



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΥΔΑΤΟΠΕΡΑΤΟΥ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΠΑΛΑΙΩΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΕΝΕΜΑΤΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

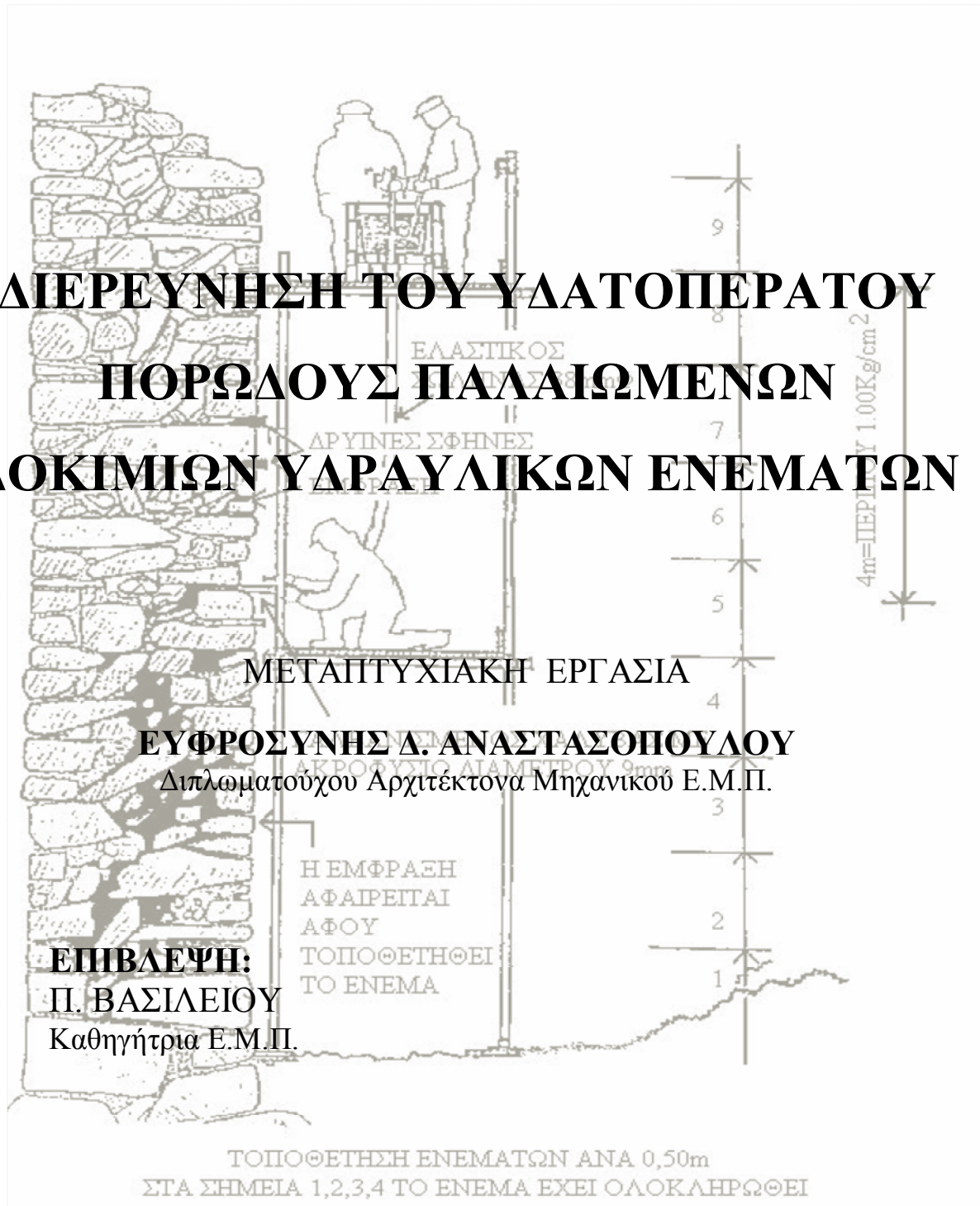
ΕΥΦΡΟΣΥΝΗΣ Δ. ΑΝΑΣΤΑΣΟΠΟΥΛΟΥ

Διπλωματούχου Αρχιτέκτονα Μηχανικού Ε.Μ.Π.

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:

Π. ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.



ΑΘΗΝΑ, Δεκέμβριος 2014



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΥΔΑΤΟΠΕΡΑΤΟΥ
ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΠΑΛΑΙΩΜΕΝΩΝ
ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΕΝΕΜΑΤΩΝ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΥΦΡΟΣΥΝΗΣ Δ. ΑΝΑΣΤΑΣΟΠΟΥΛΟΥ

Διπλωματούχου Αρχιτέκτονα Μηχανικού Ε.Μ.Π.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Π. ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Σ. ΤΣΙΒΙΛΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Κ. ΤΣΑΚΑΛΑΚΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Δεκέμβριος 2014

Πρόλογος

Η Διατριβή Διπλώματος Ειδίκευσης με τίτλο «Διερεύνηση του υδατοπερατού πορώδους παλαιωμένων δοκιμίων υδραυλικών ενεμάτων» πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών (Δ.Π.Μ.Σ.) Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών, που συντονίζεται από τη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το πειραματικό μέρος εκπονήθηκε στο εργαστήριο του Τομέα Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ.

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.

Ευχαριστίες οφείλω και στην οικογένειά μου, η συμβολή της οποίας ήταν καθοριστική.

Περιεχόμενα	4
Περίληψη – Abstract	6
Θεωρητικό μέρος	8
1. Προστασία μνημείων	8
1.1. Η πολιτιστική κληρονομιά και η ανάγκη διάσωσης της	8
2. Το Διεθνές πλαίσιο αρχών για την προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς	11
2.1. Αρμοδιότητες ειδικών	11
2.1.2. Διεθνείς συμβάσεις	11
2.1.3. Χάρτα της Βενετίας και επεκτάσεις	12
3. Ενέματα	19
3.1. Τι είναι ένεμα	19
3.2. Κατηγορίες ενεμάτων	21
3.2.1. Διαχωρισμός ενεμάτων ανάλογα με την σύνθεσή τους	21
3.2.2. Σύνθεση υδραυλικών ενεμάτων	23
3.3. Μίγματα ενεμάτων	24
3.3.1. Υδραυλική άσβεστος	27
3.4. Ιδιότητες των ενεμάτων	28
3.5. Ανάλυση των ιδιοτήτων των ενεμάτων	30
3.5.1. Ενεσιμότητα	30
3.5.2. Παράγοντες που επηρεάζουν την ενεσιμότητα	36
3.5.3. Μηχανικά χαρακτηριστικά	37
3.5.4. Ορθολογικά κριτήρια για το σχεδιασμό των υδραυλικών ενεμάτων	39
4. Φθορά	43
4.1. Ορισμός	43
4.2. Είδη φθοράς	44
4.2.1. Εξάνθιση αλάτων	45
4.2.2. Ο ρόλος του πορώδους στα υλικά	52

Πειραματικό μέρος	62
1. Τα υπό εξέταση υλικά	62
2. Εξέταση των πόρων μεγάλων διαστάσεων και της χημικής σύστασης στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης	63
2.1 Αρχή λειτουργίας του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης	63
2.2 Προετοιμασία των δειγμάτων	63
2.3 Στοιχειακή Ανάλυση των ενεμάτων	67
3. Εξέταση του ανοιχτού υδατοπερατού πορώδους και της πυκνότητας	69
4. Εξέταση της ανθεκτικότητας σε κύκλους κρυστάλλωσης Na_2SO_4	75
5. Συμπεράσματα	78
Βιβλιογραφία	79
Παράρτημα	81

Περίληψη

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας με τίτλο «Διερεύνηση του υδατοπερατού πορώδους παλαιωμένων δοκιμίων υδραυλικών ενεμάτων» είναι αρχικά, η συνοπτική ιστορική αναδρομή και αναφορά στη σημαντικότητα της προστασίας και της συντήρησης των μνημείων και των ιστορικών κτηρίων, η παρουσίαση της σύνθεσης και της εφαρμογής των ενεμάτων στην αποκατάσταση των μνημείων καθώς και η διάγνωση της φθοράς των υλικών. Στη συνέχεια, γίνεται διερεύνηση του υδατοπερατού πορώδους παλαιωμένων δοκιμίων υδραυλικών ενεμάτων με καταγραφή της πορείας της μεθόδου και των αποτελεσμάτων.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην σπουδαιότητα της προστασίας των μνημείων και στην ανάγκη διάσωσης της πολιτιστικής κληρονομιάς.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παραβάλλεται το διεθνές πλαίσιο αρχών για την προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς και όλες οι διεθνείς συμβάσεις.

Στο τρίτο κεφάλαιο προσδιορίζεται η έννοια του ενέματος, με σύντομη ιστορική αναδρομή, οι κατηγορίες των ενεμάτων και η συνθεσή τους. Περιγράφονται τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή των υδραυλικών ενεμάτων, γίνεται αναφορά στις ιδιότητες των ενεμάτων και ανάλυσή των ιδιοτήτων τους. Αναλύονται ο παράγοντας της ενεσιμότητας ως βασική ιδιότητα για τη σωστή εφαρμογή των ενεμάτων, τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ενεμάτων για τη συμβατότητα των συνεργαζόμενων υλικών και τα κριτήρια επιλογής κατάλληλων υδραυλικών ενεμάτων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη φθορά των υλικών, ορίζεται η φθορά και περιγράφονται τα είδη της φθοράς. Με την ανάλυση του φαινομένου της εξάνθισης των αλάτων και με τον υπολογισμό του πορώδους στα υλικά αξιολογείται ο βαθμός της φθοράς και προσδιορίζεται η αποτελεσματικότητα των επεμβάσεων συντήρησης.

Τέλος στο πειραματικό μέρος της εργασίας πραγματοποιήθηκαν δοκιμές της υδατοπερατότητας του πορώδους δοκιμίων υδραυλικών ενεμάτων. Έγιναν μετρήσεις της μάζας τους και υπολογίστηκε το πορώδες τους, ενώ παρατηρήθηκαν έως την αστοχία του υλικού.

Abstract

The aim of this thesis entitled "Investigation of water-permeable porous aged specimens hydraulic grout" is originally, the summary of a historical overview and a reference to the importance of the protection and maintenance of monuments and historic buildings, the presentation of the composition and application of grout in restoration of monuments and the diagnosis of deterioration of the materials. Then there is a study of water-permeable porous aged specimens hydraulic grout to record the progress of the process and the results.

The first chapter highlights the importance of the protection of monuments and the need for the conservation of the cultural heritage.

The second chapter mentions the framework of the principles for the protection of cultural heritage as well as all the international conventions.

In the third chapter the concept of the grout is being determined with a brief historical review, the categories of grout and their synthesis. The materials used for the manufacture of hydraulic grout

are being described, there is a reference to the properties of the grout and analysis of their properties. Additionally the factor of injectability as a key property for the correct application of grout, the mechanical characteristics of the grout on the compatibility of partner materials and selection criteria suitable hydraulic grout are being also analyzed.

In the fourth chapter there is a reference to the degradation of materials; the meaning and the description of the types of the degradation are being described. By analyzing the phenomenon of efflorescence of salts and calculating the porosity in the materials, the degree of degradation is being evaluated and the efficiency of maintenance interventions is being determined.

Finally in the experimental part of the thesis, tests of water permeability of porous specimens hydraulic grout have been performed. Measurements of the mass were made, their porosity has been calculated and were being observed until failure of the material.

Θεωρητικό μέρος

1. Προστασία μνημείων

1.1. Η πολιτιστική κληρονομιά και η ανάγκη διάσωσης της

Μνημεία, ιστορικά μνημεία

Με τον όρο Μνημείο Παγκόσμιας Πολιτιστικής Κληρονομιάς σύμφωνα με την UNESCO νοείται μία διακριτή θέση ή τόπος που προτάθηκε και έγινε αποδεκτό στον κατάλογο των μνημείων που διαχειρίζεται το διεθνές Πρόγραμμα Παγκόσμιας Πολιτιστικής Κληρονομιάς της Επιτροπής Παγκόσμιας Κληρονομιάς της UNESCO. Το πρόγραμμα στοχεύει στην καταλογογράφηση, την ονοματοδοσία και τη συντήρηση πεδίων ιδιάζουσας πολιτιστικής και φυσικής σημασίας για την κοινή κληρονομιά της ανθρωπότητας. Υπό ορισμένες προϋποθέσεις τα καταχωρημένα πεδία χρηματοδοτούνται από το Ταμείο Παγκόσμιας Κληρονομιάς. Η έναρξη του προγράμματος έγινε με την αποδοχή και υιοθέτηση της Συνθήκης για την Προστασία της Παγκόσμιας Πολιτιστικής και Φυσικής Κληρονομιάς από το Γενικό Συνέδριο της UNESCO στις 16 Νοεμβρίου 1972. Τα μνημεία παγκόσμιας πολιτιστικής κληρονομιάς οφείλουν να είναι «ιδιάζουσας παγκόσμιας αξίας».

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

Με την υπογραφή της Συνθήκης, τα κράτη αναγνωρίζουν ότι οι χώροι που βρίσκονται στην εθνική 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 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. Στον ορισμό περιλαμβάνονται τα ακίνητα αγαθά τα οποία θεωρούνται διατηρητέα λόγω της φύσης ή του προορισμού τους, καθώς και τα κινητά που βρίσκονται μέσα στα μνημεία".¹

Συντήρηση – Αναστήλωση

Είναι επιτακτική και άμεση η ανάγκη της προστασίας της πολιτιστικής μας κληρονομιάς, 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 συνέχεια ενός έργου τέχνης. Οι ιδεολογικές και τεχνικές εξελίξεις τόσο σε επίπεδο κρατών όσο και σε διεθνές επίπεδο, συνίστανται:

- στην ανάπτυξη προστατευτικής για τα μνημεία Νομοθεσίας και στην θέσπιση Εθνικών και Διεθνών Οδηγιών και Προδιαγραφών,
- στη συστηματική επαγγελματική εξειδίκευση και στην οργάνωση ειδικών σπουδών πανεπιστημιακού επιπέδου, στη συγκρότηση Δημοτικών, Κρατικών και Διακρατικών Υπηρεσιών και

¹ Πηγή: Γκουιντάλις Ι., «Σχεδιασμός βάσης δεδομένων χαρακτηρισμού δομικών υλικών, διάγνωσης φθοράς και ενεργειακής απόδοσης σε ιστορικά συγκροτήματα κτιρίων και μνημείων», Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ, Αθήνα 2011

Οργανισμών, στη διάθεση δημοσίων χρημάτων για προγράμματα συντηρήσεως ή αποκαταστάσεως μνημείων

- στην ευαισθητοποίηση των πολιτών
- στην εκτέλεση πλείστων έργων σε μνημεία και αρχαιολογικούς χώρους.

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 Charter 1964). Σε ότι αφορά τα μνημεία πρέπει να προστατεύονται με συνεχή επίβλεψη και πρόγραμμα συντήρησης. Απαιτείται συνεχώς να αναπτύσσονται και να εφαρμόζονται διεθνή πρότυπα που να πιστοποιούν την μεγαλύτερη δυνατή ποιότητα των υλικών.

Προστασία και συντήρηση

Βασικό βήμα για τα υπό μελέτη μνημεία είναι ο χαρακτηρισμός (υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, ιστορικό επεμβάσεων κ.λ.π.), η κατηγοριοποίηση των ειδών φθοράς (σε μικροκλίμακα και μακροκλίμακα) που έχουν υποστεί, ο εντοπισμός των αιτίων 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 μπου 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 στερέρωση του υλικού, ώστε να αποκτήσει μηχανικές ιδιότητες, αποδεκτές και ασφαλείς, αν όχι ίδιες με αυτές του αρχικού υλικού. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται ενώσεις ανόργανες (άσβεστοι, ενώσεις του Βαρίου) και οργανικές (φυσικά πολυμερή, ακρυλικά, γαλακτώματα και νανοϋλικά). Προστατευτικές επικαλύψεις μπορεί να προσδίδουν υδροφοβικότητα, παρεμπόδιση μικροβιακής ανάπτυξης, παρεμπόδιση της διάλυσης, παρεμπόδιση του σχηματισμού μη επιθυμητών αλάτων ή να ευνοούν την κρυστάλλωση επιθυμητών αλάτων (π.χ. οξαλικών, φωσφορικών).²

Κατά την διάρκεια της αποκατάστασης των μνημείων προκύπτει η ανάγκη είτε να επαναληφθούν οι παλιές κατασκευαστικές μέθοδοι είτε να συμπληρωθεί το υφιστάμενο «παραδοσιακό» υλικό. Τα παραδοσιακά υλικά, την εποχή που χρησιμοποιήθηκαν, ήταν κοινά και βρισκόνταν με σχετική ευκολία γιατί προέρχονταν από τις κοντινές προς το μνημείο περιοχές ή λατομεία. Σήμερα όπου η παραγωγή των παραπάνω υλικών έχει σταματήσει, η σύγχρονη τεχνολογία δεν έχει ενεργοποιηθεί για να καλύψει το παραπάνω κενό της αγοράς. Είναι αποδεκτό ότι συμβατότητα δεν σημαίνει απαραίτητα υλικά με τα ίδια χημικά συστατικά αλλά με παρόμοιες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες.

² Πηγή: Κανελλοπούλου Δ., «Φυσικοχημική διερεύνηση της αποσάθρωσης δομικών υλικών ιστορικών μνημείων και μέθοδοι προστασίας», Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2012

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 το τσιμέντο και κονιάματα με βάση πολυμερή οργανικά υλικά 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. Από την άλλη, νέα υλικά αποκατάστασης, τα οποία έχουν επιλεγεί χωρίς προηγούμενη μελέτη συμπεριφέρονται επίσης ακατάλληλα όταν εφαρμόζονται σε ιστορικά κτίρια λόγω των διαφορετικών φυσικών χαρακτηριστικών και του διαφορετικού τρόπου παραγωγής των πρώτων υλών τους, τον τρόπο ανάμιξης και το μέγεθος των κόκκων των κονιαμάτων. Επομένως είναι απαραίτητη η χρήση υλικών ή μιγμάτων υλικών τα οποία να είναι συμβατά με τα αρχικά υλικά του κτιρίου αποκατάστασης.

Η ολοκληρωμένη μεθοδολογία προστασίας ενός μνημείου αποσκοπεί στην αποκατάστασή του και την ανάδειξη των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών και αξιών. Συντίθεται από επιμέρους εξειδικευμένες μελέτες που υπαγορεύονται από τον πολυδιάστατο χαρακτήρα του μνημείου και προϋποθέτουν τη συνεισφορά και τη συνεργασία διαφόρων ειδικών, ως εξής:

Αρχιτεκτονική μελέτη, που εκπονείται από τον αρχιτέκτονα και αποσκοπεί στη μορφολογική αποκατάσταση του μνημείου.

Δομοστατική μελέτη, που εκπονείται από τον πολιτικό μηχανικό και στοχεύει στη δομητική αποκατάσταση και ενίσχυση του μνημείου.

Μελέτη των υλικών και της φθοράς αυτών, που αφορά τον επιστήμονα των υλικών και αποσκοπεί στην άρση ή επιβράδυνση των μηχανισμών φθοράς και την αποκατάσταση της φυσικής κατάστασης και της αισθητικής των υλικών. Εδαφοτεχνική μελέτη, που αφορά γεωλόγους και άλλους ειδικούς.

Όπως γίνεται αντιληπτό ένας από τους βασικούς στόχους της ολοκληρωμένης μεθοδολογίας προστασίας των μνημείων είναι η διασφάλιση της ποιότητας, για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων από τον σχεδιασμό μέχρι την κατασκευή. Ο έλεγχος ποιότητας περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες τεχνικές και ενέργειες που απαιτούνται για να εκπληρωθούν οι απαιτήσεις ποιότητας, είτε μέσω της καταγραφής διαδικασιών, είτε μέσω διαδικασιών ελαχιστοποίησης των αιτιών που προκαλούν μη ικανοποιητική απόδοση.

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, δομών και δομημάτων.

Οι επιλεγόμενες επεμβάσεις διέπονται από βασικές αρχές (συμβατότητα υλικών, καταγραφή, παρακολούθηση, αξιολόγηση, αντιστρεψιμότητα) οι οποίες διαμορφώθηκαν μέσα από τη διεπιστημονική συνεργασία και την εμπειρία χρόνων, συνοψίστηκαν σε οδηγίες και πολιτικές κοινά αποδεκτές (π.χ. η Χάρτα της Βενετίας, 1964, ICOMOS) και επικαιροποιούνται.

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. Οι πρώτες αναφορές στην προστασία πολιτιστικών αγαθών σε διεθνές επίπεδο εμφανίζονται το 17ο αιώνα σε συνθήκες ειρήνης και αφορούν την επιστροφή έργων τέχνης που αφαιρέθηκαν κατά τη διάρκεια εχθροπραξιών. Τη δεκαετία του '70 τίθενται οι βάσεις για τη διεθνή προστασία των πολιτιστικών αγαθών σε καιρό ειρήνης με τη θέσπιση δύο σημαντικών συμβάσεων στο πλαίσιο της UNESCO. 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 προστασίας 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 κ.α.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι πιο σημαντικές διεθνείς συμβάσεις (και άλλα νομικά κείμενα) για την προστασία των μνημείων με χρονολογική σειρά:

2.1.2. 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. Το κείμενο αυτό αποτέλεσε το έναυσμα για την κωδικοποίηση όλων των ελληνικών νομοθετικών διατάξεων στο νόμο «περί αρχαιοτήτων» (ν. 5351/32), ο οποίος αποτελεί ακόμα και σήμερα το βασικό ελληνικό νομοθέτημα προστασίας των αρχαίων, πάνω στον οποίο βασίζονται και οι μεταγενέστεροι νόμοι. 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. Από τότε έχουν συνταχθεί πολλά ανάλογα κείμενα διεθνούς κύρους που έχουν γίνει αποδεκτά από μεγάλο αριθμό κρατών και σε αυτά περιλαμβάνεται και η Χάρτα της Βενετίας (1964).

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 το Χάρτη 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.

Ανάμεσα στα συμπεράσματα είναι και η αντίληψη πως η διατήρηση των μνημείων αφορά και τον περιβάλλοντα χώρο αποκλείοντας κάθε προσθήκη, κάθε κατεδάφιση και κάθε αλλαγή που θα μπορούσε να αλλάξει τις σχέσεις των όγκων και των χρωμάτων, καθώς και το διαχωρισμό των διακοσμητικών στοιχείων του μνημείου παρά μόνο ως αναπόφευκτη λύση. Στη δεκαετία του '60 αναθεωρήθηκαν ή συντάχθηκαν νέες νομοθετικές διατάξεις στα περισσότερα ευρωπαϊκά κράτη, ενώ σημαντική υπήρξε η δραστηριοποίηση του ICOMOS (Διεθνές Συμβούλιο Μνημείων και Τόπων) και της UNESCO με ποικίλες πρωτοβουλίες, όπως: η σύνταξη με ενιαίο τρόπο αρχείου μνημείου σε διεθνές επίπεδο, η ίδρυση του διεθνούς κέντρου μελετών για τη συντήρηση και αποκατάσταση των πολιτιστικών αγαθών με έδρα τη Ρώμη, που δραστηριοποιείται, τόσο στον ερευνητικό τομέα των τεχνικών μέσων συντήρησης, όσο και στο θεωρητικό, με τη διοργάνωση σεμιναρίων που απευθύνονται στους ειδικούς όλων των εθνοτήτων.³



Εικόνα 1. Χάρτης με τις θέσεις των μνημείων Παγκόσμιας Κληρονομιάς. Κατηγορίες / Σύμβολα: ◊ Πολιτιστική ◉ Φυσική ◉ Πολιτιστική και Φυσική, Με κόκκινο ΣΕ ΚΙΝΔΥΝΟ ◊ Πολιτιστική ◉ Φυσική ◉ Πολιτιστική και Φυσική.

2.1.3. Χάρτα της Βενετίας και επεκτάσεις

Χάρτης της Βενετίας

Ο Χάρτης της Βενετίας για την Αποκατάσταση και Συντήρηση Μνημείων και Μνημειακών Συνόλων (ή Χάρτα της Βενετίας) καταρτίστηκε κατά τη διάρκεια του δεύτερου Διεθνούς Συνεδρίου Αρχιτεκτόνων και Τεχνικών των Ιστορικών Μνημείων, που πραγματοποιήθηκε στη Βενετία στις 25-31 Μαΐου 1964 και που διοργανώθηκε από το Διεθνές Συμβούλιο Μνημείων και Τοποθεσιών (ICOMOS). Ο Χάρτης αναγνωρίζεται διεθνώς ως ένα διαχρονικό πλαίσιο κατευθυντήριων αρχών που διέπουν την θεωρία και κυρίως την πράξη της Αποκατάστασης και της Συντήρησης κάθε είδους Μνημείων.

Ορισμοί

³ Πηγή: Τσέλιου Μ. Α., Διατηρητέα κτίρια και ιστορικά διατηρητέα μνημεία: νομικό πλαίσιο προστασίας και τρόποι ενίσχυσης, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2010

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 τις 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 αποτείνεται στη συνεργασία όλων των επιστημών και όλων των τεχνών που μπορούν να συνεισφέρουν στη μελέτη και τη διάσωση της μνημειακής κληρονομιάς.

Στόχος

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

Συντήρηση

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 στερέρωση 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 διατηρήσεως 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.

Μνημειακά Σύνολα

Άρθρο 14. Τα μνημειακά σύνολα πρέπει να γίνουν αντικείμενο ειδικών φροντίδων για να σωθεί η ακεραιότητά τους και να εξασφαλισθεί 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.

Ανασκαφές

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.

Τεκμηρίωση και δημοσιεύσεις

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.

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.

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

Η σύμβαση αυτή συντάχθηκε κατά τη γενική διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών για την εκπαίδευση, την επιστήμη και την επιμόρφωση, που έγινε στο Παρίσι το 1972 και επικυρώθηκε από την Ελληνική Βουλή το 1981 με το Ν.1126/10 - 02 - 1981. 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.

Διακήρυξη του Άμστερνταμ (1975)

Το 1975 αποτέλεσε για την Ευρώπη έτος αρχιτεκτονικής κληρονομιάς με εκδηλώσεις σε όλες τις χώρες – μέλη του συμβουλίου της Ευρώπης, με κορυφαία το συνέδριο του Άμστερνταμ που έγινε από τις 21 έως τις 26 Οκτωβρίου 1975, με σκοπό τη συνεκτίμηση των αποτελεσμάτων της κινητοποίησης απέναντι στο «Χάρτης της Βενετίας», 1964 προβληματισμό σχετικά με τη διάσωση της αρχιτεκτονικής κληρονομιάς και σύνθημά του «ένα μέλλον για το παρελθόν σας». Απόρροια του συνεδρίου ήταν η Διακήρυξη του Άμστερνταμ που 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. Επιπλέον, αναθέτει στην υπευθυνότητα των τοπικών αρχών, οι οποίες θα πρέπει να έχουν συγκεκριμένες και εκτεταμένες αρμοδιότητες, την αναζωογόνηση των μνημείων και των ιστορικών συνόλων, με σκοπό την απόδοση σε αυτά κάποιας χρήσης ή λειτουργίας και την οργανική τους ένταξη στον άμεσο και ευρύτερο χώρο που τα περιβάλλει. Άλλωστε, η καλύτερη διατήρηση είναι η απόδοση ζωής σε αυτά, μέσα στο πλαίσιο του πολεοδομικού σχεδιασμού. Τέλος, συστήνει στις τοπικές αρχές τη θέσπιση οικονομικής βοήθειας και φορολογικών απαλλαγών των ιδιοκτητών των κτιρίων με ιδιαίτερη αρχιτεκτονική σημασία, ώστε να είναι εφικτή η συντήρησή τους.

Σύμβαση της Γρανάδας (1985)

Το Συμβούλιο της Ευρώπης έχοντας υπόψη όλες τις μέχρι τότε συμβάσεις και διακηρύξεις, τις κατά καιρούς συστάσεις της κοινοβουλευτικής επιτροπής του Συμβουλίου της Ευρώπης, καθώς και τον

Ευρωπαϊκό Καταστατικό Χάρτη της αρχιτεκτονικής κληρονομιάς που υιοθετήθηκε από τη σύνοδο των υπουργών του Συμβουλίου της Ευρώπης (1976), συντάσσει το 1985 τη Σύμβαση της Γρανάδας που επικυρώθηκε από την ελληνική βουλή με το Ν.2039/13.04.1992. 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.

Σύμβαση για την προστασία της αρχαιολογική κληρονομιάς της Ευρώπης –Σύμβαση Μάλτας
Η σύμβαση για την προστασία της αρχαιολογική κληρονομιάς της Ευρώπης είναι η πιο πρόσφατη σχετική με το θέμα και συντάχθηκε στη Μάλτα το 1992 με πρωτοβουλία των συμβαλλόμενων μελών της Ευρωπαϊκής πολιτιστικής σύμβασης. 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».⁴

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. Για τη διασφάλιση του συνεχούς συντονισμού των θεμάτων που άπτονται της Συμβάσεως, το Κέντρο οργανώνει ετήσιες συνεδριάσεις της Επιτροπής για την Παγκόσμια Κληρονομιά, έχει συμβουλευτικό ρόλο για τα κράτη – μέλη ως προς την υποβολή υποψηφιοτήτων για εγγραφή στον Κατάλογο Πολιτιστικής Κληρονομιάς, συντονίζει την διεθνή βοήθεια που δίδεται από το Ταμείο Παγκόσμιας Κληρονομιάς κατ' αίτηση των ενδιαφερομένων και συντονίζει τόσο τις αναφορές για τη κατάσταση των μνημείων όσο και την άμεση δράση που απαιτείται στην περίπτωση των μνημείων που απειλούνται. Το Κέντρο επίσης, διοργανώνει σεμινάρια και εργαστήρια τεχνικής εκπαίδευσης, ενημερώνει τη βάση δεδομένων του Καταλόγου Παγκόσμιας Πολιτιστικής Κληρονομιάς, δημιουργεί εκπαιδευτικά εργαλεία προκειμένου να συνειδητοποιήσουν οι νέοι την ανάγκη για την προστασία της κληρονομιάς και τέλος, 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, οι οποίοι έχουν συμβουλευτικό ρόλο για την Επιτροπή ως προς τις επιδιώξεις της: Παγκόσμια Ένωση για την Συντήρηση (IUCN)

Η Παγκόσμια Ένωση για την Συντήρηση είναι ένας διεθνής, μη κυβερνητικός οργανισμός, που παρέχει στην Επιτροπή Παγκόσμιας Κληρονομιάς αξιολογήσεις τεχνικού περιεχομένου για τα φυσικά τοπία, ενώ μέσω του παγκόσμιου δικτύου εμπειρογνομόνων που διαθέτει παρέχει και αναφορές για την κατάσταση συντήρησης των τοπίων που είναι ήδη εγγεγραμμένα στον Κατάλογο Παγκόσμιας Πολιτιστικής Κληρονομιάς. Η Ένωση ιδρύθηκε το 1948, έχει πάνω από 1000 μέλη και εδρεύει στην πόλη Gland της Ελβετίας.

⁴ Πηγή: Τσέλιου Μ. Α., Διατηρητέα κτίρια και ιστορικά διατηρητέα μνημεία: νομικό πλαίσιο προστασίας και τρόποι ενίσχυσης, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2010

Το Διεθνές Κέντρο για την Μελέτη της Διατήρησης και της Ανασύλωσης των Πολιτιστικών Αγαθών (ICCROM) είναι ένα διακυβερνητικό όργανο το οποίο έχει ειδικό συμβουλευτικό ρόλο επάνω στο θέμα της διατήρησης των εγγεγραμμένων στον Κατάλογο Παγκόσμιας Πολιτιστικής Κληρονομιάς, μνημείων και τοπίων καθώς επίσης και εκπαιδευτικό ρόλο για τις τεχνικές ανασύλωσης. Το ICCROM ιδρύθηκε το 1956 και εδρεύει στη Ρώμη. Είναι ενεργός εταίρος στο Δίκτυο Πληροφόρησης για την Παγκόσμια Κληρονομιά.

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

Η Ελλάδα ως μέλος της Ευρωπαϊκής Κοινότητας οφείλει και έχει συντονιστεί στο πνεύμα των Ευρωπαϊκών αυτών Συμβάσεων και το νομοθετικό πλαίσιο της, εκτός από τους νόμους που επικυρώνουν κάποιες από τις παραπάνω συμβάσεις και αυτόν του 1932 που αναφέρθηκε πιο πάνω, περιλαμβάνει και επιπλέον νόμους προστασίας της αρχιτεκτονικής κληρονομιάς, από τους οποίους οι πιο πρόσφατοι εναρμονίζονται με τις Ευρωπαϊκές επιταγές.



Properties inscribed on the World Heritage List

Εικόνα 2. Χάρτης των μνημείων παγκόσμιας πολιτιστικής κληρονομιάς της Ελλάδος Κατηγορίες / Σύμβολα: ● Πολιτιστική ○ Φυσική ○ Πολιτιστική και Φυσική

- Ναός του Επικούριου Απόλλωνα (1986)
- Αρχαιολογικός τόπος των Δελφών (1987)
- Ακρόπολη (1987)
- Άγιο Όρος (1988)
- Αρχαιολογικός χώρος Επιδαύρου (1988)
- Παλαιοχριστιανικά και Βυζαντινά μνημεία της Θεσσαλονίκης (1988)
- Μετέωρα (1988)
- Μεσαιωνική πόλη της Ρόδου (1988)
- Αρχαία Ολυμπία (1989)
- Μυστράς (1989)
- Μονή Δαφνίου, Μονή Οσίου Λουκά και Νέα Μονή Χίου (1990)
- Δήλος (1990)

- Πυθαγόρειον και Ηραΐον Σάμου (1992)
- Αρχαιολογικός τόπος της Βεργίνας (1996)
- Ιστορικό κέντρο (Χώρα) με τη Μονή του Αγίου Ιωάννου του Θεολόγου και το Σπήλαιο της Αποκάλυψης της νήσου Πάτμος (1999)
- Αρχαιολογικοί τόποι των Μυκηνών και της Τίρυνθας (1999)
- Η Παλαιά Πόλη της Κέρκυρας (2007)

Ο νόμος 3028/2002 «Για την προστασία των Αρχαιοτήτων και εν γένει της Πολιτιστικής Κληρονομιάς» είναι το πρώτο συστηματικό και ολοκληρωμένο νομοθέτημα μετά το 1932 που συμπεριλαμβάνει και όλους τους όρους που τίθενται από τις διεθνείς συμβάσεις που έχει υπογράψει η χώρα μας. Ο νόμος αυτός, ρυθμίζει ζητήματα που μέχρι σήμερα ρυθμιζόνταν ανεπαρκώς έως καθόλου και προσπαθεί να εξοπλίσει τη χώρα με ένα σοβαρό μηχανισμό προστασίας.

3. Ενέματα

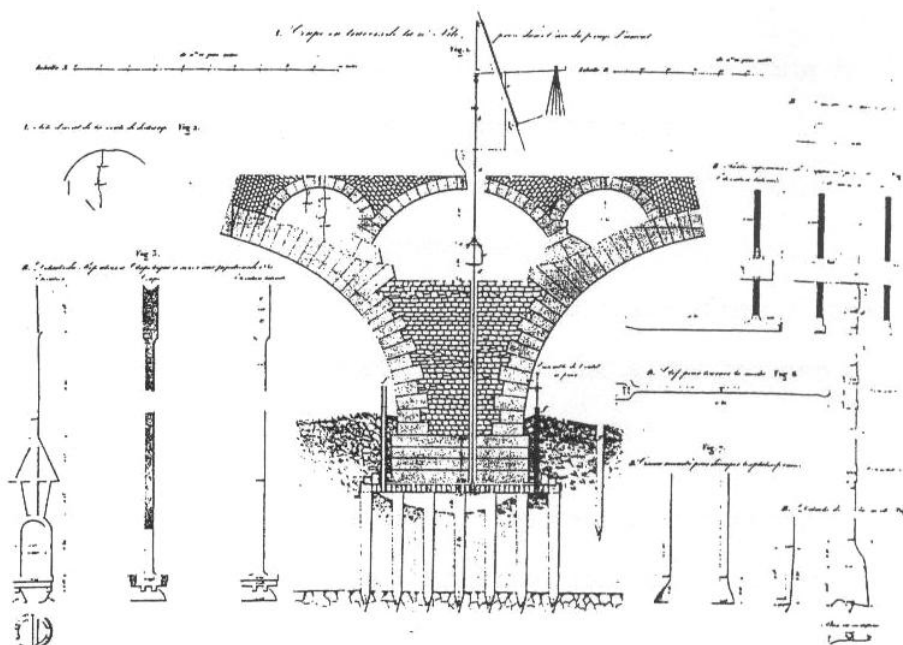
3.1. Τι είναι ένεμα

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. Τα ενέματα μπορεί να είναι: Αιωρήματα: είτε στερεών σωματιδίων είτε κολλοειδή αιωρήματα Διαλύματα: είτε αληθή είτε κολλοειδή διαλύματα και Κονιάματα.

Ιστορικά στοιχεία⁵

Η λογική της μεθόδου των ενεμάτων δεν είναι καινούργια. Η λογική της εισαγωγής κάποιου ρευστού στα πρωτοποποιημένα 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 καθώς και Ρωμανικών 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.

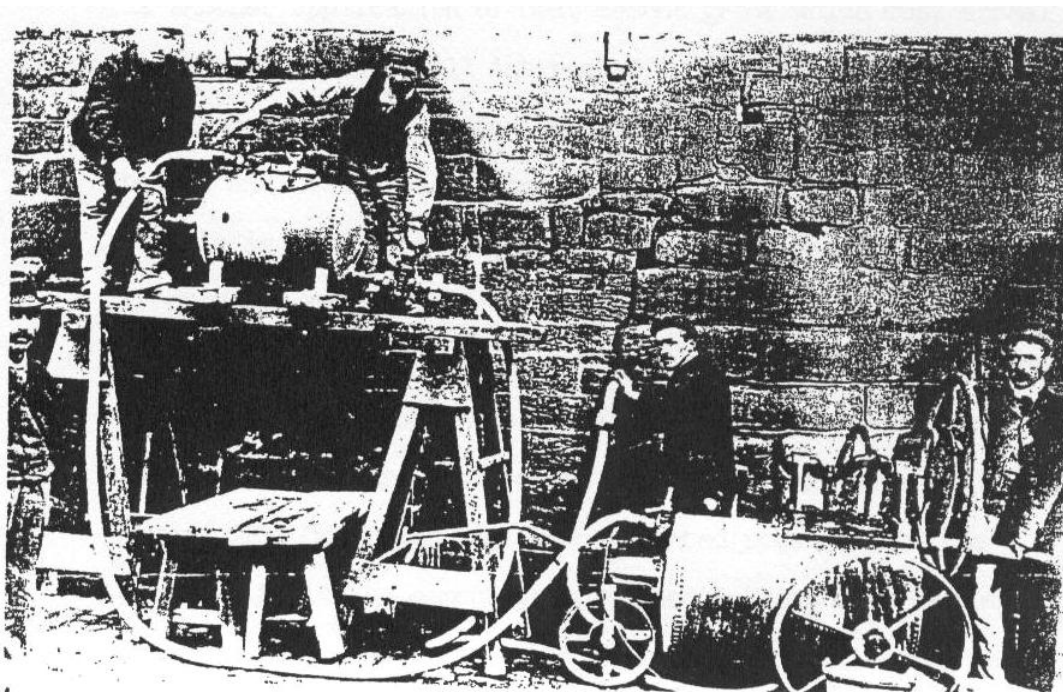


Εικόνα 3. Εφαρμογή ενεμάτων στη γέφυρα Tours στη Γαλλία το 1835.

⁵ Πηγή: Μιλτιάδου Α., «Γενική παρουσίαση της εφαρμογής των ενεμάτων για επισκευή λιθοδομών», 1991

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 περασμένου 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 4. 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 των τσιμεντενεμάτων 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 των τσιμεντενεμάτων 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.

Ειδικά για την εφαρμογή της μεθόδου σε λιθοδομές, δεν υπήρξαν δυστυχώς πολλές ειδικές έρευνες.⁶

3.2. Κατηγορίες ενεμάτων

3.2.1. Διαχωρισμός ενεμάτων ανάλογα με την σύνθεσή τους

Τα ενέματα μπορούν να διακριθούν με διάφορους τρόπους. Σε κάθε περίπτωση ο διαχωρισμός τους γίνεται βάσει των πιο σημαντικών χαρακτηριστικών των υλικών, τα οποία αποτελούν το ένεμα. Κανένα όμως από τα υπάρχοντα κριτήρια δεν περιγράφει πλήρως τα υλικά και τις ιδιότητές 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. Χρησιμοποιήθηκε ευρέως στις αρχές του 20ου αιώνα, όταν άρχισε η χρήση των χημικών ενεμάτων.

β. Οργανικά και ανόργανα ενέματα. Η διάκριση αυτή βασίζεται στην χημική σύσταση του συνδετικού υλικού. Προτάθηκε απ' τον G.K. Jone's, 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.⁷

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

⁶ Πηγή: Μπούντα Ο., «Η εφαρμογή των ενεμάτων στην αποκατάσταση των μνημείων», Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2007

⁷ Πηγή: «Τεχνικές Προδιαγραφές και απαιτούμενος Εξοπλισμός για το σχεδιασμό και την Εφαρμογή των Ενεμάτων», Διεύθυνση Τεχνικών Έργων Αναστήλωσης, ΥΠΠΟ

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.⁸



5



6, 7



8

Εικόνες 5, 6, 7, 8. 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.⁸

Η ανάπτυξη συνάφειας του ενέματος με τα υλικά επί τόπου είναι μια 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.

Τα πειράματα μέτρησης εφελκυστικής αντοχής, που πραγματοποιήθηκαν σε μια σειρά δοκιμών αποτελούμενων από ασβεστολιθικά λιθώματα 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 κόνιας που συνήθως είναι ένα τσιμέντο ή υδραυλική άσβεστος και η οποία μετά την σκλήρυνσή της συντηρείται σε νερό ή σε περιοδικά υγραινόμενο 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.

Η χρήση τους ενδείκνυται για επισκευή παλαιών λιθοδομών και ρηγματωμένων ολόσωμων λίθινων αρχιτεκτονικών μελών υπό την προϋπόθεση σωστού σχεδιασμού, τόσο ως προς τη διεισδυτικότητα όσο και ως προς τη συμβατότητα με τα υπάρχοντα υλικά.

⁸ Πηγή: Μιλτιάδου Α., «Γενική παρουσίαση της εφαρμογής των ενεμάτων για επισκευή λιθοδομών», 1991

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 φρέσκο, καθαρό και να μην περιέχει συστατικά που θα μπορούσαν να προκαλέσουν δυσμενείς επιπτώσεις επί της αντοχής της ανθεκτικότητας του ενέματος.

Υδράβεστος

Η υδράβεστος θα είναι σε μορφή σκόνης και θα διέρχεται σε ποσοστό περίπου 100% από κόσκινο διαμέτρου οπής 0,075 mm και το μεγαλύτερο ποσοστό των κόκκων (~90%) θα διέρχεται από το κόσκινο διαμέτρου οπής 0,045 mm, θα έχει ομοιόμορφο χρώμα και θα προσκομίζεται συσκευασμένη σε στεγασμένους, απόλυτα ξηρούς χώρους.

Η υδράβεστος 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 υδράβεστος 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.

Σημειώνεται ότι η ποζολάνη πρέπει σε κάθε περίπτωση να έχει χρώμα λευκό ή υπόλευκο και δείκτη ποζολανικότητας τουλάχιστον 5MPa (σύμφωνα με το ΠΔ 244/80), να είναι απαλλαγμένη από υδατοδιαλυτά αλκάλια, ενώ τα διαθέσιμα αλκάλια δεν πρέπει να υπερβαίνουν το 2% κατά ASTM 618.

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 CaCl₂ ως ποσοστό του βάρους του πρόσθετου.
- Αν το πρόσθετο δημιουργεί φυσαλίδες αέρα.
- Τυπική δοσολογία και επιπτώσεις σε περίπτωση μεγαλύτερης δόσης.
- Την περιεκτικότητα σε θεικές ρίζες (τα πρόσμικτα δεν πρέπει να περιέχουν θεικές ρίζες)
- Λεπτομερείς οδηγίες χρήσεως.
- Τον επιτρεπόμενο χρόνο αποθήκευσης και οδηγίες για τις απαιτούμενες συνθήκες αποθήκευσης.

Επίσης δεν θα έχουν δευτερογενείς επιπτώσεις στο χρόνο πήξεως, στις αντοχές και στο τελικό χρώμα του μίγματος. 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.⁹

3.3. Μίγματα ενεμάτων

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. Αν και προσδίδουν αύξηση της θλιπτικής αντοχής, υπάρχει πραγματικός κίνδυνος με τη χρήση τσιμεντενεμάτων. Μεγάλες ποσότητες αυτού του είδους ενεμάτων δημιουργούν σημαντικά προβλήματα στις παλιές τοιχοποιίες από λιθοδομή εξαιτίας του σχηματισμού μερικώς διαλυτών υλικών όπως υδροξείδιο του ασβεστίου και νατρίου, από την αντίδραση τοποθέτησης.¹⁰

Τα υλικά αυτά προκαλούν σκουρόχρωμους λεκέδες, εξανθήματα 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.

⁹ Πηγή: «Τεχνικές Προδιαγραφές και απαιτούμενος Εξοπλισμός για το σχεδιασμό και την Εφαρμογή των Ενεμάτων», Διεύθυνση Τεχνικών Έργων Αναστήλωσης, ΥΠΠΟ

¹⁰ Πηγή: Παπαποστόλου Δ., «Ενέματα και Κονιάματα σε μνημεία», Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2005

Όνομασία μείγματος	Τσιμέντο	Ποζολάνη	Κρυσταλλική άμμος	Ασβεστολιθική άμμος	Υδροφοβο πρόσθετο	Νερό*	Θλιπτική αντοχή(MPa)
N	90	10	(-)	(-)	(-)	57	35.7
NV	90	10	(-)	(-)	10	65	16.4
O	45	10	45	(-)	(-)	53	15.5
OV	45	10	45	(-)	10	56	16.3
P	45	10	(-)	45	(-)	60	16
PV	45	10	(-)	45	10	67	13.8
R	30	10	60	(-)	(-)	52	11.8
RV	30	10	60	(-)	10	59	11.8
S	30	10	(-)	60	(-)	58	6.1
SV	30	10	(-)	60	10	65	7.5

*επί % του συνόλου

Πίνακας 1. Σύνθεση τυπικών μιγμάτων για ενέματα λιθοδομών, επί % της μάζας.

Από τα δεδομένα του πίνακα, διαπιστώνεται ότι αλλάζοντας τη σύνθεση του μίγματος με την προσθήκη υδροφόρων πρόσθετων και αντικαθιστώντας το τσιμέντο με αδρανή υλικά, μειώνεται σημαντικά η θλιπτική αντοχή του αρχικού μίγματος. Ωστόσο έχει διαπιστωθεί πειραματικά ότι η αντοχή του ενέματος δεν επηρεάζει την πλευρική αντίσταση της λιθοδομής.

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 διαρκεί 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 μιγμάτων. Αυτά είναι κατάλληλα για ένα ευρύ φάσμα λειτουργιών και εξειδικευμένοι προμηθευτές συνιστούν αυτά τα ενέματα για συγκεκριμένες καταστάσεις.

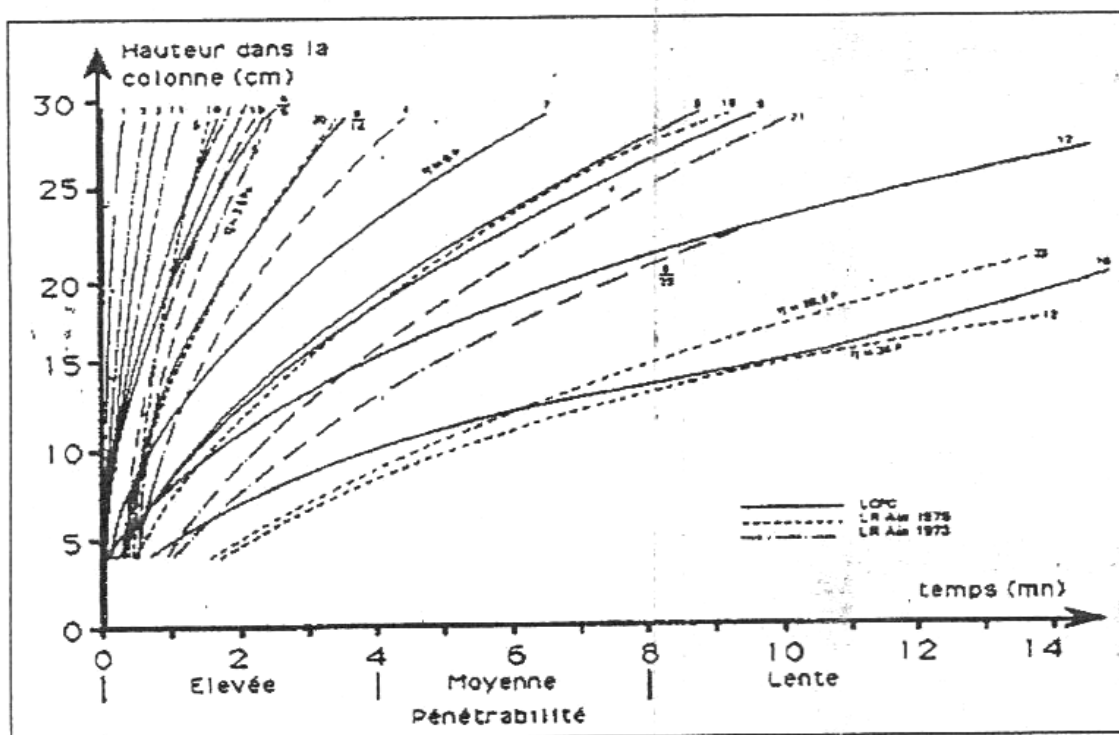
Για τυπικά κενά πλήρωσης σε ιστορικούς ιστούς, ένα προ-αποθηκευμένο μίγμα ασβέστη (1) : τέφρας (2) : μπετονίτη (½) είναι συχνά κατάλληλο.

Ένα υψηλότερης αντοχής ένεμα θα μπορούσε να είναι τσιμέντο χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο(1): ασβέστης(2) : ιπτάμενης τέφρας (1). Οι τυπικοί λόγοι στερεών προς το νερό είναι 1:3 ή 1:4. Πιο πολύπλοκα και πιο σύνθετα ενέματα παρασκευάζονται κατόπιν συνεργασίας.

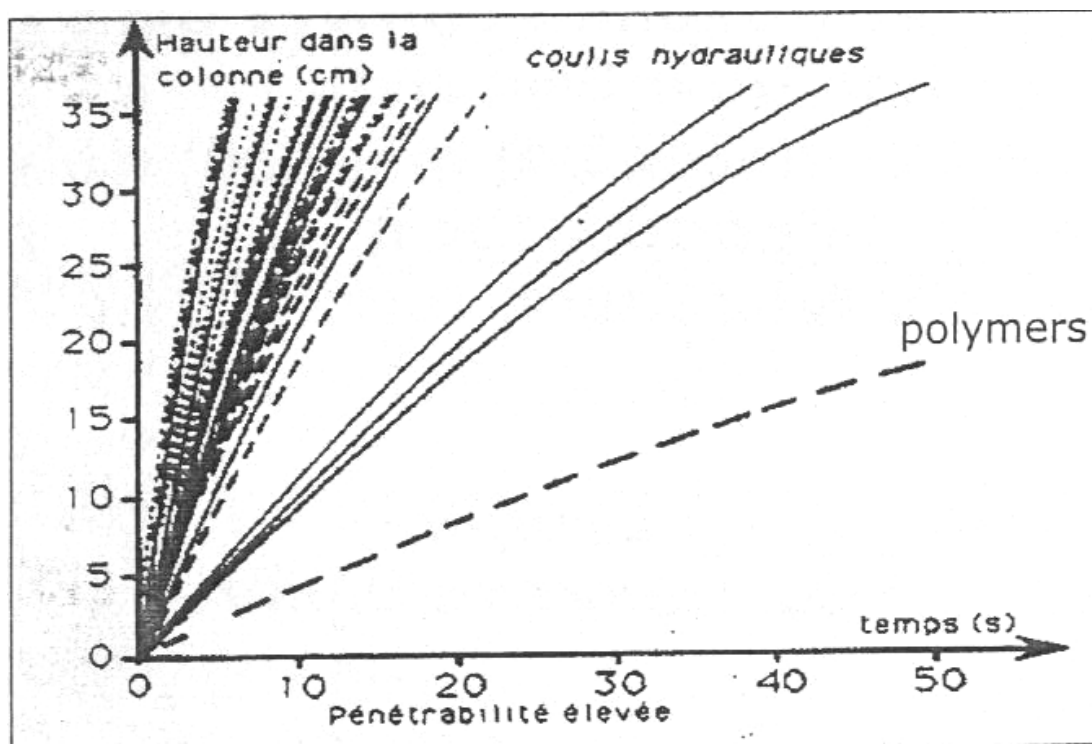
Συνδυασμός τσιμέντου με λεπτόκοκκα υλικά

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.

Επιπλέον τα υδραυλικά ενέματα που προκύπτουν έχουν ενεσιμότητα η οποία είναι συγκρίσιμη, αν όχι καλύτερη από αυτή των πολυμερών.



Γράφημα 1. Καμπύλες διεισδυτικότητας εποξειδικών ρητινών.



Γράφημα 2. Καμπύλες διεισδυτικότητας υδραυλικών ενεμάτων.

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 άσβεστος, 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 < των 32 μικρών στην περίπτωση που το ένεμα πρέπει να διεισδύσει σε ρωγμές εύρους 0,1-0,2mm, και < 64 μικρών στην περίπτωση ρωγμών εύρους 0,2-0,4 mm. Ως λεπτόκοκκο υλικό χρησιμοποιείται συνήθως συνδυασμός υδρασβέστου σε σκόνη και φυσικής ή τεχνητής ποζολάνης. Το ακριβές ποσοστό και η μεταξύ τους αναλογία, όπως προαναφέρθηκε, 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.¹¹

3.3.1. Υδραυλική άσβεστος

Γενικά

Η υδραυλική άσβεστος παρασκευάζεται με όπτηση από ασβεστολιθικά πετρώματα με αυξημένη περιεκτικότητα σε οξείδια του αργιλίου και του πυριτίου. Η περιεκτικότητα σε άργιλο είναι 10÷15%. Η όπτηση γίνεται σε συνηθισμένα ασβεστουργικά 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 οξείδια αυτά είναι οι υδραυλικοί συντελεστές της κονίας.

Φυσικές ιδιότητες της υδραυλικής ασβέστου

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

¹¹ Πηγή: «Τεχνικές Προδιαγραφές και απαιτούμενος Εξοπλισμός για το σχεδιασμό και την Εφαρμογή των Ενεμάτων», Διεύθυνση Τεχνικών Έργων Αναστήλωσης, ΥΠΠΟ

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 κονιάς. 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 CO_2 της ατμόσφαιρας και οδηγεί στο σχηματισμό CaCO_3 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 άσβεστος 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. Τα κονιάματα της υδραυλικής ασβέστου έχουν αντικατασταθεί από τα τσιμεντοκονιάματα.¹²

3.4. Ιδιότητες των ενεμάτων

Γενικά

Για να προσδιοριστούν οι επιθυμητές ιδιότητες του ενέματος θα πρέπει να έχει διασαφηνιστεί ο ιδιαίτερος ρόλος που καλείται αυτό να παίξει μέσα στη μάζα της λιθοδομής, ο οποίος είναι να αποκαταστήσει τη συνέχεια της και την συνεργασία των επί μέρους στοιχείων της.

Παρόλο που το ένεμα είναι ένας τύπος κονιάματος που καταλαμβάνει θέσεις όπου θεωρητικά θα έπρεπε να υπάρχει το αρχικό κονίαμα δομήσεως της λιθοδομής, διαφέρει από αυτό ριζικά διότι:

1. Το κονίαμα δομήσεως μπορεί να είναι απλώς εργάσιμο γιατί εφαρμόζεται μαζικά και κατά στρώσεις ενώ το ένεμα εφαρμόζεται σε πολύ μικρές ποσότητες και πρέπει να έχει την δυνατότητα να εισάγεται μέσα σε μια ήδη υπάρχουσα δομή και σε χώρους δυσπρόσιτους (ενεσιμότητα).

2. Οι συνθήκες πήξεως ενέματος και κονιάματος είναι διαφορετικές.

3. Υπάρχει η πρόσθετη απαίτηση το ένεμα να συνεργαστεί, όχι μόνο με τις πέτρες ή τους πλίνθους της τοιχοποιίας, αλλά και με το ήδη υπάρχον παλαιό κονίαμα δομής.

Έτσι θα πρέπει να τονιστεί ότι όταν αναφέρεται η έννοια συμβατότητα του ενέματος με το κονίαμα δομήσεως δεν υπονοείται μια σύνθεση ενέματος πανομοιότυπη με του αρχικού κονιάματος, αλλά μια νέα σύνθεση που είναι ικανή να επιτύχει την καλύτερη δυνατή συνεργασία με όλα τα ήδη υπάρχοντα στοιχεία της λιθοδομής.

¹² Πηγή: Κορωνάιος Α., Πουλάκος Γ., Τεχνικά Υλικά Τόμος 1, ΕΜΠ, Αθήνα 2006

Οι επιθυμητές ιδιότητες που ακολουθούν, αποτελούν ένα προσχέδιο συζήτησης για την σύνταξη προδιαγραφών και έχουν ταξινομηθεί σύμφωνα με τις τρεις βασικές χρονικές φάσεις του ενέματος.

Ένεμα σε υγρή κατάσταση

1. Πρέπει να είναι αρκετά ρευστό καθ' όλη την διάρκεια της ενέσεως ώστε να μπορεί να εισχωρήσει και να γεμίσει τα κενά με την χρήση χαμηλών πιέσεων χωρίς διατάραξη της καταπονημένης λιθοδομής.
2. Η πήξη του δεν πρέπει να επηρεάσει καθόλου την διενέργεια της ένεσης.

Ένεμα κατά την διάρκεια της πήξης του

1. Πρέπει να αποκτήσει μία ελάχιστη διατμητική αντοχή σε εύλογο χρόνο ώστε να μπορέσει να αντισταθεί στις δυνάμεις βαρύτητας και στις υδραυλικές πιέσεις που τείνουν να το μετακινήσουν.
2. Το μείγμα πρέπει να διατηρεί την σταθερή σύνθεση μέχρι την πήξη του.
3. Δεν πρέπει να γίνουν ανεπιθύμητες φυσικοχημικές αντιδράσεις ανάμεσα στα συστατικά του ενέματος κι αυτών της λιθοδομής.
4. Η συστολή ξήρανσης πρέπει να αποφευχθεί.
5. Η πήξη του ενέματος δεν πρέπει να επηρεάζεται από τον βαθμό υγρασίας της λιθοδομής ή από την απουσία αέρα.
6. Ο χρόνος πήξης πρέπει να είναι εύλογος και αξιόπιστος.
7. Το ένεμα δεν πρέπει να εκλύει τοξικά ή επικίνδυνα προϊόντα κατά την διάρκεια της πήξης.

Ένεμα μετά την στερεοποίηση

1. Η μηχανική αντοχή του δεν πρέπει να είναι του ίδιου επιπέδου περίπου με αυτή του υπάρχοντος κονιάματος, εκτός αν για ειδικούς λόγους απαιτείται μεγαλύτερη ή μικρότερη.
2. Το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος του Poisson και ο συντελεστής θερμικής διαστολής πρέπει να προσεγγίζουν αυτά της λιθοδομής.
3. Πρέπει να επιτευχθεί ικανοποιητική αντοχή συνάφειας με τα υπάρχοντα υλικά ανεξάρτητα από την παρουσία υγρασίας, ξηρασίας, σκόνης κλπ.
4. Οι αποκτηθείσες μηχανικές ιδιότητες πρέπει να διατηρούνται στο χρόνο.
5. Ο όγκος του ενέματος δεν πρέπει να επηρεάζεται από την υγρασία.
6. Το πορώδες και η κατανομή των πόρων θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μην επηρεάζουν την ομαλή κυκλοφορία της υγρασίας στην λιθοδομή.
7. Ο σχηματισμός διαλυτών αλάτων κατά την διάρκεια της πήξης πρέπει να αποφεύγεται ή να μειώνεται στο ελάχιστο.¹³

¹³ Πηγή: Μιλτιάδου Α., «Η χρήση των ενεμάτων ως μέθοδος επισκευής και ενίσχυσης λιθοδομών», Πρακτικά Διεθνούς Συμποσίου Θεσσαλονίκης, 1985

	Διαλύματα	Αιωρήματα	Κονιόματα
Πριν την πήξη	Χρόνος πήξης, πυκνότητα, pH επιφανειακή τάση εφελκυσμού, χρόνος πήγματος, ιξώδες, συνοχή, θιξοτροπία	Χρόνος πήξης, πυκνότητα, pH, κοκκομετρική διαβάθμιση, ιξώδες, συνοχή, διαρροή, θιξοτροπία, ικανότητα κατακράτησης νερού	Χρόνος πήξης, πυκνότητα, pH, κοκκομετρική διαβάθμιση, ιξώδες, εργασιμότητα, ικανότητα κατακράτησης νερού
Μετά την πήξη	Σκλήρυνση μετά την πήξη, τελική αντοχή, pH, παραμορφωσιμότητα, ανθεκτικότητα, συστολικότητα, διασταλτικότητα, διατμητική αντοχή, συναίρεση (πυριτικά διαλύματα)	Χρόνος σκλήρυνσης, τελική αντοχή, παραμορφωσιμότητα, ανθεκτικότητα, συστολικότητα, διασταλτικότητα, πυκνότητα, διατμητική αντοχή	Χρόνος σκλήρυνσης, τελική αντοχή, παραμορφωσιμότητα, ανθεκτικότητα, συστολικότητα, διασταλτικότητα,

Πίνακας 2. Κύριες παράμετροι που ορίζουν τις ιδιότητες των ενεμάτων πριν και μετά την πήξη.

3.5. Ανάλυση των ιδιοτήτων των ενεμάτων

3.5.1. Ενεσιμότητα

Οι τρεις βασικές ιδιότητες των ενεμάτων στην υγρά 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.¹⁴

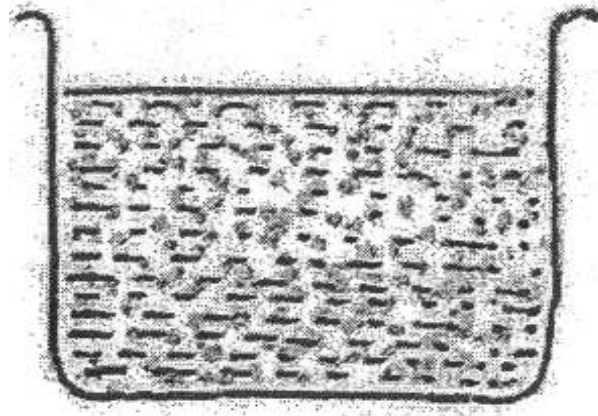
Σταθερότητα

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.

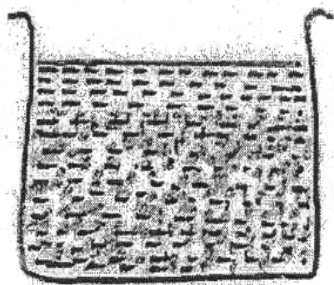
¹⁴ Πηγή: Μιλτιάδου Α., «Η χρήση των ενεμάτων ως μέθοδος επισκευής και ενίσχυσης λιθοδομών», Πρακτικά Διεθνούς Συμποσίου Θεσσαλονίκης, 1985



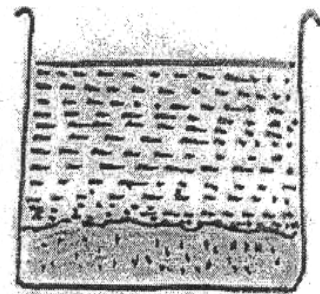
Εικόνα 9. Ένεμα σταθερό

Β) 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.

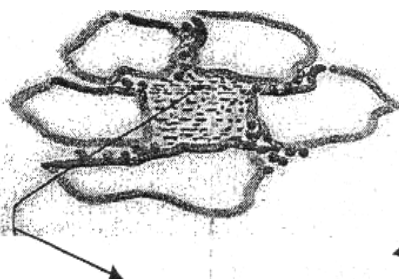


Εξίδρωση >5

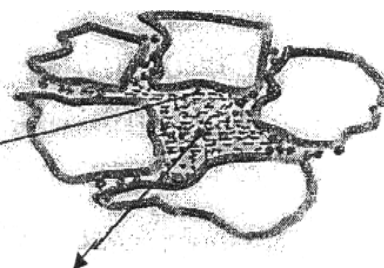


(β) Απόμικση

(α)



Κενά μετά την εξάτμιση



Ετερογενείς ιδιότητες

Εικόνα 10. Ένεμα μη σταθερό (α) εξίδρωση >5% και (β) οι 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.¹⁵

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 100 ml, διαμέτρου 25 mm και ύψους 25 cm και αφήνεται εν ηρεμία σκεπασμένος σε χώρο σκιερό επί τρεις(3) ώρες. Η σταθερότητα εκφράζεται ως το ποσοστό του όγκου του νερού που εξιδρώνει μετά την πάροδο τριών(3) ωρών 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.¹⁶



Εικόνα 11. Έλεγχος σταθερότητας

Ρευστότητα

Με τον όρο ρευστότητα εννοούμε την δυνατότητα ροής του ενέματος υπό συγκεκριμένες φυσικά συνθήκες. Τα ενέματα κατατάσσονται, όσων 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 :

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

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

¹⁵ Πηγή: Μιλτιάδου Α., «Η μέθοδος των υδραυλικών ενεμάτων για την επισκευή και ενίσχυση παλιών κατασκευών από λιθοδομή», Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα, Ιούνιος 2004

¹⁶ «Τεχνικές Προδιαγραφές και απαιτούμενος Εξοπλισμός για το σχεδιασμό και την Εφαρμογή των Ενεμάτων», Διεύθυνση Τεχνικών Έργων Αναστήλωσης, ΥΠΠΟ

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:

$$\tau = \tau_0 + \eta * \dot{\epsilon} \quad \text{όπου } \eta \rightarrow \text{πλαστικό ιξώδες}$$

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 θρόμβωσης

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.¹⁷

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 1 lt. και ονομάζεται φαινόμενο ιξώδες. Συνήθως η διάμετρος του στομίου εξόδου είναι 4mm για ενέματα χωρίς άμμο και 10 mm για ενέματα με άμμο.



12



13

Εικόνες 12, 13. 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 500 ml του ενέματος από των κώνο διαμέτρου οπής 4mm ή 10mm είναι 30- 45 sec και 13-25 sec, αντίστοιχα.¹⁸

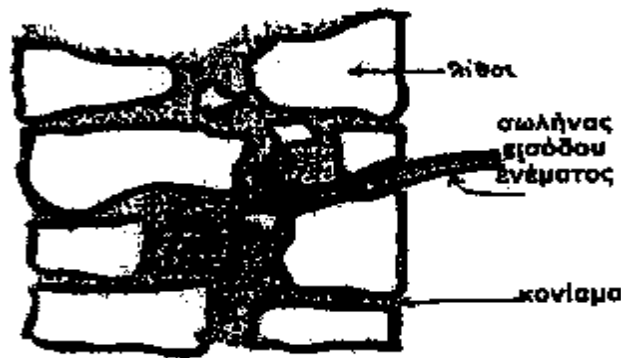
¹⁷ Πηγή: Μιλτιάδου Α., «Γενική παρουσίαση της εφαρμογής των ενεμάτων για επισκευή λιθοδομών», 1991

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 1-2 mm. 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 14. 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.

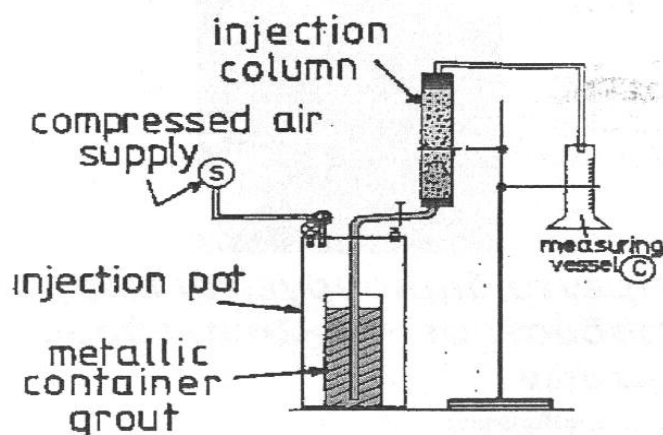
Ο λόγος αυτός διακυμαίνεται στην βιβλιογραφία μεταξύ 1,5 και 15. Η διαφορά στην εκτίμηση της τιμής του λόγου αυτού οφείλεται στην μεγάλη ποικιλία των προς επισκευή υλικών (εδάφη, σκυρόδεμα, λιθοδομές κλπ.), στην δυσκολία αναπαραγωγής τους σε συνθήκες εργαστηρίου και στο ότι συχνά η έρευνα συσχετιζόταν 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 200 μm, βλέπουμε ότι το ένεμα που αντιστοιχεί στο τσιμέντο αυτό δεν μπορεί να διεισδύσει σε ρωγμή εύρους 2-3 mm. Αν επίσης, θεωρήσουμε ότι το ένεμα περιέχει και άμμο με κόκκους διαμέτρου περίπου 1 mm τότε αυτό το όριο γίνεται ακόμα μεγαλύτερο, περίπου 1cm. Στην περίπτωση των λιθοδομών καταλαβαίνουμε εύκολα ότι οι λεπτές

¹⁸ Πηγή: «Τεχνικές Προδιαγραφές και απαιτούμενος Εξοπλισμός για το σχεδιασμό και την Εφαρμογή των Ενεμάτων», Διεύθυνση Τεχνικών Έργων Αναστήλωσης, ΥΠΠΟ

ρωγμές παίζουν ένα ιδιαίτερο ρόλο στην επιτυχία της ενέσεως καθώς αποτελούν για το ένεμα θέσεις υποχρεωτικής διέλευσης.¹⁹

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



Εικόνα 15. 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 γνωστής διαβάθμισης 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 άσβεστο 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 άσβεστο 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.

¹⁹ Πηγή: Μιλτιάδου Α., «Γενική παρουσίαση της εφαρμογής των ενεμάτων για επισκευή λιθοδομών», 1991

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 απόμικση.

3.5.2. 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 διύγρυνση 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.²⁰

3.5.3. Μηχανικά χαρακτηριστικά

Οι μηχανικές ιδιότητες του ενέματος, ο οποίες πρέπει να είναι συμβατές με τα υλικά της υπάρχουσας τοιχοποιίας και να έχουν υψηλή διεισδυτικότητα δεν μπορούν ακόμα να καθοριστούν με ποιοτικό τρόπο. Μια ποσοτική προσέγγισή τους έχει ήδη προταθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο όπου αναφέρονται ο επιθυμητές ιδιότητες των ενεμάτων.²¹

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 ανεμπόδιση 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

²⁰ Πηγή: Μιλτιάδου Α., «Η χρήση των ενεμάτων ως μέθοδος επισκευής και ενίσχυσης λιθοδομών», Πρακτικά Διεθνούς Συμποσίου Θεσσαλονίκης, 1985

²¹ Πηγή: Μιλτιάδου Α., «Grouting as a method for the repair of masonry Monuments», Εργασία για Μ.Α., IAAS, Πανεπιστήμιο του York, 1985

διάφορα υλικά της λιθοδομής και να επιτύχει την αποκατάσταση ή ενίσχυση της μηχανικής αντοχής της.

Τα πειράματα μέτρησης εφελκυστικής αντοχής, που πραγματοποίησε η Πολιτικός Μηχανικός της Διεύθυνσης Τεχνικών Ερευνών Αναστήλωσης του ΥΠ.ΠΟ. κ. Μιλτιάδου – Fezans A. και οι συνεργάτες της, σε μια σειρά δοκιμών αποτελούμενων από ασβεστολιθικά λιθοσώματα και υδραυλικά ενέματα, απέδειξαν ότι τα ενέματα αυτά έχουν πολύ καλή αντοχή συνάφειας.

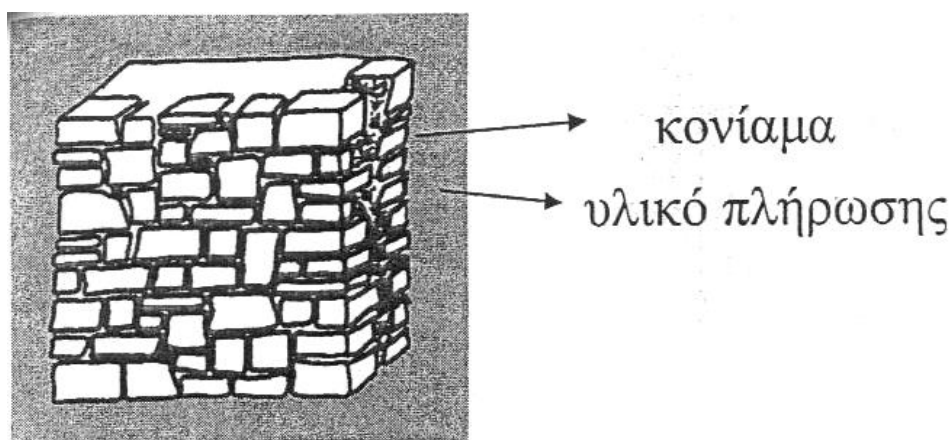
Οι αντοχές σε εφελκυσμό που μετρήθηκαν κυμαίνονται από 0,5-4 MPa πράγμα που αποδεικνύει την πολύ καλή αντοχή συνάφειας. Επίσης, μέσω των πειραμάτων αυτών, αποδείχτηκε ότι ανάμεσα στον πολύ μεγάλο αριθμό παραγόντων που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της συνάφειας, πρέπει να δοθεί μια ιδιαίτερη προσοχή στις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

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 σειρά πειραμάτων από την κ. Μιλτιάδου και τους συνεργάτες της, σε δοκίμια από λιθοσώματα και υδραυλικά ενέματα με βάση το τσιμέντο και λεπτόκοκκα για την εκτίμηση του βαθμού επισκευής μετά από την διενέργεια ενέσεων α) του κονιάματος δομής και β) του υλικού πληρώσεως.

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. Έτσι το μέτρο ελαστικότητας του κονιάματος διπλασιάζεται μετά την επισκευή, ενώ η αντοχή του, σε μονοαξονική θλίψη, περίπου τετραπλασιάζεται.

Η αύξηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών πληρώσεως είναι ακόμη πιο θεαματική. Στην περίπτωση αυτή το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή μπορούν και να δεκαπλασιαστούν ανάλογα με την ποιότητα του αρχικού υλικού.



Εικόνα 16. Τοιχοποιία αποτελούμενη από λίθους και αρμούς κονιάματος

Όσον αφορά την εκτίμηση του βαθμού επισκευής χάριν των ενεμάτων του συνόλου της λιθοδομής, στα πλαίσια του ίδιου ερευνητικού προγράμματος, πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε τοιχοποιίες από οπτοπλινθοδομή (κλίμακα 1/2) στο Πολυτεχνείο του Μιλάνου και σε τοιχοποιίες από λιθοδομή (κλίμακα 1/2 και 1/1) στην έδρα «Οπλισμένου Σκυροδέματος» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στην Αθήνα.

Τα αποτελέσματα της έρευνας που πραγματοποιήθηκε στο Πολυτεχνείο του Μιλάνου, επιβεβαίωσαν την υψηλή διεισδυτικότητα αυτών των ενεμάτων με βάση το τσιμέντο – λεπτόκοκκα υλικά και τις καλές ιδιότητες συνάφειας που μπορούν να αναπτύξουν. Η χρήση αυτών των ενεμάτων επέτρεψε όχι μόνο την επισκευή αλλά και την ενίσχυση της τοιχοποιίας καθώς η αντοχή των δοκιμών σε μονοαξονική θλίψη διπλασιάστηκε.²²

3.5.4. Ορθολογικά κριτήρια για το σχεδιασμό των υδραυλικών ενεμάτων

Γενικά

Η εφαρμογή κατάλληλων υδραυλικών ενεμάτων αποτελεί πλέον μια συνήθη πρακτική για την επισκευή και ενίσχυση ρηγματωμένων και αποδιοργανωμένων αρχιτεκτονικών μελών ή κατασκευών από παλαιές λιθοδομές, ιδιαίτερα σε σεισμογενείς περιοχές. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται επίσης για την επί τόπου στερέωση τοιχογραφικού και ψηφιδωτού διακόσμου, ώστε να αποφεύγεται σε πολλές περιπτώσεις η αποτοίχιση και η επανατοποθέτησή του. Πρόκειται για μια μέθοδο η οποία μπορεί να είναι τεχνικά αποτελεσματική και ταυτόχρονα ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα από την άποψη των αναστηλωτικών αρχών, καθώς διαθέτει το μεγάλο πλεονέκτημα να μπορεί (σε συνδυασμό με το βαθύ αρμολόγημα) να εξασφαλίζει εκ νέου τη συνέχεια, συνοχή και αντοχή των αρχιτεκτονικών μελών ή του συνόλου των κατασκευών, χωρίς αλλοίωση της εξωτερικής μορφής και γεωμετρίας τους και χωρίς αλλαγή του δομικού συστήματός τους.

Δεδομένου όμως ότι πρόκειται για μια επέμβαση που δεν είναι αναστρέψιμη, τόσο το ένεμα όσο και ο τρόπος εφαρμογής του θα πρέπει να σχεδιασθούν κατάλληλα έτσι ώστε να ικανοποιούνται όλες οι απαιτήσεις επιτελεστικότητας. Δηλαδή, αφενός να εξασφαλισθεί η υψηλή ενεσιμότητα του ρευστού ενέματος και η πλήρωση των ρωγμών και κενών υπό χαμηλή πίεση (χωρίς περαιτέρω διαταραχή της υπό επισκευή κατασκευής) και αφετέρου να επιτευχθεί, μέσω της στερεοποίησης του ενέματος, η βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών και της ανθεκτικότητας της κατασκευής, χωρίς δευτερογενείς βλαπτικές επιπτώσεις στη συνολική συμπεριφορά της εξασφαλίζοντας έτσι την αρχή της επανεπεμβασιμότητας.

Η σύγχρονη ικανοποίηση των πιο πάνω απαιτήσεων επιτελεστικότητας επηρεάζεται από παραμέτρους που είναι ανταγωνιστικές μεταξύ τους. Επομένως είναι αναγκαία η συνολική και ορθολογική θεώρηση του θέματος.

Απαιτείται λοιπόν μια συγκεκριμένη μεθοδολογία για τον τρόπο με τον οποίο, λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα της υπάρχουσας κατάστασης (τις ιδιότητες των υλικών δομήσεως και της λιθοδομής ως συνόλου, τη γεωμετρία, την ύπαρξη ή όχι διακόσμου, την παθολογία τα διαθέσιμα υλικά κλπ), θα επιτυγχάνονται οι στόχοι της επέμβασης, όπως αυτοί θα τίθεται από τη γενικότερη μελέτη δομητικής και αρχιτεκτονικής αποκατάστασης της υπό επισκευή κατασκευής, δηλαδή τις απαιτήσεις ως προς τα επιδιωκόμενα δια της επισκευής φυσικοχημικά, μηχανικά, αισθητικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά.

²² Πηγή: Μιλτιάδου Α., «Γενική παρουσίαση της εφαρμογής των ενεμάτων για επισκευή λιθοδομών», 1991

Η ορθολογική προσέγγιση του όλου θέματος, μέσω συγκεκριμένης μεθοδολογίας και κριτηρίων σχεδιασμού, είναι πολύ σημαντική, καθώς δίνει την δυνατότητα τεκμηρίωσης όλων των επιμέρους βημάτων και αποφάσεων και εξεύρεση εναλλακτικών λύσεων ανάλογα με τα εκάστοτε δεδομένα. Λόγω δε της μεγάλης ποικιλίας των δεδομένων της υπάρχουσας κατάστασης (πλήθος διαφορετικών υλικών, τύπων κατασκευών, παθολογίας, περιβάλλοντος, διατιθέμενων υλικών για την επισκευή, κλπ.), η έλλειψη ορθολογισμού και η ανεξέλεγκτη χρήση συνταγών ή η διατύπωση προτάσεων για έτοιμες συνθέσεις ενεμάτων που μπορούν τάχα να λύσουν όλα τα προβλήματα (και είναι δυστυχώς ακόμη και σήμερα μια συνήθης πρακτική), μπορεί να είναι μια εύκολη και γρήγορη λύση, ενέχει όμως σημαντικούς κινδύνους για το τελικό αποτέλεσμα.²³

Βασικά δεδομένα που επηρεάζουν τον σχεδιασμό

Απαιτούμενες έρευνες και μελέτες για τον σχεδιασμό της σύνθεσης και της διαδικασίας εφαρμογής των ενεμάτων.²⁴

Για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο σχεδιασμός του ενέματος θα πρέπει να έχουν καθοριστεί οι στόχοι της επέμβασης και να έχουν ερευνηθεί τα δεδομένα της υπάρχουσας κατάστασης, της υπό επισκευής λιθοδομής. Οι στόχοι αφορούν τις απαιτούμενες ιδιότητες της λιθοδομής μετά της επέμβαση (φυσικές, χημικές, μηχανικές, αισθητικές, λειτουργικές).

Τα δεδομένα της υπάρχουσας κατάστασης είναι:

- Αναγνώριση του τρόπου δομήσεως του εσωτερικού της κατασκευής και εκτίμηση του ποσοστού των κενών και του εύρους των ρωγμών.

Μελέτη συμπεριφοράς του φέροντος οργανισμού και καθορισμός των επιθυμητών αντοχών του ενέματος:

- Εκτίμηση αντοχής ενεμάτων
- Επέμβαση στο σύνολο του ή σε τμήμα της κατασκευής ή του αρχιτεκτονικού μέλους.

Τεκμηρίωση και έρευνα:

- Καθορισμός ειδικών απαιτήσεων λόγω διακόσμου ή άλλων δεδομένων αισθητικής αποκατάστασης.

Μελέτη σύνθεσεως ενεμάτων βασισμένη σε βιβλιογραφία και εργαστηριακές δοκιμές:

- Έρευνα αγοράς και επιλογή κατάλληλων υλικών. Είναι απαραίτητη η πραγματοποίηση ελέγχου των χαρακτηριστικών τους, ελλείψει προτυποποίησης.
- Καθορισμός χαρακτηριστικών προτεινόμενης σύνθεσης ως προς αναλογίες, φαινόμενο ιξώδες, εξίδρωση, καθίζηση, χρόνο διελεύσεως σε στήλη άμμου, χρόνο πήξεως, αντοχές, πορώδες, συστολή ξηράνσεως.
- Καθορισμός ιδιαίτερων συνθηκών εφαρμογής. Οριστικοποίηση σύνθεσεως.

Δοκιμαστική παραγωγή και εφαρμογή στο εργοτάξιο για έλεγχο και συμπλήρωση ή για διόρθωση της μελέτης:

- Καθορισμός τρόπου εφαρμογής: διάμετρος και διαστάσεις κανάβου σωληνίσκων, πίεση ενέσεως, κατανάλωση ανά m², καταλληλότητα αρμολογήματος, απώλειες ενέματος.

²³ Πηγή: Μιλτιάδου Α., Τάσιος Θ., «Ορθολογικά κριτήρια για την επισκευή και ενίσχυση των υδραυλικών ενεμάτων»

²⁴ Πηγή: Μιλτιάδου Α., «Η μέθοδος των υδραυλικών ενεμάτων για την επισκευή και ενίσχυση παλιών κατασκευών από λιθοδομή», Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα, Ιούνιος 2004

- Έλεγχος της αποτελεσματικότητας των ενέσεων στη δοκιμαστική περιοχή (πυρηνοληψία, ενδοσκοπήσεις, υπερήχους, ραντάρ, ανάλυση ενέματος).

Κριτήρια σχεδιασμού υδραυλικών ενεμάτων²⁵

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα σχετικών ερευνητικών εργασιών τα υδραυλικά ενέματα υψηλής διεισδυτικότητας πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε:

- Να είναι αιωρήματα σταθερά και επαρκώς ρευστά δηλ. ομοιογενή αιωρήματα με κατάλληλα χαρακτηριστικά ρευστότητας, τα οποία να μπορούν να ενεθούν με χαμηλή πίεση (0.5 - 1 atm) και να διατηρούν την ομοιογένειά τους από τη στιγμή της παρασκευής τους μέχρι την ολοκλήρωση της διαδικασίας εισόδου τους στο εσωτερικό των ρωγμών - κενών των λιθοδομών και την έναρξη της πήξεως, (ιδιότητες που εξαρτώνται κυρίως από τον τρόπο ανάμιξης και παρασκευής τους, την περιεκτικότητα τους σε νερό και τη χημική σύνθεση των συστατικών τους).

Σταθερό θεωρείται το ένεμα που παρουσιάζει πολύ μικρή εξίδρωση (εξίδρωση στις 3 ώρες < 5%) και δεν παρουσιάζει απόμιξη. Η ποσότητα του νερού καθορίζεται έτσι ώστε το αιώρημα να είναι σταθερό και ο χρόνος ροής του από τον κώνο MARSH (φαινόμενο ιξώδες) να είναι, για όγκο ενέματος 500ml και διάμετρο οπής εξόδου $d \sim 4.7 \text{ mm}$, $t_{ct} \sim 4.7 \text{ mm} < 45 \text{ sec}$, και για όγκο ενέματος 500 ml και διάμετρο οπής εξόδου $d \sim 2 \text{ mm}$, $t_{ct} \sim 2 \text{ mm} < 125 \text{ sec}$.

- Να διεισδύουν με ευκολία υπό χαμηλή πίεση 0.5-1.0 atm. και σε λεπτές ρωγμές (εύρους λίγων δέκατων του χιλιοστού), πράγμα που έχει κριθεί αναγκαίο προκειμένου να προσεγγισθούν, δια μέσου του αποσαθρωμένου κονιάματος δομής ή των μικρού εύρους διόδων, και να πληρωθούν κατά το μέγιστο δυνατόν, τα κενά και οι ρωγμές του εσωτερικού των επισκευαζόμενων δομικών στοιχείων (ιδιότητα που εξαρτάται από την κοκκομετρία της στερεάς φάσης του ενέματος). Επειδή είναι πολύ δύσκολο να προσομοιωθεί στο εργαστήριο μια χαρακτηριστική περίπτωση ρηγματώσεως και φθοράς της λιθοδομής με τρόπο εύκολα υλοποιήσιμο και αναπαράξιμο, για την διερεύνηση της διεισδυτικότητας ενός ενέματος χρησιμοποιείται το πείραμα ενεσιμότητας στην στήλη άμμου. Ο χρόνος διέλευσης του ενέματος από τη στήλη άμμου κατά NF P18-891 πρέπει να είναι ικανοποιητικός ($136 < 50 \text{ sec}$).

- Να έχουν εύλογο χρόνο πήξεως για να μπορεί να ολοκληρωθεί η εισαγωγή τους στο εσωτερικό των ρωγμών πριν την έναρξη της πήξης. Με την στερεοποίηση τους να προσδίδουν στο αρχικό κονίαμα και στο υλικό πληρώσεως της λιθοδομής βελτιωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά καθώς και καλύτερα χαρακτηριστικά συνάφειας των υλικών αυτών με τους λίθους. Τα μηχανικά αυτά χαρακτηριστικά διαφοροποιούνται ανάλογα με την ποιότητα της επισκευαζόμενης τοιχοποιίας και ορίζονται από την εκάστοτε μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς της επισκευαζόμενης κατασκευής, ανάλογα με τις προσδοκώμενες αντοχές της τοιχοποιίας μετά τα ενέματα.

- Να έχουν διάρκεια στο χρόνο και φυσικοχημικές ιδιότητες συμβατές με τα υλικά επί τόπου (χημική σύνθεση, πορώδες, συντελεστή θερμικής διαστολής, μεταβολή όγκου κλπ.).

Τα ενέματα με βάση τις υδραυλικές άσβεστους (σε συνδυασμό με ή χωρίς ποζολανικά υλικά) αποτελούν μια εναλλακτική λύση έναντι των σύνθετων ενεμάτων με βάση το τσιμέντο διότι οι υδραυλικές άσβεστοι είναι υλικά που μοιάζουν περισσότερο με αυτά που απαντώνται σε μια ιστορική κατασκευή, ενώ παράλληλα μπορούν να αναπτύξουν ικανοποιητικές πρώιμες αντοχές. Παρά την μεγάλη τους σπουδαιότητα, είναι λιγοστές οι εργασίες που έχουν μελετήσει συστηματικά

²⁵ Πηγή: «Τεχνικές Προδιαγραφές και απαιτούμενος Εξοπλισμός για το σχεδιασμό και την Εφαρμογή των Ενεμάτων», Διεύθυνση Τεχνικών Έργων Αναστήλωσης, ΥΠΠΟ

τέτοια ενέματα, τόσο ως προς τα ρεολογικά τους χαρακτηριστικά, όσο και ως προς την επιτελεστικότητά τους στην δομητική στερέωση των τοιχοποιιών.²⁶

²⁶ Πηγή: Valluzi M. R., “Comportamento meccanico di murature consolidate con materiali e tecniche a base di calce”, Modena, 2000

4. Φθορά

4.1. Ορισμός

Ως φθορά ορίζεται η απομείωση στο χρόνο των φυσικών, χημικών και μηχανικών ιδιοτήτων, των χαρακτηριστικών, των διαστάσεων, της συνοχής και της αισθητικής των υλικών. Τα φαινόμενα φθοράς εκδηλώνονται στις διεπιφάνειες υλικών-περιβάλλοντος ή υλικών-υλικών και είναι συνάρτηση ενδογενών και εξωγενών παραγόντων.²⁷

Κατά το Διεθνές Συμβούλιο για τη Διάβρωση, την Ευρωπαϊκή Ομοσπονδία Διάβρωσης, τους RI-LEM, ICOSMOS, UNESCO, IPAC, COIPM:

«Φθορά 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».²⁸

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 σπλισμένο 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.

Στα τέσσερα αυτά είδη μπορούν να ενταχθούν και άλλα καθώς αποτελούν υποκατηγορίες τους.

²⁷ Πηγή: Σακκή Α., «Διερεύνηση και καταγραφή των τύπων φθοράς του Αρχαίου Θεάτρου Σικυώνος», Διπλωματική Εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα 2011

²⁸ Πηγή: Σκουλικίδης Θ., «Διάβρωση και συντήρηση των δομικών υλικών των μνημείων», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο 2000

4.2. 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.²⁹



Εικόνα 22. Εξάνθιση αλάτων στα περατωτικά όρια ψηφίδων.

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.³⁰

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

²⁹ Πηγή: Σκουλικίδης Θ., «Διάβρωση και συντήρηση των δομικών υλικών των μνημείων», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο 2000

³⁰ Πηγή: Rodriguez-Navarro C., Doehne E., Sebastian E., "How does sodium sulfate crystallize? Implications for the decay and testing of building materials", Cement and Concrete Research 30 (2000) 1527- 1534

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 23. Φθορά από κρυστάλλωση αλάτων στο πορώδες των ψηφίδων.

4.2.1. Εξάνθιση αλάτων³¹

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 κινητικότητά 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,

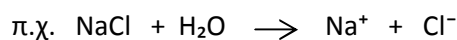
³¹ Πηγή: Borrelli E., Urland A., "Conservation of architectural heritage, historic structures and material", ICCROM, Rome, Italy 1999

υποδεικνύει την πιθανή μέθοδο συντήρησης που θα ακολουθήσουμε. Για παράδειγμα, η παρουσία νιτρικών αλάτων αποδίδεται γενικά στην διεύθυνση νερού λυμάτων ή την ύπαρξη χώρων ταφής, ενώ θειικά άλατα είναι συχνά λόγω της επίδρασης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης ιδίως στις αστικές περιοχές.

Βασικά άλατα χημείας

Ιόντα

Όταν ένα άλας διαλύεται σε νερό, αυτό διασπάται σε ιόντα.



Τα ιόντα είναι ηλεκτρικά φορτισμένα άτομα ή ομάδες ατόμων.

Αν είναι θετικά, ονομάζονται κατιόντα:

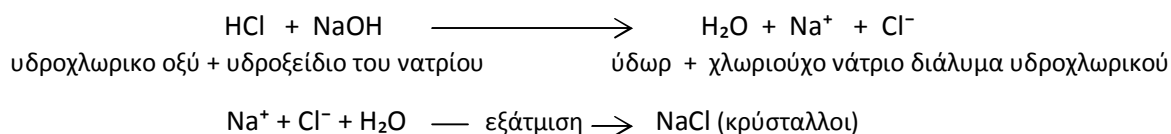
π.χ. Li^+ (λιθίου), Na^+ (νατρίου), K^+ (κάλιο), NH_4^+ (Αμμώνιο), Ca^{++} (ασβέστιο), Mg^{++} (μαγνήσιο), Fe^{+++} (σίδηρος)...

Αν είναι αρνητικά, ονομάζονται ανιόντα:

π.χ. F^- (fluoride), Cl^- (χλωρίδιο), NO_2^- (νιτρώδη), NO_3^- (νιτρικά), SO_4^{--} (θειικό άλας), CO_3^{--} (οξαλικό), PO_4^{---} (φωσφορικά) ...

Άλατα

Οι ενώσεις που σχηματίζονται από την κρυστάλλωση ενός διαλύματος που προκύπτει από την αντίδραση ενός οξέος (π.χ. HCl) με μια βάση (π.χ. NaOH).



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 δυαλυμάτων, 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 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 NaNO_3 νάτριο, 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.

Κύρια χαρακτηριστικά των μερικώς αλάτων

Θειικά SO_4^-

Προέλευση

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 0,1 mm) αναμιγνύεται με μικρά θραύσματα του επιφανειακού στρώματος που επικάθονται ελαφρά σε αυτήν.



Εικόνα 24. 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 1 mm 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 αποσπά μικροθραύσματα από την επιφάνεια.

Χλωριούχα Cl^-

Πρόελευση

Η πιο κοινή πηγή είναι το σπρέι θαλάσσης. Ιόντα χλωρίου μπορεί επίσης να προέρχεται από τις ακαθαρσίες που υπάρχουν στα δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται, για παράδειγμα, από την άμμο για την προετοιμασία των κονιαμάτων. Από άλατα απόψυξης που είναι διάσπαρτα στους δρόμους το χειμώνα και από τις εκπομπές στην ατμόσφαιρα υδροχλωρικού οξέος που προέρχονται από ορισμένους τύπους βιομηχανικής δραστηριότητας.

Οι πιο κοινές μορφές φθοράς τους

Τα χλωριούχα είναι πολύ διαλυτά άλατα και αυτό τους επιτρέπει ακόμη και να διεισδύσουν πολύ βαθιά μέσα στα υλικά προκαλώντας μετατροπές. Καθώς είναι εξαιρετικά υγροσκοπικά (ειδικά CaCl_2 χλωριούχο ασβέστιο), η παρουσία τους σε ένα υλικό παράγει υψηλότερη περιεκτικότητα υγρασίας σε ισορροπία σε σύγκριση με ένα υλικό όπου είναι απόντα. Η υψηλή περιεκτικότητα σε νερό στα τοιχώματα, μετά από τους κύκλους κατάψυξης-απόψυξης, οδηγεί στο σχηματισμό ρωγμών και αποσάθρωση.

Η διάβρωση του σπλισμού χάλυβα στο σκυρόδεμα μπορεί να συμβεί όταν οι ρωγμές επιτρέπουν στα χλωριούχα να διεισδύσουν στην δομή. Το χλωριούχο ασβέστιο (CaCl_2) είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο.

Τα νιτρώδη και νιτρικά άλατα NO_2^- NO_3^-

Πρόελευση

Τα νιτρώδη άλατα παράγονται από τη βιολογική αποσύνθεση των προϊόντων που περιέχουν άζωτο και μπορεί, επομένως, να βρεθούν όπου υπάρχει διείσδυση 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 μπορεί να έχουν την ίδια προέλευση, αλλά μπορεί επίσης να προέρχεται από γεωργικές εκτάσεις (λιπάσματα) ή από το φωτοχημικό νέφος τυπικό των άκρως μολυσμένων περιοχών με μεγάλες περιόδους ηλιοφάνειας. Το νιτρικό οξύ (από τα οξείδια του αζώτου στον αέρα) επιτίθεται στο ανθρακικό ασβέστιο στη τοιχοποιία για να σχηματίσει νιτρικό ασβέστιο ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$).

Μια άλλη πηγή των δύο νιτρώδη και νιτρικών είναι τα μικροβιολογικά: το υποξείδιο και το αζωτοβακτήριο μπορεί να μετατρέψουν το άζωτο σε νιτρώδη και νιτρικά άλατα στη μεταβολική διαδικασία.

Οι πιο κοινές μορφές φθοράς τους

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.

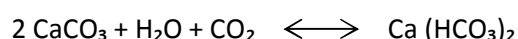
Η άλλη αλλαγή είναι από το νιτρικό οξύ που σχηματίζεται κάτω από συγκεκριμένες ατμοσφαιρικές συνθήκες: διαβρωτική δράση προσβάλλει το κονίαμα και προκαλεί απώλεια υλικού σε ασβεστολιθικά πετρώματα.

Ανθρακικά CO_3^-

Προέλευση

Το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3 ασβεσίτης) 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 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Εάν υπάρχει μεγαλύτερη από το κανονικό ποσότητα του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) στην ατμόσφαιρα (ως αποτέλεσμα της βιομηχανικής δραστηριότητας ή εξαιτίας της παρουσίας του μεγάλου αριθμού των ατόμων σε ένα κλειστό χώρο), καρβονικό οξύ (H_2CO_3) μπορεί να σχηματιστεί με την παρουσία νερού και αντιδρά με το ανθρακικό ασβέστιο για να σχηματίσουν διττανθρακικό ασβέστιο.

Υπάρχει ισορροπία μεταξύ αυτών των δύο ενώσεων:



Το διαλυτό όξινο ανθρακικό έρχεται στην επιφάνεια, όπου η εξάτμιση μετατοπίζει την ισορροπία προς τα αριστερά και πάλι σχηματίζει αδιάλυτο CaCO_3 που εναποτίθεται στην επιφάνεια. Μια άλλη πηγή μπορεί να είναι το διαλυτό περιεχόμενο αλκαλίων του τσιμέντου στην τοιχοποιία από την οποία μπορεί να σχηματιστεί το εξαιρετικά διαλυτό $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (natron). Το ανθρακικό νάτριο (Na_2CO_3), μπορεί στη συνέχεια να μετατραπεί σε όξινο ανθρακικό νάτριο (NaHCO_3), και πάλι λόγω της παρουσίας ενός υψηλής ποσότητας CO_2 σε αυτήν την ατμόσφαιρα. Και τα δύο μπορούν να βρεθούν ως $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (trona).

Οι πιο κοινές μορφές φθοράς τους

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 $C_2O_4^{--}$

Προέλευση

Μεταξύ των διαφόρων υποθέσεων σχετικά με τους μηχανισμούς για τον σχηματισμό αυτών των αλάτων, τα ακόλουθα δύο συμβαίνουν συνήθως στην πράξη:

- η βιοκαταστροφή από ορισμένους μικροοργανισμούς σύνθετων πρωτεϊνών (όπως η καζεΐνη και το ασπράδι) που μερικές φορές εφαρμόζονταν σε εργασίες συντήρησης του παρελθόντος.
- η παρουσία του οξαλικού οξέος ($H_2C_2O_4$) που εκκρίνεται από λειχήνες, αντιδρώντας με τον ασβεστίτη ($CaCO_3$) στην επιφάνεια, δημιουργεί οξαλικό ασβεστίο (CaC_2O_4) με διαφορετικές καταστάσεις ενυδάτωσης όπως whewellite ($CaC_2O_4 \cdot H_2O$) και weddellite ($CaC_2O_4 \cdot 2H_2O$). Αυτά είναι και τα δύο πολύ αδιάλυτα, σε αντίθεση με τα περισσότερα από όσα άλλα άλατα έχουν ληφθεί μέχρι σήμερα υπόψη.

Υπάρχουν, εντούτοις, άλλες ερμηνείες σχετικά με το σχηματισμό των οξαλικών, η πιο πρόσφατη περιλαμβάνει την παρουσία του μονοξειδίου του άνθρακα στον αέρα ως ρύπανση.

Οι πιο κοινές μορφές φθοράς τους

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. Μερικοί ερευνητές αναφέρουν ότι μπορεί ακόμη και να προστατεύουν την επιφάνεια του πετρώματος.

Φωσφορικά PO_4^{---}

Προέλευση

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).

Οι πιο κοινές μορφές φθοράς τους

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.

Μελέτες και δειγματοληψία

Οι πρώτες διερευνήσεις πάνω στην αλοιώση της τοιχοποιίας από τα άλατα θα πρέπει να γίνει στο χώρο μέσω ενός συνολικού οπτικού ελέγχου και αξιολόγησης των ακόλουθων:

- τον τύπο της τοιχοποιίας (τούβλα, πέτρα)
- προσανατολισμό (βόρεια, νότια, κλπ) και έκθεση (ήλιο, σκιά) των εξωτερικών επιφανειών
- κλίμα εσωτερικού χώρου, ύπαρξη κλιματισμού ή / και συστημάτων θέρμανσης, κίνηση του αέρα
- προσδιορισμό των περιοχών υγρασίας, ανερχόμενη υγρασία και πιθανή διείσδυση του νερού από τη στέγη ή την αποστράγγιση του συστήματος
- ορατές αλλοιώσεις που προκαλούνται από τα άλατα.

Το αποτέλεσμα αυτής της πρώτης αυτοψίας πρέπει να καταγράφεται σε ένα σχέδιο του κτιρίου σημειώνοντας τα φαινόμενα που παρατηρήθηκαν ως οδηγό για το σχεδιασμό της δειγματοληψίας και της μελλοντικής ανάλυσης σχετικά με την παρουσία των διαλυτών αλάτων.

Ολοκληρώνοντας μια έρευνα για τη συνολική κατάσταση, έχοντας πραγματοποιήσει σειρά φωτογραφικής ή/και γραφικής τεκμηρίωσης και αν απαιτείται και δειγματοληψίας, θα πρέπει να αποφασιστεί ένα σχέδιο αντιμετώπισης.

4.2.2. Ο ρόλος του πορώδους στα υλικά³²

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.).

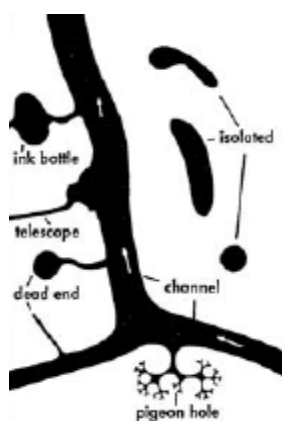
Τα χαρακτηριστικά των πόρων σε πετρώματα εξαρτώνται κυρίως από τη προέλευσή τους (πυριτικά, ιζηματογενή, κλπ), ενώ το πορώδες τεχνητών δομικών υλικών εξαρτάται από την κατασκευή τους. Η γνώση της δομής των πόρων είναι μια σημαντική παράμετρος για τον χαρακτηρισμό των υλικών, την πρόβλεψη της συμπεριφοράς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

Κατάταξη των πόρων

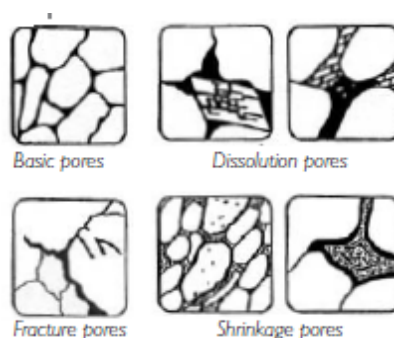
Οι πόροι μπορούν ουσιαστικά να ταξινομούνται σύμφωνα με την τυπολογία, τη γεωμετρία και το μέγεθος τους.

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.



25



26

Εικόνες 25, 26. Είδη πόρων και μορφολογία.

³² Πηγή: Borrelli E., Urland A., "Conservation of architectural heritage, historic structures and material", ICCROM, Rome, Italy 1999

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 10 Angstrom 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 <2.5 μm και > 2,5 μm 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	< 0,001 μm	(<10 Å)
μεσοπορώδες:	ακτίνα	μεταξύ 0,001 μm και 0,025 μm	(10 Å και 250 Å)
μακροπορώδες:	ακτίνα	> 0,025 μm	(>250 Å)

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		% porosity (average value)	Predominant pore type
		pressure	temperature		
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 3: Ποσοστό επί % πορώδους και είδη πόρων μερικών κοινών πετρωμάτων.

Βασικοί όροι

- όγκος πόρου (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) %

ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ του όγκου των πόρων (V_p), και του εμφανούς όγκου (V_a) που εκφράζεται ως ποσοστό.

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

(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 φαινομένου όγκου (V_a) που εκφράζεται ως ποσοστό.

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

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 φαινομένου 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 (Ss)

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

Κίνηση του νερού σε πορώδη δομικά υλικά

Γενικά

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 προσδευτικά 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 πορώδων 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 βάσει 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 πορώδων 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 4 μm δεν είναι μετρήσιμοι. Αυτό εξαρτάται από την ανάλυση του οπτικού μικροσκοπίου, η οποία περιορίζει τη μέτρηση πόρων με ακτίνα μεταξύ 4 και 500 μm.

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 ποροσημετρία 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 ποροσημετρίας 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 4000 bar (400 MPa), 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 1 g 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.

A) 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.

B) 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.

Παρά το γεγονός ότι όλες αυτές οι μετρήσεις παρέχουν πληροφορίες σχετικά με το πορώδες, συχνά χρησιμοποιούνται για να κάνουν συγκρίσεις μεταξύ ακατέργαστων ή κατεργασμένων υλικών πέτρας.

Οι μελέτες για την κρυστάλλωση σε πορώδη υλικά ξεκίνησαν πριν 150 χρόνια.

Από τον Scherer παρουσιάστηκε μία λεπτομερής μελέτη της κρυστάλλωσης σε πορώδη υλικά, συνδυάζοντας θερμοδυναμικά δεδομένα, μαζί με ακριβή ανάλυση των τάσεων που αναπτύσσονται. Τονίζει ότι η προέλευση της φθοράς λόγω κρυστάλλωσης σε πορώδη υλικά δεν οφείλεται μόνο στον υπερκορεσμό, αλλά και στο γεγονός ότι ο κρύσταλλος με τα τοιχώματα του πόρου δεν ταιριάζει ενεργειακά. Το φαινόμενο αυτό είναι αναμενόμενο στο τσιμέντο και στο μάρμαρο. Σύμφωνα με τον Scherer οι τάσεις που δημιουργούν τις φθορές εμφανίζονται μόνο όταν η κρυστάλλωση λαμβάνει χώρα σε μικρούς πόρους (στην περιοχή των μεσοπόρων), και εφόσον η ανάπτυξη γίνεται σε συνθήκες ισορροπίας. Η παρουσία μεγαλύτερων πόρων θα παρείχε επιφάνειες όπου η κρυσταλλική ανάπτυξη θα λάμβανε χώρα χωρίς να ασκηθούν βλαβερές τάσεις.

Για την ανάπτυξη των κρυστάλλων των ευδιάλυτων αλάτων στους πόρους είναι απαραίτητο να δημιουργηθούν συνθήκες υψηλού υπερκορεσμού. Η ταχεία εξάτμιση θεωρείται μια βασική αιτία

για την ανάπτυξη των υψηλών υπερκορεσμών. Όμως είναι γεγονός ότι η φθορά λόγω κρυστάλλωσης συμβαίνει ακόμα και σε μικρές ή και μηδενικές ταχύτητες εξάτμισης.

Τα υδατοδιαλυτά άλατα τα οποία επιδρούν στα δομικά υλικά ενός μνημείου είναι κυρίως θειικά, νιτρικά, ανθρακικά, χλωριούχα αλκάλια και αλκαλικές γαίες. Η προέλευση τους μπορεί να είναι από υπόγεια νερά που ανεβαίνουν με τριχοειδή αναρρίχηση, από όξινους ατμοσφαιρικούς ρυπαντές (SOx, NOx, HCl), οι οποίοι προσβάλλουν τα δομικά υλικά των μνημείων και σχηματίζουν τα αντίστοιχα άλατα του ασβεστίου, από τη θάλασσα με τη βοήθεια του ανέμου και από το ίδιο το τσιμέντο, που μπορεί να περιέχεται σε ένα μνημείο καθώς το τσιμέντο αποτελεί σημαντική πηγή υδατοδιαλυτών αλάτων.³³

Το νερό, το οποίο εισέρχεται στους πόρους των δομικών υλικών των μνημείων με τριχοειδή αναρρίχηση και περιέχει υδατοδιαλυτά άλατα, διεισδύει και αναρριχάται δυσκολότερα στους πόρους καθώς η επιφανειακή του τάση, όταν περιέχει ισχυρούς ηλεκτρολύτες αυξάνεται, ενώ όταν περιέχει ασθενείς ηλεκτρολύτες ελαττώνεται και έτσι το ύψος αναρρίχησης αυξάνεται. Συνήθως όμως, υπερισχύουν οι ισχυροί ηλεκτρολύτες, οι οποίοι είτε προέρχονται από ισχυρές βάσεις και οξέα (Na+Cl-, Na2+SO42- Na+NO3-), είτε από ισχυρό οξύ και ασθενή βάση (Mg2+SO42-, Ca2+SO42-, Mg2+(NO3)22-, Ca2+(NO3)22-) είτε από ασθενές οξύ και ισχυρή βάση (Na22+CO32-, K22+CO32-, Ca2+CO32-). Στις δυο τελευταίες περιπτώσεις πραγματοποιείται υδρόλυση, η οποία εκτός από τον εμπλουτισμό του νερού σε ισχυρούς ηλεκτρολύτες δημιουργεί και όξινα ή αλκαλικά διαλύματα αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα, η όξινη βροχή μπορεί να μειώσει το ύψος αναρρίχησης καθώς αυξάνει την επιφανειακή τάση εξαιτίας της υψηλότερης περιεκτικότητας της σε ισχυρά οξέα (H3O+HSO4-, H3O+NO3-) έναντι του H3O+HCO3-, το οποίο ελαττώνει την επιφανειακή τάση. Όμως, σύμφωνα με το φαινόμενο της εξαλάτωσης, λόγω των ομοειδών ιόντων π.χ. HSO4-, NO3- κλπ με εκείνα των αλάτων που αναρριχώνται από το έδαφος, η ρύπανση συμβάλλει στον κορεσμό του νερού σε μικρότερες συγκεντρώσεις αλάτων. Παρόλ' αυτά τα ίδια ιόντα, σύμφωνα με το φαινόμενο της εισαλάτωσης, αυξάνουν την διαλυτότητα των αλάτων, όταν τα ιόντα είναι ανόμοια.

Επομένως, τα SO42- ελαττώνουν τη διαλυτότητα των θεικών αλάτων νατρίου, μαγνησίου, ασβεστίου και αυξάνουν τη διαλυτότητα του Na+Cl-, τη διαλυτότητα των νιτρικών αλάτων νατρίου, μαγνησίου, ασβεστίου και των ανθρακικών αλάτων νατρίου, καλίου, ασβεστίου. Αντίθετα τα NO3- ελαττώνουν τη διαλυτότητα των νιτρικών αλάτων νατρίου, μαγνησίου, ασβεστίου και αυξάνουν εκείνη των θεικών και των ανθρακικών αλάτων, ενώ τα CO32- ελαττώνουν τη διαλυτότητα των ανθρακικών αλάτων και αυξάνουν αυτή των νιτρικών και θεικών.

Όταν το νερό υπερκορεσθεί (πτώση θερμοκρασίας, εξάτμιση) σε άλατα τότε αυτά κρυσταλλώνονται. Η κρυστάλλωση των αλάτων με κρυσταλλικά νερά οδηγεί στην αύξηση του όγκου τους και ασκούνται πιέσεις στα τοιχώματα των πόρων, των ήδη υπαρχόντων ρωγμών ή των ορίων των κόκκων. Αν βέβαια, τα άλατα κρυσταλλωθούν απουσία κρυσταλλικών νερών, η συνεχής απόθεσή τους στους αρχικούς πυρήνες κρυστάλλωσης και η αύξηση των κόκκων τους ασκούν επίσης ρηκτικές δυνάμεις στα τοιχώματα.³⁴

Μακροσκοπικά τα φαινόμενα φθοράς που έχουν ως αιτία την κρυστάλλωση των αλάτων είναι τα εξής και αφορούν κυρίως την επιφάνεια των μνημείων:

³³ Πηγή: Μοροπούλου Α., «Χαρακτηρισμός, έλεγχος ποιότητας, διάγνωσης φθοράς και συντήρηση δομικών υλικών. Μεθοδολογικά ενόργανων και μη καταστρεπτικών τεχνικών», Έκδοση ΕΜΠ, Αθήνα 2005

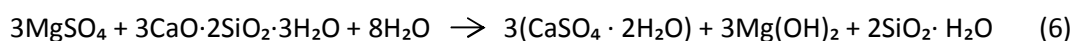
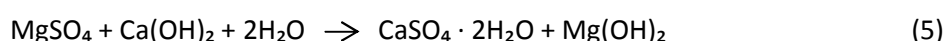
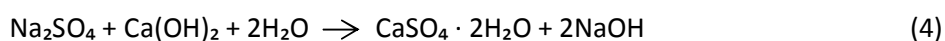
³⁴ Πηγή: Σκουλικίδης Θ., «Διάβρωση και συντήρηση των δομικών υλικών των μνημείων», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο 2000

Εμφανίζονται χειμώνα και εξαφανίζονται το καλοκαίρι. Σε ψυχρό και υγρό καιρό εμφανίζεται η ένυδρη μορφή των αλάτων, όταν φυσικά υπάρχει. Στη βροχερή περίοδο, εμφανίζεται κάθε φορά καινούρια ποσότητα αλάτων, που απλώνονται πάνω στην επιφάνεια προς όλες τις διευθύνσεις. Μεγάλη συγκέντρωση αλάτων μπορεί να παρατηρηθεί πάνω σε μικρές επιφάνειες τοίχου. Εξανθίσεις εμφανίζονται πάντα στα όρια υγρής και στεγνής περιοχής, όπως επίσης εκεί όπου υπάρχουν ρωγμές. Όταν το νερό διεισδύσει κάπου, εμφανίζονται εξανθίσεις στο σημείο που ξαναβγαίνει.

Όταν η ταχύτητα αναπλήρωσης του νερού στην επιφάνεια είναι μικρότερη από αυτή της εξάτμισης, το υδάτινο μέτωπο υποχωρεί στο εσωτερικό της πέτρας ή του μαρμάρου και η κρυστάλλωση των αλάτων γίνεται μέσα στους πόρους (σχηματισμός κρυπτοεξανθίσεων). Το φαινόμενο είναι αρκετά καταστροφικό, αφού προκαλεί θραύσεις και απολεπίσεις στο υλικό.

Η κυψέλωση είναι μία ιδιαίτερη μορφή κρυπτοεξανθίσης, που εμφανίζεται σε περιοχές που εκτίθενται σε ισχυρούς ανέμους. Η επιφάνεια της πέτρας ή του μαρμάρου εκφυλίζεται με τη δημιουργία σπηλαιώσεων.³⁵

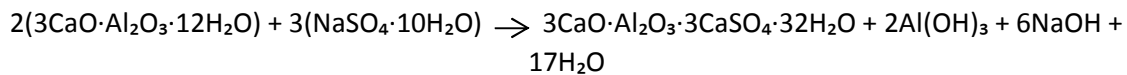
Παράλληλα με την επίδραση των υδατοδιαλυτών αλάτων στα δομικά υλικά των μνημείων, εξαιτίας της κρυστάλλωσης τους θα πρέπει να αναφέρουμε και την συμβολή τους στο σχηματισμό γύψου. Εκτός από την επίδραση του θείου στο ανθρακικό ασβέστιο και το σχηματισμό του γύψου, σημαντικές ποσότητες γύψου παράγονται από την επίδραση των θεικών αλάτων σε άλλα συστατικά των δομικών υλικών των μνημείων. Συγκεκριμένα μπορούν να λάβουν χώρα οι αντιδράσεις των θεικών αλάτων με την υδράσβεστο Ca(OH)_2 και με το ενυδατωμένο αργιλικό ασβέστιο. Τα προϊόντα αυτών των αντιδράσεων, γύψος και θειαργλικό ασβέστιο, έχουν σημαντικά μεγαλύτερο όγκο από αυτών των συστατικών που αντικαθιστούν, με αποτέλεσμα τα δομικά υλικά στα οποία επιδρούν να διογκώνονται και να αποδιοργανώνονται. Όταν στο μνημείο έχουν γίνει επεμβάσεις με υλικά τα οποία αποτελούνται από τσιμεντοπολτό Portland, ο σχηματισμός του γύψου οδηγεί αρχικά στη μείωση της σκληρότητας και της αντοχής του υλικού, ενώ στη συνέχεια προκαλείται διόγκωση, ρηγμάτωση και μετατροπή του υλικού, ενώ στη συνέχεια προκαλείται διόγκωση, ρηγμάτωση και μετατροπή του υλικού σε μια πολτώδη και μη συνεκτική μάζα. Ανάλογα βέβαια με το είδος των κατιόντων που περιέχονται στο διάλυμα, τόσο το Ca(OH)_2 όσο και το C-S-H τσιμεντοπολτού Portland, είναι δυνατόν να μετατραπούν σε γύψο σύμφωνα με τις παρακάτω αντιδράσεις:



Ο σχηματισμός του NaOH κατά την αντίδραση (4) εξασφαλίζει την συνεχόμενη υψηλή αλκαλικότητα του συστήματος με αποτέλεσμα να διατηρείται σταθερή τσιμεντοειδής φάση (C-S-H) του υλικού. Αντίθετα κατά την αντίδραση (5), λόγω του σχηματισμού του σχετικά αδιάλυτου και ασθενούς αλκαλικού Mg(OH)_2 , ελαττώνεται η σταθερότητα του C-S-H στο σύστημα και επομένως προσβάλλεται από το θειικό διάλυμα, γεγονός που δείχνει ότι η προσβολή από θειικό μαγνήσιο είναι η πιο σημαντική.

Τα θειικά ιόντα αντιδρούν όμως και με το ένυδρο αργιλικό ασβέστιο οδηγώντας στην δημιουργία ετριγκίτη:

³⁵ Πηγή: Μοροπούλου Α., «Χαρακτηρισμός, έλεγχος ποιότητας, διάγνωσης φθοράς και συντήρηση δομικών υλικών. Μεθοδολογικά ενόργανων και μη καταστρεπτικών τεχνικών», Έκδοση ΕΜΠ, Αθήνα 2005



Η δημιουργία του ετριγκίτη σχετίζεται με τη διόγκωση από την προσβολή των θειικών ιόντων παρόλα αυτά δεν είναι πάντα η αιτία της ρηγμάτωσης του τσιμέντου. Όταν το συνολικό SO₃ βρίσκεται μέσα στα φυσιολογικά όρια, δηλαδή δεν υπάρχει εξωγενής πηγή του, η δημιουργία του ετριγκίτη προκαλεί φθορά μόνο σε υλικά τα οποία έχουν βιώσει θερμοκρασίες υψηλότερες των 70°C.

Ο ρυθμός προσβολής από τα θειικά ιόντα εξαρτάται από την πυκνότητα του διαλύματος καθώς αυξάνεται με την αύξησή της, αρκεί βέβαια οι συγκεντρώσεις των MgSO₄ και Na₂SO₄ να ξεπερνούν το 0,5% και το 1% αντίστοιχα. Κορεσμένα διαλύματα MgSO₄ οδηγούν σε σοβαρές φθορές. Συγκεντρώσεις 1000 ppm (ως προς το SO₃) θεωρούνται ως μέτρια επικίνδυνες ιδιαίτερα αν το θειικό μαγνήσιο είναι το επικρατέστερο υλικό. Η ταχύτητα προσβολής από τα θειικά ιόντα δεν εξαρτάται μόνο από την συγκέντρωσή τους αλλά και από τον ρυθμό αναπλήρωσής τους. Βελτίωση της αντοχής του υλικού στα θειικά μπορεί να γίνει με την προσθήκη ποζολάνων καθώς ως αριλοπυριτικά υλικά απομακρύνουν το ελεύθερο Ca(OH)₂ και καθιστούν τις φάσεις που φέρουν αργίλιο μη δραστικές.³⁶

Η φθορά προσβάλλει όλα τα υλικά, άλλα λιγότερο και άλλα περισσότερο, ανάλογα με τις φυσικές και χημικές ιδιότητές τους. Οι παράγοντες φθοράς των μνημείων διακρίνονται σε φυσικούς, χημικούς και βιολογικούς, αλλά στην πλειονότητα των περιπτώσεων η δράση τους είναι ταυτόχρονη και συνεργατική.

Το θέμα της πολιτιστικής κληρονομιάς δεν είναι μόνο εθνικό, αλλά παγκόσμιο. Η γενικότερη κατάσταση των μνημείων όμως, αναπόφευκτα σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με τη γενικότερη κατάσταση της χώρας στην οποία βρίσκονται (πολιτικοί, οικονομικοί, κοινωνικοί παράγοντες). Όσο πολυσύνθετο είναι το πρόβλημα, αντιστοίχως πολυσύνθετο είναι και το θέμα της επίλυσης του.

³⁶ Πηγή: Τσίμας Σ., Τσιβιλής Σ., «Επιστήμη και τεχνολογία τσιμέντου», Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα 2004

Πειραματικό μέρος

1. Τα υπό εξέταση υλικά

Στην παρούσα μελέτη εξετάζονται, σκληρυμένα δοκίμια υδραυλικών ενεμάτων υψηλής διεισδυτικότητας, ηλικίας περίπου 10 ετών. Τα ενέματα διαφοροποιούνται κατά τη σύσταση και τον τρόπο ανάμειξης όπως φαίνεται στον Πίνακα 1. Στην παρασκευή των δοκιμίων έχουν χρησιμοποιηθεί δύο είδη φυσικής υδραυλικής ασβέστου μία κατηγορίας 5 MPa και μία 3,5 MPa, δύο είδη ποζολάνης, λευκό τσιμέντο Portland τύπου CEM I 52,5 R, υδράσβεστος σε μορφή κόνεως και τρεις τύποι υπερπλαστικοποιητών. Έχει επίσης εξεταστεί και έτοιμο προαναμεμειγμένο υδραυλικό ένεμα με υψηλό ποσοστό λεπτόκοκκων πυριτικών αδρανών. Η ανάμειξη των ενεμάτων έχει γίνει σε εργαστηριακή κλίμακα σε αναμεικτήρα υπερήχων χαμηλής συχνότητας (28KHz) και σε εργοταξιακή κλίμακα σε αναμεικτήρα υψηλού στροβιλώδους. Όλες οι συνθέσεις πληρούσαν τις προδιαγραφές ενεσιμότητας και αντοχών σε κάμψη και θλήψη.

Τα δοκίμια διατηρήθηκαν για τα πρώτα 1 έως 3 χρόνια σε θάλαμο συντήρησης στους 20°C και 98%RH και στη συνέχεια για διάστημα 6 έως 7 ετών σε κλειστό ξηραντήρα σε συνθήκες κορεσμού υγρασίας για την αποφυγή της ενανθράκωσης.

Όνομασία	Φυσική Υδραυλική Ασβέστος	Εμπορικό Ένεμα (LED)	Λευκό Portland Cement (AAL)	Ποζολάνη	Υδρ/στος	Υπερ/τής	Νερό	Τρόπος Ανάμειξης	Έτος Παρασκευής
3μερές US			30%	POZ2 45%	25%	SP3 1%	80%	Ultrasonic	2005
3μερές HT			30%	POZ2 45%	25%	SP3 1%	80%	High Turbulance	2006
100% US (noSP)	NHL5 100%						80%	Ultrasonic	2006
100% US	NHL5 100%					SP2 1%	80%	Ultrasonic	2006
80% 20%G US (noSP)	NHL5 80%			POZ3 20%			90%	Ultrasonic	2005
90% 10% US	NHL5 90%			POZ1 10%		SP1 1%	80%	Ultrasonic	2006
80% 20% US	NHL5 80%			POZ1 20%		SP1 1,25%	80%	Ultrasonic	2006
90% 10% HT	NHL5 90%			POZ1 10%		SP1 1%	80%	High Turbulance	2006
100% HT	NHL5 100%					SP2 1%	80%	High Turbulance	2006
80% 20% HT-b	NHL5 80%			POZ1 20%		SP1 1,5%	80%	High Turbulance	2006
80% 20% HT-a	NHL5 80%			POZ1 20%		SP1 1,25%	80%	High Turbulance	2006
C.B 100%	NHL3,5 100%						85%	Ultrasonic	2005
LED 100%		100%					130%	Ultrasonic	2005

Πίνακας 1. Αναλυτική περιγραφή των συνθέσεων.

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

2.1 Αρχή λειτουργίας του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης.

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

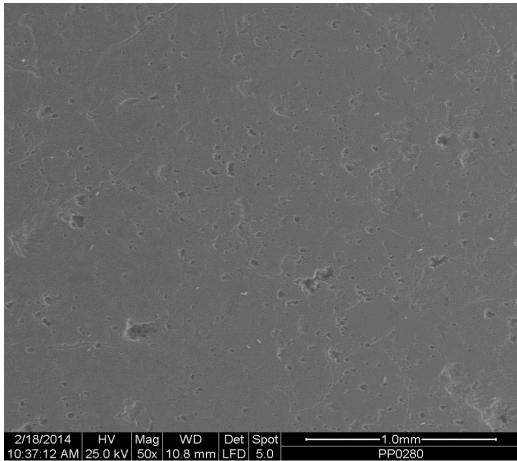
Η αρχή λειτουργίας του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης και του Φασματογράφου Ενεργειακής Διασποράς, συνίσταται στην παραγωγή δέσμης ηλεκτρονίων, εστίασης και κατεύθυνση της δέσμης στην επιφάνεια του δείγματος. Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από την επιφάνεια του δείγματος επιτρέπουν την απεικόνιση την μορφολογίας του σε μεγάλες μεγεθύνσεις και με εξαιρετικά μεγάλο βάθος πεδίου. Τα οπισθοσκεδαζόμενα πρωτογεννή ηλεκτρόνια της δέσμης επιτρέπουν την απεικόνιση των διαφορετικής χημικής σύστασης φάσεων του δείγματος καθώς μεγαλύτερος αριθμός πρωτογεννών 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 δευτερογεννή 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.

2.2 Προετοιμασία των δειγμάτων.

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. Στη 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.

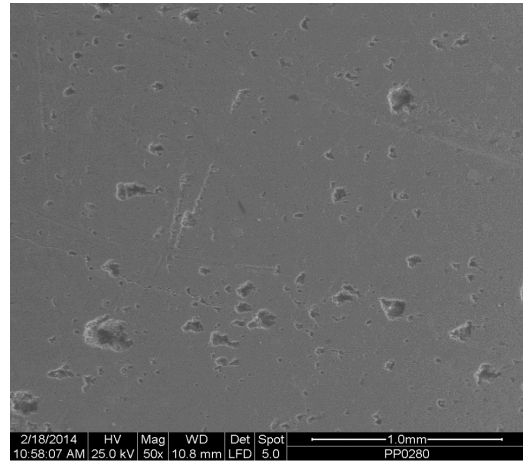
Στη παρούσα εργασία όμως θα εξετάσουμε τις απεικονίσεις των δευτερογεννών ηλεκτρονίων των στίλβομένων δοκιμίων καθώς επιτρέπουν την παρατήρηση των μεγάλων πόρων χωρίς να απαιτείται λεπτή τομή. Στους πολύ μεγάλους πόρους οι τριχοειδείς δυνάμεις δεν αρκούν για να πληρωθούν με νερό και έτσι αυτοί δεν συμμετέχουν στον υπολογισμό του ανοιχτού υδατοπερατού πορώδους, άρα και της φαινόμενης πυκνότητας. Έχουν όμως μεγάλη σημασία για τον υπολογισμό της πυκνότητας στοίβασης.

Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται οι μικροφωτογραφίες δευτερογενών ηλεκτρονίων σε μεγέθυνση 50x και σχολιάζεται το μεγάλο εμφανές πορώδες των δοκιμίων.



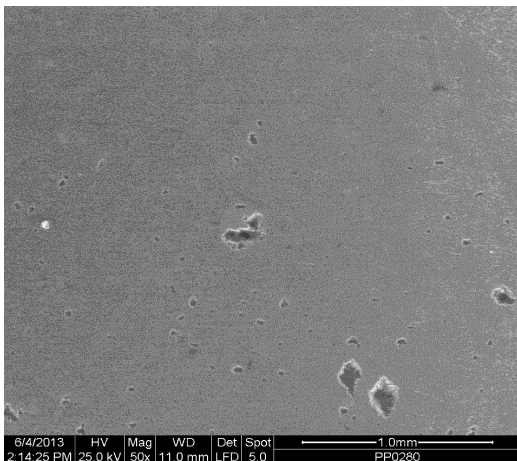
80%-20% HT-a

Παρατηρούμε δύο συστήματα πόρων, ένα με πόρους διαστάσεων περί τα 50μm και ένα με πόρους της τάξης των 1-10 μm.



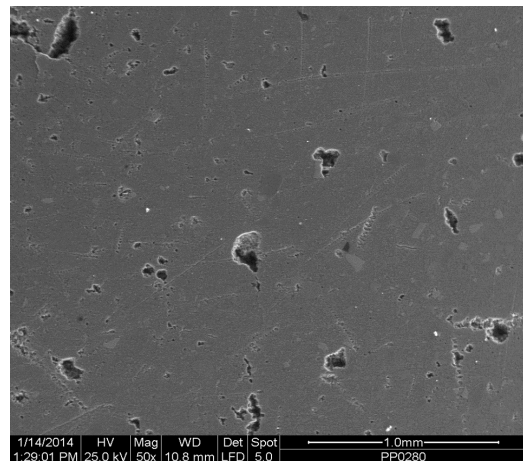
80%-20% HT-b

Παρατηρούμε δύο συστήματα πόρων, ένα με πόρους διαστάσεων 50-100 μm και ένα με πόρους της τάξης των 1-10 μm.



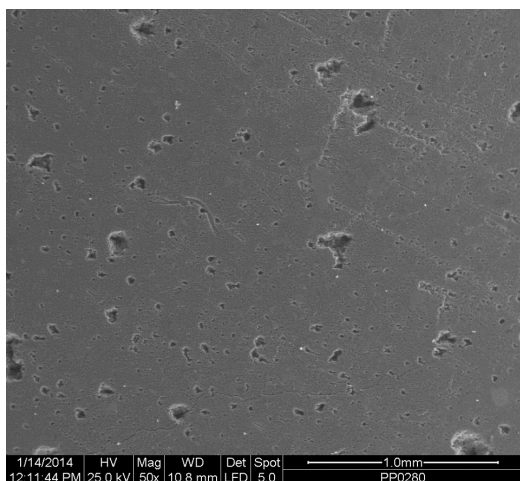
80%-20% US

Παρατηρούμε δύο συστήματα πόρων, ένα με πόρους διαστάσεων περί τα 50μm και ένα με πόρους της τάξης των 1-10 μm



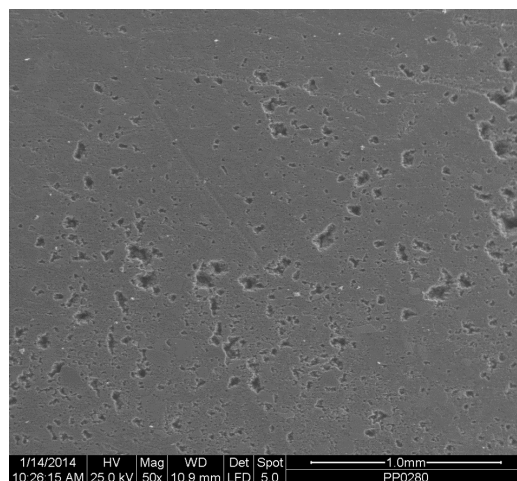
80%-20%G US (noSP)

Παρατηρούμε δύο συστήματα πόρων, ένα με πόρους διαστάσεων 50-100 μm και ένα με πόρους της τάξης των 1-10 μm.



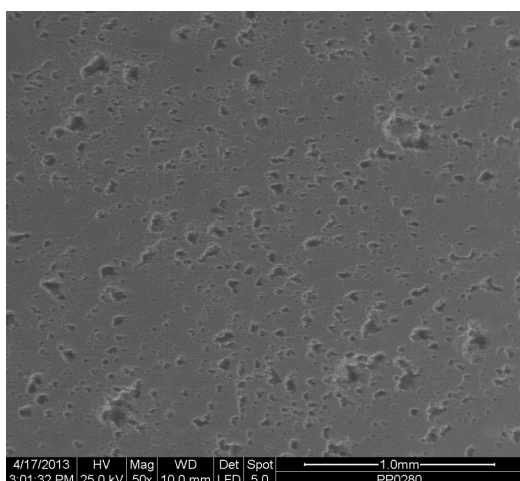
90%-10% HT

Παρατηρούμε δύο συστήματα πόρων, ένα με πόρους διαστάσεων περί τα 50μm και ένα με πόρους της τάξης των 1-10 μm. Οι πόροι είναι περισσότεροι από τις συνθέσεις με 20% ποζολάνη.



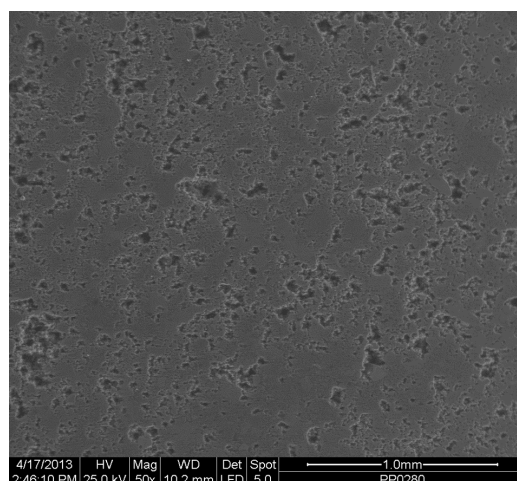
90%-10% US

Παρατηρήται μια πιο ομοιόμορφη και συνεχής κατανομή πόρων διαστάσεων από 1 έως 50μm. Οι πόροι είναι σαφώς περισσότεροι από τις συνθέσεις με 20% ποζολάνη.



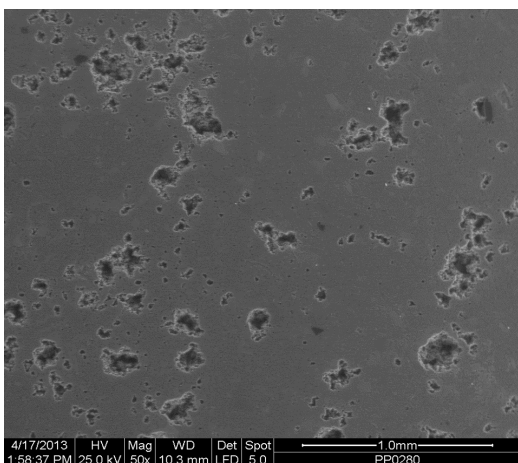
100% HT

Παρατηρούμε μια συνεχή κατανομή πόρων με μέγεθος 5-200 μm με πιο συνηθισμένο μέγεθος τα 40-50 μm. Οι πόροι είναι περισσότεροι από τις συνθέσεις με προσθήκη ποζολάνης



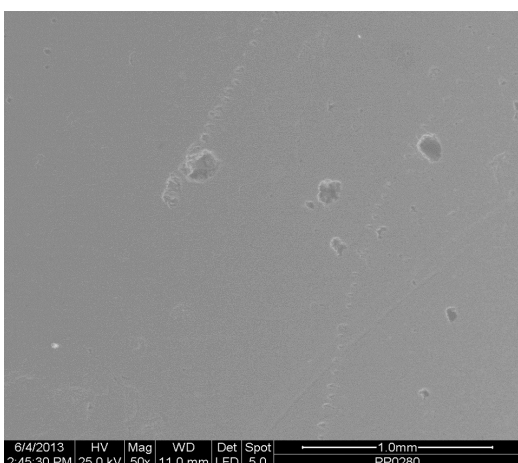
100% US

Παρατηρούμε μια συνεχή κατανομή πόρων με μέγεθος 5-200 μm με πιο συνηθισμένο μέγεθος τα 40-50 μm. Οι πόροι είναι περισσότεροι από τις συνθέσεις με προσθήκη ποζολάνης



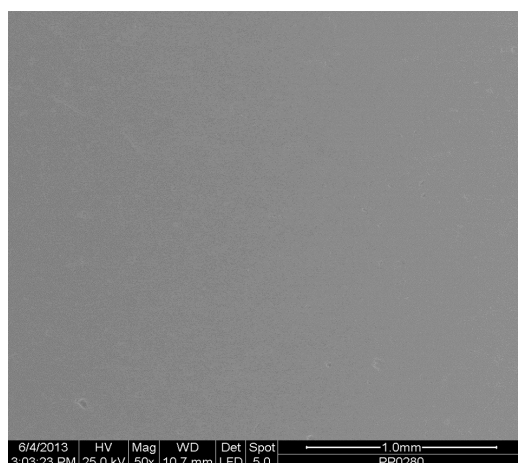
100% US (noSP)

Παρατηρούμε δύο συστήματα πόρων, ένα με πόρους διαστάσεων 50-200 μm και ένα με πόρους της τάξης των 1-10 μm.



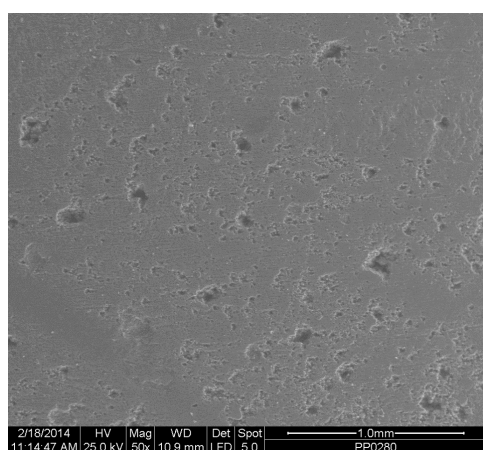
Τριμερές HT

Παρατηρούμε ελάχιστους απομονωμένους πόρους διαστάσεων 10-100 μm.



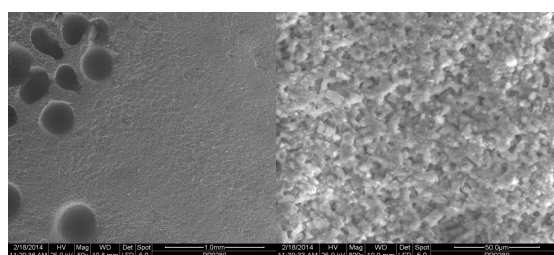
Τριμερές US

Δεν παρατηρείται εμφανές πορώδες σε αυτή τη μεγέθυνση.



C.B 100%

Παρατηρούμε μια συνεχή κατανομή πόρων με μέγεθος 5-200 μm με πιο συνηθισμένο μέγεθος τα 40-50 μm.



LED 100%

Το υλικό έχει σπογγώδη υφή με ομοιόμορφους σφαιρικούς κόκκους μεγέθους έως 5μm και αντίστοιχο πορώδες. Παρατηρούνται επίσης μεμονωμένοι σφαιρικοί ή ελλειψοειδείς πόροι από εγκλωβισμένο αέρα μεγέθους 100-300 μm. Η δεύτερη φωτογραφία είναι σε μεγέθυνση 800x.

Πίνακας 2. Φωτογραφίες Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης. Απεικονήσεις δευτερογενών ηλεκτρονίων σε μεγέθυνση x50.

Από τη σύγκριση των φωτογραφιών προκύπτει το συμπέρασμα ότι η προσθήκη της ποζολάνης οδηγεί σε μείωση του μεγέθους και του αριθμού των πόρων που είναι εμφανείς σε μεγέθυνση x50, ενώ ο τρόπος αναμειξης δεν φαίνεται να επιρραζεί σημαντικά και με συστηματικό τρόπο τον αριθμό και την κατανομή των μεγάλων πόρων. Η σύγκριση έχει νοήμα φυσικά μόνο σε συνθέσεις που έχουν τον ίδιο λόγο νερού προς υδραυλική κονία.

2.3 Στοιχειακή Ανάλυση των ενεμάτων

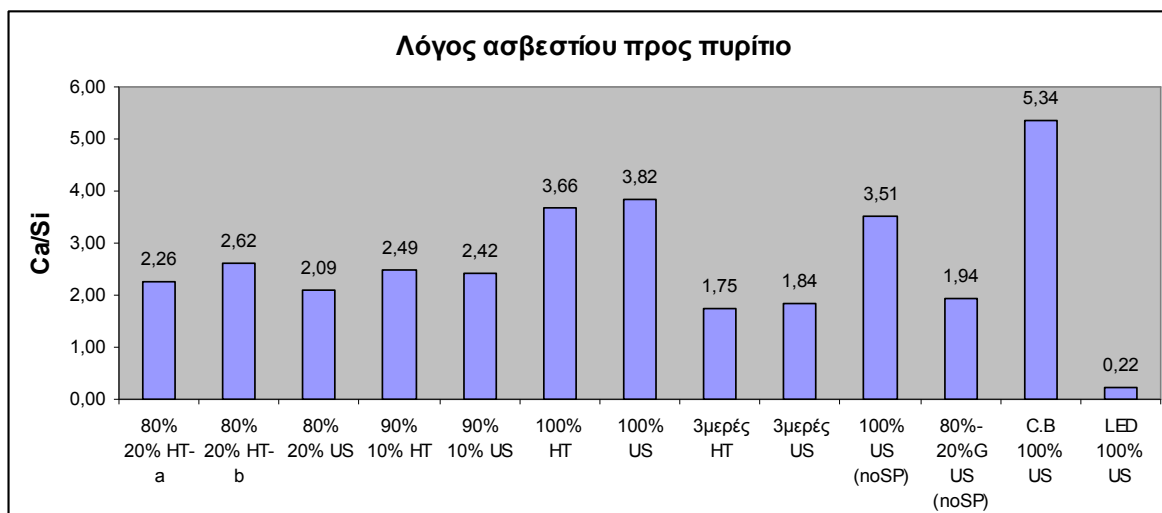
Η στοιχειακή σύσταση των ενεμάτων πραγματοποιήθηκε με Φασματοσκοπία Ενεργειακής Διασποράς (EDS), τα αποτελέσματα της οποίας, εκφρασμένα ως ατομικά ποσοστά, συνοψίζονται στον Πίνακα 3.

	80% 20% HT-a	80% 20% HT-b	80% 20% US	90% 10% HT	90% 10% US	100% HT	100% US	3μερές HT	3μερές US	100% US (noSP)	80%- 20%G US (noSP)	C.B 100% US	LED 100% US
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 3. 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 λεπτόκκοκα πυριτικά αδρανή που απλά ενώνονται μεταξύ τους με μια μικρή ποσότητα υδραυλικού υλικού, το οποίο δεν καλύπτει τον μεταξύ τους κενό χώρο.

3. Εξέταση του ανοιχτού υδατοπερατού πορώδους και της πυκνότητας

Τα δείγματα αφού βγήκαν από το ξηραντήριο, όπου συντηρούνταν σε συνθήκες υψηλής υγρασίας, κόπηκαν σε κύβους διαστάσεων (κατά το δυνατόν) 4x4x4 cm επιδιώκοντας να έχουμε τρία δοκίμια ανά σύνθεση, χωρίς ρηγματώσεις και με το μικρότερο δυνατό ποσοστό ενανθράκωσης. Οι διαστάσεις των δοκιμίων παρατίθενται στο παράρτημα.

Για τον περιορισμό της ενανθράκωσης κατά τη διάρκεια του πειράματος προηγήθηκε της ξήρανσης η πλήρωση των κύβων με νερό. Αντί της βύθισης των κυβικών δοκιμίων σε νερό - για τον περιορισμό της έκλυσης των υδατοδιαλυτών φάσεων, κυρίως του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - επιλέχθηκε η πλήρωση των δοκιμίων 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 άκαμπτος μεταλλικός κύλινδρος που σκεπαζόταν με γυάλινη πλάκα ζυγίστηκε σκέτος ($m_{1\text{empty}}$) και πληρωμένος με νερό ($m_{1\text{full}}$). Στη συνέχεια το κάθε κυβικό δοκίμιο τοποθετήθηκε στο εσωτερικό του κυλίνδρου και μετρήθηκε η συνολική μάζα ($m_{2\text{empty}}$). Κατόπιν ο κύλινδρος, με το δοκίμιο στο εσωτερικό του γεμιζόταν με νερό και μετρούσαν η μάζα του ($m_{2\text{full}}$). Το γυάλινο πώμα επέτρεπε τον έλεγχο της πλήρωσης με νερό χωρίς τον εγλωβισμό αέρα. Θεωρώντας την πυκνότητα του νερού που ίση με τη μονάδα ο όγκος του δοκιμίου (V_k) υπολογίστηκε ως εξής:

$$V_k = (m_{1\text{full}} - m_{1\text{empty}}) - (m_{2\text{full}} - m_{2\text{empty}})$$

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 μετρούσαν περιοδικά σε ζυγό ακρίβειας δύο δεκαδικών ψηφίων έως ότου σταθεροποιηθεί η μάζα τους.

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 φαινόμενη πυκνότητα (apparent density – d_{app}), η πυκνότητα πάκτωσης (bulk density – d_{bulk}) και η πυκνότητα όταν το πορώδες του δοκιμίου είναι πληρωμένο με νερό (d_{wet}). Η τιμή της φαινόμενης πυκνότητας και του πορώδους σχετίζονται με τις φυσικοχημικές ιδιότητες του υλικού, ενώ οι τιμές της πυκνότητας πάκτωσης του ξηρού και του υγρού δοκιμίου δίνουν πληροφορίες για το ελάχιστο και το μέγιστο φορτίο είναι δυνατόν να επιβάλεται 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_p) 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:

$$V_p = m_{\text{max}} - m_{\text{min}}$$

$$\varphi = V_p / V_k$$

$$d_{\text{app}} = m_{\text{min}} / (V_k - V_p)$$

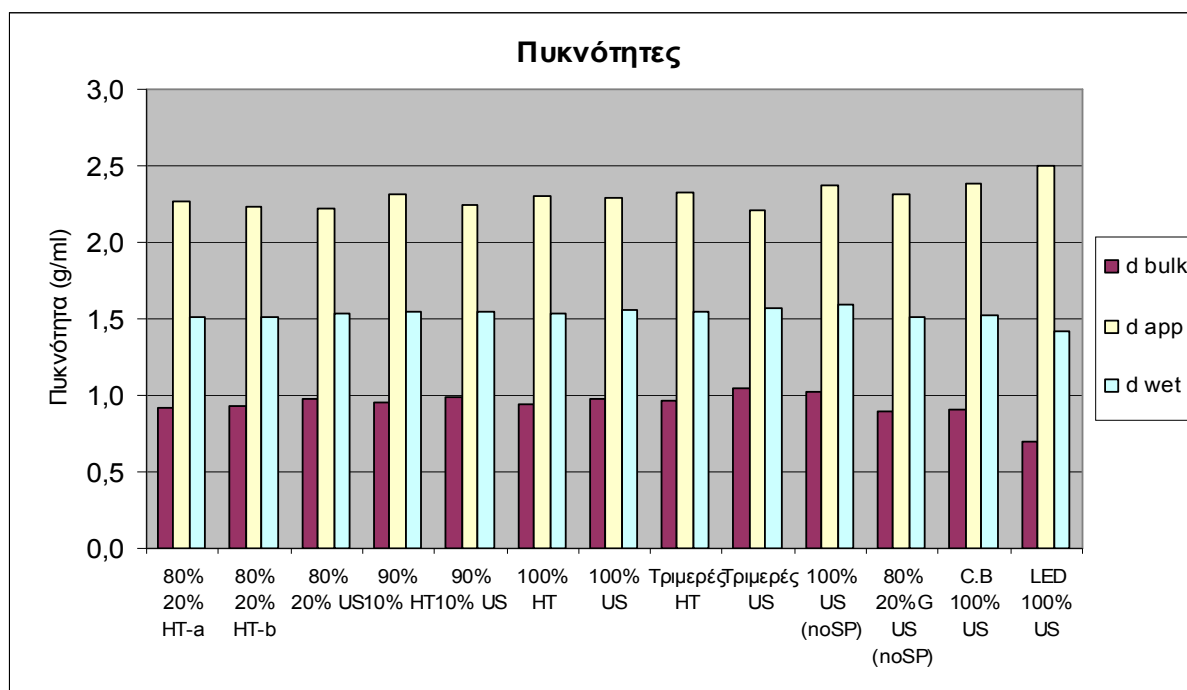
$$d_{\text{bulk}} = m_{\text{min}} / V_k$$

$$d_{\text{wet}} = m_{\text{max}} / V_k$$

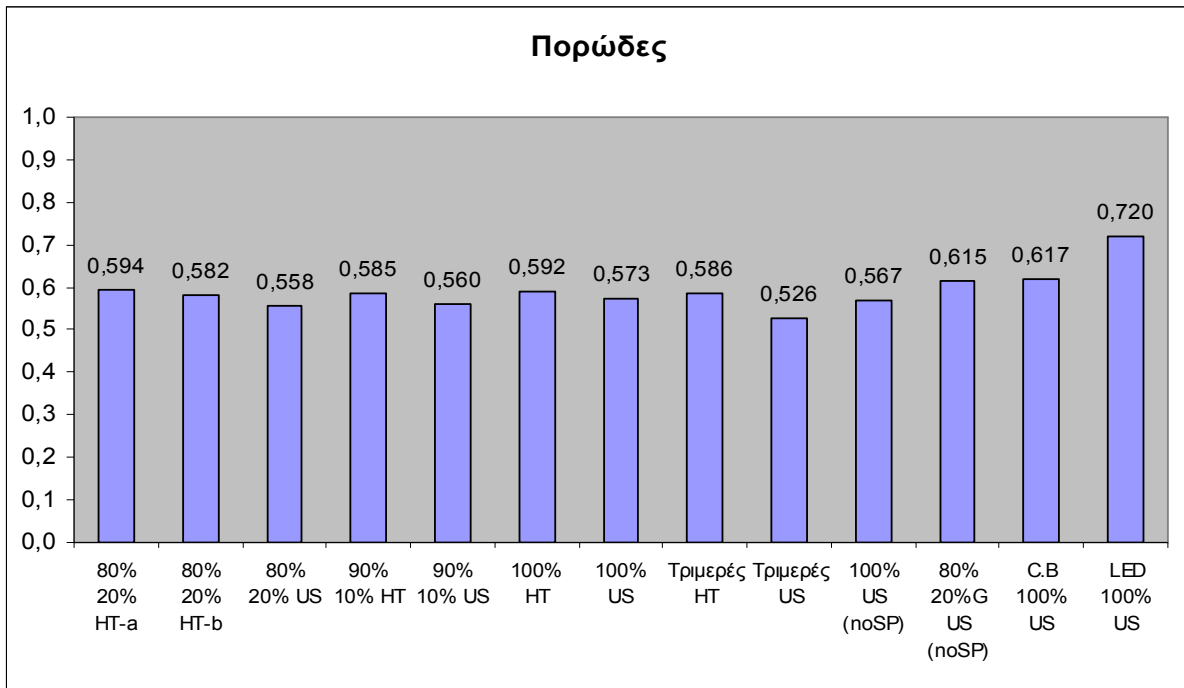
Στο Πίνακα 4 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις του πορώδους και των πυκνοτήτων των διαφορετικών τύπων ενεμάτων, ενώ στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα 2 και 3 με τις μέσες τιμές.

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

Πίνακας 4. Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις των τιμών του ανοιχτού υδατοπερατού πορώδους, της φαινόμενης πυκνότητας, της πυκνότητας στοίβασης και της πυκνότητας υγρού δοκιμίου για κάθε σύνθεση.

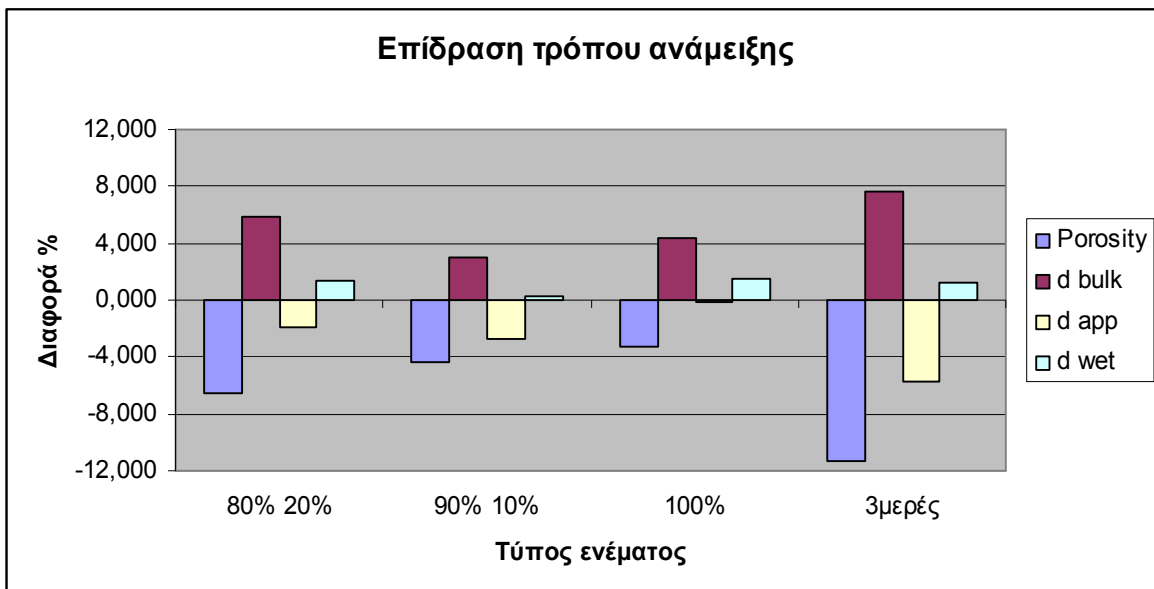


Διάγραμμα 2. Μέσες τιμές πυκνοτήτων.



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 φαινόμενη πυκνότητα όταν η ανάμειξη έχει γίνει με χρήση υπερήχων.



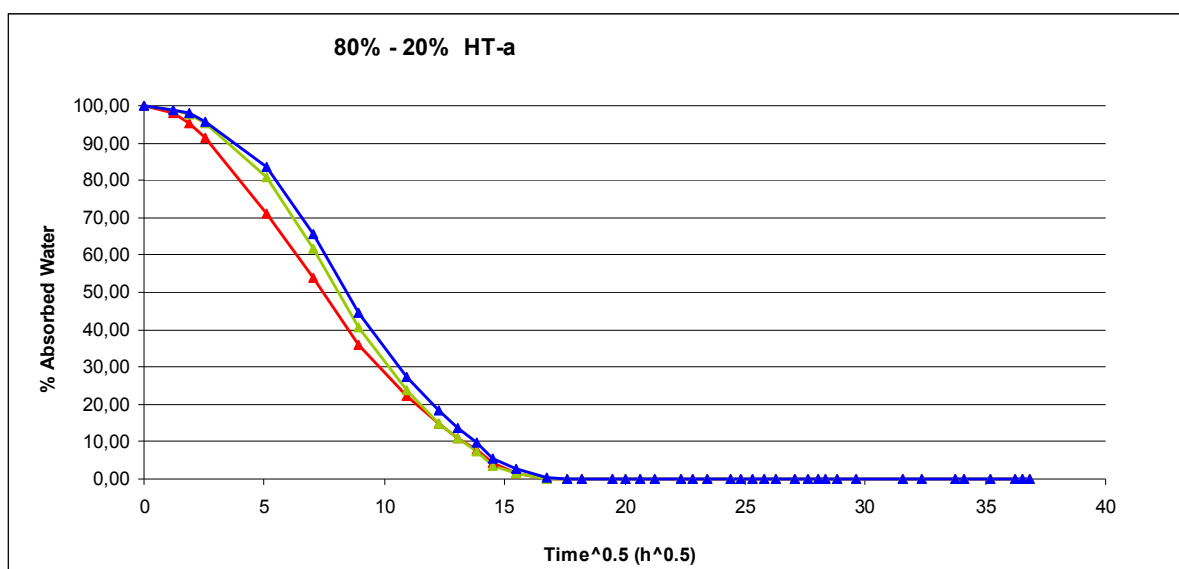
Διάγραμμα 4. Επίδραση του τρόπου ανάμειξης. Παρουσιάζονται οι % μεταβολές των τιμών πορώδους και πυκνοτήτων ανά σύνθεση, όταν η ανάμειξη έχει γίνει με υπέρηχους σε σχέση με όταν η ανάμειξη έχει γίνει με υψηλό στροβιλώδες.

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 αναμείχθηκαν με αναμεικτήρα υψηλού στροβιλώδους (Διάγραμμα 4). Παρατηρούμε μάλιστα ότι η μείωση του πορώδους φαίνεται να έχει σχέση με το ποσοστό της ποζολάνης που περιέχει το ένεμα.

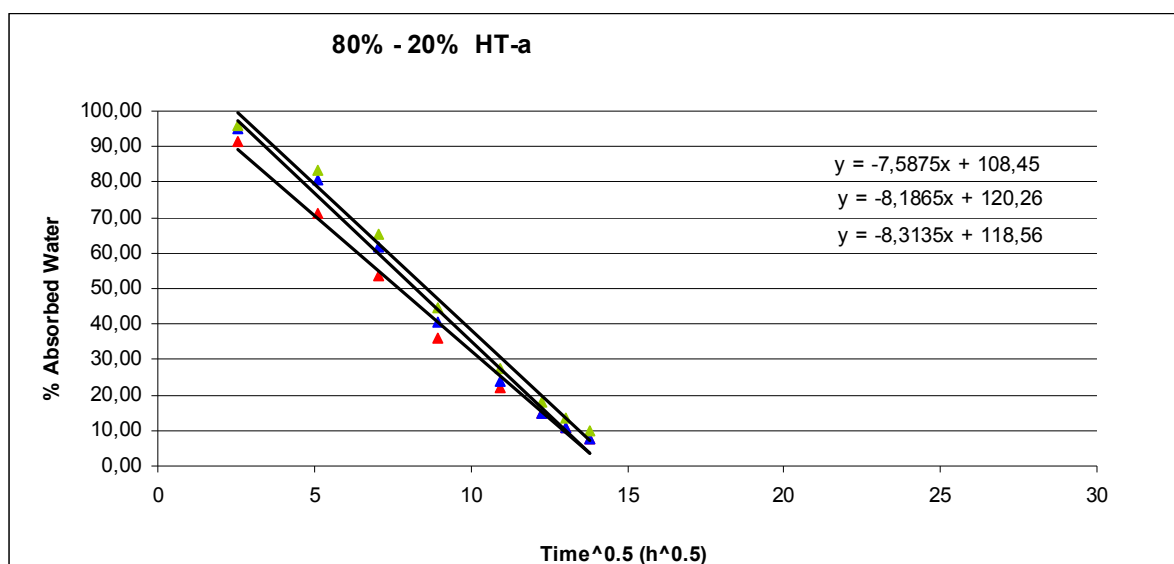
Επιπλέον παρατηρώντας τις τιμές της φαινόμενης πυκνότητας, η οποία χαρακτηρίζει το υλικό ανεξάρτητα του πορώδους βλέπουμε ότι στο ένεμα χωρίς ποζολάνη ο τρόπος ανάμειξης έχει αμελητέα επίδραση στην τιμή ενώ όταν προστίθεται ποζολάνη οι τιμές είναι χαμηλότερες. Αυτό σημαίνει ότι τα προϊόντα της ασβεστοποζολανικής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

Σε ότι αφορά την πυκνότητα πάκτωσης αυτή αυξάνεται με τη χρήση υπερήχων, καθώς η μείωση του πορώδους είναι μεγαλύτερη της μείωσης της φαινόμενης 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 περιεχόμενου αέρα, καθώς η μηχανική ανάμειξη εγκλωβίζει αέρα ενώ οι υπερήχοι αποβάλουν τον ροφημένο αέρα από το νερό και τις κόνιες.

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 συναρτήση 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. Στα διαγράμματα 5α και 5β παρουσιάζεται η καμπύλη ξήρανσης του ενέματος 80%-20% HT-a και ο υπολογισμός της κλίσης της γραμμικής περιοχής. Όλα τα διαγράμματα παρατίθενται στο παράρτημα.



Διάγραμμα 5α

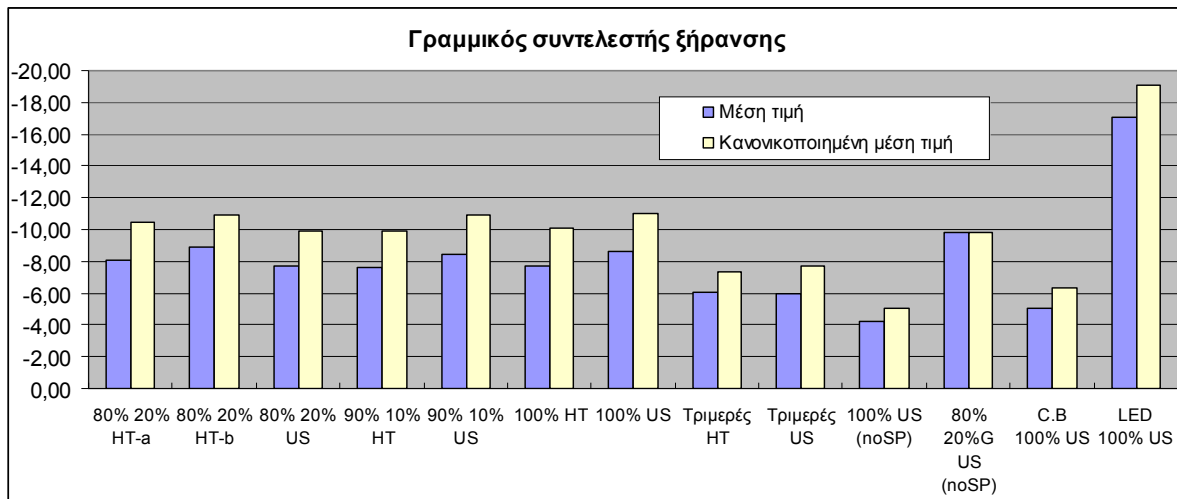


Διάγραμμα 5β

Στον πίνακα 5 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις των πρωτοβάθμιων συντελεστών που προκύπτουν από την προσαρμογή της βέλτιστης ευθείας γραμμής στο γραμμικό τμήμα της καμπύλης. Στο διάγραμμα 6 παρουσιάζεται και ραβδοδιάγραμμα με τις μέσες τιμές. Επειδή το μέγεθος και το σχήμα των δοκιμίων 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 δοκιμίων. 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% HT-a	80% 20% HT-b	80% 20% US	90% 10% HT	90% 10% US	100% HT	100% US	3μερές HT	3μερές US	100% US noSP	80% 20%G US noSP	C.B 100% US	LED 100% US
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 5. Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις των πρωτοβάθμιων συντελεστών κλίσης



Διάγραμμα 6. Μέσες τιμές των πρωτοβάθμιων συντελεστών κλίσης

Με εξαίρεση τη σύνθεση με προσθήκη ποζολάνης σε ποσοστό 20%, παρατηρούμε ότι η ανάμειξη 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.

4. Εξέταση της ανθεκτικότητας σε κύκλους κρυστάλλωσης Na_2SO_4

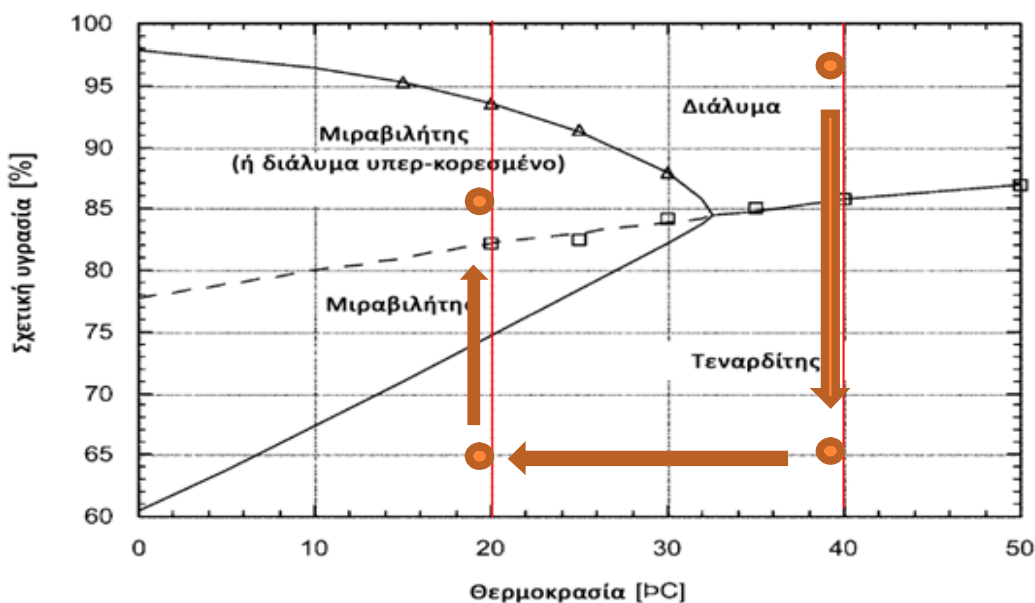
Για την δοκιμή σε κύκλους κρυστάλλωσης Na_2SO_4 , χρησιμοποιήθηκαν ανά δοκιμαζόμενη σύνθεση 6 παραλληλεπίπεδα δοκίμια διαστάσεων $2 \times 2 \times 2$ cm περίπου. Η πειραματική διαδικασία έχει ως εξής:

Αρχικά ζυγίστηκε η μάζα των δοκιμών και τοποθετήθηκαν σε δοχείο που σταδιακά προστίθεται νερό έως ότου πληρωθεί το πορώδες τους. Εάν κατά τη διαβροχή του δοκιμίου εμφανίζονταν ρηγματώσεις, τότε το δοκίμιο απορρίπτοταν. Στη συνέχεια μετρήθηκε η μάζα του δοκιμίου μετά τη διαβροχή. Η μάζα του ροφημένου νερού αντιστοιχεί στον όγκο των υδατοπερατών πόρων του δοκιμίου.

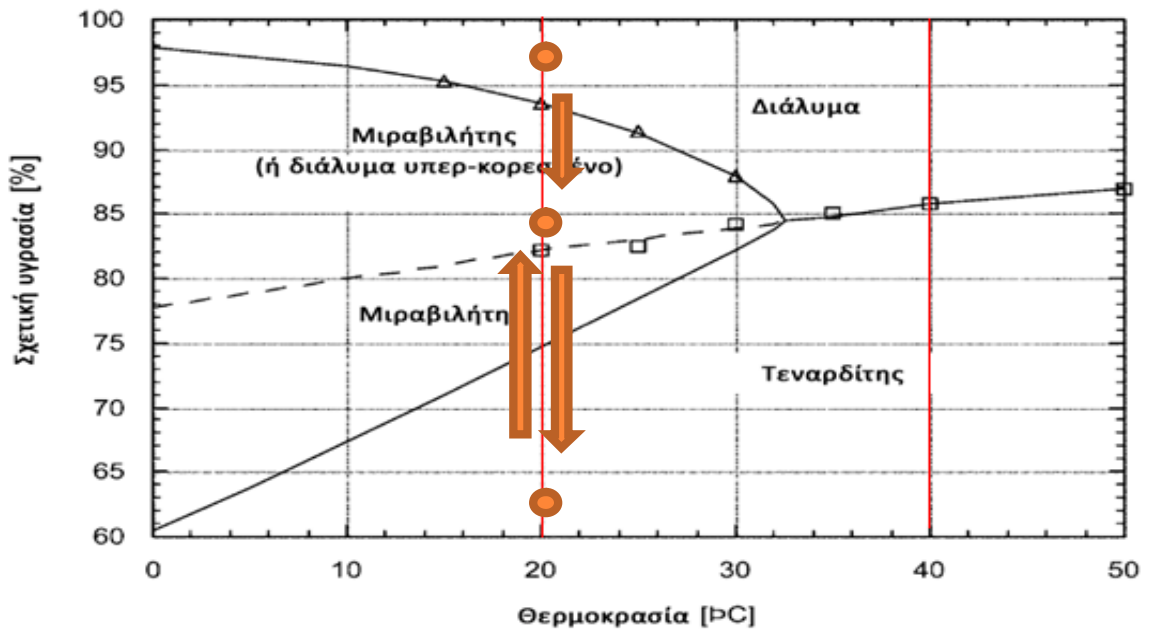
Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε ξηραντήρα με ξηραντικό μέσο, μέσα σε υδατόλουτρο στους 20°C , μέχρι σταθερής μάζας που καταγράφηκε.

Στη συνέχεια τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κύκλους εμβάπτισης σε διάλυμα θειικού νατρίου 10% w/w και ξήρανσης. Η εμβάπτιση πραγματοποιούταν σε δοχεία με πάμα που περιείχαν όγκο διαλύματος ίσο με των όγκο των υδατοπερατών πόρων. Τα δοχεία τοποθετούταν σε υδατόλουτρο στους 20°C για 24h για να ροφηθεί το διάλυμα των αλάτων.

Κατά την ξήρανση, τα μισά δοκίμια ξηραίνονται σε θάλαμο θερμοκρασίας $20 \pm 2^\circ\text{C}$ σχετικής υγρασίας 15 ± 5 RH για 48h, στις οποίες, με βάση τα θερμοδυναμικά δεδομένα είναι σταθερό το ένυδρο με 10 κρυσταλλικά νερά θειικό αλάτι του νατρίου, ο μιραβιλίτης ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Όμως, επειδή η σχετική υγρασία κατά την ξήρανση παρέμενε πάντα κάτω από 40%, κρυσταλλωνόταν εκτός ισορροπίας και το άνυδρο θειικό αλάτι του νατρίου, ο τεναρδίτης³⁷. Τα υπόλοιπα δοκίμια ξηραίνονται για 24h σε πυριαντήριο σε θερμοκρασία $40 \pm 5^\circ\text{C}$ στις οποίες με βάση τα θερμοδυναμικά δεδομένα κρυσταλλώνεται τεναρδίτης (Na_2SO_4).



³⁷ Πηγή: Rodriguez-Navarro C., Doehne E., Sebastian E., "How does sodium sulfate crystallize? Implications for the decay and testing of building materials", Cement and Concrete Research 30 (2000) 1527- 1534



Διαγράμματα 7A, 7B. Σχηματική παρουσίαση της κρυστάλλωσης του θειικού νατρίου στα δοκίμια από τη στιγμή την διάλυσης των κρυστάλλων κατά την εμφύπτιση στο διάλυμα έως την εκ νέου κρυσταλλώση τους κατά την ξήρανση και την ανακρυστάλλωση σε υπέρκορες συνθήκες. A: Ξήρανση στους 40°C. B: Ξήρανση στους 20°C.

Οι κύκλοι εμφύπτισης και ξήρανσης επαναλαμβάνονται έως ότου αστοχήσει το δοκίμιο. Ως κριτήριο τελικής αστοχίας θεωρήθηκε η ρήξη που περνάει από την κύρια μάζα του δοκίμιου (όχι η απώλεια των ακμών ή η αποφλοίωση) ή η κατάρρευση του δοκίμιου σε μικρά θραύσματα. Στον πίνακα 6 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα ανά τύπο αστοχίας. Το σύνολο των φωτογραφιών παρατίθεται στο παράρτημα.



Δοκίμιο που δεν έχει ακόμα αστοχήσει.



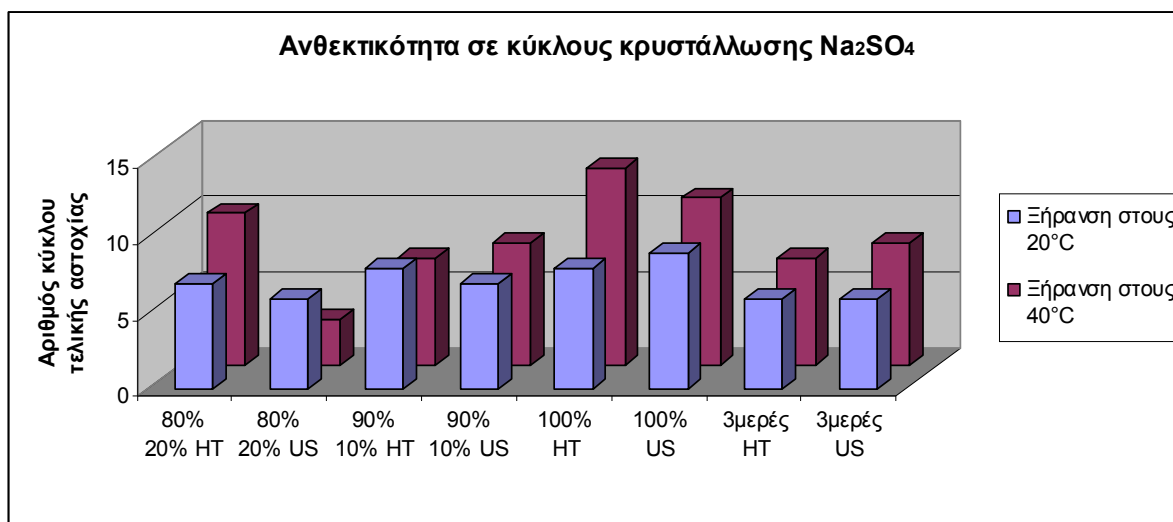
Δοκίμιο που έχει αστοχήσει με ρήξη στην κύρια μάζα.



Δοκίμιο που έχει αστοχήσει με κατάρρευση σε μικρά θραύσματα.

Πίνακας 6. Παράδειγμα τύπων αστοχίας.

Στο διάγραμμα 8 παρουσιάζεται ο μέσος όρος του αριθμού κύκλων διαβροχής και κρυστάλλωσης Na_2SO_4 που απαιτήθηκαν έως την τελική αστοχία κάθε τύπου ενέματος ανάλογα με τη θερμοκρασία ξήρανσης.



Διάγραμμα 8. Μέσος όρος αριθμού κύκλων διαβροχής – ξήρανσης, έως την τελική αστοχία των δοκιμίων κάθε σύνθεσης.

Παρατηρούμε ότι πιο ανθεκτικά είναι τα δοκίμια της φυσικής υδραυλικής ασβέστου χωρίς προσθήκη ποζολάνης, ακολουθούν αυτά με προσθήκη ποζολάνης σε ποσοστό 10%, ενώ τα δοκίμια με προσθήκη ποζολάνης σε ποσοστό 20% έχουν χειρότερη συμπεριφορά ακόμα κι από το τριμερές ένεμα που περιέχειτσιμέντο Portland. Ο τρόπος ανάμειξης δεν επηρεάζει της ανθεκτικότητα στα υδατοδιαλυτά άλατα.

Σε ότι αφορά τις συνθήκες ξήρανσης παρατηρούμε ότι πιο γρήγορα αστοχούν τα δοκίμια που ξηραίνονται στους 20°C, από ότι αυτά που ξηραίνονται στους 40°C. Οφείλεται στο γεγονός ότι φθορά από το θειικό νάτριο δεν οφείλεται σε μετατροπή του τεναρδήτη σε μιραβιλήτη μέσω ενσωμάτωσης κρυσταλλικών νερών στο πλέγμα του τεναρδήτη, καθώς στην περίπτωση αυτή θα αστοχούσαν πρώτα τα δοκίμια που ξηραίνονταν στους 40°C. Αντίθετα αυτό που συμβαίνει είναι ότι όταν τα δοκίμια βυθίζονται ξανά στο διάλυμα, διαλύονται οι κρύσταλοι είτε του τεναρδήτη είτε του μιραβιλήτη και στη συνέχεια κρυσταλλώνεται μιραβιλήτης σε υπέρκορες συνθήκες στο εσωτερικό των πόρων³⁸.

Οι τάσεις που προκαλούν την ρήξη του δοκιμίου δημιουργούνται όταν το ποσοστό του ροφημένου άλατος στο πορώδες του δοκιμίου είναι αρκετά μεγάλο ώστε η κρυστάλλωση να μην μπορεί να συμβαίνει επιλεκτικά προς κατευθύνσεις που δεν εμποδίζονται από τα τοιχώματα των πόρων. Η φθορά αυτού του τύπου λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της ρόφησης του διαλύματος και αφορά όλη τη μάζα του δοκιμίου. Αντίθετα κατά την ξήρανση, είτε αυτή γίνεται στους 20°C είτε στους 40°C, καθώς αυτή γίνεται σε συνθήκες χαμηλής σχετικής υγρασίας, κρυσταλλώνεται τεναρδίτης κοντά στην επιφάνεια του δοκιμίου (εξωτερική ή γύρω από ρωγμές) με αποτέλεσμα την αποφλοιώση ή τη ρηγμάτωση σε μεγάλα κομμάτια.

³⁸ Πηγή: N. Tsui, R.J. Flatt, G.W. Scherer, "Crystallization damage by sodium sulfate", Journal of Cultural Heritage, 4, 2003, pp 109-115.

5. 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. Εδώ φαίνεται ότι το ένεμα φυσικής υδραυλικής ασβέστου εμφανίζει την καλύτερη συμπεριφορά, ενώ το ένεμα με προσθήκη ποζολάνης 20% είναι λιγότερο ανθεκτικό ακόμα κι από το τριμερές ένεμα. Το γεγονός αυτό ίσως οφείλεται σε μείωση της διαμέτρου των πόρων του. Στα ενέματα υδραυλικής ασβέστου υπάρχει 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 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.

Τέλος παρατηρήθηκε ότι ειδικά στα ενέματα που προστίθεται ποζολάνη, η ανάμειξη με υπερήχους οδηγεί σε λίγο μικρότερες τιμές πορώδους χωρίς όμως η μείωση αυτή να σχετίζεται με διαφοροποίηση στην ανθεκτικότητα σε κρυστάλλωση θειικού νατρίου.

Βιβλιογραφία

1. Γκουιντάλιας Ι., «Σχεδιασμός βάσης δεδομένων χαρακτηρισμού δομικών υλικών, διάγνωσης φθοράς και ενεργειακής απόδοσης σε ιστορικά συγκροτήματα κτιρίων και μνημείων», Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ, Αθήνα 2011
2. Κανελλοπούλου Δ., «Φυσικοχημική διερεύνηση της αποσάθρωσης δομικών υλικών ιστορικών μνημείων και μέθοδοι προστασίας», Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2012
3. Τσέλιου Μ. Α., Διατηρητέα κτίρια και ιστορικά διατηρητέα μνημεία: νομικό πλαίσιο προστασίας και τρόποι ενίσχυσης, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2010
4. Μπούντα Ο., «Η εφαρμογή των ενεμάτων στην αποκατάσταση των μνημείων», Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2007
5. Μιλτιάδου Α., «Γενική παρουσίαση της εφαρμογής των ενεμάτων για επισκευή λιθοδομών», 1991
6. Μιλτιάδου Α., «Η μέθοδος των υδραυλικών ενεμάτων για την επισκευή και ενίσχυση παλιών κατασκευών από λιθοδομή», Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα, Ιούνιος 2004
7. Μιλτιάδου Α., «Η χρήση των ενεμάτων ως μέθοδος επισκευής και ενίσχυσης λιθοδομών», Πρακτικά Διεθνούς Συμποσίου Θεσσαλονίκης, 1985
8. Μιλτιάδου Α., «Grouting as a method for the repair of masonry Monuments», Εργασία για Μ.Α., ΙΑΑΣ, Πανεπιστήμιο του York, 1985
9. «Τεχνικές Προδιαγραφές και απαιτούμενος Εξοπλισμός για το σχεδιασμό και την Εφαρμογή των Ενεμάτων», Διεύθυνση Τεχνικών Έργων Αναστήλωσης, ΥΠΠΟ
10. Παπαποστόλου Δ., «Ενέματα και Κονιάματα σε μνημεία», Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2005
11. Κορωναίος Α., Πουλάκος Γ., Τεχνικά Υλικά Τόμος 1, ΕΜΠ, Αθήνα 2006
12. Μιλτιάδου Α., Τάσιος Θ., «Ορθολογικά κριτήρια για την επισκευή και ενίσχυση των υδραυλικών ενεμάτων»
13. Σκουλικίδης Θ., «Διάβρωση και συντήρηση των δομικών υλικών των μνημείων», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο 2000
14. Σακκή Α., «Διερεύνηση και καταγραφή των τύπων φθοράς του Αρχαίου Θεάτρου Σικυώνος», Διπλωματική Εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα 2011
15. Rodriguez-Navarro C., Doehne E., Sebastian E., "How does sodium sulfate crystallize? Implications for the decay and testing of building materials", Cement and Concrete Research 30 (2000) 1527- 1534
16. Borrelli E., Urland A., "Conservation of architectural heritage, historic structures and material", ICCROM, Rome, Italy 1999
17. Μοροπούλου Α., «Χαρακτηρισμός, έλεγχος ποιότητας, διάγνωσης φθοράς και συντήρηση δομικών υλικών. Μεθοδολογικά ενόργανων και μη καταστρεπτικών τεχνικών», Έκδοση ΕΜΠ, Αθήνα 2005
18. Τσίμας Σ., Τσιβιλής Σ., «Επιστήμη και τεχνολογία τσιμέντου», Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα 2004
19. Mechanical Properties of Three- Leaf Stone Masonry after Grouting, Miltiadou- Fezans, Vintzileou, Papadopoulou, Kalagri
20. Valluzi M. R., "Comportamento meccanico di murature consolidate con materiali e tecniche a base di calce", Modena, 2000

21. Grouting of three - leaf stone masonry: types of grouts, mechanical properties of masonry before and after grouting Vintzileou
22. Η Μέθοδος των Υδραυλικών Ενεμάτων Για την Επισκευή και Ενίσχυση Παλαιών Κατασκευών από Λιθοδομή, Μιλτιάδου – Fezans, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Παθολογία των Κατασκευών
23. N. Tsui, R.J. Flatt, G.W. Scherer, “Crystallization damage by sodium sulphate”, Journal of Cultural Heritage, 4. 2003, pp 109-115