

Η Διατήρηση in situ των Πήλινων Αρχιτεκτονικών Κατασκευών στην Ανασκαφή του Δισπηλιού

Παναγιώτης Θεουλάκης
Αλέξης Στεφανής
Εργαστήριο Συντήρησης Λίθου
ΤΕΙ Αθήνας

Κατάσταση διατήρησης των δομικών στοιχείων

- Τα αρχιτεκτονικά στοιχεία από πηλό στο χώρο της ανασκαφής παρουσιάζουν εκτεταμένη και ακανόνιστη αποσάθρωση.
- Παρατηρείται απώλεια υλικού, αλλοίωση στην μορφή και το σχήμα των κατασκευών.
- Τα παραπάνω είναι συνέπεια της ιδιοσυστασίας του υλικού σε συνδυασμό με την επίδραση των παραγόντων του περιβάλλοντος σε αυτό.

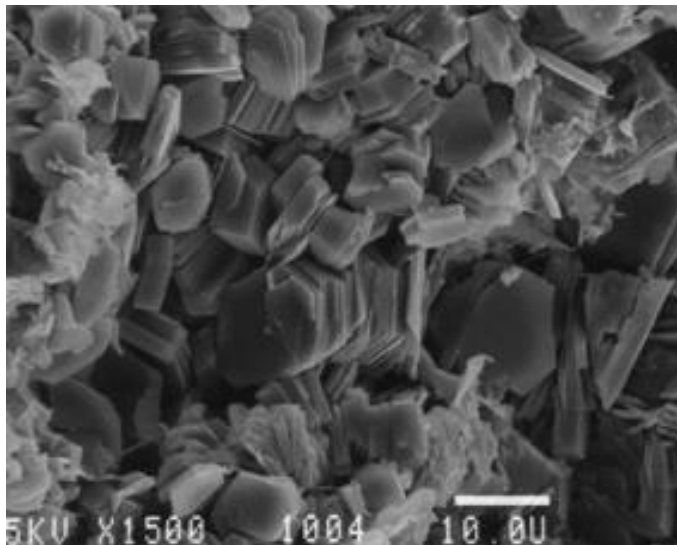


Ζητούμενο

- Να διατηρήσουμε in situ τα ευρήματα από πηλό
- Να αναστείλουμε τη διάβρωση που οφείλεται κυρίως στους περιβαλλοντικούς παράγοντες
- Να αποκαταστήσουμε την αρχική συνοχή και ανθεκτικότητα του υλικού

Επίδραση του Περιβάλλοντος – Φύση του Υλικού

- Το περιβάλλον της ανασκαφής χαρακτηρίζεται από υψηλή σχετική υγρασία και έντονες μεταβολές της θερμοκρασίας.
- Ο πηλός είναι μίγμα ορυκτών αργιλοπυριτικής συστάσεως και άλλων ενώσεων. Ορισμένες άργιλοι, όπως ο *ιλλίτης* και ο *μονμοριλλονίτης*, έχουν την ιδιότητα όταν προσροφούν νερό σε διαπλεγματικές θέσεις να διογκώνονται. Κατά την ξήρανση αποβάλλεται το νερό και οι άργιλοι συρρικνώνονται και μετατρέπονται σε σκόνη (θιξοτροπία).



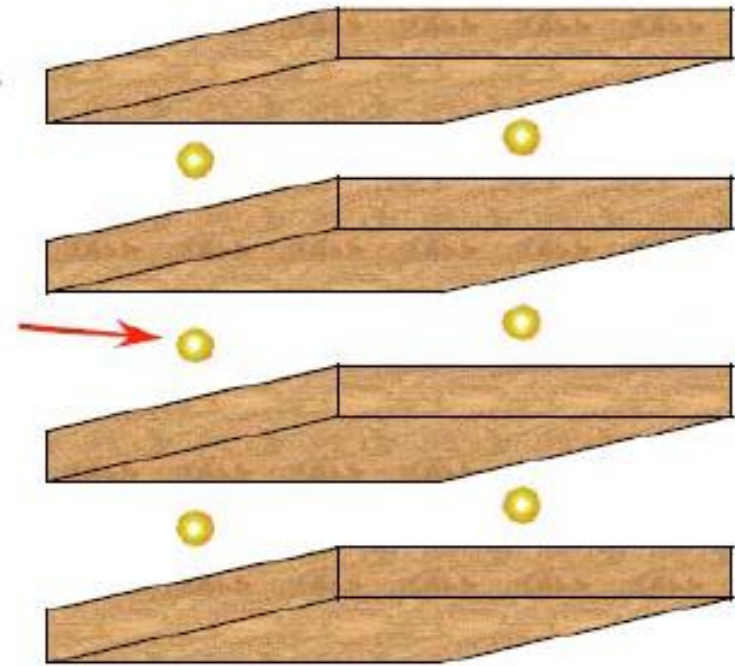
Επίδραση του Περιβάλλοντος – Φύση του Υλικού

- Με την πτώση της θερμοκρασίας κάτω από το 0°C το νερό που έχει διεισδύσει στο εσωτερικό του πηλού μπορεί να μετατραπεί κατά θέσεις σε πάγο με αποτέλεσμα την ανάπτυξη εσωτερικά σημαντικών πιέσεων.
- Μέσω του νερού που απορροφάται, προκαλείται απόθεση υδατοδιαλυτών αλάτων στα αντικείμενα.



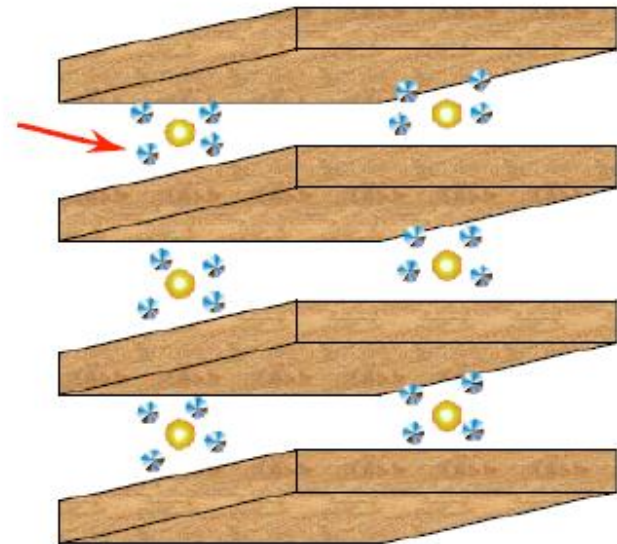
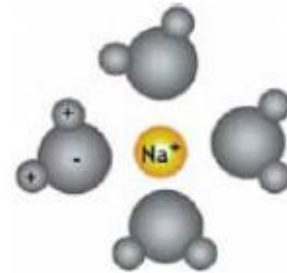
Η δομή του πηλού

- Φυλλώδης δομή
- Τα στρώματα έχουν αρνητικό φορτίο λόγω της αντικατάστασης του Al^{3+} από Si^{4+}
- Τα κατιόντα K^+ και Na^+ είναι χαλαρά συνδεδεμένα μεταξύ των στρωμάτων κάνοντας το συνολικό φορτίο ουδέτερο



Εισβολή του νερού

- Το νερό εισβάλλει μεταξύ των στρωμάτων του πηλού
- Τα μόρια του νερού κυκλώνουν τα ιόντα (όπως όταν διαλύονται τα άλατα)
- Έτσι τα στρώματα διαχωρίζονται από το νερό

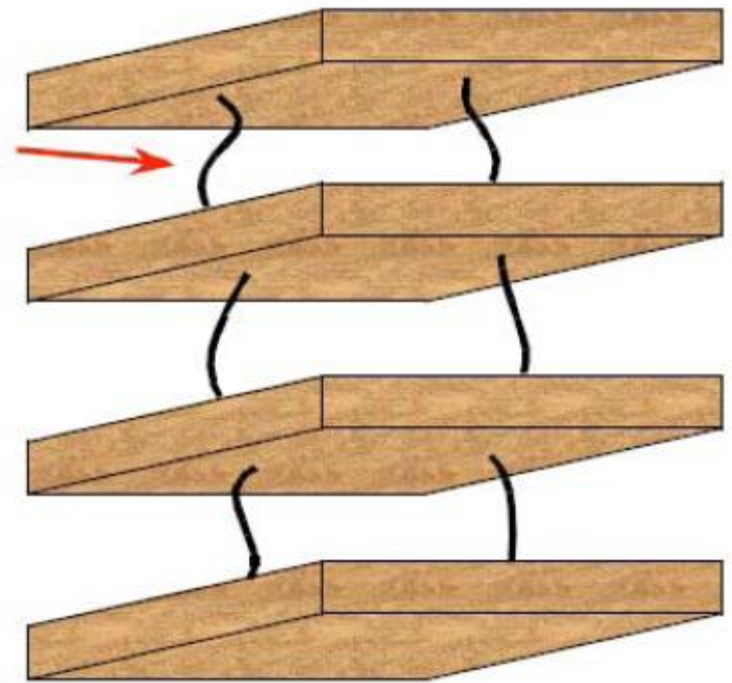


Η στερέωση ως κατεργασία συντήρησης

- Αποκατάσταση της αρχικής συνοχής και των μηχανικών ιδιοτήτων
- Ανθεκτικότητα του κατεργασμένου υλικού
- Συμβατότητα υλικών στερέωσης και πηλού
- Βάθος εμποτισμού
- Εμποτισμός=αλλαγές στη δομή του υλικού
- Υλικά στερέωσης

Τασιενεργές ουσίες (surfactants)

- Οι τασιενεργές ουσίες μειώνουν την επιφανειακή τάση όταν προστεθούν στο νερό
- Επίσης μειώνουν την διόγκωση του πηλού
- Εισέρχονται μεταξύ των στρωμάτων του πηλού και απωθούν το νερό



Κριτήρια επιτελεσιμότητας

- Φυσικές ιδιότητες που να του επιτρέπουν καλή συνεργασία με τον πηλό, χωρίς να τον καταστρέφει, δηλαδή, μηχανικές αντοχές, θερμικό συντελεστή διαστολής, διαπερατότητα σε νερό, ατμούς κ.α., που να είναι συμβατά με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του πηλού.
- Αισθητική συμβατότητα, να μην αλλοιώνει δηλαδή την εμφάνιση του πηλού.
- Χημική σταθερότητα
- Ρύθμιση της διάχυσης του νερού και των υδρατμών στο προς στερέωση υλικό, έτσι ώστε η δράση των διαβρωτικών φαινομένων να είναι ηπιότερη.

ΣΥΝΕΠΩΣ:

- Ο κυριότερος παράγοντας φθοράς είναι η παρουσία νερού σε συνδυασμό με την έντονες μεταβολές της θερμοκρασίας που οδηγεί σε:
 - Κύκλους ύγρυνσης και ξήρανσης του υλικού και
 - Φασική μεταβολή του νερού, δηλαδή δράση του παγετού.
- Κρίθηκε απαραίτητο να στερεωθούν τα πήλινα ευρήματα και παράλληλα να μειωθεί η είσδυση και δράση του νερού.
- Απαιτείται σχεδιασμός πειραματικής διαδικασίας ώστε να λαμβάνει υπ' όψιν τους παράγοντες φθοράς και να καλύπτει όλα τα είδη πηλών.
- Το κατάλληλο υλικό εμποτισμού πρέπει να ελαχιστοποιεί τη δράση των παραγόντων φθοράς, ενισχύοντας παράλληλα τη μηχανική αντοχή και τη συνοχή της δομής των αντικειμένων.
- Το εμποτισμένα δοκίμια θα υποβληθούν σε τεχνητή γήρανση για να παρατηρηθεί η συμπεριφορά τους. Η τεχνητή γήρανση θα γίνει με κύκλους κρυστάλλωσης θειικού νατρίου και κύκλους ψύξης-τήξης.

Σχεδιασμός πειραματικής διαδικασίας: Στάδια μελέτης

Κρίθηκε σκόπιμο να υπολογιστούν τα εξής φυσικά χαρακτηριστικά σε σπαράγματα που λήφθηκαν από τον χώρο της ανασκαφής :

- Μέτρηση ενεργού πορώδους
- Συντελεστής υδαταπορρόφησης
- Βαθμός υδατοκορεσμού
- Προσδιορισμός διαλυτών αλάτων

Επίσης μελετήθηκαν:

- Η αντοχή σε θλίψη (προσδιορισμός μηχανικής αντοχής)
- Το χρώμα
- Η θιξοτροπική συμπεριφορά
- Η κοκκομετρία

(Οι παραπάνω μετρήσεις έγιναν πριν και μετά την στερέωση με εξαίρεση την κοκκομετρική ανάλυση.)

Σχεδιασμός πειραματικής διαδικασίας: Υλικά κατεργασίας

Τα 5 υλικά στερέωσης που επιλέχθηκαν είναι:

- 2 είδη **نانο-διασποράς υδροξειδίου του ασβεστίου**
(CaLoSiL E25 και CaLoSiL IP25)
- 1 **ακρυλικό πολυμερές**
(Hydrogrund 5% κ.ο. σε νερό)
- 2 είδη **αλκοξυσιλανίων**
(Funcosil Steinfestiger 100 και Funcosil SL το οποίο προκαλεί υδροφοβίωση στο αντικείμενο)

Σχεδιασμός πειραματικής διαδικασίας

Μορφοποίηση δοκιμίων

Από τα σπαράγματα μορφοποιήθηκαν:

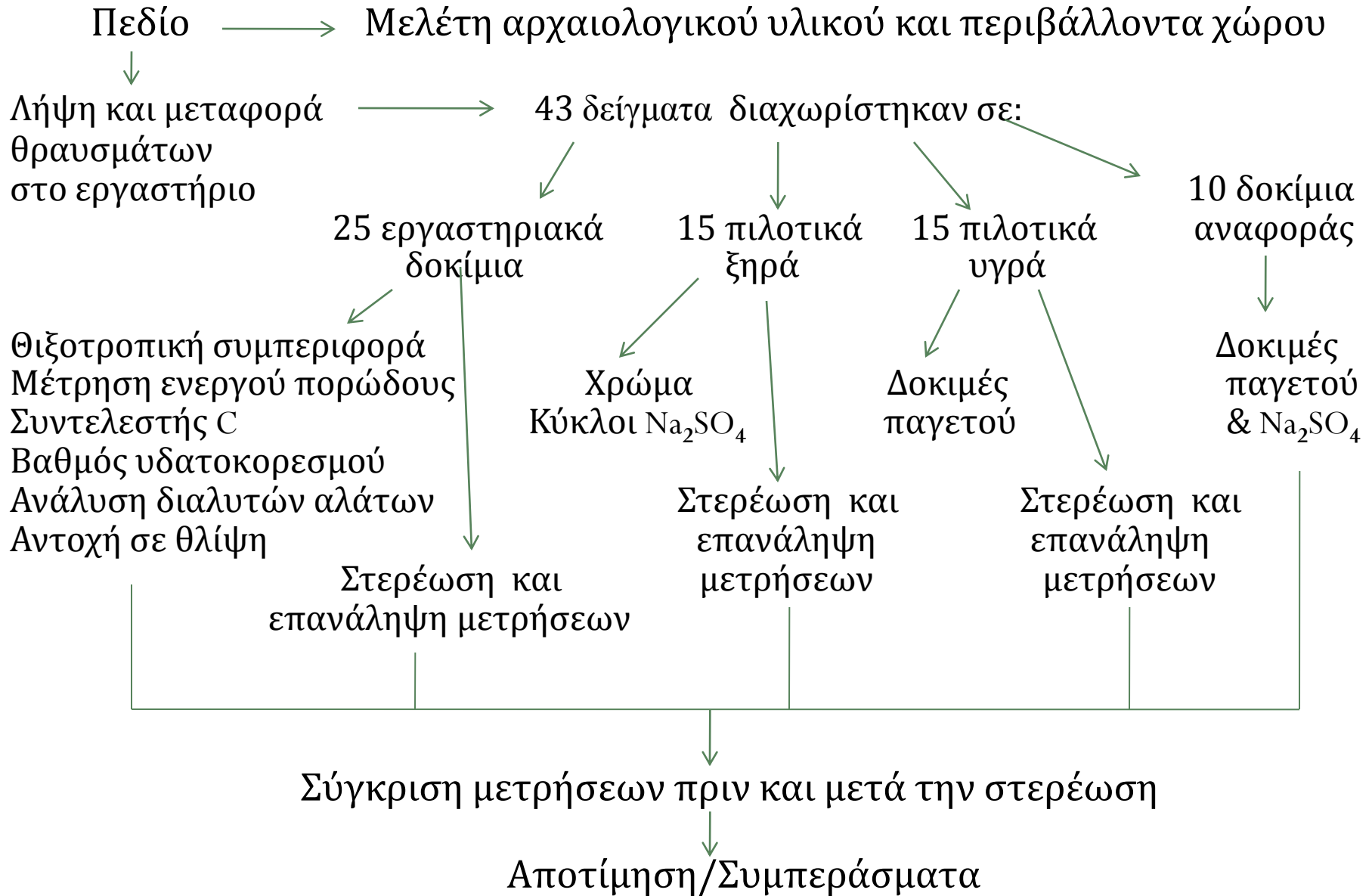
- Κυβικά δοκίμια διαστάσεων περίπου 4x4x4 cm. 25 από αυτά αποτελούν την ομάδα των εργαστηριακών δοκιμίων και 5 δοκίμια αναφοράς. Στα 25 δοκίμια εφαρμόστηκαν σε 2 κύκλους, τα 5 στερεωτικά με φυσική ρόφηση. Κάθε είδος στερεωτικού εφαρμόστηκε σε 2 κόκκινα, 2 φαιά και 1 τεφρό.
- Ακανόνιστα δοκίμια διαστάσεων από 5x5x5 έως 3x3x3 cm τα οποία χωρίστηκαν σε
 - 15 πιλοτικά ξηρά (εφαρμόστηκαν 2 κύκλοι στερεωτικού με ψεκασμό, ενώ ήταν ξηρά)
 - 15 πιλοτικά υγρά (εφαρμόστηκαν 2 κύκλοι στερεωτικού με ψεκασμό, ενώ ήταν υγρά.)
 - Δοκίμια αναφοράς (δεν στερεώθηκαν)Κάθε είδος στερεωτικού εφαρμόστηκε σε 1 κόκκινο, 1 φαιό και 1 τεφρό δοκίμιο.

Σχεδιασμός πειραματικής διαδικασίας:

Επεξεργασία δοκιμίων

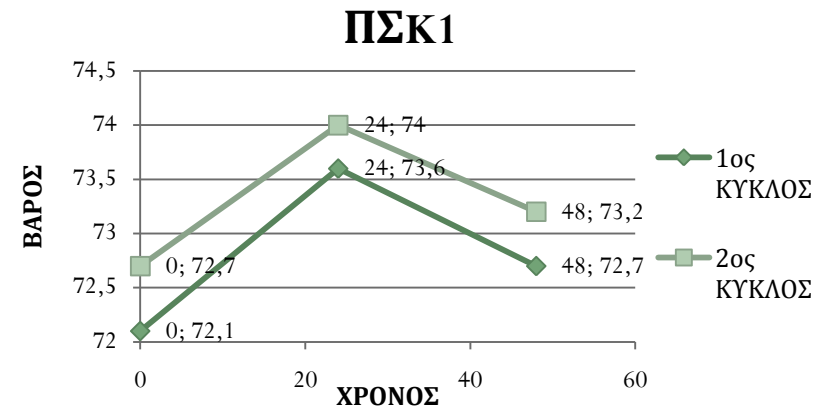
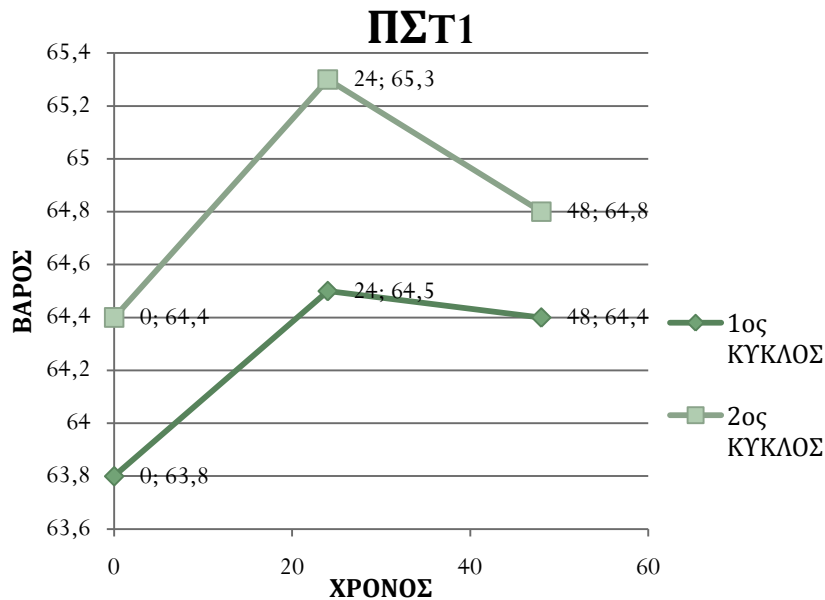
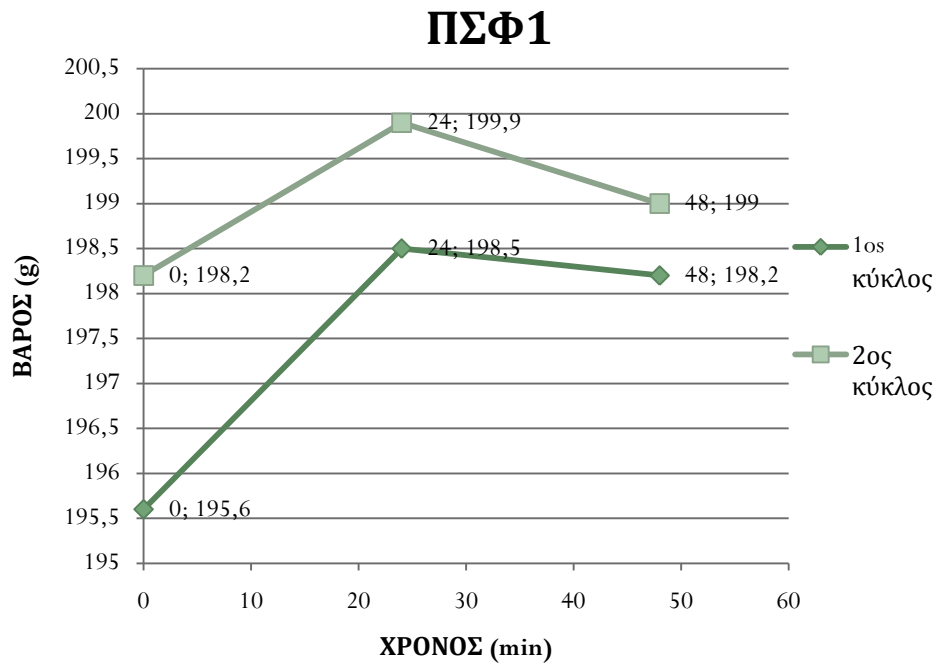
- Τα εργαστηριακά δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη των φυσικών χαρακτηριστικών πριν και μετά την στερέωση.
- Στα ξηρά πιλοτικά δοκίμια έγιναν οι δοκιμές τεχνητής γήρανσης με κρυστάλλωση θειικού νατρίου και η μέτρηση του χρώματος.
- Στα υγρά πιλοτικά έγιναν οι κύκλοι τεχνητής γήρανσης σε παγετό (ψύξης – απόψυξης) και η μέτρηση του χρώματος.

Σχεδιασμός Πειραματικής Διαδικασίας



Αποτελέσματα

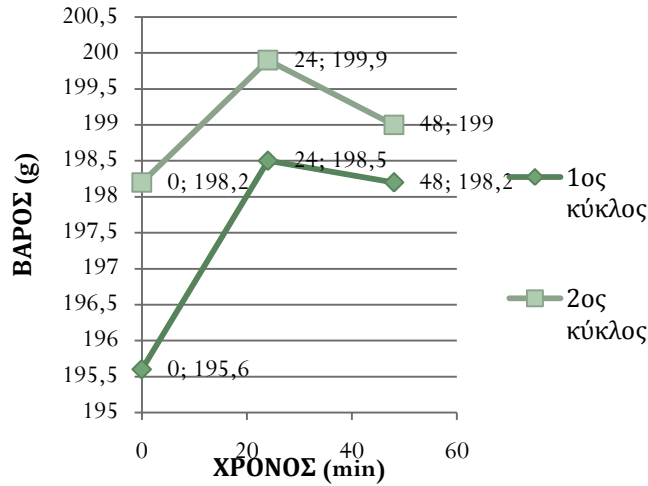
Στάδιο στερέωσης: Σύγκριση της απορρόφησης υλικού κατεργασίας με βάση το είδος του πηλού.



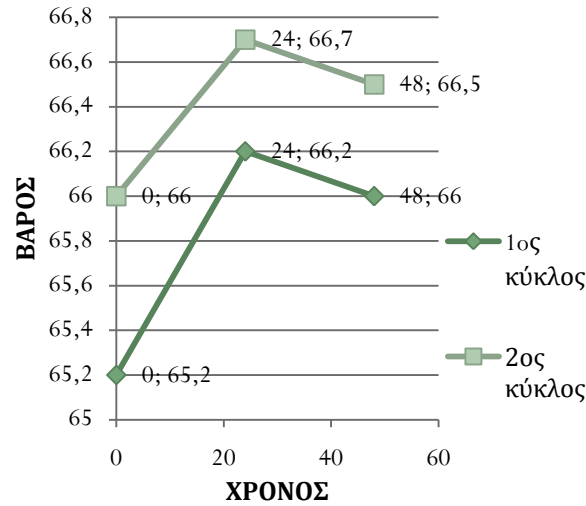
Όλα τα δοκίμια (Πιλοτικά Ξηρά), έχουν στερεωθεί με Calosil E-25. Παρατηρείται από τα διαγράμματα ότι τα φαιά έχουν την μεγαλύτερη απορροφητικότητα, έπειτα τα κόκκινα και τέλος τα τεφρά.

Στάδιο Στερέωσης: Σύγκριση της απορροφητικότητας πηλών με βάση το είδος του στερεωτικού

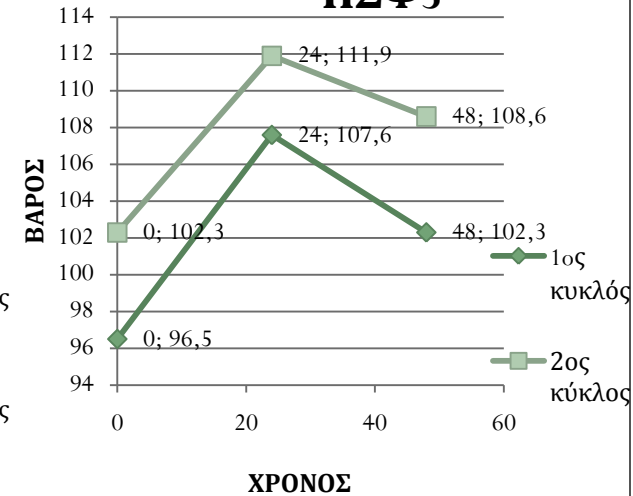
ΠΣΦ1



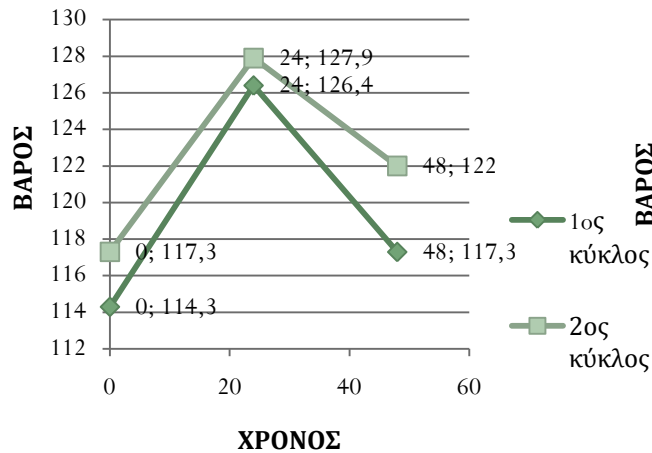
ΠΣΦ2



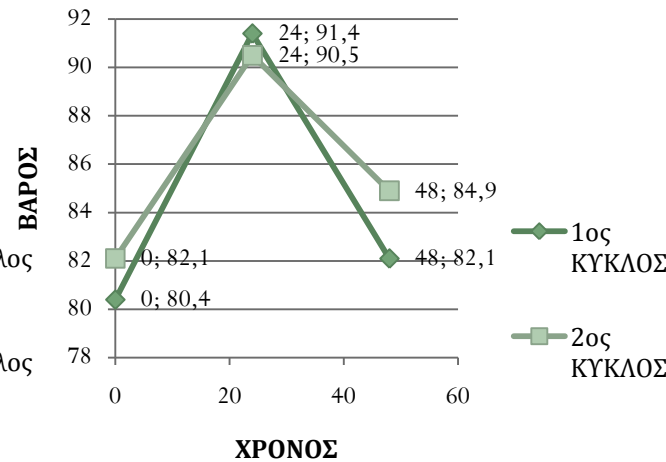
ΠΣΦ3



ΠΣΦ4



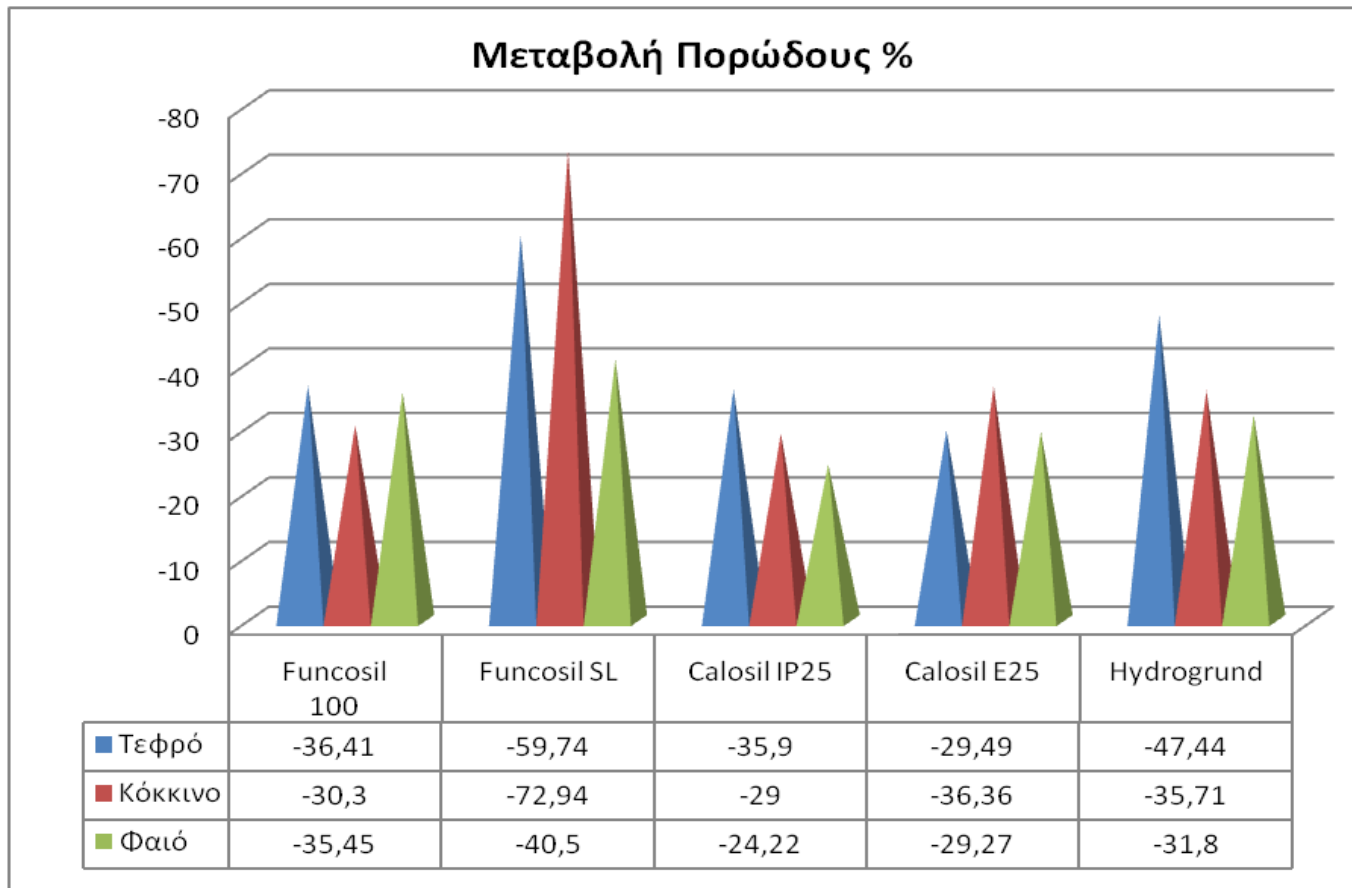
ΠΣΦ5



Τα δοκίμια είναι Πιλοτικά ξηρά Φαιά, εμποτισμένα με:

- 1: Calosil E-25
- 2: Calosil IP-25 (μέγιστη-ταχύτατη απορρόφηση)
- 3: Funcosil 100
- 4: Funcosil SL (αργή απορρόφηση)
- 5: Hydrogrund (ελάχιστη - αργή απορρόφηση)

Ενεργό Πορώδες

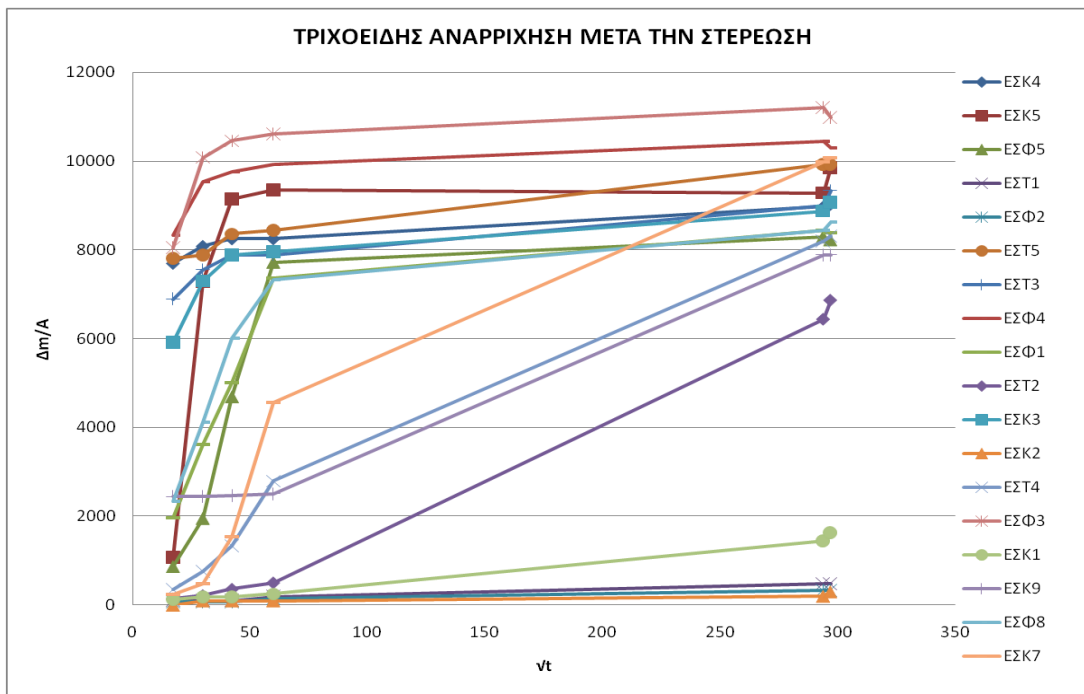
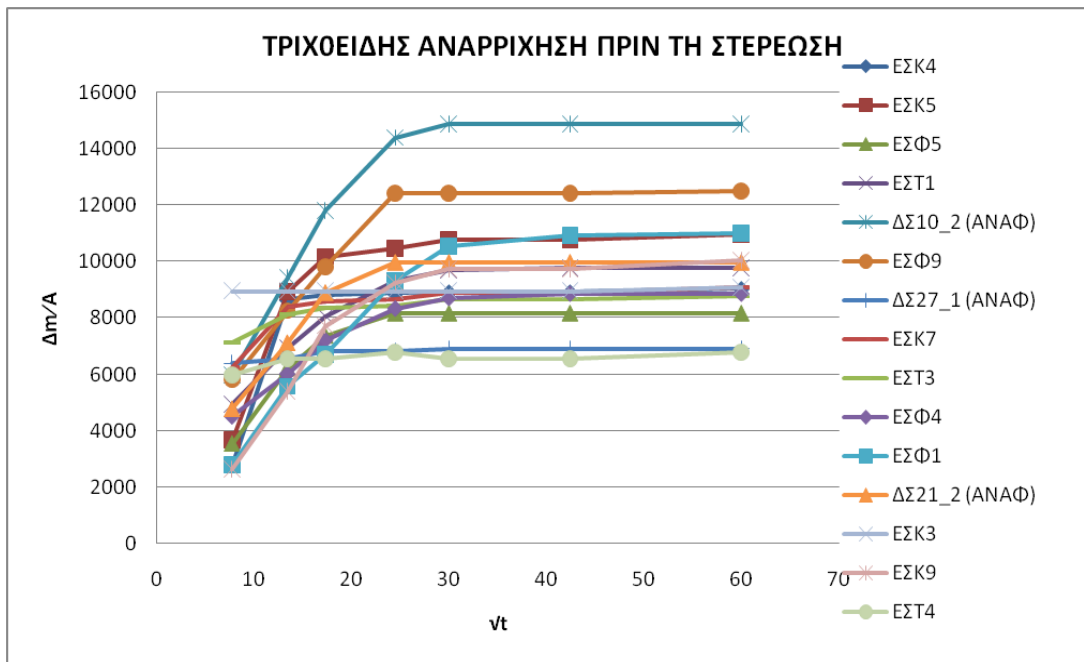


Το ενεργό πορώδες έχει μειωθεί σε ποσοστό από 24% έως 73%
Τη δραστικότερη μείωση επέφερε το Funcosil SL

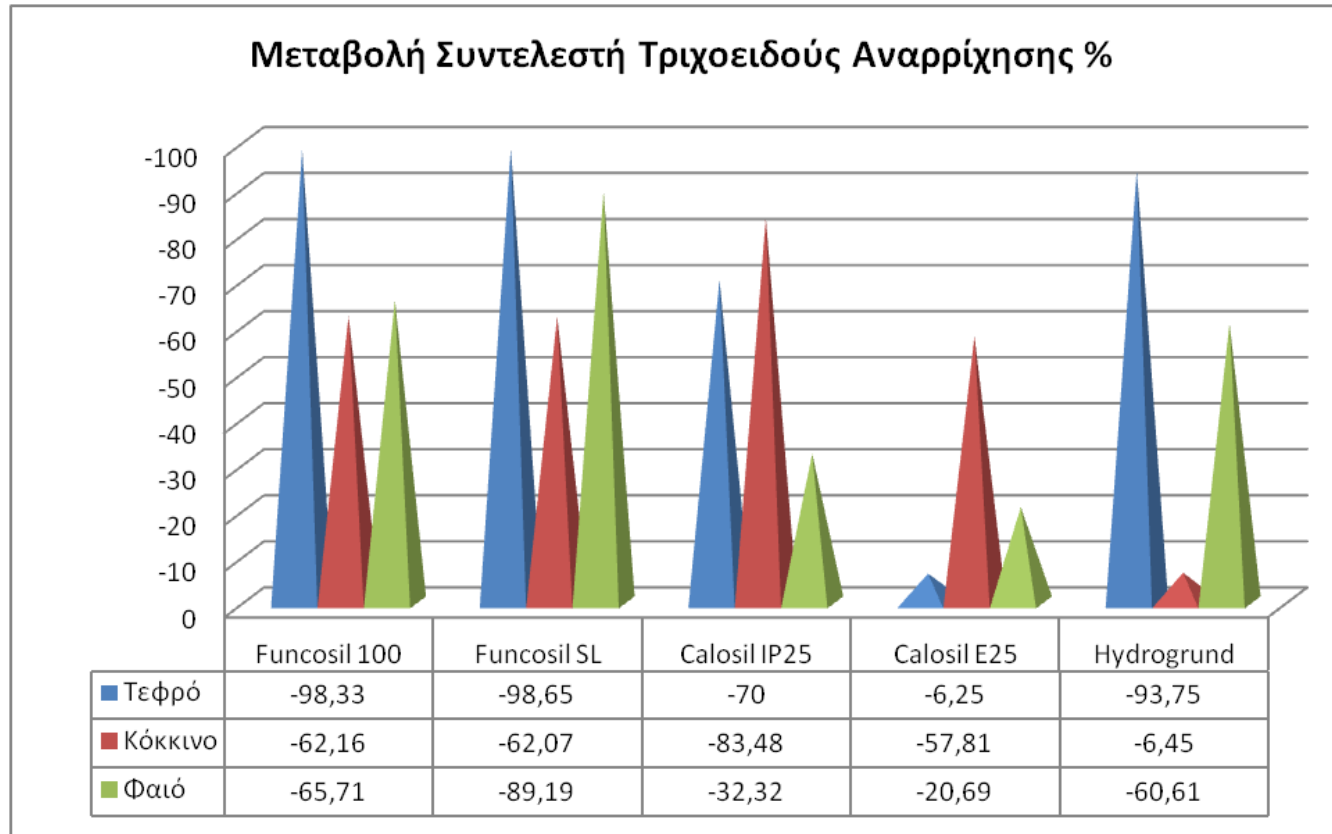
* Η μέτρηση έγινε σύμφωνα με το RILEM CPC 11.3

Τριχοειδής Αναρρίχηση

Τα δοκίμια που έχουν απορροφήσει λιγότερο μέσω της τριχοειδούς αναρρίχησης είναι αυτά που έχουν στερεωθεί με Funcosil SL, το οποίο είναι αποτελεσματικό σε όλα τα είδη πηλού και με Funcosil 100 το οποίο είναι αποτελεσματικό για τα τεφρά και τα κόκκινα.

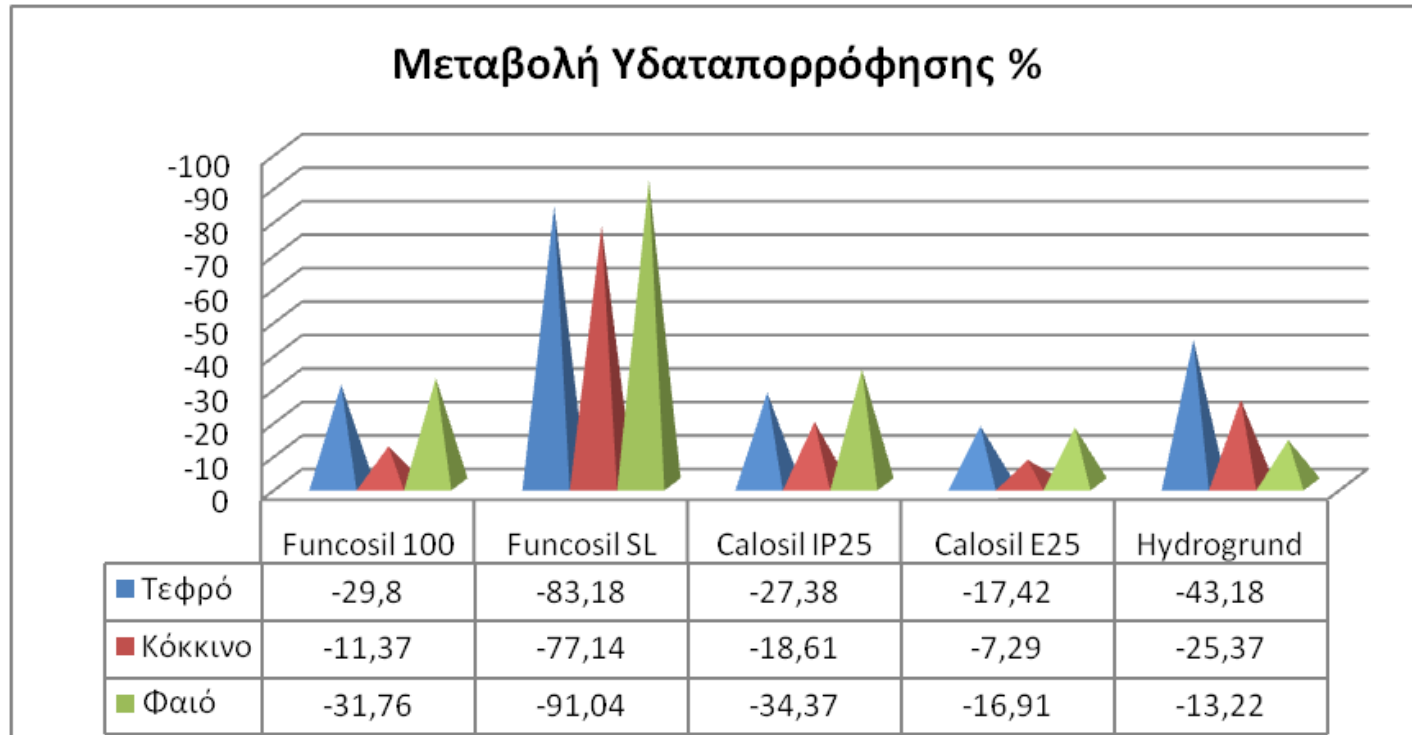


Συντελεστής Τριχοειδούς Αναρρίχησης C



Τα δοκίμια που έχουν τον χαμηλότερο συντελεστή C είναι αυτά που έχουν εμποτισθεί με Funcosil SL, το οποίο είναι αποτελεσματικό σε όλα τα είδη πηλού και με Funcosil 100 το οποίο είναι αποτελεσματικό για τα κόκκινα και τα τεφρά.

Υδαταπορρόφηση



Μετά την στερέωση το μέγιστο ποσοστό υδαταπορρόφησης έχει μειωθεί από 7% έως 91%. Τα καλύτερα αποτελέσματα έχει το Funcosil SL.

* Η διαδικασία έγινε βάσει του: “Jeanne Marie Teutonico, A laboratory manual for architectural conservators,, ICCROM, Rome, 1998”

Μετρήσεις Χρώματος Δοκιμίων

Μακροσκοπική Παρατήρηση



Πιλοτικά στεγνά δοκίμια
μετά τους 2 κύκλους
εφαρμογής στερεωτικού:
Η 1^η σειρά από κάτω έχει
στερεωθεί με Calosil E-25
Και αντίστοιχα:
Η 2^η με Calosil IP-25
Η 3^η με Funcosil-100
Η 4^η με Funcosil SL
Η 5^η με Hydrogrund

Είναι εμφανές ότι αυτό που επηρεάζει λιγότερο την όψη των δοκιμίων είναι το Hydrogrund (5^η σειρά) και έπειτα το Funcosil SL (4^η σειρά). Τα δοκίμια που έχουν στερεωθεί με Calosil (1^η, 2^η σειρά) έχουν άσπρες ασβεστιτικές αποθέσεις και αυτά που είναι με το Funcosil (3^η, 4^η σειρά) έχουν αποκτήσει σκουρότερη απόχρωση.

Ποιοτικός & ποσοτικός προσδιορισμός αλάτων με TEST STRIPS “MERCCK” (Nitrate test, Test Chloride, Sulfate Test)

• Φαιό Υγρό

- Δεν περιέχει χλωριόντα (Cl^-)
- Έχει Θειικά (SO_4^{2-}) (800mg/l)
- Δεν έχει νιτρώδη (NO_2^-)
- Έχει νιτρικά (NO_3^-) (500mg/l)

• Κόκκινο Υγρό

- Δεν περιέχει χλωριόντα (Cl^-)
- Έχει Θειικά (SO_4^{2-}) (800mg/l)
- Δεν έχει νιτρώδη (NO_2^-)
- Έχει νιτρικά (NO_3^-) (500mg/l)

• Φαιό Ξηρό

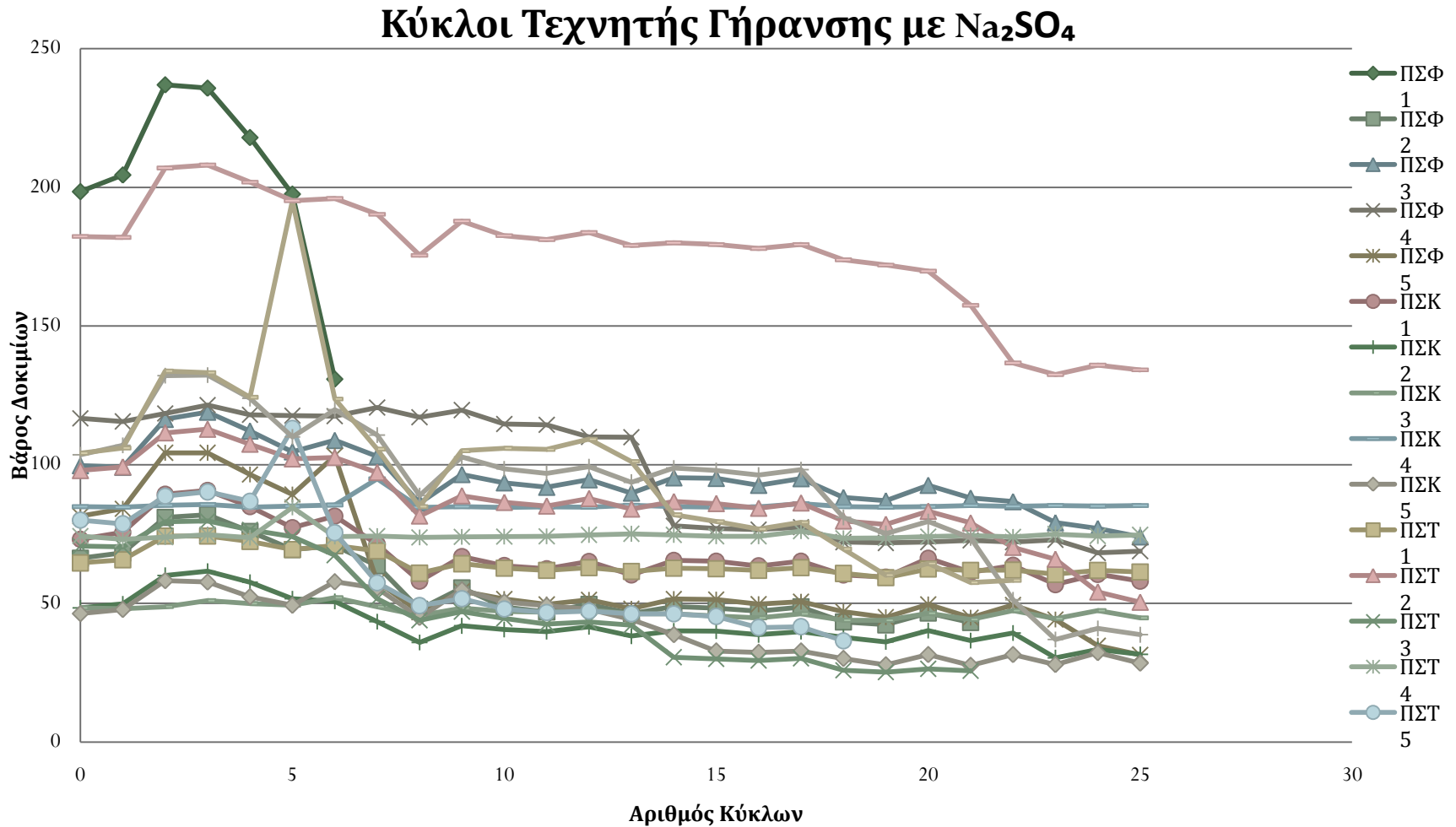
- Δεν περιέχει χλωριόντα (Cl^-)
- Έχει Θειικά (SO_4^{2-}) (>200mg/l)
- Δεν έχει νιτρώδη (NO_2^-)
- Έχει νιτρικά (NO_3^-) (200mg/l)

• Τεφρό Ξηρό

- Δεν περιέχει χλωριόντα (Cl^-)
- Έχει Θειικά (SO_4^{2-}) (>200mg/l)
- Έχει νιτρώδη (NO_2^-) (10mg/l)
- Έχει νιτρικά (NO_3^-) (50mg/l)

Λόγω της παραλίμνιας θέσης του οικισμού Δισπηλιού και των οργανικών καταλοίπων, τα νιτρώδη άλατα παρουσιάζουν αυξημένη συγκέντρωση.

Τεχνητή Γήρανση: Κύκλοι κρυστάλλωσης Θειικού Νατρίου



Επιταχυνόμενη γήρανση: Κύκλοι κρυστάλλωσης θειικού νατρίου

Στερεωτικό	Δοκίμια	Κύκλοι	Δοκίμια	Κύκλοι	Δοκίμια	Κύκλοι
Calosil E-25	ΠΣΦ 1	6	ΠΣΚ 1	25	ΠΣΤ 1	Δεν Κατ
Calosil IP-25	ΠΣΦ 2	21	ΠΣΚ 2	23	ΠΣΤ 2	22
Funcosil 100	ΠΣΦ 3	25	ΠΣΚ 3	Δεν Κατ	ΠΣΤ 3	10
Funcosil SL	ΠΣΦ 4	15	ΠΣΚ 4	Δεν Κατ	ΠΣΤ 4	Δεν Κατ
Hydrogrund	ΠΣΦ 5	7	ΠΣΚ 5	21	ΠΣΤ 5	7
Αστερέωτα	ΑΦ	19	ΑΚ	16	ΑΤ	Δεν Κατ

Συμπεράσματα:

Παρατηρείται ότι καταρρέουν ευκολότερα τα φαιά, μετά τα τεφρά και μετά τα κόκκινα.

To Calosil E-25: Είναι αποτελεσματικό για τα κόκκινα και τα τεφρά.

Calosil IP-25: Έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα για όλα.

Funcosil 100: Είναι αποτελεσματικό για φαιά και τα κόκκινα.

Funcosil SL: Είναι το αποτελεσματικότερο για τα κόκκινα και τα τεφρά.

Hydrogrund: Δεν έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

*Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε βασίστηκε στο πρότυπο τεστ RILEM test n. V Ib: Crystallization test by total immersion(for treated stone).

Συμπεράσματα

- Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των μετρήσεων των διαφόρων παραμέτρων, πριν και μετά την κατεργασία των δοκιμίων πηλού με τα υλικά εμποτισμού, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι οργανικές ενώσεις του πυριτίου (Funcosil 100, Funcosil SL) πληρούν ικανοποιητικά τα κριτήρια που έχουν τεθεί κατά το σχεδιασμό αυτής της μελέτης.
- Το μικρού μοριακού βάρους πολυσιλοξάνιο (Funcosil SL), πέραν της στερέωσης, προσδίδει σημαντική υδροφοβία η οποία υπό προϋποθέσεις έχει ευεργετικές συνέπειες στη δράση των φαινομένων φθοράς του πηλού που σχετίζονται με την απορρόφηση υγρασίας και την κυκλοφορία του νερού.
- Πρέπει όμως η έντονα υδρόφοβη δράση του, εφόσον αυτό εφαρμοσθεί, να ελεγχθεί ώστε να μην δημιουργηθούν ισχυρές ασυνέχειες στην κυκλοφορία των υδρατμών και τη διάχυση του νερού από το έδαφος προς την ατμόσφαιρα
- Η μελέτη θα ολοκληρωθεί με την συμπλήρωση των αποτελεσμάτων που θα ληφθούν από τις δοκιμές παγετού, την εκτίμηση των μηχανικών αντοχών και την ανάλυση του υλικού με SEM/EDX.