



**ΜΕΛΕΤΗ  
ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ  
ΠΗΛΟΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ**  
Σταθόπουλος Κωνσταντίνος  
Επιβλέπων: Α. Μπακόλας



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΛΕΤΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΗΛΟΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ**

Κωνσταντίνος Γ. Σταθόπουλος  
Διπλωματούχος Αρχιτέκτων Μηχανικός

Επιβλέπων:  
Αστέριος Μπακόλας  
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

Α. Μπακόλας, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Γ. Μπατής, Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Ε. Μπαδογιάννης, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2015

Εικόνα εξωφύλλου:  
Πλινθόκτιστη κατοικία,  
Τρίπολη, Αρκαδία,  
Προσωπικό αρχείο.

Για την πραγματοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Α. Μπακόλα για την έμπρακτη βοήθεια του και τις πολύτιμες συμβουλές του. Επίσης οφείλω ευχαριστίες στους διδακτορικούς Μ. Αποστολοπούλου, Ν. Καραγιάννη και Ε. Ξυνοπούλου, στο προσωπικό του τμήματος Ελέγχου Ποιότητας και Ανάπτυξης της βιομηχανίας τσιμέντων «ΤΙΤΑΝ Α.Ε.», καθώς και στον Επικ. Καθηγητή Κ. Λουπασάκη απο τον τομέα Γεωλογικών Επιστημών της Σχολής Μηχ. Μεταλλείων-Μεταλλουργών.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια τάση επανεξερεύνησης της δυνατότητας χρήσης του πηλού ως δομικό υλικό. Η στροφή της οικοδομικής δραστηριότητας προς υλικά φιλικότερα στο περιβάλλον φαίνεται απαραίτητη και ο πηλός συγκεντρώνει κάποια θετικά χαρακτηριστικά προς αυτήν την κατεύθυνση. Βασικό μειονέκτημα του πηλού είναι η μειωμένη αντοχή του έναντι της διάβρωσης από το νερό.

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η δυνατότητα σταθεροποίησης πηλοκονιαμάτων με υλικά χαμηλής ενσωματωμένης ενέργειας. Για το σκοπό αυτό ως σταθεροποιητές χρησιμοποιήθηκαν, φυσική υδραυλική άσβεστος και σκωρία κάδων χαλυβουργίας, σε διαφορετικές αναλογίες ο κάθε ένας. Συνολικά παρασκευάστηκαν πέντε συνθέσεις πηλοκονιαμάτων εκ των οποίων το ένα ήταν μη σταθεροποιημένο και λειτούργησε ως κόνιαμα αναφοράς.

Κατά την παρασκευή των πηλοκονιαμάτων διατηρήθηκε η ίδια τιμή εξάπλωσης και προσδιορίστηκαν τα τεχνικά χαρακτηριστικά των νωπών κονιαμάτων, η απαίτηση σε νερό, η φαινόμενη πυκνότητα, ο περιεχόμενος αέρας και το συγκρατούμενο νερό.

Ακολούθως πραγματοποιήθηκε αποτίμηση των πηλοκονιαμάτων κατά την πήξη και σκλήρυνση για διαφορετικούς χρόνους ωρίμανσης. Συγκεκριμένα μελετήθηκε η επιφανειακή δομή και το χρώμα των πηλοκονιαμάτων, η πρόοδος της ωρίμανσης και τα χαρακτηριστικά μικροδομής. Προσδιορίστηκε η ταχύτητα διάδοσης υπερήχων και το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας, η μεταβολή του όγκου καθώς και οι μηχανικές αντοχές. Έπειτα έγινε προσδιορισμός του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης και μελετήθηκε η αντοχή των δοκιμών έναντι της διαβρωτικής επίδρασης του νερού, διαμέσου κύκλων Ύγρανσης-Ξήρανσης.

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών προκύπτει εμφανή βελτίωση της μικροδομής και των μηχανικών χαρακτηριστικών των σταθεροποιημένων κονιαμάτων, με ιδιαιτέρως ενισχυμένες τιμές μηχανικών αντοχών στην περίπτωση σταθεροποίησης με φυσική υδραυλική άσβεστο. Όσον αφορά την αντίσταση στην διάβρωση από το νερό, τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας ήταν ιδιαιτέρως ενθαρρυντικά, τόσο στην περίπτωση σταθεροποίησης με φυσική υδραυλική άσβεστο, όσο και στην περίπτωση σταθεροποίησης με σκωρία κάδων χαλυβουργίας.

## ABSTRACT

During the past few years the construction industry is looking to expand the use of ecological materials, in order to create environmentally friendly buildings, contributing to the sustainability of the cities and limiting the waste of energy. Following this direction, clay is reconsidered as a possible structural material of extensive use. Clay presents several advantages, such as big thermal mass, through which it manages to provide thermal comfort, in warm and dry climate conditions, while simultaneously it succeeds to control the levels of humidity of indoor spaces, contributing to the maintenance of good air quality. Moreover, clay is considered a recyclable material and containing extremely low levels of embodied energy. However, one of the major disadvantages of clay is its reduced resistance against water corrosion.

This thesis explores the potential stabilization of clay mortars, with the addition of either natural hydraulic lime or ladle furnace slag originated from the steel production process. In both cases the effectiveness of the each additive is tested by its use in two different percentages and its assessment in comparison to a non-stabilized reference clay mortar. The clay used was analyzed according to the soil mechanics practice, particle size distribution and Atterberg limits were determined. The clay was classified as a Silt Sand (SM), according to the Unified Soil Classification System (USCS). The concentration of the material's total soluble salts, moisture content and organic material content were also examined. All of the above tests revealed that the clay is suitable for the production of mortars.

The river sand 0-4mm that was selected as aggregate, was tested through sieve analysis in order to examine its particle size distribution. All of the raw materials used for the production of the mortar samples were examined by X-ray diffraction (XRD) and Thermal Analysis (DTA/TG).

Five different design mixes were selected for the mortar tests. The first one contains 80% clay and 20% sand and is used as the reference clay mortar. The ratio of clay to sand is kept constant for all mortar mixes, so as to obtain comparable results. The tests of the fresh mortars include the determination of consistency by flow table, bulk density, air content and water retentivity.

The mortar for each mix design was moulded in 4x4x16 cm moulds, the samples were cured for a few days in the conservation chamber and then they were left in a room with fixed humidity and temperature conditions until the testing date. For the physical, chemical and mechanical evaluation of the set and hardened mortars, the following techniques were applied: Fiber Optics Microscopy (FOM), Colorimetry, Thermal Analysis (DTA/TG), Mercury Intrusion Porosimetry (MIP), determination of Volume Loss, Ultrasonic Testing, determination of Flexural and Compressive strength, determination of Water Absorption Coefficient due to capillary action and Wetting-Drying cycles, by both capillary action and immersion.

The tests have revealed an obvious improvement of the microstructure and the mechanical properties of the stabilized mortars, in comparison to the reference mortar. The mechanical properties of the mortars that have been stabilized by the addition of natural hydraulic lime are slightly better than all others. Regarding the assessment of the stabilized mortar samples behavior to water corrosion, the results are extremely promising, as both natural-hydraulic-lime and ladle-slag stabilized mortars presented excellent behavior in comparison to the reference mortar.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2	ΠΗΛΟΙ - ΠΗΛΟΚΟΝΙΑΜΑΤΑ - ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ.....	7
2.1	Δομή και σύνθεση των πηλών.....	7
2.1.1	Αργιλικά Ορυκτά-Γενικά στοιχεία.....	8
2.1.2	Δομή Αργιλικών Ορυκτών.....	9
2.1.3	Κατηγορίες Αργιλικών Ορυκτών.....	12
2.1.4	Χαρακτηριστικά και ιδιότητες των αργιλικών ορυκτών.....	15
2.2	Πηλοκονιάματα.....	18
2.3	Υλικά για την σταθεροποίηση.....	20
2.3.1	Τσιμέντο.....	20
2.3.2	Ασβέστης.....	22
2.3.3	Υδραυλική Άσβεστος.....	23
2.3.4	Ιπτάμενη Τέφρα.....	25
2.3.5	Σκωρίες.....	26
2.3.6	Ποζολάνες.....	32
2.3.7	Μη παραδοσιακοί σταθεροποιητές.....	33
3	ΜΕΛΕΤΕΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ - ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	39
4	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	55
4.1	Υλικά και σχεδιασμός πηλοκονιαμάτων.....	55
4.2	Τεχνικές αποτίμησης των τεχνικών χαρακτηριστικών των πρώτων υλών.....	57
4.2.1	Κοκκομετρική ανάλυση άμμου με κοσκίνισμα.....	57
4.2.2	Όρια συνεκτικότητας (Atterberg) πηλού.....	58
4.2.3	Κοκκομετρική διαβάθμιση πηλού(μέθοδος υλίου).....	61
4.2.4	Προσδιορισμός ολικών διαλυτών αλάτων πηλού.....	66
4.2.5	Έλεγχος παρουσίας οργανικού υλικού στον πηλό.....	67
4.2.6	Ορυκτολογική ανάλυση πρώτων υλών με χρήση της περίθλασης ακτίνων Χ (XRD).....	68
4.2.7	Χαρακτηρισμός των πρώτων υλών διαμέσου θερμικής ανάλυσης DTA/TG.....	70
4.3	Προετοιμασία και Παρασκευή κονιαμάτων.....	74
4.4	Τεχνικές αποτίμησης των τεχνικών χαρακτηριστικών των νωπών κονιαμάτων.....	75

4.4.1	Προσδιορισμός συνεκτικότητας νωπού κονιάματος με τράπεζα εξάπλωσης.....	75
4.4.2	Προσδιορισμός φαινόμενης πυκνότητας νωπού κονιάματος .....	76
4.4.3	Προσδιορισμός περιεχόμενου αέρα νωπού κονιάματος.....	77
4.4.4	Προσδιορισμός συγκρατούμενου νερού νωπού κονιάματος .....	78
4.5	Μορφοποίηση και συντήρηση δοκιμών κονιαμάτων .....	80
4.6	Τεχνικές αποτίμησης των πηλοκονιαμάτων κατά την πήξη και σκλήρυνση.....	83
4.6.1	Μικροσκοπία οπτικών ινών (FOM).....	83
4.6.2	Χρωματομετρία.....	86
4.6.3	Πορομετρία Hg (MIP).....	88
4.6.4	Μεταβολή του όγκου των δοκιμών των κονιαμάτων .....	92
4.6.5	Ταχύτητα Διάδοσης υπερήχων και δυναμικό μέτρο ελαστικότητας .....	93
4.6.6	Προσδιορισμός μηχανικών αντοχών .....	96
4.7	Τεχνικές αποτίμησης των σταθεροποιημένων πηλοκονιαμάτων .....	98
4.7.1	Υδατοαπορρόφηση με τριχοειδή αναρρίχηση .....	98
4.7.2	Κύκλοι ύγρυνσης ξήρανσης .....	102
5	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	105
5.1	Αποτελέσματα των τεχνικών χαρακτηριστικών των πρώτων υλών .....	105
5.1.1	Κοκκομετρική ανάλυση άμμου.....	105
5.1.2	Όρια Συνεκτικότητας (Atterberg)- Κοκκομετρική διαβάθμιση πηλού .....	106
5.1.3	Αποτελέσματα ολικών διαλυτών αλάτων .....	109
5.1.4	Αποτελέσματα ελέγχου παρουσίας οργανικού υλικού στον πηλό.....	109
5.1.5	Ορυκτολογική ανάλυση πρώτων υλών με χρήση της Περίθλασης ακτίνων-X (XRD).....	110
5.1.6	Αποτελέσματα θερμικής ανάλυσης DTA/TG .....	114
5.2	Αποτελέσματα των τεχνικών χαρακτηριστικών των νωπών κονιαμάτων.....	116
5.3	Αποτίμηση των πηλοκονιαμάτων κατά την πήξη και σκλήρυνση.....	117
5.3.1	Αποτελέσματα μικροσκοπίας οπτικών ινών (FOM) .....	117
5.3.2	Αποτελέσματα Χρωματομετρίας .....	127
5.3.3	Αποτελέσματα θερμικών αναλύσεων DTA/TG στις 28 και 90 ημέρες.....	134
5.3.4	Χαρακτηριστικά μικροδομής - αποτελέσματα Πορομετρίας Hg.....	139
5.3.5	Αποτελέσματα μεταβολής του όγκου των δοκιμών πηλοκονιαμάτων .....	143
5.3.6	Αποτελέσματα ταχύτητας διάδοσης υπερήχων και δυναμικό μέτρο ελαστικότητας .....	144



5.3.7	Αποτελέσματα μηχανικών αντοχών .....	146
5.4	Αποτίμηση των σταθεροποιημένων πηλοκονιαμάτων .....	148
5.4.1	Αποτελέσματα υδατοαπορρόφησης με τριχοειδή αναρρίχηση .....	148
5.4.2	Αποτίμηση των κονιαμάτων διαμέσου κύκλων ύγρυνσης - ξήρανσης.....	154
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	162
7	Βιβλιογραφία .....	164

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια γίνονται όλο και πιο έντονα κάποια από τα περιβαλλοντικά και κοινωνικά προβλήματα, που έχει εντείνει ή και δημιουργήσει ο άνθρωπος, με την επέμβαση του στο περιβάλλον. Ο σύγχρονος υπερκαταναλωτικός τρόπος ζωής ο οποίος σιγά σιγά υιοθετείται και από τις αναπτυσσόμενες κοινωνίες φαίνεται ότι δημιουργεί ένα πρόσθετο ζήτημα βιωσιμότητας με επιτακτικό τρόπο.

Έτσι και στην Αρχιτεκτονική υπάρχει ένα αναπτυσσόμενο ενδιαφέρον για πιο οικονομικές και φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες δόμησης. Στην εποχή μας βέβαια και ειδικότερα στην Ελλάδα που κυριαρχεί η δόμηση με σπλισμένο σκυρόδεμα και τα υλικά υψηλής τεχνολογίας, ακόμα και σε μικρής κλίμακας κατασκευές, τίθεται το ζήτημα της εύρεσης υλικών, της συστηματοποίησης και της μετάδοσης της αντίστοιχης γνώσης προς μια βιώσιμη κατεύθυνση.

Η παρούσα μελέτη προσπαθεί να βάλει ένα ακόμα λιθαράκι προς αυτή την κατεύθυνση, διευρύνοντας την γνώση μας για τον πηλό ως υλικό δόμησης και συγκεκριμένα για την σταθεροποίηση των πηλοκονιαμάτων.

Το κάθε κτήριο ως δράση του ανθρώπου επιδρά και αυτό στο περιβάλλον. Η οικολογική συμπεριφορά του κτηρίου ορίζεται ως : η βελτιστοποίηση των θετικών δράσεων και η ελαχιστοποίηση των αρνητικών δράσεων που μπορεί να έχει ένα κτήριο έναντι του ανθρώπου και του φυσικού οικοσυστήματος [1].

Ο σχεδιασμός, η κατασκευή και η χωροθέτηση ενός κτηρίου έχουν σημαντικότερη επίδραση στο περιβάλλον και τις φυσικές πηγές ενέργειας.

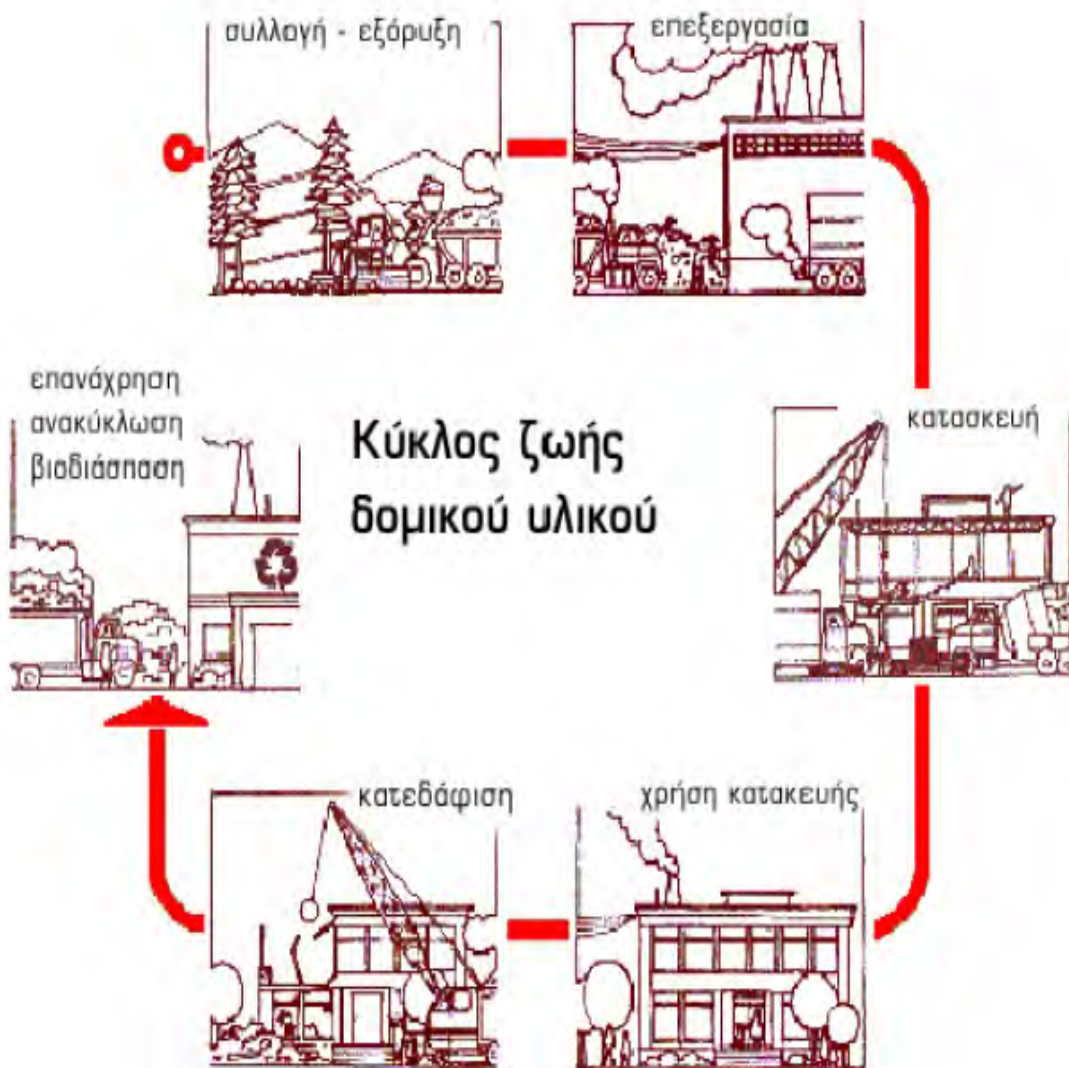
Η αειφόρος (βιώσιμη) ανάπτυξη (sustainable development) έχει στόχο την ορθολογική διαχείριση των φυσικών πόρων, με τρόπο ώστε να καλύπτονται οι ανθρώπινες ανάγκες του παρόντος, ενώ ταυτόχρονα να μην υπονομεύεται η κάλυψη των αναγκών του μέλλοντος.

Στην προσπάθεια επίτευξης της αειφορίας στην οικοδομική δραστηριότητα συμμετέχει ο σχεδιασμός του κτηρίου, η θερμική συμπεριφορά του κτηρίου, η αξιοποίηση των φυσικών πόρων, ο βιοκλιματικός σχεδιασμός και φυσικά τα υλικά του κτηρίου [1].

Η επιλογή των υλικών εξαρτάται άμεσα από οικονομικές, περιβαλλοντολογικές και ενεργειακές παραμέτρους. Ο κύκλος των εργασιών που συνδέεται με την παραγωγή και τη διακίνηση των δομικών υλικών είναι τεράστιος και κατ' επέκταση τα κριτήρια επιλογής των υλικών έχουν μεγάλη σημασία.

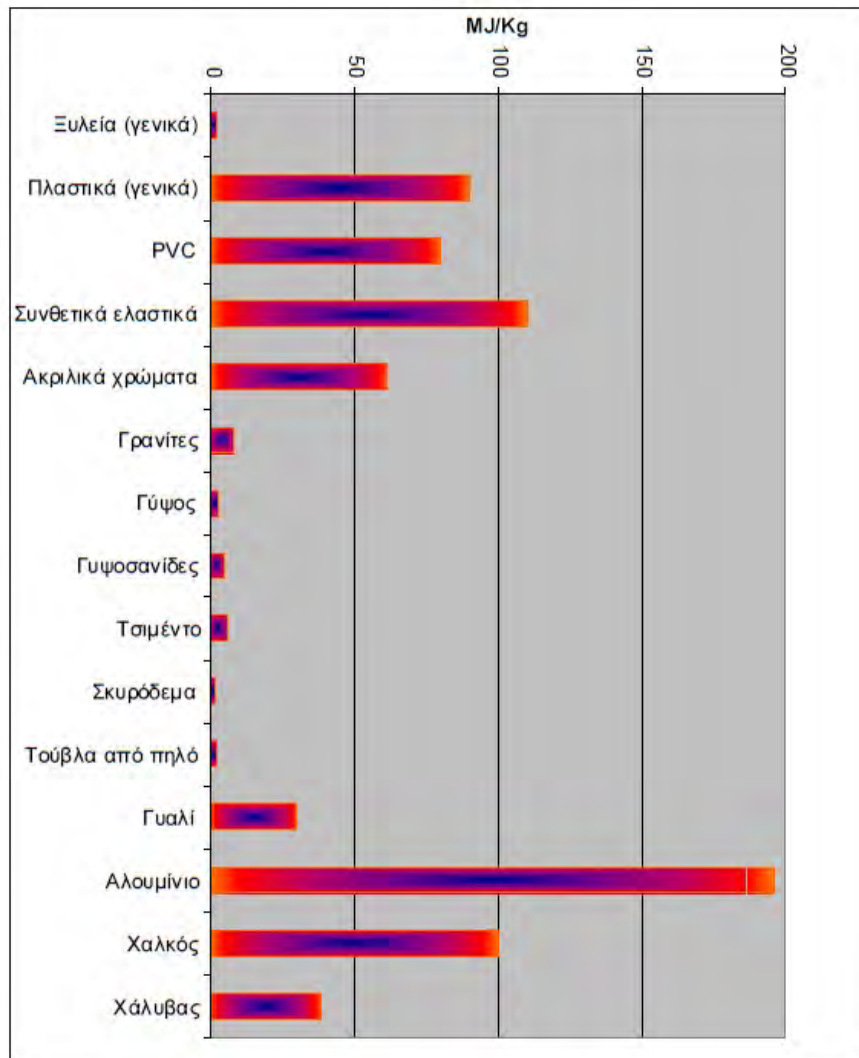
Τα υλικά διαμορφώνουν σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα του εσωτερικού αέρα των κτηρίων και μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση στην υγεία των χρηστών. Παράλληλα καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη θερμική συμπεριφορά και την οπτική των κτηρίων και επηρεάζουν το εξωτερικό περιβάλλον.

Η διαδικασία παραγωγής των υλικών, ο κύκλος ζωής τους και η τελική τους διάθεση (απόρριψη) έχει σημαντικές επιπτώσεις στο γενικότερο περιβάλλον [1].



Σχήμα 1.1 Κύκλος ζωής δομικού υλικού [1].

Το κάθε δομικό υλικό ακολουθεί έναν κύκλο ζωής (Σχήμα1.1.) από τη συλλογή ή την εξόρυξη, στην επεξεργασία, τη μεταφορά, την κατασκευή, τη χρήση της κατασκευής, την κατεδάφιση και την πιθανή επανάχρηση, την ανακύκλωση ή τη δυνατότητα βιοδιάσπασης. Συνεπώς στην επιλογή του υλικού δεν παίζουν ρόλο μόνο τα πλεονεκτήματά του κατά τη χρήση της κατασκευής, αλλά μπαίνουν και παράγοντες κόστους, υγιεινής και φιλικότητας προς το περιβάλλον.

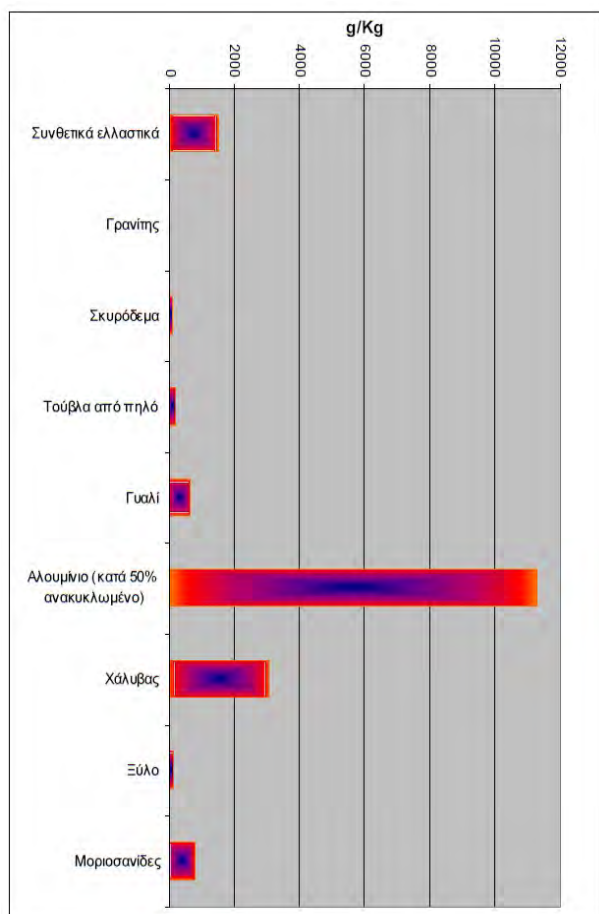


Σχήμα 1.2 Ενσωματωμένη ενέργεια για συνήθη υλικά [1].

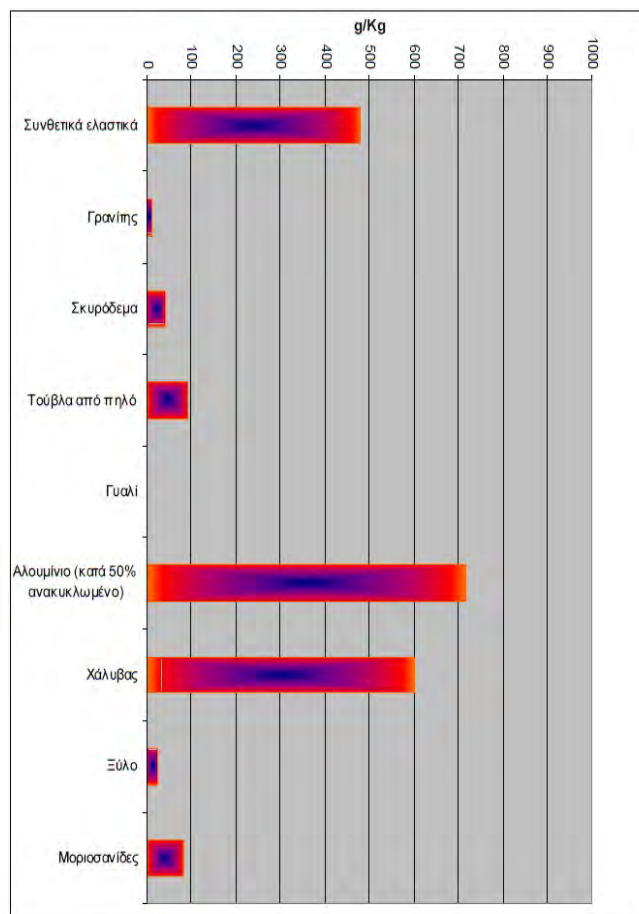
Με τον όρο Ενσωματωμένη ενέργεια καλείται η ενέργεια που καταναλώνεται για την δημιουργία ενός προϊόντος, από την παραγωγή, τη δημιουργία, μέχρι και την μεταφορά του στο εργοτάξιο.

Η ενσωματωμένη ενέργεια ενός υλικού είναι μείζονος σημασίας καθότι υλικά με μεγάλη ενσωματωμένη ενέργεια προκαλούν γενικά κατά τη διαδικασία παραγωγής μεγάλες εκπομπές CO<sub>2</sub> και θερμική ρύπανση [1].

Το σχήμα 1.2 προκύπτει από αποτελέσματα διαφόρων ερευνών της διεθνούς βιβλιογραφίας και είναι ποιοτικού χαρακτήρα μιας και η ενσωματωμένη ενέργεια περιέχει πολλές μεταβλητές παραμέτρους για κάθε διαφορετική περίπτωση αλυσίδας παραγωγής ενός υλικού.



Σχήμα 1.3 Εκπομπή αερίων ρύπων κατά την παραγωγή [1].



Σχήμα 1.4. Απώλειες πρώτων υλών κατά την παραγωγή συνήθων υλικών [1].

Από τα σχήματα 1.2, 1.3, 1.4 παρατηρούμε ότι τα πιο ενεργοβόρα υλικά (ως προς την παραγωγή και τον κύκλο ζωής) είναι τα μέταλλα, ιδιαίτερα το αλουμίνιο, και τα πλαστικά. Τους περισσότερους αέριους ρύπους και απώλειες πρώτων υλών έχουν το αλουμίνιο και ο χάλυβας και ακολουθούν τα συνθετικά υλικά. Αντιθέτως παρατηρούμε ότι το τσιμέντο και τα φυσικά υλικά, όπως το ξύλο και τα τούβλα από πηλό, έχουν σε όλες τις κατηγορίες χαμηλές τιμές.

Το σπλισμένο σκυρόδεμα παρ' ότι έχει χαμηλή ενσωματωμένη ενέργεια, είναι πολύ ενεργοβόρα η ανακύκλωσή του. Πρακτικά είναι δύσκολο να διαχωρίσεις το χάλυβα από το σκυρόδεμα. Ο χάλυβας είναι από τα πιο ενεργοβόρα υλικά στην παραγωγή και συνεπώς είναι καλό να χρησιμοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι εύκολη η ανακύκλωσή του.

Σήμερα, η παραγωγή τσιμέντου (που στη χώρα μας κατέχει ίσως τα υψηλότερα ποσοστά στην Ευρωπαϊκή Ένωση) ευθύνεται για το 5% της έκλυσης CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα καθώς και για την πολλαπλή επιβάρυνση του περιβάλλοντος με μη ανακυκλώσιμα υλικά παραπροϊόντων [2].

Υλικά όπως η πέτρα, το ξύλο, οι ωμόπλινθοι, το άχυρο, έχουν μικρή ενσωματωμένη ενέργεια, είναι φιλικά προς τον άνθρωπο και το περιβάλλον και είναι ανακυκλώσιμα. Στην παραδοσιακή αρχιτεκτονική τα συναντάμε πολύ συχνά, καθώς δουλεύονται με χαμηλή τεχνολογία και μάλιστα, σε μεγάλης κλίμακας κατασκευές. Μεταξύ αυτών θα λέγαμε ότι το ξύλο παρουσιάζει κάποια συγκριτικά πλεονεκτήματα καθώς μπορεί να θεωρηθεί ανανεώσιμη πρώτη ύλη, αφού έχει μια φάση ζωής ανάλογη με του ανθρώπου και με σωστό προγραμματισμό, θα μπορούσε να καλύπτει σε βάθος χρόνου τις οικοδομικές ανάγκες μιας κοινωνίας. Το ξύλο εξασφαλίζει μηχανική αντοχή και δίνει μεγάλη ελευθερία στη σύνθεση, ενώ συνεργάζεται καλά και με άλλα υλικά, όπως ο πηλός και το μέταλλο, έχει καλές θερμομονωτικές ιδιότητες και είναι εύκολο στην επεξεργασία. Η πέτρα προσδίδει καλές μηχανικές αντοχές αλλά είναι ακριβή στην εξόρυξή της και απαιτεί μεγάλη ενέργεια για τη μεταφορά της και την επεξεργασία της.

Βέβαια δεν μπορούμε να θεωρήσουμε ένα υλικό ως το ιδανικό, καθώς αυτό σχετίζεται πάντα με παραμέτρους όπως ο τόπος, ο χρόνος και το είδος της κατασκευής.

Ένα υλικό που παρουσιάζει πολύ μεγάλο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια είναι ο πηλός. Ο πηλός είναι ένα από τα αρχαιότερα υλικά δόμησης αλλά ταυτόχρονα και ένα από τα πιο σύγχρονα στην έρευνα δομικών υλικών. Χρησιμοποιείται σε μια ποικιλία εφαρμογών (οδοποιία, κατοικίες, καταφύγια, τείχη,) και μορφών (ωμόπλινθος, καλουπωτός πηλός, cob, rised, zambour κλπ.). Ο πηλός είτε ως δομική πλίνθος είτε ως συνδετικό κονίαμα σε λιθοδομές ή σε ξύλινα πλαισιακά συστήματα (τσατμάς), ανάλογα με την τοπική διαθεσιμότητα του αλλά και τις κλιματολογικές συνθήκες του τόπου, αποτέλεσε ως τον 18<sup>ο</sup> αιώνα (προ βιομηχανική εποχή) υλικό δόμησης καθολικής χρήσης σε όλο τον κόσμο. Η τοιχοποιία από ωμοπλίνθους αποτελεί δομικό στοιχείο της αρχιτεκτονικής κληρονομιάς τόσο της χώρας μας όσο και του υπόλοιπου κόσμου. Υπολογίζεται ότι το ένα τρίτο των κτιρίων του κόσμου είναι πλιθόκτιστα [3].

Από τον 18<sup>ο</sup> αιώνα και μετά οι βιομηχανίες ή βιοτεχνίες οπτόπλινθων αντικατέστησαν την τοπική παραγωγή ωμοπλίνθων με την δημιουργία πλίνθων μεγαλύτερης αντοχής και αξιοπιστίας. Η χρήση του πηλού περιορίστηκε σε ορισμένα σημεία του πλανήτη κυρίως σε λιγότερο αναπτυγμένες αγροτικές κοινωνίες, οι οποίες κατασκεύαζαν' μόνες τους τα σπίτια τους. Με την εμφάνιση νέων υλικών, όπως ο χάλυβας και το τσιμέντο (μέσα του 19<sup>ου</sup> αιώνα για τον δυτικό κόσμο, αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα για την Ελλάδα), η χρήση του πηλού εγκαταλείφθηκε πλήρως. Συγκεκριμένα στην Ελλάδα η χρήση των ωμοπλίνθων σταματά στα τέλη της δεκαετίας του 1950 [2].

Παραδείγματα τέτοιων κατασκευών συναντώνται σήμερα στα Κορέστεια στην περιοχή Καστοριάς, στα χωριά του θεσσαλικού κάμπου, στα νησιά του Αιγαίου και διάσπαρτα σε μικρότερη κλίμακα στις αγροτικές περιοχές και τους προσφυγικούς καταυλισμούς του μεσοπολέμου ανά την Ελλάδα.

Ο βασικός λόγος της εγκατάλειψης των ωμοπλίνθων και γενικότερα του πηλού στη δόμηση είναι η τρωτότητα των πηλοκατασκευών στον σεισμό και στην επαφή τους με το νερό αλλά και σε ένα μικρότερο βαθμό η ανάγκη των κοινωνιών να υιοθετούν υλικά ευκολότερης τεχνολογίας εφαρμογής, όπως το σκυρόδεμα. Μια προσεκτικότερη εξέταση του ζητήματος δείχνει ότι η συμπεριφορά αυτή του πηλού οφείλεται κυρίως στην έλλειψη κανονισμών σχεδιασμού [4].

Τα κτίρια από πηλό παραδοσιακά, κατασκευάζονταν σε εμπειρική βάση και η γνώση της μηχανικής συμπεριφοράς ήταν κυρίως εμπειρική και ιδιαίτερα περιορισμένη, επίσης τα κτίρια από πηλό κατασκευάζονταν με μία λογική συχνής συντήρησης και προστασίας από την βροχή, συνήθεια που εξαλείφθηκε, με αποτέλεσμα να έχουν μειωμένη αντοχή στο σεισμό. Έτσι σιγά σιγά οι ανεπτυγμένες κοινωνίες έχασαν τις εμπειρικές γνώσεις και την εμπιστοσύνη τους στο συγκεκριμένο δομικό υλικό. Μέχρι σήμερα δεν διατίθεται καμία ικανή μέθοδος υπολογισμού και διαστασιολόγησης για την αξιολόγηση των υπαρχόντων κατασκευών από πηλό ή τον σχεδιασμό νέων.

Τα τελευταία χρόνια ωστόσο ένα σύνολο παραγόντων ξαναστρέφουν το ενδιαφέρον στον πηλό. Το ενεργειακό πρόβλημα και η αλλαγή του κλίματος λόγω ρύπανσης έχει οδηγήσει αρκετές κοινωνίες σε μία στροφή προς την βιώσιμη ανάπτυξη και σε μια πιο ολιστική προσέγγιση πάνω στο ζήτημα της ύπαρξης και της ανάπτυξης των κοινωνιών σε σχέση με το περιβάλλον.

Ο πηλός συγκεντρώνει κάποια συγκριτικά πλεονεκτήματα στο σύνολο του κύκλου ζωής ενός δομικού υλικού. Αφενός έχει χαμηλή ενσωματωμένη ενέργεια, χαμηλή τιμή ρύπων κατά την παραγωγή του, είναι ανακυκλώσιμος και οικονομικός αλλά έχει και πολύ καλή θερμική συμπεριφορά λόγω της υψηλής θερμικής του μάζας (συλλέγει ενέργεια και την αποδίδει με χρονική υστέρηση στο εσωτερικό του κτιρίου), επίσης λόγω των υγροσκοπικών του ιδιοτήτων διατηρεί την υγρασία στο εσωτερικό του χώρου σε ιδανικά ποσοστά (περίπου 50%) ενώ παράλληλα κατακρατεί τους αέριους ρύπους. Τα παραπάνω τον καθιστούν ιδανικό υλικό στον βιοκλιματικό σχεδιασμό σε επίπεδο ενεργειακό και υγιεινής ειδικότερα για ζεστά και ξηρά κλίματα [5].

Η παρουσία του πηλού ως υποσχόμενο υλικό στον βιοκλιματικό σχεδιασμό σε συνδυασμό με την πολύ καλή συμβατότητά του στις αποκαταστάσεις παραδοσιακών κατασκευών γεννάει την ανάγκη διερεύνησης και βελτιστοποίησης της μηχανικής συμπεριφοράς και της αντοχής ενάντια στην διάβρωση για τον ασφαλή σχεδιασμό των πηλοκατασκευών.

Η μεγάλη πολυπλοκότητα του ίδιου του υλικού (του πηλού) κάνει απαραίτητη τη μελέτη βασικών παραμέτρων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των κατασκευών από πηλό, για αυτόν τον λόγο, η συγκεκριμένη εργασία εστιάζει στην σταθεροποίηση των πηλοκονιαμάτων.

## 2 ΠΗΛΟΙ - ΠΗΛΟΚΟΝΙΑΜΑΤΑ - ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ

### 2.1 Δομή και σύνθεση των πηλών

Ο όρος «άργιλος» αναφέρεται τόσο σε υλικά με μέγεθος σωματιδίων μικρότερο από 2 μm όσο και για μια οικογένεια ορυκτών με παρόμοια χημική σύνθεση και κοινά κρυσταλλικά χαρακτηριστικά [6].

Ο πηλός είναι ένα λεπτόκοκκο χώμα που συνδυάζει ένα ή περισσότερα μέταλλα αργίλου με ίχνη από οξειδία μετάλλων και οργανικής ύλης. Οι γεωλογικές αποθέσεις αργίλου αποτελούνται κυρίως από φυλλοπιριτικά ορυκτά τα οποία περιέχουν ποικίλες ποσότητες νερού παγιδευμένου στην δομή του ορυκτού [7].

Ο πηλός αποτελείται από ένα μείγμα από χάλικες, άμμους, ιλύες και αργίλους. Στο μείγμα προστίθενται άλατα, οξειδία και οργανικά υλικά.

Ειδικότερα, τα διαφορετικά **συστατικά του πηλού** κατατάσσονται ως εξής:

**α) Χονδρόκοκκα χημικώς αδρανή συστατικά**, όπως το ρυζάκι, οι χάλικες και τα σκύρα (4 έως 32mm) και η άμμος (80μm έως 4mm). Αυτά τα στοιχεία εξασφαλίζουν τη συνοχή του υλικού. Για να προσδώσουν αντοχή στο υλικό, πρέπει να υπάρξει ένα ελάχιστο όριο επαφής μεταξύ των αδρανών ώστε να ενεργοποιηθούν εσωτερικές δυνάμεις συνοχής.

**β) Λεπτόκοκκα χημικώς αδρανή συστατικά** τα οποία αποκαλούνται ιλύες. Πρόκειται για άμμο λεπτόκοκκη (2 έως 80μm), που απορροφά λίγο νερό. Οι ιλύες μειώνουν σε κάποιο ποσοστό την τριβή μεταξύ των αδρανών (κατά τη συμπύκνωση) και τη σταθερότητα των κόκκων γεμίζοντας τα κενά μεταξύ τους.

**γ) Λεπτόκοκκα χημικώς ενεργά συστατικά αργιλοπιριτικής βάσεως.** Η άργιλος, με την ορυκτολογική της έννοια. Τα αργιλικά μόρια είναι φορτισμένα ηλεκτρικά, οι φυλλόμορφες στοιβάδες είναι γενικά φορτισμένες αρνητικά, σε διάλυμα νερού, δημιουργείται ένα δυναμικό μεταξύ των μορίων και του διαλύματος. Προσθέτοντας στο δυναμικό αυτό ανιόντα ή κατιόντα είναι δυνατό να τροποποιηθεί η συμπεριφορά των μορίων, ενδυναμώνοντας τα ταξινομούνται σε στοιβάδες ενώ αντίθετα διαχωρίζονται. Εν ξηρώ, τα μόρια πλησιάζουν και οι δυνάμεις συνοχής Van der Waals υπερέρχουν και προκαλούν συγκόλληση των αργιλικών μορίων μεταξύ τους, αλλά και με τα αδρανή. Αυτός είναι και ο ορισμός της συνοχής, που αποτελεί πολύ γνωστό όρο της εδαφομηχανικής.

**δ) Άλλα στοιχεία λεπτόκοκκα και δραστικά.** Μερικά στοιχεία μπορούν να έχουν πολύ θετικές επιδράσεις στη συμπεριφορά των εδαφών και να ευνοούν κάποιες χημικές αντιδράσεις παρουσία υδραυλικών πρόσθετων όπως τα οξειδία του σιδήρου σε εδάφη από λατερίτη (λατερικά εδάφη). Άλλα στοιχεία μπορεί να επιδρούν αρνητικά στη συμπεριφορά των εδαφών όπως είναι τα θειικά οξέα, τα χλωρικά οξέα και τα οργανικά υλικά [2].

Η άργιλος είναι το κύριο συστατικό όλων των πρώτων υλών για κατασκευή προϊόντων οπτήσεως. Είναι πέτρωμα μαλακό, κατακερματικής καταγωγής, προσχλωσιγενές, προϊόν μακρόχρονης χημικής - μηχανικής αποσύνθεσης επιφανειακών πετρωμάτων. Δημιουργείται λόγω αποσάθρωσης των αστρίων. Εκτός από τον λευκό καθαρό καολίνη ( $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot H_2O$ ), περιέχει άλευρο πετρωμάτων, οξειδία του σιδήρου και άλλες προσμίξεις, οι οποίες καθορίζουν το χρώμα του [8].



Ο όρος άργιλος όπως προαναφέρθηκε δεν είναι μονοσήμαντος. Είναι δυνατό να σημαίνει, είτε ένα κλάσμα ορισμένου μεγέθους κόκκων (αργιλικό κλάσμα) , είτε ένα ιζηματογενές πέτρωμα, με ορισμένο ποσοστό αργιλικού κλάσματος. Ως αργιλικό κλάσμα χαρακτηρίζεται συνήθως το υλικό το οποίο αποτελείται από κόκκους με διάμετρο μικρότερη από 2μm δηλαδή 0,002 mm [9].

Στη Γεωλογία ως άργιλοι ή πελίτες χαρακτηρίζονται πολύ λεπτόκοκκα πετρώματα που δεν έχουν υποστεί μεταμόρφωση ή διαγέννεση. Στην περίπτωση αυτή η έννοια της αργίλου αφορά κατά κύριο λόγο σε χαρακτηρισμό της κοκκομετρίας, η οποία σχετίζεται άμεσα με τις συνθήκες σχηματισμού.

Οι άργιλοι σχηματίζονται μέσω απόθεσης προϊόντων αποσάθρωσης πετρωμάτων, τα οποία έχουν μεταφερθεί κυρίως από το νερό και σπανιότερα με τον αέρα, συχνά σε μεγάλες αποστάσεις, σε λεκάνες ή κόλπους. Περιλαμβάνουν κυρίως προϊόντα αποσάθρωσης, τα οποία πριν την καθίζηση τους βρίσκονταν επί μακρόν εν αιωρήσει, είτε λόγω του πολύ μικρού μεγέθους είτε λόγω του φυλλώδους χαρακτήρα τους. Μαζί με αυτά συνυπάρχουν συχνά νεοσχηματισθέντα ορυκτά, κατάλοιπα οργανισμών και λίγο ή πολύ λεπτοδιαμερισμένες οργανικές ουσίες.

Λόγω διακυμάνσεων της μεταφοράς και απόθεσης του υλικού εμφανίζονται συχνά στρωματοειδείς σχηματισμοί και μεταβαλλόμενη κοκκομετρική σύσταση. Σύμφωνα με τις Γερμανικές προδιαγραφές (DIN 66100) η άργιλος και η ιλύς είναι το κοκκομετρικό κλάσμα του ιζηματογενούς πετρώματος που έχει μέγεθος κόκκων < 0.045mm. Στο Αμερικάνικο σύστημα ταξινόμησης ορίζεται ως ιλύς (silt) το κλάσμα κόκκων διαμέτρου 2-50 μm και ως άργιλος το κλάσμα κόκκων < 2μm [10].

Η αργιλόμαζα που χρησιμοποιείται για την παρασκευή των πλίνθων είναι σύνθετο υλικό με βασικά συστατικά οξείδια πυριτίου και αργιλίου, ενώ σε μικρότερες ποσότητες ενυπάρχουν οξείδια του ασβεστίου, μαγνησίου, καλίου, σιδήρου, νατρίου καθώς και οργανικές ενώσεις.

Οι πιο κοινοί άργιλοι που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή οπτόπλινθων και κεραμιδιών περιέχουν εκτός από τριοξείδιο του αργιλίου και πυριτικό οξύ, υδροξείδια και οξείδια του σιδήρου, οξείδια αλκαλίων και χαλαζία, ανθρακικό ασβέστιο και ανθρακικό μαγνήσιο [8].

### 2.1.1 Αργιλικά Ορυκτά-Γενικά στοιχεία

Ο φλοιός της γης αποτελείται από γαίες και πετρώματα. Το κάθε πέτρωμα αποτελείται από ένα συνονθύλευμα ορυκτών. Εν τούτοις τα ορυκτά καθορίζουν το είδος των πετρωμάτων. Ορυκτά αποκαλούνται τα φυσικά, ομογενή και ανόργανα συστατικά του στερεού φλοιού της γης. Το κάθε ορυκτό έχει ορισμένη χημική σύσταση και κρυσταλλική δομή και σε σπάνιες περιπτώσεις είναι άμορφο. Ο τρόπος με τον οποίο δομούνται τα άτομα των χημικών ενώσεων που αποτελούν τα ορυκτά, καθορίζει τον κρύσταλλο του ορυκτού, ο οποίος έχει χαρακτηριστικό σχήμα και δομή στον χώρο. Ανάλογα με την κρυσταλλική δομή και τον χημικό τύπο του κάθε ορυκτού καθορίζονται και οι φυσικές του ιδιότητες [8].

Μια μεγάλη κατηγορία ορυκτών είναι τα **πυριτικά ορυκτά** (silicate minerals). Το πυρίτιο (Si) είναι το δεύτερο επικρατέστερο (περίπου 25%) στοιχείο του στερεού φλοιού της γης μετά το οξυγόνο, και φυσικά δεν απαντάται στοιχειακά αλλά ενωμένο με οξυγόνο σε ορυκτά και πετρώματα. Τα ορυκτά που δομούνται βάσει ενώσεων του πυριτίου λέγονται πυριτικά ορυκτά και αποτελούν περίπου το 90% του στερεού φλοιού της γης [11].

Η δομική μονάδα όλων των πυριτικών ορυκτών είναι ένα τετράεδρο, αποτελούμενο από ένα κεντρικό ιόν πυριτίου και τέσσερα συμμετρικά τοποθετημένα στο τετράεδρο άτομα οξυγόνου.

Η μονάδα αυτή παριστάνεται ως  $(\text{SiO}_4)^{4-}$ . Το ιόν πυριτίου είναι τετρασθενές, δηλαδή, έχει τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους τα οποία προσφέρει στα ανιόντα που συνδέονται με αυτό. Καθώς στο δομικό τετράεδρο υπάρχουν τέσσερα ιόντα οξυγόνου γύρω από το κατιόν του πυριτίου, καθένα από αυτά μοιράζεται ένα ηλεκτρόνιο σθένους με το πυριτικό ιόν. Ωστόσο, το οξυγόνο απαιτεί δύο ηλεκτρόνια σθένους προκειμένου να καταστεί ηλεκτρικά ουδέτερο, οπότε κάθε άτομο οξυγόνου πρέπει να εξασφαλίσει μία ακόμη μονάδα φορτίου από κάποια εξωτερική πηγή.

Η ικανοποίηση των ηλεκτρονιακών απαιτήσεων σθένους των ατόμων οξυγόνου διασφαλίζεται μέσω της σύνδεσής τους με εξωτερικά κατιόντα κάποιου άλλου τύπου όπως ιόντα  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  ή  $\text{Al}^{3+}$ , καθώς και μέσω της σύνδεσής τους με το κεντρικό άτομο πυριτίου ενός γειτονικού πανομοιότυπου τετραέδρου.

Τα πυριτικά ορυκτά διακρίνονται σε διάφορες επιμέρους κατηγορίες. Μια από αυτές είναι και η κατηγορία των φυλλοπυριτικών ορυκτών (phyllosilicates).

Τα **φυλλοπυριτικά ορυκτά** όπως φαίνεται και από την ονομασία τους “φύλλο” και “πυριτικό”, είναι ορυκτά που απαρτίζονται από παράλληλες στρώσεις τετραεδρικών και οκταεδρικών στιβάδων, όπως θα αναφερθεί και στη συνέχεια στην ανάλυση της δομής τους. Οι στρώσεις αυτές έχουν μεγάλη ανάπτυξη σε δυο άξονες και μικρή στον κάθετο αυτών.

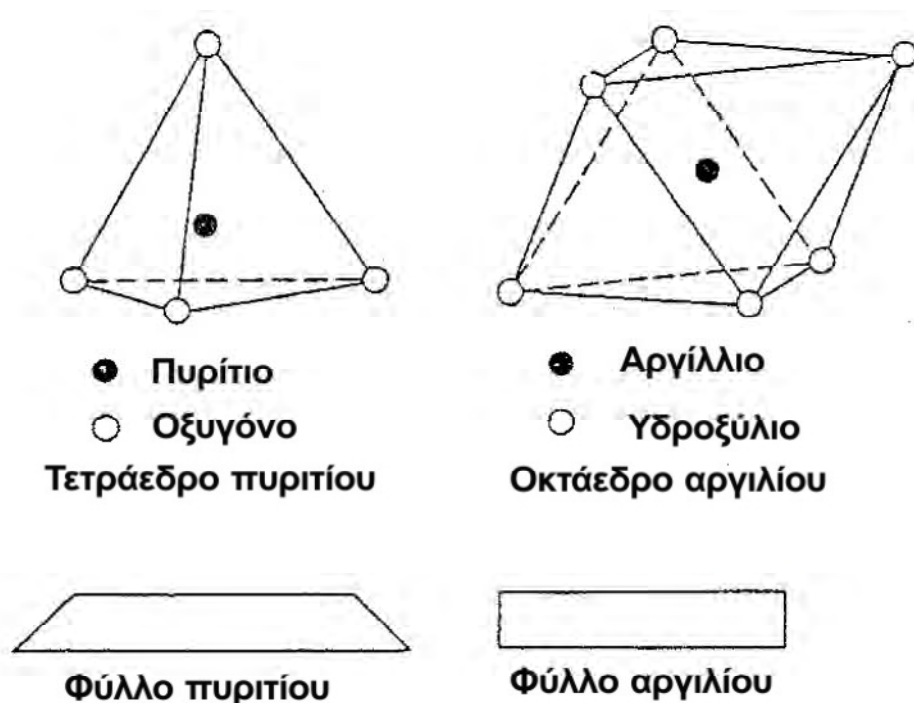
Υποκατηγορία των φυλλοπυριτικών ορυκτών αποτελούν τα αργιλικά ορυκτά (clay minerals), τα οποία είναι ένυδρα πυριτικά ορυκτά του αργιλίου εμπεριέχοντας τις περισσότερες φορές διάφορα ποσοστά σιδήρου και μαγνησίου. Γενικά ως αργιλικά ορυκτά χαρακτηρίζονται τα φυλλοπυριτικά ορυκτά με μέγεθος κόκκων  $<2\mu\text{m}$ , και αυτά διακρίνονται σε διάφορες υποομάδες [11].

### 2.1.2 Δομή Αργιλικών Ορυκτών

Τα ορυκτά της αργίλου κατατάσσονται ως ορυκτά με σταθερή κρυσταλλική δομή, εύκαμπτη, ή ενδιάμεση κρυσταλλική δομή. Παραδείγματα αργιλικών εδαφών με σταθερή κρυσταλλική δομή είναι τα ορυκτά της ομάδας του καολινίτη, ενώ ο μοντμοριλονίτης και οι μαρμαρυγίες είναι τυπικά παραδείγματα εύκαμπτης και ενδιάμεσης κρυσταλλικής δομής [2].

Τα **αργιλικά ορυκτά** χαρακτηρίζονται από το φυλλώδες πλέγμα και τον τέλειο σχισμό (001) ως αποτέλεσμα της ατομικής τους δομής. Αποτελούνται από τετράεδρα σύστασης  $\text{T}_2\text{O}_5$ , όπου T μπορούν να είναι τα κατιόντα  $\text{Si}^{4+}$  ή  $\text{Al}^{3+}$  ή  $\text{Fe}^{3+}$  τα οποία μοιράζονται με τα γειτονικά τετράεδρα τις τρεις κορυφές τους και σχηματίζουν ένα εξαγωνικό φυλλώδες πλέγμα. Η τέταρτη κορυφή συνδέεται με οκτάεδρα, τα οποία αποτελούνται από έξι ιόντα  $\text{O}^{2-}$  ή  $\text{OH}^-$  σε οκταεδρική διάταξη γύρω από ένα κατιόν  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  και  $\text{Fe}^{3+}$  [12].

Το **σχήμα** των αργιλικών συστατικών, όπως φαίνεται στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, μπορεί να μοιάζει με νιφάδες, πετάλια, ή πτερύγια. Τυπικά οι άργιλοι έχουν φυλλοειδή, τύπου μίκα διάρθρωση, με τα φυλλίδια (flakes) να απαρτίζονται από έναν αριθμό πεταλίων κρυστάλλου (crystal platelets) τα οποία στοιβάζονται πρόσωπο με πρόσωπο. Κάθε πετάλιο ονομάζεται στρώμα-μονάδα (unit layer), και οι επιφάνειες της μονάδας ονομάζονται βασικές (Basal) επιφάνειες.



Σχήμα 2.1 Οι βασικές δομικές μονάδες των αργιλικών ορυκτών [9].

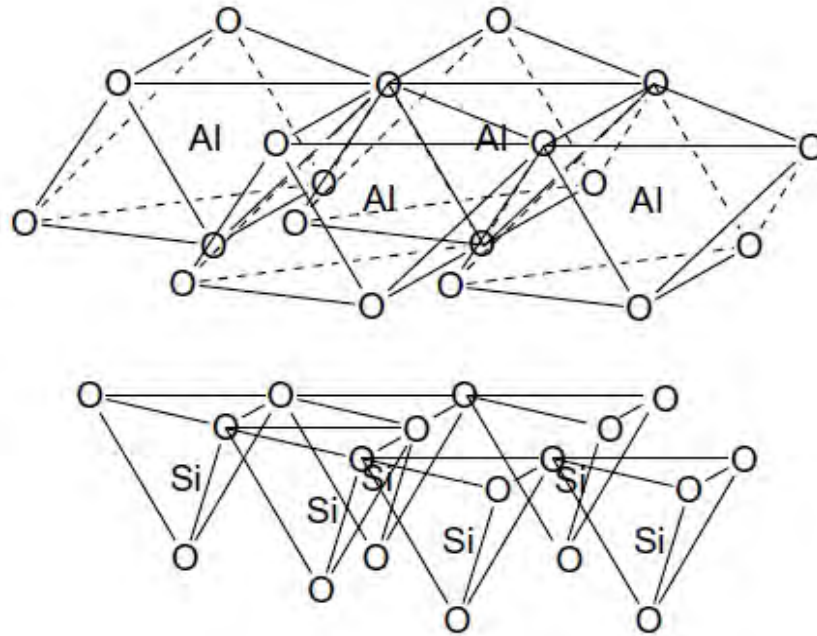
Δύο είναι οι βασικές δομικές μονάδες των αργιλικών ορυκτών:

Το **τετράεδρο του Πυριτίου**, το οποίο αποτελείται από 4 άτομα οξυγόνου (O) διατεταγμένα γύρω από ένα άτομο πυριτίου (Si). Το πυρίτιο βρίσκεται στο κέντρο του τετραέδρου και στις τέσσερις κορυφές του από ένα άτομο οξυγόνου. Τα τετράεδρα αυτά συνδέονται μεταξύ τους με τα οξυγόνα των κορυφών τους ώστε να σχηματίζουν εξαγωνικούς δακτυλίους οι οποίοι επαναλαμβάνονται απεριόριστα .

Τα τετράεδρα είναι προσανατολισμένα έτσι ώστε όλες οι βάσεις τους να βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο και όλες οι κορυφές να έχουν τον ίδιο προσανατολισμό. Από την σύνδεση των τετραέδρων σχηματίζονται το λεγόμενο φύλλο πυριτίου (τετράεδρη στρώση) το οποίο απεικονίζεται συμβολικά με ένα τραπέζιο.

Το **οκτάεδρο του Αργιλίου**, το οποίο συνίσταται από 6 άτομα υδροξυλίου (ή οξυγόνου), γύρω από ένα άτομο αργιλίου (Al). Στα οκτάεδρα του Αργιλίου έξι υδροξύλια (ή οξυγόνα) κατέχουν τις γωνίες ενός οκταέδρου στο κέντρο του οποίου βρίσκονται ιόντα αργιλίου ή σιδήρου ή μαγνησίου ή άλλο ιόν.

Τα οκτάεδρα του αργιλίου, συνδέονται μεταξύ τους και σχηματίζονται το λεγόμενο φύλλο αργιλίου (οκτάεδρη στρώση) ή φύλλο του γκιψίτη (υδραργιλίτη) το οποίο απεικονίζεται συμβολικά με ένα ορθογώνιο. Αν αντί αργιλίου στο οκτάεδρο έχουμε μαγνήσιο (Mg) ο συνδυασμός των οκταέδρων δίνει Βρουσίτη. Τα ορυκτά γκιψίτης και βρουσίτης είναι σταθερά καθώς είναι ηλεκτρικά ουδέτερα. Αντίθετα οι οκταεδρικές στρώσεις δεν είναι ουδέτερες ηλεκτρικά γι' αυτό και δεν συναντώνται μόνες τους στη φύση. Κατά την σύνδεσή τους τα επιμέρους οκτάεδρα μοιράζονται μία ακμή, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1. [9].



Σχήμα 2.2 Οκταεδρικά και Τετραεδρικά στρώματα αργίλων [13].

Τα στρώματα αποτελούνται από πολλαπλά φύλλα. Το οκταεδρικό φύλλο, αποτελείται από άτομα αργιλίου ή μαγνησίου, οκταεδρικά συντεταγμένα με άτομα οξυγόνου από τις υδροξυλικές ομάδες. Ενώ το τετραεδρικό φύλλο, αποτελείται από άτομα πυριτίου τετραεδρικά συντεταγμένα με άτομα οξυγόνου (Σχήμα 2.2).

Τα φύλλα μέσα σε μία μονάδα στρώμα συνδέονται μεταξύ τους μοιραζόμενες άτομα οξυγόνου. Όταν αυτή η σύνδεση συμβαίνει μεταξύ ενός οκταεδρικού και ενός τετραεδρικού φύλλου, μια βασική επιφάνεια περιέχει εκτεθειμένα άτομα οξυγόνου ενώ η άλλη έχει εκτεθειμένες υδροξυλομάδες. Είναι επίσης αρκετά κοινό για δύο τετραεδρικά φύλλα να κάνουν δεσμό με ένα οκταεδρικό φύλλο μοιραζόμενα άτομα οξυγόνου (δομή Hoffmann). Ως αποτέλεσμα σε μια δομή Hoffmann οι βασικές επιφάνειες περιέχουν εκτεθειμένα άτομα οξυγόνου [13].

Οι μονάδες στρωμάτων στοιβάζονται πρόσωπο με πρόσωπο και συγκρατούνται με ασθενείς ελκτικές δυνάμεις. Η απόσταση μεταξύ των αντίστοιχων επιπέδων ονομάζεται απόσταση  $c$  ( $c$ -spacing). Μία κρυσταλλική δομή αργίλου από τρία φύλλα τυπικά έχει μία απόσταση  $c$  περίπου  $9.5 \times 10^{-7}$  nm. Σε κρυστάλλους αργιλικών ορυκτών τα άτομα που έχουν διαφορετικά σθένη θα είναι συνήθως τοποθετημένα εντός των φύλλων της δομής για να δημιουργηθεί ένα αρνητικό δυναμικό στην κρυσταλλική επιφάνεια. Στην περίπτωση αυτή κατιόντα θα προσροφώνται στην επιφάνεια. Αυτά ονομάζονται κατιόντα ανταλλαγής, επειδή μπορούν χημικά να ανταλλάξουν θέσεις με άλλα κατιόντα, όταν ο πηλός αιωρείται σε νερό. Επιπλέον, ιόντα μπορούν να προσροφηθούν στα όρια των αργιλικών κρυστάλλων και να ανταλλάσσονται με άλλα ιόντα στο νερό. Αυτές οι ανταλλαγές επηρεάζουν άμεσα την διόγκωση των πηλών καθώς μόρια νερού τοποθετούνται στην κρυσταλλική δομή των πηλών με τέτοιο τρόπο αυξάνοντας την απόσταση- $c$  και συνεπώς τον όγκο [13].

Κάθε στρώμα αποτελείται από συντηγμένα φύλλα οκταέδρων οξειδίων  $Al^{3+}$ ,  $Mg^{2+}$  ή  $Fe^{3+}$  και φύλλα τετράεδρων οξειδίου του  $Si^{4+}$ . Εάν ένα αργιλικό ορυκτό περιέχει ένα τετραεδρικό και ένα οκταεδρικό φύλλο, είναι γνωστό ως ο τύπος δύο φύλλων 1:1 (two layer sheets), ενώ το σύμπλεγμα που προκύπτει από δύο φύλλα τετράεδρων και ανάμεσα ένα οκτάεδρο είναι ο τύπος 2:1 (three-layer sheets). [13]

Με βάση την δομή τους τα κρυσταλλικά αργιλικά ορυκτά διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

Τα **ορυκτά 1:1** : Με κύριο εκπρόσωπο τον Καολινίτη, τον Αλλοϋσίτη και τον Σερπεντίτη.

Τα **ορυκτά 2:1** : Κύριοι εκπρόσωποι των 2:1 είναι ο Μοντμοριλονίτης και ο Ιλλίτης.

Στα πλακίδια των ορυκτών αυτών οι βάσεις των τετράεδρων Si είναι προς τα έξω και οι κορυφές προς τα μέσα. Στα ορυκτά 2:1 έχουμε εκτεταμένη ισόμορφη αντικατάσταση ως εξής:

- Στα τετράεδρα Si: αντικατάσταση Si από Al

- Στα οκτάεδρα Al: αντικατάσταση Al από  $Mg^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$  ή  $Ni^{2+}$

Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν πολλά αρνητικά φορτία στις επιφάνειες των ορυκτών 2:1. Όπως θα δούμε και παρακάτω η ύπαρξη αυτού του αρνητικού φορτίου λόγω της ισόμορφης αντικατάστασης επηρεάζει σημαντικά την δομή των αργιλικών ορυκτών.

Τα **ορυκτά 2:1:1**: Αυτά είναι ορυκτά παρόμοια σε μορφολογία με τα 2:1, δηλαδή 2 τετράεδρα Si με ενδιάμεσο φύλλο οκταέδρου Al. Εδώ όμως υπάρχει και ένα ακόμα ενδιάμεσο φύλλο, που είναι υδροξείδιο του Mg. Το φύλλο αυτό το ονομάζουμε γέφυρα βρουσίτη (γιατί το οξείδιο του Mg λέγεται βρουσίτης). Κύριος εκπρόσωπός τους είναι ο χλωρίτης [9].

### 2.1.3 Κατηγορίες Αργιλικών Ορυκτών

Ανάλογα με την ακαδημαϊκή πηγή, υπάρχουν τρεις ή τέσσερις κύριες ομάδες αργιλικών ορυκτών: καολινίτη, μοντμοριλλονίτη-σμεκτίτη, ιλλίτη, και χλωρίτη. Οι χλωρίτες δεν θεωρούνται πάντα άργιλοι, μερικές φορές χαρακτηρίζονται ως μια ξεχωριστή ομάδα στο πλαίσιο των φυλλοπυριτικών. Υπάρχουν περίπου 30 διαφορετικοί τύποι "καθάρων" αργίλων σε αυτές τις κατηγορίες, αλλά οι περισσότεροι "φυσικοί" άργιλοι είναι μίγματα αυτών των διαφορετικών τύπων μαζί με άλλα διαβρωμένα ορυκτά [6].

**Ομάδα καολινίτη:** Περιλαμβάνονται τα ορυκτά νακρίτης, δικίτης, καολινίτης και αλλοϋσίτης.

**Ομάδα μοντμοριλλονίτη:** Τα σπουδαιότερα ορυκτά της ομάδας είναι ο μοντμοριλλονίτης, ο νοτρονίτης, ο βευδέλιτης, ο εκτορίτης και ο σαπωνίτης.

**Ομάδα ιλλιτών:** Οι ιλλιτες συναντώνται κυρίως σε ιζηματογενείς αργίλους και σχετίζονται με τον καολινίτη και τον μοντμοριλλονίτη.

**Ομάδα χλωριτών:** Ο χαμοσίτης και το κλινόχωρο αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα της ομάδας των χλωριτών.

**Ομάδα μαρμαρυγιών:** Οι μαρμαρυγίες αν και συναντώνται σε αργίλους, κυρίως σαν κατάλοιπα της αποσάθρωσης, όπως αναφέραμε, στη βιβλιογραφία συνήθως δεν θεωρούνται σαν καθαυτού αργιλικά ορυκτά. Τα πιο γνωστά ορυκτά είναι ο μοσχοβίτης, ο φλογοπίτης, ο βιοτίτης και ο γλαυκονίτης [10].

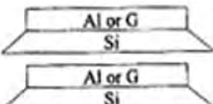
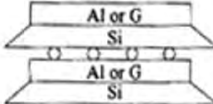
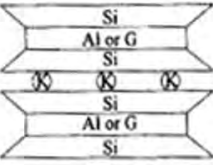
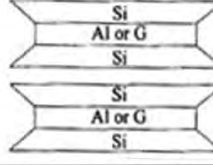
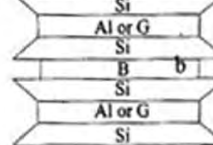
Ο **καολινίτης**  $[Al_2Si_2O_5(OH)_4]$  αποτελείται βασικά από επαναλαμβανόμενες στρώσεις ενός τετραεδρικού και ενός οκταεδρικού φύλλου (ορυκτό δομής 1:1). Στη δομή του καολινίτη, θεωρητικά, δεν υπάρχουν ελεύθερα κατιόντα και γι' αυτό είναι ιδιαίτερα σταθερός. Σχηματίζεται από την εξαλλοίωση αστρίων και μαρμαρυγιών σε όξινο περιβάλλον. Ο κρύσταλλος του καολινίτη αποτελείται από πολλές στρώσεις, που συγκρατούνται μεταξύ τους με δεσμούς υδρογόνου μεταξύ των υδροξυλίων του οκταεδρικού φύλλου και των οξυγόνων του τετραεδρικού φύλλου. Επειδή ο δεσμός αυτός είναι σχετικά ισχυρός (σε σχέση με τις δυνάμεις van der Waals), εμποδίζει την προσρόφηση νερού στο διαστρωματικό χώρο και επιτρέπει στα στρώματα να στοιβάζονται και να δημιουργούν ένα σχετικά μεγάλο κρύσταλλο. Τυπικός κρύσταλλος καολινίτη μπορεί να έχει πάχος 70 έως 100 στρωμάτων [9].

Ο **αλλοϋσίτης** αποτελεί μέλος της οικογένειας του Καολινίτη με δομή 1:1 με ουδέτερα (χωρίς φορτίο) διοκταεδρικά φύλλα και χημικό τύπο:  $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$ . Ο αλλοϋσίτης συνίσταται από όχι καλά διευθετημένα φύλλα τύπου καολινίτη, που χωρίζονται από ποικίλα στρώματα νερού μεταξύ των φύλλων και είναι σχήματος σωληνοειδούς. Όταν αφυδατώνεται (μετά από θέρμανση στους  $100^\circ C$ ) παίρνουμε τον μεταλλοϋσίτη. Η αφυδάτωση του αλλοϋσίτη μπορεί να μην είναι πλήρης. Ο μεταλλοϋσίτης που προκύπτει διατηρεί ένα περιεχόμενο σε νερό που δεν είναι αμελητέο [9].

Ο **ιλλίτης**  $[KAl_4(Si_7Al)O_{20}(OH)_4]$  ή ένυδρος μίκα έχει και αυτός δομή 2:1, όπως και ο μοντμοριλλονίτης, με την διαφορά ότι στον ιλλίτη πολλά από τα άτομα του πυριτίου των τετραέδρων έχουν υποκατασταθεί με άτομα αργιλίου και το αρνητικό φορτίο που προκύπτει από την ισόμορφη αυτή υποκατάσταση στις τετραεδρικές στιβάδες εξουδετερώνεται από κατιόντα καλίου. Τα κατιόντα καλίου συνδέονται με τις γειτονικές στρώσεις με ισχυρούς δεσμούς, πράγμα που συνεπάγεται αδυναμία εισχωρήσεως μορίων νερού. Οι ισχυρές ηλεκτροστατικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στον ενδοστιβαδικό χώρο του ιλλίτη, του προσδίνουν το χαρακτηριστικό της μη διόγκωσης υπό την επίδραση οργανικών πολικών ενώσεων. Μπορεί να σχηματιστεί από την εξαλλοίωση κυρίως μαρμαρυγιών και καλιούχων αστρίων κάτω από αλκαλικές συνθήκες, ενώ με τη σειρά του εξαλλοιώνεται σε καολινίτη [12].

Ο **χλωρίτης** αντιπροσωπεύει μια ομάδα ορυκτών με γενικό τύπο  $M_{5-6}(Al,Si)_4O_{10}(OH)_8$  όπου το κατιόν Μ μπορεί να είναι  $Mg^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Ni^{1+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Mn^{4+}$ ,  $Cr^{3+}$ ,  $Li^{1+}$ . Η δομή του χλωρίτη αποτελείται από διαδοχή στιβάδων τύπου 2:1:1 και χαρακτηρίζεται ως τετραμορφικό ορυκτό. Το 2:1 τμήμα της δομής τους χαρακτηρίζεται ως τριοκταεδρικό όταν στις οκταεδρικές θέσεις επικρατεί το Mg και ο δισθενής Fe και διοκταεδρικό όταν στις οκταεδρικές θέσεις επικρατεί το Al. Οι χλωρίτες αποτελούν προϊόντα εξαλλοίωσης της κερροσίλβης, του βιοτίτη και άλλων σιδηρομαγνησιούχων ορυκτών. Ο χλωρίτης δύναται να έχει σημαντική ισόμορφη υποκατάσταση και να του λείπει συχνά μία στρώση βρουσίτη ή γκιψίτη. Ως εκ τούτου το νερό δύναται να εισχωρήσει μεταξύ των στρώσεων και να προκαλέσει διόγκωση [12].

Ο **σμεκτίτης** είναι ο γενικότερος όρος για μια ομάδα διοκταεδρικών και τριοκταεδρικών ορυκτών, που ομοιάζουν με τον μοντμοριλλονίτη και περιλαμβάνει το μοντμοριλλονίτη, το βειδελλίτη, το νοντρονίτη, το σαπωνίτη κ.ά. Στη δομή του σμεκτίτη  $[(Na,Ca)_{0.33}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O]$  ένα φύλλο γκιψίτη παρεμβάλλεται ανάμεσα σε δυο φύλλα τετραέδρων. Η δομή του σμεκτίτη είναι παρόμοια με αυτή του ιλλίτη με τη διαφορά ότι στα τετραεδρικά φύλλα παρατηρείται αντικατάσταση του  $Si^{4+}$  από  $Al^{3+}$  και κατά συνέπεια το φορτίο των στιβάδων είναι ασθενέστερο. Οι δομικές μονάδες συγκροτούνται μεταξύ τους με μόρια νερού και κατιόντα τα οποία εισέρχονται στον ενδοστρωματικό χώρο εξισορροπώντας το έλλειμμα φορτίου που χαρακτηρίζει τις δομικές μονάδες των σμεκτιτών λόγω αντικατάστασης κατιόντων της δομής. Έτσι, οι σμεκτίτες δεν μπορούν να συγκροτήσουν ισχυρά τα ενδοστιβαδικά ιόντα. Καλούνται «διογκούμενοι» άργιλοι επειδή έχουν την ικανότητα να προσροφούν νερό ή διπολικά υγρά και χαρακτηρίζονται από την ιδιότητά τους να αυξάνουν την πλεγματική τους διάσταση από 9,6 Å μέχρι και 21,4 Å. Ο σμεκτίτης προέρχεται από την εξαλλοίωση σιδηρομαγνησιούχων ορυκτών, αστρίων και ηφαιστειακών γυαλιών. Μπορεί επίσης να προέλθει από την εξαλλοίωση των μαρμαρυγιών και του χλωρίτη σε βερμικουλίτη και στη συνέχεια σε σμεκτίτη [12].

Ορυκτό	Δομή στρώσης	Δομή στοιβάδας	Σύνδεση μεταξύ των στρώσεων	Ικανότητα βασικής ανταλλαγής me/100g	Μορφή του ορυκτού
Καολινίτης	1:1		Δεσμοί υδρογόνου (ισχυροί)	3 – 15	Φυλλώδης Εξαγωνική
Άλλουσίτης	1:1		Ένυδρη με μόρια νερού	6 – 12	Σωληνοειδείς
Ιλλίτης	2:1		Ιόντα καλίου (ασθενέστεροι από τους δεσμούς υδρογόνων)	10 – 15	Φυλλώδης
Μοντμοριλλονίτης	2:1		Δυνάμεις van der Waals ανταλλάξιμα ιόντα μόρια νερού (ασθενείς) molecules	80 – 140	Λιπτά φύλλα
Χλωρίτης	2:1:1		Πλάκα βρουσίτη	20	Φυλλώδεις

Σχήμα 2.3 Δομή των αργιλικών Ορυκτών [9].

### 2.1.4 Χαρακτηριστικά και ιδιότητες των αργιλικών ορυκτών

Τα κοινά χαρακτηριστικά σε όλα τα ορυκτά αργίλου προέρχονται από την χημική τους σύνθεση, την διαστρωματική δομή (layered structure), και το μέγεθος. Τα αργιλικά ορυκτά χαρακτηρίζονται από την έντονη έλξη για το νερό, μερικά από αυτά διογκώνονται εύκολα και μπορούν ακόμα και να διπλασιάσουν το πάχος τους όταν είναι βρεγμένα. Οι περισσότεροι πηλοί έχουν την ικανότητα να απορροφούν ιόντα (ηλεκτρικά φορτισμένα άτομα και μόρια) από ένα διάλυμα και να απελευθερώνουν τα ιόντα αργότερα, όταν αλλάζουν οι συνθήκες [6].

Τα μόρια του νερού έλκονται δυνατά από τις επιφάνειες των αργιλικών ορυκτών ενώ η διαδικασία με την οποία ορισμένα ορυκτά αργίλου διογκώνονται όταν απορροφούν νερό είναι αναστρέψιμη. Η διόγκωση και η συστολή ανταποκρίνεται στις αλλαγές των περιβαλλοντικών συνθηκών. Η ενυδάτωση και η αφυδάτωση μπορεί να αλλάξει το πάχος ενός μόνο σωματιδίου πηλού σχεδόν 100%.

Η ικανότητα ανταλλαγής ιόντων αφορά την φορτισμένη επιφάνεια των αργιλικών ορυκτών. Τα ιόντα μπορεί να έλκονται στην επιφάνεια ενός σωματιδίου πηλού ή να παραλαμβάνονται εντός της δομής των ορυκτών. Αυτή η ικανότητα αναφέρεται σε όλους τους τύπους ιόντων συμπεριλαμβανομένων των οργανικών μορίων, όπως τα φυτοφάρμακα [6].

Η συνοχή είναι η κυριότερη απ' τις ιδιότητες που επηρεάζονται από τους μικρούς κόκκους της αργίλου. Οι ιδιότητες των αργιλικών εδαφών εξαρτώνται από την ορυκτολογική σύσταση των κόκκων αυτών, το σχήμα τους και το μέγεθος τους, την αντοχή των δομικών δεσμών τους, την υφή και την κατάσταση (πυκνότητα και ποσοστό υγρασίας) του εδάφους καθώς και από τις ιδιότητες που εξαρτώνται από την αλληλεπίδραση με το νερό [2].

Τα ορυκτά της αργίλου προσδίδουν «αργιλικά» χαρακτηριστικά στο έδαφος, τα οποία αντικατοπτρίζονται στην υψηλή απορρόφηση και ικανότητα κατακράτησης νερού, στη χαμηλή διαπερατότητα, στην πλαστικότητα κ.α. Η πιο σημαντική από αυτές τις ιδιότητες είναι η συνεκτικότητα, που εκδηλώνεται μέσω της εφελκυστικής τους αντοχής. Τα εδάφη έχουν την ικανότητα να αντιστέκονται σε εφελκυστικές δυνάμεις. Αυτή η αντίσταση οφείλεται στην παρουσία των δομικών δεσμών μεταξύ των στερεών κόκκων.

Εν γένει, όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό αργίλου τόσο μεγαλύτερη είναι η πλαστικότητα, μικρότερη η διαπερατότητα, μεγαλύτερη η συμπιεστότητα, μεγαλύτερη η συνοχή και μικρότερη η γωνία τριβής.

#### **Ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων**

Μια από τις βασικές ιδιότητες των αργίλων είναι το ηλεκτρικό φορτίο στα μόρια τους, γεγονός που σημαίνει ότι οι άργιλοι θα προσροφούν κατιόντα ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  κ.α.) ή και ανιόντα ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ , κ.α.) που θα εξουδετερώνουν το φορτίο των φύλλων τα οποία θα είναι όμως ανταλλάξιμα. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να αντικαθίστανται από άλλα κατιόντα ή ανιόντα αντίστοιχα, όταν έρθουν σε επαφή με αυτά τα ιόντα σε υδατικό διάλυμα.

Το φορτίο των φύλλων είναι κατά κανόνα αρνητικό. Αυτό σημαίνει ότι οι άργιλοι τείνουν να προσροφούν κατιόντα. Η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων, χρησιμοποιείται στον προσδιορισμό του ποσού των ανταλλάξιμων ιόντων που μπορούν να συγκρατηθούν σε μια αργιλική δομή.



Αυτό σημαίνει ότι “μετρά” τα ιόντα στις εσωτερικές ή εξωτερικές επιφάνειες ενός αργιλικού ορυκτού (απορρόφηση και προσρόφηση ιόντων αντίστοιχα για την κάθε επιφάνεια).

Οι τύποι των φορτίων είναι δύο:

Το σταθερό ή δομικό λόγω των ιοντικών αντικαταστάσεων ή δομικών ατελειών και το επιφανειακό λόγω των σπασμένων δεσμών.

Η κύρια προέλευση του αρνητικού ηλεκτρικού φορτίου στα μόρια των αργίλων είναι το φαινόμενο της ισόμορφης υποκατάστασης κατά το οποίο τα κατιόντα των οκταέδρων ή των τετραέδρων υποκαθίστανται από κατιόντα μικρότερου φορτίου που έχουν παρόμοιο μέγεθος ώστε να προσαρμόζονται στη δομή. Οι σπασμένοι δεσμοί στα άκρα των μορίων μπορεί να συνεισφέρουν στην ικανότητα ανταλλαγής κυρίως στις αργίλους της ομάδας του καολινίτη. Επίσης σε αλκαλικές συνθήκες τα φορτία που οφείλονται στις ανωμαλίες των άκρων είναι θετικά, γεγονός που οδηγεί σε προσρόφηση ανιόντων παρά κατιόντων σε αυτές τις θέσεις.

Συμπερασματικά, η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων είναι από τις πιο σημαντικές ιδιότητες των αργιλικών ορυκτών διότι “μετρά”, την ειδική επιφάνεια και το φορτίο σε αυτή την επιφάνεια καθώς και τον αριθμό των ιόντων που έχουν απορροφηθεί μεταξύ των φύλλων της αργιλικής δομής και αυτών που έχουν προσροφηθεί στις εξωτερικές επιφάνειες [9].

### **Πλαστικότητα και αντοχή εν ξηρώ**

Με τον όρο πλαστικότητα (εργασιμότητα) εννοούμε την ιδιότητα των αργίλων να μετασχηματίζονται, όταν τους προσθέσουμε κατάλληλη ποσότητα νερού, σε πλαστική μάζα, ικανή να παίρνει και να διατηρεί το σχήμα που της δίνουμε χωρίς να χάνει τη συνοχή της. Η εργασιμότητα εξαρτάται κυρίως από δύο ιδιότητες των αργιλικών ορυκτών: Την λεπτότητα των κόκκων και το φυλλώδες σχήμα των φυλλοπυριτικών ορυκτών. Έτσι η βέλτιστη πλαστικότητα για την παραγωγική διαδικασία προκύπτει από συγκεκριμένο ποσοστό νερού. Υψηλότερη εργασιμότητα έχουν οι μοντοριλλονιτικές άργιλοι και ακολουθούν οι καολινιτικοί, βειδελιτικοί και ιλλιτικοί άργιλοι. Βελτίωση της εργασιμότητας μπορούμε επίσης να πετύχουμε τεχνητά με την ωρίμανση της άργιλου στον αέρα, με άλεση και με ανταλλαγή ιόντων  $\text{Ca}^{2+}$  και  $\text{Mg}^{2+}$  από  $\text{Na}^+$  και  $\text{K}^+$ . Για την συνοχή των σωματιδίων μεταξύ τους παίζει επίσης πολύ σημαντικό ρόλο ή ιοντοανταλλακτική ικανότητα των ορυκτών της άργιλου [10].

### **Υδροπερατότητα**

Το πολύ μικρό μέγεθος των αργιλικών ορυκτών καθώς και η συγκράτηση νερού στο χώρο μεταξύ των φύλλων των δομικών μονάδων, απαγορεύει την περαιτέρω διέλευση νερού. Συνεπώς τα αργιλικά ορυκτά είναι μη περατά [9].

### **Προσρόφηση του ύδατος**

Η συμπεριφορά των λεπτόκοκκων εδαφών όπως είναι τα αργιλικά εδάφη επηρεάζεται σημαντικά από την παρουσία και την ποσότητα του νερού στους πόρους. Η επιρροή αυτή οφείλεται κυρίως στην ηλεκτρική αλληλεπίδραση του νερού με τις φορτισμένες επιφάνειες των αργιλικών πλακιδίων.

Όπως είναι γνωστό, το μόριο του νερού, αν και ηλεκτρικά ουδέτερο, παρουσιάζει τις ιδιότητες ηλεκτρικού δίπολου, με κέντρα θετικού και αρνητικού φορτίου που δεν ταυτίζονται. Τα ηλεκτρικά αυτά δίπολα έλκονται προς την ηλεκτρικά φορτισμένη επιφάνεια των αργιλικών πλακιδίων και προσροφώνται σε αυτή, δηλαδή συνδέονται ισχυρά με την επιφάνεια των αργιλικών πλακιδίων και αποτελούν ενιαίο σώμα. Η έλξη των δίπολων του νερού προς τα αργιλικά πλακίδια είναι πολύ ισχυρή κοντά στην επιφάνεια και μειώνεται ραγδαία με την απόσταση από την επιφάνεια, επειδή, ως γνωστόν, οι ηλεκτρικές δυνάμεις είναι αντιστρόφως ανάλογες του τετραγώνου της απόστασης. Έτσι, δημιουργείται μια ζώνη γύρω από το αργιλικό πλακίδιο, στην οποία το προσροφημένο νερό έχει ιδιότητες πολύ διαφορετικές από το ελεύθερο νερό που βρίσκεται έξω από τη ζώνη αυτή [9].

### **Διόγκωση**

Ορισμένα αργιλικά συσσωματώματα επιτρέπουν στα πολικά μόρια του νερού να εισέρχονται, μέσω της ενυδάτωσης των κατιόντων, στον ενδοστρωματικό χώρο με αποτέλεσμα τη διόγκωση της αργίλου (όπου αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των φύλλων της κρυσταλλικής δομής των αργιλικών ορυκτών).

Η διόγκωση αυτή είναι αποτέλεσμα της επικράτησης των απωστικών δυνάμεων έναντι των ελκτικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στο σύστημα αργίλου και νερού και πραγματοποιείται σε διάφορα στάδια. Η διαδικασία της διόγκωσης είναι αντιστρέψιμη μέσω της αφυδάτωσης του αργίλου. Υπάρχουν δύο τρόποι αφυδάτωσης, η αφυδάτωση μέσω αέρα ή μέσω λυοφιλίωσης

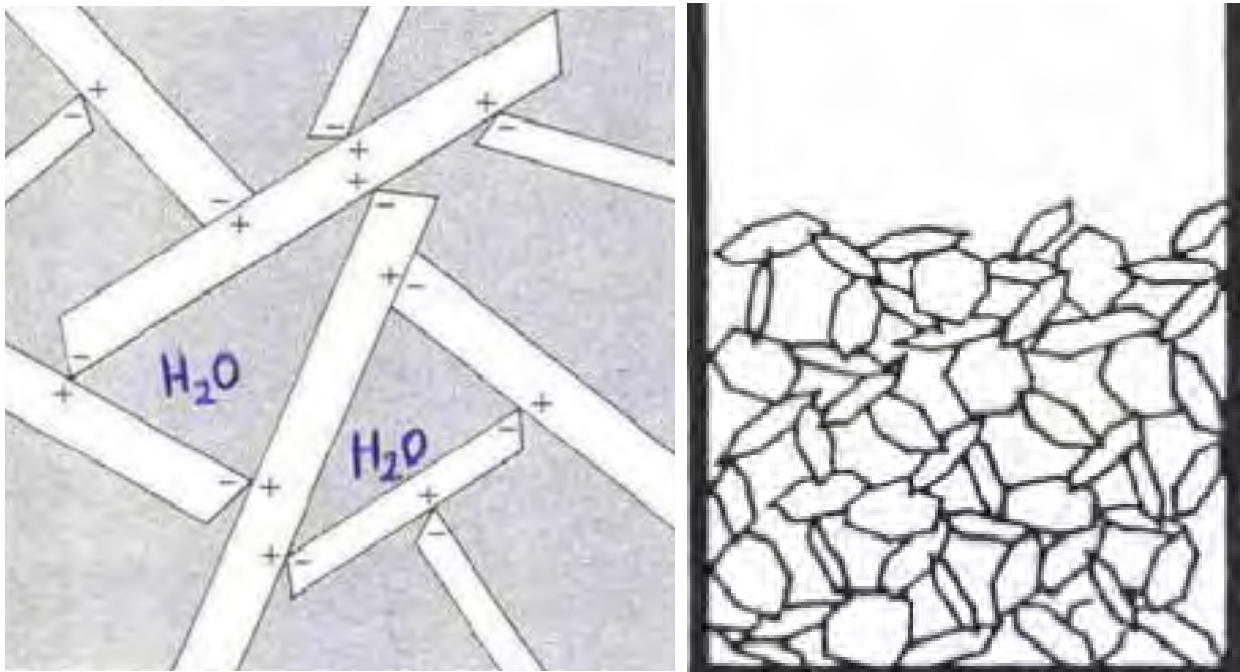
Όλες οι άργιλοι έλκουν μόρια νερού στην επιφάνεια τους (προσρόφηση), αλλά μερικές μόνο προσλαμβάνουν τα μόρια νερού μέσα στη δομή τους (απορρόφηση) [9].

### **Θιξοτροπία**

Υπάρχουν τέσσερεις βασικές κατηγορίες ρεολογικής συμπεριφοράς ή τέσσερεις τύποι ρευστών. Τα νευτώνεια ρευστά, που αυξάνουν τη διατμητική τους τάση ανάλογα του λόγου διάτμησης, τα διευρυνόμενα που αυξάνουν τη διατμητική τάση υπερβολικά, τα ψευδοπλαστικά, με ελλειπτική αύξηση, και τα πλαστικά Bingham που εμφανίζουν νευτώνειες ιδιότητες σε μεγάλες τιμές διατμητικής τάσης ενώ σε μικρές τιμές καταρρέει το ρεολογικό προφίλ και σχηματίζεται πήγμα.

Πολλά ρευστά εμφανίζουν ιδιότυπο ρεολογικό προφίλ, γεγονός που επιβάλλει τη χωριστή τους κατάταξη από την προαναφερθείσα. Πρόκειται κυρίως για υγρά στα οποία εμφανίζεται η ιδιότητα, σε ηρεμία να παράγουν πήγμα, ενώ με την παραμικρή άσκηση δύναμης στην επιφάνεια τους να ρευστοποιούνται. Τέτοια ρευστά ονομάζονται θιξότροπα, και το αντίστοιχο φαινόμενο θιξοτροπία. Πολλά αργιλικά ορυκτά και σε ανάμιξη με ορισμένη ποσότητα νερού σχηματίζουν αιωρήματα που με το χρόνο μεταπίπτουν σε σταθερούς πολτούς. Οι πολτοί αυτοί δεν ρέουν όταν υποστούν κλίση αλλά με σχετική δόνηση ή κτυπήματα μεταπίπτουν πάλι σε ρευστή μορφή.

Η ιδιότητα αυτή, αναστρέψιμη και επηρεαζόμενη από τον χρόνο, είναι γνωστή ως θιξοτροπία και οφείλεται στο ότι, τα αιωρούμενα αργιλικά σωματίδια, σταδιακά, παίρνουν τέτοιες θέσεις, έτσι ώστε τα μόρια του νερού να εγκλωβίζονται στα κενά που δημιουργούνται ανάμεσα στα αργιλικά ορυκτά και να μην μπορούν να κινηθούν ελεύθερα. Αναλυτικότερα φαίνεται στο παρακάτω (σχήμα 2.4 σελ.18).



Σχήμα 2.4 Δομή “house of cards” [9].

Πρόκειται για την ονομαζόμενη δομή “house of cards”, όπου τα αργιλικά σωματίδια είναι συνδεδεμένα σε ένα τρισδιάστατο δίκτυο. Κάθε δυνατό χτύπημα μπορεί να χαλάσει αυτό το σκελετό και το αιώρημα μπορεί να κινηθεί πάλι, ελεύθερα.

Ο μοντμοριλλονίτης αναπτύσσει θιξοτροπία σε μεγάλο βαθμό. Θιξοτροπία σε μικρό βαθμό είναι δυνατό να αναπτύξουν μερικοί καολίνες ιζηματογενούς προέλευσης, όταν είναι επεξεργασμένοι με  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . [9].

## 2.2 Πηλοκονιάματα

Κονίαμα είναι μια εφαρμόσιμη πάστα που χρησιμοποιείται για να δεσμεύσει οικοδομικά υλικά (τούβλα, πέτρες, τσιμεντόλιθους κ.α.) μεταξύ τους καθώς και να καλύψει τα κενά. Το κονίαμα σκληραίνει με τον χρόνο προδίδοντας μία άκαμπτη δομή συσσωματώματος. Τα σύγχρονα κονιάματα κατασκευάζονται τυπικά από ένα μίγμα άμμου, ένα συνδετικό όπως τσιμέντο ή ασβέστη και νερό.

Τα πηλοκονιάματα (κονιάματα με κύριο συνδετικό τον πηλό) χρησιμοποιούνταν στο παρελθόν στους αρμούς μεταξύ λίθων και ωμοπλίνθων. Αν και η χρήση τους ήταν ευρεία, υπάρχουν λίγες πληροφορίες για αυτά, εφόσον δεν έχουν μελετηθεί ιδιαίτερα μέχρι σήμερα .

Οι μηχανικές ιδιότητες ενός μείγματος πηλοκονιάματος δεν μπορούν εξαρχής να προκαθοριστούν (όπως συμβαίνει στα κονιάματα τσιμέντου κ.α.). Η αδυναμία αυτή βέβαια, είναι απόρροια της δυσκολίας και έλλειψης τυποποίησης των πηλών, καθώς χρησιμοποιούνται σε ελάχιστο ποσοστό στη σύγχρονη δόμηση, σε παγκόσμια κλίμακα [2].

Ο πηλός που χρησιμοποιείται στα πηλοκονιάματα, είναι όμοιος με αυτόν που χρησιμοποιείται για τις τοιχοποιίες αν και λίγο πιο λεπτόκοκκος (μέγιστος κόκκος το πολύ 2mm). Στη σύγχρονη δόμηση συνοδεύεται συχνά από τσιμέντο για τα κονιάματα δόμησης ή άσβεστο για τα επιχρίσματα. Τα πρόσθετα αυτά χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν τη συμπεριφορά του υλικού, όσον αφορά την αντοχή του και την ανθεκτικότητά του [2].

Για το επίχρισμα η προσθήκη άσβεστου μαζί με ελάχιστο τσιμέντο 1/10 το κάνει πιο ανθεκτικό στο νερό και στην ατμοσφαιρική διάβρωση, χωρίς ωστόσο να εμποδίζει την κυκλοφορία του αέρα κατά την εξάτμιση του νερού [14].

Η πιο συνήθης περίπτωση όσον αφορά την παραδοσιακή δόμηση είναι η χρήση πηλοκονιαμάτων χωρίς σταθεροποίηση. Η σταθεροποίηση αποτελεί τη σύγχρονη εξέλιξη των πηλοκονιαμάτων κάνοντας χρήση τσιμέντου, άσβεστου και σπανιότερα άλλων πρόσθετων. Η ποιότητα του πηλοκονιάματος πρέπει να ελέγχεται κυρίως, διαμέσου των μηχανικών του χαρακτηριστικών, της συνάφειας του με την πλίνθο, της συστολής σε ξήρανση και της ανθεκτικότητας του έναντι της διάβρωσης, καθώς και της ανθεκτικότητάς του σε κύκλους ύγρυνσης-ξήρανσης [2].

Η **συστολή** κατά την ξήρανση του πηλοκονιάματος προκαλεί στην τοιχοποιία οριζόντια συστολή από 1 έως 2mm στα 5 μέτρα μήκους τοίχου, ενώ η καθίζηση των πηλοκονιαμάτων στην τοιχοποιία σε νεκρό φορτίο προκαλεί μια κατακόρυφη συστολή του τοίχου της τάξεως του 1 έως 2 cm ανά 3 μέτρα ύψους τοίχου.

Τα σταθεροποιημένα πηλοκονιάματα παρουσιάζουν μειωμένη συστολή ξήρανσης σε σύγκριση με αυτά χωρίς σταθεροποίηση. Η χρήση φυτικών ή άλλων ινών εφαρμόζεται για τον περιορισμό των ρηγματώσεων που οφείλονται στο αργιλικό ποσοστό του πηλοκονιάματος, για την επιτάχυνση της ξήρανσης - σκλήρυνσης του χάρη στη διοχέτευση της υγρασίας προς την ατμόσφαιρα μέσω της ίνας και για την αύξηση της εφελκυστικής αντοχής του.

Βασικό ρόλο παίζει η ποιότητα και η ποσότητα του πηλού, οι προστιθέμενες κονίες και ο υδρομετρικός συντελεστής τους. Αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν σημαντικά τα μηχανικά και φυσικά χαρακτηριστικά του κονιάματος .

Η ποιότητα του πηλού καθορίζει τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του πηλοκονιάματος. Όταν το ποσοστό της άμμου που περιέχεται στη σύνθεση του πηλοκονιάματος είναι υψηλό (>30%) περιορίζεται η συστολή και οι μικρορηγματώσεις, ενώ μειώνονται οι αντοχές του. Το απαιτούμενο ποσοστό νερού στη σύνθεση, ώστε το κονίαμα να γίνει εργάσιμο εξαρτάται από το περιεχόμενο ποσοστό αργίλου του πηλού. Όσο υψηλότερο είναι το περιεχόμενο ποσοστό αργίλου, τόσο περισσότερο νερό απαιτείται με αποτέλεσμα να μειώνεται η αντοχή του πηλοκονιάματος.

Η ορυκτολογική σύσταση επίσης επηρεάζει τη συμπεριφορά του πηλού. Παραδείγματος χάριν, οι κρύσταλλοι σμεκτίτη χαρακτηρίζονται από την υψηλή προσρόφηση νερού και την έντονη αλλαγή του όγκου του υλικού [2].

## 2.3 Υλικά για την σταθεροποίηση

Με τον όρο σταθεροποίηση εννοείται γενικά η βελτίωση των φυσικών και χημικών χαρακτηριστικών εδαφών και οικοδομικών υλικών.

Ως όρος της εδαφομηχανικής αφορά στη βελτίωση της ποιότητας και των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους, με την προσθήκη πρόσθετων όπως άσβεστου, τσιμέντου, τέφρας κ.α.

Ως όρος της οικοδομικής με ωμό πηλό, χαρακτηρίζει την βελτίωση του πηλού με προσθήκη πρόσθετων (υδράσβεστου, τσιμέντου, τέφρας κ.α.), με σκοπό να καταστεί ανθεκτικός στη διαβρωτική επίδραση του νερού και να μειώσει την απορρόφηση του νερού [2].

Στην παρούσα εργασία η σταθεροποίηση εστιάζεται κυρίως στην βελτίωση των πηλοκονιαμάτων ενάντια στην διαβρωτική επίδραση του νερού καθώς από εκεί συνήθως ξεκινούν και οι μηχανικές αστοχίες σε μία πηλοκατασκευή, στοιχείο που εμφανίζεται και μέσα από την λαϊκή παράδοση εξ' ου και η παροιμία «προστατέψέ με απ' το νερό να σε προστατέψω απ' το σεισμό».

Τα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται για την σταθεροποίηση των πηλών, για οικοδομική χρήση, είναι συνήθως ανάλογα με εκείνα που χρησιμοποιούνται για την σταθεροποίηση εδαφών και σε επίπεδο έρευνας ο τομέας της εδαφομηχανικής έχει δώσει χρήσιμα στοιχεία για τα πρόσθετα καθώς και τους μηχανισμούς σταθεροποίησης. Τα παραδοσιακά πρόσθετα σταθεροποίησης είναι το τσιμέντο, ο ασβέστης και αρχίζουν να βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή κυρίως σε συνδυασμό με τσιμέντο ή ασβέστη, η υπτάμενη τέφρα και οι σκωρίες υψικαμίνων. Τα τελευταία χρόνια ένας αυξανόμενος αριθμός μη παραδοσιακών πρόσθετων έχουν αναπτυχθεί. Αυτοί οι σταθεροποιητές γίνονται δημοφιλείς λόγω του σχετικά χαμηλού κόστους, και του σύντομου χρόνου ωρίμανσης τους. Στους μη παραδοσιακούς σταθεροποιητές κατατάσσονται τα πολυμερή, συμπολυμερή, άλατα, ρητίνες πετρελαίου καθώς και άλλα παραπροϊόντα ή απορρίμματα βιομηχανιών όπως ο φωσφογύψος.

Οι σταθεροποιητές συνήθως είναι υδραυλικά (πρωτογενή συνδετικά) ή μη-υδραυλικά (δευτερογενή συνδετικά) υλικά που αντιδρούν με το νερό πρωτογενώς ή με την παρουσία ποζολανικών υλικών (δευτερογενώς) για να σχηματίσουν σύνθετα υλικά με συγκολλητικές ιδιότητες [15].

### 2.3.1 Τσιμέντο

Το τσιμέντο είναι από τα πιο δημοφιλή πρόσθετα στην σταθεροποίηση εδαφών. Θεωρείται ως πρωτογενές-υδραυλικό συνδετικό υλικό, επειδή μπορεί να επιφέρει από μόνο του την σταθεροποιητική δράση που απαιτείται. Η αντίδραση του τσιμέντου δεν εξαρτάται άμεσα από τα ορυκτά του εδάφους, καθώς αρχικά αντιδράει μόνο με το νερό, η διαδικασία ενυδάτωσης ξεκινά όταν το τσιμέντο αναμιγνύεται με νερό και άλλα συστατικά έχοντας ως αποτέλεσμα φαινόμενα σκλήρυνσης. Η σκλήρυνση του τσιμέντου θα περικλείει το έδαφος ως κόλλα, αλλά δεν θα αλλάξει τη δομή του εδάφους. Η αντίδραση ενυδάτωσης είναι αργή διαδικασία που ξεκινάει από την επιφάνεια των κόκκων τσιμέντου με αποτέλεσμα, το κέντρο των κόκκων να μπορεί να παραμείνει μη ενυδατωμένο.

Η ενυδάτωση του τσιμέντου είναι μια σύνθετη διαδικασία με μια περίπλοκη σειρά από χημικές αντιδράσεις που παραμένουν σε ένα βαθμό άγνωστες. Ωστόσο, η διαδικασία αυτή επηρεάζεται από την παρουσία ξένων υλών ή ακαθαρσιών, τον λόγο νερού-τσιμέντου, την θερμοκρασία σκλήρυνσης, την παρουσία προσθέτων και την ειδική επιφάνεια του μίγματος.

Συνήθως η επιλογή του τσιμέντου εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους προς επεξεργασία και την επιθυμητή τελική αντοχή και γι' αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι τσιμέντου από το πιο σύνηθες τσιμέντο Portland, έως τσιμέντα υψικαμίνων, τσιμέντο ανθεκτικό σε θειικά, τσιμέντο υψηλής περιεκτικότητας σε αλουμίνα κ.α. [15].

Τα ασβεστοπυριτικά προϊόντα,  $C_3S$  και  $C_2S$  είναι τα δύο κύρια τσιμεντιτικά προϊόντα που ευθύνονται για την ανάπτυξη αντοχής, ενώ το υδροξείδιο του ασβεστίου και αυτό ως προϊόν της ενυδάτωσης αντιδρά δευτερογενώς με ποζολανικά υλικά (τα οποία είναι συνήθως διαθέσιμα στους αργίλους και τα εδάφη) σχηματίζοντας περαιτέρω τσιμεντιτικά προϊόντα. Συνήθως η ποσότητα του τσιμέντου που χρησιμοποιείται είναι μικρή, αλλά επαρκής για να βελτιώσει τις μηχανικές ιδιότητες και να αυξήσει την ανταλλαγή κατιόντων των αργίλων στα εδάφη. Τα σταθεροποιημένα με τσιμέντο εδάφη παρουσιάζουν συνήθως, μειωμένη συνεκτικότητα (πλαστικότητα), μειωμένη διόγκωση και συμπιεστότητα και αυξημένη αντοχή [15].

Το τσιμέντο μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε τύπο εδάφους, εκτός από εδάφη με οργανικό περιεχόμενο μεγαλύτερο από 2% ή με pH χαμηλότερο από 5,3. Γενικά το τσιμέντο αυξάνει το όριο πλαστικότητας και μειώνει το όριο υδαρότητας, μειώνοντας έτσι το δείκτη πλαστικότητας.

Οι άλλες σημαντικές επιδράσεις της σταθεροποίησης με τσιμέντο είναι η μείωση της συρρίκνωσης και διόγκωσης, η αύξηση στη μηχανική αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας, και την αντίσταση ενάντια στην επίδραση της υγρασίας, ψύξης και απόψυξης. Η ανεμπόδιστη θλιπτική αντοχή αυξάνει με την αύξηση της περιεκτικότητας σε τσιμέντο για λεπτόκοκκα και κυρίως για χονδρόκοκκα εδάφη, ενώ παράλληλα αυξάνουν η συνοχή και η αντοχή [16].

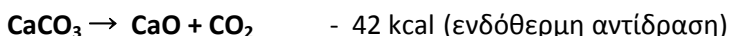
Η καταλληλότητα του εδάφους ορίζεται από την κοκκομετρική διαβάθμιση, την πλαστικότητα, τη συμπυκνωσιμότητα και τη συνοχή του. Για την παραγωγή ωμοπλίνθων ο πηλός πρέπει να έχει αρκετά μεγάλο ποσοστό λεπτών κόκκων. Όταν το αργιλικό περιεχόμενο ποσοστό στον πηλό είναι από 5% έως 20% θεωρείται ότι οι συμπιεσμένες ωμόπλινθοι μπορούν να σταθεροποιηθούν με τσιμέντο .

Η διάμετρος του μεγίστου κόκκου που προτείνεται για τη σταθεροποίηση με τσιμέντο κυμαίνεται από 6mm έως 20mm. ενώ τα καταλληλότερα εδάφη για σταθεροποίηση με τσιμέντο είναι αυτά που έχουν δείκτη πλαστικότητας μεταξύ 2,5% και 30% . Για πηλούς με υψηλότερους δείκτες πλαστικότητας η υδράσβεστος αποτελεί καταλληλότερο σταθεροποιητή [2].

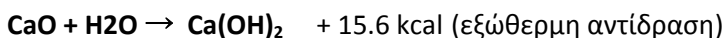
### 2.3.2 Ασβέστης

Ο ασβέστης παρέχει γενικά έναν οικονομικό τρόπο σταθεροποίησης. Η προσθήκη ασβέστη στο χώμα ή σε πηλό για την δημιουργία οικοδομικών υλικών έχει μια πολύ μακρά ιστορία από την αρχαία Μεσοποταμία και την Αίγυπτο, την αρχαία Ελλάδα και την Ρώμη μέχρι τις μέρες μας. Η άσβεστος παράγεται με έψηση ασβεστολιθικού πετρώματος, δηλαδή με έψηση ανθρακικού ασβεστίου ( $\text{CaCO}_3$ ).

**Έψηση** ασβεστολιθικών πετρωμάτων:



**Έσβηση** της παραγόμενης άσβεστου και παραγωγή της υδράσβεστου:



Η σταθεροποίηση μπορεί να προκληθεί είτε από ασβέστη  $\text{CaO}$  (Quicklime) ή υδράσβεστο  $\text{Ca(OH)}_2$  (hydratedlime). Η άσβεστος (Quicklime) όμως χρησιμοποιείται πιο συχνά καθώς παρέχει κάποια συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι της υδράσβεστου, χαρακτηρίζεται από υψηλότερη διαθέσιμη περιεκτικότητα σε ελεύθερο ασβέστη ανά μονάδα μάζας, είναι πυκνότερη από τον ένυδρο ασβέστη (απαιτείται λιγότερος χώρος αποθήκευσης), αλλά κυρίως γιατί παράγει θερμότητα κατά την ενυδάτωση η οποία επιταχύνει την ποζολανική δραστηριότητα οδηγώντας σε αύξηση της αντοχής και μεγάλη μείωση της περιεκτικότητας σε υγρασία [15].

Όλοι οι τύποι των αργιλικών ορυκτών αντιδρούν με τον ασβέστη. Η φύση της ανταλλαγής κατιόντων δεν κάνει μεγάλη διαφορά στα καολινικά εδάφη αλλά μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στα αργιλώδη εδάφη που περιέχουν μοντμοριλλονίτη. Στην πραγματικότητα οι διογκούμενοι άργιλοι τείνουν να αντιδρούν εύκολα με τον ασβέστη, χάνοντας αμέσως πλαστικότητα.

Όταν ο ασβέστης προστίθεται σε ένα χώμα έχει μία άμεση επίδραση στις ιδιότητες του. Αρχικά εμφανίζεται ανταλλαγή κατιόντων μεταξύ των μεταλλικών ιόντων που συνδέονται με τις επιφάνειες των σωματιδίων αργίλου και των ιόντων ασβεστίου του ασβέστη. Τα σωματίδια αργίλου περιβάλλονται από ένα διάχυτο ένυδρο διπλό στρώμα το οποίο έχει τροποποιηθεί από την ανταλλαγή των ιόντων. Αυτό αλλάζει την πυκνότητα του ηλεκτρικού φορτίου γύρω από τα σωματίδια αργίλου το οποίο οδηγεί τα σωματίδια να έλκονται πλησιέστερα το ένα στο άλλο για να σχηματίσουν συσσωματώματα, η διαδικασία αυτή ονομάζεται συσσωμάτωση [17].

Η ανταλλαγή ιόντων και η συσσωμάτωση συμβαίνουν αμέσως μετά την ανάμιξη προκαλώντας άμεσες αλλαγές στην αντοχή, τον δείκτη πλαστικότητας και την εργασιμότητα. Παράλληλα στην επιφάνεια των σωματιδίων της αργίλου γίνεται ενανθράκωση καθώς το  $\text{CO}_2$  αντιδρά με τον ασβέστη σχηματίζοντας έναν ασθενή παράγοντα συγκόλλησης που οδηγεί σε μια ταχεία αρχική αύξηση της αντοχής [16].

Αρχικά τα ιόντα προσροφώνται από αργιλικά ορυκτά και δεν είναι διαθέσιμα για ποζολανικές δράσεις μέχρι να ικανοποιηθεί αυτή τους η ανάγκη, η διαδικασία αυτή αναφέρεται ως δέσμευση ασβέστη (lime fixation) και για να αρχίσει η προσθήκη ασβέστη να επιφέρει αλλαγές στην μηχανική αντοχή πρέπει να ξεπεραστεί αυτό το όριο της δέσμευσης που κυμαίνεται συνήθως στο 1-3% (ασβέστη κ.β.). Εκτός από την ανταλλαγή κατιόντων αρχίζει η ποζολανική δραστηριότητα, μια αργή διαδικασία που ευθύνεται κυρίως για την ανάπτυξη των αντοχών κατά την περίοδο της ωρίμανσης.

Το εξαιρετικά αλκαλικό περιβάλλον που παράγεται με την προσθήκη ασβέστη αυξάνει την διαλυτότητα των αργιλο-πυριτικών στην επιφάνεια των αργλικών ορυκτών δίνοντας δευτερογενώς ένυδρα τσιμεντιτικά προϊόντα [17].

Οι ποζολάνες υλικά δηλαδή που περιέχουν διοξείδιο του πυριτίου και οξειδίου του αργιλίου (π.χ. αργλικά ορυκτά, ιπτάμενη τέφρα, σκωρία υψικαμίνων κ.α.) έχουν μεγάλες δυνατότητες συνεργασίας με τον ασβέστη καθώς ενισχύουν την ποζολανική αντίδραση. Ωστόσο χρειάζεται προσοχή σε χώματα όπου υπάρχουν θειικά άλατα (π.χ. γύψος) και οργανικά υλικά καθώς μπορούν να αναστείλουν την σταθεροποίηση με άσβεστο επιδρώντας στην αντοχή.

Γενικότερα η προσθήκη 5-10% ασβέστη θεωρείται η ιδανική για την ανάπτυξη των μηχανικών αντοχών σε εδάφη οδηγώντας παράλληλα σε σημαντική μείωση στο δείκτη πλαστικότητας. Αντίστοιχα αυξάνεται η βέλτιστη περιεκτικότητα σε νερό, μειώνεται η μέγιστη ξηρή πυκνότητα, μειώνεται το δυναμικό της διόγκωσης ενώ η γραμμική συρρίκνωση φαίνεται να μειώνεται όσο αυξάνεται η προσθήκη σε ασβέστη και πέραν του 10% [16].

### 2.3.3 Υδραυλική Άσβεστος

Τα τελευταία χρόνια έχει επανέλθει στο προσκήνιο η έρευνα πάνω στην παραγωγή και τη χρήση υδραυλικών κονιών, στο χώρο των κατασκευών, ειδικότερα σε εργασίες συντήρησης - αναστήλωσης ιστορικών μνημείων, ενώ το ενδιαφέρον για τις φυσικές υδραυλικές κονίες οφείλει την εμφάνισή του και στις προσδοκίες των επιστημόνων για εξοικονόμηση σημαντικών ποσοτήτων ενέργειας από την παραγωγή τους. Παρόλα αυτά με εξαίρεση την έρευνα των J.E. Oti και J.M. Kinuthia (βλέπε κεφ.3 Ανασκόπησης) στον τομέα της σταθεροποίησης αργίλων μέχρι τώρα δεν έχουν υπάρξει έρευνες με χρήση υδραυλικής άσβεστος.

Η φυσική υδραυλική άσβεστος χρησιμοποιούνταν κυρίως κατά τη διάρκεια του 19ου αιώνα και αποτελεί τον πρόδρομο του τσιμέντου Portland. Η φυσική υδραυλική άσβεστος συνήθως παράγεται από μαργαϊκούς ασβεστόλιθους που περιέχουν σημαντικά ποσοστά αργιλοπυριτικών προσμίξεων. Η βασική διαφορά στην παραγωγή μιας φυσικής υδραυλικής άσβεστος και ενός τσιμέντου τύπου Portland είναι η θερμοκρασία έψησης [18].

Η θερμοκρασία η οποία αναπτύσσεται πρέπει να διατηρείται στα χαμηλότερα δυνατά επίπεδα, στην περιοχή 900-950°C. Καθώς αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει τον κίνδυνο υπερέψησης του περιεχόμενου ασβεστόλιθου με αποτέλεσμα να μην επιτυγχάνεται στην συνέχεια ικανοποιητική σβέση.

Κατά την διάρκεια της έψησης το ανθρακικό ασβέστιο  $\text{CaCO}_3$  αποσυντίθεται σε οξείδιο του ασβεστίου  $\text{CaO}$ . Από αυτό ένα μέρος αντιδρά με τα περιεχόμενα οξείδια  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ , που προέρχεται από την άργιλο, σχηματίζοντας αργιλοπυριτικές ενώσεις του ασβεστίου:



Οι υδραυλικές ιδιότητες της άσβεστος οφείλονται στις ενώσεις του ασβεστίου με το πυρίτιο, τον άργιλο και τον σίδηρο. Οι κύριες δραστικές ενώσεις στην υδραυλική άσβεστο είναι το  $\text{C}_2\text{S}$  και το  $\text{CaO}$ .



Το ποσοστό του παραγόμενου C<sub>2</sub>S και CA εξαρτάται από τις αρχικές συγκεντρώσεις των οξειδίων του πυριτίου και αργιλίου στο πέτρωμα του μαργαϊκού ασβεστόλιθου, το οποίο με την σειρά του αποτελεί ένδειξη της υδραυλικότητας της άσβεστου. Οι άσβεστοι κατατάσσονται με βάση τον δείκτη υδραυλικότητας του Vicat: **Δείκτης υδραυλικότητας (i) = (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + SiO<sub>2</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) / (CaO + MgO)**

Όσο αυξάνει η τιμή του δείκτη υδραυλικότητας τόσο πιο υδραυλικός ο χαρακτήρας της άσβεστου:

(i)=0.00-0.01 αερική άσβεστος

(i)=0.10-0.16 άσβεστος χαμηλής υδραυλικότητας

(i)=0.16-0.32 άσβεστο μεσαίας υδραυλικότητας

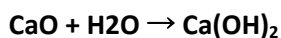
(i)=0.31-0.42 υδραυλική άσβεστος

(i)=0.42-0.50, άσβεστος υψηλής υδραυλικότητας

Όταν μια κονία παρουσιάζει δείκτη υδραυλικότητας πάνω από 0.50 θεωρείται τσιμέντο.

**ΣΒΕΣΗ:** Η παραγόμενη από την έψηση των αργιλικών ασβεστόλιθων κονία αποτελείται από δύο μέρη. Το CaO, με σβέση του οποίου παράγεται Ca(OH)<sub>2</sub> το οποίο με την σειρά του αντιδρά με το CO<sub>2</sub> και σκληρύνεται προς CaCO<sub>3</sub>. Οι υδραυλικές ενώσεις C<sub>2</sub>S, CA όταν έρθουν σε επαφή με το νερό, αντιδρούν γρήγορα μαζί του σχηματίζοντας ένυδρα προϊόντα C-S-H, C-A-H (σε μορφή gel), τα οποία παρέχουν γρήγορη σκλήρυνση. Η σβέση αποτελεί ευαίσθητη διεργασία. Υπερβολή στην ποσότητα νερού ή στην διάρκεια της σβέσης μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρη σκλήρυνση των υδραυλικών ενώσεων. Αντίθετα ημιτελής σβέση παράγει ελεύθερο CaO στην μάζα της κονίας, το οποίο δρα ανασταλτικά στην μετέπειτα συμπεριφορά του κονιάματος. Η μέθοδος της σβέσης που ενδείκνυται είναι η ξηρή μέθοδος παρέχοντας το απαραίτητο νερό για την σβέση του CaO. Η αντίδραση που εκφράζει την σβέση υδραυλικής άσβεστου και η οποία οδηγεί σε πήξη και σκλήρυνση του μίγματος χωρίς να έχει προχωρήσει η ενανθράκωση, εκφράζεται σε δυο στάδια:

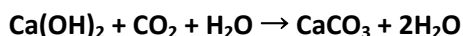
Κατά την διάρκεια της ξηρής έσβεσης, το CaO μετατρέπεται σε Ca(OH)<sub>2</sub>.



Όταν προστεθεί επιπλέον νερό οι αργιλοπυριτικές ενώσεις ενυδατώνονται, παράγοντας ένυδρο πυριτικό ασβέστιο (CSH) και ένυδρο πυριτικό αργίλιο (CAH). Αυτές οι ενώσεις είναι που προκαλούν και την γρήγορη σκλήρυνση του μείγματος κατά την αντίδραση:



**ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ:** Όταν το προϊόν της σβέσης έρθει σε επαφή με το CO<sub>2</sub> της ατμόσφαιρας, τότε το Ca(OH)<sub>2</sub> ενανθρακώνεται και σκληραίνει ενώ τα ενυδατωμένα αργιλοπυριτικά αποσυντίθενται με ιδιαίτερα αργή κινητική, η οποία μπορεί να διαρκέσει χρόνια. Το φαινόμενο εκφράζεται με τις αντιδράσεις:



Σήμερα επιτυγχάνεται παραγωγή τεχνητής υδραυλικής άσβεστου με ανάμιξη αργίλου και ασβεστόλιθου και έψηση στους 1000-1200°C. Η κατάσταση για τις υδραυλικές ασβέστους φυσικές και τεχνητές γίνεται σύμφωνα με την αντοχή σε θλίψη που αποκτούν στις 28 μέρες [8].

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η φυσική υδραυλική άσβεστος ως μέσο σταθεροποίησης του πηλού. Στον μηχανισμό της σταθεροποίησης με φυσική υδραυλική άσβεστο θεωρείται ότι κυρίαρχο ρόλο διαδραματίζουν οι υδραυλικές ενώσεις  $C_2S$  και  $CA$  καθώς και η αερική ένωση  $Ca(OH)_2$ .

Όπως και στην περίπτωση του ασβέστη αρχικά εμφανίζεται ανταλλαγή κατιόντων μεταξύ των μεταλλικών ιόντων που συνδέονται με τις επιφάνειες των σωματιδίων αργίλου και των ιόντων ασβεστίου, η οποία οδηγεί στο σχηματισμό συσσωματωμάτων. Η ανταλλαγή κατιόντων και η συσσωμάτωση συμβαίνουν αμέσως μετά την ανάμιξη προκαλώντας άμεσες αλλαγές στην αντοχή, τον δείκτη πλαστικότητας και την εργασιμότητα. Εν συνεχεία ακολουθούν μια σειρά από άλλες αντιδράσεις η οποίες έχουν διάρκεια στο χρόνο. Η ευυδάτωση των αργιλοπυριτικών ενώσεων  $C_2S$  και  $CA$  οδηγεί στην παράγωγή ένυδρου πυριτικού ασβεστίου  $CSH$  και ένυδρου αργιλικού ασβεστίου  $CAH$ . Οι αντιδράσεις αυτές ευθύνονται κατά κύριο λόγο για την γρήγορη ανάπτυξη αντοχών και την αντίσταση στη διάβρωση από το νερό. Σε ιδανικές συνθήκες υγρασίας περίπου 75% ευνοείται επίσης η διάλυση του  $CO_2$  της ατμόσφαιρας στο νερό που αντιδράει με το περιεχόμενο  $Ca(OH)_2$ . Η συγκεκριμένη αντίδραση ευθύνεται για την περεταίρω σκλήρυνση, η οποία μπορεί να διαρκέσει χρόνια [8].

### 2.3.4 Ιπτάμενη Τέφρα

Η ιπτάμενη τέφρα (Flyash) είναι ένα παραπροϊόν της καύσης άνθρακα στις εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, περιέχει διοξείδιο του πυριτίου, αλουμίνα, και διαφορετικά οξείδια και αλκάλια, η γενική της εμφάνιση είναι ανοικτή έως σκούρα γκρι σκόνη και η κοκκομετρία της προσομοιάζει τις λύες [16].

Τα τελευταία χρόνια που αναπτύσσεται το ενδιαφέρον για την βιώσιμη ανάπτυξη επεκτείνεται η χρήση της ιπτάμενης τέφρας καθώς είναι άμεσα διαθέσιμη, φθηνή και φιλική προς το περιβάλλον. Σε σύγκριση με τον ασβέστη και το τσιμέντο η ιπτάμενη τέφρα έχει μειωμένες συγκολλητικές ιδιότητες. Οι περισσότερες από τις ιπτάμενες τέφρες ανήκουν στα δευτερογενή συνδετικά καθώς δεν μπορούν να παράγουν το επιθυμητό αποτέλεσμα σταθεροποίησης από μόνες τους. Ωστόσο, υπό την παρουσία μίας μικρής ποσότητας ενεργοποιητή (activator), η ιπτάμενη τέφρα μπορεί να αντιδράσει χημικώς προς τον σχηματισμό τσιμεντιτικών προϊόντων.

Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες ιπτάμενης τέφρας C και F. Η ιπτάμενη τέφρα κατηγορίας C παράγεται από την καύση υποασφαλτούχου άνθρακα και έχει υψηλές τσιμεντιτικές ιδιότητες λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε ελεύθερο  $CaO$ . Η ιπτάμενη τέφρα κατηγορίας C από λιγνίτη έχει το υψηλότερο ποσοστό  $CaO$  (πάνω από 30%), με αποτέλεσμα να παρουσιάζει αυτο-τσιμεντιτικά (self-cementing) χαρακτηριστικά. Η ιπτάμενη τέφρα κατηγορίας F παράγεται από την καύση ανθρακίτη και ασφαλτούχου άνθρακα και έχει χαμηλές τσιμεντιτικές ιδιότητες λόγω της περιορισμένης ποσότητας ελεύθερου  $CaO$ , επομένως απαιτείται η προσθήκη ενεργοποιητών [15].

Η προσθήκη ιπτάμενης τέφρας σε ασβέστη και τσιμέντο μπορεί να βελτιώσει τις μηχανικές ιδιότητες εδαφών και πηλών, ωστόσο οι ιδιότητες της ιπτάμενης τέφρας ποικίλουν και εξαρτώνται από τη χημική σύνθεση του άνθρακα και την τεχνολογία καύσης των εγκαταστάσεων παραγωγής [16].

Η μείωση του δυναμικού διόγκωσης επιτυγχάνεται κυρίως λόγω μηχανικής πρόσφυσης και όχι τόσο λόγω της ανταλλαγής ιόντων με τα αργιλικά ορυκτά [15].

Η σταθεροποίηση με ιπτάμενη τέφρα έχει τους ακόλουθους περιορισμούς: πρέπει ο πηλός να έχει μικρή περιεκτικότητα σε υγρασία, η θερμοκρασία ωρίμανσης δεν πρέπει να πλησιάζει το μηδέν και η περιεκτικότητα σε θείο πρέπει να είναι πολύ χαμηλή αποφεύγοντας έτσι τον σχηματισμό διογκωμένων αργιλικών ορυκτών που μειώνουν τη μακροπρόθεσμη αντοχή και διάρκεια [15].

Γενικά για μη συνεκτικά εδάφη με χαμηλή πλαστικότητα η σταθεροποίηση με ιπτάμενη τέφρα και τσιμέντο θεωρείται πιο αποτελεσματική από τον ασβέστη ενώ για τα πλαστικά εδάφη η προσθήκη ιπτάμενης τέφρας με τσιμέντο ή ασβέστη είναι εξίσου αποτελεσματική. Η σταθεροποίηση με ασβέστη και ιπτάμενη τέφρα μειώνει τη μέγιστη ξηρή πυκνότητα του πηλού και η αντίστοιχη βέλτιστη περιεκτικότητα σε νερό τείνει να αυξάνεται. Τα αποτελέσματα πρόσφατων ερευνών καταδεικνύουν ότι η καθυστέρηση μιας ώρας μεταξύ της ανάμειξης και της συμπύκνωσης, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής, για επεξεργασμένα εδάφη με ασβέστη και ιπτάμενη τέφρα [16].

### 2.3.5 Σκωρίες

Σκωρίες ονομάζονται γενικά στη μεταλλουργία τα μη μεταλλικά ορυκτά μέρη που διακρίνονται από τις τέφρες, οι οποίες αποτελούν κατάλοιπα καύσης [19].

Διακρίνονται σε σιδηρούχες (σκωρίες κραμάτων χάλυβα, σκωρίες σιδηροκραμάτων) και μη-σιδηρούχες (σκωρίες χαλκού, αλουμινίου κλπ). Οι σιδηρούχες σκωρίες είναι παραπροϊόντα της μεταλλουργικής βιομηχανίας που προκύπτουν από την τήξη σε κατάλληλο κλίβανο ακατέργαστων υλικών, τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή οικοδομικού χάλυβα. Σύμφωνα με την American Society for Testing Materials (ASTM), η σιδηρούχα σκωρία ορίζεται ως ένα μη μεταλλικό προϊόν που αποτελείται κυρίως από πυριτικές ενώσεις του ασβεστίου ενωμένες με τηγμένα οξείδια σιδήρου, αλουμινίου, μαγγανίου, ασβεστίου και μαγνησίου και παράγεται ταυτόχρονα με τον χάλυβα μέσα σε κλίβανο [20].

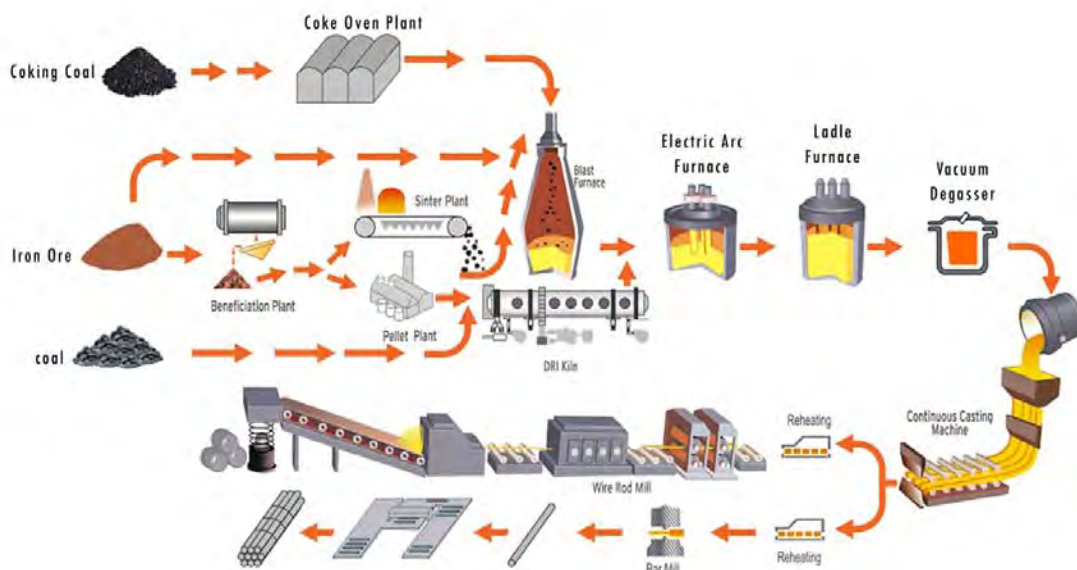
Οι σκωρίες χαλυβουργίας είναι παραπροϊόντα ευρέως γνωστά στην κατασκευαστική βιομηχανία, τα περισσότερα από τα οποία έχουν εισαχθεί επιτυχώς στην παραγωγή σκυροδέματος είτε ως αδρανή είτε ως κονίες [21].

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των βιομηχανικών παραπροϊόντων και ειδικότερα των σκωριών χαλυβουργίας είναι ότι η χημική τους σύσταση, η δομή και οι ιδιότητές τους παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία, που καθορίζει τη μετέπειτα χρήση τους σε άλλους βιομηχανικούς τομείς. Η ποικιλία της σκωρίας εξαρτάται από το αν αυτή είναι σιδηρούχα ή μη-σιδηρούχα, από την πρώτη ύλη, τη διαδικασία παραγωγής της και την τελική της επεξεργασία. Έτσι τελικά, μπορούν να προκύψουν είτε προϊόντα χαμηλού κόστους για εφαρμογές χαμηλών απαιτήσεων είτε προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας που προσδίδουν βελτιωμένες ιδιότητες στο τελικό προϊόν [21].

Η ποσότητα που παράγεται στα χαλυβουργεία, ως παραπροϊόν της παραγωγικής διαδικασίας, αποτελεί ποσοστό περίπου 13%-18% επί της συνολικής ποσότητας τροφοδοσίας του κλιβάνου με αποτέλεσμα οι μεταλλουργικές σκωρίες να είναι ένα από τα μεγαλύτερα σε ποσότητα βιομηχανικά παραπροϊόντα [19].

Από τις αρχές του 20ου αιώνα, κυρίως λόγω της αφθονίας του υλικού σε απόθεση και της μηδενικής αξίας για τους παραγωγούς χάλυβα, η εκμετάλλευση των σκωριών από υψικάμινους έγινε αντικείμενο πολλών ερευνών. Σύντομα άρχισε να γίνεται κατανοητό ότι το παραπροϊόν αυτό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στις κατασκευές και να μην είναι ένα υλικό προς απόρριψη. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε σε ευρεία κλίμακα για την κατασκευή υδραυλικών έργων, κυρίως φραγμάτων και στη συνέχεια ως δομικό υλικό. Από το 1960 έως και σήμερα γίνεται συστηματική επεξεργασία και η χρήση σκωριών λαμβάνει συνεχώς μεγαλύτερη έκταση με συνέπεια να θεωρείται ένα πολύτιμο υλικό ειδικότερα στην οδοποιία, ως αδρανές ασφαλτομειγμάτων και στη βιομηχανία τσιμέντου, για τη δημιουργία κονιαμάτων, αντικαθιστώντας σε ένα ποσοστό το τσιμέντο [19].

Σήμερα αξιοποιείται το 90% της παραγόμενης ποσότητας σκωριών. Όμως παραμένει ένα 10% που αποτίθεται στο περιβάλλον. Στόχος είναι η ανακύκλωση όλων των παραπροϊόντων που προκύπτουν από την παραγωγική δραστηριότητα του χάλυβα ώστε να επιτυγχάνεται η εξοικονόμηση των φυσικών αδρανών και η διατήρηση του φυσικού κεφαλαίου. Επίσης η χρήση των σκωριών αποτρέπει τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις της χερσαίας απόθεσης όπως είναι η κατάληψη των εκτάσεων της γης και ο αποκλεισμός τους από άλλες χρήσεις, η δημιουργία σκόνης, η αισθητική ρύπανση και η ρύπανση υπόγειων και επιφανειακών υδάτων [20].



**Σχήμα 2.5 Τα στάδια παραγωγής χάλυβα με τη μέθοδο κλίβανου ηλεκτρικού τόξου (electric arc furnace).**

Οι πιο διαδεδομένες παραγωγικές διαδικασίες που εφαρμόζονται στη βιομηχανία χάλυβα περιλαμβάνουν στην πρώτη φάση την υψικάμινο (blast furnace), τον κλίβανο βασικού οξυγόνου (basic oxygen furnace) και τον κλίβανο ηλεκτρικού τόξου (electric arc furnace) ή (ηλεκτροκάμινο) και τη δευτερεύουσα μεταλλουργική διαδικασία. Η μέθοδος της ηλεκτροκαμίνου χρησιμοποιείται στην Ελλάδα, κυρίως για την παραγωγή χάλυβα [22].

Σε όλα τα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας στους κλιβάνους ηλεκτρικού τόξου παράγονται παραπροϊόντα. Ο μεγάλος αριθμός των παραπροϊόντων προκύπτει λόγω της ποικιλίας της πρώτης ύλης, του παλαιοσίδηρου (scrap), ως προς την ποιότητα, τα μεγέθη και τις ανεπιθύμητες προσμίξεις. Τα παραπροϊόντα διαφέρουν σημαντικά ως προς τη χημική σύσταση και ως προς τις φυσικές ιδιότητες και για το λόγο αυτό η περαιτέρω επεξεργασία και οι τελικές χρήσεις τους ποικίλουν. Οι σκωρίες που προκύπτουν είναι οι εξής: η σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου (electric arc furnace slag), η σιδηρούχα σκωρία ελάστρων (mill scale) και η σκωρία κάδων (ladle furnace slag) [22].

Τα παραπροϊόντα των ηλεκτροκαμίνων, των κλιβάνων βασικού οξυγόνου και των υψικαμίνων απαιτούν περαιτέρω επεξεργασία πριν την διάθεση. Κατά τη δευτερεύουσα μεταλλουργία τα προϊόντα της χύτευσης επεξεργάζονται με οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις (αποθείωση, αποφωσφόριση) στους κλιβάνους κάδων. Αυτό επιτρέπει στην πρωτογενή επεξεργασία να επικεντρώνεται στην τήξη του παλαιοσιδήρου και την απομάκρυνση των λοιπών προσμίξεων. Η θερμοκρασία και οι χημικές αντιδράσεις στους κλιβάνους κάδων είναι σαφώς πιο ελεγχόμενες [22].

Μετά τη συλλογή των σκωριών από κάθε στάδιο της παραγωγής χάλυβα, ακολουθεί η ψύξη τους. Βάσει του τρόπου ψύξης οι σκωρίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε:

1. αερόψυκτες (air-cooled slag), εφόσον η ψύξη γίνεται αργά στον ατμοσφαιρικό αέρα, με αποτέλεσμα την δημιουργία κρυσταλλικής σκωρίας η οποία μπορεί να συνθλίβεται και να χρησιμοποιείται ως αδρανές υλικό (aggregate).

2. διογκωμένες ή αφρισμένες (expanded slag), αν η επιφανειακή ψύξη γίνει με καταιονισμό νερού του τήγματος, αλλά η στερεοποίησή της σε ατμοσφαιρικό αέρα.

3. συσφαιρωμένες (granulated ή pelletised slag), μέσω συνδυασμού απότομης ψύξης με νερό και ατμοσφαιρικό αέρα, που οδηγεί σε σχηματισμό σβολοποιημένης, υαλώδους σκωρίας.

4. κοκκοποιημένες, με απότομη ψύξη της ρευστής σκωρίας και υαλοποίηση της.

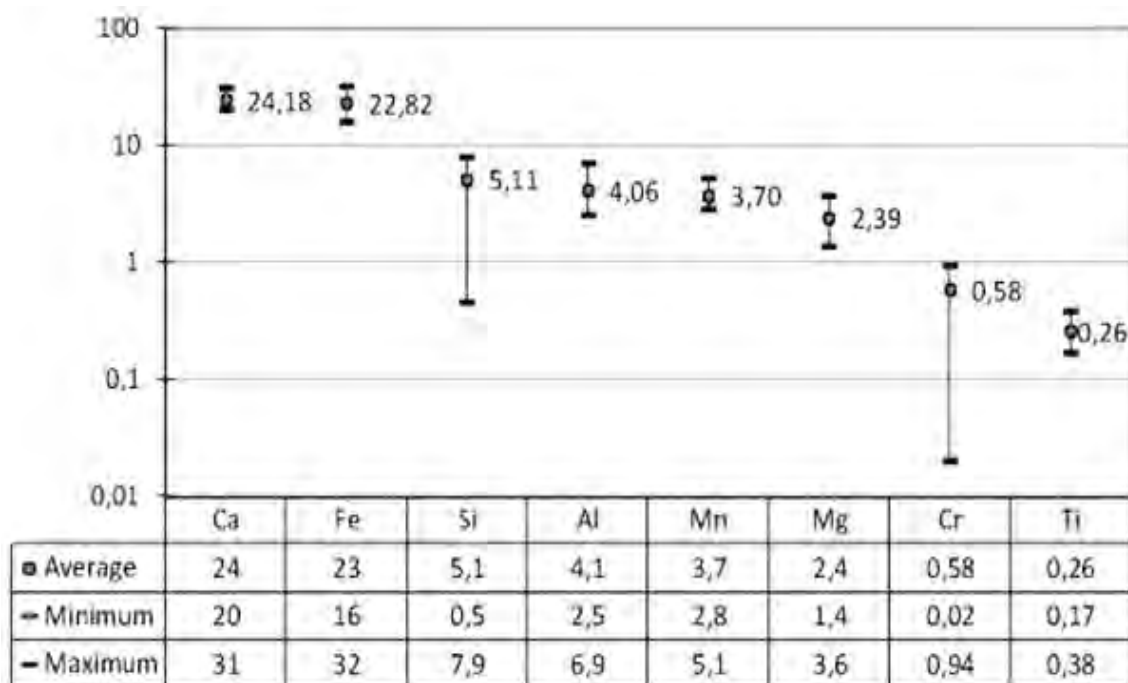
Ο μεγάλος χρόνος ψύξης (περιπτώσεις 1 και 3) αυξάνει την κρυσταλλικότητα και συνεπώς τη χρήση της προκύπτουσας σκωρίας ως αδρανούς. Η μείωσή του, από την άλλη, προκαλεί υαλοποίηση με συνακόλουθη αύξηση των υδραυλικών ιδιοτήτων. Η υδραυλικότητα είναι συνάρτηση της περιεκτικότητας υαλώδων φάσεων, του μεγέθους κόκκων, της χημικής σύστασης και της καθαρότητας του μείγματος. Εξαρτάται επίσης από εξωτερικούς παράγοντες, όπως θερμοκρασία και υγρασία.

Η μείωση του βαθμού κρυστάλλωσης αυξάνει, μεταξύ άλλων, τις συγκεντρώσεις ελεύθερων CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO. Η κατάλληλη, κατά περίπτωση, τροποποίηση των σκωριών είναι σε θέση να αυξήσει την ποζολανική τους δράση [22].

### Σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου

Η σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου είναι το βασικότερο παραπροϊόν της μεταλλουργικής βιομηχανίας. Η σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου είναι ένα βιομηχανικά ληφθέν, τεχνητό πέτρωμα, του οποίου η χημική σύνθεση, η ορυκτολογική σύσταση και οι μηχανικές ιδιότητες είναι ανάλογες των μαγματικών πετρωμάτων (βασάλτης, γρανίτης).

Προκύπτει από την τήξη σε ηλεκτρικό κλίβανο (Electric Arc Furnace) παλαιοσίδηρου (scrap), ο οποίος αποτελεί την πρώτη ύλη για την παραγωγή οικοδομικού χάλυβα [22].

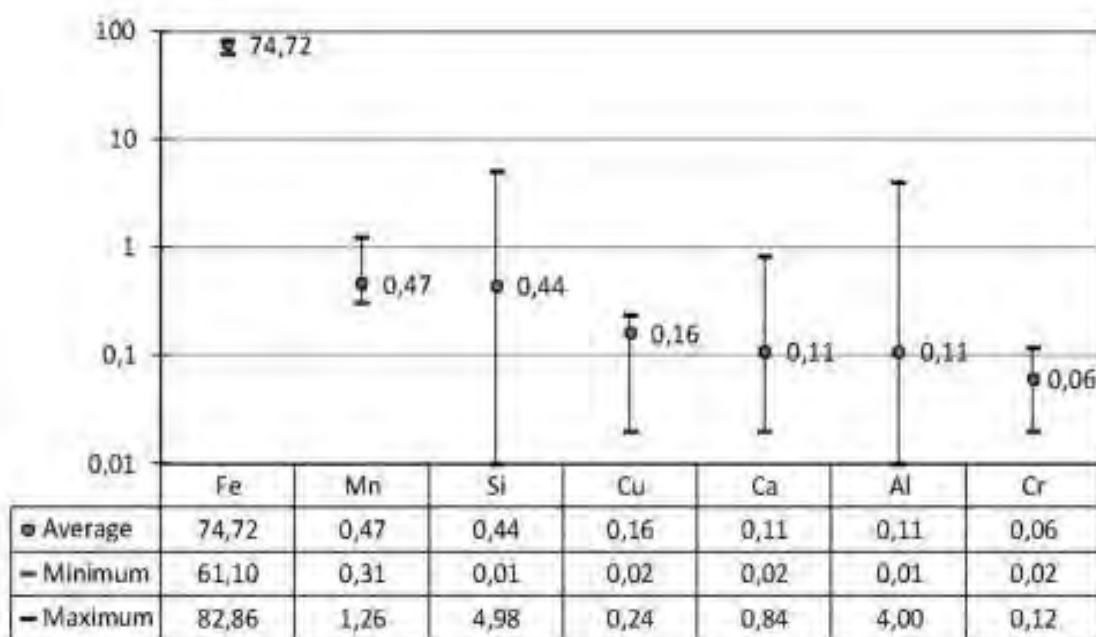


Σχήμα 2.6 Στοιχειακή χημική ανάλυση Σκωρίας Ηλεκτρικού Κλιβάνου [22].

### Σιδηρούχα σκωρία κλιβάνου και ελάστρων

Η σιδηρούχα σκωρία (mill scale) αποτελεί το παραπροϊόν καύσης του σιδήρου. Προκύπτει από δύο φάσεις της παραγωγικής διαδικασίας με παρόμοια χημική σύσταση. Σε πρώτη φάση εντοπίζεται εντός του ηλεκτρικού κλιβάνου μετά το πέρας της διαδικασίας χύτευσης και την έξοδο του μετάλλου από τον κλίβανο, η σιδηρούχα σκωρία κλιβάνου εμφανίζεται ως απολείψματα οξειδωμένου σιδήρου στα πλαϊνά τοιχώματα και τον πυθμένα από όπου και εξάγεται. Σε δεύτερη φάση, αντίστοιχο παραπροϊόν παρόμοιας χημικής σύστασης και φυσικών ιδιοτήτων παράγεται κατά την εν θερμώ έλαση του σιδήρου με τη μορφή των αποξεσμάτων.

Η σιδηρούχα σκωρία που παράγεται από τις δύο φάσεις αποτελείται σε ποσοστό συγκέντρωσης πλέον του 90% σε οξείδια του σιδήρου με τις συγκεντρώσεις των οξειδίων ασβεστίου, πυριτίου και αργιλίου να μην ξεπερνούν σε σύνολο το 10% [22].



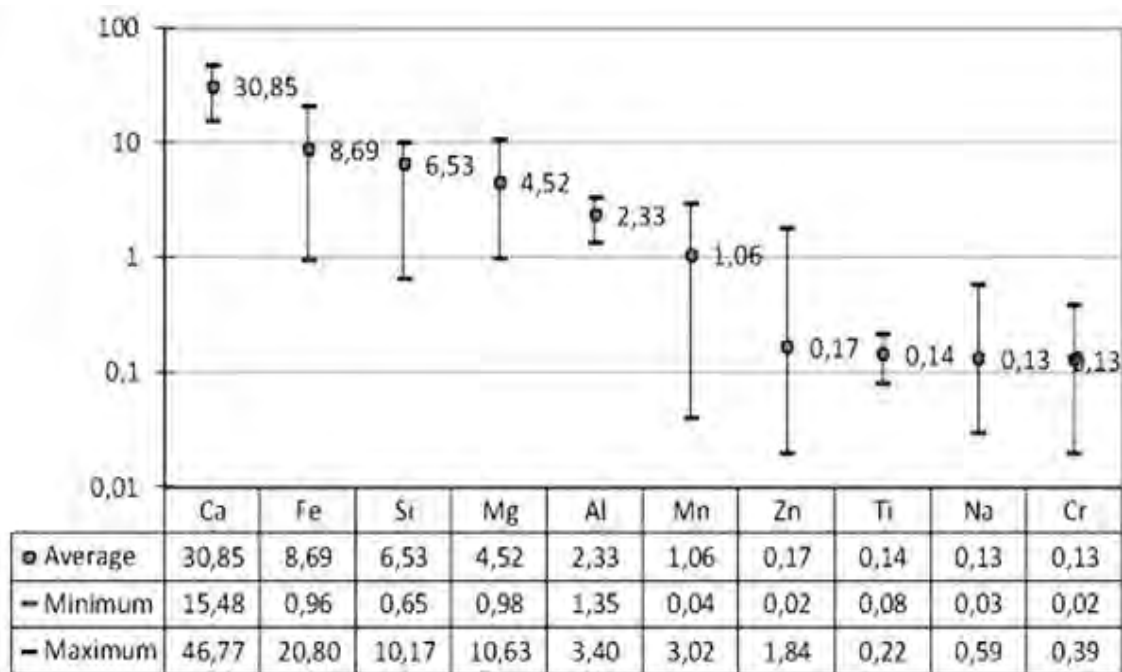
Σχήμα 2.7 Στοιχειακή ανάλυση σιδηρούχας σκωρίας [22].

### Σκωρία κάδων

Η σκωρία κάδων (ladle slag) παράγεται κατά τη δευτερογενή επεξεργασία του χάλυβα. Μετά την έξοδο του μετάλλου από τον ηλεκτροκλίβανο, ακολουθεί η δευτερεύουσα επεξεργασία του, σε ρευστή μορφή, στους κάδους χύτευσης. Για τη μείωση των συγκεντρώσεων θείου και φωσφόρου προς την επίτευξη της επιθυμητής χημικής σύστασης του χάλυβα, προστίθενται συλλιπάσματα αποτελούμενα από άσβεστο CaO και δολομιτική άσβεστο (CaO.MgO) που οξειδώνονται πλήρως εντός του κάδου. Το παραπροϊόν της διαδικασίας αυτής είναι η σκωρία κάδων, του οποίου η χημική σύσταση αποτελείται κυρίως από οξείδιο του ασβεστίου [22].

Σε κάθε τόνο μπιγέτας (τελικού προϊόντος χάλυβα) παράγονται περί τους 0,025 t σκωρίας κάδων ως συμπαράγωγο, δηλαδή περίπου 2,5% κατά βάρος παραγόμενης τελικής ποσότητας χάλυβα. Η συνολική ετήσια ποσότητα σκωρίας κάδων στα ελληνικά χαλυβουργία ανέρχεται στους 50.000 t περίπου.

Η σκωρία κάδων παράγεται σε λεπτόκοκκη μορφή, είναι εύθρυπτη, έχει ειδικό βάρος μικρότερο του ασβεστόλιθου ( $2,45\text{g/cm}^3$ ), περιέχει σημαντική ποσότητα ελεύθερου οξειδίου του ασβεστίου και μαγνησίου. Υψηλή είναι επίσης η περιεκτικότητα της σκωρίας κάδων σε διοξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ), που της προσδίδει ασθενείς ποζολανικές και υδραυλικές ιδιότητες [22].



Σχήμα 2.8 Στοιχειακή χημική ανάλυση σκωρίας κάδων [22].

Η σκωρία κάδων χρησιμοποιείται ως:

1. υδραυλικό υλικό στη σταθεροποίηση εδαφών
2. υποκατάστατο του τσιμέντου σε μη δομικές εφαρμογές
3. πληρωτικό αδρανές (παίπαλη) σε εφαρμογές εκτοξευόμενου σκυροδέματος
4. λεπτόκοκκο αδρανές σε κοκκομετρική διαβάθμιση με μέγιστο μέγεθος κόκκου 2 mm σε εφαρμογές επιχρισμάτων
5. λεπτόκοκκο αδρανές κλάσμα (μικρότερο των 5 mm) σε μείγμα αδρανών για στρώσεις έδρασης οδοστρωμάτων από ασύνδετα αδρανή υλικά

Πέραν των δομικών εφαρμογών του δύναται να αξιοποιηθεί εντός του κλιβάνου του χαλυβουργείου προς μεταβολή του ιξώδους της σκωρίας. Η προσθήκη σκωρίας κάδων υψηλής βασικότητας, πέραν της προστασίας ηλεκτροδίων και πυρίμαχων τοιχωμάτων στον ηλεκτροκλίβανο και την αποφυγή θερμοκρασιακών απωλειών, βοηθά καταλυτικά στην αποθείωση και αποφωσφόριση του μετάλλου. Επίσης σε συνδυασμό με παρεμβάσεις στη διαδικασία παραγωγής, μειώνεται ο χρόνος από χύτευση σε χύτευση κατά πέντε ως δέκα λεπτά, η κατανάλωση ενέργειας κατά 35-50 kWh και οι απαιτήσεις σε άσβεστο κατά 10,50 kg ανά τόνο παραγόμενου χάλυβα. Οι υψηλές συγκεντρώσεις CaO δίνουν τη δυνατότητα χρησιμοποίησης της πρώτης ύλης στην παραγωγική διαδικασία του τσιμέντου, σε αντικατάσταση του ασβεστόλιθου. Η εφαρμογή αυτή επιτυγχάνει σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας για τη μετατροπή του  $\text{CaCO}_3$  σε  $\text{CaO}$ , όπως και μείωση εκπομπών  $\text{CO}_2$  στις τσιμεντοβιομηχανίες [22].



### 2.3.6 Ποζολάνες

Οι ποζολάνες είναι πυριτικά και αργιλικά υλικά, τα οποία από μόνα τους διαθέτουν ελάχιστη ή καμία χημική δραστικότητα, αλλά, σε λεπτοδιαμερισμένη μορφή και με την παρουσία υγρασίας, αντιδρούν χημικά με υδροξείδιο του ασβεστίου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για να σχηματίσουν ενώσεις που διαθέτουν τσιμεντιτικές ιδιότητες [15].

Η ονομασία ποζολάνη προέρχεται από ένα από τα κύρια κοιτάσματα της ηφαιστειακής τέφρας που χρησιμοποιείται από τους Ρωμαίους στην Ιταλία, το Pozzuoli. Σήμερα ο ορισμός της ποζολάνης περιλαμβάνει κάθε ηφαιστειακό υλικό (ελαφρόπετρα ή ηφαιστειακή τέφρα) καθώς και τεχνητά υλικά με ποζολανικές ιδιότητες, έτσι υπάρχει και μία διάκριση ανάμεσα στις φυσικές ποζολάνες και στις τεχνητές ποζολάνες. Αργιλικά ορυκτά, όπως ο καολινίτης, ο μοντμοριλλονίτης, οι μαρμαρυγίες και ο ιλλίτης είναι ποζολανικά στη φύση.

Η **φυσική ποζολάνη** είναι βιομηχανικό ορυκτό ηφαιστειακής προέλευσης και περιέχει υψηλό ποσοστό ενεργού διοξειδίου του πυριτίου αλλά και οξείδιο του αργιλίου. Μεγάλη ποικιλία ορυκτών έχουν ποζολανικές ιδιότητες και μπορούν να χαρακτηριστούν φυσικές ποζολάνες. Στις φυσικές ποζολάνες περιλαμβάνονται διάφορες ηφαιστειακές γαίες, οι φυσικές ποζολάνες βρίσκονται αυτούσιες στο περιβάλλον και είναι κυρίως ηφαιστιογενείς, όπως η ελληνική θηραϊκή γη, η ιταλική rozzolana, η γερμανική trass κ.ά. [23].

Η φυσική ποζολάνη είναι ένα από τα βασικά συστατικά των ιστορικών κονιαμάτων μαζί με την άσβεστο και το κεραμάλευρο. Χρησιμοποιήθηκε σε μνημεία της αρχαίας Ελλάδας, στο Πάνθεον της Ρώμης, σε Βυζαντινά μνημεία, αλλά και σε νεοκλασικά κτίρια του 19ου αιώνα τα οποία έδειξαν αξιοσημείωτη αντοχή στη φθορά από το χρόνο και τους σεισμούς και διατηρήθηκαν από το πέρασμα των αιώνων μέχρι σήμερα.

Σήμερα, η φυσική ποζολάνη χρησιμοποιείται στον ελληνικό χώρο για την αποκατάσταση σημαντικών κατασκευών του παρελθόντος όπως είναι ο Αρχαιολογικός χώρος της Νικόπολης, η Εθνική Βιβλιοθήκη Αθηνών, πολλές μονές του Αγίου Όρους, το μουσείο Μπενάκη, η παλαιά πόλη της Ρόδου, η παλαιά πόλη του Ρεθύμνου, οι παλαιές φυλακές της Αίγινας, το αρχαίο θέατρο της Δωδώνης, το Παναθηναϊκό Στάδιο κ.α. Επίσης, χρησιμοποιείται στον εξωτερικό και εσωτερικό διάκοσμο σύγχρονων κατασκευών, αλλά και ως υλικό τοιχοποιίας παρέχοντας στις κατασκευές ανθεκτικότητα στο χρόνο και ένα αισθητικό αποτέλεσμα ιδιαίτερα αρμονικό με το φυσικό περιβάλλον [24].

Ποζολάνες όπως η θηραϊκή γη χρησιμοποιήθηκαν στην Ανατολική Μεσόγειο από το 500-400 π.Χ.. Παρά το γεγονός ότι για πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκε από τους αρχαίους Έλληνες, ήταν οι Ρωμαίοι που τελικά ανέπτυξαν πλήρως το δυναμικό των παστών ασβέστη με ποζολάνη ως συνδετικό στο ρωμαϊκό σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται για τα κτίρια και υποβρύχιες κατασκευές. Ο Βιτρούβιος μιλάει για τέσσερις τύπους ποζολάνης: μαύρο, λευκό, γκρι, κόκκινο, οι οποίες μπορούν να βρεθούν στις ηφαιστειακές περιοχές της Ιταλίας, γύρω από τη Νάπολη. Οι τυπικές αναλογίες ήταν δύο-προς-ένα με ασβέστη ακριβώς πριν την ανάμιξη με το νερό.

Ένα ενδεικτικό παράδειγμα της αντοχής των συγκεκριμένων κονιαμάτων είναι το ρωμαϊκό λιμάνι στο Cosa στην περιοχή της Τοσκάνης του οποίου οι τρεις προβλήτες είναι ακόμα ορατές σήμερα, με τα υποβρύχια τμήματα σε γενικά καλή κατάσταση, ακόμη και μετά από 2100 χρόνια.

Η καταλληλότητα μιας φυσικής ποζολάνης για χρήση της στην παρασκευή παραδοσιακών κονιαμάτων αξιολογείται από τα αποτελέσματα μιας σειράς δοκιμών που πρέπει κάθε φορά να εκτελούνται. Οι δοκιμές αυτές περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων προσδιορισμό της ορυκτολογικής σύστασης της ποζολάνης με έμφαση στην περιεκτικότητα του άμορφου υλικού, κοκκομετρικές αναλύσεις, μετρήσεις ειδικού βάρους και ειδικής επιφάνειας, την περιεκτικότητα σε υδατοδιαλυτά αλκάλια, καθώς και δοκιμές ποζολανικότητας. Αυτή αποτελεί θεμελιώδη παράμετρο για την αξιολόγηση ενός υλικού για χρήση στην Παρασκευή κονιαμάτων [24].

**Τεχνητές ποζολάνες** είναι τα προϊόντα που παράγονται με θερμική κατεργασία (770-900°C) των φυσικών υλικών που περιέχουν ποζολάνες όπως άργιλοι, σχιστόλιθοι και ορισμένοι πυριτικοί βράχοι. Στις τεχνητές ποζολάνες υπάγονται οι σκωρίες υψικαμίνων και οι ιπτάμενες τέφρες εφόσον έχουν ποζολανικές ή/και υδραυλικές ιδιότητες\* [24].

Ορισμένα φυτά λαμβάνουν από τα εδάφη διοξείδιο του πυριτίου ως θρεπτικό συστατικό και όταν καίγονται το διοξείδιο του πυριτίου παραμένει στις στάχτες τους συμβάλλοντας ως ποζολανικό στοιχείο. Η τέφρα από φλοιό ρυζιού ή άχυρο ρυζιού καθώς και τα υπολείμματα ζαχαροκάλαμου είναι πλούσια σε πυρίτια και συνιστούν επίσης εξαιρετικές τεχνητές ποζολάνες [15].

Στις τεχνητές ποζολάνες υπάγονται επίσης το κεραμάλευρο (ceramic powder) και ο μετακαολίνης (metakaolin).

\*Υδραυλική ιδιότητα είναι η ικανότητα που έχει ένα υλικό όταν σε λεπτόκοκκο διαμερισμό, μετά από ανάμιξη με νερό, πήζει και σκληρύνεται στον αέρα και μέσα σε νερό.

### 2.3.7 Μη παραδοσιακοί σταθεροποιητές

Τα μη παραδοσιακά υλικά σταθεροποίησης αποτελούνται από μια ποικιλία χημικών προϊόντων με διαφορετική σύνθεσή και σχετικά λίγα είναι γνωστά για τους μηχανισμούς σταθεροποίησης τους και την αλληλεπίδραση τους με γεωτεχνικά υλικά. Επίσης οι όποιες μελέτες, αφορούν κυρίως την σταθεροποίηση εδαφών και δεν υπάρχουν αρκετές μελέτες ακόμα για οικοδομικά υλικά, κονιάματα κλπ. Έτσι έχουν γίνει κάποιες προσπάθειες κατηγοριοποίησης με βάση τα πρωτογενή χημικά συστατικά τους και τις προτεινόμενες ιδιότητες ενίσχυσης.

Τα περισσότερα μη παραδοσιακά πρόσθετα μπορούν να ομαδοποιηθούν σε επτά κατηγορίες: ιοντικά, ένζυμα, λιγνοσουλφονικά, άλατα, ρητίνες πετρελαίου, πολυμερή και ρητίνες δέντρων. Πολλά από τα προϊόντα αυτά περιλαμβάνουν και δευτερεύοντα πρόσθετα όπως τασιενεργά, καταλύτες, και αναστολείς υπεριώδους ακτινοβολίας [25].

## **Ιοντικοί Σταθεροποιητές**

Οι Ιοντικοί σταθεροποιητές όπως τα οξέα και τα αλκαλικά πρόσθετα έχουν αποκτήσει ιδιαίτερη προσοχή λόγω των μικρών ποσοτήτων που χρειάζονται για να προσφέρουν αποτελεσματική σταθεροποίηση σε εδάφη.

Οι ηλεκτρολύτες ή οι ιοντικοί σταθεροποιητές μεταβάλλουν τη συγκέντρωση ηλεκτρολύτη στο υγρό των πόρων, με αποτέλεσμα την ανταλλαγή κατιόντων που οδηγεί στην συσσωμάτωση των αργιλικών ορυκτών. Κατά την προσρόφηση των ιόντων από τα σωματίδια του εδάφους ακολουθούν ιοντικές αντιδράσεις με τα συστατικά του εδάφους, και η ανταλλαγή ιόντων μεταβάλλει την μοριακή δομή του εδάφους. Αυτές οι αντιδράσεις μειώνουν το επιφανειακό φορτίο των σωματιδίων του εδάφους, με αποτέλεσμα την απώλεια της διπλής στιβάδας του νερού επιτρέποντας την στενή στοίβαξη ή ακόμα και την συσσωμάτωση των σωματιδίων του εδάφους.

Ο μηχανισμός αυτός θα ήταν ιδιαίτερα σημαντικός για τα μικρότερα αργιλικά ορυκτά, όπως οι μοντοριλλονίτες, όπου το διπλό στρώμα νερού είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το μέγεθος των φύλλων των σωματιδίων μοντοριλλονίτη. Το υλικό που προκύπτει θα παρουσιάζει μειωμένη πλαστικότητα, μειωμένο δυναμικό διόγκωσης, και μείωση στο μέγεθος των σωματιδίων. Τα αποτελέσματα όμως στη μοριακή δομή λόγω των αλλαγών στο υγρό των πόρων από αλκαλικό σε όξινο ή αντίστροφα συνήθως εμφανίζονται σε μεγάλες χρονικές περιόδους.

Ο προτεινόμενος μηχανισμός για τους ιοντικούς σταθεροποιητές υποδηλώνει ότι τα πρόσθετα αυτά είναι κατάλληλα μόνο για λεπτόκοκκα εδάφη, ιλύες και άργιλοι, όπου τα ηλεκτρικά φορτία των σωματιδίων και του υγρού των πόρων επηρεάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά του εδάφους. Έτσι οι ιοντικοί σταθεροποιητές θα πρέπει να είναι πιο αποτελεσματικοί όταν το μέγεθος των σωματιδίων μειώνεται λόγω της σημασίας του διπλού στρώματος νερού μεταξύ των σωματιδίων, ενώ λόγω της κυμαινόμενης χημικής σύνθεσης, συγκεκριμένες αντιδράσεις μπορεί να εμφανιστούν σε ένα συνδυασμό εδάφους-προϊόντος καθιστώντας μόνο ορισμένα εδάφη να ανταποκρίνονται καλά στους ιοντικούς σταθεροποιητές [25].

## **Σταθεροποιητές ενζύμων**

Τα ένζυμα είναι οργανικά μόρια που καταλύουν πολύ ειδικές χημικές αντιδράσεις εάν οι συνθήκες ευνοούν την αντίδραση. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε χαμηλές συγκεντρώσεις, καθώς δεν καταναλώνονται από τις αντιδράσεις που διευκολύνουν. Τα ένζυμα εκμεταλλεύονται το υγρό των πόρων για να διαχυθούν σε θέσεις αντίδρασης. Η ειδική χημεία του εδάφους παρέχει το χώρο της αντιδράσεως και έπειτα μένει ο χρόνος για να διαχυθεί το ένζυμο στην θέση αντίδρασης.

Θεωρητικά, ένα ένζυμο παραμένει ενεργό μέχρις ότου δεν υπάρχουν πλέον αντιδράσεις για κατάλυση και γι' αυτό η σταθεροποίηση με ένζυμα μπορεί να είναι αποτελεσματική για μικρές δοσολογίες. Γενικότερα τα ένζυμα καταλύουν πολύ ειδικές χημικές αντιδράσεις και ως τέτοια είναι δύσκολο να διακρίνει κανείς ένα γενικό μηχανισμό σταθεροποίησης.

Τα πρόσθετα ενζύμου συνήθως συνάπτουν δεσμούς με μεγάλα οργανικά μόρια τα οποία έλκονται από το καθαρό αρνητικό φορτίο στην επιφάνεια του αργιλικού ορυκτού. Έπειτα τα μεγάλα οργανικά μόρια θα περιβάλλουν τα αργιλικά ορυκτά, εξουδετερώνοντας το αρνητικό φορτίο μειώνοντας έτσι την τάση του πηλού να απορροφά υγρασία.

Ο προτεινόμενος μηχανισμός υποδεικνύει ότι τα ένζυμα είναι κατάλληλα για χρήση σε αργιλικά υλικά που έχουν μια έλξη (affinity) για το νερό, ιδιαίτερα αργίλους υψηλής πλαστικότητας με κάποιο οργανικό περιεχόμενο. Υλικά όπως ιλύες και κοκκώδη εδάφη που δεν έχουν σημαντική έλξη για το νερό είναι ακατάλληλα για τη σταθεροποίηση με ένζυμα. Επίσης ο προτεινόμενος μηχανισμός υποδηλώνει ότι η ενεργοποίηση των ενζύμων εξαρτάται καθοριστικά από τις συνθήκες του περιβάλλοντος και μπορεί να χρειαστεί σημαντικός χρόνος για να συμβεί [25].

### **Λιγνοσουλφονικοί Σταθεροποιητές**

Τα Λιγνοσουλφονικά προϊόντα σταθεροποίησης καθώς και τα λιγνοσουλφονικά νατρίου, ασβεστίου και αμμωνίου προέρχονται από την λιγνίνη που δεσμεύει ίνες κυτταρίνης.

Λόγω των μεταβολών στο ξύλο και στις φυτικές πρώτες ύλες, η ακριβής χημική σύνθεση των λιγνοσουλφονικών ποικίλλει. Τα Λιγνοσουλφονικά μπορούν να επικαλύψουν μεμονωμένα σωματίδια του εδάφους με ένα λεπτό συγκολλητικό (όπως η μεμβράνη που συνδέει τα σωματίδια).

Τα Λιγνοσουλφονικά άλατα είναι κυρίως τσιμεντιτικοί παράγοντες με μικρές χημικές επιδράσεις ανάλογα με τη σύνθεσή τους. Η συγκολλητική επίδραση σταθεροποιεί το έδαφος με τον φυσικό δεσμό των σωματιδίων .

Ωστόσο, καθώς αυτά τα προϊόντα είναι επίσης ιοντικά, έχουν την επιπλέον ικανότητα για ιοντική ανταλλαγή και αντιδράσεις με ορισμένα εδάφη. Τα περισσότερα εμπορικά διαθέσιμα λιγνοσουλφονικά είναι υδατοδιαλυτά και συνεπώς ευπαθή σε έκπλυση υπό υγρές συνθήκες.

Τα αποτελέσματα υποστηρίζουν ως προτεινόμενο μηχανισμό σταθεροποίησης την φυσική σύνδεση ή τσιμεντοποίηση με φυσικά πολυμερή. Έτσι, η δυνατότητα βελτίωσης στην αντοχή και η μείωση στη συρρίκνωση - διόγκωση, είναι μία συνάρτηση, της ικανότητας των λιγνοσουλφονικών να επικαλύπτουν τα αργιλικά σωματίδια επαρκώς και της αντοχής του συνδετικού παράγοντα. Τα λιγνοσουλφονικά άλατα χρησιμοποιούνται περιστασιακά για αποκροκίδωση αργίλων σε εναιωρήματα λόγω του αρνητικού επιφανειακού τους φορτίου, αυτή τους η ιδιότητα θα μπορούσε να οδηγήσει σε κακή απόδοση στην σταθεροποίηση αργίλων [25].

### **Άλατα**

Η σταθεροποίηση από άλατα γίνεται κυρίως από ενώσεις ασβεστίου και χλωριούχου μαγνησίου ( $\text{CaCl}_2$  και  $\text{MgCl}_2$ ). Τα Άλατα αυτά είναι υγροσκοπικά, προσελκύουν υγρασία από το γύρω περιβάλλον διατηρώντας το χώμα σε υγρή κατάσταση. Η εισαγωγή των δισθενών κατιόντων δημιουργεί τη δυνατότητα για ανταλλαγή κατιόντων μεταξύ των δισθενών κατιόντων του άλατος και των μονοθενών κατιόντων του εδάφους. Η ανταλλαγή κατιόντων μπορεί να βελτιώσει το έδαφος σταθεροποιώντας τα σωματίδια του εδάφους μειώνοντας παράλληλα τα διπλά στρώματα νερού [25].

Η ανταλλαγή κατιόντων μειώνει την απόσταση μεταξύ των σωματιδίων και αυξάνει την συσσωμάτωση. Επιπλέον η ανακρυστάλλωση των αλάτων στους χώρους των πόρων δημιουργεί αδύναμους φυσικούς δεσμούς μεταξύ των σωματιδίων του εδάφους και αυξάνει την πυκνότητα.

Τα άλατα μπορούν επίσης να οδηγήσουν σε αύξηση της επιφανειακής τάσης του νερού στους πόρους, στην αύξηση της φαινόμενης συνοχής του εδάφους και στην βελτίωση της αντοχής. Δυστυχώς, τα άλατα είναι πολύ διαβρωτικά για τα μέταλλα και είναι επιρρεπή σε έκπλυση, επειδή είναι υδατοδιαλυτά.

Από τους μηχανισμούς σταθεροποίησης προκύπτει ότι τα άλατα μπορεί να είναι κατάλληλα τόσο για κοκκώδη όσο και για λεπτόκοκκα εδάφη.

Σε κοκκώδη εδάφη, τα υγροσκοπικά χαρακτηριστικά των αλάτων μπορούν να βοηθήσουν στη συμπίκνωση και η ανακρυστάλλωση στον σχηματισμό αδύναμων φυσικών δεσμών μεταξύ των σωματιδίων του εδάφους.

Για λεπτόκοκκα εδάφη ιδιαίτερα αργίλους, οι υγροσκοπικές ιδιότητες των αλάτων μπορεί να βελτιώσουν τη συνοχή του εδάφους εμποδίζοντας την ξήρανση ενώ η ανταλλαγή κατιόντων σε αργιλώδη εδάφη μπορεί να οδηγήσει σε μόνιμες επιδράσεις σταθεροποίησης. Οι μηχανισμοί αυτοί, με εξαίρεση την ανταλλαγή κατιόντων, προσφέρουν σχετικά μέτρια αύξηση σε αντοχή σε σύγκριση με άλλα πρόσθετα [25].

### **Ρητίνες πετρελαίου**

Δύο ριζικά διαφορετικοί τύποι προϊόντων πετρελαίου χρησιμοποιούνται συνήθως για τη σταθεροποίηση του εδάφους, τα ασφαλτικά γαλακτώματα και τα συνθετικά ισοαλκανικά υγρά.

Τα τυπικά ασφαλτικά γαλακτώματα αποτελούνται από σωματίδια ασφάλτου που διασπείρονται σε νερό με ένα παράγοντα γαλακτωματοποίησης, διαμέσου ενός επιφανειοδραστικού που αναστέλλει την πήξη των ασφαλτικών σωματιδίων. Όταν εφαρμόζεται, το γαλακτώμα προσροφάται επάνω στην επιφάνεια των σωματιδίων του εδάφους και κατά την εξάτμιση, εναποτίθενται τα σωματίδια ασφάλτου στην επιφάνεια των σωματιδίων του εδάφους.

Ο παράγοντας γαλακτωματοποίησης μπορεί επίσης να χρησιμεύσει ως ένα επιφανειοδραστικό, μειώνοντας την επιφανειακή τάση ώστε να επιτρέπει βελτιωμένη διείσδυση για τοπικές εφαρμογές και βελτίωση της επικάλυψης των σωματιδίων για διαδικασίες ανάμειξης.

Τα ασφαλτικά γαλακτώματα είναι συνήθως κατιοντικά ή ανιοντικά. Επειδή τα περισσότερα εδάφη έχουν ένα καθαρό αρνητικό επιφανειακό φορτίο, τα κατιονικά γαλακτώματα χρησιμοποιούνται συνήθως για τη σταθεροποίηση του εδάφους. Τα ασφαλτικά γαλακτώματα επίσης κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την ταχύτητα με την οποία συνενώνονται ή ωριμάζουν. Γαλακτώματα μέσης-πήξης (Medium-setting emulsions) χρησιμοποιούνται συνήθως με χονδρά αδρανή και γαλακτώματα αργής πήξης (slow-setting Emulsions) χρησιμοποιούνται με λεπτόκοκκα αδρανή. Επειδή ο κύριος μηχανισμός σταθεροποίησης είναι η με φυσικούς δεσμούς η βελτίωση της αντοχής εξαρτάται από την ικανότητα επικάλυψης των σωματιδίων του χώματος επαρκώς και τις φυσικές ιδιότητες του συνδετικού.

Έτσι, η σταθεροποίηση με ασφαλτικά γαλακτώματα είναι κατάλληλη για κοκκώδη υλικά και όχι για λεπτόκοκκα εδάφη λόγω της υψηλής ειδικής επιφάνειας τους.

Επειδή ο φυσικός δεσμός εξαρτάται από το ασφαλτικό γαλάκτωμα, ένα ιξωδοελαστικό υλικό, οι φυσικοί δεσμοί έχουν μέτρια αντοχή. Ωστόσο το ασφαλτικό γαλάκτωμα δεν είναι υδατοδιαλυτό και έτσι παρέχει εξαιρετική στεγάνωση στα επικαλυμμένα σωματίδια, μειώνοντας την ευαισθησία στην υγρασία.

Τα συνθετικά υγρά που αποτελούνται από ισοαλκάνια επίσης, δεν στεγνώνουν ή ωριμάζουν με το χρόνο. Τα προϊόντα αυτά τυπικά χρησιμεύουν ως ενισχυτές στην συμπίεση των εδαφών. Κατά την διασπορά των σωματιδίων τους στα εδάφη, μειώνουν την τριβή μεταξύ των σωματιδίων του εδάφους, επιτρέποντας την αναδιάταξη τους με λιγότερη προσπάθεια συμπίεσης. Τα προϊόντα αυτά δεν είναι υδατοδιαλυτά, προσφέροντας έτσι αυξημένη αντίσταση στην διαβρωτική επίδραση του νερού, ενώ επειδή δεν προσφέρουν χημική ή σημαντική φυσική συγκόλληση, αναμένεται ελάχιστη βελτίωση στην αντοχή του εδάφους [25].

## **Πολυμερή**

Τα πολυμερή που χρησιμοποιούνται ως σταθεροποιητές πολυμερούς είναι συνήθως το οξικό βινύλιο (vinyl acetates) ή ακρυλικά συμπολυμερή (acrylic copolymers) εναιωρημένα σε ένα γαλάκτωμα με επιφανειοδραστικές ουσίες. Κατά την διαδικασία σταθεροποίησης το πολυμερές επικαλύπτει τα σωματίδια του εδάφους, και δημιουργεί φυσικούς δεσμούς όταν το υγρό του γαλακτώματος εξατμίζεται, αφήνοντας μια μήτρα εδάφους-πολυμερούς.

Όπως και με τα ασφαλτικά γαλακτώματα, ένας παράγοντας γαλακτωματοποίησης μπορεί να χρησιμεύσει ως επιφανειοδραστικό, βελτιώνοντας την διείσδυση για τοπικές εφαρμογές και την επικάλυψη των σωματιδίων για προσμίξεις.

Επειδή ο κύριος μηχανισμός σταθεροποίησης είναι με φυσική δέσμευση (physical bonding), η βελτίωση στην αντοχή, εξαρτάται: από την ικανότητα επαρκής επικάλυψης των σωματιδίων του εδάφους από τα πολυμερή και στη φυσικές ιδιότητες του πολυμερούς. Έτσι, η σταθεροποίηση με πολυμερή γαλακτώματα είναι κατάλληλη για κοκκώδη υλικά και λιγότερο αποτελεσματική σε λεπτοδιαμερισμένα εδάφη λόγω της υψηλής ειδικής επιφάνειας που παρουσιάζουν. Τα πολυμερή που χρησιμοποιούνται τυπικά στο χώμα έχουν εξαιρετική αντοχή εφελκυσμού και κάμψης, παράγοντας φυσικούς δεσμούς με εξαιρετική αντοχή. Τα πολυμερή επίσης είναι ανθεκτικά στο νερό, παρέχοντας έτσι αυξημένη αντίσταση στην διαβρωτική επίδραση του.

Δοκιμές σε συνδυασμό με μικρά ποσοστά τσιμέντου τύπου Πόρτλαντ Ι έδειξαν ότι το τσιμέντο τύπου Πόρτλαντ Ι χρησιμοποίησε το πλεόνασμα, του νερού του γαλακτώματος, για την ενυδάτωση του, προσδίδοντας στην πρώιμη ανάπτυξη αντοχής, ενώ το υπόλειμμα του πολυμερούς παρείχε βελτιωμένη ολκιμότητα. Έτσι τα εργαστηριακά πειράματα υποστηρίζουν τη φυσική δέσμευση, ως μηχανισμό σταθεροποίησης για τα πολυμερή γαλακτώματα, ενώ η μειωμένη απόδοση σε λεπτόκοκκα εδάφη οφείλεται πιθανώς στην ανεπαρκή επικάλυψη των σωματιδίων του εδάφους [25].

## Φυσικές Ρητίνες

Οι φυσικές ρητίνες είναι σχετικά μη επεξεργασμένα υποπροϊόντα της ξυλείας και του χάρτου σε αντίθεση με τα λιγνοσουλφονικά που παράγονται συνήθως με ελεγχόμενες διεργασίες παρασκευής. Συνήθως προστίθενται γαλακτωματοποιητικοί παράγοντες για να αποτρέψουν την πρόωρη συσσωμάτωση της ρητίνης. Τα γαλακτώματα από ρητίνη δέντρου χρησιμοποιούνται για την επικάλυψη μεμονωμένων σωματιδίων του εδάφους, οδηγώντας τα σωματίδια αυτά περαιτέρω, σε μεταξύ τους δέσμευση.

Όπως και στα λιγνοσουλφονικά, οι φυσικές ρητίνες είναι κυρίως συγκολλητικοί παράγοντες που συνδέουν φυσικά τα σωματίδια μεταξύ τους. Παρόμοια με τα γαλακτώματα πολυμερών, οι φυσικές ρητίνες είναι κατάλληλες για κοκκώδη υλικά και λιγότερο αποτελεσματικές σε λεπτόκοκκα εδάφη, λόγω της μειωμένης αποτελεσματικότητας στην ανάμιξη. Επίσης η φυσικές ρητίνες είναι λιγότερο αναμίξιμες με το νερό από ό, τι τα μεταποιημένα λιγνοσουλφονικά και επομένως λιγότερο επιρρεπείς σε έκπλυση υπό υγρές συνθήκες.

Από δοκιμές σταθεροποίησης προκύπτει ότι οι φυσικές ρητίνες παρέχουν βελτίωση στην αντοχή σε σύγκριση με μη σταθεροποιημένα εδάφη [11].

### 3 ΜΕΛΕΤΕΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ - ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

Η παρουσία μελετών για την σταθεροποίηση πηλών με σκοπό την παραγωγή οικοδομικών υλικών είναι ιδιαιτέρως περιορισμένη. Οι περισσότερες πληροφορίες για την σταθεροποίηση αργλικών υλικών μας παρέχονται από τον τομέα της εδαφομηχανικής όπου εδώ και αρκετά χρόνια τέθηκε το ζήτημα της σταθεροποίησης εδαφών, κυρίως όσον αφορά την διάβρωση από το νερό. Οι πρώτες μελέτες εντοπίζονται κυρίως στην σταθεροποίηση με τσιμέντο και ασβέστη. Ήδη από την δεκαετία του 70 πραγματοποιούνται μελέτες οι οποίες λαμβάνουν υπόψη, εκτός των άλλων, παραμέτρους οικονομικές και περιβαλλοντικές.

Το 1975 οι **M. Kawamura** και **S. Diamond** διερεύνησαν την ενσωμάτωση μικρών ποσοτήτων παραδοσιακών σταθεροποιητών, όπως το υδροξείδιο του ασβεστίου και το τσιμέντο Portland, προκειμένου να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα της σταθεροποίησης που προσφέρουν τα υλικά αυτά έναντι της διαβρωτικής δράσης του νερού της βροχής.

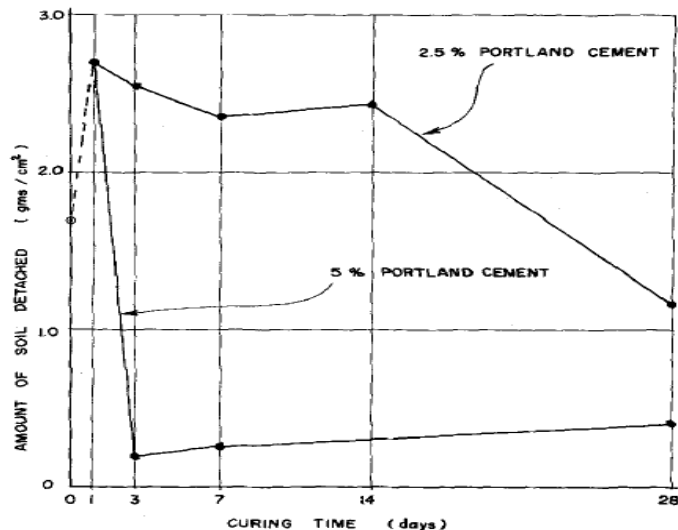
Για την συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι εδάφους και τρία διαφορετικά υλικά σταθεροποίησης, σε τρεις αναλογίες το κάθε ένα. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε διαφορετικούς χρόνους ωρίμανσης έως τις 28 ημέρες. Ο πρώτος τύπος εδάφους ήταν υλικό B-horizon που προέρχεται από την σειρά αργίλων Crosby και περιέχει μοντμοριλλονίτη, κάποια μικτά στρώματα αργίλων και καολινίτη, η περιεκτικότητα του συγκεκριμένου εδάφους σε άργιλο βρέθηκε περίπου στα 20 %.

Ο δεύτερος τύπος εδάφους ήταν ο "grundite" ιλλίτη με εμπορικό πηλό που χρησιμοποιείται συνήθως σε πολλές εργαστηριακές μελέτες. Οι σταθεροποιητές προστέθηκαν σε ποσοστά 1%, 2.5% και 5% κατά βάρος και περιλαμβάνουν δύο τύπους υδροξειδίου του ασβεστίου, ένα αντιδραστήριο υψηλής καθαρότητας, υδράσβεστο του εμπορίου δολομιτικού τύπου, και ένα συμβατικό τσιμέντο Πόρτλαντ τύπου I [26].

Τα αποτελέσματα σε γενικές γραμμές έδειξαν ότι οι σταθεροποιητές που εφαρμόστηκαν μπορούν να προστατέψουν ικανοποιητικά τα συγκεκριμένα εδάφη έναντι της διαβρωτικής δράσης της βροχής. Παρόλα αυτά όμως οι συγκεκριμένοι σταθεροποιητές δεν καθιστούν τα δείγματα αδιαπέραστα στο νερό ούτε αναπτύσσουν πολύ υψηλές μηχανικές αντοχές. Επίσης προκύπτει ότι τα εξαιρετικά όξινα εδάφη απαιτούν σχετικά μεγάλες ποσότητες σταθεροποιητή για να ξεπεραστεί η επίδραση της οξύτητας, τόσο η υδράσβεστος όσο και το τσιμέντο Portland σε ανεπαρκείς ποσότητες υπάρχει περίπτωση να προωθούν, αντί να μειώνουν την απώλεια της διάβρωσης (Σχήμα 3.1).

Γενικά η υδράσβεστος φαίνεται να είναι εξίσου αποτελεσματική με το τσιμέντο Portland, με την προϋπόθεση η ωρίμανσή της να διαρκεί αρκετές εβδομάδες πριν την δράση της βροχής, επίσης προκύπτει ότι πιο αποτελεσματική είναι η υδράσβεστος αρκετά υψηλής καθαρότητας. Η σταθεροποίηση φαίνεται να σχετίζεται κατά κύριο λόγο με την ανάπτυξη του ένυδρου ασβεστοπυριτικού gel (CSH) καθώς δρα ως συγκολλητική ουσία συμβάλλοντας στην συγκράτηση των αργλικών σωματιδίων μεταξύ τους [26].





Σχήμα 3.1 Απώλεια διάβρωσης εδάφους “grundite” σταθεροποιημένου με τσιμέντο Portland [26].

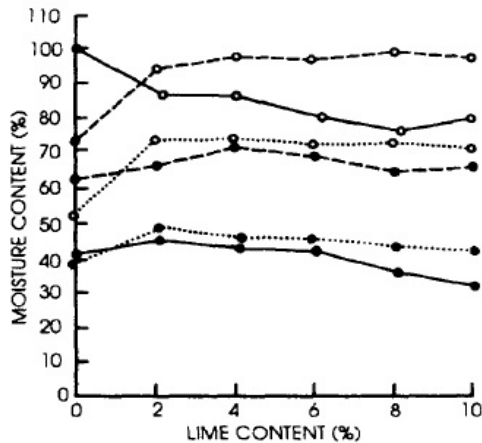
Ο **F.G. Bell** το 1996 πραγματοποίησε έρευνα για την προσθήκη ασβέστη σε διαφορετικούς τύπους εδαφών με σκοπό την στερέωση δρόμων. Χρησιμοποιήθηκαν δείγματα καολινίτη, μοντμοριλλονίτη και χαλαζία και προστέθηκε ασβέστης σε ποσοστά 2 έως 10% στην βέλτιστη περιεκτικότητα υγρασίας. Τα δείγματα αφέθηκαν για ωρίμανση στους 20°C για ένα χρόνο και έγιναν δοκιμές με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, περίθλαση ακτίνων X και προσδιορισμός της ικανότητας ανταλλαγής κατιόντων, των οριών συνεκτικότητας καθώς και των μηχανικών αντοχών.

Έπειτα έγιναν οι αντίστοιχες δοκιμές και για 2 είδη εδαφών που ελήφθησαν από τις περιοχές Teesside της βορειοανατολικής Αγγλίας, τον Upper Boulder Clay (ιλλίτης: 25-40%, καολινίτης: 20-30%, χλωρίτης: >5%, χαλαζίας: 5-35%) και τον Tees Laminated Clay (ιλλίτης: 17-43%, καολινίτης: 20-30% 23-34%, χλωρίτης: 9-19% κ.α.).

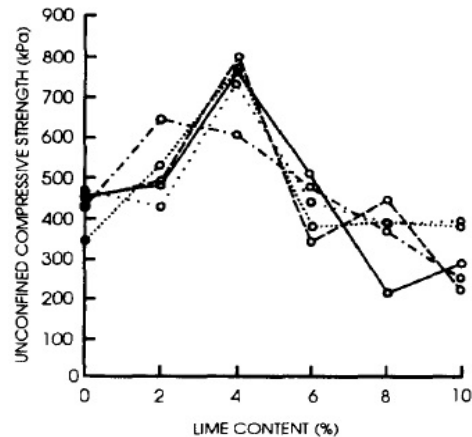
Από τα αποτελέσματα παρατηρήθηκε ότι οι ιδιότητες των εν λόγω μιγμάτων εδάφους-ασβέστη ποικίλουν και εξαρτώνται από τον χαρακτήρα του χώματος, το είδος και τον χρόνο της ωρίμανσης, την μέθοδο και την ποιότητα της κατασκευής. Όταν προστίθεται άσβεστος σε αργιλώδη εδάφη, τα ιόντα ασβεστίου αρχικά προσροφώνται από τα αργιλικά ορυκτά. Οι αλλαγές αυτές θα συνεχίσουν μέχρι το σημείο δέσμευσης του ασβέστη, σε αυτό το σημείο η προσθήκη ασβέστη συμβάλλει για τη βελτίωση της εργασιμότητας του εδάφους, αλλά όχι στην αύξηση της αντοχής. Η περεταίρω προσθήκη ασβέστη, ενισχύει την διαδικασία σταθεροποίησης και η αποτελεσματικότητα της εξαρτάται από την ανάπτυξη των προϊόντων της ποζολανικής αντίδρασης.

Στα αργιλικά εδάφη εντοπίζονται μεταβολές στα όρια πλαστικότητας με την προσθήκη ασβέστη. Οι μεγαλύτερες αυξήσεις παρατηρούνται στον μοντμοριλλονίτη, ενώ τα πλαστικά όρια του καολινίτη και του χαλαζία αλλάζουν σε μικρότερο βαθμό, τα όρια υδαρότητας του καολινίτη και του χαλαζία αυξάνονται με την προσθήκη του ασβέστη, ενώ του μοντμοριλλονίτη μειώνονται (Σχήμα 3.2). Η ευαισθησία στην αλλαγή του όγκου των διογκούμενων αργίλων επίσης μειώνεται [17].

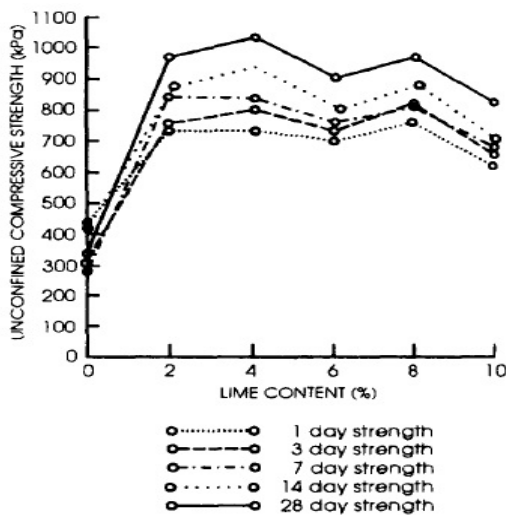
Όσον αφορά την αντοχή σε θλίψη (Σχήματα 3.3-3.5) ο άργιλος μοντμοριλλονίτη ανταποκρίθηκε πολύ πιο γρήγορα στην αρχική αύξηση της αντοχής σε σχέση με τον άργιλο καολινίτη. Η επιπλέον προσθήκη μικρών ποσοτήτων ασβέστη σε καολινίτη και χαλαζία προσδίδει μεγαλύτερες αντοχές σε ανεμπόδιση θλιπτική αντοχή στον καολινίτη, αλλά κυρίως στον χαλαζία σε σχέση με τον μοντμοριλλονίτη.



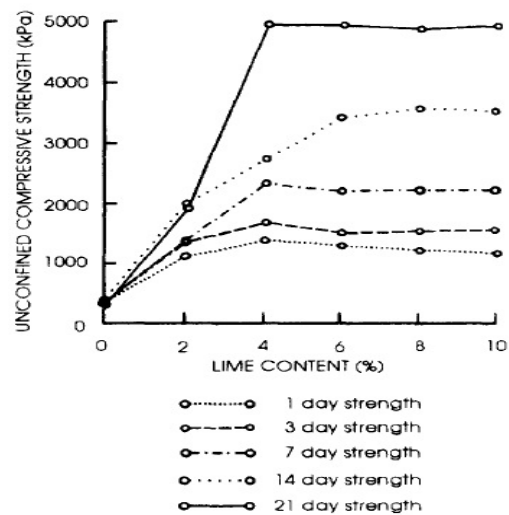
Σχήμα 3.2 Όρια Atterberg(LL, PL) των καολινίτη, μοντμοριλλονίτη και χαλαζία με προσθήκη ασβέστη [17].



Σχήμα 3.3 Ανεμπόδιση θλιπτική αντοχή του μοντμοριλλονίτη με προσθήκη ασβέστη [17].

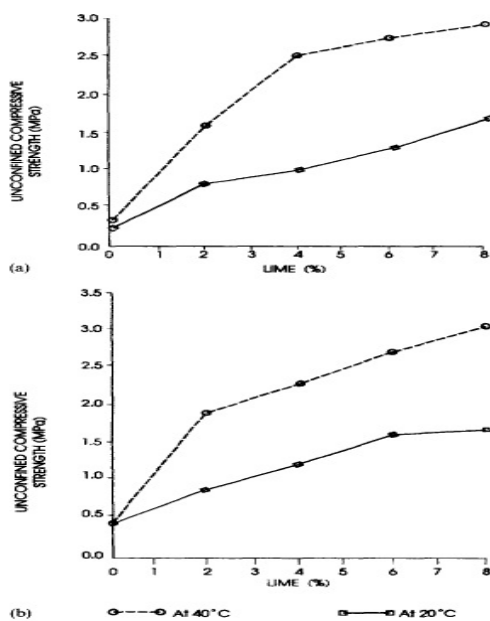


Σχήμα 3.4 Ανεμπόδιση θλιπτική αντοχή του καολινίτη με προσθήκη ασβέστη [17].

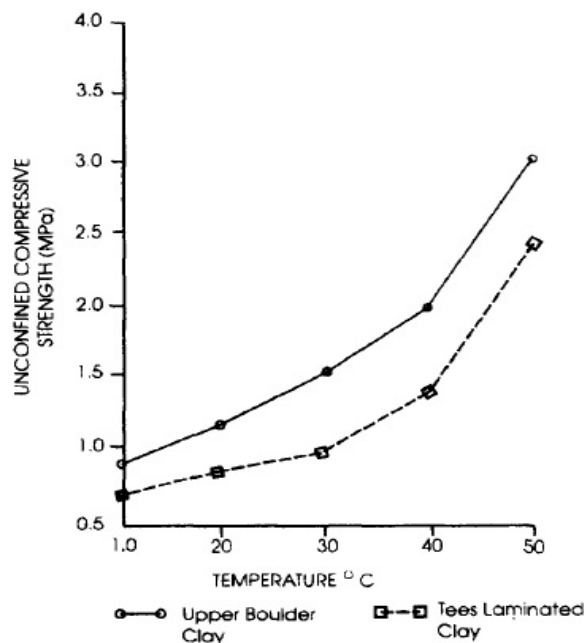


Σχήμα 3.5 Ανεμπόδιση θλιπτική αντοχή του χαλαζία με προσθήκη ασβέστη [17].

Σε κάθε περίπτωση όπως φάνηκε στα παραπάνω σχήματα, η αντοχή δεν αυξάνεται γραμμικά με την ποσότητα του ασβέστη ενώ προκύπτει ότι η μεγάλη προσθήκη ασβέστη ελαττώνει την αντοχή, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο ασβέστης από μόνος του δεν παρουσιάζει σημαντική τριβή και συνοχή.



Σχήμα 3.6 Ανεμπόδιστη θλιπτική αντοχή UCS (α) Tees Laminated Clay, (β) Upper Boulder Clay, με προσθήκη ασβέστη για ωρίμανση 7 ημερών στους 20 και 40°C [17].



Σχήμα 3.7 Η επίδραση της θερμοκρασίας στην ανάπτυξη της ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής σε δείγματα 7 ημερών [17].

Ο Upper Boulder Clay της περιοχής Teesside είναι γενικά ένα σκληρό έδαφος χαμηλής πλαστικότητας ενώ ο Tees Laminated Clay είναι σχετικά μαλακό και μεσαίας έως υψηλής πλαστικότητας. Κατά την προσθήκη της ασβέστου τα πλαστικά όρια και των δύο εδαφών αυξάνονται καθώς και το όριο υδαρότητας του Upper Boulder Clay. Ωστόσο, στην περίπτωση του Tees Laminated Clay το όριο υδαρότητας μειώνεται. Αυτό σημαίνει ότι ο δείκτης πλαστικότητας του Tees Laminated Clay μειώνεται σημαντικά ενώ του Upper Boulder Clay ελαφρώς αυξάνεται. Όσον αφορά τη γραμμική συρρίκνωση κάθε εδάφους, μειώνεται με την προσθήκη ασβέστου ενώ ο Καλιφορνιακός λόγος φέρουσας ικανότητας (CBR) αυξάνεται και στα δύο εδάφη. Το μεγαλύτερο κέρδος σε αντοχή φαίνεται να είναι με προσθήκη 4-6% ασβέστη, και φαίνεται να επηρεάζεται από το ποσοστό του νερού στο μίγμα, τον χρόνο ωρίμανσης και τη θερμοκρασία στην οποία λαμβάνει χώρα η σκλήρυνση.

Τα υψηλότερα κέρδη στην μηχανική αντοχή συμβαίνουν όταν το περιεχόμενο του νερού ανάμιξης είναι ακριβώς πάνω από την βέλτιστη υγρασία. Γενικά η αντοχή συνεχίζει να αυξάνεται με αύξηση του χρόνου ωρίμανσης, αλλά γενικά οι πλέον αξιοσημείωτες αυξήσεις συμβαίνουν μέσα στις πρώτες 7 ημέρες. Επίσης σημαντική επιρροή έχει η θερμοκρασία ωρίμανσης καθώς ειδικότερα πάνω από τους 30°C η αύξηση της αντοχής μπορεί να είναι δραματική (Σχήμα 3.7) [17].

Οι **H.L. Uppal** και **L.R. Chadda** πραγματοποίησαν μία από τις πρώτες έρευνες με σκοπό την μελέτη των φυσικο-χημικών διεργασιών, που λαμβάνουν χώρα κατά την σταθεροποίηση διογκούμενων (Μοντμοριλλονιτικών) εδαφών με προσθήκη ασβέστη. Ήδη από προηγούμενες μελέτες έχει επισημανθεί η καλή συμπεριφορά που παρουσιάζει η προσθήκη ασβέστη σε τέτοιου τύπου εδάφη ακόμα και σε μικρά ποσοστά 4-5%. Για τη μελέτη παρασκευάστηκαν μίγματα σε διάφορες αναλογίες με προσθήκη ασβέστη έως 7%.

Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι όταν ο ασβέστης προστίθεται σε μικρά ποσοστά <3%, αντιδρά κυρίως με κόκκους <0,002mm σχηματίζοντας συσσωματώματα μεγέθους 0.02-0.05mm, ενώ όταν το ποσοστό του ασβέστη αυξάνεται πέραν του 3% λαμβάνει χώρα επιπλέον αντίδραση αυξάνοντας περαιτέρω το μέγεθός τους (0.075mm). Όσον αφορά τις αντοχές προκύπτει ότι σημαντική αύξηση συμβαίνει για προσθήκη ασβέστη μεγαλύτερη του 3%. Πιο συγκεκριμένα η προσθήκη 3% ασβέστη αύξησε τις αντοχές κατά 59%, η προσθήκη 5% κατά 80.5% ενώ η προσθήκη 2% μόλις κατά 13%.

Η αύξηση των αντοχών φαίνεται να σχετίζεται με την δημιουργία των συσσωματωμάτων. Αυτή η αύξηση του μεγέθους των κόκκων, συνοδεύεται από μείωση του δείκτη πλαστικότητας. Υποστηρίζεται ότι τα κύρια φαινόμενα της ανάπτυξης των αντοχών είναι η ιοντοανταλλαγή και η ενανθράκωση του υδροξειδίου του ασβεστίου ενώ προκύπτει επιπλέον, ότι μπορεί να υπάρξει αύξηση της αντοχής τέτοιου τύπου εδαφών με προσθήκη υδροξειδίων αλκαλικών γαιών [27].

Οι **S. Z. George, D. A. Ponniah** και **J. A. Little** εδώ και αρκετά χρόνια μελέτησαν την επίδραση της θερμοκρασίας στην σταθεροποίηση εδαφών με υδράσβεστο, διεξάγοντας πειράματα σε δύο τύπους εδαφών (ιλυώδεις άργιλοι, ιλυώδεις αργιλώδεις άμμοι). Προέκυψε ότι η προσθήκη υδράσβεστου μειώνει τον δείκτη πλαστικότητας και για τους δύο τύπους εδαφών και μάλιστα συνδέεται περισσότερο με την αύξηση του ορίου πλαστικότητας παρά με την μείωση του ορίου υδαρότητας. Η αύξηση της θερμοκρασίας φάνηκε να αυξάνει τις θλιπτικές αντοχές για όλα τα μίγματα ελαφρώς, έντονη όμως αύξηση στις αντοχές παρατηρήθηκε μόνο για τα μίγματα που περιείχαν 6-10% υδράσβεστο και για μεγαλύτερες θερμοκρασίες (50°C) [28].

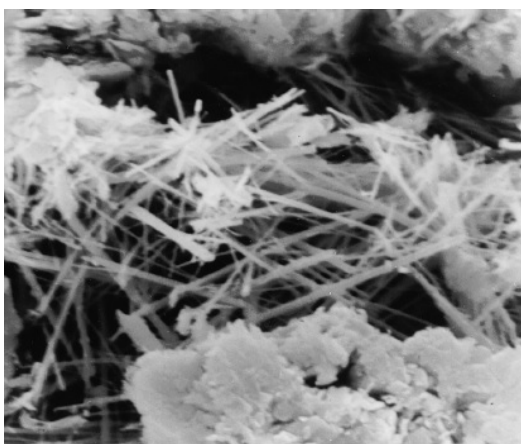
Οι **B.V. Venkatarama Reddy** και **A. Gupta** μελέτησαν σε εργασία τους την προσθήκη εδάφους σε τυπικά τσιμεντοκονιάματα. Πραγματοποίησαν δοκιμές νωπών και σκληρυμένων κονιαμάτων χρησιμοποιώντας για σύγκριση τυπικά τσιμεντοκονιάματα και ασβεστο-τσιμεντο κονιάματα.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εξάπλωση αυξάνεται γραμμικά με τον λόγο νερού τσιμέντου και το περιεχόμενο νερό, για όλα τα νωπά κονιάματα. Τα τσιμεντοκονιάματα με προσθήκη εδάφους παρουσιάζουν καλύτερη εργασιμότητα ενώ φαίνεται ότι το περιεχόμενο σε νερό για την επίτευξη επιθυμητής τιμής εξάπλωσης σχετίζεται με το κλάσμα αργίλου στο μίγμα. Για σταθερή τιμή εξάπλωσης φαίνεται ότι η ξηρή πυκνότητα, η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας μειώνονται με την αύξηση του αργιλικού κλάσματος ενώ το συγκρατούμενο νερό αυξάνεται.

Τα τσιμεντοκονιάματα με προσθήκη εδάφους παρουσίασαν μεγαλύτερη συστολή ξήρασης, ενώ πολλά από αυτά όταν εφαρμόστηκαν σε διπλέτες ωμοπλίνθων από τσιμέντο και έδαφος παρουσίασαν καλύτερη πρόσφυση αυξάνοντας τις τιμές εφελκυστικής αντοχής [29].

Η δυνατότητα ανακύκλωσης ή επεξεργασίας βιομηχανικών απορριμμάτων για τη σταθεροποίηση εδαφών, έχει μεγάλα δυνητικά οικονομικά οφέλη σε όλους τους τομείς της βιομηχανίας κατασκευής. Είναι γνωστό ότι η καλή ποιότητα σκωρίας υψικαμίνου μπορεί να προστεθεί σε υλικά, όπως το τσιμέντο, παρέχοντας βελτιωμένη αντίσταση σε επίθεση από θειικά άλατα στο θαλασσινό νερό ή άλλα επιθετικά περιβάλλοντα. Η σταθεροποίηση με άσβεστο σε αργιλώδη εδάφη έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στην οδοποιία ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις αναφέρθηκαν σοβαρά προβλήματα λόγω διόγκωσης από την παρουσία θειικών αλάτων στο έδαφος, η οποία φαίνεται να σχετίζεται με το σχηματισμό ετρινγκίτη. Σχετικές μελέτες σε κονιάματα τσιμέντων υπό την επίδραση θειικών έδειξαν ότι η επιδείνωση στην διόγκωση και την ρηγμάτωση οφείλεται κυρίως στον σχηματισμό ετρινγκίτη και ότι το χαμηλότερο περιεχόμενο σε υδροξείδιο του ασβεστίου που παράγεται από τα τσιμέντα με πρόσθετα στην περίπτωση αυτή βελτιώνει την αντίσταση σε θειικά. Επιπλέον, η ενυδάτωση της σκωρίας δείχνει ότι παράγει κλείσιμο των πόρων (“pore-blocking” effect) σε τσιμέντα με μεγάλους χρόνους σκλήρυνσης. Το μπλοκάρισμα των πόρων οδηγεί σε υψηλότερη αντοχή και μικρότερη διαπερατότητα, ενώ εκτός των άλλων ενισχύει την αντίσταση στα θειικά άλατα [30].

Οι **W. Tasong, S. Wild** και **R. Tilley** μελέτησαν τους μηχανισμούς με τους οποίους η προσθήκη σκωρίας υψικαμίνου αποτρέπει την επίθεση θειικών σε καολινιτικά εδάφη σταθεροποιημένα με υδράσβεστο. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι τα μείγματα με υψηλότερο ποσοστό ασβέστη σε μεγάλους χρόνους εμβάπτισης (3-28 ημέρες) σε θειικό νάτριο, εμφανίζουν εκτεταμένη φθορά στην δομή τους και αποτελούνται από εκτεταμένες περιοχές με καλοσχηματισμένους, ραβδοειδούς κρυστάλλους ετρινγκίτη (Σχήμα 3.8, α).



α. 6L-0S\_μεγέθυνση x 2000



β. 1L-5S\_μεγέθυνση x 2000

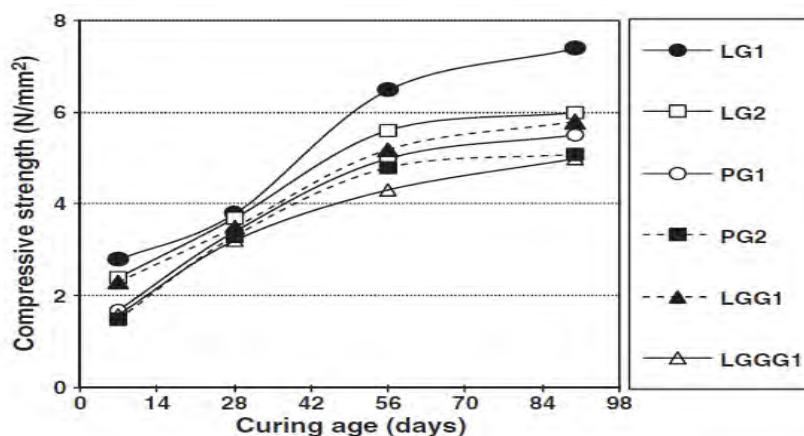
Σχήμα 3.8 Αποτελέσματα ηλεκ. μικροσκοπίου SEM μετά από 28 ημέρες εμβάπτισης σε  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  [31].

Ο βαθμός της φθοράς φαίνεται να μειώνεται στο μείγμα με την μείωση του ποσοστού ασβέστη και την αύξηση του ποσοστού σκωρίας. Η προσθήκη 83% σκωρίας(1L-5S) στον σταθεροποιητή φάνηκε να είναι η πιο αποτελεσματική (Σχήμα 3.8, β) [31].

Η ενυδάτωση της σκωρίας παράγει ένυδρα τσιμεντιτικά προϊόντα (CASH gel) και φάσεις τύπου υδροταλιίτη που περιέχουν μαγνήσιο. Σε αντίθεση με την αντίδραση του ασβέστη με τον πηλό, που δίνει ασβεστοαργιλικά και αργιλοπυριτικά προϊόντα, και η οποία είναι πολύ αργή, η ενυδάτωση της σκωρίας που ενεργοποιείται με ασβέστη φαίνεται να είναι αρκετά πιο γρήγορη [31].

Οι **J.E. Oti** και **J.M. Kinuthia** έκαναν δύο έρευνες, η πρώτη ήταν πάνω στην σταθεροποίηση ωμοπλίνθων σε συνδυασμό με τα περιβαλλοντικά οφέλη που έχει η παραγωγή τους, όσον αφορά την ενέργεια παραγωγής τους και την έκλυση CO<sub>2</sub>. Στις περισσότερες έρευνες σχετικά με συστήματα με βάση τον άργιλο, εξακολουθούν να υπάρχουν ορισμένα αναγνωρίσιμα μειονεκτήματα, κυρίως λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής, καθώς και τη χρήση ενός μεγάλου ποσοστού τσιμέντου. Μέχρι την συγκεκριμένη έρευνα δεν είχαν αναφερθεί περιπτώσεις ωμοπλίνθων οι οποίες βασίζονται στη σταθεροποίηση με σκωρία υψικαμίνου ως κύριο σταθεροποιητικό παράγοντα. Η μελέτη αυτή είναι μία από τις πρώτες προσπάθειες σύγκρισης ψητών και άψητων τεχνολογιών από πηλό, καθώς και αξιολόγησης σε σχέση με την κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές CO<sub>2</sub> [32].

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ο πηλός Lower Oxford Clay (LOC) (ιλλίτης: 23%, καολινίτης: 10%, καλσίτης: 10%, κ.α..) ο οποίος χρησιμοποιείται ήδη για την δημιουργία σπτόπλινθων. Σκωρία υψικαμίνου (GGBS) η οποία χρησιμοποιήθηκε σε σταδιακή αντικατάσταση του τσιμέντου. Τυπικό τσιμέντο Portland και δύο τύποι ασβέστου, ασβέστης (CaO) L1 και φυσική υδραυλική άσβεστος (NHL.5) L2. Δημιουργήθηκαν ωμόπλινθοι σε διάφορες αναλογίες υλικών και στην συνέχεια έγιναν μετρήσεις στην ανεμπόδιση θλιπτική αντοχή καθώς και αποτίμηση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης.



Σχήμα 3.9 Θλιπτική αντοχή για όλα τα δείγματα μέχρι τις 90 ημέρες ωρίμανσης [32].

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν αρκετά ενθαρρυντικά και δείχνουν ότι υπάρχουν δυνατότητες για την φιλική προς το περιβάλλον δημιουργία ωμόπλινθων και την αειφόρο ανάπτυξη στον οικοδομικό τομέα. Οι αντοχές σε θλίψη των ωμοπλίνθων του συστήματος LOC- άσβεστος (L1)- GGBS ήταν υψηλότερες σε σχέση με εκείνες του συστήματος LOC - PC- GGBS, ωστόσο, η αντοχή των ωμόπλινθων που πραγματοποιήθηκαν σε εργαστηριακή κλίμακα ήταν χαμηλότερη από τους ωμόπλινθους σε βιομηχανική κλίμακα (Σχήμα 3.9).

Estimate for energy usage and carbon dioxide emission for the production of 1tonne of various bricks.

Brick Types	Energy Usage (MJ/tonne)	CO <sub>2</sub> Emission (kg CO <sub>2</sub> /tonne)
Fired Clay Brick	4186.8	202
Unfired Brick (LGG1, LG1/LG2)	657.1	40.9
Unfired Clay Brick (PG1/ PG2)	667.1	49.9
Sun Baked Bricks	525.6	25.1
12% PC Stabilised Brick	1025.6	125.1

Πίνακας 3.1 Κατανάλωση ενέργειας και εκπομπή CO<sub>2</sub> για τους διάφορους τύπους τούβλων [32].

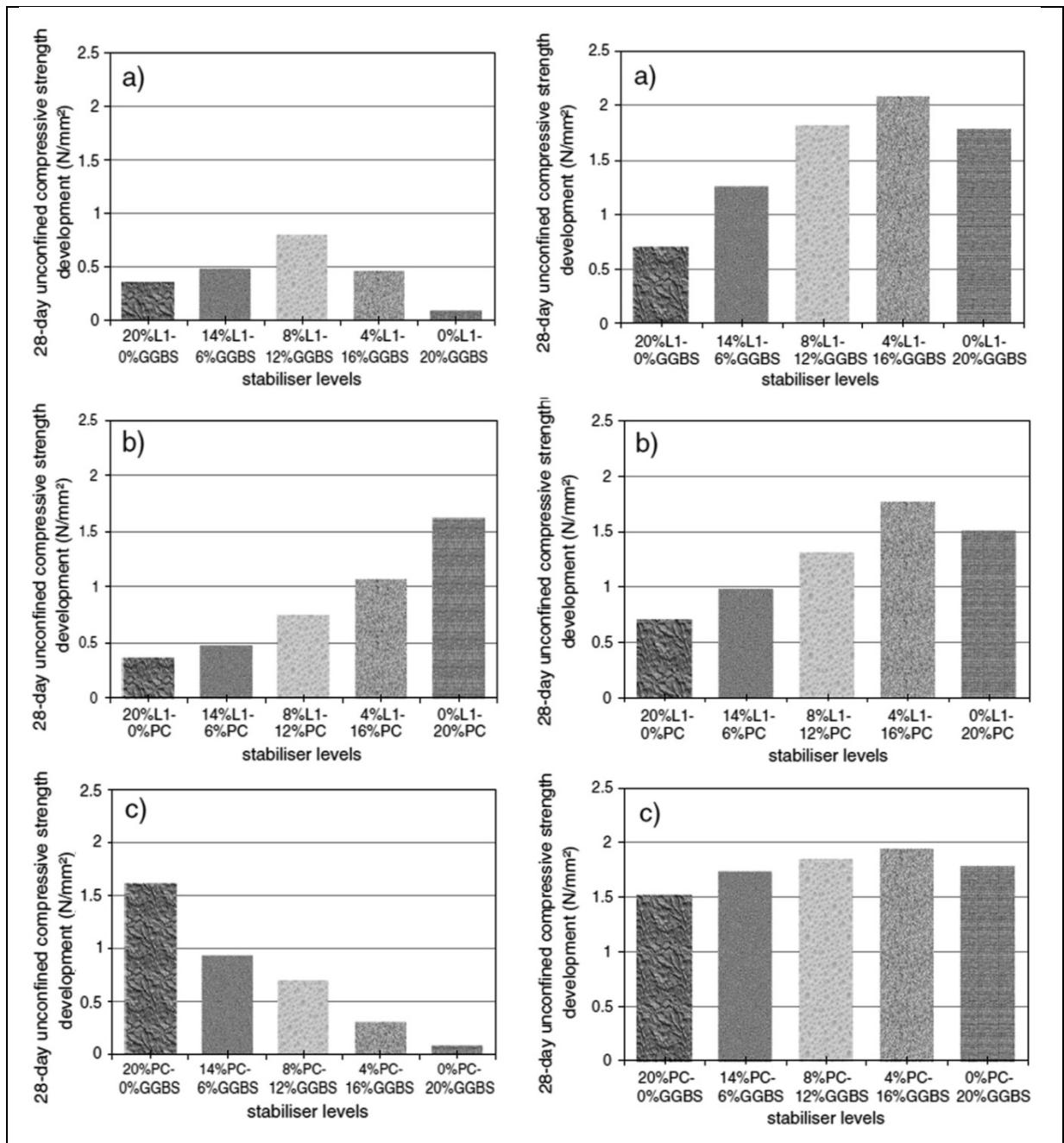
Από την περιβαλλοντική ανάλυση των διαδικασιών παραγωγής προέκυψε ότι η παραγωγή οπτόπλινθων είναι η πιο ενεργοβόρα διαδικασία και οι περισσότερες από τις αναφερόμενες εκπομπές οφείλονται στην ενέργεια που χρησιμοποιείται για το ψήσιμο των τούβλων σε κλιβάνους. Η τεχνολογία του άψητου πηλού με σκωρία GGBS ως κύριο σταθεροποιητικό παράγοντα φαίνεται να βοηθάει αισθητά στην μείωση του ενεργειακού κόστους και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Πίνακας 3.1).

Στην δεύτερη έρευνα των **J.E. Oti** και **J.M. Kinuthia** την ίδια περίοδο, χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια υλικά με την προηγούμενη έρευνα, με την διαφορά ότι, προστέθηκε ένας επιπλέον πηλός εκτός του Lower Oxford Clay (LOC), ο Καολινιτικός πηλός (KC) (καολινίτης: 84%, υλικά τύπου μίκα:13% κ.α.). Τα προκαταρκτικά μίγματα σχεδιάστηκαν για να βελτιώσουν κάποιες από τις ανεπιθύμητες ιδιότητες στα τούβλα των συμβατικών κατασκευών με στόχο την μείωση των υψηλών ποσών ενέργειας που συνδέεται με το ψήσιμο των τούβλων. Όσον αφορά τις προσμίξεις χρησιμοποιήθηκε 20% κ.β. σταθεροποιητικός παράγοντας, σκωρία υψικαμίνου GGBS ή τσιμέντο πόρτλαντ PC με σταδιακή αντικατάσταση ασβέστη (CaO) L1, φυσική υδραυλική άσβεστο (NHL.5) L2 ή τσιμέντο πόρτλαντ PC.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι το σύστημα της σκωρίας GGBS με ασβέστη (λειτουργώντας ως ενεργοποιητή) έχει σημαντικά υψηλότερη θλιπτική αντοχή σε σχέση με το αντίστοιχο σύστημα του τσιμέντου ενώ όσων αφορά τους πηλούς, υπήρξε βελτιωμένη απόδοση στα μίγματα με τον πηλό LOC σε σχέση με τον καολινιτικό πηλό KC (Σχήμα 3.10), αυτό μπορεί να συμβαίνει λόγω της καλύτερης κατανομής μεγέθους των σωματιδίων του και την μεγαλύτερη ποικιλία σε συνθέσεις ορυκτών, παρέχοντας έτσι ένα καλύτερο προφίλ ενυδάτωσης [33].

Συνολικά, η εξήγηση για αυτήν την μεταβολή στις θλιπτικές αντοχές μπορεί να είναι πολύπλοκη λόγω των διαφόρων ποζολανικών αντιδράσεων και των λοιπών αντιδράσεων κατά την διαδικασία της ενυδάτωσης εντός των συστημάτων. Τα διάφορα μίγματα σταθεροποιητών περιέχουν διάφορες ποσότητες υπολειπόμενου ασβέστη, με αποτέλεσμα να υπάρχουν διαφορές στο pH των συστημάτων και ως εκ τούτου διαφορές στην αντίδραση των ιόντων [33].

Εκτός από την εκπλήρωση των κριτηρίων αντοχής, η διόγκωση των δοκιμών κατά την εμβάπτιση σε νερό ήταν εντός των αποδεκτών ορίων αντοχής μονάδων τοιχοποιίας. Έτσι θεωρείται πιθανή η χρήση ασβεστού-GGBS ως συνδετικό υλικό, με ή χωρίς τη χορήγηση μικρών ποσοτήτων τσιμέντου PC, για την κατασκευή βιώσιμων άψητων οικοδομικών προϊόντων από πηλό.

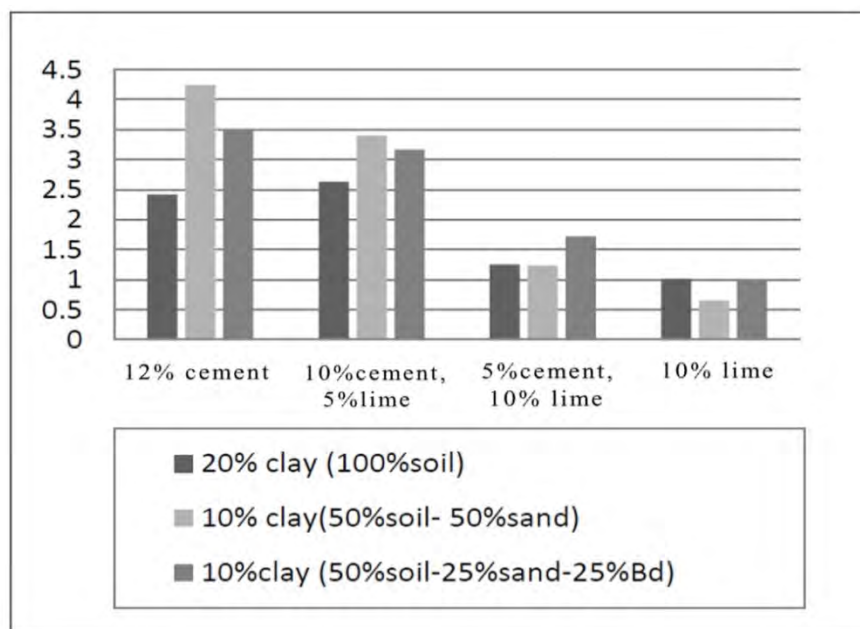


Σχήμα 3.10 Ανάπτυξη ανεμπόδισης θλιπτικής αντοχής UCS για τα διάφορα μίγματα, (αριστερά): (a) KC-L1-GGBS, (b) KC-L1-PC και (c) KC-PC-GGBS σε 35% υγρασία συμύκνωσης και (δεξιά): (a) LOC-L1-GGBS, (b) LOC-L1-PC και (c) LOC-PC-GGBS σε 30% υγρασία συμύκνωσης [33].

Η μεγαλύτερη ανάπτυξη αντοχής στο σύστημα LOC-αβέστου-GGBS σε σχέση με το σύστημα LOC-PC-GGBS μπορεί επίσης να αποδοθεί στον σταδιακό σχηματισμό τσιμεντιτικών προϊόντων (CSH gel) μέσα στη δομή, χωρίς απαραίτητα να αναπτύσσεται μια κρυσταλλική δομή, αλλά κλείνοντας τους πόρους δημιουργώντας μία πυκνότερη δομή [33].



Το 2014 οι **S. Rashmi** , **K.S. Jagadish** και **S. Nethravathi** παρουσίασαν ίσως την μοναδική έρευνα η οποία εστιάζει στην κατανόηση των χαρακτηριστικών των σταθεροποιημένων πηλοκονιαμάτων. Σκοπός ήταν η μελέτη της εργασιμότητας και των αντοχών των πηλοκονιαμάτων. Ως πηλός χρησιμοποιήθηκε φυσικό έδαφος που περιείχε 20% άργιλο, και κατά περίπτωση αναμείχθηκε με φυσική άμμο και σκόνη τούβλων (Bd) από κατεδαφίσεις. Ως σταθεροποιητές χρησιμοποιήθηκαν τσιμέντο OPC 53 και υδράσβεστος, μεμονωμένα και σε συνδυασμό σε διάφορες αναλογίες.



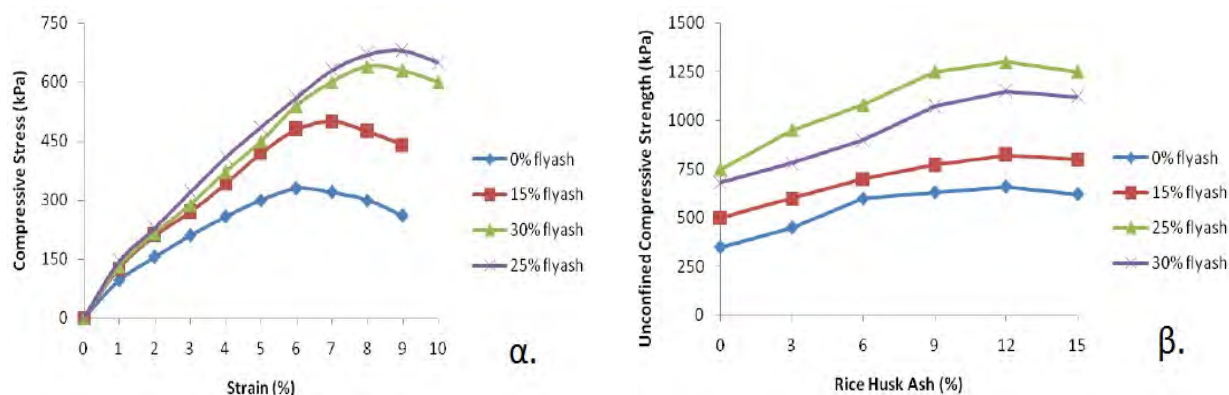
Σχήμα 3.11 Θλιπτικές αντοχές μιγμάτων στις 28 ημέρες [34].

Παρατηρήθηκε ότι οι απαιτήσεις σε νερό των κονιαμάτων για την επίτευξη της βέλτιστης εργασιμότητας αυξάνονται, όσο αυξάνεται το κλάσμα αργίλου στα μίγματα. Από τα αποτελέσματα των θλιπτικών αντοχών προκύπτει ότι, τις υψηλότερες τιμές αποκτούν τα πηλοκονιάματα με τσιμέντο, στα οποία εκτός από πηλό έχει προστεθεί άμμος 50%. Εξίσου υψηλές τιμές εμφανίζουν και τα κονιάματα στα οποία έχει προστεθεί σκόνη τούβλων από κατεδαφίσεις (Σχήμα 3.11) [34].

Ειδικότερα τα τελευταία χρόνια έχουν αρχίσει να παρουσιάζονται έρευνες στην σταθεροποίηση εδαφών με παράγοντες σταθεροποίησης μη παραδοσιακά πρόσθετα, κυρίως παραπροϊόντα ή απορρίμματα βιομηχανιών.

Ο **R. M. Brooks** το 2009 μελέτησε την χρήση τέφρας από φλοιό ρυζιού (RHA) και ιπτάμενης τέφρας (flyash) με σκοπό την αναβάθμιση διογκούμενου εδάφους τύπου CH (άργιλος υψηλής πλαστικότητας) σε δομικό υλικό υποστρώματος θεμελίων. Ο φλοιός του ρυζιού είναι ένα παραπροϊόν της βιομηχανίας επεξεργασίας ρυζιού και η τέφρα από φλοιό ρυζιού (RHA) συλλέγεται από το κάψιμο του φλοιού του ρυζιού (σε απόδοση περίπου 20%). Η Ιπτάμενη τέφρα τύπου C χρησιμοποιήθηκε σε ποσοστό έως 30% και η τέφρα από φλοιό ρυζιού (RHA) ( $SiO_2$ : 90.23%) σε ποσοστό έως 15% [35].

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η διόγκωση μειώθηκε με την προσθήκη της ιπτάμενης τέφρας, γεγονός που μπορεί να οφείλεται σε ανταλλαγή κατιόντων στο μίγμα ιπτάμενης τέφρας-εδάφους, κατά την οποία τα ιόντα νατρίου στο έδαφος αντικαθίστανται από ιόντα ασβεστίου της ιπτάμενης τέφρας. Τα σημεία αστοχίας τάσης-παραμόρφωσης παρουσίασαν αύξηση έως 106% όταν αυξήθηκε η περιεκτικότητα σε Ιπτάμενη Τέφρα από 0 σε 25% και οι μηχανικές αντοχές σχεδόν διπλασιάστηκαν (Σχήμα 3.12 α.,β.). Συμπεραίνεται ότι ένα μείγμα RHA 12% με 25% ιπτάμενη τέφρα παρουσιάζει ικανοποιητική μηχανική συμπεριφορά για την ενίσχυση υπεδάφους [35].



Σχήμα 3.12 α. Επιρροή της Ιπτάμενης τέφρας στην συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης του εδάφους β. Επιρροή της RHA στην ανεμπόδιση θλιπτική αντοχή UCS για το μείγμα πηλού-ιπτάμενης τέφρας [35].

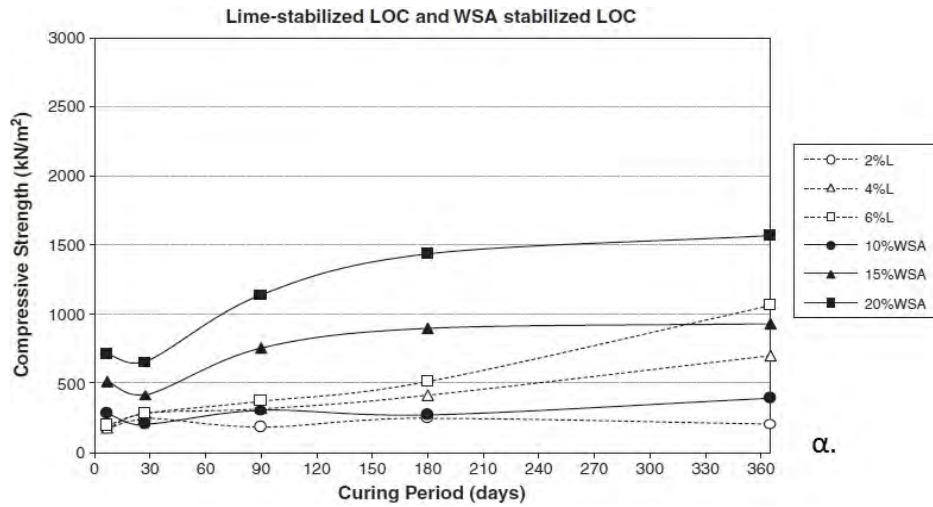
Στο Ηνωμένο Βασίλειο, μία από τις κυριότερες εταιρείες ανακύκλωσης χαρτιού κάνει καύση αυτών και παράγει ατμό για χρήση στο εργοστάσιο, η τέφρα που προκύπτει από την καύση πηγαίνει σε χώρους υγειονομικής ταφής (700 τόνοι /εβδομάδα) [36].

Οι **M.N. Rahmat** και **N. Ismail** εξέτασαν τη δυνατότητα χρήσης της Τέφρας απορριφθέντος χάρτου (WSA) ως υλικό σταθεροποίησης οδοστρώματος εδάφους, με ή χωρίς ανάμιξη με άσβεστο (CaO), τσιμέντο Portland (PC), ή σκωρία υψικαμίνου (GGBS). Το έδαφος που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο Lower Oxford Clay (LOC) που έχει υψηλό θειικό και θειούχου περιεχόμενο με τη μορφή γύψου και σιδηροπυρίτη. Ο σιδηροπυρίτης και ο γύψος μετά τη σταθεροποίηση με ασβέστη σχηματίζουν διογκούμενα ορυκτά, όπως ετρινγίτη και θαυμασίτη, καθιστώντας το στρώμα σταθεροποίησης ασταθές, έτσι ο πηλός (LOC) είναι μια εξαιρετική πρόκληση για σταθεροποίηση.

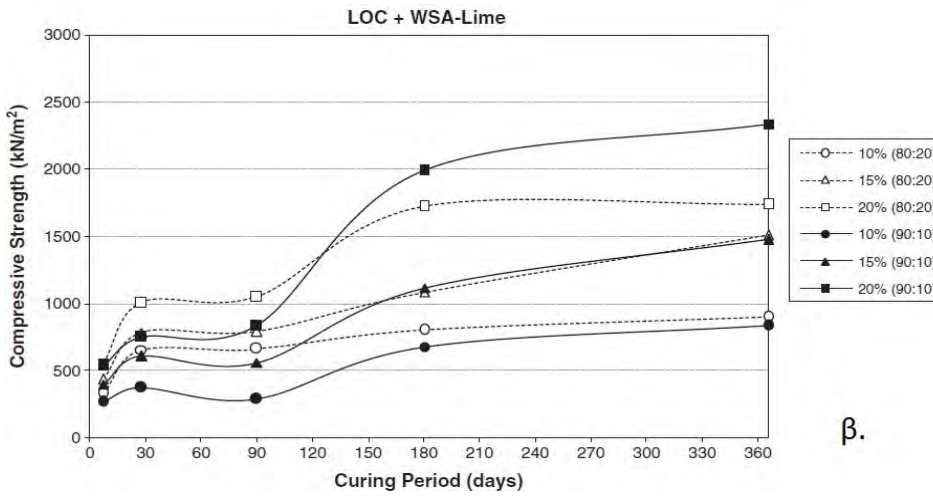
Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όλα τα μείγματα, WSA-ασβέστη, WSA-PC και WSA-GGBS εκτός από το 50:50 WSA-GGBS μείωσαν το Δείκτης πλαστικότητας ενώ η αύξηση του περιεχομένου σταθεροποιητή αύξησε την ανεμπόδιση θλιπτική αντοχή με την αύξηση της περιόδου ωρίμανσης [36].

Η υψηλότερη τιμή θλιπτικής αντοχής καταγράφηκε για το σύστημα WSA-GGBS 20% (50:50) ενώ η ανάπτυξη της αντοχής ήταν παρόμοια και για τα υπόλοιπα συστήματα (Σχήμα 3.13 α, β).

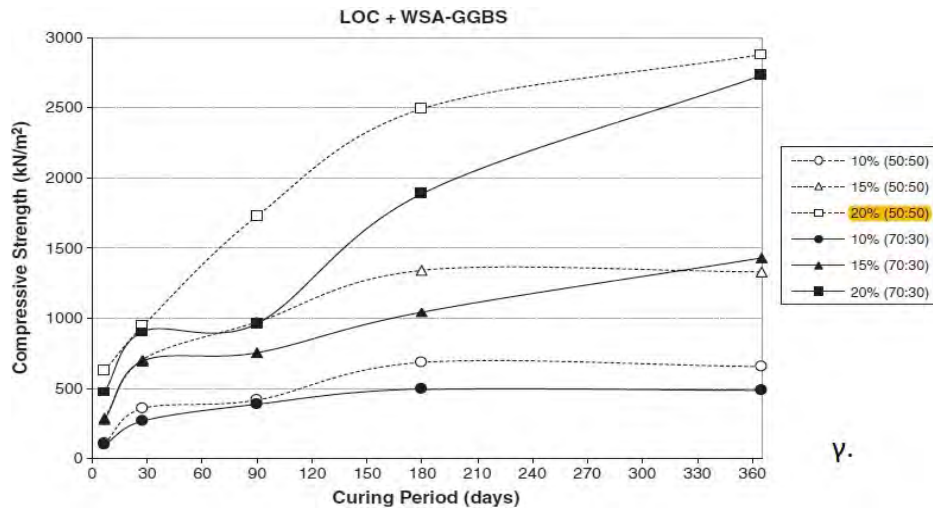
Στο σύστημα WSA-GGBS φαίνεται ότι η GGBS ενυδατώνεται, μετά την ενεργοποίηση της, από το αλκαλικό περιβάλλον που παρέχεται από τον ελεύθερο ασβέστη της WSA. Έτσι απελευθερώνονται ενώσεις σίλικας και αλουμίνας οδηγώντας στην δημιουργία ένυδρων ασβεστοπυριτικών ενώσεων οι οποίες ευθύνονται για την ανάπτυξη της αντοχής και τη σταθερότητα του όγκου [36].



α.



β.



γ.

Σχήμα 3.13 Ανεμπόδιση θλιπτική αντοχή UCS σε συνάρτηση της περιόδου ωρίμανσης για τα συστήματα α. LOC + WSA και LOC + Lime β. LOC + WSA-Lime γ. LOC + WSA-GGBS [36].

Το υψηλό κόστος και η ενεργοβόρα διαδικασία παραγωγής του τσιμέντου Portland οδηγούν στην αναζήτηση για εναλλακτικά τσιμεντιτικά πρόσθετα.

Το 2013 οι **S. Vichan, R.Rachan, S. Horpibulsuk** χρησιμοποίησαν ένα μείγμα από Τέφρα βιομάζας (BA) και υπόλειμμα καρβιδίου του ασβεστίου (CCR) σαν παράγοντα σταθεροποίησης για την σταθεροποίηση μαλακού πηλού. Ορισμένα είδη βιομάζας (BA) όπως εκείνα από φλοιό ρυζιού, ρινίσματα πεύκου, και ζαχαροκάλαμου περιέχουν υψηλές ποσότητες αλουμίνας και διοξειδίου του πυριτίου. Το υπόλειμμα καρβιδίου του ασβεστίου (CCR) είναι ένα παραπροϊόν της παραγωγής ακετυλενίου και εκτός της παρουσίας του άνθρακα (2%), έχει παρόμοια χημική και ορυκτολογική σύνθεση με τον ένυδρο ασβέστη. Η εργασία τους είχε ως στόχο να εξετάσει τις επιπτώσεις της αρχικής περιεκτικότητας σε νερό, την περιεκτικότητα σε συνδετικό υλικό, και τους χρόνους σκλήρυνσης στην ανάπτυξη της ανεμπόδιστη θλιπτική αντοχής (UCS) του σταθεροποιημένου πηλού για τις βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες περιόδους [37].

Για τον προσδιορισμό των τσιμεντιτικών προϊόντων της ποζολανικής αντίδρασης χρησιμοποιήθηκαν Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM), Ακτίνες φθορισμού-X (XRF), και Περίθλαση ακτίνων X (XRD).

Οι δοκιμές αντοχής πραγματοποιήθηκαν μετά από 7, 28, 90, και 150 ημέρες ωρίμανσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η πλέον κατάλληλη αναλογία CCR:BA για την επίτευξη της μέγιστης αντοχής είναι (60:40) η οποία αυξάνει το pH και επιταχύνει την ποζολανική αντίδραση.

Η ανάπτυξη της αντοχής στο σταθεροποιημένο πηλό μπορεί να ταξινομηθεί σε δύο Ζώνες: ενεργή (Binder= 5-15%) και αδρανής (Binder > 15%). Η ιδανική ποσότητα συνδετικού (Binder) υλικού για τη σταθεροποίηση του πηλού προσδιορίστηκε στα 15%. Στην ενεργό ζώνη, η πρόσθεση Τέφρας βιομάζας αυξάνει την περιεκτικότητα σε SiO<sub>2</sub> και επάγει την ανάπτυξη αντοχής. Στην αδρανή ζώνη αντίθετα το μεγάλο ποσό υπολείμματος καρβιδίου του ασβεστίου προκαλεί αστάθεια λόγω του ελεύθερου ασβέστη και συνεπώς μειωμένη ανάπτυξη αντοχής [37].

Ο ετρινγκίτης και ο γκισμονδίνης είναι τα κύρια προϊόντα που βρέθηκαν στο σταθεροποιημένο πηλό. Τα αποτελέσματα από την XRD και XRF δείχνουν ότι η περιεκτικότητα σε θείο του πηλού επιταχύνει την αλληλεπίδραση μεταξύ CCR και BA, που σχηματίζουν τα προϊόντα ενυδάτωσης. Ο γκισμονδίνης είναι το κύριο τσιμεντιτικό προϊόν που συμβάλλει στη μακροπρόθεσμη ανάπτυξη αντοχής. Η υδρόλυση του (CCR) με το νερό προκαλεί την αύξηση του pH και στη συνέχεια την ταχεία διάλυση του άμορφου Si και Al. Το άμορφο πυρίτιο από την Τέφρα βιομάζας (BA) κυριαρχεί στην ποζολανική αντίδραση λόγω της υψηλής δραστηριότητάς του στο διάλυμα βάσης σε σύγκριση με τα άλλα οξειδία πυριτίου του πηλού.

Η πυκνότερη δομή παρατηρείται σε υψηλότερη περιεκτικότητα συνδετικού υλικού (Binder) λόγω της αύξησης των τσιμεντιτικών προϊόντων. Κατά τη διάρκεια της ωρίμανσης, το διοξείδιο του πυριτίου από την Τέφρα βιομάζας (BA) και τον πηλό σταδιακά διαλύεται και αντιδρά με το υπόλειμμα καρβιδίου του ασβεστίου (CCR) για να σχηματίσουν συμπληρωματικά τσιμεντιτικά προϊόντα (C-A-S-H), οδηγώντας σε επιπλέον πλήρωση των κενών στους πόρους (βελτίωση της μικροδομής) και σε αύξηση της μηχανικής αντοχής [37].

Τον ίδιο χρόνο οι **T. Kamei, A.Ahmed** και **K.Ugai** δημοσίευσαν μία μελέτη η οποία εξετάζει την επίδραση των συνθηκών υγρασίας κατά τη διάρκεια κύκλων ύγρυνσης-ξήρανσης, στην αντοχή μαλακού αργιλώδους εδάφους, σταθεροποιημένου με ανακυκλωμένο μπασανίτη και μίγμα τσιμέντου σκωρίας. Είναι γνωστό ότι ο ανακυκλωμένος μπασανίτης μπορεί να επιτύχει αποδεκτά επίπεδα αντοχής και ακαμψίας υπό ξηρές συνθήκες, αλλά σε υγρό περιβάλλον χρειάζεται διερεύνηση καθώς ο μπασανίτης είναι διαλυτός στο νερό. Οι γυψοσανίδες είναι ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά κατασκευής, περίπου 1,6 - 1.700.000 τόνοι αποβλήτων από γυψοσανίδες παράγονται κάθε χρόνο στην Ιαπωνία. Οι κίνδυνοι μόλυνσης αυξάνουν όταν τα απόβλητα αποστέλλονται σε χώρους υγειονομικής ταφής, λόγω της εκπομπής του υδρόθειου [38].

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη είναι έδαφος Καολίνη, τσιμέντο σκωρίας υψικαμίνου τύπου-B και ανακυκλωμένος μπασανίτης. Το χώμα κατατάσσεται ως άργιλος με υψηλή πλαστικότητα CH. Το τσιμέντο σκωρίας υψικαμίνου τύπου-B παράγεται κυρίως από τα υλικά των αποβλήτων και παραπροϊόντων τσιμέντου Portland και έχει περιεκτικότητα σε σκωρία 30 - 60%.

Ο κύριος λόγος για τη χρήση τσιμέντου είναι για να αποφευχθεί η διαλυτότητα του ανακυκλωμένου μπασανίτη, αναπτύσσοντας στερεοποίηση του μείγματος. Επιπλέον το τσιμέντο βελτιώνει την ανθεκτικότητα του σταθεροποιημένου εδάφους και μειώνει την πιθανότητα έκπλυσης των βαρέων μετάλλων του ανακυκλωμένου μπασανίτη.

Τα θρυμματισμένα απόβλητα γύψου κοσκινίστηκαν για να απομακρυνθούν οποιαδήποτε στερεά τμήματα και χαρτί. Η σκόνη θερμάνθηκε για ορισμένο χρονικό διάστημα σε καθορισμένη θερμοκρασία για να παραχθεί ημιένυδρο θειικό ασβέστιο δηλαδή ο ανακυκλωμένος μπασανίτης. Χρησιμοποιήθηκαν δείγματα με τέσσερα διαφορετικά περιεχόμενα από 0 έως 20% ανακυκλωμένου γύψου με διαφορετικές ποσότητες τσιμέντου και προσδιορίστηκε η θλιπτική αντοχή, η απώλεια βάρους εδάφους και η μεταβολή του όγκου πριν υποβληθούν στους κύκλους ύγρυνσης-ξήρανσης και ψύξης-απόψυξης. Χρησιμοποιήθηκαν δύο αναλογίες τσιμέντου-χώματος (C / S) 5% και 10%, με βάση το ξηρό βάρος του εδάφους και για κάθε αναλογία τσιμέντου-εδάφους χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις διαφορετικές αναλογίες μπασανίτη-εδάφους (B / S), 0, 10, 20 και 40% [38].

Από τα αποτελέσματα (Πίνακας 3.2) προέκυψε ότι τόσο η θλιπτική αντοχή όσο και η αντοχή διαβροχής-ξήρανσης βελτιώθηκαν με την προσθήκη των μιγμάτων μπασανίτη-τσιμέντου και αυξάνονται όσο αυξάνεται και ο λόγος μπασανίτη-εδάφους. Η επίδραση της αναλογίας μπασανίτη-εδάφους για την ενίσχυση της αντοχής βρέθηκε να είναι πιο σημαντική στην περίπτωση των δειγμάτων με αναλογία τσιμέντου-εδάφους 5% σε σύγκριση με 10%. Η αντοχή των επεξεργασμένων και μη επεξεργασμένων δειγμάτων εδάφους μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των κύκλων διαβροχής-ξήρανσης κατά μέσο όρο 10-15%. Αυξάνοντας τον αριθμό των κύκλων ύγρυνσης-ξήρανσης υπήρξε μείωση στην αντοχή μέχρι τον τρίτο κύκλο, ενώ μετά, η αύξηση του αριθμού των κύκλων δεν είχε καμία επίδραση. Οι κύκλοι ύγρυνσης- ξήρανσης δεν είχαν σημαντική επίδραση στην περιεκτικότητα σε νερό, το ξηρό βάρος ανά μονάδα ή την μεταβολή του όγκου για το σταθεροποιημένο έδαφος [38].

Number of wetting–drying cycles, ( <i>n</i> )	Ultimate compressive strength, (kPa) Bassanite–soil ratio (B/S), (%)							
	Cement–soil ratio ( <i>C/S</i> =5%)				Cement–soil ratio ( <i>C/S</i> =10%)			
	0%	10%	20%	40%	0%	10%	20%	40%
0	55	58	70	131	150	100	155	255
1	54	50	74	130	125	92	126	230
3	56	57	74	75	130	85	126	220
5	55	58	67	113	120	90	123	240

Πίνακας 3.2 Θλιπτική αντοχή των μειγμάτων σε σχέση και με τους κύκλους διαβροχής-ξηρανσης [38].

Το 2014 οι **M. Malekzadeh** και **H.Bilsel** έκαναν μία εργασία χρησιμοποιώντας για σταθεροποίηση εδάφους, τέφρα από το φύκι *Posidonia oceanica*. Η *Posidonia oceanica* (PO) είναι το φύκι που βρίσκεται σε περισσότερη αφθονία στη Μεσόγειο καλύπτοντας περίπου 40,000 km<sup>2</sup> του πυθμένα της.

Στο νησί της Κύπρου όπου διεξήχθη η έρευνα γίνονται σταθεροποιήσεις εδαφών με παραδοσιακά πρόσθετα (ασβέστη, τσιμέντο κ.α.) Ωστόσο, υπάρχει ανάγκη για νέες μεθόδους επεξεργασίας που χρησιμοποιούν ανακυκλωμένα υλικά, καθώς το νησί καλύπτεται σε πολλά μέρη με εδάφη που περιέχουν μεγάλες ποσότητες σε διαλυτά θειικά άλατα που εμποδίζουν την αποτελεσματική σταθεροποίηση με άσβεστο [32].

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές στο φυσικό έδαφος όσων αφορά τα όρια Atterberg, τη γραμμική συρρίκνωση, την κοκκομετρική ανάλυση, τη μονοδιάστατη διόγκωση, και την ανεμπόδιση θλιπτική αντοχή (UCS) σε μίγματα εδάφους σταθεροποιημένα με 5% και 10% τέφρα από *Posidonia oceanica*. Το έδαφος που χρησιμοποιήθηκε κατατάσσεται ως άργιλος με υψηλή πλαστικότητα (CH). Το φύκι PO συλλέχθηκε από την ανατολική ακτή της Βόρειας Κύπρου, και αφού πλύθηκε αρκετές φορές για να απομακρυνθούν τα διαλυτά άλατα, ξηράνθηκε στον αέρα και συνθλίφτηκε σε μικρά τεμάχια. Η τέφρα λαμβάνεται με καύση σε κλίβανο στους 550°C για 24 ώρες και αλέθεται ώστε να χρησιμοποιηθεί σε μορφή σκόνης. Στα μίγματα εδάφους προστέθηκε 5% και 10% τέφρα από *Posidonia oceanica* [39].

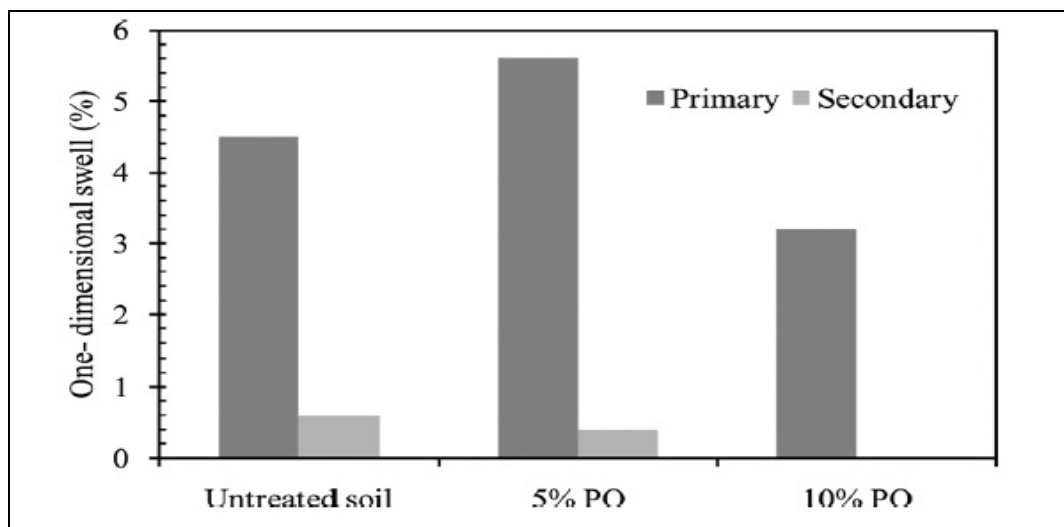
Από τα πειράματα παρατηρήθηκε ότι με προσθήκη 5% PO τέφρας η κοκκομετρική κατανομή παραμένει σχεδόν ίδια. Ενώ με 10% PO τέφρας σημειώθηκε σημαντική μείωση 48% στα κλάσματα αργίλου και σημαντική αύξηση σε ιλύ 42% και σε άμμο 50%. Έτσι αλλάζει και η ταξινόμηση του δείγματος από άργιλο υψηλής πλαστικότητας (CH) σε ιλύ με υψηλή πλαστικότητα (MH). Αυτό μπορεί να αποδοθεί σε μια πιθανή ποζολανική αντίδραση μεταξύ του εδάφους και της τέφρας PO.

Από τα όρια Atterberg προκύπτει ότι με 5% PO τέφρα ο δείκτης πλαστικότητας παραμένει σχεδόν ίδιος ενώ με 10% PO τέφρα μειώνεται αισθητά κατά 18%. Η μείωση του δείκτη πλαστικότητας τεκμηριώνει και το παραπάνω συμπέρασμα σχετικά με τις αλλαγές του μεγέθους των σωματιδίων.

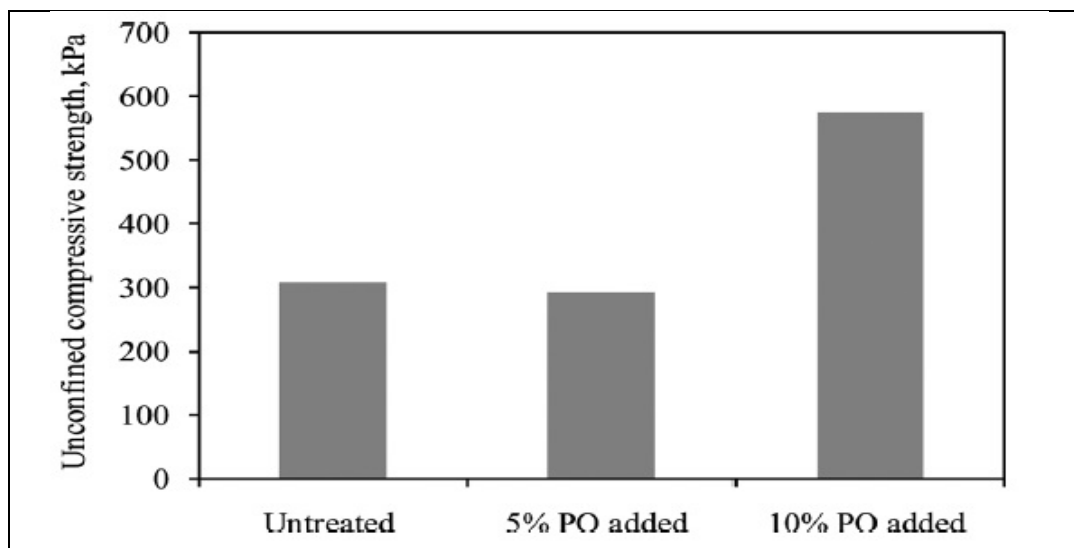
Η δοκιμή μονοδιάστατης διόγκωσης έδειξε ότι με 5% PO τέφρα η αρχική διόγκωση παρέμεινε σχεδόν η ίδια με το μη επεξεργασμένο έδαφος, ενώ ο χρόνος για να ολοκληρωθεί μειώθηκε κατά 10 φορές.

Αυτή η σημαντική αύξηση στο ρυθμό διόγκωσης μπορεί να αποδοθεί στην αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων και μια επακόλουθη αύξηση του πορώδους. Με 10% PO τέφρα υπάρχει μια αισθητή μείωση τόσο της αρχικής όσο και της δευτερεύουσας διόγκωσης σε σύγκριση με τα μη επεξεργασμένα δείγματα. Αυτές οι παρατηρήσεις επικυρώνουν περαιτέρω ότι η αύξηση των μεγεθών των σωματιδίων οφείλεται στην ποζολανική αντίδραση PO τέφρας και εδάφους [39].

Με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών σε ανεμπόδιση θλιπτική αντοχή, με 5% PO τέφρα η ανεμπόδιση θλιπτική αντοχή είναι σχεδόν η ίδια με το μη επεξεργασμένο δείγμα, ενώ με προσθήκη 10% PO τέφρας υπάρχει σημαντική βελτίωση με αύξηση 100% (Σχήμα 3.15). Τα ευρήματα αυτά μπορεί επίσης να αποδοθούν στην αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων και τη μείωση στην πλαστικότητα λόγω της ποζολανικής αντίδρασης μεταξύ της τέφρας PO και του εδάφους [39].



Σχήμα 3.14 Σχέση μεταξύ μονοδιάστατης διόγκωσης και περιεκτικότητας σε τέφρα PO [39].



Σχήμα 3.15 Σχέση μεταξύ ανεμπόδισης θλιπτικής αντοχής και περιεκτικότητας σε τέφρα PO [39].

## 4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 4.1 Υλικά και σχεδιασμός πηλοκονιαμάτων

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη σταθεροποίησης πηλοκονιαμάτων με την προσθήκη υλικών χαμηλής ενσωματωμένης ενέργειας. Απώτερος σκοπός είναι η εμπάθυνση της γνώσης για την πιθανή δημιουργία οικοδομικών υλικών προς μια πιο βιώσιμη κατεύθυνση. Ήδη έχει καταγραφεί βιβλιογραφικά η δυνατότητα σταθεροποίησης πηλοκονιαμάτων και γενικότερα πηλών με χρήση τσιμέντου, με ενθαρρυντικά αποτελέσματα ως προς τις μηχανικές αντοχές και την διάβρωση από το νερό, ωστόσο κύριο μειονέκτημα είναι ο εγκλωβισμός υγρασίας λόγω χαμηλής διαπερατότητας [40].

Με κριτήριο την αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων οι οποίες μπορεί να υπολογιστούν με τη μέθοδο της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής, αποτιμώντας όλα τα στάδια ζωής ενός υλικού, το τσιμέντο παρουσιάζει αθροιστικά μεγάλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις (αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη, οξίνιση, ευτροφισμό, χειμερινή αιθαλομίχλη) [41].

Η φυσική υδραυλική άσβεστος αντίθετα με το τσιμέντο, παράγεται σε πολύ χαμηλότερες θερμοκρασίες, παρέχοντας όμως σαν κονία υψηλό ποσοστό υδραυλικών και αερικών φάσεων, συνεπώς είναι πιθανό να μπορεί να αναδειχτεί σε κατάλληλο σταθεροποιητή για πηλοκονιάματα, συνδυάζοντας ένα προφίλ πιο φιλικό προς το περιβάλλον.

Η σκωρία κάδων χαλυβουργίας αποτελεί ένα σημαντικό ποσοστό παραπροϊόντος της βιομηχανίας μετάλλων και αποτελεί παραπροϊόν και σε βιομηχανίες στην χώρα μας. Δεν έχει μελετηθεί ιδιαίτερα βιβλιογραφικά παρόλα αυτά έχει επισημανθεί ότι μπορεί να περιέχει ικανά ποσοστά υδραυλικών φάσεων όπως αργιλικό διασβέστιο και αργιλικό τριασβέστιο. Για αυτό τον λόγο ίσως μπορεί να αποτελέσει μία καλή εναλλακτική για την σταθεροποίηση πηλοκονιαμάτων [42].

Στην παρούσα εργασία επομένως, μελετήθηκε η σταθεροποίηση πηλοκονιαμάτων με προσθήκη στην μια περίπτωση φυσική υδραυλική άσβεστος και στην άλλη περίπτωση σκωρία κάδων χαλυβουργίας. Συγκεκριμένα οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι εξής: πηλός, άμμος, φυσική υδραυλική άσβεστος και σκωρία κάδων χαλυβουργίας.

Ο πηλός προέρχεται από κεραμάρια της Β. Ελλάδας, είναι αλεσμένος και όμοιος με αυτόν που χρησιμοποιείται στην παραγωγή οπτόπλινθων, αν και λίγο πιο λεπτόκοκκος, με μέγιστο κόκκο <2mm.

Το αδρανές που επιλέχθηκε είναι φυσικής προέλευσης, πυριτική άμμος 0-4mm, πλυμένη και κοσκινισμένη, προϊόν αποθέσεων του ποταμού Αξιού.

Η φυσική υδραυλική άσβεστος NHL 3.5 (Chaux Blanche Naturelle) είναι χρώματος λευκού, κατάλληλη για παρασκευή κονιαμάτων, επιχρισμάτων και ενεμάτων. Με κριτήριο το βαθμό υδραυλικότητας, το προϊόν κατατάσσεται σε υδραυλική άσβεστος μέσου βαθμού υδραυλικότητας.

Η σκωρία κάδων χαλυβουργίας αποτελεί μη μεταλλικό, ορυκτό παραπροϊόν και παράγεται κατά τη δευτερογενή επεξεργασία του χάλυβα στους κάδους χύτευσης, διαδικασία που ακολουθεί μετά την έξοδο του μετάλλου από τον ηλεκτροκλίβανο.



Συγκεκριμένα, έγινε χρήση προϊόντος με κοκκομετρία 0/75μm, που προέρχεται εξ' ολοκλήρου από ανακύκλωση και είναι χρώματος υπόλευκου-γκρι. Το προϊόν προκύπτει μετά από διαδοχικές θραύσεις, αποσιδηρώσεις και αεροταξινομήσεις της σκωρίας κάδων χαλυβουργίας και συνίσταται κυρίως σε οξειδίο του ασβεστίου, υδράσβεστο, οξειδίο του μαγνησίου και πυριτικά διασβέστια.

Το νερό που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή των πηλοκονιαμάτων ήταν καθαρό χωρίς επιβλαβείς προσμίξεις.

Προκειμένου να μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίο τα πρόσθετα (φυσική υδραυλική άσβεστος και σκωρία κάδων χαλυβουργίας) επηρεάζουν τη σταθεροποίηση του πηλού, κρατήθηκε σταθερός ο λόγος πηλού-αδρανούς σε όλες τις συνθέσεις των πηλοκονιαμάτων.

Στα κονιάματα χρησιμοποιούνται αδρανή με μέγεθος κόκκων μικρότερο από 5mm, από την έρευνα στη βιβλιογραφία προέκυψε ότι η άμμος προστίθεται στον πηλό σε αναλογία έως 40%, κυρίως για να μειώσει την συστολή ξήρανσης, ωστόσο, σε μεγάλες τιμές μειώνει αρκετά τις αντοχές και έτσι επιλέχθηκε μία μέση τιμή στο 20% επί του πηλού κατά βάρος [5], [43].

Με αναλογία πηλού-άμμου σταθερή (80-20) ως βάση για όλα τα μείγματα προέκυψαν πέντε συνθέσεις πηλοκονιαμάτων (Πίνακας 4.1).

Η πρώτη σύνθεση (1) CS, περιέχει μόνο πηλό και άμμο σε ποσοστά 80% και 20% αντίστοιχα κ.β. Η σύνθεση αυτή αποτελεί τη σύνθεση αναφοράς, ώστε να έχουμε ένα μη σταθεροποιημένο πηλοκονίαμα ως μέτρο σύγκρισης. Ακολουθούν δύο συνθέσεις, (2) NHL20CS και (3) NHL25CS, με προσθήκη φυσικής υδραυλικής ασβέστου σε ποσοστά 20% και 25% αντίστοιχα, επί της βάσης πηλού-άμμου, και δύο συνθέσεις, (4)SL20CS, (5)SL25CS, με προσθήκη σκωρίας κάδων χαλυβουργίας επί της βάσης πηλού-άμμου σε ποσοστά 20 και 25% κ.β. αντίστοιχα. Η ιδανική ποσότητα του νερού για κάθε σύνθεση προσδιορίστηκε πειραματικά με δοκιμές εξάπλωσης νωπών κονιαμάτων με βάση την επιθυμητή τιμή της εξάπλωσης. Όπως περιγράφεται στη συνέχεια σύμφωνα με την βιβλιογραφία (Γ. Μπέη 2004) η επιθυμητή τιμή εξάπλωσης για πηλοκονιάματα ορίστηκε στα 14cm.

Σύνθεση	Κωδικός	Πηλός	Άμμος 0-4mm	NHL 3.5	Σ.Χ.	Νερό
(1)	CS	80%	20%	-	-	19.5%
(2)	NHL20CS	64%	16%	20%	-	26.2%
(3)	NHL25CS	60%	15%	25%	-	27.9%
(4)	SL20CS	64%	16%	-	20%	24%
(5)	SL25CS	60%	15%	-	25%	24.8%

Πίνακας 4.1 Συνθέσεις πηλοκονιαμάτων με τις αναλογίες των πρώτων υλών κατά βάρος.

## 4.2 Τεχνικές αποτίμησης των τεχνικών χαρακτηριστικών των πρώτων υλών

### 4.2.1 Κοκκομετρική ανάλυση άμμου με κοσκίνισμα



Εικόνα 4.1 Διάταξη κοσκίνων.



Εικόνα 4.2 Ζύγιση παραμένουσας ποσότητας.

Επειδή στο εργαστήριο η εξέταση μιας μεγάλης ποσότητας δείγματος είναι πρακτικά δύσκολη, από το δείγμα των αδρανών που προσκομίζεται επιλέγεται μικρότερη ποσότητα, αντιπροσωπευτική του όλου δείγματος. Η επιλογή και μείωση του αντιπροσωπευτικού δείγματος πραγματοποιήθηκε μέσω τετραμερισμού σύμφωνα με τα πρότυπα EN 932-1:1999 και EN 932-2:1999 [44], [45].

Κατά την δοκιμή της κοκκομετρικής ανάλυσης γίνεται η κατανομή ενός υλικού, σε κλάσματα μεγέθους, μέσω της διέλευσής του από κόσκινα με μειούμενη διάμετρο. Η παραμένουσα ποσότητα του υλικού σε κάθε κόσκινο ζυγίζεται και έτσι είναι δυνατόν να υπολογιστεί η κατανομή μεγέθους σωματιδίων για το δείγμα. Το προς εξέταση δείγμα τοποθετείται στο κόσκινο με τη μεγαλύτερη οπή από το οποίο, ανάλογα με το είδος του δείγματος, διέρχεται όλη η ποσότητα. Στη συνέχεια με οριζόντιες και κάθετες κινήσεις, που περιοδικά συνοδεύονται με προσεκτικές ανακινήσεις του δείγματος, γίνεται το κοσκίνισμα του υλικού. Το υλικό που διέρχεται από το κάθε κόσκινο συλλέγεται σε κατάλληλους πλατύστομους συλλέκτες. Το κοσκίνισμα θεωρείται ότι έληξε όταν τοποθετώντας ένα άσπρο χαρτί κάτω από το κόσκινο διαπιστώνεται ότι δεν διέρχεται άλλο υλικό.

Η διαδικασία του κοσκίνισματος, όπως αυτή περιγράφεται παραπάνω, μπορεί να γίνει και με ειδικές μηχανές κοσκίνισματος. Στις συσκευές αυτές τα κόσκινα τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο με το κόσκινο μεγαλύτερης οπής στην κορυφή και τον υποδοχέα συλλογής του λεπτότερου υλικού στον πάτο. Η κοκκομετρική ανάλυση της άμμου στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο EN 933-1 κατά το οποίο χρησιμοποιήθηκε δείγμα 500g αφού πρώτα είχε ξηρανθεί σε πυραντήριο στους 110°C [46].

Η ποσότητα του υλικού που παραμένει σε κάθε κόσκινο καλείται συγκρατούμενη και αυτή που πέρασε διερχόμενη. Τα συγκρατούμενα κλάσματα σε κάθε κόσκινο ζυγίζονται με ακρίβεια και στη συνέχεια μέσω υπολογισμών προσδιορίζεται η διερχόμενη μάζα και το ποσοστό (%) του διερχόμενου υλικού. Ο υπολογισμός του % διερχόμενου υλικού στο κόσκινο  $i$  δίνεται από τη σχέση:

**διερχόμενο % στο κόσκινο  $i$  = (διερχόμενο στο κόσκινο  $i$  / μάζα δείγματος) x 100.**

Τα αποτελέσματα αποτυπώνονται σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα όπου στον οριζόντιο άξονα  $x$  εμφανίζεται η διάμετρος της οπής των κοσκίνων και στον κατακόρυφο άξονα  $y$  το ποσοστό του διερχόμενου υλικού. Ο οριζόντιος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα δεδομένου ότι είναι επιθυμητή η ανάπτυξη της περιοχής των μικρών διαμέτρων. Η συνένωση των σημείων του διαγράμματος δίνει μια πολυγωνική γραμμή που καλείται κοκκομετρική καμπύλη [46].

Το υλικό που συγκεντρώνεται κάτω από το κόσκινο των 63 $\mu$ m χαρακτηρίζεται ως παιπάλη και αναγόμενη στην αρχική μάζα του υλικού εκφράζεται ως ποσοστό επί τοις εκατό. Η παιπάλη μπορεί να είναι άργιλος ή σκόνη από το ίδιο το υλικό και μπορεί να βρίσκεται, είτε προσκολλημένη στους κόκκους του υλικού, είτε σχηματίζοντας συσσωματώματα, επηρεάζοντας τις τελικές αντοχές των κονιαμάτων. Για αυτό τον λόγο είναι καλό σε συνήθη κονιάματα να μην υπερβαίνει το 3%.

#### 4.2.2 Όρια συνεκτικότητας (Atterberg) πηλού

Ένα έδαφος είναι πλαστικό, όταν τα μικροτεμαχίδια του βρίσκονται κυρίως στην κοκκομετρική περιοχή της αργίλου ή της ιλύος αποτελούνται από ορυκτά που έχουν την ικανότητα να προσλαμβάνουν νερό. Η περιεκτικότητα σε νερό παίζει αποφασιστικό ρόλο στις ιδιότητες αντοχής και στερεότητας του υλικού. Στα κοκκώδη εδάφη η μεταβολή του περιεχόμενου νερού παίζει μικρό ρόλο στην αντοχή του, αλλά στα συνεκτικά εδάφη μπορεί να προκαλέσει σημαντικές αλλαγές. Η συμπεριφορά των αργιλικών εδαφών σε σχέση με την περιεκτικότητά τους σε νερό προκύπτει από τον προσδιορισμό των ορίων Atterberg [47].

**Όριο υδαρότητας (LL):** Ορίζεται ως η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό κατά την χρονική στιγμή που το έδαφος μεταβαίνει από την πλαστική στην υδαρή (ρευστή) κατάσταση. Αυτό προσδιορίζεται με τη συσκευή CASAGRANDE σύμφωνα με τα πρότυπα AASHTO T-89/76, ASTM D-4318/83 [48], [49].

Η συσκευή CASAGRANDE πρέπει να επιθεωρείται για να διαπιστωθεί η καλή κατάσταση λειτουργίας της και ότι δεν έχει επέλθει φθορά λόγω μακράς χρήσης. Με τον μετρητή που υπάρχει στο πίσω μέρος του οργάνου χάραξης ρυθμίζουμε το ύψος από το οποίο θα πέφτει η μεταλλική κάψα, ώστε αυτό να είναι ακριβώς 1 cm πάνω από τη βάση. Στη συνέχεια σταθεροποιούμε την πλάκα ρύθμισης σφίγγοντας τους κοχλίες και ελέγχουμε την ρύθμιση περιστρέφοντας τον στρόφαλο μερικές φορές.

Από το δείγμα μας (~100g) απομακρύνονται με κοσκίνισμα όλοι οι κόκκοι που έχουν μέγεθος >0.4mm (κόσκινο No.40) και το υπόλοιπο μέρος ζυμώνεται με νερό ~15-20 cm<sup>3</sup>, ώστε να σχηματιστεί μία μαλακή μάζα. Ανακατεύουμε καλά με τη σπαθίδα μέχρις ότου κατανεμηθεί ομοιόμορφα το νερό και στη συνέχεια παίρνουμε μέρος της ομοιόμορφης πηκτής μάζας και την τοποθετούμε στο κύπελλο της συσκευής, πάνω από το σημείο που ακουμπά η μεταλλική κάψα τη βάση. Το υλικό απλώνεται έτσι ώστε το μέγιστο πάχος του να είναι 1 cm. Το εντός του κυπέλλου δείγμα διαιρείται με μια σταθερή διαδρομή του οργάνου χάραξης κατά μήκος της διαμέτρου που διέρχεται από το μέσο του στηρίγματος του κυπέλλου, έτσι ώστε να σχηματιστεί μία καθαρή και απότομη χαραγή καταλλήλων διαστάσεων.

Αν γυρίσουμε τώρα το στρόφαλο (δύο γύρους / sec) τότε η λεκάνη πέφτει ρυθμικά πάνω στο βάθρο του οργάνου μέχρις ότου η χαραγή κλείσει σε μήκος 12.7 mm περίπου. Έπειτα αναγράφεται ο αριθμός των κτύπων που χρειάστηκαν για να κλείσει η χαραγή και τη στιγμή αυτή από ένα μέρος του δείγματος προσδιορίζεται η περιεκτικότητα σε νερό. Για κάθε δείγμα διεξάγονται τρεις τουλάχιστον δοκιμές για διαφορετικές περιεκτικότητες νερού και για κτυπήματα >10 και <40.



Εικόνα 4.3 Συσσκευή Casagrande.



Εικόνα 4.4 Χαραγή .

Τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών μεταφέρονται σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα (αριθμός κτύπων σε λογαριθμική κλίμακα και περιεχόμενης υγρασίας σαν τετμημένη σε δεκαδική κλίμακα), όπου η σύνδεση των σημείων μας δίνει ευθεία γραμμή. Το όριο υδαρότητας LL τότε είναι η περιεκτικότητα σε νερό που προκύπτει από την τομή της ευθείας με την τεταγμένη των 25 κτύπων. Το όριο υδαρότητας αναφέρεται σε ακέραιες μονάδες [47].

**Όριο πλαστικότητας (PL).** Το όριο πλαστικότητας αντιστοιχεί στο χαμηλότερο ποσοστό υγρασίας στο οποίο το έδαφος μεταβαίνει από την πλαστική στην ημιστερεή κατάσταση και μπορεί να κυλινδρωθεί σε ραβδίσκο διαμέτρου 3 mm χωρίς αυτός να θραύεται (AASHO T-90/70, ASTM D-4318/83) [49], [50].

Αν η περιεκτικότητα του δείγματος σε νερό αρχίσει να ελαττώνεται τότε τα τεμαχίδια του εδάφους πλησιάζουν μεταξύ τους, το υλικό συρρικνώνεται και το έδαφος συμπυκνώνεται. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η συνοχή του εδάφους και συνεπώς η αντοχή του σε πίεση. Αν εξακολουθήσει να ελαττώνεται η υγρασία του, τότε εισέρχεται μέσα στους πόρους αέρας. Αν το ζυμώσουμε στο χέρι κόβεται σε μικρούς κυλίνδρους. Στο σημείο αυτό χάνει τις πλαστικές του ιδιότητες και προσδιορίζουμε την περιεκτικότητά του σε νερό κατά το όριο πλαστικότητας υλικού .

Λαμβάνεται ποσότητα εδάφους περίπου 20g από υλικό διερχόμενου από το κόσκινο No. 40. Το δείγμα αναμιγνύεται καλά με απεσταγμένο νερό μέχρι που η μάζα να καταστεί αρκετά πλαστική ώστε να μορφώνεται σε βώλο. Σαν δείγμα δοκιμής λαμβάνεται μέρος αυτού μάζας περίπου 8g. Η μάζα αυτή κυλινδρώνεται μεταξύ των δακτύλων και της σμυριδωμένης επιφάνειας με την απαιτούμενη πίεση ώστε να διαμορφωθεί σε ραβδίσκο ομοιόμορφου διαμέτρου σε όλο το μήκος του.

Όταν η διάμετρος του ραβδίσκου καταστεί 3mm, ο ραβδίσκος θραύεται ξανά σε έξι ή οκτώ τεμάχια. Συμπιέζονται τα τεμάχια μεταξύ τους προς ομοιόμορφη μάζα και επαναλαμβάνεται η κυλίνδρωση. Η εναλλαγή συνεχίζεται με κυλίνδρωση σε ραβδίσκο διαμέτρου 3mm, με συνένωση, με αναζύμωση και επανακυλίνδρωση, μέχρι που ο ραβδίσκος θρυμματισθεί με την απαιτούμενη για την κυλίνδρωση πίεση και το έδαφος δεν μπορεί πλέον να κυλινδρωθεί σε ραβδίσκο. Ο θρυμματισμός μπορεί να επέλθει όταν ο ραβδίσκος έχει διάμετρο μεγαλύτερη από 3mm. Αυτό πρέπει να θεωρηθεί ικανοποιητικό σημείο περατώσεως, με τον όρο ότι το έδαφος κυλινδρώθηκε προηγουμένως σε ραβδίσκο διαμέτρου 3mm [47].



Εικόνα 4.5, Εικόνα 4.6 Προετοιμασία και κυλίνδρωση, η σύγκριση γίνεται με μεταλλική ράβδο διαμέτρου 3mm.

Το όριο πλαστικότητας υπολογίζεται σαν την υγρασία που περιέχεται στους ραβδίσκους των 3 mm και προκύπτει από τον μέσο όρο τριών δοκιμών.

**Δείκτης πλαστικότητας PI:** Ορίζεται ως η περιοχή ανάμεσα στο όριο υδαρότητας και στο όριο πλαστικότητας ( $PI = LL - PL$ ), όπου το υλικό είναι εύπλαστο. Τα συνεκτικά εδάφη παρουσιάζουν διαφορετικό βαθμό πλαστικότητας, ο οποίος εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων τους (όσο πιο λεπτόκοκκο είναι το έδαφος, τόσο ο δείκτης πλαστικότητας είναι μεγαλύτερος) και από την πετρογραφική τους σύσταση. Με ελαττώμενη περιεκτικότητα σε νερό τα εδάφη αυτά μεταβαίνουν από τη στερεή διά μέσου της πλαστικής στην ημιστερεή κατάσταση.

Εξάιρεση αποτελούν οι εξής περιπτώσεις:

-Όταν το όριο υδαρότητας ή το όριο πλαστικότητας δεν μπορούν να προσδιοριστούν, αναφέρεται ο δείκτης πλαστικότητας σαν NP (μη πλαστικό).

-Όταν το έδαφος είναι εξαιρετικά αμμώδες, η δοκιμή για το όριο πλαστικότητας πρέπει να εκτελείται πριν από το όριο υδαρότητας.

Αν το όριο πλαστικότητας δεν μπορεί να προσδιοριστεί, αναφέρονται και το όριο υδαρότητας και το όριο πλαστικότητας σαν NP (μη πλαστικό).

-Όταν το όριο πλαστικότητας είναι ίσο ή μεγαλύτερο από το όριο υδαρότητας, αναφέρεται ο δείκτης πλαστικότητας σαν NP [47].

Από τα αποτελέσματα που θα προκύψουν ακολουθεί η κατάταξη του εδαφικού μας υλικού ανάλογα με τα συστήματα ταξινόμησης.

Τα συστήματα κατάταξης ή ταξινόμησης εξυπηρετούν τους εξής σκοπούς:

-Την κατάταξη των εδαφικών σχηματισμών σε κατηγορίες διαφορετικής μηχανικής συμπεριφοράς.

-Τη διαμόρφωση βάσεων δεδομένων για τη συσχέτιση φυσικών -μηχανικών παραμέτρων με τη συμπεριφορά και τη χρήση των εδαφικών υλικών.

-Τη λήψη ποσοτικών φυσικομηχανικών παραμέτρων για τη σχεδίαση έργων.

-Την καθιέρωση ενός κώδικα περιγραφής των εδαφικών σχηματισμών.

-Το συσχετισμό εμπειρικών δεδομένων με δεδομένα από το εκάστοτε μελετώμενο σχηματισμό.

-Την παροχή συστάσεων και οδηγιών για τη συμπεριφορά των εδαφικών υλικών στα τεχνικά έργα.

Έχουν προταθεί πολυάριθμα συστήματα κατάταξης στην συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το Ενιαίο σύστημα ταξινόμησης εδαφών (Unified Soil Classification System, USCS).

### 4.2.3 Κοκκομετρική διαβάθμιση πηλού(μέθοδος υλίου)

#### **Κοκκομετρική ανάλυση με αραιόμετρο**

Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για τον ποσοτικό προσδιορισμό της κατά μέγεθος κατανομής των κόκκων στα λεπτόκοκκα εδάφη. Για την ανάλυση αυτή χρησιμοποιείται αραιόμετρο (ή υδρόμετρο ή πυκνόμετρο) τύπου 152H ή 151H. Η κλίμακά του έχει υποδιαιρέσεις από 0- 60 g/l και η βαθμονόμησή του έγινε με βάση την παραδοχή ότι το αποσταγμένο νερό έχει ειδικό βάρος 1,000 στους 20°C και ότι το ειδικό βάρος του εδάφους που βρίσκεται σε διασπορά είναι 2,65 g/cm<sup>3</sup> [47].

Το αραιόμετρο μετράει την πυκνότητα του εν αιώρηση στερεού υλικού μέσα σ' ένα υγρό μέσο. Αποτελείται από ένα κυλινδρικό σώμα και ένα στέλεχος. Το στέλεχος έχει υποδιαιρέσεις που οι τιμές τους αυξάνονται από το ανώτερο προς το κατώτερο τμήμα του στελέχους.

Όταν η συγκέντρωση του εν αιώρηση υλικού είναι μεγάλη, τότε το στέλεχος του αραιόμετρου συναντά την επιφάνεια του νερού μέσα στον ογκομετρικό κύλινδρο στο κατώτερο τμήμα του, δηλαδή δίνει μεγάλες τιμές πυκνότητας. Αντίθετα όταν η συγκέντρωση είναι μικρή τότε το στέλεχος βυθίζεται μέσα στο αιώρημα και αυτό μας δείχνει μικρές τιμές πυκνότητας.

Η ταχύτητα καθίζησης των κόκκων μέσα στο νερό του ογκομετρικού κυλίνδρου εξαρτάται από το μέγεθος τους. Οι μεγάλοι κόκκοι θα καθιζάνουν στο πυθμένα του κυλίνδρου πρώτοι και οι μικροί τελευταίοι. Άρα οι διαφορές που παρατηρούνται κατά τη μέτρηση της πυκνότητας του αιωρήματος σε ορισμένα χρονικά διαστήματα δίνουν την καθίζηση των αιωρούμενων κόκκων και τελικά αποκαλύπτουν το μέγεθος τους [47].

Το δείγμα που χρησιμοποιείται για τη δοκιμή αυτή περιλαμβάνει όλο το υλικό που διέρχεται από το κόσκινο Νο. 10 (2mm). Η ποσότητά του ανέρχεται περίπου στα 50g για τα περισσότερα εδάφη ενώ για τα αμμώδη εδάφη ανέρχεται στα 100g.



Εικόνα 4.7 Διάλυση σε πολυφωσφορικό νάτριο.



Εικόνα 4.8 Ογκομετρικός κύλινδρος με ειδικό πώμα πριν την ανατάραξη.

Ο προσδιορισμός γίνεται σύμφωνα με τα πρότυπα AASHO T-88/78, ASTM D-422/72, [51], [52] και είναι ο ακόλουθος κατά βήματα:

-Μια μικρή ποσότητα δείγματος, περίπου 100g από το κλάσμα του υλικού που διέρχεται από το κόσκινο Νο. 10, χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της φυσικής του υγρασίας.

-Στη συνέχεια το δείγμα τοποθετείται σε ποτήρι των 600 ml και καλύπτεται με 250ml από το έτοιμο διάλυμα του παράγοντα διασποράς που έχει επιλεγεί (πολυφωσφορικό νάτριο  $\text{Na}_{12}\text{P}_{10}\text{O}_{31}$ , 21.6 g/l). Αναδεύεται καλά με γυάλινη ράβδο και αφήνεται να διαβραχεί για 12 τουλάχιστον ώρες για την αποσυσσωμάτωση των κόκκων (Εικόνα 4.7).

-Το περιεχόμενο του ποτηριού μεταφέρεται με επίπλυση μέσα σε ένα κύπελλο διασποράς, προστίθεται απεσταγμένο νερό και αναδεύεται με μηχανική συσκευή ανακίνησης (mixer) για 1 λεπτό ώστε να επιτευχθεί διασπορά.

-Το ομοιογενές αιώρημα μεταφέρεται σε γυάλινο ογκομετρικό κύλινδρο όπου προστίθεται απεσταγμένο νερό μέχρι την ογκομετρική χαραγή των 1000 ml και αναταράσσεται με τα χέρια επί 1 min αφού φραχτεί η ανοικτή του πλευρά με ειδικό πώμα (Εικόνα 4.8).



Εικόνα 4.9 Βύθιση αραιομέτρου.



Εικόνα 4.10 Συγκράτηση υλικού από κόκκινο σε ειδικό φίλτρο με επίπλυση.

-Με το τέλος της αναταράξεως τίθεται σε λειτουργία το χρονόμετρο και διαβάζονται οι ενδείξεις στην βαθμονομημένη κλίμακα του αραιομέτρου με προσέγγιση 0,5 g/l των 1, 2, 5, 30, 60, 250 και 1440 min από την έναρξη της κατακάθισης. Αμέσως μετά από κάθε ανάγνωση του αραιομέτρου μετράται η θερμοκρασία του εδαφικού αιωρήματος με τη χρήση υδραργυρικού θερμομέτρου.

-Μετά το τέλος κάθε ανάγνωσης, το αραιόμετρο απομακρύνεται προσεκτικά από το εδαφικό αιώρημα και τοποθετείται με περιστροφική κίνηση μέσα σε ογκομετρικό κύλινδρο γεμάτο απεσταγμένο νερό. Περίπου 30 sec πριν την επόμενη ανάγνωση, το αραιόμετρο από το καθαρό νερό βυθίζεται αργά μέσα στο εδαφικό αιώρημα έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η ακινητοποίησή του πριν από τον καθορισμένο χρόνο αναγνώσεως(Εικόνα 4.9).

-Μετά την τελική ανάγνωση του αραιομέτρου, το αιώρημα πλένεται επάνω σε κόσκινο No. 200. Το κλάσμα που συγκρατείται στο κόσκινο No. 200 ξηραίνεται και εκτελείται κοκκομετρική ανάλυση με τα κόσκινα : No. 40, και No. 200 (Εικόνα 4.10).



### Ποσοστό εδάφους στο αιώρημα

Οι ενδείξεις του υδρομέτρου που διαβάζονται σε θερμοκρασία διαφορετική των 20 °C διορθώνονται με πίνακες που εφαρμόζονται για τους διάφορους παράγοντες διασποράς, για τις αποκλίσεις της θερμοκρασίας και για το ύψος του μηνίσκου επάνω στο στέλεχος του υδρόμετρου.

Το ποσοστό (%) του εδάφους που βρίσκεται σε μορφή αιωρήματος και παρέχεται από τις διάφορες διορθωμένες αναγνώσεις του υδρομέτρου, εξαρτάται από την ποσότητα και το ειδικό βάρος του εδάφους που βρίσκεται σε διασπορά.

Το ποσοστό του εδάφους που παραμένει σαν αιώρημα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$P = \frac{R \cdot a}{W_s} 100(\%)$$

Όπου

**P** = ποσοστό % του αρχικού δείγματος εδάφους, που αναμίχθηκε και παραμένει σαν αιώρημα,

**R** = διορθωμένη ένδειξη του υδρομέτρου,

**W<sub>s</sub>** = βάρος του αρχικού δείγματος του εδάφους ελαττωμένο κατά την υγροσκοπική του υγρασία,

**a** = σταθερά που εξαρτάται από την πυκνότητα του αιωρήματος και δίνεται από πίνακα (για  $\gamma_s = 2.65 \rightarrow a = 1.00$ ).

Για τη μετατροπή των % ποσοστών του «εν αιωρήσει» εδάφους σε ποσοστό (%) του ολικού προς εξέταση δείγματος, που περιλαμβάνει και το συγκρατούμενο στο κόσκινο No. 10 κλάσμα, το ποσοστό του αρχικού δείγματος που παραμένει σε μορφή αιωρήματος πολλαπλασιάζεται με την σχέση:  $(100 - \text{ποσοστό \% συγκρατούμενο επί του κόσκινου No. 10}) / 100$  [47].

### Διάμετρος των κόκκων εδάφους που βρίσκεται σε μορφή αιωρήματος

Η μέγιστη διάμετρος  $d_0$  των κόκκων που βρίσκονται σε αιώρημα που αντιστοιχεί σε κάποιο ποσοστό παρεχόμενο από αναγνώσεις του υδρομέτρου, υπολογίζεται με την εφαρμογή του **νόμου του Stokes**:

$$d_0 = \sqrt{\frac{30 n l}{980 (G - G1) T}}$$

Όπου

**d<sub>0</sub>**: η μέγιστη διάμετρος σε mm

**n**: συντελεστής ιξώδους του μέσου διασποράς (νερό) που μεταβάλλεται ανάλογα με τη θερμοκρασία του αιωρήματος (0,01005 Poises στους 20 °C)

**l**: η απόσταση που διατρέχουν κατά την καθίζηση οι κόκκοι του εδάφους σε μια ορισμένη χρονική περίοδο (θεωρείται σταθερή και ίση προς 17,5 cm)

**T**: ο χρόνος σε min περιόδου καθιζήσεως

**G**: το ειδικό βάρος των κόκκων του εδάφους ( $\gamma_s = 2.65$ )

**G1**: ειδικό βάρος του μέσου διασποράς ( $\gamma_w = 1$ )

Η μέγιστη διάμετρος των κόκκων στο αιώρημα κάτω από δεδομένες συνθήκες, που αντιστοιχούν σε καθορισμένες περιόδους καθιζήσεων δίνονται στον [Πίνακα 4.2](#).

Χρόνος (min)	Μέγιστη διάμετρος κόκκων (mm)
1	0.058
2	0.040
5	0.026
15	0.015
30	0.010
60	0.0074
250	0.0036
1440	0.0015

Πίνακας 4.2 Μέγιστη διάμετρος κόκκων σε αιώρημα κάτω από τις δεδομένες συνθήκες.

Οι διάμετροι των κόκκων διορθώνονται για συνθήκες διάφορες των παραδοχών σύμφωνα με τον τύπο:

$$d = d_0 \cdot K_L \cdot K_G \cdot K_n$$

όπου:

**d** : διορθωμένη διάμετρος κόκκων σε mm

**d<sub>0</sub>** : μέγιστη διάμετρος κόκκων υπολογιζόμενη από το νόμο του Stokes

**K<sub>L</sub>**: συντελεστής διορθώσεως σε συνάρτηση με την ανάγνωση του υδρόμετρου χωρίς την σύνθετη διόρθωση.

**K<sub>G</sub>**: συντελεστής διορθώσεως σε συνάρτηση με το ειδικό βάρος του εδάφους

**K<sub>n</sub>** : συντελεστής διορθώσεως σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία

Οι συντελεστές **K<sub>G</sub>** και **K<sub>n</sub>** είναι ανεξάρτητοι από το σχήμα και τη θέση του υδρόμετρου ενώ ο συντελεστής **K<sub>L</sub>** εξαρτάται από το υδρόμετρο. Οι παραπάνω συντελεστές λαμβάνονται από πίνακες.

Κατά την κοκκομετρική ανάλυση του υλικού που πλύθηκε στο κόσκινο No. 200, τα ποσοστά (%) του δείγματος που συγκρατούνται πάνω σε κάθε κόσκινο, υπολογίζονται δια διαιρέσεως του βάρους αυτών με το βάρος του εδάφους που υποβλήθηκε σε διασπορά και έχει ξηρανθεί σε κλίβανο και πολλαπλασιασμού επί 100.

Τα ποσοστά επί του συνολικού δείγματος δοκιμής που περιλαμβάνει και το συγκρατούμενο στο κόσκινο No. 10 κλάσμα υπολογίζονται δια πολλαπλασιασμού των πιο πάνω τιμών επί την σχέση:

(100 - ποσοστό % συγκρατούμενο στο κόσκινο No. 10) / 100. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα με τη μορφή κοκκομετρικής καμπύλης [47].

#### 4.2.4 Προσδιορισμός ολικών διαλυτών αλάτων πηλού

Η παρουσία διαλυτών αλάτων (χλωριόντα - θειικά - νιτρικά) στα δομικά υλικά κατά την πήξη και σκλήρυνση έχουν επιβλαβή δράση στη διατήρηση των επιθυμητών ιδιοτήτων τους. Στην περίπτωση των πρώτων υλών κρίθηκε σκόπιμο να γίνει έλεγχος του πηλού για διαλυτά άλατα καθώς δεν παράγεται με κάποιο πιστοποιημένο ευρωπαϊκό πρότυπο και συνεπώς θα μπορούσαν να υπάρχουν αποκλίσεις στα συστατικά του. Ο προσδιορισμός των ολικών διαλυτών αλάτων γίνεται σε υδατικό διάλυμα με αγωγιμομετρία, η μέθοδος στηρίζεται στο γεγονός ότι τα άλατα αυξάνουν την κινητικότητα στο νερό και συνεπώς το ποσό της αγωγιμότητας.



Εικόνα 4.11 Γενική διάταξη πειράματος αγωγιμομετρίας.

Για τον προσδιορισμό των διαλυτών αλάτων χρησιμοποιήθηκε το όργανο EC Meter B240 (Εικόνα 4.11) και εφαρμόστηκε το Ιταλικό πρότυπο Normal 13/83 [53].

Κατά το πρότυπο ακολουθείται η εξής διαδικασία: αρχικά ξηραίνεται μία ποσότητα πηλού μεγαλύτερη του 1g σε πυραντήριο στους  $110\pm 5^{\circ}\text{C}$  για 24 ώρες και έπειτα τοποθετείται σε ξηραντηρά για 1 ώρα μέχρι να κρυώσει. Στην συνέχεια ζυγίζεται  $100\pm 5\text{mg}$  του ξηρού δείγματος σε σκόνη, το οποίο τοποθετείται σε δοχείο πολυαιθυλενίου και προστίθενται 100ml απιονισμένου νερού. Το δοχείο κλείνει και γίνεται ανακίνηση του περιεχομένου ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Ένα δεύτερο δοχείο με 100ml απιονισμένου νερού λειτουργεί σαν αναφορά. Εικοσιτέσσερις ώρες μετά την παρασκευή μετράται η αγωγιμότητα του δείγματος που έχει καθιζάνει καθώς και η αγωγιμότητα στο δοχείο αναφοράς. Στον ακόλουθο τύπο ως **C** θεωρείται η διαφορά της αγωγιμότητας των δύο διαλυμάτων.

Οι τιμές εκφράζονται σε  $\mu\text{S}$  και ο προσδιορισμός της επί της εκατό περιεκτικότητας (**SST%**) του δείγματος σε διαλυτά άλατα δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\text{SST}\% = (\text{C} \times 6.88) / \text{m}$$

Όπου:

**C:** η αγωγιμότητα του προς εξέταση δείγματος σε  $\mu\text{S}$

**m:** η μάζα του προς εξέταση δείγματος σε mg

**6.88:** παίρνεται ως τιμή για την σταθερά της κυψέλης

#### 4.2.5 Έλεγχος παρουσίας οργανικού υλικού στον πηλό

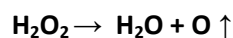
Τα εδάφη, συμπεριλαμβανομένων των πηλών, περιέχουν οργανικές ουσίες που προέρχονται από φυτικά ή ζωικά απόβλητα και υπολείμματα, σε διάφορα στάδια και βαθμό αποσύνθεσης.

Η παρουσία των οργανικών υλικών επηρεάζει πολλές φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους και μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στη μηχανική συμπεριφορά του, όπως μείωση της φέρουσας ικανότητάς του, αύξηση της συμπυκνωσιμότητας, ολίσθηση και συστολή, που οφείλεται στην απορρόφηση ή τη συγκράτηση υγρασίας [2].

Ενδεικτικό της ύπαρξης οργανικών υλικών στα εδάφη είναι το χαμηλό (όξινο) pH και ενίοτε η παρουσία θειικών. Η απομάκρυνση των οργανικών ουσιών γίνεται χημικά, χρησιμοποιώντας ισχυρούς οξειδωτικούς παράγοντες όπως το υποχλωριώδες νάτριο ( $\text{NaClO}$ ) και το υπεροξειδίο του υδρογόνου ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ).

Στην παρούσα εργασία παρά το γεγονός ότι η πρώτη ύλη του πηλού προορίζεται για βιομηχανική παραγωγή οπτόπλινθων και η συλλογή και επεξεργασία έγινε από συγκεκριμένη βιομηχανία κρίθηκε σκόπιμο ο πηλός να ελεγχθεί για ύπαρξη οργανικών υλικών. Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της οξείδωσης του υπεροξειδίου του υδρογόνου ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ).

Κατά τη μέθοδο της οξείδωσης του υπεροξειδίου του υδρογόνου, προστίθεται διάλυμα υπεροξειδίου του υδρογόνου σε εδαφικά δείγματα, το οποίο αντιδρά με το οργανικό υλικό προκαλώντας αναβρασμό που οφείλεται στην απελευθέρωση καθαρού οξυγόνου κατά την αντίδραση:



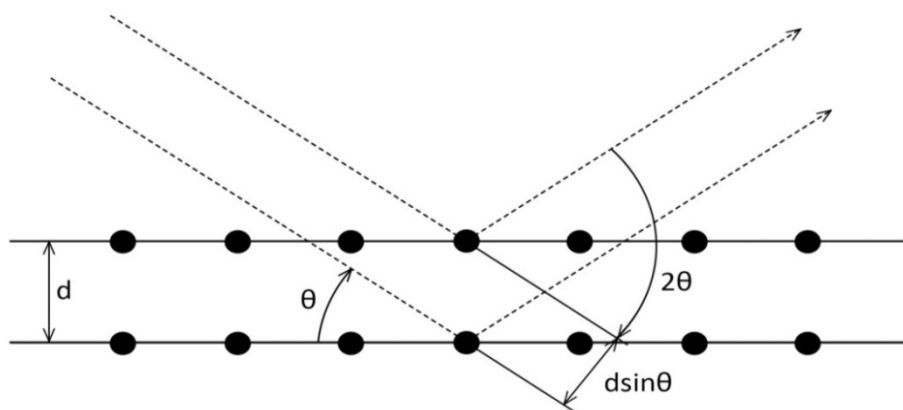
Στην πειραματική διαδικασία η μάζα του οργανικού υλικού στο έδαφος θεωρείται ίση με τη μάζα που εξατμίζεται και εκφράζεται ως ποσοστό της ξηρής μάζας του εδάφους που εξετάζεται.

#### 4.2.6 Ορυκτολογική ανάλυση πρώτων υλών με χρήση της περίθλασης ακτίνων X (XRD)

Η περίθλαση ακτίνων X αποτελεί μία από τις πλέον ικανές μεθόδους ως προς τον χαρακτηρισμό της κρυσταλλικής δομής και την ταυτοποίηση των ενώσεων που παρουσιάζονται στα υπό εξέταση δείγματα. Η χρήση της μεθόδου σε δομικά υλικά αποκαλύπτει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την κρυσταλλική δομή, το μέγεθος των κρυστάλλων και τις μικροσκοπικές καταπονήσεις. Από την εξέταση κονιαμάτων και πρώτων υλών ουσιαστικά λαμβάνονται ποιοτικά αποτελέσματα ενώ σε ένα μικρό βαθμό μπορεί να διεξαχθεί και ποσοτική ανάλυση των ορυκτολογικών φάσεων.

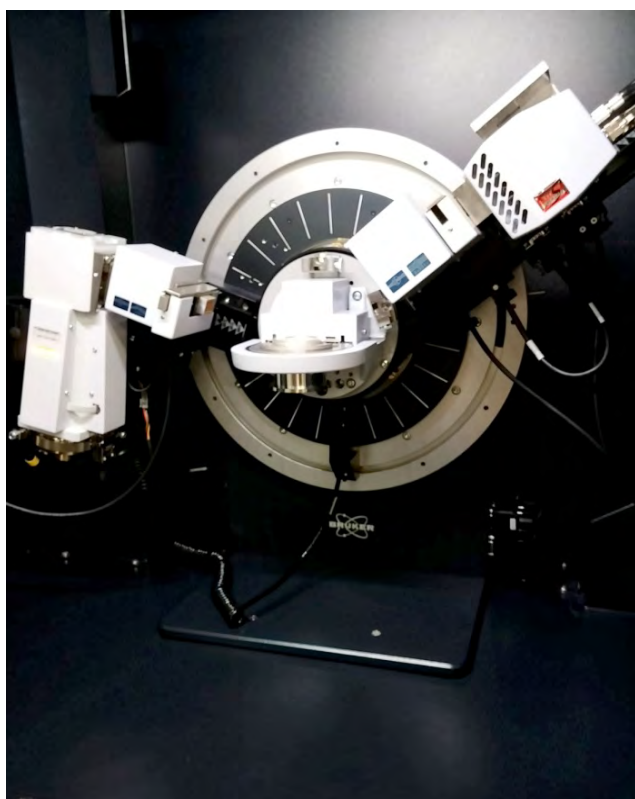
Η ποσοτική ανάλυση πολύπλοκων μιγμάτων είναι προβληματική λόγω του διαφορετικού βαθμού κρυσταλλικότητας των ορυκτών φάσεων στα διάφορα κονιάματα. Είναι δυνατόν όμως να συνάγουμε συμπεράσματα όσον αφορά στην σχετική ποσότητα (ημιποσοτική) των περιεχομένων ορυκτών φάσεων συγκρίνοντας μεταξύ τους τις εντάσεις των αντίστοιχων κορυφών στα διάφορα φάσματα.

Οι αποστάσεις μεταξύ των δικτυωτών επιπέδων των κρυστάλλων ενός ορυκτού, το είδος των ατόμων και η κατανομή τους στα δικτυωτά επίπεδα είναι χαρακτηριστικά για κάθε ορυκτό. Το μήκος κύματος των ακτίνων X είναι μεταξύ της υπεριώδους ακτινοβολίας και των ακτίνων γάμμα στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και το μέγεθός τους είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τις ενδοατομικές αποστάσεις στους κρυστάλλους. Όταν δέσμη ακτίνων X προσπίπτει πάνω σε ένα κρύσταλλο παρατηρείται το φαινόμενο της περίθλασης, η οποία εξαρτάται από το μήκος κύματος των ακτίνων X, τον προσανατολισμό και τη δομή των κρυστάλλων. Η δέσμη των ακτίνων X αλληλεπιδρά με την ηλεκτρονιακή πυκνότητα των ατόμων ή των ιόντων του κρυσταλλικού πλέγματος, δημιουργώντας έναν ηλεκτρονιακό χάρτη του εξεταζόμενου κρυστάλλου [54].



Σχήμα 4.1 Προσπίπτουσα μονοχρωματική δέσμη σε κρυσταλλικό πλέγμα σύμφωνα με το νόμο του Bragg.

Η μέθοδος της περίθλασης ακτίνων X βασίζεται στην περίθλαση μονοχρωματικής ακτινοβολίας, γνωστού μήκους κύματος  $\lambda$  επάνω στα επίπεδα του κρυσταλλικού πλέγματος των εξεταζόμενων ενώσεων και στη συνέχεια στον προσδιορισμό μέσω της αντίστοιχης γωνίας  $\theta$  (Σχήμα 4.1). Η σχέση μεταξύ της γωνίας  $\theta$ , του μήκους κύματος  $\lambda$ , των ακτίνων X αλλά και της διαπλεγματικής απόστασης  $d$  δίνεται από τη γνωστή **εξίσωση Bragg**:  $n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta$  όπου  $n$  η τάξη της περίθλασης. Η εξίσωση του Bragg είναι μια αναγκαία αλλά όχι ικανή συνθήκη για να συμβεί περίθλαση από πραγματικούς κρυστάλλους, καθορίζει πότε θα συμβεί περίθλαση για μοναδιαίες κυψελίδες με άτομα που τοποθετούνται μόνο σε γωνίες της κυψελίδας [54].



Εικόνα 4.12 Περιθλασίμετρο D8 ADVANCE-Bruker.



Εικόνα 4.13 Δειγματοφορέας με σκόνη άμμου.

Ως πηγή ακτινοβολίας ακτίνων X χρησιμοποιείται καθοδική λυχνία όπου η άνοδος αποτελείται από στοιχεία όπως Fe, Cr, Ag, Mo, Co, Cu. Η κάθοδος αποτελείται από νήμα βολφραμίου και η λυχνία είναι λυχνία κενού. Για να είναι μονοχρωματική η ακτινοβολία χρησιμοποιείται φίλτρο το οποίο επιτρέπει τη διέλευση καθορισμένου μήκους κύματος. Η πειραματική διάταξη αποτελείται από την πηγή ακτίνων X τον ανιχνευτή ακτίνων X και το γωνιόμετρο (Εικόνα 4.12).

Ο τύπος του οργάνου που χρησιμοποιήθηκε ήταν το D8 ADVANCE της Bruker με λάμπα Cu-K (K είναι η στοιβάδα). Χρησιμοποιήσαμε ένταση ρεύματος 40mA και δυναμικό 40 KV. Η ταχύτητα σάρωσης δέσμης ήταν 0,03 Vsec ενώ το γωνιακό εύρος εξέτασης των δοκιμών μετρούμενο σε γωνία  $2\theta$  ήταν από  $5^\circ$  έως  $60^\circ$ .

Η περίθλαση ακτίνων X (XRD) επιτρέπει την ταυτοποίηση κρυσταλλικών ενώσεων που περιέχονται σε ένα δείγμα όταν η συγκέντρωσή τους δεν είναι πάρα πολύ χαμηλή. Οι μη κρυσταλλικές φάσεις που περιέχονται στους διάφορους τύπους κονιαμάτων δεν εμφανίζουν καθαρές κορυφές αλλά προκαλούν την αύξηση του θορύβου συνήθως σε εκτεταμένες ζώνες. Τα άμορφα υλικά, όπως οι ηφαιστειογενείς ύαλοι των ποζολανών και η διαλυτή πυριτία ή οι άμορφες αργιλοπυριτικές ενώσεις που σχηματίζονται κατά την πήξη και σκλήρυνση των υδραυλικών ενώσεων, είναι δύσκολο να ταυτοποιηθούν και μπορούν πολλές φορές να καταστήσουν προβληματική την αναγνώριση των μικρότερων σε συγκέντρωση κρυσταλλικών φάσεων.

#### 4.2.7 Χαρακτηρισμός των πρώτων υλών διαμέσου θερμικής ανάλυσης DTA/TG

Οι θερμικές μέθοδοι ανάλυσης αποτελούν τεχνικές αποτύπωσης της μεταβολής κάποιας ιδιότητας ενός υλικού, καθώς υπόκειται σε κάποιο θερμοκρασιακό πρόγραμμα. Επιτρέπουν συνεχή καταγραφή δεδομένων υπό μορφή θερμικών φασμάτων. Το θερμόγραμμα χαρακτηρίζει ένα απλό ή σύνθετο σύστημα υλικών βάσει μεταβολών των θερμοδυναμικών, φυσικών ή μηχανικών ιδιοτήτων τους, των μεταβολών της δομής τους και της κινητικής των χημικών/φυσικοχημικών δράσεων που λαμβάνουν χώρα, συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Στην παρούσα αναφορά των θερμικών μεθόδων ενδιαφέρουν η διαφορική θερμική ανάλυση (DTA) και η θερμοβαρυμετρική ανάλυση (TG), οι οποίες εξυπηρετούν τις ποιοτικές και ποσοτικές απαιτήσεις χαρακτηρισμού των υλικών αντίστοιχα, την αποτίμηση της συμβατότητας διαφόρων υλικών σε ένα σύστημα, καθώς και τη συμπεριφορά των σύνθετων υλικών σε συνθήκες του λειτουργικού τους περιβάλλοντος. Οι δύο διαδικασίες είναι ανεξάρτητες, αλλά διεξάγονται ταυτόχρονα. Κατά τη διάρκεια της θερμικής ανάλυσης ενός στερεού καταγράφεται η μεταβολή της μάζας του σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία σε σχέση με μια μάζα-υλικό αναφοράς (Θερμοβαρυμετρική ανάλυση-TGA), ενώ ταυτόχρονα καταγράφεται η διαφορά θερμοκρασίας που σημειώνεται μεταξύ του στερεού και του υλικού αναφοράς, εξαιτίας κάποιου θερμικού συμβάντος που συμβαίνει στο στερεό (τήξη ή αλλαγή στην κρυσταλλική δομή) (διαφορική θερμική ανάλυση-DTA) [55].

Η ποσοτική ακρίβεια του προσδιορισμού εξαρτάται από τη συγκέντρωση των ενώσεων στο δείγμα, το μέγεθος της πιθανής παρεμβολής διαφορετικών μετασχηματισμών που λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα και την ταχύτητα θέρμανσης [56].

##### **Διαφορική θερμική ανάλυση DTA**

Κατά τη θέρμανση ή ψύξη των υλικών λαμβάνουν χώρα χημικές ή φυσικές μεταβολές, κατά τη διάρκεια των οποίων παρατηρούνται ενδόθερμα ή εξώθερμα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας. Εξώθερμη θερμική μεταβολή αποτελεί η καύση οργανικών ενώσεων, ενώ αντίστοιχα ενδόθερμο φαινόμενο αποτελεί η αφυδάτωση και η διάσπαση των ανθρακικών ενώσεων.

Διαμέσω της ανάλυσης DTA μπορούμε να προσδιορίσουμε τα ακόλουθα: α) χαρακτηριστικές θερμοκρασίες, β) υαλώδεις μεταβολές, γ) συμπεριφορά τήξης και κρυστάλλωσης, δ) καθαρότητα του δείγματος, ε) κινητική αντιδράσεων, και ζ) τη θερμική σταθερότητα. Συγκεκριμένα, στα κονιάματα επιτρέπεται η ταυτοποίηση, ο ποιοτικός και ποσοτικός προσδιορισμός των ακόλουθων ενώσεων: υγροσκοπικό νερό (φυσικά δεσμευμένο νερό 60-120 °C), γύψος ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 120-200 °C), ασβεστίτης ( $\text{CaCO}_3$ , 700-900 °C), πορτλαντίτης ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 470-520 °C), δολομίτης ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , 700-900 °C), μαγνησίτης ( $\text{MgCO}_3$ , 450-550°C), βρουσίτης ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , 350-420 °C), οργανικές ενώσεις (εξώθερμα 300-500 °C), χημικά δεσμευμένο νερό των υδραυλικών ενώσεων (διάφορα ενδόθερμα 150-600°C) κ.α..

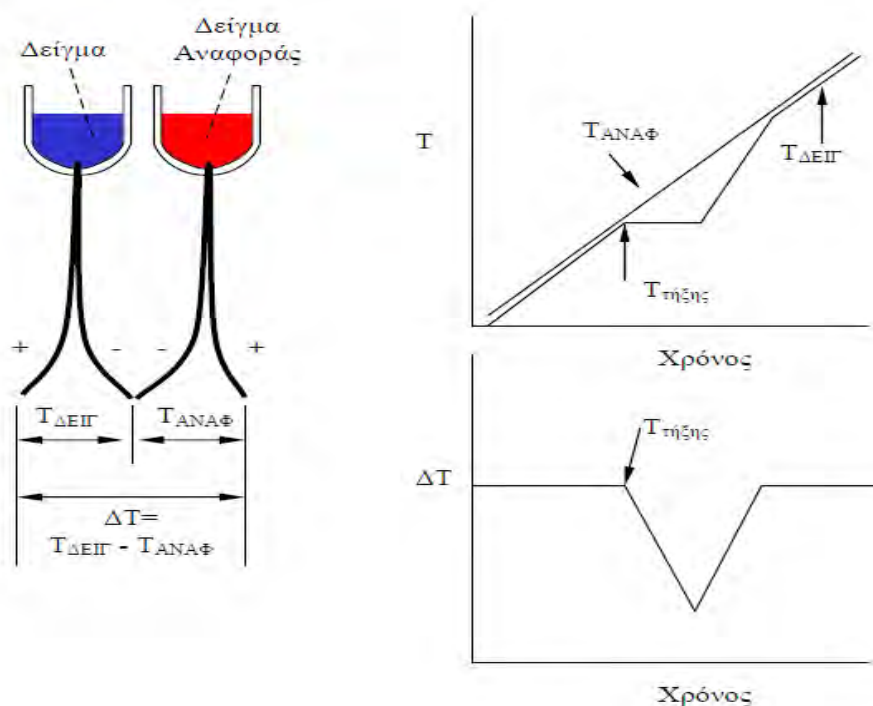
Η αρχή μεθόδου της διαφορικής θερμικής ανάλυσης (DTA) βασίζεται στην καταγραφή της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ μιας ουσίας και ενός δείγματος αναφοράς, συνήθως αλουμίνας-α ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), καθώς τα δύο δοκίμια υφίστανται μια ταυτόσημη θερμοκρασιακή μεταχείριση σε ένα περιβάλλον, το οποίο θερμαίνεται ή ψύχεται με ελεγχόμενο ρυθμό [57], [58].

Όταν λαμβάνει χώρα μια αντίδραση, η οποία περιλαμβάνει φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας, παρουσιάζεται διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο προς μέτρηση δείγμα και το δείγμα αναφοράς. Η φορά της κορυφής καθορίζεται από το τι έχει επιλεγεί για εξώθερμες αντιδράσεις (πάνω ή κάτω) [59].

Ιδιαίτερη σημασία όμως έχουν το σημείο (θερμοκρασία) που συμβαίνει η μεταβολή αυτή (γενικότερα εύρος θερμοκρασίας) καθώς και η επιφάνεια που περικλείεται από την κορυφή. Η επιφάνεια **A** είναι ανάλογη της θερμότητας της αντίδρασης:

$$\Delta H = K \cdot A = K \int \Delta T dt \quad \text{όπου η σταθερά } A \text{ εξαρτάται από τις θερμικές ιδιότητες του δείγματος.}$$

Η διαφορά θερμοκρασίας  $\Delta T$  παρουσιάζεται σαν διαφορά τάσης ανάμεσα στα θερμοστοιχεία και ενισχύεται ηλεκτρονικά, ώστε να καθίσταται ευχερέστερη η μελέτη της κατά την παρουσίασή της σαν θερμογράφημα.



Σχήμα 4.2 Ο μηχανισμός της διαφορικής θερμικής ανάλυσης, σχηματικά [59].

### Θερμοβαρμετρική Μέθοδος (Θερμοζυγός-TG)

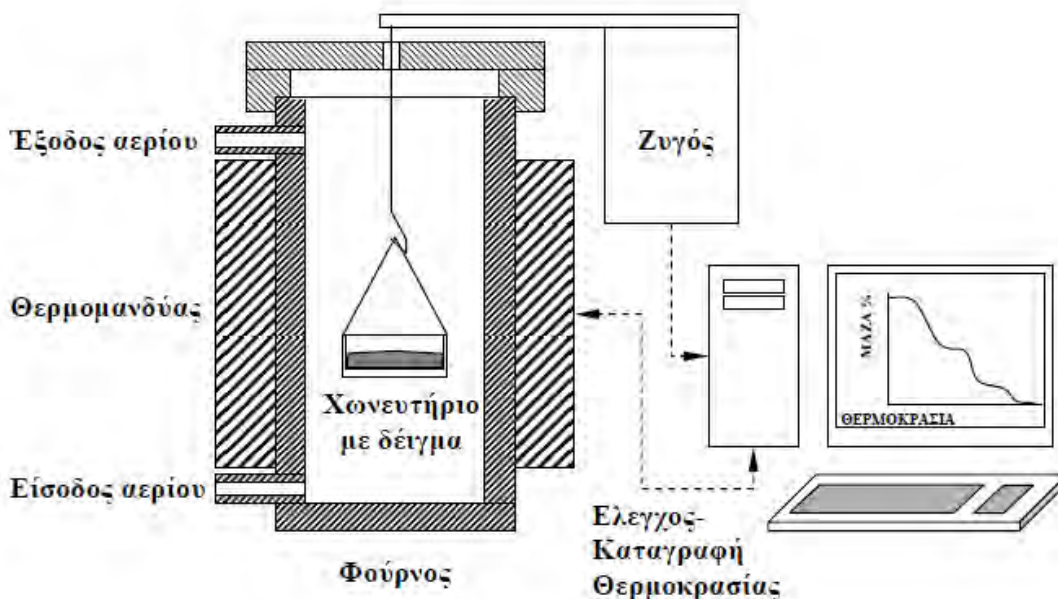
Η θερμοβαρμετρική ανάλυση, αποτελεί μια αναλυτική μέθοδο ποιοτικού και ποσοτικού προσδιορισμού. Καταγράφει τις μεταβολές μάζας που υφίσταται ένα δείγμα κατά τη θέρμανσή του με ελεγχόμενη ταχύτητα από θερμοκρασία περιβάλλοντος έως θερμοκρασία 1000 °C. Ειδικά σχεδιασμένοι θερμοζυγοί χρησιμοποιούνται για την συνεχή παρακολούθηση της ουσίας που εξετάζεται. Οι περισσότεροι ζυγοί έχουν δυνατότητα ανίχνευσης μεταβολών βάρους της τάξεως των mg. Συνεπώς αποκαλύπτεται οποιαδήποτε φυσικοχημική διεργασία συνεπάγεται μεταβολή μάζας.



Κύριες διεργασίες που δύναται να μελετηθούν κατά την θερμοβαρυμετρική ανάλυση είναι:  
α)Απορρόφηση ή προσρόφηση, β)Εκρόφηση, γ)Ξήρανση – απομάκρυνση διαλύτη ή αφυδάτωση, δ)Εξάτμιση ή εξάχνωση, ε) Αποσύνθεση, ζ)Πυρόλυση, η)Αντιδράσεις στερεάς - στερεάς φάσης και θ)Αντιδράσεις στερεάς - υγρής φάσης.

Απώλεια μάζας παρατηρείται στην εκρόφηση, στην αφυδάτωση, στην εξάτμιση, στην εξάχνωση, στην αποσύνθεση, στην πυρόλυση και σε χημικές αντιδράσεις όπου παράγονται αέρια προϊόντα. Αύξηση μάζας παρατηρείται κατά την απορρόφηση, την προσρόφηση και κατά τη χημική αντίδραση με την ατμόσφαιρα.

Τα βασικά στοιχεία της συσκευής, που ονομάζεται και θερμοζυγός, ακολουθούν την εξής διάταξη: ένα ζυγό ακρίβειας, ένα φούρνο με δυνατότητα προγραμματισμού της θερμοκρασίας, το δοχείο για το δείγμα, διάταξη για διατήρηση της κατάλληλης αέριας ατμόσφαιρας πάνω από το δείγμα (σε περιπτώσεις που απαιτείται η χρήση άλλης ατμόσφαιρας πέρα του αέρα) και τέλος μέσο (υπολογιστής) που καταγράφει και επεξεργάζεται τα δεδομένα (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3 Σχηματική διάταξη θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης [59].

Η ποιοτική ανάλυση επιτυγχάνεται μέσω μελέτης των λαμβανόμενων θερμογραφημάτων, βάση των οποίων υπολογίζεται η ακριβής μεταβολή της μάζας του δείγματος, καθώς και η θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιήθηκε. Η δυνατότητα σύνδεσης ηλεκτρονικού υπολογιστή στο θερμοζυγό δίνει ικανότητα περαιτέρω ανάλυσης του λαμβανόμενου θερμογράμματος, το οποίο παρουσιάζεται σε άξονες με τεταγμένη την επί τοις εκατό (%) απώλεια μάζας και τετμημένη την θερμοκρασία. Φέρνοντας την διαφορική καμπύλη είναι δυνατός ο ακριβής υπολογισμός των δύο βασικών μεγεθών, δηλαδή της μεταβολής της μάζας και της αντίστοιχης θερμοκρασίας στην οποία πραγματοποιήθηκε η μεταβολή.

Η βασική εφαρμογή του θερμοζυγού είναι ο καθορισμός της θερμικής σταθερότητας συστατικών και μιγμάτων σε διαρκώς ανερχόμενες θερμοκρασίες καθώς και ο καθορισμός κατάλληλων θερμοκρασιών ξήρανσης για ενώσεις, αλλά και μίγματα. Μέσω της ανάλυσης TG γίνεται και η μελέτη των φαινομένων της διάβρωσης. Η μέθοδος χρησιμεύει για τον χαρακτηρισμό υλικών, εφόσον κάθε βαθμίδα του θερμογραφήματος αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη αντίδραση και μπορεί να αποδοθεί σε συγκεκριμένη ουσία [59].



**Εικόνα 4.14** Η γενική πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε λεπτοδιαμερισμένο μίγμα από τα υλικά (πρώτες ύλες) και εν συνεχεία από τα κονιάματα, σε ποσότητα περίπου 100 mg, ζυγισμένο με ακρίβεια τεσσάρων δεκαδικών ψηφίων, το οποίο τοποθετήθηκε σε δειγματοφορέας και εν συνεχεία στην εστία του οργάνου Simultaneous Thermal Analysis-STA- 409 EP. Ως υλικό αναφοράς χρησιμοποιήθηκε α-αλούμινα ( $Al_2O_3$ ). Οι δοκιμές εκτελέστηκαν σε στατική ατμόσφαιρα αέρα σε εύρος από  $25^{\circ}C$  έως  $1000^{\circ}C$  με ρυθμό ανόδου θερμοκρασίας  $10^{\circ}C/min$ . Η εστία ελεγχόταν από έναν προγραμματιστή θερμοκρασίας, ο οποίος καθοριζόταν από το χειριστή, ενώ τα συλλεγόμενα δεδομένα παρουσιάζονταν στην οθόνη ως θερμόγραμμα.

Οι θερμικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν αρχικά για των χαρακτηρισμό των πρώτων υλών (πηλός, φυσική υδραυλική άσβεστος, σκωρία κάδων χαλυβουργίας) με σκοπό την ταυτοποίηση και τον προσδιορισμό των ποσοστών χημικών φάσεων που περιέχονται σε αυτές όπως  $Ca(OH)_2$ ,  $CaCO_3$  κ.α.

Έπειτα από την παρασκευή των κονιαμάτων πραγματοποιήθηκαν επίσης θερμικές αναλύσεις σε δείγματα των δοκιμών κατά την φάση της σκλήρυνσης. Ελήφθησαν δείγματα από κάθε σύνθεση στις 28 και 90 ημέρες, τα δείγματα των κονιαμάτων διαχωρίστηκαν όσο το δυνατόν από τα αδρανή μέσα από μία σειρά κοσκίνων ώστε να παρθεί δείγμα με κόκκο  $< 63\mu m$ .

Σκοπός ήταν η ποιοτική μελέτη της ωρίμανσης των πηλοκονιαμάτων σε σχέση με το χρόνο μέσα από την καταγραφή συγκεκριμένων αντιδράσεων οι οποίες συνοδεύουν τον μηχανισμό σταθεροποίησης, την πήξη και την σκλήρυνση. Χαρακτηριστικές τέτοιες αντιδράσεις είναι η αφυδάτωση του πορτλαντίτη και η αποκαρβοξυλίωση του ασβεστίτη.

### 4.3 Προετοιμασία και Παρασκευή κονιαμάτων

Αρχικά ελέγχθηκαν οι πρώτες ύλες ως προς το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας. Η πρώτη ύλη του πηλού βρέθηκε με ανεκτό ποσοστό υγρασίας ~1% ενώ η πρώτη ύλη της άμμου παρουσίασε υγρασία >3% και ξηράνθηκε στους  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

Τα κονιάματα παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο του τμήματος Ελέγχου Ποιότητας και Ανάπτυξης της βιομηχανίας τσιμέντων «TITAN Α.Ε.».

Αρχικός στόχος ήταν να προσδιοριστεί για τις διάφορες συνθέσεις των πηλοκονιαμάτων η απαίτηση τους σε νερό ώστε να επιτευχθεί παρόμοια τιμή εξάπλωσης κοντά στα  $14\text{cm}(\pm 2\text{mm})$ . Για να επιτευχθεί αυτό παρασκευαζόταν πρώτα ένα δοκιμαστικό κονίαμα με εκτίμηση της ποσότητας νερού που απαιτείται, στη συνέχεια με βάση την τιμή εξάπλωσης γινόταν προσθήκη επιπλέον νερού ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή εξάπλωσης. Έπειτα παρασκευάστηκαν εκ νέου κονιάματα για τις δοκιμές των νωπών κονιαμάτων αντίστοιχα, ακολουθώντας την εξής διαδικασία.



Εικόνα 4.15 Ζύγιση υλικών σε ζυγαριά.



Εικόνα 4.16 Σταδιακή ρίψη μίγματος υλικών και ανάδευση σε ηλεκτρικό αναδευτήρα.

Ζύγιση των πρώτων υλών και του απαιτούμενου νερού. Αρχική ανάμιξη των πρώτων υλών εν ξηρώ για περίπου 3 λεπτά. Τοποθέτηση στον ηλεκτρικό αναδευτήρα της απαιτούμενης ποσότητας νερού και σταδιακή ρίψη του μίγματος των ξηρών υλικών όπου και αναδύεται για 3 λεπτά (Εικόνα 4.16).

#### 4.4 Τεχνικές αποτίμησης των τεχνικών χαρακτηριστικών των νωπών κονιαμάτων

Μετά την παρασκευή των κονιαμάτων, προσδιορίστηκαν τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά των νωπών κονιαμάτων, η συνεκτικότητα με τράπεζα εξάπλωσης, η φαινόμενη πυκνότητα, ο περιεχόμενος αέρας και το συγκρατούμενο νερό. Ο προσδιορισμός των τεχνικών χαρακτηριστικών έγινε σύμφωνα με τα πρότυπα EN 1015-3:1999, EN 1015-6:1999, EN 1015-7:1999 και EN 1015-8:1999.

##### 4.4.1 Προσδιορισμός συνεκτικότητας νωπού κονιάματος με τράπεζα εξάπλωσης



Εικόνα 4.17 Συσκευή και καλούπι εξάπλωσης.



Εικόνα 4.18 Μέτρηση εξάπλωσης.

Η ποσότητα του νερού που προσθέτουμε επηρεάζει τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κονιάματος. Δεδομένου ότι με την αύξηση της ποσότητας του νερού βελτιώνεται η εργασιμότητα, σε γενικές γραμμές μειώνονται οι τελικές αντοχές και αυξάνεται η συρρίκνωση κατά την πήξη. Είναι ζητούμενο η προσθήκη της βέλτιστης ποσότητας νερού ώστε το κονίαμα να παρουσιάζει ταυτόχρονα ικανοποιητική εργασιμότητα, συρρίκνωση και μηχανικές αντοχές. Στο πρότυπο αναφέρεται ότι η συνεκτικότητα ενός νωπού κονιάματος είναι μέτρο της ρευστότητας και της παραμορφωσιμότητάς του, όταν αυτό υπόκειται σε συγκεκριμένου τύπου καταπόνηση, ωστόσο η συνεκτικότητα δεν συνδέεται απευθείας με την εργασιμότητα από τους τεχνίτες. Η τιμή της ρευστότητας προσδιορίζεται με μέτρηση της μέσης διαμέτρου ενός δείγματος στην τράπεζα εξάπλωσης μετά από 15 χτύπους. Ο όγκος του δείγματος νωπού κονιάματος είναι κατ' ελάχιστο 1,5 λίτρα [60].

Η διαδικασία δοκιμής περιλαμβάνει το γέμισμα σε δύο φάσεις και την τοποθέτηση καλουπιού (ύψος:60mm, εσωτερική διάμετρος-βάση:100mm-Κορυφή:70mm) στο κέντρο της τράπεζας εξάπλωσης. Η περίσσεια κονιάματος αφαιρείται από το πάνω μέρος του καλουπιού με το κοπίδι και η περιοχή γύρω από την βάση του καλουπιού καθαρίζεται με ένα πανί. Η χρονική διάρκεια που επιτρέπεται να παρέλθει μέχρι την απομάκρυνση του καλουπιού είναι περίπου 15 δευτερόλεπτα, έπειτα η τράπεζα δονείται 15 φορές με ρυθμό ένα χτύπημα ανά δευτερόλεπτο και η μέτρηση της διαμέτρου γίνεται σε 2 κατευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους (Εικόνα 4.18) [60].

#### 4.4.2 Προσδιορισμός φαινόμενης πυκνότητας νωπού κονιάματος

Η φαινόμενη πυκνότητα του κονιάματος καθορίζεται από τον υπολογισμό της μάζας του κονιάματος που περιέχεται σε ένα γνωστό όγκο, συγκεκριμένα με ζύγιση της μάζας του νωπού κονιάματος που απαιτείται για την πλήρωση μεταλλικού δοχείου όγκου 1l. Η φαινόμενη πυκνότητα αποτελεί σημαντική παράμετρο για τον προσδιορισμό της μάζας των πρώτων υλών που χρειάζονται για την παρασκευή του κονιάματος, καθώς και για την εκτίμηση του πόσο ελαφρύ είναι. Στο ευρωπαϊκό πρότυπο δίνονται τρεις διαφορετικές μέθοδοι πλήρωσης και συμπύκνωσης στο βαθμονομημένο δοχείο. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται εξαρτάται από τη συνοχή του νωπού κονιάματος όπως αυτή καθορίζεται στη δοκιμή εξάπλωσης. Στην προκειμένη περίπτωση για τιμή εξάπλωσης έως 14cm (σκληρό κονίαμα) χρησιμοποιείται η μέθοδος κραδασμών. Το βαθμονομημένο δοχείο γεμίζει με κονίαμα χρησιμοποιώντας σπάτουλα μέχρι να ξεχειλίσει, στη συνέχεια τοποθετείται σε μια δονούμενη τράπεζα και δονείται μέχρι να μην παρατηρείται καμία περαιτέρω διευθέτηση υλικού. Εάν είναι απαραίτητο προστίθεται επιπλέον υλικό και έπειτα το δοχείο ζυγίζεται με ακρίβεια ενός γραμμαρίου [61].



Εικόνα 4.19 Ζύγιση μεταλλικού δοχείου 1L με νωπό κονίαμα.

Η πυκνότητα ( $\rho_m$  σε  $\text{kg/m}^3$ ) υπολογίζεται με χρήση του τύπου:  $\rho_m = (m_2 - m_1) / V_v$

Όπου:

$m_1$ : η μάζα του άδειου δοχείου

$m_2$ : η μάζα του δοχείου με το κονίαμα

$V_v$ : ο όγκος του δοχείου

#### 4.4.3 Προσδιορισμός περιεχόμενου αέρα νωπού κονιάματος

Στη συγκεκριμένη δοκιμή προσδιορίζεται το ποσοστό του αέρα που περιέχεται στον όγκο του κονιάματος υπό μορφή φυσαλίδων, κενών ή ασυνέχειας στη μάζα του κονιάματος. Το ποσοστό του περιεχόμενου αέρα σχετίζεται με την εργασιμότητα του κονιάματος, δεδομένου ότι με αύξηση του ποσοστού του περιεχόμενου αέρα αυξάνει και η εργασιμότητά του. Επίσης αύξηση του συγκεκριμένου ποσοστού συνεπάγεται μεγαλύτερη ανθεκτικότητα των κονιαμάτων υπό την άσκηση τάσεων λόγω παγετού και μικρότερη φαινόμενη πυκνότητα, ενώ η αλλαγή που επέρχεται στην μικροδομή του μειώνει τις μηχανικές αντοχές του.

Δύο μέθοδοι προβλέπονται για την συγκεκριμένη δοκιμή αναλόγως με την περιεκτικότητα σε αέρα, η μέθοδος πίεσης και η μέθοδος με αλκοόλ. Στην δική μας περίπτωση που αναμένουμε περιεκτικότητα σε αέρα πολύ κάτω από το 20% ισχύει η μέθοδος πίεσης. Ο εξοπλισμός αποτελείται από ένα δοχείο για το δείγμα και μια συσκευή που το καλύπτει, το δοχείο έχει όγκο 1 λίτρο [62].



Εικόνα 4.20 Διάταξη με το δοχείο 1l κάτω και τον μετρητή πίεσης επάνω.

Το δοχείο με το δείγμα γεμίζει σε τέσσερα κατά προσέγγιση ίσα επίπεδα, όπου κάθε επίπεδο συμπιέζεται με δέκα χτυπήματα. Με μια σπάτουλα γίνεται η αφαίρεση τυχόν περίσσειας κονιάματος. Το χείλος του δοχείου καθαρίζεται με ένα βρεγμένο πανί ώστε να επιτευχθεί υδατοστεγής σφράγιση και η συσκευή στερεώνεται στη θέση της με την κύρια βαλβίδα του αέρα κλειστή. Νερό εισάγεται μέσω της βαλβίδας (A) που χρησιμοποιείται για να γεμίσει το δοχείο με νερό, έως ότου όλος ο αέρας αποβάλλεται μέσω της βαλβίδας (B) που επιτρέπει τη διαφυγή του αέρα από το δοχείο.

Έπειτα διοχετεύεται αέρας στο θάλαμο αέρα μέχρι να επιτευχθεί σταθεροποιημένη κατάσταση, αντίστοιχη με το επίπεδο που καθορίζεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βαθμονόμησης. Οι βαλβίδες A και B κλείνουν και η βαλβίδα μεταξύ του θαλάμου αέρα και του δοχείου με το δείγμα ανοίγει. Όταν η ισορροπία επιτυγχάνεται η περιεκτικότητα του αέρα προσδιορίζεται από την καμπύλη βαθμονόμησης και καταγράφεται με ακρίβεια 0,1%. Η διαδικασία βαθμονόμησης περιέχει την συσχέτιση μεταξύ της πίεσης και του περιεχόμενου αέρα στο εύρος 5-25% [62].

#### 4.4.4 Προσδιορισμός συγκρατούμενου νερού νωπού κονιάματος

Με τη συγκεκριμένη δοκιμή προσδιορίζεται το ποσοστό του νερού που συγκρατείται στη μάζα του κονιάματος σε σχέση με την συνολική ποσότητα νερού που προστέθηκε στο κονίαμα. Τα κονιάματα και ιδιαίτερα τα υδραυλικά είναι καλό να συγκρατούν όσο το δυνατόν περισσότερο νερό στην μάζα τους, ώστε αυτό να παρέχεται στο κονίαμα μετά την εφαρμογή του στην τοιχοποιία. Παράλληλα ένα μέρος του συγκρατούμενου νερού θα απορροφηθεί από τα δομικά στοιχεία τα οποία βρίσκονται, υπό γειννίαση, στην τοιχοποιία.

Σε περίπτωση που το συγκρατούμενο ποσοστό του νερού είναι μικρό, είναι δυνατή η εμφάνιση μικρορωγμών στην μάζα του κονιάματος, οι οποίες θα επηρεάσουν και την τελική του φυσικομηχανική συμπεριφορά.

Το συγκρατούμενο νερό προσδιορίζεται με τον υπολογισμό της αναρρόφησής του με χρήση τυποποιημένου διηθητικού χαρτιού(φίλτρο). Η ικανότητα συγκράτησης νερού σε ένα συγκεκριμένο δείγμα κονιάματος προσδιορίζεται από τη μάζα του νερού που διατηρείται στο κονίαμα μετά την διαδικασία αναρρόφησης και εκφράζεται ως ποσοστό της αρχικής περιεκτικότητας του σε νερό που ορίζεται ως το ποσοστό της μάζας του νερού προς την μάζα του κονιάματος.

Για τον προσδιορισμό του συγκρατούμενου νερού ενός κονιάματος γνωστής περιεκτικότητας σε νερό ( $W_1$ ), χρησιμοποιείται ένα κυκλικό καλούπι το οποίο ζυγίζεται σε στεγνή κατάσταση ( $m_1$ ). Στη συνέχεια ζυγίζεται το ειδικό φίλτρο σε ξηρά κατάσταση ( $m_2$ ). Το καλούπι συμπληρώνεται άμεσα και ομοιόμορφα με κονίαμα σε περίπου 10 βήματα χρησιμοποιώντας την ειδική σπάτουλα [63].

Όταν το κονίαμα υπερχειλίζει ελαφρώς, αφαιρείται η περίσσια και επιπεδώνεται το πάνω μέρος του καλουπιού με τη σπάτουλα. Η σπάτουλα κρατείται με κλίση περίπου 45 μοιρών και κινείται προς μία κατεύθυνση σε όλη την επιφάνεια με κίνηση πριονίσματος για να απομακρύνει το υπερβάλλον υλικό, στη συνέχεια με ελαφρώς πιο επίπεδη γωνία και σε αντίστροφη κατεύθυνση γίνεται επιπεδοποίηση. Έπειτα ζυγίζεται το γεμάτο καλούπι με ακρίβεια 0,1kg ( $m_3$ ) και καλύπτεται η επιφάνεια του κονιάματος με έναν λεπτό ιστό, από επάνω τοποθετείται το προζυγισμένο φίλτρο και αμέσως όλη η διάταξη ανατρέπεται πάνω σε μία ομαλή, επίπεδη, μη-απορροφητική επιφάνεια. Τέλος τοποθετείται βάρος 2kg στο πίσω μέρος του καλουπιού και αφήνεται σε ηρεμία για 5 λεπτά. Στη συνέχεια επαναφέρεται η διάταξη στην αρχική της θέση, διαχωρίζεται το φίλτρο από το καλούπι και ζυγίζεται εκ νέου ( $m_4$ ).

Εάν η μάζα του νερού που απορροφάται από το φίλτρο,  $W_3 = m_4 - m_2$  υπερβαίνει τα 10 g η δοκιμή επαναλαμβάνεται με δύο ή περισσότερα φίλτρα, επιλέγοντας τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων φίλτρων ώστε η αναλογία  $W_3/n < 10g$  [63].



Εικόνα 4.21 Ζύγιση διάταξης χωρίς το κονίαμα.



Εικόνα 4.22 Διάταξη με βάρος 2kg σε ηρεμία για 5 λεπτά.

Το συγκρατούμενο νερό (**WRV**) υπολογίζεται με βάση τους ακόλουθους τύπους:

- Υπολογίζεται  $W_2$  η περιεκτικότητα σε νερό του κονιάματος στο καλούπι από τους τύπους :

$$W_2 = M_5 \times W_1 \text{ όπου } M_5 = m_4 - m_1$$

- Υπολογίζεται η μάζα του νερού που απορροφάται από το φίλτρο από την εξίσωση:

$$W_3 = m_4 - m_2$$

- Υπολογίζεται η σχετική απώλεια νερού από το κονίαμα ( $W_4$ ) ως ποσοστό από την εξίσωση:

$$W_4 = (W_3 / W_2) \times 100\%$$

- Υπολογίζεται το συγκρατούμενο νερό (**WRV**) ως ποσοστό από την εξίσωση:

$$WRV = 100 - W_4\%$$

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των νωπών κονιαμάτων όπως προσδιορίστηκαν παρουσιάζονται στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων.



#### 4.5 Μορφοποίηση και συντήρηση δοκιμών κονιαμάτων

Το μείγμα του νωπού κονιάματος εισάγεται σε πρισματικά μεταλλικά καλούπια διαστάσεων 40mm x 40mm x 160mm όπως καθορίζει το πρότυπο EN 1015-11:1999 [64].

Η κάθε μήτρα αποτελείται από ένα ανοικτό πλαίσιο με κινητά τοιχώματα που όταν συναρμολογούνται σχηματίζουν τρία διαμερίσματα διαστάσεων 4x4x16cm. Πριν την εισαγωγή των κονιαμάτων στις μήτρες έχει γίνει λίπανση των εσωτερικών τοιχωμάτων ώστε να αποφευχθεί πιθανή συγκόλληση των δοκιμών και να είναι ευκολότερη η εξαγωγή τους .

Το νωπό κονίαμα εισάγεται σε δύο ή τρεις στρώσεις. Το πρώτο στρώμα του νωπού κονιάματος συμπυκνώνεται με κρούσεις της μήτρας πάνω στον πάγκο εργασίας έως ότου επιπεδωθεί. Ομοίως, εισάγονται στη μήτρα το δεύτερο και το τρίτο στρώμα του κονιάματος.



Εικόνα 4.23 Τρίδυμη μήτρα με κινητά τοιχώματα.



Εικόνα 4.24 Πρώτη στρώση πλήρωσης πριν τις κρούσεις.

Μετά την πλήρωση της μήτρας, το υλικό της πάστας διαστρώνεται ομοιόμορφα με τη χρήση μεταλλικής ράβδου διάστρωσης ή σπάτουλας ή μεταλλικού χάρακα. Έπειτα απομακρύνονται τα υπολείμματα του νωπού κονιάματος, έτσι ώστε να εξομαλυνθούν οι επιφάνειες των δοκιμών στα διαμερίσματα. Τα καλούπια μετά τη διάστρωση καλύπτονται με γυάλινη πλάκα διαστάσεων 210 x 185 mm και πάχους 6 mm ενώ είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί και χαλύβδινη πλάκα ή άλλο αδιάβροχο υλικό παρομοίων διαστάσεων [64].



Εικόνα 4.25 Κάλυψη με γυάλινες πλάκες μετά τη διάστρωση. Εικόνα 4.26 Θάλαμος συντήρησης RH: 95%±5%.

Οι συνθήκες συντήρησης διαφοροποιήθηκαν ανάλογα με την παρουσία και την φύση του σταθεροποιητή. Ο χρόνος που απαιτείται για την απομάκρυνσή των κονιαμάτων από τα καλούπια δεν είναι ο ίδιος για όλα τα κονιάματα δεδομένου ότι το κάθε κονίαμα παρουσιάζει διαφορετικό χρόνο πήξης, ανάλογα με τη φύση της κονιάς και τις ιδιαιτερότητες του προσμίκτου που έχει χρησιμοποιηθεί. Οι συνθήκες συντήρησης ακολούθησαν το πρότυπο EN 1015-11:1999, εκτός απ' την περίπτωση της σύνθεσης αναφοράς του πηλού, όπου δεν υπαγόταν σε κάποιες από τις κατηγορίες του προτύπου.

Σύνθεση	Θάλαμος συντήρησης RH: 95%±5% T: 20°C±2 °C (με καλούπι)	Θάλαμος συντήρησης RH: 95%±5% T: 20°C±2 °C (χωρίς καλούπι)	Δωμάτιο σταθερών συνθηκών RH: 55%±5% T: 20°C±2 °C (με καλούπι)	Αφαίρεση δοκιμίων από το καλούπι	Δωμάτιο σταθερών συνθηκών RH: 55%±5% T: 20°C±2 °C (χωρίς καλούπι)
(1) CS	2 ημέρες	-	25 ημέρες	27 ημέρες	Συντήρηση έως την ημέρα των δοκιμών.
(2) NHL20CS	5 ημέρες	2 ημέρες	-	5 ημέρες	
(3) NHL25CS	5 ημέρες	2 ημέρες	-	5 ημέρες	
(4) SL20CS	5 ημέρες	2 ημέρες	-	5 ημέρες	
(5) SL25CS	5 ημέρες	2 ημέρες	-	5 ημέρες	

Πίνακας 4.3 Συνθήκες και χρόνοι συντήρησης κονιαμάτων.

-Τα σταθεροποιημένα κονιάματα με φυσική υδραυλική άσβεστο (NHL20CS, NHL25CS), μετά την μορφοποίησή τους στα καλούπια, παρέμειναν για 5 ημέρες στο θάλαμο συντήρησης (RH: 95±5%, T: 20±2°C), δεδομένου ότι απαιτείται περίσσεια υγρασίας για την πήξη των υδραυλικών κονιαμάτων.

Τα κονιάματα παρέμειναν στον θάλαμο για αυτές τις ημέρες, μέχρι να πήξουν και να είναι εφικτή η απομάκρυνση τους από τα καλούπια χωρίς τον κίνδυνο θραύσης τους ή την δημιουργία ρηγματώσεων στη μάζα τους.

Την 5η ημέρα από την ημέρα παρασκευής τους απομακρύνθηκαν από τα καλούπια και παρέμειναν στο θάλαμο συντήρησης (RH: 95±5%, T: 20±2°C) για ακόμα 2 ημέρες.

Μετά από 7 ημέρες συνολικά απομακρύνθηκαν από το υγρό περιβάλλον του θαλάμου συντήρησης και αφέθηκαν να ωριμάσουν σε δωμάτιο σταθερών συνθηκών (RH: 55±5%, T: 20±2°C), μέχρι την ημέρα των δοκιμών.

-Για τα σταθεροποιημένα κονιάματα με σκωρία κάδων χαλυβουργίας (SL20CS, SL25CS) ακολουθήθηκε πανομοιότυπη διαδικασία συντήρησης με τα κονιάματα της φυσικής υδραυλικής ασβέστου. Μετά την μορφοποίησή τους στα καλούπια, παρέμειναν για 5 ημέρες στο θάλαμο συντήρησης (RH: 95±5%, T: 20±2°C). Την 5η ημέρα από την ημέρα παρασκευής τους απομακρύνθηκαν από τα καλούπια και συντηρήθηκαν για ακόμα 2 ημέρες στο θάλαμο συντήρησης (RH: 95±5%, T: 20±2°C), την έβδομη ημέρα απομακρύνθηκαν από τον θάλαμο συντήρησης και τοποθετήθηκαν σε δωμάτιο σταθερών συνθηκών (RH: 55±5%, T: 20±2°C) μέχρι την ημέρα των δοκιμών.

-Τα μη σταθεροποιημένα κονιάματα με πηλό και άμμο (CS) παρέμειναν δύο ημέρες στο θάλαμο συντήρησης (RH: 95±5%, T: 20±2°C) και έπειτα σε συνθήκες δωματίου, κανονικά το ξεκαλούπωμα θα πραγματοποιούνταν την 7η ημέρα αλλά ήταν ακόμα αρκετά νωπά και δεν παρουσίασαν την κατάλληλη συνεκτικότητα ώστε να αφαιρεθούν από τα καλούπια, οπότε και παρέμειναν στο δωμάτιο σταθερών συνθηκών (RH: 55±5%, T: 20±2°C).

Τελικά το ξεκαλούπωμα έγινε αναγκαστικά στις 27 ημέρες καθώς φαίνεται ότι στις συγκεκριμένες συνθήκες και μέσα στα καλούπια αδυνατούσαν τα πηλοκονιάματα να στεγνώσουν. Τα δοκίμια, έπειτα από την απομάκρυνσή τους από τα καλούπια, συντηρήθηκαν στο δωμάτιο σταθερών συνθηκών (RH: 55±5%, T: 20±2°C) μέχρι την ημέρα των δοκιμών.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι οι συνθήκες και οι χρόνοι συντήρησης του μη σταθεροποιημένου κονιάματος αναφοράς διαφοροποιήθηκαν από τους αντίστοιχους για τα τυπικά κονιάματα που αναφέρει το πρότυπο, EN 1015-Part 11, δεδομένου ότι οι χρόνοι που αναφέρονται σε αυτό δεν είναι δυνατό να εφαρμοστούν στα πηλοκονιάματα χωρίς να προκαλέσουν θραύση και δημιουργία ρηγματώσεων στα δοκίμια τους.

## 4.6 Τεχνικές αποτίμησης των πηλοκονιαμάτων κατά την πήξη και σκλήρυνση

### 4.6.1 Μικροσκοπία οπτικών ινών (FOM)

Η μικροσκοπία οπτικών ινών (F.O.M., Fiber Optics Microscopy) αποτελεί νέα μέθοδο εξέτασης επιφανειών. Στη θέση του οπτικού μικροσκοπίου και για μια πληθώρα εφαρμογών, κυρίως όμως για την επιτόπου παρατήρηση χρησιμοποιείται το μικροσκόπιο οπτικών ινών (FOM). Πρόκειται για ένα εύχρηστο φορητό μικροσκόπιο, με το οποίο μπορεί να εξεταστεί ολόκληρη η επιφάνεια ενός αντικειμένου χωρίς να απαιτείται προκατεργασία των υλικών.

Η μικροσκοπία οπτικών ινών χρησιμοποιείται για την επιτόπου αναγνώριση των τύπων φθοράς, την εκτίμηση των αποτελεσμάτων εφαρμογών μεθόδων συντήρησης, καθαρισμού, στερέωσης και προστασίας. Επίσης χρησιμοποιείται για την αρχική εκτίμηση της μικροδομής του υλικού, την επί τόπου παρατήρηση σύνθετων υλικών (για παράδειγμα κονιαμάτων), την επί τόπου παρατήρηση διεπιφανειακών φαινομένων, τη μελέτη μορφολογίας επιφανειών κ.α.

Οι οπτικές επικοινωνίες χρησιμοποιούν το φως ως φορέα των σημάτων και οπτικές ίνες για τη μετάδοση του. Το προς μετάδοση ηλεκτρομαγνητικό σήμα μετατρέπεται στο ένα άκρο της οπτικής ζεύξης κατά κανόνα σε ακολουθία ψηφιακών παλμών που διοχετεύονται στην οπτική ίνα. Στο άλλο άκρο της ζεύξης ανιχνεύονται οι παλμοί και μετατρέπονται στο αντίστοιχο ηλεκτρικό σήμα. Το σημαντικότερο τμήμα του μικροσκοπίου οπτικών ινών είναι οι φακοί οπτικών ινών, καθώς σε αυτή την αρχή βασίζεται η μέθοδος [8].

Το Μικροσκόπιο Οπτικών Ινών όπως και το οπτικό μικροσκόπιο χρησιμοποιεί ως φωτεινή πηγή λευκό φως που προέρχεται από λάμπα αλογόνου. Το λευκό φως αποτελείται από μήκη κύματος 400 nm έως 760 nm περίπου. Επειδή τα χαρακτηριστικά μεγέθη του πλέγματος των κρυστάλλων κυμαίνονται από 0,15 μέχρι 2 nm, είναι δηλαδή 3 τάξεις μεγέθους μικρότερα, οι κρύσταλλοι φαίνονται σαν συνεχές μέσο όταν φωτίζονται από λευκό φως. Οι οπτικές ιδιότητες των άμορφων και των κρυσταλλικών σωμάτων οφείλονται στην αλληλεπίδρασή τους με το προσπίπτον φως. Τα κύρια φαινόμενα που καθορίζουν αυτή την αλληλεπίδραση είναι η ανάκλαση, η διάθλαση και η απορρόφηση. Τα φαινόμενα αυτά αντιμετωπίζονται στην οπτική μικροσκοπία με βάση τις εξισώσεις του Maxwell για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Η φωτεινή πηγή περιγράφεται σαν ένας αρμονικός ταλαντωτής που χαρακτηρίζεται από τις μεταβολές του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου στο χώρο και στο χρόνο.

Στις περισσότερες εφαρμογές οι σχέσεις που διέπουν την οπτική μικροσκοπία βασίζονται στην πόλωση του φωτός που επιτυγχάνεται με τα πρίσματα Nicols. Στη μικροσκοπία οπτικών ινών χρησιμοποιείται όμως λευκό φως που δεν είναι ούτε πολωμένο ούτε μονοχρωματικό. Το γεγονός αυτό κάνει αδύνατη την ποσοτικοποίηση των συμπερασμάτων που εξάγονται με την μικροσκοπία οπτικών ινών. Αυτό φυσικά δεν αναιρεί τη σημασία των ποιοτικών παρατηρήσεων [65].

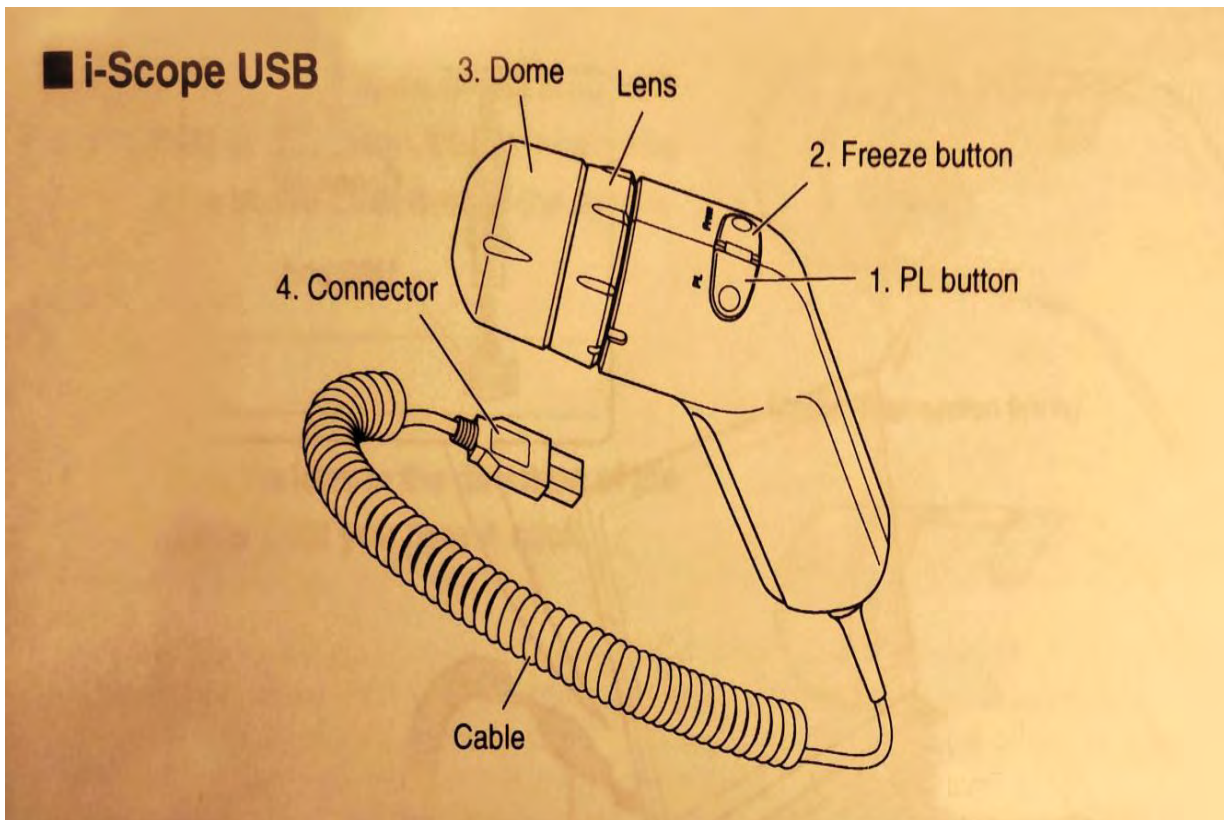


**Εικόνα 4.27** Λήψη εικόνας με μικροσκόπιο οπτικών ινών και ταυτόχρονη καταγραφή σε Η/Υ.

Κατά την διαδικασία της μικροσκοπικής εξέτασης το φως πρέπει να πέφτει κάθετα στην επιφάνεια του δείγματος ώστε να ανακλάται πίσω διαμέσου των αντικειμενικών φακών (Εικόνα 4.27).

Το μικροσκόπιο οπτικών ινών διαθέτει έξοδο τυποποιημένου σήματος βίντεο (PAL), παρέχοντας τη δυνατότητα σύνδεσης με video μόνιτορ και συσκευή εγγραφής. Οι εικόνες καταγράφονται σε μαγνητικό μέσο και έτσι μπορούν να αναπαραχθούν ανά πάσα στιγμή με ευκολία στο βίντεο. Η τυποποιημένη έξοδος σήματος επιτρέπει την εισαγωγή της εικόνας και σε υπολογιστή και κατ' επέκταση σε σύστημα ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας (η ψηφιακή ανάλυση εικόνας Pal είναι 768 x 576 pixels), παρέχοντας δυνατότητες περαιτέρω επεξεργασίας [65].

Το μικροσκόπιο οπτικών ινών χρησιμοποιήθηκε για την παρατήρηση και την καταγραφή της επιφανειακής περιοχής των δοκιμών . Το μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Moritex, i-Score USB . Οι εικόνες λήφθηκαν σε μεγεθύνσεις x30 , x50 και x120 από 3 δοκίμια κάθε σύνθεσης , χωρίς να προηγηθεί προετοιμασία των δειγμάτων και πάρθηκαν από χαρακτηριστικά σημεία κάθε πλευράς.



Σχήμα 4.4 Τμήματα της συσκευής Moritex, i-Scope USB.

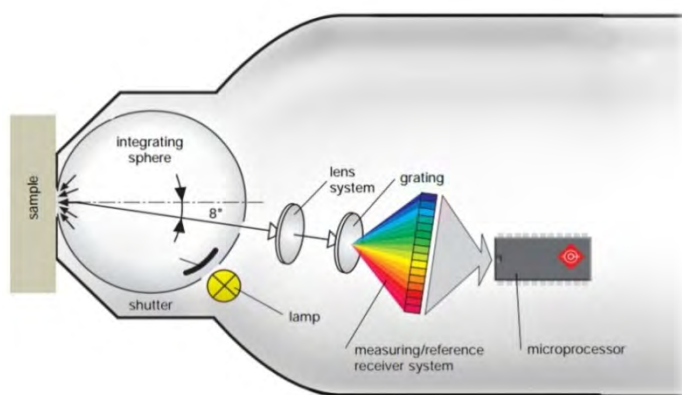
Τα κυριότερα τμήματα της συσκευής (Σχήμα 4.4) είναι:

- Λάμπα αλογόνου 100 W (εσωτερικά).
- Έλεγχος έντασης φωτός. Η ποσότητα φωτός που ανακλάται από το αντικείμενο εξαρτάται από το χρώμα και το υλικό του αντικειμένου. Το μικροσκόπιο προσαρμόζει αυτόματα την ένταση του φωτός της λάμπας έτσι ώστε να υπάρχει ένα σταθερό επίπεδο φωτεινότητας στην λαμβανόμενη εικόνα.
- Έλεγχος έντασης αντανακλώμενου φωτός (1)
- Κουμπί παγώματος εικόνας (2)
- Σύστημα εστίασης (3)
- Καλώδιο σύνδεσης με έξοδο USB (4)
- Αντικειμενικοί φακοί. Υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής των φακών ώστε να λαμβάνονται εικόνες διαφορετικών μεγεθύνσεων. Οι φακοί συνδέονται με το σύστημα μετάδοσης εικόνας μέσω οπτικών ινών.

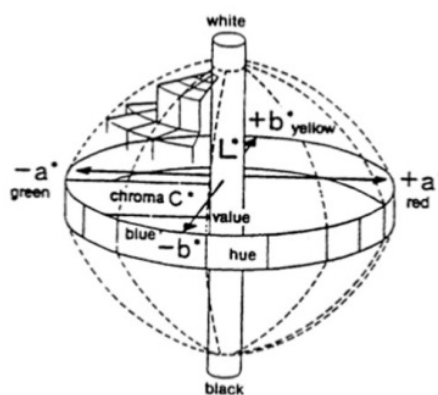
## 4.6.2 Χρωματομετρία

Η ακριβής εκτίμηση του χρώματος των κονιαμάτων και γενικότερα των οικοδομικών υλικών είναι μία ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος. Μπορεί να καθορίσει την επιλογή ενός υλικού είτε για λόγους καθαρά αισθητικούς, είτε βιοκλιματικούς, ανακλαστικότητα κλπ. Κυρίως όμως αποτελεί προαπαιτούμενο για τις αποκαταστάσεις μνημείων και κτιριακών συνόλων, καθώς σε αυτές τις περιπτώσεις η οποιαδήποτε επέμβαση, πρέπει να είναι συνεπής με τα υπάρχοντα υλικά. Οι διαφορετικές συνθήκες φωτός και η υποκειμενική εκτίμηση των χρωμάτων μας κάνουν να αντιλαμβανόμαστε τα χρώματα με διαφορετικό τρόπο. Ως εκ τούτου, είναι αδύνατο να χρησιμοποιηθεί η "αντίληψη" σε ευαίσθητες διαδικασίες παραγωγής.

Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούμε την μη καταστρεπτική τεχνική της χρωματομετρίας. Το χρωματομέτρο (φασματοφωτόμετρο-spectrophotometer) είναι ένα αυτόνομο όργανο μέτρησης διαφοράς χρώματος το οποίο δεν απαιτεί εξωτερική πηγή ισχύος και λειτουργεί με βάση την τρισδιάστατη μέθοδο, χρησιμοποιώντας την διεθνώς πιο κοινή προβολική γεωμετρία,  $d / 8^\circ$  (κυκλική). Η λειτουργία των οργάνων αυτών βασίζεται στην τριχρωματική ευαισθησία που παρουσιάζει το ανθρώπινο μάτι να συλλάβει το χρώμα με τρεις φωτοευαίσθητες ουσίες που αντιστοιχούν στα τρία βασικά χρώματα: κόκκινο, πράσινο και μπλε (RGB). Είναι γνωστό ότι από τα τρία αυτά χρώματα είναι δυνατό να παραχθούν κάτω από ορισμένες αναλογίες όλα τα χρώματα [66].



Σχήμα 4.5 Εσωτερική διάταξη χρωματομέτρου.



Σχήμα 4.6 Σύστημα πολικών συντεταγμένων χρωματικού χώρου CIE  $L^*a^*b^*$  [65].

Τα χρωματομέτρα εκπέμπουν ακτινοβολία από μια πηγή (xenon), έπειτα το διάχυτο ανακλώμενο φως του δείγματος (σε γωνία  $8^\circ$ ) διαβιβάζεται στη φορητή μονάδα μέτρησης μέσω ενός οπτικού οδηγού κύματος (καλώδιο οπτικών ινών) και ακολουθεί ακριβής διαχωρισμός πάνω στα πρότυπα φίλτρα χρώματος κόκκινο, πράσινο και μπλε. Την ίδια στιγμή, ένα δεύτερο οπτικό κύμα αξιολογεί τη φωτεινή πηγή και την επιφάνεια του γλόμπου. Το διερχόμενο φως αναλύεται με την βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή και συγκρίνεται με ορισμένα standards. Οι συντεταγμένες που δίνει το όργανο συμβολίζονται με τα γράμματα  $L^*$ ,  $a^*$  και  $b^*$  και συσχετίζονται με τις πολικές συντεταγμένες του Διεθνούς Συστήματος C.I.E. όπου η τιμή  $L^*$  δείχνει τη λαμπρότητα ή φωτεινότητα σε κλίμακα 0-100, η τιμή  $a^*$  τη διαβάθμιση του χρώματος από ερυθρό ( $+a^*$ ) ως πράσινο ( $-a^*$ ) και η τιμή  $b^*$  τη διαβάθμιση από κίτρινο ( $+b^*$ ) σε μπλε ( $-b^*$ ) [66].



Εικόνα 4.28 Γενική διάταξη εργαστηρίου, μέτρηση με άμεση καταγραφή δεδομένων στον Η/Υ.

Για τη μέτρηση των χρωματικών συντεταγμένων χρησιμοποιήθηκε το χρωματόμετρο Dr. Lange spectrocolor LMG 183, με ακρίβεια μέτρησης  $\pm 0,01$  σύμφωνα με το πρότυπο EN 15886:2010 [67].

Πριν από τη λήψη κάθε σειράς μετρήσεων προηγούνταν βαθμονόμηση του οργάνου, με τη χρήση δύο προτύπων της συσκευής, ενός λευκού και ενός μαύρου πλακιδίου. Η μέτρηση του χρώματος πραγματοποιήθηκε σε τρία δοκίμια από κάθε σύνθεση πηλοκοκκιομαμάτων. Λήφθηκαν 10 μετρήσεις σε τρεις χαρακτηριστικές πλευρές κάθε δοκιμίου (ανάλογα με τη χρωματική ανομοιογένεια) και υπολογίστηκε ο μέσος όρος για κάθε πλευρά και μετέπειτα για το σύνολο των δοκιμίων ανά σύνθεση (Εικόνα 4.28).

Εκτός από την διαφορά στην κάθε μεταβλητή του συστήματος CIE  $L^*a^*b^*$  ένα άλλο μέγεθος το οποίο θεωρείται ιδιαίτερα χρήσιμο είναι η συνολική χρωματική μεταβολή  $\Delta E$  και είναι ένας δείκτης της χρωματικής διαφοράς μεταξύ δειγμάτων. Στην προκειμένη περίπτωση μελετούμε εκτός των άλλων την χρωματική διαφορά μεταξύ των μη σταθεροποιημένων δοκιμίων τη σύνθεσης αναφοράς με τα σταθεροποιημένα δοκίμια [65].

Αξιοποιώντας τις παραμέτρους του συστήματος CIE  $L^*a^*b^*$  υπολογίζουμε τη συνολική χρωματική διαφορά δύο δειγμάτων από τον τύπο:

$$\Delta E = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$$

όπου

$\Delta L^*$  : διαφορά λαμπρότητας

$\Delta a^*$  : διαφορά στο κόκκινο – πράσινο

$\Delta b^*$  : διαφορά στο κίτρινο – μπλε



### 4.6.3 Πορομετρία Hg (MIP)

Η Πορομετρία Υδραργύρου (Mercury Intrusion Porosimetry) αποτελεί μια από τις σημαντικότερες μεθόδους εκτίμησης και ανάλυσης της μικροδομής των πορώδων υλικών. Η πειραματική τεχνική βασίζεται στη βαθμιαία εισδυσή υδραργύρου σε ένα πορώδες υλικό εκκενωμένο από αέρα και στη συνέχεια στην απομάκρυνση του. Καθώς ο Hg αποτελεί μη διαβρέχον υγρό για το σύνολο των υλικών, απαιτείται επιβολή πίεσης για να εισδύσει στους πόρους ενός εκκενωμένου από αέρα πορώδους υλικού. Καθώς η εξωτερική πίεση αυξάνεται ο Hg προοδευτικά εισβάλλει και στους μικρότερους πόρους με την προϋπόθεση ότι όταν επιβληθεί αρκετά μεγάλη πίεση, το πορώδες δείγμα θα κορεσθεί με Hg. Μετά το στάδιο της εισδυσής του Hg, πραγματοποιείται η απομάκρυνση του από τους πόρους του δείγματος με ελάττωση της πίεσης. Κατά τα δύο προηγούμενα στάδια γίνεται ταυτόχρονη καταγραφή των πειραματικών δεδομένων, τα οποία βάσει συγκεκριμένου μοντέλου, δίνουν πληροφορίες σε σχέση με το σύστημα πόρων του υλικού.

Οι καμπύλες εισδυσής - απομάκρυνσης υδραργύρου παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τα μεγέθη και τα σχήματα των πόρων, τη συνεκτικότητα του πορώδους, τις συσχετίσεις μεταξύ των μεγεθών γειτονικών πόρων και τη τραχύτητα των τοιχωμάτων των πόρων. Οι μικροδομικές ιδιότητες των πορώδων υλικών προσδιορίζουν τις μακροσκοπικές τους ιδιότητες μεταφοράς, για παράδειγμα τη διαπερατότητα ή την αποτελεσματική διαχυτότητα του υλικού και έχουν μεγάλη σημασία για την αποτίμηση των ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών των δομικών υλικών και της προσδοκώμενης συμπεριφοράς κατά την εφαρμογή τους. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων της μεθόδου, δύναται να καθορίσει τη σχέση μεταξύ των δομικών παραμέτρων των υλικών και των ιδιοτήτων τους, θέτοντας τις βάσεις για βελτίωση ιδιοτήτων, ελέγχου συμβατότητας διαφορετικών υλικών, σχεδιασμού και αριστοποίησης παραγωγής νέων υλικών, μέσω μελέτης των χαρακτηριστικών μικροδομής [59].

Οι παράμετροι μικροδομής που προσδιορίζονται με την πορομετρία υδραργύρου είναι ο ολικός όγκος των κενών ανά μονάδα μάζας ( $\text{mm}^3/\text{g}$ ), η ειδική επιφάνεια πόρων ( $\text{m}^2/\text{g}$ ), η μέση ακτίνα των πόρων  $r$  ( $\mu\text{m}$ ), η φαινόμενη και η διορθωμένη φαινόμενη πυκνότητα του δείγματος ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) και το % ολικό ανοιχτό πορώδες. Επίσης, το ενσωματωμένο λογισμικό πρόγραμμα κατασκευάζει διάγραμμα ειδικού όγκου εισερχόμενου υδραργύρου-πίεσης καθώς και το ιστόγραμμα που παρουσιάζει την κατανομή του όγκου των πόρων (ανοιχτών) με τις ακτίνες του υλικού. Με την πορομετρία υδραργύρου επιτυγχάνεται η έμμεση μέτρηση του ανοιχτού πορώδους. Ως ολικό πορώδες ενός υλικού ονομάζεται το ποσοστό του κενού χώρου (%) στο σύνολο του όγκου:  $P \% = (V_{\text{κενών}}/V_{\text{δείγματος}}) \times 100$ . Ανοιχτό πορώδες (P%) ενός υλικού ονομάζεται το ποσοστό του όγκου των πόρων, όπου μπορεί να εισχωρήσει ένα ρευστό. Στην πορομετρία υδραργύρου, ουσιαστικά μετρείται το ανοικτό πορώδες, το οποίο προσεγγιστικά και για ορισμένους τύπους δειγμάτων μπορεί να θεωρηθεί ίσο με το ολικό πορώδες [68].

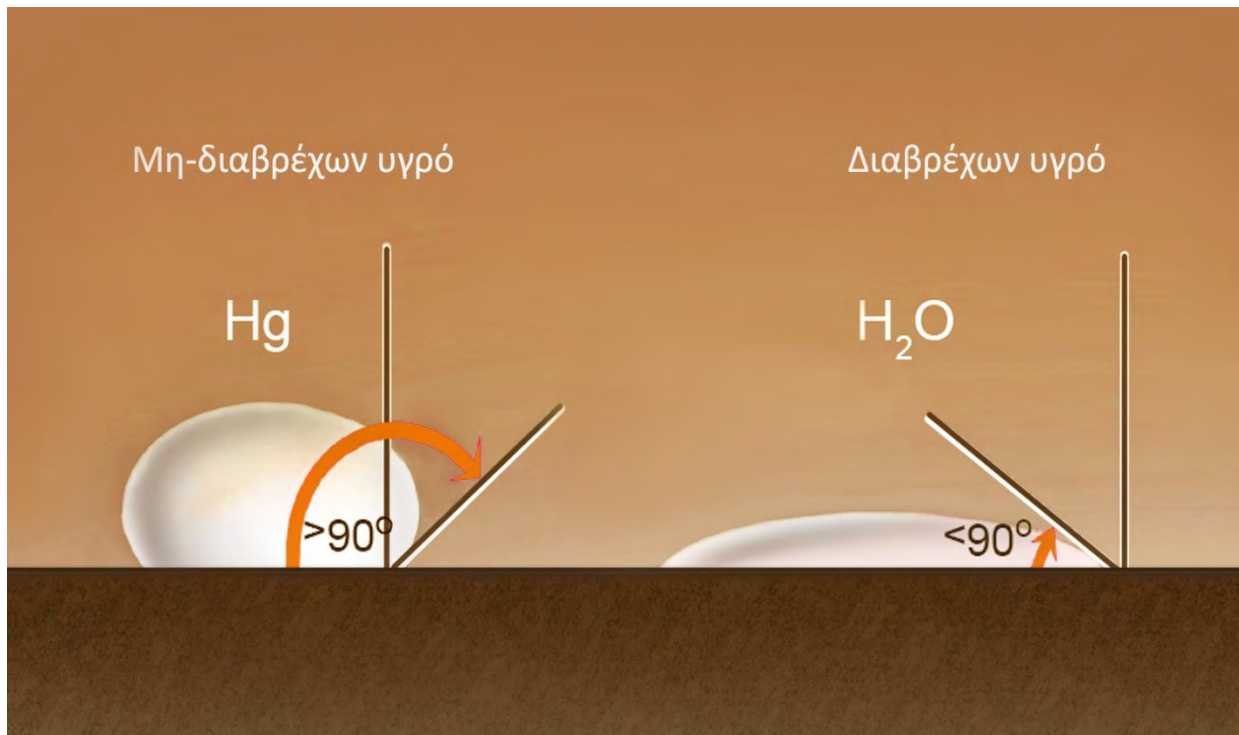
Το ολικό πορώδες ενός κονιάματος σχετίζεται κατά προσέγγιση με την μηχανική αντοχή του κονιάματος. Το πορομέτρο υδραργύρου αντίθετα επιτρέπει τη χρήση ακανόνιστων τεμαχίων και μικρών διαστάσεων δείγματα κονιάματος για την εκτέλεση της μέτρησης. Η κατανομή των διαμέτρων των πόρων με τον όγκο των κενών είναι ένα δεδομένο χρήσιμο, παρά τους περιορισμούς που προκύπτουν από την μέτρηση που υιοθετεί το κυλινδρικό μοντέλο πόρων.

Συγκριτικά οι κατανομές μπορούν να είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για τη διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών των κονιαμάτων. Οι κατανομές μπορούν να διαφοροποιούνται ανάλογα με την φύση της κονιάς (π.χ. τα κονιάματα με τσιμέντο δείχνουν μια υπεροχή σε πολύ μικρούς πόρους, ενώ τα κονιάματα με ασβέστη παρουσιάζουν συνήθως ένα μεγάλο ποσοστό μεγαλύτερων πόρων). Το πορώδες επηρεάζεται αρκετά, από τις συνθήκες εφαρμογής του κονιάματος και κυρίως από το νερό ανάμιξης και από την συμπίεση που υφίσταται το κονίαμα κατά την εφαρμογή του. Επίσης το πορώδες των αδρανών επηρεάζει το αποτέλεσμα της μέτρησης [59].



Εικόνα 4.29 Γενική διάταξη Πορομετρίας με δύο τμήματα για τη μέτρηση των μεγάλων και μικρών πόρων.

Η πειραματική διάταξη στο εργαστήριο του Τομέα ΙΙΙ Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών αποτελείται από δύο τμήματα: το Macropores Unit 120 (Fisons Instruments) και το Pascal 440 (Thermo Electron)(εικόνα 4.29). Το πρώτο τμήμα χρησιμεύει για τη μέτρηση των μεγάλων πόρων (ακτίνας 7.5-100  $\mu\text{m}$ ) ενώ το δεύτερο για τη μέτρηση μικρότερων πόρων (ακτίνας 7.5 – 0.00375 $\mu\text{m}$ ). Το πρώτο τμήμα (Macropores Unit 120) περιλαμβάνει: αντλία κενού μέσω της οποίας αφαιρείται ο αέρας από το δείγμα και δεξαμενή αποθήκευσης του υδραργύρου. Στο τμήμα αυτό ο υδράργυρος εισδύει στο δείγμα με επιβολή εξωτερικής πίεσης μέσω του ατμοσφαιρικού αέρα. Η μέγιστη τιμή της ισούται με 1atm. Στο δεύτερο τμήμα (Pascal 440), η εισδυσή του υδραργύρου πραγματοποιείται με επιβολή εξωτερικής πίεσης μέσω υδραυλικού συστήματος, το όριο της πίεσης είναι ίσο προς 200MPa. Και τα δύο τμήματα είναι συνδεδεμένα μέσω μιας μονάδας ελέγχου με ηλεκτρονικό υπολογιστή, όπου γίνονται απ'ευθείας, η καταγραφή της καμπύλης εισδυσής - απομάκρυνσης του υδραργύρου, οι διάφοροι υπολογισμοί (πορώδες, πυκνότητα κλπ.) και επεξεργασία των μετρήσεων (κατασκευή της καμπύλης ογκομετρικής κατανομής των πόρων ως προς τις ακτίνες τους).



Σχήμα 4.7 Η γωνία επαφής ( $\theta$ ) για τον υδράργυρο (μη-διαβρέχων υγρό) και για το νερό (διαβρέχων υγρό).

Η πορομετρία υδραργύρου βασίζεται στην υπόθεση του κυλινδρικού μοντέλου πόρων, το μέγεθος των πόρων μπορεί να προσδιοριστεί από την εξωτερική πίεση που απαιτείται για να ωθήσει το υγρό μέσα σε ένα πόρο ως προς την αντιστασόμενη δύναμη της επιφανειακής τάσης του υγρού. Τα περισσότερα λογισμικά των οργάνων επεξεργάζονται τις μετρήσεις χρησιμοποιώντας μια τροποποιημένη εξίσωση Young-Laplace, η οποία τις περισσότερες φορές αναφέρεται ως εξίσωση ισορροπίας δυνάμεων γνωστή και ως εξίσωση Washburn [69].

$$P = - \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{R}$$

Όπου,

$P$  = η εφαρμοζόμενη πίεση

$\gamma$  = η επιφανειακή τάση του υδραργύρου

$R$  = η ακτίνα των πόρων

$\theta$  = η γωνία επαφής του υγρού διείσδυσης

Από την στιγμή που η τεχνική γίνεται συνήθως υπό κενό, η πίεση του αερίου θεωρητικά ξεκινά από το μηδέν. Η γωνία επαφής του υδραργύρου με τα περισσότερα στερεά είναι μεταξύ  $135^\circ$  και  $142^\circ$ , στην περίπτωση μας λαμβάνεται η τιμή των  $141^\circ$  (Σχήμα 4.7) και η επιφανειακή τάση του υδραργύρου στους  $20^\circ\text{C}$  είναι  $480\text{mN/m}$  (δίνες ανά εκατοστό).



Εικόνα 4.30 Πλήρωση κυψελίδας με υδράργυρο.



Εικόνα 4.31 Σφράγιση με λάδι του δειγματοφορέα.

**Η πειραματική διαδικασία μπορεί να αναλυθεί στα ακόλουθα επιμέρους στάδια:**

Το εκάστοτε δείγμα ζυγίζεται με ακρίβεια 4ου δεκαδικού ψηφίου (μάζας  $1.5 \pm 0.2\text{g}$ ) και εισάγεται σε κατάλληλο υποδοχέα του οργάνου (dilatometer) και τοποθετείται στο Macropores Unit 120 . Η μάζα του δείγματος κυμαίνεται από 1.5g για υλικά με μεγάλη τιμή του πορώδους ως και 3g για υλικά με μικρό πορώδες.

Μέσω της αντλίας κενού, αφαιρείται ο αέρας από το δείγμα (διατήρηση του κενού για 30 λεπτά). Στη συνέχεια και υπό κενό, ο υποδοχέας (Κυψελίδα) πληρώνεται με υδράργυρο μέχρι την προτεινόμενη χαραγή, και ακολουθεί παύση της λειτουργίας του κενού (Εικόνα 4.30).

Ακολουθεί σταδιακή αύξηση της πίεσης από 0-1atm (101.325KPa), οπότε ο υδράργυρος εισδύει στους “μεγάλους” πόρους του δείγματος ενώ ταυτόχρονα καταγράφεται η μείωση του ύψους στην κυψελίδα και μετράται ο όγκος του. Μετά το πέρας της διαδικασίας ο υποδοχέας μαζί με το δείγμα και τον υδράργυρο ζυγίζονται.

Η πειραματική διαδικασία συνεχίζεται στο δεύτερο τμήμα του πορομέτρου (Pascal 440), όπου μέσω ενός υδραυλικού συστήματος, ο υδράργυρος διεισδύει στους μικρούς πόρους. Η αύξηση της πίεσης γίνεται με ρυθμό 4 bar/s μέχρι την τιμή των 200MPa. Μετά το στάδιο της εισόδου του υδράργυρου, πραγματοποιείται η απομάκρυνση του υδράργυρου από τους πόρους του δείγματος με μείωση της πίεσης και ρυθμό 2 bar/s. Ταυτόχρονα και για τα δυο προηγούμενα στάδια γίνεται καταγραφή των πειραματικών δεδομένων.

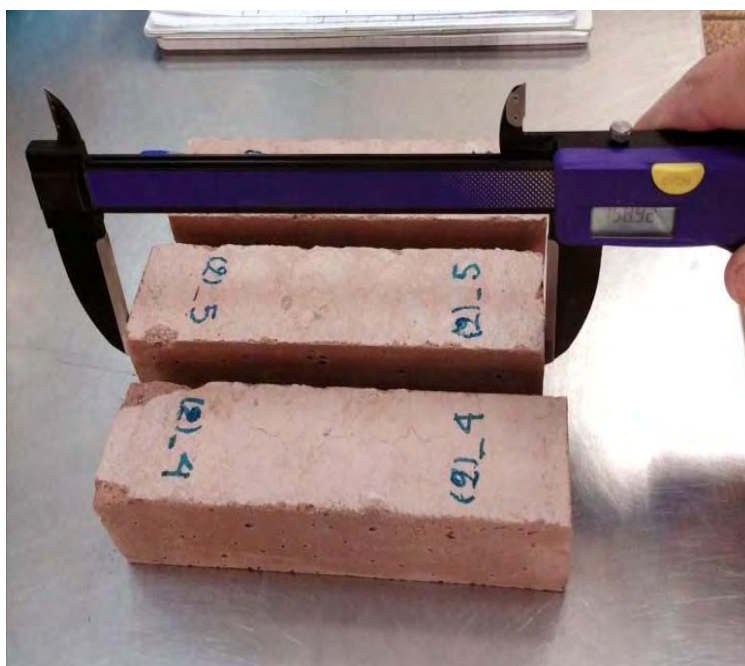
#### 4.6.4 Μεταβολή του όγκου των δοκιμών των κονιαμάτων

Η συστολή κατά την ξήρανση των πηλοκονιαμάτων έχει παρατηρηθεί ότι μπορεί να προκαλέσει στην τοιχοποιία οριζόντια συστολή από 1 έως 2mm στα 5 μέτρα μήκους τοίχου, ενώ από την καθίζηση των πηλοκονιαμάτων στην τοιχοποιία μπορεί να προκληθεί μια κατακόρυφη συστολή του τοίχου της τάξεως του 1 έως 2 cm ανά 3 μέτρα ύψους τοίχου [70].

Προκειμένου να αποτιμηθεί η μεταβολή κατά όγκο των κονιαμάτων, μετρήθηκαν οι διαστάσεις των δοκιμών στις 7, 28, 90 και 180 ημέρες για όλα τα σταθεροποιημένα κονιάματα (συνθέσεις (2)NHL20CS, (3)NHL25CS,(4)SL20CS και (5)SL25CS) ενώ για το μη σταθεροποιημένο κονίαμα (σύνθεση (1)CS) δεν πάρθηκε μέτρηση στις 7 ημέρες καθώς δεν είχε πήξει ακόμα. Πιο συγκεκριμένα για κάθε δοκίμιο έγιναν 4 μετρήσεις σε κάθε πλευρά των 4cm και 5 μετρήσεις στην πλευρά των 16 cm. Οι μετρήσεις έγιναν με πιστοποιημένο ψηφιακό παχύμετρο TESA 0-300mm από το εργαστήριο του τμήματος Ελέγχου Ποιότητας και Ανάπτυξης της βιομηχανίας τσιμέντων «TITAN Α.Ε.» (Εικόνα 4.32).



Εικόνα 4.32 Ψηφιακό παχύμετρο TESA.



Εικόνα 4.33 Μέτρηση συστολής δοκιμών.

Από τις παραπάνω μετρήσεις, υπολογίστηκε ο όγκος του κάθε δοκιμίου και χρησιμοποιώντας τον τύπο που ακολουθεί υπολογίστηκε η συρρίκνωση (% κ.ο.).

$$\text{Shrin.(\%V)} = 100 - (V_t / V_0) \cdot 100$$

Όπου:

**Shrin.(%V)** : Η συρρίκνωση κατά όγκο, (%)

**$V_t$**  : Ο όγκος δοκιμίου στη χρονική στιγμή  $t$ , ( $\text{cm}^3$ )

**$V_0$**  : Ο αρχικός όγκος δοκιμίου, ( $\text{cm}^3$ )

#### 4.6.5 Ταχύτητα Διάδοσης υπερήχων και δυναμικό μέτρο ελαστικότητας

Η τεχνική των υπερήχων αποτελεί μια μη καταστροφική τεχνική ελέγχου των υλικών. Πρόκειται για εξελιγμένη μέθοδο με ευρεία χρήση στον έλεγχο των κατασκευών. Βασίζεται στο ότι τα στερεά υλικά είναι καλοί αγωγοί των ηχητικών κυμάτων, η ταχύτητα των οποίων εξαρτάται από την πυκνότητα και τις ελαστικές ιδιότητες του εκάστοτε υλικού [8].

Κατά την μέθοδο αυτή μετράται η ταχύτητα διάδοσης ακουστικών κυμάτων, η οποία εξαρτάται από το μέτρο ελαστικότητας και συνεπώς αποτελεί ένα δείκτη αντοχής των υλικών, στην προκειμένη περίπτωση των κονιαμάτων. Τα ηχητικά κύματα ανακλώνται σε τυχούσες εσωτερικές ατέλειες και τις εντοπίζουν. Όσο ισχυρότερη είναι η αλληλεπίδραση του υλικού με το κύμα τόσο υψηλότερη και η συχνότητά του.

Η μέθοδος συνίσταται στην εφαρμογή δύο ακροδεκτών στα άκρα ενός υλικού, εκ των οποίων ο ένας δρα ως πομπός και ο άλλος ως δέκτης. Μετρώντας το χρόνο διάδοσης των κυμάτων από τον πομπό προς το δέκτη και γνωρίζοντας τη μεταξύ τους απόσταση υπολογίζεται η ταχύτητα των υπερήχων.

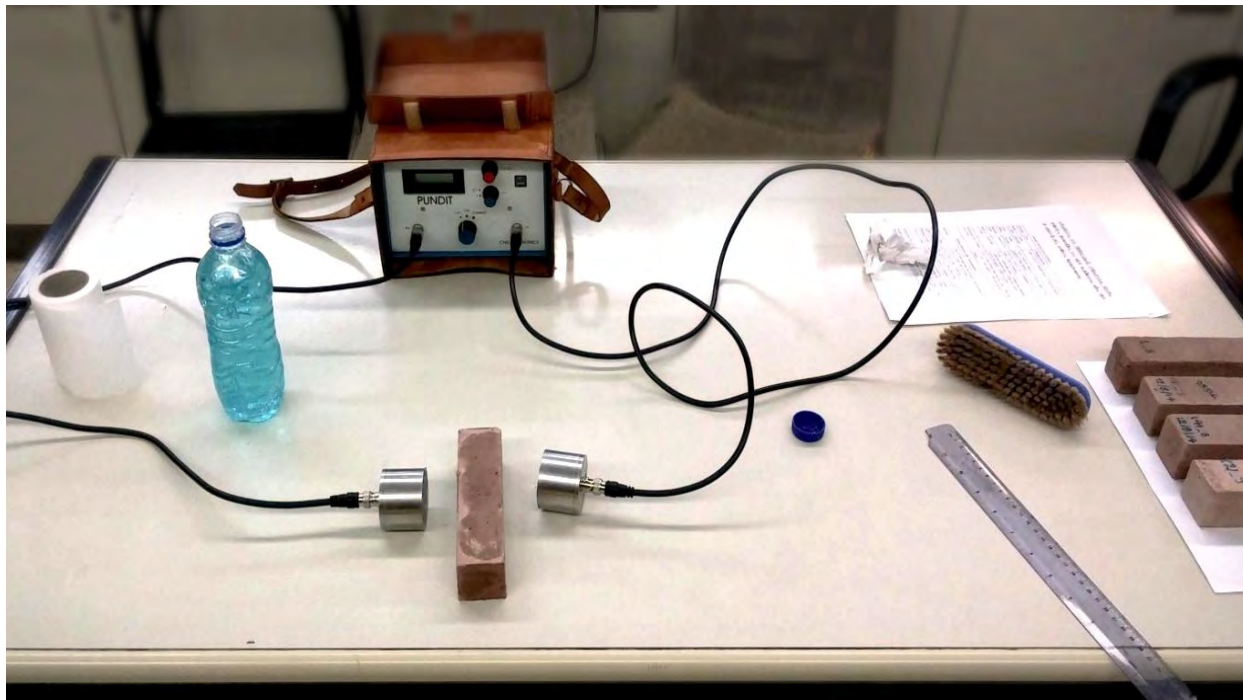
Η μέθοδος των υπερήχων είναι εξαιρετικά δημοφιλής όχι μόνο για τον εντοπισμό ατελειών (ρωγμές, πόροι, αποκολλήσεις) στη δομή των εξεταζόμενων στοιχείων, αλλά επίσης για την εκτίμηση της θλιπτικής αντοχής, του μέτρου ελαστικότητας, της σταθεράς του Poisson και της ποιότητας των υλικών, για τον έλεγχο της ομοιογένειας, την παρακολούθηση της εξέλιξης της αντοχής και την εύρεση του πάχους του κατεστραμμένου επιφανειακού στρώματος. Με την υπερηχοσκόπηση μπορούν να μετρηθούν αλλαγές που παρατηρούνται με την πάροδο του χρόνου στις ιδιότητες των υλικών των κατασκευών [8].

Πιο συγκεκριμένα ο μεγάλος χρόνος μετάδοσης των κυμάτων μπορεί να οφείλεται είτε σε κακή ποιότητα του υλικού είτε στην ύπαρξη ρωγμών, οι οποίες υποχρεώνουν τα σήματα να ακολουθήσουν τεθλασμένη πορεία.

Αν είναι εκ των προτέρων γνωστή ή ύπαρξη ρωγμής, μπορεί να γίνει εκτίμηση του μεγέθους της. Σε αντίθετη περίπτωση ενδέχεται να εξαχθούν πλασματικά αποτελέσματα, αν η μέθοδος δε συνδυαστεί με άλλες μεθόδους αποτίμησης της κατάστασης του υλικού.

Σε μη ομογενή υλικά παρατηρείται το φαινόμενο απώλειας ακουστικής ενέργειας λόγω απορρόφησης ή διασκόρπισης της. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με μείωση της συχνότητας, ωστόσο δυσκολεύει την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων [8].

Επίσης είναι σημαντικό οι μετρήσεις να μην γίνονται σε ακραίες τιμές υγρασίας και θερμοκρασίας. Σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες το νερό ενδέχεται να πήξει και να αυξήσει τις μετρούμενες ταχύτητες, ενώ αντίθετα σε υψηλές θερμοκρασίες, μικρορωγμές, που προκαλούνται στα οικοδομικά υλικά, θα δώσουν εσφαλμένες εκτιμήσεις χαμηλής αντοχής.



Εικόνα 4.34 Γενική διάταξη πειράματος υπερηχοσκόπησης.

Οι συσκευές υπερήχων αποτελούνται από ένα πομπό υπερηχητικού κύματος, έναν ελεγκτή συχνότητας, ένα δέκτη του σήματος με ενσωματωμένο ενισχυτή, ένα μετρητή του χρόνου τον οποίο χρειάζεται ο υπέρηχος για να διανύσει το υπό εξέταση στοιχείο και μια οθόνη προβολής δεδομένων. Για εξασφάλιση της συνολικής μετακίνησης των υπερηχητικών κυμάτων μέσα από τη μάζα του στοιχείου συνίσταται να τοποθετείται μεταξύ των ακροδεκτών πομπού - δέκτη και του στοιχείου που εξετάζεται, μια λιπαντική ουσία, η οποία καλύπτει τις ατέλειες της εξωτερικής επιφάνειας του μέλους (Εικόνα 4.34).

Στην συγκεκριμένη εργασία η τεχνική των υπερήχων χρησιμοποιήθηκε για την αποτίμηση της ταχύτητας διάδοσης των υπερήχων στα δοκίμια των κονιαμάτων καθώς και του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας. Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε ήταν η Pundit-CNS Electronics, EN12504-4 με συχνότητα παλμών πηγής στα 54 KHz.

Για κάθε σύνθεση προσδιορίστηκαν οι ταχύτητες διάδοσης των υπερηχητικών κυμάτων με αρκετές μετρήσεις στις πλευρές που εφάπτονταν στα τοιχώματά της μήτρας και κάθετα στον διαμήκη άξονα, καθώς διατηρούσαν έντονα την παραλληλία, αντιθέτως στον διαμήκη άξονα δεν ήταν δυνατό να παρθούν αξιόπιστες μετρήσεις καθώς οι πλευρές στις κορυφές των δοκιμίων δεν διατηρούσαν παραλληλία. Πριν από οποιαδήποτε μέτρηση προηγήθηκε βαθμονόμηση της συσκευής με την βοήθεια ειδικής ράβδου βαθμονόμησης στα 25,5μs (Εικόνα 4.35).



Εικόνα 4.35 Ράβδος βαθμονόμησης υπερηχοσκόπησης. Εικόνα 4.36 Μέτρηση ταχύτητας διάδοσης υπερήχων.

Η ταχύτητα διάδοσης των υπερηχητικών κυμάτων για ισότροπο, ελαστικό μέσο απείρων διαστάσεων σχετίζεται με την φαινόμενη πυκνότητα του υλικού και τις ελαστικές του σταθερές σύμφωνα με τον τύπο : [71]

$$E_d = \rho \cdot V^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)}$$

Όπου:

**V** : Η ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων

**E<sub>d</sub>** : Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας

**ρ** : Η φαινόμενη πυκνότητα

**ν** : Ο λόγος Poisson

Χρησιμοποιώντας τους παραπάνω τύπους, υπολογίστηκε το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας, γνωρίζοντας την ταχύτητα διάδοσης των διαμήκων κυμάτων (V) και την φαινόμενη πυκνότητα των κονιαμάτων (ρ). Όσον αφορά τον λόγο Poisson (ν) χρησιμοποιήθηκε τιμή που αναφέρεται στην διεθνή βιβλιογραφία για κονιάματα τέτοιου τύπου, ίση με 0.25 [72].



#### 4.6.6 Προσδιορισμός μηχανικών αντοχών

Τα δομικά υλικά παρουσιάζουν μεταξύ τους διαφορετική αντίσταση στην φθορά, η οποία εξαρτάται από, τις συνθήκες του περιβάλλοντος και την ίδια την φύση του υλικού. Εξωτερικά φορτία καταπονούν τα δομικά υλικά σαν μέρος του δομικού συνόλου. Σε περίπτωση κακού σχεδιασμού, είναι πιθανή η γρήγορη αστοχία των κονιαμάτων, εάν έχουν τεθεί σε έντονες εφελκυστικές καταπονήσεις. Επιπλέον διαφορετικοί συντελεστές θερμικής διαστολής μεταξύ γειτονικών υλικών, προκαλούν ανάπτυξη τάσεων με επακόλουθη καταπόνηση των υλικών ενώ η δημιουργία πάγου μπορεί να ασκήσει μηχανικές τάσεις εντός του υλικού [8].

Οι μηχανικές ιδιότητες ενός μείγματος πηλοκονιάματος δεν μπορούν εξ' αρχής να προκαθοριστούν, γεγονός που συμβαίνει στα συνήθη κονιάματα. Η αδυναμία αυτή βέβαια, είναι απόρροια της δυσκολίας και έλλειψης τυποποίησης των πηλών, καθώς χρησιμοποιούνται σε ελάχιστο ποσοστό στη σύγχρονη δόμηση, σε παγκόσμια κλίμακα [2].

Το κονίαμα των οριζόντιων αρμών, κατά τη θλιπτική καταπόνηση της τοιχοποιίας, τελεί υπό περισφίγξη και η τοιχοποιία αστοχεί από εγκάρσια διάρρηξη των πλίνθων ακόμη και για ακραίους συνδυασμούς ισχυρών πλίνθων με ασθενή κονιάματα. Κατά συνέπεια, η αύξηση της θλιπτικής αντοχής του τοίχου επηρεάζεται έμμεσα απ' την αύξηση της θλιπτικής αντοχής του κονιάματος και οφείλεται στη μείωση των εγκάρσιων παραμορφώσεων του κονιάματος [73].

##### Αντοχή σε κάμψη



Εικόνα 4.37 Συσσκευή κάμψης ToniTechnik. Εικόνα 4.38 Δοκιμή κάμψης πηλοκονιαμάτων.

Κατά την διαδικασία προσδιορισμού της αντοχής σε κάμψη, το πρισματικό δοκίμιο του κονιάματος (διαστάσεων 4x4x16 cm), τοποθετείται στη συσκευή δοκιμής με την πλάγια πλευρά του επαπτόμενη στους κυλίνδρους στήριξης (ώστε να εξασφαλίζεται καλή επαφή των κυλίνδρων στο δοκίμιο) και με τον επιμήκη άξονά του κάθετο προς τα στηρίγματα. Το δοκίμιο φορτίζεται κατακόρυφα με εφαρμογή του κυλίνδρου φόρτισης στην απέναντι πλάγια πλευρά του πρίσματος. Η συσκευή κάμψης που χρησιμοποιείται είναι η ToniTechnik-D-70804 με ρυθμό φόρτισης: 0.05 KN/s.

Για κάθε σύνθεση πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε τρία δοκίμια, στα χρονικά διαστήματα των 28 ημερών, 3 και 6 μηνών (εξαιρουμένης της σύνθεσης αναφοράς (1)CS της οποίας τα δοκίμια δεν ήταν έτοιμα για δοκιμές στις 28 ημέρες).

Η αντοχή σε κάμψη ( $R_f$ ) υπολογίζεται θεωρητικά από τη σχέση:  $R_f = 1.5 \cdot F_f / (l \cdot b \cdot d^2)$

όπου:

$R_f$ : η αντοχή σε κάμψη (MPa)

$b$ : το πλάτος του πρίσματος (mm)

$d$ : το βάθος του πρίσματος (mm)

$F_f$ : το φορτίο που ασκείται στο μέσο του πρίσματος κατά τη θραύση (N)

$l$ : η απόσταση μεταξύ των στηριγμάτων (mm)

Η εφαρμογή του μέγιστου φορτίου γίνεται στο κέντρο του διαμήκη άξονα του πρισματικού δοκιμίου, δεδομένου ότι στο σημείο αυτό εμφανίζεται η μέγιστη αντοχή του. Τόσο η δοκιμή σε κάμψη όσο και η δοκιμή σε θλίψη πραγματοποιήθηκαν βάσει του προτύπου EN 1015-11:1999 [64].

### Αντοχή σε θλίψη

Για τον προσδιορισμό της αντοχής σε θλίψη, χρησιμοποιούνται τα δύο θραυσμένα μέρη των δοκιμίων που έχουν υποστεί κάμψη. Η τοποθέτησή τους γίνεται κατά το μήκος τους, στο κέντρο των πλακών της συσκευής θλίψης, με τέτοιο τρόπο ώστε το άκρο του πρίσματος να προεξέχει περίπου 10 mm από τα άκρα των πλακών. Η συσκευή θραύσης που χρησιμοποιείται είναι η TopiTechnik-D-70804 (μέγιστο φορτίο: 50 kN, ρυθμός φόρτισης: 0.1mm/min). Τα δοκίμια στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής αποτιμήθηκαν στα χρονικά διαστήματα των 28 ημερών, 3 και 6 μηνών.



Εικόνα 4.39 Δοκιμή θλίψης.



Εικόνα 4.40 Εικόνα δοκιμίου NHL25CS μετά τη θλίψη.

Η αντοχή σε θλίψη υπολογίζεται θεωρητικά από τη σχέση:  $R_c = F_c / A$

όπου:

$R_c$ : η αντοχή σε θλίψη (MPa)

$F_c$ : το μέγιστο φορτίο στο σημείο θραύσης (N)

$A$ : η επιφάνεια στην οποία ασκείται το φορτίο (mm<sup>2</sup>).

## 4.7 Τεχνικές αποτίμησης των σταθεροποιημένων πηλοκονιαμάτων

### 4.7.1 Υδατοαπορρόφηση με τριχοειδή αναρρίχηση

Τα τριχοειδή φαινόμενα που παρατηρούνται στα πορώδη υλικά, δηλαδή η άνοδος και η πτώση ενός υγρού μέσα στη μάζα τους, οφείλονται στην επιφανειακή τάση και εξαρτώνται από τα σχετικά μεγέθη συνοχής του υγρού και συνάφειας του με τα τοιχώματα των πόρων των μέσων [74].

Η δοκιμή της υδατοαπορρόφησης με τριχοειδή αναρρίχηση πραγματοποιήθηκε προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά των δοκιμών ως προς την ταχύτητα ρόφησης και να προσδιοριστούν τα παρακάτω μεγέθη:

- ο **συντελεστής απορρόφησης νερού μέσω τριχοειδών (C.R.C.,  $\text{mg}/\text{cm}^2\text{s}^{1/2}$ )**,

$$\text{C.R.C.} = \frac{\Delta B}{(S \cdot \sqrt{t})}$$

Όπου:

**$\Delta B$**  : Η μάζα νερού που απορροφήθηκε συνολικά (mg),

**S**: Η επιφάνεια του δείγματος που έρχεται σε επαφή με το νερό ( $\text{cm}^2$ )

**t**: Ο συνολικός χρόνος απορρόφησης (sec)

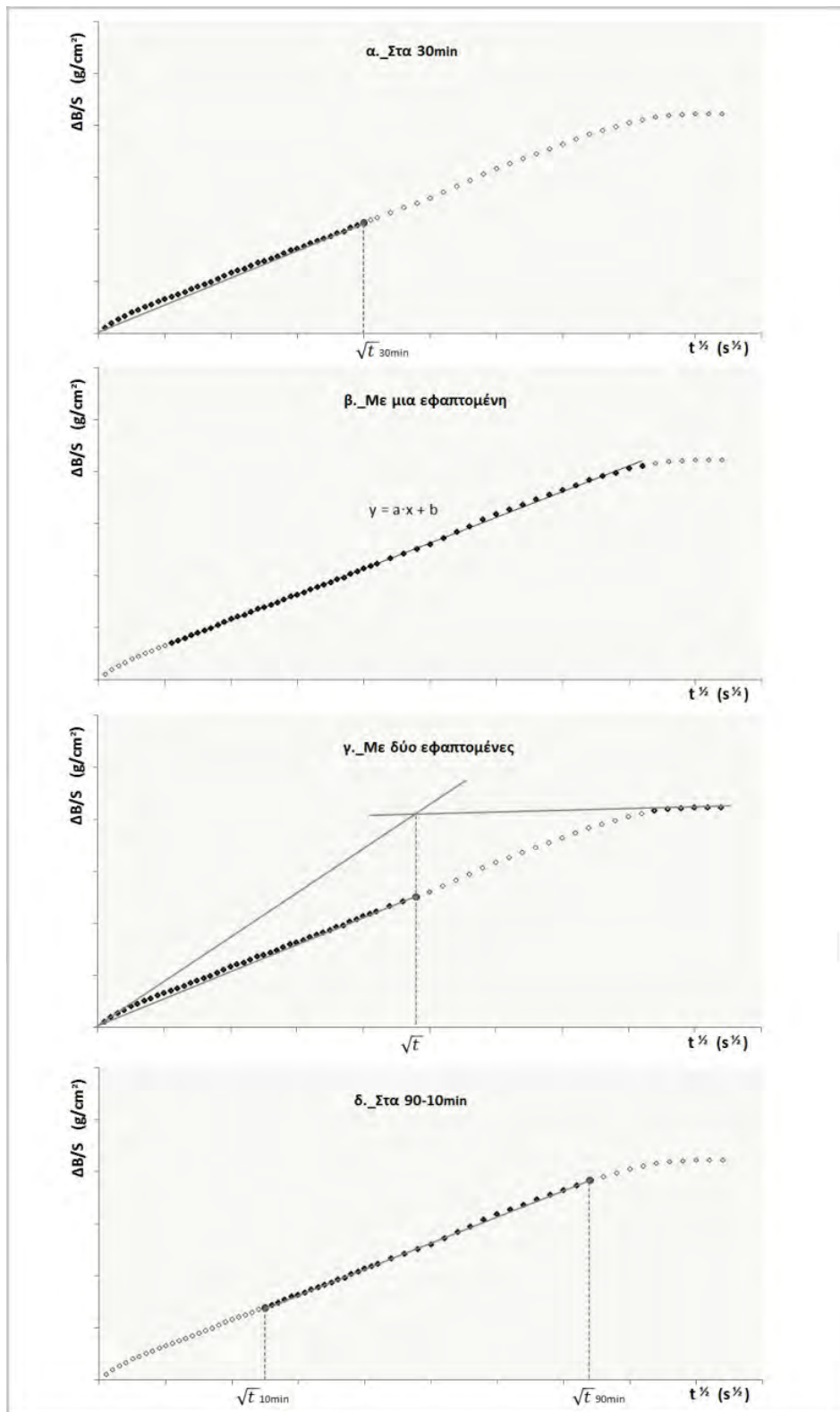
Στην συγκεκριμένη εργασία, ο συντελεστής υδατοαπορρόφησης κάθε υλικού υπολογίστηκε με τέσσερις προτεινόμενους τρόπους από διαφορετικά πρότυπα:

**α)** Στα **30min** (σύμφωνα με το πρότυπο EN 15801: 2010): Από τον αρχικό τύπο για χρόνο  $t$  30 λεπτών (1800sec). Ο λόγος αντιστοιχεί στην τάση ευθείας που περνάει από την αρχή των αξόνων και το σημείο της καμπύλης για  $t=1800\text{sec}$  (Σχήμα 4.8,α) [75].

**β)** Με **μία εφαπτομένη** (σύμφωνα με το πρότυπο NORMAL 11/85): Σαν ο μέσος όρος των τιμών του λόγου  $\Delta B/(S \cdot \sqrt{t})$ , ο οποίος και ισούται με την τιμή της κλίσης των σημείων της καμπύλης του διαγράμματος  $\sqrt{t}$ -  $\Delta B/S$ . Στην συγκεκριμένη περίπτωση στην γραμμή τάσης δεν συμπεριλήφθηκαν τα πολύ αρχικά και τελικά σημεία της καμπύλης παρά μόνο ο βασικός κορμός των σημείων που προσομοιάζει καλύτερα σε ευθεία γραμμή (Σχήμα 4.8,β) [76].

**γ)** Με **δύο εφαπτομένες** (σύμφωνα με το πρότυπο NORMAL 11/85): Φέρνοντας δύο εφαπτομένες, μία στα αρχικά και μία στα τελικά σημεία της καμπύλης του διαγράμματος  $\sqrt{t}$ -  $\Delta B/S$ . Παίρνοντας την τετμημένη του σημείου τομής τους, υπολογίζεται ο λόγος  $\Delta B/(S \cdot \sqrt{t})$  για την συγκεκριμένη τιμή ( $\sqrt{t}$ ). Ο λόγος αντιστοιχεί στην τάση ευθείας που περνάει από την αρχή των αξόνων και το σημείο της καμπύλης για την συγκεκριμένη τιμή του  $t$ . (Σχήμα 4.8, γ) [76].

**δ)** Στα **90-10min** (σύμφωνα με το πρότυπο EN 1015-18: 2002): Θέτοντας στον αρχικό τύπο ως  $\Delta B$  την διαφορά των μαζών στα 90 και 10 λεπτά ( $B_{90\text{min}}-B_{10\text{min}}$ ) και ως ( $\sqrt{t}$ ) την αντίστοιχη διαφορά ( $\sqrt{t_{90\text{min}}}-\sqrt{t_{10\text{min}}}$ ). Ο λόγος αντιστοιχεί στην τάση ευθείας που περνάει από τα σημεία της καμπύλης υδατοαπορρόφησης για  $t$  στα 10min και 90 min αντίστοιχα (Σχήμα 4.8 ,δ) [77].



Σχήμα 4.8 Προσδιορισμός του συντελεστή υδαταπορρόφησης από καμπύλες υδαταπορρόφησης.

-**Η συνολική μεταβολή της μάζας%**, όπου ισοδυναμεί με την συνολική μάζα νερού που απορροφήθηκε % ( $M_{water}\%$ ):

$$M_{water}\% = \frac{M_{τελ.} - M_{αρχ.}}{M_{αρχ.}} \cdot 100$$

Όπου:

**$M_{τελ.}$** : Η τελική υγρή μάζα του δοκιμίου σε (g)

**$M_{αρχ.}$** : Η αρχική ξηρή μάζα του δοκιμίου σε (g),

-ο **συνολικός προσροφώμενος όγκος νερού ανά g δείγματος (T.C.V.w., total cumulative volume of water, mm<sup>3</sup>/g),**

$$T.C.V.w.: V_w/M_{αρχ.},$$

Όπου:

**$V_w$**  : Ο συνολικός προσροφώμενος όγκος νερού σε(mm<sup>3</sup>/g),ο οποίος υπολογίζεται από την συνολική ποσότητα σε g του προσροφώμενου νερού διαιρώντας με την αντίστοιχη πυκνότητα του νερού στην εκάστοτε θερμοκρασία (οι τιμές για την εκάστοτε πυκνότητα του νερού πάρθηκαν βιβλιογραφικά).

**$M_{αρχ.}$** : Η αρχική ξηρή μάζα του δοκιμίου σε (g),

Ένα υλικό διαμέσου της επιφάνειάς του μπορεί να απορροφήσει νερό μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης, η ιδιότητα του τριχοειδούς ενδιαφέρει τα δομικά υλικά που έρχονται σε επαφή με το νερό, την υγρασία του εδάφους ή της ατμόσφαιρας. Συνέπεια της απορρόφησης νερού μέσα στους πόρους του υλικού είναι η συμπύκνωση του νερού και ο σχηματισμός σταγονιδίων στους πόρους.

Κατά την διαβροχή μίας επιφάνειας από πηλό το νερό απορροφάται από την εξωτερική στρώση και το υλικό διογκώνεται, εάν στην ξηρή κατάσταση, η επιφάνεια έχει υψηλή πυκνότητα, το αποτέλεσμα της διόγκωσης είναι το κλείσιμο των πόρων του υλικού και η μείωση του ποσοστού απορρόφησης νερού στο εσωτερικό. Συνέπεια αυτού είναι το υλικό να αποκτά μία ακαμψία εξωτερικά. Η διείσδυση του νερού όμως συνεχίζεται με πιο αργό ρυθμό λόγω της τριχοειδούς αναρρίχησης και έχει ως συνέπεια να γίνεται η επιφάνεια πιο μαλακή από στρώση σε στρώση. Στις περισσότερες περιπτώσεις η υγρή αλλά όχι διαβρωμένη εξωτερική στρώση θα αποτελέσει ένα φράγμα στην περαιτέρω είσοδο της υγρασίας και κατά την ξήρανση θα σχηματιστεί μια σκληρή αλλά ψαθυρή εξωτερική στρώση, ωστόσο, κάτω από αυτή την επιφάνεια θα σχηματιστεί μια στρώση υλικού με μειωμένη πυκνότητα, η οποία ενώ είχε διογκωθεί δεν έχει επανέλθει εντελώς στην αρχική της κατάσταση. Στην επόμενη διαβροχή η ψαθυρή εξωτερική στρώση που είχε δημιουργηθεί είναι πιο ευάλωτη και η διείσδυση της υγρασίας θα έχει πιο σοβαρές συνέπειες, αναπόφευκτα σε κάθε έναν από τους κύκλους υγρασίας θα υπάρξει απώλεια υλικού [78].



**Εικόνα 4.41** Γενική διάταξη δοκιμής υδατοαπορρόφησης με τριχοειδή αναρρίχηση-ζύγιση δοκιμίου.

Η δοκιμή της τριχοειδούς αναρρίχησης πραγματοποιήθηκε σε 3 κυβικά δοκίμια από κάθε σύνθεση πηλοκονιάματος και έγινε χρήση απιονισμένου νερού. Τα δοκίμια διαστάσεων περίπου 4 x 4 x 4 cm σχηματίστηκαν έπειτα από υδροκοπή με τροχό.

Πριν από την εκτέλεση των δοκιμών, τα δοκίμια παρέμειναν σε πυραντήριο θερμοκρασίας 60 °C για χρονικό διάστημα τουλάχιστον 24 ωρών προκειμένου να απομακρυνθεί η περιεχόμενη υγρασία τους. Στην συνέχεια τα δοκίμια τοποθετούνται σε ξηραντήρα μέχρι να κρυσώσουν.

Για το κάθε δοκίμιο πραγματοποιήθηκε ξεχωριστά η δοκιμή σε ένα δοχείο, όπου στον πυθμένα, είχε τοποθετηθεί υδρόφιλο μέσο (απορροφητικό χαρτί) το οποίο διαβρεχόταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα ώστε να παραμένει υγρό, τα δοκίμια εξέρχονταν σε συγκεκριμένους χρόνους για να ζυγιστούν και έπειτα επανατοποθετούνταν στο δοχείο.

Η τοποθέτηση του κάθε δοκιμίου γινόταν από την πλαϊνή πλευρά του (αυτή δηλαδή που ακουμπούσε στα πλαϊνά τοιχώματα της μήτρας) αφού προηγουμένως είχε προσδιορισθεί το εμβαδό της με χρήση παχύμετρου ώστε να ξέρουμε την ακριβή επιφάνεια από όπου προσροφάται το νερό.

Παράλληλα για κάθε δοκιμή γινόταν μέτρηση των συνθηκών θερμοκρασίας και υγρασίας δωματίου, καθώς και η θερμοκρασία του νερού, ώστε μετέπειτα να μπορούν να υπολογιστούν ο συνολικός προσροφώμενος όγκος νερού ανά γραμμάρια δείγματος.

#### 4.7.2 Κύκλοι ύγρυνσης ξήρανσης

Μετά την Δοκιμή υδατοαπορρόφησης με τριχοειδή αναρρίχηση ακολούθησαν κύκλοι ύγρυνσης ξήρανσης ώστε να μελετηθεί η ανθεκτικότητα των κονιαμάτων, ως προς την διαστολή τους και την μεταβολή της μάζας κατά την διαβρώση από το νερό και τις απότομες αλλαγές των κλιματολογικών συνθηκών.

Στην αρχή και στο τέλος κάθε κύκλου γινόταν ζύγιση στις ξηρές και υγρές μάζες των δοκιμών καθώς και έλεγχος της κατάστασης των δοκιμών σε συνδυασμό με φωτογραφική αποτύπωση (για πιθανές ρηγματώσεις, απώλεια υλικού, παραμορφώσεις και μεταβολής των διαστάσεων κάθε πλευράς).



Εικόνα 4.42 Γενική διάταξη πειράματος ύγρυνσης-ξήρανσης μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης.

Αρχικά πραγματοποιήθηκαν **10 κύκλοι μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης ύγρυνσης-ξήρανσης** για τρία δοκίμια από κάθε σύνθεση.

Η διαδικασία του κάθε κύκλου είχε ως εξής: τα δοκίμια ξηραίνονται για 24h σε πυραντήριο στους  $60\pm 5^{\circ}\text{C}$ , έπειτα τοποθετούνται σε ξηραντήρα μέχρι να κρυώσουν (εικόνα 4.43) και ύστερα ζυγίζονται.

Στην συνέχεια τοποθετούνται στα ειδικά δοχεία για την τριχοειδή αναρρίχηση και παραμένουν εκεί για τουλάχιστον 30 min παραπάνω από την χρονική διάρκεια του κορεσμού τους.

Μετά τον κύκλο ύγρυνσης τα δοκίμια αφαιρούνται από τα δοχεία και παραμένουν σε συνθήκες δωματίου για μερικές ώρες ώστε η ξήρανση να είναι πιο ομαλή, έπειτα όλα μαζί τοποθετούνται εκ νέου για 24h σε πυραντήριο  $60 \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

Η διάταξη στην συγκεκριμένη δοκιμή αποτελείται από τρία πλαστικά δοχεία, ένα για κάθε σύνθεση (εικόνα 4.42). Σε αυτά είχε τοποθετηθεί στον πυθμένα υδρόφιλο μέσο (απορροφητικό χαρτί) το οποίο διαβρεχόταν συχνά έτσι ώστε να παραμένει υγρό και η στάθμη του νερού να παραμένει σταθερή.



Εικόνα 4.43 Ξηραντήρας Silica-gel.

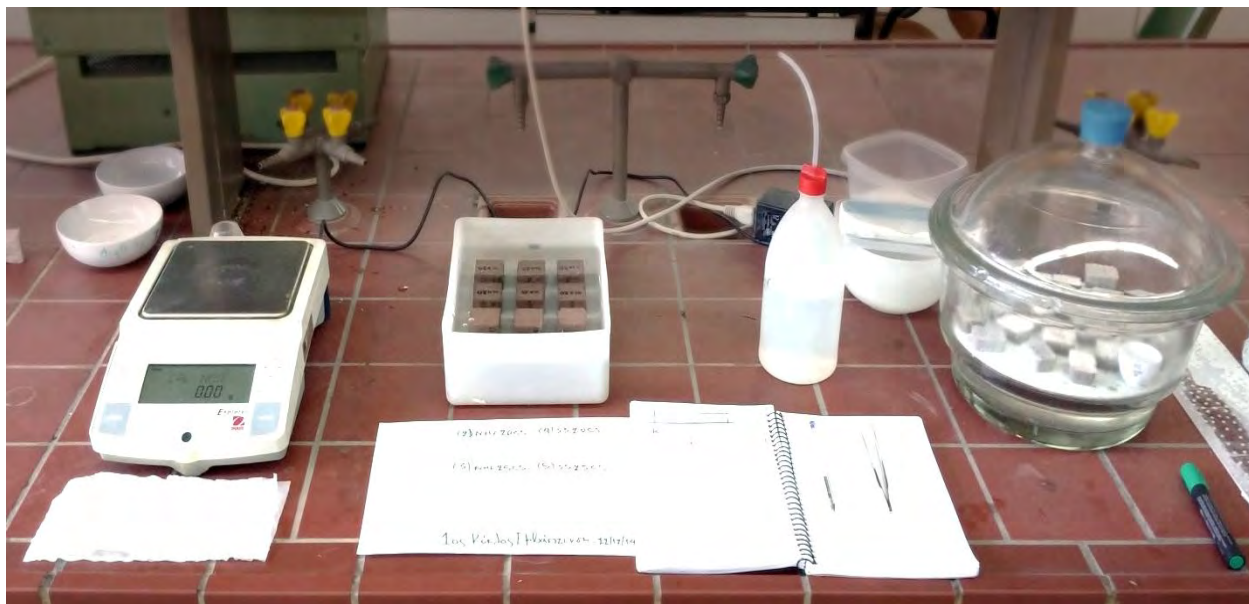


Εικόνα 4.44 Δοχείο εμφάπτισης.

Τα δοκίμια από κάθε σύνθεση τοποθετούνταν με προσοχή σε κάθε δεξαμενή αφήνοντας ίσες αποστάσεις μεταξύ τους (τουλάχιστον 0.8cm), η δοκιμή έγινε στο εργαστήριο του Τομέα ΙΙΙ Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών όπου η θερμοκρασία δωματίου κυμαινόταν στους  $17 \pm 2^{\circ}\text{C}$  και του νερού ήταν συνήθως  $2^{\circ}\text{C}$  μικρότερη, ενώ η σχετική υγρασία RH% ήταν στους  $55 \pm 5\%$ .

Τόσο στους κύκλους ύγρυνσης ξήρανσης μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης όσο και στους κύκλους ύγρυνσης-ξήρανσης μέσω εμφάπτισης χρησιμοποιήθηκε απιονισμένο νερό.





Εικόνα 4.45 Γενική διάταξη πειράματος ύγρανσης - ξήρανσης μέσω εμβάπτισης.

Μετά τους 10 πρώτους κύκλους μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης ακολούθησαν **6 κύκλοι ύγρανσης-ξήρανσης μέσω εμβάπτισης**.

Η διαδικασία ακολούθησε την γενική λογική του πρώτου μέρους και ήταν η εξής: τα δοκίμια και εδώ ξηραίνονται αρχικά για 24h σε πυραντήριο ( $60\pm 5^{\circ}\text{C}$ ) αλλά μετά την ζύγιση, στο στάδιο της ύγρανσης, τοποθετούνται σε δοχείο στο οποίο βυθίζονται σε νερό (εμβάπτιση) (Εικόνα 4.44).

Το νερό καλύπτει τα δοκίμια και η στάθμη του υπερβαίνει το πάνω μέρος των δοκιμίων για τουλάχιστον 2cm. Εκεί παραμένουν όλα τα δοκίμια για 24h και εν συνεχεία ζυγίζονται. Μετά την ζύγιση των υγρών μαζών παραμένουν για μερικές ώρες σε συνθήκες δωματίου και στη συνέχεια τοποθετούνται ξανά στο πυραντήριο ( $60\pm 5^{\circ}\text{C}$ ) για ~ 46h.

Η παραπάνω διαδικασία ακολουθήθηκε για τους πρώτους 5 κύκλους και καθώς σε αυτούς δεν παρατηρήθηκαν μεταβολές στις διαστάσεις και τις μάζες τους, για τον 6ο κύκλο τα δοκίμια εμβαπτίστηκαν στο νερό για 20 επιπλέον ημέρες.

Για να βρεθεί η τελική ξηρή μάζα των δοκιμίων έμειναν στο πυραντήριο ( $60\pm 5^{\circ}\text{C}$ ) για μερικές ημέρες και έπειτα ζυγίστηκαν και μετρήθηκαν οι τελικές διαστάσεις τους.

## 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 5.1 Αποτελέσματα των τεχνικών χαρακτηριστικών των πρώτων υλών

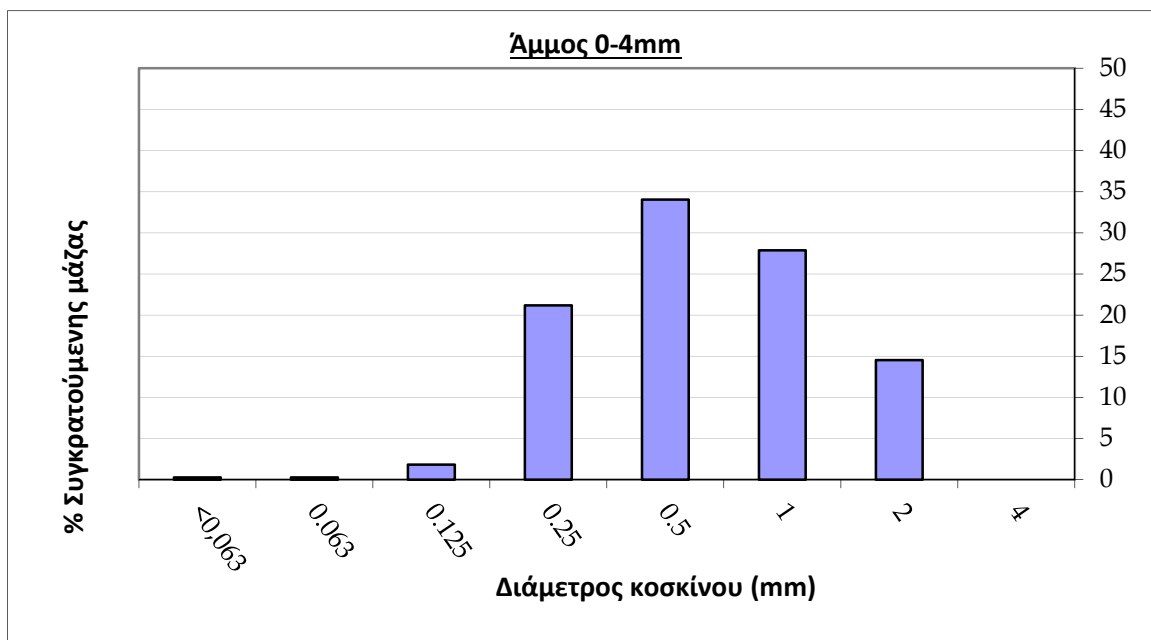
#### 5.1.1 Κοκκομετρική ανάλυση άμμου

Το αδρανές που επιλέχθηκε είναι φυσικής προέλευσης, πυριτική άμμος 0-4mm, πλυμένη και κοσκινισμένη, προϊόν αποθέσεων του ποταμού Αξιού. Σύμφωνα με τους Ευρωπαϊκούς Κανονισμούς Αδρανών Υλικών η άμμος αυτή κατατάσσεται στα λεπτόκοκκα αδρανή, με μέγιστο κόκκο 4mm.

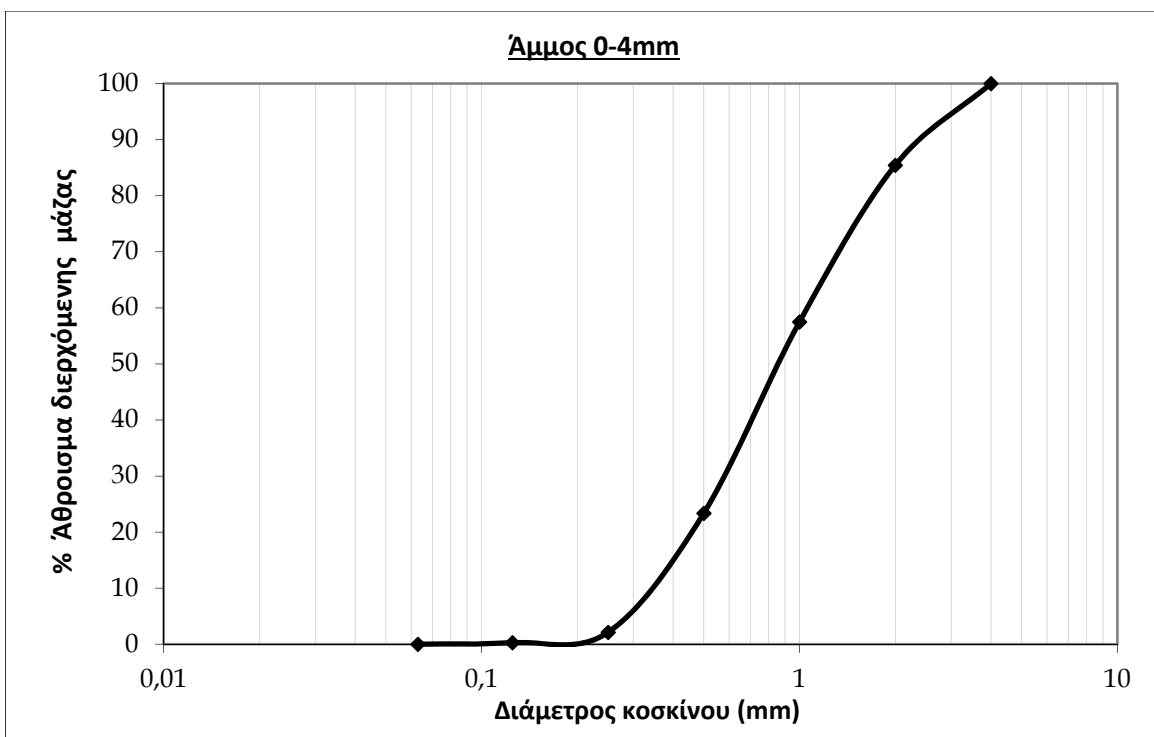
Η φαινόμενη πυκνότητα της άμμου προσδιορίστηκε στα  $1.5 \text{ g/cm}^3$  σύμφωνα με το πρότυπο EN 1097-3:1998 [79]. Το ποσοστό υγρασίας της άμμου ύστερα από έλεγχο βρέθηκε μεγαλύτερο του 3%, οπότε η ποσότητα που χρησιμοποιήθηκε στα πηλοκονιάματα, προηγουμένως ξηράνθηκε σε πυρανήριο, στους  $110^\circ\text{C}$  για 48 ώρες.

Στα σχήματα 5.1, 5.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων από την κοκκομετρική ανάλυση της άμμου 0-4mm. Παρατηρείται ότι το περισσότερο υλικό συγκεντρώνεται στο κόσκινο 0.5 mm (~ 34%) και εν συνεχεία στα κόσκινα 1mm (~ 28%), 0.25 mm (~ 21%), 2 mm (~ 14.5%). Αρκετά μικρότερο είναι το ποσοστό συγκράτησης στα κόσκινα μικρότερων οπών. Στο κόσκινο 0.125mm συγκρατείται περίπου το 1.8% και στο κόσκινο 0.063mm περίπου το 0.3%. Το ποσοστό της παύλας, δηλαδή το ποσοστό του υλικού που διέρχεται από όλα τα κόσκινα είναι μόλις 0.3%. Σύμφωνα με το πρότυπο EN 13139:2002 το ποσοστό της παύλας για κονιάματα δεν πρέπει να υπερβαίνει το 3% συνεπώς στην προκειμένη περίπτωση η συγκεκριμένη άμμος κρίνεται εξαιρετικά καθαρή [80].

Σε γενικές γραμμές η κοκκομετρική καμπύλη της άμμου μπορεί να χαρακτηριστεί ομαλή. Διακρίνεται μία ένταση στα 0.5 mm και μία ελάττωση στην αρχή και στο τέλος, δηλαδή στα 4mm και 0.063mm. Το μεγαλύτερο ποσοστό των κόκκων έχει διάμετρο 0.5-1mm ενώ φαίνεται ότι πάνω από το 50% (το 57.5%) των κόκκων έχει διάμετρο μικρότερη από 1mm.



Σχήμα 5.1 Ποσοστά συγκρατούμενων αδρανών σε κάθε κόσκινο.



Σχήμα 5.2 Ποσοστό διερχόμενων αδρανών από το κάθε κόσκινο.

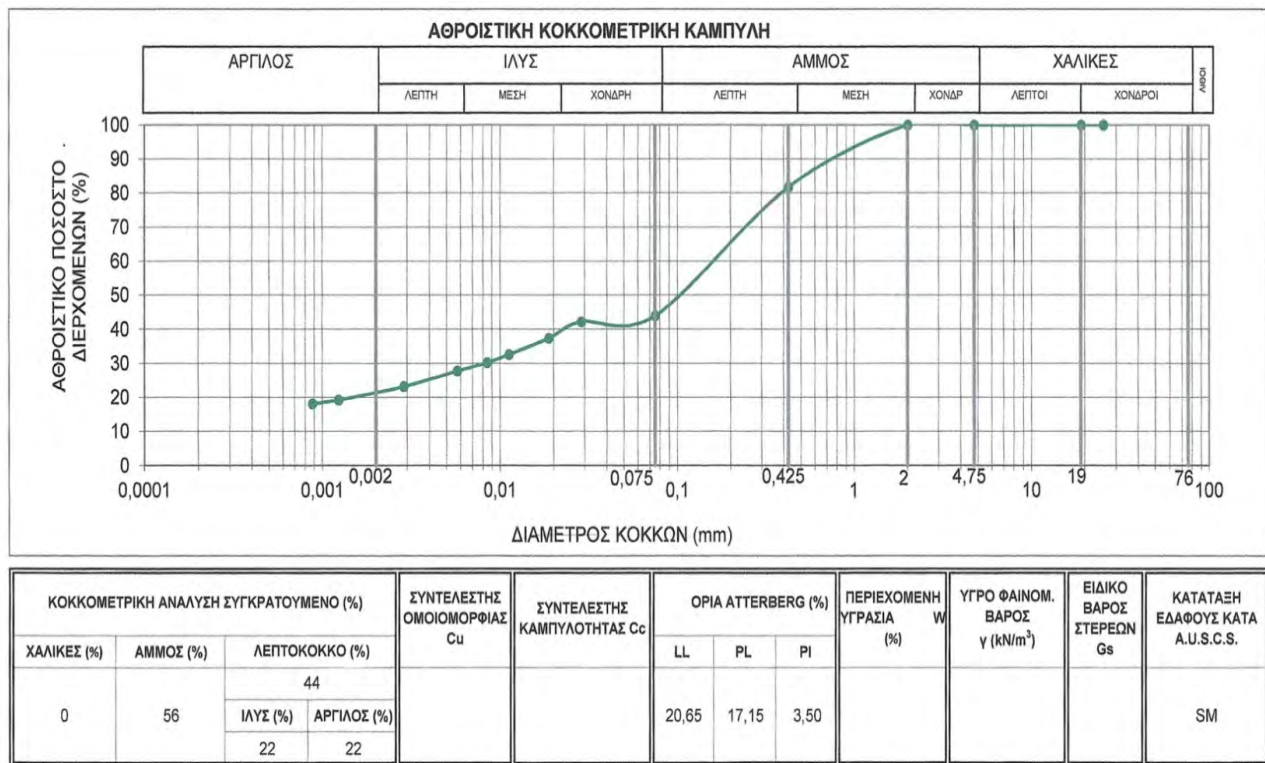
### 5.1.2 Όρια Συνεκτικότητας (Atterberg)- Κοκκομετρική διαβάθμιση πηλού

Ο πηλός που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία προέρχεται από κεραμάρια της Β. Ελλάδας, είναι αλεσμένος και όμοιος με αυτόν που χρησιμοποιείται στην παραγωγή οπτόπλινθων, αν και λίγο πιο λεπτόκοκκος, με μέγιστο κόκκο <2mm. Η φαινόμενη πυκνότητα του πηλού προσδιορίστηκε στα  $1.2\text{g/cm}^3$ . Η περιεχόμενη υγρασία προσδιορίστηκε ύστερα από ξήρανση σε πυραντήριο ( $110 \pm 5^\circ\text{C}$ ) σε ποσοστό 0.76% αρκετά μικρότερη από το επιτρεπτό ποσοστό του 3%.

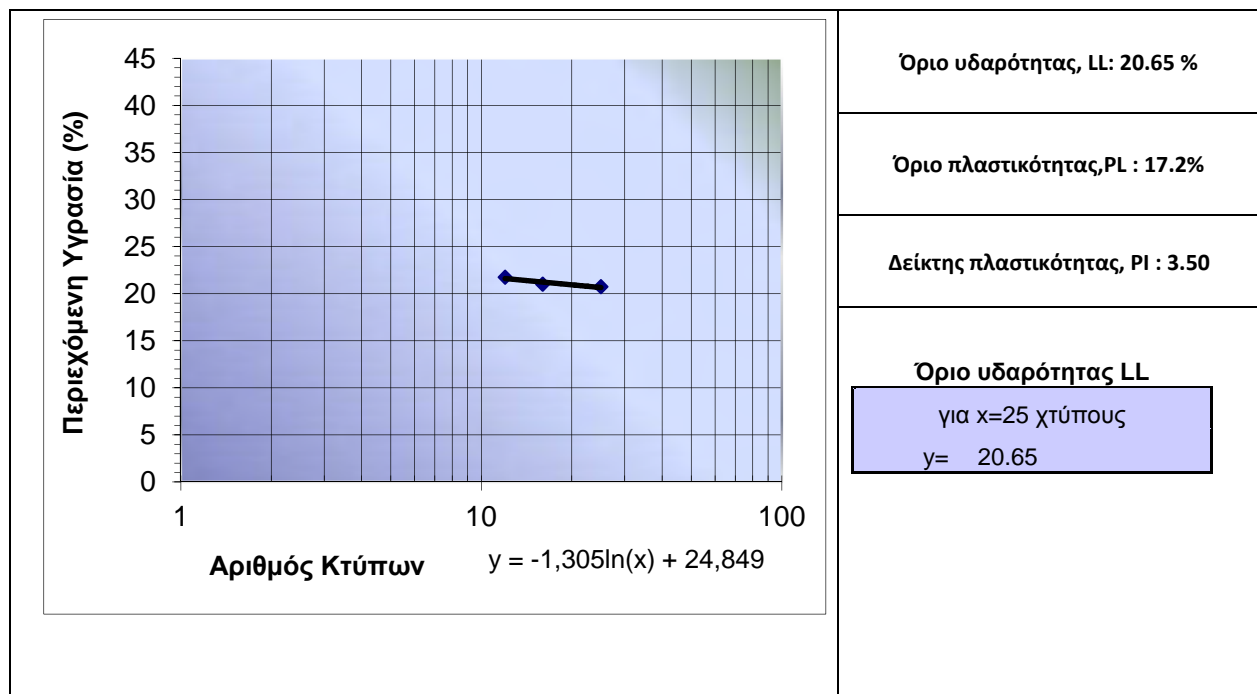
Για το χαρακτηρισμό του πηλού, εκτός της κοκκομετρικής ανάλυσης με κόσκινα ήταν απαραίτητη και η διαβάθμιση των μικρότερων κόκκων, όπου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ιλύος. Έγιναν, επίσης, οι απαραίτητες δοκιμές εδαφομηχανικής για την εύρεση των ορίων Atterberg. Στο Σχήμα 5.3 συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών.

Παρατηρείται μια σχετικά ομαλή κατανομή των κόκκων. Η διάμετρος στο μεγαλύτερο ποσοστό των κόκκων (~40%) κυμαίνεται από 0.075 ως 0.425 mm. Πιο συγκεκριμένα πάνω από το 50% του πηλού (περίπου το 57%) παραμένει στο κόσκινο Νο 200 (0,075mm) και ταυτόχρονα πάνω από το 50% διέρχεται από το κόσκινο Νο 40 (0.425mm). Επίσης περισσότερο από το 12% του συνολικού υλικού διέρχεται από το κόσκινο Νο 200 (0.075mm), σε ποσοστό περίπου 43%.

Όσον αφορά τα όρια Atterberg ο πηλός παρουσιάζει όριο υδαρότητας LL: 20.7%, όριο πλαστικότητας PL: 17.2% και συνεπώς δείκτη πλαστικότητας  $PI=3.5 < 4$ . Με τα παραπάνω δεδομένα σύμφωνα με το Ενιαίο Σύστημα Κατάταξης Εδαφών – U.S.C.S. (Πίνακας 5.1) ο πηλός μας κατατάσσεται στα μείγματα άμμου-ιλύος SM.



Σχήμα 5.3 Κοκκομετρική καμπύλη πηλού, Όρια Atterberg και κατάταξη σύμφωνα με το U.S.C.S.



Σχήμα 5.4 Εύρεση ορίου υδαρότητας από 3 μετρήσεις, για x=25 χτύπους γ=20.65%.

## Ταξινόμηση σύμφωνα με το Ενιαίο Σύστημα Κατάταξης Εδαφών (USCS)

Βασικός Διαχωρισμός			Σύμβολα	Περιγραφή	Κριτήρια Κατάταξης	
Χονδρό-Κοκκα εδάφη  Περισσότερο από 50% παραμένει στο κόσκινο No 200	Χάλικες 50% ή περισσότερα παραμένουν επί του κόσκινου No 4	Χάλικες	GW	Καλά διαβαθμισμένοι χάλικες ή αμμοχάλικα με λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα	Κατάταξη με βάση το λεπτόκοκκο κλάσμα  Διέρχ. από το κόσκινο No 200 < 5% GW, GP, SW, SP  Διέρχ. από το κόσκινο No 200 > 12% GM, GC SM, SC  Διέρχ. από το κόσκινο No 200 μεταξύ 5% και 12% οριακή περίπτωση χρήση διπλού συμβολισμού	$C_u = D_{60}/D_{10} > 4$ $1 < C_u = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60}) < 3$
			GP	Ομοιόμορφοι χάλικες ή αμμοχάλικα με λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα		Δεν ισχύουν τα δύο πιο πάνω κριτήρια για GW
		Χάλικες με λεπτόκοκκα	GM	Πλώδεις χάλικες. Μίγματα χαλίκων - άμμου - ιλύος		PI < 4 η θέση στο σχήμα κάτω από τη γραμμή A
			GC	Αργιλώδεις χάλικες. Μίγματα χαλίκων - άμμου - αργίλου		PI > 7 & θέση στο σχήμα επάνω από τη γραμμή A
	Άμμοι 50% ή περισσότερα διέρχονται από το κόσκινο No 4	Άμμοι	SW	Καλά διαβαθμισμένες άμμοι ή αμμοχάλικα με λίγα λεπτόκοκκα		$C_u = D_{60}/D_{10} > 6$ $1 < C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60}) < 3$
			SP	Ομοιόμορφα άμμοι ή αμμοχάλικα με λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα		Δεν ισχύουν τα δύο κριτήρια για SW
Λεπτόκοκκα εδάφη  Λιγότερο από 50% παραμένει στο κόσκινο No 200	Ιλεις και άργιλοι  WL < 50%	SM	Πλώδεις άμμοι. Μίγματα άμμου - ιλύος	PI < 4 η θέση στο σχήμα κάτω από τη γραμμή A		
		SC	Αργιλώδεις άμμοι. Μίγματα άμμου - αργίλου	PI > 7 & θέση στο σχήμα επάνω από τη γραμμή A		
		ML	Ανόργανες ιλεις, πολύ λεπτές άμμοι, ινώδεις και αργιλώδεις άμμοι			
		CL	Ανόργανες άργιλοι χαμηλής πλαστικότητας (ενίοτε χαλικώδεις, αμμώδεις ή ινώδεις)			
OL	Οργανικές ιλεις ή ινώδεις άργιλοι χαμηλής πλαστικότητας					
MH	Ανόργανες, συχνά μαρμαρυγιακές ιλεις υψηλής πλαστικότητας					
Πολύ οργανικά εδάφη	Ιλεις και άργιλοι  WL > 50%	CH	Ανόργανες άργιλοι υψηλής πλαστικότητας	Ινώδη οργανικά γεωλικά προϊόντα απανθράκωσης		
		OH	Οργανικές άργιλοι μέσης έως υψηλής πλαστικότητας			
		Pt	Βουρκοδή και τυρφοδή εδάφη			

Πίνακας 5.1 Πίνακας ταξινόμησης εδαφών σύμφωνα με το Ενιαίο Σύστημα Κατάταξης Εδαφών U.S.C.S.

### 5.1.3 Αποτελέσματα ολικών διαλυτών αλάτων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της περιεκτικότητας του πηλού σε διαλυτά άλατα. Το ποσοστό των διαλυτών αλάτων που περιέχονται στο δείγμα βρέθηκε στο 0.15% και συνεπώς θεωρείται πολύ χαμηλή η συγκέντρωση.

Δείγμα πηλού (mg)	Αγωγιμότητα C (μS)	Ολικά διαλυτά άλατα- SST (%)
101.3	2.26	0.15

Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα περιεκτικότητας ολικών διαλυτών αλάτων δείγματος πηλού.

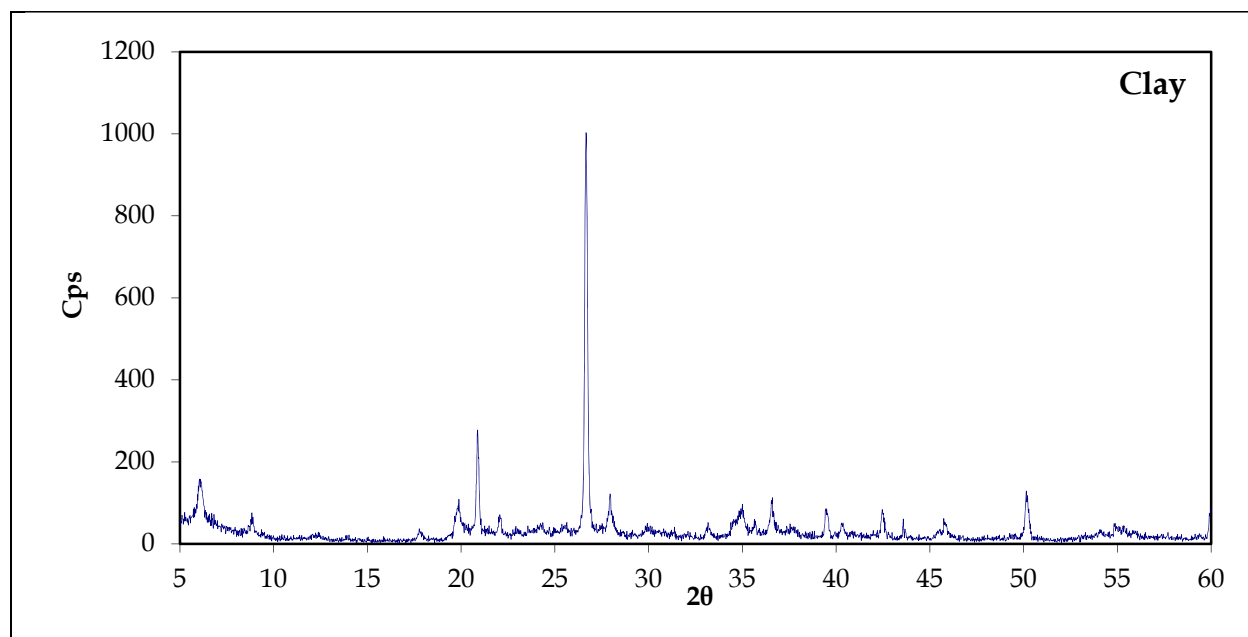
Δεδομένου ότι το όριο των περιεχόμενων διαλυτών αλάτων, πάνω από το οποίο θεωρείται πως συμβάλλουν στη διαδικασία φθοράς των δομικών υλικών, είναι περίπου 3%, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα πως το ποσοστό των διαλυτών αλάτων που προσδιορίστηκε μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο, καθιστώντας τον πηλό καθαρό για την παρασκευή πηλοκονιαμάτων.

### 5.1.4 Αποτελέσματα ελέγχου παρουσίας οργανικού υλικού στον πηλό

Κατά τον έλεγχο δείγματος πηλού με τη μέθοδο της οξείδωσης του υπεροξειδίου του υδρογόνου ( $H_2O_2$ ) δεν παρατηρήθηκε αφρισμός, δεν υπήρξε, δηλαδή, απελευθέρωση οξυγόνου, ενώ ύστερα από ζύγιση πριν και μετά την κατεργασία με το υπεροξείδιο του υδρογόνου δεν εμφανίστηκε μεταβολή στην μάζα του δείγματος. Συνεπώς, η δοκιμή έδειξε απουσία οργανικού υλικού από το συγκεκριμένο πηλό.

### 5.1.5 Ορυκτολογική ανάλυση πρώτων υλών με χρήση της Περίθλασης ακτίνων-X (XRD)

Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται το ακτινοδιάγραμμα περίθλασης ακτίνων-X (XRD) του πηλού που χρησιμοποιήθηκε στην παρασκευή όλων των πηλοκονιαμάτων και στον Πίνακα 5.3 οι ορυκτολογικές φάσεις που ταυτοποιήθηκαν με τα κύρια χαρακτηριστικά κατάταξής τους. Οι ορυκτολογικές φάσεις που ανιχνεύτηκαν στην περίπτωση του πηλού ήταν: πρωτεύουσα φάση χαλαζία και δευτερεύουσες φάσεις αλβίτη, μοσχοβίτη, μοντμοριλλονίτη (σμεκτίτης) και χλωρίτη. (\*Όπου **M** μπορεί να είναι  $Mg^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Ni^{1+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Mn^{4+}$ ,  $Cr^{3+}$ ,  $Li^{1+}$ ).



Σχήμα 5.5 Διάγραμμα ορυκτών φάσεων για τον πηλό.

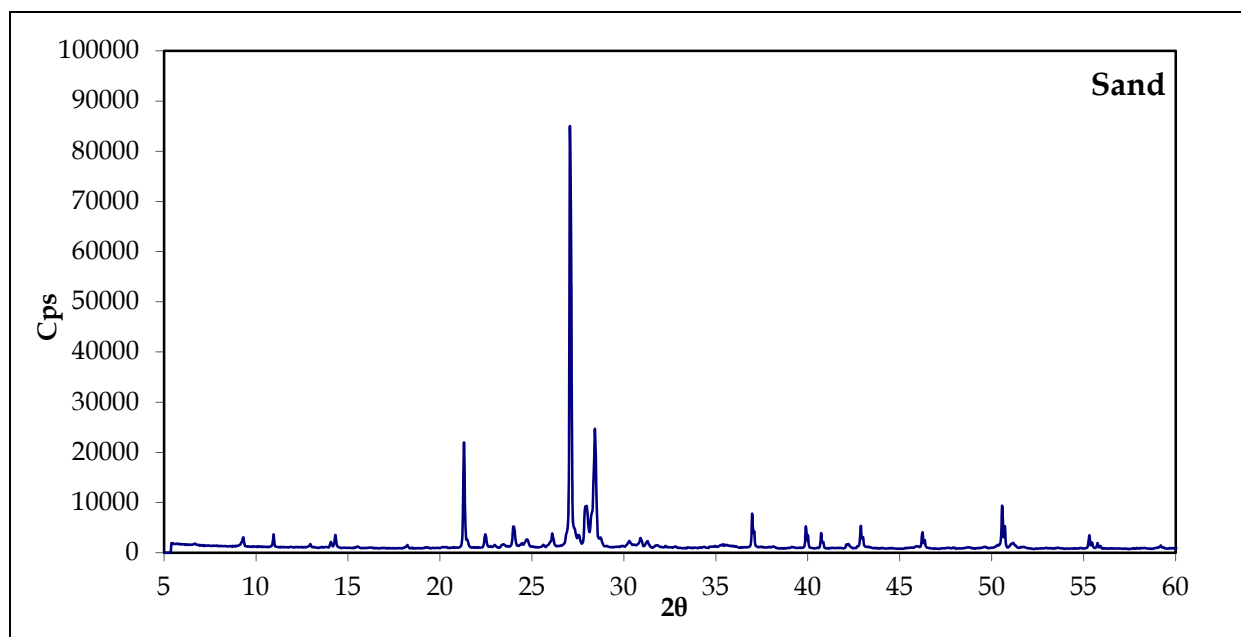
Φάσεις	Χημικός τύπος	Κατηγορία	Ομάδα
Χαλαζίας	$SiO_2$	Οξειδία	Χαλαζία
Αλβίτης	$NaAlSi_3O_8$	Τεκτοπυριτικά	Άστριοι
Μοσχοβίτης	$KAl_2(AlSi_3)O_{10}(OH)_2$	Φυλλοπυριτικά	Μαρμαρυγίες
Μοντμοριλλονίτης	$(NA,Ca)_{0.33}(Al,Mg)_2(Si_4O_{10})(OH)_2 \cdot nH_2O$	Φυλλοπυριτικά	Σμεκτίτη
Χλωρίτης	$*M_{5-6}(Al,Si)_4O_{10}(OH)_8$	Φυλλοπυριτικά	Χλωρίτη(αργιλικά)

Πίνακας 5.3 Ορυκτά που αναγνωρίστηκαν με χρήση της Περίθλασης ακτίνων X για την πρώτη ύλη του πηλού.

Ο χλωρίτης είναι ένα φυλλόμορφο ορυκτό του εδάφους που δεν διογκώνεται με την παρουσία νερού και χαρακτηρίζει τη σταθερή δομή ενός εδάφους. Όμως, η παρουσία του σμεκτίτη στη δομή του πηλού αλλάζει την πλεγματική του διάσταση και του δίνει τη δυνατότητα ανταλλαγής κατιόντων και προσρόφησης νερού. Έτσι λοιπόν, οι ιδιότητες διόγκωσης ή συστολής κατά την ύγρανση ή ξήρανση του πηλού πρέπει να αποδοθούν κατά κύριο λόγο, στην παρουσία σμεκτίτη στη δομή του.

Σημειώνεται ότι, τα καθαρά σμεκτιτικά εδάφη είναι υπεύθυνα για κατολισθήσεις. Λεπτομέρειες που βοηθούν στην κατανόηση των ιδιοτήτων του πηλού έχουν ήδη παρουσιαστεί στην ενότητα 2 [2].

Στο **Σχήμα 5.6** παρουσιάζεται το ακτινοδιάγραμμα περίθλασης ακτίνων-X (XRD) του αδρανούς που χρησιμοποιήθηκε στην παρασκευή όλων των πηλοκονιαμάτων και στον **Πίνακα 5.4** οι ορυκτολογικές φάσεις που ταυτοποιήθηκαν με τα κύρια χαρακτηρισικά τους. Οι ορυκτολογικές φάσεις που ανιχνεύτηκαν στην περίπτωση της άμμου ήταν: πρωτεύουσα φάση χαλαζία και δευτερεύουσες φάσεις αλβίτη και μοσχοβίτη.



**Σχήμα 5.6** Διάγραμμα ορυκτών φάσεων για την άμμο 0-4mm.

Φάσεις	Χημικός τύπος	Κατηγορία	Ομάδα
Χαλαζίας	SiO <sub>2</sub>	Οξείδια	Χαλαζία
Αλβίτης	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Τεκτοपुरιτικά	Άστριοι
Μοσχοβίτης	KAl <sub>2</sub> (AlSi <sub>3</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	Φυλλοपुरιτικά	Μαρμαρυγίες

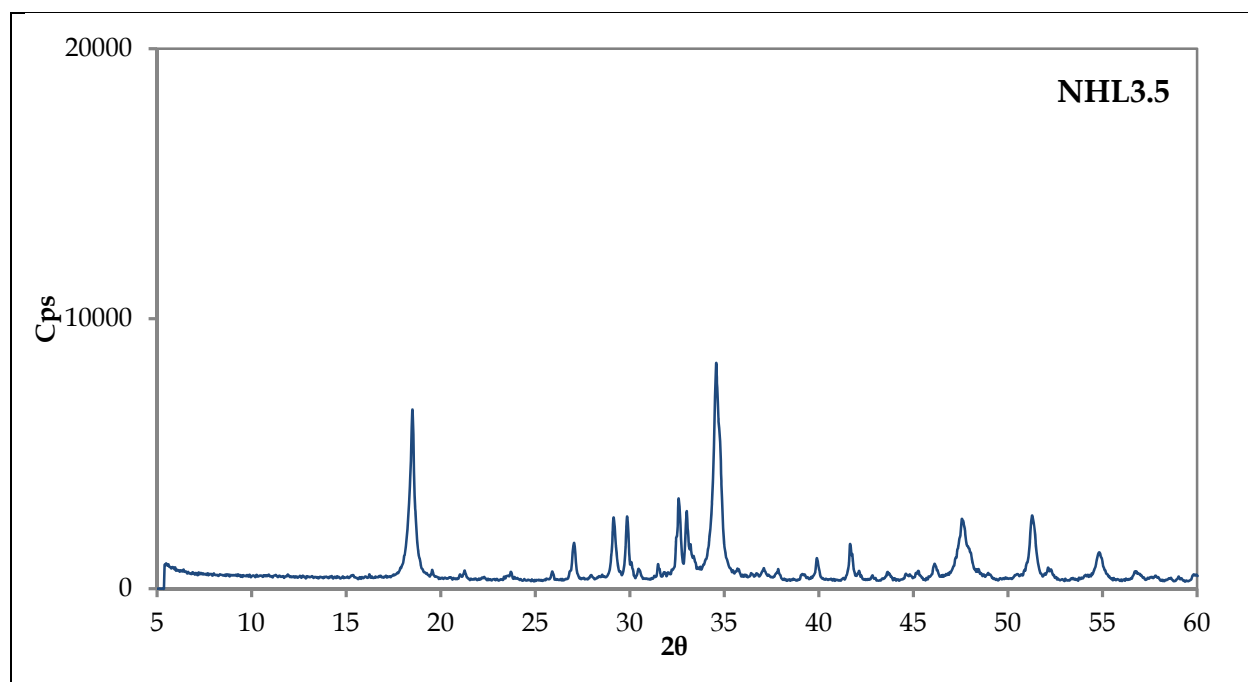
**Πίνακας 5.4** Ορυκτά που αναγνωρίστηκαν με χρήση της Περίθλασης ακτίνων X για την πρώτη ύλη της Άμμου.

Η φυσική υδραυλική άσβεστος NHL 3.5 χρώματος λευκού που χρησιμοποιήθηκε ως σταθεροποιητικός παράγοντας σε ποσοστά 20 και 25% είναι κατάλληλη για παρασκευή κονιαμάτων, επιχρισμάτων και ενεμάτων. Παράγεται σύμφωνα με το πρότυπο EN 459:1-2010 όπου πρέπει να πληροί τις ακόλουθες προϋποθέσεις: να έχει διαθεσιμότητα σε Ca(OH)<sub>2</sub> ≥25% και ταυτόχρονα σε SO<sub>3</sub> ≤2%, η θλιπτική αντοχή στις 28 ημέρες αναμένεται ≥3,5 και ≤10 MPa. Όσον αφορά τις φυσικές απαιτήσεις του υλικού, προσδιορίζεται, μεταξύ άλλων, η περιεκτικότητα σε ελεύθερο νερό σε ποσοστό ≤ 2%, σε περιεχόμενο αέρα ≤ 5%, ενώ στην κοκκομετρική διαβάθμιση το ποσοστό του υλικού που συγκρατείται στα κόσκινα 0,09mm και 0,2mm πρέπει να είναι ≤15% και ≤2% αντίστοιχα. Με κριτήριο το βαθμό υδραυλικότητας



το προϊόν κατατάσσεται σε υδραυλική άβεστο μέσου βαθμού υδραυλικότητας και η φαινόμενη πυκνότητά του προσδιορίστηκε στα 0.7g/cm<sup>3</sup> [81].

Στο Σχήμα 5.7, παρουσιάζεται το ακτινοδιάγραμμα περίθλασης ακτίνων-X (XRD) της φυσικής υδραυλικής άβεστο που χρησιμοποιήθηκε στην παρασκευή των συνθέσεων (2)NHL20CS και (3)NHL25CS, στον Πίνακα 5.5 παρουσιάζονται οι ορυκτολογικές φάσεις που ταυτοποιήθηκαν με τα κύρια χαρακτηριστικά τους. Η πρωτεύουσα φάση που αναγνωρίστηκε είναι ο πορτλαντίτης, που αποτελεί και την αερική φάση της κονιάς ενώ η κύρια υδραυλική φάση του δείγματος είναι ο λαρνίτης. Οι δευτερεύουσες ορυκτολογικές φάσεις που ανιχνεύτηκαν ήταν ο ασβεστίτης, ο βολλαστονίτης, ο χαλαζίας, το αργλικό τριασβέστιο και το περικόλαστο.

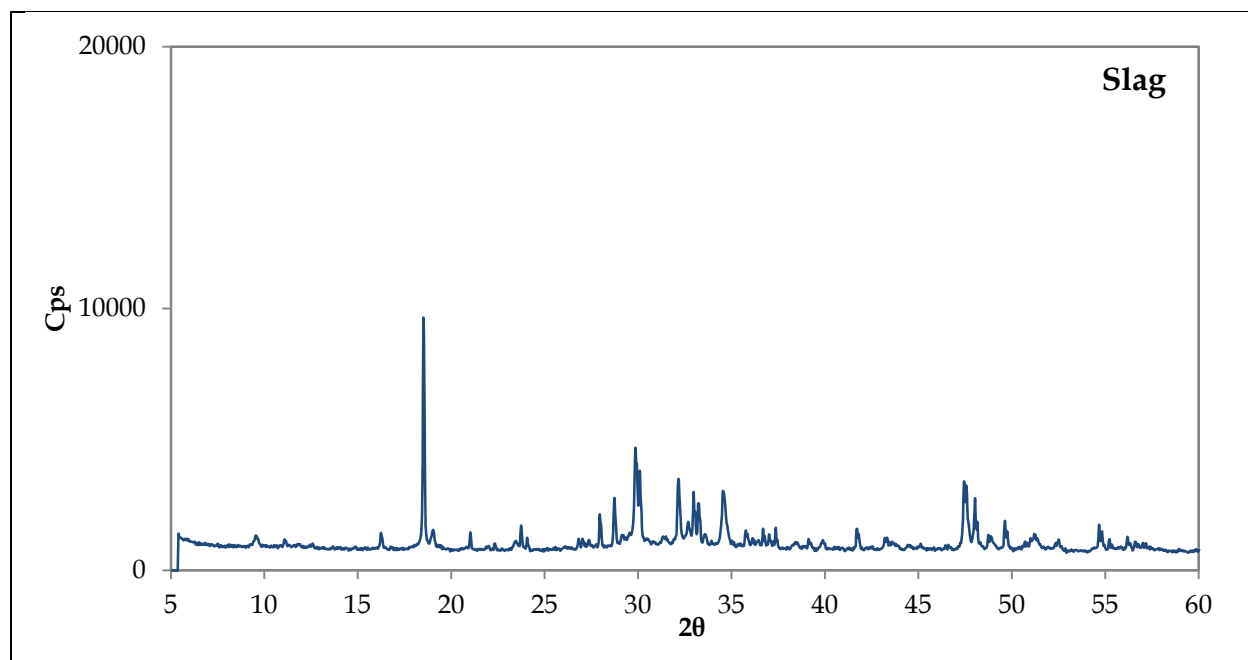


Σχήμα 5.7 Διάγραμμα ορυκτών φάσεων για την φυσική υδραυλική άβεστο NHL3.5.

Φάσεις	Χημικός τύπος	Κατηγορία	Ομάδα
Πορτλαντίτης	Ca(OH) <sub>2</sub>	Υδροξείδια	Βρουσίτη
Λαρνίτης	β-Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Νησοπυριτικά	Ολιβίνη
Ασβεστίτης	CaCO <sub>3</sub>	Ανθρακικά	Ασβεστίτη
Βολλαστονίτης	CaSiO <sub>3</sub>	Ινοπυριτικά	Βολαστονίτη
Χαλαζίας	SiO <sub>2</sub>	Οξείδια	Χαλαζία
Αργλικό τριασβέστιο	C <sub>3</sub> A - (Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub> )	-	Αργλικού ασβεστίου
Περικόλαστο	MgO	Υδροξείδια	Περικόλαστου

Πίνακας 5.5 Ορυκτά που αναγνωρίστηκαν με χρήση της Περίθλασης ακτίνων X για την πρώτη ύλη NHL3.5.

Η σκωρία κάδων χαλυβουργίας που χρησιμοποιήθηκε επίσης, ως σταθεροποιητικός παράγοντας σε ποσοστά 20 και 25%, είναι μη μεταλλικό, ορυκτό παραπροϊόν με κοκκομετρία 0/75 $\mu$ m, χρώματος υπόλευκο-γκρι και φαινόμενης πυκνότητας 0.96g/cm<sup>3</sup>. Περιέχει οξείδιο του ασβεστίου σε ποσοστά 55-65%, οξείδιο του πυριτίου σε ποσοστό 18-22% και σε μικρότερα ποσοστά οξείδια σιδήρου, αργιλίου, μαγνησίου και μαγγανίου. Στο Σχήμα 5.8, παρουσιάζεται το ακτινοδιάγραμμα περίθλασης ακτίνων-Χ (XRD) της σκωρίας κάδων χαλυβουργίας και στον Πίνακα 5.6 παρουσιάζονται οι ορυκτολογικές φάσεις που ταυτοποιήθηκαν με τα κύρια χαρακτηριστικά τους. Πρωτεύουσα φάση του δείγματος είναι ο πορτλαντίτης και δευτερεύουσες φάσεις ο λαρνίτης, ο ασβεστίτης, το φθοριούχο ασβέστιο, το αργιλικό τριασβέστιο, το  $\gamma$ -πυριτικό ασβέστιο, το οξείδιο μαγνησίου σιδήρου και ο βρουσίτης.



Σχήμα 5.8 Διάγραμμα ορυκτών φάσεων για την σκωρία κάδων χαλυβουργίας.

Φάσεις	Χημικός τύπος	Κατηγορία	Ομάδα
Πορτλαντίτης	Ca(OH) <sub>2</sub>	Υδροξείδια	Βρουσίτη
Λαρνίτης	$\beta$ -Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Νησοπυριτικά	Ολιβίνη
Ασβεστίτης	CaCO <sub>3</sub>	Ανθρακικά	Ασβεστίτη
Φθοριούχο ασβέστιο (Φθορίτης)	CaF <sub>2</sub>	Αλογονίδια	Φθορίτη
Αργιλικό τριασβέστιο	C <sub>3</sub> A - (Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub> )	-	Αργιλικού ασβεστίου
$\gamma$ -πυριτικό ασβέστιο	$\gamma$ -Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Νησοπυριτικά	Ολιβίνη
Οξείδιο μαγνησίου σιδήρου	(MgO) <sub>0.91</sub> (FeO) <sub>0.09</sub>	Οξείδια	-
Βρουσίτης	Mg(OH) <sub>2</sub>	Υδροξείδια	Βρουσίτη

Πίνακας 5.6 Ορυκτά που αναγνωρίστηκαν με χρήση της Περίθλασης ακτίνων Χ για την πρώτη ύλη της σκωρίας.

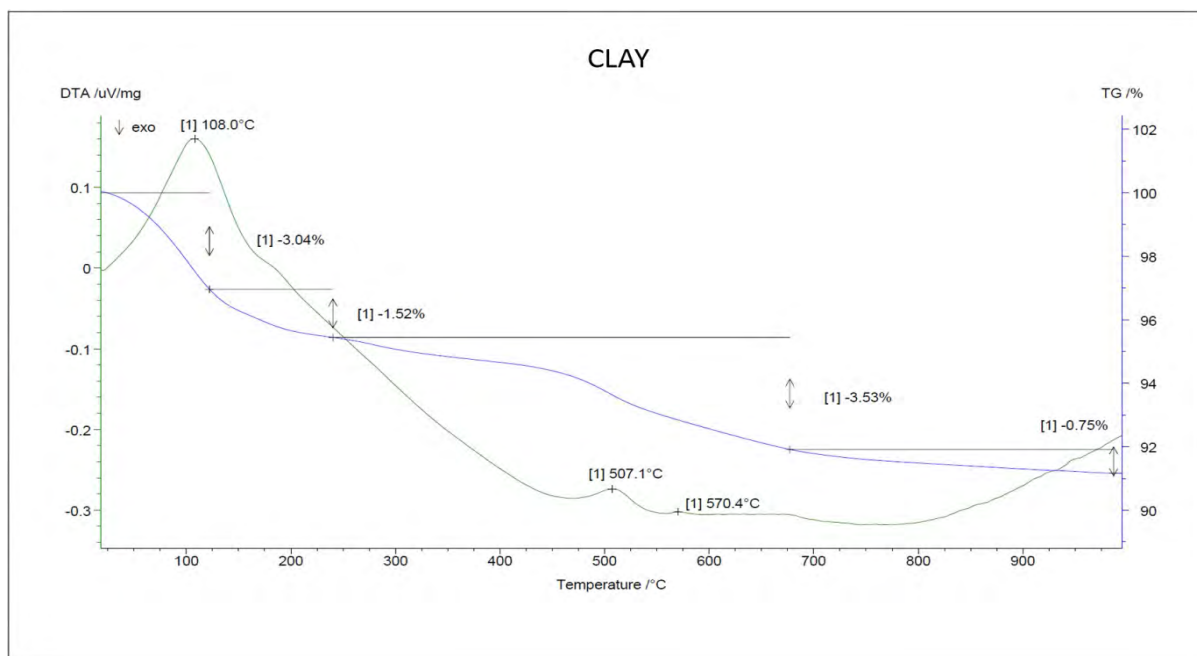
### 5.1.6 Αποτελέσματα θερμικής ανάλυσης DTA/TG

Στο Σχήμα 5.9 και στα Σχήματα 5.10-5.11 παρουσιάζονται τα διαγράμματα από τις θερμικές αναλύσεις DTA/Tg των πρώτων υλών που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των πηλοκονιαμάτων.

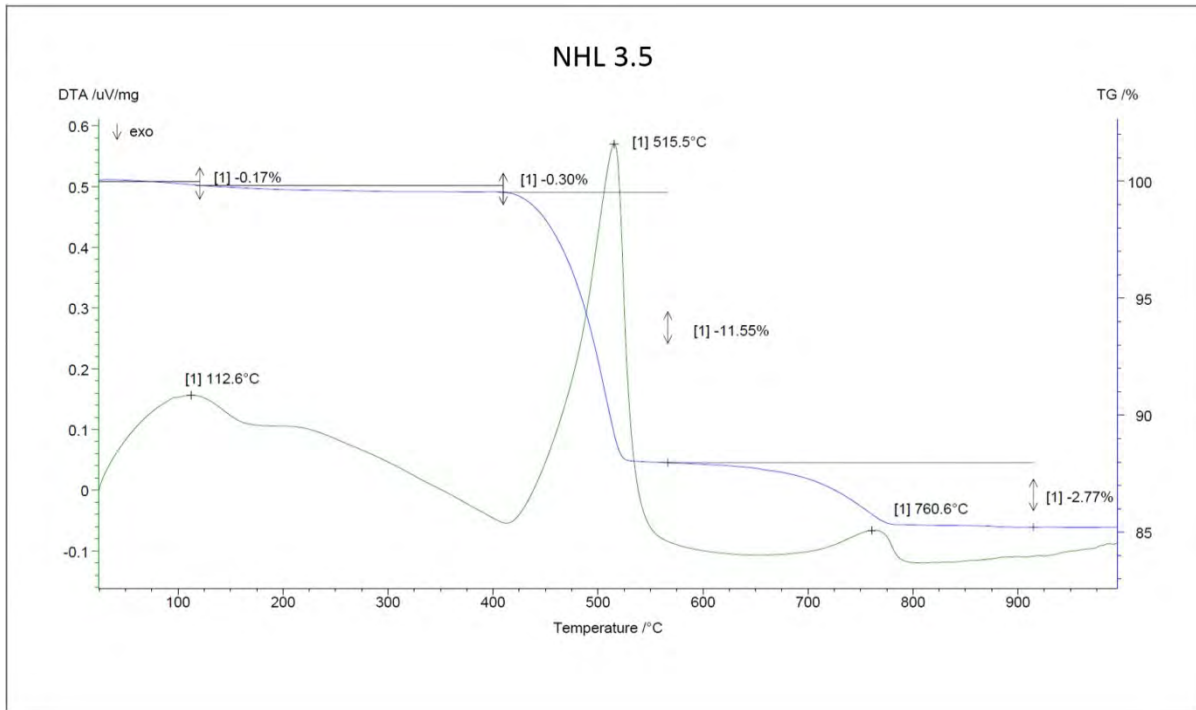
Στο διάγραμμα του σχήματος 5.9 φαίνεται η μείωση της μάζας σε αντιστοιχία με το θερμόγραμμα για την πρώτη ύλη του πηλού. Κάτω από τους 120°C παρουσιάζεται απώλεια στο φυσικά δεσμευμένο H<sub>2</sub>O (υγρασία), στους 120-250°C η απώλεια μάζας οφείλεται στο ενδοστρωματικό H<sub>2</sub>O. Στο μεσοδιάστημα η απώλεια μάζας οφείλεται στο χημικά δεσμευμένο H<sub>2</sub>O από τους αργίλους, ενώ η απώλεια μάζας που οφείλεται στις μαρμαρυγίες (μοσχοβίτης) γίνεται πάνω από τους 900°C. Πιο συγκεκριμένα μεταξύ 120°C και 450°C η απώλεια οφείλεται στην παρουσία του σμεκτίτη και μεταξύ των 450°C και 600°C η απώλεια μάζας αποδίδεται στον χλωρίτη με ενδόθερμη κορυφή στους 507.1°C. Η ενδόθερμη κορυφή στους 570.4°C αποδίδεται στην μετατροπή της φάσης του χαλαζία-α στον χαλαζία-β η οποία δεν συνοδεύεται από απώλεια μάζας.

Για την φυσική υδραυλική άσβεστο (Σχήμα 5.10) αναγνωρίστηκαν η ενδόθερμη αντίδραση αφυδάτωσης του Ca(OH)<sub>2</sub> με κορυφή στους 515.5°C. Από την απώλεια μάζας 11.55% του χημικά δεσμευμένου H<sub>2</sub>O υπολογίστηκε ότι το υδροξείδιο του ασβεστίου (Ca(OH)<sub>2</sub>) βρίσκεται σε ποσοστό 47.4%. Με αντίστοιχο τρόπο από την απώλεια μάζας 2.77% σε CO<sub>2</sub> υπολογίστηκε ότι το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO<sub>3</sub>) με ενδόθερμη κορυφή στους 760.6°C βρίσκεται σε ποσοστό 6.3%.

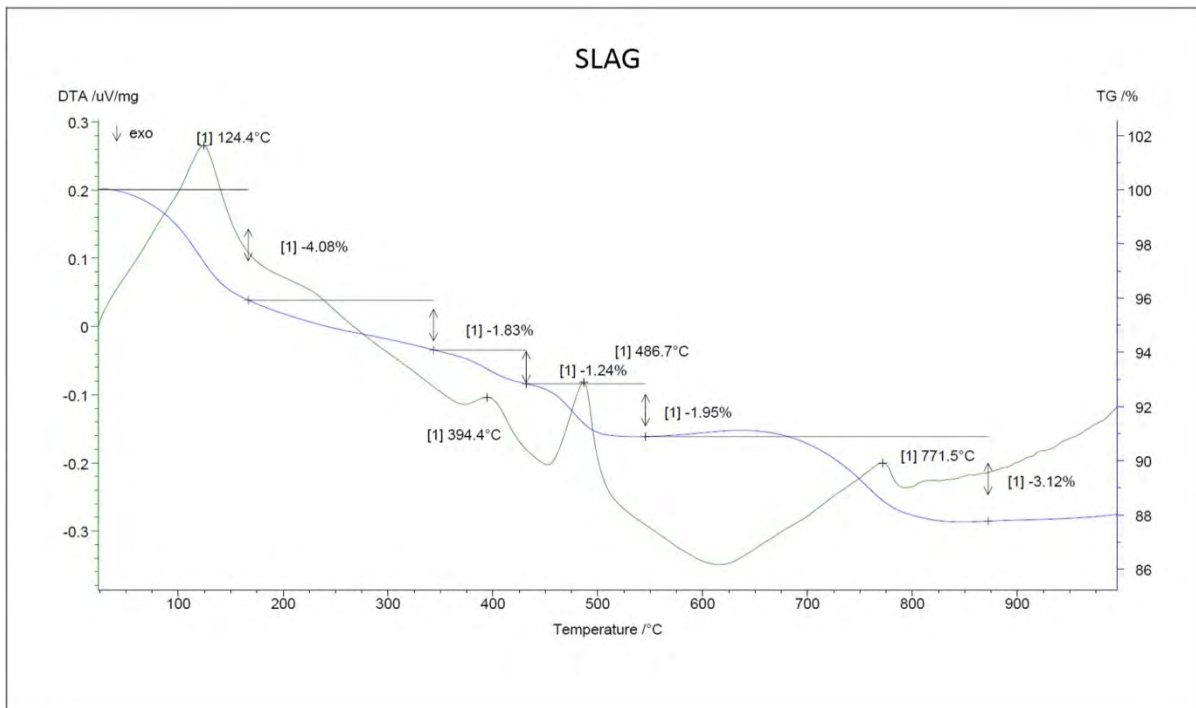
Για την σκωρία κάδων χαλυβουργίας (Σχήμα 5.11) αναγνωρίστηκε αντίστοιχα ότι παρουσιάζει την ενδόθερμη κορυφή του Ca(OH)<sub>2</sub> στους 486.7°C. Από την απώλεια μάζας προσδιορίστηκε ότι το υδροξείδιο του ασβεστίου (Ca(OH)<sub>2</sub>) βρίσκεται σε ποσοστό 8.01%. και το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO<sub>3</sub>) με ενδόθερμη κορυφή στους 771.5°C βρίσκεται σε ποσοστό 7.1%. Επίσης αναγνωρίστηκε η ύπαρξη βρουσίτη (Mg(OH)<sub>2</sub>) σε ποσοστό 4%, ο οποίος παρουσιάζει ενδόθερμη κορυφή στους 394°C απολύοντας το χημικά δεσμευμένο H<sub>2</sub>O.



Σχήμα 5.9 Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης DTA/TG για τον πηλό.



Σχήμα 5.10 Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης DTA/TG για την φυσική υδραυλική άσβεστο.



Σχήμα 5.11 Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης DTA/TG για την σκωρία κάδων χαλυβουργίας.

## 5.2 Αποτελέσματα των τεχνικών χαρακτηριστικών των νωπών κονιαμάτων

Στον Πίνακα 5.7 παρατίθενται τα αποτελέσματα των δοκιμών των νωπών κονιαμάτων. Η εξάπλωση όλων των δοκιμών διατηρήθηκε σε ανώτατη τιμή 14cm και επιτρεπτή απόκλιση 2mm, προκειμένου όλα τα κονιάματα να παρουσιάζουν ανάλογη εργασιμότητα και να είναι συγκρίσιμα. Η εξάπλωση για πηλοκονιάματα όπως έχει προαναφερθεί είναι αρκετά χαμηλή στα 14cm ώστε οι απαιτήσεις σε νερό να μην υπερβαίνουν το όριο υδαρότητας [2].

Όσον αφορά το μη σταθεροποιημένο πηλοκονίαμα αναφοράς (1)CS, για την επίτευξη εξάπλωσης 13.8cm, απαιτείται ποσοστό νερού 19.5%. Η φαινόμενη πυκνότητα του είναι 2.05 kg/l, ο περιεχόμενος αέρας 3% και το συγκρατούμενο νερό 95.23%. Σε όλες τις υπόλοιπες συνθέσεις παρατηρούμε ότι απαιτείται μεγαλύτερο ποσοστό νερού για να επιτύχουμε την ίδια τιμή εξάπλωσης και παίρνουμε μικρότερες φαινόμενες πυκνότητες, παρόμοια ποσοστά περιεχόμενου αέρα και ελαφρώς μικρότερα ποσοστά συγκρατούμενου νερού.

Συγκεκριμένα, τις μεγαλύτερες απαιτήσεις νερού εμφανίζουν τα σταθεροποιημένα κονιάματα με φυσική υδραυλική άσβεστο (2)NHL20CS και (3)NHL25CS. Όταν, μάλιστα, αυξάνεται το ποσοστό της φυσικής υδραυλικής άσβεστου από 20% σε 25%, αυξάνονται ελαφρώς οι απαιτήσεις σε νερό και ταυτόχρονα μειώνονται τα ποσοστά σε συγκρατούμενο νερό, καθώς και η τιμή της φαινόμενης πυκνότητας. Στις συνθέσεις της σκωρίας κάδων χαλυβουργίας (4)SL20CS και (5)SL25CS, εμφανίζονται αντίστοιχα μεγαλύτερες απαιτήσεις νερού σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς, αλλά μικρότερες από τις συνθέσεις της φυσικής υδραυλικής άσβεστου. Επίσης όσο αυξάνεται το ποσοστό της σκωρίας από 20% σε 25% αυξάνονται οι απαιτήσεις σε νερό και μειώνεται ελαφρώς το συγκρατούμενο νερό.

Οι μεγαλύτερες απαιτήσεις νερού συνδέονται κυρίως με την φύση της κονιάς και την ειδική επιφάνεια. Η φυσική υδραυλική άσβεστος και η σκωρία κάδων χαλυβουργίας αποτελούνται από σαφώς πιο λεπτοδιαμερισμένα συστατικά, έχουν δηλαδή μικρότερη κοκκομετρία και συνεπώς μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια ενώ ταυτόχρονα περιέχουν πορτλαντίτη και υδραυλικές ενώσεις οι οποίες συνδέονται με αυξημένες απαιτήσεις σε νερό.

Σύνθεση	Εξάπλωση (cm)	Ποσοστό νερού (%)	φαινόμενη πυκνότητα (Kg/l)	Περιεχόμενος αέρας (%)	Συγκρατούμενο νερό (%)
(1) CS	13.8	19.5	2.05	3	95.23 %
(2) NHL20CS	13.8	26.2	1.94	3	92.95 %
(3) NHL25CS	14	27.88	1.91	2.8	91.70 %
(4) SL20CS	14	24	1.96	3	90.49 %
(5) SL25CS	14	24.8	1.96	3	89.70 %

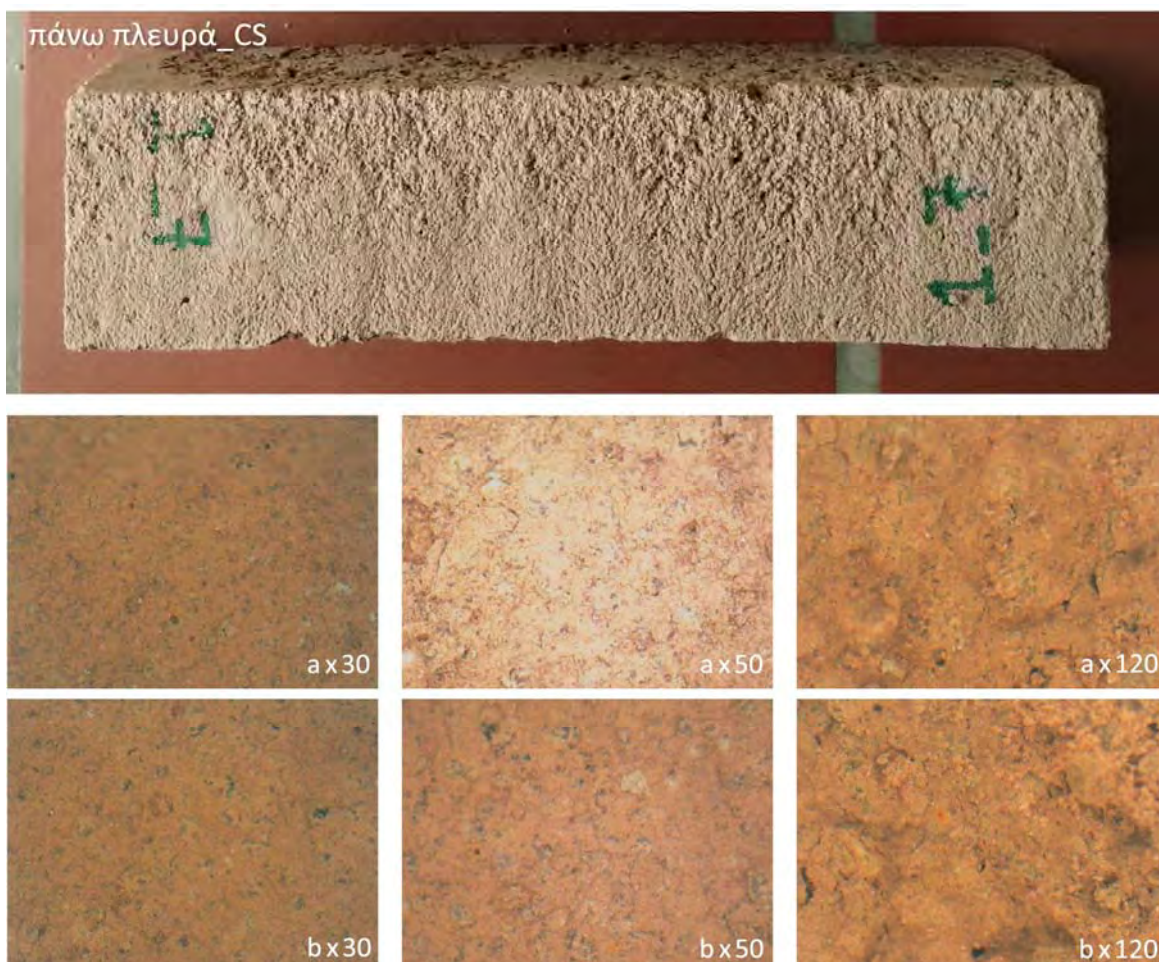
Πίνακας 5.7 Συγκέντρωση αποτελεσμάτων για τις δοκιμές των νωπών κονιαμάτων.

### 5.3 Αποτίμηση των πηλοκονιαμάτων κατά την πήξη και σκλήρυνση

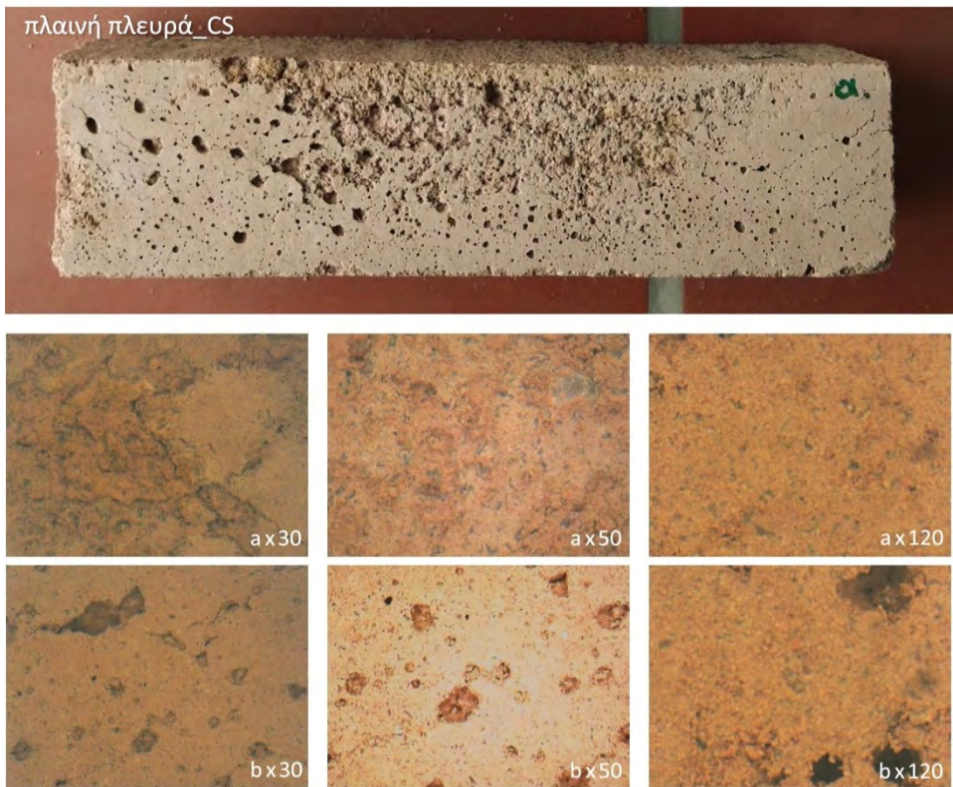
#### 5.3.1 Αποτελέσματα μικροσκοπίας οπτικών ινών (FOM)

Με τη χρήση του μικροσκοπίου οπτικών ινών πραγματοποιήθηκε η μορφολογική εξέταση των δοκιμίων. Ελήφθησαν εικόνες από τρεις πλευρές (επάνω πλευρά, πλάγια και κάτω πλευρά) κάθε δοκιμίου, που παρουσιάζουν διαφοροποίηση ως προς την κατανομή των πόρων και την ομαλότητα της επιφάνειας. Σε κάθε πλευρά εξετάστηκε η τυπική περιοχή (a) και η τυχόν αποκλίνουσα, αδρή περιοχή (b) σε μεγεθύνσεις x30, x50 και x120. Από τις μικροσκοπικές παρατηρήσεις προκύπτουν τα ακόλουθα:

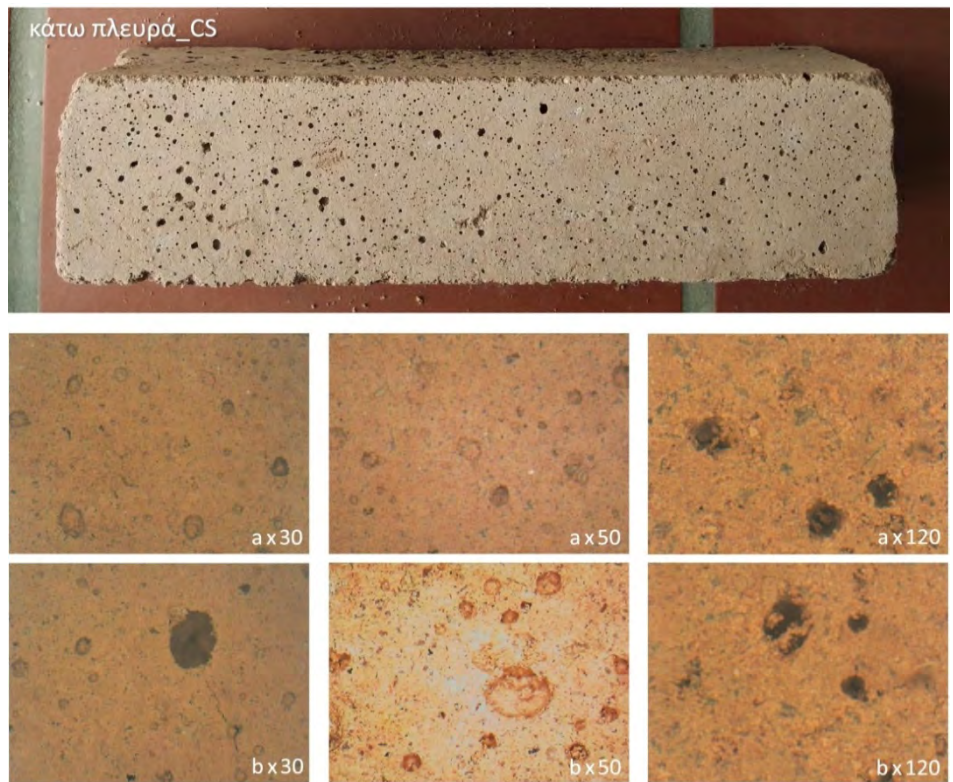
Τα μη σταθεροποιημένα δοκίμια έχουν παρόμοια όψη σε κάθε πλευρά. Ειδικότερα, η επιφάνεια της πάνω πλευράς έχει τραχεία υφή, με σημαντική αναλογία αδρανών, πόρους και μικρορωγμές σε τυχαίες διευθύνσεις, σε όλη την έκτασή της. Παρόμοια χαρακτηριστικά εμφανίζουν η πλαϊνή και η κάτω επιφάνεια, που προκύπτουν, ωστόσο, ομαλότερες υπό την πίεση της μήτρας. Οι πλευρές που βρίσκονταν σε επαφή με τη μήτρα έχουν προφανή ίχνη οξειδωσης που οφείλεται στη μακρά παραμονή τους στο καλούπι, λόγω της αργής πήξης του μείγματος. Οι έντονες ανωμαλίες που εμφανίζονται ανά περιοχές στις πλευρές αυτές οφείλονται στην απώλεια μάζας κατά το ξεκαλούπωμα (Εικόνα 5.2).



Εικόνα 5.1 Μορφολογία της πάνω πλευράς μη σταθεροποιημένου δοκιμίου.



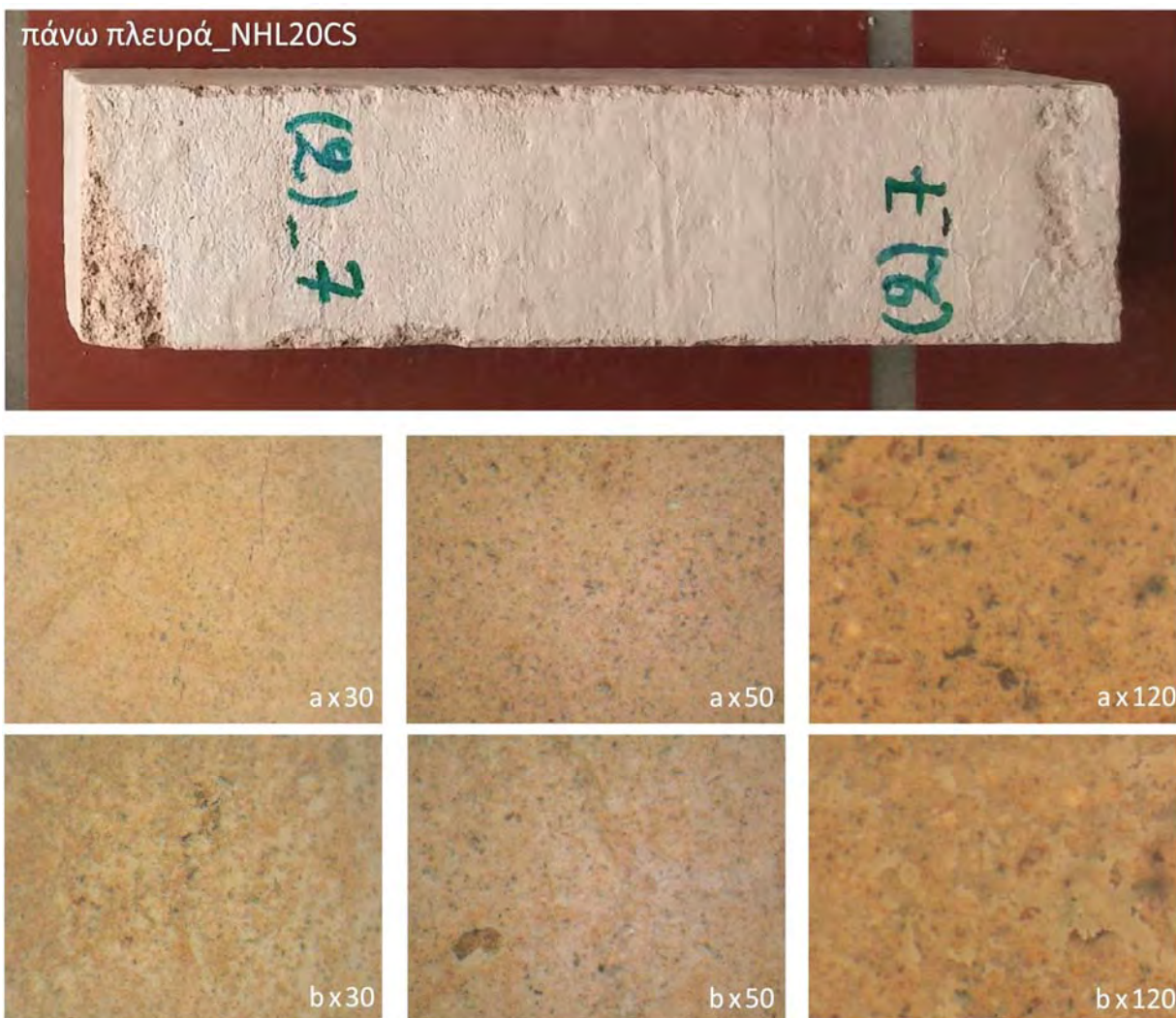
Εικόνα 5.2 Μορφολογία της πλαϊνής πλευράς μη σταθεροποιημένου δοκιμίου.



Εικόνα 5.3 Μορφολογία της κάτω πλευράς μη σταθεροποιημένου δοκιμίου.

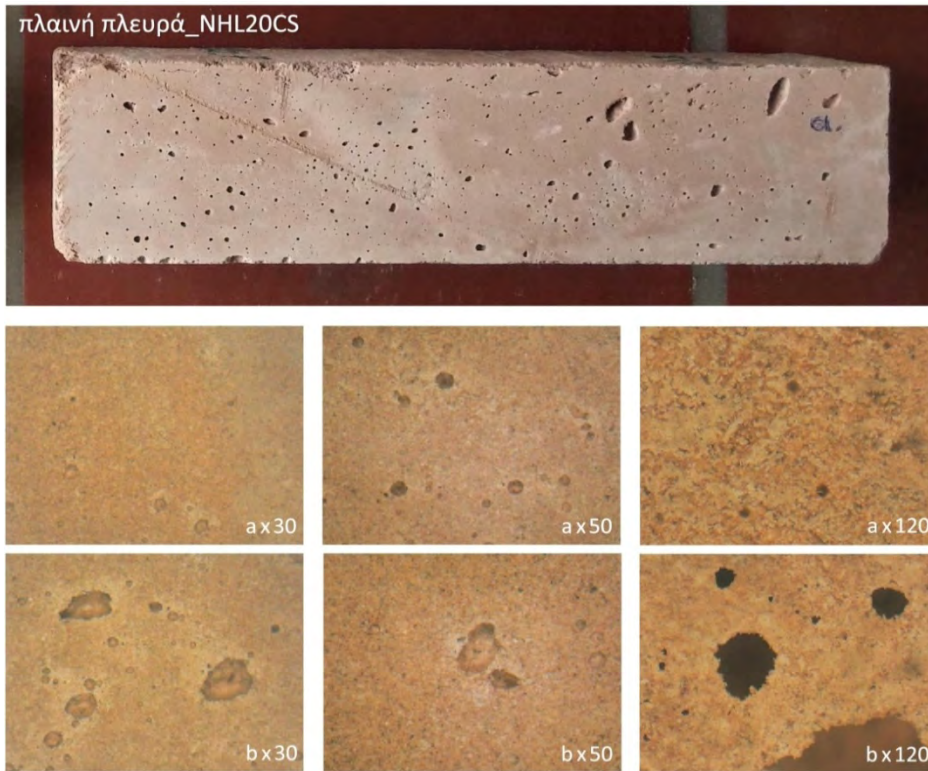
Το σταθεροποιημένα δοκίμια με 20% φυσική υδραυλική άσβεστο (σύνθεση (2) NHL20CS) (Εικόνα 5.4) εμφανίζουν γενικά συνεκτική δομή και παρουσιάζουν καλή πρόσφυση των λεπτόκοκκων αδρανών με την πάστα. Σποραδικά εμφανίζονται μόνο οι κόκκοι της άμμου, οι οποίοι είναι εμφανείς για μεγαλύτερες μεγεθύνσεις (a,b x 120). Σε γενικές γραμμές οι επιφάνειες παρουσιάζονται ομαλές. Επίσης διακρίνονται μικροί πόροι, σποραδικά κατανεμημένοι, οι οποίοι είναι σαφώς μικρότερης διαμέτρου σε σύγκριση με αυτούς των μη σταθεροποιημένων δοκιμίων της σύνθεση αναφοράς (1)CS.

Οι πλαϊνές πλευρές, ειδικότερα, εμφανίζουν κατά τόπους οπές, μεγαλύτερης διαμέτρου και σε ακανόνιστη κατανομή, που οφείλονται προφανώς, στη δημιουργία κυψελίδων από τον εγκλεισμό αέρα στη φάση του καλουπώματος. Μικρότερες είναι οι οπές που σχηματίστηκαν, για τον ίδιο λόγο, στην κάτω πλευρά του δοκιμίου (Εικόνες 5.5-5.6).

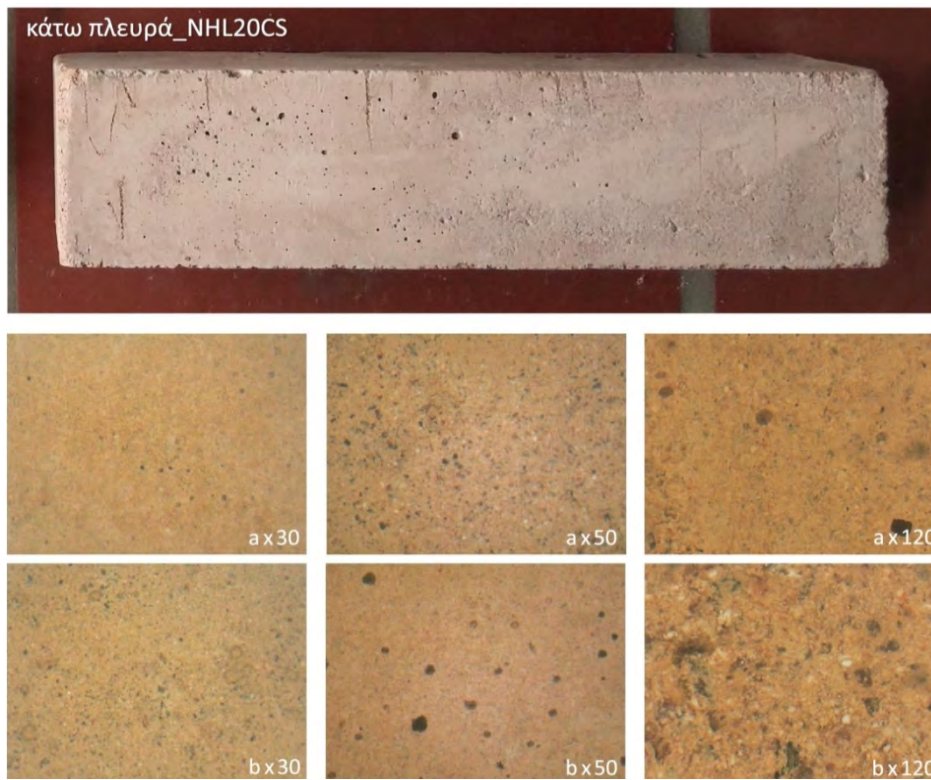


Εικόνα 5.4 Μορφολογία της πάνω πλευράς σταθεροποιημένου δοκιμίου με 20% φυσική υδραυλική άσβεστο.





Εικόνα 5.5 Μορφολογία πλαϊνής πλευράς σταθεροποιημένου δοκιμίου με 20% φυσική υδραυλική άσβεστο.



Εικόνα 5.6 Μορφολογία της κάτω πλευράς σταθεροποιημένου δοκιμίου με 20% φυσική υδραυλική άσβεστο.

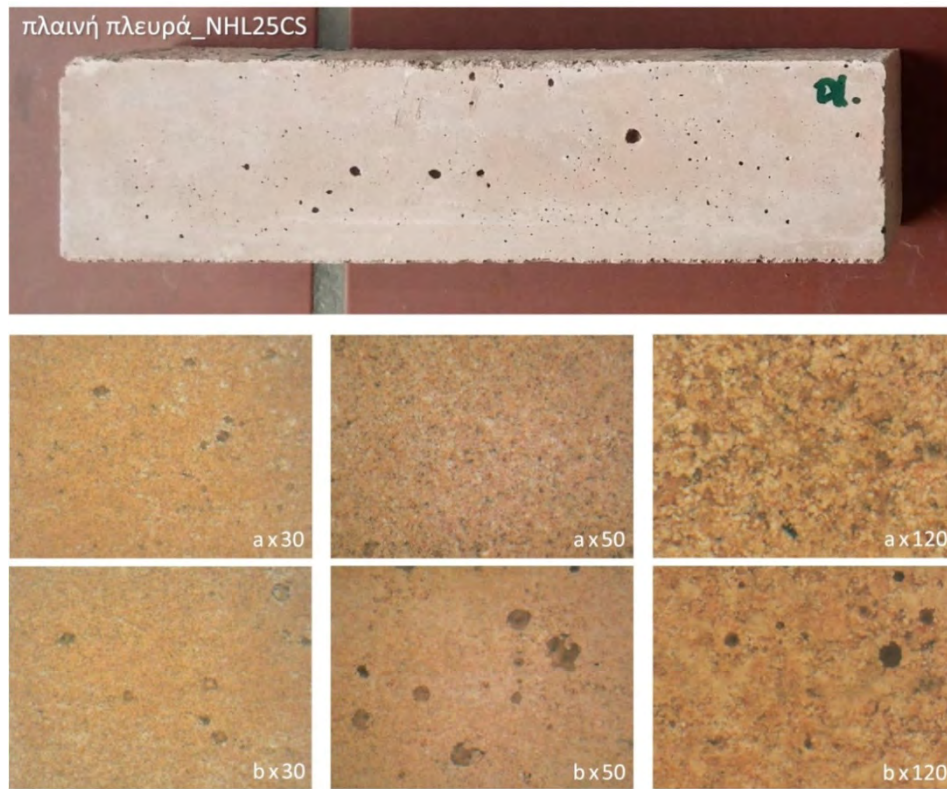
Τα σταθεροποιημένα δοκίμια με 25% φυσική υδραυλική άσβεστο (σύνθεση (3) NHL25CS) εμφανίζουν ένα δείγμα με ελαφρώς καλύτερη συνοχή ανάμεσα στα αδρανή και την κονία σε σχέση με τα σταθεροποιημένα δοκίμια με 20% φυσική υδραυλική άσβεστο.

Σποραδικά διακρίνονται κόκκοι αδρανούς για μεγαλύτερες μεγεθύνσεις (a και b x120), ενώ πόροι πολύ μικρής διαμέτρου εμφανίζονται κατά τόπους σε όλες τις πλευρές των δοκιμίων. Σε γενικές γραμμές όμως όλες οι επιφάνειες παρουσιάζονται ομαλές.

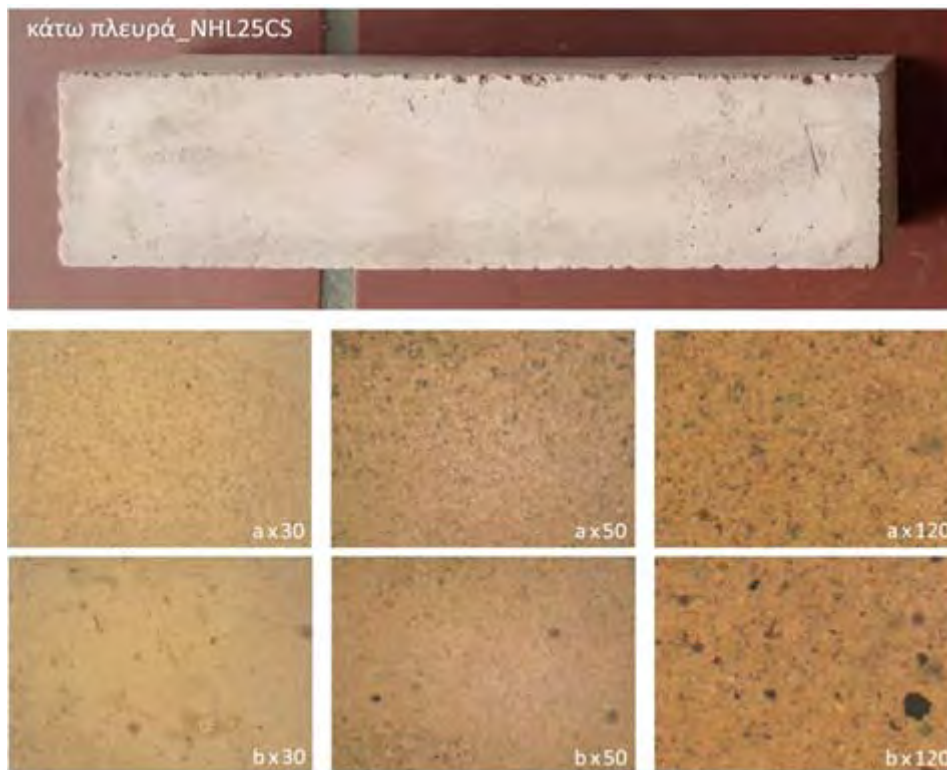
Στην πλαϊνή πλευρά παρουσιάζονται οπές ποικίλων διαστάσεων και τυχαίας κατανομής που οφείλονται στις κυψελίδες αέρα που εγκλωβίστηκε κατά το καλούπωμα. Πολύ πιο περιορισμένο είναι το φαινόμενο στην κάτω πλευρά του δοκιμίου (Εικόνες 5.8-5.9).



Εικόνα 5.7 Μορφολογία της πάνω πλευράς σταθεροποιημένου δοκιμίου με 25% φυσική υδραυλική άσβεστο.



Εικόνα 5.8 Μορφολογία πλαϊνής πλευράς σταθεροποιημένου δοκιμίου με 25% φυσική υδραυλική άσβεστο.



Εικόνα 5.9 Μορφολογία της κάτω πλευράς σταθεροποιημένου δοκιμίου με 25% φυσική υδραυλική άσβεστο.

Τα σταθεροποιημένα δοκίμια με 20% σκωρία κάδων χαλυβουργίας (σύνθεση (4) SL20CS) εμφανίζουν επιφάνειες συνεκτικές και ομοιογενείς.

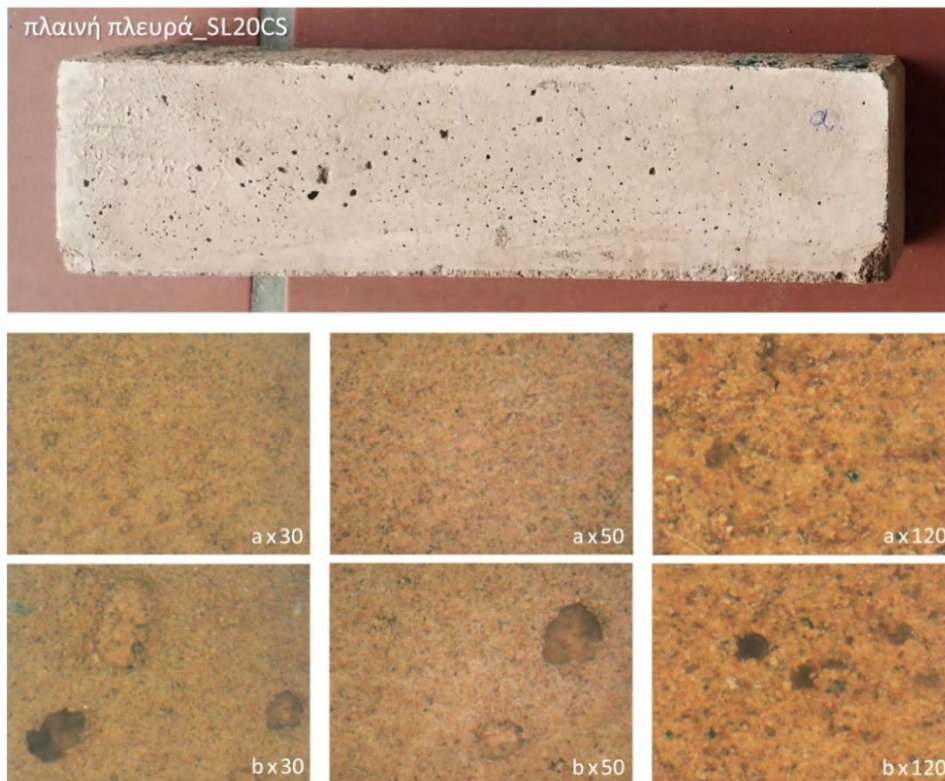
Παρ' ότι η συνοχή μεταξύ κόνιας και αδρανών είναι εμφανής, διακρίνονται ανά διαστήματα οι κόκκοι της άμμου (μεγεθύνσεις a,b x 120). Οι επιφάνειες σε γενικές γραμμές προκύπτουν ομαλές με σποραδική κατανομή μικρών πόρων για όλες τις πλευρές (Εικόνες 5.10, 5.11-5.12).

Στις πλευρές που ήρθαν σε επαφή με τη μήτρα σχηματίστηκαν όπως σε όλες τις συνθέσεις κυψελίδες εγκλωβισμένου αέρα, με αποτέλεσμα τη σποραδική παρουσία οπών, το φαινόμενο αυτό σε αντιστοιχία για όλα τα σταθεροποιημένα δοκίμια είναι εντονότερο στις πλαϊνές πλευρές.

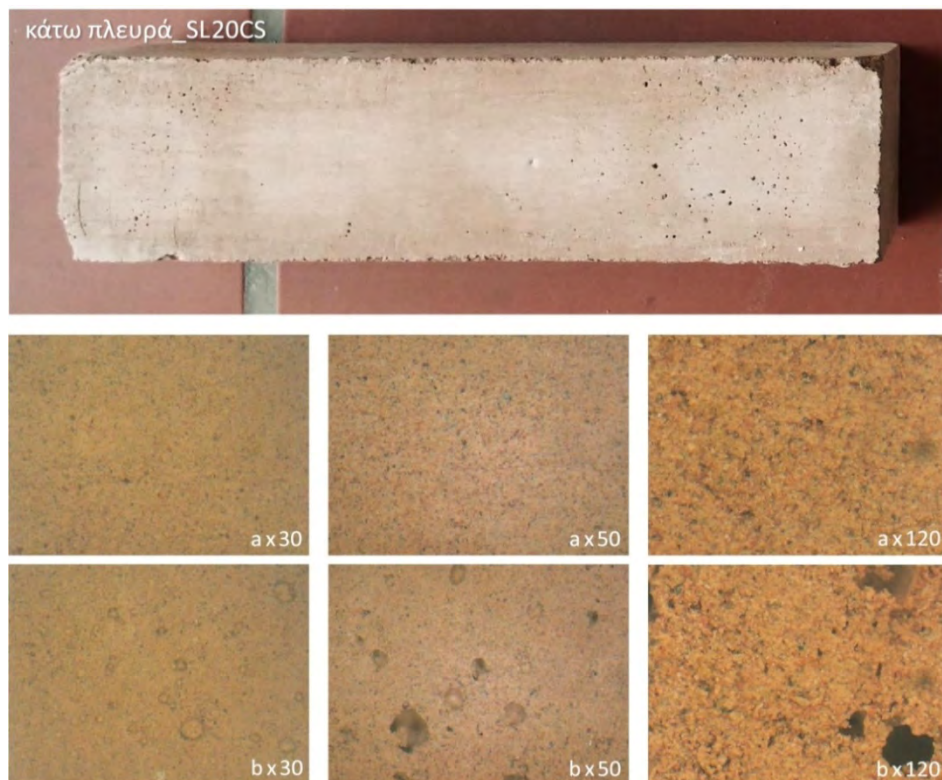
Οι μεγάλες οπές (εμφανείς και χωρίς τη βοήθεια του μικροσκοπίου) που εμφανίζονται στην πλαϊνή πλευρά και σχηματίστηκαν στη φάση του καλουπώματος δεν φαίνεται να σχετίζονται με τον τύπο η το ποσοστό της προσθήκης σε σταθεροποιητή στα μείγματα.



Εικόνα 5.10 Μορφολογία πάνω πλευράς σταθεροποιημένου δοκιμίου με 20% σκωρία κάδων χαλυβουργίας.



Εικόνα 5.11 Μορφολογία πλαϊνής πλευράς σταθεροποιημένου δοκιμίου με 20% σκωρία κάδων χαλυβουργίας.

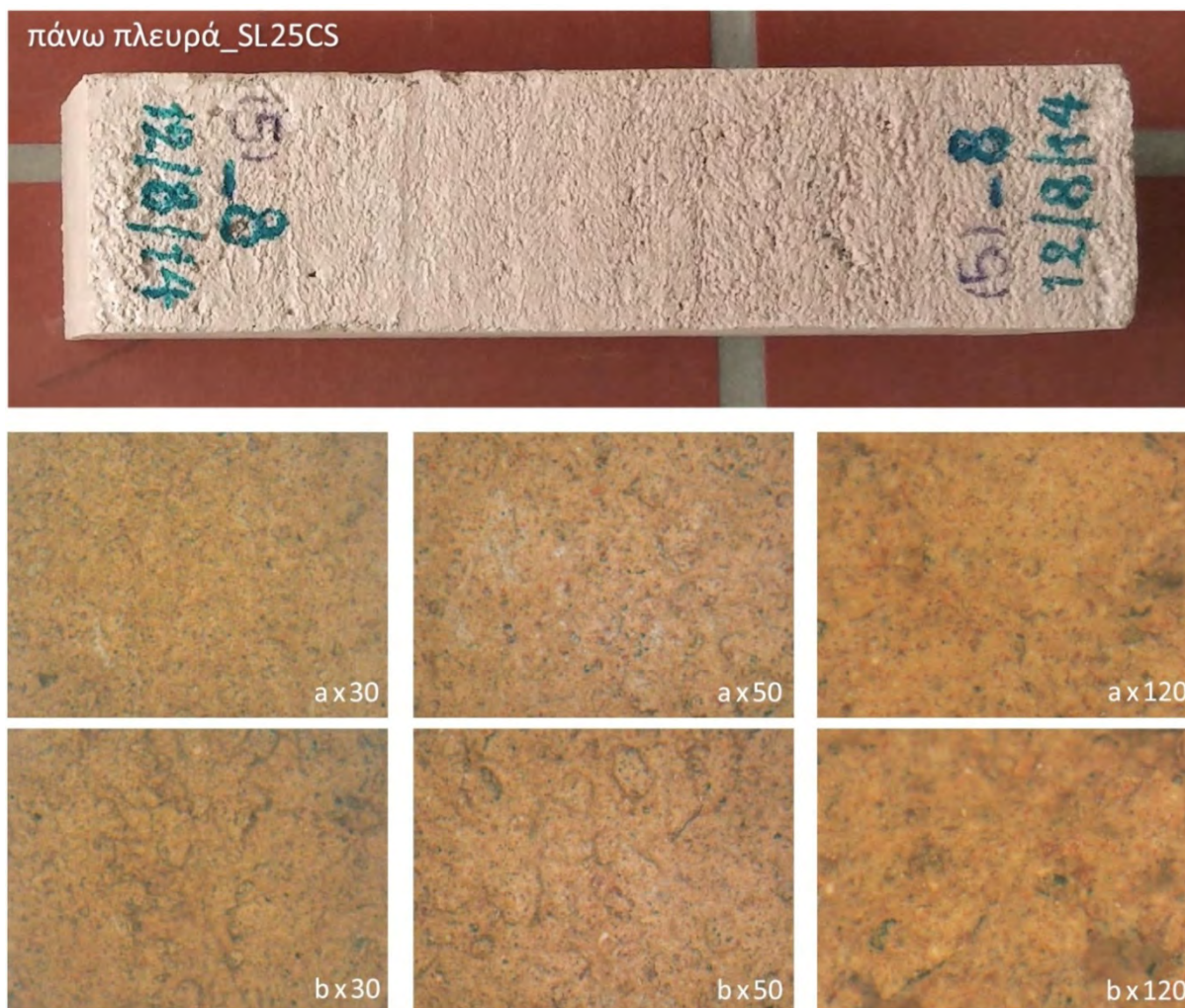


Εικόνα 5.12 Μορφολογία κάτω πλευράς σταθεροποιημένου δοκιμίου με 20% σκωρία κάδων χαλυβουργίας.

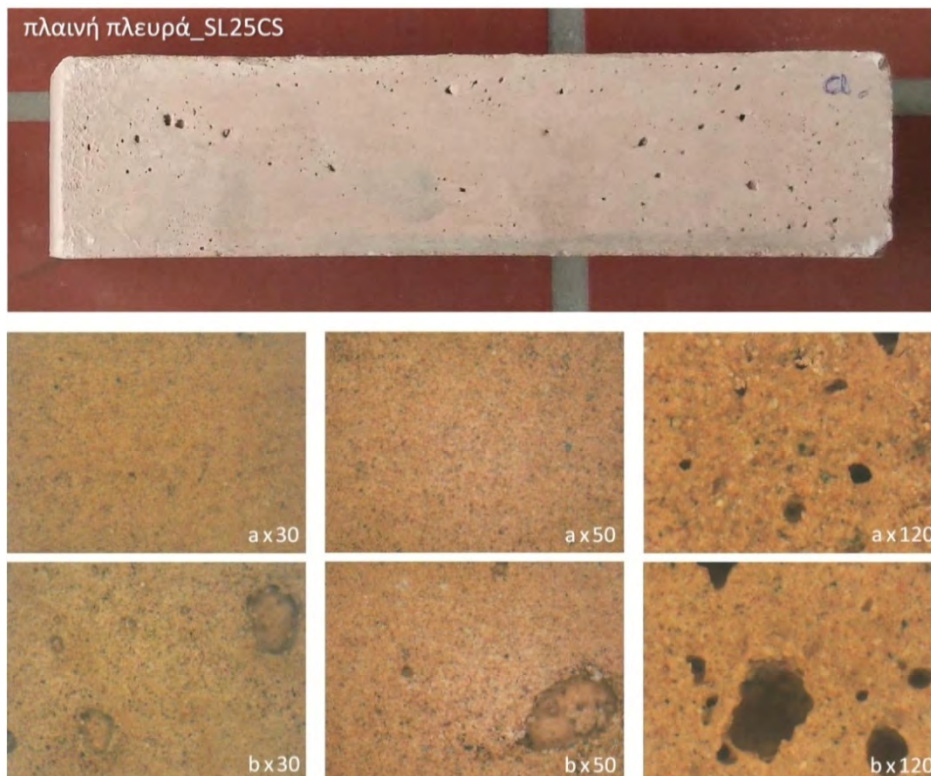
Όλες οι επιφάνειες των σταθεροποιημένων δοκιμών με 25% σκωρία κάδων χαλυβουργίας (σύνθεση (5) SL25CS) εμφανίζουν συνεκτικότητα και ομοιογένεια. Τα αδρανή, αν και γενικά παρουσιάζουν συνοχή με την κονία, γίνονται ομοίως εμφανή στις μεγαλύτερες μεγεθύνσεις (a, b x 120).

Όλες οι επιφάνειες των δοκιμών παρουσιάζονται σε γενικές γραμμές ομαλές και εμφανίζουν σποραδικά πόρους μικρής διαμέτρου και αραιής κατανομής. Στις πλευρές που ήρθαν σε επαφή με τη μήτρα σχηματίστηκαν κυψελίδες εγκλωβισμένου αέρα, με αποτέλεσμα τη διάσπαρτη παρουσία οπών στις πλευρές αυτές. Το φαινόμενο είναι εντονότερο στις πλαϊνές πλευρές (Εικόνα 5.14).

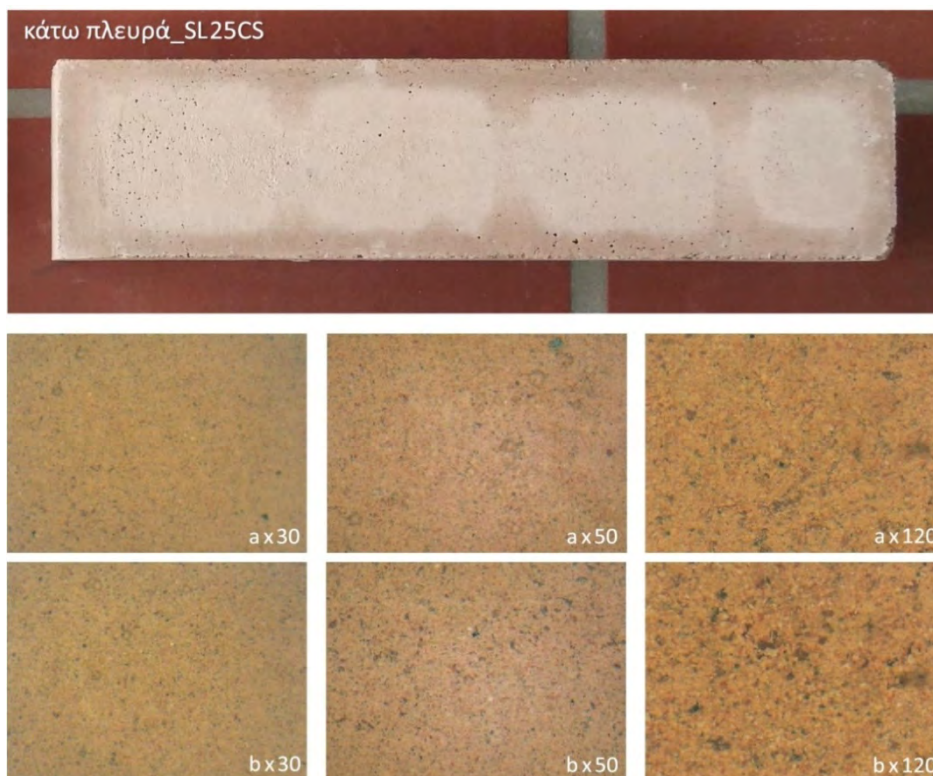
Γενικά, από τις μετρήσεις του Μικροσκοπίου Οπτικών Ινών γίνεται κατανοητή η πορώδης φύση των πηλοκονιαμάτων. Σε σύγκριση με τα μη σταθεροποιημένα δοκίμια αναφοράς, η συχνότητα εμφάνισης των επιφανειακών πόρων και το μέγεθός τους μειώνεται αισθητά στις συνθέσεις που περιέχουν σκωρία κάδων χαλυβουργίας ή φυσική υδραυλική άσβεστο. Τα δείγματα των σταθεροποιημένων συνθέσεων έχουν γενικά συνεκτική δομή και εμφανίζουν καλή πρόσφυση των αδρανών με την πάστα.



Εικόνα 5.13 Μορφολογία πάνω πλευράς σταθεροποιημένου δοκιμίου με 25% σκωρία κάδων χαλυβουργίας.



Εικόνα 5.14 Μορφολογία πλαϊνής πλευράς σταθεροποιημένου δοκιμίου με 25%σκωρία κάδων χαλυβουργίας.



Εικόνα 5.15 Μορφολογία κάτω πλευράς σταθεροποιημένου δοκιμίου με 25% σκωρία κάδων χαλυβουργίας.

### 5.3.2 Αποτελέσματα Χρωματομετρίας

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται όλες οι πλευρές των δοκιμών από τις οποίες πάρθηκαν οι μετρήσεις. Τοποθετήθηκε εδώ για να μας βοηθήσει να κατανοήσουμε καλύτερα τα αποτελέσματα και να τα συνδέσουμε με την αισθητική όψη των δειγμάτων.



Εικόνα 5.16 Όψεις των σταθεροποιημένων και μη δοκιμών από τις οποίες πάρθηκαν οι μετρήσεις.



Από τα παρακάτω [σχήματα 5.12-5.14](#) και τον [πίνακα 5.8](#) είναι εμφανές ότι εκτός των χρωματικών διαφορών ανά σύνθεση υπάρχει και μία σχετική χρωματική ανομοιομορφία στα ίδια τα δοκίμια ανά πλευρά. Σε αυτό το σημείο είναι καλό να ορίσουμε ότι η μεταβολή της λαμπρότητας  $L^*$  συνδέεται, με την αλλαγή στην τόνο ενός αντικειμένου, ενώ η μεταβολή στις μεταβλητές  $a^*b^*$ , συνδέεται με την αξία, δηλαδή την απόχρωση. Επίσης όσων αφορά τα χρώματα όταν οι τιμές των μεταβλητών  $a^*b^*$  δηλαδή το κόκκινο και το κίτρινο αυξάνονται, το χρώμα γίνεται πιο θερμό ενώ αντιθέτως ψυχραίνει. Επιπλέον όσο οι μεταβλητές  $L^*a^*b^*$  τείνουν να είναι σε ισορροπία τότε η εκάστοτε επιφάνεια τείνει να φαίνεται γκριζα χωρίς εμφανώς να υπερτερεί ένα βασικό χρώμα επάνω της.

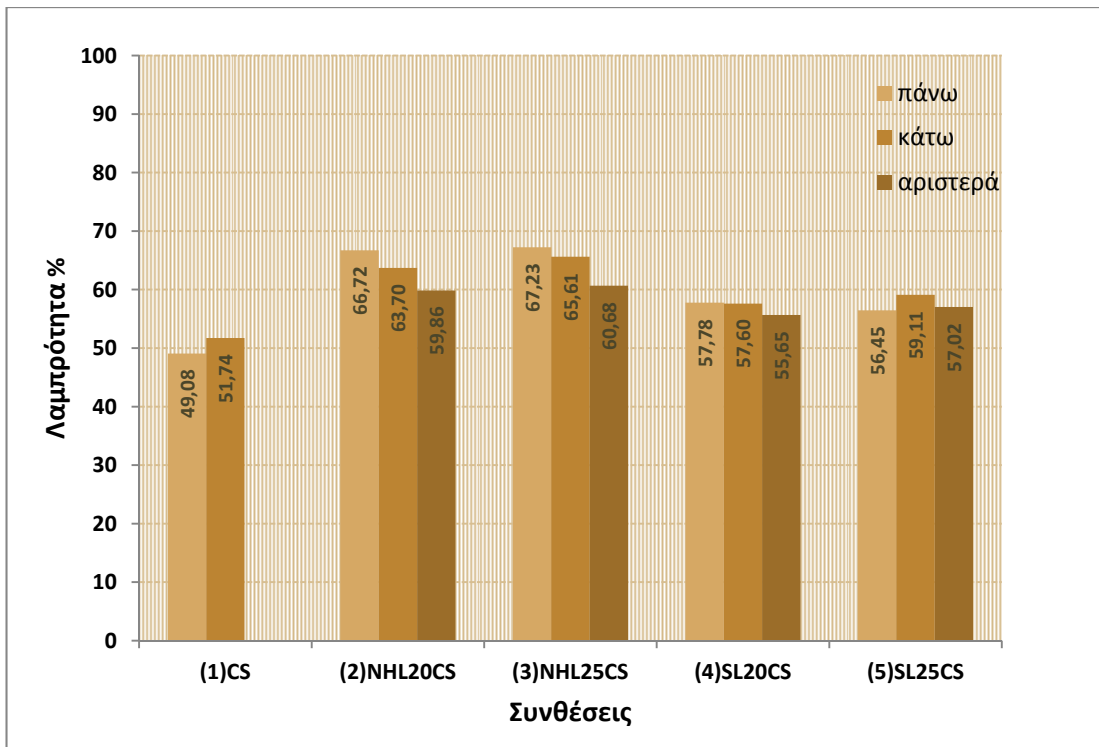
Όσων αφορά την **λαμπρότητα  $L^*$**  ([Σχήμα 5.12](#)) παρατηρούμε ότι τα μη σταθεροποιημένα δοκίμια της σύνθεσης (1)CS είναι πιο σκούρα και κατά την σταθεροποίηση ανοίγουν τονικά. Τα σταθεροποιημένα δοκίμια με φυσική υδραυλική άσβεστο σε ποσοστό 25% (σύνθεση (3) NHL25CS) παρουσιάζουν την μεγαλύτερη τιμή  $L^*$ . Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες συνθέσεις τα μη σταθεροποιημένα δοκίμια της σύνθεσης (1)CS παρουσιάζουν πιο σκούρα την πάνω πλευρά τους, γεγονός που μπορεί να δικαιολογηθεί από την έντονη επιφανειακή τραχύτητα ([εικόνα 5.16](#)).

Όσων αφορά την **τιμή  $a^*$**  παρατηρούμε ότι τα μη σταθεροποιημένα δοκίμια της σύνθεσης αναφοράς (1)CS έχουν ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές ενώ τα σταθεροποιημένα δοκίμια με 25% σκωρία κάδων χαλυβουργίας (σύνθεση (5)SL25CS) παρουσιάζουν την μικρότερη τιμή.

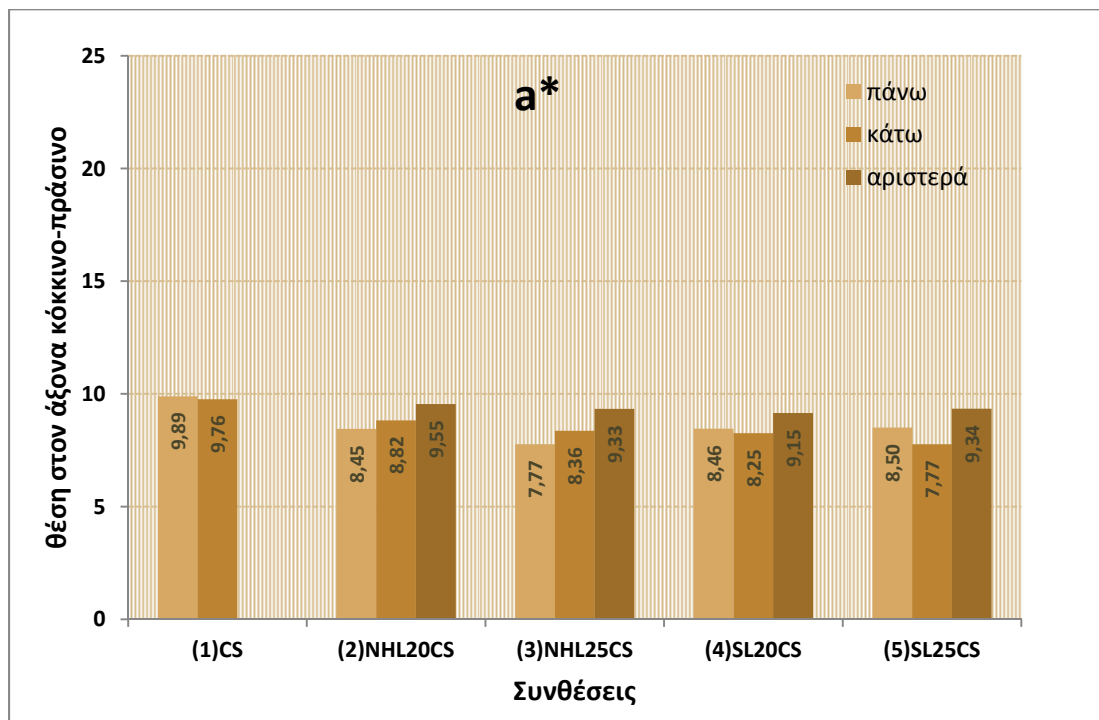
Όσων αφορά την **τιμή  $b^*$**  παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν έντονες διαφοροποιήσεις σε σχέση με την σύνθεση αναφοράς (1)CS, το ενδιαφέρον είναι ότι τα σταθεροποιημένα δοκίμια με φυσική υδραυλική άσβεστο (2)NHL20CS και (3)NHL25CS, ρίχνουν τις τιμές τους ιδιαίτερα στην πάνω πλευρά ψυχραίνοντας την απόχρωσή τους, ενώ τα σταθεροποιημένα δοκίμια σκωρία κάδων χαλυβουργίας, ελαφρώς κιτρινίζουν μόνο στις πλαϊνές πλευρές τους, φαινόμενο το οποίο, μπορεί να οφείλεται σε πιθανή ελαφριά οξείδωση με τα μεταλλικά τοιχώματα της μήτρας ([Σχήμα 5.14](#)).

Σύνθεση	Πλευρά	$L^*$	Τυπ. απόκ. $L^*$	$a^*$	Τυπ. απόκ. $a^*$	$b^*$	Τυπ. απόκ. $b^*$
(1)CS	πάνω	49.08	0.87	9.89	0.10	10.66	0.21
	κάτω	51.74	0.66	9.76	0.08	11.42	0.19
	αριστερά	-	-	-	-	-	-
(2)NHL20CS	πάνω	66.72	1.21	8.45	0.44	10.24	0.84
	κάτω	63.70	0.87	8.82	0.29	11.11	0.46
	αριστερά	59.86	0.93	9.55	0.22	11.44	0.20
(3)NHL25CS	πάνω	67.23	1.15	7.77	0.12	8.60	0.23
	κάτω	65.61	1.39	8.36	0.36	10.42	0.57
	αριστερά	60.68	0.39	9.33	0.08	10.64	0.20
(4)SL20CS	πάνω	57.78	1.86	8.46	0.28	10.64	0.59
	κάτω	57.60	0.06	8.25	0.30	10.72	0.27
	αριστερά	55.65	1.67	9.15	0.31	11.79	0.32
(5)SL25CS	πάνω	56.45	0.12	8.50	0.43	10.74	0.58
	κάτω	59.11	0.48	7.77	0.16	10.77	0.23
	αριστερά	57.02	0.56	9.34	0.17	12.20	0.29

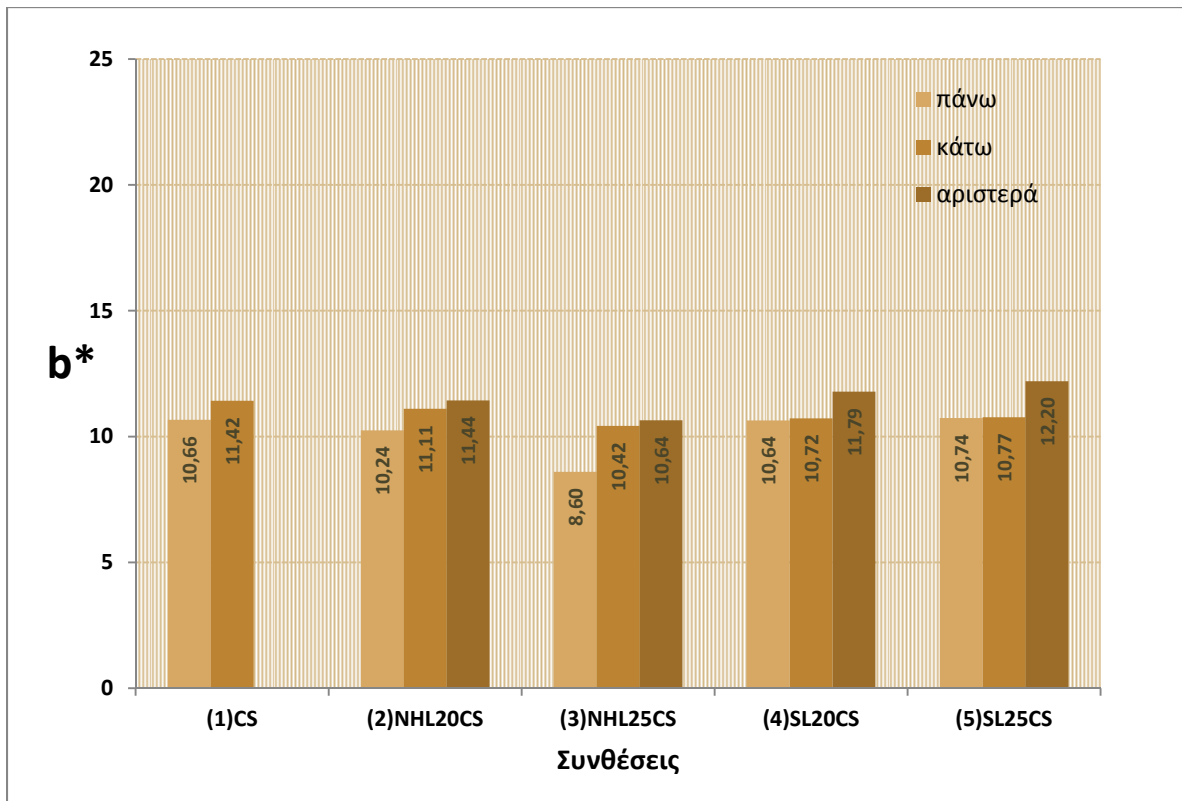
Πίνακας 5.8 Μέσοι Όροι μεταβλητών CIE  $L^*a^*b^*$  ανά πλευρά για σταθεροποιημένα και μη ηηλοκονιάματα.



Σχήμα 5.12 Λαμπρότητα L (%) δειγμάτων ανά πλευρά για σταθεροποιημένα και μη πηλοκονιάματα.



Σχήμα 5.13 Μεταβολή του  $\alpha^*$ (κόκκινο-πράσινο) δειγμάτων ανά πλευρά για σταθεροποιημένα και μη πηλοκονιάματα.



Σχήμα 5.14 Μεταβολή του  $b^*$  (μπλε-κίτρινο) δειγμάτων ανά πλευρά για σταθεροποιημένα και μη πηλοκονιάματα.

Στα πλαϊνά τοιχώματα των μη σταθεροποιημένων δοκιμών δεν ήταν δυνατές οι μετρήσεις λόγω της μεγάλης τραχύτητας που παρουσίαζαν στην επιφάνεια τους, προϊόν αποκολλήσεων κατά την διάρκεια του ξεκαλουπώματος.

Στα συγκεντρωτικά αποτελέσματα (Πίνακας 5.9) επιβεβαιώνονται οι παραπάνω παρατηρήσεις δείχνοντάς μας τις συνολικές διαφορές μεταξύ των συνθέσεων.

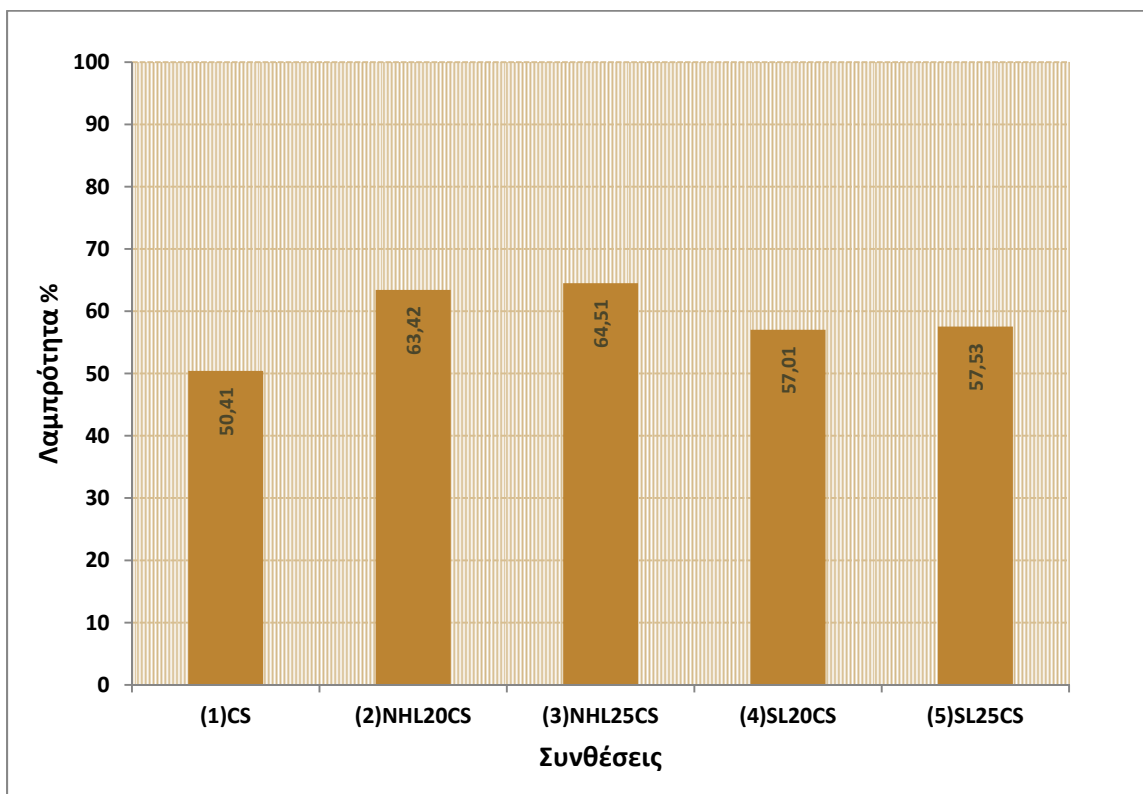
Τα σταθεροποιημένα πηλοκονιάματα με φυσική υδραυλική άσβεστο (συνθέσεις (2)NHL20CS, (3)NHL25CS) εμφανίζουν την μεγαλύτερη λαμπρότητα με την σύνθεση (3)NHL25CS να είναι 14% πιο ανοιχτή από την μη σταθεροποιημένη σύνθεση, ενώ επίσης τα σταθεροποιημένα δοκίμια με 25% φυσική υδραυλική άσβεστο παρουσιάζουν χαμηλότερη τιμή σε ερυθρότητα ( $a^*$ ) και ψυχραίνουν ελαφρώς ρίχνοντας την τιμή του  $b^*$ .

Τα σταθεροποιημένα κονιάματα με σκωρία κάδων χαλυβουργίας (συνθέσεις (4)SL20CS και (5)SL25CS) παρουσιάζουν ελάχιστες διαφορές μεταξύ τους και σχεδόν πανομοιότυπα αυξάνουν κατά 7% την λαμπρότητα  $L^*$ . Μειώνουν αντίστοιχα με την σύνθεση (3)NHL25CS την ερυθρότητα ενώ φαίνεται να αυξάνουν ελαφρώς την τιμή του κίτρινου  $b^*$ , κάτι το οποίο όμως δεν ισχύει στην πραγματικότητα καθώς στους αναλυτικό πίνακα 5.8 φαίνεται ότι αυτό συμβαίνει μόνο για τις πλαϊνές πλευρές και καθώς για την σύνθεση αναφοράς (1)CS δεν πήραμε μετρήσεις στις πλαϊνές πλευρές, εμφανίζεται αυτή η μικρή αναντιστοιχία στους μέσους όρους.

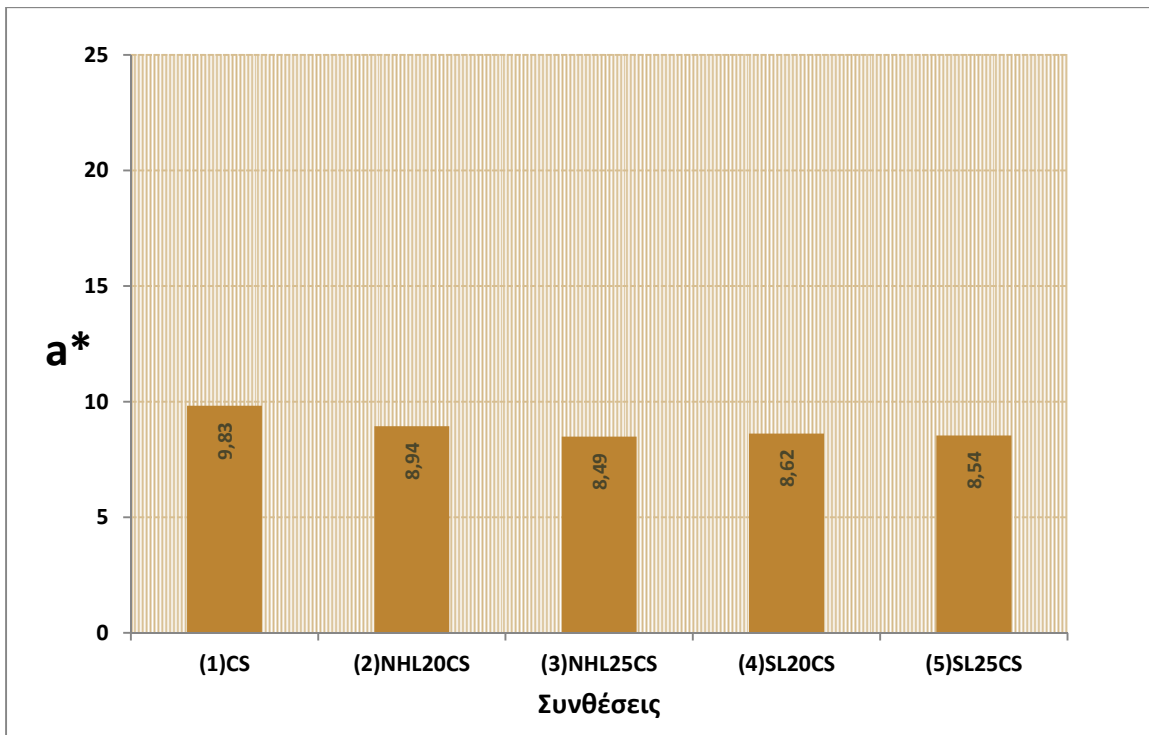
Σε γενικές γραμμές προκύπτει ότι τα αποτελέσματα έρχονται σε άμεση συνέπεια με την ανάμιξη των πρώτων υλών δηλαδή, τα σταθεροποιημένα δοκίμια με υδραυλική άσβεστο (λευκή σκόνη) ανοίγουν σε τόνο και ροζίζονται σε χρώμα καθώς ψυχραίνουν με την ελάττωση των τιμών  $a^*$  και  $b^*$ . Αντίστοιχα η σταθεροποίηση με σκωρία κάδων χαλυβουργίας (γκριζο-πράσινη ανοιχτή σκόνη) ανοίγει ελαφρώς τον τόνο των πηλοκονιαμάτων και ρίχνει ελαφρώς την ερυθρότητα γκριζάροντας το τελικό αποτέλεσμα.

Μ.Ο. Μεταβλητών CIE L*a*b* από τις πλευρές ανά σύνθεση πηλοκονιάματος						
Σύνθεση	L*	Τυπ. απόκ.	a*	Τυπ. απόκ.	b*	Τυπ. απόκ.
(1)CS	50.41	1.88	9.83	0.09	11.04	0.54
(2)NHL20CS	63.42	3.44	8.94	0.56	10.93	0.62
(3)NHL25CS	64.51	3.41	8.49	0.79	9.89	1.12
(4)SL20CS	57.01	1.18	8.62	0.47	11.05	0.64
(5)SL25CS	57.53	1.40	8.54	0.79	11.23	0.84

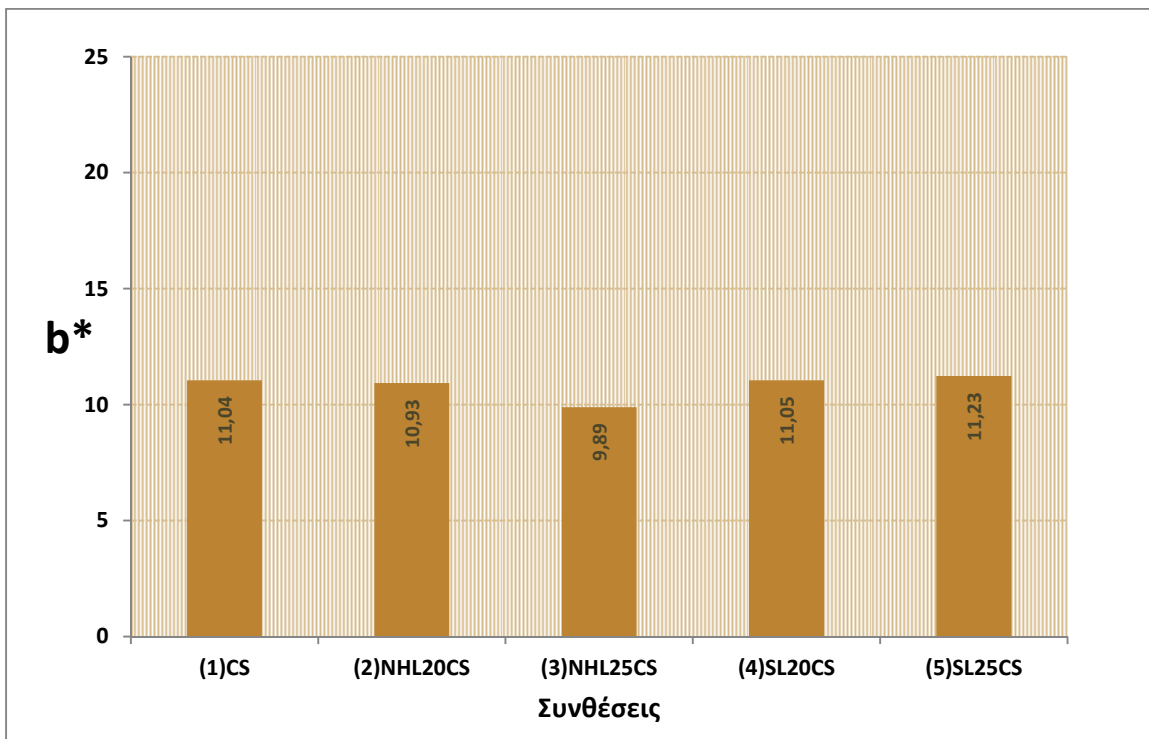
Πίνακας 5.9 Μέσοι Όροι μεταβλητών CIE L\*a\*b\* για σταθεροποιημένα και μη πηλοκονιάματα.



Σχήμα 5.15 Συνολική μεταβολή της Λαμπρότητας L(%) δειγμάτων για σταθεροποιημένα και μη πηλοκονιάματα.



Σχήμα 5.16 Συνολική μεταβολή του  $a^*$  (κόκκινο-πράσινο) δειγμάτων για σταθεροποιημένα και μη πηλοκονιάματα.

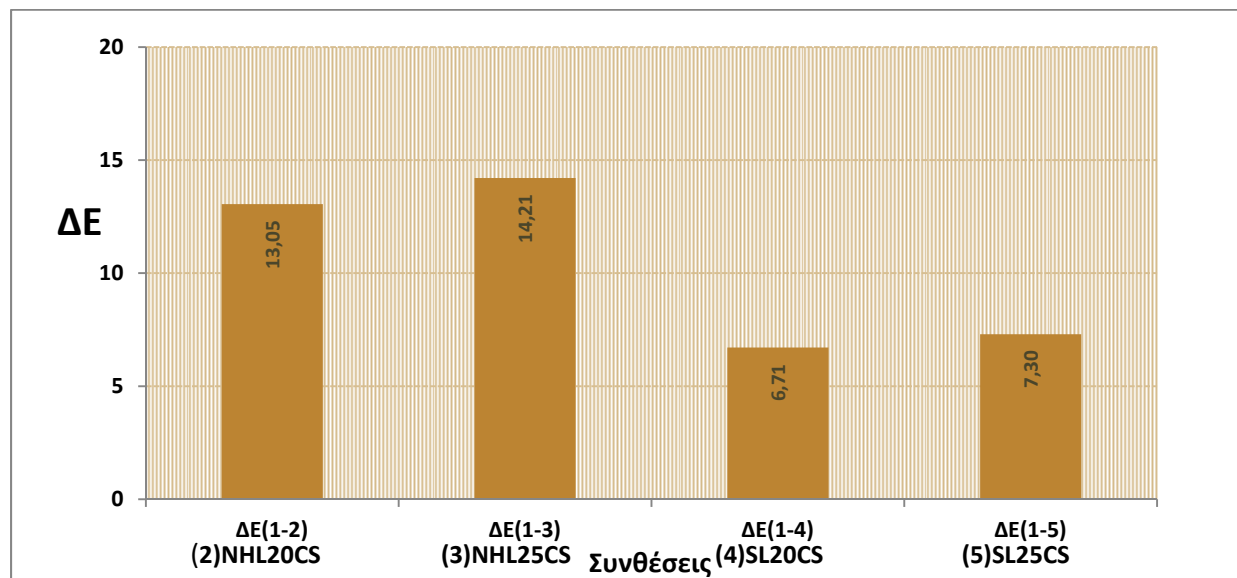


Σχήμα 5.17 Συνολική μεταβολή του  $b^*$  (μπλε-κίτρινο) δειγμάτων για σταθεροποιημένα και μη πηλοκονιάματα.

Για να αποτιμήσουμε τη συνολική χρωματική μεταβολή των σταθεροποιημένων πηλοκονιαμάτων υπολογίστηκε η συνολική χρωματική μεταβολή  $\Delta E$  ως προς το μη σταθεροποιημένο πηλοκονίαμα. Η συνολική χρωματική μεταβολή κυμαίνεται μεταξύ του 13 και 14,2 για τις σταθεροποιημένες με φυσική υδραυλική άσβεστο συνθέσεις και μάλιστα με αύξηση του ποσοστού του σταθεροποιητή αυξάνεται και η συνολική χρωματική μεταβολή  $\Delta E$ . Αντίστοιχα και σχεδόν στην μισή τιμή 6,7 και 7,3 είναι η συνολική χρωματική μεταβολή  $\Delta E$  για τις σταθεροποιημένες με σκωρία κάδων χαλυβουργίας συνθέσεις ((4)SL20CS και (5)SL20CS) (Πίνακας 5.10). Η διαφοροποίηση μεταξύ της σταθεροποίησης με υδραυλική άσβεστο έναντι της σκωρίας έγκειται κυρίως στο γεγονός ότι η σταθεροποίηση με φυσική υδραυλική άσβεστο αυξάνει πιο έντονα την λαμπρότητα  $L^*$ . Αξίζει να σημειωθεί ότι η ελάχιστη μεταβολή που μπορεί να αντιληφθεί το μάτι ενός μέσου παρατηρητή προσεγγίζεται όταν η  $\Delta E$  παίρνει την τιμή 2 [65].

Συνεπώς από τα παραπάνω διαφαίνεται ότι έχουμε μία ελαφριά χρωματική μεταβολή στην σταθεροποίηση με την σκωρία κάδων Χαλυβουργίας και μία μικρή χρωματική μεταβολή στην σταθεροποίηση με την φυσική Υδραυλική Άσβεστο, ωστόσο όμως θα έπρεπε να ληφθούν ιδιαίτερα υπόψη σε περιπτώσεις συντηρήσεων και αποκαταστάσεων

Σύμφωνα με προτεινόμενους δείκτες κινδύνου συμβατότητας για αποκαταστάσεις, θα πρέπει η  $\Delta E$  να παίρνει τιμή  $< 10$ , όταν παίρνει τιμή  $< 5$  θεωρείται μέσου κινδύνου χρωματική μεταβολή και για τιμή  $< 3$  ελαχίστου κινδύνου χρωματική μεταβολή [82].



Σχήμα 5.18 Συνολική Χρωματική Μεταβολή  $\Delta E$  σε σύγκριση με το μη σταθεροποιημένο πηλοκονίαμα.

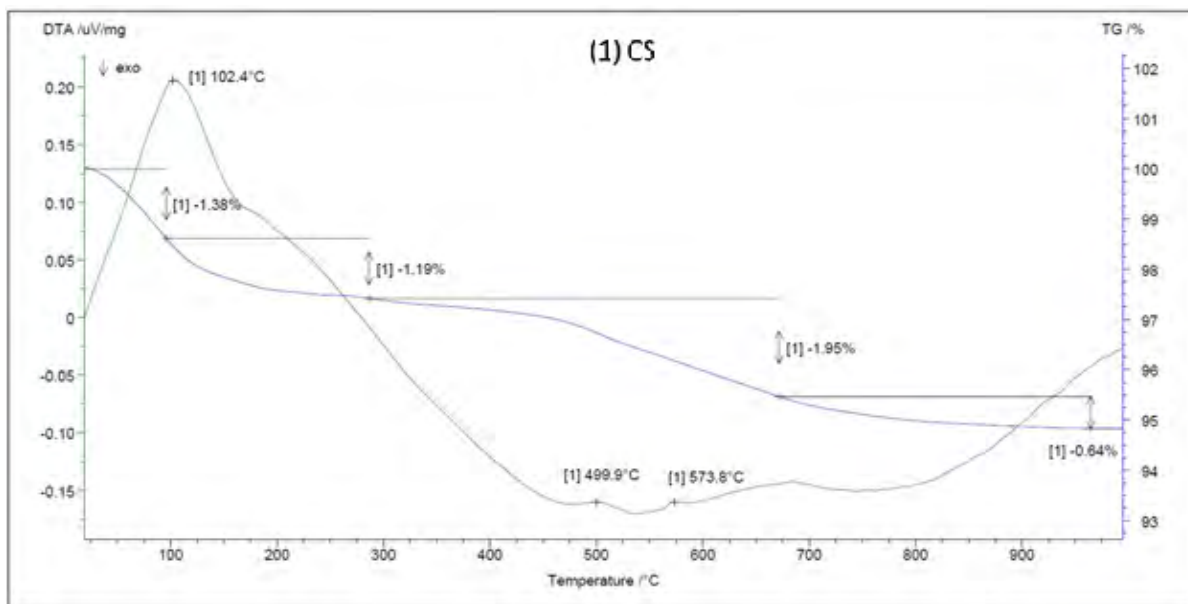
Συνολική Χρωματική Μεταβολή $\Delta E = (\Delta L^*^2 + \Delta a^*^2 + \Delta b^*^2)^{1/2}$			
ΔE(1-2)- (2)NHL20CS	ΔE(1-3)- (3)NHL25CS	ΔE(1-4)- (4)SL20CS	ΔE(1-4)- (5)SL25CS
13.05	14.21	6.71	7.30

Πίνακας 5.10 Συνολική Χρωματική Μεταβολή  $\Delta E$  σε σύγκριση με το μη σταθεροποιημένο πηλοκονίαμα.

### 5.3.3 Αποτελέσματα θερμικών αναλύσεων DTA/TG στις 28 και 90 ημέρες

Οι θερμικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα των ηλοκονιαμάτων τα οποία είχαν πρωτίτερα διέλθει από το κόσκινο των 63μm ώστε να απομακρυνθούν όσο το δυνατόν τα αδρανή τους. Τα δείγματα των σταθεροποιημένων και μη σταθεροποιημένων κονιαμάτων αναλύθηκαν στα χρονικά διαστήματα ωρίμανσης των 28 και 90 ημερών.

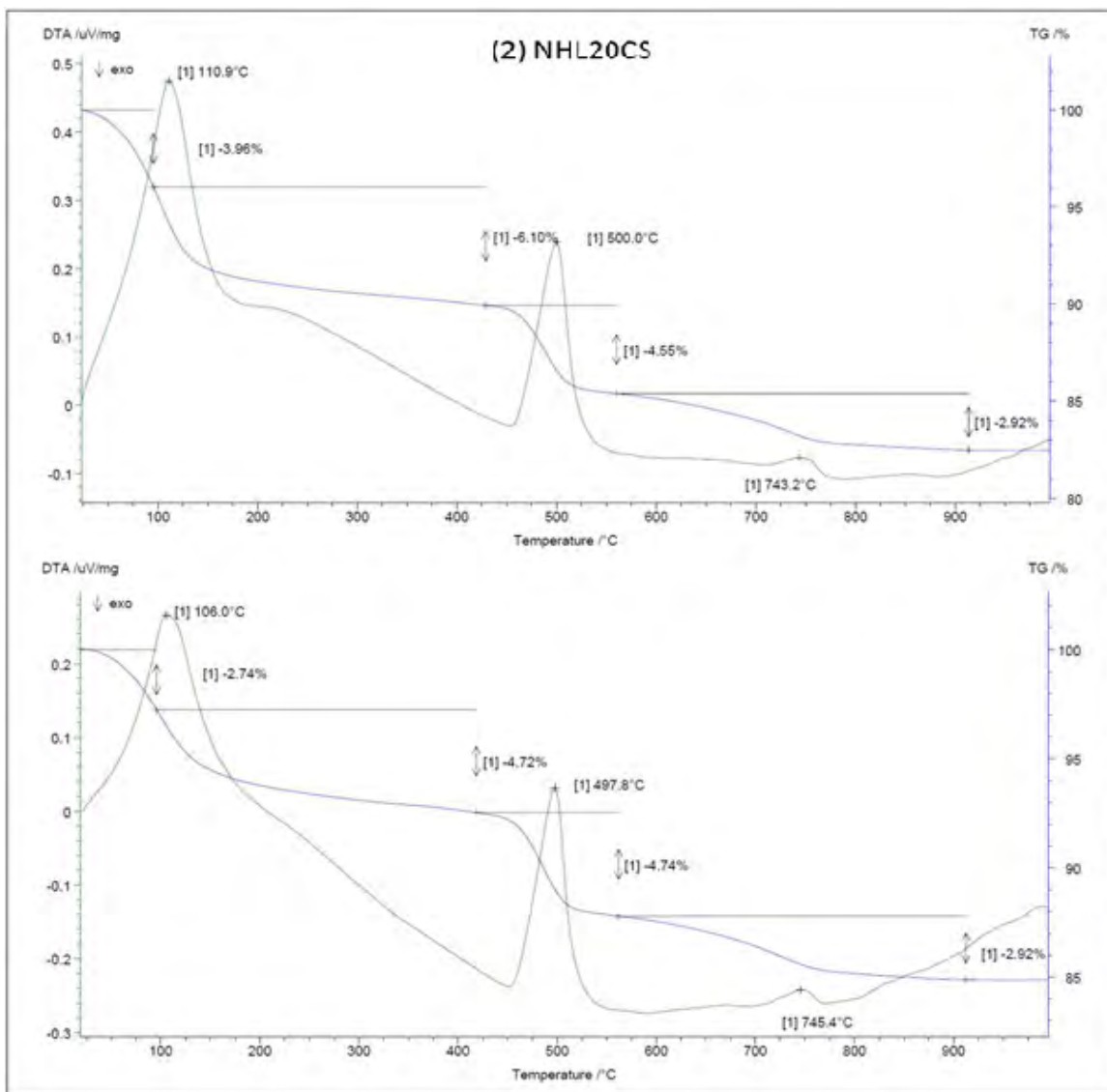
Στο Σχήμα 5.19 παρουσιάζεται το διάγραμμα από τις θερμικές αναλύσεις DTA/TG του μη σταθεροποιημένου κονιάματος (σύνθεση (1) CS). Παρατηρείται ότι το μη σταθεροποιημένο ηλοκονίαμα όπως ήταν αναμενόμενο, δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις σε σύγκριση με την πρώτη ύλη του ηλού. Καθώς στο μίγμα με τον ηλό προστέθηκε μόνο αδρανές (20%) δεν παρατηρούνται ποιοτικές αλλαγές σε σχέση με το αντίστοιχο διάγραμμα DTA/Tg της πρώτης ύλης του ηλού, (κεφ.5.1.5). Από το διάγραμμα θερμικής ανάλυσης για το μη σταθεροποιημένο ηλοκονίαμα παρατηρείται αντίστοιχα ότι, η απώλεια του φυσικά δεσμευμένου H<sub>2</sub>O γίνεται στο θερμικό διάστημα κάτω από τους 120°C και στους 120-250°C η μεταβολή της μάζας οφείλεται στο ενδοστρωματικό H<sub>2</sub>O. Στο μεσοδιάστημα η πτώση της καμπύλης TG οφείλεται στην απώλεια μάζας του H<sub>2</sub>O που βρίσκεται στο κρυσταλλικό πλέγμα των αργίλων, ενώ η μείωση μάζας που οφείλεται στις μαρμαρυγίες γίνεται πάνω από τους 900°C. Μεταξύ 120 - 450°C η απώλεια μάζας οφείλεται στην παρουσία του σμεκτίτη και μεταξύ των 450°C και 600°C η απώλεια μάζας αποδίδεται στον χλωρίτη με ενδόθερμη κορυφή στους 499.9 °C, η ενδόθερμη κορυφή στους 573.8 °C αποδίδεται στην μετατροπή της φάσης του χαλαζία-α σε χαλαζία-β.



Σχήμα 5.19 Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης DTA/TG για το μη σταθεροποιημένο κονίαμα στις 90 ημέρες.

Στο θερμοκρασιακό εύρος των 25-1000 °C, όπου πραγματοποιήθηκε η θερμική μελέτη των δειγμάτων λαμβάνουν χώρα διαφορετικές αντιδράσεις διάσπασης και αφυδάτωσης. Η θερμική μελέτη για τα σταθεροποιημένα κονιάματα επικεντρώνεται στην αφυδάτωση του χημικά δεσμευμένου H<sub>2</sub>O από το υδροξείδιο του ασβεστίου και στην διάσπαση του ανθρακικού ασβεστίου που συνοδεύεται από απώλεια CO<sub>2</sub>.

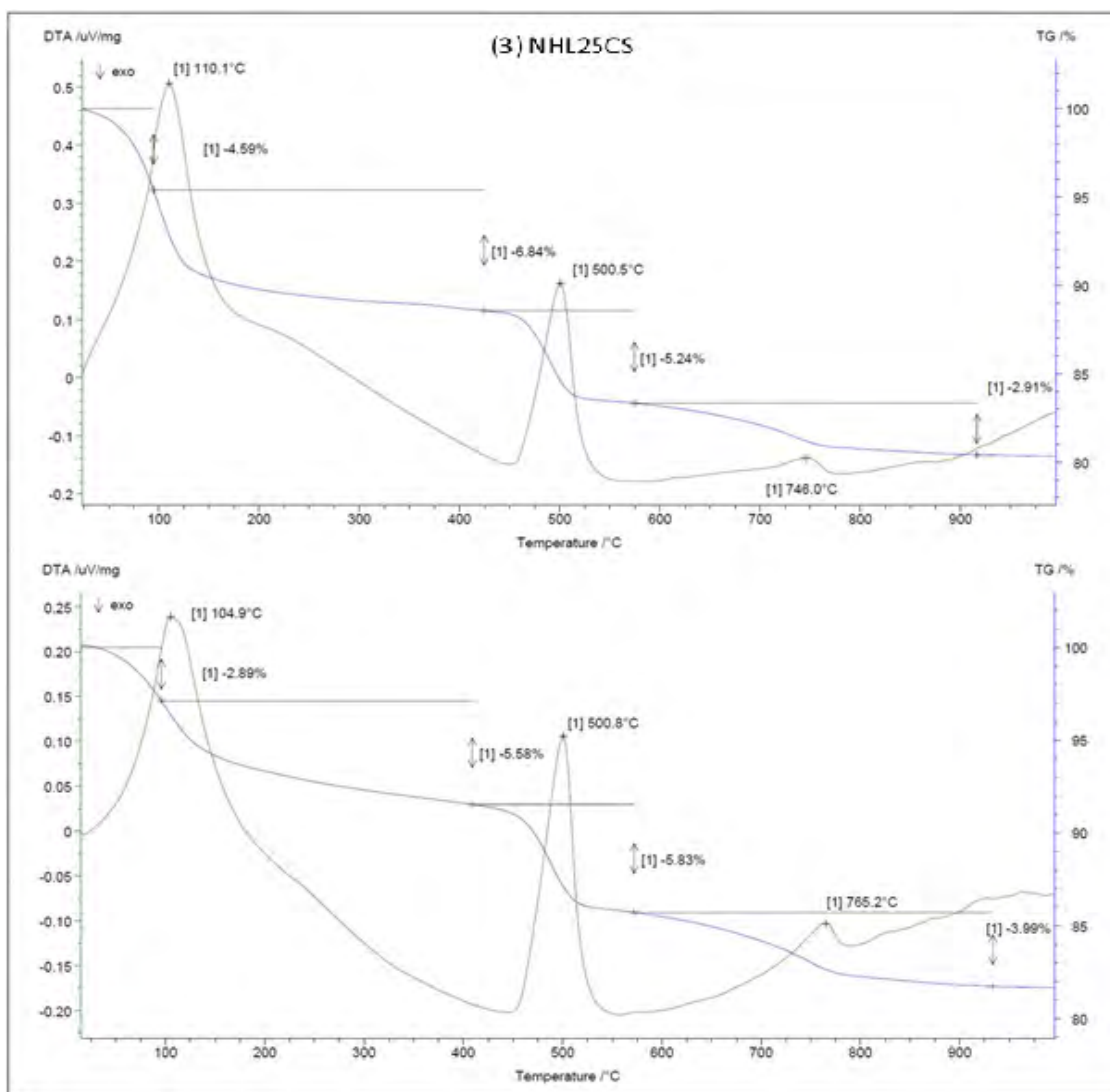
Στο **Σχήμα 5.20** παρατίθενται το διάγραμμα θερμικής ανάλυσης για το σταθεροποιημένο κονίαμα με 20% φυσική υδραυλική άσβεστο σε χρόνους ωρίμανσης 28 και 90 ημερών. Στο θερμικό διάστημα ~ 410 – 450 °C παρατηρείται μια απότομη πτώση της καμπύλης TG, που χαρακτηρίζεται από ένα έντονα ενδόθερμο φαινόμενο με κορυφή στους ~ 500 °C (καμπύλη DTA) και αποδίδεται στην αφυδάτωση του  $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ . Ακολουθεί μία ακόμη πτώση της καμπύλης TG μεταξύ 600 και 800 °C, η οποία σχετίζεται με ένα επίσης ενδόθερμο φαινόμενο στους 650 °C, που αποδίδεται στην αποκαρβοξυλίωση του  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ . Παρατηρείται ότι από τις 28 στις 90 ημέρες ωρίμανσης η δέσμευση του  $\text{Ca(OH)}_2$  είναι αρκετά αργή καθώς παραμένει σε αντίστοιχα ποσοστά (περίπου 19%) ενώ αντίστοιχα σταθερό εμφανίζεται και το ποσοστό του  $\text{CaCO}_3$  (6-7%). Η απώλεια μάζας στο θερμοκρασιακό εύρος ~ 85-160°C οφείλεται στις ένυδρες ασβεστοπυριτικές φάσεις CSH [83], [84].



**Σχήμα 5.20** Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης DTA/TG για κονίαμα σταθεροποιημένο με 20% φυσική υδραυλική άσβεστο, σε χρόνους ωρίμανσης 28 και 90 ημερών.

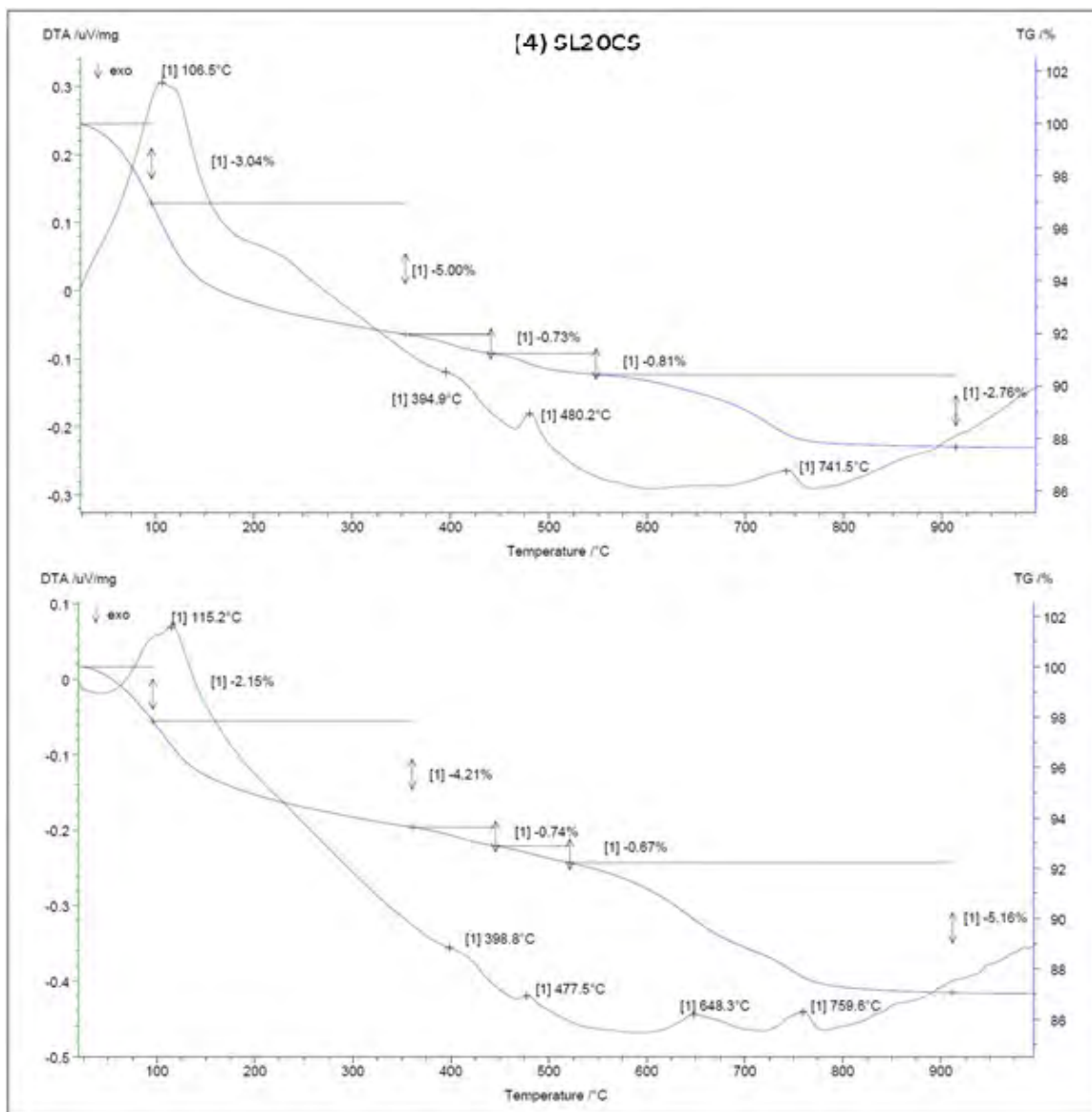


Στο Σχήμα 5.21 παρατίθενται το διάγραμμα θερμικής ανάλυσης για το σταθεροποιημένο κονίαμα με 25% φυσική υδραυλική άσβεστο σε χρόνους ωρίμανσης 28 και 90 ημερών. Παρατηρούνται αντίστοιχες μεταβολές με το σταθεροποιημένο με 20% φυσική υδραυλική άσβεστο κονίαμα, μόνο που σε αυτή την περίπτωση είναι λίγο πιο έντονη η απώλεια μάζας. Όσον αφορά την ωρίμανση, δεν εμφανίζονται μεγάλες διαφορές από τις 28 στις 90 ημέρες, η δέσμευση του υδροξειδίου του ασβεστίου είναι αρκετά αργή καθώς παραμένει σε ποσοστό ~22% ενώ το ποσοστό του ανθρακικού ασβεστίου εμφανίζει ελαφριά τάση αύξησης από 6.5 στα 9%. Το περιεχόμενο σε υδροξείδιο του ασβεστίου και για τα τις δύο περιπτώσεις σταθεροποίησης προέρχεται από την πρώτη ύλη της φυσικής υδραυλικής άσβεστου και κατά ένα μέρος από την ενυδάτωση των υδραυλικών ενώσεων της κονιάς. Το ανθρακικό ασβέστιο αντίστοιχα προέρχεται κατά ένα μέρος από την πρώτη ύλη της υδραυλικής ασβέστου και κατά ένα μέρος από την ενανθράκωση του υδροξειδίου του ασβεστίου.



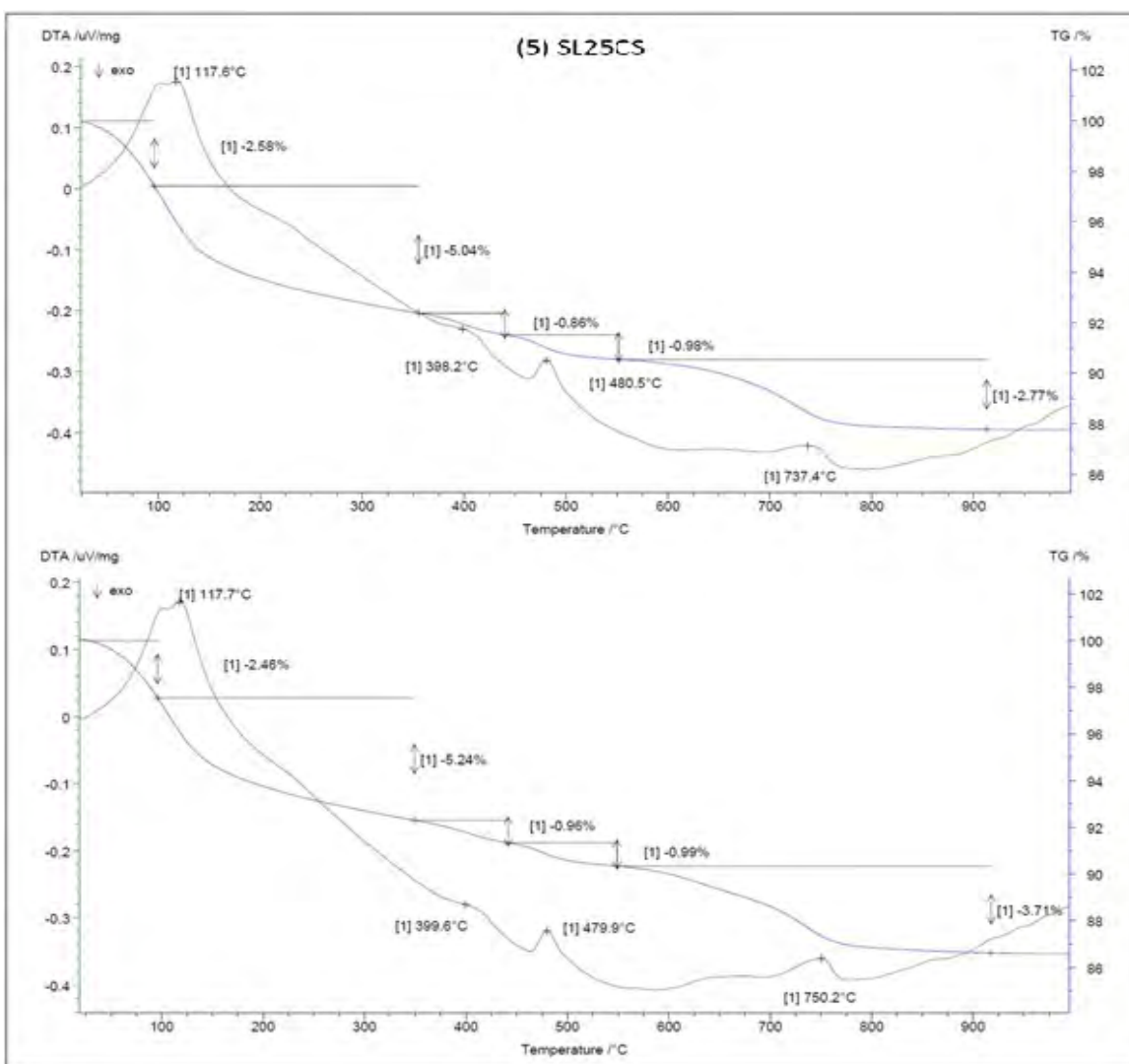
Σχήμα 5.21 Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης DTA/TG για κονίαμα σταθεροποιημένο με 25% φυσική υδραυλική άσβεστο, σε χρόνους ωρίμανσης 28 και 90 ημερών.

Στο Σχήμα 5.22 για το σταθεροποιημένο κονίαμα με 20% σκωρία κάδων χαλυβουργίας παρατηρείται, παρόμοια χαμηλή απώλεια μάζας στην περιοχή αφυδάτωσης του υδροξειδίου του ασβεστίου, όπου και υπολογίστηκε σε ποσοστό μόλις ~2.9% και για τους δύο χρόνους ωρίμανσης. Ταυτόχρονα παρουσιάζεται μία τάση ενανθράκωσης (στους 600-800°C) και το ποσοστό του ανθρακικού ασβεστίου προσδιορίστηκε από 6.2% στις 28 ημέρες σε 11.7% στις 90 ημέρες ωρίμανσης. Παρατηρείται ακόμα η ενδόθερμη κορυφή του υδροξειδίου του μαγνησίου (βρουσίτης) στους ~ 399 °C σε ποσοστό ~2.75%. Επίσης εμφανίζεται στις 90 ημέρες μία επιπλέον ενδόθερμη κορυφή στους ~ 648 °C και η οποία θα μπορούσε να αποδοθεί σε πρώιμη διάσπαση του ανθρακικού ασβεστίου ( $\text{CaCO}_3$ ), λόγω αλληλεπίδρασης με αργλικές ορυκτές φάσεις ή λόγω παρουσίας διαλυτών αλάτων [85], [86].



Σχήμα 5.22 Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης DTA/TG για κονίαμα σταθεροποιημένο με 20% σκωρία κάδων χαλυβουργίας, σε χρόνους ωρίμανσης 28 και 90 ημερών.

Στο Σχήμα 5.23 παρουσιάζεται το διάγραμμα θερμικής ανάλυσης DTA/TG για το σταθεροποιημένο κονίαμα με 25% σκωρία. Παρατηρείται σε αντίστοιχες θερμοκρασίες με το κονίαμα που έχει προστεθεί 20% σκωρία, η αφυδάτωση του  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  και η αποκαρβοξυλίωση του  $\text{CaCO}_3$ . Η αντίδραση ενανθράκωσης έχει μία τάση αύξησης από τις 28 στις 90 ημέρες (6.3%-8.4%), ενώ η δέσμευση του  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  παραμένει σε χαμηλά ποσοστά ~ 4%. Το ποσοστό των ένυδρων ασβεστοπυριτικών ενώσεων CSH (~ 85-160°C) όπως και σε όλα τα σταθεροποιημένα δείγματα παραμένει σχετικώς σταθερό από τις 28 στις 90 ημέρες. Η ενδόθερμη κορυφή του υδροξειδίου του μαγνησίου (βρουσίτης) εμφανίζεται στους ~ 399 °C όπου και υπολογίστηκε σε ποσοστό ~ 3%. Το περιεχόμενο σε υδροξείδιο του ασβεστίου και για τα τις δύο περιπτώσεις σταθεροποίησης προέρχεται από την πρώτη ύλη της σκωρίας κάδων χαλυβουργίας και κατά ένα μέρος από την ενυδάτωση των υδραυλικών ενώσεων της κονιάς, αντίστοιχα, το ανθρακικό ασβέστιο προέρχεται κατά ένα μέρος από την πρώτη ύλη της σκωρίας και κατά ένα μέρος από την ενανθράκωση του υδροξειδίου του ασβεστίου.



Σχήμα 5.23 Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης DTA/TG για κονίαμα σταθεροποιημένο με 25% σκωρία κάδων χαλυβουργίας, σε χρόνους ωρίμανσης 28 και 90 ημερών.

### 5.3.4 Χαρακτηριστικά μικροδομής - αποτελέσματα Πορομετρίας Hg

Στον πίνακα 5.11 παρατίθενται τα αποτελέσματα της εξέτασης της μικροδομής με τη μέθοδο της πορομετρίας υδραργύρου σε χρονικό διάστημα 4 μηνών. Τα μεγέθη που προσδιορίστηκαν είναι ο ολικός ειδικός όγκος του Hg που εισδύει στους πόρους των δειγμάτων, η φαινόμενη πυκνότητα, το ολικό πορώδες, η μέση ακτίνα των πόρων και η ειδική επιφάνεια.

Για το μη σταθεροποιημένο κονίαμα (σύνθεση αναφοράς (1)CS) από τα αποτελέσματα της πορομετρίας προκύπτει ότι, παρουσιάζει τις μικρότερες τιμές στον ολικό ειδικό όγκο, στο ολικό πορώδες και στην ειδική επιφάνεια ενώ αντίθετα παρουσιάζει τις μεγαλύτερες τιμές στη φαινόμενη πυκνότητα και στη μέση ακτίνα πόρων, σε σύγκριση με τα σταθεροποιημένα ηηλοκονιάματα.

Για τα σταθεροποιημένα με φυσική υδραυλική άσβεστο κονιάματα ((2)NHL20CS και (3)NHL25CS), παρατηρείται αύξηση όλων των μεγεθών σε σύγκριση με το μη σταθεροποιημένο κονίαμα αναφοράς, εκτός της φαινόμενης πυκνότητας και της μέσης ακτίνας πόρων όπου παρατηρείται μείωση. Επίσης προκύπτει ότι με αύξηση του συγκεκριμένου σταθεροποιητή από 20 σε 25% υπάρχει ελαφριά τάση αύξησης της φαινόμενης πυκνότητας και μείωσης στον ολικό ειδικό όγκο, στο ολικό πορώδες και στην ειδική επιφάνεια.

Για τα σταθεροποιημένα με σκωρία κάδων χαλυβουργίας κονιάματα ((4)SL20CS και (5)SL25CS), παρατηρείται αντίστοιχα αύξηση όλων των μεγεθών σε σχέση με το μη σταθεροποιημένο κονίαμα, εκτός της φαινόμενης πυκνότητας και της μέσης ακτίνας πόρων όπου παρατηρείται μείωση, οι μεταβολές στα παραπάνω μεγέθη ωστόσο, είναι λιγότερο έντονες σε σύγκριση με τα κονιάματα όπου ως σταθεροποιητής προστέθηκε φυσική υδραυλική άσβεστος. Επίσης παρατηρείται ότι με αύξηση του ποσοστού σκωρίας κάδων χαλυβουργίας στα κονιάματα, από 20 σε 25%, υπάρχει ελαφριά τάση αύξησης της φαινόμενης πυκνότητας και μείωσης στον ολικό ειδικό όγκο, στο ολικό πορώδες, στην μέση ακτίνα πόρων και στην ειδική επιφάνεια. Ενδεχομένως η διαφορετική τιμή στην φαινόμενη πυκνότητα ως προς τα κονιάματα σταθεροποιημένα με σκωρία κάδων χαλυβουργίας σε σύγκριση με αυτά της φυσική υδραυλικής άσβεστου, να οφείλεται και στην διαφορετική τιμή φαινόμενης πυκνότητας των σταθεροποιητών (Φυσ. Υδραυλ. άσβεστος:  $0.7 \text{ g/cm}^3$ , Σκωρία Κάδων:  $0.96 \text{ g/cm}^3$ ).

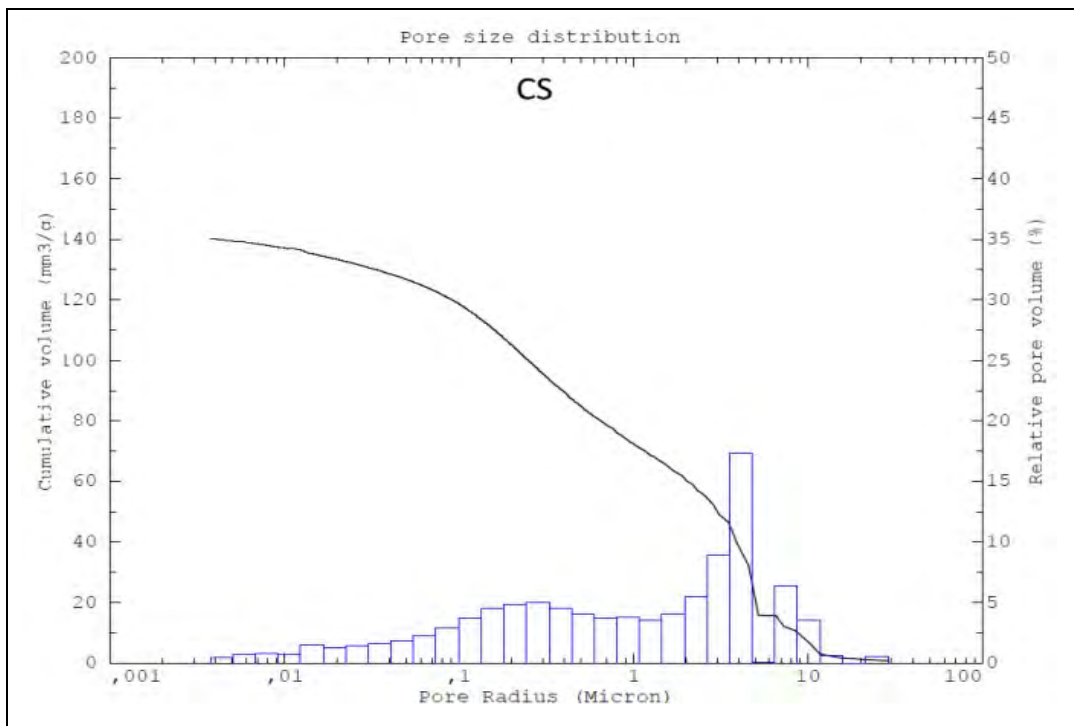
Σύνθεση	Ολικός ειδικός όγκος ( $\text{mm}^3/\text{g}$ )	Φαινόμενη Πυκνότητα ( $\text{g/cm}^3$ )	Ολικό Πορώδες (%)	Μέση Ακτίνα Πόρων ( $\mu\text{m}$ )	Ειδική Επιφάνεια ( $\text{m}^2/\text{g}$ )
(1)CS	140,20	1.87	26.29	4.13	2.58
(2)NHL20CS	227.89	1.58	36.05	0.48	7.37
(3)NHL25CS	211.47	1.64	34.62	0.48	6.92
(4)SL20CS	200	1.69	33.92	0.52	3.87
(5)SL25CS	185.50	1.73	32.04	0.48	3.79

Πίνακας 5.11 Αποτελέσματα πορομετρίας Hg σταθεροποιημένων και μη ηηλοκονιαμάτων.

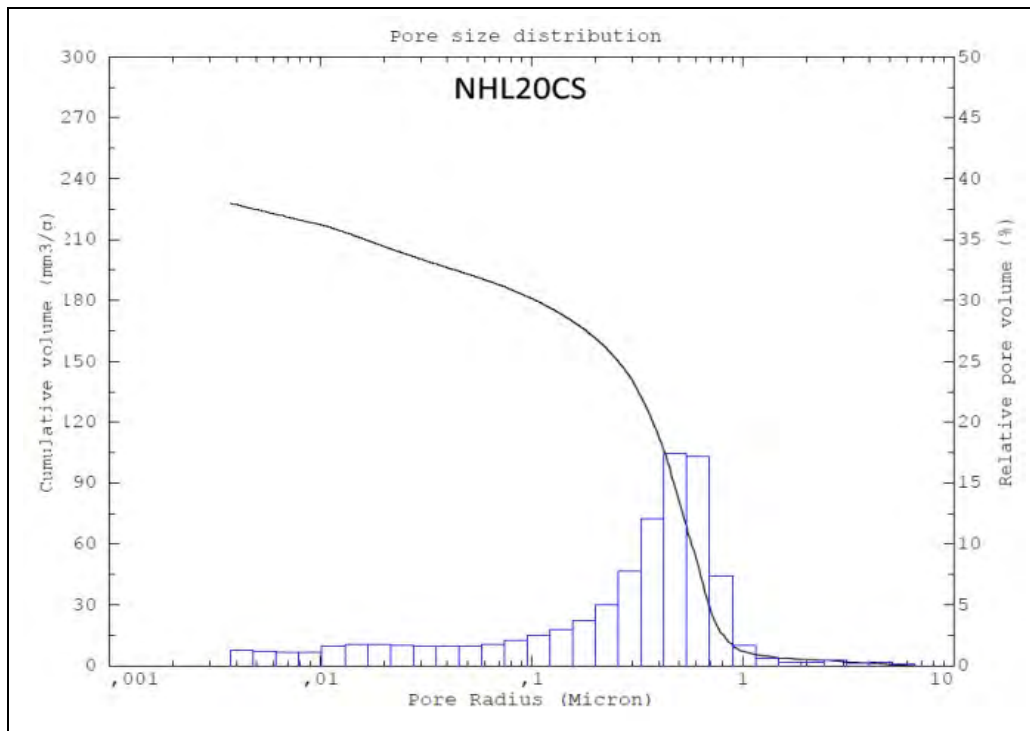
Στο διάγραμμα κατανομής του ειδικού όγκου των κενών με την ακτίνα των πόρων για το μη σταθεροποιημένο κονίαμα (Σχήμα 5.24), παρατηρείται δικόρυφη κατανομή με συχνότερη τιμή κατανομής προς ακτίνα μεγαλύτερων πόρων στα 4μm η οποία αντιστοιχεί και στην μέση τιμή κατανομής. Η δεύτερη συχνότερη τιμή κατανομής που αντιστοιχεί σε πολύ μικρότερο ποσοστό όγκου πόρων παρουσιάζεται στα 0.3 μm.

Στα διάγραμμα κατανομής του ειδικού όγκου με την ακτίνα των πόρων για τα σταθεροποιημένα κονιάματα με φυσική υδραυλική άσβεστο (Σχήμα 5.25, 5.26), έχουμε μονοκόρυφες κατανομές με συχνότερη τιμή κατανομής του όγκου των κενών στα 0.4μm και με μικρές διαφοροποιήσεις κατανομής κοντά στη συχνότερη τιμή κατανομής. Στα διάγραμμα κατανομής του ειδικού όγκου των κενών με την ακτίνα των πόρων για τα σταθεροποιημένα κονιάματα με σκωρία κάδων χαλυβουργίας (Σχήμα 5.27, 5.28), παρατηρούνται μικρότερης έντασης κατανομές, σε σύγκριση με τα διαγράμματα των κονιαμάτων σταθεροποιημένων με φυσική υδραυλική άσβεστο. Στο σταθεροποιημένο κονίαμα με 20% σκωρία έχουμε δικόρυφη κατανομή με συχνότερη τιμή κατανομής του όγκου των κενών στα 0.5μm και τη δεύτερη συχνότερη τιμή κατανομής κοντά στο 1μm. Αντίστοιχα στην περίπτωση σταθεροποίησης με 25% σκωρία κάδων χαλυβουργίας έχουμε δικόρυφη κατανομή με συχνότερη τιμή κατανομής του όγκου των κενών στα 0.4μm και τη δεύτερη συχνότερη τιμή κατανομής κοντά στο 1,5μm.

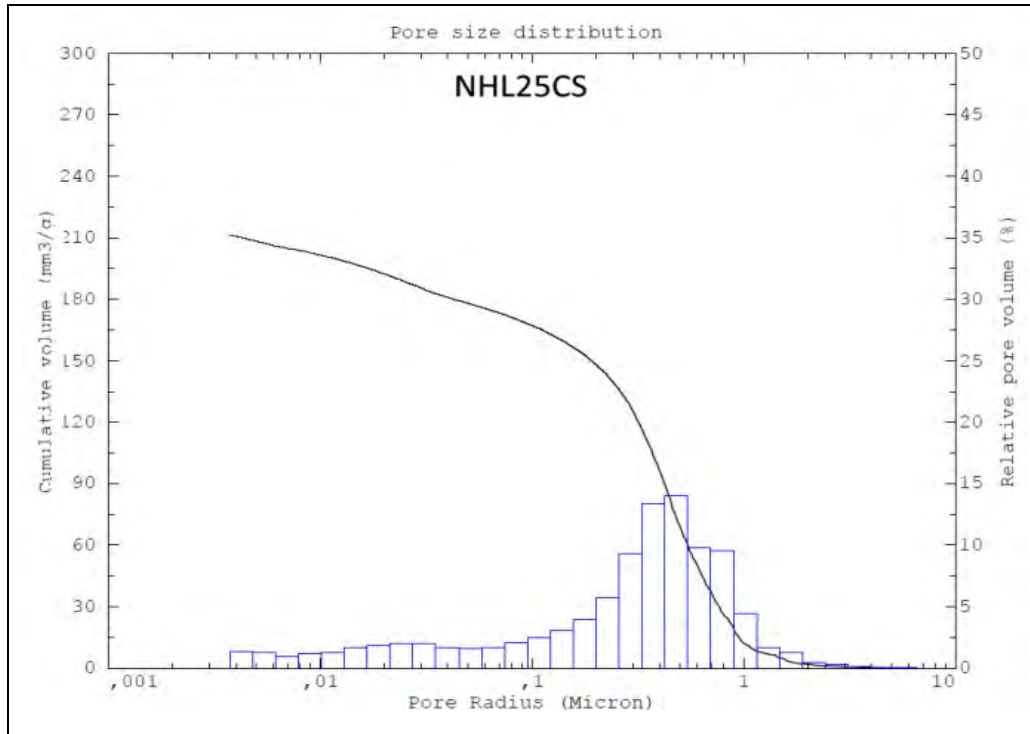
Σε σύγκριση με το μη σταθεροποιημένο πηλοκονίαμα παρατηρείται ότι, με την προσθήκη των σταθεροποιητών, υπάρχει μετατόπιση της συχνότερης κατανομής του όγκου των κενών κατά μία τάξη μεγέθους από τα 4μm στα 0,4-0.5μm, ενώ επίσης φαίνεται ότι με αύξηση του ποσοστού του σταθεροποιητή η μετατόπιση της συνολικής κατανομής προς μικρότερες ακτίνες πόρων είναι πιο έντονη, τόσο στην περίπτωση της υδραυλικής άσβεστου όσο και στην περίπτωση της σκωρίας.



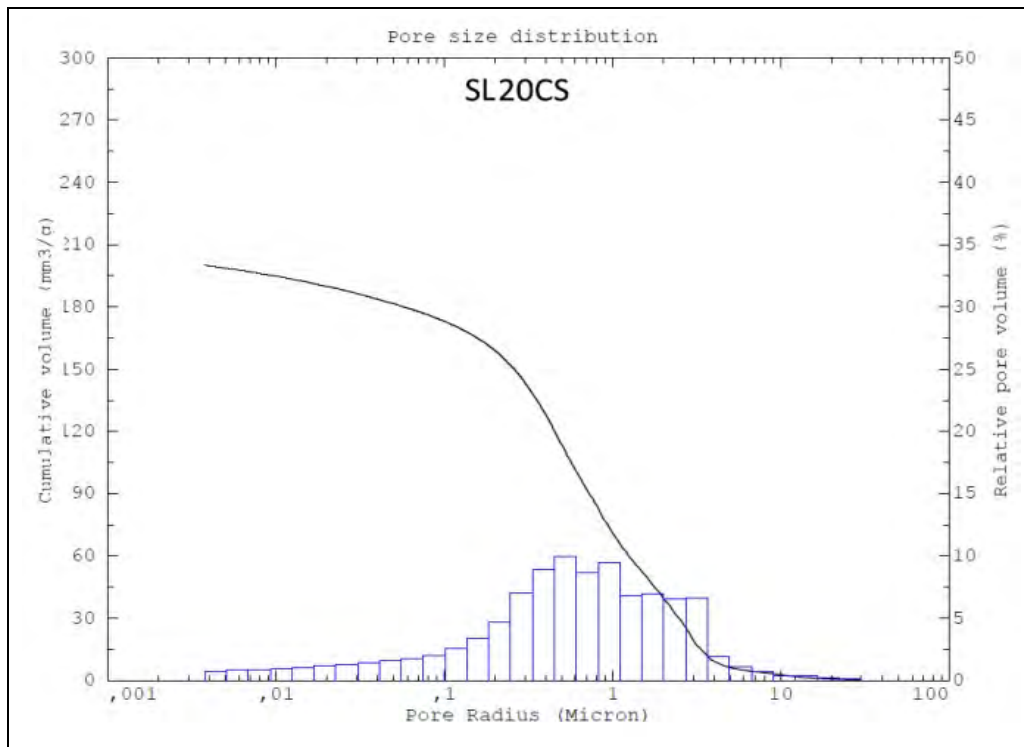
Σχήμα 5.24 Διάγραμμα κατανομής του ειδικού όγκου με την ακτίνα των πόρων για μη σταθεροποιημένο κονίαμα ((1)CS).



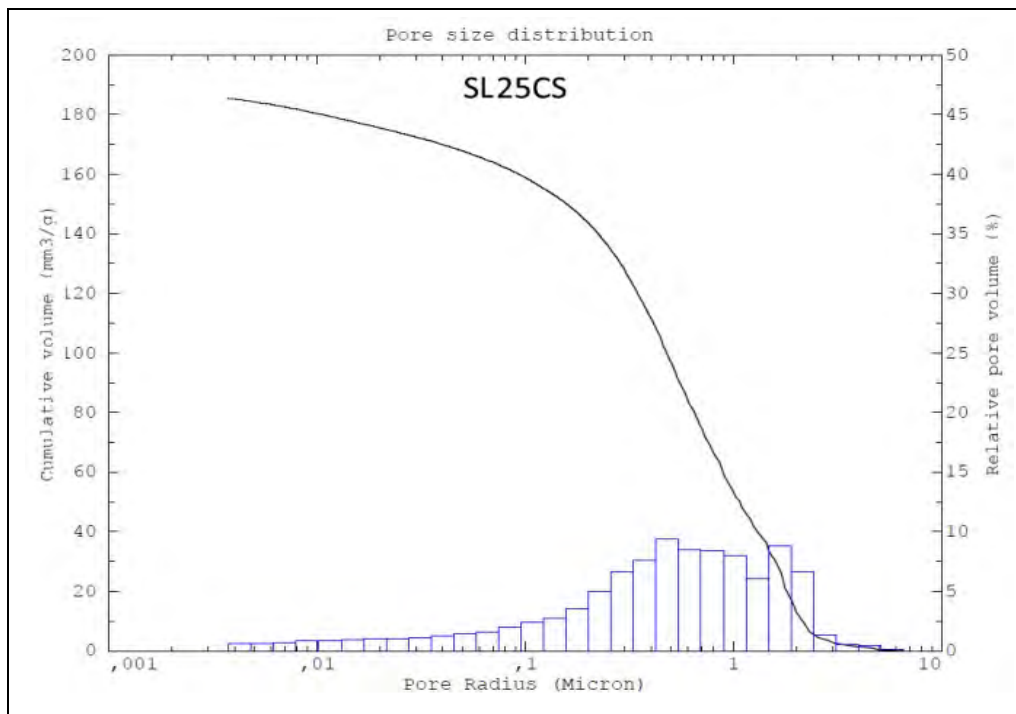
Σχήμα 5.25 Διάγραμμα κατανομής του ειδικού όγκου με την ακτίνα των πόρων για κονίαμα σταθεροποιημένο με 20% φυσική υδραυλική άσβεστο.



Σχήμα 5.26 Διάγραμμα κατανομής του ειδικού όγκου με την ακτίνα των πόρων για κονίαμα σταθεροποιημένο με 25% φυσική υδραυλική άσβεστο.



Σχήμα 5.27 Διάγραμμα κατανομής του ειδικού όγκου με την ακτίνα των πόρων για κονίαμα σταθεροποιημένο με 20% σκωρία κάδων χαλυβουργίας.



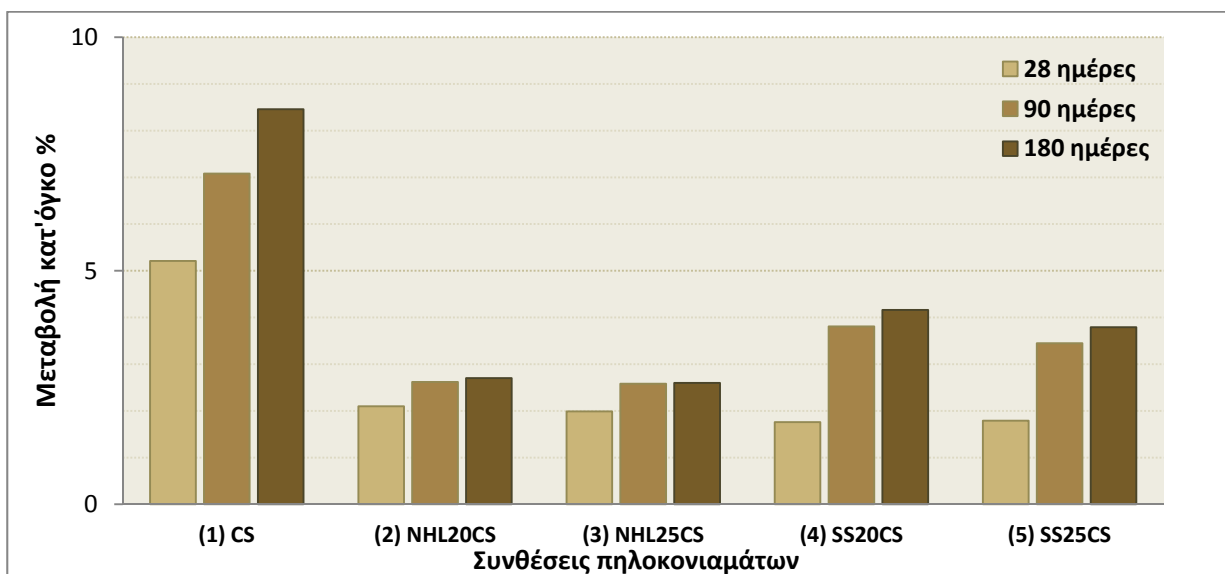
Σχήμα 5.28 Διάγραμμα κατανομής του ειδικού όγκου με την ακτίνα των πόρων για κονίαμα σταθεροποιημένο με 25% σκωρία κάδων χαλυβουργίας.

### 5.3.5 Αποτελέσματα μεταβολής του όγκου των δοκιμίων πηλοκονιαμάτων

Στον Πίνακα 5.12 και στο Σχήμα 5.29 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συστολής κατ' όγκο των κονιαμάτων για διαφορετικούς χρόνους ωρίμανσης. Για κάθε δοκίμιο πραγματοποιήθηκαν 4 μετρήσεις σε κάθε πλευρά των 4cm και 5 μετρήσεις στην πλευρά των 16 cm. Για τα δοκίμια του μη σταθεροποιημένου κονιάματος δεν έγιναν μετρήσεις στις 7 ημέρες καθώς δεν είχε πήξει ακόμα.

Όπως ήταν αναμενόμενο τα μη σταθεροποιημένα δοκίμια ((1)CS) παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη συστολή με την πάροδο του χρόνου, ήδη στις 28 ημέρες η συστολή αυτή είναι αρκετά μεγάλη ~5% και αυξάνεται σταθερά μέχρι τους έξι μήνες όπου και υπερβαίνει τα 8%. Το φαινόμενο της έντονης συστολής είναι ένα από τα σημαντικά μειονεκτήματα του πηλού καθώς δημιουργούνται ρηγματώσεις που μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχίες και μείωση των τελικών αντοχών [2].

Τα σταθεροποιημένα κονιάματα εμφανίζουν σαφώς μειωμένες συστολές. Τις μικρότερες τιμές τελικής συστολής παρουσιάζουν τα σταθεροποιημένα δοκίμια με φυσική υδραυλική άσβεστο (~2.6%) ενώ τα σταθεροποιημένα δοκίμια με σκωρία κάδων χαλυβουργίας έχουν ελαφρώς μικρότερη απόδοση με τιμές περίπου στο 4%. Φαίνεται, επίσης, ότι για όλες τις περιπτώσεις σταθεροποίησης δεν παρουσιάζονται αξιοσημείωτες μεταβολές μετά τους 3 μήνες, καθώς και ότι με αύξηση του ποσοστού του σταθεροποιητή από 20 σε 25% βελτιώνονται ελαφρώς οι αποδόσεις.



Σχήμα 5.29 Μεταβολή του όγκου των πηλοκονιαμάτων σε χρόνους ωρίμανσης 28 , 90 και 180 ημέρες.

Συνθέσεις	7 ημέρες		28 ημέρες		3 μήνες		6 μήνες	
	Μ.Ο.%	Τυπ.Απ.	Μ.Ο.%	Τυπ.Απ.	Μ.Ο.%	Τυπ.Απ.	Μ.Ο.%	Τυπ.Απ.
(1) CS	-	-	5.21	0.43	7.08	0.68	8.46	1.47
(2) NHL20CS	0.74	0.27	2.10	0.23	2.62	0.31	2.70	0.17
(3) NHL25CS	0.82	0.16	1.99	0.46	2.58	0.49	2.60	0.28
(4) SL20CS	0.71	0.31	1.76	0.18	3.81	0.49	4.16	0.57
(5) SL25CS	0.80	0.25	1.79	0.23	3.45	0.42	3.79	0.41

Πίνακας 5.12 Αποτελέσματα της μεταβολής σε όγκο των κονιαμάτων για διαφορετικούς χρόνους ωρίμανσης.



### 5.3.6 Αποτελέσματα ταχύτητας διάδοσης υπερήχων και δυναμικό μέτρο ελαστικότητας

Ο προσδιορισμός της ταχύτητας διάδοσης των διαμήκων υπερηχητικών κυμάτων και του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας έγινε σε δοκίμια των πηλοκονιαμάτων στους 6 μήνες. Σε κάθε δοκίμιο πραγματοποιήθηκαν πολλές μετρήσεις και για τον λόγο του Poisson χρησιμοποιήθηκε η τιμή 0.25 όπου αναφέρεται βιβλιογραφικά για τέτοιου τύπου κονιάματα [72]. Στον Πίνακα 5.13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τον προσδιορισμό της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων και του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την φαινόμενη πυκνότητα προέρχονται από τα αποτελέσματα της πορομετρίας υδραργύρου. Στα σχήματα 5.30, 5.31 αντίστοιχα παρουσιάζονται γραφικά τα συγκεκριμένα αποτελέσματα.

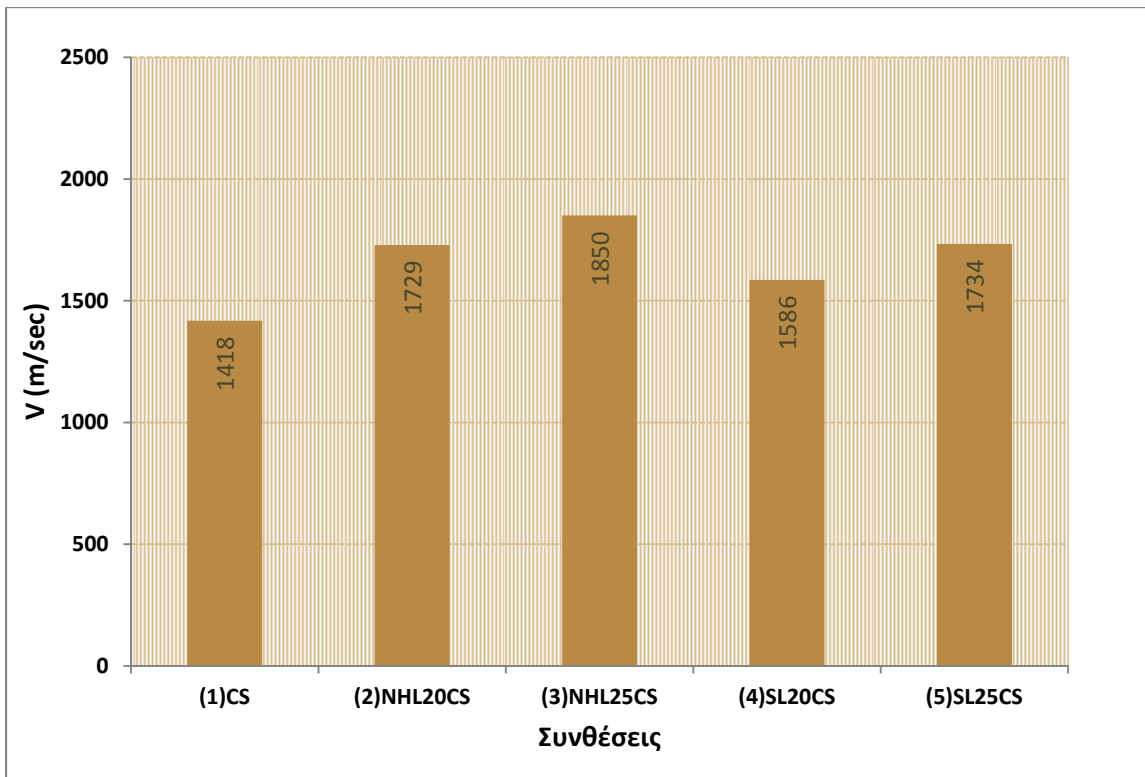
Όπως ήταν αναμενόμενο παρατηρείται ότι το μη σταθεροποιημένο πηλοκονίαμα παρουσιάζει τις μικρότερες τιμές τόσο ως προς την ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων όσο και ως προς το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας. Συγκεκριμένα ως προς την ταχύτητα διάδοσης υπερήχων το σταθεροποιημένο με 20% φυσική υδραυλική άσβεστο κονίαμα, εμφανίζει αύξηση 22% σε σύγκριση με το μη σταθεροποιημένο κονίαμα και το σταθεροποιημένο με 25% φυσική υδραυλική άσβεστο κονίαμα εμφανίζει αύξηση κατά 30%. Τα σταθεροποιημένα πηλοκονιάματα με 20 και 25% σκωρία κάδων χαλυβουργίας παρουσιάζουν αντίστοιχα 12% και 22% αύξηση.

Αντίστοιχες παρατηρήσεις μπορούν να διεξαχθούν και για το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας όπου το σταθεροποιημένο με 20% φυσική υδραυλική άσβεστο κονίαμα εμφανίζει αύξηση κατά 26% και το σταθεροποιημένο με 25% φυσική υδραυλική άσβεστο κονίαμα εμφανίζει αύξηση κατά 49%. Το σταθεροποιημένο κονίαμα με 20% σκωρία κάδων χαλυβουργίας εμφανίζει αύξηση 13% και το σταθεροποιημένο κονίαμα με 25% σκωρία κάδων χαλυβουργίας εμφανίζει αύξηση κατά 38%.

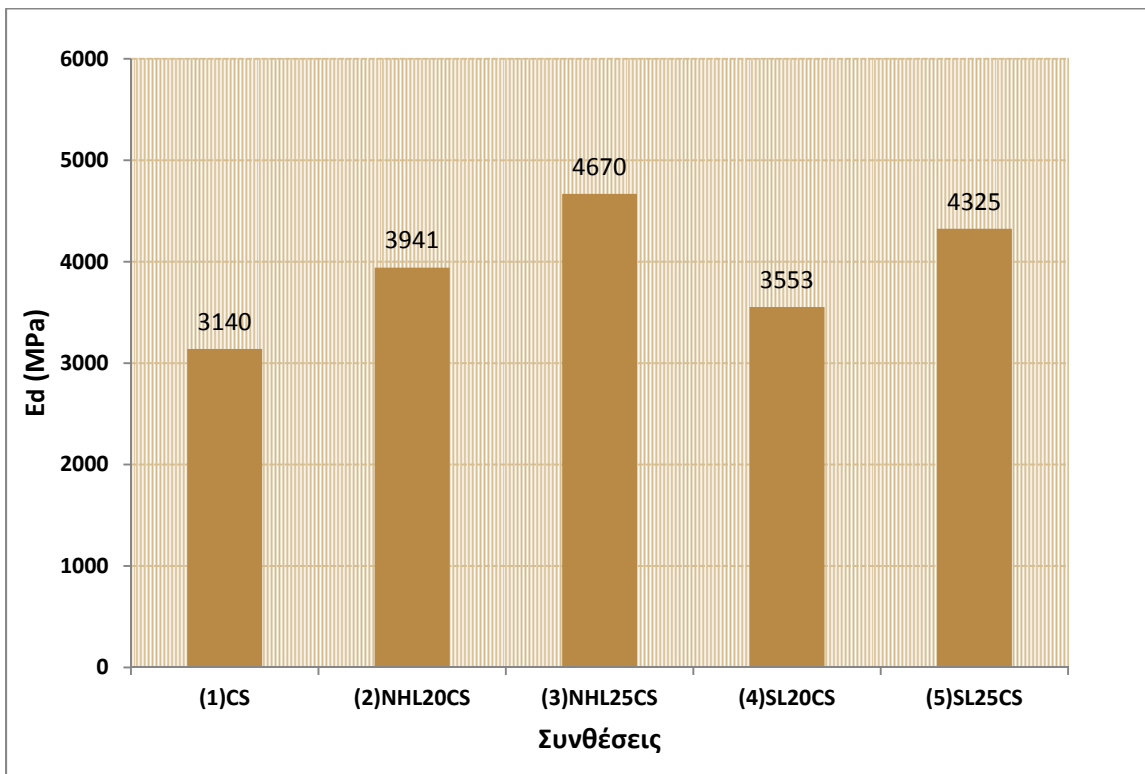
Προκύπτει από τα παραπάνω ότι η ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων και το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας αυξάνονται αισθητά σε όλες τις σταθεροποιημένες συνθέσεις, σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς (1)CS. Ωστόσο οι μεγαλύτερες τιμές προκύπτουν κατά τη σταθεροποίηση με φυσ. υδραυλική άσβεστο. Επίσης συμπεραίνεται ότι με αύξηση του σταθεροποιητή από 20% σε 25%, αυξάνονται αισθητά οι αντίστοιχες τιμές της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων και του δυν. μέτρου ελαστικότητας.

Σύνθεση	Φαινόμενη πυκνότητα $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Ταχύτητα διάδοσης υπερήχων V (m/sec)	Τυπ.απ.	Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας Ed (Mpa)	Τυπ.απ.
(1) CS	1.87	1418	5.2	3140	23
(2) NHL20CS	1.58	1729	3.8	3941	17
(3) NHL25CS	1.64	1851	8.6	4670	44
(4) SL20CS	1.70	1586	6.3	3553	28
(5) SL25CS	1.73	1734	3.8	4325	19

Πίνακας 5.13 Αποτελέσματα ταχύτητας διάδοσης υπερήχων και δυναμικού μέτρου ελαστικότητας.



Σχήμα 5.30 Ταχύτητα Διάδοσης υπερήχων για σταθεροποιημένα και μη πηλοκονιάματα.



Σχήμα 5.31 Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας για σταθεροποιημένα και μη πηλοκονιάματα.

### 5.3.7 Αποτελέσματα μηχανικών αντοχών

Στους πίνακες 5.14, 5.15 και στα σχήματα 5.32, 5.33 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων των καμπτικών και θλιπτικών αντοχών των πηλοκονιαμάτων, για διαφορετικούς χρόνους ωρίμανσης. Σημειώνεται ότι για τα δοκίμια του μη σταθεροποιημένου κονιάματος ((1)CS) δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στις 28 μέρες, καθώς τα δοκίμια δεν είχαν ξηρανθεί επαρκώς.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι το μη σταθεροποιημένο κονίαμα παρουσιάζει σχετικά χαμηλές αντοχές, ~0.5 MPa καμπτική και 1.1 MPa θλιπτική, με μικρές τυπικές αποκλίσεις και για τις δύο περιπτώσεις, ενώ δεν παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση όσο αυξάνεται ο χρόνος ωρίμανσης.

Για τα σταθεροποιημένα με φυσική υδραυλική άσβεστο κονιάματα ((2)NHL20CS και (3)NHL25CS) παρατηρούμε μια σχετική αύξηση στις καμπτικές αντοχές συγκριτικά με το μη σταθεροποιημένο κονίαμα, ~30% και ~46% αντίστοιχα στους 6 μήνες. Όσον αφορά την εξέλιξη των καμπτικών αντοχών στο χρόνο, δεν μπορούμε να προβούμε σε ασφαλή συμπεράσματα, παρ' ότι διακρίνεται μια αυξητική τάση. Παρομοίως για τα σταθεροποιημένα με σκωρία κάδων χαλυβουργίας κονιάματα ((4)SL20CS και (5)SL25CS) οι αυξήσεις στις καμπτικές αντοχές στους 6 μήνες φτάνουν τα ποσοστά ~42% και ~103% αντίστοιχα, τις οποίες όμως φαίνεται να αποκτούν σταδιακά με την αύξηση του χρόνου ωρίμανσης.

Όσον αφορά την αντοχή σε θλίψη, η αύξηση στις τιμές σε σύγκριση με το μη σταθεροποιημένο κονίαμα φαίνεται εντονότερη. Για το σταθεροποιημένο κονίαμα με 20% φυσική υδραυλική άσβεστο εμφανίζεται σημαντική αύξηση ήδη στις 28 ημέρες η οποία σταδιακά φτάνει ~199% στους 6 μήνες ωρίμανσης. Για το σταθεροποιημένο κονίαμα με 25% φυσική υδραυλική άσβεστο παρατηρείται ενίσχυση της αντοχής μετά τις 28 ημέρες με συνολική αύξηση ~199% στους 6 μήνες ωρίμανσης. Στην συγκριμένη περίπτωση βέβαια η μέγιστη τιμή παρατηρείται στους 3 μήνες κάτι που δεν ήταν αναμενόμενο, ωστόσο είναι εντός των ορίων των τυπικών αποκλίσεων, οι οποίες είναι αυξημένες ειδικότερα στους 3 μήνες. Ίσως ένας ακόμα λόγος για την συμπεριφορά αυτή είναι ότι, για τα συγκεκριμένα δοκίμια δεν υπήρξαν οι κατάλληλες συνθήκες ωρίμανσης κατά την αποθήκευση και ως εκ τούτου δεν ευνοήθηκε η περαιτέρω δέσμευση του  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Για τα κονιάματα σταθεροποιημένα με 20% και 25% σκωρία κάδων χαλυβουργίας, παρόμοια αυξάνεται η αντοχή στον χρόνο, η οποία φτάνει σε ποσοστό ~84% και ~154% αντίστοιχα, στους 6 μήνες ωρίμανσης. Παρατηρείται ωστόσο ότι η σταθεροποίηση με φυσική Υδραυλική άσβεστο δίνει αρκετά υψηλότερες τιμές θλιπτικών αντοχών.

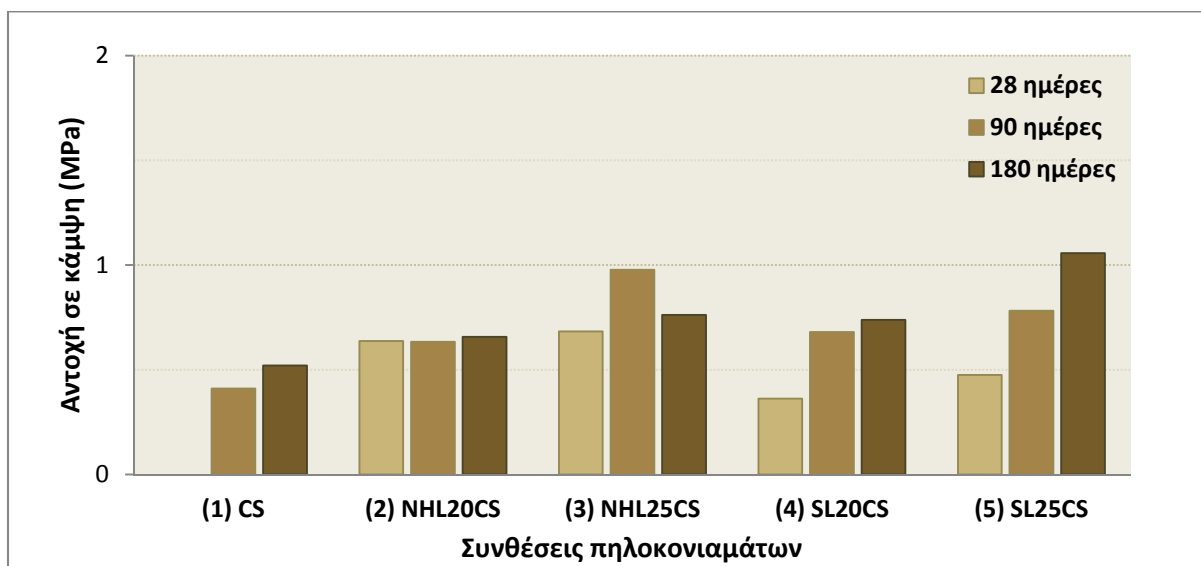
Επίσης από τα παραπάνω προκύπτει ότι η αύξηση της προσθήκης σε σταθεροποιητή από 20% σε 25%, τόσο στα κονιάματα της φυσικής υδραυλικής άσβεστου όσο και σε εκείνα της σκωρίας κάδων χαλυβουργίας, αντιστοιχεί σε περαιτέρω αύξηση των μηχανικών αντοχών και ιδιαίτερα των θλιπτικών.

Σύνθεση	28 ημέρες		3 μήνες		6 μήνες	
	Μ.Ο. (MPa)	Τυπ.Απ.	Μ.Ο. (MPa)	Τυπ.Απ.	Μ.Ο. (MPa)	Τυπ.Απ.
(1) CS	---	---	0.41	0.01	0.52	0.02
(2) NHL20CS	0.637	0.10	0.63	0.04	0.66	0.03
(3) NHL25CS	0.683	0.09	0.98	0.30	0.76	0.13
(4) SL20CS	0.362	0.10	0.6	0.07	0.74	0.06
(5) SL25CS	0.475	0.10	0.78	0.03	1.06	0.21

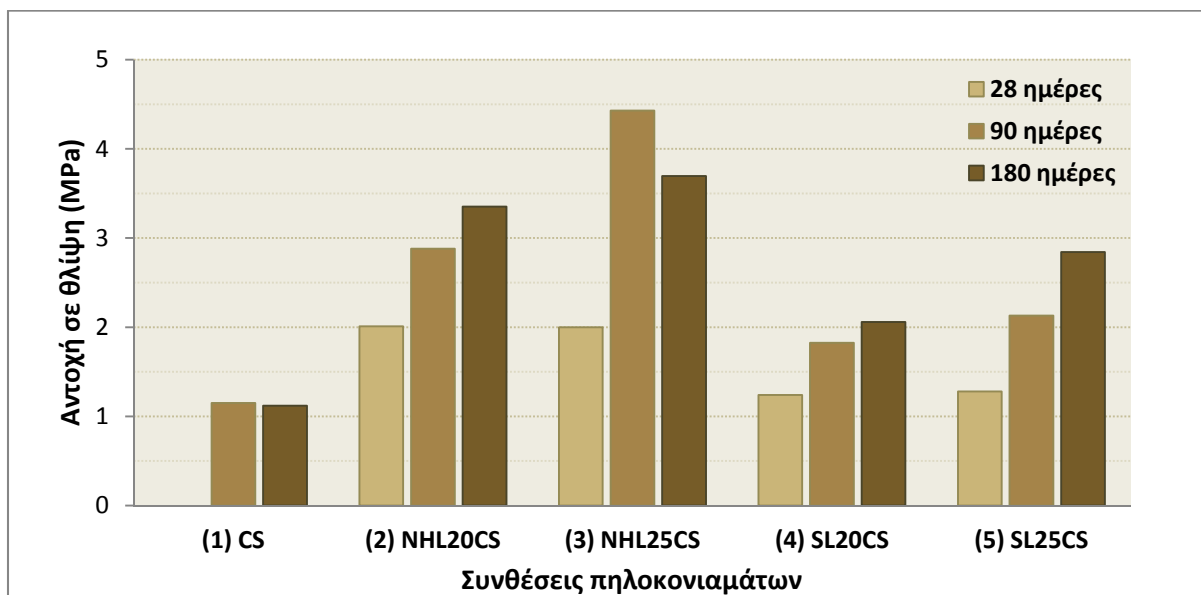
Πίνακας 5.14 Αποτελέσματα καμπτικών αντοχών για σταθεροποιημένα και μη σταθεροποιημένα πηλοκονιάματα σε χρόνους ωρίμανσης 28, 90 και 180 ημερών.

Σύνθεση	28 ημέρες		3 μήνες		6 μήνες	
	Μ.Ο. (MPa)	Τυπ.Απ.	Μ.Ο. (MPa)	Τυπ.Απ.	Μ.Ο. (MPa)	Τυπ.Απ.
(1) CS	---	---	1.15	0.05	1.12	0.07
(2) NHL20CS	2.01	0.12	2.88	0.26	3.35	0.22
(3) NHL25CS	2.00	0.13	4.43	0.96	3.69	0.46
(4) SL20CS	1.24	0.01	1.83	0.13	2.06	0.11
(5) SL25CS	1.28	0.03	2.13	0.13	2.84	0.20

Πίνακας 5.15 Αποτελέσματα θλιπτικών αντοχών για σταθεροποιημένα και μη σταθεροποιημένα πηλοκονιάματα σε χρόνους ωρίμανσης 28, 90 και 180 ημερών.



Σχήμα 5.32 Αντοχή σε κάμψη πηλοκονιαμάτων σε χρόνους ωρίμανσης 28, 90 και 180 ημερών.



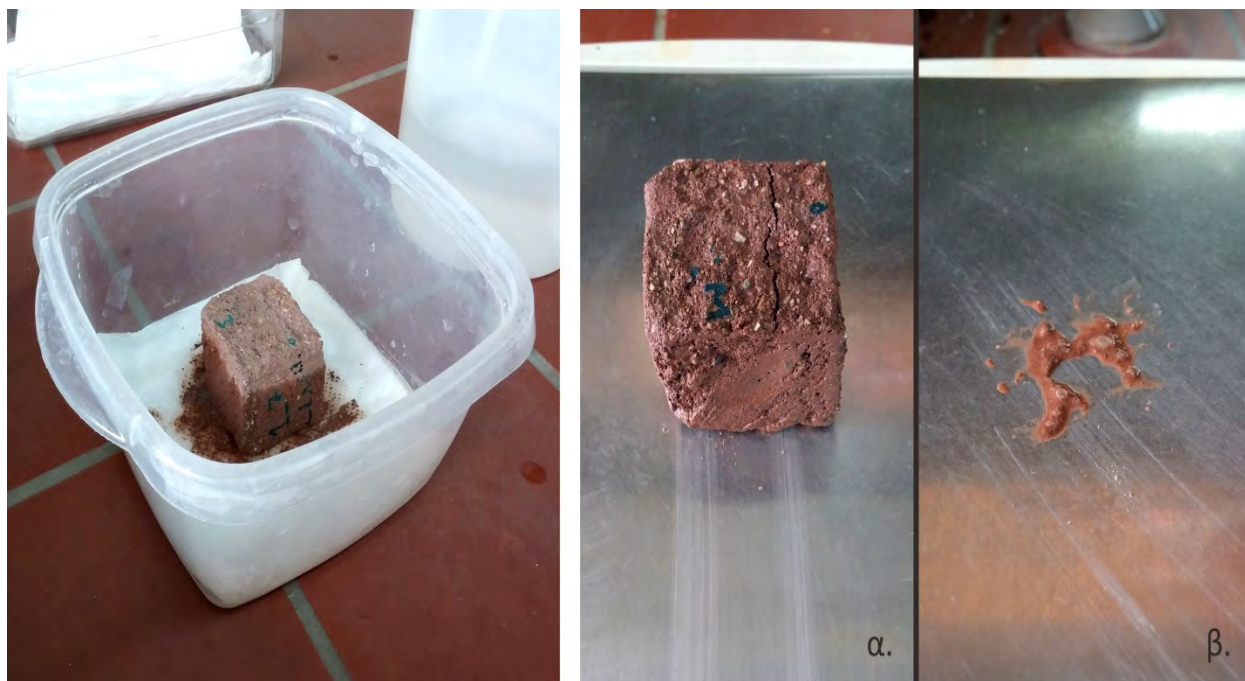
Σχήμα 5.33 Αντοχή σε θλίψη πηλοκονιαμάτων σε χρόνους ωρίμανσης 28, 90 και 180 ημερών.

## 5.4 Αποτίμηση των σταθεροποιημένων πηλοκονιαμάτων

### 5.4.1 Αποτελέσματα υδατοαπορρόφησης με τριχοειδή αναρρίχηση

Οι δοκιμές υδατοαπορρόφησης με τριχοειδή αναρρίχηση πραγματοποιήθηκαν σε 3 κυβικά δοκίμια από κάθε σύνθεση πηλοκονιάματος, μετά τους 5 μήνες ωρίμανσης, ούτως ώστε να δοθεί χρόνος για την σταθεροποίηση των δοκιμίων. Τα δοκίμια διαστάσεων περίπου 4x4x4cm σχηματίστηκαν έπειτα από υδροκοπή με τροχό. Πριν από την εκτέλεση των δοκιμών, τα δοκίμια παρέμειναν σε πυραντήριο θερμοκρασίας 60 °C για χρονικό διάστημα 24 ωρών προκειμένου να απομακρυνθεί η περιεχόμενη υγρασία τους. Για το κάθε δοκίμιο πραγματοποιήθηκε ξεχωριστά η δοκιμή σε ένα δοχείο με χρήση απιονισμένου νερού. Οι συνθήκες του εργαστηρίου κυμαίνονταν σε ποσοστά σχετικής υγρασίας RH:55±10%, θερμοκρασίας αέρα 19±2°C και θερμοκρασίας νερού 2 βαθμούς χαμηλότερα.

Πρέπει να σημειωθεί ότι όσον αφορά το μη σταθεροποιημένο κονίαμα (σύνθεση (1)CS) υπήρξε από την αρχή και κατά την διάρκεια του πειράματος απώλεια υλικού στο δοχείο (εικόνα 5.17), αλλά και σε κάθε ζύγιση της τάξεως των 0.05g, στο σύνολο των δοκιμών η απώλεια ήταν κατά μέσο όρο 4g για κάθε δοκίμιο (εικόνα 5.18 α,β). Για αυτό τον λόγο οι απώλειες των μαζών, για το μη σταθεροποιημένο κονίαμα, λήφθηκαν υπόψη για την δημιουργία των καμπύλων υδατοαπορρόφησης και τον προσδιορισμό των υπόλοιπων μεγεθών. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι για το μη σταθεροποιημένο κονίαμα προς το τέλος της δοκιμής πλησιάζοντας στον κορεσμό, παρατηρήθηκε ελαφριά παραμόρφωση του σχήματος των δοκιμίων και στο ένα από αυτά εμφανίστηκε εγκάρσια ρωγμή στην άνω πλευρά (εικόνα 5.18, α).



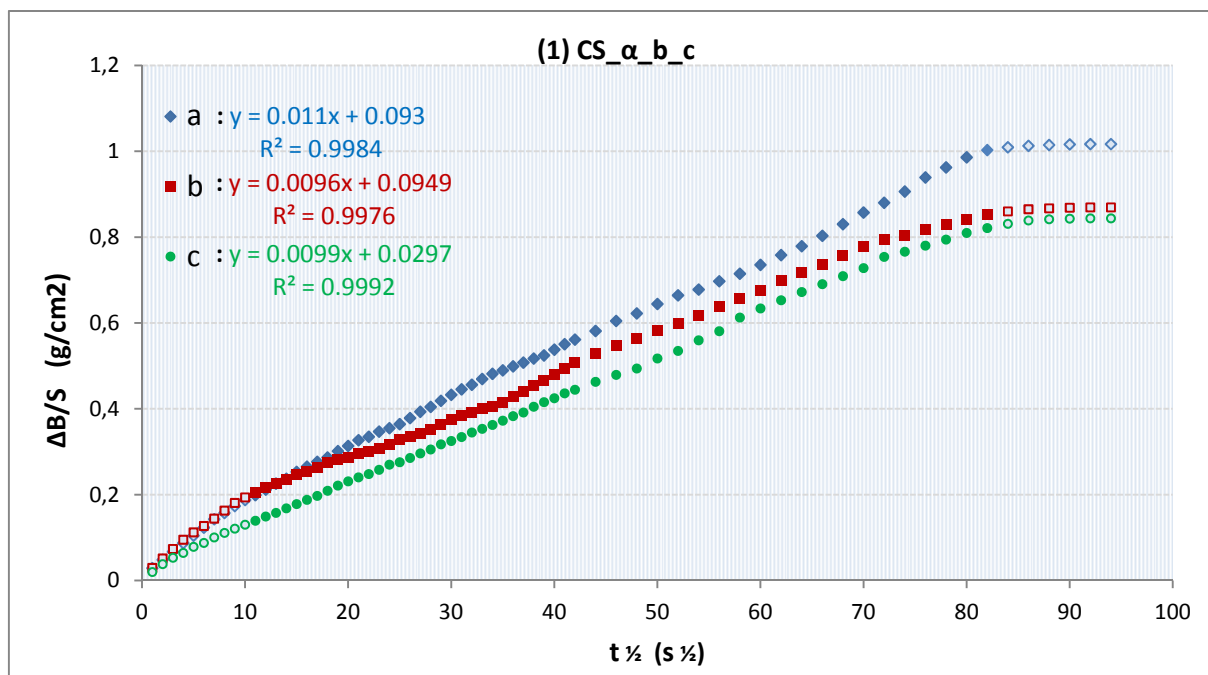
Εικόνα 5.17 Δοκιμή υδατοαπορρόφησης πηλού CS. Εικόνα 5.18 α. Ζύγιση δοκιμίου CS, β. Απώλεια υλικού.

Από το διάγραμμα  $\sqrt{t}$ -  $\Delta B/S$  (Σχήμα 5.34) για το μη σταθεροποιημένο πηλοκονίαμα αναφοράς παρατηρείται ότι αρχικώς η καμπύλη υδατοαπορρόφησης έχει μεγαλύτερη κλίση η οποία στην συνέχεια ελαττώνεται και προς το τέλος μετά τα 80 s  $\frac{1}{2}$  αρχίζει να γίνεται ασυμπτωτική. Ουσιαστικά στην αρχή υπάρχει αυξημένη τάση απορρόφησης νερού η οποία στην συνέχεια πέφτει, ενδέχεται αυτό το φαινόμενο να εξηγείται από την ιδιότητα των αργιλικών κλασμάτων να διογκώνονται κατά την επαφή με το νερό. Αρχικά λόγω και της μεγάλης ακτίνας πόρων του μη σταθεροποιημένου κονιάματος φαίνεται να έχουμε μία απότομη ρόφηση νερού η οποία όταν φτάσει σε ένα κρίσιμο σημείο περίπου στο 1.5min πέφτει, σε αυτό το σημείο ίσως να είναι ικανή η διόγκωση να μειώσει την ακτίνα των ανοιχτών πόρων σε τέτοιο βαθμό ώστε να μειωθεί αρκετά η ταχύτητα ρόφησης.

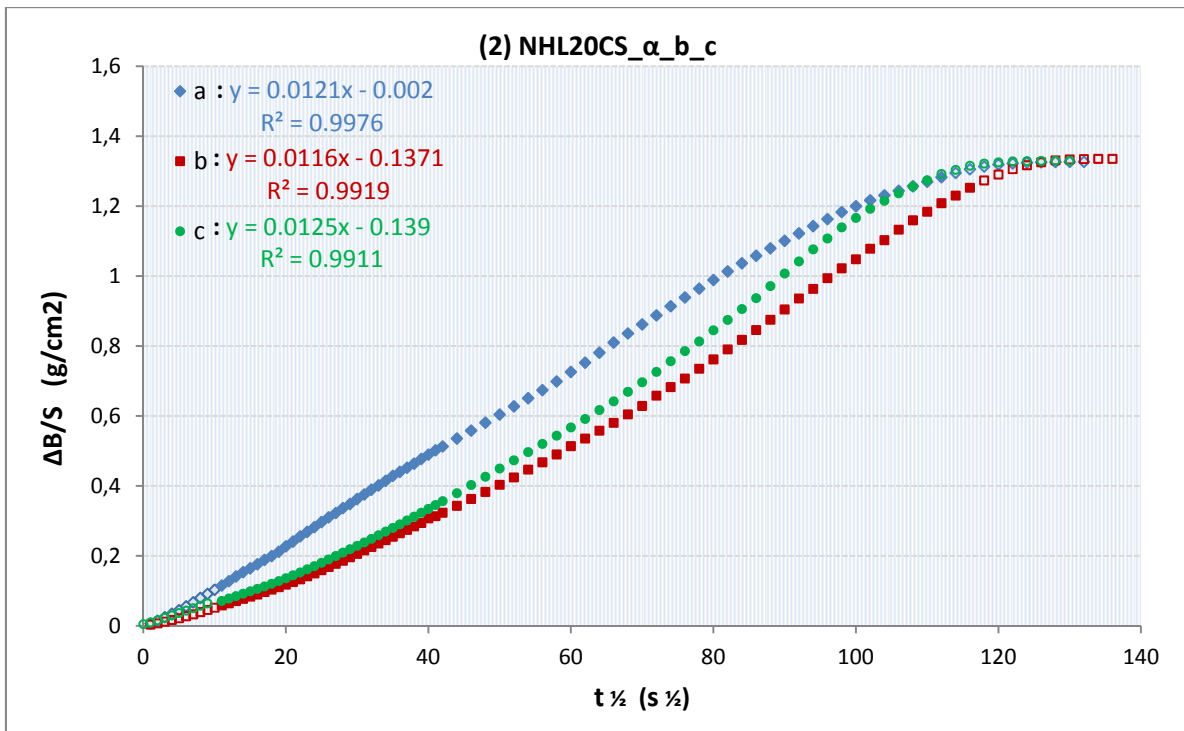
Στην καμπύλη υδατοαπορρόφησης του σταθεροποιημένου κονιάματος με 20% φυσική υδραυλική άσβεστο (Σχήμα 5.35) παρατηρείται σαφώς μικρότερη τάση απορρόφησης για τα πρώτα λεπτά και αύξηση της τάσης ρόφησης νερού μετά τα 60 s  $\frac{1}{2}$  ενώ η καμπύλη αρχίζει να γίνεται ασυμπτωτική αρκετά μετά τα 100 s  $\frac{1}{2}$ , δηλαδή πολύ αργότερα σε σύγκριση με το μη σταθεροποιημένο κονίαμα.

Αντίστοιχα και σε πιο έντονο βαθμό κινείται η καμπύλη υδατοαπορρόφησης του σταθεροποιημένου κονιάματος με 25% φυσική υδραυλική άσβεστο (Σχήμα 5.36) όπου αρχίζει να γίνεται ασυμπτωτική αρκετά μετά τα 130 s  $\frac{1}{2}$  και για τα τρία δοκίμια a, b, c.

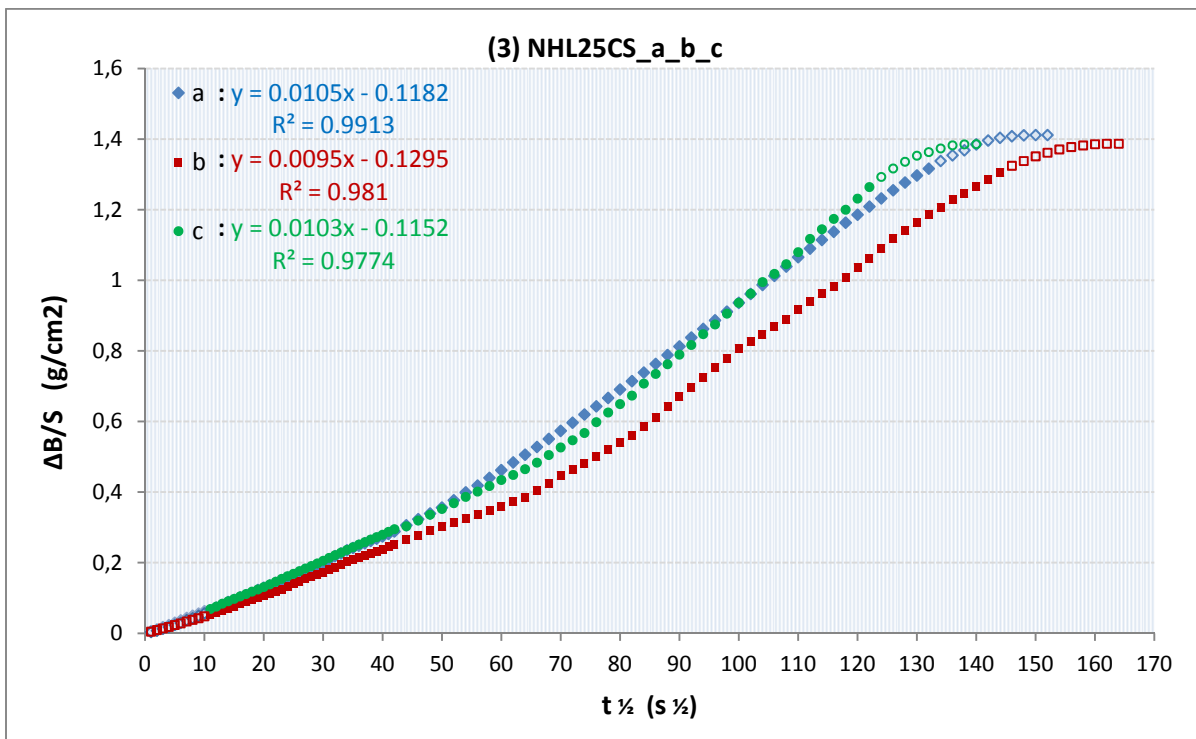
Από τα διαγράμματα  $\sqrt{t}$ -  $\Delta B/S$  (Σχήμα 5.37, 5.38) για τα κονιάματα σταθεροποιημένα με 20% και 25% σκωρία κάδων χαλυβουργίας φαίνεται αρχικά να είναι ελαφρώς μειωμένος ο ρυθμός ρόφησης αλλά στην συνέχεια παρατηρείται αύξηση της κλίσης της καμπύλης υδατοαπορρόφησης. Επίσης μετά τα 40s  $\frac{1}{2}$ , και στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται μεγάλη διασπορά των καμπύλων υδατοαπορρόφησης με δύο από τα δοκίμια να αυξάνουν απότομα ρυθμό, γεγονός το οποίο ίσως να οφείλεται σε περίσσια πλήρωση νερού με τον υδροφορέα κατά την διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος.



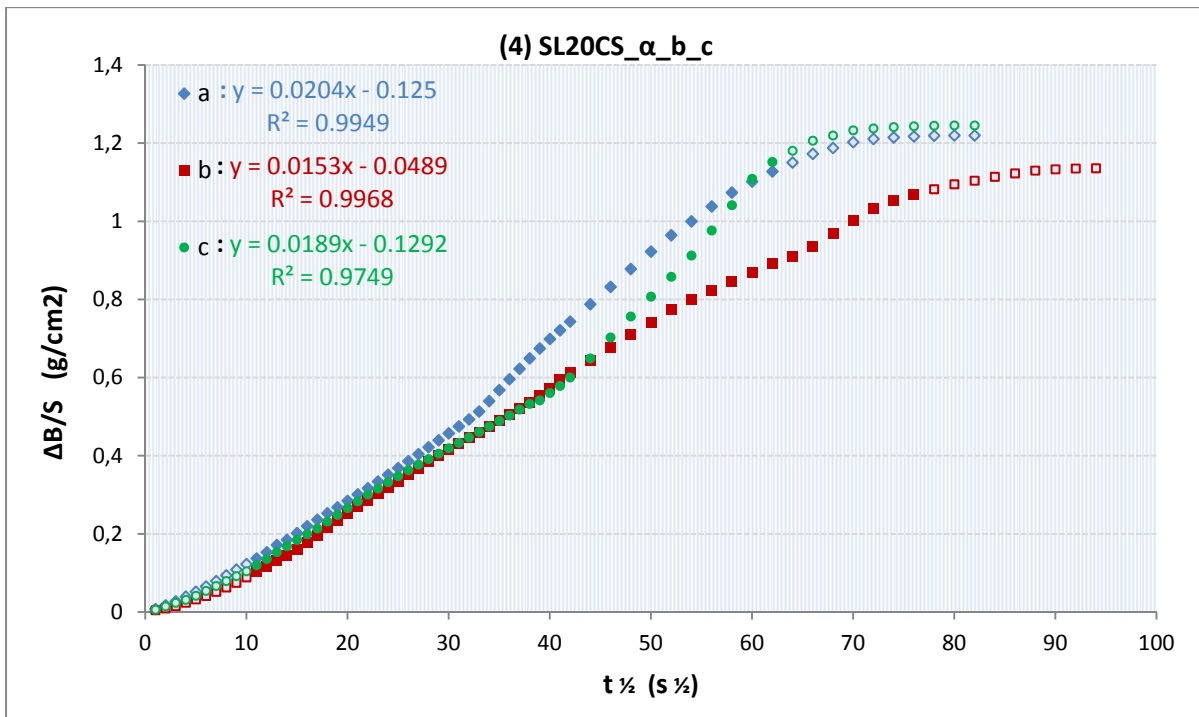
Σχήμα 5.34 Διάγραμμα  $\sqrt{t}$ -  $\Delta B/S$  των τριών δοκιμών a,b,c για το μη σταθεροποιημένο πηλοκονίαμα.



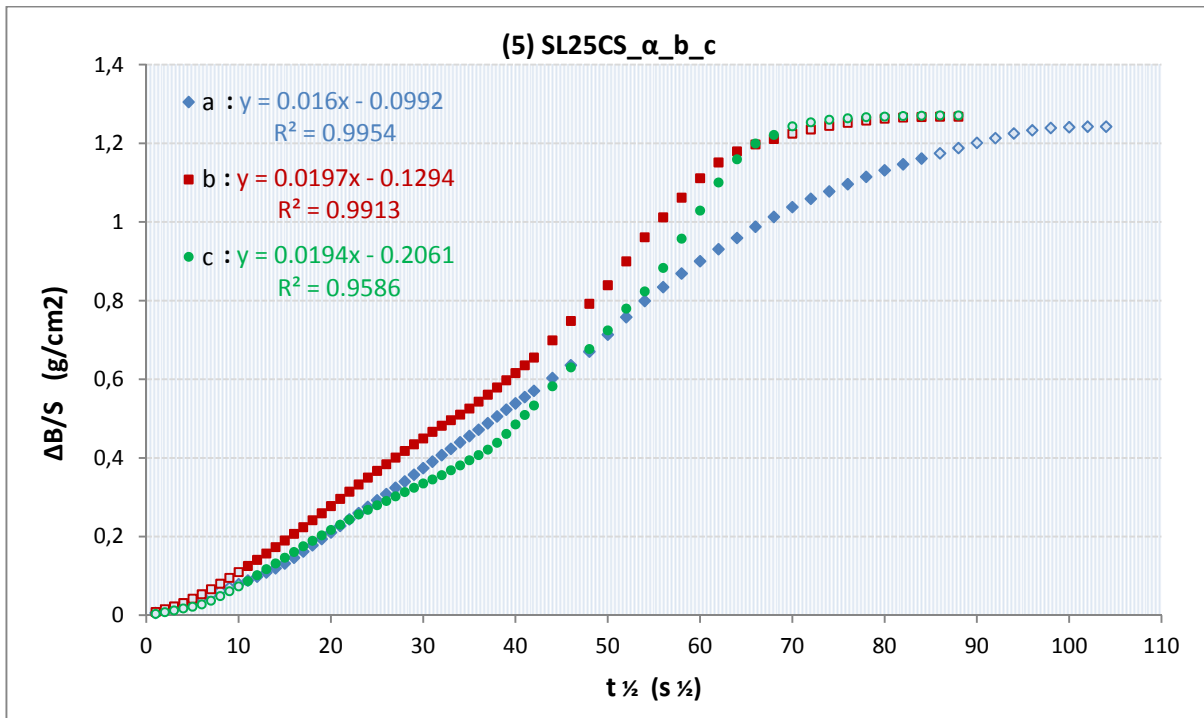
Σχήμα 5.35 Διάγραμμα  $\sqrt{t}$ -  $\Delta B/S$  των τριών δοκιμών a, b, c για κονίαμα σταθεροποιημένο με 20% φυσική υδραυλική άσβεστο.



Σχήμα 5.36 Διάγραμμα  $\sqrt{t}$ -  $\Delta B/S$  των τριών δοκιμών a, b, c για κονίαμα σταθεροποιημένο με 25% φυσική υδραυλική άσβεστο.



Σχήμα 5.37 Διάγραμμα  $\sqrt{t}$ - ΔB/S των τριών δοκιμών a, b, c για κόνιαμα σταθεροποιημένο με 20% σκωρία κάδων χαλυβουργίας.



Σχήμα 5.38 Διάγραμμα  $\sqrt{t}$ - ΔB/S των τριών δοκιμών a, b, c για κόνιαμα σταθεροποιημένο με 25% σκωρία κάδων χαλυβουργίας.



Στον Πίνακα 5.16 παρατίθενται τα αποτελέσματα εύρεσης του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης από τις καμπύλες υδατοαπορρόφησης με τέσσερις διαφορετικές μεθόδους εύρεσής του.

Ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης για το μη σταθεροποιημένο κονίαμα ((1)CS) εμφανίζεται σχετικά χαμηλός σχεδόν με όλες τις μεθόδους εύρεσής του εκτός από την περίπτωση α. των 30min, αυτό οφείλεται στο φαινόμενο που εξηγήθηκε παραπάνω, καθώς με την συγκεκριμένη μέθοδο ουσιαστικά μετρείται ο συντελεστής για τα πρώτα λεπτά, όπου ακόμα η ταχύτητα ρόφησης είναι μεγάλη, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα επόμενα σημεία της καμπύλης (βλέπε κεφ.4.7.1).

Τα σταθεροποιημένα πηλοκονιάματα με φυσική υδραυλική άσβεστο παρουσιάζουν τις μικρότερες τιμές στον συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης. Φαίνεται μάλιστα ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό της υδραυλικής ασβέστου από 20 σε 25% μειώνεται ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρίχησης και με τις τέσσερις μεθόδους εύρεσής του. Σε όλες τις μεθόδους παίρνουμε παρόμοιες τιμές εκτός της πρώτης (μέθοδος α. των 30min) όπου εμφανίζονται ακόμα μικρότερες τιμές. Από τα διαγράμματα  $\sqrt{t}$ -  $\Delta B/S$  (Σχήματα 5.35, 5.36) φαίνεται αρχικά να είναι ελαφρώς μειωμένος ο ρυθμός ρόφησης ενώ στην συνέχεια σταθεροποιείται, γι αυτό τον λόγο με την πρώτη μέθοδο α. των 30min εμφανίζονται ακόμα μικρότερες τιμές συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης σε σχέση με τις υπόλοιπες.

Τα σταθεροποιημένα πηλοκονιάματα με σκωρία κάδων χαλυβουργίας παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες τιμές ως προς τον συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης, για όλες τις μεθόδους εύρεσής του, σε σύγκριση με τα υπόλοιπα πηλοκονιάματα. Ωστόσο ως προς την μεταξύ τους σύγκριση δεν μπορούμε να προβούμε σε ασφαλή συμπεράσματα καθώς οι διαφορές στις απόλυτες τιμές είναι εντός των ορίων των τυπικών αποκλίσεων ενώ παράλληλα δεν διακρίνεται αντίστοιχη τάση και στις τέσσερις μεθόδους. Ίσως για τις συγκεκριμένα κονιάματα θα ήτανε πιο σωστή η αποδοχή των μετρήσεων της α. μεθόδου των 30min καθώς λαμβάνονται υπόψη τα σημεία των πρώτων 30 min για τα οποία υπάρχει μεγάλη σύγκλιση μεταξύ των δοκιμών. Όσον αφορά τις μεθόδους εύρεσης του συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης θα λέγαμε ότι δεν είναι κάποια, πιο αποδοτική από τις υπόλοιπες. Γενικότερα θεωρείται ότι η μέθοδος γ. με τις 2 εφαπτομένες είναι αρκετά ασφαλής καθώς περιλαμβάνει περισσότερα κρίσιμα σημεία του διαγράμματος, παρόλα αυτά οι μέθοδοι πρέπει πάντα να προσεγγίζονται σε συνδυασμό με ένα κριτικό έλεγχο των διαγραμμάτων  $\sqrt{t}$ -  $\Delta B/S$ .

Σύνθεση	α. Στα 30min	Τυπ. Απ.	β. με μια εφαπτομένη	Τυπ. Απ.	γ. με δύο εφαπτομένες	Τυπ. Απ.	δ. Στα 90-10min	Τυπ. Απ.
(1)CS	12.4	0.9	10.2	0.7	11.74	1.3	10.3	0.7
(2)NHL20CS	9.5	2.4	12.1	0.5	11.3	0.5	11.7	1
(3)NHL25CS	6.7	0.5	10.1	0.5	9.7	0.7	8.1	1.2
(4)SL20CS	15.8	1.9	18.20	2.6	16.8	2.2	16.7	1.8
(5)SL25CS	14.3	1.4	18.37	2.1	16.6	2.2	18	2

Πίνακας 5.16 Αποτελέσματα συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης με τέσσερις μεθόδους α, β, γ, δ.

Στον Πίνακα 5.17 παρατίθενται τα αποτελέσματα από τον προσδιορισμό της συνολικής απορροφούμενης μάζας νερού επί τοις εκατό ( $M_{water}\%$ ) και τον συνολικό προσροφώμενο όγκο νερού ανά g δείγματος (T.C.V.w).

Παρατηρείται ότι τα σταθεροποιημένα πηλοκονιάματα με φυσική υδραυλική άβεστο εμφανίζουν τις μεγαλύτερες τιμές (συνθέσεις (2)NHL20CS και (3)NHL25CS) με τις μεταξύ τους τιμές να είναι αρκετά κοντινές. Τα σταθεροποιημένα πηλοκονιάματα με σκωρία κάδων χαλυβουργίας (συνθέσεις (4)SL20CS και (5)SL25CS) φαίνεται να έχουν εμφανώς μικρότερες τιμές σε σχέση με τις φυσικές υδραυλικές ασβέστους, με αρκετά μεγάλες τυπικές αποκλίσεις, σε συνδυασμό μάλιστα και με τις μεγάλες διαφορές στα επίπεδα υγρασίας στον χώρο του εργαστηρίου κατά την διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος, δεν είναι αδύνατο να προβούμε σε ένα ασφαλές συμπέρασμα ως προς τις απόλυτες τιμές τους και την μεταξύ τους διαφορά. Σε κάθε περίπτωση όμως παρατηρείται ότι τόσο για την σταθεροποίηση με φυσική υδραυλική άβεστο όσο και για την σταθεροποίηση με σκωρία κάδων χαλυβουργίας οι τιμές της συνολικής απορροφούμενης μάζας νερού και του συνολικού προσροφώμενου όγκου νερού ανά g δείγματος αυξάνονται αρκετά σε σύγκριση με το μη σταθεροποιημένο κονίαμα αναφοράς.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι συνήθως όσο αυξάνεται η ακτίνα των πόρων αυξάνεται και ο συντελεστής υδατοαπορρόφησης, ωστόσο η είσοδος του νερού μέσα σε ένα υλικό, δεν εξαρτάται μόνο από τον όγκο των κενών, αλλά κυρίως από τη μορφή και το μέγεθός τους. Μεγάλοι και ευθύγραμμοι πόροι επιτρέπουν εύκολα την είσοδο του νερού. Αντίθετα, πολύ μικροί (υποτριχοειδείς), δαιδαλώδεις πόροι και πόροι που δε συγκοινωνούν μεταξύ τους (κυψελωτοί) δυσχεραίνουν πολύ τον εμποτισμό ενός υλικού με νερό [87].

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της τριχοειδούς αναρρίχησης με τα αποτελέσματα από την Πορομετρία Hg παρατηρούμε για τον συνολικό προσροφώμενο όγκο νερού ανά g δείγματος κοντινές τιμές παρουσιάζοντας ανάλογες τάσεις ανά υλικό σταθεροποίησης, δηλαδή, και εκεί εμφανίζονται οι μεγαλύτερες τιμές για τα κονιάματα που είναι σταθεροποιημένα με φυσική υδραυλική άβεστο και έπειτα για τα σταθεροποιημένα πηλοκονιάματα με σκωρία κάδων χαλυβουργίας.

Σύνθεση	Συνολική απορροφώμενη μάζα νερού $M_{water}\%$	Τυπ.Απ.	Συνολικός προσροφώμενος όγκος νερού ανά g δείγματος T.C.V.w ( $mm^3/g$ )	Τυπ.Απ.
(1)CS	14.3	1.6	143.6	16.3
(2)NHL20CS	20.5	0.8	205.4	5.4
(3)NHL25CS	22	0.9	220.1	4.2
(4)SL20CS	18.1	0.7	181.6	7.4
(5)SL25CS	19	0.3	190.3	2.9

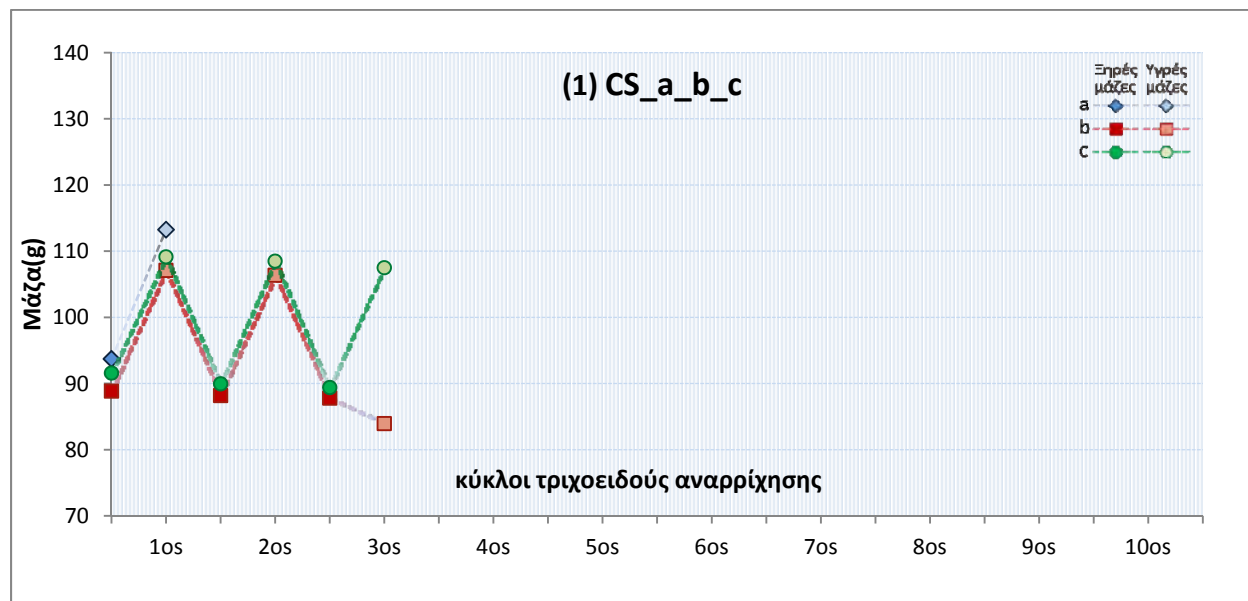
Πίνακας 5.17 Αποτελέσματα υδατοαπορρόφησης με τριχοειδή αναρρίχηση για  $M_{water}\%$  και T.C.V.w .

#### 5.4.2 Αποτίμηση των κονιαμάτων διαμέσου κύκλων ύγρανσης - ξήρανσης

Μετά την δοκιμή υδατοαπορρόφησης, με σκοπό να μελετηθεί κυρίως ποιοτικά, η αντίσταση των κονιαμάτων στην διάβρωση από το νερό και τις απότομες αλλαγές των κλιματολογικών συνθηκών, ακολούθησαν 10 κύκλοι ύγρανσης-ξήρανσης μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης και έπειτα 6 κύκλοι ύγρανσης-ξήρανσης μέσω εμβάπτισης. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν από κάθε σύνθεση κονιάματος ήταν τα ίδια με εκείνα που χρησιμοποιήθηκαν στην δοκιμή υδατοαπορρόφησης.

Τα δοκίμια αρχικά ξηραίνονταν για 46h σε πυραντήριο ( $60\pm 5^{\circ}\text{C}$ ), ακολουθούσε ζύγιση στην ξηρή κατάσταση και καταγραφή τυχόν αλλαγών στις διαστάσεις τους. Μετά την εμβάπτιση ζυγίζονταν εκ νέου και αφού παρέμεναν για περίπου 2 ώρες σε συνθήκες δωματίου ξανατοποθετούνταν για ~46h στο πυραντήριο. Πριν, κατά την διάρκεια και μετά από κάθε κύκλο πραγματοποιήθηκε έλεγχος της κατάστασης των δοκιμών σε συνδυασμό με φωτογραφική τεκμηρίωση. Από τις μετρήσεις των μαζών φτιάχτηκαν τα διαγράμματα μάζας (Σχήματα 5.39-5.43), τα οποία μας παρέχουν μια πιο συνολική εικόνα για την μεταβολή της μάζας των δοκιμών στην ξηρή και κορεσμένη κατάσταση.

Τα δοκίμια του μη σταθεροποιημένου κονιάματος (σύνθεση αναφοράς (1)CS) όπως αναμενόταν παρουσίασαν πολύ χαμηλή αντοχή όσον αφορά την αντίσταση στη διάβρωση από το νερό. Πιο συγκεκριμένα το ένα από τα τρία δοκίμια (CS\_a) ήδη από την δοκιμή υδατοαπορρόφησης με τριχοειδή αναρρίχηση είχε παρουσιάσει μία ρωγμή στην άνω πλευρά του η οποία κατά τον 1ο κύκλο ύγρανσης-ξήρανσης διευρύνθηκε αρκετά (Εικόνα 5.19,γ). Κατά την έξοδο από το δοχείο και κατά την διάρκεια ζύγισης το συγκεκριμένο δοκίμιο κατέρρευσε ολοκληρωτικά (Εικόνα 5.19,δ). Τα δύο άλλα δοκίμια υπέστησαν μερική παραμόρφωση και μικρορωγμές από τον πρώτο κύκλο, η οποίες εντάθηκαν σταδιακά στους επόμενους κύκλους ύγρανσης-ξήρανσης καταρρέοντας συνολικά με το πέρας του 3ου κύκλου (Εικόνες 5.20-5.21), σημειώνεται ότι σε κάθε κύκλο υπήρχε απώλεια μάζας και στα δύο δοκίμια του μη σταθεροποιημένου κονιάματος κατά μέσο όρο 1-2 g (Σχήμα 5.39).



Σχήμα 5.39 Κύκλοι ύγρανσης-ξήρανσης για τα τρία δοκίμια a, b, c του μη σταθεροποιημένου κονιάματος.



Εικόνα 5.19 Στάδια 1ου κύκλου ύγρυνσης-ξήρανσης μέσω τριχλωιδούς αναρρίχησης για το μη σταθεροποιημένο πηλοκονίαμα.

(1)CS\_2ος κύκλος



α) ξηρή κατάσταση



β) κορεσμένα δοκίμια

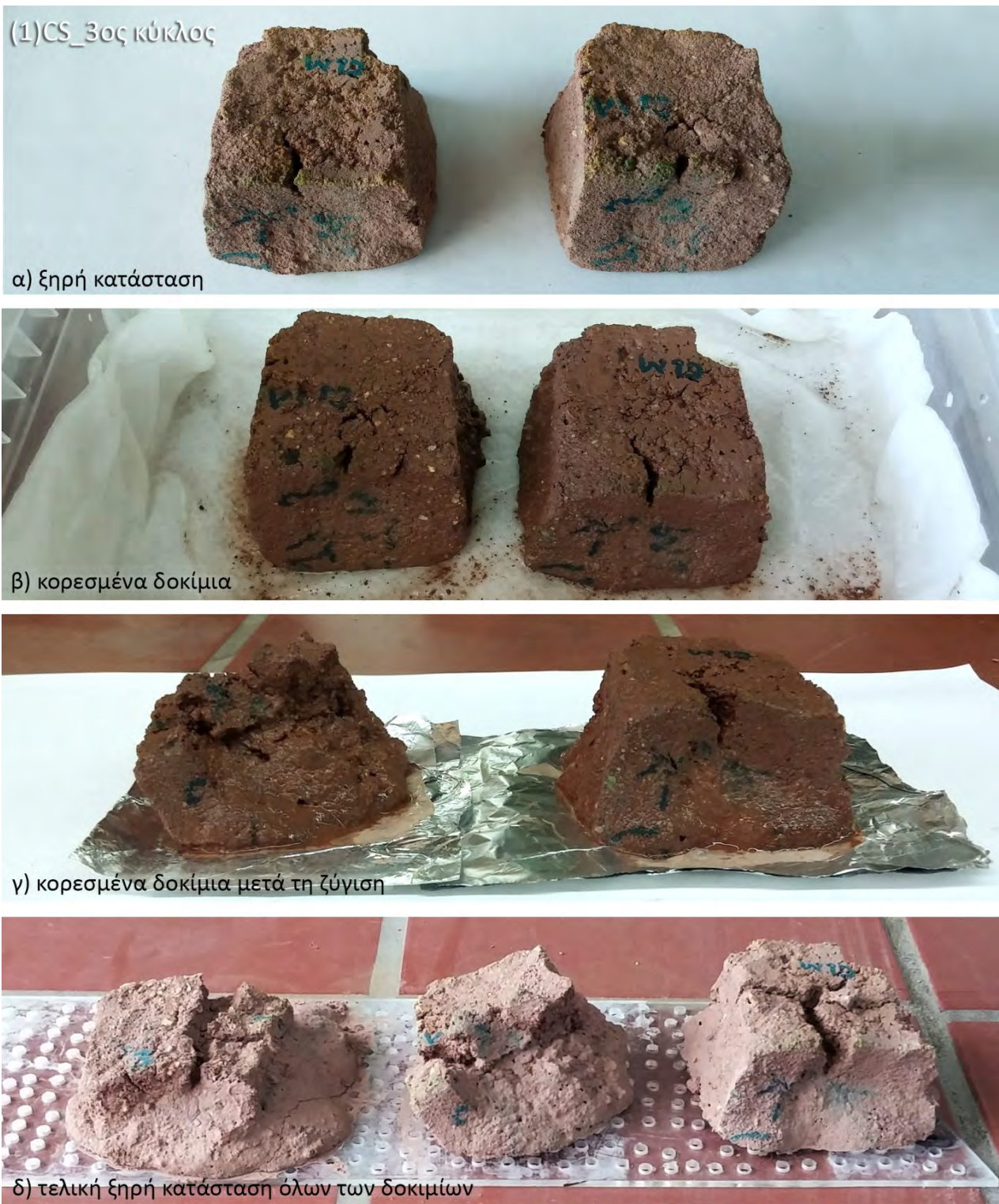


γ) απώλεια υλικού



δ) κορεσμένα δοκίμια μετά τη ζύγιση

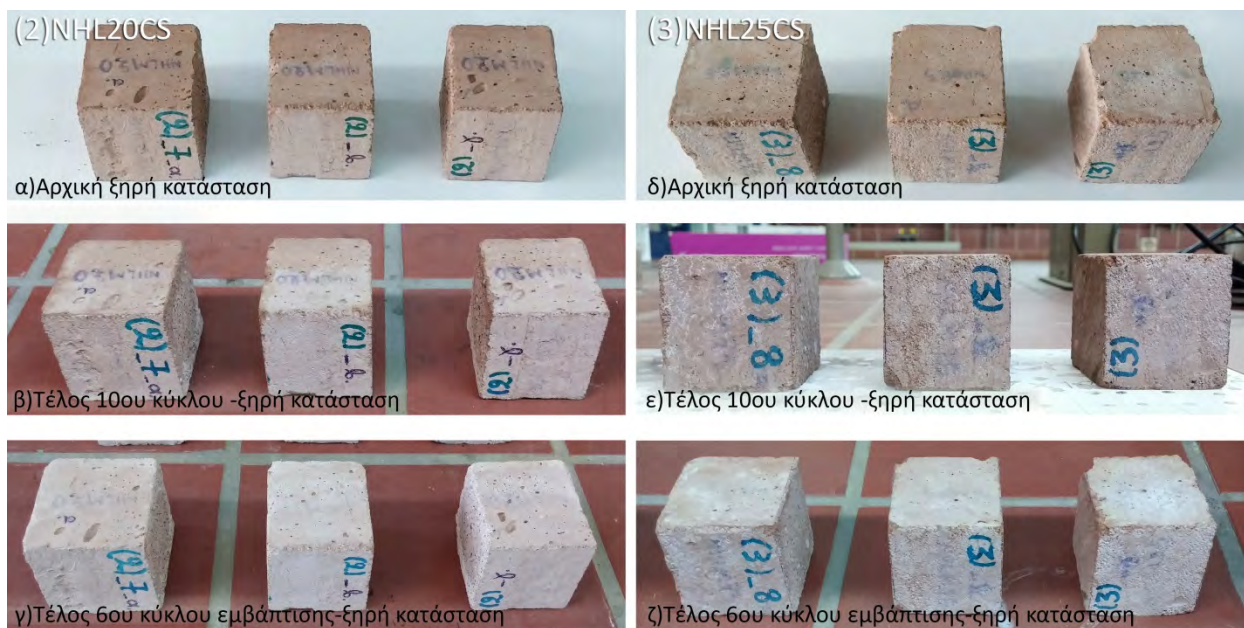
Εικόνα 5.20 Στάδια 2ου κύκλου ύγρυνσης-ξήρανσης μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης για το μη σταθεροποιημένο πηλοκονίαμα.



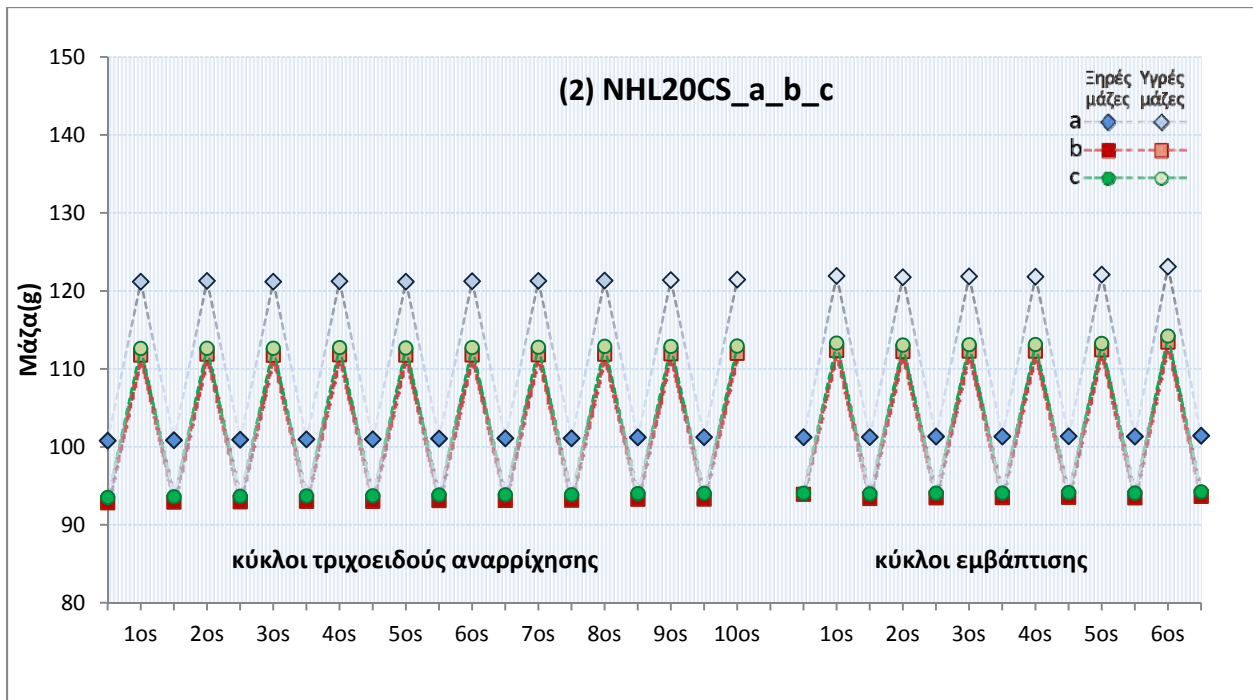
Εικόνα 5.21 Στάδια 3ου κύκλου ύγρυνσης-ξήρανσης μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης για το μη σταθεροποιημένο πηλοκονίαμα.

Τα σταθεροποιημένα με φυσική υδραυλική άσβεστο δοκίμια (συνθέσεις (2)NHL20CS και (3)NHL25CS) εμφάνισαν αξιοσημείωτα καλή συμπεριφορά στην διάβρωση από το νερό καθ' όλη την διάρκεια των κύκλων ύγρυνσης-ξηράνσης, χωρίς να παρουσιάσουν επιφανειακές ενδείξεις φθοράς ή παραμόρφωσης (Εικόνα 5.22). Κατά την διάρκεια των 10 κύκλων ύγρυνσης-ξηράνσης μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης δεν εμφάνισαν καμία αξιοσημείωτη μεταβολή μάζας αλλά δεν παρατηρήθηκε και μεταβολή στις διαστάσεις τους. Οι ελάχιστες μεταβολές των μαζών που παρουσιάστηκαν κατά κύριο λόγο είχαν αύξουσα τάση, γεγονός που μπορεί να δικαιολογηθεί από πιθανή παραμένουσα υγρασία μετά την ξήρανση. Η τυπική απόκλιση στις ξηρές μάζες κυμαίνεται στα 0.12g για τα σταθεροποιημένα με 20% φυσική υδραυλική άσβεστο δοκίμια και στα 0.3g για τα σταθεροποιημένα με 25% (Σχήματα 5.40, 5.41). Η τυπική απόκλιση στις μάζες των κορεσμένων δοκιμίων και για τις δύο περιπτώσεις σταθεροποίησης με φυσική υδραυλική άσβεστο ήταν αμελητέες.

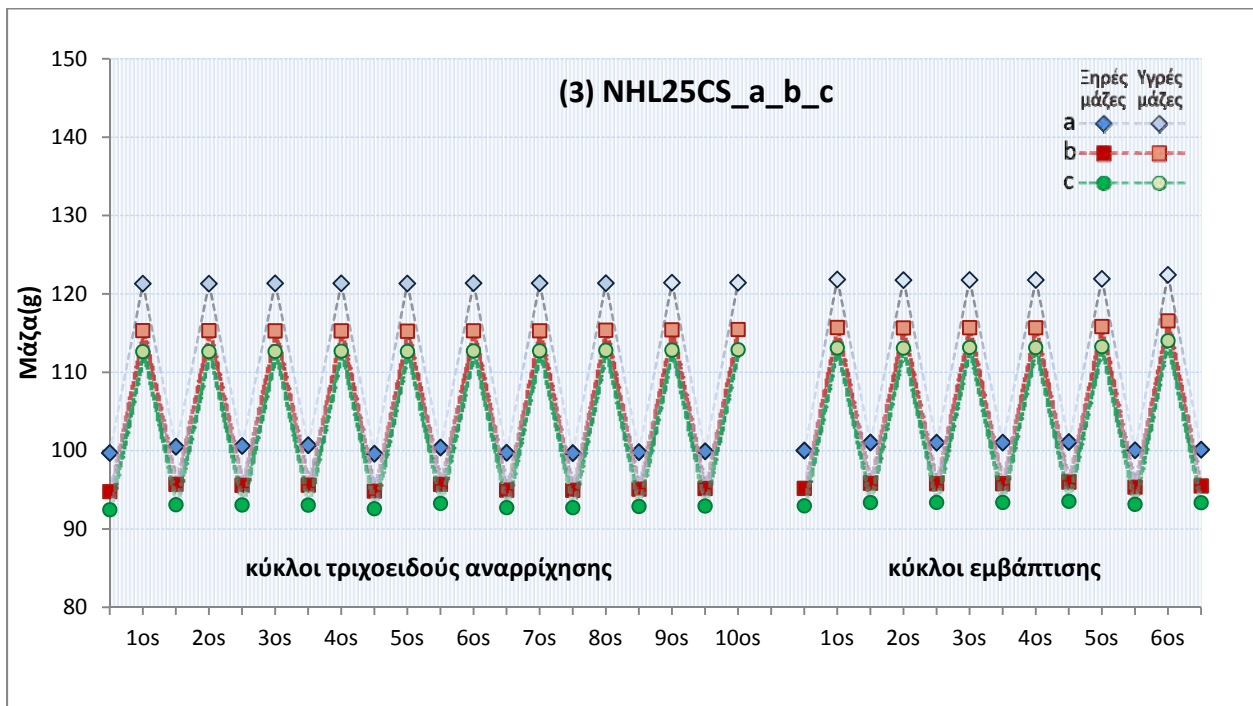
Κατά την διάρκεια των 6 κύκλων ύγρυνσης-ξηράνσης μέσω εμβάπτισης, παρουσιάστηκαν αντίστοιχα ελαφριές τυπικές αποκλίσεις στις ξηρές μάζες και για τις δύο περιπτώσεις σταθεροποίησης. Η τυπική απόκλιση κατά την ξηρή κατάσταση όπως προαναφέρθηκε δικαιολογείται από ενδεχόμενη ατελή ξήρανση. Για τα σταθεροποιημένα με 25% φυσική υδραυλική άσβεστο δοκίμια είναι λογικό να είναι ελαφρώς μεγαλύτερη καθώς είχαν μεγαλύτερους χρόνους κορεσμού αλλά και μικρότερο συντελεστή υδατοαπορρόφησης. Σημαντικό είναι να σημειωθεί ότι η ελαφρά αυξητική τάση των υγρών μαζών με το πέρασμα των κύκλων ύγρυνσης-ξηράνσης, εκτός των άλλων μπορεί να οφείλεται σε πιθανή βραδεία διάνοιξη των μικρότερων πόρων, φαινόμενο που οδηγεί και σε μία ελάχιστη αύξηση του ανοιχτού πορώδους. Ειδικότερα στον 6ο κύκλο εμβάπτισης που η διάρκεια εμβάπτισης προσαυξήθηκε στις 20 ημέρες η αύξηση της υγρής μάζας εμφανίστηκε ελαφρώς εντονότερη (Σχήματα 5.40,5.41).



**Εικόνα 5.22 Φωτογραφική τεκμηρίωση σταθεροποιημένων δοκιμίων σε ξηρή κατάσταση, δοκίμια σταθεροποιημένα με 20% φυσική υδραυλική άσβεστο (αριστερά) και με 25% (δεξιά).**



Σχήμα 5.40 Κύκλοι ύγρανσης-ξήρανσης για τα τρία δοκίμια a, b, c του σταθεροποιημένου κονιάματος με 20% φυσική υδραυλική άσβεστο.



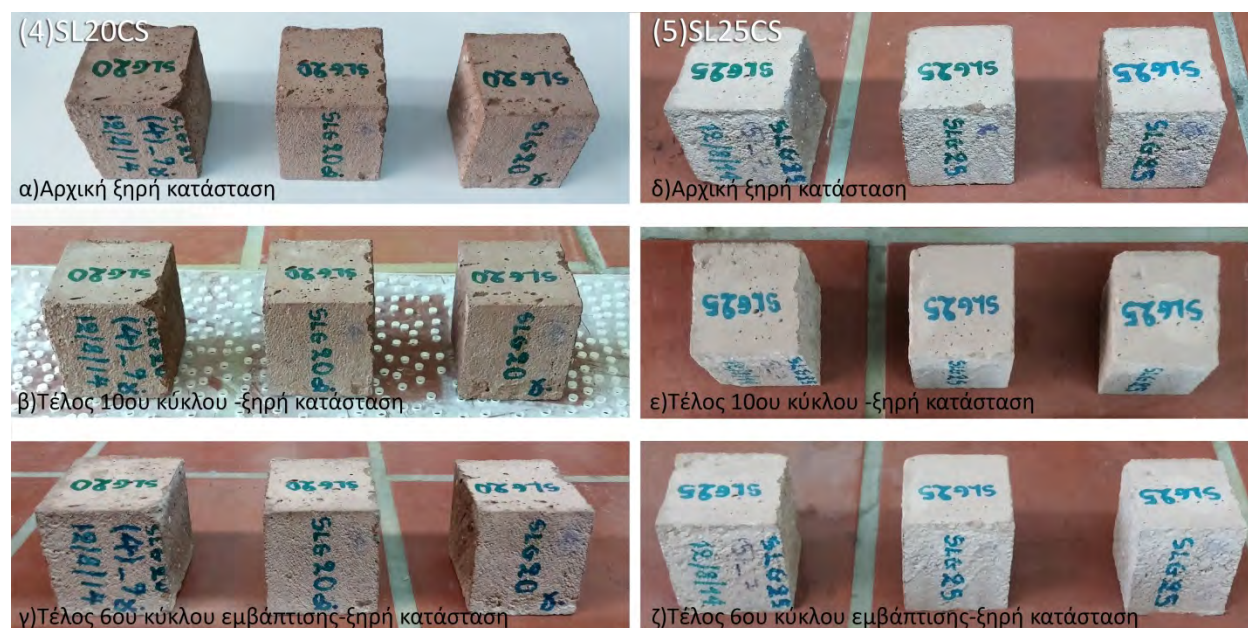
Σχήμα 5.41 Κύκλοι ύγρανσης-ξήρανσης για τα τρία δοκίμια a, b, c του σταθεροποιημένου κονιάματος με 25% φυσική υδραυλική άσβεστο.



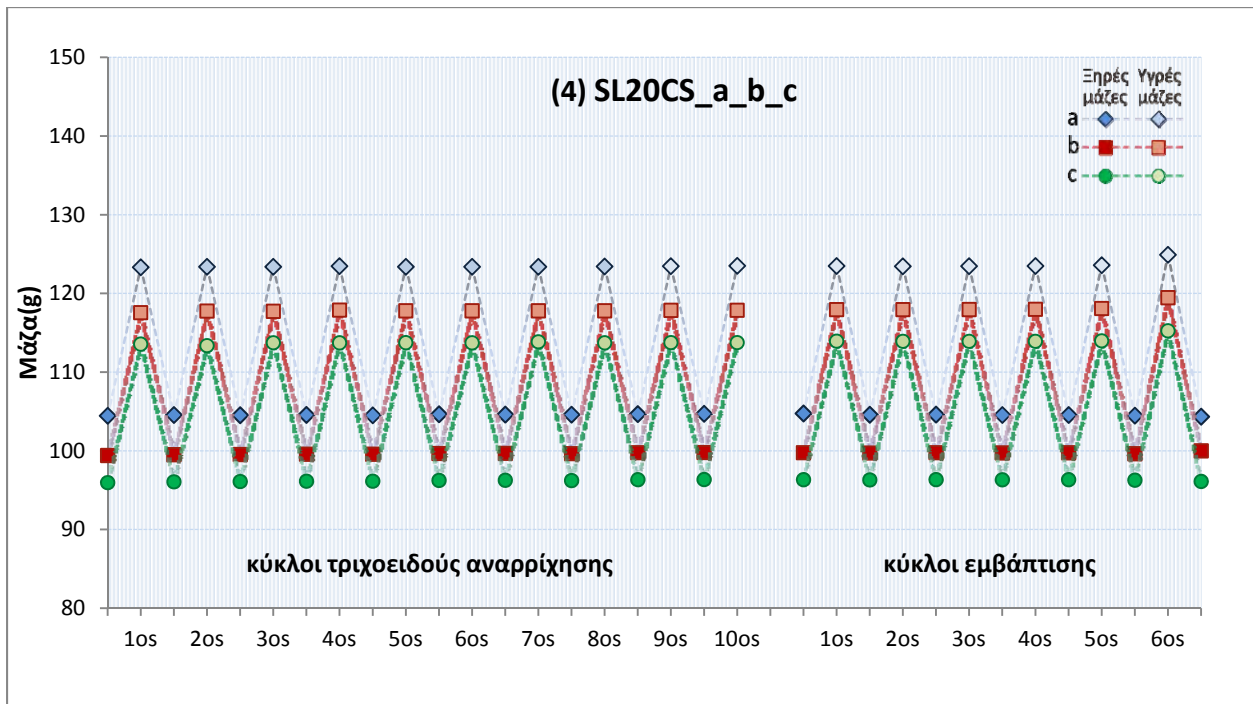
Τα σταθεροποιημένα με σκωρία κάδων χαλυβουργίας δοκίμια (συνθέσεις (4)SL20CS και (5)SL25CS) εμφάνισαν εξίσου καλή συμπεριφορά έναντι της διάβρωσης από το νερό καθ' όλη την διάρκεια των κύκλων ύγρυνσης-ξήρανσης, χωρίς να εμφανίσουν επιφανειακές ενδείξεις φθοράς ή παραμορφώσεις (Εικόνα 5.23). Στο πρώτο μέρος των 10 κύκλων ύγρυνσης-ξήρανσης (μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης) παρουσίασαν παρόμοια με τα δοκίμια των φυσικών υδραυλικών άβεστων, ελαφριές μεταβολές στην μάζα τους, ενώ δεν παρατηρήθηκαν αλλαγές στις διαστάσεις τους. Οι τυπικές αποκλίσεις των ξηρών μαζών κυμάνθηκαν στα 0.1g για τα σταθεροποιημένα δοκίμια με 20% σκωρία κάδων χαλυβουργίας και στα 0.18g για τα σταθεροποιημένα με 25% (Σχήμα 5.42,5.43).

Κατά την διάρκεια των 6 κύκλων ύγρυνσης-ξήρανσης μέσω εμβάπτισης, παρουσιάστηκαν αντίστοιχα ελαφριές τυπικές αποκλίσεις στις ξηρές μάζες, ενώ οι τυπικές αποκλίσεις κατά την ζύγιση των κορεσμένων δοκιμίων και στις 2 περιπτώσεις σταθεροποίησης ήταν περίπου στα 0.55 g. Γεγονός που δικαιολογείται από την παρατεταμένη διάρκεια εμβάπτισης κατά τον 6ο κύκλο ύγρυνσης-ξήρανσης. Για τα σταθεροποιημένα δοκίμια με σκωρία κάδων χαλυβουργίας, οι διακυμάνσεις των ξηρών μαζών ήταν ελαφρώς μειωμένες έναντι των αντίστοιχων σταθεροποιημένων με φυσική υδραυλική άβεστο γεγονός που πιθανώς δικαιολογείται από τους μειωμένους χρόνους κορεσμού και συνεπώς ξήρανσης.

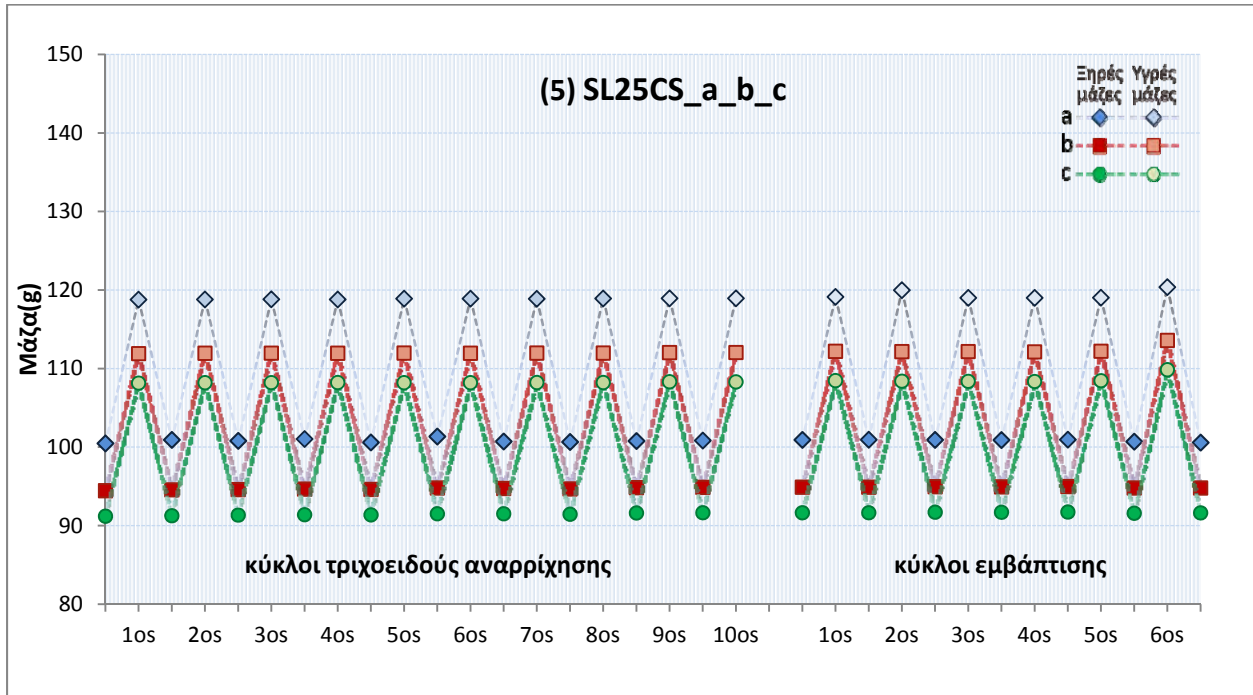
Σε γενικές γραμμές μπορούμε να προβούμε στο συμπέρασμα ότι υπήρξε ικανοποιητική σταθεροποίηση έναντι στην διάβρωση από το νερό σε όλες τις περιπτώσεις σταθεροποίησης. Η αντοχή των δοκιμίων και στα δύο μέρη των κύκλων ύγρυνσης-ξήρανσης ήταν επαρκής καθώς δεν παρουσίασαν επιφανειακές φθορές ούτε αλλαγή στις διαστάσεις τους. Παράλληλα η τελική μεταβολή στην μάζα από την αρχική ξηρή στην τελική ξηρή κατάσταση μετά και τον τελευταίο κύκλο ήταν αμελητέα για όλα τα σταθεροποιημένα δοκίμια. Αυτό σημαίνει ότι τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την σταθεροποίηση προσδίδουν στα πηλοκονιάματα αυξημένη αντοχή έναντι του νερού.



**Εικόνα 5.23 Φωτογραφική τεκμηρίωση σταθεροποιημένων δοκιμίων σε ξηρή κατάσταση , δοκίμια σταθεροποιημένα με 20% σκωρία κάδων χαλυβουργίας (αριστερά) και με 25% (δεξιά).**



Σχήμα 5.42 Κύκλοι ύγρυνσης-ξηράνσης για τα τρία δοκίμια a, b, c του σταθεροποιημένου κονιάματος με 20% σκωρία κάδων χαλυβουργίας.



Σχήμα 5.43 Κύκλοι ύγρυνσης-ξηράνσης για τα τρία δοκίμια a, b, c του σταθεροποιημένου κονιάματος με 25% σκωρία κάδων χαλυβουργίας.

## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα πειραματικά αποτελέσματα και την συζήτηση αυτών προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα. Όσον αφορά την αποτίμηση των νωπών κονιαμάτων προκύπτει ότι το μη σταθεροποιημένο κονίαμα παρουσιάζει τις μικρότερες απαιτήσεις σε νερό, κοντά στο όριο υδαρότητας του πηλού. Τα σταθεροποιημένα κονιάματα παρουσιάζουν μεγαλύτερες απαιτήσεις σε νερό για την επίτευξη της ίδιας τιμής εξάπλωσης, ενώ ταυτόχρονα η φαινόμενη πυκνότητα και το συγκρατούμενο νερό μειώνονται με την προσθήκη σταθεροποιητή. Οι παραπάνω μεταβολές μάλιστα παρουσιάζονται μεγαλύτερες ειδικότερα για τα κονιάματα που έχουν σταθεροποιηθεί με φυσική υδραυλική άσβεστο.

Από τη μελέτη των επιφανειών με οπτικό μικροσκόπιο προκύπτει εμφανής βελτίωση για τα σταθεροποιημένα δοκίμια ως προς την συνεκτικότητα, την ομοιογένεια και την ομαλότητα των επιφανειών. Ο προσδιορισμός των χρωματικών παραμέτρων έδειξε ότι η συνολική χρωματική μεταβολή ΔΕ είναι μικρότερη στην περίπτωση σταθεροποίησης με σκωρία κάδων χαλυβουργίας ενώ για την σταθεροποίηση με φυσική υδραυλική άσβεστο η συνολική χρωματική μεταβολή είναι ελαφρώς εντονότερη.

Τα σταθεροποιημένα κονιάματα όπως προέκυψε από τη μελέτη μικροδομής με τη μέθοδο της πορομετρίας Hg παρουσιάζουν μετατόπιση του μεγέθους των πόρων σε μικρότερες κατανομές η οποία συνοδεύεται με αντίστοιχη μείωση στην μέση ακτίνα πόρων. Ταυτόχρονα κατά την σταθεροποίηση αυξάνεται ο ολικός ειδικός όγκος, το ολικό πορώδες, η ειδική επιφάνεια και μειώνεται η φαινόμενη πυκνότητα. Η παραπάνω μεταβολές είναι εντονότερες στην περίπτωση της σταθεροποίησης με φυσική υδραυλική άσβεστο, ωστόσο και στις δύο περιπτώσεις σταθεροποίησης η μεταβολές αυτές δεν κινούνται ανάλογα με την αύξηση στην προσθήκη σταθεροποιητή.

Κατά την σταθεροποίηση αυξάνεται η ταχύτητα διάδοσης υπερήχων και το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας. Η αύξηση παρουσιάζεται εντονότερη για τα σταθεροποιημένα κονιάματα με φυσική υδραυλική άσβεστο, ενώ τόσο στην περίπτωση σταθεροποίησης με φυσική υδραυλική άσβεστο, όσο και στην περίπτωση σταθεροποίησης με σκωρία κάδων χαλυβουργίας, η αύξηση ενισχύεται αισθητά με την αύξηση στα ποσοστά του σταθεροποιητή από 20% σε 25%.

Σοβαρό πρόβλημα, που οδηγεί σε μηχανικές αστοχίες των πηλοκονιαμάτων, αποτελεί η έντονη συστολή. Η σταθεροποίηση μείωσε θεαματικά τα ποσοστά συστολής και παρατηρήθηκε ότι μετά τους 3 μήνες ωρίμασης δεν παρουσιάζονται σημαντικές αλλαγές στον όγκο των δοκιμίων. Στην περίπτωση της σταθεροποίησης με φυσική υδραυλική άσβεστο προκύπτει μεγαλύτερη μείωση σε σύγκριση με τα σταθεροποιημένα με σκωρία κάδων χαλυβουργίας κονιάματα, ενώ η αύξηση σε προσθήκη σταθεροποιητή από 20 σε 25% φαίνεται να μην επιδρά σημαντικά στην βελτίωση των τελικών τιμών.

Τα σταθεροποιημένα πηλοκονιάματα παρουσιάζουν σημαντικά ενισχυμένες μηχανικές αντοχές σε σύγκριση με το μη σταθεροποιημένο πηλοκονίαμα οι οποίες αυξάνονται με την αύξηση του ποσοστού του σταθεροποιητή από 20 σε 25%. Ειδικότερα, ως προς την αντοχή σε θλίψη παρουσιάστηκαν οι πιο έντονες αυξήσεις και σε γενικές γραμμές η αντοχή σε θλίψη αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου ωρίμανσης. Εξαιρεση αποτέλεσε το κονίαμα σταθεροποιημένο με 25% φυσική υδραυλική άσβεστο, το οποίο παρουσίασε μέγιστη τιμή στους τρεις μήνες, ωστόσο, η τιμή αυτή ήταν μέσα στα όρια των τυπικών αποκλίσεων σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των έξι μηνών.

Ο κύριος στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η σταθεροποίηση των πηλοκονιαμάτων ενάντια στη διάβρωση από το νερό. Από την δοκιμή υδατοαπορρόφησης με τριχοειδή αναρρίχηση προέκυψε μείωση στο συντελεστή τριχοειδούς αναρρίχησης για τα σταθεροποιημένα κονιάματα με φυσική υδραυλική άβεστο και αύξηση στην περίπτωση σταθεροποίησης με σκωρία κάδων χαλυβουργίας. Στην περίπτωση της σταθεροποίησης με φυσική υδραυλική άβεστο η αλλαγή στον συντελεστή συνοδεύτηκε και από αύξηση του συνολικού χρόνου κορεσμού των δοκιμίων.

Ο ποιοτικός έλεγχος της αντοχής των σταθεροποιημένων πηλοκονιαμάτων έναντι της διάβρωσης από το νερό, έγινε μέσω δέκα κύκλων ύγρυνσης-ξήρανσης διαμέσου τριχοειδούς αναρρίχησης και έξι κύκλων ύγρυνσης-ξήρανσης μέσω εμβάπτισης. Τα αποτελέσματα των κύκλων ύγρυνσης-ξήρανσης ήταν ιδιαίτερα ενθαρρυντικά για όλα τα σταθεροποιημένα κονιάματα, καθώς ολοκλήρωσαν τις δοκιμές με επιτυχία, χωρίς απώλειες μάζας, ούτε ενδείξεις επιφανειακής φθοράς ή μεταβολές στις διαστάσεις τους. Στο ίδιο πρόγραμμα, όπως ήταν αναμενόμενο, το μη σταθεροποιημένο κονίαμα αστόχησε πολύ νωρίς, εμφανίζοντας ρωγμές και παραμορφώσεις, καταρρέοντας τελικά, μόλις στον τρίτο κύκλο ύγρυνσης διαμέσου τριχοειδούς αναρρίχησης.

Αποτιμώντας συνολικά τη σταθεροποίηση, τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά και για τα δύο πρόσθετα. Ιδιαίτερα όσον αφορά την αντίστασή τους στην διάβρωση από το νερό, παρουσίασαν παρόμοια ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ως προς το σύνολο, όμως, των τεχνικών και μηχανικών χαρακτηριστικών (μικροδομή, δυναμικό μέτρο ελαστικότητας, θλιπτική αντοχή) η σταθεροποίηση με φυσική υδραυλική άβεστο σημείωσε υψηλότερες επιδόσεις, που βελτιώνονταν με την αύξηση του ποσοστού της στο κονίαμα, από 20 σε 25%. Φαίνεται ότι ο μηχανισμός σταθεροποίησης και στις δύο περιπτώσεις δρα κυρίως με τις υδραυλικές ενώσεις οι οποίες συμβάλλουν στην πήξη και στην άμεση αύξηση των αντοχών έναντι των αερικών ενώσεων που ευθύνονται για την επιπλέον σκλήρυνση κατά την περίοδο ωρίμανσης.

Προκειμένου να ελεγχθούν περαιτέρω οι προοπτικές αξιοποίησης της φυσικής υδραυλικής άβεστου και της σκωρίας κάδων χαλυβουργίας στη σταθεροποίηση πηλοκονιαμάτων, χρήσιμη θα ήταν η μελέτη της συμπεριφοράς των πηλοκονιαμάτων με προσθήκη μικρότερων ποσοστών των σταθεροποιητών, ώστε να μειωθεί περαιτέρω το ενεργειακό και οικονομικό κόστος. Επιπλέον χρήσιμη θα ήταν η διερεύνηση της συμπεριφοράς των πηλοκονιαμάτων σε κύκλους ψύξης-απόψυξης ώστε να αποτιμηθεί η καταλληλότητά τους για χρήση σε ψυχρά κλίματα.

## 7 Βιβλιογραφία

1. Κορωναίος Γ. Α., Σαργέντης Γ. Φ., “Δομικά Υλικά και Οικολογία”, Ερευνητικό Έργο, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2005.
2. Μπέη Γ., “Τοιχοποιία από πηλό: πειραματική διερεύνηση μηχανικών και φυσικών χαρακτηριστικών δομικών μονάδων και τοίχων από συμπιεσμένες ωμοπλίνθους”, Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2004.
3. Morel J.C., Mesbah A., Oggero M., Walker P., “Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction”, Building and Environment, 36 (2001) 1119-1126.
4. Morton T., “Conserving Earth Structures in a Damp Climate”, The Getty Conservation Institute, Terra, 2008.
5. Minke G., “Building with earth, Design and Technology of Sustainable Architecture”, Birkhauser, 2006.
6. Foley K. N., “Environmental characteristics of clays and clay Mineral deposits”, US Geological Survey, US Department of the Interior, Reston, 1999.
7. Guggenheim S., Martin R. T., “Definition of Clay and Clay Minerals: Joint Report of the AIPEA Nomenclature and CMS Nomenclature Committees”, Clays and Clay Minerals, 43 (1995) 255-256.
8. Αποστολοπούλου Μ., “Συμβολή στον χαρακτηρισμό των δομικών υλικών και πρόταση συμβατών επεμβάσεων αποκατάστασης του Ιερού Ναού της Παρηγορήτισσας στην Άρτας”, Μεταπτυχιακή εργασία, Δ.Π.Μ.Σ. Προστασία Μνημείων, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2007.
9. Κοτρώτσιου Β., Φραντζεσκάκη Ε., “Μελέτη της επίδρασης του φαινομένου της αναζύμωσης στις μηχανικές ιδιότητες των αργιλικών εδαφών”, Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Δομικών Έργων, ΤΕΙ Πειραιά, 2011.
10. Μαρακής Θ., “Διερεύνηση δυνατοτήτων παρασκευής κεραμικών μαζών από ιπτάμενη τέφρα του ΑΗΣ ΛΙΠΤΟΛ. για την παραγωγή φίλτρων”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2012.
11. Σκουμπής Ν. Ε., “Προσδιορισμός του Μεγέθους και της Κατανομής Φορτίου Κρυσταλλικής Δομής σε Σμεκτίτες με Μειωμένο Φορτίο”, Μεταπτυχιακή Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2010.
12. Τσομπανόγλου Ι. Κ., “Ορυκτολογική και γεωχημική μελέτη της αιωρούμενης σωματιδιακής ύλης και των ιζημάτων του πυθμένα στο Βόρειο τμήμα του Θερμαϊκού κόλπου”, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 2011.
13. Fink K. J., “Petroleum Engineer’s Guide to Oil Field Chemicals and Fluid”. Elsevier’s Inc., Oxford, 2012.
14. Oliver A., “Modified Earthen Materials”, Terra Literature Review-An overview of research in earthen architecture conservation, The Getty Conservation Institute, 2008.
15. Makusa P. G., “Soil stabilization methods and materials”, Dept. of Civil, Environmental and Natural resources engineering, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 2012.

16. Razavi M., *“Soil Stabilization with Traditional and Non-Traditional Stabilizer, Soil Stabilization by Using Additives”*, New Mexico Tech University, Socorro, pp. 1-30, 2008.
17. Bell F.G., *“Lime stabilization of clay minerals and soils”*, Engineering Geology, 42 (1996) 223-237.
18. Μαρκόπουλος Θ., Τριανταφύλλου Γ., *“Παραγωγή φυσικής υδραυλικής ασβέστου από ασβεστολιθικές πρώτες ύλες Δυτικής Κρήτης”*, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, 16ο Πανελλήνιο Συνέδριο Σκυροδέματος, πρακτικά σε CD-Rom, Κύπρος, Πάφος 21-23 Οκτωβρίου, 2009.
19. Παπαρρήγας Λ., *“Χρήση σκωριών χαλυβουργίας στη δομική βιομηχανία και στις οδικές κατασκευές”*, ΕΒΙΠΑΡ, 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο για την Αξιοποίηση των Βιομηχανικών Παραπροϊόντων στη Δόμηση, Θεσσαλονίκη 24-26 Νοεμβρίου, 2005.
20. Παπαγιάννη Ι., Παπαχριστοφόρου Μ., Στρατής Γ., Ζωγράφος Κ., *“Υψηλής ποιότητας σκυρόδεμα δαπέδων με αδρανή σκωρία και ίνες”*, ΕΒΙΠΑΡ, 2<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο για την Αξιοποίηση των Βιομηχανικών Παραπροϊόντων στη Δόμηση, Αιανή Κοζάνης, 1-3 Ιουνίου, 2009.
21. Παπαγιάννη Ι., Αναστασίου Ε., *“Έλεγχος καταλληλότητας σκωρίας κάδου σαν συμπληρωματική κονία για την παραγωγή σκυροδέματος”*, ΕΒΙΠΑΡ, 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο για την Αξιοποίηση των Βιομηχανικών Παραπροϊόντων στη Δόμηση, Θεσσαλονίκη 24-26/11, 2005.
22. Λιάπης Γ. Ι., *“Βελτιστοποίηση μηχανικών/φυσικών ιδιοτήτων σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου για χρήση ως αδρανούς υλικού σε σκυρόδεμα”*, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, 2014.
23. Κορωναίος Γ. Α., Πουλάκος Γ. Ι., *“Τεχνικά Υλικά, τόμος 1”*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2006.
24. Καντηράνης Ν., Φιλιππίδης Α., Βογιατζής Δ., Δρακούλης Α., Καρατάσιος Γ., *“Καταλληλότητα της παζολάνης της Νισύρου για χρήση σε παραδοσιακά κονιάματα”*, Συνέδριο της επιτροπής Οικονομικής Γεωλογίας, Ορυκτολογίας & Γεωχημείας, σ. 113-122, Θεσσαλονίκη, Οκτώβριος 2005.
25. Tingle J. S., Newman J. K., Larson S. L., Weiss C. A., Rushing J. F., *“Stabilization Mechanisms of Nontraditional Additives”*, s.l. : Transportation Research Record ,The Committee on Low-Volume Roads, 1989.
26. Kawamura M., Diamond S., *“Stabilization of clay soils against erosion loss”*, Clays and Clay Minerals, 23, (1975) 444-451.
27. Uppal H.L., Chadda L.R., *“Physico-chemical changes in the lime stabilization of black cotton soil”*, Engineering Geology, 3 (1967) 179-189.
28. George S. Z., Ponniah D. A., Little J. A., *“Effect of temperature on lime-soil stabilization”*, Construction and Building Materials, 6 (1992) 247-252.
29. Venkatarama Reddy B.V., Gupta A., *“Characteristics of cement-soil mortars”*, Materials and Structures, 38 (2005) 639-650.
30. Maslehuddin A. M., Saadi M. M., *“Effect of magnesium sulfate and sodium sulfate in the durability performance of plain and blended cements”* ACI Materials, 92, (1995) 15–24.
31. Tasong W. A., Wild S., Tilley J. D., *“Mechanisms by which ground granulated blastfurnace slag prevents sulphate attack of lime-stabilised kaolinite”*, Cement and Concrete Research, 29 (1999) 975–982.

32. Oti J.E., Kinuthia J.M., *“Stabilised unfired clay bricks for environmental and sustainable use”*, Applied Clay Science, 58 (2012) 52–59.
33. Oti J.E., Kinuthia J.M., *“Designed non-fired clay mixes for sustainable and low carbon use”*, Applied Clay Science, 59–60 (2012) 131–139.
34. Rashmi S., Jagadish K.S., Nethravathi S., *“Stabilized Mud Mortar”*, International Journal of Research in Engineering and Technology, 3 (2014) 26-29.
35. Brooks M. R., *“Soil stabilization with fly ash and rice husk ash”*, International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences, 1 (2009) 209-217.
36. Rahmat M.N., Ismail N., *“Sustainable stabilization of the Lower Oxford Clay by non-traditional binder”*, Applied Clay Science, 52 (2011) 199–208.
37. Vichan S., Rachan R., Horpibulsuk S., *“Strength and microstructure development in Bangkok clay stabilized with calcium carbide residue and biomass ash”*, Science Asia, 39 (2013) 186–193.
38. Kamei T., Ahmed A., Ugai K., *“Durability of soft clay soil stabilized with recycled Bassanite and furnace cement mixtures”*, Soils and Foundations, 53 (2013) 155–165.
39. Malekzadeh M., Bilsel H., *“Use of Posidonia Oceanica Ash in Stabilization of Expansive Soils”*, Marine Georesources & Geotechnology, 32 (2014) 179–186.
40. Zinn W.A., *“Cement Modified Earthen Mortar – An Investigation of Soil-Cement Performance Characteristics at Three Southwestern National Monuments”*, Thesis, Master of science, University of Pennsylvania, 2005.
41. Moropoulou A., Koroneos C., Karoglou M., Aggelakopoulou E., Bakolas A., Dompros A., *“Life cycle analysis of mortars and its environmental impact”*, in Life Cycle Analysis Tools for “Green”, Materials and Process Solution, Vol. 895, eds S. Papasavva and V. Fthinakis, Materials Research Society, Pittsburgh, 2006, pp. 235-241.
42. Serjun V. Z., Mirtic B., Mladenovic A., *“Evaluation of Ladle Slag as potential material for building and civil engineering”*, Materials and technology 47 (2013) 543–550.
43. Αναγνωστοπούλου Σ., *“Μεθοδολογία αποτίμησης του ρόλου των αδρανών για τον επιτελεστικό σχεδιασμό κονιαμάτων αποκατάστασης”*, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, 2012.
44. EN 932-1:1999, *“Tests for general properties of aggregates Part 1: Methods for sampling”*.
45. EN 932-2:1999, *“Tests for general properties of aggregates Part 2: Methods for reducing laboratory samples”*.
46. EN 933-1:2012, *“Tests for geometrical properties of aggregates-Determination of particle size distribution. Sieving method”*.
47. Χρηστάρας Β., *“Εργαστηριακές και επί τόπου δοκιμές Εδαφομηχανικής”*, ΤΕΕ, Αθήνα, 2006.
48. AASHTO T-89/76, *“Standard Method of Test for Determining the Liquid Limit of Soils”*.
49. ASTM D-4318/83, *“Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils”*.
50. AASHTO T-90/70, *“Standard Method of Test for Determining the Plastic Limit and Plastic Index of Soils”*.
51. AASHTO T-88/78, *“Standard Method of Test for Particle Size Analysis of Soils”*.
52. ASTM D-422/72, *“Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils”*.
53. Normal 13/83, *“Dosaggio dei sali solubili”*, CNR-ICR.

54. Καραλής Κ., “Δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα από ιπτάμενη τέφρα”, Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2010.
55. Νταγκουνάκη Κ., “Αξιολόγηση Ανθρακικών Πετρωμάτων της Δυτ. Μακεδονίας και Μελέτη Εφαρμογής τους σε Κεραμικά και Υάλους”, Διδακτορική Διατριβή, Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, 2006.
56. Mackenzie R.C., “*Differential Thermal Analysis 1-2*”, 1st edn, Academic Press, London, 1970.
57. Chiari G., Santarelli M.L., Torraca G., “*Caratterizzazione delle malte antiche mediante l’analisi di campioni non frazionati*”, *Materiali e Strutture*, 3 (1992) 111-137.
58. Bakolas A., Biscontin G., Moropoulou A., Zendri E., “*Characterization of structural byzantine mortars by thermogravimetric analysis*”, *Thermochimica Acta*, 321 (1998) 151-160.
59. Μοροπούλου Α., “Υλικά και επεμβάσεις συντήρησης”, Διδακτικές σημειώσεις Β' Κατεύθυνσης, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2009.
60. EN 1015-3:1999, “*Methods of test for mortar for masonry Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*”.
61. EN 1015-6:1999, “*Methods of test for mortar for masonry Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar*”.
62. EN 1015-7:1999, “*Methods of test for mortar for masonry Part 7: Determination of air content of fresh mortar*”.
63. EN 1015-8:1999, “*Methods of test for mortar for masonry Part 8: Determination of the water retentivity of fresh mortar*”.
64. EN 1015-11:1999, “*Methods of test for mortar for masonry Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortars*”.
65. Ζερβός Σ., “Διερεύνηση κριτηρίων και μεθόδων αποτίμησης /επεμβάσεων συντήρησης χαρτιού”, Μεταπτυχιακή εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, 2000.
66. Σφακιωτάκης Ε., “*Μετασυλλεκτική Φυσιολογία και Τεχνολογία Νωπών Οπωροκηπευτικών Προϊόντων*”, Εκδόσεις Τυρομαν, Θεσσαλονίκη, 2004.
67. EN 15886:2010, “*Conservation of cultural property-Test methods-Colour measurement of surfaces*”.
68. Ζερβός Σ., “*Κριτήρια και μεθοδολογία αποτίμησης καταλληλότητας επεμβάσεων συντήρησης χαρτιού*”, Διδακτορική διατριβή, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, 2004.
69. Giesche H., “*Mercury Porosimetry: a General (Practical) Overview*”, *Particle and Particle Systems Characterization*, 23 (2006) 9-19.
70. Houben H., Guillaud H., “*Traité de Construction en Terre*”, CRATerre, Parenthèses, 2nd ed., 1995.
71. Moropoulou A., Bakolas A., Aggelakopoulou E., Odatzidou A., Teas C., Papageorgiou D., “*Estimation of elastic constants of restoration mortars, used on historic masonries restoration interventions, via ultrasonic technique and correlation to their mechanical and microstructure parameters*”, *Materials issues in Art and Archaeology VII*, vol. 852, eds P.Vandiver, J.L. Mass and A. Murray, Materials Research Society, Pittsburgh, 2005, pp.115-120.
72. Αγγελακοπούλου Ε., “*Κριτήρια και Μέθοδοι Αποτίμησης Φυσικοχημικών και Μηχανικών Χαρακτηριστικών κατά την διερεύνηση Αριστοποίησης Συμβατών Κονιαμάτων και Σκυροδεμάτων*”, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, 2006.



73. Τάσιος Θ.Π., *“Η μηχανική της τοιχοποιίας”*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1992.
74. Giles R.V., *“Μηχανική των Ρευστών και Υδραυλική”* (Μετάφραση: Νουτσόπουλος Γ., Μέγγος Α. 1986), McGraw-Hill, New York –ΕΣΠΙ, Αθήνα, 1962.
75. EN 15801:2010, *“Conservation of cultural property - Test methods - Determination of water absorption by capillarity”*.
76. NORMAL 11/85, *“Assorbimento d'acqua per capillarità: coefficiente di assorbimento capillare”*.
77. EN 1015-18:2002, *“Methods of test for mortar for masonry Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar”*.
78. Warren J., *“Earthen architecture”*, Sri Lanka National Committee of ICOMOS : Sri Lanka Central cultural Fund, Colombo, 1993.
79. EN 1097-3:1998, *“Tests for mechanical and physical properties of aggregates Part 3: Determination of loose bulk density and voids”*.
80. EN 13139:2002, *“Aggregates for mortar”*.
81. EN 459:1-2010, *“Building lime- Definitions, specifications and conformity criteria”*.
82. Karoglou M., Bakolas A., Kouloumbi N., Moropoulou A., *“Reverse engineering methodology for studying historic buildings coatings: The case study of the Hellenic parliament neoclassical building”*, Progress in Organic Coatings, 72 (2011) 202-209.
83. Bakolas A., Moropoulou A., Aggelakopoulou E., *“Evaluation of pozzolanic activity of natural and artificial pozzolans by thermal analysis”*, Thermochemica Acta, 420 (2004) 135–140.
84. Bakolas A., Aggelakopoulou E., Moropoulou A., Anagnostopoulou. S., *“Evaluation of pozzolanic activity and physicochemical characteristics in Metakaolin-Lime pastes”*, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 84 (2006)1, 157–163.
85. Chirai G., Santarelli M.L., Torraca G., *“Problemi nell’ analisi strumentale di calcestruzzi pozzolanici antichi”*, in Calcestruzzi Antichi e Moderni, Scienza e Beni Culturali IX, Libreria Progetto, Padova, 1993, pp 275-286.
86. Biscontin G., Bakolas A., Moropoulou A., Zendri E., *“The influence of soluble salts in thermal decomposition of carbonates in traditional mortars”*, in Giornate Mediterranee di Calorimetria ed Analisi Termica, XVII Conference AICAT-GICAT, VI Meeting, Chia Laguna, 1995. p.45.
87. Πινέλη Χ. Τριανταφυλλιά, *“Συσχέτιση αποτελεσμάτων δοκιμών υπερηχοσκόπησης, μηχανικών αντοχών και χαρακτηριστικών μικροδομής δομικών λίθων ιστορικών τοιχοποιιών”*, Μεταπτυχιακή εργασία, Δ.Π.Μ.Σ. Προστασία Μνημείων, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, 2003.