



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΥΔΑΤΟΠΕΡΑΤΟΥ
ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ
ΣΕ ΥΔΑΤΟΔΙΑΛΥΤΑ ΑΛΑΤΑ
ΠΑΛΑΙΩΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ
ΕΝΕΜΑΤΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ Ε. ΜΑΝΩΛΗ

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:
Π. ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2016



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΥΔΑΤΟΠΕΡΑΤΟΥ
ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ
ΣΕ ΥΔΑΤΟΔΙΑΛΥΤΑ ΑΛΑΤΑ
ΠΑΛΑΙΩΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ
ΕΝΕΜΑΤΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ Ε. ΜΑΝΩΛΗ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Π. ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ, Καθηγήτρια ΕΜΠ

Κ. ΚΟΛΛΙΑ, Καθηγήτρια ΕΜΠ

Κ. ΔΕΡΒΟΣ, Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2016

Πρόλογος

Ευχαριστώ πρώτα, την Επιβλέποντα Καθηγήτρια μου, Καθηγήτρια του Τομέα Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ, κ. Π. Βασιλείου που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με την έρευνα του συγκεκριμένου θέματος.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα, του Τομέα Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ, κ. Μ. Δελαγραμμάτικα που με τις υποδείξεις του και την καθοδήγησή του συνέβαλλε ουσιαστικά στην περάτωση αυτής της εργασίας, ειδικά στο Πειραματικό μέρος της.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	7
Θεωρητικό μέρος.....	8
1. Προστασία μνημείων.....	8
2. Το Διεθνές πλαίσιο αρχών για την προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς	9
3. Ενέματα.....	14
4. Φθορά των δομικών υλικών	32
5. Θερμοδυναμική της κρυστάλλωση στο εσωτερικό πόρων.	47
6. Η κρυστάλλωση του θειικού νατρίου στο εσωτερικό πόρων.....	49
Πειραματικό μέρος	53
1. Τα υπό εξέταση υλικά.....	53
2. Εξέταση των πόρων μεγάλων διαστάσεων και της χημικής σύστασης στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης	54
3. Εξέταση του ανοιχτού υδατοπερατού πορώδους και της πυκνότητας	59
4. Ανθεκτικότητα στην κρυστάλλωση θειικού νατρίου.....	65
5. Ανάλυση συντριμμάτων με Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD)	70
6. Συμπεράσματα	73
Βιβλιογραφία.....	75
Κατάλογος εικόνων	77
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	80

Περίληψη

Σκοπός της εργασίας είναι η εξέταση του υδατοπερατού πορώδους και της ανθεκτικότητας σε κρυστάλλωση θειικού νατρίου, δοκιμίων υδραυλικών ενεμάτων ηλικίας 10 περίπου ετών.

Το θεωρητικό μέρος αποτελείται από τρία τμήματα. Το πρώτο αφορά το πλαίσιο προστασίας και συντήρησης των ιστορικών μνημείων και γενικότερα της πολιτιστικής κληρονομιάς, με βάση το διεθνές πλαίσιο και τις διεθνείς συμβάσεις που διέπουν κάθε εργασία προστασίας και συντήρησης ενός μνημείου. Το δεύτερο αφορά την τεχνολογία και εφαρμογή των υδραυλικών ενεμάτων στη συντήρηση και αποκατάσταση των ιστορικών κτηρίων, ενώ το τρίτο μέρος αφορά τη θεωρία της φθοράς των δομικών υλικών με ιδιαίτερη έμφαση στην κρυστάλλωση των υδατοδιαλυτών αλάτων και του θειικού νατρίου συγκεκριμένα.

Στο πειραματικό μέρος εξετάζεται η επίδραση της σύστασης, ιδιαίτερα της προσθήκης ποζολάνης σε φυσική υδραυλική άσβεστο, και του τρόπου ανάμειξης με αναμεικτήρα υπερήχων ή υψηλής διάτμησης κολλοειδούς διασποράς στην πυκνότητα και το πορώδες των δοκιμίων. Υπολογίζεται ο συντελεστής ξήρανσης και διερευνάται η ανθεκτικότητα σε κύκλους κρυστάλλωσης θειικού νατρίου. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται με συνοπτικό τρόπο μέσω διαγραμμάτων, ενώ στο παράρτημα παρουσιάζονται τα πρωτογενή δεδομένα.

Θεωρητικό μέρος

1. Προστασία μνημείων

1.1. Η πολιτιστική κληρονομιά και η ανάγκη διάσωσης της

Ο όρος "Πολιτιστική Κληρονομιά" αναφέρεται σε μνημεία, ομάδες κτισμάτων και χώρων με ιστορική, αισθητική, αρχαιολογική, επιστημονική, εθνολογική ή ανθρωπολογική αξία.

Ο ορισμός που έδωσε το Διεθνές Συμβούλιο Μνημείων και Χώρων (ICOMOS) για το μνημείο είναι: "Κάθε ακίνητο, κτισμένο ή όχι, το οποίο διακρίνεται για το αρχαιολογικό, ιστορικό, αισθητικό ή το εθνογραφικό του ενδιαφέρον"

Η ανάγκη της προστασίας της πολιτιστικής μας κληρονομιάς είναι επιτακτική και άμεση, κάτι που είναι εμφανές και σε διεθνές επίπεδο με την ολοένα πιο αυστηρή νομοθεσία προστασίας της που υιοθετείται. Με τον όρο προστασία μνημείων νοείται το σύνολο των τεχνικοεπιστημονικών εργασιών οι οποίες εγγυώνται την συνέχειά του στο χρόνο.

Η συντήρηση και η αποκατάσταση ιστορικών κτιρίων είναι ένα μεγάλο σε έκταση και σημασία θέμα. Είναι γνωστό ότι οι επεμβάσεις και ο ανασχεδιασμός κτιρίων που είτε παρουσιάζουν βλάβες και χρειάζονται επισκευή είτε χρειάζονται ενίσχυση για κάποιο λόγο είναι σύνθετο και δύσκολο πρόβλημα. Εξωτερικές δράσεις όπως σεισμοί, ελλιπής συντήρηση των κατασκευών καθώς επίσης και η αλληλεπίδραση με ένα ολοένα επιθετικότερο περιβάλλον προκαλούν συχνά την απώλεια της συνάφειας των δομικών στοιχείων μεταξύ τους, ρηγματώσεις και προβλήματα ανθεκτικότητας σε διάρκεια. Το αντικείμενο και οι αρχές της αποκατάστασης των ιστορικών κτιρίων παρουσιάζονται στον Χάρτη της Βενετίας (Venice Chapter 1964).

Βασικό βήμα για τα υπό μελέτη μνημεία είναι ο χαρακτηρισμός, η κατηγοριοποίηση των ειδών φθοράς (σε μικροκλίμακα και μακροκλίμακα) που έχουν υποστεί, ο εντοπισμός των αιτιών που την έχουν προκαλέσει καθώς και ο εντοπισμός νέων δυνητικών κινδύνων και τελικά η εκτίμηση της συνολικής κατάστασης των μνημείων. Γνωρίζοντας τα αίτια φθοράς είναι δυνατόν να μπουν σε εφαρμογή προληπτικές δράσεις (π.χ. ειδική νομοθεσία, σχεδιασμός και έλεγχος πρόσβασης και χρήσης, καταγραφή και μείωση κυκλοφορίας οχημάτων και ρύπανσης στην περιοχή). Τα στάδια της συντήρησης συνήθως περιλαμβάνουν ως πρώτο στάδιο τον καθαρισμό του μνημείου με τις κατάλληλες κατά περίπτωση τεχνικές τόσο ως προς την επιφάνεια όσο και ως προς την απομάκρυνση αλάτων από τους πόρους (με νερό, ατμό, ψηγματοβολή, επιθέματα αργίλων, laser ακόμα και με χρήση μικροοργανισμών). Στην πλειονότητα των περιπτώσεων απαιτείται στερέωση του υλικού, ώστε να αποκτήσει μηχανικές ιδιότητες, αποδεκτές και ασφαλείς, ιδανικά ίδιες με αυτές του αρχικού υλικού. Κατά την διάρκεια της αποκατάστασης των μνημείων προκύπτει η ανάγκη είτε να επαναληφθούν οι παλιές κατασκευαστικές μέθοδοι είτε να συμπληρωθεί το υφιστάμενο «παραδοσιακό» υλικό.

Μέχρι τώρα ο προσδιορισμός της συμβατότητας των υλικών στηριζόταν σε πειραματικά αποτελέσματα σε συνθήκες εργαστηρίου οι οποίες διαφέρουν σημαντικά από τις

πραγματικές. Τα υλικά εξετάζονται με την χρήση μεθόδων που χρησιμοποιούνται για δοκιμές σκυροδέματος και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αυθεντικά υλικά. Γενικά, όσον αφορά τα υλικά επισκευής πρέπει να τονιστεί ότι κονιάματα με βάση το τσιμέντο Portland δεν δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας σε διαλυτά άλατα και της μικρής συμβατότητας αυτών των υλικών με τα αρχικά συστατικά του ιστορικού κτιρίου. Αντίστοιχα ακατάλληλα είναι τις περισσότερες φορές τα πολυμερή υλικά. Γενικά, νέα υλικά αποκατάστασης, τα οποία έχουν επιλεγεί χωρίς προηγούμενη μελέτη, συμπεριφέρονται ακατάλληλα όταν εφαρμόζονται σε ιστορικά κτίρια λόγω των διαφορετικών φυσικοχημικών χαρακτηριστικών τους. Επομένως είναι απαραίτητη η χρήση υλικών ή μιγμάτων υλικών τα οποία να είναι συμβατά με τα αρχικά υλικά του κτιρίου αποκατάστασης.

Τα βασικότερα κριτήρια ελέγχου της ποιότητας υφιστάμενων κτιρίων στα οποία εντάσσονται τα ιστορικά κτίρια και τα μνημεία είναι:

Τήρηση της δεοντολογίας των διεθνών συμβάσεων, που απαιτούν την διατήρηση και ανάδειξη των ιστορικών, αισθητικών αξιών και της αρχιτεκτονικής των μνημείων, παράλληλα με την διατήρηση των αυθεντικών υλικών, και δομών.

Οι επιλεγόμενες επεμβάσεις διέπονται από βασικές αρχές (συμβατότητα υλικών, καταγραφή, παρακολούθηση, αξιολόγηση, αντιστρεψιμότητα) οι οποίες συνοψίστηκαν σε οδηγίες και πολιτικές κοινά αποδεκτές (π.χ. η Χάρτα της Βενετίας, 1964 και οι επεκτάσεις της).

2. Το Διεθνές πλαίσιο αρχών για την προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς

2.1. Αρμοδιότητες ειδικών

Κατά την διαδικασία μίας μελέτης αποκατάστασης και συντήρησης ενός μνημείου πρέπει πάντα να λαμβάνονται υπόψη οι βασικές αρχές που έχουν γίνει αποδεκτές διεθνώς καθώς και το εκάστοτε τοπικό νομικό δίκαιο. Η δεκαετία του '90 χαρακτηρίζεται από μία προσπάθεια αναθεώρησης των υφιστάμενων συμβάσεων για την προσαρμογή τους στα νέα δεδομένα, καθώς και αποτελεσματικότερης αντιμετώπισης του προβλήματος της παράνομης διακίνησης πολιτιστικών αγαθών.

Για τη διαμόρφωση του περιεχομένου της προστασία πλέον λαμβάνονται υπόψη οι νεότερες τεχνικές αρχαιολογικής και ιστορικής έρευνας του παρελθόντος. Εστιάζεται η προσοχή στην αντιμετώπιση των σύγχρονων κινδύνων που απειλούν την πολιτιστική κληρονομιά, όπως, αυτών που προέρχονται από τα μεγάλα κατασκευαστικά έργα, από την μόλυνση του περιβάλλοντος, την κλιματική αλλαγή, την τουριστική πίεση κ.α.

2.2. Διεθνείς συμβάσεις

Το πρώτο διεθνούς κύρους συλλογικό κείμενο που επισήμαινε τις βασικές αρχές προστασίας του μνημειακού πλούτου υπήρξε ο Χάρτης των Αθηνών (1931), που συνοψίζει τα συμπεράσματα από το 1ο διεθνές συνέδριο των Αρχιτεκτόνων και Ειδικών των Ιστορικών

μνημείων, το οποίο πραγματοποιήθηκε στην Αθήνα το 1931. Κύριο αντικείμενο προστασίας του νόμου αυτού ήταν τα αρχαία μνημεία και εκείνα της αρχαιότατης εποχής του χριστιανισμού και του μεσαιωνικού ελληνισμού, καθώς επίσης και τα παλαιότερα του 1830 καλλιτεχνικά και ιστορικά μνημεία και οικοδομήματα. Τον ίδιο χρόνο συντάχθηκε στην Ιταλία ένα νέο κείμενο ο Χάρτης της Αναστήλωσης, με βασικό νομοθέτη τον G. Giovannoni, που διαφέρει από το Χάρτη των Αθηνών μόνο ως προς τα άρθρα που αφορούν την αναστηλωτική διαδικασία.

Μετά το Β΄ παγκόσμιο πόλεμο η ανάγκη για αποκατάσταση των Ευρωπαϊκών πόλεων δημιούργησε ένα κύμα ευαισθητοποίησης των πολιτών για τη διάσωση κάθε αυθεντικού δείγματος της δομημένης πολιτιστικής κληρονομιάς, της παράδοσης ή λαϊκής αρχιτεκτονικής, το οποίο εκφράστηκε και μέσα από την Χάρτα της Βενετίας που υπέγραψαν 17 κράτη. Το κείμενο αυτό συμπεριλαμβάνει τα συμπεράσματα του δεύτερου συνεδρίου των αρχιτεκτόνων και τεχνικών, το οποίο έλαβε χώρα μετά από πρωτοβουλία της Ιταλίας στη Βενετία από τις 15 έως τις 31 Μαΐου του 1964.

2.3. Χάρτα της Βενετίας και επεκτάσεις

2.3.1 Η Χάρτα της Βενετίας

Η Χάρτα της Βενετίας είναι το αποτέλεσμα του δεύτερου Διεθνούς Συνεδρίου Αρχιτεκτόνων και Τεχνικών των Ιστορικών Μνημείων που έλαβε μέρος στη Βενετία τον Μάιο του 1964, και οργανώθηκε από το Διεθνές Συμβούλιο Μνημείων και Τοποθεσιών (ICOMOS). Η Χάρτα είναι διεθνώς αναγνωρισμένη ως οδηγός για την αποκατάσταση και τη συντήρηση κάθε είδους Μνημείων. Η Χάρτης της Βενετίας περιλαμβάνει τα παρακάτω άρθρα:

Άρθρο 1. Η έννοια ενός ιστορικού μνημείου δεν καλύπτει μόνο το μεμονωμένο αρχιτεκτονικό έργο αλλά και την αστική ή την αγροτική τοποθεσία που μαρτυρεί ένα ιδιαίτερο πολιτισμό μια ενδεικτική εξέλιξη ή ένα ιστορικό γεγονός. Αυτό ισχύει όχι μόνο για τις μεγάλες δημιουργίες αλλά και για τα επικράτειά τους και έχουν εγγραφεί στον Κατάλογο της Παγκόσμιας Κληρονομιάς, αποτελούν, με κάθε επιφύλαξη της εθνικής κυριαρχίας και των δικαιωμάτων ιδιοκτησίας, παγκόσμια κληρονομιά «για την προστασία της οποίας είναι υπεύθυνη η διεθνής κοινότητα, που πρέπει να εργαστεί ως σύνολο για αυτό τον σκοπό».

Ο χαρακτηρισμός ενός δημιουργήματος ως μνημείου παγκόσμιας πολιτιστικής κληρονομιάς εξαρτάται από την ιστορική αξία του, την ηλικία του, τον προορισμό του, την αισθητική, συμβολική, τεχνολογική και τεχνική αξία του. Δεν είναι απαραίτητο να ισχύουν όλα τα παραπάνω κριτήρια και επίσης δεν απαιτείται να ισχύει αναγκαστικά ο παράγοντας της ηλικίας του. Έτσι περιλαμβάνονται σ' αυτόν τον ορισμό και νεότερα δημιουργήματα που κρίνονται ως διατηρητέα γιατί ικανοποιούν κάποιον από τους παραπάνω παράγοντες σαν ταπεινά έργα που με τον καιρό απέκτησαν πολιτιστική σημασία.

Άρθρο 2. Η συντήρηση και η αποκατάσταση των μνημείων, αποτελεί έναν επιστημονικό κλάδο ο οποίος πρέπει να αποτελείται στη συνεργασία όλων των επιστημών και όλων των

τεχνών που μπορούν να συνεισφέρουν στη μελέτη και τη διάσωση της μνημειακής κληρονομιάς.

Άρθρο 3. Η συντήρηση και η αποκατάσταση των μνημείων αποσκοπούν να τα διασώσουν τόσο σαν έργα τέχνης όσο και σαν ιστορικές μαρτυρίες.

Άρθρο 4. Η συντήρηση των μνημείων έχει σαν πρωταρχική απαίτηση τη συνεχή και μόνιμη φροντίδα για την διατήρησή τους.

Άρθρο 5. Η συντήρηση των μνημείων ευνοείται πάντοτε από την καταλληλότητα τους να χρησιμοποιηθούν για κάποιο σκοπό ωφέλιμο στην κοινωνία. Μια τέτοια χρησιμοποίηση είναι βέβαια επιθυμητή, αλλά δεν πρέπει να αλλάζουν την διάρθρωση ή την διακόσμηση των κτιρίων. Οι διαρρυθμίσεις που επιβάλλει η αλλαγή της λειτουργίας τους (από νέες χρήσεις) πρέπει να αντιμετωπίζονται και ενδεχομένως να επιτρέπονται μέσα σ' αυτά τα όρια.

Άρθρο 6. Η συντήρηση ενός μνημείου συνεπάγεται την διατήρηση του άμεσου περιβάλλοντος του, στην κλίμακα του. Αν το παραδοσιακό πλαίσιο δεν έχει εξαφανισθεί, έχουμε καθήκον να το διατηρήσουμε αλλά και ταυτόχρονα να αποκλείσουμε κάθε άλλη προσθήκη, κάθε κατεδάφιση και κάθε αλλαγή που θα μπορούσε να αλλάξει τις σχέσεις των όγκων και των χρωμάτων.

Άρθρο 7. Το μνημείο είναι αναπόσπαστο από την ιστορική στιγμή που αντιπροσωπεύει και από τον χώρο που είναι τοποθετημένο. Επομένως η μετακίνηση του όλου ή τμήματος ενός μνημείου μπορεί να γίνει παραδεκτή μόνο αν επιβάλλεται από την ανάγκη διασώσεως του, ή δικαιολογείται από λόγους μεγάλης εθνικής ή διεθνούς σημασίας.

Άρθρο 8. Τα γλυπτικά, ζωγραφικά ή διακοσμητικά στοιχεία που είναι αναπόσπαστα δεμένα με το μνημείο, δεν μπορούν να διαχωριστούν παρά μόνο αν το μέτρο αυτό είναι η μοναδική διέξοδος για να εξασφαλιστεί η διάσωση τους.

Αποκατάσταση και Αναστήλωση

Άρθρο 9. Η διαδικασία της αποκαταστάσεως είναι μια επέμβαση υψηλής εξειδίκευσης που επιβάλλεται να γίνεται κατ' εξαίρεση. Έχει σαν στόχο να διατηρήσει και να αποκαλύψει τις ιστορικές και αισθητικές αξίες του μνημείου και βασίζεται στον σεβασμό προς την αρχική του υπόσταση και τα αυθεντικά του στοιχεία. Σταματάει στο σημείο που αρχίζουν να υπάρχουν υποθέσεις. Πέρα από αυτό το σημείο, οποιαδήποτε εργασία που ενδεχομένως θα θεωρηθεί απαραίτητη για τεχνικούς ή αισθητικούς λόγους, θα πρέπει να διαχωρίζεται από την αρχική αρχιτεκτονική σύνθεση και να φέρνει την σφραγίδα της εποχής μας. Σε όλες τις περιπτώσεις η αρχαιολογική μελέτη θα προηγείται της αποκατάστασης και θα την ακολουθεί.

Άρθρο 10. Όταν οι παραδοσιακές τεχνικές αποδεικνύονται ανεπαρκείς, η στερέωση ενός μνημείου μπορεί να εξασφαλιστεί με την προσφυγή σε όλες σε όλες τις σύγχρονες τεχνικές συντηρήσεως και κατασκευές, που η αποτελεσματικότητα θα έχει αποδειχθεί από τα επιστημονικά δεδομένα και τις οποίες θα εγγυάται η πείρα της εφαρμογής τους.

Άρθρο 11. Οι αξιόλογες προσθήκες όλων των εποχών στη σημερινή υπόσταση ενός μνημείου πρέπει να γίνουν σεβαστές, γιατί σκοπός της αποκαταστάσεως του δεν είναι η ενότητα του αρχικού του ρυθμού. Όταν ένα κτίριο φέρνει υπερκείμενες φάσεις διαφόρων

εποχών, η επαναφορά στην αρχική του κατάσταση δεν δικαιολογείται παρά μόνο κατ' εξαίρεση. Αν, δηλαδή, τα στοιχεία που θα αφαιρεθούν έχουν πολύ μικρή σημασία και η σύνθεση που θα αποκαλυφθεί είναι μεγάλης ιστορικής, αρχαιολογικής ή αισθητικής αξίας κι ακόμη αν η κατάσταση της διατήρησης του μνημείου κριθεί αρκετά ικανοποιητική. Η κρίση σχετικά με την αξιολόγηση των μεταγενέστερων στοιχείων και η απόφαση για την απάλειψή τους, δεν θα πρέπει να εξαρτώνται μόνο από το άτομο που ανέλαβε την μελέτη του έργου.

Άρθρο 12. Τα στοιχεία που προορίζονται να αντικαταστήσουν τμήματα του μνημείου που έχουν καταστραφεί, πρέπει να ενσωματώνονται αρμονικά στο σύνολο, αλλά και να διακρίνονται από τα αυθεντικά μέρη, έτσι ώστε να μην πλαστογραφούνται τα καλλιτεχνικά και ιστορικά τεκμήρια του κτιρίου.

Άρθρο 13. Οι προσθήκες δεν μπορεί να γίνουν ανεκτές παρά μόνο αν σέβονται όλα τα ενδιαφέροντα μέρη του κτιρίου, το παραδοσιακό του πλαίσιο, την ισορροπία της συνθέσεως του και τις σχέσεις του με τον περιβάλλοντα χώρο.

Άρθρο 14. Τα μνημειακά σύνολα πρέπει να γίνουν αντικείμενο ειδικών φροντίδων για να σωθεί η ακεραιότητά τους και να εξασφαλιστεί η εξυγίανσή τους, η διαρρύθμιση και η αξιοποίησή τους. Οι εργασίες για την συντήρηση και την αποκατάστασή τους, πρέπει να εμπνέονται από τις αρχές που διατυπώνονται στα προηγούμενα άρθρα.

Άρθρο 15. Οι ανασκαφές πρέπει να γίνονται σύμφωνα με τους επιστημονικούς κανόνες και καθώς ορίζουν οι "συστάσεις για τους διεθνείς όρους που πρέπει να εφαρμόζονται στις αρχαιολογικές ανασκαφές" τις οποίες υιοθέτησε η UNESCO το 1956. Επιβάλλεται να γίνεται διευθέτηση των ερειπίων και να λαμβάνονται τα αναγκαία μέτρα για την συντήρηση και την μόνιμη προστασία των αρχιτεκτονικών στοιχείων και των ευρημάτων. Εξάλλου, θα είναι ευπρόσδεκτη κάθε πρωτοβουλία που θα διευκολύνει την κατανόηση του μνημείου χωρίς να παραμορφώνει την σημασία του. Ωστόσο, κάθε εργασία ανακατασκευής θα πρέπει να αποκλείεται εκ των προτέρων. Μόνο η αναστήλωση μπορεί να αντιμετωπισθεί, δηλαδή η ανασύνθεση μελών που σώθηκαν αλλά έχουν μετακινηθεί. Οι συμπληρώσεις όμως θα είναι πάντα αναγνωρίσιμες και θα αντιπροσωπεύουν το ελάχιστο που απαιτείται για να εξασφαλιστούν οι συνθήκες συντηρήσεως του μνημείου και να αποκατασταθεί η μορφολογική του συνέχεια.

Άρθρο 16. Οι εργασίες συντηρήσεως, αποκαταστάσεως και ανασκαφής θα πρέπει να βασίζονται σε εξακριβωμένη τεκμηρίωση, δηλαδή σε αναλυτικές και κριτικές εκθέσεις, εικονογραφημένες με σχέδια και φωτογραφίες. Όλες οι φάσεις των εργασιών για την απάλειψη νεότερων στοιχείων, την στερέωση, την ανασύνθεση και την ένταξη νέων (στοιχείων), καθώς και όλα τα τεχνικά και μορφολογικά στοιχεία που θα εξακριβώνονται κατά την διάρκεια των εργασιών, θα πρέπει να καταγράφονται λεπτομερειακά. Αυτή η τεκμηρίωση θα κατατίθεται στα αρχεία ενός δημοσίου ιδρύματος και θα είναι προσιτή στους ερευνητές. Προτείνεται η δημοσίευσή τους.

2.3.2 Διεθνής σύμβαση για την προστασία της παγκόσμιας πολιτιστικής και φυσικής κληρονομιάς (Παρίσι 1972)

Με άρθρο αυτής τα κράτη – μέλη καλούνται να προσδιορίσουν την πολιτιστική τους κληρονομιά και να αναλάβουν συγκεκριμένες δεσμεύσεις και πολιτικές διατήρησής της. Επιπλέον, ιδιαίτερη αναφορά γίνεται και στην πληροφόρηση και επιμόρφωση των πολιτών σχετικά με πολιτιστική κληρονομιά, με σκοπό το σεβασμό της από αυτούς.

2.3.3 Διακήρυξη του Άμστερνταμ (1975)

Αναφέρεται στη μελέτη των προβλημάτων της κοινής Ευρωπαϊκής κληρονομιάς, η οποία είναι και πολιτιστική κληρονομιά ολόκληρης της ανθρωπότητας. Στο κείμενο αυτό προβάλλονται για πρώτη φορά οι αρχές για την ολοκληρωμένη διατήρηση, η οποία πρέπει να αποτελέσει μείζον αντικειμενικό στόχο του γενικότερου σχεδιασμού του χώρου και να ενταχθεί στις διευθετήσεις των ρυθμιστικών και πολεοδομικών σχεδίων.

2.3.5 Σύμβαση της Γρανάδας (1985)

Στη σύμβαση αυτή, εκτός από τις αρχές της πολιτικής ολοκληρωμένης προστασίας, προσδιορίζονται οι νομικές διαδικασίες προστασίας που θα πρέπει να εφαρμόζονται από τα συμβαλλόμενα κράτη και οι κυρώσεις για τυχόν παραβάσεις. Πιο συγκεκριμένα, επιβάλλεται η προστασία της αρχιτεκτονικής κληρονομιάς και η μέριμνα για την ένταξη των προστατευόμενων στοιχείων της στην οικονομική και κοινωνική ζωή.

2.3.6 Σύμβαση για την προστασία της αρχαιολογική κληρονομιάς της Ευρώπης – Σύμβαση Μάλτας

Η σύμβαση για την προστασία της αρχαιολογικής κληρονομιάς της Ευρώπης είναι η πιο πρόσφατη σχετική με το θέμα και συντάχθηκε στη Μάλτα το 1992. Έχοντας υπόψη όλες τις προγενέστερες συμβάσεις, διαπιστώνει την ανάγκη συμπλήρωσης των αρχών που διατυπώθηκαν στην Ευρωπαϊκή σύμβαση για την προστασία της αρχαιολογική κληρονομιάς στο Λονδίνο το 1969.

Οι παραπάνω συμβάσεις εκφράζουν την Ευρωπαϊκή πολιτική για τη διατήρηση και διαχείριση της Ακίνητης Πολιτιστικής και Φυσικής Κληρονομιάς και ασχολούνται με τις διαδικασίες διατήρησης και ενσωμάτωσης μιας κληρονομιάς που δημιουργήθηκε σε άλλες εποχές και «πρέπει να περάσει στις μελλοντικές γενιές στην αυθεντική της κατάσταση».

2.4 Διεθνής Οργανισμοί

Το Κέντρο Παγκόσμιας Πολιτιστικής Κληρονομιάς, το οποίο δημιουργήθηκε το 1992, είναι το κέντρο παρακολούθησης και ο συντονιστής της UNESCO για όλα τα ζητήματα που αφορούν την Παγκόσμια Κληρονομιά. Το Κέντρο επίσης, διοργανώνει σεμινάρια και εργαστήρια τεχνικής εκπαίδευσης και ενημερώνει διαρκώς την κοινή γνώμη για τα θέματα σχετικά με την Παγκόσμια Κληρονομιά.

Συμβουλευτικά όργανα

Στη Σύμβαση αναφέρονται τρεις διεθνείς οργανισμοί, δύο μη κυβερνητικοί και ένας διακυβερνητικός:

Παγκόσμια Ένωση για την Συντήρηση (IUCN)

Η Παγκόσμια Ένωση για την Συντήρηση είναι ένας διεθνής, μη κυβερνητικός οργανισμός, που παρέχει αξιολογήσεις τεχνικού περιεχομένου για τα φυσικά τοπία.

Το Διεθνές Κέντρο για την Μελέτη της Διατήρησης και της Ανασύλωσης των Πολιτιστικών Αγαθών (ICCROM) έχει ειδικό συμβουλευτικό ρόλο επάνω στο θέμα της διατήρησης των εγγεγραμμένων στον Κατάλογο Παγκόσμιας Πολιτιστικής Κληρονομιάς μνημείων.

Και τέλος το Διεθνές Συμβούλιο Μνημείων και Τοπίων (ICOMOS).

3. Ενέματα

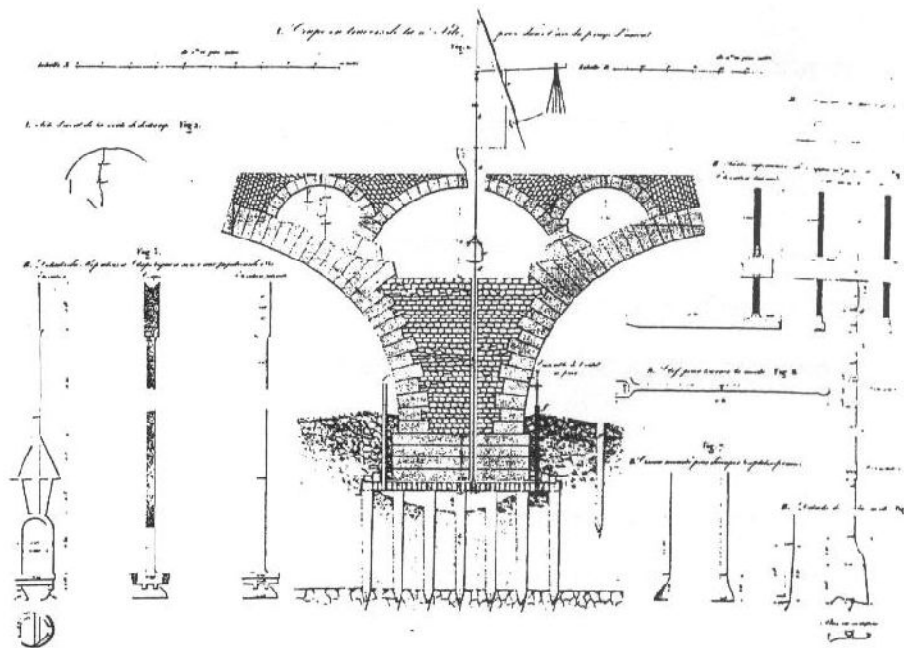
3.1. Τι είναι ένεμα

3.1.1 Ορισμός

Με τον όρο ένεμα, εννοούμε την διοχέτευση στην λιθοδομή με μηχανικό τρόπο ενός νέου υλικού υπό ρευστή μορφή, με στόχο την διείσδυση και την πλήρωση των ρωγμών, των κενών και των κοιλοτήτων. Με αυτή τη τεχνική βελτιώνουμε τη φέρουσα αντοχή των επιμέρους τμημάτων. Με την πάροδο κάποιου χρόνου το υλικό αυτό στερεοποιείται και έτσι επιτυγχάνεται η αποκατάσταση της συνέχειας μεταξύ των ρηγματωμένων και αποδιοργανωμένων τμημάτων της λιθοδομής ή του αρχιτεκτονικού μέλους. Επιτυγχάνεται επίσης η αντοχή και η συνολική βελτίωση της συμπεριφοράς της κατασκευής χωρίς αλλοίωση της εξωτερικής της μορφής, της γεωμετρίας και της στατικότητας.

3.1.2 Ιστορικά στοιχεία

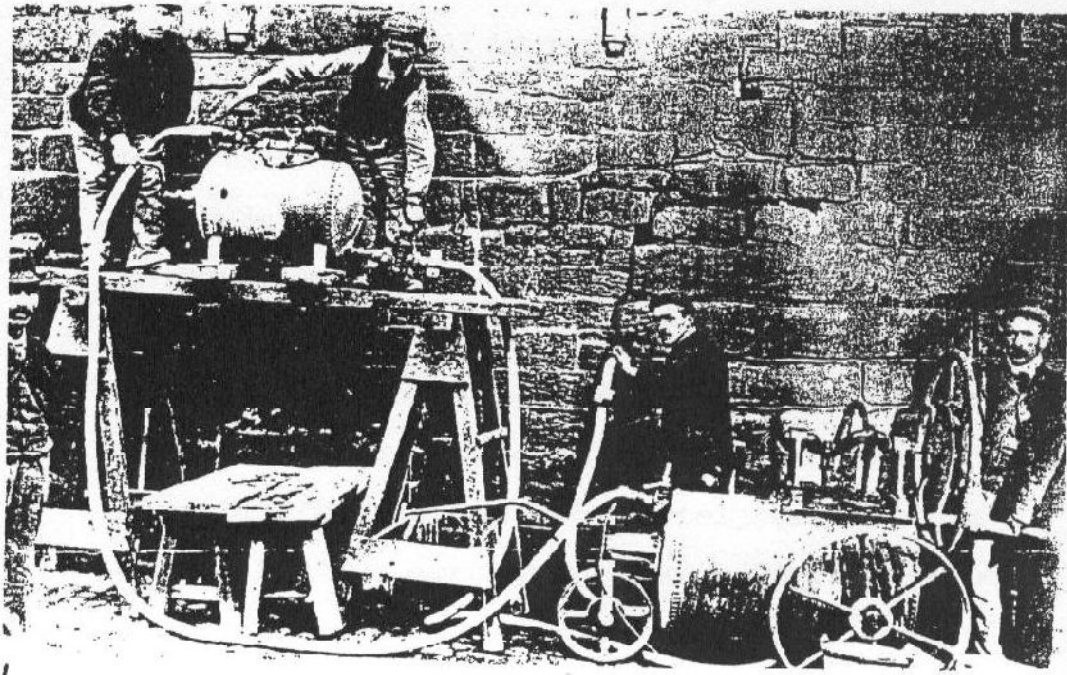
Η λογική της μεθόδου των ενεμάτων δεν είναι καινούργια. Η λογική της εισαγωγής κάποιου ρευστού στα πρωτοτοποθετημένα υλικά της λιθοδομής, το οποίο μέσω της στερεοποίησής του θα συνδέσει μεταξύ τους και θα δώσει ένα νέο υλικό με διαφορετικές φυσικομηχανικές ιδιότητες και συχνά καλύτερες αντοχές, είναι πολύ παλαιότερη. Η ίδια λογική είχε χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή πολλών Ρωμαϊκών μνημείων. Υπάρχουν αποδείξεις, από υπαρκτές πληροφορίες σχετικά με τις ρωμαϊκές μεθόδους κατασκευής, όπου γινόταν χρήση υδαρούς κονιάματος μεταξύ των ρωγμών των τοιχοποιιών. Αυτή θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι η προϊστορία της μεθόδου των ενεμάτων.



Εικόνα 1. Εφαρμογή ενεμάτων στη γέφυρα Tours στη Γαλλία το 1835.

Τα ενέματα αρχίζουν να εφαρμόζονται για την επισκευή λιθοδομών από την αρχή του 19ου αιώνα, όταν ο Γάλλος μηχανικός Charles Berigny τα χρησιμοποιεί για να στερεώσει τοίχους από λιθοδομή στο λιμάνι της Dieppe. Λίγο αργότερα τα ενέματα εφαρμόζονται για την πλήρωση κενών στις λιθοδομές των θεμελίων τριών βάθρων της γέφυρας της Tours στη Γαλλία.

Γύρω στα μέσα του προπερασμένου αιώνα, και μετά την εφεύρεση του τσιμέντου Portland, η ανάγκη για την επέκταση των σιδηροδρομικών δικτύων, με την εφεύρεση της ατμομηχανής, οδηγεί στην εκτεταμένη χρήση των τσιμεντενεμάτων για την επισκευή και την ενίσχυση των γεφυρών (ανάγκη ανάληψης αυξημένων φορτίων). Με την εφεύρεση (γύρω στο 1888) της πρώτης μηχανής ενεμάτων υπό πίεση, από τον James Greathead στην Αγγλία, η χρήση της μεθόδου σε έργα εδάφους και υπεδάφους γίνεται συστηματική.



Εικόνα 2. Η πρώτη μηχανή ενεμάτων υπό πίεση που επινόησε ο James Greathead

Παράλληλα, η μέθοδος χρησιμοποιείται συχνά σε λιθοδομές και αρχίζουν οι πρώτες εφαρμογές σε μνημεία. Ο Sir Francis Fox, πολιτικός μηχανικός, το 1905, έχοντας εμπειρία χρησιμοποίησης της μηχανής J. Greathead στην κατασκευή του μετρό του Λονδίνου κάνει τις πρώτες εφαρμογές (Winchester Cathedral 1905, St. Paul's Cathedral 1906 και 1926, Lincoln Cathedral 1922-1927). Μέσα από την εμπειρία της εφαρμογής της μεθόδου προκύπτει το πρόβλημα της αδυναμίας τωντσιμεντενεμάτων να διεισδύσουν σε υλικά χαμηλής διαπερατότητας (ρωγμές μικρού εύρους ή πόρους μικρής διαμέτρου) λόγω του υψηλού ιξώδους και της κοκκώδους μορφής τους. Για την αντιμετώπιση της αδυναμίας αυτής, ήδη το 1886, αρχίζει να αναπτύσσεται έρευνα σε δύο βασικά θέματα:

1. Τη βελτίωση του εξοπλισμού για την διενέργεια των ενέσεων, που οδηγεί στην κατασκευή αντλιών μεγάλων δυνατοτήτων και την επίτευξη υψηλών πιέσεων. Η χρησιμοποίηση των αντλιών αυτών δεν επιλύει όμως το πρόβλημα.

2. Την εφεύρεση νέων υλικών, χωρίς κόκκους, που οδηγεί στα οργανικά ενέματα αυτά που σήμερα εν συντομία ονομάζουμε πολυμερή. Η έρευνα για τα ενέματα αυτά γνωρίζει μεγάλη εξέλιξη ιδιαίτερα μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο και η χρήση τους βρίσκεται σε μεγάλη ακμή μετά από το 1960. Η επέκταση της εφαρμογής, τόσο τωντσιμεντενεμάτων όσο και των χημικών ενεμάτων, στηρίχθηκε σε αξιόλογες έρευνες που έγιναν κυρίως για την εφαρμογή της μεθόδου σε έργα εδαφομηχανικής και θεμελιώσεων, προεντεταμένου σκυροδέματος, επισκευής οπλισμένου σκυροδέματος και σκυροδέματος πρωτοτοποθετημένων αδρανών.

3.2. Κατηγορίες ενεμάτων

3.2.1. Διαχωρισμός ενεμάτων ανάλογα με την σύνθεσή τους

Οι πιο συνηθισμένες κατηγορίες ενεμάτων είναι οι εξής :

α. Χημικά ενέματα με κύριο συστατικό το τσιμέντο. Η διάκριση αυτή βασίζεται στη φύση του πιο σημαντικού υλικού του ενέματος, που είναι το συνδετικό υλικό.

β. Οργανικά και ανόργανα ενέματα. Η διάκριση αυτή βασίζεται στην χημική σύσταση του συνδετικού υλικού. Προτάθηκε απ' τον G.K. Jones, εξαιτίας της άποψής του ότι ο όρος χημικό ένεμα δεν είναι εύκολα κατανοητός. Οι παραπάνω κατηγοριοποιήσεις έχουν σαν μειονέκτημα ότι δεν λαμβάνουν υπόψη την φύση των υπολοίπων συστατικών που αποτελούν το ένεμα. Συγκεκριμένα, ένα ένεμα που αποτελείται από το τσιμέντο και οργανικά υλικά είναι δύσκολο να κατηγοριοποιηθεί. (Μιλτιάδου-Fezans, Αναγνωστοπούλου, & Καλαγρή, 2006)

Σήμερα, πλέον και ύστερα και από άλλους διαχωρισμούς που χρησιμοποιήθηκαν, τα ενέματα διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα πολυμερή και τα υδραυλικά. Ο διαχωρισμός αυτός βασίζεται στο ότι τα πολυμερή αποτελούνται από οργανικά υλικά, ενώ τα υδραυλικά από ανόργανα και επιπλέον συντηρούνται σε νερό.

Πολυμερή ενέματα

Τα πολυμερή, δηλαδή τα οργανικά ενέματα (ρητίνες, σιλικόνες), δεν έχουν πρόβλημα διεισδυτικότητας καθώς μπορούμε αν θέλουμε να προσαρμόσουμε το ιξώδες τους ανάλογα με το εύρος των ρωγμών του υποδοχέα και να πετύχουμε υψηλή διεισδυτικότητα. Όμως, όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για την επισκευή και ενίσχυση λιθοδομών πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι τα πολυμερή έχουν :

- Μηχανικά και φυσικά χαρακτηριστικά διαφορετικά από εκείνα των υλικών δομήσεως των λιθοδομών ως προς τις αντοχές, το πορώδες, το συντελεστή θερμικής διαστολής.
- Προβληματική συνάφεια παρουσία υγρασίας.
- Μια άγνωστη ακόμη διάρκεια ζωής.

Για τους λόγους αυτούς υπάρχει πολύ μεγάλη επιφύλαξη σήμερα ως προς την χρήση τους σε λιθοδομές. Ορισμένες εποξειδικές κυρίως ρητίνες έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλές χώρες αλλά και στην δική μας ακόμα. Πρόσφατα, μετά από μια δεύτερη θεώρηση των πραγμάτων, στην οποία οδήγησαν προβλήματα που παρουσιάστηκαν στην εφαρμογή τους, αλλά και αποτελέσματα ανάλογων ερευνητικών εργασιών, η χρήση τους γίνεται μετά από μεγαλύτερη σκέψη και διερεύνηση. Η χρήση τους περιορίζεται για την πλήρωση πολύ λεπτών ρωγμών (<0,1mm) υλικών μεγάλης αντοχής και μικρού πορώδους που συντηρούνται σε ελεγχόμενες συνθήκες, ενώ είναι ακατάλληλα για την επισκευή λιθοδομών και λίθινων αρχιτεκτονικών μελών που εκτίθενται στη δράση του περιβάλλοντος.



Εικόνα 3. Εφαρμογή ενεμάτων σε τοιχοποιία

Υδραυλικά ενέματα

Τα υδραυλικά ενέματα, δηλαδή τα ενέματα από ανόργανα υλικά (τσιμέντο, υδραυλική άσβεστος, θηραϊκή γη, πούδρα τούβλου, άργιλο, κλπ.) έχουν μηχανικά και φυσικά χαρακτηριστικά παρόμοια με εκείνα των υλικών δόμησης των λιθοδομών, γνωστή διάρκεια ζωής και συνάφεια ικανοποιητική. (Μιλτιάδου-Fezans A. , 1991)

Τα πειράματα μέτρησης εφελκυστικής αντοχής, που πραγματοποιήθηκαν σε μια σειρά δοκιμών αποτελούμενων από ασβεστολιθικά λιθοσώματα και υδραυλικά ενέματα απέδειξαν ότι τα ενέματα αυτά έχουν πολύ καλή αντοχή συνάφειας. Πράγματι οι αντοχές σε εφελκυσμό που μετρήθηκαν κυμαίνονται από 0,5 έως 4 MPa.

Λέγονται υδραυλικά λόγω της συνθετικής κονίας που συνήθως είναι ένα τσιμέντο ή υδραυλική άσβεστος και η οποία μετά την σκλήρυνσή της συντηρείται σε νερό ή σε περιοδικά υγραινόμοιο περιβάλλον και άρα είναι αδιάλυτη στο νερό. Θέλουν όμως πολύ προσεκτικό σχεδιασμό, κυρίως όσον αφορά της αδυναμίες της διεισδυτικότητας και λόγω του υψηλού τους κόστους. Αυτά συνδυάζονται, συνήθως με κάποια άλλα υλικά όπως είναι τεχνικές ή φυσικές ποζολάνες.

3.2.2. Σύνθεση υδραυλικών ενεμάτων

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται ως πρώτες ύλες για την παρασκευή των υδραυλικών ενεμάτων πρέπει να πληρούν συγκεκριμένες απαιτήσεις, οι οποίες συνοψίζονται ακολούθως:

Τσιμέντο

Ισχύει το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1: «Τσιμέντο –Μέρος 1: Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για τα κοινά τσιμέντα», ΕΛΟΤ EN 197-2: «Τσιμέντο- Μέρος 2: Αξιολόγηση συμμόρφωσης» όπως αυτό ισχύει από 1η Απριλίου 2001(ΦΕΚ 917, 17 Ιουλίου 2001, Αριθμ. 16462/29). Το τσιμέντο που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να συνοδεύεται από το αντίστοιχο πιστοποιητικό ποιότητας (δελτίο Τεχνικών Χαρακτηριστικών Υλικού), το οποίο

θα αφορά σε όλα τα απαιτούμενα από τους υπάρχοντες κανονισμούς στοιχεία (ΕΛΟΤ – EN 197-1, EN 196-1). Το τσιμέντο είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε θειικά άλατα, αλκάλια και C3A και θα συνοδεύεται : α) από τη χημική και ορυκτολογική ανάλυση, συμπεριλαμβανομένης της ακριβούς περιεκτικότητάς του (%) σε SO₃ και υδροδιαλυτά αλκάλια και β) από την ειδική επιφάνεια (m²/g) και την καμπύλη κοκκομετρικής κατανομής LASER.

Νερό

Για νερό αναμίξεως και συντηρήσεως ισχύει το Σχέδιο Προτύπου ΕΛΟΤ 345 : « Το ύδωρ αναμίξεως και συντηρήσεως σκυροδέματος». Σε κάθε περίπτωση το νερό πρέπει να είναι καθαρό και να μην περιέχει συστατικά που θα μπορούσαν να προκαλέσουν δυσμενείς επιπτώσεις επί της αντοχής της ανθεκτικότητας του ενέματος.

Υδράσβεστος

Η υδράσβεστος θα είναι σε μορφή σκόνης και θα διέρχεται σε ποσοστό περίπου 100% από κόσκινο διαμέτρου οπής 0,075mm και το μεγαλύτερο ποσοστό των κόκκων (≈90%) θα διέρχεται από το κόσκινο διαμέτρου οπής 0,045mm, θα έχει ομοιόμορφο χρώμα και θα προσκομίζεται συσκευασμένη σε στεγασμένους, απόλυτα ξηρούς χώρους. Η υδράσβεστος που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να συνοδεύεται από το αντίστοιχο πιστοποιητικό ποιότητας (Δελτίο Τεχνικών Χαρακτηριστικών Υλικού), που θα αφορά: στην πλήρη χημική ανάλυση και σε όλα τα στοιχεία που απαιτούνται ώστε να πληρούνται οι απαιτήσεις των ισχυόντων κανονισμών (ΕΛΟΤ – EN 459-1 και EN 459-2). Ειδικότερα, απαιτούνται επίσης στοιχεία της ειδικής επιφάνειας (m²/g) και της κοκκομετρίας LASER. Σε κάθε περίπτωση η χρησιμοποιούμενη υδράσβεστος πρέπει να αντιστοιχεί στον τύπο CL90 των ισχυόντων κανονισμών.

Ποζολάνη

Η ποζολάνη μπορεί να είναι φυσική ή τεχνητή. Σε κάθε περίπτωση θα είναι λεπτοαλεσμένη και θα διέρχεται σε ποσοστό περίπου 100% από κόσκινο διαμέτρου οπής 0,075mm, ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό των κόκκων (≈90%) θα διέρχεται από το κόσκινο διαμέτρου οπής 0,045 mm, θα έχει χρώμα λευκό ή υπόλευκο, θα είναι απαλλαγμένη από υδατοδιαλυτά αλκάλια, ενώ τα διαθέσιμα αλκάλια δεν θα υπερβαίνουν το 2% κατά ASTM C 618.

Η ποζολάνη που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να συνοδεύεται από το αντίστοιχο πιστοποιητικό ποιότητας (Δελτίο Τεχνικών Χαρακτηριστικών Υλικού), που θα αφορά: στην ορυκτολογική της σύσταση, στην περιεκτικότητά της σε ενεργό πυρίτιο και σε αλκάλια (διαθέσιμα και υδατοδιαλυτά), στην ειδική επιφάνεια, στην κοκκομετρική ανάλυση LASER και στον δείκτη ποζολανικότητας.

Πρόσθετα / Πρόσμικτα

Τα πρόσθετα- πρόσμικτα που θα χρησιμοποιηθούν θα είναι συμβατά με τον χρησιμοποιούμενο τύπο τσιμέντου ή υδραυλικής άσβεστου και θα συνοδεύονται από πιστοποιητικά ελέγχου. Τα τεχνικά φυλλάδια που θα συνοδεύουν τα πρόσθετα- πρόσμικτα θα παρέχουν κατ' ελάχιστο τις εξής πληροφορίες:

- Χημική ονοματολογία των κυρίως ενεργών συστατικών των πρόσθετων-πρόσμικτων. Περιεκτικότητα των πρόσθετων- πρόσμικτων σε χλώριο εκφρασμένη σε άνυδρο CaCl_2 ως ποσοστό του βάρους του πρόσθετου.
- Αν το πρόσθετο δημιουργεί φυσαλίδες αέρα.
- Τυπική δοσολογία και επιπτώσεις σε περίπτωση μεγαλύτερης δόσης.
- Την περιεκτικότητα σε θειικές ρίζες (τα πρόσμικτα δεν πρέπει να περιέχουν θειικές ρίζες)
- Τον επιτρεπόμενο χρόνο αποθήκευσης και οδηγίες για τις απαιτούμενες συνθήκες αποθήκευσης.

Απαγορεύεται η χρήση πρόσθετων που δημιουργούν ιόντα χλωρίου.

Τα πρόσθετα-πρόσμικτα που θα χρησιμοποιηθούν στο έργο θα είναι του ίδιου εργοστασίου και θα έχουν την αυτή εμπορική ονομασία με εκείνα που χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη συνθέσεως και θα προστίθενται στην αναλογία που προβλέπεται σε αυτήν (Μιλτιάδου-Fezans, Αναγνωστοπούλου, & Καλαγρή, 2006).

3.2.3 Συνθέσεις ενεμάτων για χρήση σε μνημεία

Η ποικιλία συνδυασμών στην παρασκευή των ενεμάτων είναι τόσο μεγάλη όσο και στην παρασκευή των κονιαμάτων διαστρωμάτωσης και αρμολογήματος, αν και μέχρι πρόσφατα τα απλά ενέματα γενικής χρήσης αποτελούνταν μόνο από το συνηθισμένο τσιμέντο Portland και νερό. Αυτά τα ενέματα πλέον δεν συνιστώνται. Όσοι ασχολούνται με την αποκατάσταση μνημείων δεν αποδέχονται την χρήση των τσιμεντενεμάτων στις ιστορικές λιθοδομές. Τα υλικά αυτά προκαλούν σκουρόχρωμους λεκέδες, εξανθίσεις και τοπικές επιφανειακές ρήξεις. Αν και τέτοια ενέματα είναι ελκυστικά λόγω χαμηλής τιμής και απλότητας, ο ασφαλέστερος και ευκολότερος δρόμος είναι ο αποκλεισμός τους από κάθε εργασία στον ιστορικό ιστό. Επίσης, τα απλά ενέματα τσιμέντου δεν είναι πολύ αποτελεσματικά στην πλήρωση μεγάλων κενών, διότι πέρα από τα διαλυτά άλατα δημιουργούν προβλήματα που συνδέονται με ανεπαρκή ευκινησία, μεγάλη συστολή και τελική ευθραυστότητα.

Αλλάζοντας τη σύνθεση του μίγματος με την προσθήκη υδροφόρων πρόσθετων και αντικαθιστώντας το τσιμέντο με αδρανή υλικά, μειώνεται σημαντικά η θλιπτική αντοχή του αρχικού μείγματος. Έχει διαπιστωθεί πειραματικά ότι η αντοχή του ενέματος δεν επηρεάζει την αντοχή της λιθοδομής, καθοριστικός παράγοντας της αποτελεσματικότητας του ενέματος είναι διεισδυτικότητα στα κενά όλων των διαστάσεων και η συνάφεια με την τοιχοποιία. Επιπλέον ενέματα που παρουσιάζουν αντοχές υψηλότερες από αυτές των αυθεντικών υλικών μπορεί να προκαλέσουν φθορές στα αυθεντικά υλικά σε περίπτωση δυναμικών φορτίσεων (σεισμοί).

Ένα από τα σημαντικότερα συστατικά των ενεμάτων είναι αναμφίβολα η χαμηλής περιεκτικότητας θείου, ιπτάμενη τέφρα (PFA), η οποία τις τελευταίες δεκαετίες χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο με τσιμέντο, ή ασβέστη, ή και τα δύο, και άλλα πρόσθετα υλικά τα οποία παρέχουν διόγκωση ή βοηθούν την κινητικότητα και την

εναιώρηση. Ειδικά, μη υδραυλικά ασβεστοκονιάματα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς την βοήθεια πρόσθετων υλικών.

Ο συνδυασμός ιπτάμενης τέφρας και ασβεστοκονιάματος παράγει ένα ευκίνητο, χαμηλής προς μεσαίας αντοχής ένεμα, το οποίο είναι συχνά αυτό ακριβώς που απαιτείται για την πλήρωση των κενών σε τοίχους διπλού φλοιού από συμπαγείς λίθους. Η αντιδρούσα ιπτάμενη τέφρα είναι ένα ποζολανικό πρόσθετο υλικό το οποίο, εκτός του ότι επιταχύνει την πήξη του ασβεστοκονιάματος σε υγρές συνθήκες, βοηθά επίσης στην εισχώρησή του. Ο μπετονίτης είναι ένα άλλο σχετικά φθινό πρόσθετο το οποίο βοηθά στην διατήρηση του τσιμέντου/ της τέφρας / του ασβέστη σε μορφή εναιωρήματος, αποφεύγοντας έτσι την καθίζησή του κατά την διάρκεια της διαδικασίας έκχυσης του ενέματος.

Στην περίπτωση που η παραπάνω διαδικασία έκχυσης είναι μικρή ή πολύ εξειδικευμένη, συνιστάται όσο το δυνατόν περισσότερο η χρήση προ-αποθηκευμένων μειγμάτων. Αυτά είναι κατάλληλα για ένα ευρύ φάσμα λειτουργιών και εξειδικευμένοι προμηθευτές συνιστούν αυτά τα ενέματα για συγκεκριμένες καταστάσεις.

Συνδυασμός τσιμέντου με λεπτόκοκκα υλικά

Η χαμηλή διεισδυτικότητα των υδραυλικών ενεμάτων οδήγησε σε συστηματική εργαστηριακή έρευνα. Η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων έδειξε ότι η αντικατάσταση του τσιμέντου από λεπτόκοκκα υλικά στην κατάλληλη ποσότητα, επιτρέπει την παρασκευή των ενεμάτων διεισδυτικών σε πολύ λεπτές ρωγμές.

Οι συνδυασμοί των ενεμάτων τσιμέντου με λεπτόκοκκα υλικά που χρησιμοποιούνται πλέον σε ευρεία κλίμακα για την στερέωση των τοιχοποιιών, παρασκευάζονται συνήθως :

α) Από λευκό τσιμέντο κατάλληλης σύνθεσης και κοκκομετρίας σε συνδυασμό με πολύ λεπτόκοκκα υλικά (φυσική ποζολάνη και υδράσβεστος σε μορφή σκόνης) και με την χρήση μικρής ποιότητας ρευστοποιητή. Ο συνδυασμός λεπτόκοκκων υλικών με το τσιμέντο, βελτιώνει την διεισδυτικότητα και σταθερότητα του ενέματος, αλλά και αυξάνει την δυνατότητα του να συγκρατεί σημαντικό ποσοστό του νερού που χρησιμοποιήθηκε κατά την παρασκευή του, χάριν κυρίως της μεγάλης ειδικής επιφάνειας των κόκκων του λεπτόκοκκου υλικού, εξασφαλίζοντας συγχρόνως την επίτευξη των εκάστοτε κατάλληλων αντοχών.

Το ακριβές ποσοστό και το είδος του, ή των λεπτόκοκκων υλικών που θα χρησιμοποιηθούν, εξαρτάται από την κοκκομετρική διαβάθμιση του τσιμέντου ή της υδραυλικής άσβεστου, την στάθμη των επιθυμητών αντοχών του ενέματος που ορίζεται από τη σχετική δομοστατική μελέτη, αλλά και τις απαιτήσεις ανθεκτικότητας. Το υλικό αυτό πρέπει να έχει κόκκους διαμέτρου κατά προτίμηση <math> < 32\mu\text{m}</math> στην περίπτωση που το ένεμα πρέπει να διεισδύσει σε ρωγμές εύρους 0,1-0,2mm, και <math> < 64\mu\text{m}</math> μικρών στην περίπτωση ρωγμών εύρους 0,2-0,4mm. Ως λεπτόκοκκο υλικό χρησιμοποιείται συνήθως συνδυασμός υδρασβέστου σε σκόνη και φυσικής ή τεχνητής ποζολάνης. Το ακριβές ποσοστό και η μεταξύ τους αναλογία εξαρτάται από τις επιθυμητές αντοχές του ενέματος, που έχουν οριστεί από την μελέτη δομητικής αποκατάστασης του κτίσματος, καθώς εξαρτώνται από τις επιθυμητές αντοχές της επισκευασμένης τοιχοποιίας.

β) Από φυσική υδραυλική άσβεστο ειδικών προδιαγραφών, κάποιες φορές ως συνδυασμός αυτής με λεπτόκοκκη φυσική ποζολάνη προκειμένου να βελτιωθούν τα μηχανικά

χαρακτηριστικά του ενέματος και η ανθεκτικότητα. Τα ενέματα στερέωσης με βάση την φυσική υδραυλική άσβεστο είναι σε πολλές περιπτώσεις (ύπαρξη τοιχογραφικού ή ψηφιδωτού διακόσμου, λιθοσωμάτων χαμηλών αντοχών και μεγάλου πορώδους κλπ.) καταλληλότερα από την άποψη φυσικοχημικής συμβατότητας με τα αυθεντικά υλικά μιας ιστορικής λιθοδομής. Λόγω δε των υδραυλικών ιδιοτήτων της εν λόγω κονίας, αποκτούν μια αποδεκτή, πρώιμη αντοχή η οποία αυξάνεται με τον χρόνο και ενισχύεται και λόγω της ποζολανικής αντίδρασης, στην περίπτωση που μικρό μέρος της έχει αντικατασταθεί με ποζολάνη. Παρά την σπουδαιότητά τους όμως, μόνο λίγες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί επί του παρόντος σχετικά με τα ρεολογικά χαρακτηριστικά και την αποτελεσματικότητα τέτοιων ενεμάτων (Μιλτιάδου-Fezans, Αναγνωστοπούλου, & Καλαγρή, 2006).

3.2.4 Υδραυλική άσβεστος

Η υδραυλική άσβεστος παρασκευάζεται με όπτηση από ασβεστολιθικά πετρώματα με αυξημένη περιεκτικότητα σε οξειδία του αργιλίου και του πυριτίου. Η περιεκτικότητα σε άργιλο είναι 10÷15%. Η όπτηση γίνεται σε συνηθισμένα ασβεστοουργικά καμίνια και σε θερμοκρασίες μεταξύ 1000÷1200°C. Η όπτηση στις θερμοκρασίες αυτές βοηθά στο σχηματισμό οξειδίων του αργιλίου, του πυριτίου και του σιδήρου μαζί με άσβεστο. Τα οξειδία αυτά είναι οι υδραυλικοί συντελεστές της κονίας.

Φυσικές ιδιότητες της υδραυλικής ασβέστου

Η υδραυλική άσβεστος είναι σκόνη υπόθεφρη μέχρι τεφρή. Οι αντοχές της κυμαίνονται μεταξύ 1,0÷5,0MPa. Πήζει και σκληρύνεται στον αέρα και μετά διατηρείται στο νερό χωρίς να διαλύεται.

Σβέση της υδραυλικής ασβέστου

Η σβέση της υδραυλικής ασβέστου γίνεται στον τόπο παραγωγής της αμέσως μετά την όπτηση. Το προϊόν της όπτησης ραντίζεται με όση ποσότητα νερού απαιτείται για να μετατραπεί σε υδράσβεστο. Ακολούθως, αφήνεται στο περιβάλλον για 10 μέρες περίπου, όπου υφίσταται συμπληρωματική σβέση και κονιοποιείται.

Πήξη και σκλήρυνση της υδραυλικής ασβέστου

Η πήξη οφείλεται κυρίως στους υδραυλικούς συντελεστές της κονίας. Όμως στην πήξη και τη σκλήρυνση συμβάλλει και η μικρή ποσότητα CaO που σχηματίζεται κατά την όπτηση, το οποίο αφού ενυδατωθεί και μετατραπεί σε υδράσβεστο, Ca(OH)₂, αντιδρά με το CO₂ της ατμόσφαιρας και οδηγεί στο σχηματισμό CaCO₃ και στη στερεοποίησή του, δηλαδή στη λίθωση της υδρασβέστου.

Είδη της υδραυλικής ασβέστου

Ανάλογα με τη μικρή ή μεγάλη υδραυλική ικανότητά της, η υδραυλική άσβεστος διακρίνεται σε : α. Υδραυλική άσβεστο. β. Πολύ υδραυλική άσβεστο. γ. Υπερυδραυλική άσβεστο .

Δοκιμασίες της υδραυλικής ασβέστου

Για να εξακριβωθεί η ποιότητα της παρασκευαζόμενης υδραυλικής ασβέστου, ελέγχονται σύμφωνα με τους αντίστοιχους κανονισμούς : α. Η λεπτότητα. β. Η σταθερότητα όγκου. γ. Ο χρόνος πήξης. δ. Η αντοχή σε θλίψη.

Εφαρμογές της υδραυλικής ασβέστου

Η υδραυλική ασβέστος μαζί με άμμο δίνει κονιάματα, τα οποία έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τα κονιάματα της αερικής ασβέστου, υστερούν όμως ως προς τα άλλα υδραυλικά κονιάματα, επειδή περιέχουν σημαντικό ποσοστό ελεύθερης ασβέστου. (Κορωναίος & Πουλάκος, 2006).

3.3 Ιδιότητες των ενεμάτων - Ενεσιμότητα

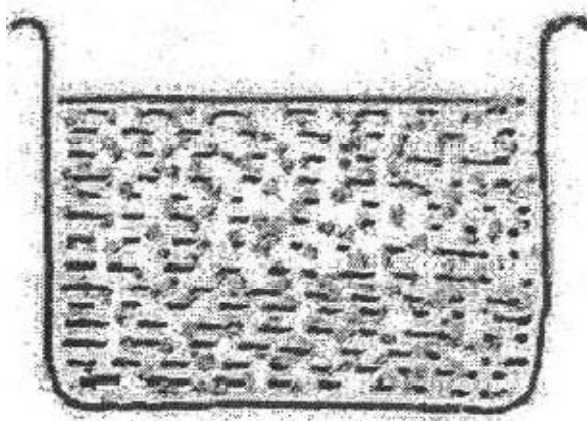
Οι τρεις βασικές ιδιότητες των ενεμάτων στην υγρή μορφή, η σταθερότητα, η ρευστότητα και η διεισδυτικότητα ονομάζονται ενεσιμότητα. Η ενεσιμότητα θεωρείται μία από τις βασικότερες ιδιότητες των ενεμάτων και καθοριστικός παράγοντας για την ορθή εφαρμογή τους. Η ενεσιμότητα επηρεάζεται τόσο από τα χαρακτηριστικά ροής του ενέματος όσο και από την διαπερατότητα και την γεωμετρία της λιθοδομής (Μιλτιάδου-Fezans A. , Η Χρήση των Ενεμάτων ως Μέθοδος Επισκευής και Ενίσχυσης Λιθοδομών, 1985).

3.3.1 Σταθερότητα

Με τον όρο σταθερότητα εννοούμε την ικανότητα ενός ενέματος να διατηρεί την ομοιογένειά του σε όλη τη διάρκεια της ενέσεως και μέχρι το τέλος της πήξεως. Όταν γεμίζουμε ένα δοχείο με ένεμα, οι κόκκοι της στερεάς φάσης του, πιο βαρείς από το νερό, έχουν την τάση να κατεβούν στον πυθμένα του δοχείου. Εκτός από τις δυνάμεις βαρύτητας, τα στερεά σωματίδια δέχονται και την επίδραση άλλων δυνάμεων όπως είναι οι δυνάμεις τριβής, και οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις.

Αυτό το σύνολο των δράσεων οδηγεί το ένεμα σε μία από τις εξής τρεις καταστάσεις ισορροπίας:

A) Το περιεχόμενο του δοχείου αποτελείται από ένα αιώρημα ομοιογενές. Λέμε τότε ότι το ένεμα είναι σταθερό.

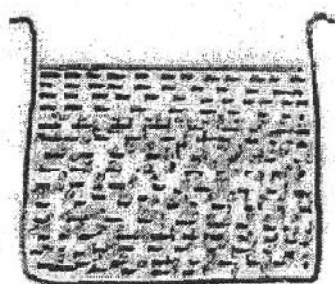


Εικόνα 4. Ένεμα σταθερό

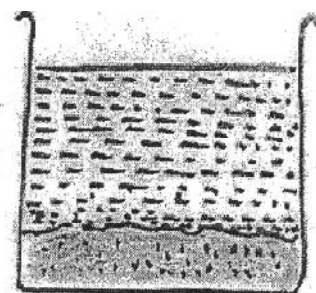
B) Το περιεχόμενο του δοχείου αποτελείται από ένα τμήμα ομοιογενούς αιωρήματος πάνω από το οποίο υπάρχει μία στρώση νερού. Το αιώρημα διατηρώντας την ομοιογένειά του,

έχει επικαλυφθεί με μία στρώση νερού εξίδρωσης. Η στρώση αυτή αντιστοιχεί στο νερό που δεν μπόρεσε να συγκρατηθεί από το αιώρημα. Αυτό το επιπλέον νερό, αν υπερβαίνει κάποιο ποσοστό περίπου 5%, μετά την εξάτμισή του στο εσωτερικό της λιθοδομής θα αφήσει κενά και θα έχει επομένως αρνητικές επιπτώσεις για την επιτυχία της ενέσεως.

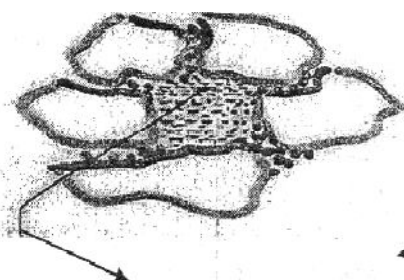
Γ) Κανένα τμήμα του περιεχομένου του δοχείου δεν αποτελείται από ένα ομοιογενές αιώρημα. Στον πυθμένα του δοχείου έχουν συγκεντρωθεί οι βαρύτεροι κόκκοι της στερεάς φάσης, μετά ακολουθούν οι ελαφρότεροι κόκκοι και τέλος υπάρχει μία στρώση νερού. Η ύπαρξη αυτού του φαινομένου της καθίζησης ή διαστρωμάτωσης δεν είναι αποδεκτή για ένα ένεμα, διότι αφενός αμφισβητείται η πήξη του στο εσωτερικό της λιθοδομής, και αφετέρου, αν αυτή επέλθει, το στερεοποιημένο ένεμα θα έχει διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά από θέση σε θέση.



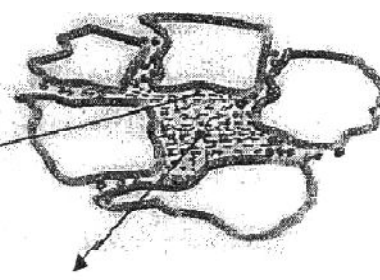
(α) Εξίδρωση >5



(β) Απόμιξη



Κενά μετά την εξάτμιση



Ετερογενείς ιδιότητες

Εικόνα 5. Ένεμα μη σταθερό (α) εξίδρωση: διαχωρισμός νερού στην επιφάνεια και (β) απόμιξη: βαρύτεροι κόκκοι βρίσκονται στον πυθμένα

Έτσι, γενικώς, ένα ένεμα θεωρείται σταθερό εάν παρουσιάζει πολύ μικρή εξίδρωση (εξίδρωση στις τρεις ώρες < 5%) και δεν παρουσιάζει καθίζηση ή διαστρωμάτωση (Μιλτιάδου Α. , 2004).

Ο έλεγχος της σταθερότητας πραγματοποιείται με την μέτρηση εξίδρωσης. Η δοκιμή εξίδρωσης γίνεται σύμφωνα με τον κανονισμό Norme Francaise NFP 18-359/1988. Το ένεμα τοποθετείται σε τρεις απολύτως καθαρούς και στεγνούς ογκομετρικούς διαφανείς σωλήνες των 100ml, διαμέτρου 25mm και ύψους 25cm και αφήνεται εν ηρεμία σκεπασμένος σε χώρο σκιερό επί τρεις ώρες (3h). Η σταθερότητα εκφράζεται ως το ποσοστό του όγκου του νερού που εξιδρώνει μετά την πάροδο τριών ωρών (3h) από την παρασκευή του. Στο βαθμό

που ο αρχικός όγκος του ενέματος ήταν 100ml η εξίδρωση μετράται απευθείας διαβάζοντας το πλήθος των κυβικών εκατοστών του νερού εξίδρωσης κάθε σωλήνα. Η εξίδρωση του ενέματος προκύπτει από τον μέσο όρο των τριών μετρήσεων (Μιλτιάδου-Fezans, Αναγνωστοπούλου, & Καλαγρή, Τεχνικές Προδιαγραφές και Απαιτούμενος Εξοπλισμός για το Σχεδιασμό και την Εφαρμογή των Ενεμάτων, 2006).



Εικόνα 6. Έλεγχος σταθερότητας

3.3.2 Ρευστότητα

Με τον όρο ρευστότητα εννοούμε την δυνατότητα ροής του ενέματος υπό συγκεκριμένες φυσικά συνθήκες. Τα ενέματα κατατάσσονται, όσον αφορά τα χαρακτηριστικά ροής τους σε δύο κατηγορίες : α) αυτά που συμπεριφέρονται ως ιδανικά ή Νευτόνια υγρά και β) αυτά που συμπεριφέρονται ως σώματα Bingham.

Ένα ιδανικό υγρό χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι υπάρχει μια γραμμική σχέση ανάμεσα στην διατμητική τάση (τ) και την ταχύτητα παραμόρφωσής του (ϵ).

Έτσι έχουμε :

$$\tau = \eta \cdot \epsilon \quad \text{όπου } \eta \rightarrow \text{ιξώδες}$$

Η ροή ενός ιδανικού υγρού χαρακτηρίζεται από το ιξώδες. Όσο μεγαλύτερη η τιμή του ιξώδους του υγρού τόσο πιο αργή είναι η ροή του για μια δεδομένη δύναμη. Ως ιδανικά υγρά μπορούν να θεωρηθούν το νερό και πολλά από τα οργανικά ενέματα. Ως σώματα Bingham ορίζονται τα υγρά των οποίων η ροή δεν αρχίζει παρά μόνο όταν η διατμητική τάση, ξεπεράσει μία τιμή, που ονομάζεται όριο διατμήσεως (τ_0).

Έτσι στην περίπτωση αυτή έχουμε:

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \epsilon \quad \text{όπου } \eta \rightarrow \text{ιξώδες}$$

Ως σώματα Bingham θεωρείται ότι συμπεριφέρονται τα περισσότερα υδραυλικά ενέματα. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στην αλληλεπίδραση των αιωρούμενων στερεών

σωματιδίων του ενέματος, τα οποία, όταν το αιώρημα είναι πυκνό, σχηματίζουν ένα είδος χαλαρού στερεού αναπτύσσοντας διατμητική αντοχή.

Η διατμητική αντοχή του ενέματος εξαρτάται από:

- Το λόγο του νερού/στερεών σωματιδίων
- Την ειδική επιφάνεια και το σχήμα των σωματιδίων
- Την φυσικοχημική τους συγγένεια με το νερό
- Την καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης
- Το βαθμό κροκίδωσης

Η εκτίμηση της στο σχεδιασμό του ενέματος είναι σημαντική γιατί καθορίζει μεταξύ άλλων την πίεση που απαιτείται τόσο για να αρχίσει όσο και για να συνεχισθεί η ένεση (Μιλτιάδου-Fezans A. , 1991).

Ο έλεγχος της ρευστότητας γίνεται με την μέτρηση του φαινομένου ιξώδους σε κώνο τύπου Marsh. Κώνος καθορισμένων διαστάσεων γεμίζει με μια δεδομένη ποσότητα ενέματος. Μετρείται ο χρόνος ροής ορισμένου όγκου ενέματος, συνήθως 0,5 και 1lt και ονομάζεται φαινόμενο ιξώδες. Συνήθως η διάμετρος του στομίου εξόδου είναι 4mm για ενέματα χωρίς άμμο και 10mm για ενέματα με άμμο.



Εικόνα 7. Έλεγχος ρευστότητας σε κώνο τύπου Marsh

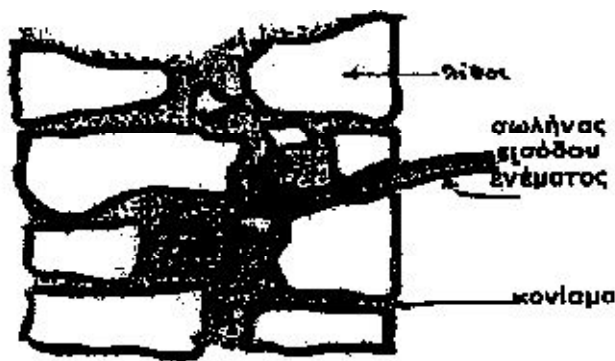
Πραγματοποιούνται τρεις δοκιμές για κάθε κώνο. Η ρευστότητα θεωρείται ικανοποιητική όταν ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για την διέλευση 500ml του ενέματος από των κώνο διαμέτρου οπής 4mm ή 10mm είναι 30-45s και 13-25s, αντίστοιχα (Μιλτιάδου-Fezans, Αναγνωστοπούλου, & Καλαγρή, Τεχνικές Προδιαγραφές και Απαιτούμενος Εξοπλισμός για το Σχεδιασμό και την Εφαρμογή των Ενεμάτων, 2006).

3.3.3 Διεισδυτικότητα

Με τον όρο διεισδυτικότητα εννοούμε την δυνατότητα ενός ενέματος να διεισδύσει στις ρωγμές ή τους πόρους του υποδοχέα. Ένα υδραυλικό ένεμα είναι ένα κοκκώδες αιώρημα το οποίο πρέπει να εισαχθεί σε κάποια ρωγμή με δεδομένο εύρος. Θα πρέπει η κοκκομετρία να είναι κατάλληλη σε σχέση με το μέγεθος των προς πλήρωση κενών. Αν οι κόκκοι είναι πολύ μεγάλοι, δεν θα μπορούν να περάσουν μέσα από μια λεπτή ρωγμή.

Στην αποκατάσταση των κατασκευών μας ενδιαφέρει τα ενέματα να είναι υψηλής διεισδυτικότητας καθώς οι λεπτές ρωγμές και τα μικρά κενά του κονιάματος ή των ρωγμών των αρχιτεκτονικών μελών αποτελούν συνήθως υποχρεωτικές διόδους για την πλήρωση των ρωγμών και κοιλοτήτων στο εσωτερικό τους.

Η εμπειρία και τα πειράματα που έχουν γίνει μέχρι τώρα απέδειξαν ότι τα ενέματα με το τσιμέντο για τις συνηθισμένες χρήσεις δεν μπορούν να διεισδύσουν σε εύρος ρωγμών ή κενών μικρότερο των 1-2mm. Όταν το εύρος της ρωγμής είναι μικρότερο δημιουργείται έμφραξη. Συγκεκριμένα, γίνεται απόμιξη του ενέματος, καθώς διέρχονται μόνο το νερό και τα πολύ λεπτόκοκκα υλικά. Έτσι, παρόλο που η πίεση αυξάνεται, η συνέχιση της ενέσεως καθίσταται αδύνατη.



Εικόνα 8. Τομή λιθοδομής

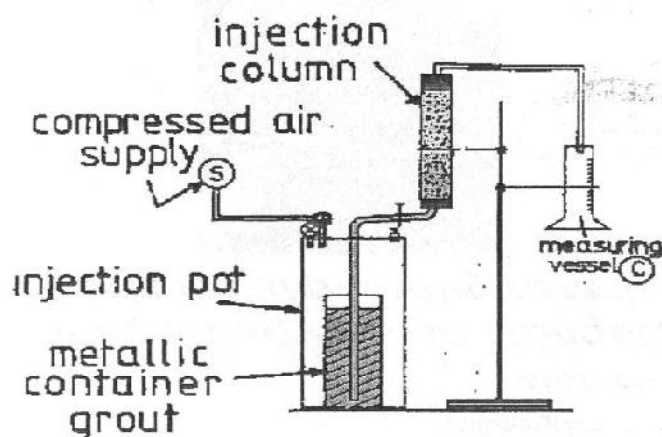
Διάφοροι ερευνητές, προκειμένου να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα της έμφραξης, προσπάθησαν να διατυπώσουν ένα κριτήριο διεισδυτικότητας, που τις πιο πολλές φορές ήταν ο λόγος του μεγέθους του εύρους της μικρότερης ρωγμής ή πόρου του προς επισκευή υλικού, προς το μέγεθος των μεγαλύτερων κόκκων της στερεάς φάσης του ενέματος.

Ο λόγος αυτός διακυμαίνεται στην βιβλιογραφία μεταξύ 1,5 και 15. Η διαφορά στην εκτίμηση της τιμής του λόγου αυτού οφείλεται στην μεγάλη ποικιλία των προς επισκευή υλικών (εδάφη, σκυρόδεμα, λιθοδομές κλπ.), στην δυσκολία αναπαραγωγής τους σε συνθήκες εργαστηρίου και στο ότι συχνά η έρευνα συσχετιζόταν με συγκεκριμένα προβλήματα εφαρμογής και δεν ήταν συστηματική.

Αν πάρουμε ένα μέσο όρο αυτών των τιμών και αν θεωρήσουμε ότι οι μεγαλύτεροι κόκκοι του τσιμέντου έχουν διάμετρο περίπου 200μm, βλέπουμε ότι το ένεμα που αντιστοιχεί στο τσιμέντο αυτό δεν μπορεί να διεισδύσει σε ρωγμή εύρους 2-3mm. Αν επίσης, θεωρήσουμε

ότι το ένεμα περιέχει και άμμο με κόκκους διαμέτρου περίπου 1mm τότε αυτό το όριο γίνεται ακόμα μεγαλύτερο, περίπου 1cm. Στην περίπτωση των λιθοδομών καταλαβαίνουμε εύκολα ότι οι λεπτές ρωγμές παίζουν ένα ιδιαίτερο ρόλο στην επιτυχία της ενέσεως καθώς αποτελούν για το ένεμα θέσεις υποχρεωτικής διέλευσης (Μιλτιάδου-Fezans A. , 1991).

Έτσι, χρησιμοποιώντας ένα πρότυπο πείραμα, την στήλη άμμου, ελέγχθηκαν πάρα πολλά τσιμέντα.



Εικόνα 9. Πειραματική διάταξη στήλης άμμου

Μέσω του πειράματος της στήλης άμμου προσδιορίζεται ο χρόνος διέλευσης του ενέματος. Χρησιμοποιείται προτυποποιημένη άμμος, συγκεκριμένης κοκκομετρίας, ώστε να προσομοιώνονται κενά και ρωγμές συγκεκριμένου εύρους. Συγκεκριμένα γεμίζουμε την στήλη με κάποια γνωστή διαβάθμιση άμμο, για την οποία γνωρίζουμε σε τι κενά αντιστοιχεί. Το δοχείο του ενέματος γεμίζεται με πολύ χαμηλή πίεση και οδηγούμε το ένεμα να διέλθει μέσα από την στήλη. Αν διέλθει σημαίνει πως έχει ικανοποιητική ενεσιμότητα.

Κριτήρια διεισδυτικότητας

Προκειμένου να βελτιωθεί η διεισδυτικότητα, αλλά και η ρευστότητα και σταθερότητα των ενεμάτων τσιμέντου ή υδραυλικής άσβεστου που δεν πληρούν τις παραπάνω προϋποθέσεις και προκειμένου να διασφαλιστούν οι επιθυμητές αντοχές και η ανθεκτικότητα, προστίθενται λεπτόκοκκα υλικά που αντικαθιστούν σε κατάλληλο ποσοστό το τσιμέντο ή την υδραυλική άσβεστο. Το ελάχιστο ποσοστό των λεπτόκοκκων αυτών υλικών που θα αντικαταστήσουν το τσιμέντο ή την υδραυλική άσβεστο, έτσι ώστε να βελτιωθεί επαρκώς η κοκκομετρική διαβάθμιση της στερεάς φάσης του ενέματος και να διασφαλιστεί η διεισδυτικότητα σε πολύ λεπτές ρωγμές, εξαρτάται από την κοκκομετρία του τσιμέντου ή της υδραυλικής άσβεστου αντίστοιχα, ενώ το μέγιστο ποσοστό καθορίζεται από τις απαιτήσεις αντοχών και ανθεκτικότητας. Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα προσαρμογής των χαρακτηριστικών του στερεοποιημένου ενέματος στις απαιτήσεις αντοχής και συμβατότητας με τα υπάρχοντα υλικά. Επιγραμματικά να αναφερθεί πως μετά από μελέτη ποικίλων συνθέσεων υδραυλικών ενεμάτων προέκυψε πως η αντικατάσταση του τσιμέντου σε ποσοστό από 10% - 40% από θηραϊκή γη (που είναι και τα πιο συνήθη υλικά) δίνουν αντοχές σε θλίψη αποδεκτές σε περιπτώσεις τοιχοποιίας από λιθοδομή.

Για την επίτευξη της επιθυμητής διεισδυτικότητας αποδεικνύεται ο σημαντικός ρόλος που παίζει η τεχνική ανάμιξης με την οποία πρέπει να επιδιώκεται η πλήρης διασπορά των κόκκων της στερεάς φάσης του ενέματος και να εξασφαλίζεται η διαβροχή ολόκληρης της επιφάνειάς τους και η ομοιογενής κατανομή τους μέσα στο νερό. Η ανάμιξη με χρήση αναμικτήρα υψηλού στροβιλώδους αποδεικνύεται ικανοποιητική όταν τα λεπτόκοκκα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι υδράσβεστος σε μορφή σκόνης, φυσική ποζολάνη και μη συμπυκνωμένη πυριτική παιπάλη.

Σε ό,τι αφορά στη διεισδυτικότητα πρέπει κανείς να λάβει υπόψη του το νερό και τον πλαστικοποιητή. Για κάθε υδραυλικό ένεμα που σχεδιάζουμε υπάρχει μια περιοχή όπου αυτό είναι ενέσιμο. Δηλαδή υπάρχει τέτοια αναλογία νερού-στερεών υλικών και πλαστικοποιητή όπου επιτυγχάνεται ενέσιμο ένεμα. Εάν για παράδειγμα σε ένα ένεμα με χαμηλό ποσοστό αναλογίας νερού-στερεών υλικών δεν προσθέσουμε πλαστικοποιητή, το ένεμα που θα προκύψει δεν είναι ενέσιμο. Αν προσθέσουμε πλαστικοποιητή, αυξάνοντας ταυτόχρονα και την αναλογία νερού-στερεών υλικών, τότε θα εμφανιστεί το φαινόμενο της εξίδρωσης. Αν προσθέσουμε επιπλέον πλαστικοποιητή τότε το ένεμα θα παρουσιάσει μεγάλη απόμειξη.

3.3.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την ενεσιμότητα

Πήξη

Τα ενέματα είναι υλικά που έχουν σχεδιαστεί να πήξουν μετά από ένα λογικό χρονικό διάστημα. Όμως η πήξη δεν πρέπει να επηρεάζει τα χαρακτηριστικά ροής και άρα να εμποδίζει την ενεσιμότητα του μείγματος.

Για τα τσιμεντενέματα η πήξη αρχίζει περίπου μια ώρα μετά την ανάμιξη των υλικών του μείγματος, επηρεάζεται από την θερμοκρασία και μπορεί να ρυθμιστεί από την χρήση κατάλληλων πρόσμικτων (επιταχυντές – επιβραδυντές). Η αρχή της πήξης των τσιμεντενεμάτων καθορίζει τη διάρκεια που επιτρέπεται η διοχέτευσή του. Όταν η πήξη αρχίσει, η χρήση του μείγματος απαγορεύεται, διότι η διατάραξη της πήξης με την κίνηση του μείγματος θα επηρεάσει δυσμενώς την σκλήρυνση του ενέματος.

Για τα οργανικά ενέματα, ο χρόνος για τον οποίο είναι αρκετά ρευστά ώστε να μπορούν να ενεθούν, καλείται «διάρκεια χρήσης», ή «ανοικτός χρόνος» (POT-LIFE) και εξαρτάται από την θερμοκρασία κατά την ανάμιξη και κατά την εφαρμογή τους, από την ποσότητα του δοχείου ανάμιξης και από το σχήμα του δοχείου. Καθορίζεται από τον κατασκευαστή για κάθε συγκεκριμένο υλικό σε συγκεκριμένες συνθήκες.

Αστάθεια του μείγματος

Η καθίζηση και η διαστρωμάτωση είναι φαινόμενα που επηρεάζουν την ομοιογένεια του ενέματος, αλλάζουν τα χαρακτηριστικά ροής του και οδηγούν σε μία επαρκή ή προβληματική πλήρωση των κενών.

α)Καθίζηση είναι η τάση του νερού να ανεβαίνει στο πάνω μέρος του αιωρήματος ενώ τα στερεά σωματίδια καθιζάνουν. Η ταχύτητα καθίζησης καθορίζεται από την δυσκολία του νερού να κινηθεί μεταξύ των στερεών σωματιδίων.

β) Διαστρωμάτωση είναι η τάση των στερεών σωματιδίων του αιωρήματος να διατάσσονται σε οριζόντιες στρώσεις ανάλογα με το μέγεθός τους.

Η καθίζηση και η διαστρωμάτωση εξαρτώνται από τον λόγο νερού / στερεών σωματιδίων, από το σχήμα και το μέγεθος των κόκκων, από την φυσικοχημική τους συγγένεια με το νερό και από την κοκκομετρική διαβάθμιση (που επηρεάζει τους κενούς χώρους μεταξύ των κόκκων).

Η αστάθεια του αιωρήματος μπορεί να βελτιωθεί :

- Με την ανάμιξη του ενέματος σε πολύ υψηλές ταχύτητες ώστε να επιτευχθεί ένα κολλοειδές μείγμα.
- Χρησιμοποιώντας κατάλληλα πρόσμικτα, ρευστοποιητές, που μειώνουν την ποσότητα του απαιτούμενου νερού για δεδομένα χαρακτηριστικά ροής.
- Προσθέτοντας πολύ λεπτόκοκκα πληρωτικά υλικά, όπως άργιλο ή διογκωτικά πρόσμικτα, που μεγαλώνουν την ειδική επιφάνεια της στερεάς φάσης του μείγματος και βελτιώνουν την κοκκομετρική διαβάθμιση.

Απορρόφηση νερού από λιθοδομή

Όταν μέρος του νερού του ενέματος απορροφάται από τα γύρω στεγνά υλικά της λιθοδομής, η ένεση μπορεί να εμποδιστεί και το ένεμα να χάσει την σταθερότητα της σύνθεσής του.

Η απώλεια νερού μπορεί να αποφευχθεί : α) με προηγούμενη διύγρανση της λιθοδομής και β) προσθέτοντας στο ένεμα ειδικά πρόσμικτα για την συγκράτηση του νερού.

Γεωμετρικοί παράγοντες

Αφορούν τη σχέση μεταξύ των διαστάσεων των κόκκων του ενέματος και των διαστάσεων των κενών στα οποία το μείγμα πρόκειται να ενεθεί. Οι περισσότεροι εμπειρικοί και πειραματικοί κανόνες προτείνουν ότι η διάμετρος των μικρότερων κενών της λιθοδομής πρέπει να είναι 2-3 φορές μεγαλύτερη από την διάμετρο των μεγαλύτερων κενών του μείγματος.

Μια άλλη συνέπεια της γεωμετρίας της λιθοδομής στην επιτυχημένη εφαρμογή των ενεμάτων είναι ότι λόγω της ποικιλίας του εύρους των ρωγμών και των κενών οι ρωγμές μικρού εύρους κινδυνεύουν να μην γεμιστούν ακόμη κι αν το μείγμα είναι κατάλληλα σχεδιασμένο να τις διαπεράσει. Αυτό συμβαίνει διότι η ροή από τις ευρύτερες ρωγμές και κενά (λόγω της κατανομής των υδραυλικών πιέσεων και των ταχυτήτων ροής) εμποδίζει τη ροή του ενέματος στις γειτονικές ρωγμές μικρότερου εύρους (Μιλτιάδου-Fezans A. , 1985).

3.3.5 Μηχανικά χαρακτηριστικά

Αντοχή των υδραυλικών ενεμάτων

Η ανάλυση των μηχανικών χαρακτηριστικών των υδραυλικών ενεμάτων που περιέχουν τσιμέντο και λεπτόκοκκα υλικά οδήγησε στο συμπέρασμα ότι είναι δυνατόν να επιτευχθεί μια μεγάλη ποικιλία αντοχών ανάλογα με την ποσότητα και την φύση των

χρησιμοποιούμενων λεπτόκοκκων υλικών. Συνοπτικά, μέσα από μια σειρά ερευνών, διαπιστώθηκε ότι τα ενέματα των οποίων η στερεά φάση περιέχει λεπτόκοκκα υλικά σε ποσότητα που κυμαίνεται από 10-40%, έχουν αντοχή 28 ημερών σε ανεμπόδιστη θλίψη, η οποία διαφέρει ανάλογα με τη φύση του λεπτόκοκκου υλικού.

Η ύπαρξη μιας τέτοιας ποικιλίας αντοχών είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα από πρακτική άποψη. Είναι πράγματι σημαντική να υπάρχει η δυνατότητα επιλογής ενός ενέματος του οποίου τα μηχανικά χαρακτηριστικά μπορούν να προσαρμοστούν στις απαιτήσεις της γενικότερης μελέτης επισκευής και ενίσχυσης της λιθοδομής.

Συνάφεια υδραυλικών ενεμάτων – λιθοσωμάτων

Η ανάπτυξη συνάφειας του ενέματος με τα υλικά επί τόπου είναι μία από τις πιο σημαντικές ιδιότητές του, από την οποία εξαρτάται η ικανότητα του ενέματος να συνδέσει μεταξύ τους τα διάφορα υλικά της λιθοδομής και να επιτύχει την αποκατάσταση ή ενίσχυση της μηχανικής αντοχής της.

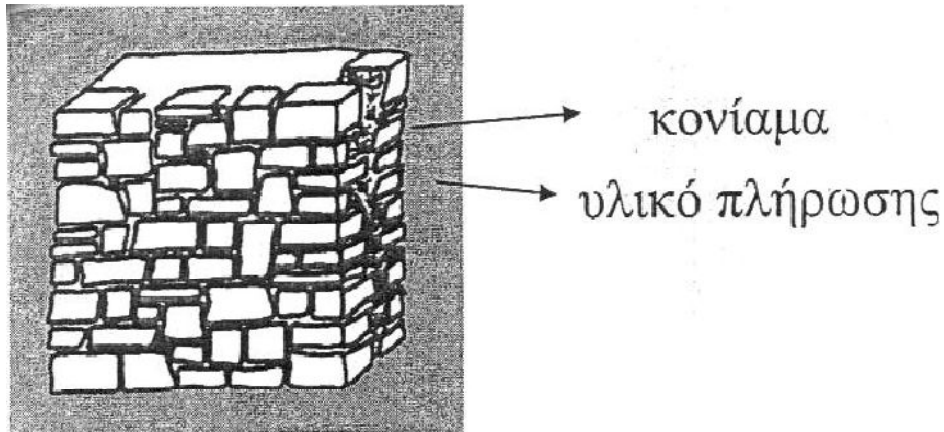
Οι αντοχές σε εφελκυσμό που μετρήθηκαν κυμαίνονται από 0,5-4MPa πράγμα που αποδεικνύει την πολύ καλή αντοχή συνάφειας. Επίσης, μέσω των πειραμάτων αυτών, αποδείχτηκε ότι ανάμεσα στον πολύ μεγάλο αριθμό παραγόντων που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της συνάφειας, πρέπει να δοθεί μια ιδιαίτερη προσοχή στις ανταλλαγές νερού μεταξύ ενέματος και λίθων.

Όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά και απαιτήσεις αποτελούν κριτήρια για τον ορθολογικό σχεδιασμό των ενεμάτων όπως έχουν εισηγηθεί οι (Μιλτιάδου-Fezans & Τάσιος, 2006).

3.3.6 Επισκευασμένη λιθοδομή

Στην περίπτωση των λιθοδομών, η διατομή της τοιχοποιίας αποτελείται συχνά από δύο πλευρές δομημένες με λίθους και αρμούς κονιάματος μεταξύ των οποίων υπάρχει ένα τμήμα αποτελούμενο από κομμάτια λίθων τυχαία τοποθετημένων και ελάχιστο κονίαμα. Το υλικό αυτό, δηλαδή το υλικό πληρώσεως, έχει συχνά υψηλό πορώδες και χαμηλές μηχανικές αντοχές. Επειδή το ένεμα, εισερχόμενο στο εσωτερικό αυτών των λιθοδομών, μεταβάλλει όχι μόνο τα μηχανικά χαρακτηριστικά του κονιάματος δομής αλλά και εκείνα του υλικού πληρώσεως, πραγματοποιήθηκαν πειράματα με εφαρμογή υδραυλικών ενεμάτων με βάση το τσιμέντο και λεπτόκοκκα καθώς και με βάση την υδραυλική για την εκτίμηση του βαθμού επισκευής μετά από την διενέργεια ενέσεων α) του κονιάματος δομής, β) του υλικού πληρώσεως, γ) πειραματικών τοιχίων τρίστωτης τοιχοποιίας.

Πειράματα απέδειξαν καταρχήν την ικανότητα των ενεμάτων να διεισδύσουν σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό στα κονιάματα και υλικά πληρώσεως που μελετήθηκαν. Η βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών τους, μετά την διενέργεια των ενέσεων, είναι πολύ σημαντική (Μιλτιάδου-Fezans A. , 1991) (Vintzileou & Miltiadou-Fezans, 2007) (Vintzileou, 2006) (Vintzileou, Miltiadou-Fezans, Papadopoulou, & Kalagri, 2006) (Kalagri, Miltiadou-Fezans, & Vintzileou, 2010) (Μιλτιάδου-Fezans, Αναγνωστοπούλου, & Καλαγρή, 2006).



Εικόνα 10. Τοιχοποιία αποτελούμενη από λίθους και αρμούς κονιάματος

4. Φθορά των δομικών υλικών

4.1. Ορισμός

Η φθορά των δομικών υλικών μπορεί να οριστεί κατά αναλογία του ορισμού της διάβρωσης, με την επισημάνση ότι ο όρος διάβρωση (corrosion) αφορά μεταλλικά υλικά, ενώ ο όρος φθορά (decay, wear, erosion) αφορά το σύνολο των υλικών.

«Διάβρωση είναι κάθε αυθόρμητη, ακόμα και εκβιασμένη, χημικής, ηλεκτροχημικής, φυσικής, μηχανικής, βιολογικής φύσης διεργασία αλλοίωσης της επιφάνειας εξωτερικής και εσωτερικής (πόροι) των υλικών, που οδηγεί σε απώλεια υλικού» (Σκουλικίδης & Βασιλείου, 2007, σ. 40).

4.2. Είδη φθοράς

Τα είδη φθοράς κατατάσσονται σε κατηγορίες ανάλογα με το αποτέλεσμα που προκαλούν:

- Ομοιόμορφη ή γενική φθορά ονομάζεται η φθορά, κατά την οποία δημιουργείται στην επιφάνεια του υλικού ένα ομοιόμορφο και σχεδόν ισόπαχο στρώμα προϊόντος φθοράς (π.χ. η γυψοποίηση στα ανθρακικά υλικά) ή πραγματοποιείται μια περίπου ομοιόμορφη διάλυση της επιφάνειας.
- Φθορά με βελονισμούς ορίζεται ο εκλεκτικός τοπικός μηχανισμός προϊόντος φθοράς ακόμη και όταν το υλικό καλύπτεται από προϊόντα φθοράς ή προστατευτικά υλικά, ή η εκλεκτική τοπική διάλυση της επιφάνειας (βελονισμοί) ή των περατωτικών ορίων των κρυστάλλων.
- Φθορά με μηχανική καταπόνηση, που οδηγεί σε ψαθυρή θραύση και έχει τα πιο επιβλαβή αποτελέσματα, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε εξαιρετικά μεγάλες καταστροφές, με σημαντικές οικονομικές επιπτώσεις για μικρή απώλεια υλικού από φθορά. Όταν από τη

φθορά με βελονισμούς ή μηχανικές κακώσεις δημιουργηθεί εσοχή (βελονισμός) στην επιφάνεια ενός μνημείου, μια μηχανής ή εγκατάστασης που καταπονείται μηχανικά (π.χ. σφόνδυλοι κίωνων που υπόκεινται σε καταπόνηση λόγω του βάρους τους, οριζόντιοι δοκοί, πρόβολοι ανυψωτικών μηχανημάτων και μηχανημάτων οδοποιίας, κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα κλπ) τότε ενδέχεται να πραγματοποιηθεί ψαθυρή θραύση ολόκληρου τμήματος, ακόμη και αν η μηχανική καταπόνηση είναι μικρή (μικρότερη από το 10% του φορτίου θραύσης). Ως παραλλαγή αυτού του είδους φθοράς μπορεί να θεωρηθεί η θραύση από κόπωση, η οποία συμβαίνει εξαιτίας εναλλασσόμενης φόρτισης με συνύπαρξη ή μη φθοράς.

- Τέλος, υπάρχει η σπηλαιώδης φθορά, η οποία είναι ένα είδος καθαρά μηχανικό. Σε αυτό παρατηρείται η δημιουργία εσοχών, σπηλαίων ή κρατήρων από τοπική εξάχνωση του υλικού, εξαιτίας παρουσίας υποπίεσης. Παρατηρείται στην περίπτωση ρευστών σε σωλήνες έντονης βροχής, ποτάμιου ρεύματος σε επαφή με μνημείο, σε πτερύγια αντλιών, ελίκων, πλοίων και αεροπλάνων.

4.3 Μηχανισμοί φθοράς

Εκτός από τις διάφορες συνθήκες που επηρεάζουν τη φθορά των υλικών, έχει ιδιαίτερη σημασία να αποκαλυφθεί ο μηχανισμός της κάθε διεργασίας φθοράς, ούτως ώστε να ανακαλύψουμε και τις μη φανερές συνθήκες, οι οποίες επηρεάζουν την ταχύτητα των διαβρωτικών δράσεων. Με αυτό τον τρόπο, γνωρίζοντας και περιορίζοντας τις γενικές συνθήκες που τις επιταχύνουν καθώς και αποκαλύπτοντας τις λεπτομέρειες του μηχανισμού, επιτυγχάνεται η επιβράδυνση, αναστολή ή και αναστροφή τους. Συγκεκριμένα για να αποκαλυφθεί ο μηχανισμός των δράσεων φθοράς πρέπει να προσδιοριστεί το βραδύτερο στάδιο τους, το οποίο είναι και αυτό που επιβάλλει τις συνθήκες για την πραγματοποίησή του και την ταχύτητά του σε όλη τη δράση. Για να αποκαλυφθεί όμως ο μηχανισμός μια διεργασίας φθοράς πρέπει να ακολουθηθεί μια συγκεκριμένη πορεία. Η πορεία αυτή περιλαμβάνει δυο στάδια, τις μακροσκοπικές και μικροσκοπικές παρατηρήσεις και την επιλογή των κατάλληλων συνθηκών επιτάχυνσης και εξομίωσης της κάθε δράσης. Το δεύτερο αυτό στάδιο περιλαμβάνει την επιλογή άμεσων κατάλληλων μεθόδων μέτρησης, όπως πχ η ελάττωση βάρους κατά την όξινη προσβολή ή η αύξηση βάρους κατά τη θείωση, την επιλογή κατάλληλων συνθηκών και τη χρήση τους στην επιτάχυνση των δράσεων και την μαθηματική επεξεργασία των μετρήσεων ώστε να προκύψει ένα αποδεκτό και αποδεδειγμένο μοντέλο της δράσης φθοράς (Σκουλικίδης, 2000, σσ. 78-85).



Εικόνα 11. Εξάνθιση αλάτων στα περατωτικά όρια ψηφίδων.

4.3.1 Επίδραση των υδατοδιαλυτών αλάτων στα μνημεία

Η κρυστάλλωση ευδιάλυτων αλάτων στο εσωτερικό των πόρων των υλικών αποτελεί μια από τις κυριότερες αιτίες φθοράς των δομικών υλικών των ιστορικών μνημείων. Η φθορά προκαλείται από την ανάπτυξη κρυστάλλων αλάτων από αλατούχα διαλύματα, κατά τις αυξομειώσεις θερμοκρασίας και υγρασίας, οι οποίοι ασκούν τάσεις στα τοιχώματα των πόρων. Το πρόβλημα αυτό είναι πιο έντονο σε παραθαλάσσιες περιοχές όπου το νερό της βροχής είναι μεγάλης περιεκτικότητας σε ευδιάλυτα άλατα.

Τα περισσότερα άλατα που αναφέρονται στην βιβλιογραφία ότι προκαλούν φθορές στα δομικά υλικά διαλύονται και καταβυθίζονται ανάλογα με τις συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας. Η αποφυγή των διαδοχικών κύκλων διάλυσης και κρυστάλλωσης θα μπορούσε να ήταν ένας τρόπος αποφυγής της συνακόλουθης φθοράς. Αν προσδιοριστούν τα άλατα που βρίσκονται στο εσωτερικό των πόρων, μπορεί να προσδιοριστεί και το εύρος της υγρασίας πέρα από το οποίο τα μείγματα αυτά είτε θα διαλυθούν είτε θα καταβυθιστούν, δείχνοντας τις καταλληλότερες συνθήκες έκθεσης των αρχαίων αντικειμένων. Ωστόσο, η πλειοψηφία των μνημείων δεν μπορούν να τοποθετηθούν σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα, και γι' αυτό το πρόβλημα προστασίας τους παραμένει δυσεπίλυτο.



Εικόνα 12. Φθορά από κρυστάλλωση αλάτων στο πορώδες των ψηφίδων.

4.3.2. Εξάνθιση αλάτων (Borrelli, Salts, 1999)

Γενικά

Η παρουσία υδατοδιαλυτών αλάτων σε πορώδη δομικά υλικά είναι ένα από τα κύρια προβλήματα συντήρησης. Η κρυστάλλωσή τους είναι στην πραγματικότητα η αιτία αυτών των φαινομένων φθοράς που τόσο συχνά εμφανίζονται επί των επιφανειών: έλλειψη συνοχής, αποσάθρωση και διόγκωση.

Πηγές των αλάτων μπορεί να είναι τα ίδια τα υλικά του κτιρίου (άμμος, τούβλα, κονίαμα) ή εξωτερικές πηγές (έδαφος, τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τις μεθόδους συντήρησης, ρύποι στην ατμόσφαιρα, η αλμύρα της θάλασσας, άλατα παγετού που είναι διάσπαρτα στους δρόμους το χειμώνα, τα προϊόντα που παράγονται από το μεταβολισμό των

μικροοργανισμών). Τα άλατα μεταφέρονται στα πορώδη υλικά από τα όμβρια ύδατα, την ανερχόμενη υγρασία, τη διήθηση ή τη συμπύκνωση.

Σχεδόν όλη οι τοιχοποιία περιέχει διαλυτά άλατα, κυρίως θειικά, νιτρικά, χλωριούχα και ανθρακικά άλατα του νατρίου, καλίου, ασβεστίου, μαγνησίου και αμμωνίου και έτσι όλο το νερό που υπάρχει στους τοίχους είναι περισσότερο ή λιγότερο ένα αραιωμένο διάλυμα άλατος.

Αλλά δεν δημιουργούν όλα τα άλατα αποσύνθεση. Αυτό εξαρτάται από την διαλυτότητα, υγροσκοπικότητα, την κινητικότητα τους και το επίπεδο υγρασίας της κρυσταλλικής μορφής τους. Όταν το νερό που μεταφέρει τα άλατα μέσω των πορωδών υλικών εξατμίζεται, λόγω, για παράδειγμα, των μεταβαλλόμενων κλιματικών συνθηκών, το διάλυμα γίνεται πιο συγκεντρωμένο. Όσο πιο σύντομα γίνεται υπερκορεσμένο, τα άλατα κρυσταλλώνουν δημιουργώντας και αποσαθρώσεις στην επιφάνεια ή / και υπό-αποσαθρώσεις κάτω από την επιφάνεια του στρώματος.

Είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε την περιεκτικότητα σε αλάτι των βαθύτερων επιφανειών, για να κατανοήσουμε τα αίτια της αποσάθρωσης και για να σχεδιάσουμε τη στρατηγική συντήρησης. Η φύση του άλατος μας παρέχει πληροφορίες σχετικά με την καταγωγή του και ως εκ τούτου, υποδεικνύει την πιθανή μέθοδο συντήρησης που θα ακολουθήσουμε. Για παράδειγμα, η παρουσία νιτρικών αλάτων αποδίδεται γενικά στην διείσδυση νερού λυμάτων ή την ύπαρξη χώρων ταφής, ενώ θειικά άλατα είναι συχνά λόγω της επίδρασης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης ιδίως στις αστικές περιοχές.

Διαλυτότητα

Είναι η μέγιστη ποσότητα της διαλυμένης ουσίας (άλας), που θα διαλυθεί σε μία δεδομένη ποσότητα νερού. Η διαλυτότητα συνήθως εκφράζεται σε g/l ή g/100 ml σε μια δεδομένη θερμοκρασία. Η διαλυτότητα είναι συνεχής σε μια σταθερή θερμοκρασία και γενικά αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Κορεσμένο διάλυμα

Πρόκειται για διάλυμα που περιέχει το μέγιστο ποσό ισορροπίας της διαλυμένης ουσίας σε μια δεδομένη θερμοκρασία. Σε ένα κορεσμένο διάλυμα, η διαλυμένη ουσία είναι σε ισορροπία με την αδιάλυτη ουσία. Με άλλα λόγια, ο ρυθμός με τον οποίο τα σωματίδια διαλυμένης ουσίας κρυσταλλώνονται είναι ακριβώς σε ισορροπία με το ρυθμό με τον οποίο αυτά διαλύονται. Ένα διάλυμα που περιέχει περισσότερη από την ποσότητα ισορροπίας της διαλυμένης ουσίας λέγεται υπερκορεσμένο (και μπορεί να σχηματίζεται από την αργή ψύξη ενός κορεσμένου διαλύματος). Τέτοια διαλύματα είναι μεταβαλλόμενα, εάν προστεθεί ένα μικρό κομμάτι κρύσταλλου η περίσσεια διαλυμένης ουσίας κρυσταλλώνεται από το διάλυμα.

Κρυστάλλωση

Η κρυστάλλωση λαμβάνει χώρα όταν οι συνθήκες του άλατος που παραμένει στο διάλυμα δεν υπάρχουν πλέον: σε αυτό το σημείο το διάλυμα είναι υπερκορεσμένο.

Σε πορώδη δομικά υλικά η κρυστάλλωση μπορεί να πραγματοποιηθεί:

- Μέσα στους πόρους των υλικών, εάν το διάλυμα γίνει υπερκορεσμένο, δηλαδή, εάν η συγκέντρωση των αλάτων υπερβαίνει της διαλυτότητας.
- Στις επιφάνειες υλικών σε σχέση με το επίπεδο της υγρασίας του περιβάλλοντος. Είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε τη θερμοκρασία και τις σχετικές συνθήκες υγρασίας που

προκαλούν φάση μεταμόρφωσης των διαλυμάτων, κυρίως για περιβάλλοντα εσωτερικών χώρων όπου είναι πιο εύκολος ο έλεγχος των κλιματικών συνθηκών.

Εντός της τοιχοποιίας, κάθε κορεσμένο διάλυμα δεδομένου άλατος σε μια δεδομένη θερμοκρασία αντιστοιχεί στην «ισορροπία σχετικής υγρασίας». Όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος σχετικής υγρασίας καθίσταται χαμηλότερη από την ισορροπία σχετικής υγρασίας του κορεσμένου διαλύματος, η εξάτμιση από τα τοιχώματα λαμβάνει χώρα, το διάλυμα καθίσταται υπέρκορεσμένο και επιτυγχάνεται η συνθήκη της κρυστάλλωσης. Αυτό συμβαίνει, για παράδειγμα, όταν ένα δωμάτιο θερμαίνεται. Για να αποφευχθεί η κρυστάλλωση, είναι πάντοτε απαραίτητο να διατηρείται η σχετική υγρασία του περιβάλλοντος σε ένα υψηλότερο επίπεδο από την σχετική υγρασία ισορροπίας των αλάτων στο εσωτερικό της τοιχοποιίας.

Αλλοίωση

Υπάρχει μια σχέση μεταξύ της διαλυτότητας των αλάτων και της διασπαστικής δράσης τους στα υλικά:

- Πρακτικά αδιάλυτα άλατα δεν παράγουν φαινόμενα επικίνδυνης κρυστάλλωσης. Ακόμα κι αν η κακή διαλυτότητα τους επιτρέπει να φθάσουν σε κορεσμό μέσα στα υλικά, οι συγκεντρώσεις σε κορεσμό είναι ελάχιστες και ανεπαρκείς για να προκαλέσουν εμφανείς βλάβες.

- Ελαφρώς διαλυτά άλατα είναι γενικά πιο επικίνδυνα. Λόγω της χαμηλής τους διαλυτότητας, συχνά κρυσταλλώνονται ακριβώς κάτω από το στρώμα της επιφάνειας και προκαλούν διόγκωση, αποσάθρωση και απώλεια τμημάτων. Μεταξύ αυτών, ο γύψος που είναι το κυριότερο άλας ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), το οποίο κρυσταλλώνεται ακόμη και σε υγρά κλίματα, γίνεται η κύρια αιτία της φθοράς.

- Εξαιρετικά διαλυτά άλατα (κυρίως χλωριούχα και νιτρικά άλατα, χλωριούχο NaCl , νιτρικό νάτριο NaNO_3 , νιτρικό κάλιο KNO_3), μπορεί να συσσωρευτούν και να φθάσουν σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις των εξαιρετικά υγροσκοπικών αλάτων τα οποία ως εκ τούτου παραμένουν σε διάλυμα σε υγρά περιβάλλοντα που παράγουν σκούρα μπαλώματα. Σε ξηρότερες συνθήκες (π.χ. μέσα σε θερμαινόμενα κτίρια), όταν λαμβάνει χώρα η κρυστάλλωση, εμφανίζονται αποσαθρώσεις. Πάντως λόγω της υψηλής διαλυτότητας, η κρυστάλλωση απαιτεί ισχυρή εξάτμιση που πραγματοποιείται ειδικά επί των επιφανειών προκαλώντας περιορισμένη βλάβη. Μερικές φορές, η κρυστάλλωση είναι τόσο άφθονη ώστε απλώνεται κάτω από το επιφανειακό στρώμα επηρεάζοντας τη συνοχή.

Άλλη παράμετρος για την αξιολόγηση του κινδύνου των αλάτων είναι οι ιδιότητες ενυδάτωσης τους. $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (μιραβιλίτης) είναι ένα συγκεκριμένο παράδειγμα, καθώς είναι εξαιρετικά διαλυτός και ως εκ τούτου, σύμφωνα με την παραπάνω εξήγηση, δεν πρέπει να είναι επικίνδυνος ενώ στην πραγματικότητα είναι. Ο μιραβιλίτης, που απορρέει από την ενυδάτωση Na_2SO_4 (τεναρδίτης), αυξάνει σε όγκο κατά περίπου 400% προκαλώντας μεγάλη πίεση στο εσωτερικό της πορώδους δομής.

Η παρουσία των διαλυτών αλάτων στα τοιχώματα μπορεί να προκαλέσει τη φθορά τους με τουλάχιστον τρεις τρόπους:

- τα διαλυτά άλατα προσελκύουν νερό και παράγουν φαινόμενο ώσμωσης και υγροσκοπικότητας, προκαλώντας μια αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία η οποία αφήνει πάντα υγρή την τοιχοποιία

- εξαιτίας των μικροκλιματικών διαφοροποιήσεων, τα αλατούχα διαλύματα που υπάρχουν στους τοίχους δημιουργούν κύκλους διάλυσης και κρυστάλλωσης. Αν αυτά είναι συχνά, ακόμα και καθημερινά, παράγουν μηχανική καταπόνηση και κατά συνέπεια κατάρρευση του υλικού.
- όταν τα άλατα κρυσταλλώνουν κοντά στην επιφάνεια, σχηματίζουν αποσαθρώσεις και υπό-αποσαθρώσεις.

4.3.3 Κύρια χαρακτηριστικά των συνηθέστερων υδατοδιαλυτών αλάτων

Θειικά SO_4^-

Πρόελευση

Γενικά βρίσκονται σε τοίχους, με τη μορφή του διένυδρου θειικού ασβεστίου ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$ γύψος), θειικού νατρίου ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ μιραβιλίτης) και σπανιότερα ως θειικού μαγνησίου ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$ εψωμίτης).

Η πιο σημαντική πηγή των θειικών ιόντων είναι η εναπόθεση ατμοσφαιρική ρύπανσης. Υγρό οξύς από διοξείδιο του θείου και η υγρασία από την από αέρος επίθεση ανθρακικού ασβεστίου στην τοιχοποιία σχηματίζουν θειικό ασβέστιο, αλλά σύμφωνα με ορισμένους ερευνητές και θειικά μπορούν επίσης να αποτίθενται επί της επιφανείας από τα αιωρούμενα σωματίδια που υπάρχουν στην αέρα (ξηρά απόθεση)

Άλλες πηγές περιλαμβάνουν

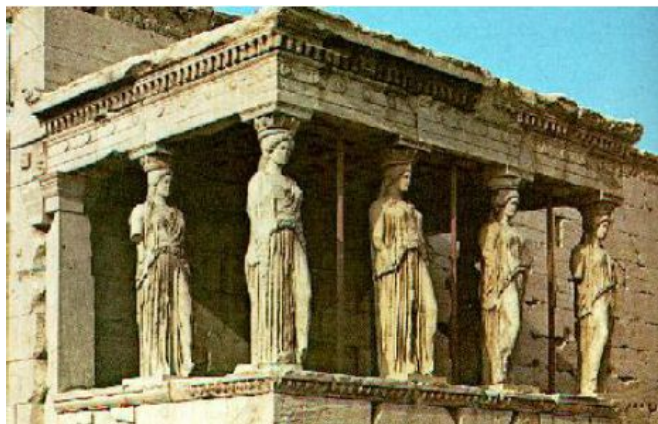
- αγροτική γη: (θειικό αμμώνιο), από τα οποία τα θειικά άλατα μπορούν να διαπεράσουν την τοιχοποιία μέσω της τριχοειδούς δράσης
- γνήσια ή πρόσθετα υλικά: ανόργανα συνδετικά υλικά όπως το τσιμέντο περιέχουν θειικά άλατα τα οποία μπορούν να ενεργοποιηθούν από το νερό. Το τσιμέντο Portland συνήθως περιέχει περίπου 4% θειικό ασβέστιο και ορισμένα συνδετικά αρμολόγησης περιέχουν θειικό νάτριο ως ακαθαρσία, όταν προστίθενται οι πλαστικοποιητές
- ψέκασμα θαλασσινού νερού: το οποίο περιέχει χαμηλές συγκεντρώσεις θειικού μαγνησίου που μπορεί να βρίσκονται κυρίως στις επιφάνειες
- μικροοργανισμοί: μερικές φορές υπάρχουν σε ασβεστολιθικά υλικά και είναι σε θέση να μεταβολίζουν ενώσεις που περιέχουν μειωμένες μορφές του θείου οξειδώνοντάς τους σε θειικές.

Οι πιο κοινές μορφές φθοράς τους

- Μαύρα στίγματα: βρίσκονται γενικά στα ασβεστούχα υλικά των κτιρίων που είναι μεν προστατευμένα από τη βροχή, αλλά εκτεθειμένα στην ατμοσφαιρική ρύπανση. Η σύνθεσή τους είναι ουσιαστικά ο γύψος και το μαύρο χρώμα οφείλεται στη συσσώρευση σωματιδίων άνθρακα που υπάρχουν στο μολυσμένο αέρα. Εκτός από διατάραξη της αισθητικής εμφάνισης της επιφάνειας, μπορούν επίσης να αποκρύψουν τη βλάβη που εκτείνεται πολύ κάτω από το επιφανειακό στρώμα.

Οι αποσαθρώσεις είναι ιδιαίτερα εμφανείς στις τοιχογραφίες και γενικά εμφανίζονται σε τρεις μορφές:

- γύψινη σκόνη: μια υπόλευκη κατάθεση (από μερικά μικρόμετρα έως 0,1mm) αναμιγνύεται με μικρά θραύσματα του επιφανειακού στρώματος που επικάθονται ελαφρά σε αυτήν.



Εικόνα 13. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το πεντελικό μάρμαρο στο οποίο η διάλυση του στρώματος του γύψου στην επιφάνεια του απαλείφει τις λεπτομέρειες από το πρόσωπο και τις πτυχές του χιτώνα των Καρυάτιδων.

- λευκές κρούστες: μεταξύ 0,1 και 1mm σε μέγεθος, είναι καλά προσκολλημένες στην επιφάνεια και βρίσκονται συνήθως κοντά σε μικρές ατέλειες (π.χ. ρωγμές) Είναι κατασκευασμένα από συμπλέγματα του συνολικού γύψου.
- λεύκανση: υπόλευκα ή διαφανή στρώματα τα οποία μπορούν να αποκολληθούν από την επιφάνεια σε νιφάδες. Είναι τυπικά από περιοχές με αυξημένη υγρασία και μπορεί να γίνουν σκόνη γύψου όταν η υγρασία μειώνεται.

Η διάβρωση: ο γύψος είναι εύκολα προσροφημένος στο μακρο-πορώδες των κονιαμάτων σχηματίζοντας αρχικά λεπτά υπό-επιφανειακά, σταδιακά αποσπώ μικροθραύσματα από την επιφάνεια.

Χλωριούχα Cl^-

Η πιο κοινή πηγή είναι το σπρέι θαλάσσης. Ιόντα χλωρίου μπορεί επίσης να προέρχεται από τις ακαθαρσίες που υπάρχουν στα δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται. Τα χλωριούχα είναι πολύ διαλυτά άλατα και αυτό τους επιτρέπει ακόμη και να διεισδύσουν πολύ βαθιά μέσα στα υλικά προκαλώντας μετατροπές. Η υψηλή περιεκτικότητα σε νερό στα τοιχώματα, μετά από τους κύκλους κατάψυξης-απόψυξης, οδηγεί στο σχηματισμό ρωγμών και αποσάθρωση. Η διάβρωση του οπλισμού χάλυβα στο σκυρόδεμα μπορεί να συμβεί όταν οι ρωγμές επιτρέπουν στα χλωριούχα να διεισδύσουν στην δομή.

Τα νιτρώδη και νιτρικά άλατα NO_2^- NO_3^-

Τα νιτρώδη άλατα παράγονται από τη βιολογική αποσύνθεση των προϊόντων που περιέχουν άζωτο και μπορεί, επομένως, να βρεθούν όπου υπάρχει διείδυση λυμάτων ή υποδεικνύεται ταφικό μνημείο. Η τάση για τα νιτρώδη (NO_2) να οξειδώνονται σε νιτρικά άλατα (NO_3) το καθιστά δύσκολο να εντοπιστούν στην τοιχοποιία. Τα νιτρικά άλατα, όπως τα χλωριούχα, είναι ιδιαίτερα διαλυτά. Η πιο σοβαρή βλάβη οφείλεται στην υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία στην τοιχοποιία που προκαλείται από την υγροσκοπικότητα των

νιτρικών αλάτων. Αυτό οδηγεί στο φαινόμενο της αποσύνθεσης που συνήθως συμβαίνει σε τοιχοποιία με μόνιμα υψηλό περιεχόμενο υγρασίας.

Ανθρακικά CO_3^-

Το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3 ασβεστίτης) είναι ένα συστατικό τόσο ασβεστολιθικών λίθων όσο και κονιαμάτων, και αν και είναι πρακτικά αδιάλυτο στο νερό, μπορεί να μεταμορφωθεί σε ένα πιο διαλυτό όξινο ανθρακικό $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Το διαλυτό όξινο ανθρακικό έρχεται στην επιφάνεια και σχηματίζει αδιάλυτο CaCO_3 που εναποτίθεται στην επιφάνεια. Παρουσιάζεται συσσώρευση ασβεστούχων υλικών σε μορφή κρούστας και συγκέντρωση κυρίως σε προεξέχοντα τμήματα των κτιρίων (όπου λαμβάνει χώρα η κρυστάλλωση). Ένα μείγμα από $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ και NaHCO_3 έχει διασπαστική επίδραση στα δομικά υλικά.

Οξαλικά $\text{C}_2\text{O}_4^{--}$

Μπορεί να προέλθει από τη βιοκαταστροφή από ορισμένους μικροοργανισμούς σύνθετων πρωτεϊνών (όπως η καζεΐνη) που μερικές φορές εφαρμόζονταν σε εργασίες συντήρησης του παρελθόντος. Η παρουσία του οξαλικού οξέος ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) που εκκρίνεται από λειχήνες, αντιδρώντας με τον ασβεστίτη (CaCO_3) στην επιφάνεια, δημιουργεί οξαλικό ασβέστιο (CaC_2O_4) με διαφορετικές καταστάσεις ενυδάτωσης όπως whewellite ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) και weddellite ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Αυτά είναι και τα δύο πολύ αδιάλυτα, σε αντίθεση με τα περισσότερα από όσα άλλα άλατα έχουν ληφθεί μέχρι σήμερα υπόψη. Η παρουσία των οξαλικών εμφανίζεται ως χρωματική αλλοίωση: γενικά κιτρινωπή, κοκκινωπή ή καφετί πατίνα ανάλογα με τις ακαθαρσίες που περιέχει. Είναι συνήθως καλά προσκολλημένα στην επιφάνεια του πετρώματος.

Φωσφορικά PO_4^{---}

Τα περιττώματα πουλιών περιέχουν φωσφορικά άλατα. Η συσσώρευση περιττωμάτων επιτρέπει στα φωσφορικά άλατα, τα οποία είναι διαλυτά, να μετακινούνται σε μεγάλες εκτάσεις της επιφάνειας κάτω από υγρές συνθήκες. Μια άλλη πηγή των φωσφορικών αλάτων είναι τα λιπάσματα (φωσφορικά άλατα του αμμωνίου). Εμφανίζονται σκούρες μαύρες εναποθέσεις και άσπρα μπαλώματα που είναι πλούσια σε οργανική ύλη που παρέχουν θρεπτικά συστατικά για μικροβιολογική ανάπτυξη και ως εκ τούτου αύξηση της φθοράς.

4.3.4. Ο ρόλος του πορώδους στα δομικά υλικά (Borrelli, Porosity, 1999)

Πολλά δομικά υλικά, τόσο φυσικά (πετρώματα) όσο και τεχνητά (τούβλα, ασβέστης και τσιμεντοκονίαμα) περιέχουν ένα ορισμένο όγκο κενού χώρου. Αυτός διανέμεται εντός της στερεάς μάζας, με τη μορφή πόρων, κοιλοτήτων και ρωγμών διαφόρων σχημάτων και μεγεθών. Το συνολικό άθροισμα αυτών των κενών χώρων ονομάζεται πορώδες και είναι ένα θεμελιώδες χαρακτηριστικό του δομικού υλικού που επηρεάζει τις φυσικές ιδιότητες του (αντοχή, μηχανική αντοχή, κ.λπ.).

Τα χαρακτηριστικά των πόρων σε πετρώματα εξαρτώνται κυρίως από τη προέλευσή τους (πυριτικά, ιζηματογενή, κλπ), ενώ το πορώδες τεχνητών δομικών υλικών εξαρτάται από την κατασκευή τους. Η γνώση της δομής των πόρων είναι μια σημαντική παράμετρος για τον χαρακτηρισμό των υλικών, την πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους σύμφωνα με τις καιρικές

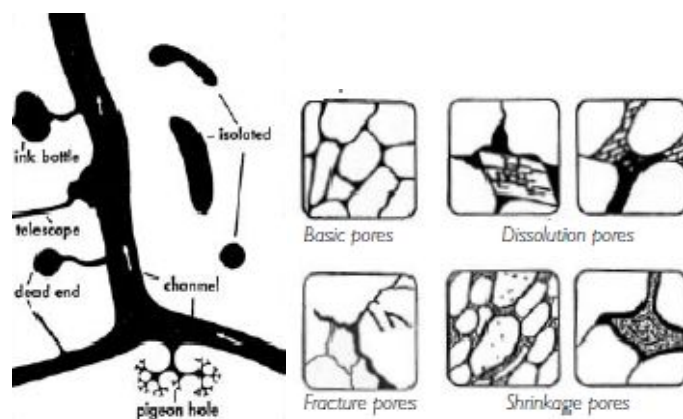
συνθήκες, αξιολογώντας το βαθμό της φθοράς και προσδιορίζοντας την αποτελεσματικότητα των επεμβάσεων συντήρησης.

Κατάταξη των πόρων

Οι πόροι μπορούν ουσιαστικά να ταξινομούνται σύμφωνα με την τυπολογία, τη γεωμετρία και το μέγεθος τους.

Τυπολογία

- κλειστοί πόροι: οι εντελώς απομονωμένοι πόροι από την επιφάνεια του εξωτερικού, που δεν επιτρέπουν την πρόσβαση του νερού είτε σε ρευστή είτε σε υπό ατμών φάση. Αυτοί δεν επηρεάζουν ούτε την διαπερατότητα ούτε τη μεταφορά υγρών στα υλικά, αλλά επηρεάζουν την πυκνότητά τους και τις μηχανικές και θερμικές ιδιότητες.
- ανοιχτοί πόροι: οι πόροι που συνδέονται με την εξωτερική επιφάνεια του υλικού και ως εκ τούτου, με πρόσβαση στο νερό έχουν άμεση σχέση με την επιδείνωση των καιρικών φαινομένων. Οι ανοικτοί πόροι επιτρέπουν τη διέλευση του νερού και διατηρούν εσωτερική υγρασία μέσω της τριχοειδούς διαδικασίας. Αυτοί μπορεί να διαιρεθούν περαιτέρω σε αδιέξοδους ή συνδεδεμένους πόρους.



Εικόνα 14. Είδη πόρων και μορφολογία.

Γεωμετρία

Οι πόροι μπορούν επίσης να ταξινομηθούν ανάλογα με το σχήμα τους:

- σφαιρικοί πόροι, κυλινδρικοί πόροι και επιμήκεις πόροι

ή σύμφωνα με την προέλευσή τους:

- βασικοί πόροι: οι πόροι που προϋπάρχουν στη διαδικασία του σχηματισμού πετρώματος
- πόροι διάλυσης: οι πόροι που απορρέουν από τη χημική διάλυση των ανθρακικών αλάτων, των θειικών, και των οργανικών υλικών (από μετατροπή σε CO₂)
- πόροι θραύσης: οι πόροι και μικρορωγμές που απορρέουν από την εισερχόμενη και κρυσταλλική μηχανική θραύση, που συνδέονται με την τεκτονική παραμόρφωση των πετρωμάτων και λόγω της πίεσης που προκαλείται από τα εφαρμοσμένα φορτία.
- πόροι συστολής: οι πόροι που προέρχονται από τη συρρίκνωση διάφορων παραμέτρων των υλικών τοιχοποιίας, κυρίως τεχνητών π.χ. η συρρίκνωση των κονιαμάτων λόγω της ταχείας απώλειας νερού.

Μέγεθος

Τα μεγέθη των πόρων, ποικίλουν από λίγα Angstrom (Å) έως αρκετά χιλιοστά. Οι πόροι μεγαλύτερων διαστάσεων ορίζονται ως κοιλότητες παρά ως πόροι, και δεν συμβάλλουν στην τριχοειδή εξέλιξη. Πόροι με ακτίνα λιγότερο από 1Å δεν θεωρούνται διαπερατοί.

Υπάρχουν αντικρουόμενες απόψεις σχετικά με την κατάταξη του μεγέθους των πόρων. Στην πράξη, όταν οι ειδικοί συντήρησης μιλούν για διατήρηση του πορώδους, γενικά δεν αναφέρονται στις τιμές που ορίζονται παρακάτω, αλλά σε μία διαχωριστική γραμμή από <2,5μm και> 2,5μm μεταξύ μικροπορώδους και μακροπορώδους, η οποία είναι πιο ρεαλιστική όταν έχει να κάνει με δομικό υλικό.

Διεθνή πρότυπα (IUPAC) ταξινομούν τους πόρους σύμφωνα με την ακτίνα τους

μικροπορώδες:	ακτίνα	<0,001μm	(<10Å)
μεσοπορώδες:	ακτίναμεταξύ	0,001μm και 0,025μm	(10Å και 250Å)
μακροπορώδες:	ακτίνα	> 0,025μm	(>250Å)

Η ποσοστιαία κατανομή των πόρων διαφορετικής ακτίνας εντός του υλικού είναι μια εξαιρετικά σημαντική παράμετρος για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του σε επαφή με το νερό και ως εκ τούτου για την πρόβλεψη των κύκλων ψύξης-απόψυξης, χημική δραστηριότητα κ.λ.π.

Υπάρχει προφανώς μια μεγάλη διακύμανση του πορώδους από το ένα υλικό στο άλλο. Πυριτικά (π.χ. από γρανίτη, βασάλτη) και παραμορφωτικά (π.χ. μάρμαρα), πετρώματα δεν είναι πολύ πορώδη με μέγιστο πορώδες μεταξύ 1% και 2%. Εκτός αν είναι ρηγματωμένα, αυτά τα πετρώματα χαμηλού πορώδους είναι μόλις και μετά βίας διαπερατά.

Πολλά ιζηματογενή πετρώματα, όμως, και κυρίως ασβεστολιθικοί ψαμμίτες, έχουν υψηλό πορώδες με μέγιστη τιμή να φτάνει ακόμη και το 45%.

Rock type	Genesis	Geological formation pressure	Geological formation temperature	% porosity (average value)	Predominant pore type
basalt	igneous	low	very high	≈ 1 - 3	macro
granite	igneous	high	very high	≈ 1 - 4	micro
tuff	igneous	low	high	≈ 20 - 30	micro
gneiss	metamorphic	high	high	≈ 0,4 - 2	micro
marble	metamorphic	high	high	≈ 0,2 - 0,3	micro
slate	metamorphic	high	medium-high	≈ 0,1 - 1	micro
coral stone	sedimentary	low	low	≈ 40 - 50	macro
limestone	sedimentary	low	low	≈ 15 - 20 ± equal	micro/macro
sandstone	sedimentary	low	low	≈ 10 - 15	macro

Πίνακας 1. Ποσοστό επί % πορώδους και είδη πόρων μερικών κοινών πετρωμάτων.

Βασική ορολογία

- όγκος πόρων (V_p)
είναι το κλάσμα του συνολικού όγκου του στερεού που καταλαμβάνεται από τους πόρους (ο κενός χώρος ενός στερεού).

- φαινόμενος όγκος (V_a)
είναι ο όγκος του στερεού συμπεριλαμβανομένου του χώρου που καταλαμβάνεται από τους πόρους.
(ένα κομμάτι πετρώματος μεγέθους 5 εκατοστών κάθε πλευρά έχει φαινομενικό όγκο $5 \times 5 \times 5 = 125 \text{ cm}^3$)

- συνολικό πορώδες (P ή φ) %
ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ του όγκου των πόρων (V_p), και του εμφανούς όγκου (V_a) που εκφράζεται ως ποσοστό.

$$\% \varphi = 100 \times (V_p/V_a)$$

(ένα κομμάτι του ασβεστόλιθου διαστάσεως 5 cm η κάθε πλευρά με ένα συνολικό πορώδες 22% περιέχει $27,5 \text{ cm}^3$ του κενού χώρου)

- όγκος ανοικτών πόρων (V_{op})
είναι ο όγκος που καταλαμβάνεται από τους ανοικτούς πόρους.

- ανοικτό πορώδες %
είναι μικρότερο από ή ίσο με το συνολικό πορώδες και ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ του όγκου των ανοικτών πόρων (V_{op}) και του φαινόμενου όγκου (V_a) που εκφράζεται ως ποσοστό.

$$\% \varphi = 100 \times (V_{op}/V_a)$$

Είναι επίσης γνωστό ως αποτελεσματικό πορώδες: ποσοστό των συνδεδεμένων χώρων πόρου (ένα κομμάτι από ασβεστόλιθο διαστάσεων 5 cm η κάθε πλευρά με ένα συνολικό πορώδες 22%, το οποίο περιέχει 20 cm^3 από ανοικτούς πόρους έχει ένα ανοικτό πορώδες 16%)

- πραγματικός όγκος (V_r)
είναι η διαφορά μεταξύ του φαινόμενου όγκου (V_a) και του όγκου των πόρων (V_p)

$$V_r = V_a - V_p$$

(ένα κομμάτι πετρώματος διαστάσεων 5 cm η κάθε πλευρά με ένα συνολικό πορώδες 22% έχει ένα πραγματικό όγκο $97,5 \text{ cm}^3$)

- ειδική επιφάνεια (S_s)
είναι η επιφάνεια από τα τοιχώματα των ανοιχτών πόρων και εκφράζεται ανά μονάδα όγκου του υλικού (m^2/m^3).

Κίνηση του νερού σε πορώδη δομικά υλικά

Η μελέτη του πορώδους είναι θεμελιώδης για την κατανόηση των φαινομένων μεταφοράς του νερού στην εσωτερική δομή των πόρων και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των υλικών και του νερού. Το νερό μπορεί να διεισδύσει σε ένα στερεό επειδή υπάρχουν επικοινωνούντα κανάλια (πόρων) στο εσωτερικό του στερεού που διευκολύνουν τη μεταφορά του. Το πετρώδες υλικό μπορεί να απορροφήσει την υγρασία από το περιβάλλον σε μορφή ατμών, ανάλογα με τη σχετική υγρασία και σε υγρή μορφή όταν εκτίθεται στην άμεση δράση του νερού (βροχόπτωση, ανερχόμενη υγρασία από τη συμπύκνωση των ατμών του εδάφους και του νερού από τον αέρα).

Σε υγρή μορφή:

α) Με τριχοειδή αναρρόφηση: όταν ένα αρχικά στεγνού πορώδους υλικό έρχεται σε επαφή με νερό, γίνεται προοδευτικά πιο υγρό. Αρχικά, γεμίζει τους μικρότερους πόρους, και στη συνέχεια δημιουργεί ένα υγρό φιλμ στην επιφάνεια των μεγαλύτερων πόρων, τελικά συμπληρώνοντας και αυτούς επίσης.

β) Με την διάχυση, μέσω της διέλευσης του νερού από μια υψηλότερη προς μια χαμηλότερη περιοχή περιεκτικότητας σε νερό.

γ) από την ώσμωση: όταν τα άλατα είναι παρόντα στο νερό, αυτά διασπώνται σε ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια (ιόντα) που προσελκύουν νερό μέσα από ηλεκτρική δύναμη.

Σε μορφή ατμού:

α) Με διάχυση ως ατμός, από πόρους με μεγάλη περιεκτικότητα υδρατμών σε πόρους με χαμηλότερη.

β) Με την υγροσκοπική απορρόφηση, η οποία μπορεί να συμβεί ακόμα και σε θερμοκρασίες πάνω από το σημείο υγροποίησης. Το φαινόμενο αυτό επιτείνεται με την παρουσία των διαλυτών αλάτων τα οποία είναι υγροσκοπικά και μπορεί να απορροφήσουν το νερό ακόμη και υπό μέσες συνθήκες της σχετικής υγρασίας.

γ) Με συμπύκνωση: όταν η θερμοκρασία του υλικού είναι μικρότερη από το σημείο υγροποίησης, ο υδρατμός στη συνέχεια συμπυκνώνεται εντός των πόρων. Σε μικρούς πόρους, η συμπύκνωση μπορεί να λάβει χώρα πριν η θερμοκρασία φθάσει στο σημείο υγροποίησης.

Αλλοίωση

Το μέγεθος των πόρων, η διανομή και η γεωμετρία τους είναι θεμελιώδεις παράγοντες για τον καθορισμό των ιδιοτήτων των υλικών και την καταλληλότητά τους για τη εφαρμογή τους σε κτίρια.

Ο βαθμός του πορώδους σε διαφορετικά υλικά μπορεί να είναι ένα θετικό χαρακτηριστικό για τη χρήση τους σε ορισμένες εφαρμογές (π.χ. πολύ πορώδης γύψος επιτρέπει την μεταφορά υδρατμών), αλλά μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στις επιδόσεις του σε άλλα (κάθε πωρόλιθος επιδεινώνεται γενικά πιο εύκολα).

Μία από τις κύριες αιτίες αποσύνθεσης του πετρώματος είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ του νερού και της πορώδους δομής.

Η απορρόφηση νερού μπορεί να προκαλέσει φθορά στα πετρώματα με διάφορους τρόπους:

α) με χημική αντίδραση (π.χ. επιθετικότητα ρύπων)

- β) με ένα φυσικό μηχανισμό: με μηχανική καταπόνηση λόγω κύκλου ψύξης / απόψυξης
- γ) ενεργώντας ως μέσο μεταφοράς για τα άλατα σε διαδικασία διάλυσης και ανακρυστάλλωσης μέσα στο χώρο του πόρου
- δ) παρέχοντας ένα βασικό υπόστρωμα για βιολογική ανάπτυξη.

Μέθοδοι μέτρησης

Οι τρεις δομικές ιδιότητες που είναι θεμελιώδεις για την περιγραφή πορωδών υλικών είναι το πορώδες, η κατανομή μεγέθους των πόρων και η ειδική επιφάνεια. Το σχήμα των πόρων είναι επίσης σημαντικό, αλλά πιο δύσκολα μετρήσιμο. Δεδομένου ότι αυτές οι ιδιότητες είναι γεωμετρικές, μπορούν να αξιολογηθούν με άμεση παρατήρηση. Άλλες μέθοδοι εκτίμησης ονομάζονται έμμεσες, όπως αυτές που προέρχονται από υπολογισμούς βάση άλλων παραμέτρων.

Άμεσες μέθοδοι

Εκείνες οι μέθοδοι που καθιστούν δυνατή την απευθείας παρατήρηση της δομής των πόρων, χρησιμοποιώντας είτε ένα μικροσκόπιο πετρογραφικό ή μικροσκοπία σάρωσης ηλεκτρονίων (SEM).

A) Πετρογραφικό Μικροσκόπιο

Η άμεση παρατήρηση στο μικροσκόπιο των λεπτών τομών των πορωδών υλικών καθιστά δυνατή την αξιολόγηση του συνολικού πορώδους που περιλαμβάνει κλειστούς πόρους. Αυτή είναι μια παραδοσιακή μέθοδος για τη μελέτη του πορώδους σε λεπτές τομές του υλικού, επιτρέποντας τον υπολογισμό της περιοχής που καταλαμβάνεται από πόρους ως ποσοστό της συνολικής επιφάνειας υπό εξέταση και συγχρόνως καταγράφει την κατανομή του μεγέθους τους.

Το πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι επιτρέπει την άμεση ποσοτικοποίηση σε ότι είναι ορατό. Ένα περαιτέρω σημαντικό χαρακτηριστικό είναι ότι συγκεκριμένα δεδομένα όπως το μέγεθος κατανομής των μεγαλύτερων πόρων μπορούν να ληφθούν μόνο με την παρούσα μέθοδο. Περιορίζεται σε αυτό ένας μεγάλος αριθμός από λεπτές τομές από διαφορετικά στρώματα και γωνίες του δείγματος που πρέπει να εξεταστεί ώστε να ληφθεί ένα στατιστικά βιώσιμο αποτέλεσμα από αυτές τις μετρήσεις.

Παρά το γεγονός ότι η ανάλυση αυτή είναι κατάλληλη για μεγαλύτερους πόρους, πόροι με ακτίνα μικρότερη από 4μm δεν είναι μετρήσιμοι. Αυτό εξαρτάται από την ανάλυση του οπτικού μικροσκοπίου, η οποία περιορίζει τη μέτρηση πόρων με ακτίνα μεταξύ 4 και 500μm.

Όταν συνδυάζεται με την ψηφιακή ανάλυση των εικόνων, η τεχνική αυτή υπολογίζει αυτόματα την περιοχή που καταλαμβάνεται από πόρους συγκρίνοντάς την με εκείνη που καταλαμβάνεται από το στερεό. Για το λόγο αυτό, είναι δυνατόν να πραγματοποιήσει ένα μεγάλο αριθμό μετρήσεων και συνεπώς να λάβει στατιστικώς έγκυρα δεδομένα.

B) Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM)

Αυτή είναι μια αποτελεσματική τεχνική για την ανάλυση υλικών που έχουν ένα μεγάλο αριθμό μικροπόρων.

Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δεν στηρίζεται σε εικονικά μοντέλα αξιολόγησης πόρων, τα οποία σε γενικές γραμμές θεωρούνται ότι είναι κυλινδρικά (βλέπε έμμεσες μέθοδοι), αλλά παρέχει μια πραγματική περιγραφή της δομής των πόρων. Είναι και πάλι αναγκαίο να εξεταστεί ένας μεγάλος αριθμός από λεπτές φέτες του υλικού για να είναι αντιπροσωπευτικό το αποτέλεσμα.

Το πρόβλημα της αντιπροσωπευτικότητας του δείγματος είναι το ίδιο όπως και στην προηγούμενη περίπτωση. Αυτή είναι μια εξαιρετικά εξελιγμένη μέθοδος και χρησιμοποιείται μόνο σε συγκεκριμένες περιοχές της έρευνας.

Έμμεσες μέθοδοι

Οι έμμεσες μέθοδοι μετρούν ορισμένες παράγωγες ιδιότητες, όπως η πυκνότητα, η διαπερατότητα σε υγρά (υγρό ή αέριο), τα ποσοστά υγρής διαβροχής, την ικανότητα προσροφητικότητας, έτσι ώστε να αξιολογηθεί η πορώδης δομή.

Η ποροσιμετρία Υδραργύρου και η μέτρηση αζώτου προσρόφησης είναι οι δύο πιο κοινές έμμεσες μέθοδοι στις οποίες το πορώδες ουσιαστικά συσχετίζεται με την πίεση αναγκαίο για να εισαχθεί ένα ρευστό μέσα στους πόρους του υλικού.

A) Μέτρηση ποροσιμετρίας υδραργύρου

Αυτή η τεχνική επιτρέπει τη μέτρηση της κατανομής του μεγέθους των πόρων στο εσωτερικό του υλικού. Ο υδράργυρος εισχωρεί μέσα μέσω της ολοένα αυξανόμενης πίεσης.

Η αρχή της μέτρησης βασίζεται στην εξίσωση Washburn:

$$r = 2\sigma \cos\theta / P$$

όπου:

P = πίεση που ασκείται

σ = επιφάνεια του υδραργύρου

θ = γωνία επαφής μεταξύ του υδραργύρου και του στερεού

r = ακτίνα πόρου

Η κατανομή των πόρων, καθώς και οι συνολικές τιμές πορώδους, η πραγματική και η φαινόμενη πυκνότητα και ο όγκος της διείσδυσης μπορούν να ληφθούν από την αναλογικότητα μεταξύ της πίεσης που είναι αναγκαία για τη διείσδυση και τη διάσταση των πόρων. Η θεωρία πάνω στην οποία βασίζεται η εξίσωση Washburn υποθέτει ότι όλοι οι πόροι είναι κυλινδρικοί. Στην περίπτωση των πόρων φιάλης μελάνης, για παράδειγμα, οι πραγματικές τους διαστάσεις είναι αδύνατο να υπολογιστούν, καθώς η μέτρηση αναφέρεται μόνο στην ακτίνα της εισόδου του πόρου.

Τρέχουσα όργανα επιτρέπουν την πίεση να φτάσει 4000bar (400MPa), η οποία τους επιτρέπει να συμπληρώσουν τους μακρο- και μικροπόρους. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή δεν συνιστάται για πολύ εύθραυστα υλικά.

Η ποσότητα του δείγματος που απαιτείται για την ανάλυση κυμαίνεται από 0,5 έως 1g και το κόστος δοκιμής είναι υψηλό.

B) Μέτρηση του αζώτου προσρόφησης

Αυτή η διαδικασία βασίζεται στην ποσότητα αερίου που προσροφάται από ένα πορώδες υλικό σε σταθερή θερμοκρασία και στην αύξηση των επιπέδων της πίεσης. Μία καμπύλη προκύπτει που ονομάζεται ισοθερμική της προσρόφησης που συσχετίζεται με την κατανομή των μεγεθών των πόρων εντός του στερεού. Διάφορα υγρά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τις διαστάσεις των πόρων που πρόκειται να μετρηθούν, αλλά το άζωτο έχει δώσει τα καλύτερα αποτελέσματα κάνοντας δυνατό τον προσδιορισμό των μικροπόρων.

Ένα γραμμάριο του δείγματος είναι αναγκαίο για την ανάλυση.

Απλές μέθοδοι

Όλες οι προαναφερθείσες μέθοδοι, τόσο άμεσες όσο και έμμεσες, έχουν το πλεονέκτημα ότι απαιτείται μόνο μια μικρή ποσότητα του δείγματος για την ανάλυση, αλλά το αρχικό κόστος των οργάνων είναι εξαιρετικά υψηλό.

Μπορεί να χρησιμοποιηθούν και άλλες έμμεσες μέθοδοι για να μελετηθεί το πορώδες, με βάση τα παράγωγα των υλικών, μετρώντας, για παράδειγμα, την απορρόφηση νερού με ολική βύθιση, την εκρόφηση νερού, την απορρόφηση νερού από το τριχοειδές φαινόμενο, και τη διαπερατότητα μέσω των υδρατμών. Αυτές οι δοκιμές, οι οποίες είναι εύκολο να πραγματοποιηθούν, καθιστούν δυνατή τη παρακολούθηση της συμπεριφοράς των δομικών υλικών που έρχονται σε επαφή με το νερό. Παρότι απλό, περιορίζονται από την ανάγκη να δουλευτούν σε δείγματα από ένα ειδικό γεωμετρικό σχήμα και μέγεθος (π.χ. κύβοι, κύλινδροι, κ.λπ.).

Τα δείγματα πρέπει να αναλυθούν για να ληφθεί ένα στατιστικά βιώσιμο αποτέλεσμα.

Α) Δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας με ολική βύθιση

Αυτή η δοκιμή μετρά τον ρυθμό απορρόφησης του νερού και τη μέγιστη απορρόφητική ικανότητα νερού. Η συνολική ποσότητα νερού που απορροφάται σχετίζεται με το συνολικό ανοικτό πορώδες, ενώ οι κινητικές της διεργασίας εξαρτώνται κυρίως από την κατανομή μεγεθών του πόρου.

Β) Δοκιμή εκρόφησης νερού

Αυτή μετρά την ταχύτητα εξάτμισης των κορεσμένων δειγμάτων σε θερμοκρασία και πίεση δωματίου. Αυτό είναι ένα εξαιρετικά χρήσιμο τεστ που δείχνει τις ιδιότητες ξήρανσης των υλικών (π.χ. αν θα στεγνώσει γρήγορα ή θα παραμείνει υγρό για μεγάλο χρονικό διάστημα).

Γ) Τριχοειδής υδαταπορρόφηση

Ο έλεγχος αυτός μετρά το τριχοειδές φαινόμενο του ύδατος, την συνηθέστερη μορφή μετακίνησης ρευστού νερού στα δομικά υλικά. Είναι αντιστρόφως ανάλογη προς τη διάμετρο των πόρων. Όσο μικρότερη είναι η διάμετρος, τόσο μεγαλύτερη είναι η τριχοειδής απορρόφηση. Ορισμένα δομικά υλικά, λόγω της χαμηλής τριχοειδούς απορρόφησης τους, επιλέγονται για συγκεκριμένες χρήσεις, για παράδειγμα, ως φράγμα σε τοιχοποιία που είναι σε επαφή με το έδαφος ή ως βάση κατασκευής ξύλου για την προστασία της από την ανερχόμενη υγρασία.

Όλες οι παραπάνω δοκιμές μπορούν να συσχετισθούν με τη συμπεριφορά της τοιχοποιίας σε επαφή με υγρό νερό.

Δ) Διαπερατότητα νερού μέσω ατμών

Η δοκιμή διαπερατότητας είναι πολύ σημαντική για να προβλέψουμε την ικανότητα μετάδοσης υδρατμού στα προστιθέμενα υλικά, ειδικά στους σοβάδες. Μετρά τη ποσότητα των υδρατμών που περνά μέσα από ένα δεδομένο πάχος του υλικού, περιορισμένο στις παράλληλες επιφάνειες, ως αποτέλεσμα της μερικής διαφοράς στην πίεση του ατμού του ύδατος μεταξύ των δύο πλευρών. Είναι επίσης μια χρήσιμη μέθοδος για την αξιολόγηση της καταλληλότητας των χρωμάτων ως στρώματα φινιρίσματος τα οποία παρέχουν προστασία χωρίς μείωση της μετάδοσης υδρατμών.

5. Θερμοδυναμική της κρυστάλλωση στο εσωτερικό πόρων.

Μια από τις βασικές αιτίες φθοράς των πορωδών δομικών υλικών είναι η κρυστάλλωση των υδατοδιαλυτών αλάτων από το υδατικό διάλυμα των ιόντων τους που γεμίζει τους πόρους του υλικού. Οι κρύσταλλοι των αλάτων σχηματίζονται από τα αντίστοιχα διαλύματα, όταν η συγκέντρωση των ιόντων ξεπεράσει τις τιμές που ορίζονται από το γινόμενο διαλυτότητας (K_{sp}) για τις δεδομένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Δημιουργούνται έτσι υπέρκορα διαλύματα, που είναι θερμοδυναμικά ασταθή, και τα πλεονάζοντα ιόντα αποβάλλονται από το διάλυμα υπό τη μορφή κρυστάλλων, έως ότου αποκατασταθεί η θερμοδυναμική ισορροπία. Επομένως, γενεσιουργός αιτία της κρυστάλλωσης των υδατοδιαλυτών αλάτων στα πορώδη υλικά είναι ο βαθμός υπερκορεσμού του διαλύματος. Η K_{sp} κάθε ζεύγους ιόντων εξαρτάται εκτός από τη θερμοκρασία και την πίεση και από την παρουσία άλλων όμοιων ή ανόμοιων ιόντων στο διάλυμα, η οποία μπορεί να αυξάνει ή να μειώνει τη συγκέντρωση κορεσμού του άλατος, φαινόμενο που ονομάζεται εξαλάτωση ή εισαλατώση (Σκουλικίδης, 2000, σ. 141).

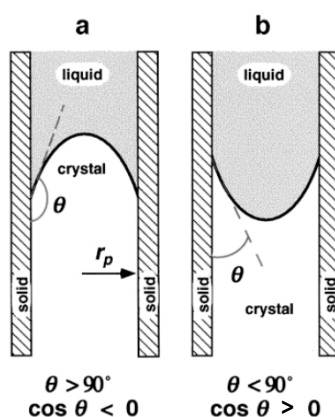
Με δεδομένο ότι η εφελκυστική αντοχή των περισσότερων πορωδών δομικών υλικών είναι μικρότερη της πίεσης που απαιτείται για να αυξηθεί το γινόμενο διαλυτότητας και να εμποδιστεί έτσι η δημιουργία κρυστάλλων, ο υπερκορεσμός μπορεί να προέλθει είτε από μείωση της θερμοκρασίας (ειδική περίπτωση του φαινομένου αυτού μπορεί να θεωρηθεί και η δημιουργία του μοριακού κρυστάλλου του νερού σε συνθήκες παγετού), είτε από αύξηση της συγκέντρωσης των ιόντων εξαιτίας της εξάτμισης του νερού. Όταν ο υπερκορεσμός προκαλείται από εξάτμιση του νερού, έχει ιδιαίτερη σημασία ο ρυθμός εξάτμισης της υγρασίας και συγκεκριμένα το κατά πόσο η εξάτμιση λαμβάνει χώρα γρηγορότερα ή όχι από το ρυθμό αναπλήρωσης του νερού στους πόρους του υλικού. Εάν ο ρυθμός εξάτμισης είναι μικρότερος από τον ρυθμό αναπλήρωσης του νερού λόγω υψηλής σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντος ή π.χ λόγω υψηλού ρυθμού τριχοειδούς αναρρίχησης του νερού, τότε η κρυστάλλωση των αλάτων λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια του πορώδους υλικού και το φαινόμενο ονομάζεται εξάνθιση αλάτων (efflorescence). Οι εξανθίσεις έχουν συνήθως τη μορφή μικρών λευκών κρυστάλλων χωρίς ιδιαίτερη συνοχή και πρόσφυση με το υλικό και μοιάζουν με "λεκέδες" στην επιφάνεια. Πέρα από την αισθητική απομείωση, συνήθως δεν προκαλούν σημαντική φθορά στο υλικό. Φυσικά υπάρχουν και περιπτώσεις που οι εξανθίσεις σχηματίζουν σκληρές και συνεκτικές κρούστες και φθείρουν σημαντικά την επιφάνεια, ιδιαίτερα κατά την απομάκρυνσή τους. Εάν ο ρυθμός εξάτμισης είναι μεγαλύτερος από αυτόν της αναπλήρωσης, συνήθως σε συνθήκες χαμηλής σχετικής υγρασίας ή όταν δεν υπάρχει πηγή αναπλήρωσης του νερού, τότε η κρυστάλλωση λαμβάνει χώρα στο εσωτερικό των πόρων. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται κρυπτοεξάνθιση (subflorescence) και σε γενικές γραμμές οδηγεί σε σημαντικές φθορές στη μάζα του υλικού, καθώς όπως αναφέρθηκε και προηγούμενα η εφελκυστική αντοχή των περισσότερων πορωδών δομικών υλικών είναι μικρότερη από τις τάσεις που ασκούν οι σχηματιζόμενοι κρύσταλλοι στα τοιχώματα των πόρων. Επομένως εάν το μέτωπο της εξάτμισης είναι κοντά στην επιφάνεια μπορεί να προκαλέσει αποφλοιώσεις, ενώ αν βρίσκεται ακόμα πιο βαθιά από την επιφάνεια μπορεί να προκαλέσει ρωγματώσεις, ακόμα και την πλήρη καταστροφή της δομής του υλικού. Ειδική περίπτωση κρυπτοεξάνθισης αποτελεί και η λεγόμενη κυψελοειδής διάβρωση (Μοροπούλου, 2005), όπου η απώλεια

του υλικού συνήθως από το κέντρο πορωδών δομικών λίθων, είναι αποτέλεσμα αιολικής διάβρωσης, όπου ισχυρά ρεύματα αέρα μεταφέρουν το μέτωπο της εξάτμισης στο εσωτερικό του λίθου ενώ ταυτόχρονα ασκούν και ισχυρές μηχανικές πιέσεις. Η τάση ατμών του διαλύματος των αλάτων καθορίζει την τάση κάθε είδους αλατιού να κρυσταλλώνεται ως εξάνθιση ή κρυπτοεξάνθιση σε κάθε πορώδες μέσω και περιβαλλοντικές συνθήκες (Rodriguez-Navaro & Doehne, 1999).

Συνοψίζοντας, η κρυστάλλωση των αλάτων στα πορώδη δομικά υλικά και εν προκειμένω στα υλικά των μνημείων μπορεί να προκαλέσει:

- Αισθητική υποβάθμιση
- Φθορά ή/και απώλεια αρχιτεκτονικών στοιχείων διακοσμήσεων (γλυπτά, τοιχογραφίες, ψηφιδωτά, επεξεργασμένες επιφάνειες)
- Βλάβη δομικών στοιχείων

Απαραίτητη προϋπόθεση για να προκληθεί φθορά στο πορώδες υλικό από την κρυστάλλωση αλάτων στο εσωτερικό των πόρων είναι το να ασκήσουν οι κρύσταλλοι στα τοιχώματα ενός σημαντικού ποσοστού των πόρων σε μία περιοχή, δυνάμεις ισχυρότερες από την διατμητική αντοχή του υλικού. Αυτό εξαρτάται από το μέγεθος των πόρων και από τη σχέση της ελεύθερης ενέργειας του κρυστάλλου, του διαλύματος και των τοιχωμάτων των πόρων. Συγκεκριμένα εάν η επιφανειακή τάση της διεπιφάνειας κρυστάλλου - τοιχωμάτων γ_{cs} είναι μικρή, τότε ο κρύσταλλος διαβρέχει τα τοιχώματα των πόρων, σχηματίζοντας γωνία επαφής μικρότερη των 90° και η ανάπτυξη των κρυστάλλων λαμβάνει χώρα ανεμπόδιστα στο εσωτερικό των πόρων χωρίς να ασκούνται πιέσεις και να προκαλείται θραύση. Αντίθετα, εάν η επιφανειακή τάση γ_{cs} είναι μεγάλη, η γωνία επαφής γίνεται μεγαλύτερη των 90° και η ανάπτυξη των κρυστάλλων παρεμποδίζεται από τα τοιχώματα με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται μεγάλες τάσεις, ειδικά σε πόρους μικρού μεγέθους (πιο συγκεκριμένα στο μεσοπορώδες) όπου η ακτίνα καμπυλότητας του κρυστάλλου στη διεπιφάνεια του με το διάλυμα είναι μικρή (Εικόνα 15). Στην ειδική περίπτωση που η γωνία επαφής γίνει 180° , ο κρύσταλλος δεν έρχεται σε επαφή με τα τοιχώματα του πόρου, αλλά ανάμεσά τους μεσολαβεί ένα λεπτό υμένιο διαλύματος, οπότε και ο κρύσταλλος δέχεται τη μέγιστη πίεση.



Εικόνα 15. Ανάπτυξη κρυστάλλου σε πόρο ακτίνας r_p . α) Ο κρύσταλλος δεν διαβρέχει τα τοιχώματα του πόρου, β) Ο κρύσταλλος διαβρέχει τα τοιχώματα του πόρου.

Τη σημασία της ελεύθερης ενέργειας στην ανάπτυξη των τάσεων στο εσωτερικό των πόρων μελέτησε θεωρητικά ο (Scherer, 1998) και κατέληξε, μεταξύ άλλων, στα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Το μέγιστο όριο της πίεσης που ασκείται από την δημιουργία κρυστάλλων, καθορίζεται από τον βαθμό υπερκορεσμού (για κρυστάλλωση από διάλυμα) ή υπόψυξης (για κρυστάλλωση από τήγμα).
2. Η πίεση που ασκείται στην πράξη μπορεί να είναι μικρότερη από τη μέγιστη, εάν η γωνία επαφής κρυστάλλου - τοιχωμάτων πόρου είναι μικρή· εάν $\theta < 90^\circ$, δεν αναπτύσσονται εφελκύστηκες τάσεις.
3. Οι τάσεις που ασκούνται από την κρυστάλλωση είναι μικρότερες σε μεγαλύτερους πόρους.
4. Δεν είναι δυνατόν να επέλθει θραύση από την κρυστάλλωση στο εσωτερικό ενός μεμονωμένου πόρου. Απαιτείται η ανάπτυξη κρυστάλλων σε μια περιοχή του σώματος ανάλογη σε μέγεθος με τις αστοχίες του υλικού που καθορίζουν τις αντοχές του. Συνεπώς το δυναμικό που ωθεί την ανάπτυξη του κρυστάλλου, πρέπει να είναι επαρκές ώστε να επιτρέπει στους κρυστάλλους να διεισδύουν σε πόρους με διάμετρο τουλάχιστον τόσο μικρή όσο των στομίων των "πόρων - μελανοδοχείο" (breakthrough radius, r_{BT}).

Συνοψίζοντας, η βλάβη που προκαλείται από την κρυστάλλωση υδατοδιαλυτών αλάτων στα πορώδη δομικά υλικά εξαρτάται από:

- Τη σύσταση και το επίπεδο υπερκορεσμού του διαλύματος των αλάτων
- Το πορώδες των δομικών υλικών, το μέγεθος, την κατανομή, τη μορφολογία και τη διασύνδεση των πόρων
- Το μέγεθος, την πυκνότητα και τη γεωμετρία των αστοχιών που καθορίζουν τις αντοχές του υλικού
- Την τάση διαβροχής των πόρων από τους κρυστάλλους των αλάτων
- Περιβαλλοντικούς παράγοντες (διακυμάνσεις υγρασίας και θερμοκρασίας, ηλιακή ακτινοβολία, ανέμους)

6. Η κρυστάλλωση του θειικού νατρίου πορώδη υλικά.

Το θειικό νάτριο είναι ένα αλάτι που μπορεί να προκαλέσει σοβαρές βλάβες στα δομικά υλικά και τον αρχιτεκτονικό διάκοσμο των μνημείων. Η παρουσία του στα δομικά υλικά είναι διαδεδομένη διότι μπορεί να βρίσκεται στις πρώτες ύλες που έχουν χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή, αλλά και να εισαχθεί από το περιβάλλον (θαλάσσιο περιβάλλον, ρύποι). Ο συνηθέστερος τρόπος εισαγωγής θειικού νατρίου είναι η χρήση τσιμέντου Portland, είτε ως δομικό υλικό στα σύγχρονα μνημεία είτε ως υλικό αποκατάστασης σε προηγούμενες παρεμβάσεις αναστήλωσης ή συντήρησης μνημείων.

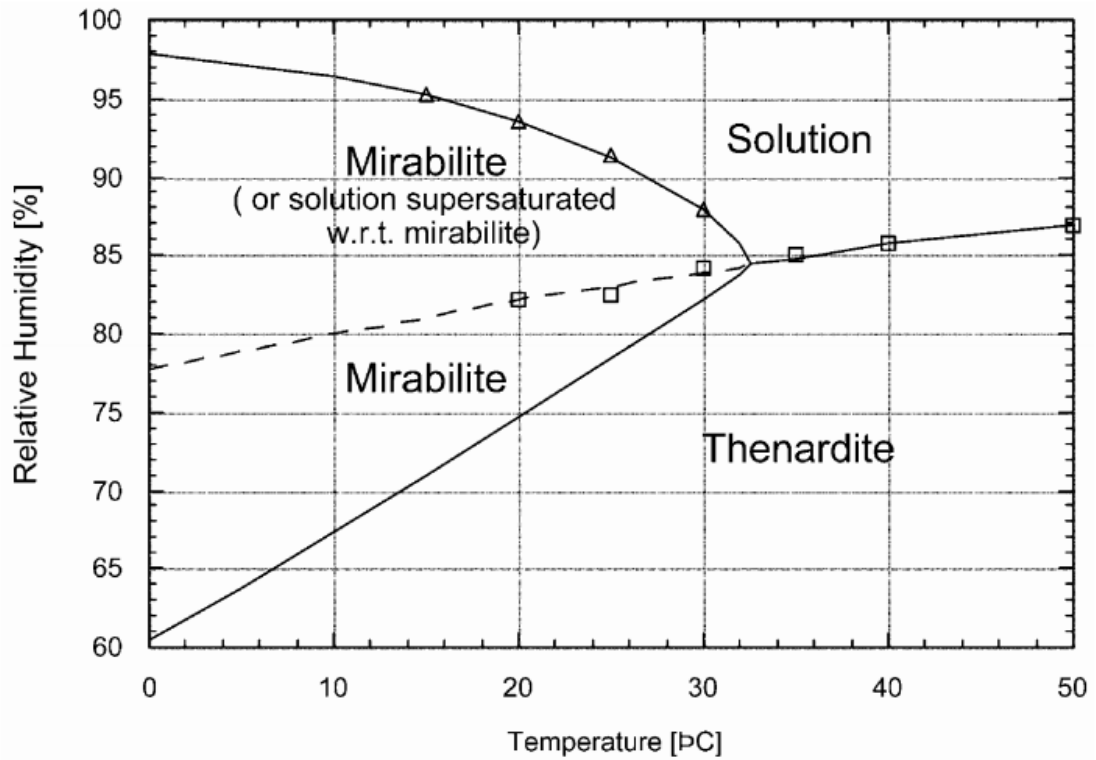
Σε περιβαλλοντικές συνθήκες το θειικό νάτριο κρυσταλλώνεται σε δύο σταθερές μορφές. Ως άνυδρο αλάτι, όποτε ονομάζεται τεναρδίτης (thenardite - Na_2SO_4) και ως ένυδρο αλάτι με δέκα κρυσταλλικά νερά, οπότε ονομάζεται μιραβιλίτης (mirabilite $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Στον Πίνακα 2 συνοψίζονται ορισμένες από τις φυσικοχημικές ιδιότητες των δύο σταθερών αλάτων θειικού νατρίου.

Όνομασία (Χημικός Τύπος)	Τεναρδίτης (Na ₂ SO ₄)	Μιραβιλίτης (Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O)
Κρυσταλλικά νερά	Άνυδρο Αλάτι	10 κρυσταλλικά νερά
Συγκέντρωση κορεσμού στις πειραματικές συνθήκες	31% w/w (50°C)	16% w/w (20°C) -ως ποσοστό τεναρδίτη-
Όγκος μοναδιαίας κυψελίδας	700,99 Å ³	1451,46 Å ³
Πυκνότητα	2,69 g/cm ³	1,47 g/cm ³
Θερμοδυναμικά σταθερό	θ ≥ 32,38 °C Χαμηλό %RH	θ < 32,38 °C Υψηλό %RH
Κινητικά σταθερό	Καλοσηματισμένοι κρύσταλλοι δύσκολα ενυδατώνονται σε υψηλές %RH	Κρυσταλλώνεται σχεδόν ακαριαία από υπέρκορα διαλύματα και αφυδατώνεται εύκολα σε χαμηλές %RH
Συνήθης τύπος κρυστάλλωσης	Κρυπτοεξάνθιση	Κρυπτοεξάνθιση σε χαμηλές %RH Εξάνθιση σε υψηλές %RH

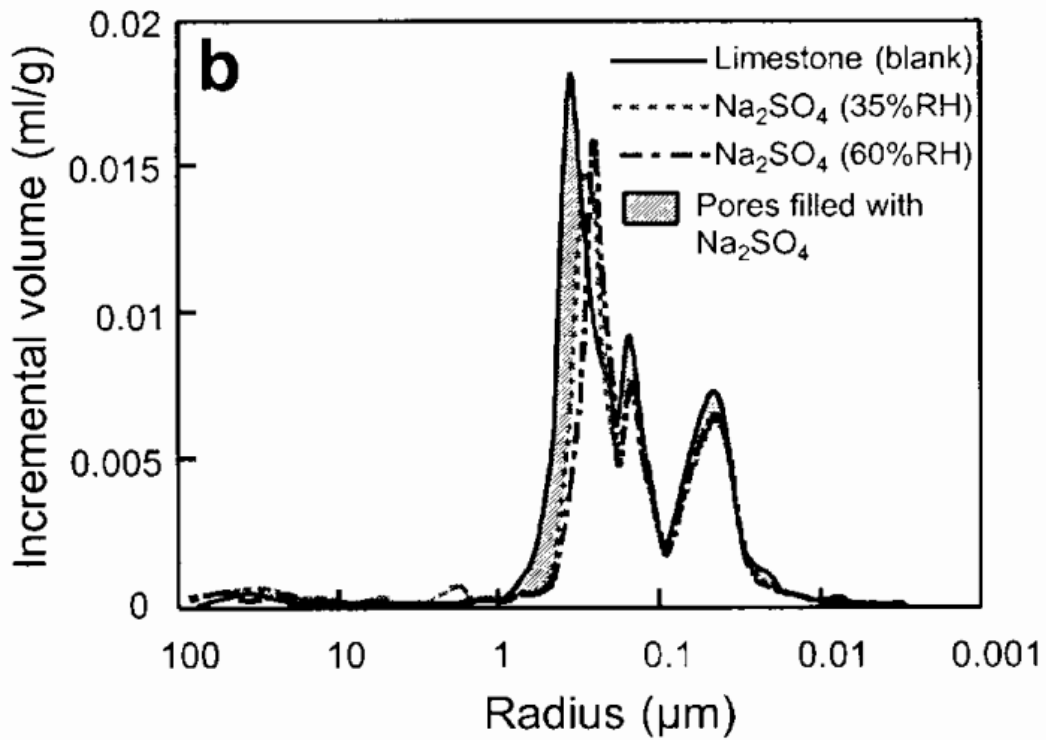
Πίνακας 2. Φυσικοχημικές ιδιότητες των σταθερών αλάτων του θειικού νατρίου

Στην Εικόνα 16 παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα φάσεων θειικού νατρίου - νερού, όπου φαίνεται το ποιά φάση είναι θερμοδυναμικά σταθερή σε περιβαλλοντικές συνθήκες θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας.

Οι (Rodriguez-Navaro & Doehne, 1999) με χρήση ποροσιμετρίας υδραργύρου κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το θειικό νάτριο όταν κρυσταλλώνεται σε πορώδη υλικά, τείνει να συγκεντρώνεται στους σχετικά μεγάλους πόρους, μειώνοντας τη διατομή τους, με τρόπο που δεν εμποδίζεται η περαιτέρω κίνηση της υγρασίας και των διαλυμένων αλάτων στο εσωτερικό του πορώδους υλικού. Στην Εικόνα 17 παρουσιάζεται η μεταβολή της κατανομής των πόρων ενός πορώδους ασβεστόλιθου μετά την κρυστάλλωση στο εσωτερικό των πόρων του σε συνθήκες υψηλής και χαμηλής σχετικής υγρασίας, όπου ευνοείται η εξάνθιση και η κρυπτοεξάνθιση αντίστοιχα. Στην ίδια εργασία επισημαίνουν ότι η κρυστάλλωση των αλάτων του θειικού νατρίου από διάλυμα, όταν εμφανίζονται οι κατάλληλες συνθήκες, λαμβάνει χώρα σχεδόν ακαριαία.



Εικόνα 16. Διάγραμμα φάσεων θειικού νατρίου - νερού



Εικόνα 17. Κατανομή μεγέθους πόρων σε ασβεστόλιθο, πριν και μετά την κρυστάλλωση στο εσωτερικό των πόρων θειικού νατρίου, σε συνθήκες συνεχούς τριχοειδούς αναρρίχησης σε διαφορετικές συνθήκες σχετικής υγρασίας. Μετρήσεις ποροσιμετρίας υδραργύρου.

Οι (Tsui, Flatt, & Scherer, 2003) έδειξαν ότι ο βασικός μηχανισμός, μέσω του οποίου προκαλείται φθορά στα πορώδη υλικά από τα άλατα του θειικού νατρίου δεν είναι η ενυδάτωση του τεναρδίτη προς σχηματισμό μιραβιλίτη, όπως ήταν ευρέως θεωρούμενο. Η ενυδάτωση είναι πρακτικά αδύνατη από κινητική άποψη, αντίθετα λαμβάνει χώρα διαλυτοποίηση του τεναρδίτη και σχηματισμός διαλύματος με υψηλό βαθμό υπερκορεσμού, ως προς τον σχηματισμό μιραβιλίτη. Όταν οι θερμοκρασιακές συνθήκες επιτρέπουν τον σχηματισμό μιραβιλίτη, αυτός κρυσταλλώνεται ασκώντας πιέσεις σε μεγάλες περιοχές του πορώδους υλικού, οδηγώντας το σε αστοχία.

Πειραματικό μέρος

1. Τα υπό εξέταση υλικά

Τα υπό εξέταση υλικά, σκληρυμένα δοκίμια υδραυλικών ενεμάτων υψηλής διεισδυτικότητας, ηλικίας περίπου 10 ετών, έχουν παραχθεί από την μείξη διαφορετικών πρώτων υλών, ενώ έχουν χρησιμοποιηθεί δύο τρόποι ανάμειξης. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται το είδος και οι αναλογίες των πρώτων υλών που χρησιμοποιήθηκαν καθώς επίσης ο τρόπος ανάμειξης και το έτος παρασκευής κάθε διαφορετικού ενέματος. Συνολικά έχουν χρησιμοποιηθεί δύο είδη φυσικής υδραυλικής ασβέστου NHL5 και NHL3,5 (αντοχών 5 MPa και 3,5 MPa αντίστοιχα), τρία είδη ποζολάνης, λευκό τσιμέντο Portland τύπου CEM1 52,5 R, υδράσβεστος σε μορφή κόνωσης και τρεις τύποι υπερπλαστικοποιητών (SP1: υδατικό διάλυμα τροποποιημένων πολυκαρβοξυλικών αιθέρων, SP2: υδατικό διάλυμα τροποποιημένων λιγνοναφθαλινικών αλάτων και SP3: υδατικό διάλυμα ναφθαλινοσουλφονικού πολυμερούς). Επίσης έχει εξεταστεί έτοιμο προαναμεμιγμένο υδραυλικό ένεμα με υψηλό ποσοστό λεπτόκοκκων πυριτικών αδρανών (LED). Η ανάμειξη των ενεμάτων έχει γίνει σε εργαστηριακή κλίμακα σε αναμεικτήρα υπερήχων χαμηλής συχνότητας (28KHz) και σε εργοταξιακή κλίμακα σε αναμεικτήρα υψηλής διάτμησης κολλοειδούς διασποράς και αναφέρονται κωδικά ως US και CHS αντίστοιχα. Όλες οι συνθέσεις πληρούσαν τις προδιαγραφές ενεσιμότητας και αντοχών σε κάμψη και θλίψη.

Όνομασία	Είδος συνδετικής κονιάς					Υπερ/τής	Νερό	Τρόπος Ανάμειξης	Ηλικία (έτη)
	Φυσική Υδραυλική Ασβέστος	Εμπορικό Ένεμα	Λευκό τσιμέντο Portland	Ποζολάνη	Υδρ/στος				
TER US			30%	POZ2 45%	25%	SP3 1%	80%	Ultrasonic	10
TER CHS			30%	POZ2 45%	25%	SP3 1%	80%	Colloidal High Shear	9
100 US	NHL5 100%					SP2 1%	80%	Ultrasonic	9
100 CHS	NHL5 100%					SP2 1%	80%	Colloidal High Shear	9
90-10 US	NHL5 90%			POZ1 10%		SP1 1%	80%	Ultrasonic	9
90-10 CHS	NHL5 90%			POZ1 10%		SP1 1%	80%	Colloidal High Shear	9
80- 20 US	NHL5 80%			POZ1 20%		SP1 1,25%	80%	Ultrasonic	9
80-20 CHS (a)	NHL5 80%			POZ1 20%		SP1 1,25%	80%	Colloidal High Shear	9
80-20 CHS (b)	NHL5 80%			POZ1 20%		SP1 1,5%	80%	Colloidal High Shear	9
100 US (noSP)	NHL5 100%						80%	Colloidal High Shear	9
80-20 US (noSP)	NHL5 80%			POZ3 20%			90%	Ultrasonic	10
C.B	NHL3,5 100%						85%	Ultrasonic	10
LED		100%					130%	Ultrasonic	10

Πίνακας 3. Σύθεση ενεμάτων, αναλογίες πρώτων υλών, τρόπος ανάμειξης και ηλικία

Τα δοκίμια διατηρήθηκαν για τα πρώτα 1 έως 2 χρόνια σε θάλαμο συντήρησης στους 20°C και 98%RH και στη συνέχεια για διάστημα 8 ετών σε κλειστό ξηραντήρα σε συνθήκες κορεσμού υγρασίας για την αποφυγή της ενανθράκωσης.

2. Εξέταση των πόρων μεγάλων διαστάσεων και της χημικής σύστασης στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης

2.1 Αρχή λειτουργίας του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης, οργανολογία και συνθήκες λειτουργίας.

Δείγματα από όλες τις συνθέσεις των ενεμάτων εξετάστηκαν σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης συζευγμένο με Φασματογράφο Ενεργειακής Διασποράς (SEM-EDS), προκειμένου να συλλεχθούν πληροφορίες σχετικά με τη σύσταση και τη μορφολογία τους.

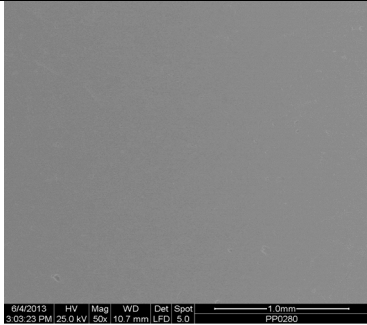
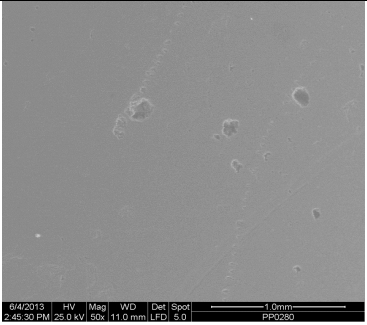
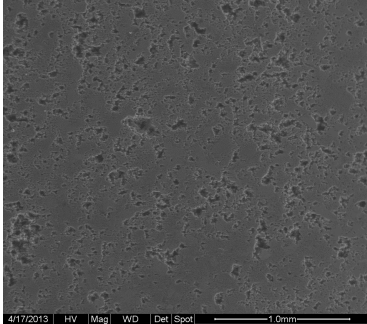
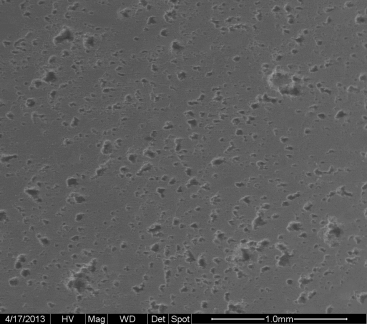
Η αρχή λειτουργίας του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης και του Φασματογράφου Ενεργειακής Διασποράς, συνίσταται στην παραγωγή δέσμης ηλεκτρονίων, την εστίαση και κατεύθυνση της δέσμης στην επιφάνεια του δείγματος. Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια, που εκπέμπονται εξαιτίας της ανελαστικής κρούσης των πρωτογενών ηλεκτρονίων της δέσμης με τα ηλεκτρόνια των ατόμων που βρίσκονται σε βάθος λίγων νανόμετρων από την επιφάνεια του δείγματος, επιτρέπουν την απεικόνιση της μορφολογίας και της τοπογραφίας του δείγματος σε μεγάλες μεγεθύνσεις και με εξαιρετικά μεγάλο βάθος πεδίου. Τα οπισθοσκεδαζόμενα πρωτόγεννη ηλεκτρόνια της δέσμης επιτρέπουν την απεικόνιση των διαφορετικής χημικής σύστασης φάσεων του δείγματος καθώς μεγαλύτερος αριθμός πρωτόγεννων ηλεκτρονίων οπισθοσκεδάζεται από τους πυρήνες ατόμων με μεγαλύτερο ατομικό αριθμό, με αποτέλεσμα περιοχές με βαρύτερα στοιχεία να εμφανίζονται πιο φωτεινές. Παράλληλα οι ακτίνες X που παράγονται μαζί με τα δευτερογενή ηλεκτρόνια σε βάθος έως 10μm και αναλύονται στον φασματογράφο επιτρέπουν την χημική ανάλυση του δείγματος καθώς η ενέργεια των φωτονίων τους είναι χαρακτηριστική της διαφοράς της ενεργειακής στάθμης των ηλεκτρονίων του κάθε στοιχείου.

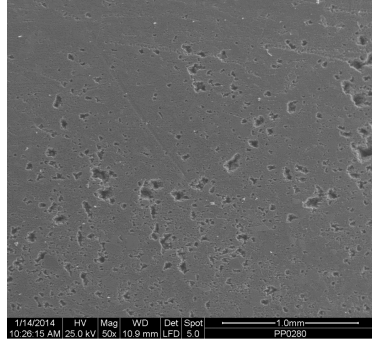
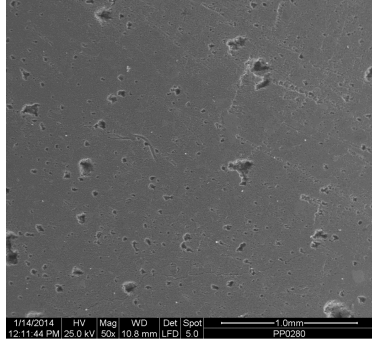
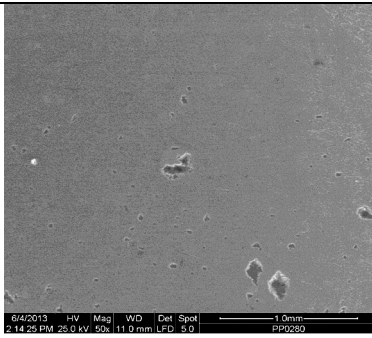
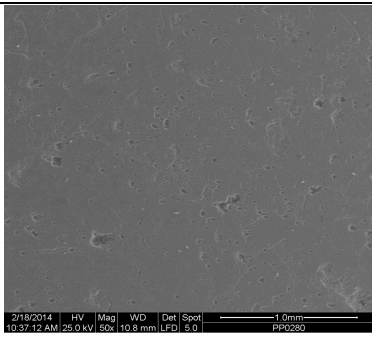
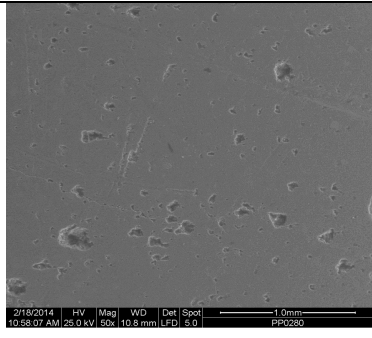
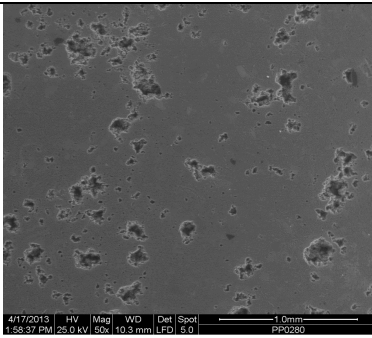
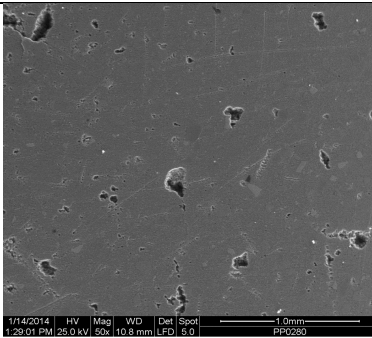
Χρησιμοποιήθηκε το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης της Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ (FEI, Quanta 200), με πηγή ακτινοβολίας νήμα Βολφραμίου (Tungsten filament), δυναμικό επιτάχυνσης της δέσμης ηλεκτρονίων 25kV και ανιχνευτή ευρέος πεδίου (LFD) καθώς τα δείγματα είναι μη αγώγιμα. Η στοιχειακή ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τον συζευγμένο φασματογράφο ενεργειακής διασποράς (EDAX) με ανιχνευτή διόδου λιθίου - πυριτίου (LiSi).

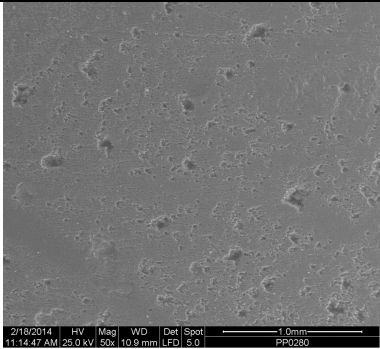
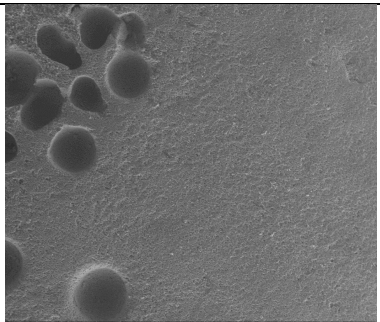
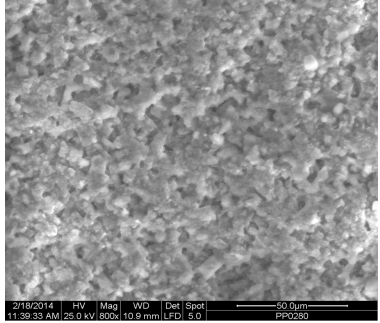
2.2 Προετοιμασία των δειγμάτων, παρουσίαση και σχολιασμός των απεικονίσεων των δευτερογενών ηλεκτρονίων.

Η προετοιμασία των δοκιμίων για το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο περιλάμβανε τη στίλβωση της επιφάνειάς τους αρχικά σε λειαντικά καρβιδίου του πυριτίου (SiC) έως Grid 1000 και στη συνέχεια σε διαμαντόπαστα 3μm, 1μm και 0,25μm σε υπόστρωμα βελούδου. Κατά τη στίλβωση χρησιμοποιήθηκε λιπαντικό αλκοολικής βάσης για να μην αλλοιωθούν οι υδατοδιαλυτές φάσεις του δοκιμίου. Η στίλβωση της επιφάνειας είναι ο ενδεδειγμένος τρόπος εξέτασης των φάσεων των τσιμεντοειδών υλικών με οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια καθώς εξαλείφει την επίδραση της μορφολογίας της επιφάνειας.

Στη παρούσα εργασία όμως εξετάζονται οι απεικονίσεις των δευτερογενών ηλεκτρονίων των στιλβωμένων δοκιμίων καθώς επιτρέπουν την παρατήρηση των μεγάλων πόρων χωρίς να απαιτείται λεπτή τομή. Στους πολύ μεγάλους πόρους οι τριχοειδείς δυνάμεις δεν αρκούν για να πληρωθούν με νερό και έτσι αυτοί δεν συμμετέχουν στον υπολογισμό του ανοιχτού υδατοπερατού πορώδους, άρα και της φαινόμενης πυκνότητας. Έχουν όμως μεγάλη σημασία για τον υπολογισμό της πυκνότητας στοιβασής. Οι απεικονίσεις των δευτερογενών ηλεκτρονίων σε μεγέθυνση 50x παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.

Όνομα	Ανάμιξη με US	Ανάμιξη με CHS
TER		
100		

90-10	 <p>1/14/2014 HV Mag WD Det Spot 10:26:15 AM 25.0 kV 50x 10.8 mm LFD 5.0 1.0mm PP0280</p>	 <p>1/14/2014 HV Mag WD Det Spot 12:11:44 PM 25.0 kV 50x 10.8 mm LFD 5.0 1.0mm PP0280</p>
80-20	 <p>6/4/2013 HV Mag WD Det Spot 2:14:25 PM 25.0 kV 50x 11.0 mm LFD 5.0 1.0mm PP0280</p>	 <p>2/18/2014 HV Mag WD Det Spot 10:37:12 AM 25.0 kV 50x 10.8 mm LFD 5.0 1.0mm PP0280</p>
80-20 (b)		 <p>2/18/2014 HV Mag WD Det Spot 10:58:07 AM 25.0 kV 50x 10.8 mm LFD 5.0 1.0mm PP0280</p>
100 US (noSP)	 <p>4/17/2013 HV Mag WD Det Spot 1:58:37 PM 25.0 kV 50x 10.3 mm LFD 5.0 1.0mm PP0280</p>	
80-20 US (noSP)	 <p>1/14/2014 HV Mag WD Det Spot 1:29:01 PM 25.0 kV 50x 10.8 mm LFD 5.0 1.0mm PP0280</p>	

C.B		
LED		50x
		800x

Πίνακας 4. Απεικονίσεις δευτερογενών ηλεκτρονίων σε μεγέθυνση 50x (και 800x στο δοκίμιο LED) στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.

Από τη σύγκριση των φωτογραφιών προκύπτει το συμπέρασμα ότι η προσθήκη ποζολάνης στα ενέματα φυσικής υδραυλικής ασβέστου, οδηγεί σε μείωση του μεγέθους και του αριθμού των μεγάλων πόρων που είναι εμφανείς σε μεγέθυνση x50. Ο τρόπος ανάμειξης δεν φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά και με συστηματικό τρόπο τον αριθμό και την κατανομή των μεγάλων πόρων των ενεμάτων αυτών. Στα δοκίμια που δεν έχει προστεθεί υπερπλαστικοποιητής οι πόροι έχουν μεγαλύτερες διαστάσεις. Πρέπει να σημειωθεί βέβαια ότι το δοκίμιο 80 20 US (noSP) έχει υψηλότερο λόγο νερού προς υδραυλική κονία και επομένως αναμένεται να έχει μεγαλύτερο πορώδες. Το τριμερές μίγμα που περιέχει 30% λευκό τσιμέντο Portland και 45% ποζολάνη, εμφανίζει ελάχιστους ορατούς μεγάλους πόρους, σημαντικά λιγότερους όταν η ανάμειξη έχει γίνει με υπερήχους. Η σύγκριση των ενεμάτων της φυσικής υδραυλικής ασβέστου NHL3,5 και NHL5 δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις, αν και πρέπει να τονιστεί ότι τα δείγματα δεν είναι άμεσα συγκρίσιμα καθώς κατά την παρασκευή τους έχει χρησιμοποιηθεί ελαφρά διαφορετικός λόγος νερού προς υδραυλική κονία. Το προαναμεμιγμένο υδραυλικό ένεμα με υψηλό ποσοστό λεπτόκοκκων πυριτικών αδρανών (LED) έχει τελείως διαφορετική μορφή με τους πυριτικούς κόκκους ομοιόμορφα κατανεμημένους σε σπογγώδη δομή.

2.3 Στοιχειακή Ανάλυση των ενεμάτων

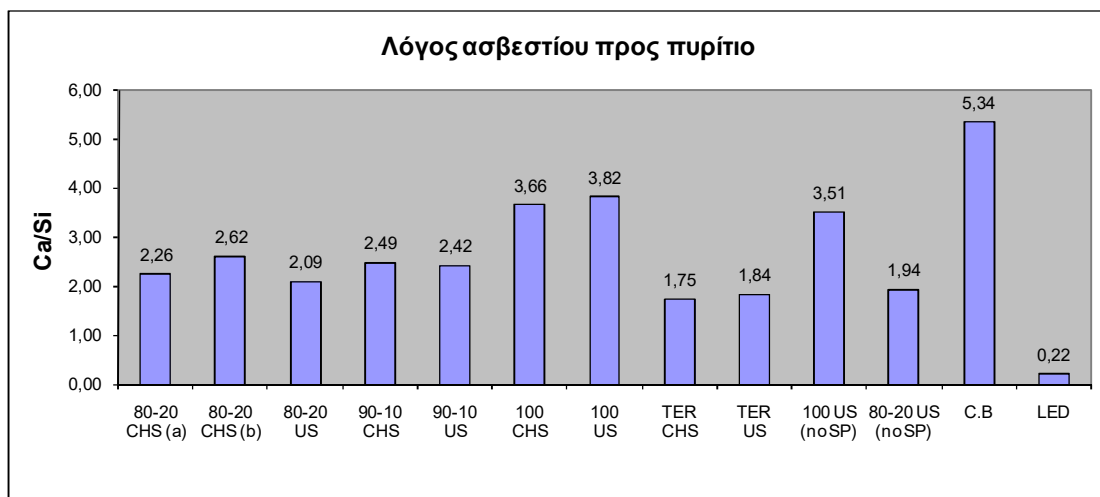
Η στοιχειακή σύσταση των ενεμάτων πραγματοποιήθηκε με Φασματοσκοπία Ενεργειακής Διασποράς (EDS), τα αποτελέσματα της οποίας, εκφρασμένα ως ατομικά ποσοστά, συνοψίζονται στον Πίνακα 3.

	80-20 CHS (a)	80-20 CHS (b)	80-20 US	90-10 CHS	90-10 US	100 CHS	100 US	TER CHS	TER US	100 US (noSP)	80-20 US (noSP)	C.B	LED 100
C K	4,8	4,4	4,3	4,9	3,9	5,2	4,6	4,4	0,8	5,6	5,0	4,8	4,3
O K	65,7	65,7	65,0	66,4	66,9	63,8	65,4	65,4	63,8	65,4	65,6	65,1	62,5
NaK	0,2	0,5	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1	0,3	0,0	0,1	0,2	0,1	0,1
MgK	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,6	0,5	0,3	0,2	0,4	0,3	0,2	0,1
AlK	1,2	1,0	1,3	1,0	1,1	0,8	0,7	1,4	1,3	0,6	1,4	0,2	0,5
SiK	8,2	7,3	9,0	7,4	7,8	6,0	5,7	9,8	11,1	5,9	8,8	4,5	25,9
Y L	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
S K	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,3	0,2	0,3	0,4
ClK	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0
K K	0,3	1,0	0,4	0,3	0,2	0,6	0,4	0,2	0,8	0,6	0,7	0,2	0,2
CaK	18,6	19,1	18,8	18,5	18,9	22,1	21,8	17,2	20,5	20,6	17,2	24,2	5,6
FeK	0,3	0,3	0,5	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,6	0,4	0,4	0,4	0,2
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Πίνακας 5. Στοιχειακή ανάλυση των δοκιμών με EDS. Τα ποσοστά παρουσιάζονται ως στοιχειακές % αναλογίες

Παρατηρούμε όπως ήταν αναμενόμενο μικρά ποσοστά σε αλκάλια (Na, K), χλώριο (Cl) και θείο (S), γεγονός που καθιστά τις συνθέσεις κατάλληλες για χρήση σε μνημεία καθώς δεν αποτελούν πηγές υδατοδιαλυτών αλάτων, η μικρή περιεκτικότητα σε σίδηρο (Fe) εξηγεί το ανοιχτό χρώμα, η μικρή αναλογία μαγνησίου (Mg) προς ασβέστιο (Ca) δείχνει ότι η πρώτη ύλη δεν είχε δολομιτικό χαρακτήρα, ενώ η απουσία μαγγανίου (Mn) και η μικρή περιεκτικότητα σε αργίλιο (Al) συμβάλλουν προς τη χημική σταθερότητα των ενεμάτων. Φαίνεται μάλιστα ότι σημαντικό ποσοστό του αργιλίου εισάγεται στη σύνθεση μέσω της ποζολάνης κι όχι μέσω του υδραυλικού ασβέστη.

Η εξέταση του λόγου ασβεστίου (Ca) προς πυρίτιο (Si) που παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 1 αναδεικνύει τον υδραυλικό χαρακτήρα της κάθε σύνθεσης, καθώς μεγάλες τιμές του λόγου αντιστοιχούν σε λιγότερο υδραυλικό και περισσότερο αερακτικό χαρακτήρα του ενέματος.



Διάγραμμα 1. Λόγος ασβεστίου προς πυρίτιο.

Παρατηρούμε ότι η προσθήκη της ποζολάνης αυξάνει τον υδραυλικό χαρακτήρα, εισάγοντας περισσότερο ενεργό πυρίτιο στη σύνθεση. Το συμπέρασμα αυτό βέβαια δεν είναι δυνατόν να εξαχθεί απλά και μόνο από τη στοιχειακή σύσταση, καθώς δεν συμμετέχει στις αντιδράσεις το σύνολο της μάζας της ποζολάνης. Το διάγραμμα όμως μας δείχνει ότι είναι σχετικά εύκολο κάποιος να διακρίνει μέσω μια ανάλυσης EDS το αν σε κάποιο ένεμα υδραυλικού ασβέστη έχει προστεθεί ή όχι ποζολάνη. Τέλος ενδιαφέρον παρουσιάζει ο λόγος Ca/Si του προαναμεμιγμένου ενέματος, το οποίο αποτελείται από λεπτόκοκκα πυριτικά αδρανή που απλά ενώνονται μεταξύ τους με μια μικρή ποσότητα υδραυλικού υλικού, το οποίο, όπως έχει ήδη σημειωθεί στο σχολιασμό των απεικονίσεων, δεν καλύπτει τον μεταξύ τους κενό χώρο.

3. Εξέταση του ανοιχτού υδατοπερατού πορώδους και της πυκνότητας

3.1 Προετοιμασία των δοκιμών και διαδικασία μέτρησης του όγκου και των ρυθμών τριχοειδούς ρόφησης και εξάτμισης νερού.

Τα δείγματα, που φυλάσσονταν ξηραντήρα σε συνθήκες υψηλής υγρασίας, κόπηκαν σε κύβους διαστάσεων (κατά το δυνατόν) 4x4x4 cm επιδιώκοντας να σχηματιστούν τρία δοκίμια ανά σύνθεση, χωρίς ρηγματώσεις και με το μικρότερο δυνατό ποσοστό ενανθράκωσης. Οι διαστάσεις των δοκιμών παρατίθενται στο παράρτημα.

Για τον περιορισμό της ενανθράκωσης, κατά τη διάρκεια του πειράματος, προηγήθηκε της ξήρανσης πλήρωση των κύβων με νερό. Αντί της βύθισης των κυβικών δοκιμών σε νερό - για τον περιορισμό της έκλυσης των υδατοδιαλυτών φάσεων, κυρίως του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - επιλέχθηκε η πλήρωση των δοκιμών να γίνει μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης με την τοποθέτησή τους σε κλειστά δοχεία με νερό σε ύψος έως και 1mm.

Η μάζα του κάθε δοκιμίου ζυγίζοταν περιοδικά σε ζυγό ακρίβειας δύο δεκαδικών του γραμμαρίου έως ότου σταθεροποιηθεί. Πριν τη μέτρηση αφαιρούταν το επιφανειακό νερό με ένα βρεγμένο κομμάτι απορροφητικού χαρτιού.

Αφού σταθεροποιήθηκε η μάζα των δοκιμίων μετρήθηκε ο όγκος τους. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε ήταν έμμεση. Ένας άκαμπτos μεταλλικός κύλινδρος που σκεπαζόταν με γυάλινη πλάκα ζυγίστηκε σκέτος (m_{1empty}) και πληρωμένος με νερό (m_{1full}). Στη συνέχεια το κάθε κυβικό δοκίμιο τοποθετήθηκε στο εσωτερικό του κυλίνδρου και μετρήθηκε η συνολική μάζα (m_{2empty}). Κατόπιν ο κύλινδρος, με το δοκίμιο στο εσωτερικό του γεμιζόταν με νερό και μετρούσαν η μάζα του (m_{2full}). Το γυάλινο πώμα επέτρεπε τον έλεγχο της πλήρωσης με νερό χωρίς τον εγκλωβισμό αέρα. Θεωρώντας την πυκνότητα του νερού που ίση με τη μονάδα ο φαινόμενος όγκος του δοκιμίου (V_a) υπολογίστηκε ως εξής:

$$V_a = (m_{1full} - m_{1empty}) - (m_{2full} - m_{2empty})$$

Ακολούθησε η διαδικασία της ξήρανσης των δοκιμίων. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε πυριαντήριο, με θερμοκρασία 55 ± 5 °C ενώ καταγράφονταν οι τιμές της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας. Η μάζα των δοκιμίων μετρούταν περιοδικά σε ζυγό ακρίβειας δύο δεκαδικών ψηφίων έως ότου σταθεροποιηθεί η μάζα τους.

3.2 Υπολογισμός των πυκνοτήτων και του ελεύθερου υδατοπερατού πορώδους. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

Με βάση τις μέγιστες τιμές της μάζας (m_{max}) των πληρωμένων με νερό δοκιμίων και τις ελάχιστες τιμές των ξηρών δοκιμίων (m_{min}), υπολογίστηκε το πορώδες (φ) των δοκιμίων καθώς και η πραγματική πυκνότητα (real density – d_r), η φαινόμενη πυκνότητα (apparent density – d_{bulk}) και η πυκνότητα όταν το πορώδες του δοκιμίου είναι πληρωμένο με νερό (d_{wet}). Η τιμή της πραγματικής πυκνότητας και του πορώδους σχετίζονται με τις φυσικοχημικές ιδιότητες του υλικού, ενώ οι τιμές της φαινόμενης πυκνότητας του ξηρού και του υγρού δοκιμίου δίνουν πληροφορίες για το ελάχιστο και το μέγιστο φορτίο είναι δυνατόν να επιβάλλεται από το ένεμα στο μνημείο που εφαρμόζεται. Η σημασία του τελευταίου είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν το ένεμα χρησιμοποιείται σε υποστρώματα ψηφιδωτών και τοιχογραφιών. Ο όγκος των υδατοπερατών πόρων (V_{op}) υπολογίστηκε από τη μέγιστη μάζα του ροφημένου νερού, θεωρώντας την πυκνότητα του νερού μέσα στους πόρους ίση με τη μονάδα. Ο υπολογισμός των τιμών έγινε ως εξής:

$$V_{op} = m_{max} - m_{min}$$

$$\varphi = V_{op} / V_a$$

$$d_r = m_{min} / (V_a - V_{op})$$

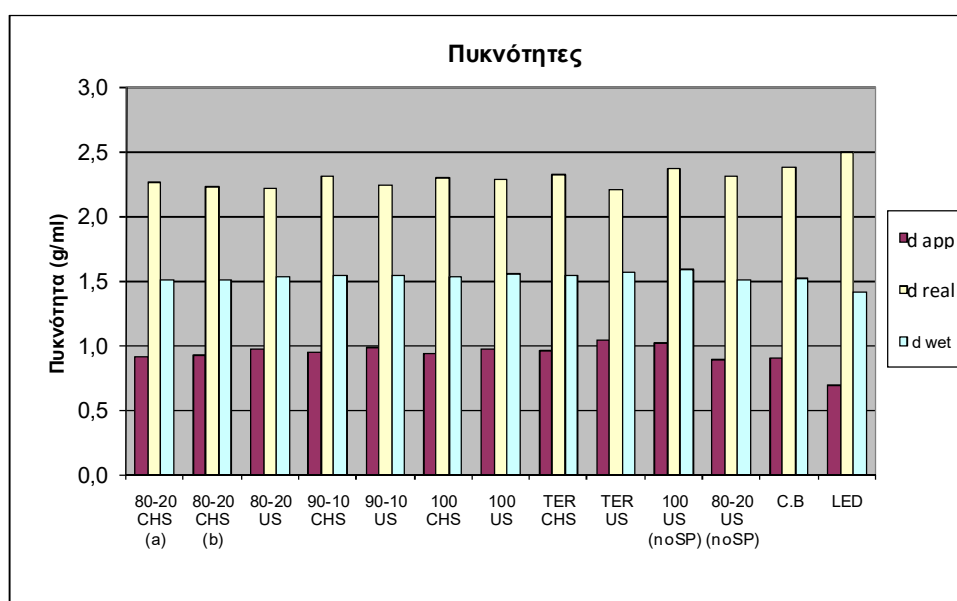
$$d_a = m_{min} / V_a$$

$$d_{wet} = m_{max} / V_a$$

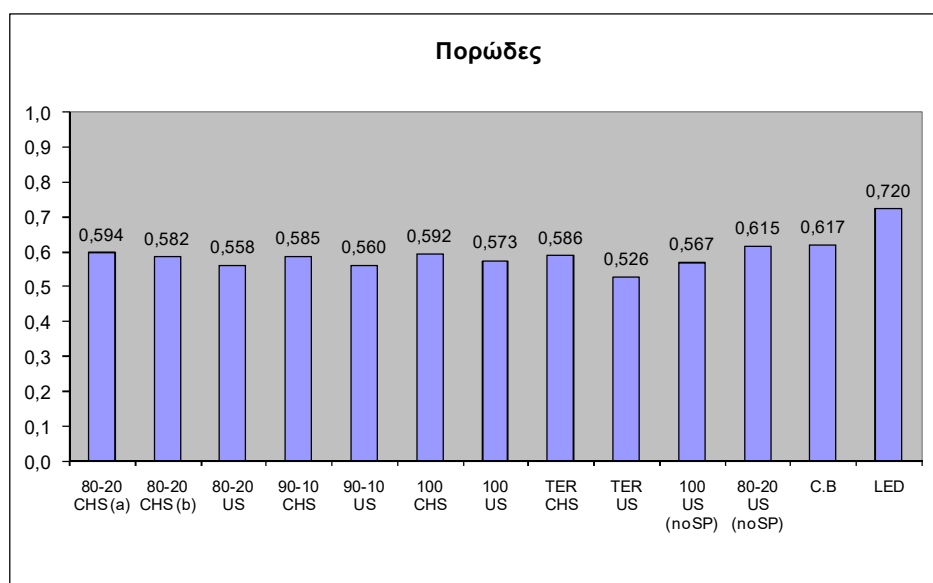
Στο Πίνακα 7 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις του πορώδους και των πυκνοτήτων των διαφορετικών τύπων ενεμάτων, ενώ στη συνέχεια παρατίθενται τα Διαγράμματα 2 και 3 με τις μέσες τιμές.

	80-20 CHS (a)	80-20 CHS (b)	80-20 US	90-10 CHS	90-10 US	100 CHS	100 US	TER CHS	TER US	100 US (noSP)	80-20 US (noSP)	C.B	LED
Porosity	0,594 ± 0,006	0,582 ± 0,007	0,558 ± 0,006	0,585 ± 0,005	0,560 ± 0,003	0,592 ± 0,003	0,573 ± 0,008	0,586 ± 0,002	0,526 ± 0,006	0,567 ± 0,005	0,615	0,617 ± 0,002	0,720
d app	0,920 ± 0,005	0,934 ± 0,014	0,978 ± 0,006	0,959 ± 0,013	0,988 ± 0,010	0,938 ± 0,001	0,981 ± 0,012	0,965 ± 0,000	1,044 ± 0,034	1,024 ± 0,001	0,892	0,911 ± 0,001	0,701
d real	2,268 ± 0,043	2,235 ± 0,057	2,226 ± 0,026	2,308 ± 0,005	2,246 ± 0,023	2,297 ± 0,023	2,295 ± 0,016	2,330 ± 0,012	2,205 ± 0,090	2,366 ± 0,026	2,315	2,378 ± 0,003	2,504
d wet	1,514 ± 0,010	1,516 ± 0,017	1,535 ± 0,006	1,543 ± 0,008	1,548 ± 0,009	1,530 ± 0,005	1,554 ± 0,010	1,551 ± 0,002	1,571 ± 0,037	1,591 ± 0,004	1,507	1,528 ± 0,005	1,421

Πίνακας 6. Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις των τιμών του ανοιχτού υδατοπερατού πορώδους, της πραγματικής πυκνότητας, της φαινόμενης πυκνότητας και της πυκνότητας υγρού δοκιμίου για κάθε σύνθεση.

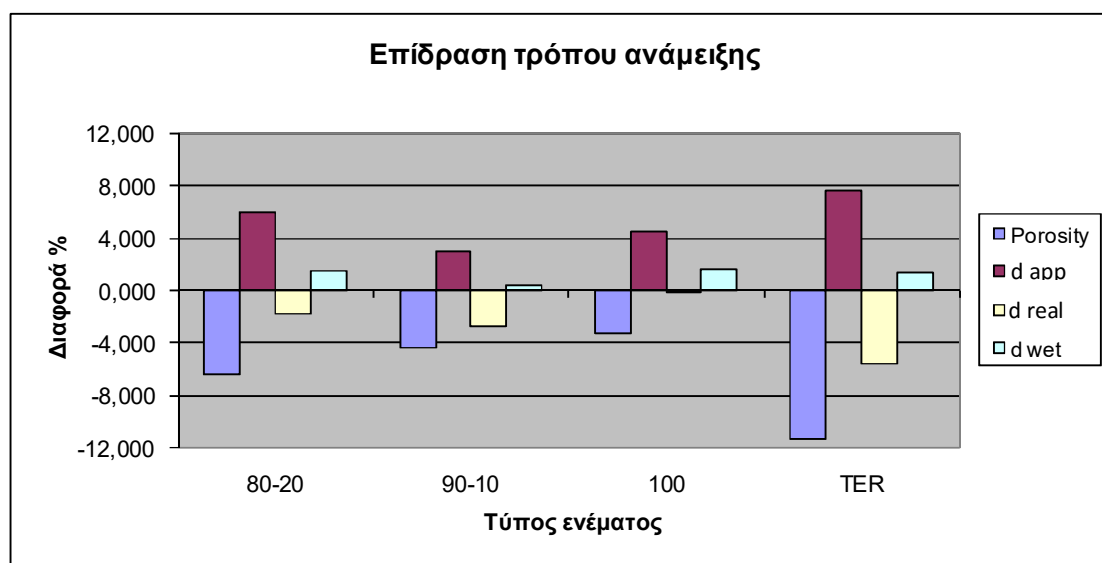


Διάγραμμα 2. Μέσες τιμές πυκνοτήτων.



Διάγραμμα 3. Μέσες τιμές πορώδους.

Παρατηρούμε ότι οι τιμές του πορώδους είναι ιδιαίτερα υψηλές, γεγονός αναμενόμενο εξαιτίας της υψηλής αναλογίας νερού προς υδραυλική κονία (water to binder ratio). Αυτό φαίνεται ιδιαίτερα στις τελευταίες τρεις συνθέσεις του πίνακα που η αναλογία w/b είναι 90%, 85% και 130%, ενώ σε όλες τις άλλες συνθέσεις η αναλογία είναι 80%. Από τα διαθέσιμα δείγματα δεν μπορεί να εξαχθεί συμπέρασμα για το κατά πόσον η προσθήκη υπερρευστοποιητή επηρεάζει τις τιμές του πορώδους και των πυκνοτήτων (δεδομένης της σταθερής αναλογίας νερού). Η προσθήκη ποζολάνης φαίνεται να οδηγεί σε ενέματα με λίγο μικρότερο πορώδες και μικρότερη πραγματική πυκνότητα όταν η ανάμειξη έχει γίνει με χρήση υπερήχων.



Διάγραμμα 4. Επίδραση του τρόπου ανάμειξης. Παρουσιάζονται οι % μεταβολές των τιμών πορώδους και πυκνοτήτων ανά σύνθεση, όταν η ανάμειξη έχει γίνει με υπέρηχους σε σχέση με όταν η ανάμειξη έχει γίνει με υψηλό στροβιλώδες.

Ενδιαφέρον όμως παρουσιάζει η συστηματική μείωση της τιμής του πορώδους των δοκιμίων που είχαν αναμειχθεί με χρήση υπερήχων σε σχέση με τις ίδιες συνθέσεις που αναμειχθηκαν με αναμεικτήρα υψηλής διάτμησης κολλοειδούς διασποράς (Διάγραμμα 4). Παρατηρούμε μάλιστα ότι η μείωση του πορώδους φαίνεται να έχει σχέση με το ποσοστό της ποζολάνης που περιέχει το ένεμα.

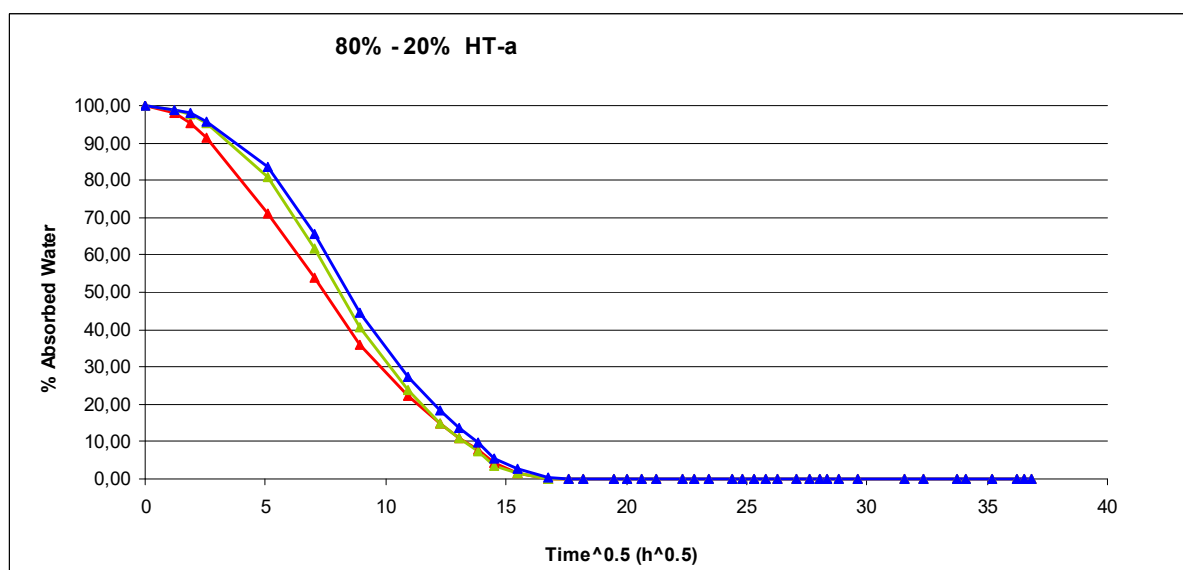
Επιπλέον παρατηρώντας τις τιμές της πραγματικής πυκνότητας, η οποία χαρακτηρίζει το υλικό ανεξάρτητα του πορώδους βλέπουμε ότι στο ένεμα χωρίς ποζολάνη ο τρόπος ανάμειξης έχει αμελητέα επίδραση στην τιμή ενώ όταν προστίθεται ποζολάνη οι τιμές είναι χαμηλότερες. Αυτό σημαίνει ότι τα προϊόντα της ασβεστοποζολανικής αντίδρασης όταν η ανάμειξη γίνεται με υπέρηχους, καταλαμβάνουν περισσότερο όγκο με αποτέλεσμα μειώνεται η πραγματική πυκνότητα του υλικού και το πορώδες του.

Σε ότι αφορά την φαινόμενη πυκνότητα αυτή αυξάνεται με τη χρήση υπερήχων, καθώς η μείωση του πορώδους είναι μεγαλύτερη της μείωσης της πραγματικής πυκνότητας. Η πυκνότητα του δοκιμίου όταν το πορώδες είναι πληρωμένο με νερό, μένει πρακτικά αμετάβλητη, καθώς είναι σχεδόν ίση με την πυκνότητα του ρευστού ενέματος η οποία δεν επηρεάζεται σημαντικά από τον τρόπο ανάμειξης, παρά μόνο από το ποσοστό του

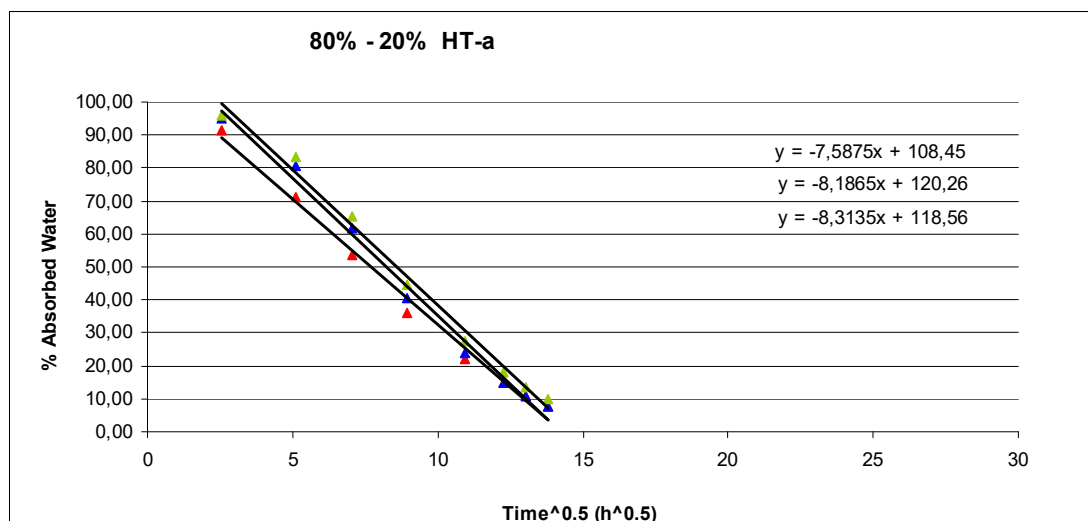
περιεχομένου αέρα, καθώς η μηχανική ανάμειξη εγκλωβίζει αέρα ενώ οι υπέρηχοι αποβάλλουν τον ροφημένο αέρα από το νερό και τις κόνιες.

3.3 Υπολογισμός του συντελεστή ξήρανσης.

Κατά τη διάρκεια της ξήρανσης των δοκιμίων στους 55 ± 5 °C, μετρούταν η μάζα των δοκιμίων σε συνάρτηση με τον χρόνο. Οι καμπύλες που προκύπτουν, όταν τοποθετηθεί σε διάγραμμα το ποσοστό του συνολικού ροφημένου νερού που παραμένει στο δοκίμιο σε συνάρτηση με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου, εμφανίζουν μια χαρακτηριστική γραμμική περιοχή. Η κλίση της γραμμικής περιοχής είναι χαρακτηριστική του ρυθμού που το νερό εξατμίζεται μέσα από το πορώδες του κάθε υλικού, στο βαθμό που τα δοκίμια έχουν όμοιες διαστάσεις και γεωμετρικά χαρακτηριστικά και ονομάζεται συντελεστής ξήρανσης. Στα Διαγράμματα 5 και 6 παρουσιάζεται η καμπύλη ξήρανσης του ενέματος 80 20% CHS(a) και ο υπολογισμός της κλίσης της γραμμικής περιοχής. Όλα τα διαγράμματα παρατίθενται στο παράρτημα.



Διάγραμμα 5. Καμπύλες ξήρανσης δοκιμίων 80 20 CHS(a) ως προς τετραγωνική ρίζα του χρόνου



Διάγραμμα 6. Υπολογισμός συντελεστή ξήρανσης της σύνθεσης 80 20 CHS(a)

Στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις των συντελεστών ξήρανσης που προκύπτουν από την προσαρμογή της βέλτιστης ευθείας γραμμής στο γραμμικό τμήμα της καμπύλης. Επειδή το μέγεθος και το σχήμα των δοκιμών δεν ήταν πανομοιότυπο, εκτός από τους συντελεστές που προκύπτουν απευθείας από τις καμπύλες έχει υπολογιστεί και μια κανονικοποιημένη τιμή, όπου ο κάθε συντελεστής έχει διαιρεθεί με τον λόγο της ανοιγμένης επιφάνειας προς των ανοιγμένο όγκο των δοκιμών. Οι ανοιγμένες τιμές έχουν υπολογιστεί ως το πηλίκο της επιφάνειας ή του όγκου κάθε κύβου προς την αντίστοιχη τιμή του μικρότερου κύβου. Ο λόγος επιφάνειας προς όγκο κανονικοποιεί τις τιμές ως προς της απόκλιση το δοκιμίου από το κυβικό σχήμα, και η αναγωγή των τιμών ως προς το μέγεθος του μικρότερου δοκιμίου κανονικοποιεί τις τιμές ως προς το μέγεθος το δοκιμίου. Βέβαια η κανονικοποίηση είναι σχετική καθώς δεν διαφοροποιείται ως προς το βαθμό που επηρεάζεται το φαινόμενο από την κάθε παράμετρο. Σε περίπτωση που η μία τιμή απείχε πολύ από τις δύο άλλες, δεν λαμβανόταν υπόψη στον υπολογισμό του μέσου όρου.

	80-20 CHS (a)	80-20 CHS (b)	80-20 US	90-10 CHS	90-10 US	100 CHS	100 US	TER CHS	TER US	100 US (noSP)	80-20 US (noSP)	C.B	LED
Μέση τιμή	-8,03	-8,86	-7,67	-7,58	-8,44	-7,75	-8,60	-6,04	-6,00	-4,27	-9,86	-5,02	-17,08
Τυπική απόκλιση	0,39	0,16	0,20	0,21	0,24	0,49	0,37	0,02	0,44	0,10	-	2,32	-
Κανονικοποιημένη μέση τιμή	-10,44	-10,95	-9,95	-9,91	-10,95	-10,06	-11,00	-7,38	-7,68	-5,00	-9,86	-6,33	-19,08
Κανονικοποιημένη Τυπική απόκλιση	0,39	0,39	0,38	0,34	0,36	0,77	0,16	0,05	0,37	0,02	-	2,79	-

Πίνακας 7. Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις των πρωτοβάθμιων συντελεστών κλίσης

Με εξαίρεση τη σύνθεση υδραυλικής ασβέστου με προσθήκη ποζολάνης σε ποσοστό 20%, παρατηρούμε ότι η ανάμιξη με υπερήχους οδηγεί σε ελαφρά υψηλότερες τιμές του ρυθμού εξάτμισης καθώς και ότι –πάλι με την ίδια εξαίρεση- η προσθήκη της ποζολάνης μειώνει τον ρυθμό εξάτμισης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η περίπτωση του προαναμεμιγμένου ενέματος που έχει ρυθμό εξάτμισης σχεδόν διπλάσιο από τα ενέματα υδραυλικής άσβεστου.

Στο παράρτημα παρατίθενται επιπλέον υπολογισμοί για τον συντελεστή τριχοειδούς ρόφησης νερού και φωτογραφίες των δοκιμών μετά το σύνολο των δοκιμών, όπου καταγράφεται η κατάσταση των δοκιμών πριν τις καταστρεπτικές ανθεκτικότητας σε κύκλους κρυστάλλωσης θειικού νατρίου.

4. Ανθεκτικότητα στην κρυστάλλωση θειικού νατρίου.

Από το σύνολο των δοκιμών επιλέχθηκαν οι τρεις συνθέσεις NHL5 χωρίς και με μικρή προσθήκη ποζολάνης, καθώς και το τριμερές ένεμα, που έχουν αναμειχθεί και με υπερήχους και με αναμεικτάρια κολλοειδούς διασποράς. Οι συνθέσεις αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 9. Το δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα κυβικά δοκίμια, μήκους πλευράς 4cm που είχαν χρησιμοποιηθεί νωρίτερα για τον προσδιορισμό του υδατοπερατού πορώδους.

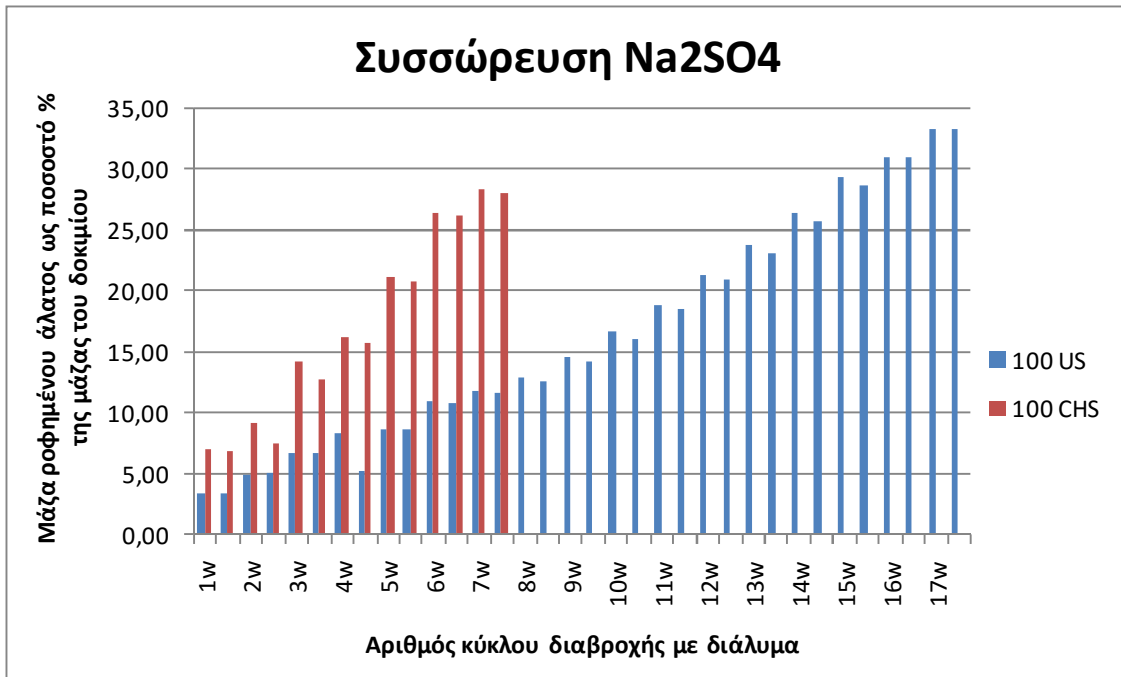
Όνομασία	Είδος συνδετικής κονιάς					Υπερ/τής	Νερό	Τρόπος Ανάμιξης	Ηλικία (έτη)
	Φυσική Υδραυλική Άσβεστος	Εμπορικό Ένεμα	Λευκό τσιμέντο Portland	Ποζολάνη	Υδρ/στος				
TER US			30%	POZ2 45%	25%	SP3 1%	80%	Ultrasonic	10
TER CHS			30%	POZ2 45%	25%	SP3 1%	80%	Colloidal High Shear	9
100 US	NHL5 100%					SP2 1%	80%	Ultrasonic	9
100 CHS	NHL5 100%					SP2 1%	80%	Colloidal High Shear	9
90-10 US	NHL5 90%			POZ1 10%		SP1 1%	80%	Ultrasonic	9
90-10 CHS	NHL5 90%			POZ1 10%		SP1 1%	80%	Colloidal High Shear	9
80- 20 US	NHL5 80%			POZ1 20%		SP1 1,25%	80%	Ultrasonic	9
80-20 CHS (a)	NHL5 80%			POZ1 20%		SP1 1,25%	80%	Colloidal High Shear	9

Πίνακας 8. Πίνακας των συνθέσεων που υποβλήθηκαν στις δοκιμές κρυστάλλωσης θειικού νατρίου

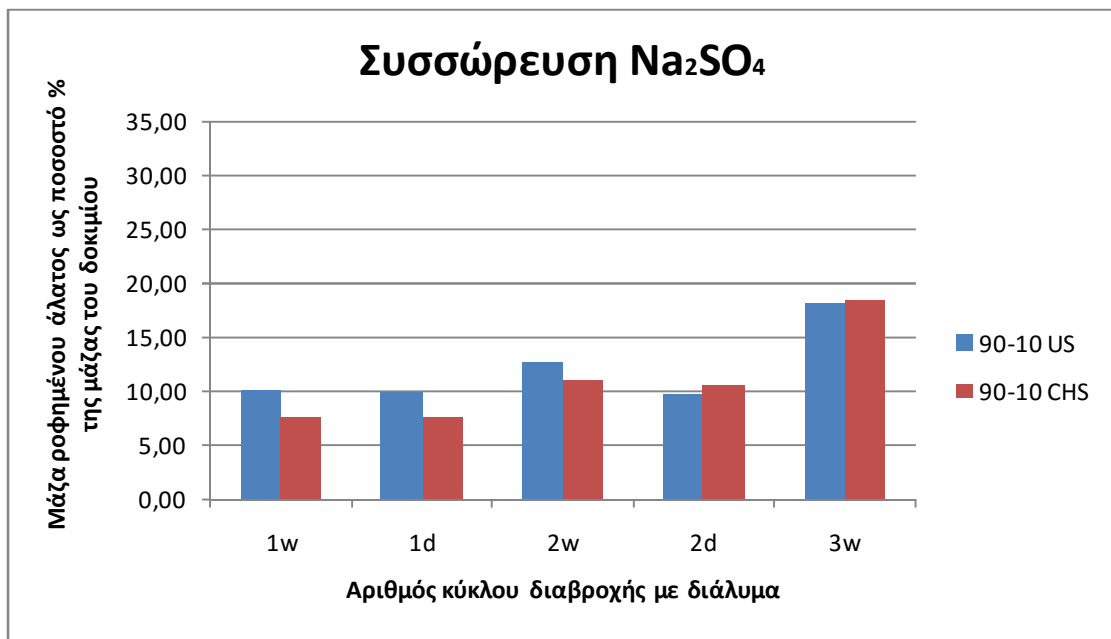
Πραγματοποιήθηκαν κύκλοι διαβροχής και ξήρανσης δοκιμών με πορώδες πληρωμένο από διάλυμα θειικού νατρίου 25%w/w. Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε περιγράφεται ακολούθως. Κατά τη φάση της διαβροχής, τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε δοχεία πολυαιθυλενίου με πώμα και σε κάθε δοκίμιο προσθέτονταν ζεστό διάλυμα θειικού νατρίου, θερμοκρασίας $55\pm 5^{\circ}\text{C}$ και όγκου λίγο μεγαλύτερου από το πορώδες το δοκίμιου.

Ακολουθως το σφραγισμένο δοκίμιο τοποθετούταν σε πυριαντήριο θερμοκρασίας $55\pm 5^{\circ}\text{C}$ για τουλάχιστον 8h. Κατά τη φάση της ξήρανσης τα δοκίμια εκθέτονταν σε συνθήκες δωματίου, όπου η θερμοκρασία δεν υπερέβαινε τότε τους 25°C και η σχετική υγρασία RH το 40%, για χρονικό διάστημα τουλάχιστον 24h. Χρησιμοποιήθηκε διάλυμα συγκέντρωσης 25% w/w θειικού νατρίου ώστε η συγκέντρωση να είναι μικρότερη της συγκέντρωσης κορεσμού στη θερμοκρασία διαβροχής (31% w/w στους 50°C) και το διάλυμα να είναι υπέρκορο στη θερμοκρασία ξήρανσης (16% w/w στους 20°C). Με αυτή τη συγκέντρωση διαλύματος επιτυγχάνουμε τον πρώτο ακόμα κύκλο συνθήκες υπερκορεσμού στο εσωτερικό των πόρων κατά την ξήρανση των δοκιμίων. Κατά τη διάρκεια της διαβροχής σε θερμοκρασία $55\pm 5^{\circ}\text{C}$ ο μιραβιλίτης δεν είναι θερμοδυναμικά σταθερός και δεν μπορεί να σχηματιστεί ανεξάρτητα της συγκέντρωσης του διαλύματος στους πόρους. Επιπλέον οι κρύσταλλοι μιραβιλίτη που είχαν σχηματιστεί κατά τη διαδικασία της ξήρανσης του προηγούμενου κύκλου, θα χάσουν τα 10 κρυσταλλικά μόρια νερού και είτε θα διαλυθούν είτε θα μετατραπούν σε τεναρδίτη, εάν έχει επιτευχθεί αρκετά υψηλός υπερκορεσμός. Κατά τη διάρκεια της ξήρανσης σε θερμοκρασία δωματίου, δηλαδή κάτω των 32.38°C , ο μιραβιλίτης είναι θερμοδυναμικά σταθερός και μπορεί να κρυσταλλωθεί όταν υπάρχει αρκετό διαθέσιμο νερό. Η χαμηλή σχετική υγρασία στις συνθήκες ξήρανσης δεν ευνοεί τη δημιουργία μιραβιλίτη, ενώ και στις συνθήκες αυτές ο μιραβιλίτης μπορεί να χάσει τα κρυσταλλικά του νερά και να μετατραπεί σε τεναρδίτη. Καθώς οι σημαντικότερες φθορές από την κρυστάλλωση θειικού νατρίου λαμβάνουν χώρα όταν σχηματίζεται μιραβιλίτης από την ανακρυστάλλωση τεναρδίτη σε συνθήκες υψηλού υπερκορεσμού, η πειραματική μας διαδικασία επιτρέπει σε μέρος του αλατιού να σχηματιστεί μιραβιλίτη να προκαλέσει φθορά, ενώ η μεγαλύτερη ποσότητα θειικού νατρίου να συσσωρεύεται ως τεναρδίτη στους πόρους του δοκιμίου προτού αυτό καταρρεύσει.

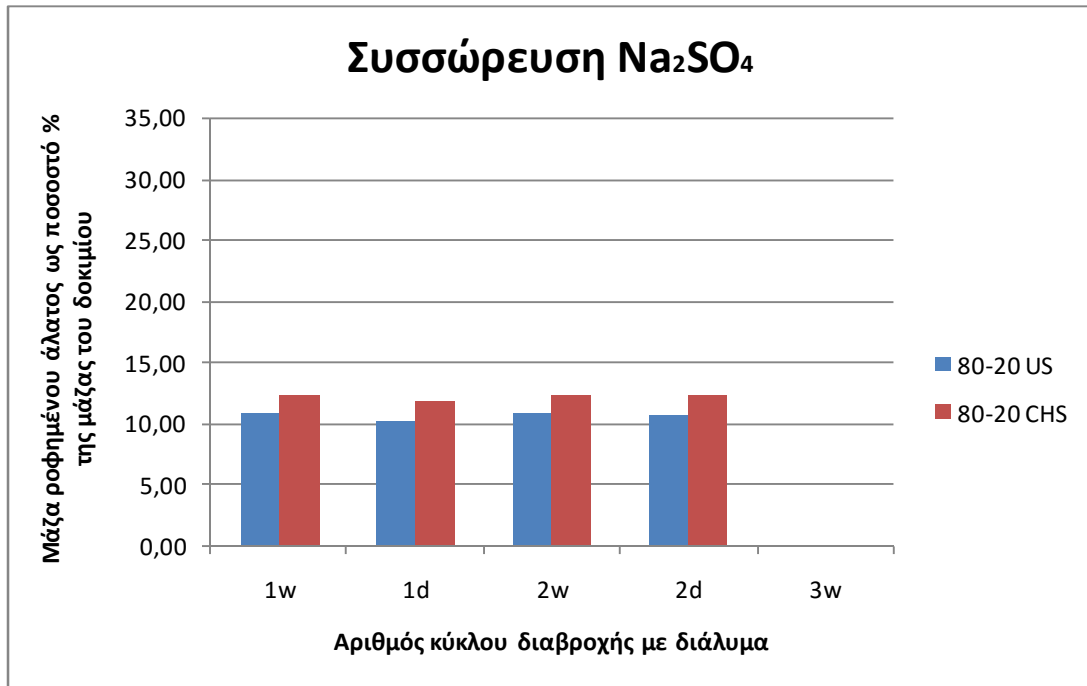
Με κατάλληλες μετρήσεις της μάζας των δοκιμίων, του διαλύματος που προστίθεται, του νερού που εξατμίζεται, του αλατιού που αποβάλλεται ως εξάνθιση και των κόκκων υλικού που παρασέρνει, καθώς και των κομματιών των δοκιμίων που αποκόπτονται και του αλατιού περιέχουν αυτά, υπολογίζεται σε κάθε κύκλο η μάζα του δοκιμίου που παραμένει, η μάζα του ροφημένου αλατιού και το ποσοστό του πορώδους του δοκιμίου που θα γέμιζε εάν όλο το ροφημένο αλάτι κρυσταλλωνόταν ως μιραβιλίτης. Στα Διαγράμματα 7 έως 10 παρουσιάζεται η μάζα του αλατιού που συσσωρεύεται σε κάθε δοκίμιο ως ποσοστό της μάζας του δοκιμίου και ο κύκλος διαβροχής με διάλυμα στον οποίο επήλθε ρήξη του δοκιμίου.



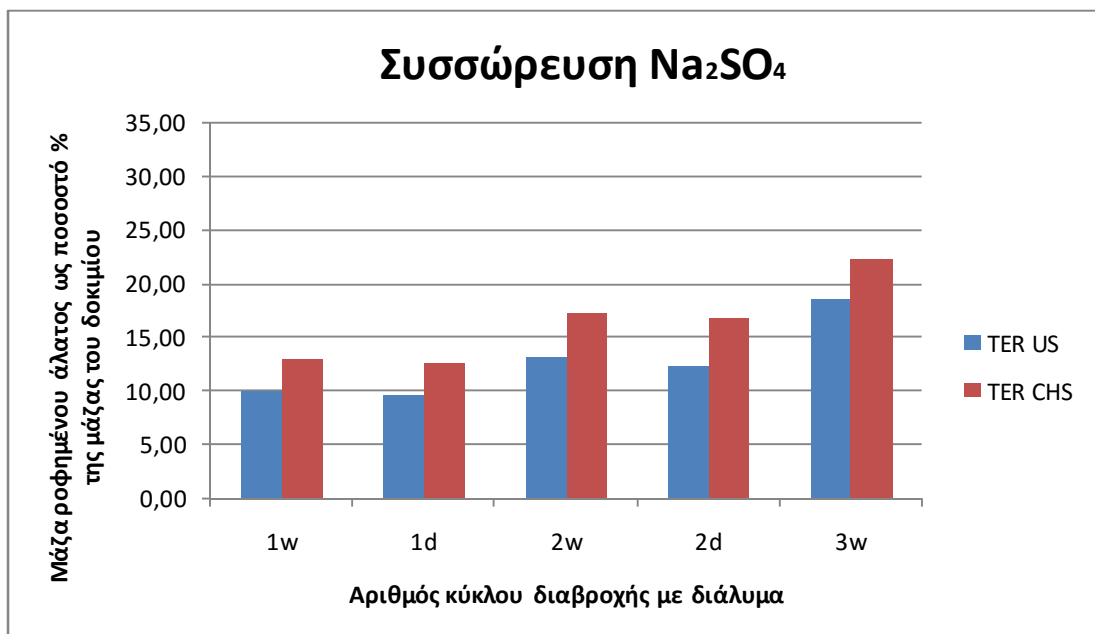
Διάγραμμα 7. Συσσώρευση αλατιού στο ένεμα φυσικής υδραυλικής ασβέστου χωρίς προσθήκη ποζολάνης



Διάγραμμα 8. Συσσώρευση αλατιού στο ένεμα φυσικής υδραυλικής ασβέστου με προσθήκη ποζολάνης 10%



Διάγραμμα 9. Συσσώρευση αλατιού στο ένεμα φυσικής υδραυλικής ασβέστου με προσθήκη ποζολάνης 20%

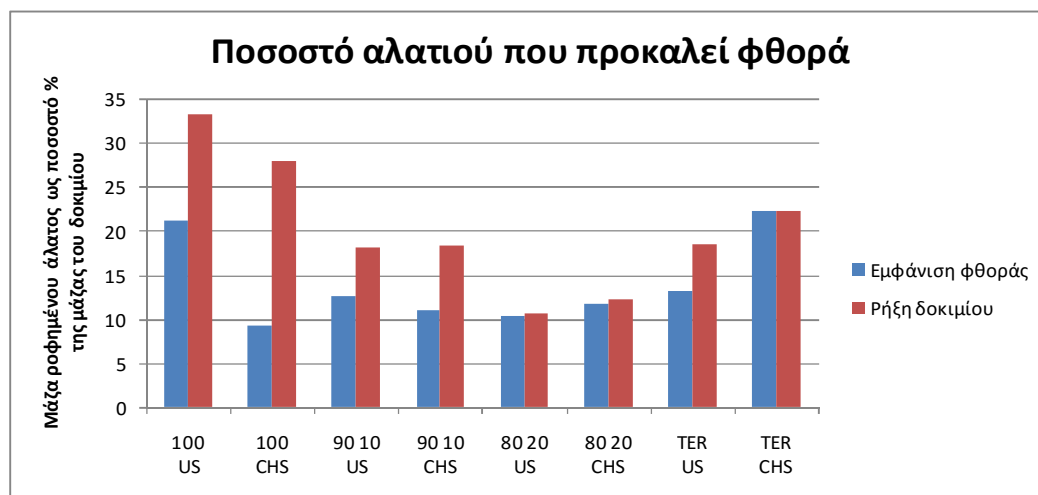


Διάγραμμα 10. Συσσώρευση αλατιού στο τριμερές ένεμα λευκού τσιμέντου portland-υδρασβέστου-ποζολάνης

Παρατηρούμε το ένεμα με προσθήκη ποζολάνης 20% κατέρρευσε στο τέλος του δεύτερου κύκλου ρόφησης-ξήρανσης, το δοκίμιο με προσθήκη ποζολάνης 10% και το τριμερές ένεμα στο τέλος του τρίτου κύκλου. Τη μεγαλύτερη ανθεκτικότητα εμφάνισε το δοκίμιο χωρίς προσθήκη ποζολάνης (NHL5 100%) όπου αστόχησε στον 7^ο και 17^ο κύκλο για τα δοκίμια που

αναμείχθηκαν με κολλοειδή αναμεικτήρα και υπερήχους αντίστοιχα. Συνολικά όμως διακρίνεται κάποια συσχέτιση του τρόπου ανάμειξης με την ανθεκτικότητα στην κρυστάλλωση θειικού νατρίου.

Πιο συστηματικά συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν εάν η σύγκριση γίνει με βάση το ροφημένο αλάτι κι όχι τον αριθμό του κύκλου που επέρχεται η ρήξη του δοκιμίου. Στο Διάγραμμα 11 παρουσιάζεται συγκεντρωτικά το ποσοστό της μάζας του αλατιού που έχει ροφηθεί σε κάθε δοκίμιο, ως προς τη μάζα του δοκιμίου, που απαιτείται για να αρχίσει η φθορά του δοκιμίου με αποκόλληση τεμαχίων και για την τελική ρήξη, οπότε διαρρηγνύεται η κύρια μάζα του δοκιμίου.



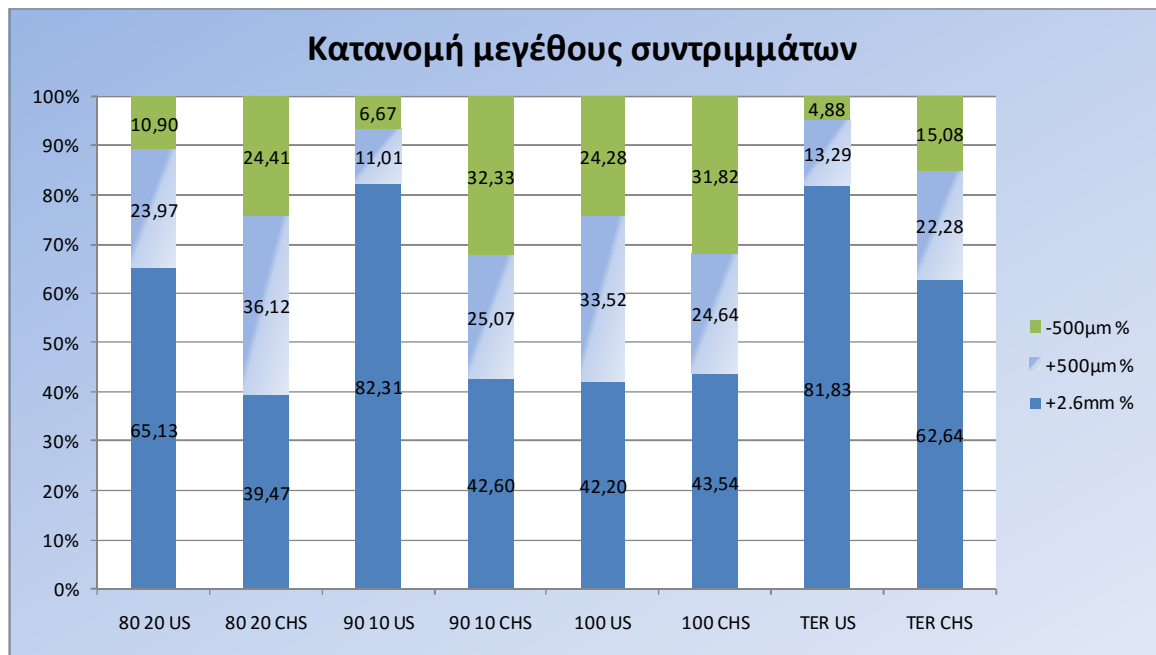
Διάγραμμα 11. Ποσοστό αλατιού που προκαλεί φθορά στα δοκίμια.

Η αρχική εμφάνιση φθοράς δεν ακολουθεί κάποιο ιδιαίτερο πρότυπο, καθώς οφείλεται κυρίως σε προϋπάρχουσες ρωγμές. Η ρήξη όμως του δοκιμίου σχετίζεται με τη σύσταση του δοκιμίου και η σειρά ανθεκτικότητας ακολουθεί τη σειρά:

$$100 > \text{TER} \approx 90 \ 10 > 80 \ 20$$

Τα αποτελέσματα δεν υποδεικνύουν συσχέτιση της αντοχής των δοκιμίων με τον τρόπο ανάμειξής τους στην παρασκευή τους.

Με την τελική τους αστοχία, τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε δοχεία με μεγάλη ποσότητα νερού σε θερμοκρασία 20°C. Το νερό διεισδύοντας στο εσωτερικό των πόρων διαλυτοποιεί τον τεναρδίτη με αποτέλεσμα τον σχηματισμό υπέρκορου διαλύματος ως προς μιραβιλίτη, που στη θερμοκρασία αυτή μπορεί να σχηματιστεί. Ο υψηλός βαθμός υπερκορεσμού που δημιουργείται κατά το μέτωπο της εισδοχής του νερού στους πόρους, οδηγεί στην ταχεία κρυστάλλωση μιραβιλίτη, του οποίου ο κρυσταλλικός όγκος είναι σχεδόν διπλάσιος από τον όγκο του τεναρδίτη που αντικαθιστά με αποτέλεσμα το δοκίμιο να καταρρέει και να μετατρέπεται σε συντρίμματα. Τα συντρίμματα αυτά, αφού εκπλήθηκαν για να απομακρυνθεί το θειικό νάτριο, συλλέχθηκαν, ξηράνθηκαν, διαχωρίστηκαν με σειρά κοσκίνων και μετρήθηκε η μάζα κάθε κλάσματος. Στο Διάγραμμα 12 παρουσιάζεται η κατανομή μεγέθους των συντριμμάτων για κάθε σύνθεση και τρόπο ανάμειξης.



Διάγραμμα 12. Κατανομή μεγέθους συντριμμάτων βάση των μαζών των κλασμάτων.

Από την κατάταξη των κλασμάτων προκύπτει ότι τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με τη χρήση υπερήχων καταρρέουν σε μεγαλύτερα κομμάτια σε σχέση με τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν με χρήση κolloειδούς αναμεικτήρα (κλάσμα

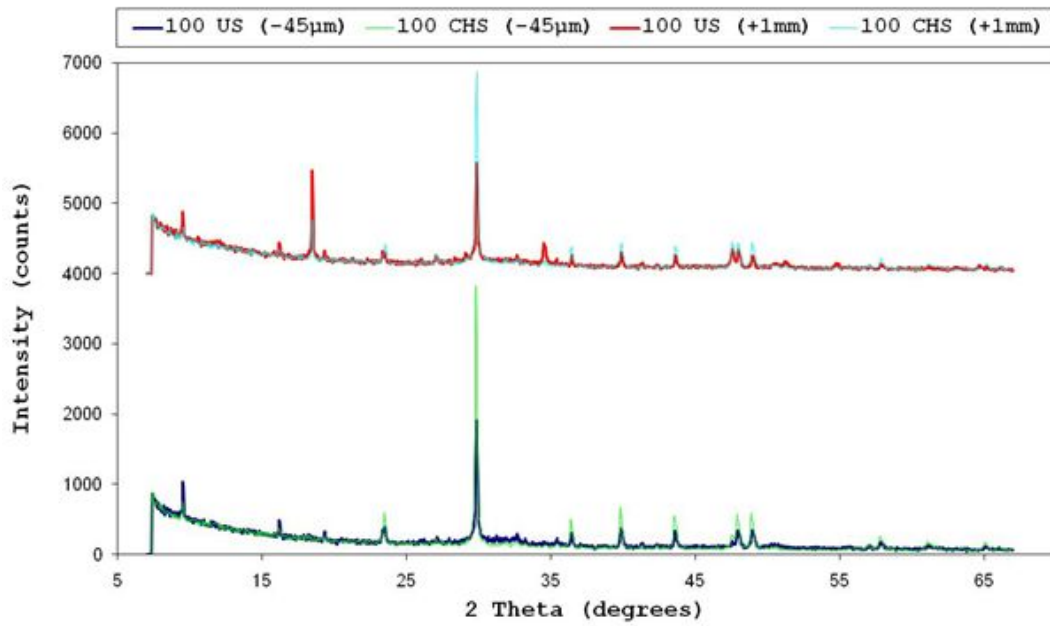
+2,6mm). Εξαιρέση αποτελεί το δοκίμιο φυσικής υδραυλικής ασβέστου χωρίς προσθήκη ποζολάνης στο οποίο όμως το περιεχόμενο αλάτι, άρα και η έκταση του υπερκορεσμού, του δοκιμίου που παρασκευάστηκε με υπερήχους ήταν σημαντικά περισσότερο.

5. Ανάλυση συντριμμάτων με Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD)

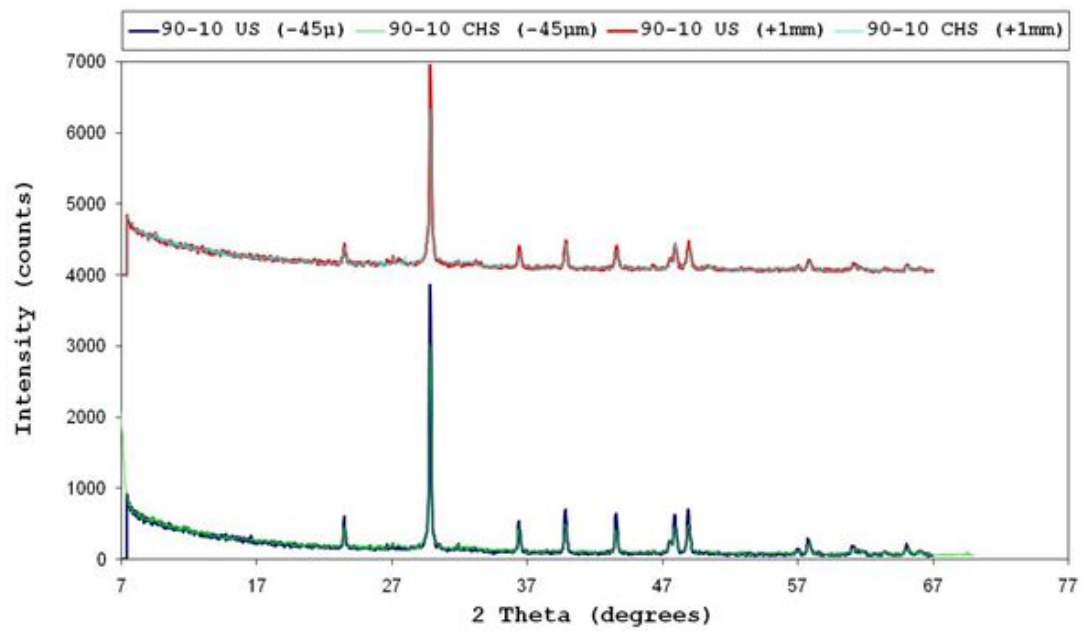
Για την ανάλυση των κρυσταλλικών φάσεων και την επιβεβαίωση ότι τα κλάσματα των συντριμμάτων δεν περιέχουν θειικό νάτριο, δύο κλάσματα ανά σύνθεση και μέθοδο ανάμειξης αναλύθηκαν με τη μέθοδο της Περίθλασης Ακτίνων Χ. Τα δείγματα που αναλύθηκαν (-45μm και -2,6/+1mm) λειοτριβήθηκαν σε ιγδίο αχάτη. Για τη μέτρηση χρησιμοποιήθηκε περιθλασίμετρο Bruker Advance D8. Οι πειραματικές συνθήκες ήταν οι εξής:

- δείγμα σε μορφή σκόνης, ατμοσφαιρικές συνθήκες.
- γεωμετρία δέσμης ακτίνων Χ: Bragg-Brentano.
- πρωτογενής άξονας: ακτινοβολία Cu Kα, τάση-ένταση λυχνίας 40V-40A, φίλτρο Ni για την απορρόφηση της Kβ ακτινοβολίας, σπή διαφράγματος 0,681mm, axial soller 2,5°.
- δευτερογενής άξονας: axial soller 2,5° σπή διαφράγματος 0,681mm, ανιχνευτής Lynxeye.
- παράμετροι σάρωσης: γωνία 2θ 7° έως 67°, βήμα γωνιόμετρου 0,020°, χρόνος παραμονής ανά βήμα 0,8s.

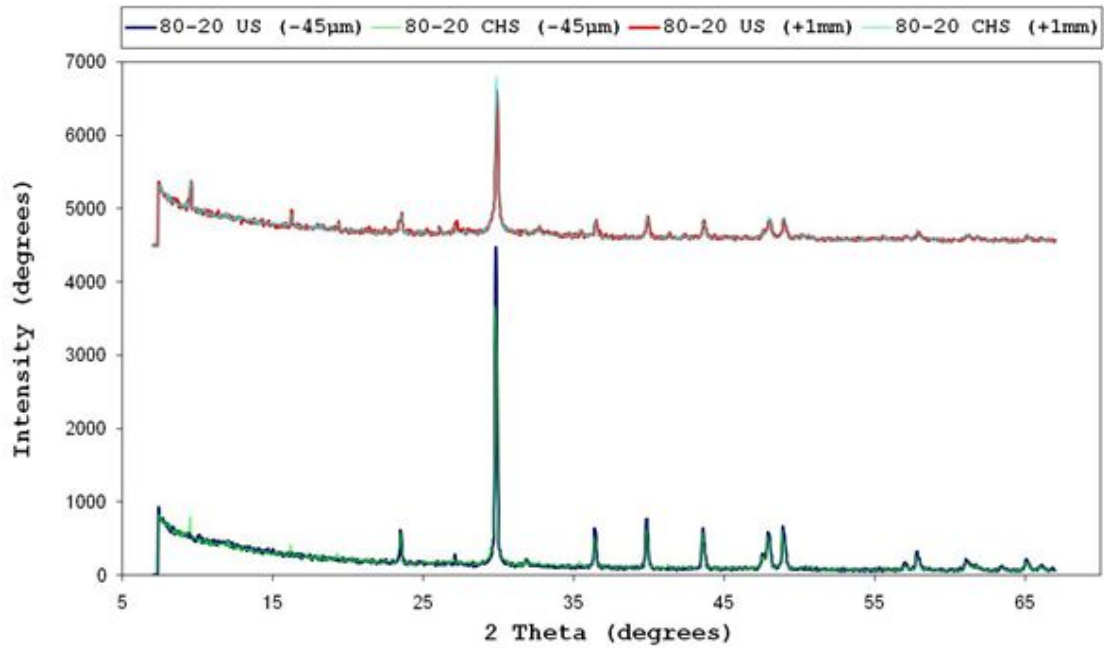
Στα Διαγράμματα 13 έως 16 παρουσιάζονται τα φάσματα XRD των τεσσάρων συνθέσεων.



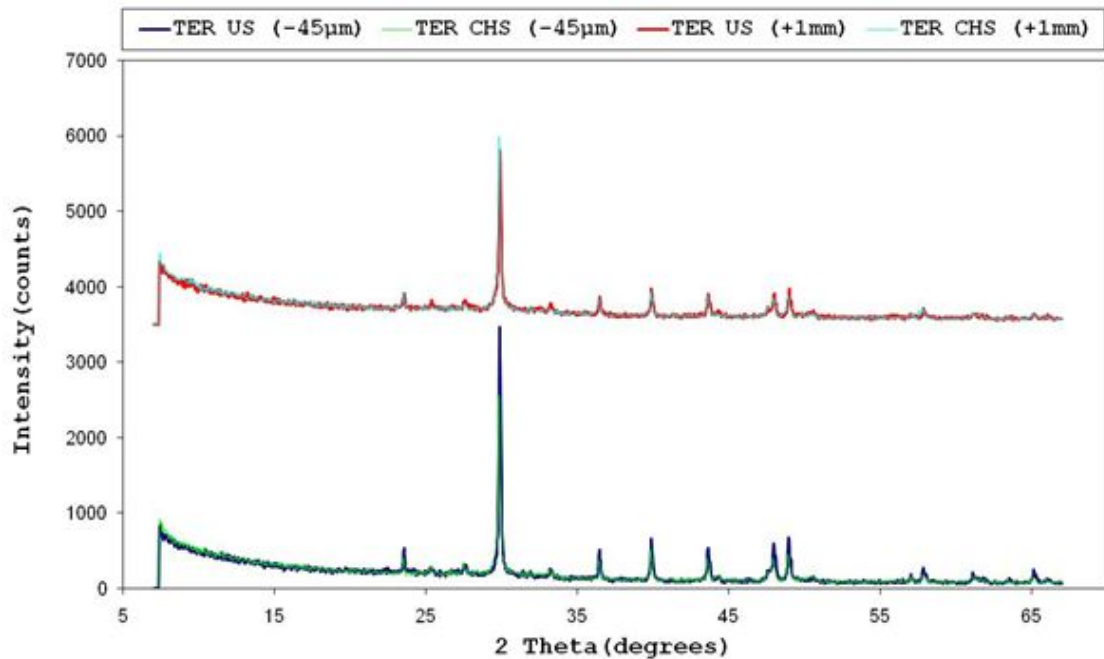
Διάγραμμα 13. Φάσμα XRD ενέματος υδραυλικής ασβέστου χωρίς προσθήκη ποζολάνης



Διάγραμμα 14. Φάσμα XRD ενέματος υδραυλικής ασβέστου με προσθήκη ποζολάνης 10%



Διάγραμμα 15. Φάσμα XRD ενέματος υδραυλικής ασβέστου με προσθήκη ποζολάνης 20%



Διάγραμμα 16. Φάσμα XRD ενέματος λευκού τσιμέντου portland-υδρασβέστου-ποζολάνης

Από την ανάλυση των φασμάτων προκύπτει ότι τα δείγματα του ενέματος φυσικής υδραυλικής ασβέστου χωρίς προσθήκη ποζολάνης δεν είναι πλήρως ενανθρακομένα καθώς διακρίνονται οι χαρακτηριστικές κορυφές του πορτλαντίτη (Ca(OH)_2). Οι κορυφές του είναι πιο έντονες όταν η ανάμειξη έχει γίνει με υπερήχους. Στα ενέματα φυσικής υδραυλικής ασβέστου με προσθήκη ποζολάνης, οι κορυφές του καλσίτη (CaCO_3) είναι πιο έντονες όταν έχουν χρησιμοποιηθεί υπέρηχοι. Μια πιθανή εξήγηση είναι ότι η ανάμειξη με υπερήχους προκαλεί στην υγρή φάση του φρέσκου ενέματος υπερκορεσμό σε υδροξείδιο του

ασβεστίου, το οποίο στις συνθέσεις χωρίς προσθήκη ποζολάνης σχηματίζει στους πόρους του ενέματος μεγάλους κρυστάλλους που είναι δύσκολο να ενανθρακωθούν. Αντίθετα παρουσία ποζολάνης μεγάλο μέρος αντιδρά προς το σχηματισμό ένυδρων ασβεστοπυριτικών φάσεων και οι ποσότητες που απομένουν σχηματίζουν μικρούς κρυστάλλους που ενανθρακώνονται ευκολότερα και στις πειραματικές συνθήκες που ακολουθήθηκαν η ενανθράκωση ήταν πλήρης. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι στα δοκίμια φυσικής υδραυλικής ασβέστου χωρίς και με 20% προσθήκη ποζολάνης, ταυτοποιείται θαυμασίτης ($\text{Ca}_3\text{Si}(\text{OH})_6(\text{CO}_3)(\text{SO}_4)\cdot 12\text{H}_2\text{O}$) χωρίς όμως η παρουσία του να μπορεί να συσχετιστεί με τα αποτελέσματα της ανθεκτικότητας ή να αποδοθεί στη σύσταση.

6. Συμπεράσματα

Σκοπός της εργασίας ήταν να διερευνηθούν παράμετροι του πορώδους και της ανθεκτικότητας υδραυλικών ενεμάτων που έχουν ωριμάσει για περίπου 10 χρόνια. Από το σύνολο των συνθέσεων που δοκιμάστηκαν τα συμπεράσματα εστιάζονται στις συνθέσεις φυσικής υδραυλικής ασβέστου NHL5 με ή χωρίς προσθήκη μικρού ποσοστού ποζολάνης, καθώς και στην τριμερή σύνθεση με λευκό τσιμέντο Portland, υδράσβεστο και ποζολάνη. Παρατηρούμε ότι τα ενέματα με βάση την φυσική υδραυλική ασβέστο έχουν μεγαλύτερο ανοιχτό υδατοπερατό πορώδες σε σχέση με τα τριμερή ενέματα. Η προσθήκη ποζολάνης μειώνει το πορώδες. Σε ότι αφορά του μεγάλους πόρους, που είναι εμφανείς στο μικροσκόπιο, παρατηρείται σημαντική μείωσή τους με την προσθήκη ποζολάνης. Τα παραπάνω οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η προσθήκη ποζολάνης είναι πιθανό να αυξάνει τις μηχανικές αντοχές.

Αντίθετα όμως είναι τα συμπεράσματα σε ότι αφορά την ανθεκτικότητα των ενεμάτων σε κύκλους κρυστάλλωσης θειικού νατρίου. Το ένεμα φυσικής υδραυλικής ασβέστου χωρίς προσθήκη ποζολάνης εμφανίζει την καλύτερη συμπεριφορά, ενώ το ένεμα με προσθήκη ποζολάνης 20% είναι λιγότερο ανθεκτικό ακόμα κι από το τριμερές ένεμα. Μία πιθανή εξήγηση είναι ότι στα ενέματα υδραυλικής ασβέστου παρουσιάζεται μεγάλο ποσοστό μακροπορώδους. Με την προσθήκη της ποζολάνης τα προϊόντα της ασβεστοποζολανικής αντίδρασης σχηματίζουν στερεή φάση στο εσωτερικό των πόρων δεσμεύοντας μεγαλύτερο ποσοστό του ελεύθερου ή δευτερογενούς υδροξειδίου του ασβεστίου, μετατοπίζοντας έτσι το μέγεθος των πόρων προς την περιοχή του μεσοπορώδους και επομένως σε αύξηση της φθοράς από κρυστάλλωση αλάτων. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη και τον αριθμό των κύκλων και τη μέγιστη περιεκτικότητα σε άλατα, η προσθήκη της ποζολάνης έχει αρνητική επίπτωση στην ανθεκτικότητα των δοκιμών NHL5 στην κρυστάλλωση τα θειικού νατρίου, αλλά η προσθήκη ενός μικρού ποσοστού ποζολάνης της τάξης του 10% μπορεί να ισορροπεί ανάμεσα στην ανάγκη για μεγαλύτερες μηχανικές αντοχές και ανθεκτικότητα στα υδατοδιαλυτά άλατα.

Σε ότι αφορά τον τρόπο ανάμειξης παρατηρείται ότι στα ενέματα που προστίθεται ποζολάνη, η ανάμειξη με υπερήχους οδηγεί σε λίγο μικρότερες τιμές πορώδους και πραγματικής πυκνότητας, χωρίς όμως η μείωση αυτή να σχετίζεται με διαφοροποίηση στην ανθεκτικότητα σε κρυστάλλωση θειικού νατρίου. Σε συνδυασμό με το γεγονός ότι στα φάσματα XRD οι συνθέσεις που αναμείχθηκαν με υπερήχους έχουν μεγαλύτερες κορυφές καλσίτη και πορτλαντίτη, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ανάμειξη με υπερήχους προκαλεί υπερκορεσμό υδροξειδίου του ασβεστίου στην υγρή φάση του φρέσκου ενέματος.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι η μίξη με υπέρηχους επηρεάζει το μέγεθος των συντριμμάτων όταν τα δοκίμια που έχουν πληρωθεί με τεναρδίτη βυθίζονται σε νερό θερμοκρασίας 20°C. Το γεγονός ότι καταρρέουν σε μεγάλα κομμάτια σημαίνει ότι διαθέτουν πιο μεγάλους όγκους στους οποίους δεν μπορεί να κρυσταλλωθεί μιραβιλίτης, υπό συνθήκες υψηλού υπερκορεσμού, ενεργοποιώντας ατέλειες.

Για περαιτέρω έρευνα προτείνεται:

- Χρήση άλλων ποζολανικών υλικών, π.χ. μετακαολίτη.
- Μέτρηση την κατανομής των πόρων, αρχικά και μετά την πλήρωση με θειικό νάτριο με χρήση ποροσιμετρίας υδραργύρου.
- Μέτρηση του υπερκορεσμού σε $\text{Ca}(\text{OH})_2$, από τη χρήση υπερήχων στην μίξη.

Βιβλιογραφία

- Borrelli, E. (1999). Porosity. In I. U. WHC, *Conservation of Architectural Heritage, Historic Structures and Materials. Laboratory Handbook*. Rome: ICCROM.
- Borrelli, E. (1999). Salts. Στο I. U. WHC, *Conservation of Architectural Heritage, Historic Structures and Materials. Laboratory Handbook*. Rome: ICCROM.
- Kalagri, A., Miltiadou-Fezans, A., & Vintzileou, E. (2010). Design and evaluation of hydraulic lime grouts for the strengthening of stone masonry historic structures. *Materials and Structures*.
- Rodriguez-Navaro, C., & Doehne, E. (1999). Salt Weathering: Influence of Evaporation Rate, Supersaturation and Crystallization Pattern. *Earth Surface Processes and Landforms*, 191-209.
- Scherer, G. W. (1998). Crystallization in Pores. *Cement and Concrete Research*, 1347-1358.
- Tsui, N., Flatt, R. J., & Scherer, G. W. (2003). Crystallization Damage by Sodium Sulfate. *Journal of Cultural Heritage*, 4, 109-115.
- Vintzileou, E. (2006). Grouting of three- leaf stone masonry: types of grouts, mechanical properties of masonry before and after grouting. *Structural Analysis of Historical Constructions*. New Delhi.
- Vintzileou, E., & Miltiadou-Fezans, A. (2007). Mechanical properties of three-leaf stone masonry grouted with ternary or hydraulic lime-based grouts. *Engineering Structures*.
- Vintzileou, E., Miltiadou-Fezans, A., Papadopoulou, E., & Kalagri, A. (2006). Mechanical Properties of Three-Leaf Stone Masonry after Grouting. *Structural Analysis of Historical Constructions*. New Delhi.
- ΔΙΤΕΑ. *Τεχνικές Προδιαγραφές και Απαιτούμενος Εξοπλισμός για το Σχεδιασμό και την Εφαρμογή των Ενεμάτων*. Διεύθυνση Τεχνικών Έργων Αναστήλωσης, ΥΠΠΟ.
- Κορωναίος, Α., & Πουλάκος, Γ. (2006). *Τεχνικά Υλικά* (Τόμ. 1). Αθήνα: ΕΜΠ (Σημειώσεις).
- Μιλτιάδου, Α. (1991). *Γενική Παρουσίαση της Εφαρμογής των Ενεμάτων για Επισκευή Λιθοδομών*.
- Μιλτιάδου, Α. (2004). *Η Μέθοδος των Υδραυλικών Ενεμάτων για την Επισκευή και Ενίσχυση Παλιών Κατασκευών από Λιθοδομή*. Αθήνα: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας.
- Μιλτιάδου, Α. (1985). *Η Χρήση των Ενεμάτων ως Μέθοδος Επισκευής και Ενίσχυσης Λιθοδομών*. Θεσσαλονίκη.
- Μιλτιάδου-Fezans, Α., & Τάσιος, Θ. (n.d.). *Ορθολογικά κριτήρια για την επισκευή και ενίσχυση των υδραυλικών ενεμάτων*.

Μοροπούλου, Α. (2005). *Χαρακτηρισμός, Έλεγχος Ποιότητας, Διάγνωσης Φθοράς και Συντήρηση Δομικών Υλικών. Μεθοδολογικά Ενόργανων και Μη Καταστρεπτικών Τεχνικών*. Αθήνα: ΕΜΠ (Σημειώσεις).

Σκουλικίδης, Θ. Ν. (2000). *Διάβρωση και Προστασία των Δομικών Υλικών των Μνημείων*. Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.

Σκουλικίδης, Θ. Ν., & Βασιλείου, Π. (2007). *Διάβρωση και Προστασία Υλικών*. Αθήνα: Συμεών.

Κατάλογος εικόνων

(Σε παρένθεση αναφέρεται η πηγή της εικόνας. Εικόνες για τις οποίες δεν αναφέρεται πηγή έχουν δημιουργηθεί στο Εργαστήριο Φυσικοχημείας της Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ)

Εικόνα 1. Εφαρμογή ενεμάτων στη γέφυρα Tours στη Γαλλία το 1835. (Μιλτιάδου-Fesans)	15
Εικόνα 2. Η πρώτη μηχανή ενεμάτων υπό πίεση που επινόησε ο James Greathead (Μιλτιάδου-Fesans).....	16
Εικόνα 3. Εφαρμογή ενεμάτων σε τοιχοποιία (Μιλτιάδου-Fesans)	18
Εικόνα 4. Ένεμα σταθερό (Μιλτιάδου-Fesans).....	23
Εικόνα 5. Ένεμα μη σταθερό (α) εξίδρωση: διαχωρισμός νερού στην επιφάνεια και (β) απόμιξη: βαρύτεροι κόκκοι βρίσκονται στον πυθμένα (Μιλτιάδου-Fesans)	24
Εικόνα 6. Έλεγχος σταθερότητας (Μιλτιάδου-Fesans)	25
Εικόνα 7. Έλεγχος ρευστότητας σε κώνο τύπου Marsh(Μιλτιάδου-Fesans)	26
Εικόνα 8. Τομή λιθοδομής (Μιλτιάδου-Fesans)	27
Εικόνα 9. Πειραματική διάταξη στήλης άμμου (Μιλτιάδου-Fesans)	28
Εικόνα 10. Τοιχοποιία αποτελούμενη από λίθους και αρμούς κονιάματος (Μιλτιάδου-Fesans).....	32
Εικόνα 11. Εξάνθιση αλάτων στα περατωτικά όρια ψηφίδων (Getty Institute).	33
Εικόνα 12. Φθορά από κρυστάλλωση αλάτων στο πορώδες των ψηφίδων (Getty Institute).	34
Εικόνα 13. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το πεντελικό μάρμαρο στο οποίο η διάλυση του στρώματος του γύψου στην επιφάνεια του απαλείφει τις λεπτομέρειες από το πρόσωπο και τις πτυχές του χιτώνα των Καρυάτιδων (Σκουλικίδης).....	38
Εικόνα 14. Είδη πόρων και μορφολογία (ICCR0M).	40
Εικόνα 15. Ανάπτυξη κρυστάλλου σε πόρο ακτίνας r_p , α) Ο κρύσταλλος δεν διαβρέχει τα τοιχώματα του πόρου, β) Ο κρύσταλλος διαβρέχει τα τοιχώματα του πόρου (Scherer).....	48
Εικόνα 16. Διάγραμμα φάσεων θειικού νατρίου - νερού (Tsui)	51
Εικόνα 17. Κατανομή μεγέθους πόρων σε ασβεστόλιθο, πριν και μετά την κρυστάλλωση στο εσωτερικό των πόρων θειικού νατρίου, σε συνθήκες συνεχούς τριχοειδούς αναρρίχησης σε διαφορετικές συνθήκες σχετικής υγρασίας. Μετρήσεις ποροσιμετρίας υδραργύρου (Rodrigues-Navarro).....	51

Κατάλογος πινάκων

(Σε παρένθεση αναφέρεται η πηγή του πίνακα. Πίνακες για τους οποίους δεν αναφέρεται πηγή έχουν δημιουργηθεί στο Εργαστήριο Φυσικοχημείας της Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ)

Πίνακας 1. Ποσοστό επί % πορώδους και είδη πόρων μερικών κοινών πετρωμάτων (ICCROM).	41
Πίνακας 2. Φυσικοχημικές ιδιότητες των σταθερών αλάτων του θειικού νατρίου.....	50
Πίνακας 3. Σύνθεση ενεμάτων, αναλογίες πρώτων υλών, τρόπος ανάμειξης και ηλικία	53
Πίνακας 4. Απεικονίσεις δευτερογενών ηλεκτρονίων σε μεγέθυνση 50x (και 800x στο δοκίμιο LED) στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.	57
Πίνακας 5. Στοιχειακή ανάλυση των δοκιμίων με EDS. Τα ποσοστά παρουσιάζονται ως στοιχειακές % αναλογίες.....	58
Πίνακας 6. Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις των τιμών του ανοιχτού υδατοπερατού πορώδους, της πραγματικής πυκνότητας, της φαινόμενης πυκνότητας και της πυκνότητας υγρού δοκιμίου για κάθε σύνθεση.	61
Πίνακας 7. Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις των πρωτοβάθμιων συντελεστών κλίσης	64
Πίνακας 8. Πίνακας των συνθέσεων που υποβλήθηκαν στις δοκιμές κρυστάλλωσης θειικού νατρίου	65

Κατάλογος διαγραμμάτων

(Σε παρένθεση αναφέρεται η πηγή του διαγράμματος. Διαγράμματα για τα οποία δεν αναφέρεται πηγή έχουν δημιουργηθεί στο Εργαστήριο Φυσικοχημείας της Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ)

Διάγραμμα 1. Λόγος ασβεστίου προς πυρίτιο.	59
Διάγραμμα 2. Μέσες τιμές πυκνοτήτων.	61
Διάγραμμα 3. Μέσες τιμές πορώδους.	61
Διάγραμμα 4. Επίδραση του τρόπου ανάμειξης. Παρουσιάζονται οι % μεταβολές των τιμών πορώδους και πυκνοτήτων ανά σύνθεση, όταν η ανάμειξη έχει γίνει με υπέρηχους σε σχέση με όταν η ανάμειξη έχει γίνει με υψηλό στροβιλώδες.	62
Διάγραμμα 5. Καμπύλες ξήρανσης δοκιμίων 80 20 CHS(a) ως προς τετραγωνική ρίζα του χρόνου.	63
Διάγραμμα 6. Υπολογισμός συντελεστή ξήρανσης της σύνθεσης 80 20 CHS(a)	64
Διάγραμμα 7. Συσσώρευση αλατιού στο ένεμα φυσικής υδραυλικής ασβέστου χωρίς προσθήκη ποζολάνης.	67
Διάγραμμα 8. Συσσώρευση αλατιού στο ένεμα φυσικής υδραυλικής ασβέστου με προσθήκη ποζολάνης 10%.	67
Διάγραμμα 9. Συσσώρευση αλατιού στο ένεμα φυσικής υδραυλικής ασβέστου με προσθήκη ποζολάνης 20%.	68
Διάγραμμα 10. Συσσώρευση αλατιού στο τριμερές ένεμα λευκού τσιμέντου portland-υδρασβέστου-ποζολάνης.	68
Διάγραμμα 11. Ποσοστό αλατιού που προκαλεί φθορά στα δοκίμια.	69
Διάγραμμα 12. Κατανομή μεγέθους συντριμμάτων βάση των μαζών των κλασμάτων.	70
Διάγραμμα 13. Φάσμα XRD ενέματος υδραυλικής ασβέστου χωρίς προσθήκη ποζολάνης.	71
Διάγραμμα 14. Φάσμα XRD ενέματος υδραυλικής ασβέστου με προσθήκη ποζολάνης 10%.	71
Διάγραμμα 15. Φάσμα XRD ενέματος υδραυλικής ασβέστου με προσθήκη ποζολάνης 20%.	72
Διάγραμμα 16. Φάσμα XRD ενέματος λευκού τσιμέντου portland-υδρασβέστου-ποζολάνης.	72

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 : Διαστασιολόγηση Δοκιμών.

Σύνθεση	Δοκίμιο	Πλευρά Α		Πλευρά Β		Πλευρά Γ	
		Μήκος Ακμής Α1 (cm)	Μήκος Ακμής Α2 (cm)	Μήκος Ακμής Β1 (cm)	Μήκος Ακμής Β2 (cm)	Μήκος Ακμής Γ1(cm)	Μήκος Ακμής Γ2 (cm)
100 CHS	11a	4,060	4,059	3,840	3,860	3,972	3,978
	11b	3,955	3,954	3,547	3,549	3,948	3,959
	11c	3,975	3,988	3,690	3,689	4,083	4,088
C.B	16a	3,999	4,032	3,731	3,720	3,973	3,963
	16b	3,967	3,952	3,888	3,905	3,733	3,707
	16c	3,668	3,672	3,944	3,931	3,949	3,968
TER US	4aa	4,132	4,110	3,765	3,770	3,928	3,924
	4ab	3,761	3,766	3,694	3,691	3,952	3,983
	4ac	3,773	3,796	3,993	3,978	4,009	3,995
TER CHS	9aa	3,883	3,864	3,191	3,186	3,855	3,883
	9ab	3,892	3,887	3,213	3,199	3,966	3,979
LED	15	3,673	3,676	3,465	3,472	3,434	3,428
100 US (noSP)	5a	3,909	3,898	3,935	3,926	3,234	3,223
	5b	3,174	3,161	3,794	3,785	3,922	3,922
80-20 US (noSP)	8	3,227	3,226	3,357	3,360	3,317	3,317
80-20 US	22a	3,589	3,596	3,969	3,977	3,990	4,002
	22b	4,041	4,043	3,996	3,988	3,886	3,860
	22c	3,975	3,976	3,929	3,922	3,944	3,920
100 US	7aa	3,922	3,919	3,904	3,905	3,900	3,913
	7ab	4,024	4,006	3,676	3,691	3,945	3,960
	7ac	3,977	3,975	4,075	4,086	3,790	3,775
80-20 CHS (a)	13a	3,96	3,957	3,967	3,966	4,093	4,072

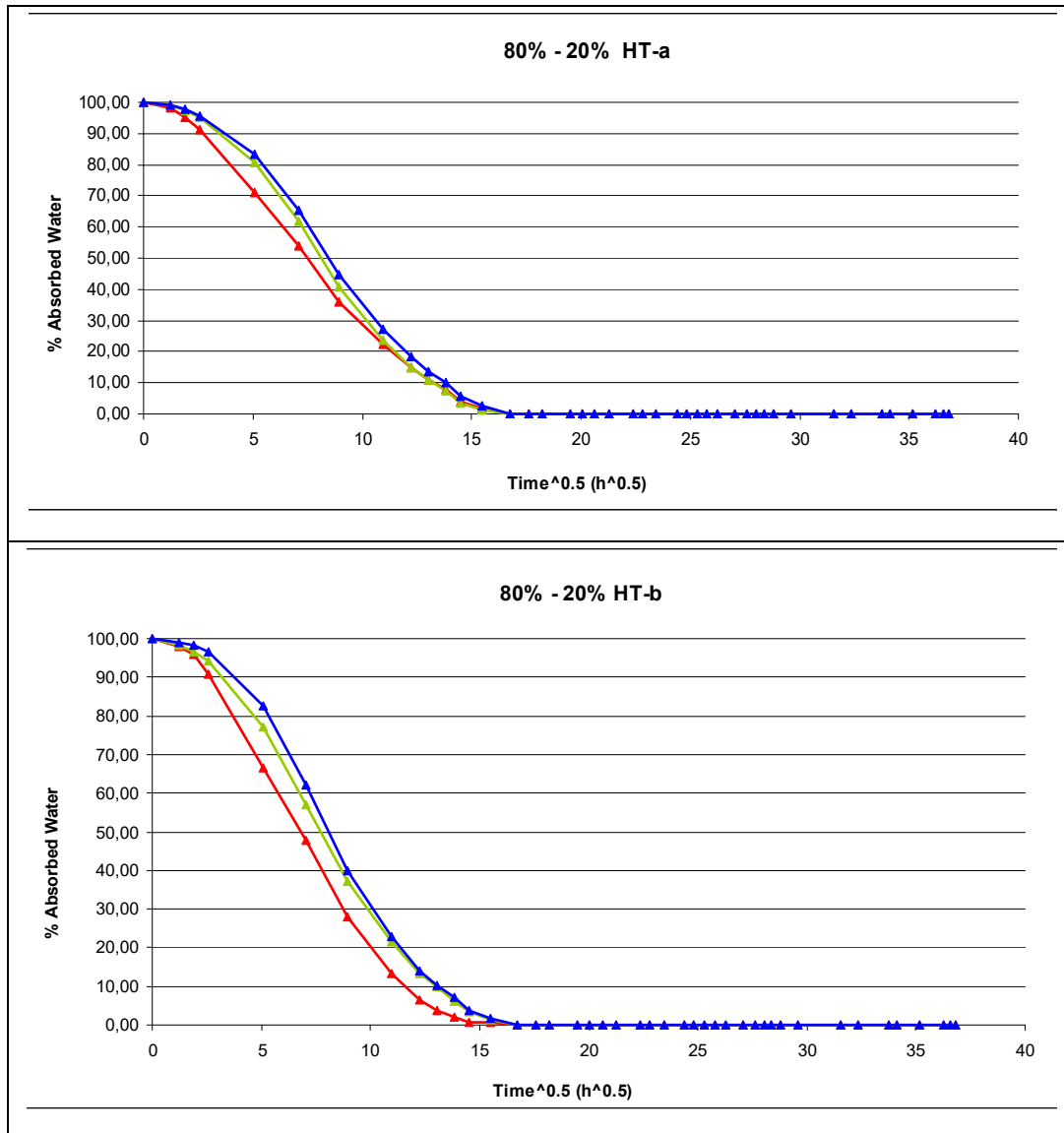
	13b	3,923	3,929	3,995	3,979	3,526	3,490
	13c	4,040	4,040	3,918	3,912	3,953	3,947
90-10 US	20a	3,96	3,961	4,144	4,119	3,819	3,830
	20b	3,888	3,887	3,875	3,909	3,952	3,953
	20c	3,990	3,992	3,922	3,922	3,988	3,952
80-20 CHS (b)	12a	3,978	3,985	3,915	3,890	3,623	3,639
	12b	3,926	3,925	3,892	3,892	3,355	3,360
	12c	3,885	3,878	3,900	3,897	3,495	3,485
90-10 CHS	10a	4,037	4,029	3,983	3,975	4,017	3,989
	10b	3,835	3,820	3,977	3,972	3,953	3,947
	10c	4,020	4,026	3,958	3,978	3,979	4,010

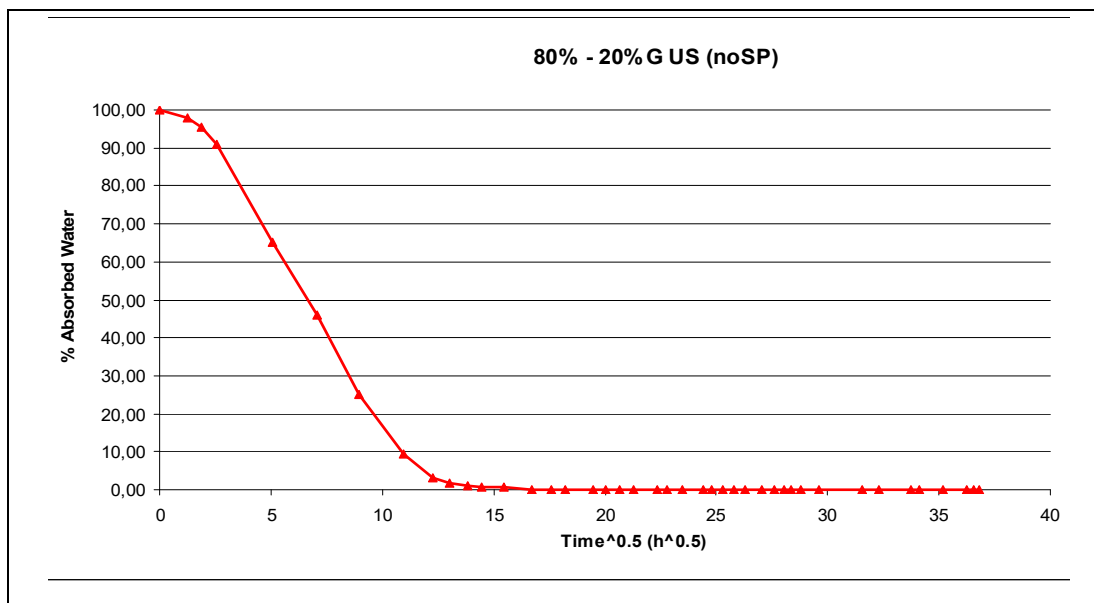
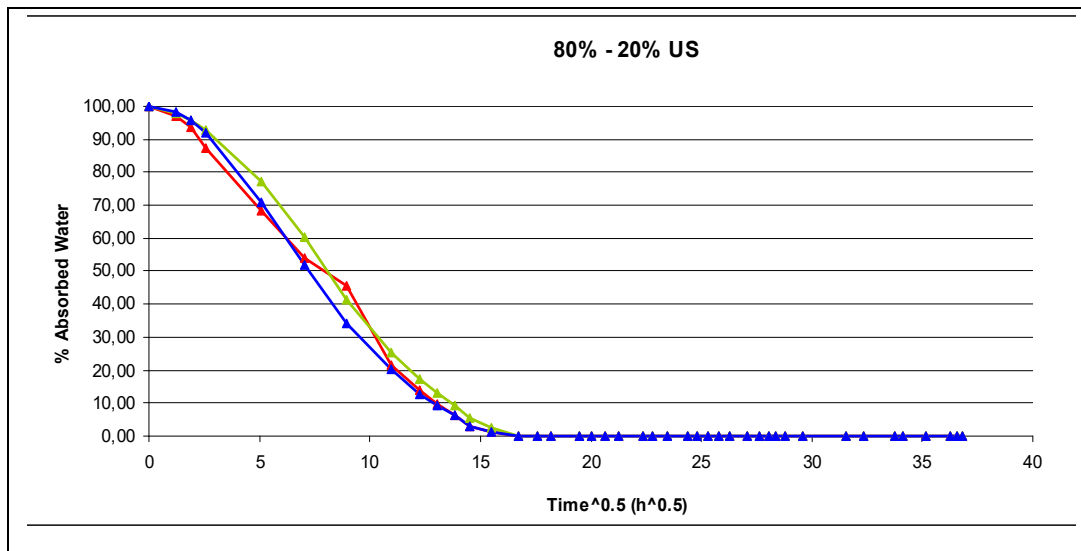
ΠΙΝΑΚΑΣ 2 :Υπολογισμός Ανοιχτού Υδατοπερατού Πορώδους και Πυκνότητας.

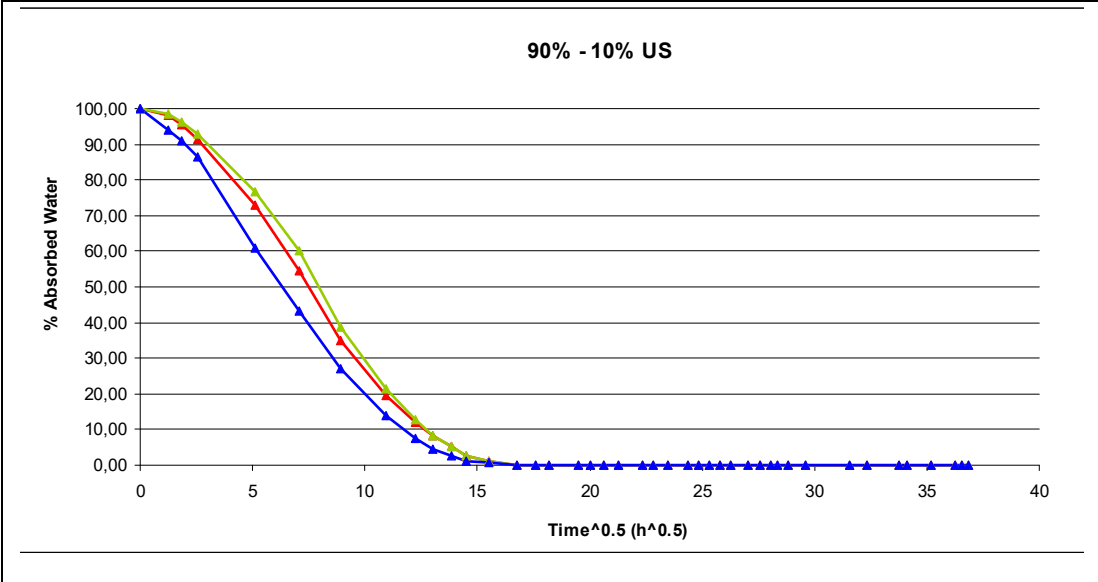
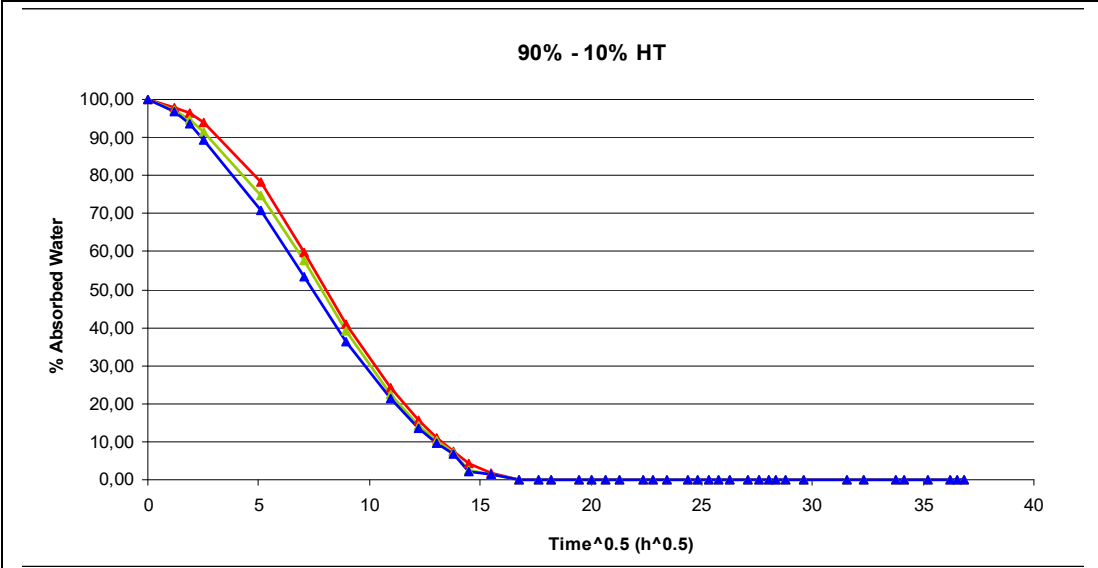
Σύνθεση	Δοκίμιο	Πορώδες	Πυκνότητα (g/cm ³)		
			d _{wet}	d _{apparent}	d _{real}
100% CHS	11a	0,594	1,533	0,939	2,314
	11b	0,600	1,520	0,919	2,300
	11c	0,589	1,526	0,937	2,281
C.B 100%	16a	0,581	1,527	0,946	2,257
	16b	0,618	1,527	0,909	2,381
	16c	0,616	1,528	0,913	2,374
Τριμερές US	4aa	0,533	1,610	1,077	2,305
	4ab	0,520	1,566	1,046	2,180
	4ac	0,526	1,536	1,010	2,130
Τριμερές CHS	9aa	0,584	1,549	0,964	2,321
	9ab	0,587	1,552	0,965	2,339
LED 100%	15	0,720	1,421	0,701	2,504
100% US (noSP)	5a	0,571	1,594	1,024	2,385
	5b	0,564	1,588	1,024	2,348
80%-20%G US (noSP)	8	0,615	1,507	0,892	2,315
80%-20% US	22a	0,566	1,545	0,979	2,255
	22b	0,555	1,538	0,983	2,208
	22c	0,561	1,533	0,972	2,214
100% US	7aa	0,581	1,549	0,968	2,311
	7ab	0,568	1,553	0,984	2,280
	7ac	0,568	1,559	0,991	2,295
80%-20% CHS -a	13a	0,599	1,522	0,923	2,301
	13b	0,588	1,503	0,915	2,219
	13c	0,596	1,519	0,923	2,283
90%-10% US	20a	0,557	1,542	0,985	2,223
	20b	0,564	1,543	0,979	2,245
	20c	0,560	1,559	0,999	2,269

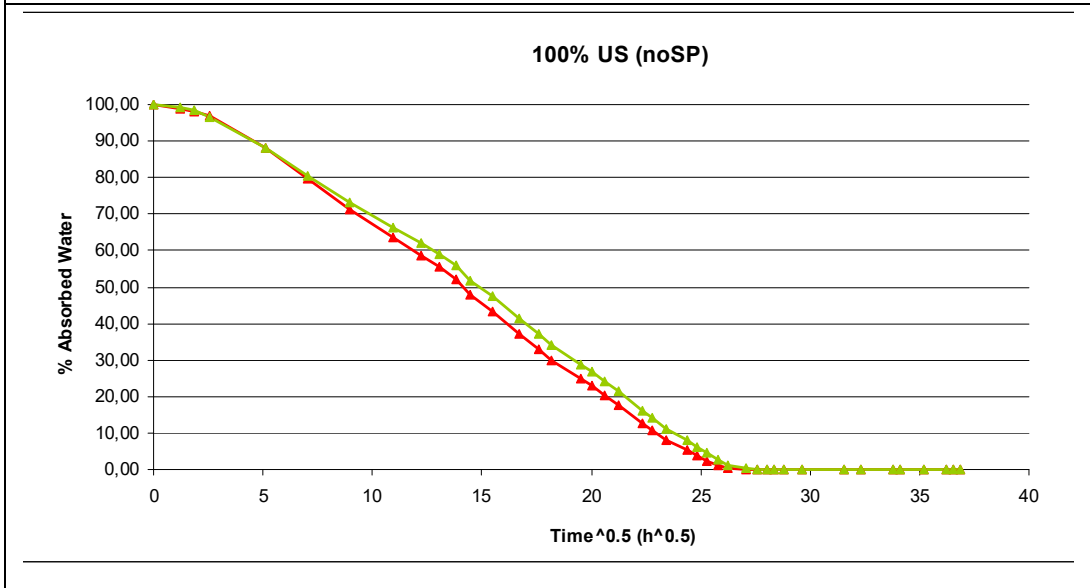
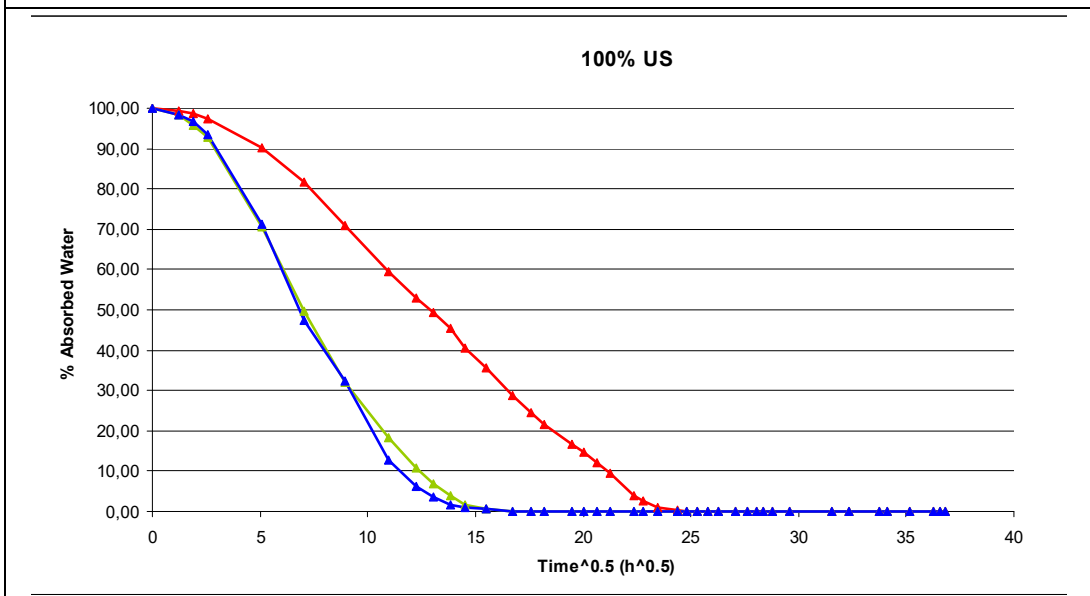
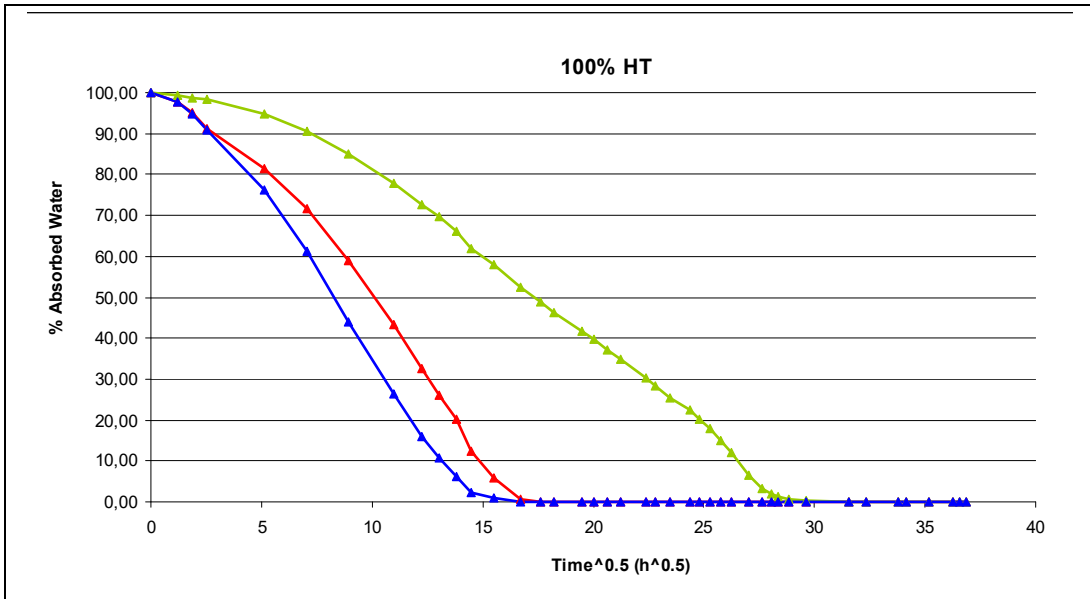
80%-20% CHS -b	12a	0,584	1,506	0,921	2,216
	12b	0,574	1,506	0,932	2,190
	12c	0,587	1,536	0,949	2,299
90%-10% CHS	10a	0,590	1,535	0,945	2,304
	10b	0,583	1,545	0,962	2,308
	10c	0,581	1,550	0,969	2,313

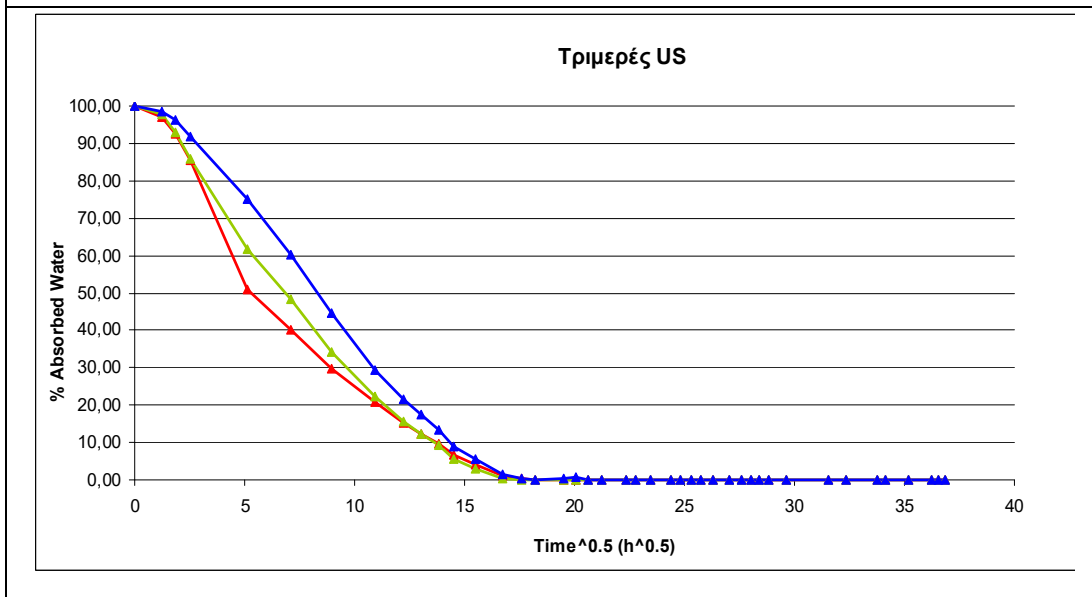
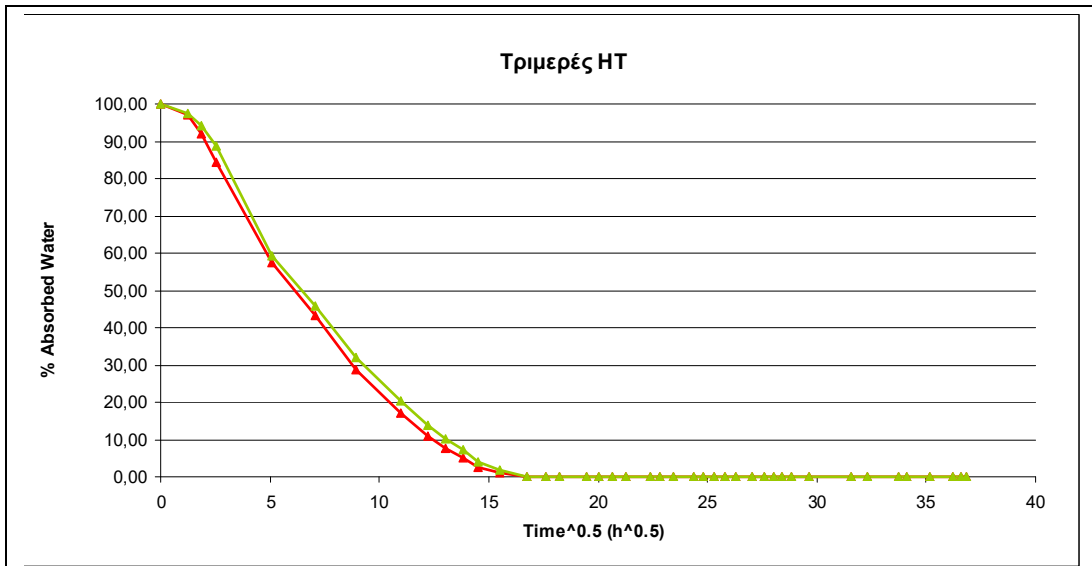
ΠΙΝΑΚΑΣ 3 : Καμπύλες Ξήρανσης Δοκιμίων ανά Σύσταση - % Ροφημένο Νερό συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του Χρόνου. Ο χαρακτηρισμός HT αντιστοιχεί σε μείξη με αναμεικτάρια υψηλής διάτμησης κολλοειδούς διασποράς (CHS)

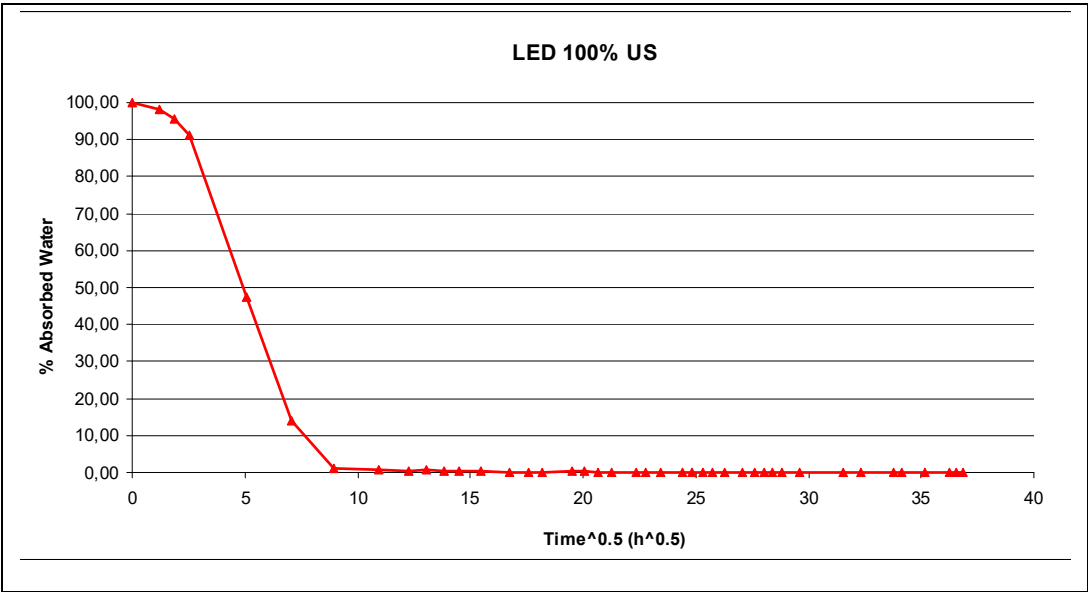
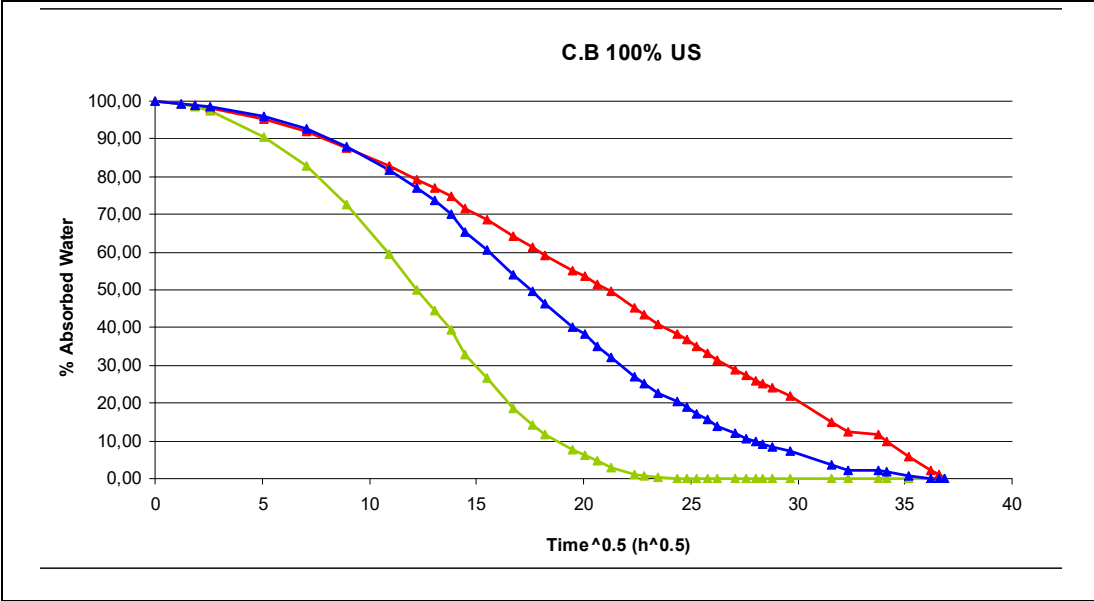




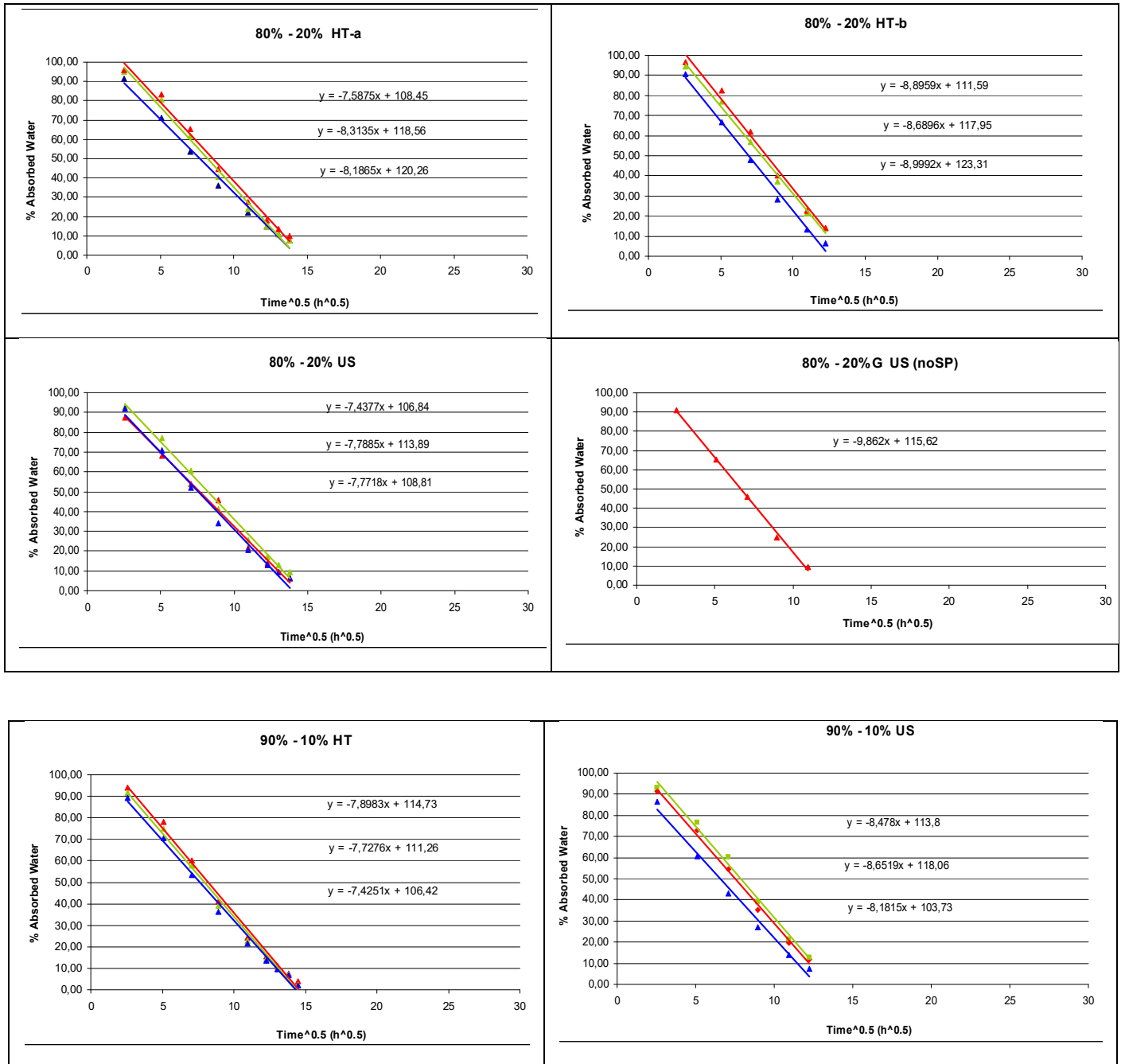


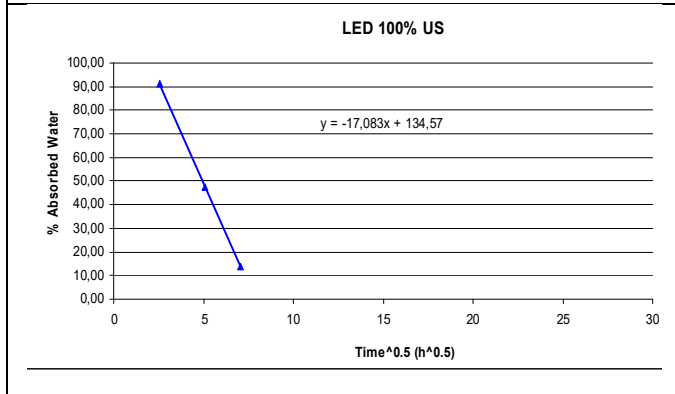
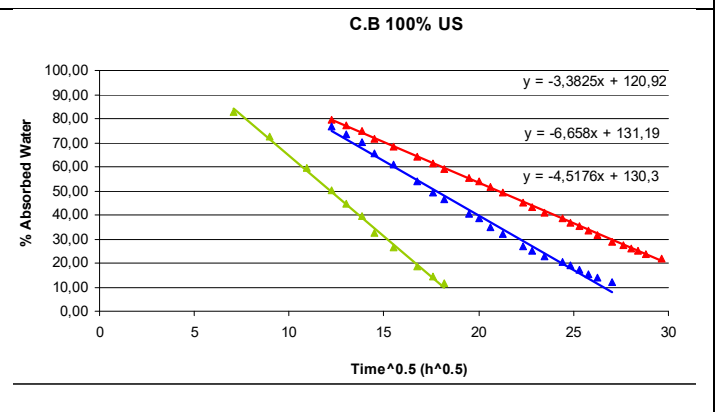
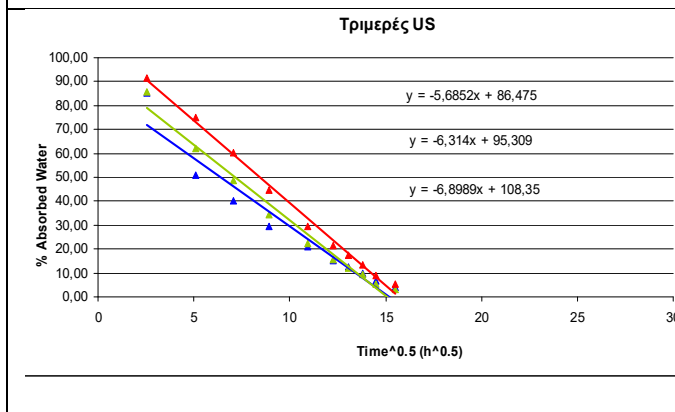
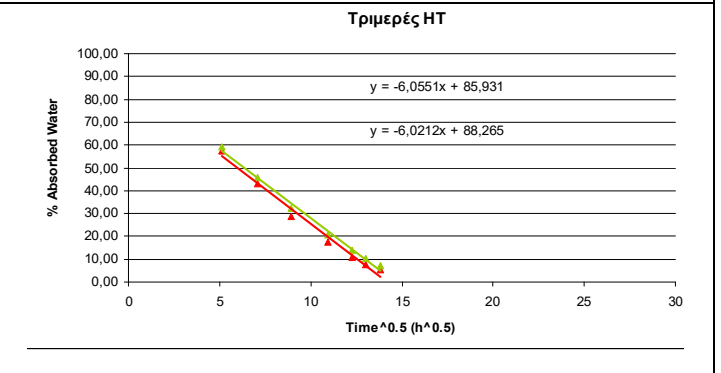
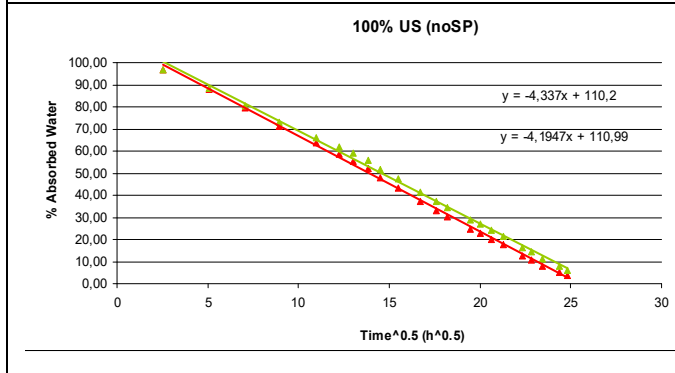
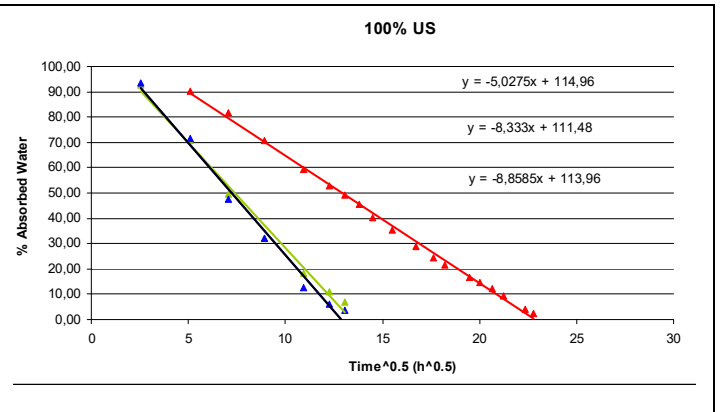
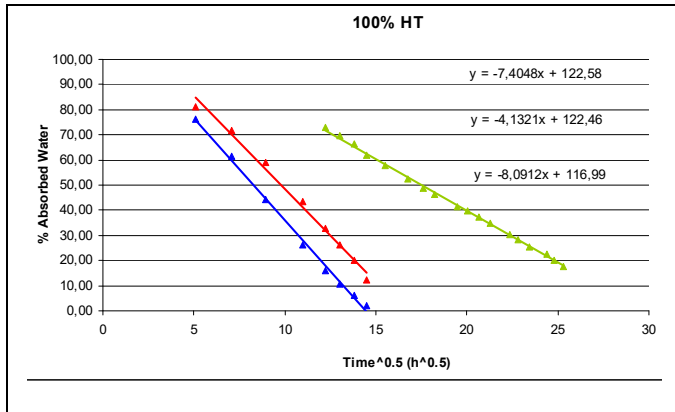




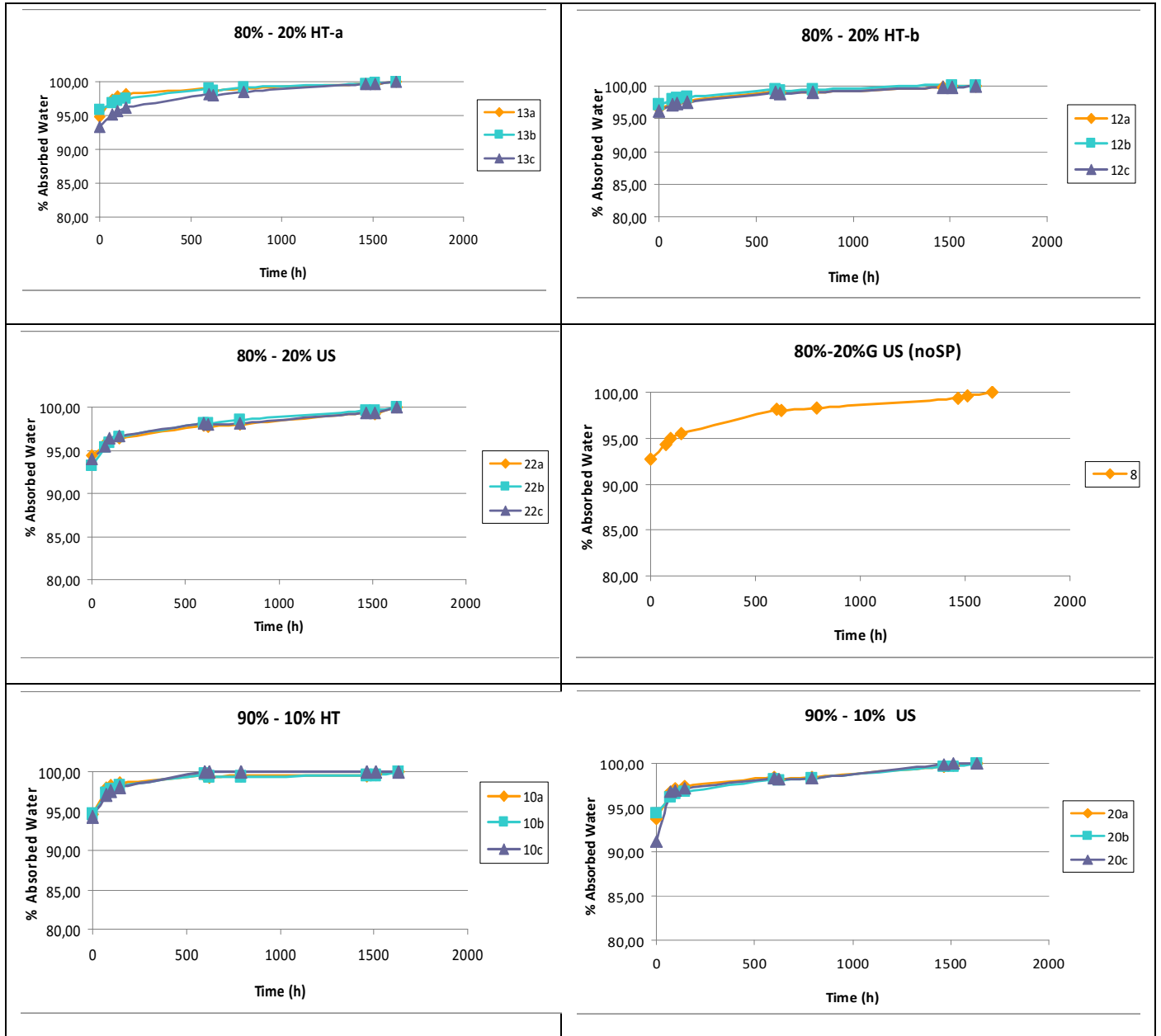


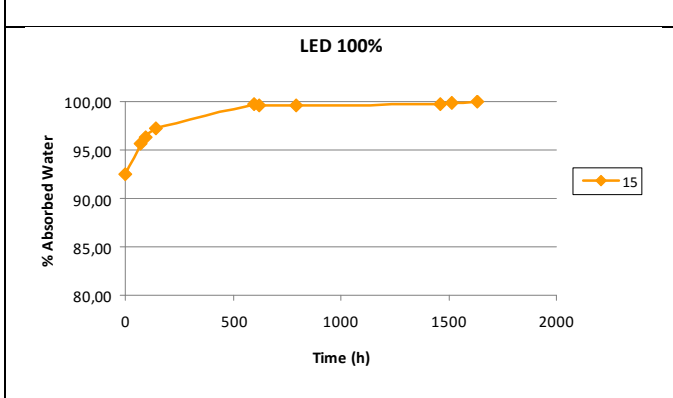
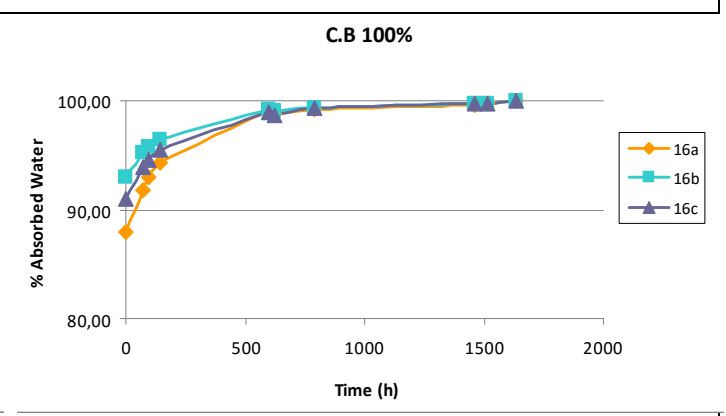
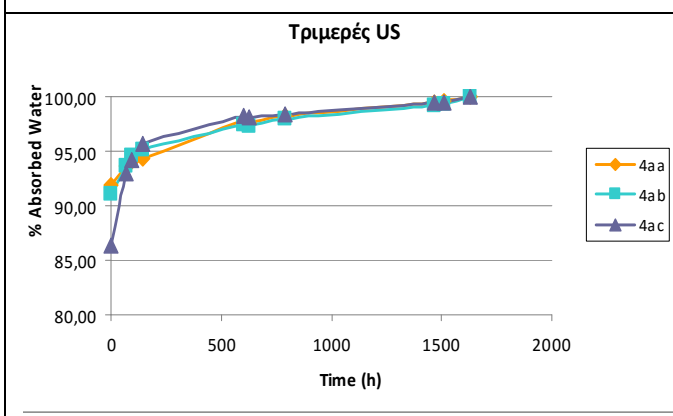
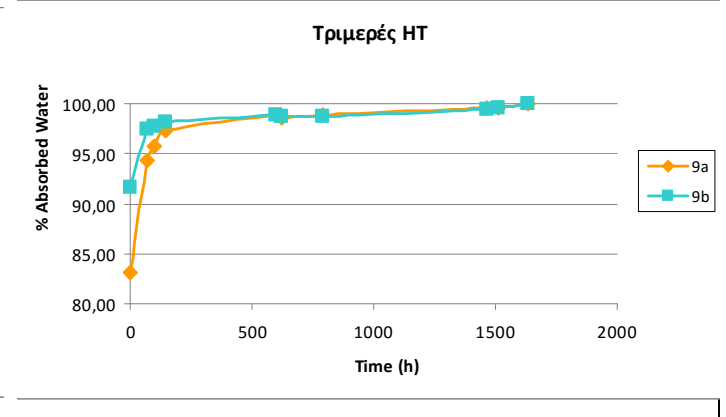
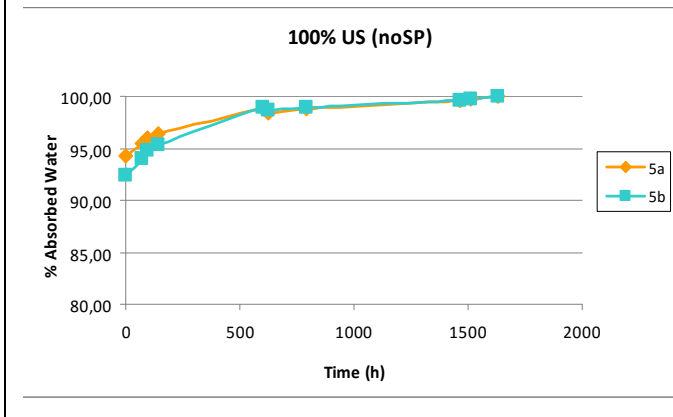
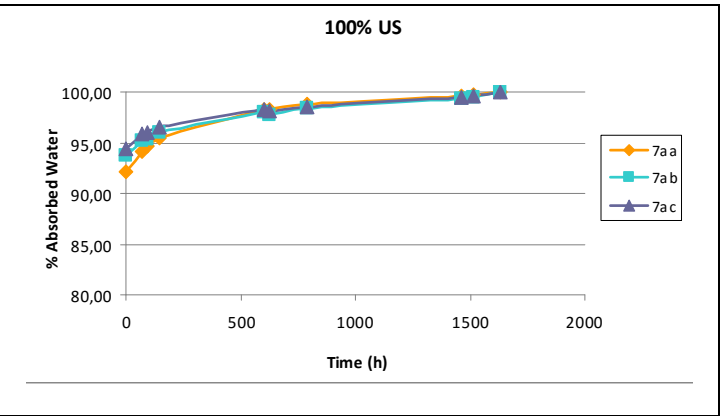
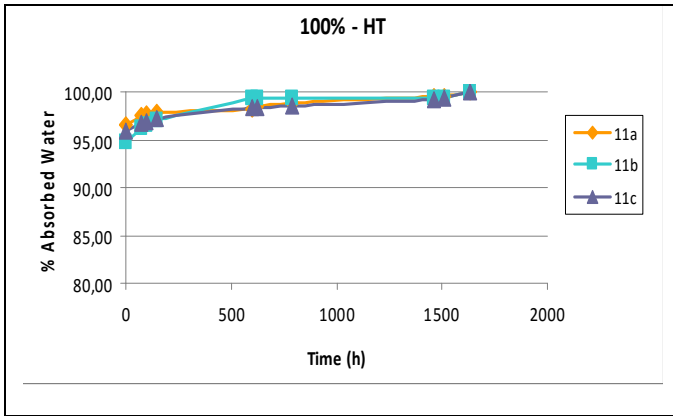
ΠΙΝΑΚΑΣ 4: Υπολογισμός Γραμμικού Συντελεστή Ξήρανσης ανά Σύσταση. Ο χαρακτηρισμός HT αντιστοιχεί σε μείξη με αναμεικτήρα υψηλής διάτμησης κολλοειδούς διασποράς (CHS)



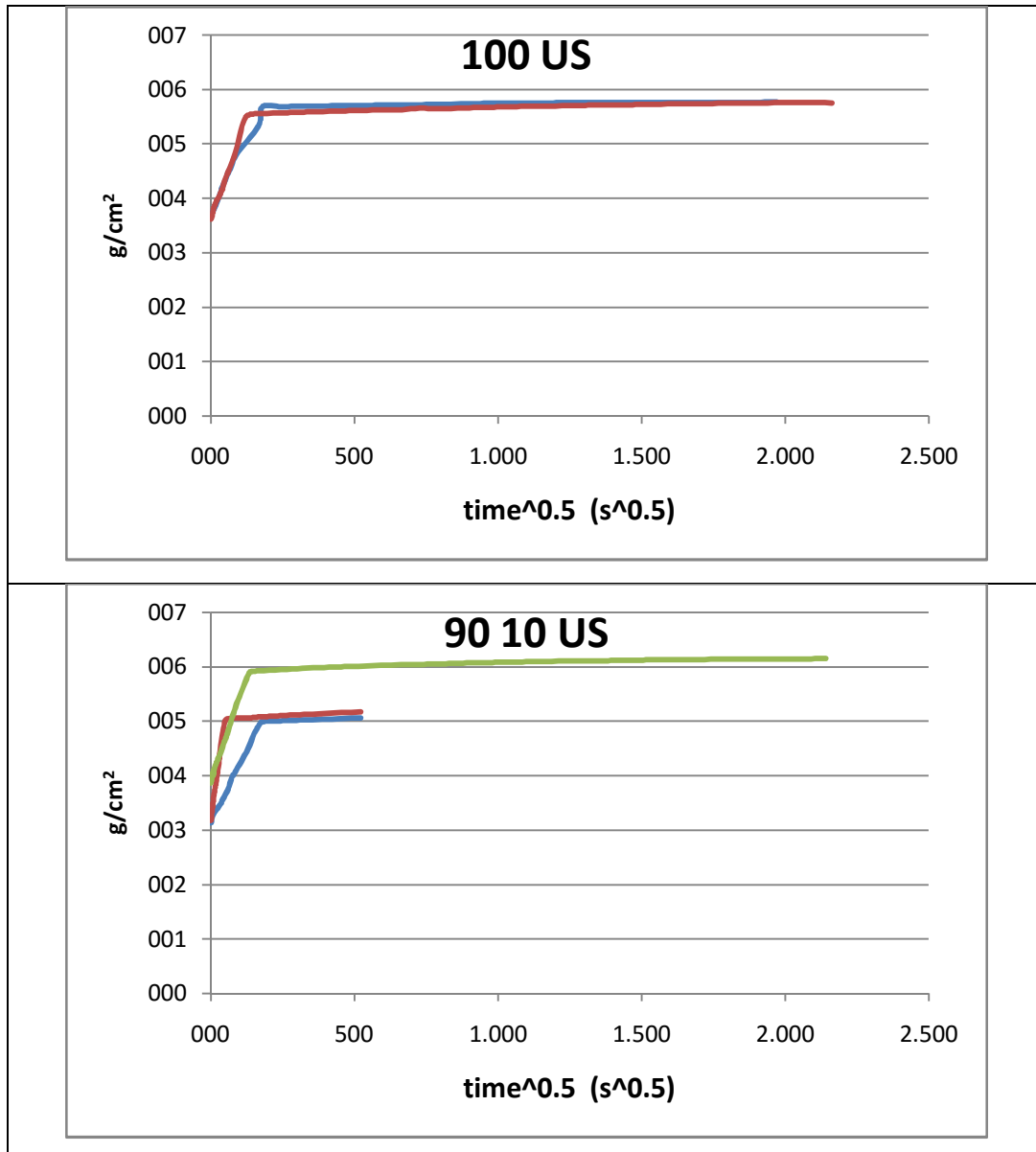


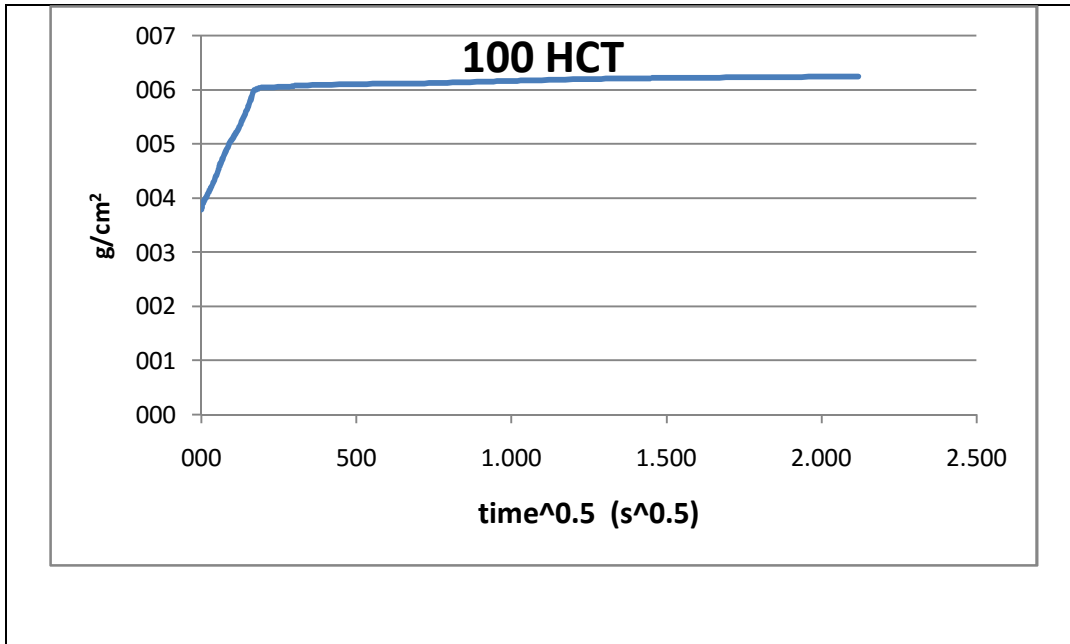
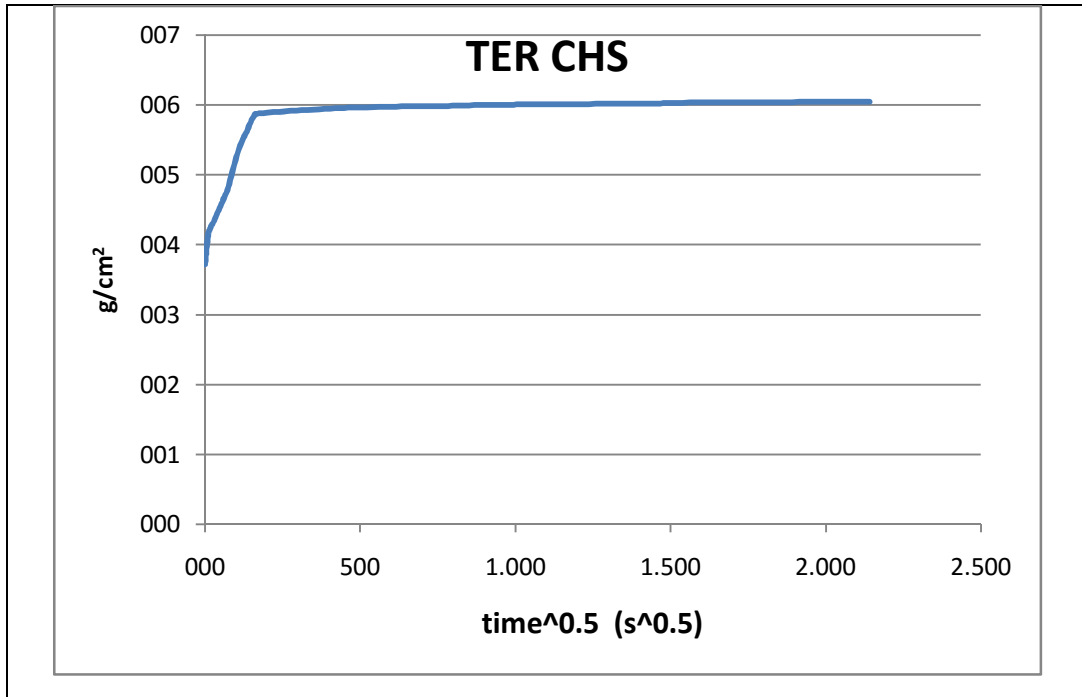
ΠΙΝΑΚΑΣ 5: Αρχικές Καμπύλες Ρόφησης Νερού Δοκιμών ανά Σύνθεση - % Ροφημένο Νερό συναρτήσει του Χρόνου. Ο χαρακτηρισμός HT αντιστοιχεί σε μείξη με αναμεικτάρια υψηλής διάτμησης κολλοειδούς διασποράς (CHS)

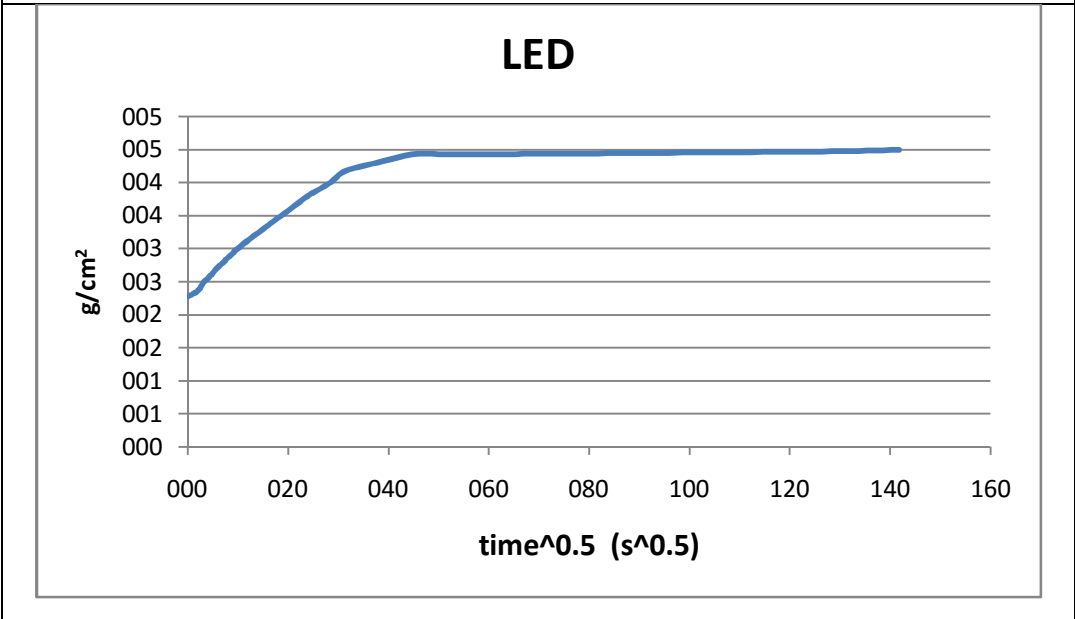
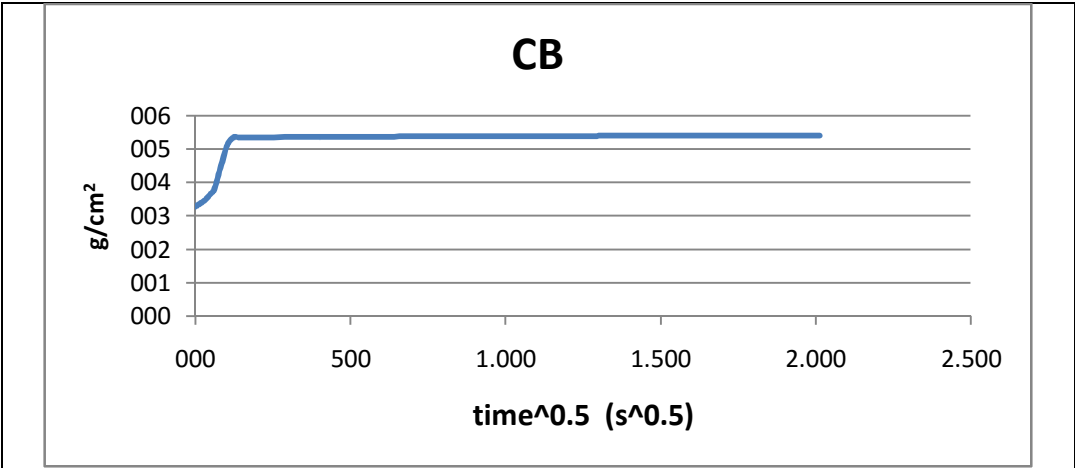


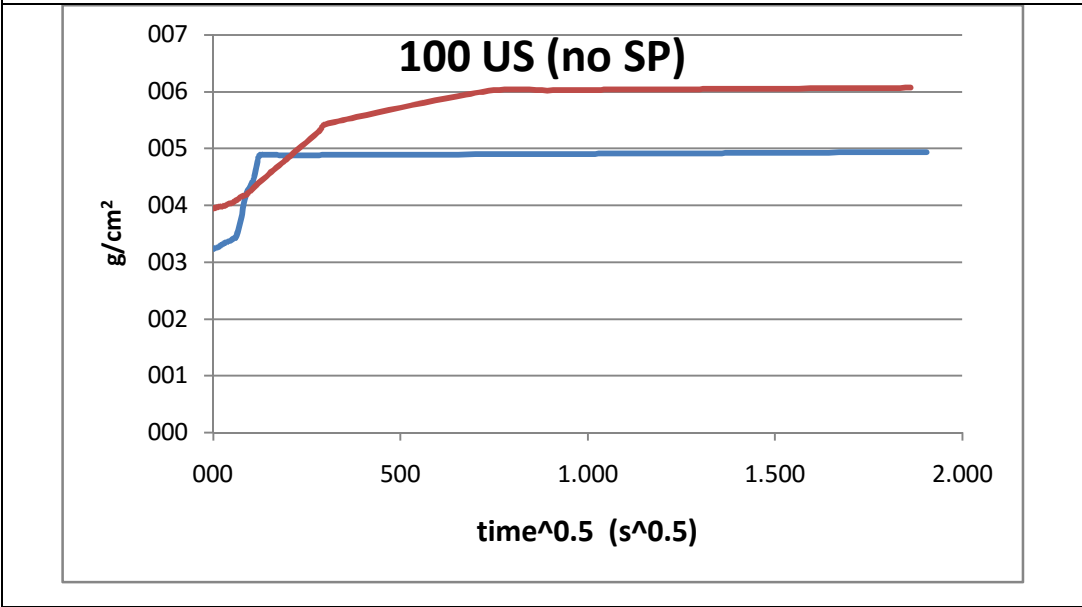
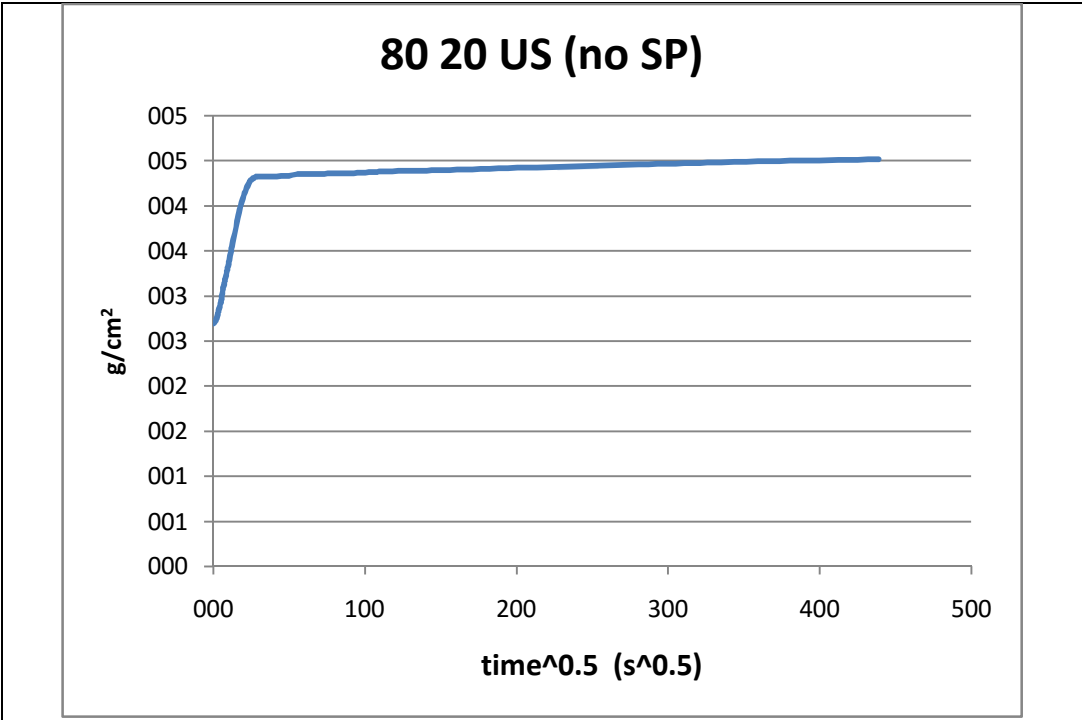


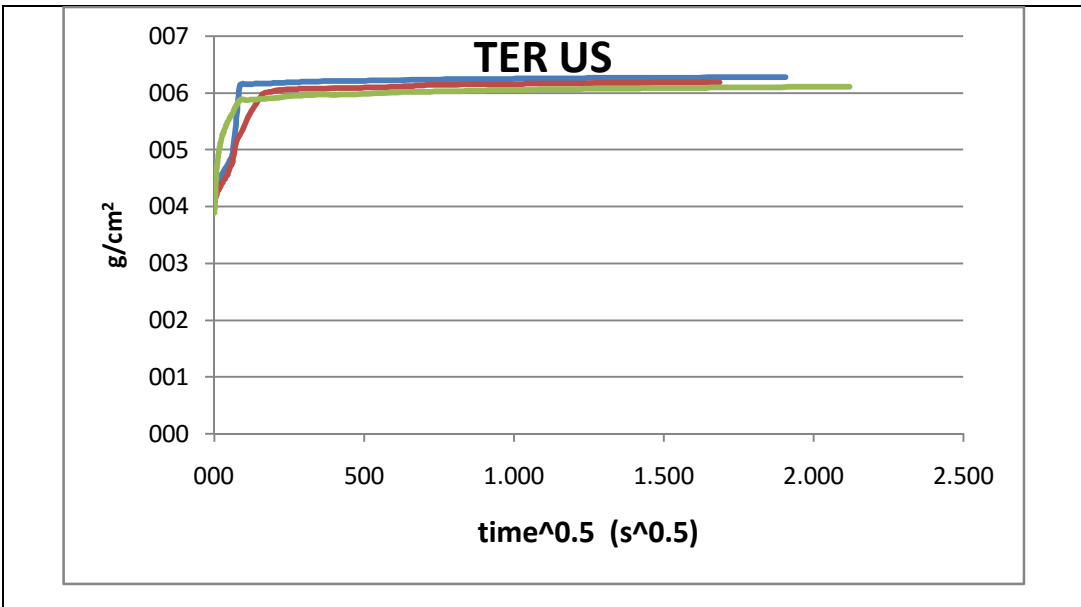
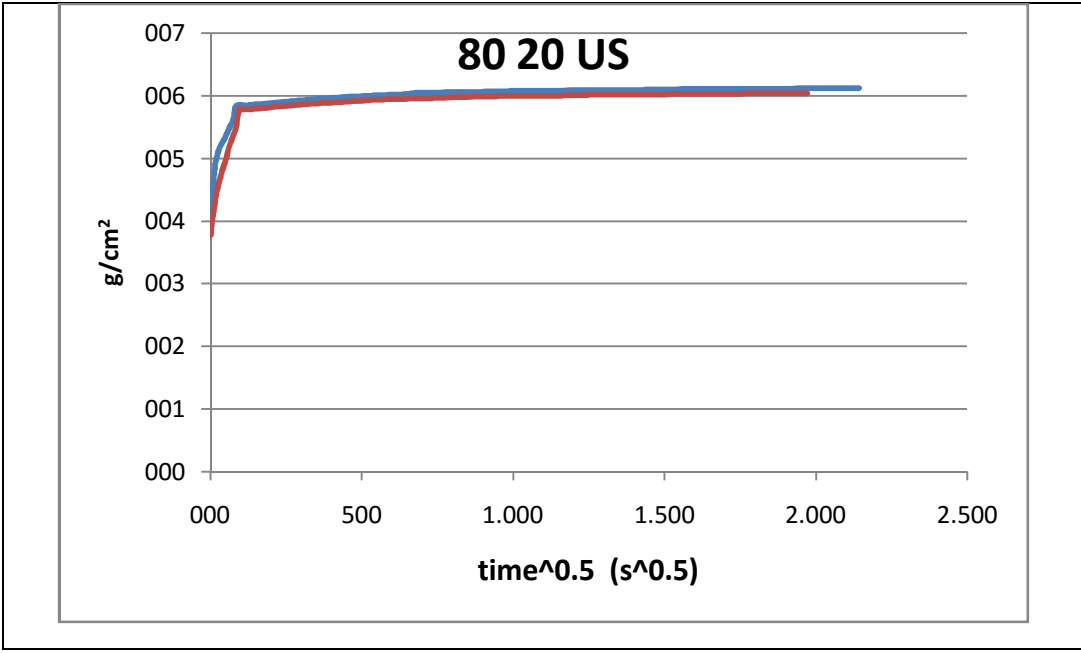
ΠΙΝΑΚΑΣ 6 : Καμπύλες Ρόφησης(1^{ου} κύκλου) Δοκιμίων ανά Σύνθεση - Μάζα Ροφημένου Νερού ανοιγμένο προς την επιφάνεια ρόφησης (g/cm²) συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του Χρόνου.

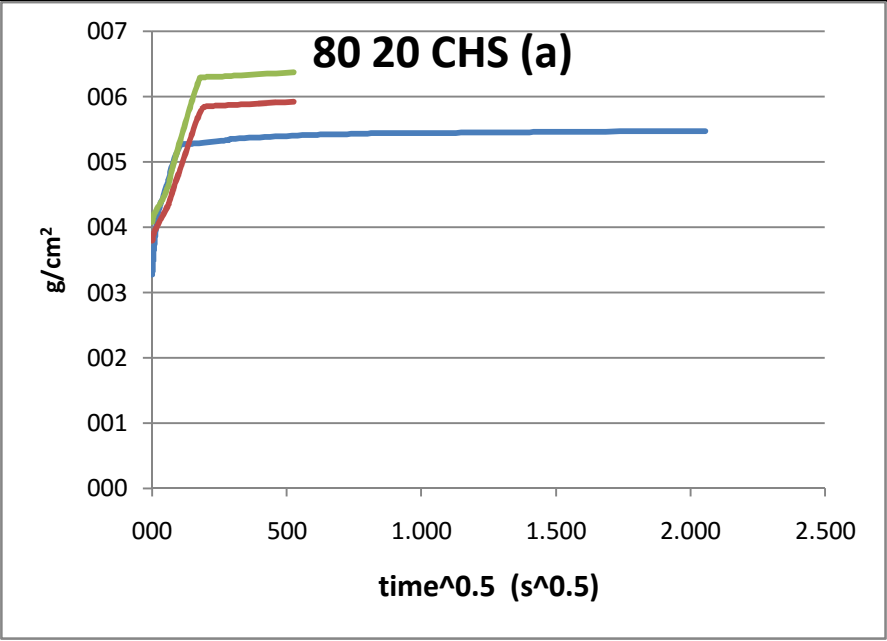
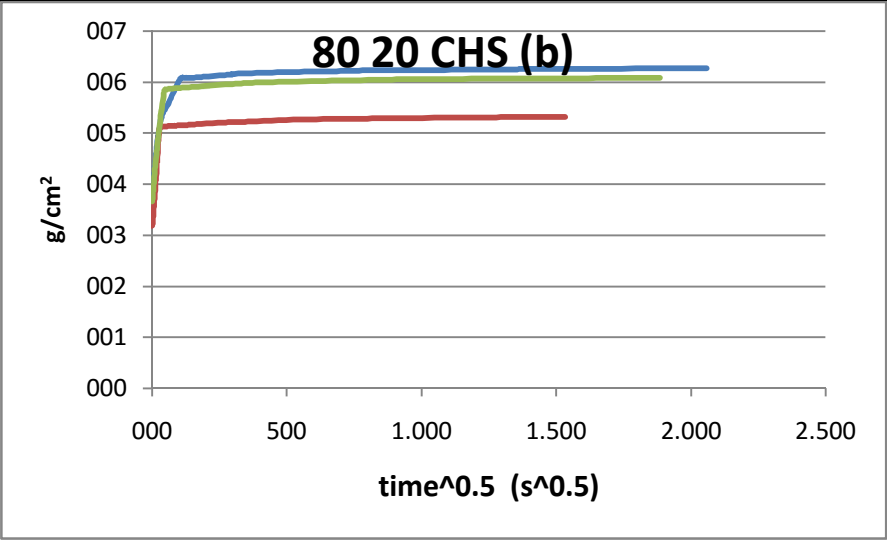


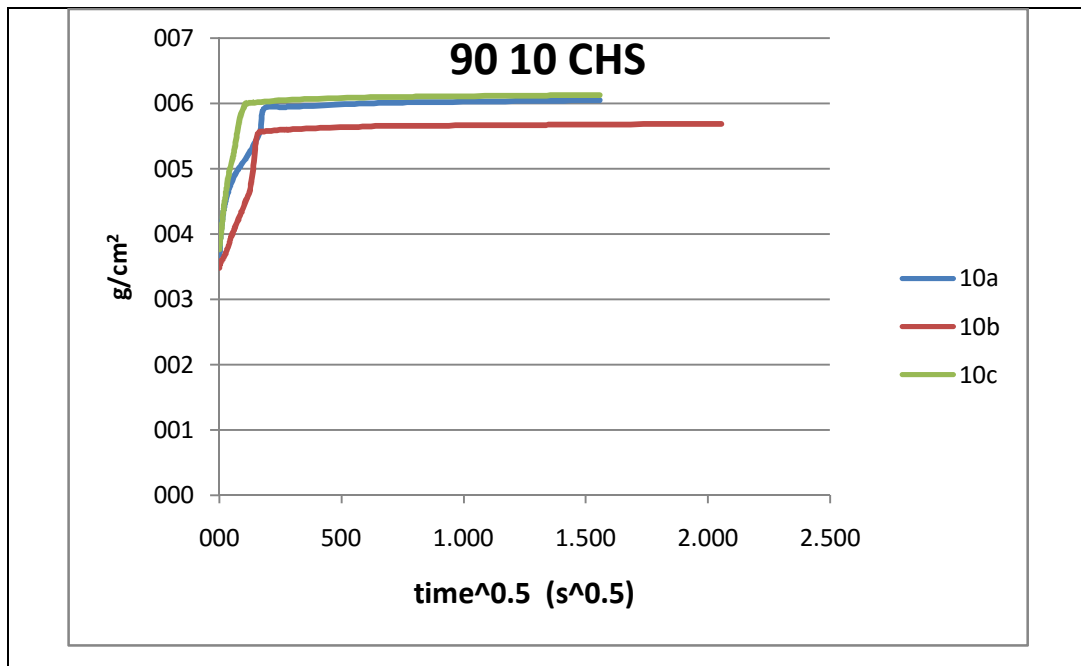








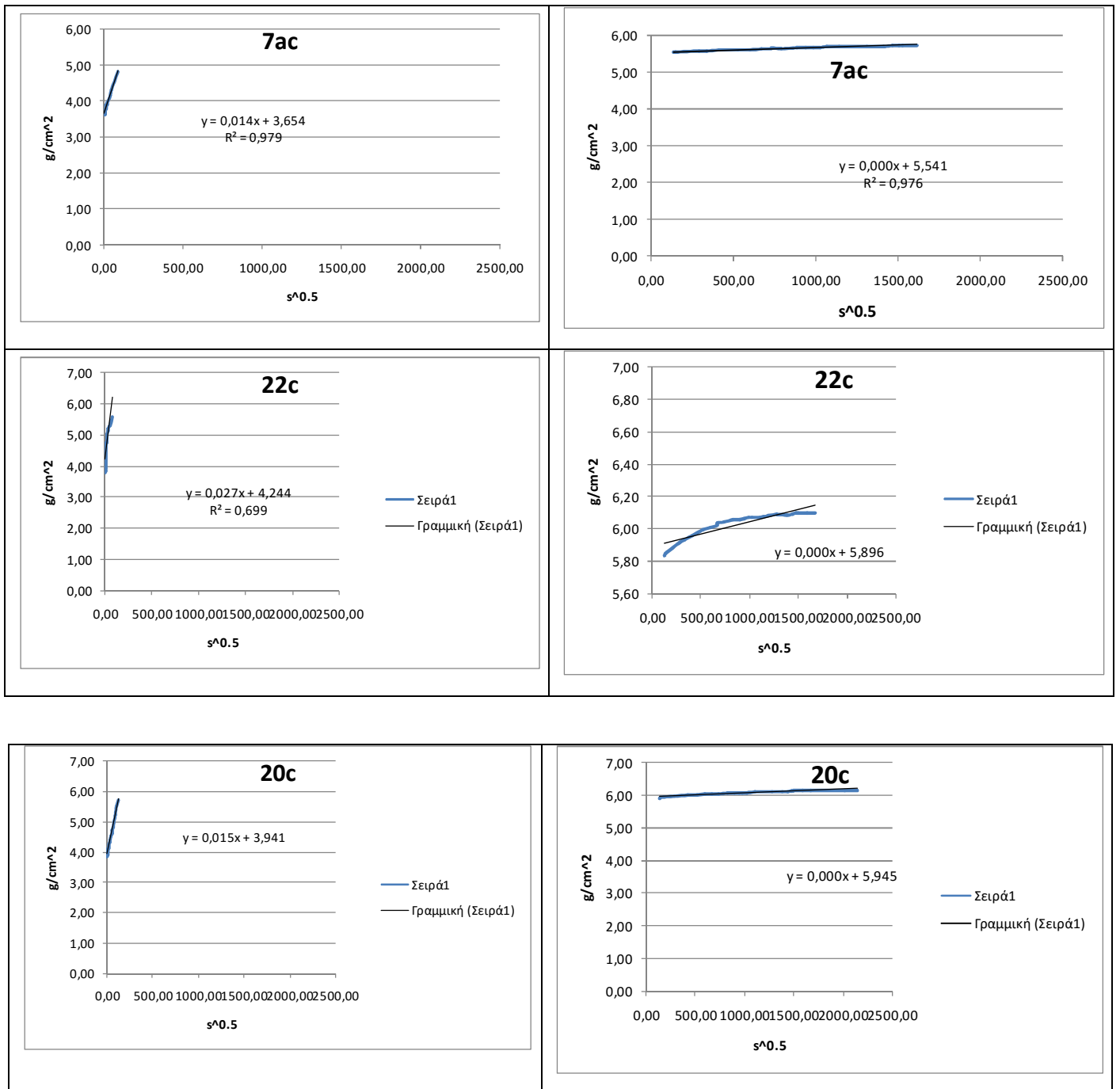


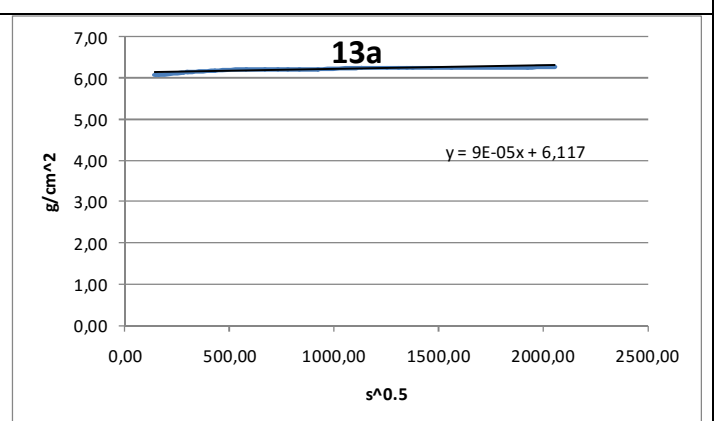
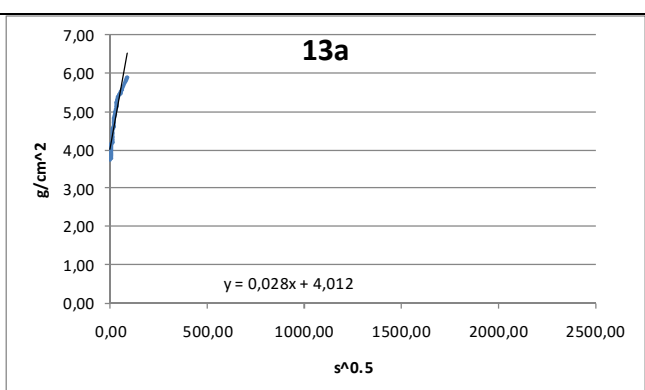
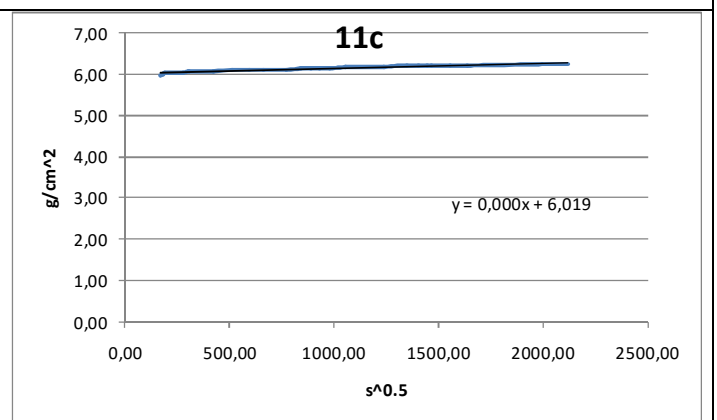
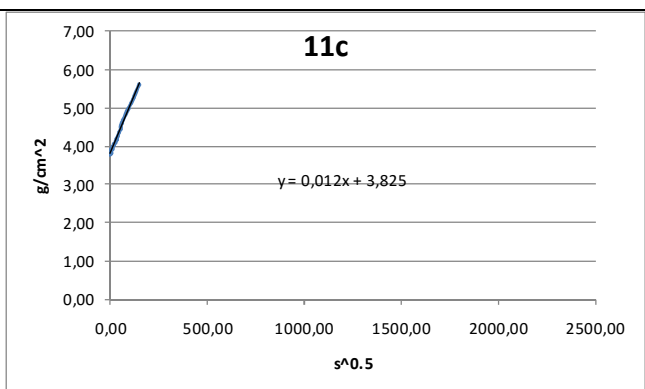
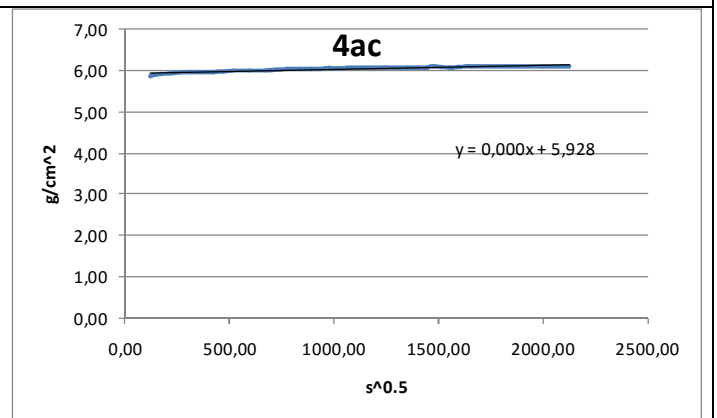
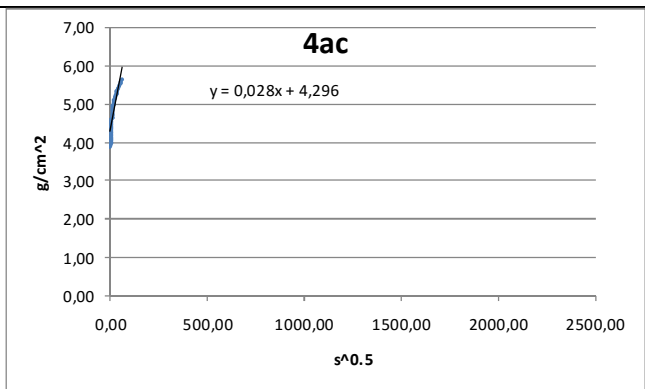
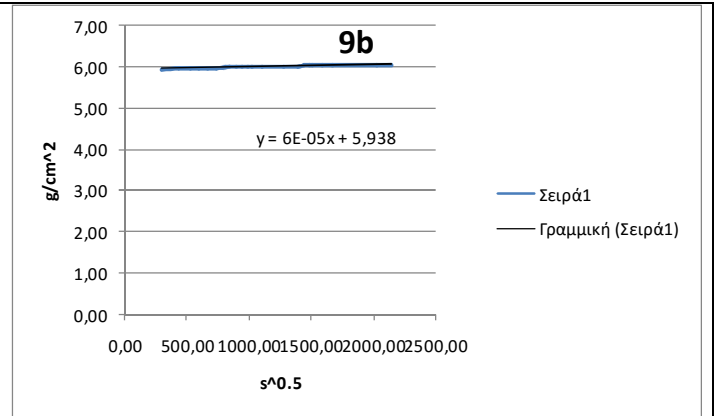
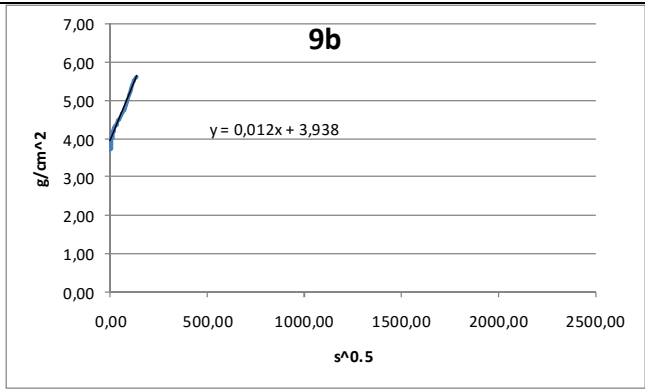


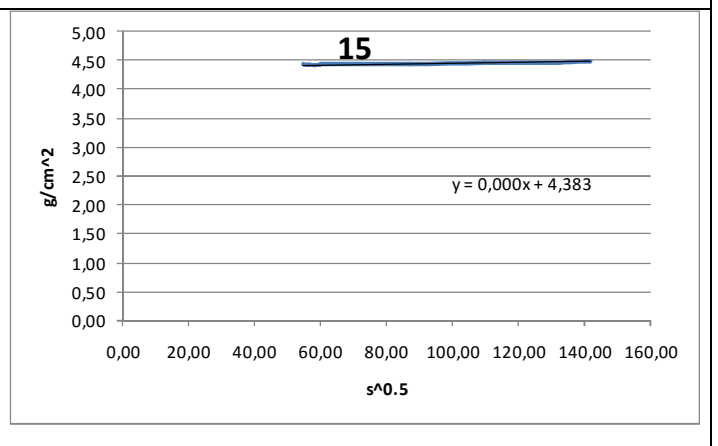
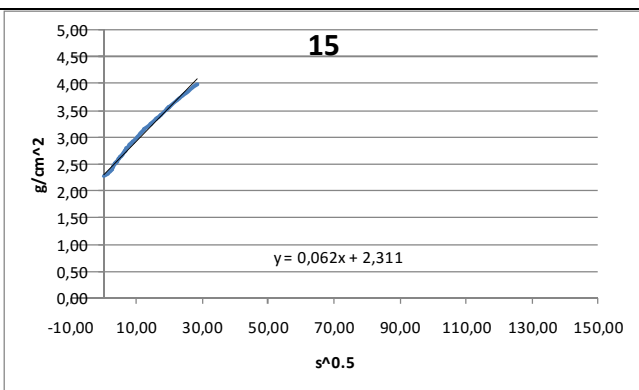
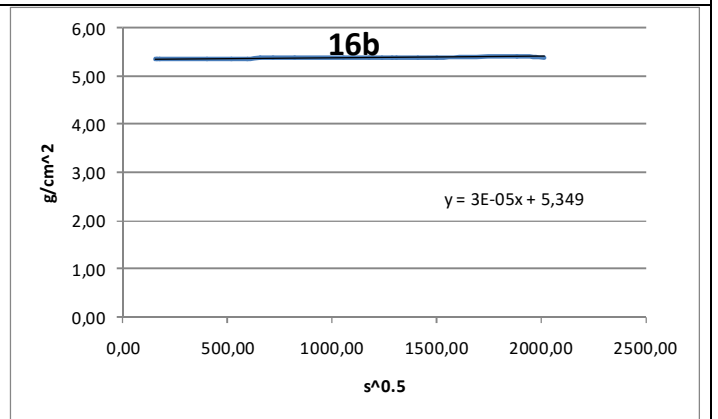
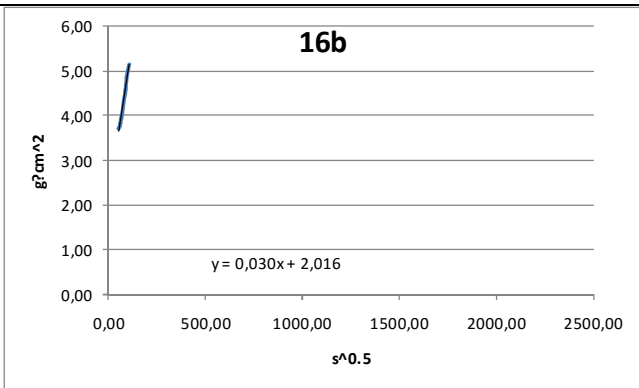
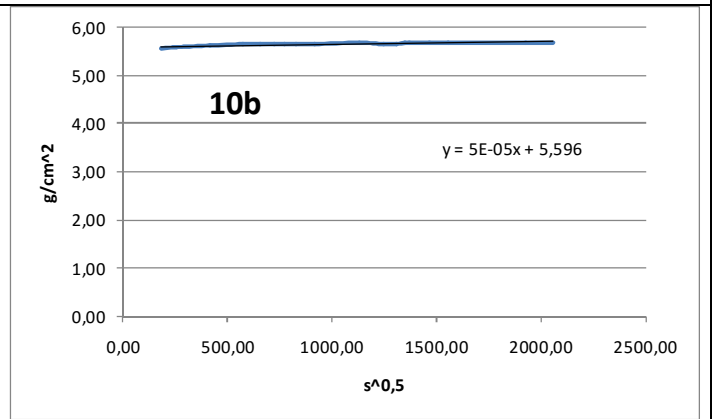
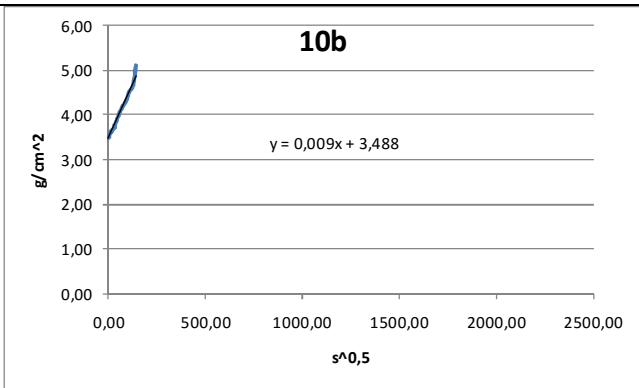
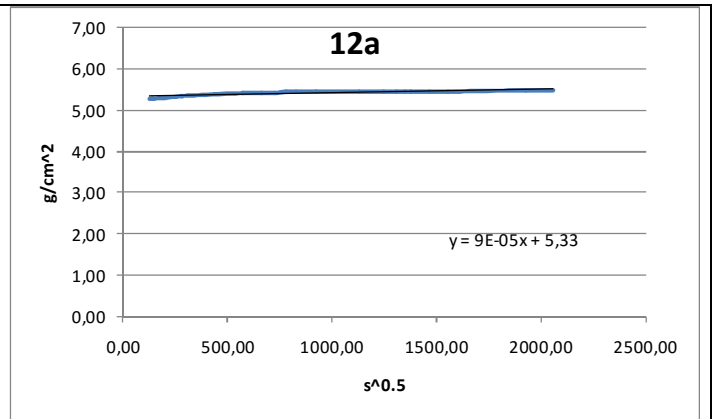
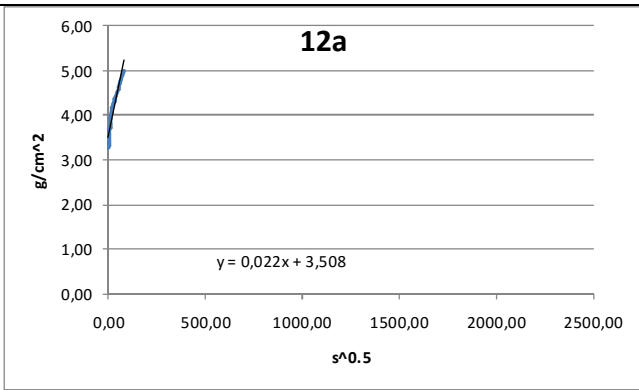
ΠΙΝΑΚΑΣ 7: Πίνακας αντιστοίχισης κωδικού δοκιμίου με ονομασία σύνθεσης για τους Πίνακες 8,9 και 10

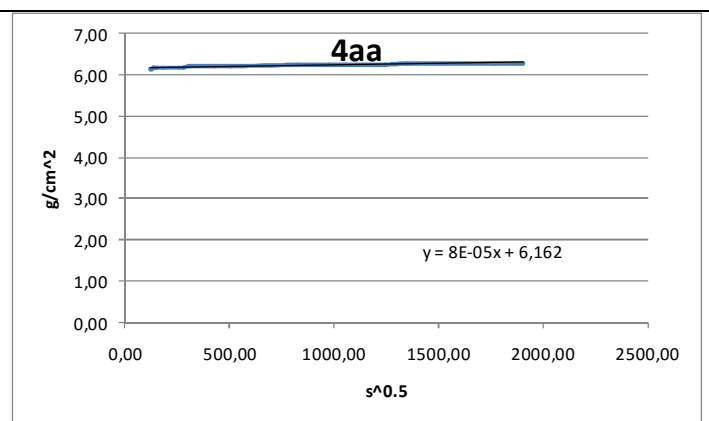
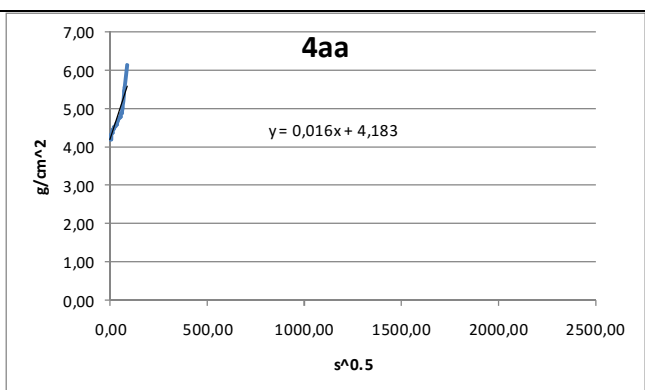
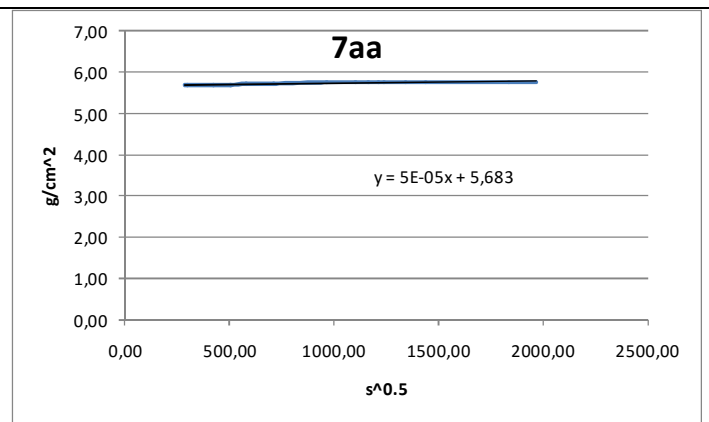
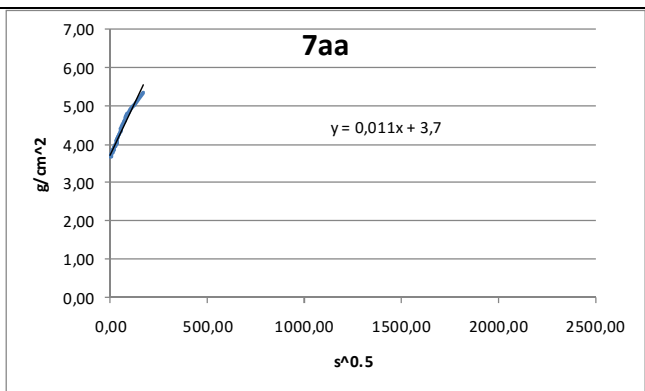
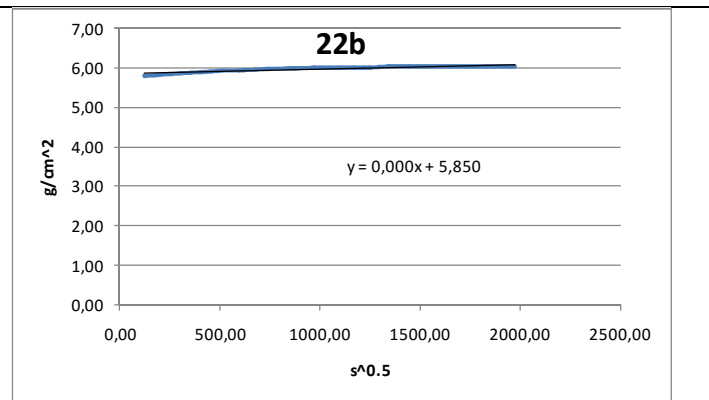
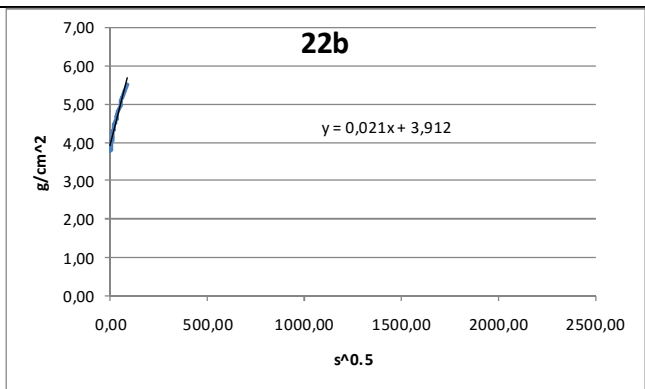
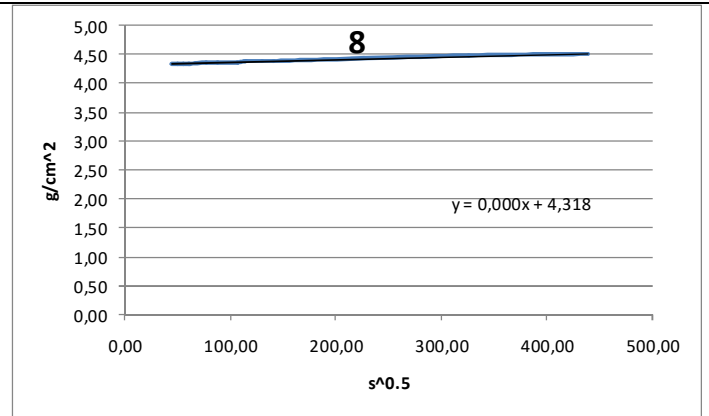
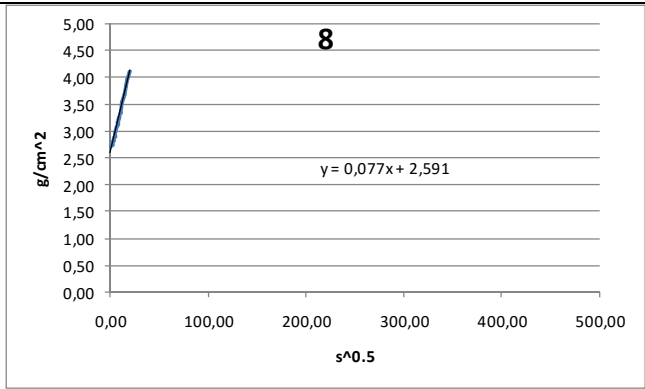
Κωδικός Δοκιμίου	Ονομασία Σύνθεσης
4a	TER US
9	TER CHS
5a	100 US (no SP)
7a	100 US
8	80-20 US (no SP)
20	90 10 US
22	80 20 US
10	90 10 CHS
11	100 CHS
12	80 20 CHS (b)
13	80 20 CHS (a)
16	CB
15	LED

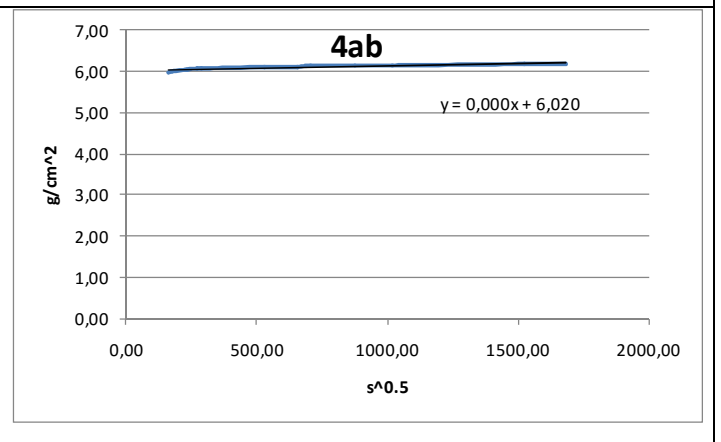
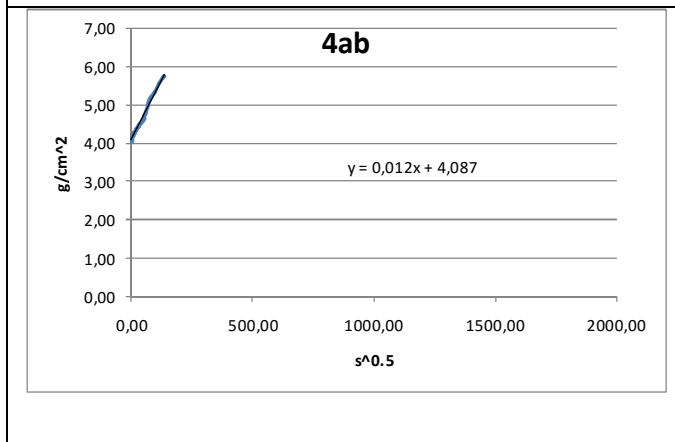
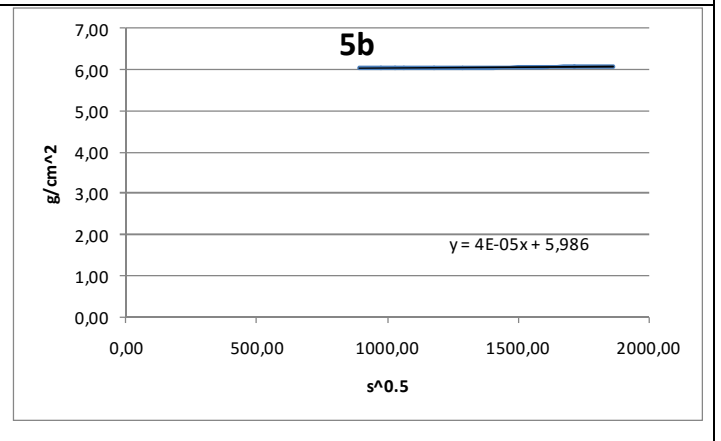
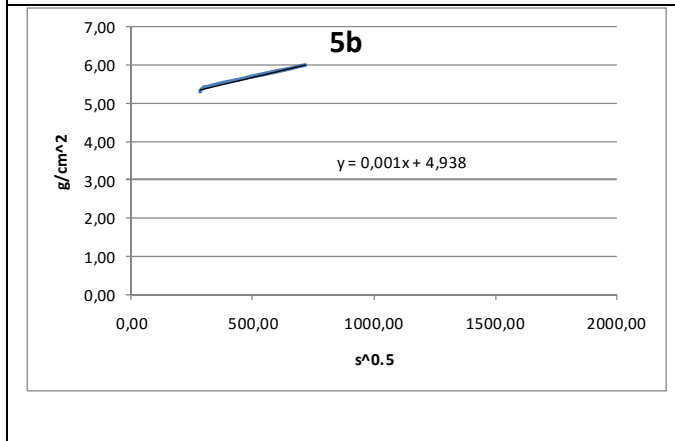
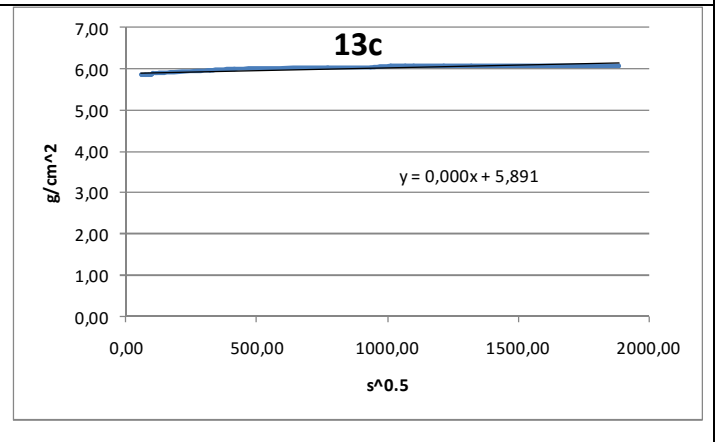
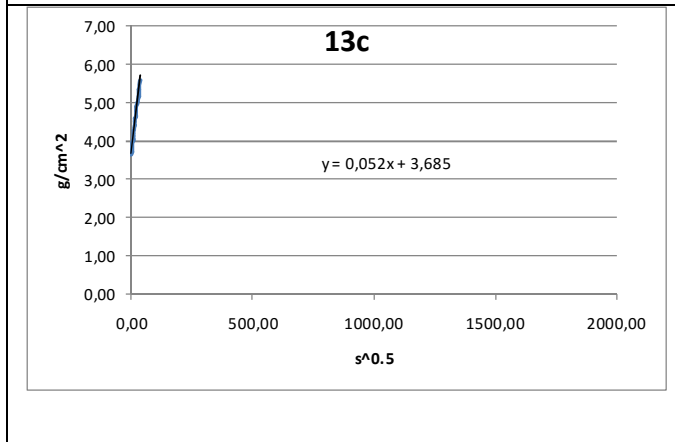
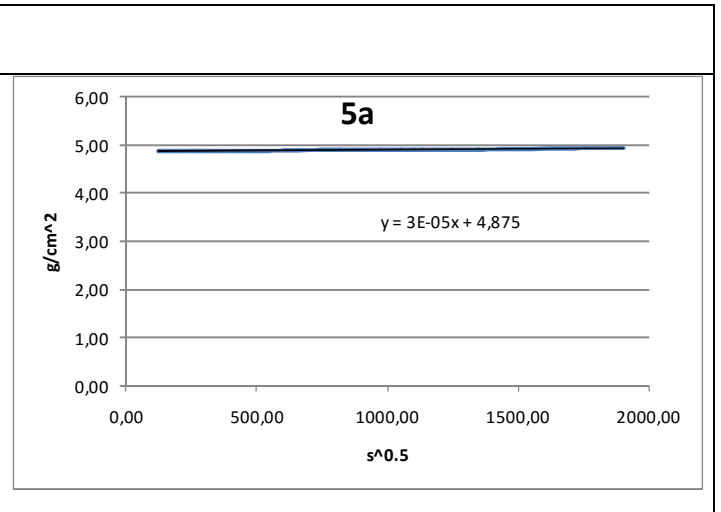
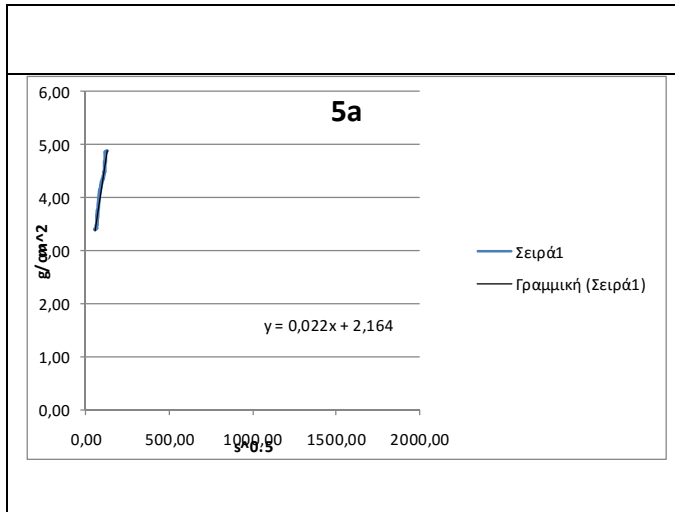
ΠΙΝΑΚΑΣ 8: Διαγράμματα γραμμικών περιοχών ρόφησης.

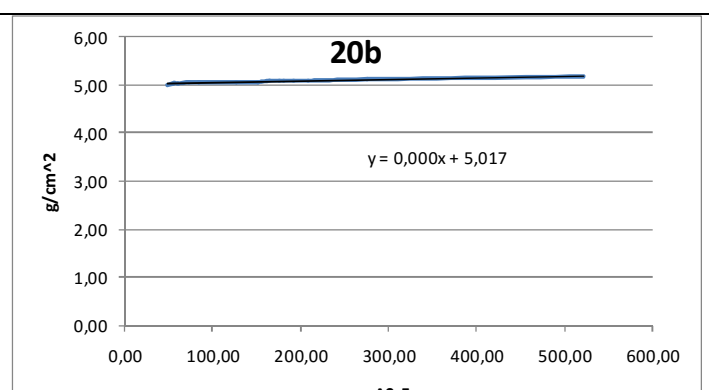
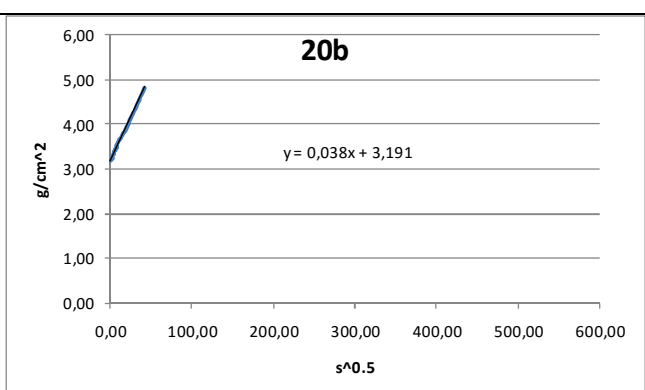
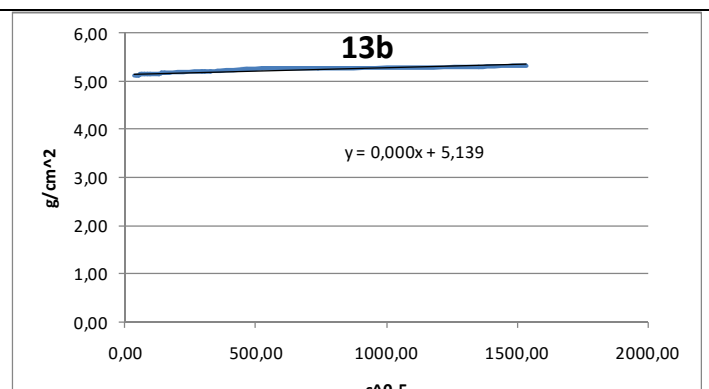
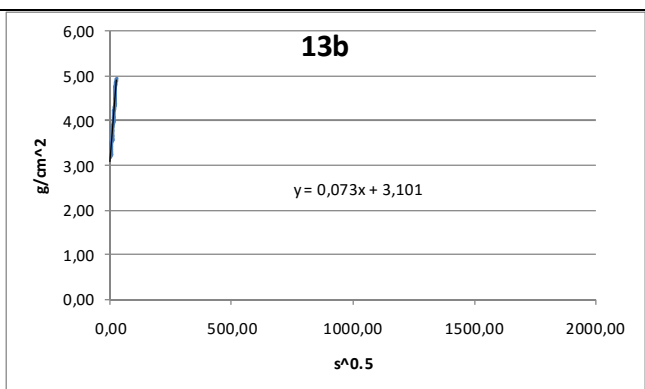
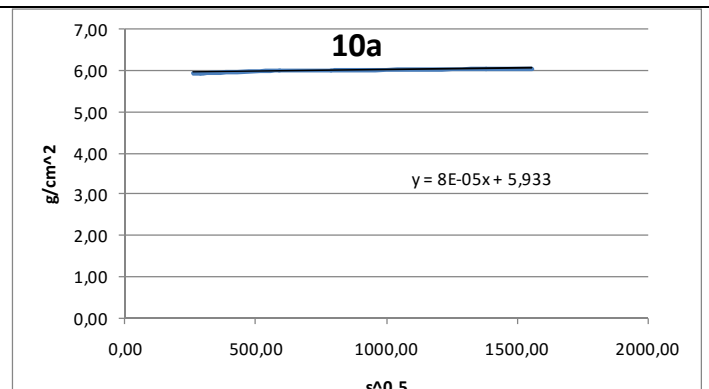
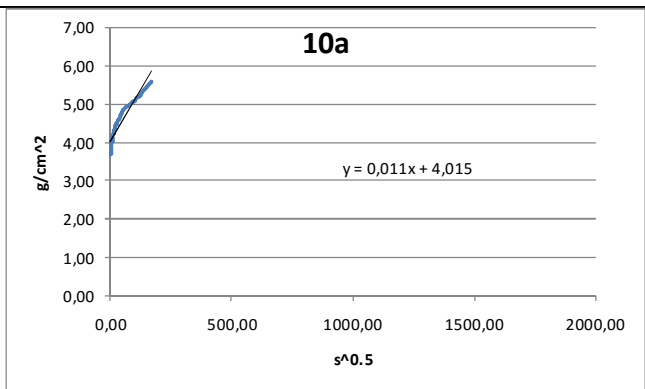
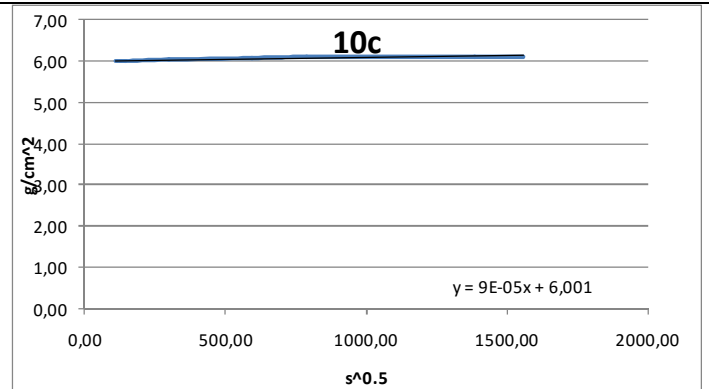
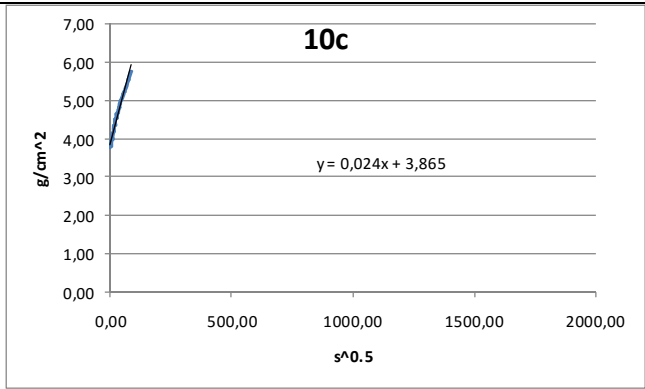


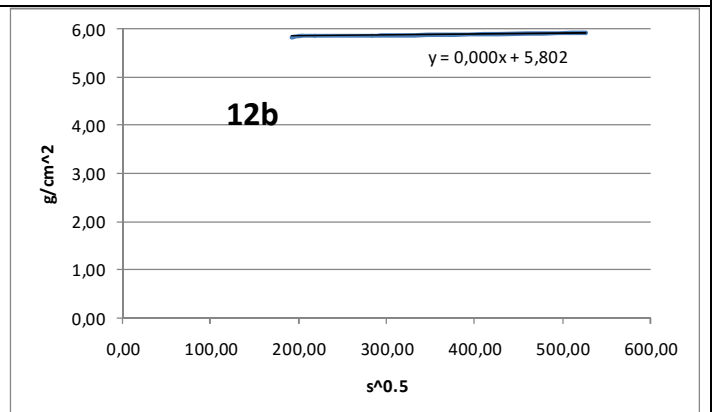
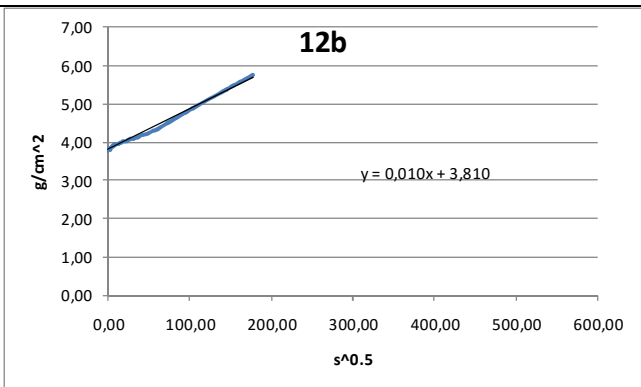
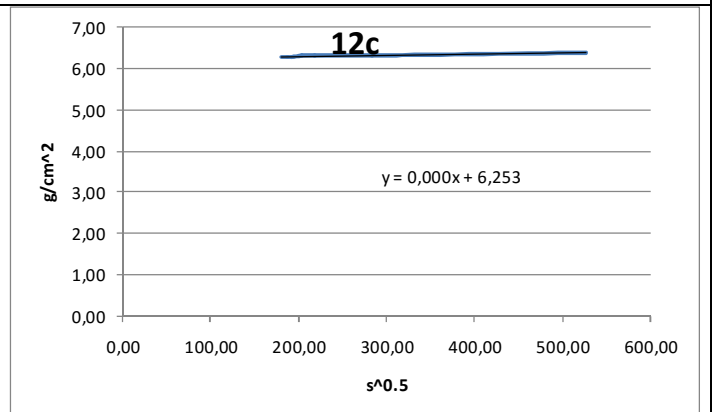
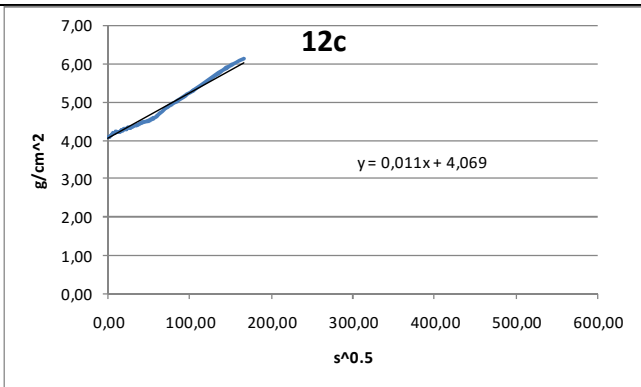
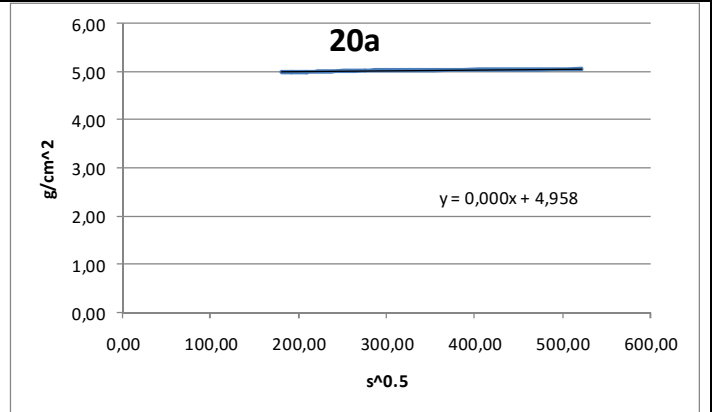
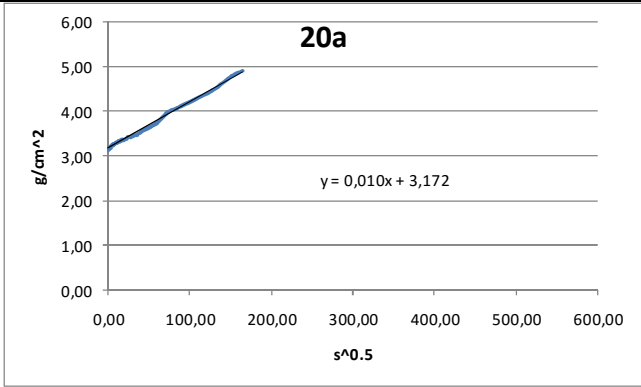












ΠΙΝΑΚΑΣ 9: Συντελεστές γραμμικών εξισώσεων και σημεία τομής.

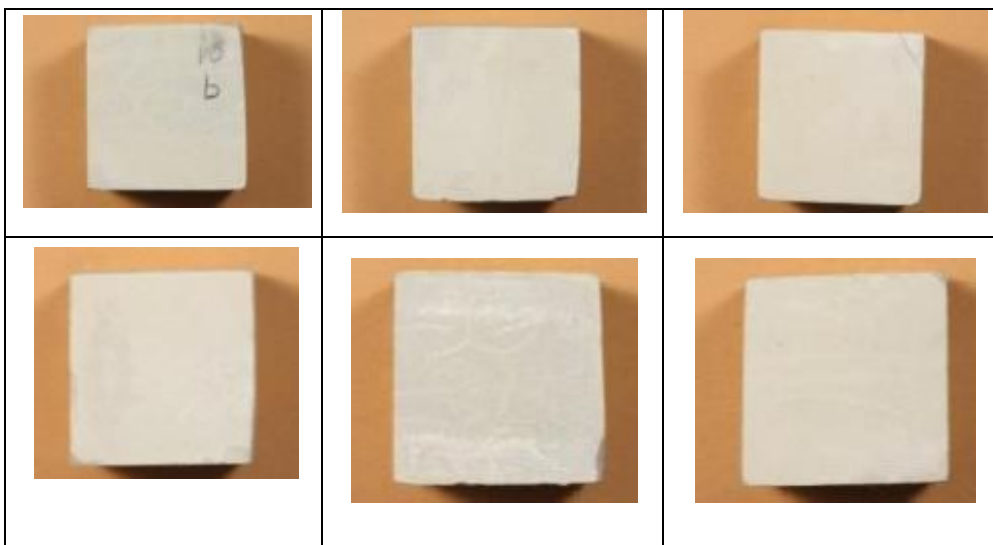
δοκίμιο	7ac			δοκίμιο	7aa		
a1	0,0142	b1	3,6544	a1	0,0112	b1	3,7
a2	0,0001	b2	5,541	a2	0,00005	b2	5,683
x0	133,8014			x0	177,8475		
γ0	5,55438			γ0	5,691892		
δοκίμιο	22c			δοκίμιο	22b		
a1	0,0271	b1	4,2444	a1	0,021	b1	3,9122
a2	0,0001	b2	5,8966	a2	0,0001	b2	5,8506
x0	61,19259			x0	92,74641		
γ0	5,902719			γ0	5,859875		
δοκίμιο	20c			δοκίμιο	20b		
a1	0,0151	b1	3,9415	a1	0,0387	b1	3,19
a2	0,0001	b2	5,9456	a2	0,0003	b2	5,017
x0	133,6067			x0	47,57813		
γ0	5,958961			γ0	5,031273		
	20a			δοκίμιο	9b		
a1	0,0104	b1	3,17	a1	0,0129	b1	3,9388
a2	0,0002	b2	4,9588	a2	0,00001	b2	5,9388
x0	175,3725			x0	155,159		
γ0	4,993875			γ0	5,940352		

δοκίμιο	4ac			δοκίμιο	4aa		
a1	0,0281	b1	4,296	a1	0,0165	b1	4,18
a2	0,0001	b2	5,9282	a2	0,00008	b2	6,1628
x0	58,29286			x0	120,7552		
y0	5,934029			y0	6,17246		
δοκίμιο	4ab			δοκίμιο	11c		
a1	0,0127	b1	4,08	a1	0,0124	b1	3,8255
a2	0,0001	b2	6,0206	a2	0,0001	b2	6,0199
x0	154,0159			x0	178,4065		
y0	6,036002			y0	6,037741		
δοκίμιο	13a			δοκίμιο	13c		
a1	0,0283	b1	4	a1	0,0527	b1	3,68
a2	0,0001	b2	6,1172	a2	0,0001	b2	5,8912
x0	75,07801			x0	42,03802		
y0	6,124708			y0	5,895404		
δοκίμιο	13b			δοκίμιο	12a		
a1	0,0734	b1	3,1	a1	0,0225	b1	3,5
a2	0,0001	b2	5,13	a2	0,0001	b2	5,33
x0	27,69441			x0	81,69643		
y0	5,132769			y0	5,33817		

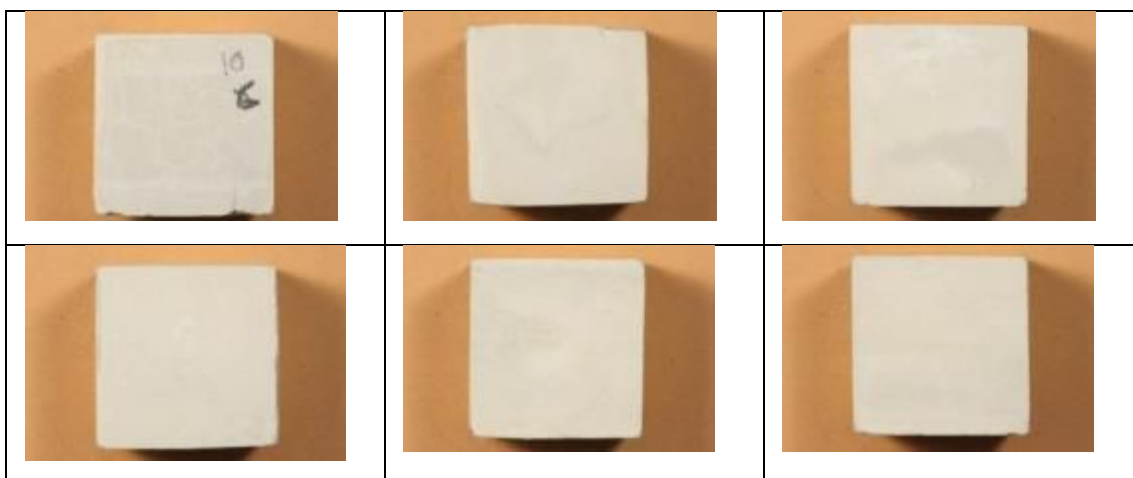
δοκίμιο	12c			δοκίμιο	12b		
a1	0,0119	b1	4,0695	a1	0,0106	b1	3,81
a2	0,0002	b2	6,25	a2	0,0002	b2	5,8026
x0	186,3675			x0	191,5962		
γ0	6,287274			γ0	5,840919		
δοκίμιο	10b			δοκίμιο	10c		
a1	0,0099	b1	3,488	a1	0,0242	b1	3,865
a2	0,00005	b2	5,5965	a2	0,00009	b2	6
x0	214,0609			x0	88,55247		
γ0	5,607203			γ0	6,00797		
δοκίμιο	10a			δοκίμιο	16b		
a1	0,011	b1	4,01	a1	0,03	b1	2,01
a2	0,00008	b2	5,93	a2	0,00003	b2	5,3494
x0	175,8242			x0	111,4248		
γ0	5,944066			γ0	5,352743		
δοκίμιο	15			δοκίμιο	8		
a1	0,0629	b1	2,311	a1	0,077	b1	2,6
a2	0,0007	b2	4,3831	a2	0,0005	b2	4,3188
x0	33,3135			x0	22,46797		
γ0	4,406419			γ0	4,330034		
δοκίμιο	5a			δοκίμιο	5b		
a1	0,022	b1	2,16	a1	0,0015	b1	4,93
a2	0,00003	b2	4,8755	a2	0,00004	b2	5,9869
x0	123,6004			x0	723,9041		
γ0	4,879208			γ0	6,015856		

ΠΙΝΑΚΕΣ 10: Χαρακτηρισμός φθοράς δοκιμίων. Παρουσιάζονται ανά δοκίμιο οι φωτογραφίες που απεικονίζουν τις 6 πλευρές του κάθε κύβου και ποιοτικών χαρακτηρισμός των ρωγμών- φθοράς δοκιμίου.

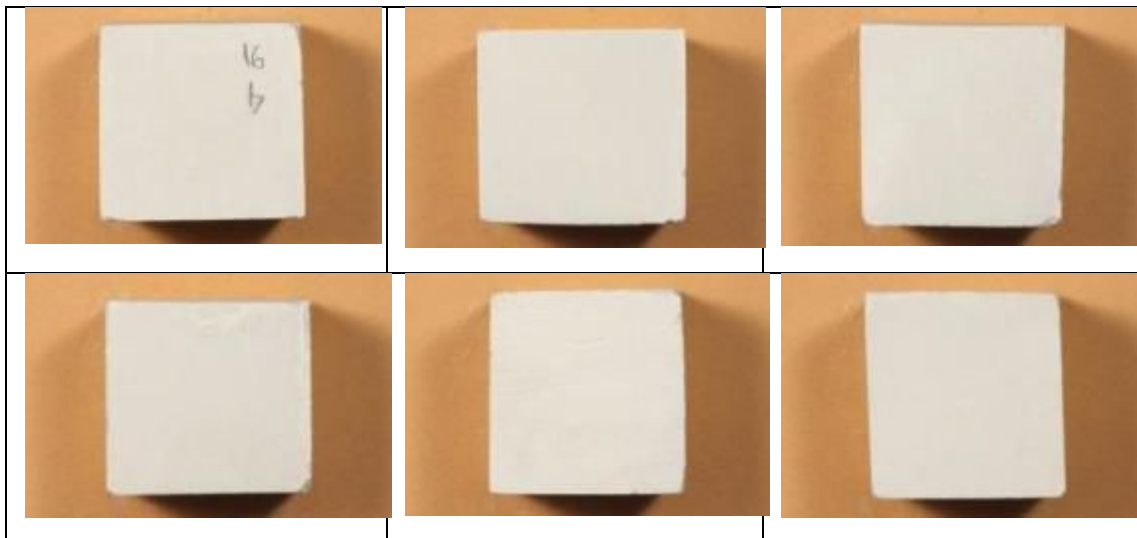
10b: Παρουσιάζει πλήθος ρωγμών οι οποίες είναι εμφανείς στις επιφάνειες 1,5,6. Ο προσανατολισμός τους είναι κάθετος στη διεύθυνση της ρόφησης. Και τουλάχιστον 3 έχουν φτάσει ως την επιφάνεια του κύβου. Δεν έχουν προσανατολισμένη φορά και η μορφή τους χαρακτηρίζεται ως πεπλεγμένη.



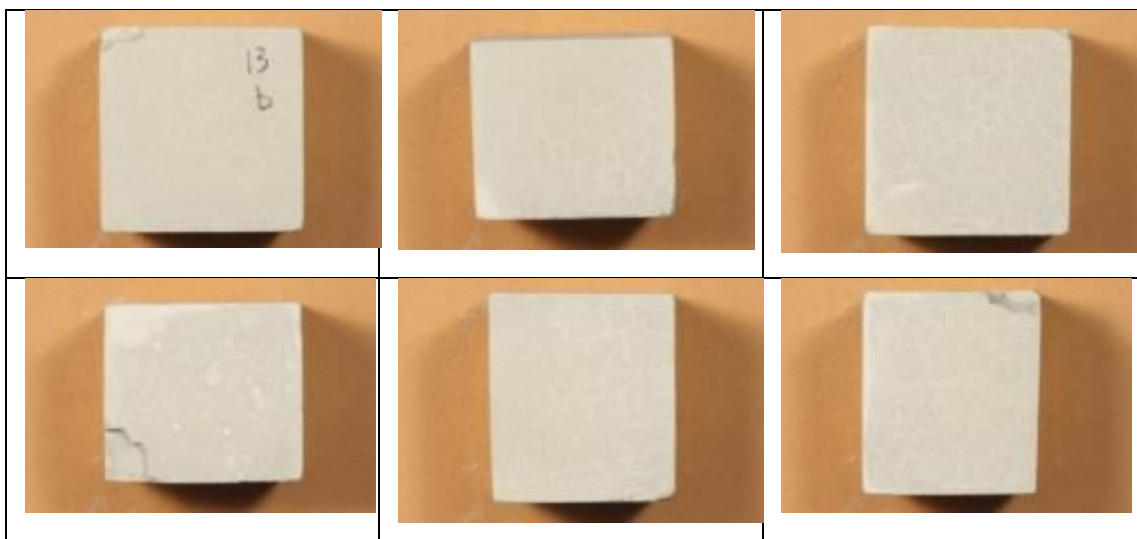
10c: Εμφανίζει αρκετές ρωγμές στην πάνω του πλευρά (1), με διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο ρόφησης. Είναι διασταυρούμενες και ανοιγμένες.



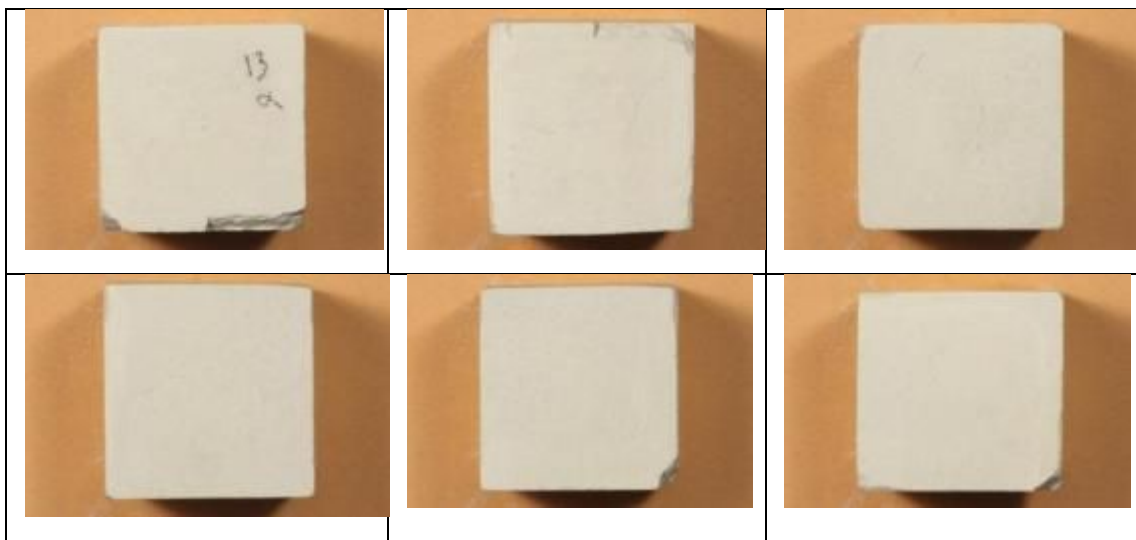
16b: Δεν έχει εμφανείς ρωγμές.



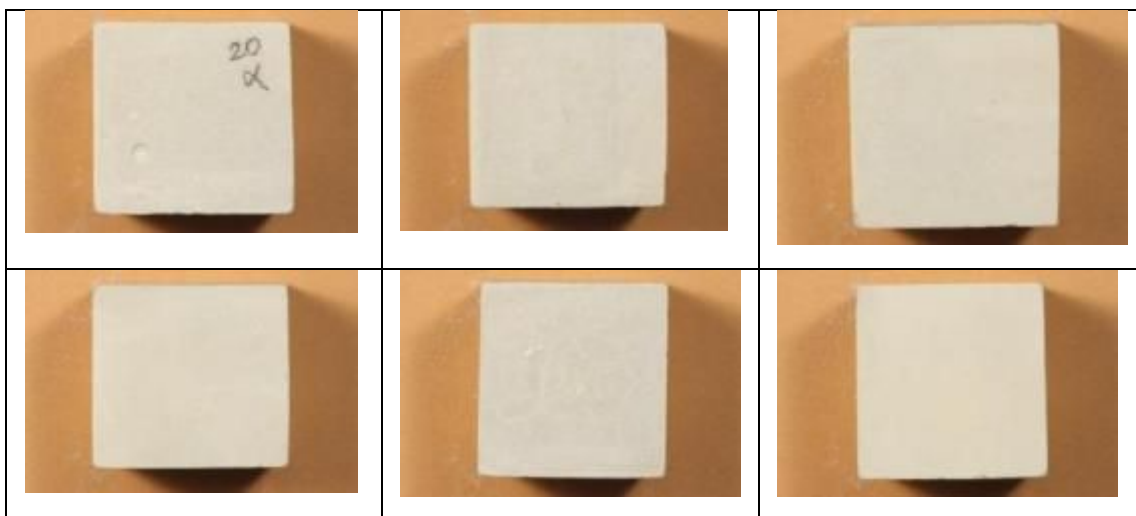
13b: Φαίνεται ένα πυκνό πλέγμα ρωγμών σε όλες του τις πλευρές από τις οποίες λίγες είναι ανοιγμένες και έχουν τυχαία διεύθυνση. Στην πλευρά (4) έχει αποκολληθεί ένα κομμάτι.



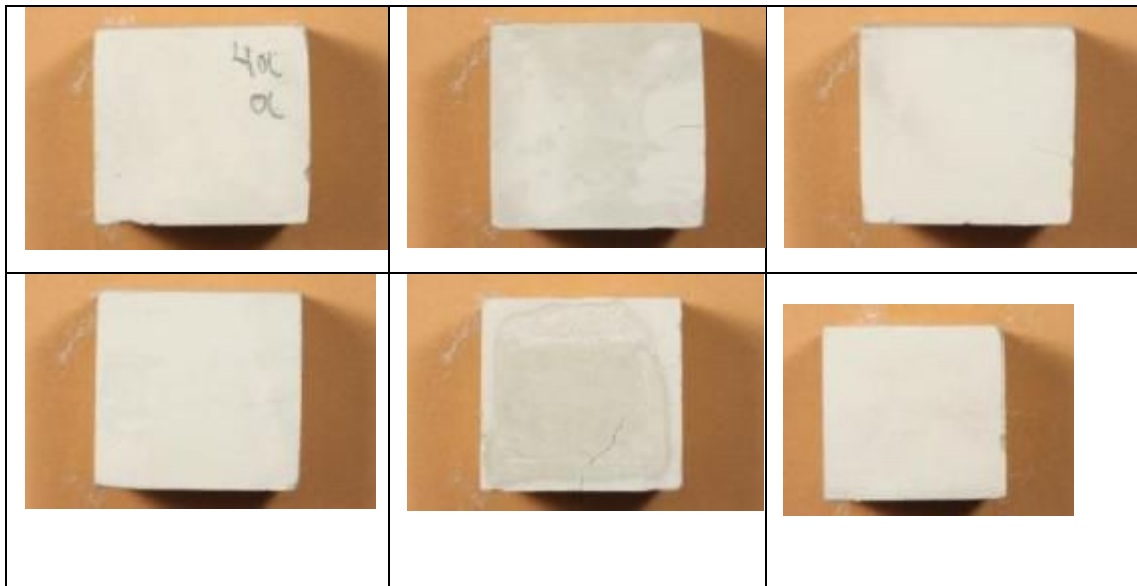
13a: Έχει πολλές μικρές και ανοιγμένες ρωγμές. Είναι διασταυρούμενες. Έχει σπάσει ένα μέρος του δοκιμίου στη γωνία που σχηματίζουν οι πλευρές (1) και (2).



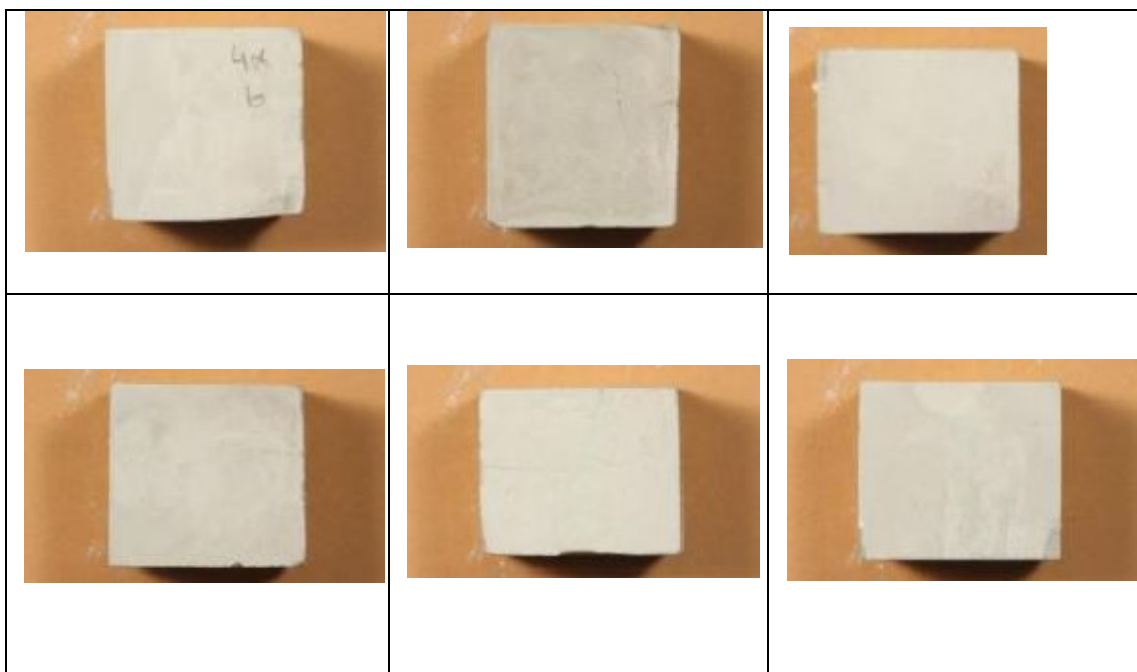
20a: Παρουσιάζει λίγες και όχι ανοιγμένες ρωγμές τύπου μπακλαβά κυρίως στις πλευρές 1,2,5.



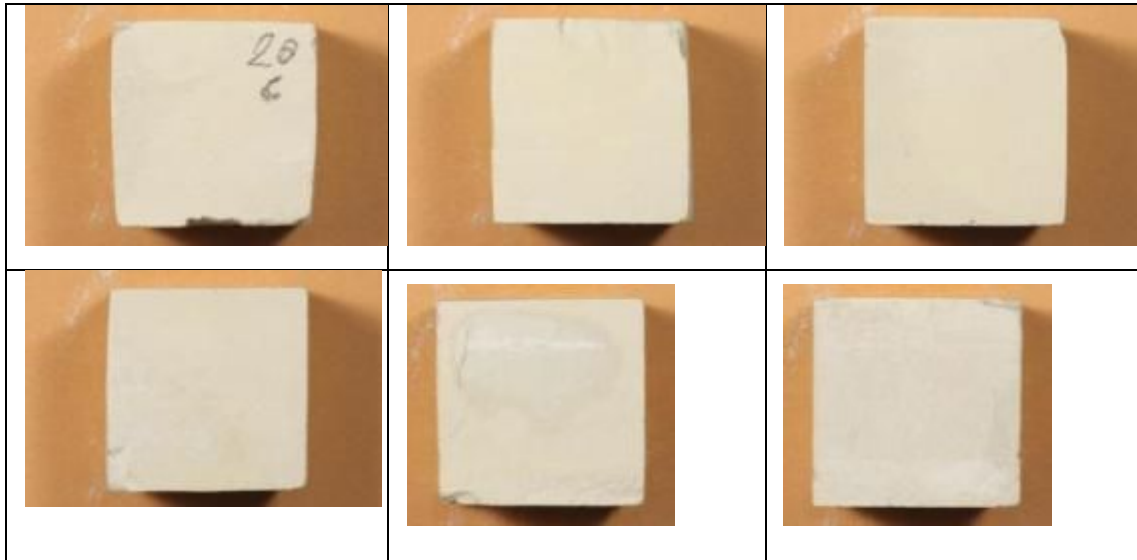
4aa: Εμφανίζει μερικές ρωγμές κυρίως στη πλευρά (5) που είναι βαθιές και ανοιγμένες στην επιφάνεια. Το μέγεθος της ζημιάς που έχει ο κύβος είναι συγκεντρωμένο στην πλευρά (5). Ρωγμές με τυχαία διεύθυνση και όχι πυκνές.



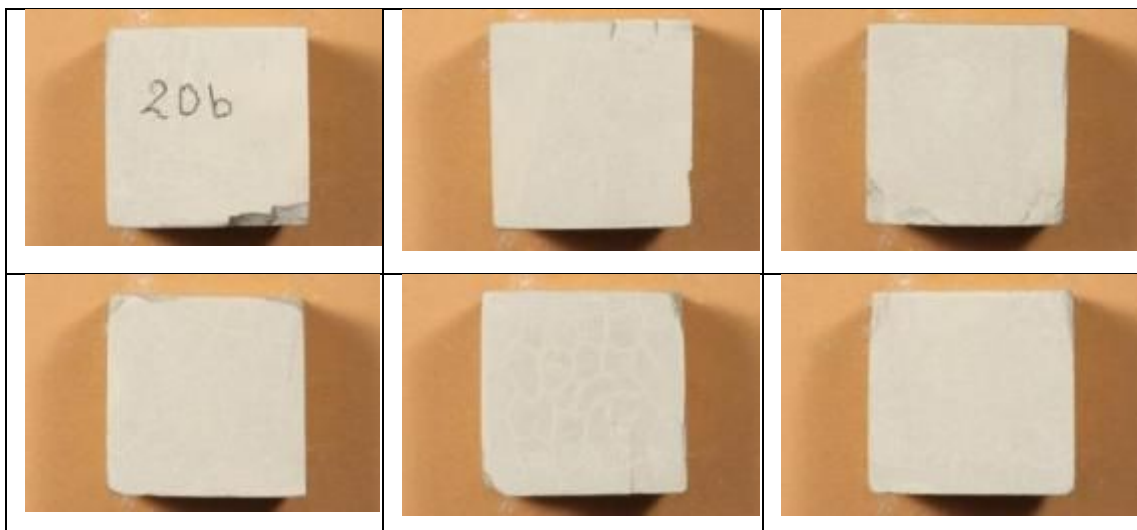
4ab: Παρουσιάζει λίγες ρωγμές ανοιγμένες, με τις περισσότερες κάθετες. Χαρακτηριστική οριζόντια ρωγμή που πιθανόν να καθυστερεί τη ρόφηση υπάρχει στην πλευρά (4), (5).



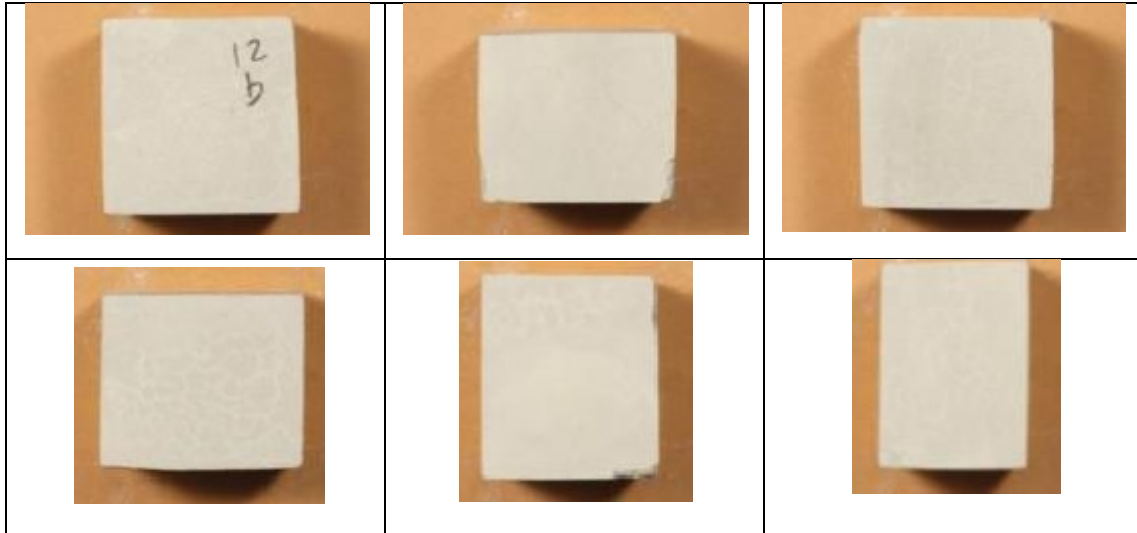
20c: Αρκετές ρωγμές σε όλες τις πλευρές του. Τυχαία διεύθυνση φοράς. Στην πλευρά (6) φαίνεται πεπλεγμένη διαμόρφωση και παρατηρείται οριζόντια ανοιγμένη ρωγμή στην πλευρά (5). Επίσης υπάρχει και απώλεια ακμών.



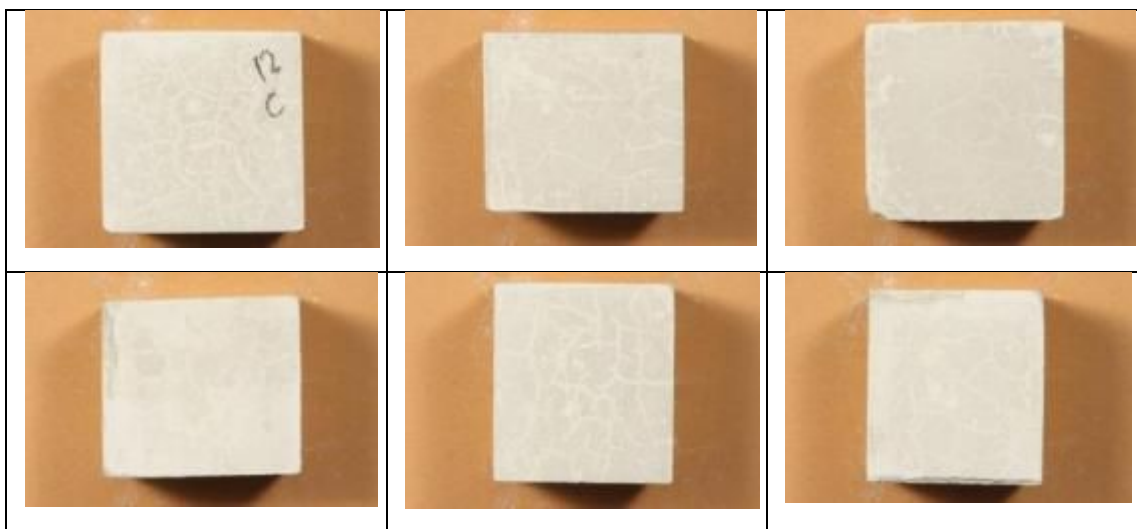
20b: Πεπλεγμένες ρωγμές, όχι ανοιγμένες. Και απώλεια 3 ακμών.



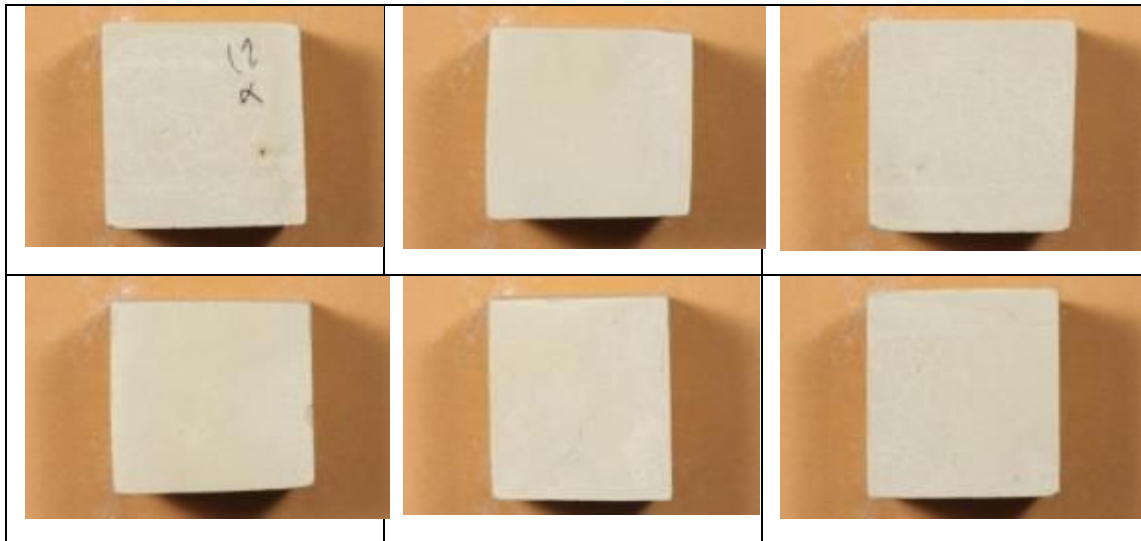
12b: Πολλές και διασταυρούμενες ρωγμές, εκ των οποίων λίγες ανοιγμένες και μικρή φθορά σε 2 ακμές. Ιδιαίτερα στην επιφάνεια της ρόφησης παρατηρείται πυκνό πλέγμα ρωγμών.



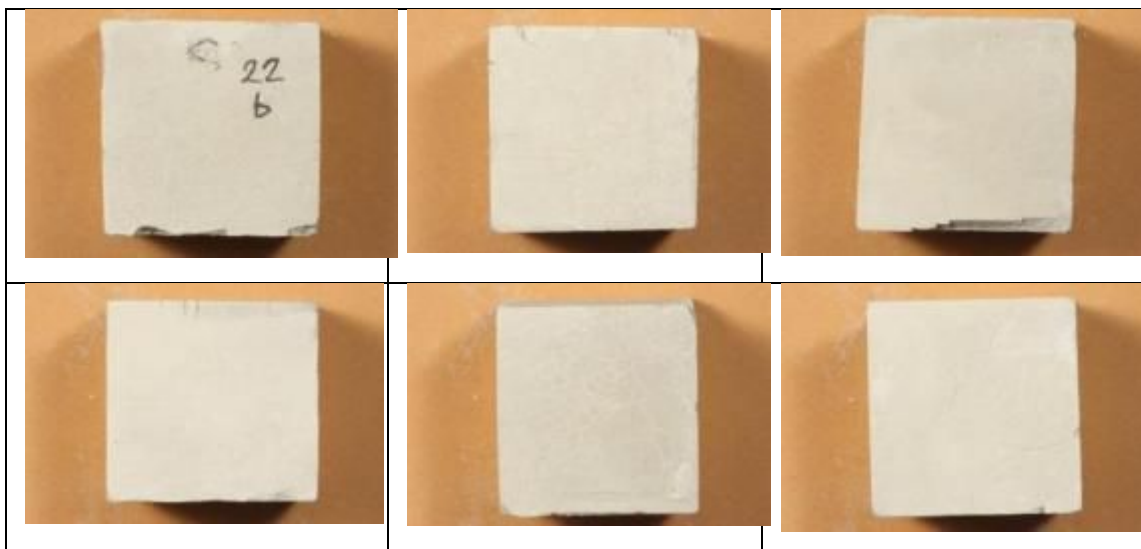
12c: Παρατηρούνται πολλές ρωγμές με μπακλαβαδωτή μορφή. Αρκετές ανοιγμένες, που φαίνεται ότι εμπόδισαν την τριχοειδή αναρρίχηση του νερού. Απουσία ακμής στις πλευρές (4),(6).



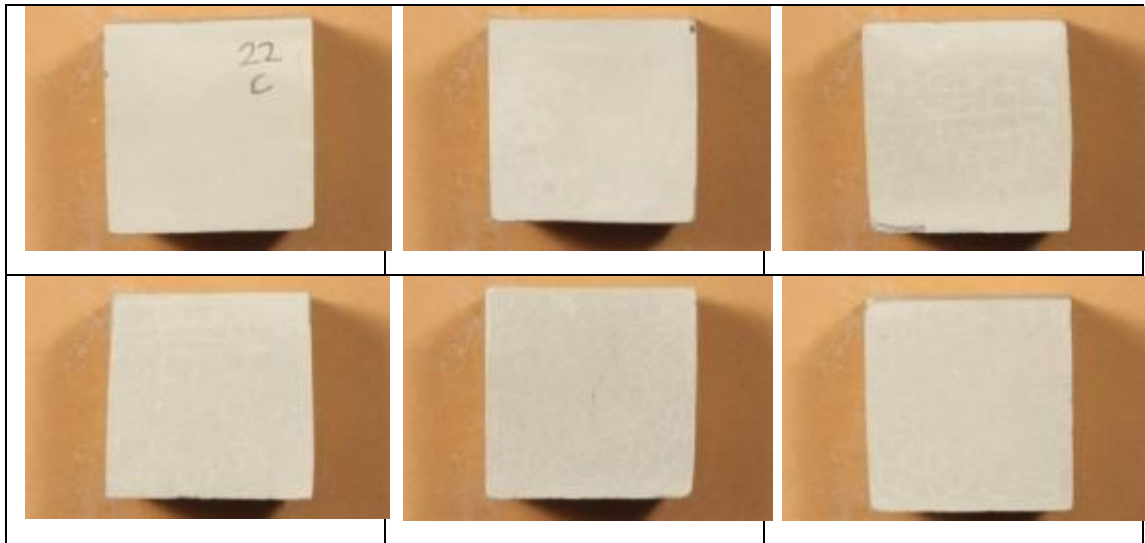
12a: Πολλές ρωγμές και διασταυρούμενες (πλευρά 1) και οριζόντιες/κάθετες. Εμφανίζει ενανθράκωση και φθορά στις ακμές.



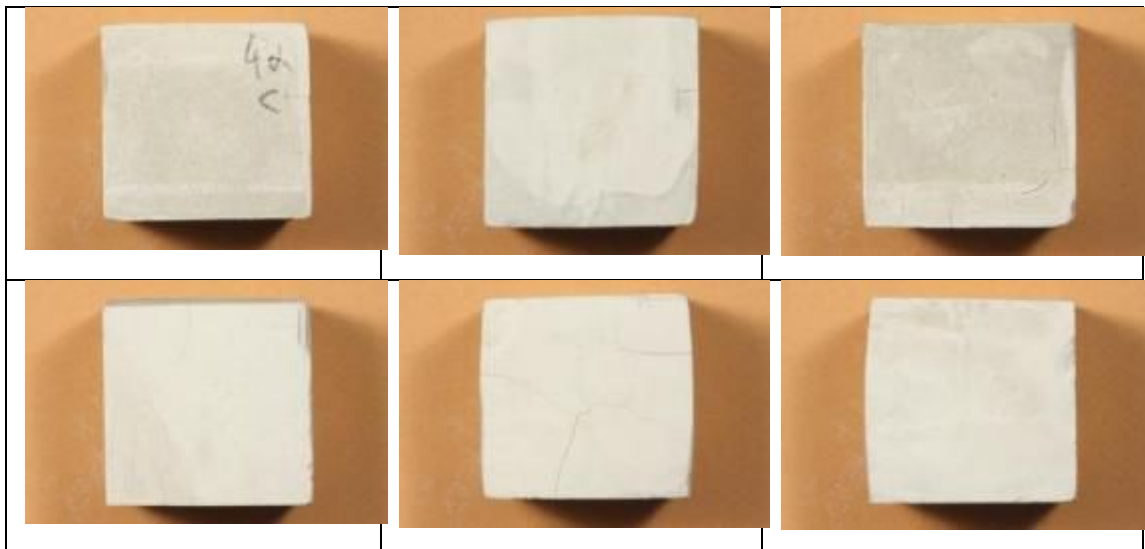
22b: Ελάχιστες ρηγματώσεις. Η μόνη φθορά που παρουσιάζει είναι στις ακμές του.



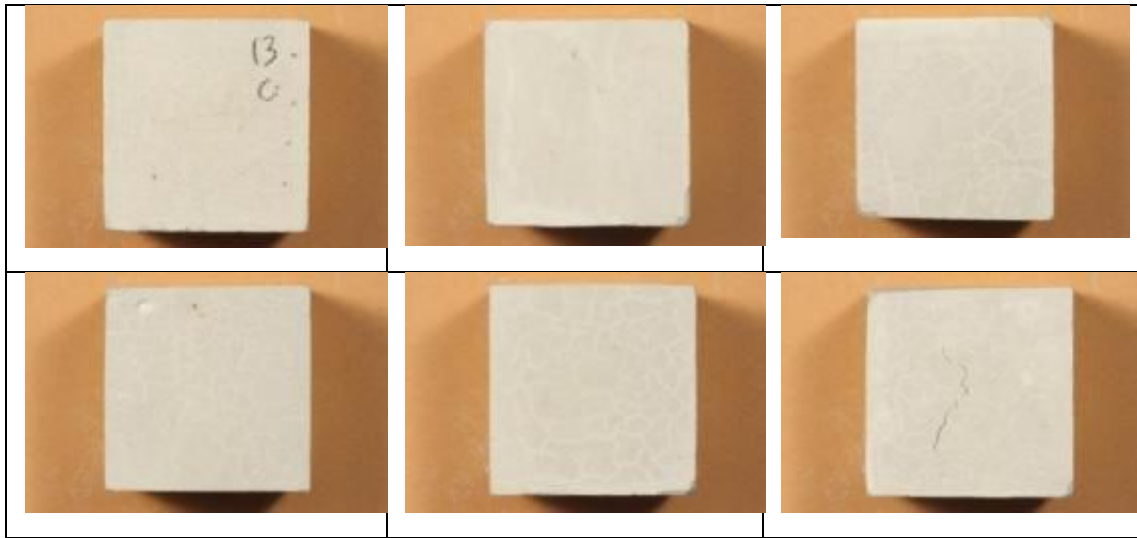
22c: Εμφανίζει πολλές και διασταυρούμενες ρωγμές παρόλα αυτά δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη φθορά.



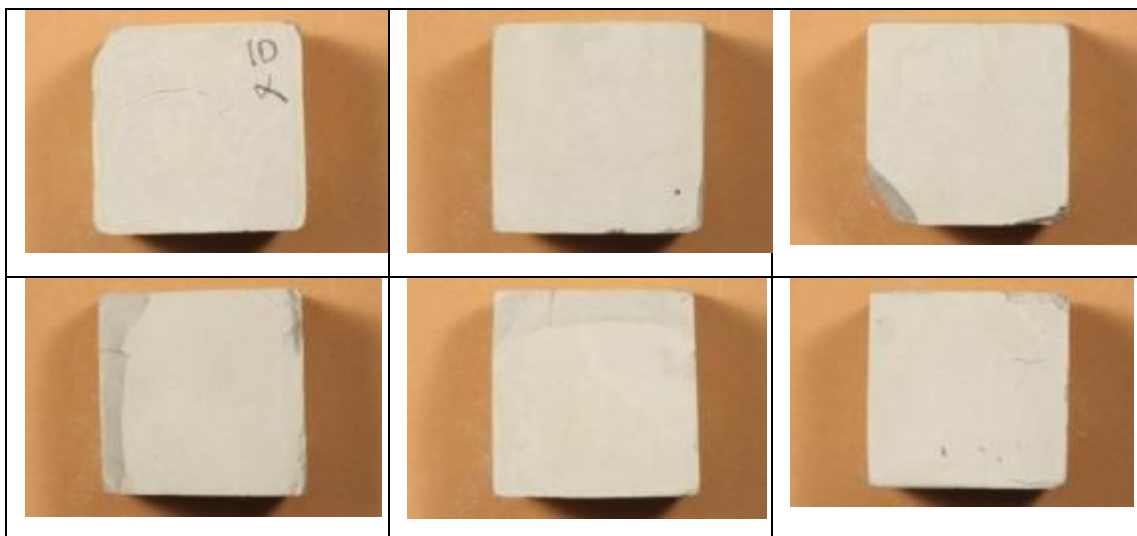
4aс: Πολλές ρωγμές και διασταυρούμενες (πλευρά 1) και οριζόντιες/κάθετες. Εμφανίζει ενανθράκωση και φθορά στις ακμές.



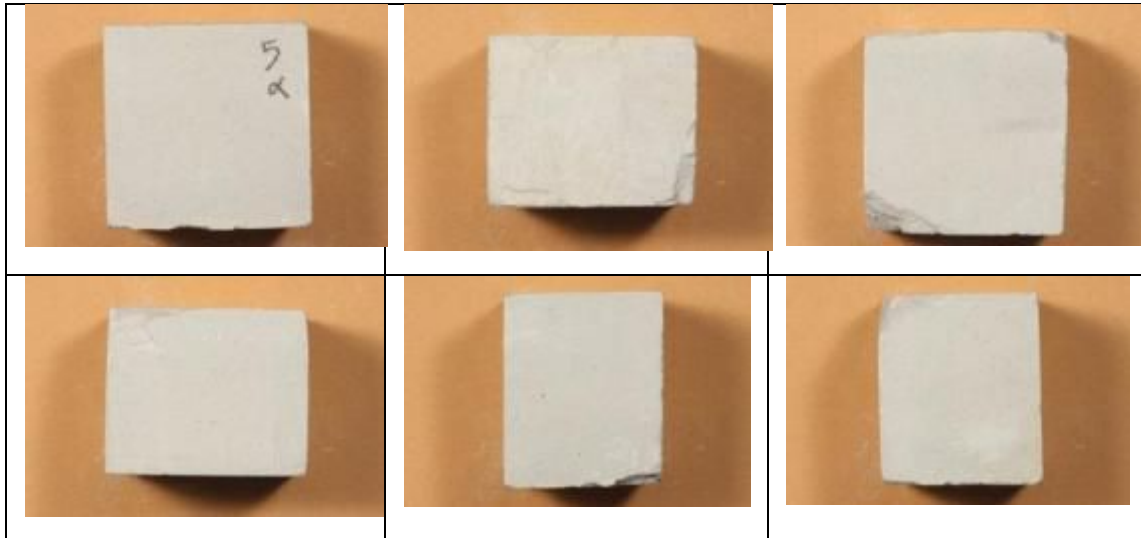
13c: Πάρα πολλές και πυκνές ρωγμές σε σχηματισμό μπακλαβά. Χαρακτηριστική ανοιγμένη ρηγμάτωση στην πλευρά (6).



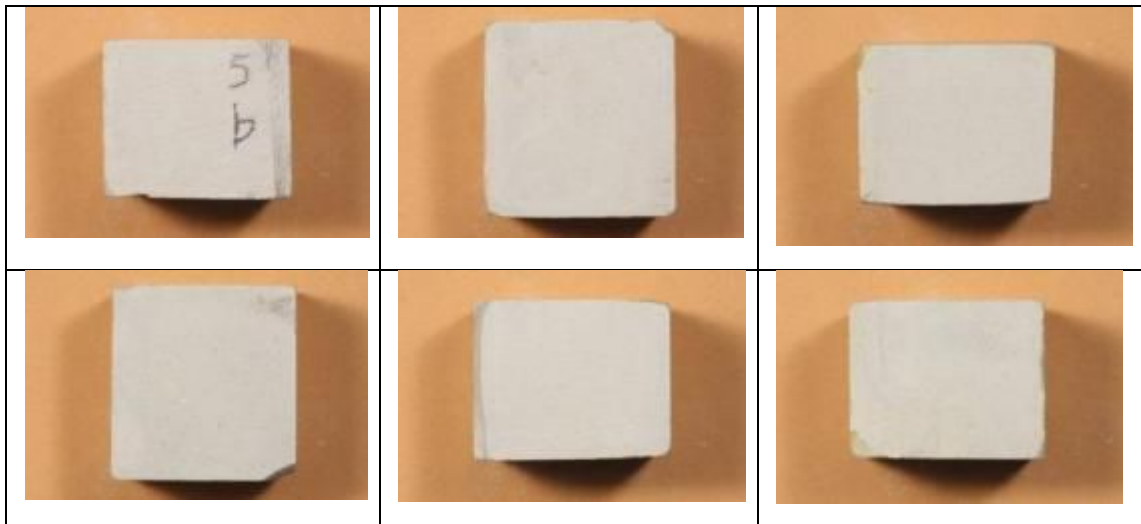
10a: Αραιό πλέγμα πεπλεγμένων ρωγμών, με μόνο 6 ρωγμές ανοιχτές στις εξωτερικές πλευρές του κύβου. Οριζόντια ανοιγμένη ρωγμή στην πλευρά (6). Μεγάλη φθορά και απώλεια ακμής.



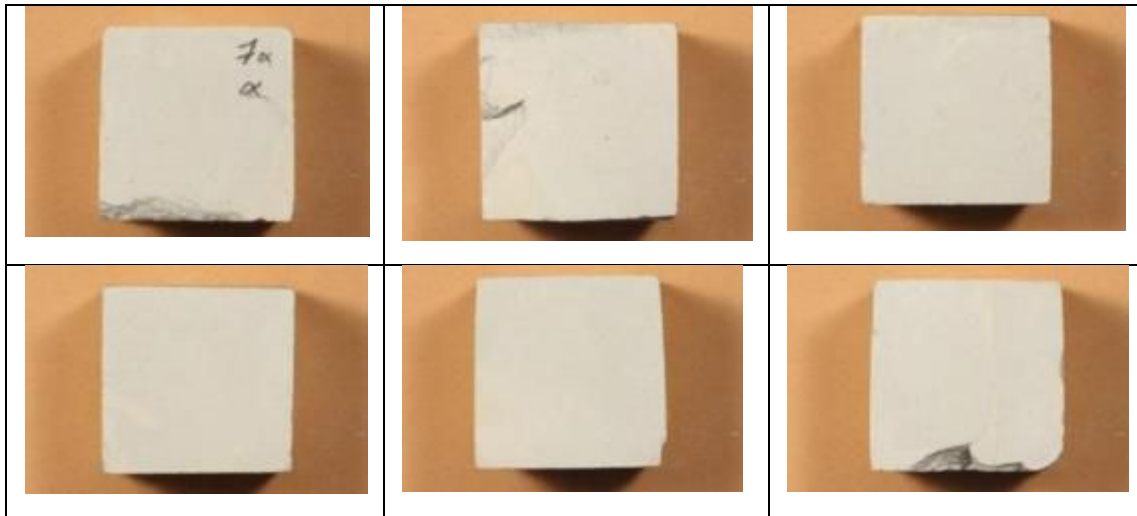
5a: Σχεδόν καθόλου ρωγμές μόνο απώλεια ακμών.



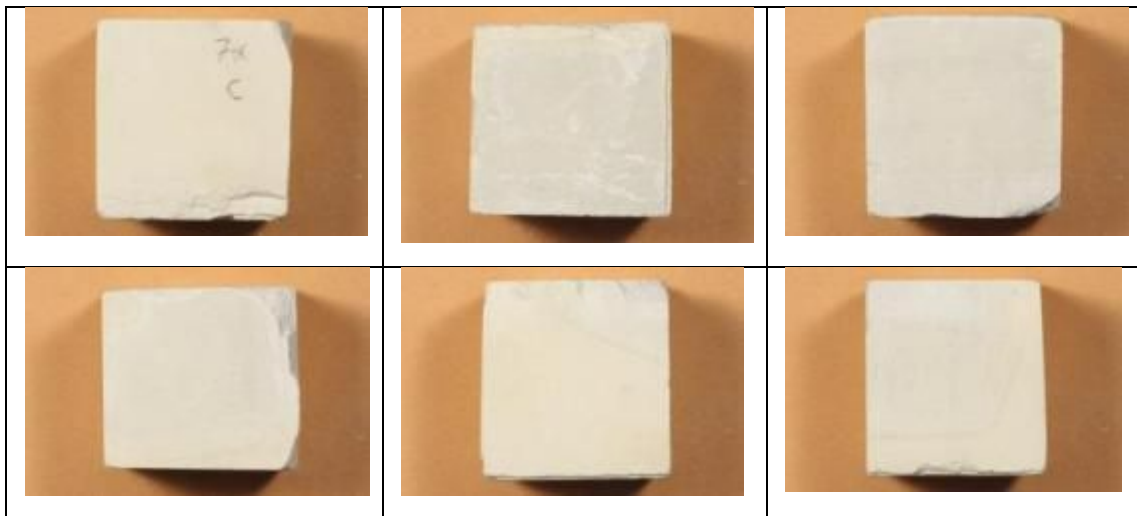
5b: Σχεδόν καθόλου ρωγμές μόνο απώλεια ακμών.



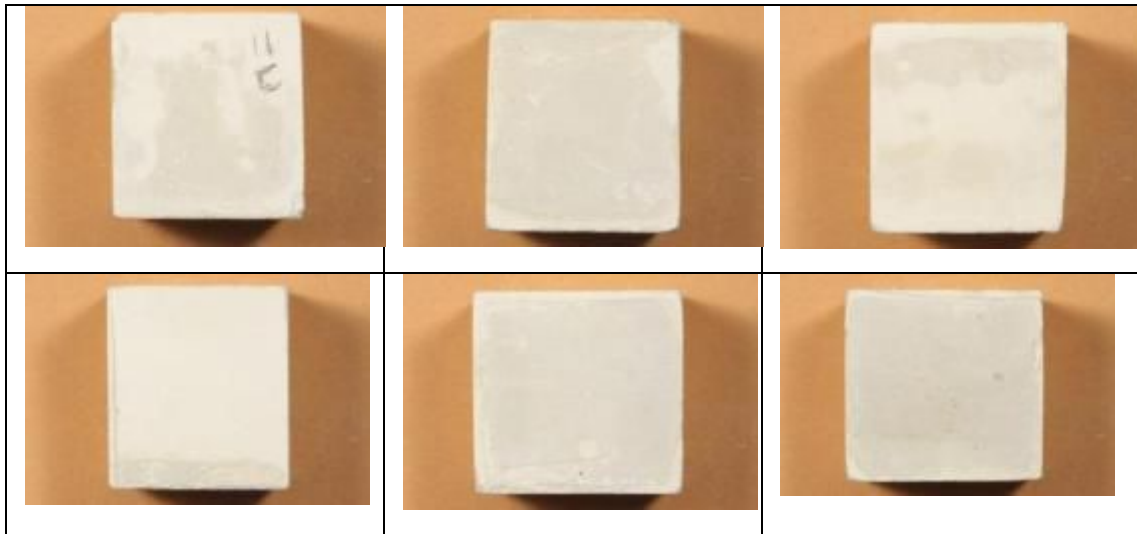
7αα:Σημαντική φθορά και απώλεια ακμών. Λίγες ρωγμές με χαρακτηριστική αυτή στην πλευρά (6) η οποία είναι οριζόντια και παρεμποδίζει τον ρυθμό ρόφησης.



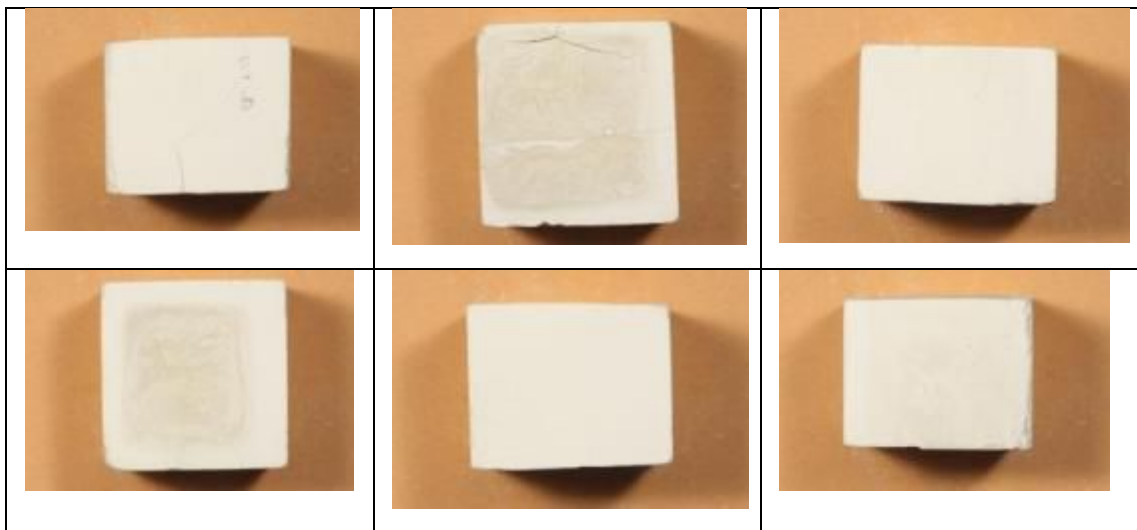
7αc: Πολύ λίγες ρωγμές με τυχαία διεύθυνση, και φθορά μόνο στις ακμές του.



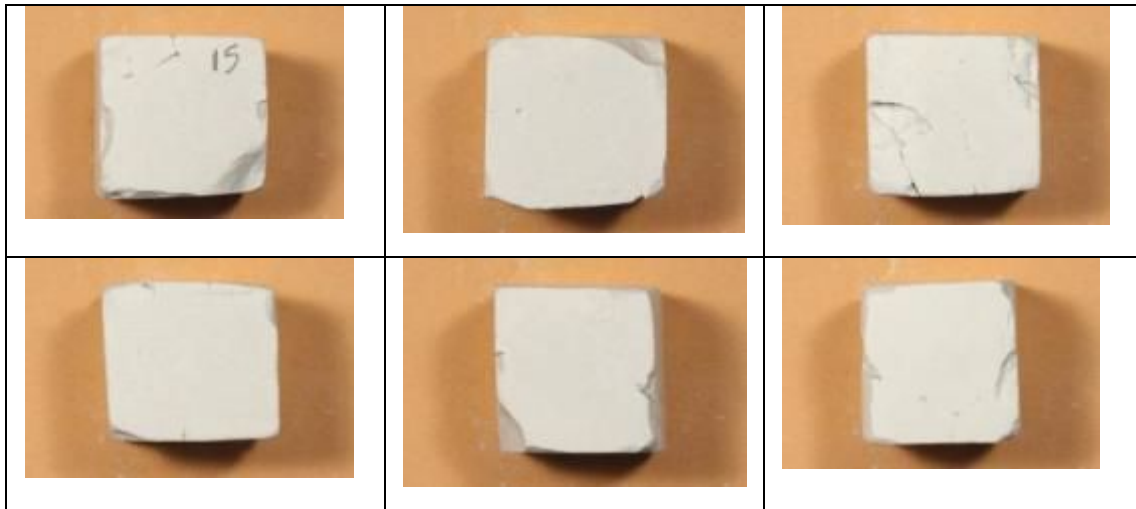
11c: Όχι αξιόλογη φθορά, παρουσιάζει ωστόσο ενανθράκωση και μια ανοιχτή οριζόντια ρωγμή στις πλευρές (2),(6).



9b: Εμφανίζει βαθιές και ανοιγμένες ρωγμές, και υψηλό ποσοστό ενανθράκωσης στις πλευρές (2),(4). Μέσα στην ενανθρακωμένη περιοχή υπάρχουν μικρές και πεπλεγμένες ρηγματώσεις.



15: Πολλές ρωγμές όλες ανοιχτές στις αντίστοιχες επιφάνειες συνδυασμό με μεγάλη απώλεια υλικού. Το δοκίμιο έχει σπάσει σε κομμάτια.



8: Έχει διαρρηχτεί σε τμήματα.

