



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΠΤΟΜΕΡΩΝ ΛΑΤΟΜΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ
ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥΣ**

ΑΣΠΡΟΥΔΗ Θ. ΣΟΦΙΑ

Εξεταστική Επιτροπή :

**Γαλετάκης Μιχαήλ, Επίκουρος Καθηγητής (Επιβλέπων)
Περδικάτσης Βασίλειος, Καθηγητής
Αλεβίζος Γεώργιος, Λέκτορας**

Χανιά, Μάρτιος 2008

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι ο προσδιορισμός των ποιοτικών χαρακτηριστικών των λεπτομερών ασβεστολιθικών υλικών που παράγονται ως λατομικά παραπροϊόντα (παιπάλη) και η ανάπτυξη ενός έμπειρου ασαφούς συστήματος που θα χρησιμοποιηθεί για να διερευνήσει τις πιθανές χρήσεις τους σε διάφορους τομείς με βάση το βαθμό εκπλήρωσης των απαιτούμενων ποιοτικών προδιαγραφών.

Η ασβεστολιθική παιπάλη που παράγεται κατά τη λατομική διεργασία ως παραπροϊόν – απόρριμμα των αδρανών υλικών δημιουργεί προβλήματα κατά την απόθεσή της. Για το λόγο αυτό η αξιοποίησή της σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς αποτελεί επιτακτικό παράγοντα για τη βιωσιμότητα του λατομείου αφού συνεισφέρει οικονομικά αλλά και στη προστασία του περιβάλλοντος.

Η διάρθρωση της παρούσας εργασίας είναι η εξής:

Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφεται το πρόβλημα της δημιουργίας της παιπάλης κατά τη διαδικασία παραγωγής θραυστών αδρανών σκυροδέματος και οδοποιίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια γενική αναφορά στον ασβεστόλιθο και στις λατομικές δραστηριότητες κατά τις οποίες δημιουργούνται τα λεπτομερή παραπροϊόντα. Αναφέρονται επίσης οι τομείς στους οποίους τα λεπτομερή υλικά μπορούν να βρουν εφαρμογή. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην προέλευση και τον χαρακτηρισμό του εξεταζόμενου υλικού καθώς και στις εργαστηριακές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα εξετασθέντα δείγματα (30) που προέρχονται από λατομικές επιχειρήσεις του νομού Ηρακλείου. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στα βασικά στοιχεία των ασαφών εμπειρών συστημάτων και δίνεται η μεθοδολογία ανάπτυξης ενός έμπειρου ασαφούς συστήματος για την αξιολόγηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των λεπτομερών παραπροϊόντων. Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η εφαρμογή του έμπειρου ασαφούς συστήματος που αναπτύχθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού Matlab[®] (Fuzzy Toolbox). Τέλος στο έκτο κεφάλαιο παραθέτονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της φοίτησής μου στο τμήμα των Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Μ. Γαλετάκη που έπαιξε καθοριστικό ρόλο με τη σημαντική συμβολή του και την αποτελεσματική καθοδήγησή του στη σωστή διεκπεραίωση της εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Β. Περδικάτση και τον Λέκτορα κ. Γ. Αλεβίζο που δέχθηκαν να αξιολογήσουν την εργασία και συνέβαλαν στην ολοκλήρωσή της με τις πολύτιμες επισημάνσεις τους.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που με στήριξε και με παρότρυνε καθ'όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Χανιά, Μάρτιος 2008

*Αφιερωμένη
στην οικογένειά μου*

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σελίδες

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	I
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	II
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	IV
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	VIII
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	XII
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	XIII

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο : ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
--	---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΛΕΠΤΟΜΕΡΩΝ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΩΝ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΩΝ	3
2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΩΝ	3
2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΞΟΡΥΞΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΔΡΑΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	3
2.3 ΤΟΜΕΙΣ ΠΟΥ ΜΠΟΡΟΥΝ ΝΑ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΟΥΝ ΤΑ ΛΕΠΤΟΜΕΡΗ ΛΑΤΟΜΙΚΑ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ	5

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο : ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ...	17
3.1 ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΗΣ ΠΑΠΑΛΗΣ	17
3.2 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΚΑΙ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΠΑΠΑΛΗΣ	20
3.2.1 ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	23
3.2.2 ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	24
3.2.3 ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	26
3.2.4 ΘΕΡΜΟΒΑΡΥΤΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	31
3.2.5 ΑΠΩΛΕΙΑ ΠΥΡΩΣΗΣ	37
3.2.6 ΟΠΤΙΚΗ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ	39

3.2.7 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	43
3.2.8 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ	46
3.2.9 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΡΗ	48
3.2.10 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΑΔΙΑΛΥΤΟΥ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΟΣ ΣΕ ΗCl	49
3.3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΛΕΠΤΟΜΕΡΩΝ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ...	51

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο: ΑΣΑΦΗ ΕΜΠΕΙΡΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ (FIS) ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ FIS ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΛΕΠΤΟΜΕΡΩΝ ΑΤΟΜΙΚΩΝ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	55
4.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΣΜΟΙ	56
4.2.1 ΛΟΓΙΚΟΙ ΤΕΛΕΣΤΕΣ	57
4.2.2 ΠΡΑΞΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΑΣΑΦΗ ΣΥΝΟΛΩΝ	58
4.2.3 ΓΛΩΣΣΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΑΝΤΕΣ	59
4.2.4 ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ	59
4.3 Ο ΑΣΑΦΗΣ ΚΑΝΟΝΑΣ	60
4.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΣΑΦΟΥΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ	61
4.5 Η ΑΣΑΦΗΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΘΗΚΗ ΤΟΥ MATLAB® (FUZZY TOOLBOX)	62
4.6 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΕΜΠΕΙΡΟΥ ΑΣΑΦΟΥΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΠΟΙΟΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΛΕΠΤΟΜΕΡΩΝ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΩΝ.....	64

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΕΜΠΕΙΡΟΥ ΑΣΑΦΟΥΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ MATLAB® (FUZZY TOOLBOX)...

5.1 ΚΑΝΟΝΕΣ ΠΟΥ ΚΑΘΟΡΙΖΟΥΝ ΤΟ ΕΜΠΕΙΡΟ ΑΣΑΦΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑ	82
5.2 ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ.....	84
5.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΕΜΠΕΙΡΟΥ ΑΣΑΦΟΥΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	90

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο:

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	96
6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	96
6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	97

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	99
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	99
ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	100

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α:

ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΠΑΙΠΑΛΗΣ ΓΙΑ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ ΜΕ LASER.....	103
ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΗΣ ΠΑΙΠΑΛΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ BLAINE	108

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β:

Ο ΚΩΔΙΚΑΣ ΤΟΥ ΕΜΠΕΙΡΟΥ ΑΣΑΦΟΥΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΤΗ ΓΛΩΣΣΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ MATLAB	111
--	------------

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

	Σελίδες
3.1 Διάγραμμα κοκκομετρικής ανάλυσης παιπάλης.....	25
3.2 Διάγραμμα κοκκομετρικής ανάλυσης παιπάλης (αθροιστικά διερχόμενο).....	25
3.3 Απεικόνιση της μεταβολής του βάρους της παιπάλης στο Δείγμα X.A.1 συναρτήσει της θερμοκρασίας.....	33
3.4 Απεικόνιση της μεταβολής του βάρους της παιπάλης στο Δείγμα 13 συναρτήσει της θερμοκρασίας.....	33
3.5 Απεικόνιση της μεταβολής του βάρους της παιπάλης στο Δείγμα A συναρτήσει της θερμοκρασίας.....	33
3.6 Απεικόνιση της μεταβολής του βάρους της παιπάλης στο Δείγμα 8 συναρτήσει της θερμοκρασίας.....	34
3.7 Απεικόνιση της μεταβολής του βάρους της παιπάλης στο Δείγμα X.A.1 κατά τη διάρκεια της καύσης.....	34
3.8 Απεικόνιση της μεταβολής του βάρους της παιπάλης στο Δείγμα 13 κατά τη διάρκεια της καύσης.....	34
3.9 Απεικόνιση της μεταβολής του βάρους της παιπάλης στο Δείγμα A κατά τη διάρκεια της καύσης.....	35
3.10 Απεικόνιση της μεταβολής του βάρους της παιπάλης στο Δείγμα 8 κατά τη διάρκεια της καύσης.....	35
3.11 Σύγκριση της μεταβολής του βάρους της παιπάλης στο	

Δείγμα X.A.1 και στο Δείγμα 13.....	36
3.12 Σύγκριση της μεταβολής του βάρους της παιπάλης στο Δείγμα A και στο Δείγμα 8.....	36
4.1 Τύποι συναρτήσεων συμμετοχής.....	59
4.2 Το έμπειρο ασαφές σύστημα με τις 12 εισόδους και τις 10 εξόδους.....	66
4.3 Διαμερισμός της εισόδου " C " (σύνολο ανθρακικών ορυκτών %) σε λεκτικούς όρους.....	67
4.4 Διαμερισμός της εισόδου " Fe " (Fe_2O_3 %) σε λεκτικούς όρους.....	68
4.5 Διαμερισμός της εισόδου " H " (αδιάλυτο υπόλειμμα σε HCl %) σε λεκτικούς όρους.....	68
4.6 Διαμερισμός της εισόδου " LOI " (απώλεια πύρωσης % στους 1050 °C) σε λεκτικούς όρους.....	69
4.7 Διαμερισμός της εισόδου " pH " σε λεκτικούς όρους.....	70
4.8 Διαμερισμός της εισόδου " P.S. " (κατανομή μεγέθους σωματιδίων (μm)) σε λεκτικούς όρους.....	70
4.9 Διαμερισμός της εισόδου " K ₄₀ " (ποσοστό (%) που παραμένει με διάμετρο κόκκου 40μm) σε λεκτικούς όρους.....	71
4.10 Διαμερισμός της εισόδου " d ₅₀ " (διάμετρος κόκκων (μm) που παραμένουν σε ποσοστό 50%) σε λεκτικούς όρους.....	72
4.11 Διαμερισμός της εισόδου " d ₉₀ " (διάμετρος κόκκων (μm) που παραμένουν σε ποσοστό 90%) σε λεκτικούς όρους.....	72
4.12 Διαμερισμός της εισόδου " d ₁₀ " (διάμετρος κόκκων (μm) που παραμένουν σε ποσοστό 10%) σε λεκτικούς όρους.....	73
4.13 Διαμερισμός της εισόδου " B " (ειδική επιφάνεια κατά Blaine (cm^2/g)) σε λεκτικούς όρους.....	74
4.14 Διαμερισμός της εισόδου " W " (λευκότητα %) σε λεκτικούς όρους.....	74
4.15 Διαμερισμός της εξόδου " I " (βιομηχανία χάρτου ως filler) σε λεκτικούς όρους.....	75

4.16 Διαμερισμός της εξόδου " 2 " (βιομηχανία χάρτου ως επικαλυπτικό) σε λεκτικούς όρους.....	76
4.17 Διαμερισμός της εξόδου " 3 " (βιομηχανία χρωμάτων και βερνικιών) σε λεκτικούς όρους.....	76
4.18 Διαμερισμός της εξόδου " 4 " (βιομηχανία πλαστικών) σε λεκτικούς όρους.....	77
4.19 Διαμερισμός της εξόδου " 5 " (χημική βιομηχανία) σε λεκτικούς όρους.....	78
4.20 Διαμερισμός της εξόδου " 6 " (βιομηχανία τροφίμων και ζωοτροφών) σε λεκτικούς όρους.....	78
4.21 Διαμερισμός της εξόδου " 7 " (βιομηχανία λιπασμάτων) σε λεκτικούς όρους.....	79
4.22 Διαμερισμός της εξόδου " 8 " (βιομηχανία παραγωγής σιδήρου) σε λεκτικούς όρους.....	80
4.23 Διαμερισμός της εξόδου " 9 " (βιομηχανία γυαλιού) σε λεκτικούς όρους.....	80
4.24 Διαμερισμός της εξόδου " 10 " (βιομηχανία σκυροδέματος) σε λεκτικούς όρους.....	81
5.1 Διάγραμμα ασαφούς συνεπαγωγής, όπως εμφανίζεται από το Fuzzy Toolbox του Matlab.....	84
5.2 Επιφάνεια απόκρισης του συνόλου των ανθρακικών και του Fe_2O_3 σε σχέση με τη βιομηχανία χάρτου (ως filler).....	85
5.3 Επιφάνεια απόκρισης του συνόλου των ανθρακικών και της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων σε σχέση με τη χημική βιομηχανία	86
5.4 Επιφάνεια απόκρισης του συνόλου των ανθρακικών και της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων σε σχέση με τη βιομηχανία τροφίμων και ζωοτροφών.....	86
5.5 Επιφάνεια απόκρισης του συνόλου των ανθρακικών και της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων σε σχέση με τη βιομηχανία λιπασμάτων.....	87
5.6 Επιφάνεια απόκρισης του συνόλου των ανθρακικών και της κατανομής	

μεγέθους των σωματιδίων σε σχέση με τη βιομηχανία παραγωγής σιδήρου.....	87
5.7 Επιφάνεια απόκρισης του συνόλου των ανθρακικών και της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων σε σχέση με τη βιομηχανία γυαλιού.....	88
5.8 Επιφάνεια απόκρισης του συνόλου των ανθρακικών και του Fe_2O_3 σε σχέση με τη βιομηχανία γυαλιού.....	88
5.9 Επιφάνεια απόκρισης του Fe_2O_3 και της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων σε σχέση με τη βιομηχανία γυαλιού.....	89
5.10 Επιφάνεια απόκρισης του συνόλου των ανθρακικών και του Fe_2O_3 σε σχέση με τη βιομηχανία σκυροδέματος.....	89
5.11 Επιφάνεια απόκρισης του συνόλου των ανθρακικών και της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων σε σχέση με τη βιομηχανία σκυροδέματος.....	90
5.12 Επιφάνεια απόκρισης του Fe_2O_3 και της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων σε σχέση με τη βιομηχανία σκυροδέματος.....	90
5.13 Η δομή του FIS συστήματος που αποτελείται από 12 εισόδους, 10 εξόδους και 18 κανόνες.....	91
6.1 Δυνατότητες χρήσης της ασβεστολιθικής παιπάλης	98

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Σελίδες

3.1	Στρωματογραφική στήλη αλπικών σχηματισμών (IGME - φύλλο Ηράκλειο κλίμακα 1:50.000).....	18
3.2	Συλλογή της παιπάλης με τη χρήση σακκόφιλτρων.....	19
3.3	Στρώμα παιπάλης στο χώρο του συγκροτήματος.....	20
3.4	Ακτινοδιάγραμμα δείγματος Α (αποτελείται από ασβεστίτη).....	27
3.5	Ακτινοδιάγραμμα δείγματος Β (αποτελείται από ασβεστίτη).....	27
3.6	Ακτινοδιάγραμμα δείγματος Χ.Α.1 (αποτελείται στο μεγαλύτερο μέρος από ασβεστίτη και σε ένα μικρότερο ποσοστό από δολομίτη).....	28
3.7	Ακτινοδιάγραμμα δείγματος Χ.Α.2 (αποτελείται από δολομίτη).....	28
3.8	Ακτινοδιάγραμμα δείγματος 8 (αποτελείται από ασβεστίτη).....	29
3.9	Ακτινοδιάγραμμα δείγματος 11 (αποτελείται από ασβεστίτη).....	29
3.10	Ακτινοδιάγραμμα δείγματος 13 (αποτελείται στο μεγαλύτερο μέρος από ασβεστίτη και σε ένα μικρότερο ποσοστό από δολομίτη).....	29
3.11	Ακτινοδιάγραμμα δείγματος 14 (αποτελείται στο μεγαλύτερο μέρος από ασβεστίτη και σε ένα μικρότερο ποσοστό από δολομίτη).....	30
3.12	Ακτινοδιάγραμμα δείγματος 19 (αποτελείται στο μεγαλύτερο μέρος από ασβεστίτη και σε ένα μικρότερο ποσοστό από δολομίτη και NaCl).....	30
3.13	Ακτινοδιάγραμμα δείγματος 24 (αποτελείται στο μεγαλύτερο μέρος από ασβεστίτη και σε ένα μικρότερο ποσοστό από δολομίτη).....	31
3.14	Εικόνα δοκιμίου μαύρης παιπάλης από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο	

σάρωσης.....	40
3.15 Άσπρη παιπάλη (-75 +56μm), πλάτος εικόνας 2,33mm.....	40
3.16 Άσπρη παιπάλη (+75μm), πλάτος εικόνας 15mm.....	41
3.17 Άσπρη παιπάλη (+75μm), πλάτος εικόνας 6mm.....	41
3.18 Καφέ παιπάλη (-75 +56μm), πλάτος εικόνας 2,11mm.....	41
3.19 Καφέ παιπάλη (+75μm), πλάτος εικόνας 6mm.....	42
3.20 Καφέ παιπάλη (+75μm), πλάτος εικόνας 15mm.....	42
3.21 Μαύρη παιπάλη (-75 +56μm), πλάτος εικόνας 1,85mm.....	42
3.22 Μαύρη παιπάλη (-75 +56μm), πλάτος εικόνας 1,85mm.....	42
3.23 Μαύρη παιπάλη (+75μm), πλάτος εικόνας 6mm.....	43
3.24 Μαύρη παιπάλη (+75μm), πλάτος εικόνας 6mm.....	43

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Σελίδες

3.1 Χημικές αναλύσεις δειγμάτων.....	23
3.2 Ποσοστό υγρασίας, άκαυστων οργανικών, κρυσταλλικού νερού, CaCO ₃ για 3 δείγματα παιπάλης.....	37
3.3 Αποτελέσματα μέτρησης της απώλειας των οργανικών υλικών.....	38
3.4 Αποτελέσματα μέτρησης της απώλειας πύρωσης.....	38
3.5 Μετρήσεις της λεπτότητας κατά Blaine.....	46
3.6 Μετρήσεις της φαινόμενης πυκνότητας.....	47
3.7 Αποτελέσματα από τη μέτρηση του pH.....	49
3.8 Αποτελέσματα από τη μέτρηση του αδιάλυτου υπολείμματος σε HCl.....	50
3.9 Χαρακτηριστικές ιδιότητες των ακατέργαστων ασβεστολιθικών υλικών.....	51
3.10 Προδιαγραφές και δείκτες για την αξιολόγηση λεπτόκοκκου ασβεστολιθικού υλικού (Kolb, 2001).....	54
4.1 Λογικοί τελεστές AND , OR , NOT (Fuzzy Toolbox της Matlab).....	57
4.2 Αντικατάσταση των λογικών τελεστών (Fuzzy Toolbox της Matlab).....	58
5.1 Τιμές εισόδων για την αξιολόγηση των 8 δειγμάτων.....	93
5.2 Τα αποτελέσματα από την αξιολόγηση των 8 δειγμάτων με χρήση του έμπειρου ασαφούς συστήματος και με τη μέθοδο αποασαφοποίησης κέντρου βάρους (centroid).....	93
5.3 Τα αποτελέσματα από την αξιολόγηση των 8 δειγμάτων με χρήση του έμπειρου ασαφούς συστήματος και με τη μέθοδο αποασαφοποίησης του μέσου όρου των μεγίστων (mom).....	94
5.4 Σύγκριση των δύο μεθόδων αποασαφοποίησης.....	94

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1°

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά την παραγωγή αδρανών υλικών δημιουργούνται μεγάλες ποσότητες υπερλεπτομερούς παραπροϊόντος που ονομάζεται παιπάλη και αποτελεί ένα από τα βασικότερα προβλήματα στη βιομηχανία αδρανών. Συγκεκριμένα η δημιουργία κονιορτού στους εργασιακούς χώρους των λατομείων αλλά και στην ευρύτερη περιοχή είναι ανεπιθύμητη. 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).

Με βάση τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος ως παιπάλη ορίζεται το μέρος του αδρανούς που περνάει από το Αμερικάνικο πρότυπο κόσκινο Νο 200 (75μm) και προσδιορίζεται σύμφωνα με τη μέθοδο ΣΚ-305. Η παιπάλη της άμμου δεν πρέπει να υπερβαίνει το 16% του ξερού βάρους της και η παιπάλη των πιο χονδρόκοκκων κλασμάτων (ρυζάκι, γαρμπίλι, σκύρα) δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1% του ξερού βάρους του. Για άοπλα σκυροδέματα χωρίς ειδικές απαιτήσεις επιτρέπεται παιπάλη στην άμμο μέχρι 20% του ξερού βάρους της.

Τα λεπτομερή αυτά απορρίμματα που παραμένουν ανεκμετάλλευτα θα μπορούσαν να αποτελέσουν πρώτη ύλη σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας όπως στη χαρτοβιομηχανία και στη βιομηχανία χρωμάτων και πλαστικών που χρησιμοποιούνται ως υλικά πληρώσεως. Επίσης βρίσκουν εφαρμογή στη γεωργία ως πληρωτικά και εδαφοβελτιωτικά υλικά σε λιπάσματα καθώς για τη προστασία του περιβάλλοντος ως φίλτρα απορρύπανσης. Στη βιομηχανία σιδήρου και χάλυβα χρησιμοποιούνται σε ρευστή μορφή στις πυρομεταλλουργικές διαδικασίες. Ακόμη στη βιομηχανία κεραμικών αποτελούν κύριο συστατικό για τη παραγωγή κεραμικών όπως και στη βιομηχανία γυαλιού που με τη χρήση τους βελτιώνουν τις μηχανικές ιδιότητες του γυαλιού μειώνοντας την ευθρυπτότητά του. Στην οδοποιΐα μπορούν να αντικαταστήσουν τα αδρανή υπόβασης. Στην παραγωγή σκυροδέματος και τσιμέντου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ακατέργαστα υλικά για παραγωγή κλίνκερ ενώ στη παραγωγή ασφαλτομίγματος χρησιμεύουν ως πληρωτικά υλικά και παίζουν καθοριστικό ρόλο στη σκλήρυνση του συνδετικού.

Ακόμη η αξιοποίηση τους είναι σημαντική γιατί μπορεί να συμβάλλει στην καλύτερη εκμετάλλευση των πετρωμάτων, των λατομικών περιοχών και αυτό συνεπάγεται την παράταση της διάρκειας ζωής του λατομείου.

Σημαντικά επιπλέον πλεονεκτήματα από τη εκμετάλλευση της παιπάλης είναι τα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη που δημιουργούνται με τη μείωση των εξόδων για απόθεση ή απόρριψη και των επιπρόσθετων εσόδων από την πώληση νέων προϊόντων που παράγονται από τη χρήση αυτών των λεπτομερών.

Παρόλο αυτά μέχρι σήμερα δεν έχουν γίνει σημαντικά βήματα στην χρήση των λεπτομερών ασβεστολιθικών προϊόντων ως πληρωτικά υλικά σε διάφορους τομείς της βιομηχανίας. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στο κόστος μεταφοράς που καθιστά απαγορευτική τη διάθεση της παιπάλης σε άλλες βιομηχανίες είτε στην επεξεργασία του υλικού που χρειάζεται έτσι ώστε να είναι σε κατάλληλη μορφή για να συμμετέχει σε ένα προϊόν και μπορεί να είναι αρκετά δαπανηρή ή δύσκολη. Για τους λόγους αυτούς θα πρέπει αρχικά να γίνεται αξιολόγηση των χαρακτηριστικών της παιπάλης έτσι ώστε οι ιδιότητες του υλικού να αποτελέσουν ένα οδηγό για τους πιθανούς τομείς χρησιμοποίησής του.

Έχοντας υπόψη τα παραπάνω, στην εργασία αυτή επιχειρείται να γίνει η αξιολόγηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των λεπτομερών λατομικών παραπροϊόντων που δημιουργούνται σε μεγάλες ποσότητες στα λατομεία αδρανών υλικών καθώς και η διερεύνηση των δυνατοτήτων χρήσης τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΛΕΠΤΟΜΕΡΩΝ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΩΝ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

2.1 Γενικά χαρακτηριστικά των ασβεστόλιθων

Ο ασβεστόλιθος είναι ευρέως γνωστός σε όλο το κόσμο, αφού χρησιμοποιείται πάνω από 5000 χρόνια. Για παράδειγμα οι Αρχαίοι Αιγύπτιοι κατασκεύασαν τις πυραμίδες από ασβεστόλιθο και ακόμη και σήμερα συνεχίζουμε να χρησιμοποιούμε εκατοντάδες χιλιάδες τόνους ανθρακικού ασβεστίου.

Οι ασβεστόλιθοι είναι ανθρακικά ιζηματογενή πετρώματα χημικής ή βιογενούς ή μεικτής προέλευσης τα οποία αποτελούνται κατά κύριο λόγο από το ανθρακικό ορυκτό ασβεστίτης (CaCO_3). Εκτός από τον ασβεστίτη μπορεί να περιέχουν σε μικρές ποσότητες δολομίτη, χαλαζία, χλωρίτη, οπάλιο, αργιλικά ορυκτά, αστρίους, μαρμαρυγίες, λειμωνίτη, αιματίτη, σιδηρίτη και άλλα ορυκτά καθώς επίσης οργανικές ουσίες. Στις οργανικές ουσίες οφείλεται συνήθως το τεφρό, στο λειμωνίτη και το σιδηρίτη το ανοικτοκίτρινο έως καστανό, στο χλωρίτη το τεφροπράσινο και στον αιματίτη το ροδόχρουν έως κεραμέρυθρο χρώμα των ασβεστόλιθων. Οι καθαροί ασβεστόλιθοι έχουν χρώμα λευκό. Οι ασβεστόλιθοι έχουν ειδικό βάρος $2,72\text{gr/cm}^3$ και σκληρότητα κατά Mohs 3. Η αντοχή τους σε θλίψη κυμαίνεται από $200\text{-}2000\text{kg/m}^2$ ως αποτέλεσμα των ποικίλων γεωλογικών διεργασιών που έχουν επιδράσει κατά τη διάρκεια και μετά από τη δημιουργία τους.

Παρόλο που τα αποθέματα ασβεστόλιθου είναι άφθονα, μόνο μερικά είναι επαρκώς υψηλής ποιότητας για εκμετάλλευση και ακόμη λιγότερα κοιτάσματα μπορούν να παρέχουν ακατέργαστα υλικά για βιομηχανικές και γεωργικές χρήσεις παρά για τον κατασκευαστικό τομέα και την οδοποιία. Μόνο αν η καθαρότητα, ο βαθμός λευκότητας, το πάχος και η ομοιογένεια είναι επιτρεπτές τότε συμφέρει οικονομικά η εκμετάλλευση του.

2.2 Μέθοδοι εξόρυξης και επεξεργασίας αδρανών υλικών

Η μέθοδος εκμετάλλευσης που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ασβεστόλιθου είναι κυρίως η επιφανειακή και σε μεμονωμένες περιπτώσεις η υπόγεια. Αυτό οφείλεται στο

ότι η επιφανειακή εκμετάλλευση πλεονεκτεί της υπόγειας όσον αφορά στον έλεγχο ποιότητας, στην ασφάλεια, στην υψηλότερη παραγωγή και στο ότι είναι πιο οικονομική. Η εξόρυξη του αβεστόλιθου γίνεται συνήθως με ασυνεχείς μεθόδους όπου η θραύση του πετρώματος επιτυγχάνεται με εφαρμογή διακριτών κύκλων εργασίας όπως είναι η όρυξη, γόμωση και ανατίναξη των διατρημάτων και η αποκομιδή του προϊόντος που γίνεται με την χρήση εκσκαφών - φορτωτών - χωματουργικών οχημάτων.

Ο τρόπος με τον οποίο θα τοποθετούν τα διατρήματα παίζει καθοριστικό ρόλο στο μέγεθος και την ομοιομορφία των τεμαχίων του πετρώματος που θα προκύψουν από την ανατίναξη. Το μέγεθος των τεμαχίων θα πρέπει να είναι κατάλληλο για την ομαλή λειτουργία του σπαστήρα. Αν υπάρχουν μεγάλα τεμάχια πετρώματος τότε θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν σφύρες για να μειώσουν το μέγεθος πριν την φόρτωση και μεταφορά του υλικού προς την μονάδα θραύσης.

Στην μονάδα θραύσης γίνεται ένας πρώτος διαχωρισμός των λεπτότερων τεμαχίων από τα μεγαλύτερα με τη χρήση εσχάρας. Επίσης στο στάδιο αυτό αποβάλλονται πρωτογενή λεπτομερή, τα οποία περιέχουν αργιλικά υλικά από τα υπερκείμενα του αβεστόλιθου, ενώ τα υπόλοιπα τεμάχια τροφοδοτούνται στους σπαστήρες για περαιτέρω μείωση του μεγέθους τους.

Στην πρωτογενή θραύση όπου το μέγεθος των τεμαχίων του αβεστόλιθου μειώνεται σε μέγεθος <10cm χρησιμοποιείται συνήθως σιαγωνωτός ή κρουστικός τύπος σπαστήρα. Έτσι η θραύση του υλικού επιτυγχάνεται είτε με την σύνθλιψη των τεμαχίων όταν βρεθούν ανάμεσα σε δυο επιφάνειες που ενεργούν σαν ένα είδος σιαγόνων και προκύπτουν επιμήκη σωματίδια, είτε με την απότομη πρόσκρουση των τεμαχίων σε ταχέως κινούμενη επιφάνεια με αποτέλεσμα τον κατακερματισμό τους σε σωματίδια ομοιόμορφου μεγέθους και σχήματος. Όμως με τη μέθοδο αυτή παράγεται και μεγάλη ποσότητα λεπτομερών.

Στην δευτερογενή θραύση το υλικό περνάει από άλλους σπαστήρες που μειώνουν το μέγεθος στα επιθυμητά κλάσματα χαλικιών και άμμου τα οποία προορίζονται για την παρασκευή σκυροδέματος. Σε αυτό το στάδιο, και κυρίως στα αμμοτριβεία, παρατηρείται η μεγαλύτερη παραγωγή παιπάλης.

Στη συνέχεια τα προϊόντα του θραυστήρα διέρχονται από δονούμενα συνήθως κόσκινα όπου διαχωρίζονται ανάλογα με το μέγεθός τους. Το ξέπλυμα των υλικών αυτών με νερό

είναι πολύ σημαντικό γιατί με τον τρόπο αυτό απομακρύνονται τα λεπτομερή που είναι ανεπιθύμητα. Τέλος ακολουθεί η ταξινόμηση των αδρανών σε σωρούς ανάλογα με το μέγεθός τους και η κατηγοριοποίησή τους με βάση τη τελική τους χρήση σε υλικά βάσεων/υποβάσεων, σκύρα, χαλίκια και άμμο.

2.3 Τομείς που μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα λεπτομερή λατομικά παραπροϊόντα

Οι χρήσεις των ασβεστόλιθων καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα έτσι ώστε σήμερα να συγκαταλέγονται μαζί με τους γαιάνθρακες, το πετρέλαιο και τα μεταλλικά ορυκτά στις σημαντικότερες πρώτες ύλες. Οι πιο γνωστές εφαρμογές των λεπτομερών ασβεστολιθικών υλικών είναι:

-Παραγωγή σκυροδέματος και τσιμέντου. Ο ασβεστόλιθος χρησιμοποιείται στο τσιμέντο και στο σκυρόδεμα είτε ως ακατέργαστο υλικό για την παραγωγή κλίνκερ, είτε ως χονδρόκοκκο ή λεπτομερές υλικό. Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί μια αύξηση στον ερευνητικό τομέα που αναφέρεται στους τρόπους χαρακτηρισμού, ελέγχου και εκτίμησης των ιδιοτήτων των αδρανών έτσι ώστε να είναι δυνατή η πρόβλεψη των ιδιοτήτων του σκυροδέματος που παρασκευάζεται με συμμετοχή των λεπτομερών αδρανών. Πολλές από τις έρευνες αυτές αφορούν τα λεπτομερή αδρανών υλικών με μέγεθος κόκκων μικρότερο από 75μm.

Προσπάθειες για την ταξινόμηση της χρήσης των λεπτομερών αδρανών στο σκυρόδεμα έχουν αναπτυχθεί και στο συνέδριο ICAR (International Center for Aggregates Research). Στόχος αυτού του προγράμματος ήταν να εξετάσει τις μεθόδους και τις δοκιμές που χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν για να χαρακτηρίσουν τις ιδιότητες των λεπτομερών και να αναπτύξουν, σε πρώτο στάδιο, ένα πλαίσιο για το χαρακτηρισμό και τη κατηγοριοποίηση των ιδιοτήτων των λεπτομερών αδρανών. Επιπλέον, νέες μέθοδοι και δοκιμές προτάθηκαν που μπορούν να αποτελέσουν έναν οδηγό για τη χρήση των λεπτομερών αδρανών σε σκυροδέματα με τσιμέντο Portland. Ως πιθανές μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας θεωρούνται εφαρμογές όπως το υψηλής απόδοσης σκυρόδεμα και προϊόντα σκυροδέματος χαμηλής αντοχής αλλά με θερμομονωτικές ιδιότητες.

Για την χρησιμοποίηση όμως των λεπτομερών αδρανών στην παραγωγή σκυροδέματος θα πρέπει να θεσπιστούν νέες προδιαγραφές γιατί οι ήδη ισχύουσες αναφέρουν μόνο τη χρήση της φυσικής άμμου στο σκυρόδεμα. Ιστορικά, προτιμάται η φυσική άμμος λόγω

των στρογγυλεμένων σωματιδίων που δίνουν καλύτερη εργασιμότητα, όμως τα λεπτομερή που εμφανίζονται είναι συνήθως αργιλικά ορυκτά που μειώνουν την αντοχή του σκυροδέματος καθώς περιορίζουν το δεσμό μεταξύ αδρανών και τσιμεντοκονίας (Dukatz, 1995). Για τον λόγο αυτό, προέκυψε ο περιορισμός για το ποσοστό των λεπτομερών υλικών που συμμετέχουν στο σκυρόδεμα. Εναλλακτικά με την χρήση θραυστής άμμου, τα λεπτομερή δεν είναι κατά βάση αργιλικά.

Η προσέγγιση του θέματος των λεπτομερών από μια επιτροπή ερευνητών που συστήθηκε από την Georgia Crushed Stone Association στην πολιτεία της Τζόρτζια μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μελέτη αναφοράς αφού το 1997 επιτράπηκε η χρησιμοποίηση υψηλότερου ποσοστού λεπτομερών από θραυστά πετρώματα στην παραγωγή σκυροδέματος με τσιμέντο Portland (Watson, 1999). Αυτό οφείλεται στο ότι οι βόρειες περιοχές της Τζόρτζια δεν έχουν αποθέματα φυσικής άμμου και το μειωμένο κόστος μεταφοράς καθιστά την θραυστή άμμο ανταγωνιστική επιτρέποντας αυξημένο ποσοστό λεπτομερών για την επίτευξη της εργασιμότητας. Ωστόσο, οι προδιαγραφές της διαβάθμισης είναι ακόμη μη ικανοποιητικές ως δείκτης πρόβλεψης της ποιότητας του σκυροδέματος.

Πριν το 1997, τα λατομεία που πιστοποιήθηκαν από το αμερικάνικο Υπουργείο Μεταφορών έπρεπε να διατηρούν τη διαβάθμιση σε τιμές 0-7% διερχόμενο από το κόσκινο No100 (150 μm) και 0-2% διερχόμενο από το κόσκινο No200 (75 μm). Οι χρήστες έπρεπε να προσθέτουν λεπτομερή προκειμένου να βελτιώσουν την εργασιμότητα και την υφή της τελικής επιφάνειας. Αυτές οι συνήθειες προδιαγραφές για πολύ χαμηλό ποσοστό λεπτομερών κάτω από No200 (75 μm) στα αδρανή για μίγματα ασφαλικά και σκυροδέματα και οι αυξημένες απαιτήσεις για θραυστή άμμο σκυροδέματος, έχουν συντελέσει στην αύξηση του ρυθμού παραγωγής των απόβλητων λεπτομερών (Smith and Slaughter, 1996).

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

- Η αντοχή σε θλίψη μειώνεται ελαφρώς καθώς η συγκέντρωση των λεπτομερών αυξάνεται στο κλάσμα κάτω από 75 μm .

- Με την αύξηση των λεπτομερών με κλάσμα κάτω από 75μm μπορεί να αυξηθεί ελαφρώς και η συρρίκνωση ξήρανσης.

Το σκυρόδεμα που παρασκευάζεται από υπερλεπτομερή υλικά σε σύγκριση με το σκυρόδεμα από φυσική άμμο έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

- υψηλότερη αντοχή σε κάμψη,
- βελτιωμένη αντίσταση τριβής,
- υψηλότερη πυκνότητα και χαμηλότερη υδατοπερατότητα (πολύ σημαντικό για τη μείωση της διάβρωσης).

Ο Crouch et al. (2003) μελέτησαν την επίδραση των αδρανών λεπτομερών σε ελεγχόμενης χαμηλής αντοχής και καλής ροής πληρωτικά υλικά (Controlled Low-Strength Material CLSM). Δημιουργήθηκε έτσι ένα υλικό με υψηλή ρευστότητα, γρήγορη εφαρμογή, χωρίς να τρίβεται, με ελεγχόμενη χαμηλή αντοχή για εφαρμογές όπου ο παράγοντας του χρόνου είναι κρίσιμος. Ιδιότητες των λεπτομερών αδρανών, όπως η διαβάθμιση και η γωνιότητα, υποδεικνύουν τις αναλογίες που θα χρησιμοποιηθούν στο μίγμα ώστε να επιτευχθεί η απαραίτητη ροή και το απαιτούμενο ποσοστό περιεχόμενου αέρα, κι έτσι, έμμεσα, να επηρεαστεί ο χρόνος εφαρμογής και η αναπτυσσόμενη θλιπτική αντοχή. Τα πληρωτικά αυτά υλικά καλής ροής που περιέχουν ασβεστολιθικά λεπτομερή μπορεί να είναι οικονομικά ελκυστικά όταν άλλα αδρανή είναι ακριβά - όπως στην περίπτωση όπου η άμμος ποταμών είναι ακριβή ή δύσκολη στη λήψη.

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

Ο Schimdt (1992) πρότεινε ότι η ευεργετική επίδραση της προσθήκης ασβεστόλιθων στη συγκεκριμένη ρεολογία μπορεί να αφορά τη βελτίωση στη κατανομή μεγέθους των κόκκων. Οι λεπτόκοκοι κόκκοι μετατοπίζουν ένα ποσό νερού από τα κενά μεταξύ των πιο χονδροειδών κόκκων, και το καθιστούν διαθέσιμο ως πρόσθετο εσωτερικό λιπαντικό. Κατά συνέπεια, το σκυρόδεμα είναι λιγότερο δύσκαμπτο και η διατήρηση του νερού βελτιώνεται. Με άλλα λόγια, λιγότερο νερό απαιτείται για να γίνει ένα

εφαρμόσιμο μίγμα, και η μειωμένη περιεκτικότητα σε νερό μπορεί να αυξήσει την αντοχή.

Ακόμη οι Cochet και Sorrentino (1993) παρατήρησαν ότι μερικοί από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη ρεολογική συμπεριφορά του πληρωμένου με ασβεστόλιθο τσιμέντου, περιλαμβάνουν την ποιότητα και την λεπτότητα του υλικού πληρώσεως. Αν η ποιότητα του ασβεστόλιθου είναι υψηλή τότε η ρεολογία του σκυροδέματος παραμένει ανεπηρέαστη.

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

- Η κάθιση και ο περιεχόμενος αέρας του νωπού σκυροδέματος μειώθηκε καθώς το ποσοστό της παιπάλης αυξήθηκε.
- Βελτιώθηκε η αντοχή σε θλίψη και σε κάμψη του σκυροδέματος καθώς και η συρρίκνωση κατά την ξήρανση με αύξηση της παιπάλης μέχρι 10%. Αύξηση πάνω από 10% συσχετίστηκε με βαθμιαία ελάττωση των αντοχών και της συρρίκνωσης.
- Βελτιώθηκε η αντίσταση κρούσης στο σκυρόδεμα, όταν χρησιμοποιήθηκε μέχρι 5% παιπάλη. Μεγαλύτερο ποσοστό οδήγησε σε σημαντική ελάττωση της ιδιότητας αυτής.
- Η ελάχιστη τιμή απορρόφησης παρατηρήθηκε όταν το περιεχόμενο παιπάλης ανήλθε στο 15%, ενώ μεγαλύτερο ποσοστό αύξησε την απορρόφηση του σκυροδέματος.
- Η υδατοπερατότητα του σκυροδέματος μειώθηκε με την αύξηση του ποσοστού παιπάλης.

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

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

Στοιχεία για έρευνα σε εμπορικό επίπεδο και ανάπτυξη της χρήσης των λεπτομερών στο σκυρόδεμα και σε προϊόντα σχετικά με το σκυρόδεμα δεν είναι ευρέως διαθέσιμα, πιθανόν λόγω της οικονομικής ευαισθησίας του θέματος.

-Παραγωγή ασφαλτομίγματος. Το ασβεστολιθικό πληρωτικό υλικό που χρησιμοποιείται σε θερμά ασφαλτικά μίγματα είναι γνωστό ότι παίζει σημαντικό ρόλο στην σκλήρυνση του συνδετικού.

Μια ενδιαφέρουσα μελέτη που αναφέρεται σε δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στη χρήση των λεπτομερών στην άσφαλτο (Collins, 1999), έδειξε ότι υψηλής συχνότητας κοσκίνιση των αδρανών και νέες στρατηγικές ανάμειξης μπορούν να μετατρέψουν τα επιπλέον ή απόβλητα λεπτομερή σε υλικό υψηλής απόδοσης και μεγάλης ζήτησης.

Επομένως αποτελεσματικές δοκιμαστικές μέθοδοι θα πρέπει να αναπτυχθούν ώστε να προκύψουν καλύτερες και καταλληλότερες προδιαγραφές και πρότυπα. Έκθεση του ICAR (ICAR, 201-1) περιγράφει την έρευνα για τις ιδιότητες και την απόδοση των ασφαλτικών μιγμάτων σε αντιστοιχία με τις υπάρχουσες προδιαγραφές για τη γωνιότητα

των λεπτομερών αδρανών, που περιλαμβάνουν αρκετούς περιορισμούς. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι περιορισμοί στις προδιαγραφές δεν είναι απαραίτητοι για τον έλεγχο της διαβάθμισης.

-Οδοποιία. Τα λατομικά λεπτομερή μπορούν να υποκαταστήσουν τα αδρανή υπόβασης για δρόμους, σιδηροδρομικές γραμμές, κλπ. σύμφωνα με τη μελέτη του Touahamia et al. (2002). Σε ξεχωριστές λοιπόν δοκιμές ξηρά λατομικά απόβλητα, που είχαν πολύ μικρότερη κατανομή μεγέθους σωματιδίων από άλλα υλικά (<5mm σε αντίθεση με τα <13mm) συμπυκνώθηκαν σε στρώματα διαχωρισμένα με γεωφύλακα. Οι αντοχές τους συγκρίθηκαν με θραυσμένο βασάλτη αντιπροσωπεύοντας ένα "παραδοσιακό αδρανές". Το συμπέρασμα που προέκυψε ήταν ότι η παρουσία γεωσυνθετικής ενίσχυσης αυξάνει κατά πολύ τη διατμητική αντοχή (έως 50%) και την πλευρική παραμόρφωση.

Μια παρόμοια μελέτη (Parker, 1996) ερευνά τα πλεονεκτήματα των λεπτομερών που προκύπτουν από τα θραυστά πετρώματα για σταθεροποίηση πρανών. Αφού μελετήθηκαν τα λεπτομερή ως προς την αντοχή, τη διαπερατότητα και τις χημικές τους ιδιότητες, κατασκευάστηκε ένα γεωφύλακα ύψους 4m με ίνες για τη σταθεροποίηση τοίχου. Έχοντας υπόψη τις παραπάνω ιδιότητες βρέθηκε ότι στα λεπτομερή που προέρχονται από θραυστό πέτρωμα απαιτείται λιγότερη ενίσχυση με ίνες σε σχέση με τη φυσική άμμο, με αποτέλεσμα να μειώνεται το κόστος.

Άλλη μια μελέτη που αφορά την κατασκευή ενός δοκιμαστικού δρόμου από λατομικά απόβλητα (Rezende and Carvalho, 2003) απέδειξε ότι τα λατομικά απόβλητα μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιτυχώς ως υλικά βάσης. Ωστόσο επισημαίνεται ότι η αντοχή και η ανθεκτικότητα της επιφάνειας καταστρέφονται από το νερό. Ο πειραματικός αυτός δρόμος, είχε μήκος 80m και πλάτος 10m, κατασκευάστηκε και δοκιμάστηκε για περίοδο 3 ετών με χρήση όχι πολύ συχνή. Λατομικά απόβλητα με μέγεθος κόκκων $\leq 100\text{mm}$ χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή ενός στρώματος βάσης πάχους 20cm, το οποίο καλύφθηκε από μια επιφάνεια πάχους 3cm.

Επίσης ένα άρθρο που παρουσιάστηκε στο συνέδριο ICAR του 1996 (Graves and Little, 1996) περιγράφει τον τρόπο που τα ασβεστολιθικά αδρανή υπόβασης μπορούν να ενισχυθούν με την προσθήκη ανθρακικών λεπτομερών. Τα λεπτομερή λοιπόν ανέπτυξαν επιπλέον αντοχή, μέσω μιας διαδικασίας τσιμεντοποίησης, που μπορεί να επανληφθεί με την προσθήκη υδροξειδίου του ασβεστίου στο μίγμα. Το κατά πόσο θα αυξηθεί η αντοχή

εξαρτάται από την ορυκτολογία του ασβεστόλιθου και των λεπτομερών που χρησιμοποιούνται.

-Γεωργία. Μια πιθανή εφαρμογή είναι η δημιουργία υλικών με κύριο συστατικό τους την παιπάλη για την αποκατάσταση εδαφών, ιδιαίτερα για λατομεία σε περιοχές με περιορισμούς λόγω μορφολογίας ή που απέχουν σημαντική απόσταση από βιομηχανικούς καταναλωτές. Εφόσον ο ασβεστόλιθος έχει τη δυνατότητα να ελέγχει την οξύτητα του εδάφους μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πληρωτικό και εδαφοβελτιωτικό υλικό σε λιπάσματα.

-Τομείς που απαιτούν αυστηρές προδιαγραφές όπως είναι η φαρμακοβιομηχανία για τη παρασκευή φαρμακευτικών σκευασμάτων, καλλυντικών καθώς και στην οδοντιατρική για τη παραγωγή προϊόντων οδοντιατρικής φροντίδας. Σε αυτές τις περιπτώσεις προτιμούνται τα λεπτομερή των λατομείων γιατί είναι καλύτερης ποιότητας (ως προς τη σταθερότητα στη σύσταση, τις φυσικές ιδιότητες και τη διαθεσιμότητα) από τα ανακυκλωμένα απόβλητα.

-Αποκατάσταση χώρων λατομείου. Αποτελεί ίσως την περισσότερο οικονομικά βιώσιμη λύση για τη χρήση αποβλήτων από υπερλεπτομερή (Harrison, 2003). Μια μελέτη που αναφέρεται στις ιδιαίτερες γεωτεχνικές ιδιότητες των λεπτομερών όταν χρησιμοποιούνται ως υλικά για επιχώσεις σε λατομεία δολομίτη, διεξήχθη από τους Fraser και McBride (2002). Συγκεκριμένα μετά από διαβροχή των λεπτομερών χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή επικλινούς αναχώματος στη βάση της κάθετης περιμέτρου των τοίχων του λατομείου. Παρατηρήθηκε λοιπόν ότι αύξηση της πυκνότητας επί ξηρού κατά 0.1 g/cm^3 πάνω από τη μέση πυκνότητα που μετρήθηκε επί τόπου, δεν βελτιώνει τους συντελεστές ασφάλειας για την ευστάθεια των πρανών, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί αυξημένη μηχανική συμπίκνωση των λεπτομερών κατά τη διάρκεια της κατασκευής του αναχώματος.

Επίσης είναι γνωστή η ανάγκη για αποκατάσταση πρώην ενεργών και πλέον εγκαταλελειμμένων ανθρακωρυχείων σε διάφορες τοποθεσίες. Πολύ λεπτομερές ασβεστολιθικό υλικό είναι ιδανικό υλικό να φέρει εις πέρας αυτούς τους στόχους αφού τα εδάφη είναι υψηλής οξύτητας και χρειάζεται ο ασβεστόλιθος για να ουδετεροποιήσει τα όξινα συστατικά με σκοπό την εγκατάσταση και ανάπτυξη φυτών που θα καλύψουν την περιοχή.

Η αντίδραση εξουδετέρωσης μπορεί να ληφθεί πιο εύκολα και μπορεί να είναι πιο αποτελεσματική λόγω του μικρού μεγέθους των κόκκων γιατί αυτό αυξάνει την περιοχή της επιφάνειας. Η ουδετεροποίηση του ασβεστόλιθου είναι μια επιφανειακή αντίδραση και το συνολικό αποτέλεσμά της σχετίζεται άμεσα με την περιοχή της επιφάνειας. Η εξουδετέρωση των οξέων στην εξόρυξη του άνθρακα είναι κυρίως το θεικό οξύ που αντιδρά με ασβεστόλιθο και σχηματίζεται θεικό ασβέστιο το οποίο είναι αδιάλυτη ένωση στο νερό.

Τα ευεργετικά αποτελέσματα στο έδαφος και στις θέσεις των εξορυγμένων αποβλήτων είναι ότι τώρα το έδαφος είναι εμπλουτισμένο με ασβέστιο, μαγνήσιο και γύψο (απαραίτητα θρεπτικά συστατικά για τα φυτά). Το pH του εδάφους προσαρμόζεται σε μια ουδέτερη περιοχή που τα φυτά μπορούν να μεγαλώσουν και προστατεύονται από τοξικά βαρέα μέταλλα ενώ η δομή του εδάφους βελτιώνεται σε ένα εύθρυπτο υλικό που επιτρέπει την απορρόφηση του νερού, βοηθώντας έτσι στην ανάπτυξη των φυτών και στην εμπόδιση της διάβρωσης λόγω υψηλών βροχοπτώσεων.

-Διαμόρφωση κήπων με τη χρήση χαλαρών λεπτόκοκκων λατομικών υλικών. Τα λατομικά αδρανή μπορούν ακόμη να χρησιμοποιηθούν ως επίστρωμα ή υλικό βάσης σε δρόμους, μονοπάτια κήπων και αυλές αντικαθιστώντας την άμμο.

-Παρασκευή πλακών δαπεδόστρωσης και τεχνητών λίθων. Οι πλάκες δαπεδόστρωσης είναι ένα προϊόν που παραδοσιακά παρασκευάζεται από λεπτομερή λατομικά απόβλητα και μπορούν να εμπορευθούν ως «περιβαλλοντικά ασφαλή».

-Βιομηχανία κεραμικών. Τα λεπτομερή παραπροϊόντα χρησιμοποιούνται για την παραγωγή κεραμικών που βρίσκουν εφαρμογή στην κατασκευή πεζοδρομίων, ως αδρανή και ως θερμομονωτικά υλικά. Ακόμη μια μέθοδος που αναπτύχθηκε από τον Marabini et al (1998) για την παραγωγή κεραμικών καθώς και μονωτικών υλικών όπως υαλοβάμβακα και πετροβάμβακα (glass- and rock-wool fibre) από έναν συνδυασμό βιομηχανικών, μεταλλευτικών και λατομικών αποβλήτων, έδειξε ότι μπορούν να δημιουργηθούν νέα υλικά τα οποία είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν ή να αποτεθούν χωρίς να υπάρχει κίνδυνος για το περιβάλλον από βαρέα μέταλλα που υπάρχουν σε κάποιες πρώτες ύλες (αδρανοποίηση βαρέων τοξικών μετάλλων). Για παράδειγμα ο

πετροβάμβακας προτείνεται για την αντικατάσταση του αμιάντου και σε όλα τα προϊόντα τα ενισχυμένα με ίνες.

-Βιομηχανία γυαλιού. Η βιομηχανία αυτή περιέχει την παραγωγή υαλοβάμβακα, μπουκαλιών και χρησιμοποιεί ασβεστόλιθο μαζί με πυρίτιο και αστρίους για να δημιουργηθούν τα παραπάνω προϊόντα. Ο ασβεστόλιθος βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες του γυαλιού αφού μειώνει την ευθρυπτότητά του. Ακόμη αποδίδει στο γυαλί περισσότερη αδιαλυτότητα έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς περιορισμούς όταν έρθει σε επαφή με νερό και χημικά διαλύματα.

-Βιομηχανία χρωμάτων. Ως υλικό επίστρωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο ασβεστόλιθος και έχει καθιερωθεί ως το κύριο διαλυτικό χρώματος. Η λεπτότητα και η κατανομή του μεγέθους του κόκκου μπορεί να συμβάλλει στην αδιαφάνεια των επιστρωμάτων. Επίσης μπορεί να προσφέρει βελτιώσεις στην καιρική αντίσταση, στις αντιδιαβρωτικές και ρεολογικές ιδιότητες, συνδεδεμένο με τη χαμηλή τραχύτητα και τη χαμηλή περιεκτικότητα σε ηλεκτρολύτες.

-Προστασία του περιβάλλοντος. Ο ασβεστόλιθος χρησιμοποιείται ως φίλτρο απορρύπανσης. Συγκεκριμένα στις περισσότερες βιομηχανικές διαδικασίες παράγονται όξινα απόβλητα αποχέτευσης. Για τον λόγο αυτό απαιτείται από τις βιομηχανίες να «προεπεξεργάζονται» τα απόβλητά τους πριν την έκθεσή τους ή την απελευθέρωσή τους σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας υγρών λυμάτων οι οποίες με τη σειρά τους διοχετεύονται στον υδροφόρο ορίζοντα (ποτάμια, χείμαρροι).

Η ασβεστολιθική εξουδετέρωση όμως αφήνει τα ληφθέντα νερά "υγιή" καθώς τα άλατα ασβεστίου των περισσότερων συστατικών είναι αδιάλυτα στο νερό και η μικρή ποσότητα του ασβεστίου που απελευθερώνεται στους ποταμούς είναι απαραίτητη και ευεργετική για την άγρια ζωή, τη γεωργία και τα αποθέματα πόσιμου νερού. Οι βιομηχανίες που αναφέρθηκαν παραπάνω μπορεί να είναι βιομηχανίες: επιμετάλλωσης μετάλλων, παραγωγής μετάλλων, λιπασμάτων, επεξεργασίας τροφίμων καθώς και οι χαρτοβιομηχανίες, η χημική βιομηχανία κ.ά.

Μια επιπλέον εφαρμογή του ασβεστόλιθου είναι σε σωλήνες αποθείωσης αερίων (FGD). Οι εγκαταστάσεις υπηρεσιών κοινής ωφέλειας που καίνε λιγνίτη και πετρέλαιο για να παράγουν ατμό και ηλεκτρικό ρεύμα, θα πρέπει να ελέγχουν τα αέρια των καμινάδων τους που μπορεί να είναι καυσαέρια βαρέων μετάλλων και οξέων. Πολλές εταιρείες

καταναλώνουν κάθε χρόνο πολλά εκατομμύρια τόνους ασβεστόλιθου για τον καθαρισμό των καυσαερίων που παράγουν. Ο κύριος σκοπός τους είναι να διατηρηθεί καθαρός ο αέρας και να εμποδιστεί η δημιουργία όξινης βροχής. Ο ασβεστόλιθος αντιδρά με αυτά τα όξινα αέρια και σχηματίζονται ενώσεις του ασβεστίου που αιχμαλωτίζονται στα φίλτρα συγκράτησης (σακόφιλτρα ή ηλεκτρόφιλτρα). Οι υγρές διαδικασίες αραίωσης χρησιμοποιούν λεπτομερές ασβεστολιθικό υλικό και το τελικό προϊόν είναι λασπώδης γύψος.

Επίσης σήμερα απαιτείται ο έλεγχος των όξινων αερίων που παράγονται από λέβητες και καυστήρες που έχουν μέγεθος μεγαλύτερο από 75MW. Κάποιες από αυτές θα αναγκαστούν να αντικαταστήσουν τα καύσιμα που χρησιμοποιούν (πετρέλαιο , λιγνίτη) με φυσικό αέριο, ενώ οι υπόλοιπες θα πρέπει να καθαρίσουν με τη χρήση ασβεστόλιθου δημιουργώντας έτσι μια πιθανή νέα αγορά.

Τέλος είναι γνωστό ότι τα επικίνδυνα απόβλητα θα πρέπει να απορρίπτονται σε στεγανές χωματερές για την προστασία των υπόγειων νερών από τη μόλυνση. Οι χωματερές αυτές εκτός από τις στεγανοποιητικές στρώσεις πλαστικών και αργιλικών υλικών διαθέτουν και ένα υπόστρωμα λεπτομερούς ασβεστολιθικού υλικού. Αυτό συμπεριφέρεται σαν ένα στρώμα εξουδετέρωσης για να κατακρατεί τοξικά μέταλλα που διαρρέουν από τις προηγούμενες στρώσεις.

-Βιομηχανία σιδήρου και χάλυβα. Χρησιμοποιούνται τα ασβεστολιθικά λεπτομερή σε ρευστή μορφή στις πυρομεταλλουργικές διαδικασίες. Συγκεκριμένα στη βιομηχανία χάλυβα ο ασβεστόλιθος έχει την ικανότητα να απομακρύνει ακαθαρσίες από το τήγμα. Πολλά λεπτομερή του σιδήρου παράγονται κατά τη παρασκευή χάλυβα και είναι πρόβλημα για τους παραγωγούς γιατί από τη μια μεριά αποτελούν περιβαλλοντικό ζήτημα, ενώ από την άλλη χάνεται πρώτη ύλη. Ένας τρόπος να χρησιμοποιηθούν αυτά τα λεπτομερή είναι να σχηματίσουν σφαιρίδια μαζί με ασβεστόλιθο τα οποία είναι εύκολα στη φόρτωση. Μεγάλες ποσότητες και υψηλής αξίας ασβεστόλιθος χρησιμοποιείται σε αυτή τη βιομηχανία.

-Χαρτοβιομηχανία. Τα τελευταία χρόνια η χρήση του ασβεστόλιθου έχει αυξηθεί σημαντικά καθώς η τεχνολογία στη χαρτοβιομηχανία έχει μετακινηθεί από την όξινη στην ουδέτερη ταξινόμηση. Σήμερα, ο ασβεστόλιθος είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό πληρώσεως στην παραγωγή χαρτιού. Επιπλέον χρησιμοποιείται

ως χρωστική ουσία επιστρώματος και βοηθά στη παραγωγή χαρτιών με υψηλή λευκότητα, στιλπνότητα και καλές εκτυπωτικές ιδιότητες.

-Βιομηχανία πλαστικών. Τα πλαστικά και οι πλαστικοί σωλήνες περιέχουν περίπου 80% λεπτομερές ασβεστολιθικό υλικό πληρώσεως. Μια εξαιρετικά μεγάλη ποσότητα του υλικού αυτού διατίθεται απλά ως ένα αδρανές πρόσμικτο στη βιομηχανία χρωμάτων. Αποτελεί ακόμη το πιο σημαντικό συστατικό για τη σύνθεση με πολυμερή όπως είναι πλαστικοποιημένο και άκαμπτο PVC, ακόρεστοι πολυεστέρες, πολυπροπυλένιο και πολυαιθυλένιο. Το ανθρακικό ασβέστιο δεν είναι μόνο ένα υλικό πληρώσεως που προστίθεται για να μειώσει τις δαπάνες που αφορούν το πετρέλαιο, αλλά πολλές ιδιότητες των πλαστικών μπορούν να επηρεαστούν από τη χρήση του ανθρακικού ασβεστίου.

-Άλλες χρήσεις λεπτομερών υλικών. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η χρήση των λατομικών λεπτομερών για την παραγωγή ελαφροβαρών αδρανών, που εναλλακτικά παράγονται από σχετικά σπάνιες πρώτες ύλες όπως η κίσηρη. Τα ενδεχόμενα προβλήματα που μπορεί να εμφανιστούν είναι η επίδραση της κατανομής του μεγέθους των κόκκων και η υπερβολική λεπτότητα των σωματιδίων. Αυτά είναι δυνατόν να αντιμετωπιστούν αν τα λεπτομερή ενωθούν με κάποιο συνδετικό ώστε να σχηματίσουν τεχνητά σωματίδια μεγαλύτερου μεγέθους και πιο ομοιόμορφα. Η διαδικασία σχηματισμού των ελαφροβαρών αδρανών βασίζεται στην ικανότητα του υλικού να διαστέλλεται ('bloat') όταν θερμαίνεται σε περιστροφικό κλίβανο. Έτσι, η χημική σύσταση των αποβλήτων θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μπορούν να διασταλούν ή να χρησιμοποιηθούν πρόσθετα.

Μια άλλη εφαρμογή της λατομικής παιπάλης είναι στην παραγωγή τούβλων όπως γίνεται στην Ινδία. Τα τούβλα λοιπόν παρασκευάζονται από ανάμιξη λατομικής παιπάλης, άσβεστου και γύψου, πιέζονται σε μήτρες και ξηραίνονται στον αέρα.

Άλλη περίπτωση είναι σε λατομείο της Νότιας Αφρικής (South African Peak Quarry, 1998) που όπως στην Ινδία, υπάρχει μεγάλη ζήτηση για τούβλα και το λατομείο αυτό πουλάει τα λεπτομερή απόβλητα ως πρώτη ύλη σε κοντινό εργοστάσιο παρασκευής τούβλων. Με τον τρόπο αυτό δε δημιουργούνται πλέον σωροί από λεπτομερή στους χώρους του λατομείου καθώς απορροφάται από την παρασκευή των τούβλων.

Τα τούβλα αυτά παρασκευάζονται από λεπτομερή με εύρος μεγέθους κόκκων <5 mm και οι προδιαγραφές τους είναι ίδιες με εκείνες των συμβατικών τούβλων. Επίσης μπορούν να παραχθούν χωρίς έψηση εάν η ωρίμανση μπορεί να προκληθεί με χημική αντίδραση, σχηματίζοντας τα λεγόμενα non-sinter chemical (NSC) bricks. Τα συγκεκριμένα τούβλα μπορούν να μειώσουν το κόστος καθώς το κόστος για την έψηση μπορεί να είναι μεγαλύτερο από ότι το κόστος για τα χημικά.

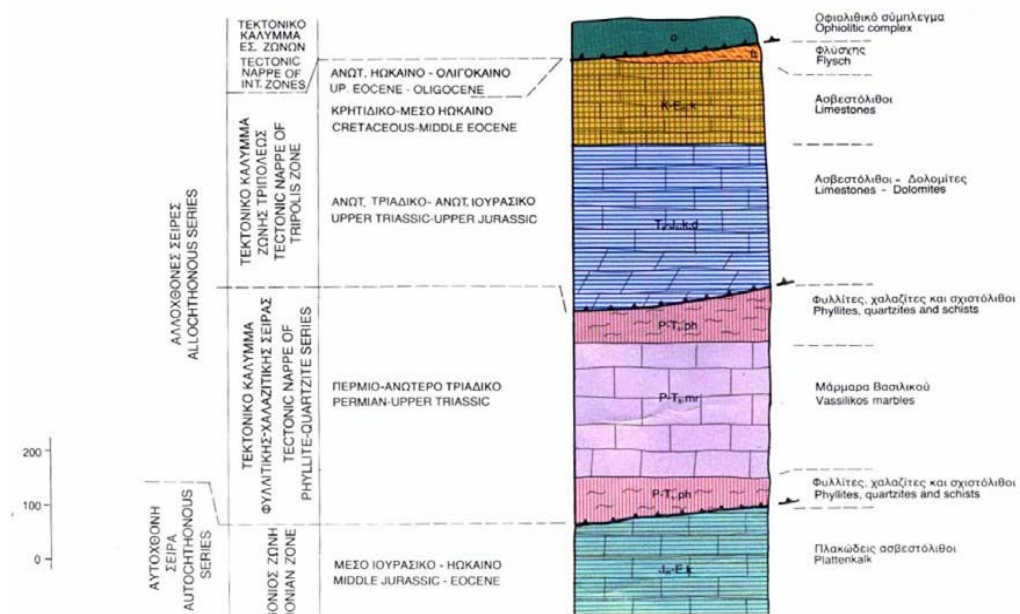
Σημαντική είναι ακόμη η εργαστηριακή διερεύνηση της χρήσης λεπτομερών λατομικών παραπροϊόντων για την παραγωγή ενός δομικού στοιχείου τύπου αναδομημένης πέτρας (artificial stone) φιλικό προς το περιβάλλον, που θα είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ως δομικό ή διακοσμητικό στοιχείο ή ως στοιχείο δαπεδόστρωσης (πλάκα ή κυβόλιθος) ή ως δομικό στοιχείο ειδικών κατασκευών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3_ο:**ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ****3.1 Προέλευση της παιπάλης**

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται ασβεστολιθική παιπάλη που προέρχεται από λατομείο αδρανών υλικών που βρίσκεται στην περιοχή Γούβες στο νομό Ηρακλείου. Το λατομείο αυτό τροφοδοτεί με αδρανή υλικά τέσσερις εταιρείες παραγωγής σκυροδέματος και ασφαλτομίγματος στην Βιομηχανική Περιοχή Ηρακλείου. Μια από τις εταιρείες αυτές είναι και η Ασφαλτική Μπετόν ΑΕ, η οποία διαθέτει συγκρότημα παραγωγής σκυροδέματος στη ΒΙΠΕ Ηρακλείου και μονάδα παραγωγής ασφαλτομίγματος εντός του λατομείου αδρανών στις Γούβες. Η εταιρεία 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 για το σκυρόδεμα και για το ασφαλτόμιγμα.

Ο σχηματισμός απ' όπου εξορύσσεται ο ασβεστόλιθος αποτελείται από : ασβεστόλιθους, δολομιτικούς ασβεστόλιθους και δολομίτες που αποτελούν τη βάση του τεκτονικού καλύμματος των εξωτερικών ζωνών, με αποτέλεσμα στη βάση τους να είναι κατά θέσεις μυλονιτιωμένοι 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.

Στην Εικόνα 3.1 παρουσιάζεται η στρωματογραφική στήλη των αλπικών σχηματισμών, όπου απαντώνται οι συγκεκριμένοι ασβεστόλιθοι.

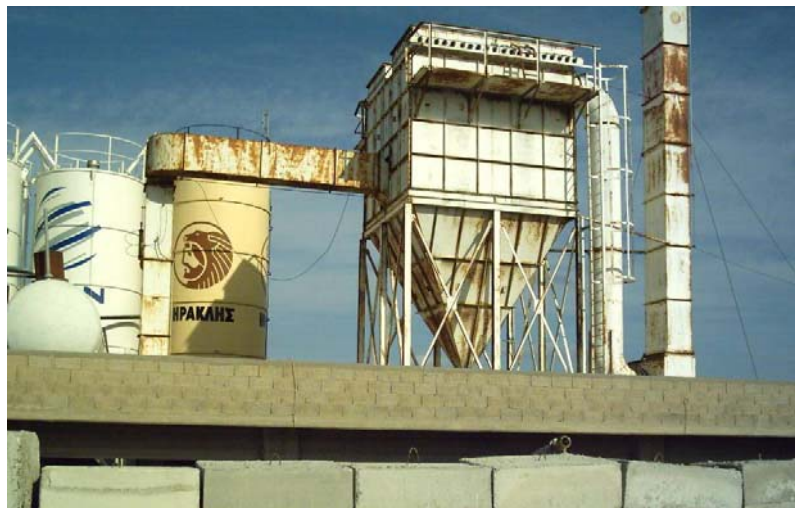


Εικόνα 3.1 Στρωματογραφική στήλη αλπικών σχηματισμών (ΙΓΜΕ - φύλλο Ηράκλειο κλίμακα 1:50.000).

Η ποσότητα της παιπάλης δημιουργείται τόσο από το συγκρότημα παραγωγής σκυροδέματος όσο και από τη μονάδα παραγωγής ασφαλτομίγματος. Στην πρώτη περίπτωση η συγκέντρωση του λεπτομερούς ασβεστολιθικού υλικού οφείλεται στον καθαρισμό των χαλικιών με πεπιεσμένο αέρα κατά τη διέλευσή τους από ταινιοζυγό. Έτσι το λεπτομερές υλικό απάγεται από τον αέρα και παγιδεύεται σε κυκλώνες και σακκόφιλτρα. Τα σακκόφιλτρα όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.2 είναι επιμήκεις σάκοι από ύφασμα που τοποθετούνται κατακόρυφα και ανάστροφα μέσα σε μεγάλους θαλάμους, αναρτώμενοι από την οροφή. Το δάπεδο των θαλάμων είναι κλειστό και στο κάτω μέρος του υπάρχει ένας κώνος από όπου τροφοδοτείται το ρεύμα του αέρα με τα αιωρούμενα στερεά που μη βρίσκοντας άλλη διέξοδο εισέρχεται στους σάκους από τις οπές του πυθμένα. Ο θάλαμος με τους σάκους βρίσκεται υπό κενό και έτσι ο αέρας διέρχεται από αυτούς εναποθέτοντας τη σκόνη στα εσωτερικά τους τοιχώματα. Περιοδικά η λειτουργία διακόπτεται και η σκόνη που συγκρατείται από τους σάκους

πέφτει στον κώνο, απ' όπου απάγεται με μεταφορικούς κοχλίες. Η αποκόλληση της σκόνης από τους σάκους υποβοηθείται είτε με δόνηση των σάκων είτε με δημιουργία αντίθετου ρεύματος αέρα (Σταμπολιάδης, 1995).

Στην δεύτερη περίπτωση η απαγωγή της παιπάλης γίνεται στον κυλινδρικό περιστροφικό κλίβανο θέρμανσης των αδρανών από τα απαέρια του καυστήρα ενώ τελικοί συλλέκτες είναι και πάλι κυκλώνες και σακκόφιλτρα.



Εικόνα 3.2 Συλλογή της παιπάλης με τη χρήση σακκόφιλτρων.

Το επόμενο στάδιο είναι η μεταφορά της παιπάλης από τα σακκόφιλτρα σε ένα χώρο που είναι υπό κλίση, έτσι ώστε να διαβραχεί με νερό και σε μορφή πολφού πλέον να μεταφερθεί εύκολα με τη χρήση φορτωτή στο τελικό χώρο απόθεσης. Το πρόβλημα των λεπτομερών εξακολουθεί να υφίσταται αφού με την πάροδο του χρόνου ο πολφός χάνει την υγρασία του και μένει η λεπτόκοκκη σκόνη η οποία παρασύρεται εύκολα με τον αέρα και μπορεί να φτάσει σε μεγάλες αποστάσεις προκαλώντας πολλά προβλήματα. Παρά τα μέτρα που λαμβάνει η εταιρεία, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.3 ολόκληρος ο χώρος του συγκροτήματος είναι καλυμμένος από ένα παχύ στρώμα παιπάλης.



Εικόνα 3.3 Στρώμα παιπάλης στο χώρο του συγκροτήματος.

Η ετήσια λοιπόν ποσότητα παιπάλης που συλλέγει και αποθέτει η εταιρεία Ασφαλτική ΑΕ ανέρχεται σε 10.000 τόνους. Επομένως η συνολική ποσότητα παιπάλης που συγκεντρώνεται και από τις τέσσερις εταιρείες παραγωγής σκυροδέματος και ασφαλτομίγματος που εδρεύουν στην βιομηχανική περιοχή του Ηρακλείου και έχουν παραπλήσιες παραγωγικές ικανότητες, ανέρχεται περίπου στους 40.000-50.000 τόνους ετησίως. Οπότε είναι προφανές ότι εκτός από τα περιβαλλοντικά προβλήματα που δημιουργούνται, μια μεγάλη ποσότητα ασβεστολιθικού υλικού παραμένει ανεκμετάλλευτη.

3.2 Δειγματοληψία και εργαστηριακές μετρήσεις της παιπάλης

Η δειγματοληψία της παιπάλης από το χώρο των εγκαταστάσεων παραγωγής σκυροδέματος και ασφαλτομιγμάτων, έγινε με τη χρήση πρότυπων δειγματοληπτικών πρακτικών για την εξασφάλιση αντιπροσωπευτικών δειγμάτων. Συγκεκριμένα συλλέχθηκαν 30 δείγματα από την έξοδο της παιπάλης από το συγκρότημα κονιοσυλλέκτης - σακκόφιλτρα και 5 δείγματα μητρικού πετρώματος από το χώρο του λατομείου. Σε όλα τα ληφθέντα δείγματα έγινε:

- μακροσκοπικός χαρακτηρισμός και με βάση αυτόν έγιναν χημικές αναλύσεις για τον προσδιορισμό της χημικής σύστασης στο ένα τρίτο των δειγμάτων της παιπάλης καθώς και σε περιορισμένο αριθμό δειγμάτων από τα μητρικά πετρώματα του

λατομείου με την μέθοδο φασματοσκοπίας ακτίνων-Χ φθορισμού. Η επιλογή των δειγμάτων του πετρώματος έγινε με καθορισμένο τρόπο ο οποίος επιτρέπει την συσχέτιση των μετρήσεων με εκείνες της παιπάλης. Στόχος της συσχέτισης αυτής είναι να διερευνηθεί η μεταβολή που επέρχεται στη σύσταση σαν αποτέλεσμα των διεργασιών της παραγωγής.

- υγρή κοκκομετρική ανάλυση που αρχικά έγινε με κόσκινα ανοίγματος 212μm, 125μm, 90μm και 63μm, αφού παρατηρήθηκε ότι στη συλλεγόμενη από τους κονιοσυλλέκτες και τα σακκόφιλτρα παιπάλη υπάρχουν πεπλατυσμένα κυρίως σωματίδια αρκετά μεγαλύτερης διαμέτρου. Με βάση τις μετρήσεις αυτές επιλέγεται το ένα τρίτο των δειγμάτων (10 δείγματα) για να γίνει κοκκομετρική ανάλυση με αναλυτή laser.
- σε 10 επιλεγμένα δείγματα παιπάλης έγινε ορυκτολογική ανάλυση με την μέθοδο περιθλασιμετρίας ακτίνων -Χ.
- σε 3 επιλεγμένα δείγματα παιπάλης έγινε θερμοβαρυτομετρική ανάλυση.
- μελέτη της μορφολογίας των κόκκων της παιπάλης σε 10 δείγματα με οπτική μικροσκοπία και ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης για το πολύ λεπτό κλάσμα.
- μέτρηση της λεπτότητας κατά Blaine σε όλα τα δείγματα.
- μέτρηση της φαινόμενης πυκνότητας σε όλα τα δείγματα.
- μέτρηση του pH, της απώλειας πύρωσης στους 1050°C και του αδιάλυτου υπολείμματος σε HCl σε 3 επιλεγμένα δείγματα.

Από τον μακροσκοπικό χαρακτηρισμό διακρίθηκαν τρεις ποιότητες ασβεστολιθικής παιπάλης που παράγει σαν παραπροϊόν η εταιρεία ΑΣΦΑΛΤΙΚΗ Α.Τ.Ε. Για τον λόγο αυτό έγιναν και διαφορετικοί τρόποι δειγματοληψίας. Δηλαδή πραγματοποιήθηκαν διαφορετικές μέθοδοι συλλογής της παιπάλης κατά τα στάδια παραγωγής και αυτό είχε ως αποτέλεσμα διαφορετικές φυσικοχημικές ιδιότητες για τα τελικά υλικά.

Η λευκή παιπάλη συλλέχθηκε με διαδικασίες αέριου διαχωρισμού, όπως σακκόφιλτρα, αεροδιαχωριστές, αναρροφητήρες πάνω από ταινίες υλικού και η διαχείρισή της δημιουργεί το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό πρόβλημα αφού η κοκκομετρία της καθιστά εύκολη την διασπορά της. Συλλέγεται κατά την παραγωγή του σκυροδέματος από την γραμμή της άμμου, κατά την προσπάθεια ελέγχου της παιπάλης εντός των νόμιμων ποσοστών σύμφωνα με τον Κανονισμό Σκυροδέματος. Πολύ μεγαλύτερες ποσότητες του

υλικού αυτού συλλέγουν οι παρακείμενες εταιρείες που βρίσκονται εντός της Βιομηχανικής Περιοχής Ηρακλείου παρά η ΑΣΦΑΛΤΙΚΗ Α.Τ.Ε. Η ανάγκη όμως οικονομικής και περιβαλλοντικά ορθής διαχείρισής της θα αποτελούσε μια λύση που θα είναι επιχειρηματικά συμφέρουσα για την εταιρεία.

Η δειγματοληψία έγινε με συλλογή μικροποσοτήτων από πολλά και διαφορετικά σημεία στους σωρούς εναπόθεσης του υλικού αυτού μέσα στους χώρους του συγκροτήματος της εταιρείας. Τέτοια σημεία ήταν κάτω από ταινίες, προσήνεμες θέσεις κάτω από σημεία απόρριψης/μεταφόρτωσης, προσήνεμα σημεία σε τοίχους, κολώνες κ.τ.λ. Η συνολική ποσότητα του υλικού που συγκεντρώθηκε σε δυο σάκους ήταν περίπου 60kg.

Η μαύρη παιπάλη προήλθε από το ψηλότερο των δύο σκαμμάτων πάχυνσης, τα οποία συλλέγονται εν υγρώ, με τη μορφή πολφού και ρέουν με φυσική ροή μέχρι τη θέση εναπόθεσης/πάχυνσης/ξήρανσης. Προήλθαν από τα φίλτρα αποκονίωσης της γραμμής παραγωγής του ασφαλτοσκυροδέματος τα οποία εκφορτίζονται με ψεκάσμο νερού ανά τακτά χρονικά διαστήματα, καθώς και από αεροκυκλώνες οι οποίοι όμως λειτουργούν με τα καυσάερια του μαζούτ από τον καυστήρα του ασφαλικού συγκροτήματος. Αυτό έχει σα συνέπεια την κατακράτηση υποπροϊόντων της καύσης μέσα στην παιπάλη και για το λόγο αυτό έχει σκούρο χρώμα.

Η δειγματοληψία έγινε με διαδοχική επιφανειακή λήψη 15 δειγμάτων με φτυάρι, από κανονικά διεσπαρμένες θέσεις σε όλη την επιφάνεια της δεξαμενής πάχυνσης. Αυτό κατέστη δυνατό γιατί η δεξαμενή είχε προφανώς να τροφοδοτηθεί πολλούς μήνες και παρουσίαζε ξηρή, συμπαγή υφή επιτρέποντας έτσι την επισκεψιμότητα σε όλη την επιφάνειά της. Η αρίθμηση των δειγμάτων ξεκινά από το σημείο τροφοδοσίας της δεξαμενής και ακολουθεί σπειροειδή πορεία σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού (δεξιόστροφα), για τα δείγματα 1 έως 15, προς το κέντρο της.

Τέλος **η καφέ παιπάλη** προήλθε από το χαμηλότερο των δύο σκαμμάτων πάχυνσης, και παράγεται με τις ίδιες ακριβώς διαδικασίες όπως και η μαύρη. Η δεξαμενή αυτή βρισκόταν σε λειτουργία κατά τον χρόνο της επίσκεψης και δεν ήταν δυνατή η πρόσβαση σε όλη την επιφάνειά της.

Η δειγματοληψία έγινε με διαδοχική επιφανειακή λήψη 15 δειγμάτων με φτυάρι, από την περιφέρεια της δεξαμενής, με αρχή το σημείο τροφοδοσίας της δεξαμενής και φορά δεξιόστροφη, για τα δείγματα 16 έως 30.

Στη συνέχεια ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των εργαστηριακών μετρήσεων που διεξήχθησαν με σκοπό την απόκτηση ακριβών γνώσεων για την φύση του υλικού.

3.2.1 Χημική ανάλυση

Πραγματοποιήθηκε σε 10 δείγματα ασβεστολιθικής παιπάλης καθώς και σε 2 δείγματα μητρικού πετρώματος που συλλέχθηκαν από το λατομείο. Εφαρμόστηκε η μέθοδος της φασματοσκοπίας ακτίνων Χ φθορισμού (X-ray fluorescence). Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζεται η σύσταση των υλικών που αναλύθηκαν.

Πίνακας 3.1: Χημικές αναλύσεις δειγμάτων

Δείγμα	Περιγραφή	CaO %	Fe ₂ O ₃ %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	MgO %	K ₂ O %	Na ₂ O %	CO ₂ %	CaCO ₃ %	CaMg(CO ₃) ₂ %
A	Παιπάλη	55.34	0.07	0.58	0.12	0.23	<0.1	<0.1	43.62	98.82	<0.5
B	Παιπάλη	55.30	0.07	0.61	0.13	0.24	<0.1	<0.1	43.61	98.74	<0.5
8	Παιπάλη	55.11	0.21	0.53	0.12	0.25	<0.1	<0.1	43.90	98.41	<0.5
11	Παιπάλη	55.17	0.27	0.55	0.11	0.23	<0.1	<0.1	43.85	98.51	<0.5
XA1	Παιπάλη	51.46	0.06	0.52	0.15	3.36	<0.1	<0.1	44.55	83.60	14.85
XA2	Παιπάλη	30.40	0.07	0.63	0.14	21.90	<0.1	<0.1	47.70	<0.5	99.13
13	Παιπάλη	53.46	0.21	0.48	0.16	1.68	<0.1	<0.1	43.86	91.17	7.8
14	Παιπάλη	53.76	0.25	0.63	0.21	1.48	<0.1	<0.1	43.75	92.07	6.7
19	Παιπάλη	53.06	0.165	0.49	0.19	1.48	<0.1	0.6	43.26	90.88	7.02
24	Παιπάλη	53.46	0.179	0.55	0.17	1.68	<0.1	<0.1	43.85	91.17	7.80
Μ.Ο.	Παιπάλη	51.65	0.16	0.56	0.15	3.25	<0.1	<0.1	44.20	84.38	14.53
ΜΠΑ	Πέτρωμα	55.44	0.03	0.26	0.10	0.24	<0.1	<0.1	43.89	99.00	<0.5
ΜΠΒ	Πέτρωμα	55.34	0.03	0.36	0.10	0.23	<0.1	<0.1	43.90	98.83	<0.5
Μ.Ο.	Πέτρωμα	55.39	0.03	0.31	0.1	0.235	<0.1	<0.1	43.89	98.92	<0.5

Παρατηρείται ότι τα δείγματα της παιπάλης έχουν χαμηλή περιεκτικότητα σε CaO και CaCO_3 ενώ έχουν αυξημένη περιεκτικότητα σε Fe_2O_3 , SiO_2 και Al_2O_3 σε σχέση με τα δείγματα του μητρικού πετρώματος. Αυτό οφείλεται στην τάση που έχουν οι αργιλοπυριτικές προσμίξεις του ασβεστόλιθου να συγκεντρώνονται στα λεπτότερα κλάσματα.

3.2.2 Κοκκομετρική ανάλυση

Εφαρμόστηκαν οι μέθοδοι υγρής κοσκίνισης και περίθλασης ακτίνων laser. Αρχικά έγινε κοσκίνιση γιατί υπήρχαν πεπλατυσμένα σωματίδια αρκετά μεγαλύτερης διαμέτρου από $75\mu\text{m}$. Με την μέθοδο αυτή μετράται η ισοδύναμη διάμετρος σφαίρας (d_w) 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, αλλά μειονεκτεί γιατί στη συνέχεια απαιτείται ξήρανση των δειγμάτων.

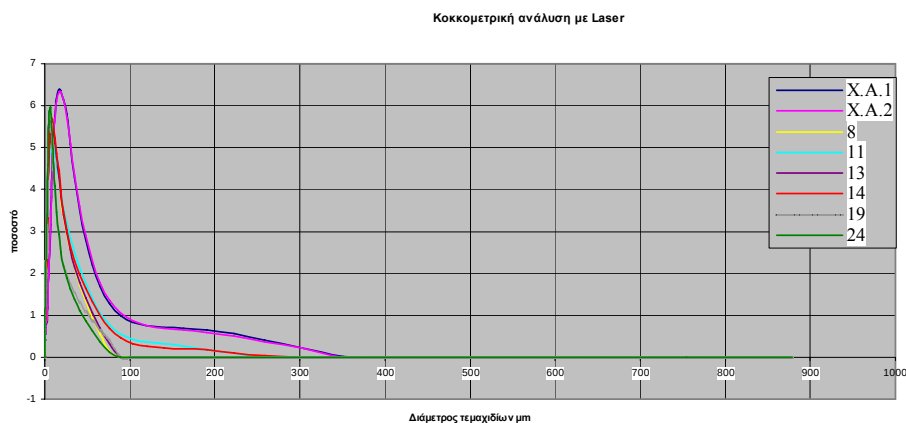
Αντίθετα με τη μέθοδο περίθλασης των ακτίνων laser μετράται η ισοδύναμη διάμετρος σφαίρας με όγκο ίσο με αυτόν του σωματιδίου (d_v) και το εύρος μεγεθών που μετρείται περιλαμβάνει πολύ λεπτά σωματίδια (από $1000\mu\text{m}$ - $0.1\mu\text{m}$) που δεν υπολογίζονται εύκολα με τις άλλες μεθόδους. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην διάχυση και διάθλαση των ακτίνων 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:

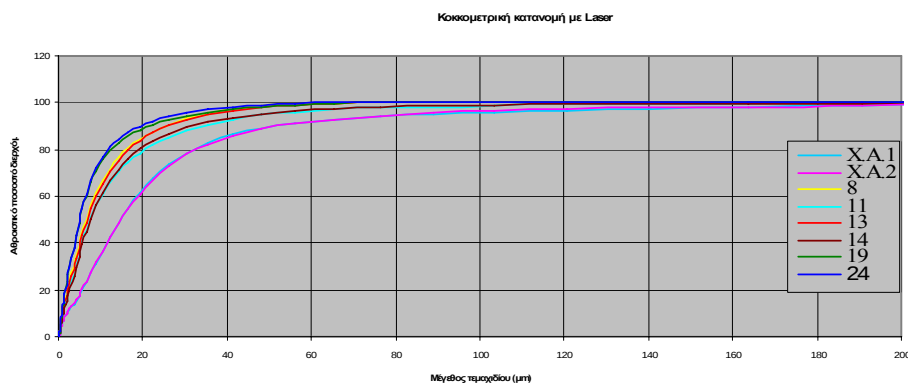
- Πηγή laser ως πηγή φωτός συγκεκριμένου μήκους κύματος. Το laser είναι τύπου He-Ne ($\lambda=0.63\mu\text{m}$), ιδιαίτερα διαδεδομένο, καθώς προσφέρει ακρίβεια και μικρό σήμα θορύβου απ' ότι τα laser μεγαλύτερου μήκους κύματος.
- Ανιχνευτής. Συνήθως υπάρχει ένα τεμάχιο από φωτοευαίσθητη σιλικόνη με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

Με βάση τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια της παραπάνω μεθόδου, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1 το διάγραμμα των ποσοστών κατ' όγκον συναρτήσει της διαμέτρου των κόκκων και διαπιστώνεται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό του όγκου των δειγμάτων βρίσκεται στα μικρότερα μεγέθη.

Αντίστοιχα στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα του αθροιστικά διερχόμενου υλικού συναρτήσει του μεγέθους των κόκκων. Από το διάγραμμα αυτό παρατηρείται ότι το κλάσμα των 75 μ m αποτελεί ένα ποσοστό του υλικού των δειγμάτων που κυμαίνεται από 94-100%.



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα κοκκομετρικής ανάλυσης παιπάλης



Σχήμα 3.2: Διάγραμμα κοκκομετρικής ανάλυσης παιπάλης (αθροιστικά διερχόμενο)

Στο παράρτημα παρατίθενται οι αναλυτικές μετρήσεις της παιπάλης για κοκκομετρία με laser.

3.2.3 Ορυκτολογική ανάλυση

Πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο περιθλασιμετρίας ακτίνων X (X-Ray Diffraction) σε 10 δείγματα του λεπτομερούς υλικού. Χρησιμοποιήθηκε το σύστημα αυτόματης περιθλασιμετρίας ακτίνων X τύπου D8 Advance της εταιρείας Bruker. Με τη μέθοδο αυτή είναι δυνατή η απευθείας μέτρηση των γωνιών και των εντάσεων των ανακλάσεων των ακτίνων X που προσπίπτουν σε παρασκεύασμα κρυσταλλικής κόνεως. Το περιθλασίμετρο ακτίνων X αποτελείται από τα εξής μέρη:

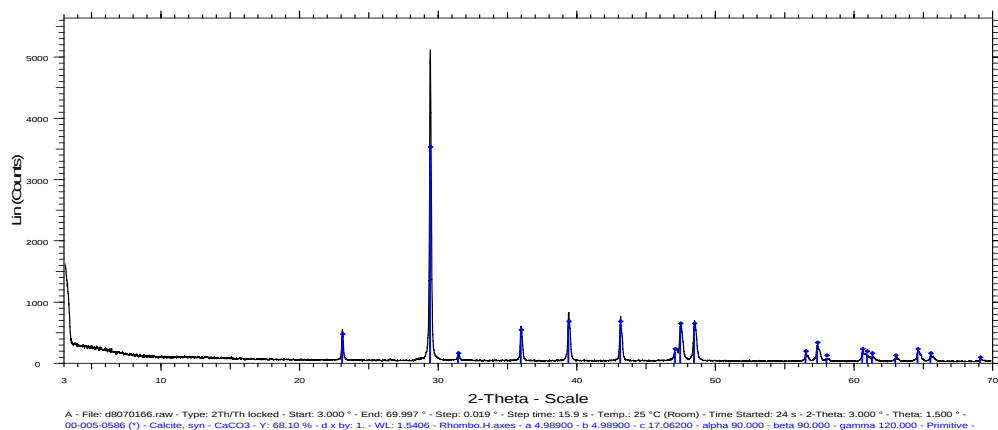
- την μονάδα παραγωγής υψηλής τάσης (35 KV)
- τη λυχνία των ακτίνων X (Cu)
- το γωνιόμετρο με ταχύτητα $1^\circ/\text{sec}$
- τον απαριθμητή κρούσεων και
- την μονάδα μικροϋπολογιστή για καθοδήγηση του συστήματος και αξιολόγηση των καταγραφών.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η τοποθέτηση μικρής ποσότητας παιπάλης στην κοιλότητα κατάλληλου κυκλικού πλαστικού υποδοχέα. Έπειτα ο υποδοχέας τοποθετήθηκε στο δειγματοφορέα του γωνιομέτρου, ο οποίος βρίσκεται σε τέτοια θέση ώστε να παραμένει πάντα στο κέντρο κύκλου που διαγράφει ο απαριθμητής των ακτίνων X και με τρόπο ώστε το επίπεδο της επιφάνειας του δείγματος να είναι πάντα κάθετο προς το επίπεδο του κύκλου.

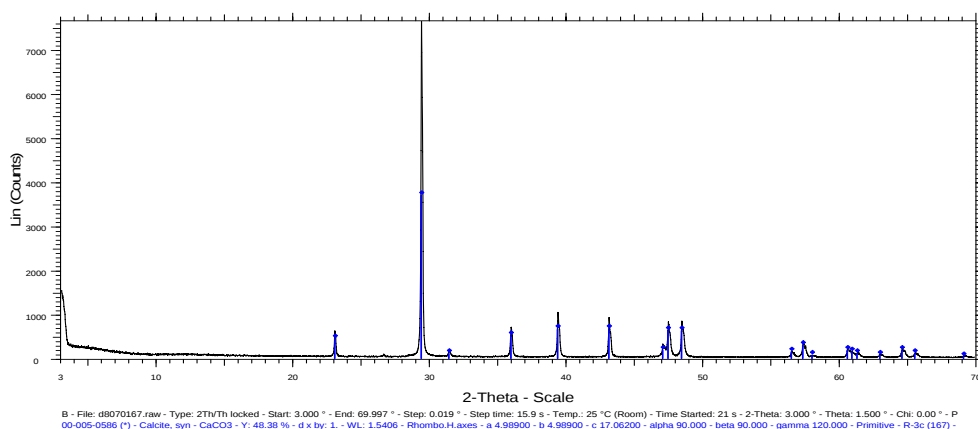
Στη συνέχεια ο απαριθμητής περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα $2\theta/\text{min}$ και το επίπεδο του δείγματος με γωνιακή ταχύτητα θ/min , ώστε με τη σύγχρονη αυτή μετατόπιση απαριθμητή και δείγματος, ο απαριθμητής να σχηματίζει την ίδια γωνία ως προς το επίπεδο του δείγματος, όπως και το σημείο εξόδου των ακτίνων X της λυχνίας. Με τον τρόπο αυτό καταγράφεται η ακτινοβολία που περιθλάται στους κρυσταλλικούς κόκκους του δείγματος, που βρίσκονται σε τέτοια γωνία ως προς την κατεύθυνση της δέσμης των ακτίνων – X, ώστε να πληρούται για κάποια ομάδα πλεγματικών επιπέδων η εξίσωση του BRAGG : $n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta$. Για κάθε ακέραιο αριθμό n, προκύπτει κατά την ανάκλαση των ακτίνων X θετική συμβολή τους. Καθώς το μήκος κύματος των ακτίνων

είναι σταθερό (μονοχρωματική ακτινοβολία), η γωνία θ εξαρτάται μόνο από την απόσταση d , πράγμα που επιτρέπει μετρώντας τη γωνία θ στην οποία εμφανίζεται η θετική συμβολή, να προσδιορισθεί η απόσταση που χαρακτηρίζει τα πλεγματικά επίπεδα στα οποία πραγματοποιείται η ανάκλαση (Κωστάκης, 1988).

Στη συνέχεια, με τη βοήθεια βιβλιογραφικών πινάκων αναφοράς προσδιορίζονται τα ορυκτά που αποτελούν τις κρυσταλλικές φάσεις του δείγματος. Από την ορυκτολογική ανάλυση που έγινε στο λεπτόκοκκο ασβεστολιθικό υλικό προέκυψαν τα ακτινοδιάγραμμα που απεικονίζονται στις Εικόνες 3.4 - 3.13.

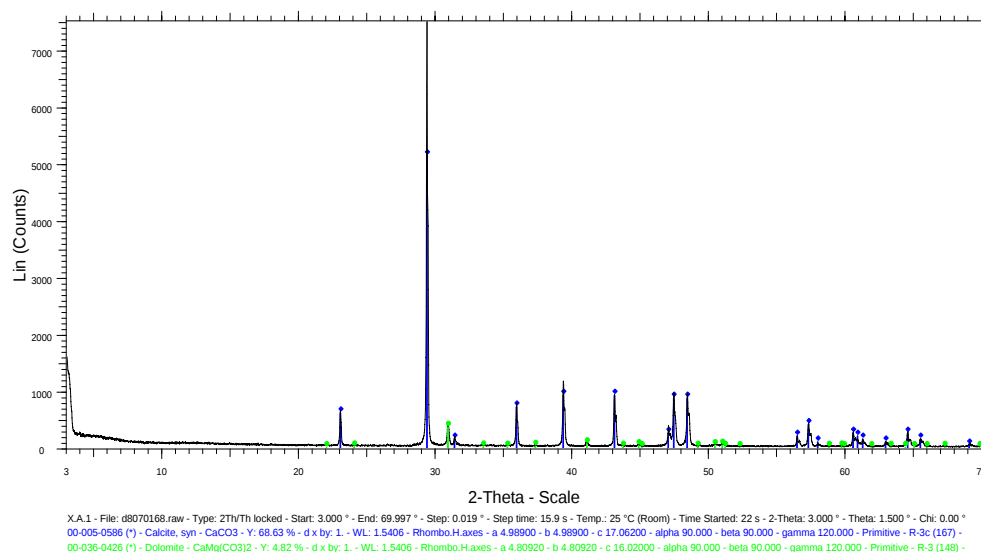


Εικόνα 3.4: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος A (αποτελείται από ασβεσίτη)

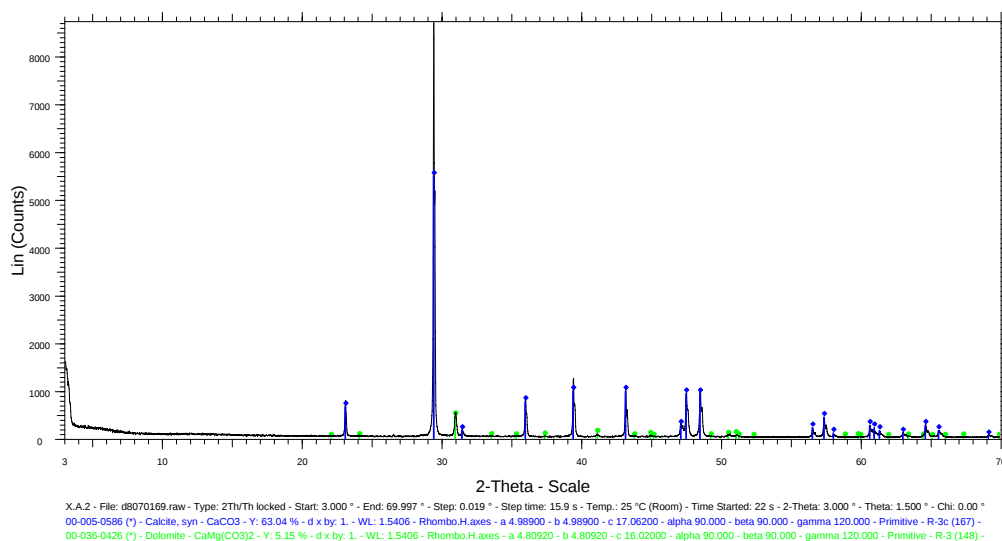


Εικόνα 3.5: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος B (αποτελείται από ασβεσίτη)

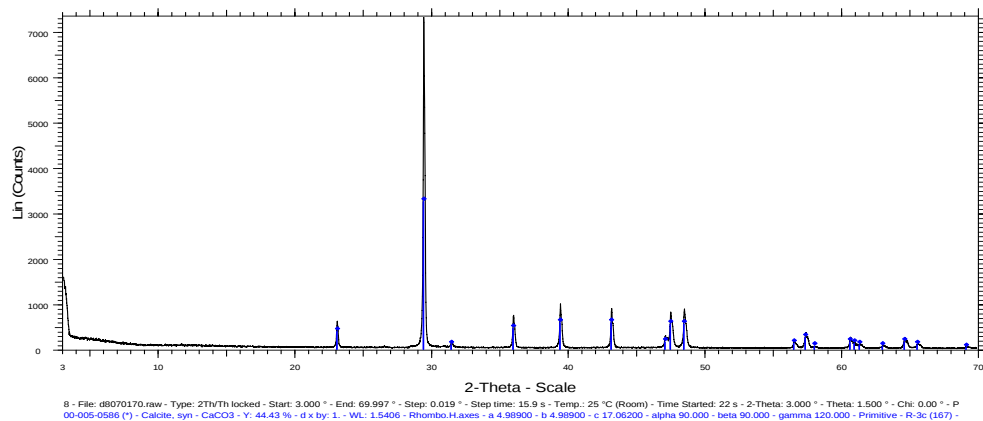
Μορφοποιήθηκε



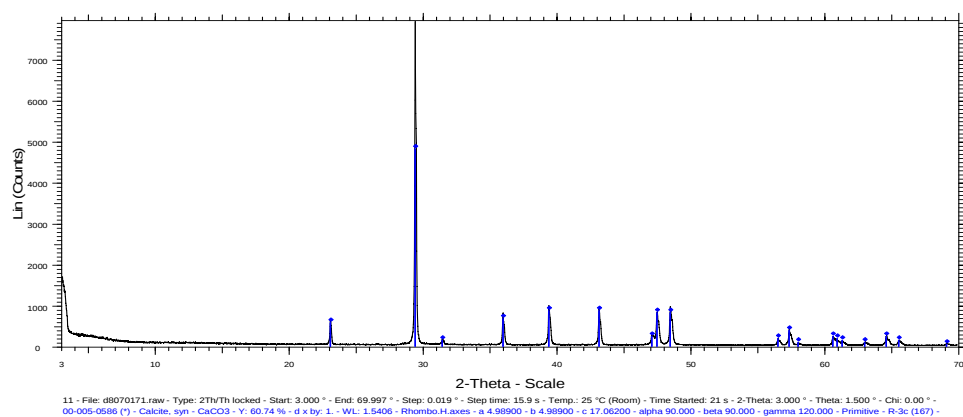
Εικόνα 3.6: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος X.A.1 (αποτελείται στο μεγαλύτερο μέρος από ασβεστίτη και σε ένα μικρότερο ποσοστό από δολομίτη)



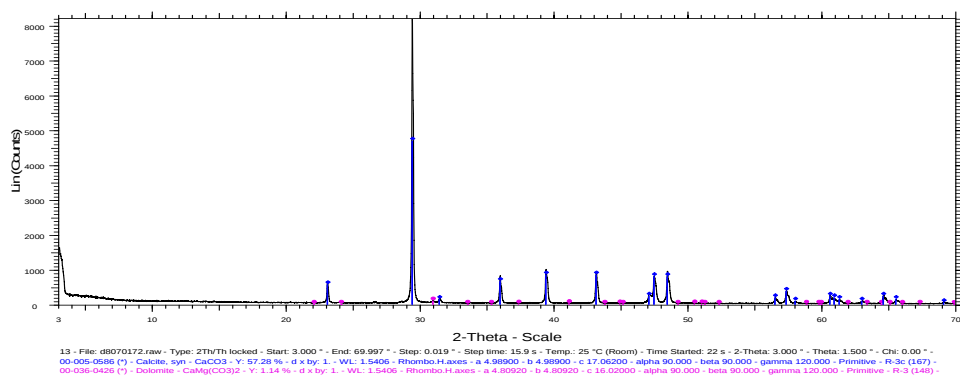
Εικόνα 3.7: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος X.A.2 (αποτελείται από δολομίτη)



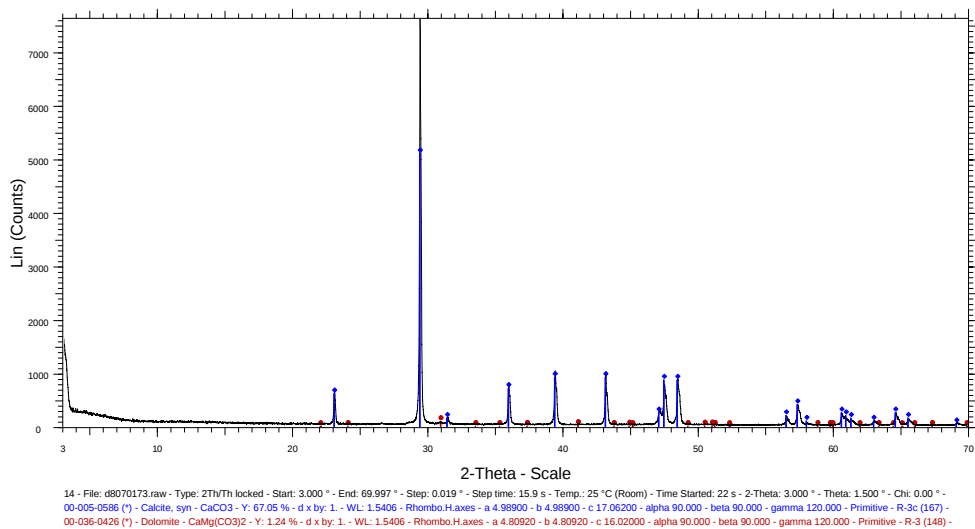
Εικόνα 3.8: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος 8 (αποτελείται από ασβεστίτη)



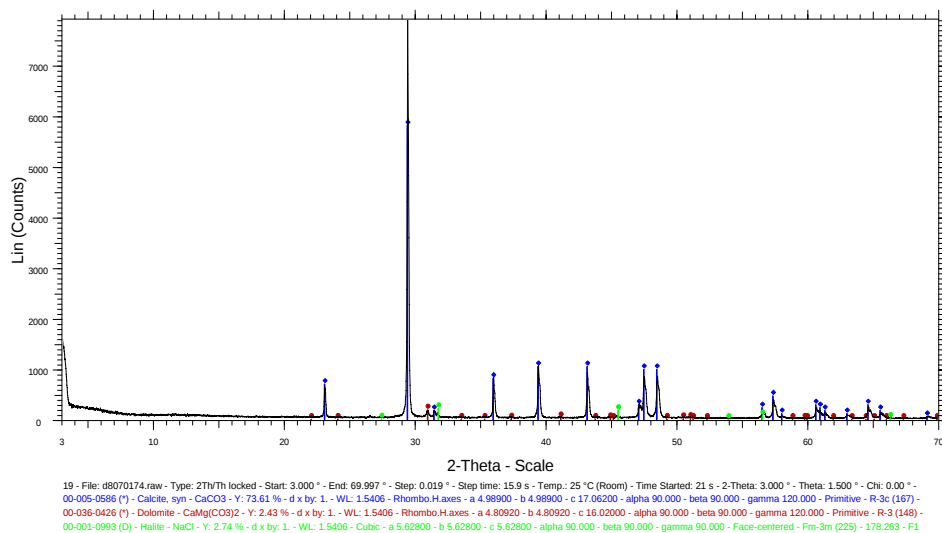
Εικόνα 3.9: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος 11 (αποτελείται από ασβεστίτη)



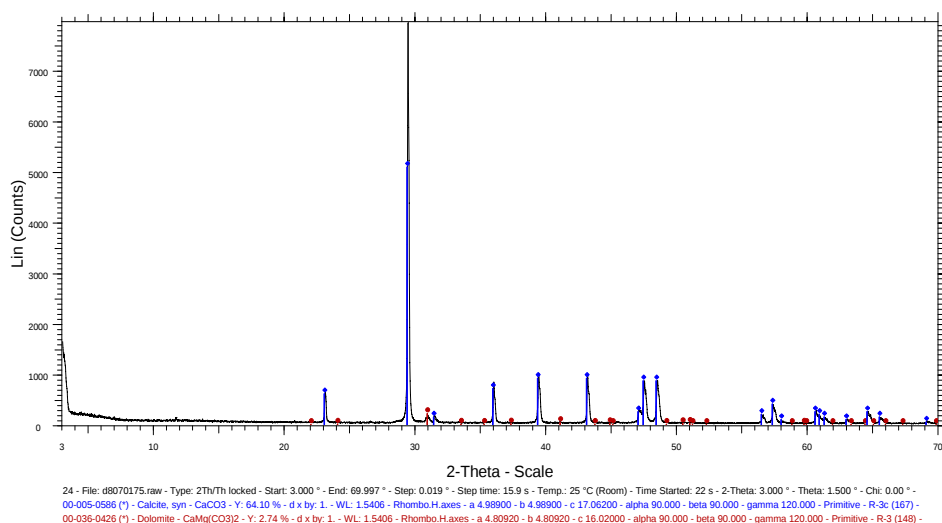
Εικόνα 3.10: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος 13 (αποτελείται στο μεγαλύτερο μέρος από ασβεστίτη και σε ένα μικρότερο ποσοστό από δολομίτη)



Εικόνα 3.11: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος 14 (αποτελείται στο μεγαλύτερο μέρος από ασβεστίτη και σε ένα μικρότερο ποσοστό από δολομίτη)



Εικόνα 3.12: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος 19 (αποτελείται στο μεγαλύτερο μέρος από ασβεστίτη και σε ένα μικρότερο ποσοστό από δολομίτη και NaCl)



Εικόνα 3.13: Ακτινοδιάγραμμα δείγματος 24 (αποτελείται στο μεγαλύτερο μέρος από ασβεστίτη και σε ένα μικρότερο ποσοστό από δολομίτη)

Με βάση τα παραπάνω ακτινοδιαγράμματα παρατηρείται ότι τα δείγματα που προέρχονται από το μητρικό πέτρωμα (δείγμα A, B) αποτελούνται μόνο από ασβεστίτη. Τα δείγματα X.A.1 και X.A.2 που προέρχονται από τη λευκή παιπάλη εκτός από ασβεστίτη περιέχουν και δολομίτη. Τα δείγματα που προέρχονται από τη καφέ παιπάλη (δείγματα 8,11, 13,14) αποτελούνται ως επί το πλείστον από ασβεστίτη και σε ένα μικρό ποσοστό από δολομίτη. Τέλος τα δείγματα 19 και 24 που προέρχονται από τη μαύρη παιπάλη αποτελούνται στο μεγαλύτερο μέρος τους από ασβεστίτη και σε μικρότερο από δολομίτη. Επιπλέον στο δείγμα 19 υπάρχει και ένα μικρό ποσοστό NaCl, γεγονός που εξηγείται από τη χρήση ελαφρά υφαλμυρισμένου νερού που χρησιμοποιείται για την διαβροχή της παιπάλης.

3.2.4 Θερμοβαρυντομετρική ανάλυση

Πραγματοποιήθηκε με τον θερμοζυγό TGA-6 της εταιρείας Perkin Elmer που 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 κυμαίνεται 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.

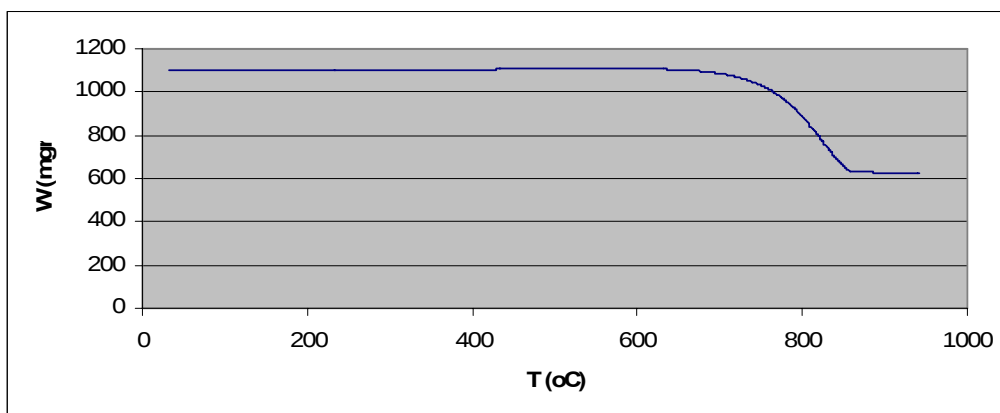
Κατά την εκτέλεση του πειράματος, τοποθετείται δείγμα 35mg στον δειγματοφορέα και κατόπιν στον υποδοχέα μέσα στον φούρνο. Ο υποδοχέας συνδέεται με τον ζυγό μέσω ενός βραχίονα με δύο μέρη, ο οποίος αντισταθμίζεται από ένα απόβαρο. Ο βραχίονας στηρίζεται σε ηλεκτρικό πηνίο που βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό 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.

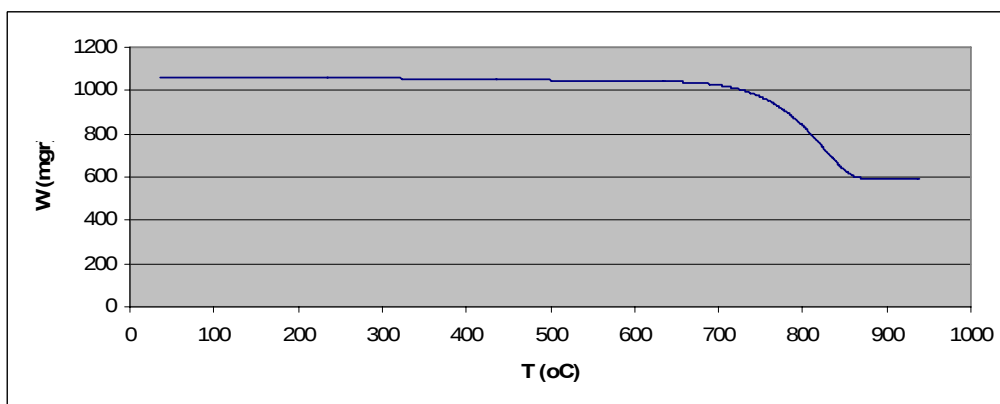
Έπειτα η θερμοκρασία αυξήθηκε από τους 200°C στους 550°C με ρυθμό ξανά 10°C/min και το δείγμα παρέμεινε εκεί πάλι για 15 λεπτά. Στο συγκεκριμένο διάστημα μεταβολής της θερμοκρασίας παρατηρείται η καύση και απομάκρυνση των οργανικών υλικών.

Το τελικό στάδιο του πειράματος περιελάμβανε άνοδο της θερμοκρασίας ως τους 900°C με ρυθμό 10°C/min και παραμονή του δείγματος για άλλα 15 λεπτά. Στο διάστημα αυτό παρατηρείται η διάσπαση του ανθρακικού ασβεστίου.

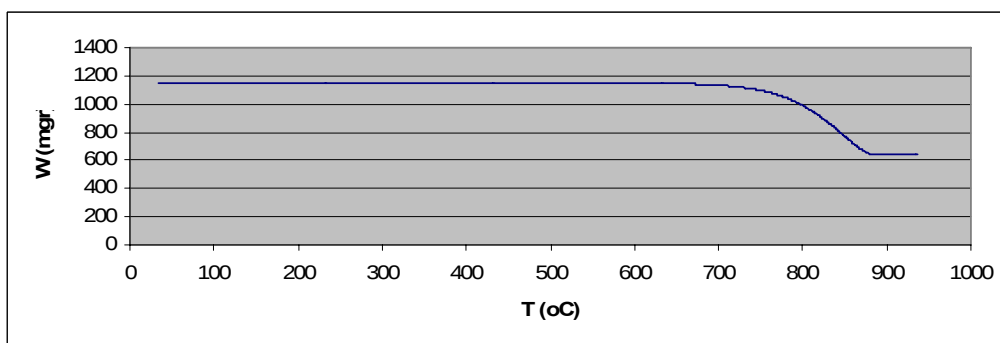
Στα Σχήματα 3.3-3.6 παρουσιάζονται τα διαγράμματα μεταβολής του βάρους του υλικού σε 4 δείγματα συναρτήσει της θερμοκρασίας. Ενώ στα Σχήματα 3.7-3.10 απεικονίζεται ο έντονος ρυθμός μεταβολής του βάρους των δειγμάτων που προκύπτει λόγω της διάσπασης του ανθρακικού ασβεστίου σε όλο το εύρος θερμοκρασιών του πειράματος.



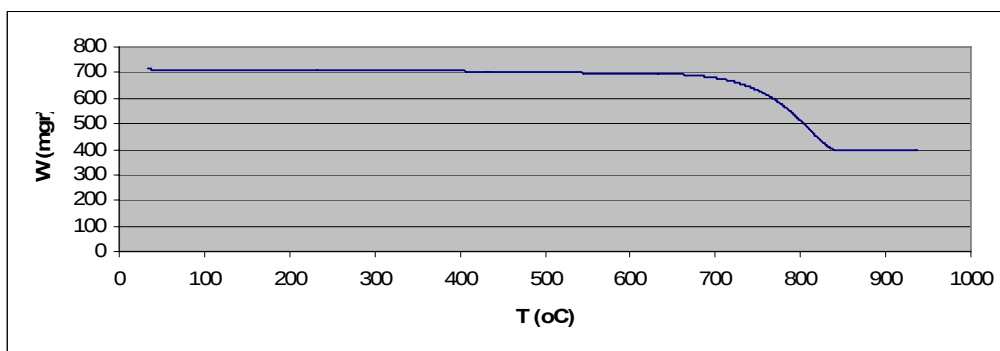
Σχήμα 3.3: Απεικόνιση της μεταβολής του βάρους της παιπάλης στο Δείγμα X.A.1 συναρτήσει της θερμοκρασίας.



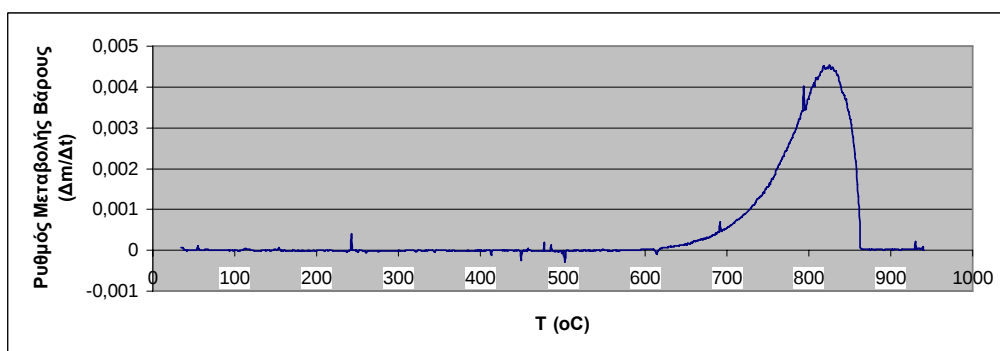
Σχήμα 3.4: Απεικόνιση της μεταβολής του βάρους της παιπάλης στο Δείγμα 13 συναρτήσει της θερμοκρασίας.



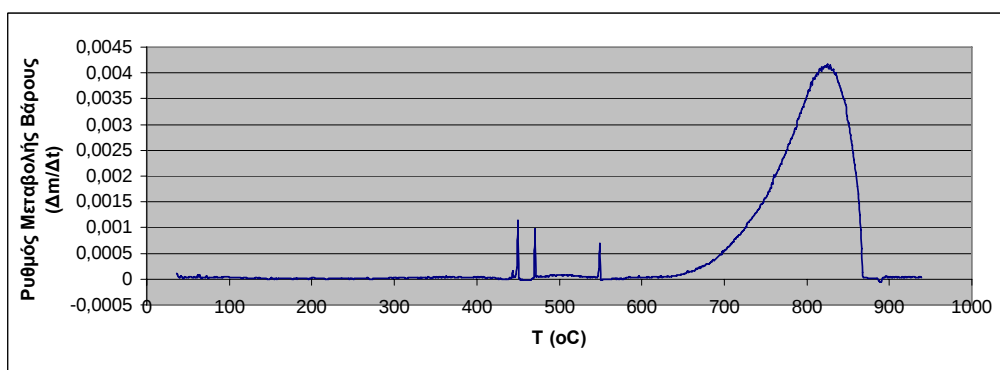
Σχήμα 3.5: Απεικόνιση της μεταβολής του βάρους της παιπάλης στο Δείγμα A συναρτήσει της θερμοκρασίας.



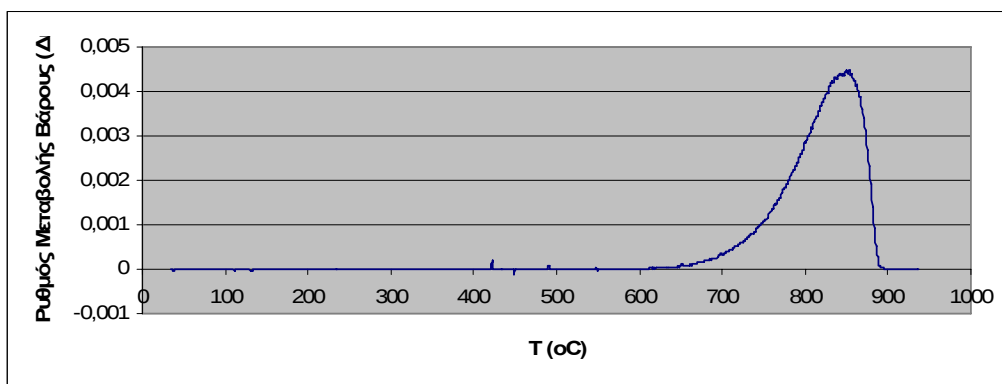
Σχήμα 3.6: Απεικόνιση της μεταβολής του βάρους της παιπάλης στο Δείγμα 8 συναρτήσει της θερμοκρασίας.



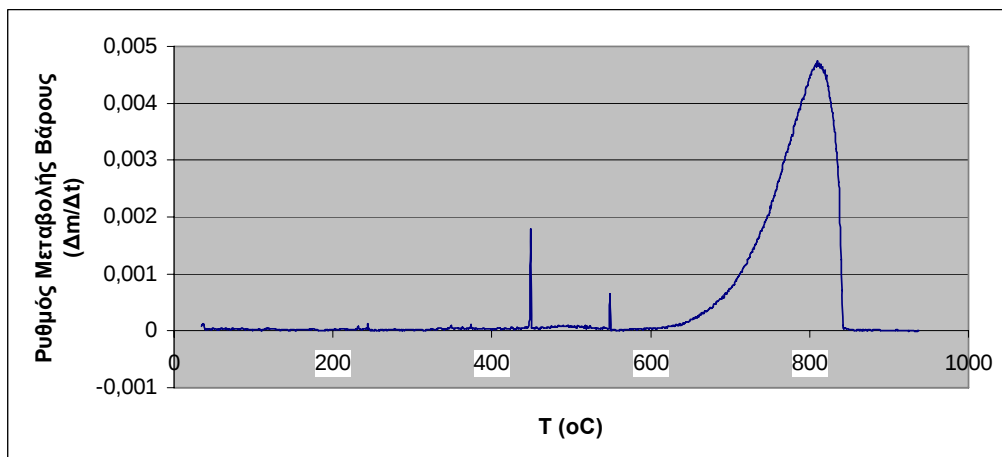
Σχήμα 3.7: Απεικόνιση της μεταβολής του βάρους της παιπάλης στο Δείγμα X.A.1 κατά τη διάρκεια της καύσης.



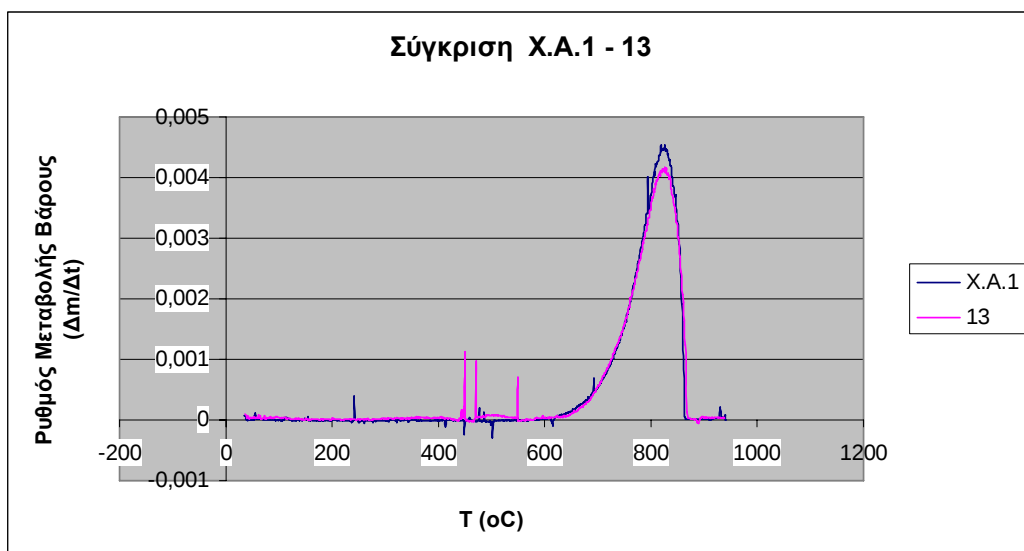
Σχήμα 3.8: Απεικόνιση της μεταβολής του βάρους της παιπάλης στο Δείγμα 13 κατά τη διάρκεια της καύσης.



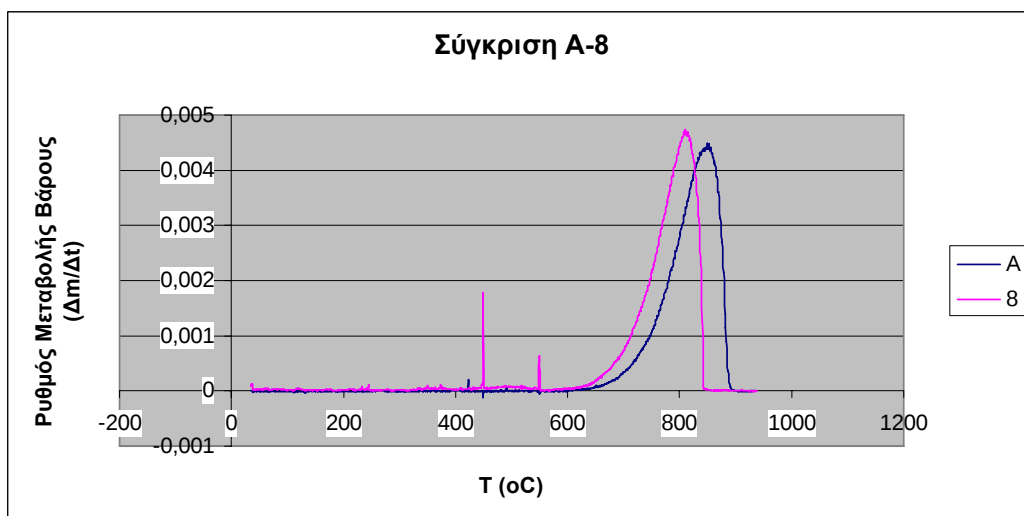
Σχήμα 3.9: Απεικόνιση της μεταβολής του βάρους της παιπάλης στο Δείγμα Α κατά τη διάρκεια της καύσης.



Σχήμα 3.10: Απεικόνιση της μεταβολής του βάρους της παιπάλης στο Δείγμα 8 κατά τη διάρκεια της καύσης.



Σχήμα 3.11: Σύγκριση της μεταβολής του βάρους της παιπάλης στο Δείγμα X.A.1 και στο Δείγμα 13.



Σχήμα 3.12: Σύγκριση της μεταβολής του βάρους της παιπάλης στο Δείγμα A και στο Δείγμα 8.

Από το Σχήμα 3.12 που γίνεται η σύγκριση του δείγματος Α με το δείγμα 8 παρατηρείται ότι στο δείγμα 8 η μεταβολή του βάρους που οφείλεται στη διάσπαση του ανθρακικού ασβεστίου αρχίζει σε μικρότερη θερμοκρασία σε σχέση με το δείγμα Α. Αυτό οφείλεται στο ότι το δείγμα 8 (μαύρη παιπάλη) είναι πιο λεπτόκοκκο και έτσι έχει περισσότερη ελεύθερη επιφάνεια σε σχέση με το δείγμα Α (μητρικό πέτρωμα).

Αντίθετα στο Σχήμα 3.11 που γίνεται η σύγκριση των δειγμάτων Χ.Α.1(λευκή παιπάλη) και 13(μαύρη παιπάλη) παρατηρείται ότι η μεταβολή του βάρους της παιπάλης που οφείλεται στη διάσπαση του ανθρακικού ασβεστίου γίνεται στην ίδια περιοχή θερμοκρασιών.

Στο πίνακα που ακολουθεί αναφέρεται το ποσοστό υγρασίας που αφαιρέθηκε από 3 δείγματα όταν παρέμειναν για 15 λεπτά σε θερμοκρασία που σταδιακά αυξήθηκε από τους 50-200°C. Στο επόμενο στάδιο παρατηρήθηκε απώλεια των άκαυστων οργανικών υλικών με αύξηση της θερμοκρασίας από τους 200-550°C. Τέλος με βαθμιαία αύξηση της θερμοκρασίας από τους 550-900°C έχουμε την απομάκρυνση του κρυσταλλικού νερού και εν συνεχεία τη διάσπαση του ανθρακικού ασβεστίου.

Το δείγμα Α που προέρχεται από το μητρικό πέτρωμα δεν έχει καθόλου υγρασία όπως φαίνεται στον πίνακα 3.2 και το ποσοστό των άκαυστων οργανικών υλικών που περιείχε είναι πολύ μικρό σε σχέση με τα άλλα δείγματα.

Πίνακας 3.2: Ποσοστό υγρασίας, άκαυστων οργανικών, κρυσταλλικού νερού, CaCO_3 για 3 δείγματα παιπάλης.

	Ποσοστό υγρασίας (%)	Ποσοστό άκαυστων οργανικών (%)	Ποσοστό κρυσταλλικού νερού αργιλικών ορυκτών (%)	CO_2 (%)
Δείγμα 8	0,25	1,49	0,47	42,21
Δείγμα 13	0,28	1,07	0,42	42,16
Δείγμα Α	0,00	0,02	0,003	43,80

3.2.5 Απώλεια πύρωσης

Αρχικά έγινε η μέτρηση της απώλειας των οργανικών υλικών με την τοποθέτηση 3 δειγμάτων σε φούρνο θερμοκρασίας 600°C για 24 ώρες. Όπως φαίνεται και στο πίνακα 3.3, στο δείγμα Χ.Α.1 η απώλεια βάρους είναι 6% ενώ παρουσίασε πολύ μικρή αλλαγή στο χρώμα από υπόλευκο σε λευκό. Αυτή η διαφορά βάρους όμως δεν έπρεπε να υπάρχει γιατί το δείγμα αυτό που προέρχεται από τη λευκή παιπάλη δεν πρέπει να έχει άκαυστα. Επομένως ο ίδιος ο ασβεστόλιθος θα πρέπει να περιέχει αρκετό ποσοστό βιτουμενίων που είναι οργανικά υλικά και τα οποία χάθηκαν κατά τη θέρμανση.

Στο δείγμα 19 που προέρχεται από τη μαύρη παιπάλη, παρατηρήθηκε σημαντική αλλαγή στο χρώμα αφού από τεφρό έγινε υπόλευκο και η απώλεια βάρους όπως αναμενόταν είναι μεγάλη δηλαδή 6%. Αυτό υποδεικνύει ότι περιείχε πολλά οργανικά υλικά.

Τέλος το δείγμα 13 που προέρχεται από τη καφέ παιπάλη είχε σημαντική αλλαγή στο χρώμα δηλαδή από σκούρο γκρι έγινε ανοιχτόχρωμο υπόλευκο. Η απώλεια βάρους που παρατηρήθηκε είναι σημαντική (5.67%). Άρα και σε αυτό το δείγμα υπήρχαν πολλά οργανικά υλικά.

Μετά τη μέτρηση της απώλειας των οργανικών υλικών τα δείγματα τοποθετήθηκαν πάλι σε φούρνο αυτή τη φορά όμως σε θερμοκρασία 1050°C για 6 ώρες έτσι ώστε να μετρηθεί η απώλεια πύρωσης. Τα αποτελέσματα της μέτρησης αυτής παρατίθενται στο πίνακα 3.4.

Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα μέτρησης της απώλειας των οργανικών υλικών.

Μέτρηση Απώλειας Οργανικών υλικών				Μετά από 24h στους 600 °C			
Δείγμα	Βάρος Κάψας(gr)	Βάρος Κάψας+Δείγματος (gr)	Βάρος Δείγματος (gr)	Βάρος Κάψας+Δείγματος (gr)	Βάρος Δείγματος (gr)	Απώλεια Δείγματος (gr)	Απώλεια Δείγματος (%)
Χ.Α.1	71	101	30	99,2	28,2	1,8	6
19	107	137	30	135,2	28,2	1,8	6
13	110,8	140,8	30	139,1	28,3	1,7	5,67

Πίνακας 3.4: Αποτελέσματα μέτρησης της απώλειας πύρωσης.

Μέτρηση Απώλειας Πύρωσης στους 1050 °C για 6h				Μετά από 6h στους 1050 °C			
Δείγμα	Βάρος Κάψας (gr)	Βάρος Κάψας+ Δείγματος (gr)	Βάρος Δείγματος (gr)	Βάρος Κάψας+ Δείγματος (gr)	Βάρος Δείγματος (gr)	Απώλεια Πύρωσης (gr)	Απώλεια Δείγματος (%)
X.A.1	71	85,1	14,1	79,4	8,4	5,7	40,425
19	107	121,1	14,1	115,4	8,4	5,7	40,425
13	110,8	124,9	14,1	119,2	8,4	5,7	40,425

3.2.6 Οπτική και ηλεκτρονική μικροσκοπία

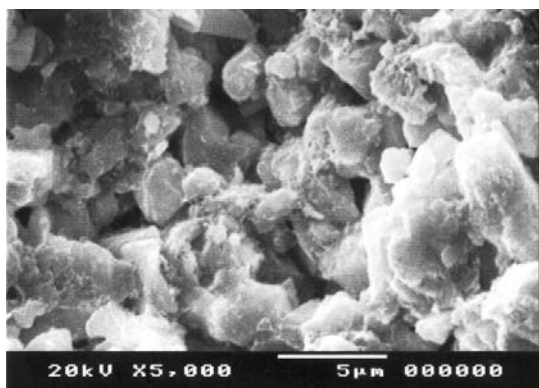
Ένα από τα πιο ισχυρά και αποτελεσματικά όργανα για τη μελέτη της μικροδομής υλικών είναι το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Αυτό επιτρέπει τη μεγεθυσμένη απεικόνιση του δείγματος με διακριτική ικανότητα της τάξης του nm, μέσω της αλληλεπίδρασής του με μια δέσμη ηλεκτρονίων. Ο χειρισμός της δέσμης των ηλεκτρονίων που προσπίπτει στο δείγμα, όσο και εκείνων που σκεδάζονται (περιθλώνται) από αυτό, γίνεται με τη βοήθεια μαγνητικών φακών.

Ένα από τα είδη ηλεκτρονικών μικροσκοπίων είναι το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης που χρησιμοποιήθηκε για τη διερεύνηση της μορφολογίας των κόκκων της παιπάλης. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στη χρήση μιας λεπτής δέσμης ηλεκτρονίων ενέργειας από 0-50 keV, η οποία αφού περάσει από μια ακολουθία δυο ή τριών φακών εστίασης, οι οποίοι είναι συνδυασμένοι με κατάλληλα διαφράγματα, καταλήγει να έχει διάμετρο 2-10 nm. Η λεπτή αυτή δέσμη κατευθύνεται με τη βοήθεια ενός πηνίου οδήγησης έτσι ώστε να σαρώνει με περιοδικό τρόπο, την προς μελέτη επιφάνεια του δείγματος. Η προσπίπτουσα δέσμη προκαλεί την εκπομπή δευτερογενών ηλεκτρονίων με ενέργειες 2-5 eV και οπισθοσκεδασμένων ηλεκτρονίων με ενέργειες που κυμαίνονται από την ενέργεια των ηλεκτρονίων της δέσμης μέχρι περίπου 50 eV. Τα σήματα αυτά ενισχύονται και στη συνέχεια διαμορφώνουν την ένταση μιας εξωτερικής (ανεξάρτητης) καθοδικής δέσμης η οποία προσπίπτει σε φθορίζουσα οθόνη ακολουθώντας την ίδια

σάρωση η οποία οδηγεί τη δέσμη του μικροσκοπίου. Το αποτέλεσμα είναι η μεγεθυσμένη απεικόνιση, στη φθορίζουσα οθόνη, της επιφάνειας του δείγματος που σαρώνει η δέσμη του μικροσκοπίου.

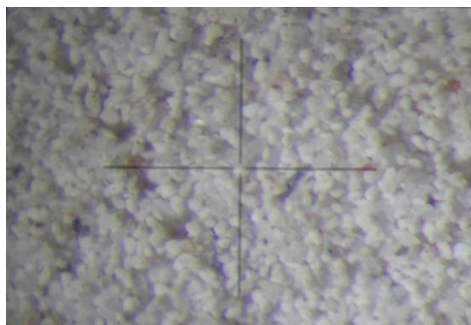
Ανάλογα με την επιλογή του σήματος που θα χρησιμοποιηθεί για την αναπαραγωγή της εικόνας, αναδεικνύονται διαφορετικά χαρακτηριστικά του δείγματος, δεδομένου ότι τόσο η παραγωγή δευτερογενών ηλεκτρονίων όσο και ο συντελεστής οπισθοσκέδασης εξαρτώνται από τις τοπικές τιμές της γωνίας πρόσπτωσης (τοπογραφικά χαρακτηριστικά), το μέσο ατομικό αριθμό (πληροφορίες για τη σύνθεση) και τον κρυσταλλικό προσανατολισμό (κρυσταλλογραφικά χαρακτηριστικά).

Στην εικόνα 3.14, που προέρχεται από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, φαίνεται η μορφολογία των κόκκων της μαύρης παιπάλης, που είναι ακανόνιστα γωνιώδη τεμαχίδια αποτελούμενα αποκλειστικά σχεδόν από ασβεστίτη.



Εικόνα 3.14: Εικόνα δοκιμίου μαύρης παιπάλης από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.

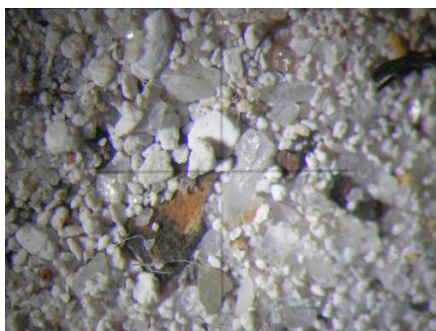
Οι εικόνες 3.15-3.24 που προέρχονται από στερεοσκοπικό μικροσκόπιο, παρουσιάζουν διάφορα κλάσματα άσπρης, καφέ και μαύρης παιπάλης. Παρατηρείται ότι στα μεγάλα κλάσματα της παιπάλης οι κόκκοι είναι ανομοιογενείς και υπάρχουν και ξένα υλικά που πιθανόν παρασύρθηκαν από τον αέρα. Αντίθετα στα μικρά κλάσματα οι κόκκοι είναι ομοιογενείς.



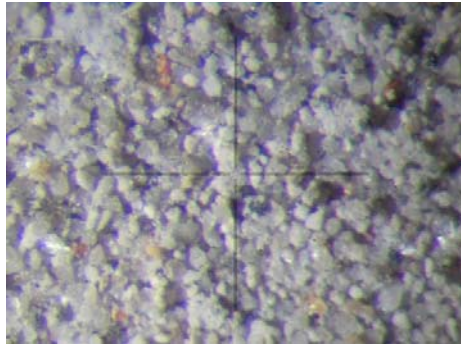
Εικόνα 3.15: Άσπρη παιπάλη (-75 +56μm), πλάτος εικόνας 2,33mm



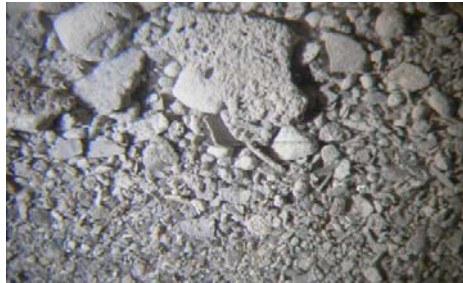
Εικόνα 3.16: Άσπρη παιπάλη (+75μm), πλάτος εικόνας 15mm



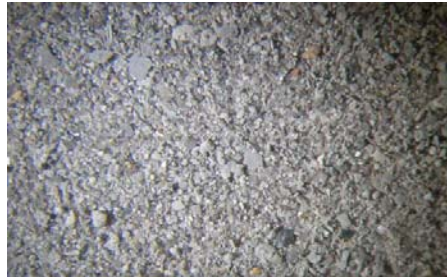
Εικόνα 3.17: Άσπρη παιπάλη (+75μm), πλάτος εικόνας 6mm



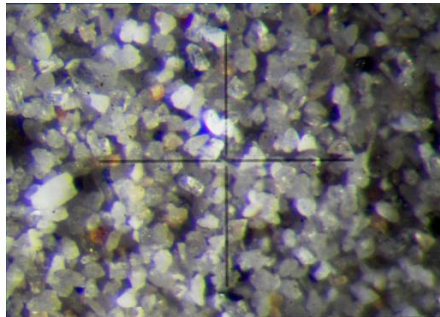
Εικόνα 3.18: Καφέ παιπάλη (-75 +56μm), πλάτος εικόνας 2,11mm



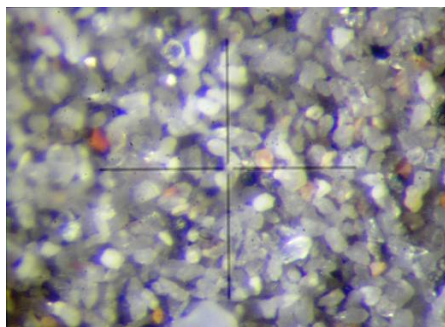
Εικόνα 3.19: Καφέ παιπάλη (+75μm), πλάτος εικόνας 6mm



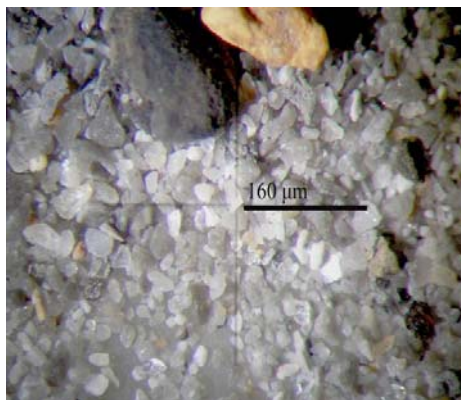
Εικόνα 3.20: Καφέ παιπάλη (+75μm), πλάτος εικόνας 15mm



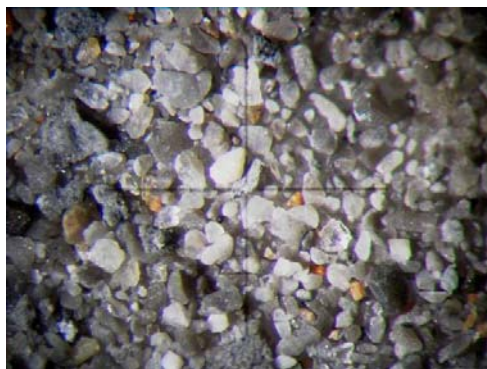
Εικόνα 3.21: Μαύρη παιπάλη (-75 +56μm), πλάτος εικόνας 1,85mm



Εικόνα 3.22: Μαύρη παιπάλη (-75 +56μm), πλάτος εικόνας 1,85mm



Εικόνα 3.23: Μαύρη παιπάλη (+75μm), πλάτος εικόνας 6mm



Εικόνα 3.24: Μαύρη παιπάλη (+75μm), πλάτος εικόνας 6m

Μορφοποιήθηκε

3.2.7 Μέτρηση της ειδικής επιφάνειας

Πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο διαπερατότητας με αέρα (Blaine). Η ειδική επιφάνεια ενός δείγματος παιπάλης μετρείται παρακολουθώντας το χρόνο που απαιτείται για να διέλθει μια συγκεκριμένη ποσότητα αέρα μέσα από το στρώμα του δείγματος που έχει συγκεκριμένες διαστάσεις και πορώδες. Υπό κανονικές συνθήκες η ειδική επιφάνεια της παιπάλης είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του απαιτούμενου χρόνου για να περάσει μια δεδομένη ποσότητα αέρα μέσα από το στρώμα του δείγματος. Ο αριθμός και οι διαστάσεις των μεμονωμένων πόρων μέσα στο συγκεκριμένο στρώμα προσδιορίζονται σύμφωνα με την κατανομή των διαστάσεων των σωματιδίων της παιπάλης που καθορίζουν τον απαιτούμενο χρόνο για τη διέλευση του αέρα. Η συσκευή αποτελείται από τα εξής μέρη:

- κελί διαπερατότητας
- διάτρητο δίσκο
- έμβολο
- μανόμετρο
- μανομετρικό υγρό (ελαφρύ ορυκτέλαιο)
- χρονόμετρο
- ζυγαριά
- πυκνόμετρο

Το στρώμα της παιπάλης αποτελείται από ένα σύνολο σωματιδίων με συγκεκριμένο όγκο αέρα ανάμεσά τους. Αυτός ο όγκος αέρα προσδιορίζει το κλάσμα του συνολικού όγκου του στρώματος και ονομάζεται πορώδες (e). Κατά συνέπεια το κλάσμα του όγκου που καταλαμβάνεται από τα σωματίδια της παιπάλης είναι $(1 - e)$. Αν V είναι ο συνολικός όγκος του στρώματος, ο απόλυτος όγκος της παιπάλης είναι $V(1 - e)$ cm^3 και η μάζα της παιπάλης (m) είναι $m = \rho V(1 - e)$ gr όπου ρ είναι η πυκνότητα των σωματιδίων του δείγματος.

Η διαδικασία του πειράματος που εφαρμόστηκε είναι η εξής:

Αρχικά ζυγίστηκε μια ποσότητα παιπάλης m_1 για να διαμορφωθεί ένα στρώμα με πορώδες $e=0.5$ και με βάση τις σχέσεις που προαναφέρθηκαν ισχύει :

$$m_1 = 0.5 \rho_1 V = 0.5 \cdot 2.8 \cdot 1.899 = 2.66 \text{ gr, όπου } \rho_1 \text{ είναι η πυκνότητα της παιπάλης.}$$

Η μάζα του τσιμέντου αναφοράς είναι:

$m_2 = 0.5\rho_2V = 0.5 \cdot 3.15 \cdot 1.899 = 2.991 \text{ gr}$, όπου ρ_2 είναι η πυκνότητα του τσιμέντου αναφοράς.

Η ποσότητα αυτή τοποθετείται στο κελί διαπερατότητας αφού πρώτα έχει εγκατασταθεί στο κάτω μέρος του κελιού ο διάτρητος δίσκος και πάνω του ένα χάρτινο φίλτρο. Θα πρέπει να διασφαλιστεί ότι το χάρτινο φίλτρο καλύπτει καλά το διάτρητο δίσκο και ότι είναι σε οριζόντια θέση. Πάνω από τη ποσότητα της παιπάλης τοποθετείται ένα δεύτερο φίλτρο και τέλος μπαίνει το έμβολο μέχρι να έρθει σε επαφή με το φίλτρο.

Στη συνέχεια το κελί αυτό μπαίνει στην υποδοχή στο άνω τμήμα του μανόμετρου. Η κάνουλα ανοίγεται εφόσον το κελί είναι κλειστό με το έμβολο και με ελαφριά αναρρόφηση ανεβαίνει το επίπεδο του μανομετρικού υγρού μέχρι την ανώτερη χαραγμένη γραμμή. Αφού σταθεροποιηθεί το μανομετρικό υγρό κλείνει η στρόφιγγα και αφαιρείται το έμβολο από το άνω μέρος του κυλινδρικού κελιού. Το μανομετρικό υγρό αρχίζει να κατεβαίνει και μόλις φτάσει στη δεύτερη χαραγμένη γραμμή τότε ξεκινά η χρονομέτρηση και διαρκεί μέχρι να φτάσει στη κατώτερη γραμμή. Ο χρόνος καταγράφεται με ακρίβεια 0.2sec και η θερμοκρασία με ακρίβεια 1°C. Η δοκιμή αυτή είναι καλό να επαναλαμβάνεται δυο φορές για κάθε δείγμα έτσι ώστε να επιτευχθεί καλύτερη ακρίβεια.

Στην επεξεργασία των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε η εξής σχέση για την ειδική επιφάνεια (S) :

$$S = [\rho_o \cdot (1 - e_o) \cdot \sqrt{e_o^3} \cdot \sqrt{0.1\eta_o} \cdot \sqrt{t}] \cdot S_o / [\rho \cdot (1 - e) \cdot \sqrt{e_o^3} \cdot \sqrt{0.1\eta} \cdot \sqrt{t_o}] \text{ (cm}^2/\text{gr)} \quad (3.1)$$

όπου $S_o = 3774 \text{ cm}^2/\text{gr}$ είναι η ειδική επιφάνεια του τσιμέντου αναφοράς

$e = 0.5$ είναι το πορώδες του δείγματος

$e_o = 0.5$ είναι το πορώδες του τσιμέντου αναφοράς

t είναι ο μέσος όρος των δύο χρόνων που μετρούνται για το κάθε δείγμα της δοκιμής

t_o είναι ο μέσος όρος των τριών χρόνων που μετρούνται για το τσιμέντο αναφοράς

ρ είναι η πυκνότητα του δείγματος της δοκιμής

$\rho_o = 3.15 \text{ gr/cm}^3$ είναι η πυκνότητα του τσιμέντου αναφοράς

η είναι το ιξώδες του αέρα στη θερμοκρασία της δοκιμής

η_o είναι το ιξώδες του αέρα από το μέσο όρο των τριών θερμοκρασιών του τσιμέντου αναφοράς.

Η σχέση (3.1) απλοποιείται αφού $e=e_0=0.5$ και οι συνθήκες του εργαστηρίου που διεξήχθησαν οι δοκιμές ήταν σε θερμοκρασία $20\pm 2^\circ\text{C}$ και η σχετική υγρασία δεν ξεπερνούσε το 65%. Για τον λόγο αυτό ισχύει $\eta=\eta_0$.

Στον πίνακα 3.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της λεπτότητας που υπολογίστηκε με τη μέθοδο διαπερατότητας με αέρα (Blaine) σε 30 δείγματα. Όπως φαίνεται η ειδική επιφάνεια της ασβεστολιθικής παιπάλης κυμαίνεται από 2841.36 ως $6303.2 \text{ cm}^2/\text{gr}$.

Πίνακας 3.5: Μετρήσεις της λεπτότητας κατά Blaine

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	S (cm^2/gr)
1	5997.91
2	4007.9
3	6303.02
4	5365.99
5	5364.28
6	5650.38
7	5413.07
8	5706.52
9	5548.79
10	5366.5
11	5844.59
12	6303.02
13	5834.08
14	5815.76
15	6249.82
16	5551.67
17	6028.68
18	5729.35
19	5465.12
20	5883.96
21	5979.94
22	6009.2
23	5468.55
24	5545.73
25	4815.91
26	4271.99
27	6168.15

28	6008.89
29	6190.91
30	5488.95
X.A.1	2841.36
X.A. 2	3135.19

Στο παράρτημα παρατίθεται ο συνολικός πίνακας της λεπτότητας κατά Blaine.

3.2.8 Μέτρηση της φαινόμενης πυκνότητας

Πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ζυγαριάς ακριβείας στην οποία τοποθετήθηκε μια ποσότητα παιπάλης χύδην χωρίς να χρειάζεται συμπίεση. Στον πίνακα 3.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της φαινόμενης πυκνότητας της παιπάλης σε 30 δείγματα.

Πίνακας 3.6: Μετρήσεις της φαινόμενης πυκνότητας

Παιπάλη	Δείγματα	Φαινόμενη πυκνότητα (gr/cm ³)
Λευκή χύδην	1	1,27
Λευκή χύδην	2	1,26
Λευκή χύδην	3	1,26
Λευκή χύδην	4	1,26
Λευκή χύδην	5	1,25
Λευκή χύδην	6	1,26
Παιπάλη	Δείγματα	Φαινόμενη πυκνότητα (gr/cm ³)
Μαύρη συμπαγής	1	1,59
Μαύρη συμπαγής	2	1,28
Μαύρη συμπαγής	3	1,31
Μαύρη συμπαγής	4	1,29
Μαύρη συμπαγής	5	1,30
Μαύρη συμπαγής	6	1,28

Παιπάλη	Δείγματα	Φαινόμενη πυκνότητα (gr/cm ³)
Καφέ συμπαγής	1	1,25
Καφέ συμπαγής	2	1,33
Καφέ συμπαγής	3	1,34
Καφέ συμπαγής	4	1,30
Καφέ συμπαγής	5	1,32
Καφέ συμπαγής	6	1,31
Παιπάλη	Δείγματα	Φαινόμενη πυκνότητα (gr/cm ³)
Μαύρη χύδην	1	1,26
Μαύρη χύδην	2	1,22
Μαύρη χύδην	3	1,23
Μαύρη χύδην	4	1,24
Μαύρη χύδην	5	1,25
Μαύρη χύδην	6	1,22
Παιπάλη	Δείγματα	Φαινόμενη πυκνότητα (gr/cm ³)
Καφέ χύδην	1	1,20
Καφέ χύδην	2	1,14
Καφέ χύδην	3	1,11
Καφέ χύδην	4	1,12
Καφέ χύδην	5	1,13
Καφέ χύδην	6	1,14

3.2.9 Μέτρηση του pH

Χρησιμοποιήθηκε πεχάμετρο που αποτελείται από το "ηλεκτρόδιο" και την ηλεκτρονική συσκευή που μετράει τη διαφορά δυναμικού και δίνει απ' ευθείας τη τιμή του pH . Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τρία ποτήρια ζέσεως, ένας αναδευτήρας και ένας

ογκομετρικός κύλινδρος ενώ οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν εκτός από το πεχάμετρο είναι η ζυγαριά ακριβείας.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την δημιουργία του διαλύματος είναι η εξής:

- Τοποθετούνται 20gr δείγματος και 40ml απιονισμένο νερό σε ένα ποτήρι ζέσεως και γίνεται ανάδευση με την χρήση αναδευτήρα.
- Έπειτα αφήνεται το διάλυμα να ηρεμήσει για 10 min έτσι ώστε να διαχωριστεί το αιώρημα από το ίζημα το οποίο καθιζάνει.
- Ακολουθεί δεύτερη ανάδευση.
- Τέλος αφήνεται πάλι το διάλυμα να ηρεμήσει για 5min και μετά πραγματοποιείται η μέτρηση του pH στο αιώρημα.

Τα βήματα που εφαρμόστηκαν για τη μέτρηση του pH είναι η εξής:

- Αρχικά το ηλεκτρόδιο πλένεται με απιονισμένο νερό χρησιμοποιώντας τον υδροβολέα και σκουπίζεται με απορροφητικό χαρτί (η διαδικασία αυτή γίνεται πάντα πριν από κάθε μέτρηση).
- Έπειτα βυθίζεται το ηλεκτρόδιο στο διάλυμα στο οποίο θα μετρηθεί το pH και τοποθετείται ο διακόπτης του ηλεκτρονικού μέρους του πεχαμέτρου στη θέση pH. Στην οθόνη του οργάνου εμφανίζεται η τιμή του pH η οποία σταθεροποιείται σε μικρό χρονικό διάστημα. Επίσης στη οθόνη εμφανίζεται και η τιμή της θερμοκρασίας.

Στον πίνακα 3.7 δίνονται τα αποτελέσματα από τη μέτρηση του pH σε 3 δείγματα.

Παρατηρείται ότι τα δείγματα αυτά είναι βασικά.

Πίνακας 3.7 : Αποτελέσματα από τη μέτρηση του pH.

Δείγμα	Βάρος Δείγματος (gr)	Μέτρηση pH	Θερμοκρασία (°C)
19	20	8,78	26,6
15	20	9,34	26,6
X.A.1	20	9,34	26,6

3.2.10 Προσδιορισμός του αδιάλυτου υπολείμματος σε HCl

Είναι η τεχνική διαχωρισμού της αδιάλυτης σε HCl στερεής φάσης από την διαλυόμενη (υγρή) με τη χρήση ηθμού. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται αποτελείται από διηθητικό χαρτί το οποίο λειτουργεί ως ηθμός, γυάλινο χωνί και κωνικές φιάλες.

Η διαδικασία παρασκευής του μίγματος στερεού-υγρού είναι η εξής:

- Αρχικά γίνεται αραιώση 20 ml HCl σε 40 ml απιονισμένο νερό.
- Σε ένα ποτήρι ζέσεως τοποθετούνται 10 gr δείγματος (στερεό) και τα 60 ml του αραιωμένου HCl με συνεχή ανάδευση μέχρι να διαλυθεί το λεπτόκοκκο υλικό του στερεού και να παύσει το στερεό να αφρίζει.
- Το παραπάνω μίγμα μεταφέρεται στον ηθμό κατά μικρά ποσά και με προηγούμενη ανακίνηση έτσι ώστε το ποσό του στερεού που θα μείνει στο ποτήρι ζέσεως να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο. Το υλικό αυτό μπορεί να ανακτηθεί με την προσθήκη απιονισμένου νερού.
- Στη συνέχεια το στερεό που παραμένει στον ηθμό τοποθετείται σε φούρνο θερμοκρασίας 55°C για 24 ώρες για ξήρανση και έπειτα ακολουθεί η ζύγιση του ιζήματος.

Στον πίνακα 3.8 φαίνονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της απλής διήθησης με αδιάλυτο HCl.

Πίνακας 3.8: Αποτελέσματα από τη μέτρηση του αδιάλυτου υπολείμματος σε HCl.

Δείγμα	Βάρος Δείγματος (gr)	Βάρος Διηθητικού Χαρτιού (gr)	Βάρος Ιζήματος (gr)	Μέσος Όρος	Ποσοστό Αδιάλυτου Υπολοίπου (%)
X.A.1	10	0,64	0,0579		
X.A.1	10	0,64	0,0915	0,0747	0,75
19	10	0,64	0,1978		
19	10	1,18	0,2576	0,2277	2,3
15	10	0,6+1,18=1,78	0,2334		
15	10	0,6+1,18=1,78	0,2177	0,2255	2,25

3.3 Αξιολόγηση των λεπτομερών παραπροϊόντων με τη χρήση κριτηρίων

Ο προσδιορισμός ενός κοιτάσματος σχετίζεται με τη διαδικασία της επεξεργασίας και είναι ίσως ο μόνος τρόπος να βρεθεί η σχέση μεταξύ εμπλουτισμού και παραγωγής οπότε και η βάση για μια οικονομική εκτίμηση.

Έχει αποδειχθεί ότι η καμπύλη του κέρδους μπορεί να αλλάξει αλματωδώς με τη βελτίωση των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων των υλικών. Αυτό επιτυγχάνεται με την επεξεργασία των υλικών και αυξάνει συγκρινόμενο με την βελτιστοποίηση του εμπλουτισμού και της παραγωγής. Από οικονομική άποψη η τιμή του προϊόντος εξαρτάται από τις ιδιότητές του σε σχέση με τις πιθανές χρήσεις του.

Ο Πίνακας 3.9 δείχνει ποια χαρακτηριστικά μπορεί ή πρέπει να έχει ένα ασβεστολιθικό υλικό. Όλοι αυτοί οι παράγοντες δεν ισχυρίζονται πληρότητα. Ωστόσο επηρεάζουν την αξία του ακατέργαστου υλικού. Έτσι δεν είναι η λεπτότητα ή η λευκότητα μόνο που προσδιορίζει την αξία ενός προϊόντος, αλλά ένας συνδυασμός των χαρακτηριστικών αυτών ιδιοτήτων.

Πίνακας 3.9: Χαρακτηριστικές ιδιότητες των ακατέργαστων ασβεστολιθικών υλικών.

Φυσικά Χαρακτηριστικά:
<u>Μηχανικές ιδιότητες:</u>
Αντοχές (θλίψη, εφελκυσμό, διάτμηση, κάμψη)
Αρχική εντατική κατάσταση
Μέτρο ελαστικότητας (συντελεστής του Young)
Λόγος Poisson
Συνοχή
Γωνία εσωτερικής τριβής
Υδατοαποροφητικότητα
Σκληρότητα

Πυκνότητα
<u>Ηλεκτρικές ιδιότητες:</u> Ηλεκτρική αντίσταση
<u>Ρεολογικές ιδιότητες:</u> Ιξώδες Απορρόφηση λαδιού
<u>Οπτικές ιδιότητες:</u> Λευκότητα Λάμψη Δείκτης διαθλαστικότητας
<u>Θερμικές ιδιότητες:</u> Θερμική αγωγιμότητα Θερμική διαστολή
<u>Κοκκομετρικές ιδιότητες:</u> Κατανομή μεγέθους κόκκων Ειδική επιφάνεια Σχήμα κόκκου Πορώδες
<u>Χημικά Χαρακτηριστικά:</u> Χημική σύσταση Χημική αντίσταση Τοξικότητα

Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες του ασβεστόλιθου που απαιτούνται από την αγορά απεικονίζονται στον Πίνακα 3.10. Μερικές από αυτές τις οριακές τιμές είναι απαιτήσεις από τη βιομηχανία ή βάση προδιαγραφών.

Συγκρίνοντας τις οριακές αυτές τιμές του πίνακα με τις χαρακτηριστικές ιδιότητες της παιπάλης που παρατέθηκαν στη προηγούμενη ενότητα, μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί σε ποια κλίμακα εφαρμογής το προϊόν που εξετάστηκε είναι χρήσιμο και συνεπώς, εμπορεύσιμο. 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.

Στον πίνακα αυτό εκτός από τις τιμές των ιδιοτήτων του υλικού, υπάρχουν και κάποιοι δείκτες που δείχνουν 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. Οι δείκτες αυτοί παίρνουν τιμές από 1 έως 10. Ο αριθμός 1 δεν εκφράζει καμία έννοια, ο αριθμός 5 έχει σημασία και ο αριθμός 10 έχει μεγάλη σημασία. Όταν η τιμή μιας ιδιότητας μπορεί εύκολα με κάποια επεξεργασία να προσεγγίσει το όριο των προδιαγραφών χρησιμοποιείται το σύμβολο (+), όταν υπάρχει δυσκολία χρησιμοποιείται το σύμβολο (-), ενώ σε μια ενδιάμεση περίπτωση το σύμβολο ($\pm$). 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. (Kolb, 2001).

Συγκρίνοντας τις τιμές των ιδιοτήτων της ασβεστολιθικής παιπάλης που προέρχονται από την επεξεργασία των εργαστηριακών μετρήσεων με εκείνες των προδιαγραφών του Πίνακα 3.10 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- το σύνολο των ανθρακικών ορυκτών και οι υπόλοιπες ενώσεις που προσδιορίστηκαν με τη χημική ανάλυση πληρούν τις προδιαγραφές
- η κατανομή μεγέθους των κόκκων είναι μικρότερη σε σχέση με τις οριακές τιμές του πίνακα
- οι μετρήσεις της ειδικής επιφάνειας με τη μέθοδο Blaine πληρούν τις προδιαγραφές
- η απώλεια πύρωσης και η μέτρηση του αδιάλυτου υπολείμματος σε HCl που έγιναν σε 3 μόνο δείγματα πληρούν τις προδιαγραφές
- το pH που μετρήθηκε σε 3 δείγματα δεν πληρεί τις προδιαγραφές
- η λευκότητα θεωρήθηκε <85 άρα δε τηρεί τις απαιτήσεις των οριακών τιμών.

Μια πιο αναλυτική αξιολόγηση της παιπάλης θα αναπτυχθεί στα επόμενα κεφάλαια

με τη χρήση ενός έμπειρου ασαφούς συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη πάντα τον Πίνακα 3.10.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

		Ορυκτολογικές και χημικές ιδιότητες											Φυσικές ιδιότητες					
	Σύνολο ανθρακικών	CaCO ₃	MgCO ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SO ₃	Αδιάλυτο HCl	Απώλεια πύρωσης	pH	Κατανομή μεγέθους σωματιδίων	Παραμένον (40 μm) d ₅₀ , d ₃₀ , d ₁₀	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 ₅₀ =5μm d ₉₀ =0.5μm d ₁₀ =15μm (+8)	4000-8000cm ² /g (+6)	93.5(±10)	15g/100g (+10)	
Βιομηχανία χάρτου (επικαλυπτικό)	>98 (-8)	-	-	<0.15 (+8)	-	-	-	-	<0.1 (-2)	<0.7(±8)	>44(-1)	9 (-8)	90%<2μm(+6)	0.01% d ₅₀ =0.8μm d ₉₀ =0.15μm d ₁₀ =2μm (+8)	>30000 cm ² /g (+7)	>94(±10)	-(+1)	
Βιομηχανία χρωμάτων και βερνικιών	-	-	>	<0.15 (+8)	-	-	-	-	-	<1.5(±7)	-	(+9)	<60μm <30μm (+8)	<0.1%(+8)	4000-8000cm ² /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 ₅₀ =5 μm d ₉₀ =0.5 μm d ₁₀ =15μm (+6)	4000-8000cm ² /g (+8)	>91(±8)	15-20g/100g (+10)	
Χημική βιομηχανία – περιβαλλοντικές 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 ² /g (+6)	-	>20g/100g (+10)	
Βιομηχανία λιπασμάτων	60 (-8)	-	Κυριαρχούν δολομικά (-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)	
Βιομηχανία σκυροδέματος	>90 (-8)	-	-	<0.15 (+8)	<1 (9)	-	-	<0.3 (+8)	<<	-	-	-	0.1-4mm (+8)	-	-	>85 (+9)	<< (-10)	

Μορφοποιήθηκε

Πίνακας 3.10: Προδιαγραφές και δείκτες για την αξιολόγηση λεπτόκοκκου ασβεστολιθικού υλικού (Kolb, 2001).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4_ο:

ΑΣΑΦΗ ΕΜΠΕΙΡΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ (FIS) ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ FIS ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΛΕΠΤΟΜΕΡΩΝ ΑΤΟΜΙΚΩΝ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Πριν από δύο χιλιάδες περίπου χρόνια ο Αριστοτέλης έθεσε τα θεμέλια της λογικής ως επιστήμη αναπτύσσοντας τις αρχές της Τυπικής Λογικής ή Λογικής Πρώτης Τάξης (Format Logic, First Order Logic). Η λογική αυτή βασίστηκε στο ότι ένας συλλογισμός είναι ή δεν είναι αληθής , ένα στοιχείο ανήκει ή δεν ανήκει σε ένα σύνολο, σύμφωνα με συγκεκριμένους κανόνες, όπως για παράδειγμα το σύνολο των ζυγών αριθμών.

Στη συνέχεια ακολούθησαν τα Λογικά Παράδοξα και η Αρχή της Απροσδιοριστίας τη δεκαετία του 1920 και συνέβαλαν στην ανάπτυξη της «διακριτής» λογικής από τον Lukasiewicz όπου το «σωστό» και το «λάθος» , η «αλήθεια» και το «ψεύδος» ενός συλλογισμού , θεωρούνταν οι ακραίες τιμές ενός πεδίου τιμών ,στο οποίο μπορούσαν να ορισθούν μια ή και περισσότερες ενδιάμεσες τιμές.

Η μετάβαση αυτή από το απόλυτα αληθές στο απόλυτα ψευδές με τη βοήθεια της «διακριτής» λογικής οδήγησε τη δεκαετία του 1960 τον Lotfi Zadeh στην ανάπτυξη μιας λογικής που να βασίζεται στη συνεχή μετάβαση ανάμεσα στις δύο αυτές τιμές. Η λογική αυτή είναι η Ασαφής Λογική και στηρίζεται στα ασαφή σύνολα.

Η ασαφής λογική έχει δυο διαφορετικές έννοιες. Υπό μια έννοια, η ασαφής λογική είναι ένα λογικό σύστημα το οποίο είναι επέκταση της κλασσικής λογικής, ενώ σε μια πιο ευρεία έννοια που κυρίως χρησιμοποιείται σήμερα, η ασαφής λογική είναι σχεδόν συνώνυμη με τη θεωρία των ασαφών συνόλων. Η θεωρία αυτή υποστηρίζει ότι τα στοιχεία ανήκουν σε διάφορα σύνολα, με διαφορετικούς βαθμούς συμμετοχής.

Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι ένα ασαφές σύνολο εκφράζει κατανομή δυνατότητας και ένας βαθμός συμμετοχής μιας τιμής σε ένα ασαφές σύνολο αποτελεί το βαθμό βεβαιότητας ότι η πρόταση που διατυπώνεται είναι αληθής και όχι κατανομή πιθανότητας.

Η ασαφής λογική είναι ένας τρόπος να αντιστοιχιστεί ένα ασαφές, όχι σαφώς ορισμένο στοιχείο , σε ένα σύνολο. Αντί να απαιτείται το στοιχείο να είναι μέλος του συνόλου ή του

συμπληρωματικού του, δέχεται να ανήκει κατά ένα ποσοστό σε διάφορα σύνολα. Η λογική
| αυτή είναι πιο κοντά στον τρόπο που ο άνθρωπος είναι ικανός να διαχειρίζεται έννοιες όχι

τόσο σαφείς και να φθάνει σε λογικά συμπεράσματα. Οι μαθηματικές έννοιες πίσω από την ασαφή λογική είναι πολύ απλές. Επιπλέον είναι ανεκτική σε ανακριβή στοιχεία. Ένα ακόμη πλεονέκτημά της είναι ότι μπορεί να ενσωματώσει εύκολα την εμπειρία των ειδικών. Η ασαφής λογική μπορεί να συνδυαστεί με τις συμβατικές τεχνικές ελέγχου, χωρίς απαραίτητα να τις αντικαθιστά. Σε πολλές περιπτώσεις τα ασαφή συστήματα αυξάνουν αυτές και απλοποιούν την εφαρμογή τους. Τέλος η ασαφής λογική είναι βασισμένη στη φυσική γλώσσα. Η βάση για την ασαφή λογική είναι η βάση για την ανθρώπινη επικοινωνία. Δεδομένου ότι η ασαφής λογική χτίζεται πάνω στις δομές της ποιοτικής περιγραφής που χρησιμοποιούνται στην καθημερινή γλώσσα, είναι εύχρηστη.

Η θεωρία των ασαφών συνόλων έχει μελετηθεί εκτενέστατα κατά τη διάρκεια των προηγούμενων 40 ετών και αναφέρεται πλέον σε προβλήματα: εφαρμοσμένης μηχανικής, επιχειρήσεων, ιατρικής και σε σχετικές επιστήμες υγείας, καθώς και στις φυσικές επιστήμες. Η χρήση της ως μεθοδολογία για τη διαμόρφωση και την ανάλυση συστημάτων απόφασης παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τους ερευνητές στη βιομηχανική εφαρμοσμένη μηχανική εξαιτίας της ικανότητάς της στα ποσοτικά και ποιοτικά πρότυπα προβλήματα τα οποία περιέχουν την ασάφεια και την ανακρίβεια. Η θεωρία λοιπόν των ασαφών συνόλων μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη γεφύρωση σε χάσματα διαμόρφωσης, σε περιγραφικά και καθοδηγητικά πρότυπα απόφασης στη βιομηχανική εφαρμοσμένη μηχανική.

4.2 Βασικές έννοιες και Ορισμοί

Στην κλασσική θεωρία συνόλων ένα σύνολο αποτελείται από ένα πεπερασμένο ή άπειρο αριθμό στοιχείων. Τα στοιχεία όλων των συνόλων ανήκουν σε ένα *υπερσύνολο αναφοράς* (*universe of discourse ή referential*). Τα στοιχεία ενός υπερσυνόλου αναφοράς που περιέχει το υπό μελέτη σύνολο A ανήκουν ή όχι στο σύνολο αυτό.

Αυτό μπορεί να εκφραστεί με τη χαρακτηριστική συνάρτηση του Bool (Boolean characteristic function) $f_A(x)$ του ασαφούς συνόλου A (Yager and Zadeh, 1992)

$$f_A(x) = 1, \text{ αν } x \in A$$

$$f_A(x) = 0, \text{ αν } x \notin A \quad (4.1)$$

που ορίζει την τιμή 1 σε κάθε στοιχείο που ανήκει στο σύνολο A και την τιμή 0 σε κάθε στοιχείο που δεν ανήκει στο σύνολο A.

Η ασάφεια μπορεί να εισαχθεί στη θεωρία των συνόλων εάν γενικευθεί η χαρακτηριστική συνάρτηση έτσι ώστε να λαμβάνει άπειρο αριθμό τιμών στο διάστημα $[0,1]$.

Αν X είναι το υπερσύνολο αναφοράς με επί μέρους στοιχεία x , τότε $X=\{x\}$. Ένα ασαφές σύνολο A του υπερσυνόλου αναφοράς X , μπορεί να εκφραστεί συμβολικά ως ένα σύνολο διατεταγμένων ζευγών (ordered pairs) (Harris et al., 1993):

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\} \quad (4.2)$$

Όπου $\mu_A(x)$ είναι η συνάρτηση συμμετοχής (*membership function*) του x στο σύνολο A και είναι μια απεικόνιση από το υπερσύνολο αναφοράς X στο κλειστό διάστημα $[0,1]$. Η συνάρτηση συμμετοχής υποδεικνύει το βαθμό κατά τον οποίο το στοιχείο x ανήκει στο σύνολο A (Harris et al., 1993), δηλαδή :

$$\mu_A(x) : X \rightarrow [0,1] \quad (4.3)$$

4.2.1 Λογικοί Τελεστές

Ο ασαφής λογικός συλλογισμός είναι σημαντικός γιατί αποτελεί ένα υπερσύνολο της τυποποιημένης λογικής του Bool. Δηλαδή αν κρατηθούν ασαφείς τιμές στα άκρα τους δηλαδή 1 (απολύτως αληθής), και 0 (απολύτως ψευδής), θα ισχύουν οι τυποποιημένες λογικές διαδικασίες. Ως παράδειγμα εξετάζονται τα πρότυπα αλήθειας στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 4.1: Λογικοί τελεστές AND , OR , NOT (Fuzzy Toolbox της Matlab)

A	B	A and B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

AND

A	B	A or B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

OR

A	not A
0	1
1	0

NOT

Θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι στην ασαφή λογική η αλήθεια οποιασδήποτε δήλωσης είναι ένα θέμα βαθμού. Οι τιμές εισόδου μπορεί να είναι πραγματικοί αριθμοί μεταξύ 0 και 1. Η δήλωση $A \text{ AND } B$ όπου τα A και B κυμαίνονται στο διάστημα $[0,1]$, επιλύεται με την χρήση της συνάρτησης $\min(A,B)$. Ακολουθώντας τον ίδιο συλλογισμό, μπορεί να αντικατασταθεί η λειτουργία OR με την λειτουργία $\max$ έτσι ώστε η δήλωση $A \text{ OR } B$ να γίνει

ισοδύναμη με τη συνάρτηση $\max(A, B)$. Τέλος, η δήλωση $NOT A$ γίνεται ισοδύναμη με τη λειτουργία $1-A$. Ο πίνακας αλήθειας είναι απολύτως αμετάβλητος από αυτήν την αντικατάσταση.

Πίνακας 4.2: Αντικατάσταση των λογικών τελεστών (Fuzzy Toolbox της Matlab)

A	B	$\min(A, B)$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

AND

A	B	$\max(A, B)$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

OR

A	$1 - A$
0	1
1	0

NOT

Επιπλέον, δεδομένου ότι υπάρχει μια συνάρτηση πίσω από τον πίνακα αλήθειας παρά ακριβώς ο ίδιος ο πίνακας αλήθειας, είναι δυνατό να εξεταστούν και τιμές εκτός από 1 και 0.

4.2.2 Πράξεις μεταξύ ασαφή συνόλων

Μεταξύ ασαφή συνόλων ορίζονται ορισμένες πράξεις οι βασικότερες από τις οποίες είναι:

A) Η ένωση (union)

B) Η τομή (intersection)

Γ) Το συμπλήρωμα ενός ασαφούς συνόλου (complement)

Έστω δυο ασαφή σύνολα A, B, που ορίζονται στο πεδίο ορισμού X. Με συναρτήσεις συμμετοχής $\mu_A(x)$ και $\mu_B(x)$.

- Η ένωση δίνεται από την σχέση:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)], \forall x \in X \quad (4.4)$$

- Η τομή δίνεται από την σχέση:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)], \forall x \in X \quad (4.5)$$

- Το συμπλήρωμα (complement) $\bar{A}$: ενός ασαφούς συνόλου A, είναι ένα νέο ασαφές σύνολο με συνάρτηση συμμετοχής :

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x), \forall x \in X \quad (4.6)$$

4.2.3 Γλωσσικές Μεταβλητές

Γλωσσική μεταβλητή (*linguistic variable*) καλείται μια ασαφής μεταβλητή (*fuzzy variable*) όταν παίρνει τιμές που είναι προτάσεις μιας φυσικής ή τεχνητής γλώσσας για να περιγράψει τα ασαφή σύνολα. Συνήθως είναι ένας σύνθετος όρος αποτελούμενος από επιμέρους όρους. Οι όροι αυτοί διαίρουνται στις ακόλουθες κατηγορίες:

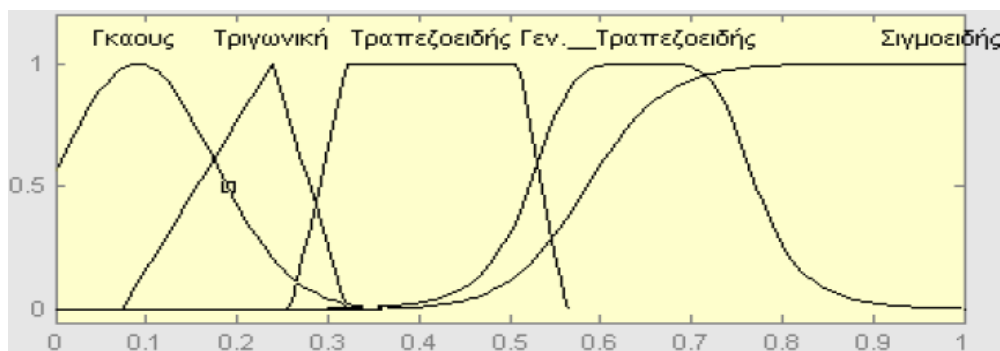
- *Πρωτεύοντες όροι (primary terms)*: είναι όροι ασαφών συνόλων του υπερσυνόλου αναφοράς.
- *Την άρνηση ΟΧΙ και τα συνδετικά (connectives) ΚΑΙ και Ή.*
- *Γλωσσικά περιγράμματα (linguistic descriptors)* όπως πολύ , ελαφρά , σχετικά.

Τα συνδετικά ΚΑΙ και Ή και η άρνηση ΟΧΙ, μπορούν να ορισθούν μέσω των πράξεων του συμπληρώματος, της ένωσης και της τομής.

Τα γλωσσικά περιγράμματα από την άλλη χρησιμεύουν στη δημιουργία ενός ευρύτερου συνόλου γλωσσικών τιμών μιας γλωσσικής μεταβλητής από μια μικρότερη συλλογή πρωτεύοντων όρων. Χρησιμοποιώντας το περίγραμμα *πολύ* σε συνδυασμό με τα συνδετικά ΟΧΙ, ΚΑΙ και τον πρωτεύοντα όρο *μεγάλο*, μπορούμε να δημιουργήσουμε τα επιπλέον ασαφή σύνολα *πολύ μεγάλο* , *πάρα πολύ μεγάλο*, *ΟΧΙ πολύ μεγάλο*, *μεγάλο ΚΑΙ ΟΧΙ πολύ μεγάλο*, κλπ.

4.2.4 Συναρτήσεις Συμμετοχής

Η μορφή των συναρτήσεων συμμετοχής (*membership function*) μπορεί να είναι: τραπεζοειδής που στο λογισμικό Matlab έχει το όνομα *trapmf*, τριγωνική (*trimf*), Γκαουσιανή (*gaussmf*), γενικευμένη τραπεζοειδής ή ακόμη και σιγμοειδής (*sigmf*). Διάφοροι τύποι συναρτήσεων συμμετοχής που αναπαριστούν ασαφή σύνολα απεικονίζονται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Τύποι συναρτήσεων συμμετοχής.

Η συνάρτηση συμμετοχής προκειμένου να αναπαραστήσει ένα ασαφές σύνολο θα πρέπει να πληρή τα εξής: το πεδίο τιμών της να είναι το σύνολο $[0,1]$ και να είναι καμπύλη.

4.3 Ο ασαφής κανόνας

Εννοιολογικά, ο ασαφής κανόνας είναι ένας μηχανισμός αναπαράστασης της γνώσης, ο οποίος προσιδιάζει στον ανθρώπινο τρόπο σκέψης. Τα ασαφή σύνολα που εκφράζουν λεκτικούς όρους συνδυάζονται μεταξύ τους και δημιουργούν ασαφείς κανόνες που αναπαριστούν τη γνώση που υπάρχει για το σύστημα. Ένας ασαφής κανόνας αποτελείται από δύο βασικά μέρη :

- α) το τμήμα υπόθεσης (premise part) και
- β) το τμήμα απόδοσης ή απόφασης (consequent part).

Ένας απλός κανόνας είναι της μορφής: If x is A then y is B

Το τμήμα if x is A είναι το τμήμα υπόθεσης και το τμήμα then y is B είναι το τμήμα απόφασης ή συμπεράσματος. Όπου A και B ασαφή σύνολα. x είναι η τιμή μιας μεταβλητής εισόδου, η οποία ασαφοποιείται (*fuzzyfication*), δηλαδή αποκτά ένα βαθμό συμμετοχής στο ασαφές σύνολο A. y είναι η έξοδος του συστήματος που εκφράζει την απόφαση του κανόνα και παρέχεται από το μηχανισμό του συμπεράσματος (*inference*) σε ασαφή μορφή. Στη συνέχεια το ασαφές συμπέρασμα από-ασαφοποιείται με το μηχανισμό της αποασαφοποίησης (*defuzzyfication*), και προκύπτει μια τιμή (crisp value) που είναι το τελικό αριθμητικό συμπέρασμα που μπορεί να χειριστεί μια υπολογιστική μηχανή.

Υπάρχουν δυο τύποι ασαφών συστημάτων συμπεράσματος που μπορούν να εφαρμοστούν στην Εργαλειοθήκη της Ασαφούς Λογικής (Fuzzy Logic Toolbox): ο τύπος **Mamdani** και ο τύπος **Sugeno**. Αυτοί οι τύποι διαφέρουν κυρίως στον τρόπο που καθορίζονται τα αποτελέσματα.

Η ασαφής μέθοδος συμπεράσματος του Mamdani είναι η πιο συνηθισμένη και είναι μεταξύ των πρώτων συστημάτων ελέγχου που χτίστηκαν χρησιμοποιώντας τη θεωρία των ασαφών συνόλων. Το συμπέρασμα του τύπου του Mamdani αναμένει τις συναρτήσεις συμμετοχής εξόδου να είναι ασαφή σύνολα. Μετά τη διαδικασία συνάθροισης, υπάρχει ένα ασαφές σύνολο για κάθε μεταβλητή εξόδου που χρειάζεται αποασαφοποίηση.

Τα συστήματα τύπου Sugeno μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν οι συναρτήσεις συμμετοχής στην έξοδο του συστήματος είναι είτε γραμμικές είτε σταθερές.

4.4 Συστήματα ασαφούς επαγωγής

Ασαφής επαγωγή είναι η διαδικασία αντιστοίχισης μιας δεδομένης εισόδου σε μια έξοδο, χρησιμοποιώντας την ασαφή λογική. Η αντιστοίχιση αυτή παρέχει μια βάση με την οποία μπορούν να ληφθούν αποφάσεις. Η διαδικασία της ασαφούς επαγωγής εμπεριέχει όλες τις έννοιες που προαναφέρθηκαν : συναρτήσεις συμμετοχής, τελεστές ασαφούς λογικής και κανόνες if-then.

Τα συστήματα ασαφούς επαγωγής βρήκαν επιτυχώς εφαρμογή σε τομείς όπως: ο αυτόματος έλεγχος, η κατηγοριοποίηση δεδομένων, η ανάλυση αποφάσεων και τα έμπειρα συστήματα.

Εξαιτίας της ιδιαίτερης φύσης τους, τα συστήματα ασαφούς επαγωγής συνδέονται με έναν αριθμό ονομάτων όπως είναι: ασαφή συστήματα που βασίζονται σε κανόνες (fuzzy-rule-based systems), ασαφές έμπειρο σύστημα (fuzzy expert systems), ασαφές μοντέλο (fuzzy modelling) και απλούστερα ασαφή συστήματα.

Οι βασικοί μηχανισμοί του συστήματος ασαφούς λογικής είναι οι εξής:

- **Ασαφοποίηση:** είναι η διαδικασία μετατροπής των αρχικών δεδομένων σε ασαφείς αριθμούς μέσω των συναρτήσεων συμμετοχής.
- **Χρήση των λογικών τελεστών,** όταν ένας κανόνας έχει πάνω από ένα μέρος τότε εφαρμόζονται οι ασαφείς τελεστές για να καθοριστεί ένας αριθμός που αντιπροσωπεύει το αποτέλεσμα για αυτόν τον κανόνα. Αυτός ο αριθμός εφαρμόζεται στη συνάρτηση εξόδου. Η είσοδος στον ασαφή τελεστή είναι δυο ή περισσότερες τιμές συμμετοχής από τις ασαφοποιημένες μεταβλητές εισόδου. Η έξοδος είναι μια τιμή αλήθειας.

Το Fuzzy Toolbox της Matlab υποστηρίζει δυο μεθόδους για την λειτουργία **AND**: **min(minimum)** και **prod(product)** και δυο μεθόδους για την λειτουργία **OR**: **max(maximum)** και **probor (probabistic)**.

- **Μέθοδος ασαφούς συνεπαγωγής:** είναι ο σχηματισμός του αποτελέσματος (ενός ασαφούς συνόλου) βασιζόμενος στο αίτιο (έναν μοναδικό αριθμό). Η είσοδος για την διαδικασία συνεπαγωγής είναι ένας αριθμός που προέρχεται από τα αίτια και η έξοδος είναι ένα ασαφές σύνολο. Η συνεπαγωγή χρησιμοποιείται σε κάθε κανόνα.

Το Fuzzy Toolbox της Matlab υποστηρίζει δυο μεθόδους για την μέθοδο της ασαφούς συνεπαγωγής: **min(minimum)** και **prod(product)**.

- **Άθροιση των εξόδων:** είναι η διαδικασία του συνδυασμού όλων των ασαφών συνόλων που αντιπροσωπεύουν την έξοδο κάθε κανόνα, σε ένα και μόνο ασαφές σύνολο, ώστε να γίνει μετά η αποασαφοποίηση. Η άθροιση αυτή γίνεται μόνο μια φορά για κάθε κανόνα και δεν έχει σημασία η σειρά με την οποία γίνεται. Το Fuzzy Toolbox της Matlab

υποστηρίζει τρεις ενσωματωμένες μεθόδους: *max (maximum)*, *probor (probabistic)* και *sum* (άθροιση της εξόδου από κάθε κανόνα).

▪ **Αποασαφοποίηση:** είναι η διαδικασία που παράγει μια αυστηρά αριθμητική τιμή από ένα ασαφές σύνολο. Είναι δηλαδή μια απεικόνιση, η οποία απεικονίζει ένα ασαφές σύνολο σε ένα πραγματικό αριθμό. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές αποασαφοποίησης, αλλά θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι δεν υπάρχει καμιά θεωρητική βάση για αυτές. Το βασικό κριτήριο επιλογής της κατάλληλης τεχνικής για τον έλεγχο των διαδικασιών είναι η υπολογιστική απλότητα. Με βάση το κριτήριο αυτό έχουν προταθεί οι εξής μέθοδοι:

- a) *Αποασαφοποίηση άθροισης των μεγίστων (sum of maximum or som):* Η μέθοδος αυτή υπολογίζει το άθροισμα των μεγίστων τιμών αλλά δε δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα ειδικά όταν υπάρχουν πολλαπλά τοπικά μέγιστα.
- b) *Αποασαφοποίηση μέσου όρου των μεγίστων (mean of maximum or mom):* Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή επιλέγεται ως τιμή ο μέσος όρος των τιμών των σημείων που παρουσιάζουν μέγιστο στο σύνολο εξόδου.
- c) *Αποασαφοποίηση κέντρου βάρους (center of gravity – COG defuzzifier):* Πρόκειται για την πιο πολύπλοκη υπολογιστικά μέθοδο, που επιλέγει ως τιμή, το σημείο που αποτελεί το κέντρο βάρους του σχήματος. Μπορεί να ορισθεί με την εξής σχέση:

$$x^* = \frac{\int x \cdot \mu(x) dx}{\int \mu(x) dx}$$

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι παρουσιάζει τις περισσότερες φορές ομαλή συμπεριφορά ελέγχου. Η κύρια ιδέα της είναι να λαμβάνονται υπόψη οι κανόνες σύμφωνα με το βαθμό δυνατότητας εφαρμογής τους. Ένα μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι μπορεί με δυσκολία να δικαιολογηθεί σημασιολογικά. Ακόμη ο υπολογισμός της μπορεί να χρειαστεί περισσότερο χρόνο σε σχέση με άλλες μεθόδους (Kruse et al., 1994). Όμως η τεχνική αυτή δίνει θεωρητικά καλύτερα αποτελέσματα από τις άλλες.

4.5 Η ασαφής Εργαλειοθήκη του MATLAB® (Fuzzy Toolbox)

Το MATLAB® εκτός από τη μεγάλη ευκολία που παρέχει σχετικά με την επεξεργασία και την απεικόνιση δεδομένων, είναι εφοδιασμένο με ένα σύνολο από εργαλειοθήκες (toolboxes) που είναι ολοκληρωμένα περιβάλλοντα και με βιβλιοθήκες που δίνουν τεράστια ευκολία σχεδιασμού και ανάλυσης σε εξειδικευμένα πεδία της επιστήμης. Ειδικότερα η Εργαλειοθήκη

Ασαφούς λογικής (Fuzzy Toolbox) δίνει τη δυνατότητα σχεδιασμού ασαφών συστημάτων και χρησιμοποιεί πέντε βασικά εργαλεία γραφικής διεπαφής με τον χρήστη (Graphical User Interface-GUI) για να δημιουργεί, να αλλάζει και να απεικονίζει τα ασαφή συστήματα:

- O FIS Editor - (Fuzzy Inference System) (Σύστημα Ασαφούς Συνεπαγωγής): χειρίζεται τις υψηλού επιπέδου αποφάσεις του συστήματος όπως : τον αριθμό των μεταβλητών εισόδου και εξόδου, την ονομασία τους κτλ.
- O Membership Function Editor (Συντάκτης Συναρτήσεων Συμμετοχής): χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των μορφών όλων των συναρτήσεων συμμετοχής που σχετίζονται με κάθε μεταβλητή.
- O Rule Editor (Συντάκτης Κανόνων): δημιουργεί και μετατρέπει τον κατάλογο των κανόνων που καθορίζουν το σύστημα.
- O Rule Viewer (Επισκόπηση Κανόνων): είναι η παρουσίαση ενός διαγράμματος ασαφούς συνεπαγωγής. Δείχνει ποιοι κανόνες είναι ενεργοποιημένοι (για συγκεκριμένες τιμές εισόδου) ή πως η μορφή της κάθε συνάρτησης συμμετοχής επηρεάζει τα αποτελέσματα.
- O Surface Viewer (Επισκόπηση Επιφανειών): δείχνει πως η έξοδος εξαρτάται από μια είσοδο ή από δυο εισόδους.

O Membership Function Editor και ο Rule Editor δεν χρησιμοποιούνται άμεσα για τον καθορισμό ή τη μετατροπή των συστατικών ενός ασαφούς συστήματος. Απεικονίζουν παραστατικά τη δομή και λειτουργία του ασαφούς συστήματος και διευκολύνουν τον χρήστη να προβεί σε διορθώσεις – βελτιώσεις του συστήματος.

Οι πέντε αυτοί μηχανισμοί GUI ανταλλάσσουν πληροφορίες. Για κάθε ασαφές σύστημα ένας ή και όλοι μπορεί να είναι ανοιχτοί. Αν περισσότεροι από ένας από αυτούς τους μηχανισμούς είναι ανοιχτοί, οι υπόλοιποι αναγνωρίζουν την ύπαρξη των άλλων και ανανεώνουν αν χρειάζεται τα σχετικά παράθυρα. Για παράδειγμα, αν αλλάξουν τα ονόματα των συναρτήσεων συμμετοχής στον Membership Function Editor αυτές οι αλλαγές φαίνονται στον Rule Editor.

Ακόμη οι FIS Editor, Membership Function Editor και Rule Editor μπορούν όχι μόνο να διαβάζουν αλλά να επιφέρουν και αλλαγές στα δεδομένα του συστήματος, ενώ οι Rule Viewer και Surface Viewer δεν έχουν αυτή τη δυνατότητα.

4.6 Ανάπτυξη του έμπειρου ασαφούς συστήματος για την αξιολόγηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών λεπτομερών παραπροϊόντων

Το έμπειρο ασαφές σύστημα (FIS) που αναπτύχθηκε για την αξιολόγηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών της παιπάλης, βασίζεται στις οριακές τιμές των λειτουργικών ιδιοτήτων των λεπτομερών ασβεστολιθικών υλικών που απαιτούνται από την αγορά και απεικονίζονται στον Πίνακα 3.10. Για το σχεδιασμό του συστήματος πραγματοποιήθηκαν τα εξής βήματα:

I. Λεκτικός διαμερισμός των εισόδων και εξόδων: Πρόκειται για την απόδοση των μεταβλητών εισόδου και εξόδου με λεκτικούς όρους. Το FIS που δημιουργήθηκε αποτελείται από 12 εισόδους οι οποίες αποτελούν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της παιπάλης και 10 εξόδους που αποτελούν τις βιομηχανίες στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παιπάλη ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της.

II. Διατύπωση των κανόνων: Μετά τον λεκτικό διαμερισμό των εισόδων και εξόδων τα ασαφή σύνολα αποθηκεύονται στον υπολογιστή υπό μορφή συναρτήσεων και στη συνέχεια διατυπώνονται οι κανόνες (if-then).

III. Καθορισμός του τύπου της ασαφούς συνεπαγωγής (fuzzy implication): Οι παράμετροι του FIS για τους κανόνες ασαφούς συνεπαγωγής και άθροισης των εξόδων είναι:

- Για την λειτουργία AND χρησιμοποιήθηκε η $\min$ που είναι η μικρότερη από τις τιμές που συνδέει.
- Για την λειτουργία OR χρησιμοποιήθηκε η $\max$ που είναι η μεγαλύτερη από τις τιμές που συνδέει.

IV. Μέθοδος αποασαφοποίησης (defuzzification). Η διαδικασία της αποασαφοποίησης είναι αντίθετη αυτής της ασαφοποίησης και παράγει μια αυστηρά αριθμητική τιμή (crisp τιμή) από ένα ασαφές σύνολο. Δηλαδή απεικονίζει ένα ασαφές σύνολο σε ένα πραγματικό αριθμό. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι αποασαφοποίησης αλλά αυτές που επιλέχθηκαν είναι η αποασαφοποίηση κέντρου βάρους (centroid) και η αποασαφοποίηση του μέσου όρου των μεγίστων (mom).

Ο τύπος της συνάρτησης συμμετοχής που χρησιμοποιήθηκε στις εισόδους είναι τραπεζοειδής (trapmf) και δείχνει τα όρια (low , high) των ιδιοτήτων για κάθε βιομηχανία ανάλογα με τις προδιαγραφές. Ενώ ο τύπος της συνάρτησης συμμετοχής που εφαρμόστηκε στις εξόδους είναι τριγωνική (trimf) και δείχνει αν το υλικό είναι κατάλληλο ή όχι (suitable , no suitable) στις συγκεκριμένες βιομηχανίες. Όσο πιο κοντά στην τιμή 1 τόσο αυξάνεται η πιθανότητα το υλικό να είναι κατάλληλο στις βιομηχανίες. Η πιθανότητα αυτή στο FIS λαμβάνει όλες τις πιθανές τιμές στο διάστημα $[0,1]$ σε αντίθεση με την κλασσική μέθοδο που λαμβάνει τις τιμές 0 για μη κατάλληλο και 1 για κατάλληλο.

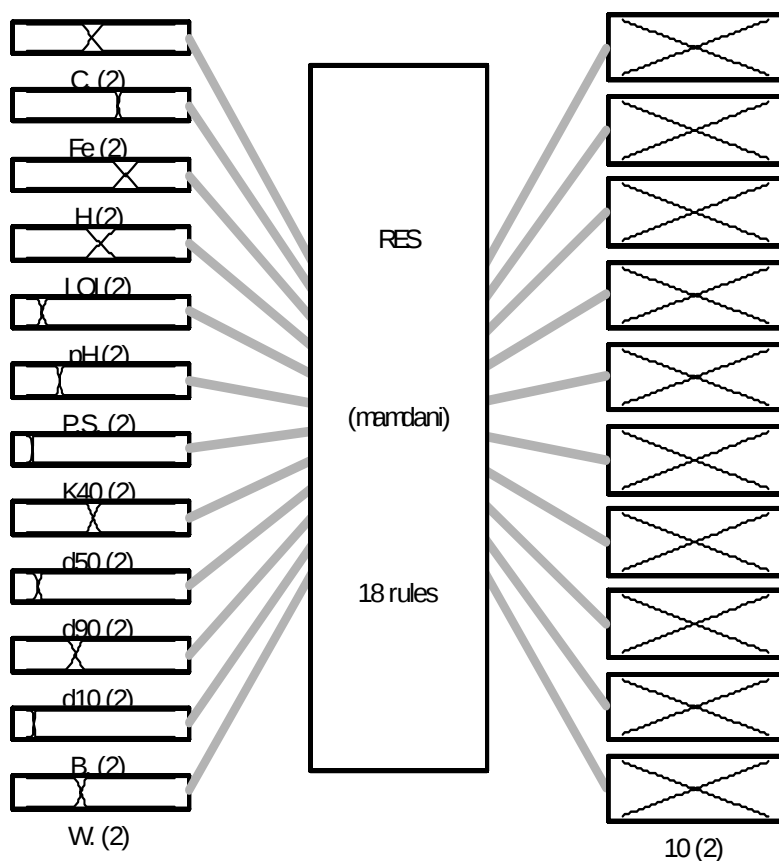
Οι είσοδοι του συστήματος που επιλέχθηκαν βάση των προδιαγραφών του Πίνακα 3.10 είναι οι εξής:

- Το σύνολο των ανθρακικών ορυκτών που στο σύστημα έχει το σύμβολο C.
- Το Fe_2O_3 που στο σύστημα έχει το σύμβολο Fe.
- Το αδιάλυτο HCl που στο σύστημα έχει το σύμβολο H.
- Η απώλεια πύρωσης που στο σύστημα έχει το σύμβολο LOI.
- Το pH που στο σύστημα έχει το σύμβολο pH.
- Η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων που στο σύστημα έχει το σύμβολο P.S.
- Το ποσοστό που παραμένει στο κόσκινο με διάμετρο κόκκου $40\mu\text{m}$ και στο σύστημα έχει το σύμβολο K_{40} .
- Η διάμετρος των κόκκων που παραμένουν στο κόσκινο σε ποσοστό 50% και στο σύστημα έχει το σύμβολο d_{50} .
- Η διάμετρος των κόκκων που παραμένουν στο κόσκινο σε ποσοστό 90% και στο σύστημα έχει το σύμβολο d_{90} .
- Η διάμετρος των κόκκων που παραμένουν στο κόσκινο σε ποσοστό 10% και στο σύστημα έχει το σύμβολο d_{10} .
- Η μέτρηση της ειδικής επιφάνειας (κατά Blaine) που στο σύστημα έχει το σύμβολο B.
- Η λευκότητα που στο σύστημα έχει το σύμβολο W.

Αντίστοιχα οι έξοδοι του συστήματος που επιλέχθηκαν είναι οι εξής:

- Η βιομηχανία χάρτου (filler) που στο σύστημα είναι ο αριθμός 1.
- Η βιομηχανία χάρτου (επικάλυμμα) που στο σύστημα είναι ο αριθμός 2.
- Η βιομηχανία χρωμάτων και βερνικιών που στο σύστημα είναι ο αριθμός 3.
- Η βιομηχανία πλαστικών που στο σύστημα είναι ο αριθμός 4.
- Η χημική βιομηχανία-περιβαλλοντικές τεχνολογίες που στο σύστημα είναι ο αριθμός 5.
- Η βιομηχανία τροφίμων και ζωοτροφών που στο σύστημα είναι ο αριθμός 6.
- Η βιομηχανία λιπασμάτων που στο σύστημα είναι ο αριθμός 7.
- Η βιομηχανία παραγωγής σιδήρου που στο σύστημα είναι ο αριθμός 8.
- Η βιομηχανία γυαλιού που στο σύστημα είναι ο αριθμός 9.
- Η βιομηχανία σκυροδέματος που στο σύστημα είναι ο αριθμός 10.

Ο τύπος του ασαφούς συστήματος συμπεράσματος που χρησιμοποιήθηκε βασίζεται στη μέθοδο του Mamdani όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2: Το έμπειρο ασαφές σύστημα με τις 12 εισόδους και τις 10 εξόδους.

Ακολουθεί μια αναλυτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών των εισόδων και των εξόδων του συστήματος.

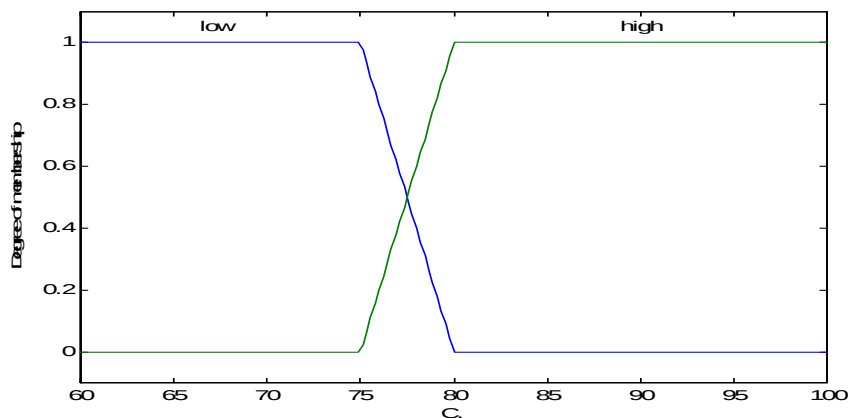
1) Σύνολο ανθρακικών:

Για την είσοδο " C " που αναφέρεται στο σύνολο των ανθρακικών ορυκτών που περιέχονται στην παιπάλη εξετάστηκαν οι τιμές που κυμαίνονται στο διάστημα [60 100]. Στο διάστημα [60 80] θεωρείται ότι το υλικό έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε ανθρακικά ενώ στο διάστημα (75 100] θεωρείται υψηλή περιεκτικότητα ανθρακικών στο υλικό.

Χρησιμοποιήθηκαν δυο τραπεζοειδείς συναρτήσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3. Στον οριζόντιο άξονα είναι οι τιμές του συνόλου των ανθρακικών, ενώ στον κατακόρυφο άξονα είναι ο βαθμός συμμετοχής κάθε τιμής. Επομένως σε κάθε τιμή του συνόλου των ανθρακικών αποδίδονται ένας ή περισσότεροι βαθμοί συμμετοχής που κυμαίνονται σε διάστημα [0 1]. Με τον τρόπο αυτό γίνεται η αντιστοίχιση των αριθμητικών δεδομένων του συνόλου των ανθρακικών σε ασαφείς αριθμούς.

Οι τιμές αυτών των συναρτήσεων χαρακτηρίζονται από τέσσερις αριθμούς που δείχνουν τα όρια και τις κορυφές του αντίστοιχου τραπεζίου και είναι οι εξής:

- low [24 56 75 80]
- high [75 80 104 136]



Σχήμα 4.3: Διαμερισμός της εισόδου " C " (σύνολο ανθρακικών ορυκτών %) σε λεκτικούς όρους.

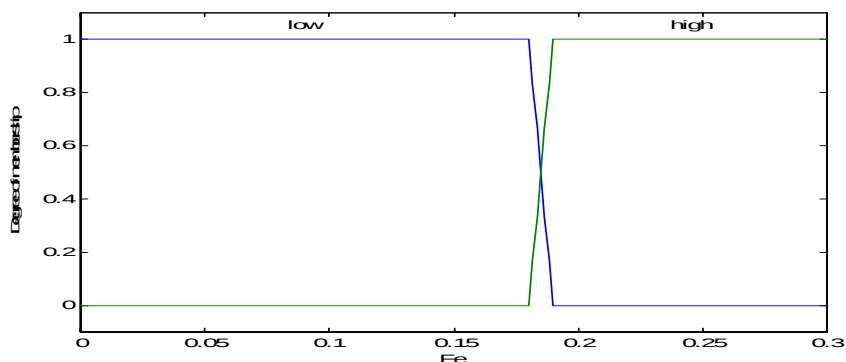
2) Fe_2O_3 :

Για την είσοδο "Fe" που αναφέρεται στο περιεχόμενο του Fe_2O_3 που περιέχει η παιπάλη, εξετάστηκαν οι τιμές που κυμαίνονται στο διάστημα [0 0.3]. Στο διάστημα [0 0.19] θεωρείται ότι το υλικό έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε Fe_2O_3 ενώ στο διάστημα (0.19 0.3] θεωρείται υψηλή περιεκτικότητα σε Fe_2O_3 στο υλικό.

Χρησιμοποιήθηκαν δυο τραπεζοειδείς συναρτήσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4. Στον οριζόντιο άξονα είναι οι τιμές του Fe_2O_3 (%), ενώ στον κατακόρυφο άξονα είναι ο βαθμός συμμετοχής κάθε τιμής.

Οι τιμές αυτών των συναρτήσεων χαρακτηρίζονται από τέσσερις αριθμούς που δείχνουν τα όρια και τις κορυφές του αντίστοιχου τραπεζίου και είναι οι εξής:

- low [-0.27 -0.03 0.18 0.19]
- high [0.18 0.19 0.33 0.57]



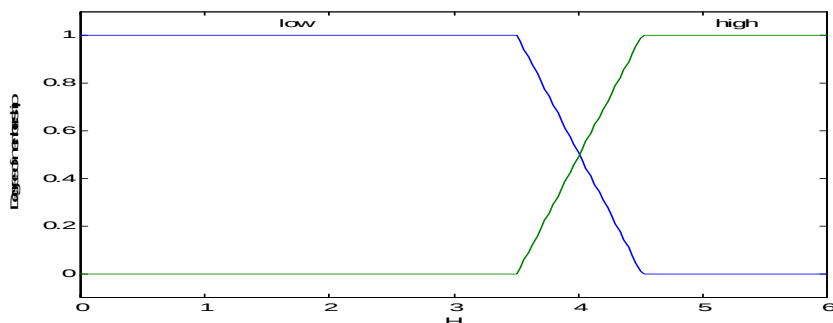
Σχήμα 4.4: Διαμερισμός της εισόδου "Fe" (Fe_2O_3 %) σε λεκτικούς όρους.

3) Αδιάλυτο υπόλειμμα σε HCl:

Για την είσοδο "H" που αναφέρεται στο περιεχόμενο των αδιάλυτων σε HCl συστατικών που περιέχει η παιπάλη, εξετάστηκαν οι τιμές που κυμαίνονται στο διάστημα [0 6]. Στο διάστημα [0 4.51] θεωρείται ότι το υλικό έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε αδιάλυτο στο HCl συστατικά ενώ στο διάστημα (3.51 6.6] θεωρείται υψηλή. Χρησιμοποιήθηκαν δυο τραπεζοειδείς συναρτήσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5. Στον οριζόντιο άξονα είναι οι τιμές του αδιάλυτου υπολείμματος σε HCl (%), ενώ στον κατακόρυφο άξονα είναι ο βαθμός συμμετοχής κάθε τιμής.

Οι τιμές αυτών των συναρτήσεων χαρακτηρίζονται από τέσσερις αριθμούς που δείχνουν τα όρια και τις κορυφές του αντίστοιχου τραπεζίου και είναι οι εξής:

- low [-5.4 -0.6 3.51 4.51]
- high [3.51 4.51 6.6 11.4]



Σχήμα 4.5: Διαμερισμός της εισόδου "H" (αδιάλυτο υπόλειμμα σε HCl %) σε λεκτικούς όρους.

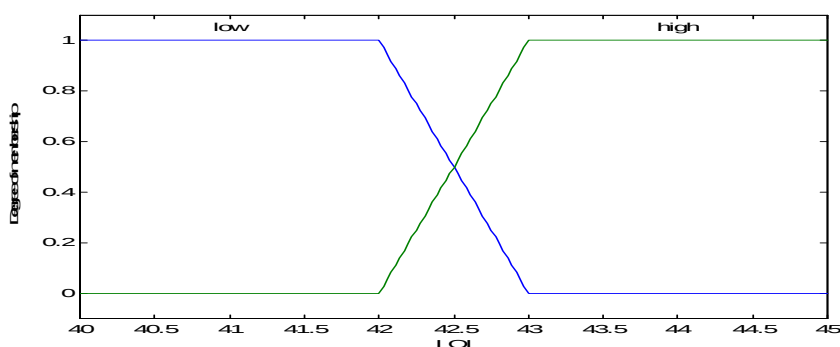
4) Απώλεια πύρωσης στους 1050 °C:

Για την είσοδο "LOI" που αναφέρεται στην απώλεια πύρωσης στους 1050 °C που μπορεί να έχει η παιπάλη, εξετάστηκαν οι τιμές που κυμαίνονται στο διάστημα [40 45]. Στο διάστημα [40 43) θεωρείται ότι το υλικό έχει χαμηλή απώλεια πύρωσης ενώ στο διάστημα (42 45] θεωρείται ότι το υλικό έχει μεγάλη απώλεια πύρωσης.

Χρησιμοποιήθηκαν δυο τραπεζοειδείς συναρτήσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6. Στον οριζόντιο άξονα είναι οι τιμές της απώλειας πύρωσης (%), ενώ στον κατακόρυφο άξονα είναι ο βαθμός συμμετοχής κάθε τιμής.

Οι τιμές αυτών των συναρτήσεων χαρακτηρίζονται από τέσσερις αριθμούς που δείχνουν τα όρια και τις κορυφές του αντίστοιχου τραπεζίου και είναι οι εξής:

- low [35.5 39.5 42 43]
- high [42 43 45.5 49.5]



Σχήμα 4.6: Διαμερισμός της εισόδου "LOI" (απώλεια πύρωσης % στους 1050 °C) σε λεκτικούς όρους.

5) pH:

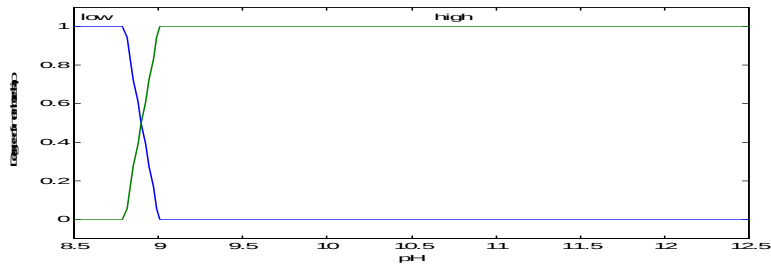
Για την είσοδο " pH " που αναφέρεται στο αν είναι βασική ή όχι η παιπάλη, εξετάστηκαν οι τιμές που κυμαίνονται στο διάστημα [8.5 12.5]. Στο διάστημα [8.5 9) θεωρείται ότι το υλικό έχει χαμηλό pH ενώ στο διάστημα (8.8 12.5] θεωρείται ότι το υλικό έχει μεγάλο pH.

Χρησιμοποιήθηκαν δυο τραπεζοειδείς συναρτήσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Στον οριζόντιο άξονα είναι οι τιμές του pH, ενώ στον κατακόρυφο άξονα είναι ο βαθμός συμμετοχής κάθε τιμής.

Οι τιμές αυτών των συναρτήσεων χαρακτηρίζονται από τέσσερις αριθμούς που δείχνουν τα όρια και τις κορυφές του αντίστοιχου τραπεζίου και είναι οι εξής:

- low [4.9 8.1 8.8 9]

- high [8.8 9 12.9 16.1]



Σχήμα 4.7: Διαμερισμός της εισόδου " pH " σε λεκτικούς όρους.

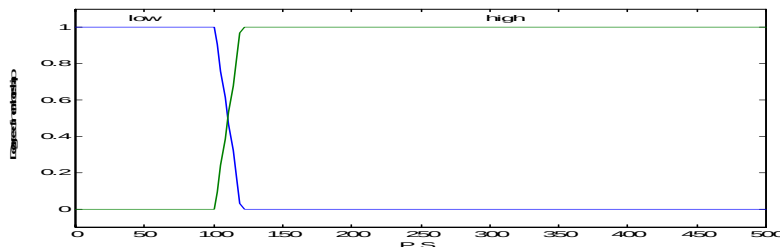
6) Κατανομή μεγέθους σωματιδίων:

Για την είσοδο " P.S. " που αναφέρεται στο εύρος του μεγέθους των σωματιδίων στη παιπάλη, εξετάστηκαν οι τιμές με μονάδα μέτρησης (μm) και κυμαίνονται στο διάστημα [0 500]. Στο διάστημα [0 120) θεωρείται ότι το υλικό έχει χαμηλή κατανομή σωματιδίων δηλαδή το μέγεθος των σωματιδίων είναι λιγότερο λεπτόκοκκο ενώ στο διάστημα (101 500] θεωρείται ότι το υλικό είναι περισσότερο λεπτόκοκκο.

Χρησιμοποιήθηκαν δυο τραπεζοειδείς συναρτήσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8. Στον οριζόντιο άξονα είναι οι τιμές της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων, ενώ στον κατακόρυφο άξονα είναι ο βαθμός συμμετοχής κάθε τιμής.

Οι τιμές αυτών των συναρτήσεων χαρακτηρίζονται από τέσσερις αριθμούς που δείχνουν τα όρια και τις κορυφές του αντίστοιχου τραπεζίου και είναι οι εξής:

- low [-450 -50 101 120]
- high [101 120 550 950]



Σχήμα 4.8: Διαμερισμός της εισόδου " P.S. " (κατανομή μεγέθους σωματιδίων (μm)) σε λεκτικούς όρους.

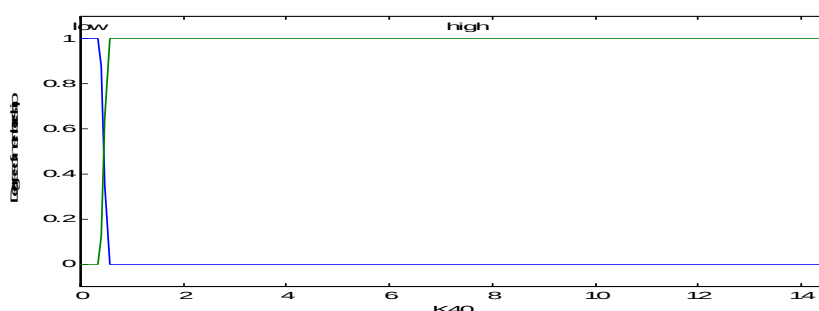
7) Ποσοστό που παραμένει σε κόσκινο με διάμετρο κόκκου 40μm:

Για την είσοδο " K₄₀ " που αναφέρεται στο ποσοστό της παιπάλης που παραμένει σε κόσκινο και έχει διάμετρο κόκκου 40μm. Εξετάστηκαν λοιπόν οι τιμές που κυμαίνονται στο διάστημα [0 14.5]. Στο διάστημα [0 0.537] θεωρείται ότι το υλικό έχει χαμηλό ποσοστό παραμένοντος ενώ στο διάστημα (0.384 14.5] θεωρείται ότι το υλικό έχει υψηλό ποσοστό.

Χρησιμοποιήθηκαν δυο τραπεζοειδείς συναρτήσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9. Στον οριζόντιο άξονα είναι οι τιμές του ποσοστού (%) που παραμένει με διάμετρο κόκκου 40μm , ενώ στον κατακόρυφο άξονα είναι ο βαθμός συμμετοχής κάθε τιμής.

Οι τιμές αυτών των συναρτήσεων χαρακτηρίζονται από τέσσερις αριθμούς που δείχνουν τα όρια και τις κορυφές του αντίστοιχου τραπεζίου και είναι οι εξής:

- low [-13.1 -1.45 0.384 0.537]
- high [0.384 0.537 15.9 27.6]



Σχήμα 4.9: Διαμερισμός της εισόδου " K₄₀ " (ποσοστό (%)) που παραμένει με διάμετρο κόκκου 40μm) σε λεκτικούς όρους.

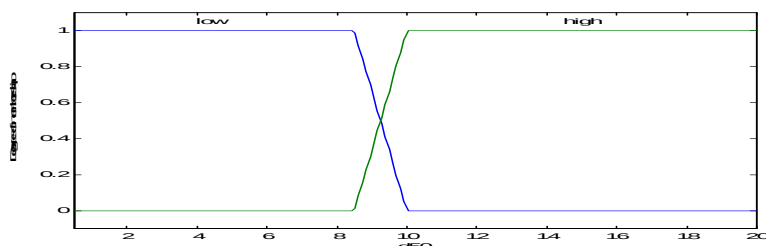
8) Διάμετρος κόκκων που παραμένουν σε ποσοστό 50%:

Για την είσοδο " d₅₀ " που αναφέρεται στη διάμετρο των κόκκων της παιπάλης που παραμένουν κατά 50%. Εξετάστηκαν λοιπόν οι τιμές που κυμαίνονται στο διάστημα [0.5 20] με μονάδα μέτρησης (μm). Στο διάστημα [0 10] θεωρείται ότι το υλικό έχει μικρή διάμετρο κόκκων που παραμένουν κατά 50% ενώ στο διάστημα (8.5 20] θεωρείται ότι το υλικό έχει μεγάλη διάμετρο κόκκων.

Χρησιμοποιήθηκαν δυο τραπεζοειδείς συναρτήσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10. Στον οριζόντιο άξονα είναι οι τιμές της διαμέτρου των κόκκων (μm) που παραμένουν σε ποσοστό 50%, ενώ στον κατακόρυφο άξονα είναι ο βαθμός συμμετοχής κάθε τιμής.

Οι τιμές αυτών των συναρτήσεων χαρακτηρίζονται από τέσσερις αριθμούς που δείχνουν τα όρια και τις κορυφές του αντίστοιχου τραπεζίου και είναι οι εξής:

- low [-17.1 -1.45 8.5 10]
- high [8.5 10 21.9 37.5]



Σχήμα 4.10: Διαμερισμός της εισόδου " d_{50} " (διάμετρος κόκκων (μm) που παραμένουν σε ποσοστό 50%) σε λεκτικούς όρους.

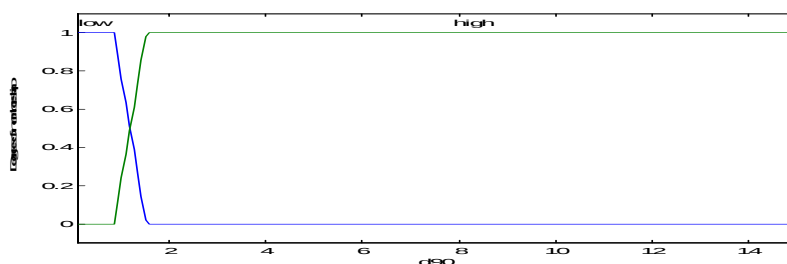
9) Διάμετρος κόκκων που παραμένουν σε ποσοστό 90%:

Για την είσοδο " d_{90} " που αναφέρεται στη διάμετρο των κόκκων της παιπάλης που παραμένουν κατά 90%. Εξετάστηκαν λοιπόν οι τιμές που κυμαίνονται στο διάστημα [0.1 15] με μονάδα μέτρησης (μm). Στο διάστημα [0 1.52] θεωρείται ότι το υλικό έχει μικρή διάμετρο κόκκων που παραμένουν κατά 90% ενώ στο διάστημα (0.849 15] θεωρείται ότι το υλικό έχει μεγάλη διάμετρο κόκκων.

Χρησιμοποιήθηκαν δυο τραπεζοειδείς συναρτήσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.11. Στον οριζόντιο άξονα είναι οι τιμές της διαμέτρου των κόκκων (μm) που παραμένουν σε ποσοστό 90%, ενώ στον κατακόρυφο άξονα είναι ο βαθμός συμμετοχής κάθε τιμής.

Οι τιμές αυτών των συναρτήσεων χαρακτηρίζονται από τέσσερις αριθμούς που δείχνουν τα όρια και τις κορυφές του αντίστοιχου τραπεζίου και είναι οι εξής:

- low [-13.3 -1.39 0.849 1.52]
- high [0.849 1.52 16.5 28.4]



Σχήμα 4.11: Διαμερισμός της εισόδου " d_{90} " (διάμετρος κόκκων (μm) που παραμένουν σε ποσοστό 90%) σε λεκτικούς όρους.

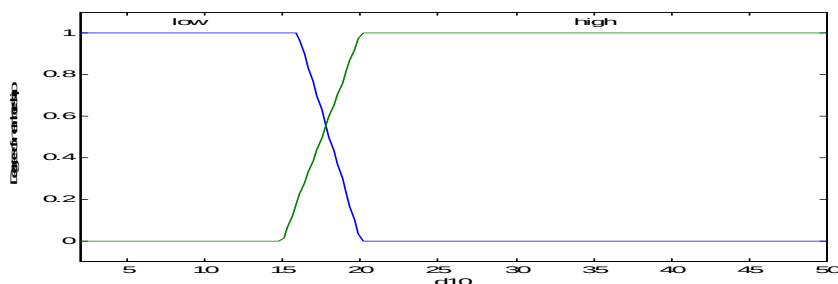
10) Διάμετρος κόκκων που παραμένουν σε ποσοστό 10%:

Για την είσοδο " d_{10} " που αναφέρεται στη διάμετρο των κόκκων της παιπάλης που παραμένουν κατά 10%. Εξετάστηκαν λοιπόν οι τιμές που κυμαίνονται στο διάστημα [2 50] με μονάδα μέτρησης (μm). Στο διάστημα [2 20] θεωρείται ότι το υλικό έχει μικρή διάμετρο κόκκων που παραμένουν κατά 10% ενώ στο διάστημα (15 50] θεωρείται ότι το υλικό έχει μεγάλη διάμετρο κόκκων.

Χρησιμοποιήθηκαν δυο τραπεζοειδείς συναρτήσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.12. Στον οριζόντιο άξονα είναι οι τιμές της διαμέτρου των κόκκων (μm) που παραμένουν σε ποσοστό 10%, ενώ στον κατακόρυφο άξονα είναι ο βαθμός συμμετοχής κάθε τιμής.

Οι τιμές αυτών των συναρτήσεων χαρακτηρίζονται από τέσσερις αριθμούς που δείχνουν τα όρια και τις κορυφές του αντίστοιχου τραπεζίου και είναι οι εξής:

- low [-41.2 -2.8 16 20]
- high [15 20 54.8 93.2]



Σχήμα 4.12: Διαμερισμός της εισόδου " d_{10} " (διάμετρος κόκκων (μm) που παραμένουν σε ποσοστό 10%) σε λεκτικούς όρους.

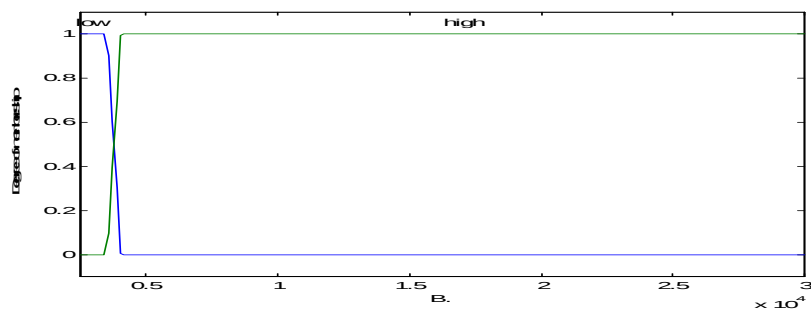
11) Ειδική επιφάνεια:

Για την είσοδο " B " που αναφέρεται στη μέτρηση της ειδικής επιφάνειας της παιπάλης με τη μέθοδο Blaine, εξετάστηκαν οι τιμές που κυμαίνονται στο διάστημα [2500 30000]. Στο διάστημα [2500 4030] θεωρείται ότι το υλικό έχει μικρή ειδική επιφάνεια ενώ στο διάστημα (3520 30000] θεωρείται ότι το υλικό έχει μεγάλη ειδική επιφάνεια η οποία έχει μονάδα μέτρησης cm^2/g .

Χρησιμοποιήθηκαν δυο τραπεζοειδείς συναρτήσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.13. Στον οριζόντιο άξονα είναι οι τιμές της ειδικής επιφάνειας, ενώ στον κατακόρυφο άξονα είναι ο βαθμός συμμετοχής κάθε τιμής.

Οι τιμές αυτών των συναρτήσεων χαρακτηρίζονται από τέσσερις αριθμούς που δείχνουν τα όρια και τις κορυφές του αντίστοιχου τραπεζίου και είναι οι εξής:

- low [-22300 -250 3520 4030]
- high [3520 4030 32800 54800]



Σχήμα 4.13: Διαμερισμός της εισόδου " B " (ειδική επιφάνεια κατά Blaine (cm^2/g)) σε λεκτικούς όρους.

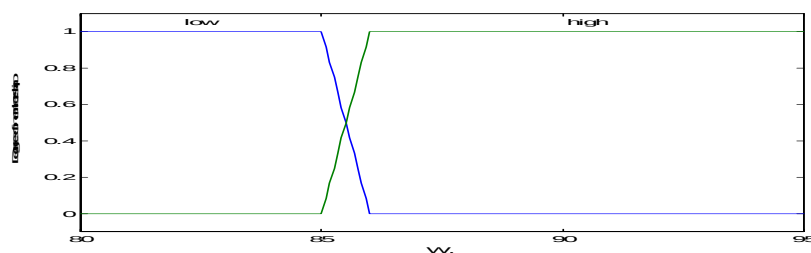
12) Λευκότητα:

Για την είσοδο " W " που αναφέρεται στη λευκότητα της παιπάλης, εξετάστηκαν οι τιμές που κυμαίνονται στο διάστημα [80 95]. Στο διάστημα [80 86] θεωρείται ότι το υλικό έχει χαμηλή λευκότητα ενώ στο διάστημα (85 95] θεωρείται ότι το υλικό έχει υψηλή λευκότητα.

Χρησιμοποιήθηκαν δυο τραπεζοειδείς συναρτήσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.14. Στον οριζόντιο άξονα είναι οι τιμές της λευκότητας (%), ενώ στον κατακόρυφο άξονα είναι ο βαθμός συμμετοχής κάθε τιμής.

Οι τιμές αυτών των συναρτήσεων χαρακτηρίζονται από τέσσερις αριθμούς που δείχνουν τα όρια και τις κορυφές του αντίστοιχου τραπεζίου και είναι οι εξής:

- low [66.5 78.5 85 86]
- high [85 86 96.5 109]

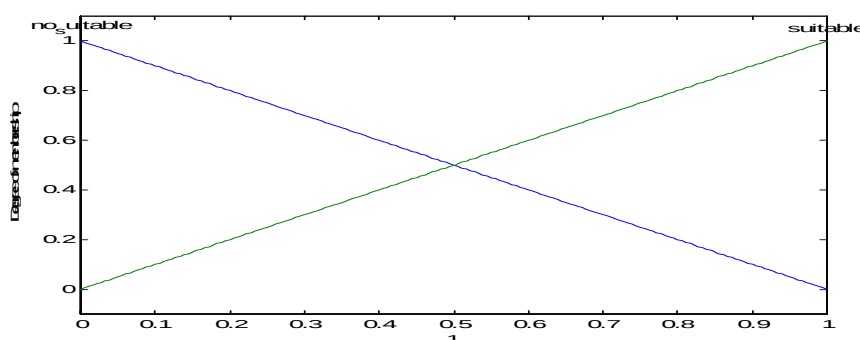


Σχήμα 4.14: Διαμερισμός της εισόδου " W " (λευκότητα %) σε λεκτικούς όρους.

13) Βιομηχανία χάρτου (ως filler):

Η έξοδος με τον αριθμό " 1 " αναφέρεται στη βιομηχανία χάρτου (filler) και εξετάζεται αν η παιπάλη είναι κατάλληλη για αυτή τη βιομηχανία. Θεωρήθηκε ότι οι τιμές που παίρνει κυμαίνονται στο διάστημα [0 1]. Όσο πιο κοντά στο 1 είναι η τιμή τόσο αυξάνεται η πιθανότητα το υλικό αυτό να χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία χάρτου. Χρησιμοποιήθηκαν δυο τριγωνικές συναρτήσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.15. Οι τιμές αυτών των συναρτήσεων χαρακτηρίζονται από τρεις αριθμούς που δείχνουν τα όρια και την κορυφή του αντίστοιχου τριγώνου και είναι οι εξής:

- no suitable [-1 0 1]
- suitable [0 1 2]

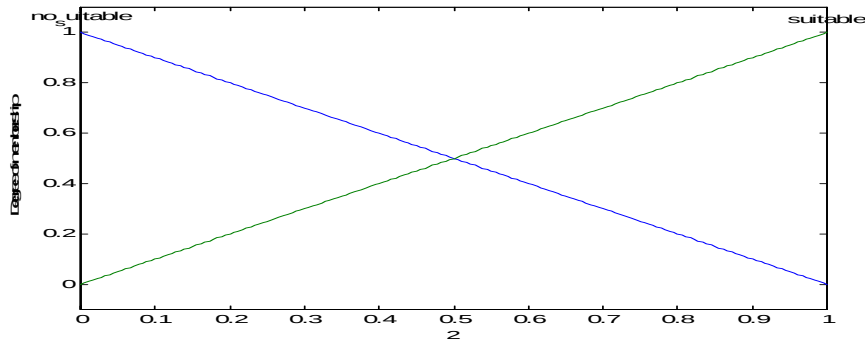


Σχήμα 4.15: Διαμερισμός της εξόδου " 1 " (βιομηχανία χάρτου ως filler) σε λεκτικούς όρους.

14) Βιομηχανία χάρτου (επικαλυπτικό):

Η έξοδος με τον αριθμό " 2 " αναφέρεται στη βιομηχανία χάρτου (επικαλυπτικό) και εξετάζεται αν η παιπάλη είναι κατάλληλη για αυτή τη βιομηχανία. Θεωρήθηκε ότι οι τιμές που παίρνει κυμαίνονται στο διάστημα [0 1]. Όσο πιο κοντά στο 1 είναι η τιμή τόσο αυξάνεται η πιθανότητα το υλικό αυτό να χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία χάρτου. Χρησιμοποιήθηκαν δυο τριγωνικές συναρτήσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.16. Οι τιμές αυτών των συναρτήσεων χαρακτηρίζονται από τρεις αριθμούς που δείχνουν τα όρια και την κορυφή του αντίστοιχου τριγώνου και είναι οι εξής:

- no suitable [-1 0 1]
- suitable [0 1 2]

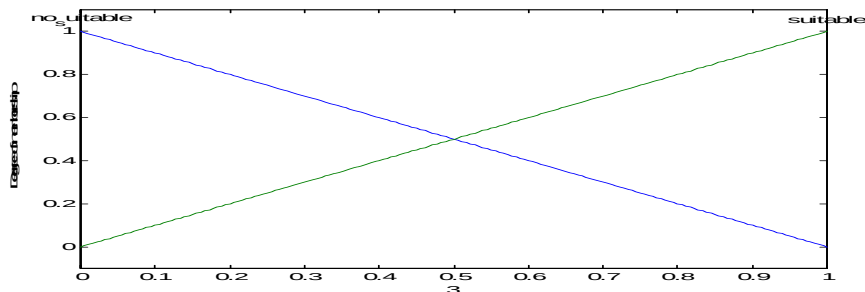


Σχήμα 4.16: Διαμερισμός της εξόδου " 2 " (βιομηχανία χάρτου ως επικαλυπτικό) σε λεκτικούς όρους.

15) Βιομηχανία χρωμάτων και βερνικιών:

Η έξοδος με τον αριθμό " 3 " αναφέρεται στη βιομηχανία χρωμάτων και βερνικιών. Εξετάζεται λοιπόν αν η παιπάλη είναι κατάλληλη για αυτή τη βιομηχανία. Θεωρήθηκε ότι οι τιμές που παίρνει κυμαίνονται στο διάστημα $[0 \ 1]$. Όσο πιο κοντά στο 1 είναι η τιμή τόσο αυξάνεται η πιθανότητα το υλικό αυτό να χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία χρωμάτων και βερνικιών. Χρησιμοποιήθηκαν δυο τριγωνικές συναρτήσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.17. Οι τιμές αυτών των συναρτήσεων χαρακτηρίζονται από τρεις αριθμούς που δείχνουν τα όρια και την κορυφή του αντίστοιχου τριγώνου και είναι οι εξής:

- no_suitable $[-1 \ 0 \ 1]$
- suitable $[0 \ 1 \ 2]$

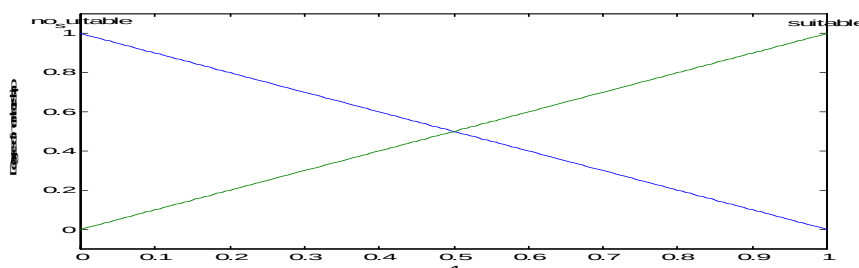


Σχήμα 4.17: Διαμερισμός της εξόδου " 3 " (βιομηχανία χρωμάτων και βερνικιών) σε λεκτικούς όρους.

16) Βιομηχανία πλαστικών:

Η έξοδος με τον αριθμό " 4 " αναφέρεται στη βιομηχανία πλαστικών. Εξετάζεται λοιπόν αν η παιπάλη είναι κατάλληλη για αυτή τη βιομηχανία. Θεωρήθηκε ότι οι τιμές που παίρνει κυμαίνονται στο διάστημα $[0 \ 1]$. Όσο πιο κοντά στο 1 είναι η τιμή τόσο αυξάνεται η πιθανότητα το υλικό αυτό να χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία πλαστικών. Χρησιμοποιήθηκαν δυο τριγωνικές συναρτήσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.18. Οι τιμές αυτών των συναρτήσεων χαρακτηρίζονται από τρεις αριθμούς που δείχνουν τα όρια και την κορυφή του αντίστοιχου τριγώνου και είναι οι εξής:

- no suitable $[-1 \ 0 \ 1]$
- suitable $[0 \ 1 \ 2]$

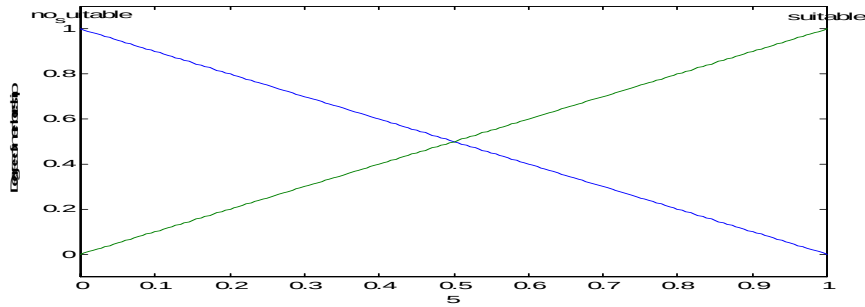


Σχήμα 4.18: Διαμερισμός της εξόδου " 4 " (βιομηχανία πλαστικών) σε λεκτικούς όρους.

17) Χημική βιομηχανία:

Η έξοδος με τον αριθμό "5" αναφέρεται στη χημική βιομηχανία και στις περιβαλλοντικές τεχνολογίες. Εξετάζεται λοιπόν αν η παιπάλη είναι κατάλληλη για αυτή τη βιομηχανία. Θεωρήθηκε ότι οι τιμές που παίρνει κυμαίνονται στο διάστημα $[0 \ 1]$. Όσο πιο κοντά στο 1 είναι η τιμή τόσο αυξάνεται η πιθανότητα το υλικό αυτό να χρησιμοποιηθεί στη χημική βιομηχανία. Χρησιμοποιήθηκαν δυο τριγωνικές συναρτήσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.19. Οι τιμές αυτών των συναρτήσεων χαρακτηρίζονται από τρεις αριθμούς που δείχνουν τα όρια και την κορυφή του αντίστοιχου τριγώνου και είναι οι εξής:

- no suitable $[-1 \ 0 \ 1]$
- suitable $[0 \ 1 \ 2]$

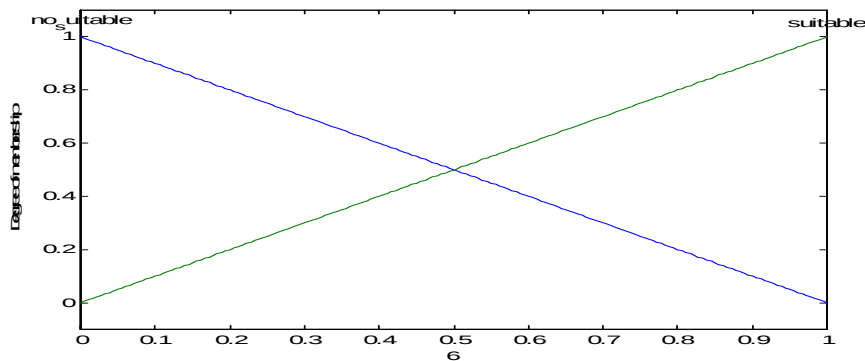


Σχήμα 4.19: Διαμερισμός της εξόδου " 5 " (χημική βιομηχανία) σε λεκτικούς όρους.

18) Βιομηχανία τροφίμων και ζωοτροφών:

Η έξοδος με τον αριθμό "6" αναφέρεται στη βιομηχανία τροφίμων και ζωοτροφών. Εξετάζεται λοιπόν αν η παιπάλη είναι κατάλληλη για αυτή τη βιομηχανία. Θεωρήθηκε ότι οι τιμές που παίρνει κυμαίνονται στο διάστημα $[0 \ 1]$. Όσο πιο κοντά στο 1 είναι η τιμή τόσο αυξάνεται η πιθανότητα το υλικό αυτό να χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία τροφίμων και ζωοτροφών. Χρησιμοποιήθηκαν δυο τριγωνικές συναρτήσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.20. Οι τιμές αυτών των συναρτήσεων χαρακτηρίζονται από τρεις αριθμούς που δείχνουν τα όρια και την κορυφή του αντίστοιχου τριγώνου και είναι οι εξής:

- no_suitable $[-1 \ 0 \ 1]$
- suitable $[0 \ 1 \ 2]$

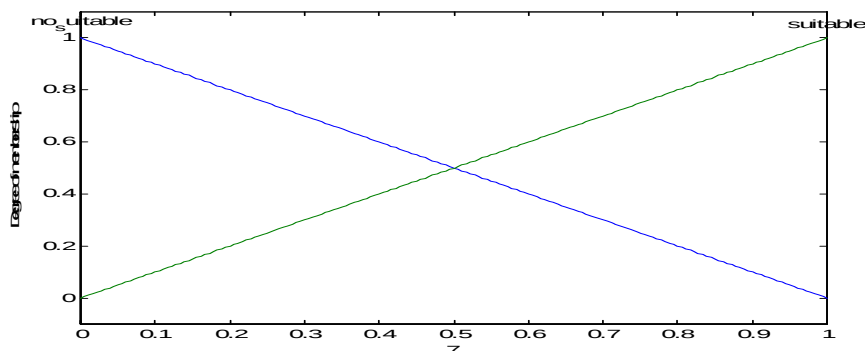


Σχήμα 4.20: Διαμερισμός της εξόδου " 6 " (βιομηχανία τροφίμων και ζωοτροφών) σε λεκτικούς όρους.

19) Βιομηχανία λιπασμάτων:

Η έξοδος με τον αριθμό "7" αναφέρεται στη βιομηχανία λιπασμάτων και εξετάζεται αν η παιπάλη είναι κατάλληλη για αυτή τη βιομηχανία. Θεωρήθηκε ότι οι τιμές που παίρνει κυμαίνονται στο διάστημα $[0 \ 1]$. Όσο πιο κοντά στο 1 είναι η τιμή τόσο αυξάνεται η πιθανότητα το υλικό αυτό να χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία λιπασμάτων. Χρησιμοποιήθηκαν δυο τριγωνικές συναρτήσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.21. Οι τιμές αυτών των συναρτήσεων χαρακτηρίζονται από τρεις αριθμούς που δείχνουν τα όρια και την κορυφή του αντίστοιχου τριγώνου και είναι οι εξής:

- no suitable $[-1 \ 0 \ 1]$
- suitable $[0 \ 1 \ 2]$

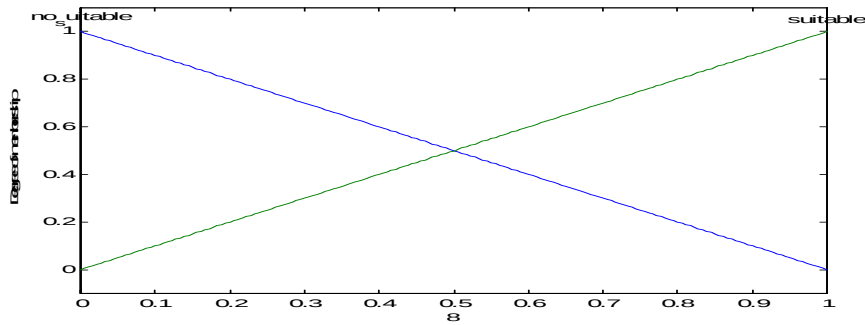


Σχήμα 4.21: Διαμερισμός της εξόδου " 7 " (βιομηχανία λιπασμάτων) σε λεκτικούς όρους.

20) Βιομηχανία παραγωγής σιδήρου:

Η έξοδος με τον αριθμό "8" αναφέρεται στη βιομηχανία παραγωγής σιδήρου και εξετάζεται αν η παιπάλη είναι κατάλληλη για αυτή τη βιομηχανία. Θεωρήθηκε ότι οι τιμές που παίρνει κυμαίνονται στο διάστημα $[0 \ 1]$. Όσο πιο κοντά στο 1 είναι η τιμή τόσο αυξάνεται η πιθανότητα το υλικό αυτό να χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία παραγωγής σιδήρου. Χρησιμοποιήθηκαν δυο τριγωνικές συναρτήσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.22. Οι τιμές αυτών των συναρτήσεων χαρακτηρίζονται από τρεις αριθμούς που δείχνουν τα όρια και την κορυφή του αντίστοιχου τριγώνου και είναι οι εξής:

- no suitable $[-1 \ 0 \ 1]$
- suitable $[0 \ 1 \ 2]$

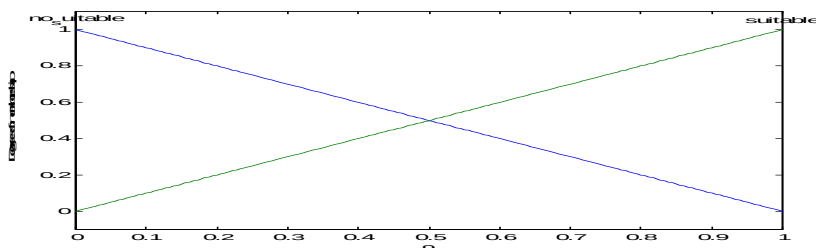


Σχήμα 4.22: Διαμερισμός της εξόδου " 8 " (βιομηχανία παραγωγής σιδήρου) σε λεκτικούς όρους.

21) Βιομηχανία γυαλιού:

Η έξοδος με τον αριθμό "9" αναφέρεται στη βιομηχανία γυαλιού και εξετάζεται αν η παιπάλη είναι κατάλληλη για αυτή τη βιομηχανία. Θεωρήθηκε ότι οι τιμές που παίρνει κυμαίνονται στο διάστημα [0 1]. Όσο πιο κοντά στο 1 είναι η τιμή τόσο αυξάνεται η πιθανότητα το υλικό αυτό να χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία γυαλιού. Χρησιμοποιήθηκαν δυο τριγωνικές συναρτήσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.23. Οι τιμές αυτών των συναρτήσεων χαρακτηρίζονται από τρεις αριθμούς που δείχνουν τα όρια και την κορυφή του αντίστοιχου τριγώνου και είναι οι εξής:

- no_suitable [-1 0 1]
- suitable [0 1 2]



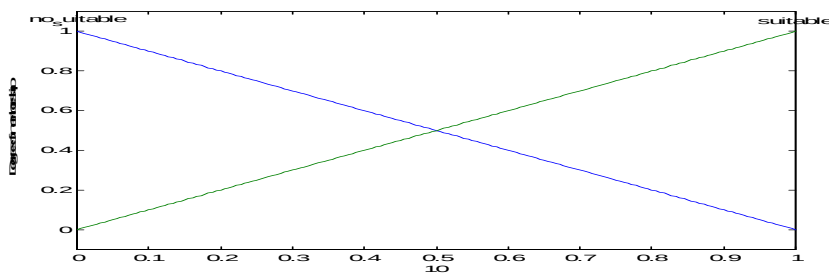
Σχήμα 4.23: Διαμερισμός της εξόδου " 9 " (βιομηχανία γυαλιού) σε λεκτικούς όρους.

22) Βιομηχανία σκυροδέματος:

Η έξοδος με τον αριθμό "10" αναφέρεται στη βιομηχανία σκυροδέματος και εξετάζεται αν η παιπάλη είναι κατάλληλη για αυτή τη βιομηχανία. Παρόλο που τόσο λεπτομερή

ασβεστολιθικά υλικά (παιπάλη) δεν χρησιμοποιούνται παρά σε μικρό ποσοστό ως προσθετικά στη παραγωγή σκυροδέματος και κυρίως ειδικών τύπων σκυροδέματος όπως είναι το αυτοσυμπυκνούμενο, η βιομηχανία αυτή αναφέρεται περισσότερο για την πληρότητα του αναπτυχθέντος έμπειρου ασαφούς συστήματος (FIS). Θεωρήθηκε λοιπόν ότι οι τιμές που παίρνει κυμαίνονται στο διάστημα $[0 \ 1]$. Όσο πιο κοντά στο 1 είναι η τιμή τόσο αυξάνεται η πιθανότητα το υλικό αυτό να χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία σκυροδέματος. Χρησιμοποιήθηκαν δυο τριγωνικές συναρτήσεις όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.24. Οι τιμές αυτών των συναρτήσεων χαρακτηρίζονται από τρεις αριθμούς που δείχνουν τα όρια και την κορυφή του αντίστοιχου τριγώνου και είναι οι εξής:

- no_suitable $[-1 \ 0 \ 1]$
- suitable $[0 \ 1 \ 2]$



Σχήμα 4.24: Διαμερισμός της εξόδου " 10 " (βιομηχανία σκυροδέματος)
σε λεκτικούς όρους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5_ο:

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΕΜΠΕΙΡΟΥ ΑΣΑΦΟΥΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ MATLAB® (FUZZY TOOLBOX)

5.1 Κανόνες που καθορίζουν το έμπειρο ασαφές σύστημα

Ο σκοπός της ασαφούς λογικής είναι να χαρτογραφήσει ένα διάστημα εισαγωγής σε ένα διάστημα εξαγωγής και ο αρχικός μηχανισμός για να γίνει αυτό είναι μια λίστα με if-then (εάν-τότε) δηλώσεις που καλούνται κανόνες. Όλοι οι κανόνες αξιολογούνται παράλληλα και δεν έχει σημασία η σειρά τους. Είναι χρήσιμοι γιατί αναφέρονται σε μεταβλητές αλλά και στα επίθετα που περιγράφουν αυτές τις μεταβλητές.

Για το έμπειρο ασαφές σύστημα που δημιουργήθηκε υπάρχουν 12 είσοδοι και 10 έξοδοι οι οποίες έχουν από δυο συναρτήσεις συμμετοχής η καθεμιά . Επομένως θα έπρεπε να αναπτυχθούν 240 κανόνες ($12 \cdot 10 \cdot 2$) για να καλύψουν τις παραπάνω περιπτώσεις. Από αυτούς τους κανόνες επιλέχθηκαν οι 18 γιατί ανταποκρίνονται στις προδιαγραφές και είναι οι εξής:

1) Εάν C είναι high και Fe είναι low και LOI είναι high και pH είναι high και P.S. είναι low και K_{40} είναι low και d_{50} είναι low και d_{90} είναι low και d_{10} είναι low και B είναι low και W είναι high, τότε είναι κατάλληλο για 1 και 2.

Έτσι αν το σύνολο των ανθρακικών είναι υψηλό δηλαδή κυμαίνεται στο διάστημα (75 100] και αν το Fe_2O_3 είναι χαμηλό δηλαδή κυμαίνεται στο διάστημα [0 0.19) και αν η απώλεια πύρωσης στους 1050 °C είναι υψηλή δηλαδή κυμαίνεται στο διάστημα (42 45] και αν το pH είναι υψηλό δηλαδή κυμαίνεται στο διάστημα (8.8 12.5] και αν η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων είναι χαμηλή δηλαδή κυμαίνεται στο διάστημα [0 120) και αν το ποσοστό που παραμένει σε κόσκينو με διάμετρο κόκκου 40μm είναι χαμηλό δηλαδή κυμαίνεται στο διάστημα [0 0.537) και αν η διάμετρος κόκκων που παραμένουν σε ποσοστό 50% είναι χαμηλή δηλαδή κυμαίνεται στο διάστημα [0 10) και αν η διάμετρος κόκκων που παραμένουν σε ποσοστό 90% είναι χαμηλή δηλαδή κυμαίνεται στο διάστημα [0 1.52) και αν η διάμετρος κόκκων που παραμένουν σε ποσοστό 10% είναι χαμηλή δηλαδή κυμαίνεται στο διάστημα [2 20) και αν η ειδική επιφάνεια είναι χαμηλή δηλαδή κυμαίνεται στο διάστημα [2500 4030) και αν η λευκότητα είναι υψηλή δηλαδή κυμαίνεται στο διάστημα (85 95] , τότε το υλικό είναι κατάλληλο για τις βιομηχανίες χάρτου ως filler (1) και ως επικαλυπτικό (2). Τα ίδια θα ισχύουν για τους υπόλοιπους κανόνες.

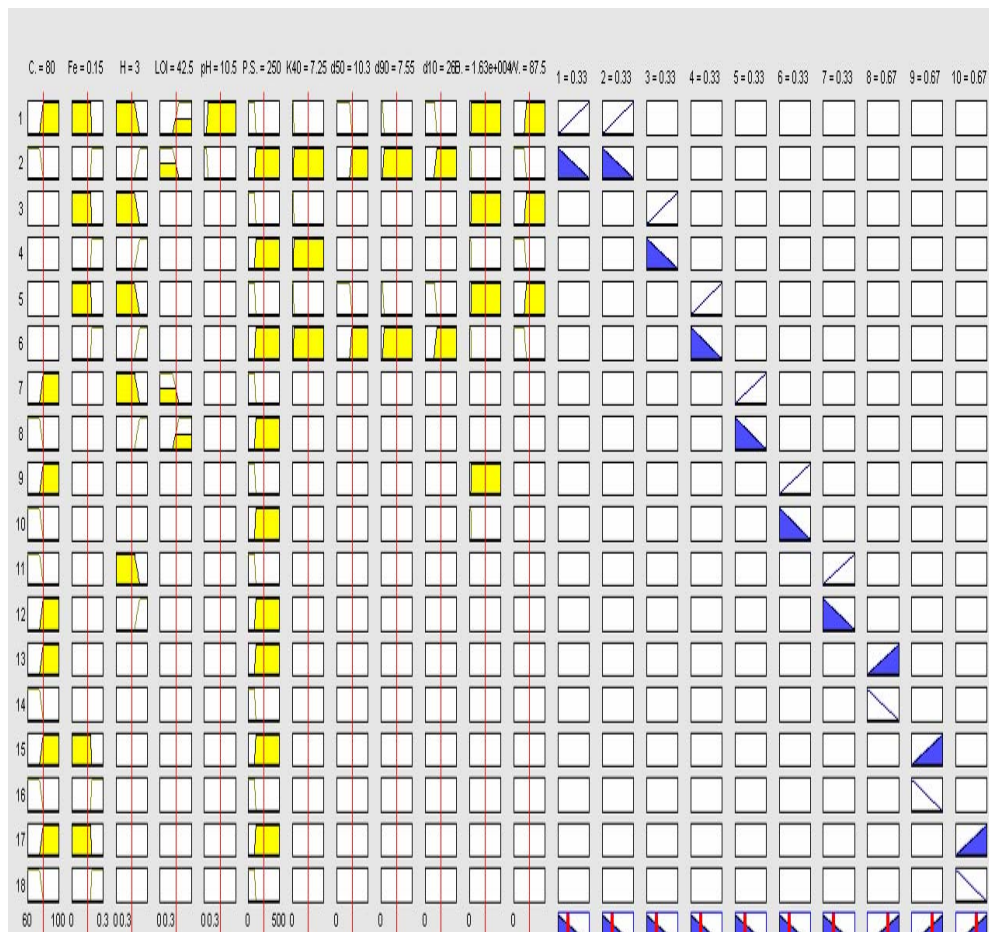
- 2) Εάν C είναι low ή Fe είναι high ή LOI είναι low ή pH είναι low ή P.S. είναι high ή K₄₀ είναι high ή d₅₀ είναι high ή d₉₀ είναι high ή d₁₀ είναι high ή B είναι high ή W είναι low, τότε δεν είναι κατάλληλο για 1 και 2.
- 3) Εάν Fe είναι low και H είναι low και P.S. είναι low και K₄₀ είναι low και B είναι high και W είναι high, τότε είναι κατάλληλο για 3.
- 4) Εάν Fe είναι high ή H είναι high ή P.S. είναι high ή K₄₀ είναι high ή B είναι low ή W είναι low, τότε δεν είναι κατάλληλο για 3.
- 5) Εάν Fe είναι low και H είναι low και P.S. είναι low και K₄₀ είναι low και d₅₀ είναι low και d₉₀ είναι low και d₁₀ είναι low και B είναι high και W είναι high, τότε είναι κατάλληλο για 4.
- 6) Εάν Fe είναι high ή H είναι high ή P.S. είναι high ή K₄₀ είναι high ή d₅₀ είναι high ή d₉₀ είναι high ή d₁₀ είναι high ή B είναι low ή W είναι low, τότε δεν είναι κατάλληλο για 4.
- 7) Εάν C είναι high και H είναι low και LOI είναι low και P.S. είναι low, τότε είναι κατάλληλο για 5.
- 8) Εάν C είναι low ή H είναι high ή LOI είναι high ή P.S. είναι high, τότε δεν είναι κατάλληλο για 5.
- 9) Εάν C είναι high και P.S. είναι low και B είναι high, τότε είναι κατάλληλο για 6.
- 10) Εάν C είναι low ή P.S. είναι high ή B είναι low, τότε δεν είναι κατάλληλο για 6.
- 11) Εάν C είναι low και H είναι low και P.S. είναι low, τότε είναι κατάλληλο για 7.
- 12) Εάν C είναι high ή H είναι high ή P.S. είναι high, τότε δεν είναι κατάλληλο για 7.
- 13) Εάν C είναι high και P.S. είναι high, τότε είναι κατάλληλο για 8.
- 14) Εάν C είναι low ή P.S. είναι low, τότε δεν είναι κατάλληλο για 8.
- 15) Εάν C είναι high και Fe είναι low και P.S. είναι high, τότε είναι κατάλληλο για 9.
- 16) Εάν C είναι low ή Fe είναι high ή P.S. είναι low, τότε δεν είναι κατάλληλο για 9.
- 17) Εάν C είναι high και Fe είναι low και P.S. είναι high, τότε είναι κατάλληλο για 10.
- 18) Εάν C είναι low ή Fe είναι high ή P.S. είναι low, τότε δεν είναι κατάλληλο για 10.

Με τη χρήση του *Rule Viewer* παρουσιάζεται το διάγραμμα της ασαφούς συνεπαγωγής όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Το διάγραμμα αυτό δείχνει ποιοι κανόνες είναι ενεργοποιημένοι (για συγκεκριμένες τιμές εισόδου) ή πως η μορφή της κάθε συνάρτησης συμμετοχής επηρεάζει τα αποτελέσματα.

Παρατηρώντας το παρακάτω διάγραμμα επισημαίνονται τα εξής:

- Κάθε γραμμή του διαγράμματος αντιπροσωπεύει ένα κανόνα. Για τον λόγο αυτό υπάρχουν 18 γραμμές.

- Το κίτρινο χρώμα δείχνει πως η μεταβλητή εισόδου χρησιμοποιείται στους κανόνες, ενώ το μπλε χρώμα δείχνει πως η μεταβλητή εξόδου χρησιμοποιείται στους κανόνες.
- Σε κάθε κανόνα εφαρμόζεται η μέθοδος της συνεπαγωγής, μετά ακολουθεί η άθροιση των εξόδων που στο διάγραμμα είναι τα ορθογώνια της τελευταίας γραμμής. Τέλος γίνεται η αποασαφοποίηση όπου εξάγονται τα τελικά αποτελέσματα και στο διάγραμμα παρουσιάζονται με έντονες κόκκινες γραμμές στα ορθογώνια της άθροισης.



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα ασαφούς συνεπαγωγής, όπως εμφανίζεται από το Fuzzy Toolbox του Matlab.

5.2 Επιφάνειες Απόκρισης

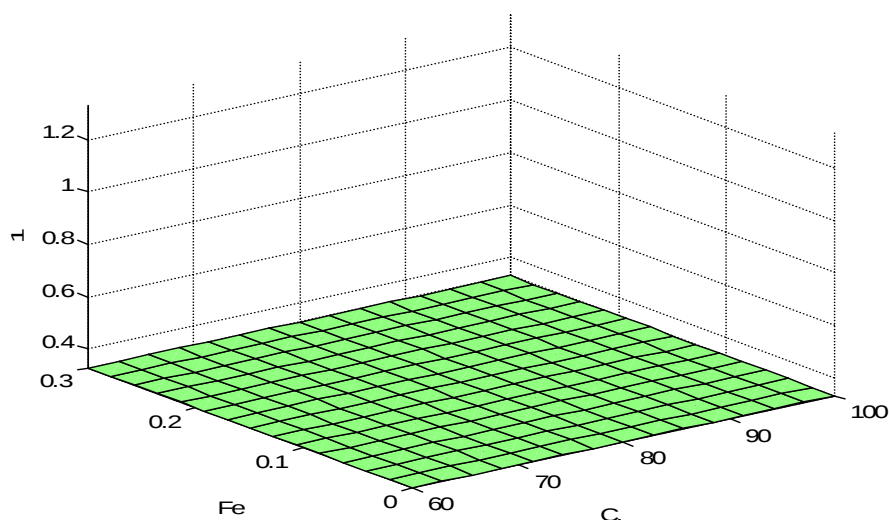
Με τη χρήση του *Surface Viewer* δίνεται η δυνατότητα κατασκευής των επιφανειών απόκρισης του συστήματος ανά δυο εισόδους σε σχέση με τις εξόδους του FIS. Δηλαδή

δείχνει υπό μορφή ισοτίμων καμπυλών πως η κάθε έξοδος εξαρτάται από μια ή δυο εισόδους ταυτόχρονα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένες επιφάνειες απόκρισης ανά δυο εισόδους σε σχέση με τις εξόδους που είναι 10.

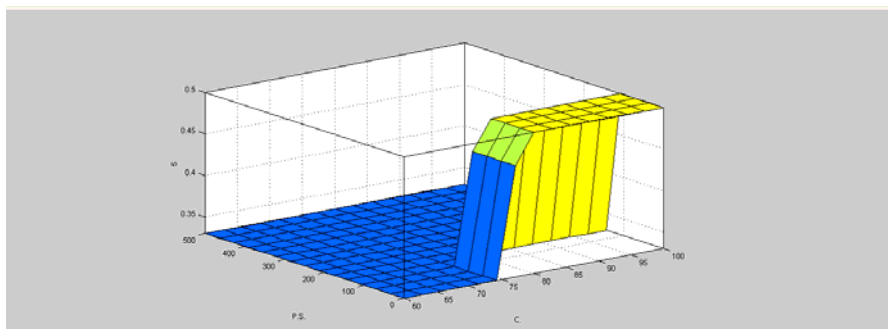
Στο Σχήμα 5.2 παριστάνεται η επιφάνεια απόκρισης της βιομηχανίας χάρτου (filler) σε σχέση με το σύνολο των ανθρακικών και του Fe_2O_3 . Από το διάγραμμα φαίνεται πως μόνο οι χαρακτηριστικές αυτές ιδιότητες δεν είναι αρκετές για να καταστήσουν κατάλληλο το υλικό γι' αυτή τη βιομηχανία.

Το ίδιο ισχύει για τη βιομηχανία χάρτου (επικάλυμμα), τη βιομηχανία χρωμάτων και βερνικιών καθώς και τη βιομηχανία πλαστικών.



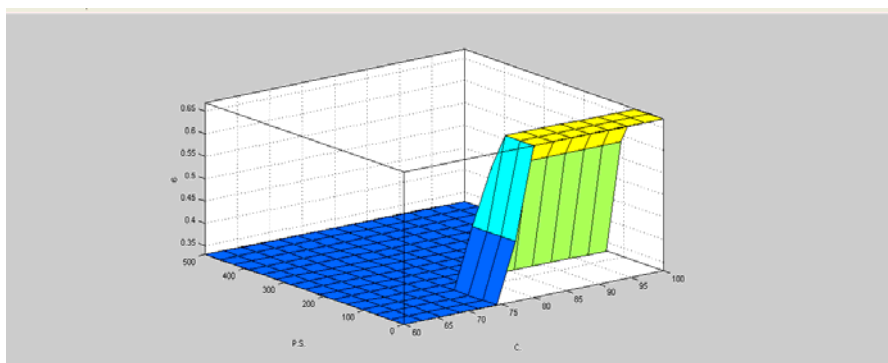
Σχήμα 5.2: Επιφάνεια απόκρισης του συνόλου των ανθρακικών και του Fe_2O_3 σε σχέση με τη βιομηχανία χάρτου (ως filler).

Στο Σχήμα 5.3 απεικονίζεται η επιφάνεια απόκρισης της χημικής βιομηχανίας σε σχέση με το σύνολο των ανθρακικών και τη κατανομή μεγέθους των σωματιδίων. Παρατηρείται ότι σε υψηλές τιμές του συνόλου των ανθρακικών το υλικό είναι κατάλληλο για τη βιομηχανία αυτή ενώ η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων δεν το επηρεάζει.



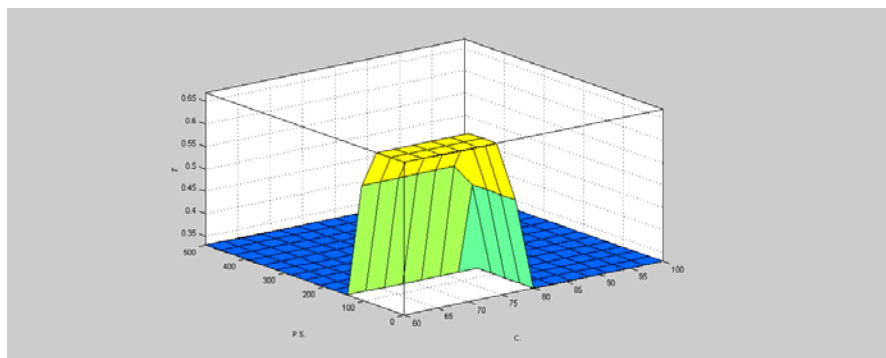
Σχήμα 5.3: Επιφάνεια απόκρισης του συνόλου των ανθρακικών και της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων σε σχέση με τη χημική βιομηχανία.

Στο Σχήμα 5.4 παριστάνεται η επιφάνεια απόκρισης της βιομηχανίας τροφίμων και ζωοτροφών σε σχέση με το σύνολο των ανθρακικών και τη κατανομή μεγέθους των σωματιδίων. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το σύνολο των ανθρακικών τόσο πιο κατάλληλο είναι το υλικό για τη βιομηχανία αυτή, ενώ η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων φαίνεται ότι δεν επιδρά σημαντικά στην αξιολόγηση του υλικού.



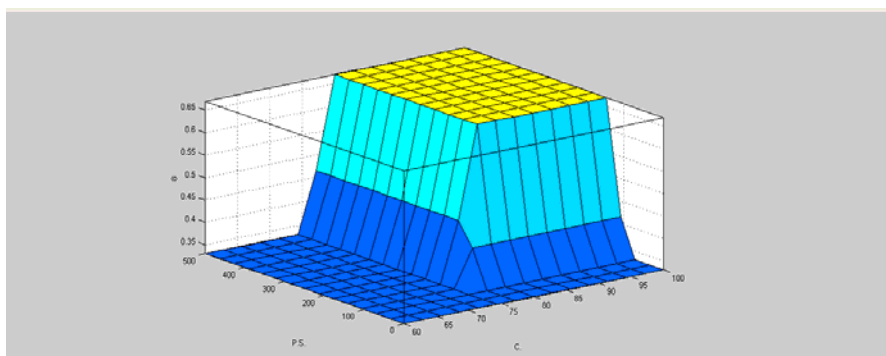
Σχήμα 5.4: Επιφάνεια απόκρισης του συνόλου των ανθρακικών και της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων σε σχέση με τη βιομηχανία τροφίμων και ζωοτροφών.

Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η επιφάνεια απόκρισης της βιομηχανίας λιπασμάτων σε σχέση με το σύνολο των ανθρακικών και την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων. Παρατηρείται ότι όταν τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι σε χαμηλή περιεκτικότητα στο υλικό, τότε το καθιστούν κατάλληλο για τη βιομηχανία λιπασμάτων.



Σχήμα 5.5: Επιφάνεια απόκρισης του συνόλου των ανθρακικών και της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων σε σχέση με τη βιομηχανία λιπασμάτων.

Στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζεται η επιφάνεια απόκρισης της βιομηχανίας παραγωγής σιδήρου σε σχέση με το σύνολο των ανθρακικών και την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων. Παρατηρείται ότι με αύξηση της περιεκτικότητας αυτών των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων, το υλικό έχει περισσότερες πιθανότητες να είναι κατάλληλο στη συγκεκριμένη βιομηχανία.

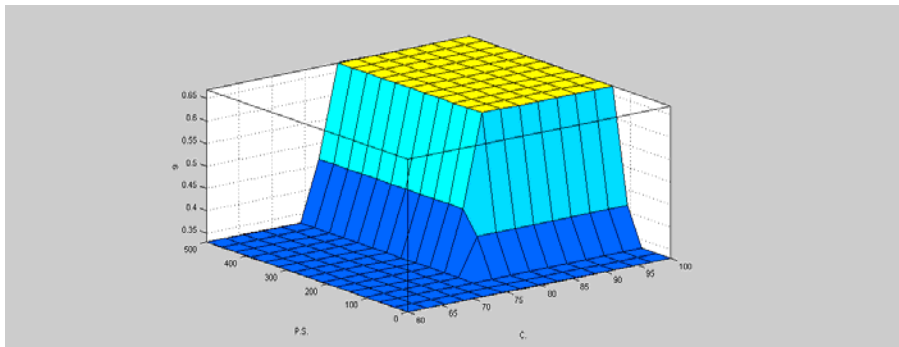


Σχήμα 5.6: Επιφάνεια απόκρισης του συνόλου των ανθρακικών και της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων σε σχέση με τη βιομηχανία παραγωγής σιδήρου.

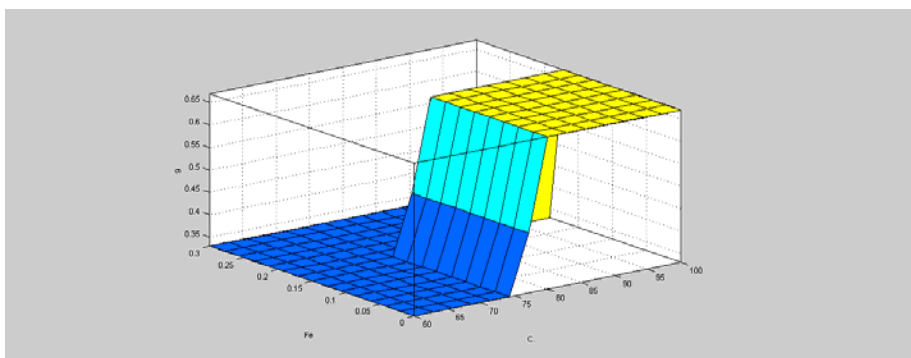
Στο Σχήμα 5.7 απεικονίζεται η επιφάνεια απόκρισης της βιομηχανίας γυαλιού σε σχέση με το σύνολο των ανθρακικών και της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνονται οι ιδιότητες αυτές τόσο πιο κατάλληλο γίνεται το υλικό για τη βιομηχανία γυαλιού.

Αντίθετα στο Σχήμα 5.8 που απεικονίζεται η επιφάνεια απόκρισης της ίδιας βιομηχανίας σε σχέση με το σύνολο των ανθρακικών και του Fe_2O_3 φαίνεται πως με την αύξηση του συνόλου

των ανθρακικών το υλικό γίνεται όλο και πιο κατάλληλο για τη βιομηχανία αυτή ενώ το Fe_2O_3 δείχνει να μην το επηρεάζει.

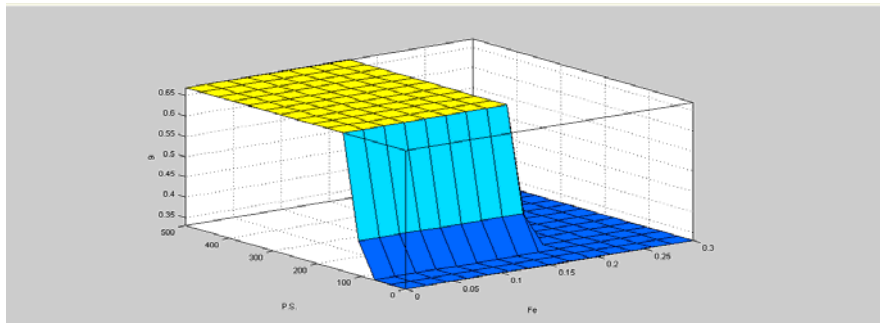


Σχήμα 5.7: Επιφάνεια απόκρισης του συνόλου των ανθρακικών και της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων σε σχέση με τη βιομηχανία γυαλιού.



Σχήμα 5.8: Επιφάνεια απόκρισης του συνόλου των ανθρακικών και του Fe_2O_3 σε σχέση με τη βιομηχανία γυαλιού.

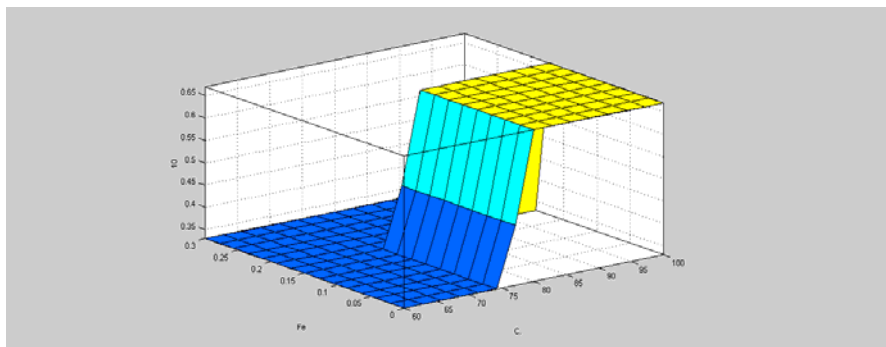
Στο Σχήμα 5.9 απεικονίζεται η επιφάνεια απόκρισης της βιομηχανίας γυαλιού σε σχέση με το Fe_2O_3 και την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων. Παρατηρείται λοιπόν ότι με αύξηση της κατανομής του μεγέθους των σωματιδίων αυξάνεται και το ποσοστό καταλληλότητας του υλικού για τη βιομηχανία γυαλιού.



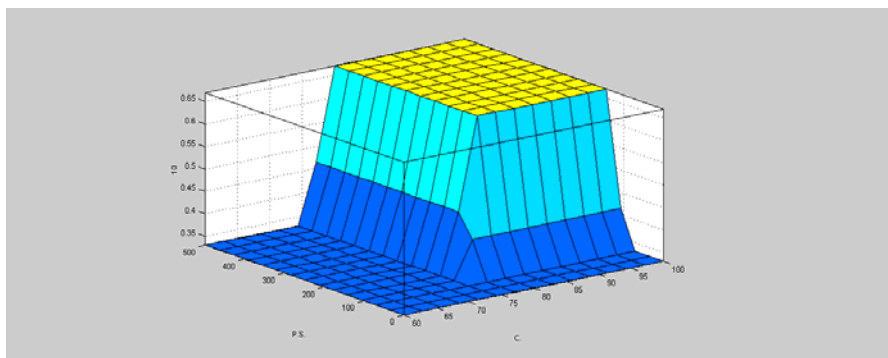
Σχήμα 5.9: Επιφάνεια απόκρισης του Fe_2O_3 και της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων σε σχέση με τη βιομηχανία γυαλιού.

Στο Σχήμα 5.10 παρουσιάζεται η επιφάνεια απόκρισης της βιομηχανίας σκυροδέματος σε σχέση με το σύνολο των ανθρακικών και του Fe_2O_3 . Παρατηρείται ότι με αύξηση του συνόλου των ανθρακικών αυξάνεται και η καταλληλότητα του υλικού ως προς τη βιομηχανία σκυροδέματος ενώ το Fe_2O_3 δείχνει να μη το επηρεάζει.

Ακόμη στο Σχήμα 5.11 παρουσιάζεται η επιφάνεια απόκρισης της προηγούμενης βιομηχανίας σε σχέση τώρα με το σύνολο των ανθρακικών και την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων. Παρατηρείται ότι με σταδιακή αύξηση των ιδιοτήτων αυτών, το υλικό γίνεται όλο και πιο κατάλληλο για τη συγκεκριμένη βιομηχανία.

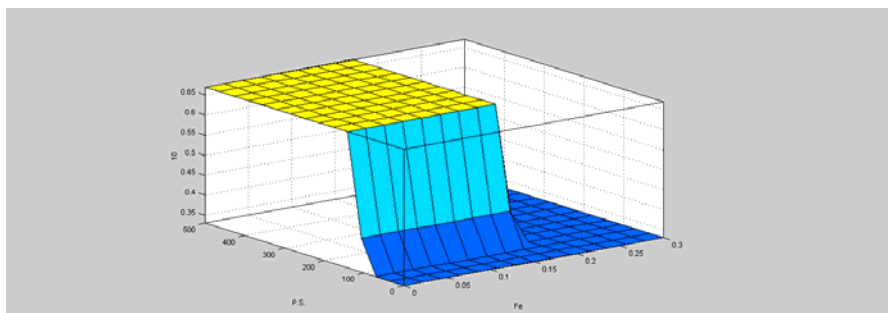


Σχήμα 5.10: Επιφάνεια απόκρισης του συνόλου των ανθρακικών και του Fe_2O_3 σε σχέση με τη βιομηχανία σκυροδέματος.



Σχήμα 5.11: Επιφάνεια απόκρισης του συνόλου των ανθρακικών και της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων σε σχέση με τη βιομηχανία σκυροδέματος.

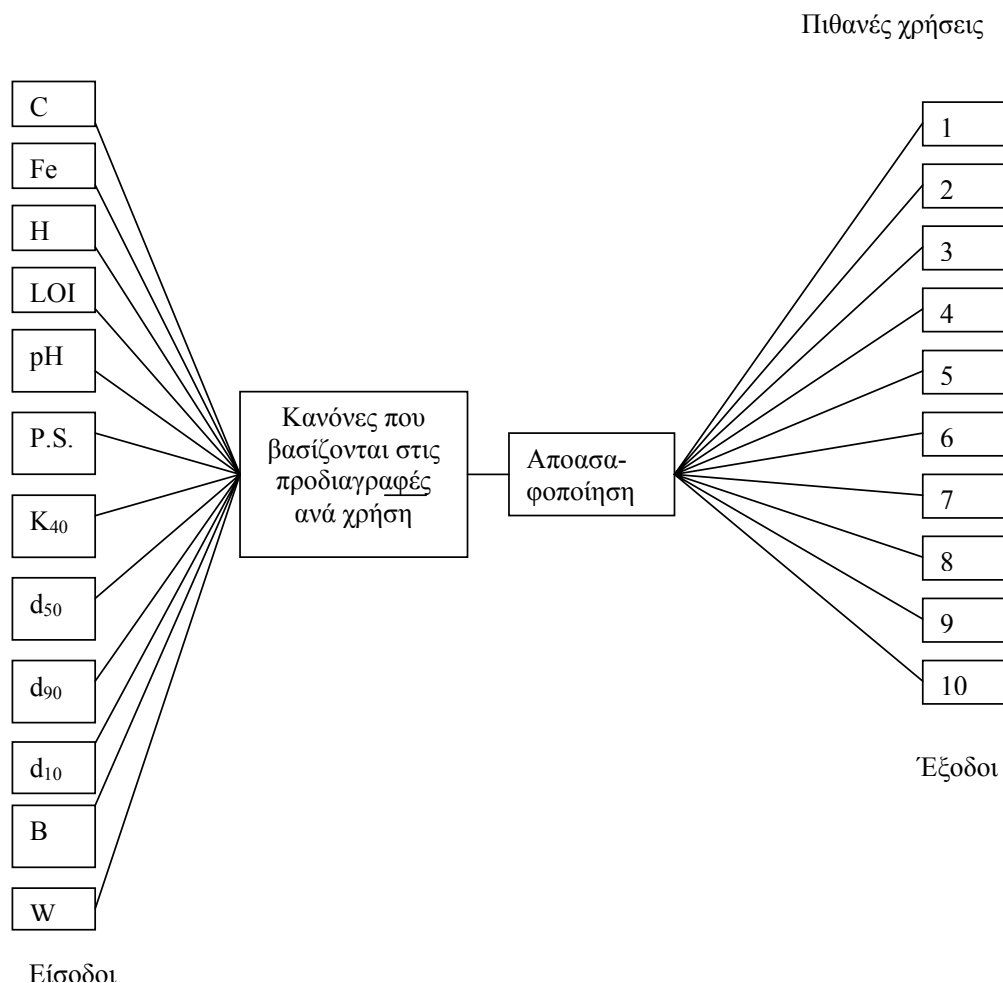
Αντίστοιχα στο Σχήμα 5.12 που απεικονίζεται η επιφάνεια απόκρισης της βιομηχανίας σκυροδέματος σε σχέση με το Fe_2O_3 και την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων, φαίνεται ότι μόνο με την αύξηση της κατανομής του μεγέθους των σωματιδίων αυξάνεται η καταλληλότητα του υλικού ως προς τη βιομηχανία σκυροδέματος.



Σχήμα 5.12: Επιφάνεια απόκρισης του Fe_2O_3 και της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων σε σχέση με τη βιομηχανία σκυροδέματος.

5.3 Εφαρμογή του έμπειρου ασαφούς συστήματος

Στην ενότητα αυτή γίνεται εφαρμογή του αναπτυχθέντος έμπειρου ασαφούς συστήματος για την αξιολόγηση 8 δειγμάτων παιπάλης. Με βάση λοιπόν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά τους μπορούν να ταξινομηθούν από το έμπειρο σύστημα που αναπτύχθηκε για την δυνατότητα χρήσης τους σε συγκεκριμένες βιομηχανίες. Στο Σχήμα 5.13 παρουσιάζεται η δομή του FIS συστήματος που δημιουργήθηκε.



Σχήμα 5.13: Η δομή του FIS συστήματος που αποτελείται από 12 εισόδους, 10 εξόδους και 18 κανόνες.

Οι τιμές που δίνονται στις εισόδους προέρχονται από την επεξεργασία των εργαστηριακών αναλύσεων και λαμβάνονται ως εξόδοι τιμές που κυμαίνονται στο διάστημα $[0 \ 1]$. Όσο η τιμή της εξόδου πλησιάζει την μονάδα, τόσο αυξάνονται οι πιθανότητες το δείγμα να καταστεί κατάλληλο για συγκεκριμένη βιομηχανία.

Στους πίνακες 5.1 έως 5.4 παρατίθενται οι εξόδοι του έμπειρου ασαφούς συστήματος σε 8 δείγματα με τη χρήση δυο μεθόδων αποασαφοποίησης. Συγκεκριμένα στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με τη χρήση της αποασαφοποίησης του κέντρου βάρους (centroid) η οποία λαμβάνει υπόψη τους κανόνες σύμφωνα με το βαθμό δυνατότητας εφαρμογής τους. Αντίστοιχα στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με τη χρήση

της αποασαφοποίησης του μέσου όρου των μεγίστων (mom) η οποία επιλέγει ως τιμή το μέσο όρο των τιμών των σημείων που παρουσιάζουν μέγιστο στο σύνολο εξόδου. Από τις δυο αυτές τεχνικές καλύτερα αποτελέσματα δίνει η αποασαφοποίηση κέντρου βάρους (centroid).

Στον Πίνακα 5.4 γίνεται σύγκριση των δυο αυτών μεθόδων αποασαφοποίησης. Από τη σύγκριση αυτή παρατηρείται ότι όταν ένα δείγμα δεν είναι δυνατόν ή έχει ελάχιστες πιθανότητες να χρησιμοποιηθεί σε μια βιομηχανία τότε για τη μέθοδο αποασαφοποίησης του μέσου όρου των μεγίστων ο βαθμός συμμετοχής θα είναι μηδέν ενώ για την αποασαφοποίηση του κέντρου βάρους θα έχει μια τιμή 0.33 ή 33%. Αντίστοιχα όταν ένα δείγμα έχει τις κατάλληλες ιδιότητες για μια βιομηχανία τότε για την αποασαφοποίηση του μέσου όρου των μεγίστων ο βαθμός συμμετοχής θα είναι μονάδα ενώ για την αποασαφοποίηση του κέντρου βάρους θα έχει μια τιμή 0.67 ή 67%. Για ενδιάμεσες καταστάσεις δηλαδή για περιπτώσεις που το δείγμα μπορεί να καταστεί κατάλληλο για μια βιομηχανία και στις δυο μεθόδους αποασαφοποίησης ο βαθμός συμμετοχής θα παίρνει τη τιμή 0.5 ή 50%.

Πίνακας 5.1: Τιμές εισόδων για την αξιολόγηση των 8 δειγμάτων.

ΕΙΣΟΔΟΙ	Σύνολο Ανθρακικών	Fe ₂ O ₃	Αδιάλυτο HCl	Απώλεια Πύρωσης	pH	Κατανομή μεγέθους σωματιδίων	Παραμένον με d=40μm	Διάμετρος κόκκων που παραμένουν κατά 50%	Διάμετρος κόκκων που παραμένουν κατά 90%	Διάμετρος κόκκων που παραμένουν κατά 10%	Ειδική Επιφάνεια	Λευκότητα
X.A.1	98.45	0.06	0.75	40.4	9.34	5.5	14.5	15	1.8	50	2841.36	92
19	97.9	0.165	2.3	40.4	8.78	1.5	3	4.9	0.7	20.5	5465.12	84
13	98.97	0.21		40.4		2.1	3.5	6.5	0.95	26	5834.08	84
8	98.41	0.21				2	3	6.2	0.85	24	5706.52	84
11	98.51	0.27				2.4	7.5	7.5	1.1	32	5844.59	84
X.A.2	99.63	0.07				5.6	14	15	1.78	50	3135.19	92
14	98.77	0.25				2.7	6.5	7.5	1.1	31	5815.76	84
24	98.97	0.179				1.5	2	4.9	0.69	19.5	5545.73	84

Πίνακας 5.2: Τα αποτελέσματα από την αξιολόγηση των 8 δειγμάτων με χρήση του έμπειρου ασαφούς συστήματος και με τη μέθοδο αποασαφοποίησης κέντρου βάρους (centroid).

ΕΞΟΔΟΙ	Βιομηχανία Χάρτου (filler)	Βιομηχανία Χάρτου (επικάλυμμα)	Βιομηχανία Χρωμάτων & Βερνικιών	Βιομηχανία Πλαστικών	Χημική Βιομηχανία	Βιομηχανία Τροφίμων & Ζωοτροφών	Βιομηχανία Λιπασμάτων	Βιομηχανία Παραγωγής Σιδήρου	Βιομηχανία Γυαλιού	Βιομηχανία Σκυροδέματος
X.A.1	0.33	0.33	0.33	0.33	0.67	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
19	0.33	0.33	0.33	0.33	0.67	0.67	0.33	0.33	0.33	0.33
13	0.33	0.33	0.33	0.33	0.67	0.67	0.33	0.33	0.33	0.33
8	0.33	0.33	0.33	0.33	0.5	0.67	0.33	0.33	0.33	0.33
11	0.33	0.33	0.33	0.33	0.5	0.67	0.33	0.33	0.33	0.33
X.A.2	0.33	0.33	0.33	0.33	0.5	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
14	0.33	0.33	0.33	0.33	0.5	0.67	0.33	0.33	0.33	0.33
24	0.33	0.33	0.33	0.33	0.5	0.67	0.33	0.33	0.33	0.33

Πίνακας 5.3: Τα αποτελέσματα από την αξιολόγηση των 8 δειγμάτων με χρήση του έμπειρου ασαφούς συστήματος και με τη μέθοδο αποασαφοποίησης του μέσου όρου των μεγίστων (mom).

ΕΞΟΔΟΙ	Βιομηχανία Χάρτου (filler)	Βιομηχανία Χάρτου (επικάλυμμα)	Βιομηχανία Χρωμάτων & Βερνικιών	Βιομηχανία Πλαστικών	Χημική Βιομηχανία	Βιομηχανία Τροφίμων & Ζωοτροφών	Βιομηχανία Λιπασμάτων	Βιομηχανία Παραγωγής Σιδήρου	Βιομηχανία Γυαλιού	Βιομηχανία Σκυροδέματος
X.A.1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
13	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0.5	1	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0.5	1	0	0	0	0
X.A.2	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0.5	1	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0.5	1	0	0	0	0

Πίνακας 5.4: Σύγκριση των δύο μεθόδων αποασαφοποίησης.

ΕΞΟΔΟΙ	Βιομηχανία Χάρτου (filler)		Βιομηχανία Χάρτου (επικάλυμμα)		Βιομηχανία Χρωμάτων & Βερνικιών		Βιομηχανία Πλαστικών		Χημική Βιομηχανία		Βιομηχανία Τροφίμων & Ζωοτροφών		Βιομηχανία Λιπασμάτων		Βιομηχανία Παραγωγής Σιδήρου		Βιομηχανία Γυαλιού		Βιομηχανία Σκυροδέματος	
ΔΕΙΓΜΑ	centro id	mom	centro id	mom	centro id	mom	centro id	mom	centro id	mom	centro id	mom	centro id	mom	centro id	mom	centro id	mom	centro id	mom
X.A.1	0.33	0	0.33	0	0.33	0	0.33	0	0.67	1	0.33	0	0.33	0	0.33	0	0.33	0	0.33	0
19	0.33	0	0.33	0	0.33	0	0.33	0	0.67	1	0.67	1	0.33	0	0.33	0	0.33	0	0.33	0
13	0.33	0	0.33	0	0.33	0	0.33	0	0.67	1	0.67	1	0.33	0	0.33	0	0.33	0	0.33	0
8	0.33	0	0.33	0	0.33	0	0.33	0	0.5	0.5	0.67	1	0.33	0	0.33	0	0.33	0	0.33	0
11	0.33	0	0.33	0	0.33	0	0.33	0	0.5	0.5	0.67	1	0.33	0	0.33	0	0.33	0	0.33	0

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5° : ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΕΜΠΕΙΡΟΥ ΑΣΑΦΟΥΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ MATLAB® (FUZZY TOOLBOX)

Χ.Α.2	0.33	0	0.33	0	0.33	0	0.33	0	0.5	0.5	0.33	0	0.33	0	0.33	0	0.33	0	0.33	0
14	0.33	0	0.33	0	0.33	0	0.33	0	0.5	0.5	0.67	1	0.33	0	0.33	0	0.33	0	0.33	0
24	0.33	0	0.33	0	0.33	0	0.33	0	0.5	0.5	0.67	1	0.33	0	0.33	0	0.33	0	0.33	0

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6°:**ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ****6.1 Συμπεράσματα**

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η δυνατότητα αξιολόγησης της ασβεστολιθικής παιπάλης που παράγεται κατά τη λατομική διεργασία ως παραπροϊόν των αδρανών υλικών και δημιουργεί προβλήματα κατά την απόθεσή της. Γι' αυτό η αξιοποίησή της σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς αποτελεί επιτακτικό παράγοντα για τη βιωσιμότητα του λατομείου αφού εκτός από τον οικονομικό τομέα συνεισφέρει και στη προστασία του περιβάλλοντος.

Για τον προσδιορισμό των ποιοτικών χαρακτηριστικών των λεπτομερών ασβεστολιθικών υλικών πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές αναλύσεις σε 30 δείγματα παιπάλης όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Λαμβάνοντας υπόψη τον Πίνακα 3.10 στον οποίο παρουσιάζονται οι προδιαγραφές για την αξιολόγηση της παιπάλης και συγκρίνοντας αυτές με τις τιμές των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων που προέρχονται από την επεξεργασία των εργαστηριακών μετρήσεων, προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- οι τιμές (%) του συνόλου των ανθρακικών ορυκτών και των υπολοίπων ενώσεων που προσδιορίστηκαν πληρούν τις προδιαγραφές
- η κατανομή μεγέθους των κόκκων είναι μικρότερη σε σχέση με τις οριακές τιμές των προδιαγραφών.
- οι μετρήσεις της ειδικής επιφάνειας με τη μέθοδο Blaine (cm^2/g) πληρούν τις προδιαγραφές
- οι μετρήσεις της απώλειας πύρωσης στους 1050°C και του αδιάλυτου υπολείμματος σε HCl πληρούν τις προδιαγραφές
- οι μετρήσεις του pH δεν πληρούν τις προδιαγραφές
- η λευκότητα θεωρήθηκε <85 άρα δε τηρεί τις απαιτήσεις των οριακών τιμών.

Μια πιο αναλυτική αξιολόγηση της παιπάλης με βάση τα παραπάνω στοιχεία, έγινε με τη χρήση της ασαφούς λογικής. Δηλαδή δημιουργήθηκε ένα έμπειρο ασαφές σύστημα το οποίο είχε ως εισόδους βασικές ιδιότητες της παιπάλης που ήταν δώδεκα και ως εξόδους είχε δέκα βιομηχανίες, στις οποίες είναι πιθανό να χρησιμοποιηθεί.

Με βάση ένα συγκεκριμένο αριθμό δειγμάτων της παιπάλης, έγινε εφαρμογή του FIS συστήματος με σκοπό την αξιολόγηση των δειγμάτων. Δηλαδή σε τι ποσοστό είναι κατάλληλα να χρησιμοποιηθούν σε κάθε μια βιομηχανία.

Τα συμπεράσματα λοιπόν που προέκυψαν είναι τα εξής:

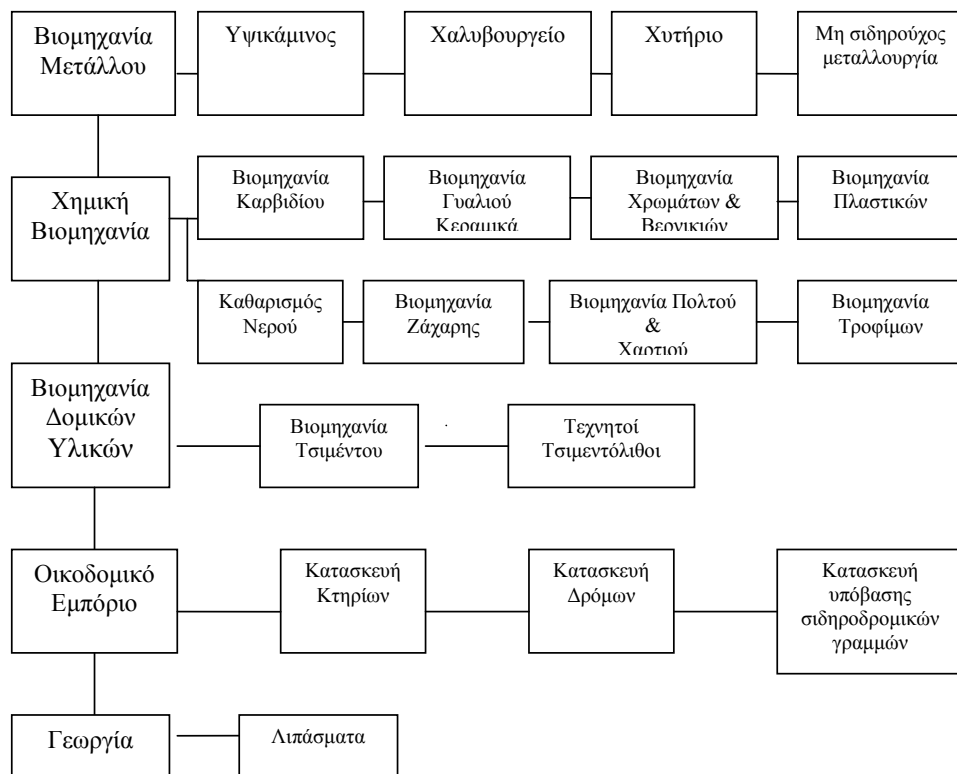
- Για τα δείγματα X.A.1 και X.A.2 που προέρχονται από τη λευκή παιπάλη, η πιθανότητα να καταστούν κατάλληλα για τη χημική βιομηχανία είναι 67% και 50% αντίστοιχα. Επομένως η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν σε αυτή τη βιομηχανία είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τις άλλες.
- Για τα δείγματα 8, 11, 14 και 24 που προέρχονται από την καφέ παιπάλη εκτός από το τελευταίο που προέρχεται από τη μαύρη, η πιθανότητα να καταστούν κατάλληλα για τη βιομηχανία τροφίμων και ζωοτροφών είναι 67% ενώ για τη χημική βιομηχανία είναι 50%. Άρα η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν τα συγκεκριμένα δείγματα στη χημική βιομηχανία είναι μεγάλη και ακόμη μεγαλύτερη για τη βιομηχανία τροφίμων και ζωοτροφών.
- Για τα δείγματα 13 και 19 που προέρχονται από την καφέ και τη μαύρη παιπάλη αντίστοιχα, η πιθανότητα να καταστούν κατάλληλα για τη χημική βιομηχανία και τη βιομηχανία τροφίμων και ζωοτροφών είναι 67%. Άρα η δυνατότητα χρήσης τους σε αυτές τις βιομηχανίες είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τις άλλες βιομηχανίες.

Επομένως η συγκεκριμένη ασβεστολιθική παιπάλη που προήλθε από λατομείο αδρανών υλικών που εδρεύει στην Κρήτη, είναι πιο κατάλληλη η χρήση της στη χημική βιομηχανία και στη βιομηχανία τροφίμων και ζωοτροφών.

6.2 Προτάσεις

Για τη βελτίωση της ακρίβειας του έμπειρου ασαφούς συστήματος που δημιουργήθηκε, προτείνεται η αύξηση του αριθμού των εισόδων. Αυτό σημαίνει περισσότερες ιδιότητες της παιπάλης όπως για παράδειγμα είναι οι μηχανικές (θλίψη, κάμψη, αντοχή στη τριβή κ.ά.), οι ηλεκτρικές, οι ρεολογικές και οι θερμικές. Με τον τρόπο αυτό τα αποτελέσματα είναι πιο ακριβή αφού γίνεται μια ολοκληρωμένη περιγραφή του υλικού.

Μια άλλη πρόταση είναι η προσθήκη και άλλων εξόδων. Δηλαδή να αναφερθούν και άλλες βιομηχανίες στις οποίες είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί η παιπάλη. Έτσι η ασβεστολιθική παιπάλη μπορεί να καταστεί κατάλληλη σε ένα μεγαλύτερο αριθμό βιομηχανιών. Κάποιοι τομείς της οικονομίας που είναι πιθανό να χρησιμοποιηθούν τα ασβεστολιθικά λεπτομερή παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1: Δυνατότητες χρήσης της ασβεστολιθικής παιπάλης.

Τέλος θα μπορούσαν να προστεθούν και άλλοι παράμετροι στο έμπειρο ασαφές σύστημα που να αφορούν το κατά πόσο εύκολα ή δύσκολα μπορεί το υλικό να επεξεργαστεί για να βελτιωθούν οι χαρακτηριστικές του ιδιότητες. Σημαντικό ρόλο παίζει αν η επεξεργασία που θα υποστεί το υλικό είναι τεχνικά και οικονομικά εφικτή.

Όταν λοιπόν η τιμή μιας ιδιότητας μπορεί εύκολα με κάποια επεξεργασία να προσεγγίσει το όριο των προδιαγραφών για μια βιομηχανία τότε το υλικό θα θεωρείται κατάλληλο για τη συγκεκριμένη βιομηχανία. Όταν υπάρχει δυσκολία στο να υποστεί επεξεργασία το υλικό τότε δεν θεωρείται κατάλληλο ενώ σε ενδιάμεση περίπτωση το υλικό υπάρχει πιθανότητα να χρησιμοποιηθεί σε συγκεκριμένη βιομηχανία.

Μια ακόμη παράμετρος μπορεί να είναι η μεταβολή της αξίας του υλικού μετά την επεξεργασία που θα έχει υποστεί. Δηλαδή αν η τιμή του υλικού αυξάνεται ή όχι όταν οι χαρακτηριστικές ιδιότητές του προσεγγίζουν τα όρια των προδιαγραφών για μια βιομηχανία.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Βιβλιογραφία

- 1) Ακριβός, Π. και Μανουσάκης, Γ. και Μπόλος, Χ. και Παπαστεφάνου, Σ. και Συγκολλιτού, Α. και Κουράκου και Χατζηκώστας, Χ. , "Εργαστηριακές Ασκήσεις Γενικής Ανόργανης Χημείας", Εκδόσεις ΖΗΤΗ , Θεσσαλονίκη.
- 2) Γαλετάκης, Μ., (1991), "Βασικές αρχές φασματοσκοπίας ακτίνων Χ-Φθορισμού και πρακτική των μετρήσεων", Εργαστηριακές σημειώσεις, Χανιά.
- 3) Κωστάκης, Γ., (1988), "Γενική Ορυκτολογία", Σημειώσεις μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- 4) Κωστάκης, Γ.,(2003), "Εισαγωγή στην αξιολόγηση των βιομηχανικών ορυκτών", Σημειώσεις μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- 5) Χρηστίδης, Γ.,(2006), "Κοιτασματολογία ΙΙ" (Βιομηχανικά Ορυκτά και Πετρώματα), Σημειώσεις μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- 6) Καστανάκη, Ε., (2002), Κινητικές μελέτες πυρόλυσης βιομάζας, λιγνίτη και μιγμάτων λιγνίτη με βιομάζα, ΜΔΕ, Χανιά.
- 7) Κοροπούλης, Ι., Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, Διευθυντής Τεχνικής Εξυπηρέτησης ΜΑΠΕΙ ΕΛΛΑΣ Α.Ε.Β.Ε, "Αυτο-Συμπυκνούμενο Σκυρόδεμα SCC (Self Compacting Concrete)".
- 8) Σίδερης, Κ., Επίκ. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης, Κυριτσάς , Σ., Διπλ. Πολ. Μηχανικός, Προϊστάμενος Εργαστηρίου Τεχνολογίας Σκυροδέματος TITAN , Χανιωτάκης , Ε., Χημικός , Διευθυντής Τμήματος Έρευνας και Ποιότητας Τσιμέντων TITAN , "Μηχανικά χαρακτηριστικά και ανθεκτικότητα αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων παρασκευασθέντων με ελληνικά υλικά".
- 9) Σταμπολιάδης, Η.,(1995), "Εμπλουτισμός Ι", Σημειώσεις μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- 10) Σταμπολιάδης, Η.,(2004), "Μηχανική των Τεμαχιδίων", Σημειώσεις μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Διεθνής Βιβλιογραφία

- 1) Colman , T.B., with contributions from Highley, D.E., A G Gunn, A.G., Cameron, D.G., and Prof. Smith, B., (August 2003), "An assessment of the nature of the waste produced by active mineral workings in the UK",Commissioned Report CR/03/157C, For the office of the Deputy Prime Minister.
- 2) Kolb, H., (2001), Aufbereitung von Carbonaten, ZKG INTERNATIONAL, Vo 54, No 5/2001, Austria.
- 3) CCA-Europe – "The European Calcium Carbonate Association" (Member of IMA-Europe).
- 4) Malvern Instuments Limited, www.malvern.co.uk.
- 5) Francis, Harry L. , Consultant Lime, (July 8, 1997), "Potential markets and uses for finely ground limestone from mineral processing".
- 6) Chapter 2, "Literature review on use of fines in cement and concrete".
- 7) Chapter 5, "Limestone Uses, Chemistry and Technology of Lime and Limestone".
- 8) Able, R. J. (1995). Update on the aggregate industry investigation on the utilization of fines for remineralization. ICAR 3rd annual symposium.
- 9) Ahn, N. and Fowler, D. W. (2002). The Effects of High Fines on the Properties of Concrete. ICAR 10th Annual Symposium.
- 10) Ahn, N., Phelan, T., Fowler, D. W. and Hudson, B. P. (2001). The Effects of High-Fines Concrete on the Properties of Cement Mortar and Concrete. ICAR 9th Annual Symposium.
- 11) Çelik, T. and Marar, K. (1996). Effects of crushed stone dust on some properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, 26, pp 1121-1130.
- 12) Collins, R. (1999). Innovative uses of aggregate fines in hot-mix asphalts. ICAR 7th annual symposium.
- 13) Crouch, L. K., Dotson, V. J., Clouse, L. and Hall, S. M. (2003). Effect of Fine Aggregate Type on CLSM Properties. ICAR 11th Annual Symposium.
- 14) de Rezende, L.R. and de Carvalho, J.C. (2003). The use of quarry waste in pavement construction. *Resources, Conservation and Recycling*, pp. 1-15.
- 15) Dukatz, E. L. (1995). Effective use of aggregate fines. ICAR 3rd annual symposium.
- 16) Felekoglu, B. and Baradan, B. (2003). Utilisation of limestone powder in self-levelling binders. *In: Recycling and Reuse of Waste Materials*. Eds Dhir, R.K., Newlands, M.D., Halliday, J.E. pp.475-484.
- 17) Fowler, J. (1995). Construction uses of stone fines. ICAR 3rd annual symposium.

- 18) Fowler, J. C. (1997). Increasing amount of minus 200 fines in Portland cement concrete. ICAR 5th annual symposium.
- 19) Fowler, D. W. and Constantino, C. A. (1997). International research on fines in concrete. ICAR 5th annual symposium.
- 20) Fraser, J. and McBride, R.A. (2000). The utility of aggregate processing fines in the rehabilitation of dolomite quarries. *Land Degradation and Development*, 11, pp 1-17.
- 21) Galetakis, M. and Raka, S (2003). Utilization of limestone dust for artificial stones production. Processing and Disposal of Mineral Industry Wastes Conference 18-20 June 2003.
- 22) Graves, R. E. and Little, D. N. (1996). Importance of carbonate fines in improving structural contribution of unbound limestone. ICAR 4th annual symposium.
- 23) Harrison, D. J. (2003). From waste to wealth: developing saleable mineral products from quarry waste. *In: Recycling and Reuse of Waste Materials*. Eds Dhir, R.K., Newlands, M.D., Halliday, J.E. pp.281-286.
- 24) Jackson, N. M. and Brown, R. H. (1996). Use of higher fines contents in Portland cement concrete. ICAR 4th annual symposium.
- 25) Marabini, A., Plescia, P., Maccari, D., Burrigato, F. and Pelino, M. (1998). New materials from industrial and mining wastes: glass-ceramic and glass and rock wool fibre. *International Journal of Mineral Processing*, 53, pp 121-134.
087/MIST2/DACM/01 MIST project reference: MA/2/4/003
- 26) Parker, F. (1996). Crushed stone fines for mechanically stabilized earth walls. ICAR 4th annual symposium.
- 27) Smith, J. O. and Slaughter, P. (1996). Uses for by-product fines. ICAR 4th annual symposium.
- 28) South African Peak Quarry (Company). South African quarry turns waste into valuable product, *The world of Svedala. C&D Debris Recycling*; Mar/Apr 98, Vol. 5, Issue 2, p19.
- 29) Touahamia, M., Sivakumar, V. and McKelvey, D. (2002). Shear strength of reinforced-recycled material. *Construction and Building Materials*, 16, pp 331-339. *087/MIST2/DACM/01 MIST project reference: MA/2/4/003*.
- 30) Watson, D. (1999). Georgia's experience with increasing the use of fines in concrete. ICAR 7th annual symposium.
- 31) Harris, C. J., Moore, G. and Brown, M., (1993), "Intelligent Control, Aspects of Fuzzy Logic and Neural Nets", World Scientific Publishing, Singapore.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 32) Matlab, Fuzzy Logic Toolbox User's Guide, The Mathworks, Inc., Version 2, copyright 1995-1998.
- 33) Driankov, D., Hellendoorn, H. and Reinfrank, M.,(1993), "An Introduction to Fuzzy Control", Springer, United States of America.
- 34) Kruse, R., Gebhardt J. and Klawonn, F., (1994), "Foundations of Fuzzy Systems", Published by John Wiley & Sons Ltd, England.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α:

Αναλυτικές μετρήσεις της παιπάλης για κοκκομετρία με Laser

Πίνακας 3.1: Ποσοστό διερχόμενου

Μέγεθος (μm)	Ποσοστό διερχόμενου κ.ο.									
	Χ.Α. 1	Χ.Α.2	Δείγμα 8	Δείγμα 11	Δείγμα 13	Δείγμα 14	Δείγμα 19	Δείγμα 24	Δείγμα 1Α	Δείγμα 1Β
0.06	0.00118	0.00119	0.00915	0.00417	0.00544	0.00353	0.0019	0.00573	0	0.0025
0.07	0.00422	0.00425	0.02447	0.01206	0.01537	0.01059	0.00662	0.01709	0	0.00862
0.08	0.01123	0.01127	0.04888	0.0261	0.03247	0.02384	0.01722	0.038	0.01	0.02195
0.09	0.02501	0.02503	0.08419	0.04846	0.05907	0.04602	0.03779	0.07214	0.03	0.04671
0.11	0.04816	0.04814	0.13042	0.08035	0.09627	0.0791	0.0724	0.12159	0.07	0.08604
0.13	0.08216	0.0821	0.18611	0.1218	0.14393	0.12389	0.12399	0.18639	0.15	0.14069
0.15	0.12782	0.1278	0.24998	0.17292	0.202	0.18119	0.19541	0.26636	0.32	0.21005
0.17	0.18688	0.1871	0.32261	0.23541	0.27225	0.2536	0.29208	0.36359	0.6	0.29474
0.20	0.26023	0.26109	0.4043	0.31091	0.35618	0.34321	0.41978	0.47981	1.05	0.39432
0.23	0.33903	0.3411	0.48861	0.39416	0.44733	0.44191	0.56998	0.60571	1.61	0.49696
0.27	0.39616	0.39996	0.55781	0.46627	0.52412	0.52152	0.70067	0.71096	2.13	0.57137
0.31	0.41132	0.41673	0.60026	0.51143	0.56957	0.55884	0.77032	0.77123	2.39	0.59728
0.36	0.41593	0.42249	0.64288	0.55423	0.61234	0.58673	0.82543	0.82457	2.4	0.61717
0.42	0.45384	0.46123	0.72616	0.63536	0.69818	0.65656	0.94742	0.93189	2.37	0.69044
0.49	0.5063	0.51362	0.83544	0.73679	0.80764	0.74375	1.09613	1.06607	2.29	0.79811
0.58	0.55468	0.56066	0.95208	0.83592	0.91663	0.82177	1.22486	1.19558	2.07	0.91701
0.67	0.63791	0.64183	1.11207	0.97177	1.06858	0.9391	1.41735	1.37807	1.9	1.10275
0.78	0.71483	0.71611	1.27144	1.09858	1.21307	1.04367	1.58789	1.54954	1.79	1.29742
0.91	0.77261	0.77299	1.41109	1.20741	1.33872	1.13258	1.75072	1.70551	1.74	1.49623
1.06	0.81707	0.81741	1.54087	1.30948	1.45571	1.21531	1.90759	1.85546	1.78	1.68188
1.24	0.84192	0.84388	1.66005	1.40687	1.56495	1.29518	2.06348	2.00386	1.91	1.84753
1.44	0.83989	0.84565	1.77136	1.50329	1.66884	1.37561	2.21642	2.15571	2.12	1.97851

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

1.68	0.81805	0.82957	1.89384	1.61784	1.78679	1.47624	2.38688	2.33572	2.39	2.07769
1.95	0.8001	0.81846	2.06339	1.78606	1.95675	1.63529	2.62326	2.58859	2.77	2.17418
2.28	0.80756	0.83267	2.31009	2.03472	2.20847	1.88236	2.95119	2.94138	3.21	2.28861
2.65	0.8623	0.89272	2.65406	2.37861	2.5606	2.23581	3.37628	3.40157	3.69	2.43746
3.09	0.99322	1.02609	3.10757	2.82946	3.02828	2.71341	3.90931	3.97042	4.15	2.6467
3.60	1.21815	1.24862	3.64804	3.3662	3.58958	3.29694	4.50402	4.59853	4.57	2.91046
4.19	1.55213	1.57391	4.23043	3.94688	4.20053	3.94782	5.09271	5.2119	4.9	3.21301
4.88	1.99623	2.00257	4.7789	4.49859	4.78467	4.58841	5.56518	5.70279	5.12	3.51343
5.69	2.53499	2.519	5.21116	4.93935	5.25233	5.12428	5.81315	5.96912	5.2	3.76363
6.63	3.14355	3.10168	5.47246	5.2149	5.54217	5.48614	5.78981	5.9639	5.17	3.9387
7.72	3.81757	3.74939	5.56447	5.33238	5.65786	5.67198	5.54727	5.72633	4.75	4.05861
9.00	4.52169	4.43244	5.49533	5.29924	5.60448	5.67999	5.14076	5.31236	4.23	4.13225
10.48	5.18918	5.08961	5.28711	5.13443	5.4024	5.51877	4.64003	4.79834	3.67	4.16428
12.21	5.76347	5.66704	4.98622	4.87981	5.10102	5.23175	3.97309	4.09845	3.15	4.17385
14.22	6.18043	6.10044	4.63885	4.57183	4.75078	4.86341	3.37994	3.46745	2.69	4.16987
16.57	6.38147	6.3281	4.20421	4.23129	4.3002	4.4493	2.88786	2.93649	2.3	4.14844
19.31	6.35613	6.3343	3.77153	3.87798	3.84847	3.95883	2.50178	2.51017	1.97	4.11212
22.49	6.13579	6.14549	3.34722	3.53025	3.40258	3.48237	2.2019	2.16863	1.68	4.0617
26.20	5.80399	5.7199	2.93565	3.19006	2.96983	3.04038	1.96	1.88517	1.42	3.92799
30.53	5.07799	5.13248	2.53636	2.85123	2.555	2.64338	1.74318	1.63201	1.18	3.72772
35.56	4.29484	4.35868	2.13706	2.50483	2.15916	2.2888	1.51975	1.37886	0.95	3.45122
41.43	3.52537	3.59839	1.73776	2.14416	1.78086	1.96204	1.29631	1.1257	0.73	3.09242
48.27	2.81498	2.89994	1.33846	1.76944	1.41737	1.6408	1.07287	0.87254	0.53	2.64836
56.23	2.19334	2.28939	0.93916	1.39697	1.05388	1.31358	0.84944	0.61939	0.36	2.13327
65.51	1.67763	1.77638	0.53986	1.04919	0.6904	0.98552	0.626	0.36623	0.22	1.58149
76.32	1.28015	1.36817	0.14057	0.76128	0.32691	0.69005	0.40256	0.11308	0.13	1.06207
88.91	1.001	1.06544	0	0.5553	0	0.46156	0	0	0.07	0.642
103.58	0.82992	0.86369	0	0.43211	0	0.31938	0	0	0.05	0.36406
120.67	0.7434	0.74602	0	0.36747	0	0.25357	0	0	0	0.08612
140.58	0.70746	0.68303	0	0.32251	0	0.2299	0	0	0	0
163.77	0.68663	0.64151	0	0.2643	0	0.21106	0	0	0	0
190.80	0.64747	0.58947	0	0.18063	0	0.17147	0	0	0	0
222.28	0.56014	0.49957	0	0.09696	0	0.10646	0	0	0	0
258.95	0.41027	0.35793	0	0	0	0.04145	0	0	0	0

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

301.68	0.21178	0.21629	0	0	0	0	0	0	0	0
351.46	0.01328	0	0	0	0	0	0	0	0	0
409.45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
477.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
555.71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
647.41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
754.23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
878.67	0	0	0	0	0	0	0	0		0

Πίνακας 3.2: Αθροιστικό ποσοστό διερχόμενου

Αθροιστικό ποσοστό διερχόμενου										
Μέγεθος (μm)	Χ.Α. 1	Χ.Α. 2	Δείγμα 8	Δείγμα 11	Δείγμα 13	Δείγμα 14	Δείγμα 19	Δείγμα 24	Δείγμα 1A	Δείγμα 1B
0.06	0.00118	0.00119	0.00915	0.00417	0.00544	0.00353	0.0019	0.00573	0	0.0025
0.07	0.0054	0.00544	0.03362	0.01623	0.02081	0.01412	0.00852	0.02282	0	0.01112
0.08	0.01663	0.01671	0.0825	0.04233	0.05328	0.03796	0.02574	0.06082	0.01	0.03307
0.09	0.04164	0.04174	0.16669	0.09079	0.11235	0.08398	0.06353	0.13296	0.04	0.07978
0.11	0.0898	0.08988	0.29711	0.17114	0.20862	0.16308	0.13593	0.25455	0.11	0.16582
0.13	0.17196	0.17198	0.48322	0.29294	0.35255	0.28697	0.25992	0.44094	0.26	0.30651
0.15	0.29978	0.29978	0.7332	0.46586	0.55455	0.46816	0.45533	0.7073	0.58	0.51656
0.17	0.48666	0.48688	1.05581	0.70127	0.8268	0.72176	0.74741	1.07089	1.18	0.8113
0.20	0.74689	0.74797	1.46011	1.01218	1.18298	1.06497	1.16719	1.5507	2.23	1.20562
0.23	1.08592	1.08907	1.94872	1.40634	1.63031	1.50688	1.73717	2.15641	3.84	1.70258
0.27	1.48208	1.48903	2.50653	1.87261	2.15443	2.0284	2.43784	2.86737	5.97	2.27395
0.31	1.8934	1.90576	3.10679	2.38404	2.724	2.58724	3.20816	3.6386	8.36	2.87123
0.36	2.30933	2.32825	3.74967	2.93827	3.33634	3.17397	4.03359	4.46317	10.76	3.4884
0.42	2.76317	2.78948	4.47583	3.57363	4.03452	3.83053	4.98101	5.39506	13.13	4.17884
0.49	3.26947	3.3031	5.31127	4.31042	4.84216	4.57428	6.07714	6.46113	15.42	4.97695
0.58	3.82415	3.86376	6.26335	5.14634	5.75879	5.39605	7.302	7.65671	17.49	5.89396
0.67	4.46206	4.50559	7.37542	6.11811	6.82737	6.33515	8.71935	9.03478	19.39	6.99671
0.78	5.17689	5.2217	8.64686	7.21669	8.04044	7.37882	10.30724	10.58432	21.18	8.29413

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

0.91	5.9495	5.99469	10.05795	8.4241	9.37916	8.5114	12.05796	12.28983	22.92	9.79036
1.06	6.76657	6.8121	11.59882	9.73358	10.83487	9.72671	13.96555	14.14529	24.7	11.47224
1.24	7.60849	7.65598	13.25887	11.14045	12.39982	11.02189	16.02903	16.14915	26.61	13.31977
1.44	8.44838	8.50163	15.03023	12.64374	14.06866	12.3975	18.24545	18.30486	28.73	15.29828
1.68	9.26643	9.3312	16.92407	14.26158	15.85545	13.87374	20.63233	20.64058	31.12	17.37597
1.95	10.06653	10.14966	18.98746	16.04764	17.8122	15.50903	23.25559	23.22917	33.89	19.55015
2.28	10.87409	10.98233	21.29755	18.08236	20.02067	17.39139	26.20678	26.17055	37.1	21.83876
2.65	11.73639	11.87505	23.95161	20.46097	22.58127	19.6272	29.58306	29.57212	40.79	24.27622
3.09	12.72961	12.90114	27.05918	23.29043	25.60955	22.34061	33.49237	33.54254	44.94	26.92292
3.60	13.94776	14.14976	30.70722	26.65663	29.19913	25.63755	37.99639	38.14107	49.51	29.83338
4.19	15.49989	15.72367	34.93765	30.60351	33.39966	29.58537	43.0891	43.35297	54.41	33.04639
4.88	17.49612	17.72624	39.71655	35.1021	38.18433	34.17378	48.65428	49.05576	59.53	36.55982
5.69	20.03111	20.24524	44.92771	40.04145	43.43666	39.29806	54.46743	55.02488	64.73	40.32345
6.63	23.17466	23.34692	50.40017	45.25635	48.97883	44.7842	60.25724	60.98878	69.9	44.26215
7.72	26.99223	27.09631	55.96464	50.58873	54.63669	50.45618	65.80451	66.71511	74.65	48.32076
9.00	31.51392	31.52875	61.45997	55.88797	60.24117	56.13617	70.94527	72.02747	78.88	52.45301
10.48	36.7031	36.61836	66.74708	61.0224	65.64357	61.65494	75.5853	76.82581	82.55	56.61729
12.21	42.46657	42.2854	71.7333	65.90221	70.74459	66.88669	79.55839	80.92426	85.7	60.79114
14.22	48.647	48.38584	76.37215	70.47404	75.49537	71.7501	82.93833	84.39171	88.39	64.96101
16.57	55.02847	54.71394	80.57636	74.70533	79.79557	76.1994	85.82619	87.3282	90.69	69.10945
19.31	61.3846	61.04824	84.34789	78.58331	83.64404	80.15823	88.32797	89.83837	92.66	73.22157
22.49	67.52039	67.19373	87.69511	82.11356	87.04662	83.6406	90.52987	92.007	94.34	77.28327
26.20	73.32438	72.91363	90.63076	85.30362	90.01645	86.68098	92.48987	93.89217	95.76	81.21126
30.53	78.40237	78.04611	93.16712	88.15485	92.57145	89.32436	94.23305	95.52418	96.94	84.93898
35.56	82.69721	82.40479	95.30418	90.65968	94.73061	91.61316	95.7528	96.90304	97.89	88.3902
41.43	86.22258	86.00318	97.04194	92.80384	96.51147	93.5752	97.04911	98.02874	98.62	91.48262
48.27	89.03756	88.90312	98.3804	94.57328	97.92884	95.216	98.12198	98.90128	99.15	94.13098
56.23	91.2309	91.19251	99.31956	95.97025	98.98272	96.52958	98.97142	99.52067	99.51	96.26425
65.51	92.90853	92.96889	99.85942	97.01944	99.67312	97.5151	99.59742	99.8869	99.73	97.84574
76.32	94.18868	94.33706	99.99999	97.78072	100.0000	98.20515	99.99998	99.99998	99.86	98.90781
88.91	95.18968	95.4025	99.99999	98.33602	100.0000	98.66671	99.99998	99.99998	99.93	99.54981
103.58	96.0196	96.26619	99.99999	98.76813	100.0000	98.98609	99.99998	99.99998	99.98	99.91387
120.67	96.763	97.01221	99.99999	99.1356	100.0000	99.23966	99.99998	99.99998	99.98	99.99999

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

140.58	97.47046	97.69524	99.99999	99.45811	100.0000	99.46956	99.99998	99.99998	99.98	99.99999
163.77	98.15709	98.33675	99.99999	99.72241	100.0000	99.68062	99.99998	99.99998	99.98	99.99999
190.80	98.80456	98.92622	99.99999	99.90304	100.0000	99.85209	99.99998	99.99998	99.98	99.99999
222.28	99.3647	99.42579	99.99999	100	100.0000	99.95855	99.99998	99.99998	99.98	99.99999
258.95	99.77497	99.78372	99.99999	100	100.0000	100	99.99998	99.99998	99.98	99.99999
301.68	99.98675	100	99.99999	100	100.0000	100	99.99998	99.99998	99.98	99.99999
351.46	100	100	99.99999	100	100.0000	100	99.99998	99.99998	99.98	99.99999
409.45	100	100	99.99999	100	100.0000	100	99.99998	99.99998	99.98	99.99999
477.01	100	100	99.99999	100	100.0000	100	99.99998	99.99998	99.98	99.99999
555.71	100	100	99.99999	100	100.0000	100	99.99998	99.99998	99.98	99.99999
647.41	100	100	99.99999	100	100.0000	100	99.99998	99.99998	99.98	99.99999
754.23	100	100	99.99999	100	100.0000	100	99.99998	99.99998	99.98	99.99999
878.67	100	100	99.99999	100	100.0000	100	99.99998	99.99998	99.98	99.99999

Αναλυτικές μετρήσεις της ειδικής επιφάνειας της παιπάλης με τη μέθοδο Blaine

Πίνακας 3.3: Συνολικός πίνακας της λεπτότητας κατά Blaine

ΔΟΚΙΜΗ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	T(min)	T (sec)	θ (οC)	M.O. T(sec)	√T (sec)	√T/√To	Διαπερατότητα (S) (cm ² /gr)	S (cm ² /gr)
1	Τσιμέντο αναφοράς(114p)	1:41.40	101.4	20					
2	Τσιμέντο αναφοράς(114p)	1:37.01	97.01	20					
3	Τσιμέντο αναφοράς(114p)	1:36.76	96.76	20	98.39	9.919173			
4	1	3:17.42	197.42	20					
5	1	3:15.29	195.29	20	196.355	14.01267	1.412686	5997.909662	5997.91
6	2	1:28.24	88.24	20					
7	2	1:27.11	87.11	20	87.675	9.363493	0.943979	4007.899522	4007.9
8	3	3:37.11	217.11	21					
9	3	3:36.57	216.57	21	216.84	14.72549	1.484548	6303.019305	6303.02
10	4	2:36.89	156.89	21					
11	4	2:37.43	157.43	21	157.16	12.53635	1.26385	5365.991101	5365.99
12	5	2:36.12	156.12	21					
13	5	2:38.00	158	21	157.06	12.53236	1.263448	5364.283654	5364.28
14	6	2:55.11	175.11	20					
15	6	2:53.41	173.41	20	174.26	13.20076	1.330832	5650.38178	5650.38
16	7	2:38.48	158.48	20					
17	7	2:41.38	161.38	20	159.93	12.64634	1.274939	5413.073282	5413.07
18	8	2:58.18	178.18	20					
19	8	2:57.30	177.3	20	177.74	13.33192	1.344055	5706.522394	5706.52
20	9	2:47.89	167.89	20					
21	9	2:48.21	168.21	20	168.05	12.96341	1.306904	5548.78882	5548.79
22	10	2:36.52	156.52	20					
23	10	2:37.86	157.86	20	157.19	12.53754	1.263971	5366.503228	5366.5
24	11	3:06.63	186.63	20					
25	11	3:06.26	186.26	20	186.445	13.65449	1.376575	5844.593471	5844.59
26	12	3:39.42	219.42	20					
27	12	3:34.26	214.26	20	216.84	14.72549	1.484548	6303.019305	6303.02

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

28	13	3:05.23	185.23	20					
29	13	3:06.32	186.32	20	185.775	13.62993	1.374099	5834.082591	5834.08
30	14	3:02.87	182.87	20					
31	14	3:06.35	186.35	20	184.61	13.58713	1.369784	5815.760978	5815.76
32	15	3:35.92	215.92	20					
33	15	3:30.47	210.47	20	213.195	14.6012	1.472018	6249.81908	6249.82
34	16	2:48.73	168.73	20					
35	16	2:47.72	167.72	20	168.225	12.97016	1.307585	5551.677202	5551.67
36	17	3:18.12	198.12	20					
37	17	3:18.63	198.63	20	198.375	14.08457	1.419933	6028.682437	6028.68
38	18	2:59.10	179.1	20					
39	18	2:59.23	179.23	20	179.165	13.38525	1.349432	5729.35226	5729.35
40	19	2:43.34	163.34	20					
41	19	2:42.70	162.7	20	163.02	12.76793	1.287197	5465.115973	5465.12
42	20	3:09.04	189.04	20					
43	20	3:08.89	188.89	20	188.965	13.74645	1.385847	5883.958811	5883.96
44	21	3:15.97	195.97	20					
45	21	3:14.39	194.39	20	195.18	13.97068	1.408452	5979.93681	5979.94
46	22	3:16.87	196.87	20					
47	22	3:17.32	197.32	20	197.095	14.03905	1.415345	6009.201148	6009.2
48	23	2:44.98	164.98	20					
49	23	2:41.47	161.47	20	163.225	12.77595	1.288006	5468.551125	5468.55
50	24	2:48.30	168.3	20					
51	24	2:47.43	167.43	20	167.865	12.95627	1.306185	5545.733751	5545.73
52	25	2:04.86	124.86	20					
53	25	2:08.32	128.32	20	126.59	11.25122	1.13429	4815.913057	4815.91
54	26	1:39.69	99.69	20					
55	26	1:39.53	99.53	20	99.61	9.980481	1.006181	4271.991777	4271.99
56	27	3:29.10	209.1	20					
57	27	3:26.22	206.22	20	207.66	14.41041	1.452784	6168.156196	6168.15
58	28	3:19.10	199.1	20					
59	28	3:15.05	195.05	20	197.075	14.03834	1.415273	6008.896251	6008.89
60	29	3:28.14	208.14	20					
61	29	3:30.25	210.25	20	209.195	14.46357	1.458143	6190.911391	6190.91

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

62		30	2:46.21	166.21	20.5					
63		30	2:42.68	162.68	20.5	164.445	12.82361	1.29281	5488.949998	5488.95
64	X.A 1		00:43.34	43.34	20					
65	X.A 1		00:44.79	44.79	20	44.065	6.638147	0.669224	2841.357141	2841.36
66	X.A 2		00:53.44	53.44	20					
67	X.A 2		00:53.86	53.86	20	53.65	7.324616	0.73843	3135.189537	3135.19
68	CEM II (32.5)		01:44.04	104.04	20					
69	CEM II (32.5)		01:43.93	103.93	20	103.985	10.1973	1.02804	4364.799371	4364.8

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β:

Ο κώδικας του έμπειρου ασαφούς συστήματος στη γλώσσα προγραμματισμού Matlab

```

a=readfis
a =
    name: 'RES'
    type: 'mamdani'
    andMethod: 'min'
    orMethod: 'max'
    defuzzMethod: 'centroid'
    impMethod: 'min'
    aggMethod: 'max'
    input: [1x12 struct]
    output: [1x10 struct]
    rule: [1x18 struct]

```

```

getfis(a)
Name    = RES
Type    = mamdani
NumInputs = 12
InLabels =
    C.
    Fe
    H
    LOI
    pH
    P.S.
    K40
    d50
    d90
    d10
    B.
    W.

```

NumOutputs = 10

OutLabels =

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

NumRules = 18

AndMethod = min

OrMethod = max

ImpMethod = min

AggMethod = max

DefuzzMethod = centroid

showfis(a)

1. Name RES

2. Type mamdani

3. Inputs/Outputs [12 10]

4. NumInputMFs [2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2]

5. NumOutputMFs [2 2 2 2 2 2 2 2 2 2]

6. NumRules 18

7. AndMethod min

8. OrMethod max

9. ImpMethod min

10. AggMethod max

11. DefuzzMethod centroid

12. InLabels C.

13. Fe

14. H

15. LOI

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

16.	pH
17.	P.S.
18.	K40
19.	d50
20.	d90
21.	d10
22.	B.
23.	W.
24. OutLabels	1
25.	2
26.	3
27.	4
28.	5
29.	6
30.	7
31.	8
32.	9
33.	10
34. InRange	[60 100]
35.	[0 0.3]
36.	[0 6]
37.	[40 45]
38.	[8.5 12.5]
39.	[0 500]
40.	[0 14.5]
41.	[0.5 20]
42.	[0.1 15]
43.	[2 50]
44.	[2500 3e+004]
45.	[80 95]
46. OutRange	[0 1]
47.	[0 1]
48.	[0 1]
49.	[0 1]
50.	[0 1]
51.	[0 1]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

52.	[0 1]
53.	[0 1]
54.	[0 1]
55.	[0 1]
56. InMFLabels	low
57.	high
58.	low
59.	high
60.	low
61.	high
62.	low
63.	high
64.	low
65.	high
66.	low
67.	high
68.	low
69.	high
70.	low
71.	high
72.	low
73.	high
74.	low
75.	high
76.	low
77.	high
78.	low
79.	high
80. OutMFLabels	no_suitable
81.	suitable
82.	no_suitable
83.	suitable
84.	no_suitable
85.	suitable
86.	no_suitable
87.	suitable

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

88.	no_suitable
89.	suitable
90.	no_suitable
91.	suitable
92.	no_suitable
93.	suitable
94.	no_suitable
95.	suitable
96.	no_suitable
97.	suitable
98.	no_suitable
99.	suitable
100.	InMFTypes trapmf
101.	trapmf
102.	trapmf
103.	trapmf
104.	trapmf
105.	trapmf
106.	trapmf
107.	trapmf
108.	trapmf
109.	trapmf
110.	trapmf
111.	trapmf
112.	trapmf
113.	trapmf
114.	trapmf
115.	trapmf
116.	trapmf
117.	trapmf
118.	trapmf
119.	trapmf
120.	trapmf
121.	trapmf
122.	trapmf
123.	trapmf

124.	OutMFTypes	trimf
125.		trimf
126.		trimf
127.		trimf
128.		trimf
129.		trimf
130.		trimf
131.		trimf
132.		trimf
133.		trimf
134.		trimf
135.		trimf
136.		trimf
137.		trimf
138.		trimf
139.		trimf
140.		trimf
141.		trimf
142.		trimf
143.		trimf
144.	InMFParams	[24 56 75 80]
145.		[75 80 104 136]
146.		[-0.27 -0.03 0.18 0.19]
147.		[0.18 0.19 0.33 0.57]
148.		[-5.4 -0.6 3.51 4.51]
149.		[3.51 4.51 6.6 11.4]
150.		[35.5 39.5 42 43]
151.		[42 43 45.5 49.5]
152.		[4.9 8.1 8.8 9]
153.		[8.8 9 12.9 16.1]
154.		[-450 -50 101 120]
155.		[101 120 550 950]
156.		[-13.1 -1.45 0.384 0.537]
157.		[0.384 0.537 15.9 27.6]
158.		[-17.1 -1.45 8.5 10]
159.		[8.5 10 21.9 37.5]

160.	[-13.3 -1.39 0.849 1.52]
161.	[0.849 1.52 16.5 28.4]
162.	[-41.2 -2.8 16 20]
163.	[15 20 54.8 93.2]
164.	[-2.23e+004 -250 3520 4030]
165.	[3520 4030 3.28e+004 5.48e+004]
166.	[66.5 78.5 85 86]
167.	[85 86 96.5 109]
168. OutMFParams	[-1 0 1 0]
169.	[0 1 2 0]
170.	[-1 0 1 0]
171.	[0 1 2 0]
172.	[-1 0 1 0]
173.	[0 1 2 0]
174.	[-1 0 1 0]
175.	[0 1 2 0]
176.	[-1 0 1 0]
177.	[0 1 2 0]
178.	[-1 0 1 0]
179.	[0 1 2 0]
180.	[-1 0 1 0]
181.	[0 1 2 0]
182.	[-1 0 1 0]
183.	[0 1 2 0]
184.	[-1 0 1 0]
185.	[0 1 2 0]
186.	[-1 0 1 0]
187.	[0 1 2 0]
188. Rule Antecedent	[2 1 1 2 2 1 1 1 1 2 2]
189.	[1 2 2 1 1 2 2 2 2 1 1]
190.	[0 1 1 0 0 1 1 0 0 0 2 2]
191.	[0 2 2 0 0 2 2 0 0 0 1 1]
192.	[0 1 1 0 0 1 1 1 1 2 2]
193.	[0 2 2 0 0 2 2 2 2 1 1]
194.	[2 0 1 1 0 1 0 0 0 0 0 0]
195.	[1 0 2 2 0 2 0 0 0 0 0 0]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

196.	[2 0 0 0 0 1 0 0 0 0 2 0]
197.	[1 0 0 0 0 2 0 0 0 0 1 0]
198.	[1 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0]
199.	[2 0 2 0 0 2 0 0 0 0 0 0]
200.	[2 0 0 0 0 2 0 0 0 0 0 0]
201.	[1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0]
202.	[2 1 0 0 0 2 0 0 0 0 0 0]
203.	[1 2 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0]
204.	[2 1 0 0 0 2 0 0 0 0 0 0]
205.	[1 2 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0]
188. Rule Consequent [2 2 0 0 0 0 0 0 0 0]	
189.	[1 1 0 0 0 0 0 0 0 0]
190.	[0 0 2 0 0 0 0 0 0 0]
191.	[0 0 1 0 0 0 0 0 0 0]
192.	[0 0 0 2 0 0 0 0 0 0]
193.	[0 0 0 1 0 0 0 0 0 0]
194.	[0 0 0 0 2 0 0 0 0 0]
195.	[0 0 0 0 1 0 0 0 0 0]
196.	[0 0 0 0 0 2 0 0 0 0]
197.	[0 0 0 0 0 1 0 0 0 0]
198.	[0 0 0 0 0 0 2 0 0 0]
199.	[0 0 0 0 0 0 1 0 0 0]
200.	[0 0 0 0 0 0 0 2 0 0]
201.	[0 0 0 0 0 0 0 1 0 0]
202.	[0 0 0 0 0 0 0 0 2 0]
203.	[0 0 0 0 0 0 0 0 1 0]
204.	[0 0 0 0 0 0 0 0 0 2]
205.	[0 0 0 0 0 0 0 0 0 1]
188. Rule Weigth 1	
189.	1
190.	1
191.	1
192.	1
193.	1
194.	1
195.	1

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

196.	1
197.	1
198.	1
199.	1
200.	1
201.	1
202.	1
203.	1
204.	1
205.	1
188. Rule Connection	1
189.	2
190.	1
191.	2
192.	1
193.	2
194.	1
195.	2
196.	1
197.	2
198.	1
199.	2
200.	1
201.	2
202.	1
203.	2
204.	1
205.	2