

Πολυτεχνείο Κρήτης (TUC)
Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών
Ερευνητική Εργασία, 9ο Εξάμηνο
Ακαδημαϊκό Έτος : 2021 - 2022

ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ ΕΝΕΜΑΤΩΝ

ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΩΝ ΩΣ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

INJECTION GROUTING HANDBOOK

FROM DESIGN TO IMPLEMENTATION

ΙΩΑΝΝΗΣ ΜΑΛΕΒΙΤΗΣ



Επιβλέπουσα :

Μαραβελάκη Παγώνα – Νόννη

Τριμελής Επιτροπή Αξιολόγησης :

Μαραβελάκη Παγώνα – Νόννη

Προβιδάκης Κωνσταντίνος

Σταυρουλάκη Μαρία

Περίληψη

Η παρούσα ερευνητική εργασία αποτελεί ένα εγχειρίδιο για τα ενέματα· μια επισκευαστική τεχνική για τοιχοποιίες με σοβαρές βλάβες. Αυτή η τεχνική αφορά την εξυγίανση και ενίσχυση ιστορικών κατασκευών. Στόχος της εργασίας είναι να τονιστεί η σημαντικότητα της προστασίας των μνημείων και να τεκμηριωθεί γιατί η ενεμάτωση έχει εδραιωθεί ως επισκευαστική μέθοδος σε τέτοιου είδους κατασκευές. Επιπλέον, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην ανάγκη συμβατότητας των υλικών του ενέματος με αυτά της αρχικής δομής της κατασκευής. Στην εργασία αναφέρονται οι πρώτες ύλες, τα γενικά χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες των ενεμάτων, μερικά στοιχεία για την εξέλιξη της διαδικασίας σύνθεσης και εφαρμογής ενεμάτων, καθώς και οι βασικές κατηγορίες αυτών σε σχέση με τη φύση των πρώτων υλών (οργανικά - ανόργανα). Γίνεται κατηγοριοποίηση των ανόργανων ενεμάτων με κριτήριο τη συνδετική κονία που χρησιμοποιείται ως βάση (τσιμέντο, άσβεστος, πηλός) και αναφέρονται τα πλέον χρησιμοποιούμενα πρόσμικτα που μπορούν να εισαχθούν στο μείγμα του ενέματος καθώς και η μέθοδος παρασκευής του. Γίνεται αναφορά, επίσης, στις ιδιότητες των ενεμάτων τόσο σε ρευστή μορφή (ρευστότητα, διεισδυτικότητα και σταθερότητα όγκου), όσο και σε σκληρυμένη κατάσταση (φυσικο-χημικές και μηχανικές ιδιότητες), καθώς και στους κυριότερους εργαστηριακούς ελέγχους, οι οποίοι με συγκεκριμένη μεθοδολογία αποτιμούν τις ιδιότητες αυτές. Μετά την παρασκευή και τον έλεγχο του ενέματος ακολουθεί η έγχυση του στη δομή που χρήζει αποκατάστασης (τοιχοποιία, διακοσμημένη επιφάνεια). Η εργασία ολοκληρώνεται με την παρουσίαση και την αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας εφαρμογής ενεμάτων σε διάφορες κατασκευές.

Abstract

This research Thesis is a handbook for injection grouting, a restoration technique for severely damaged masonries and belongs to the structural engineering domain. This method is related to the restoration and conservation of historic structures. This Thesis is aiming to address the importance of protecting monuments and to justify why grouts are established as a restoration method for this kind of structures. In addition, special emphasis is given to the necessity of the compatibility between the grout materials those used in the original structure. In this work are mentioned: the raw materials, general features and properties of grouts, (information of the evolution of the process and their implementation, as well as the main categories of grouts in relation to the nature of the raw materials (organic - inorganic) . Inorganic grouts are classified according to the type of mortar used as a base (cement, lime, clay). Additionally, the most common admixtures that can be embedded into the grout mixture and the method of preparation are remarked. Reference is also made to the properties of the grouts both in the fresh state (fluidity, penetrability and volume stability) and in the hardened state (physical-chemical and mechanical properties), as well as to the main laboratory tests, which utilize a specific methodology to assess those properties. Once the grout has been prepared and tested, it is injected into the structure (masonry, decorated surface). Thesis concludes with a presentation and detailed description of the process of implementing grout to various structures.

Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή	04
2.	Γενικά χαρακτηριστικά ενεμάτων	06
2.1.	Ορισμός	06
2.2.	Ιστορική Αναδρομή	06
2.3.	Κατηγορίες ενεμάτων	09
2.3.1.	Οργανικά	09
2.3.2.	Ανόργανα	09
3.	Σύνθεση Ενεμάτων	10
3.1.	Πρώτες ύλες ενεμάτων	10
3.1.1.	Συνδετικά υλικά	11
3.1.1.1.	Τσιμέντο	11
3.1.1.2.	Άσβεστος	13
3.1.1.3.	Ποζολάνες	16
3.1.2.	Μέσα εναιώρησης	18
3.1.2.1.	Νερό	18
3.1.2.2.	Αιθανόλη	18
3.1.3.	Πρόσμικτα	19
3.1.3.1.	Υπερρευστοποιητές	19
3.1.3.2.	Ρητίνες	20
3.1.3.3.	Λευκό τσιμέντο	20
3.1.3.4.	Ίνες	21
3.2.	Προετοιμασία Ενέματος	22
3.3.	Παραδείγματα σύνθεσης ενεμάτων	23
4.	Ιδιότητες και έλεγχοι ενεμάτων	24
4.1.	Ιδιότητες σε ρευστή κατάσταση	24
4.1.1.	Χρόνος Ροής (Ρευστότητα)	24
4.1.2.	Ενεσιμότητα – Διεισδυτικότητα	26
4.1.3.	Σταθερότητα Όγκου	28
4.2.	Ιδιότητες Σκληρυμένης Κατάστασης	29
4.2.1.	Φυσικές Ιδιότητες	29
4.2.1.1.	Έλεγχος Συρρίκνωσης, (μεταβολή όγκου/βάρους)	29
4.2.1.2.	Πορώδες, Απορροφητικότητα, Φαινόμενο Ειδικό Βάρος	31
4.2.1.3.	Τριχοειδής Απορρόφηση	32
4.2.2.	Μηχανικές ιδιότητες	33
4.2.2.1.	Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (ΔΜΕ)	33
4.2.2.2.	Αντοχή σε εφελκυσμό	34
5.	Διαδικασία Έγχυσης Ενεμάτων σε τοιχοποιίες	36
5.1.	Διαδικασία πριν την ενεμάτωση	36
5.2.	Εφαρμογή Ενέματος	36
5.2.1.	Εισαγωγή ενέματος υπό πίεση	36
5.2.1.1.	Ενέματα ομογενοποίησης μάζας	37
5.2.1.2.	Ενέματα σε θέσεις τοπικών φθορών	38
6.	Εφαρμογή ενεμάτων σε διακοσμημένες αρχιτεκτονικές επιφάνειες.	39
6.1.	Φθορές αρχιτεκτονικών επιφανειών	39
6.2.	Μεθοδολογία	40
6.3.	Επιλογή του κατάλληλου ενέματος	41
6.4.	Πριν την ενεμάτωση	41

6.5.	Έγχυση ενέματος	42
6.6.	Μετά την ενεμάτωση	42
7.	Παραδείγματα εφαρμογής ενεμάτων	43
7.1.	Σταθεροποίηση τοιχοποιίας της Μονής Δαφνίου	43
7.2.	Σταθεροποίηση τοιχογραφιών στην Παναγία τη Φανερωμένη στη Νέας Σκιώνης της Χαλκιδικής	45
7.3.	Συντήρηση αρχαίων Χαρακτικών στο El Kuru, Σουδάν	47
7.4.	Αποκατάσταση Ιερού Κουβουκλίου του Πανάγιου Τάφου, Ιερουσαλήμ	50
7.5.	Σταθεροποίηση τοιχογραφιών στο Hadi Rani Mahal, Nagaur, Ινδία	52
7.5.1.	Γενικά Χαρακτηριστικά	52
7.5.2.	Μεθοδολογία ανάπτυξης, ελέγχου και εφαρμογής ενέματος	52
7.5.2.1.	Ορισμός προβλημάτων και κριτηρίων εφαρμογής ενέματος	53
7.5.2.2.	Σύνθεση ενεμάτων	54
7.5.2.3.	Πρώτο στάδιο ελέγχου	55
7.5.2.4.	Δεύτερο στάδιο ελέγχου	57
7.5.2.5.	Εφαρμογή και αξιολόγηση	58
7.5.3.	Συμπεράσματα	58
8.	Συμπεράσματα	59
9.	Παραπομπές	60
9.1.	Π1. Συνθέσεις ενεμάτων	60
9.2.	Π2. Ιδιότητες σε νωπή κατάσταση	66
9.3.	Π3. Ιδιότητες σε σκληρυμένη κατάσταση	71
	Βιβλιογραφία	76
	Πηγές Εικόνων	79

1. Εισαγωγή

IMBUED WITH A MESSAGE FROM THE PAST, THE HISTORIC MONUMENTS OF GENERATIONS OF PEOPLE REMAIN TO THE PRESENT DAY AS LIVING WITNESSES OF THEIR AGE-OLD TRADITIONS. PEOPLE ARE BECOMING MORE AND MORE CONSCIOUS OF THE UNITY OF HUMAN VALUES AND REGARD ANCIENT MONUMENTS AS A COMMON HERITAGE. THE COMMON RESPONSIBILITY TO SAFEGUARD THEM FOR FUTURE GENERATIONS IS RECOGNIZED. IT IS OUR DUTY TO HAND THEM ON IN THE FULL RICHNESS OF THEIR AUTHENTICITY.
(THE VENICE CHARTER 1964)

ΔΙΑΠΟΤΙΣΜΕΝΑ ΜΕ ΕΝΑ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΟ ΜΗΝΥΜΑ ΑΠΟ ΤΟ ΠΑΡΕΛΘΟΝ, ΤΑ ΜΝΗΜΕΙΑ ΩΣ ΕΡΓΑ ΤΩΝ ΛΑΩΝ ΣΤΕΚΟΝΤΑΙ ΜΕΧΡΙ ΣΗΜΕΡΑ ΣΑΝ ΖΩΝΤΑΝΕΣ ΜΑΡΤΥΡΙΕΣ ΤΗΣ ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΑΣ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ ΤΟΥΣ. Η ΑΝΘΡΩΠΟΤΗΤΑ ΠΟΥ ΑΠΟΚΤΑ ΟΛΟ ΚΑΙ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΣΥΝΕΙΔΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΩΝ ΑΞΙΩΝ, ΤΑ ΘΕΩΡΕΙ ΣΑΝ ΚΟΙΝΗ ΚΛΗΡΟΝΟΜΙΑ. ΑΠΕΝΑΝΤΙ ΣΤΙΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΓΕΝΙΕΣ ΝΟΙΩΘΕΙ ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΣΩΣΗ ΤΟΥΣ ΚΑΙ ΕΧΕΙ ΧΡΕΟΣ ΝΑ ΤΑ ΠΑΡΑΔΩΣΕΙ ΜΕ ΟΛΟ ΤΟΝ ΠΛΟΥΤΟ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΥΘΕΝΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥΣ.

Ο άνθρωπος από τις απαρχές της ύπαρξής του συνειδητοποίησε τη φθοροποιό δύναμη του χρόνου. Παρατηρώντας την επίδραση του πάνω στον ίδιο του τον εαυτό, με το σταδιακό αδυνάτισμα της μνήμης, προσπάθησε να καταπολεμήσει αυτή την πραγματικότητα, στο βαθμό που ήταν δυνατό. Αν αναλογιστούμε την ιλιγγιώδη αύξηση της εξέλιξης και τη φθορά που προκαλεί στην πολιτιστική μας κληρονομία, καταλήγουμε στο ότι η προστασία αυτής αποτελεί αναγκαιότητα.

Η μέριμνα για τη διαφύλαξη των μνημείων έκανε την εμφάνιση της, κυρίως σε Ευρωπαϊκές χώρες, τον 19ο αιώνα με το κίνημα του ρομαντισμού, το οποίο υποστήριζε την επιστροφή στις αξίες του παρελθόντος. Η βιομηχανική επανάσταση και η αστικοποίηση ήταν καταληκτικοί παράγοντες για την εμπορευματοποίηση της γης στις αστικές περιοχές και για την εγκατάλειψη πολλών παραδοσιακών οικισμών. Έτσι κατά τον 19ο αιώνα ξεκίνησε η συστηματική καθιέρωση κανόνων δικαίου και η ίδρυση διοικητικών οργάνων για την προστασία αρχαιολογικών κυρίως μνημείων.

Καθώς τα αρχιτεκτονικά μνημεία αποτελούν ένα από τα κυριότερα υποσύνολα της πολιτισμικής κληρονομιάς ενός τόπου, είναι φυσικό να βρίσκονται στο επίκεντρο των προσπαθειών για διάσωση και προστασία. Στην εποχή μας, διάφοροι φορείς έχουν συμβάλει στην προστασία των μνημείων. Η διασφάλιση της πολιτιστικής κληρονομιάς στη σύγχρονη εποχή ξεκίνησέ στις αρχές του 20ου αιώνα με το 4ο Διεθνές Αρχιτεκτονικό Συνέδριο των Αθηνών και με τη συγκρότηση της χάρτας των Αθηνών, της οποίας επιμελήθηκε τη δημοσίευση ο La Corbusier. Λίγα χρόνια αργότερα η UNESCO υιοθέτησε μια σημαντική Σύσταση για την προστασία των κέντρων των σύγχρονων πόλεων και των παραδοσιακών οικισμών. Το 1954 θεσπίστηκαν κάποιες ρυθμιστικές παρεμβάσεις με την Ευρωπαϊκή Πολιτιστική Σύμβαση, όπου έγιναν οι πρώτες αναφορές για την κοινή ευρωπαϊκή πολιτιστική κληρονομία. Σημαντικός σταθμός υπήρξε το 1964, το 2ο Συνέδριο Αρχιτεκτόνων στη Βενετία, όπου με τη χάρτα της Βενετίας ορίζονται βασικές αρχές για την προστασία των μνημείων. Από τότε άρχισαν συστηματικές συζητήσεις σε συνέδρια και θεσπίστηκαν διάφορες αρχές για την προστασία και τις μεθόδους επέμβασης σε ιστορικές κατασκευές και σύνολα.

Οι πρωτοβουλίες για τη συντήρηση της πολιτιστικής μας κληρονομιάς σχετίζονται πρωτίστως με τη διατήρηση της ως μαρτυρία για τις επόμενες γενιές και σε μικρότερο βαθμό με την ανάγκη επανάχρησης των κτιρίων. Η διαδικασία αυτή συχνά απαιτεί την αποκατάσταση, η οποία πρέπει να πληροί δύο κριτήρια: τη μηχανική στερέωση της κατασκευής και τη διατήρηση της αρχικής της μορφής στο βαθμό που είναι δυνατό. Με άλλα λόγια, πρέπει να

εξασφαλίζεται η στατικότητα και οι αρχιτεκτονικές αξίες της κατασκευής. Αυτές οι δυο αρχές πρέπει να συνεργάζονται, αφού χωρίς την δομική ασφάλεια υπάρχει μεγάλη πιθανότητα για ολική κατάρρευση της κατασκευής. Η διασφάλιση των μνημείων μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση σύγχρονων υλικών και μεθόδων επέμβασης.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί πως η πολιτιστική κληρονομία της Ελλάδας, όπως και των περισσότερων ευρωπαϊκών χωρών, αποτελείται κυρίως από εκατομμύρια κυβικά μέτρα τοιχοποιίας και πλινθοδομών. Αυτό καθιστά τη συντήρηση τοίχων από οπτόπλινθους και λίθους εξαιρετικά σημαντική για τη διατήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς. Οι φθορές που παρατηρούνται σε αυτά τα δομικά στοιχεία προέρχονται από το πέρασμα του χρόνου, από φυσικά φαινόμενα καθώς και από την ανθρώπινη παρέμβαση. Για παράδειγμα, η βροχή και η καταπόνηση των δομών από σεισμικές δονήσεις προκαλούν διάβρωση των κονιαμάτων και των επιχρισμάτων. Επιπλέον η κλιματική αλλαγή, με τις ακραίες εναλλαγές του κλίματος ακόμα και σε μικρά χρονικά διαστήματα επιφέρει σημαντικές αλλαγές στη σύσταση του εδάφους. Η διάβρωση του εδάφους προκαλεί καθιζήσεις, με αποτέλεσμα την εμφάνιση ρωγμών σε κατασκευές, οι οποίες αν και έχουν αντέξει σε βάθος χρόνου, παρουσιάζουν φθορές που ήταν αδύνατο να προβλεφθούν. Σημαντικό ρόλο στις καθιζήσεις του εδάφους έχει και ο άνθρωπος, ο οποίος με την υπεράντληση νερού προκαλεί μείωση των υπόγειων υδάτων. Ακόμα η υπερφόρτωση των δομών με νέους ορόφους προκαλεί σημαντικές φθορές στις κατασκευές. Καθώς οι φθορές αυτές διαρκώς αυξάνονται, η εξυγίανση τους χρήζει ιδιαίτερης προσοχής. Η ενεμάτωση αποτελεί μια εκ των πολλών μεθόδων συντήρησης, η οποία αποκαθιστά τα ελλειπή και τα φθαρμένα δομικά στοιχεία της τοιχοποιίας.

Υπάρχουν αρκετές τεχνικές για την αποκατάσταση των μνημείων, οι περισσότερες όμως επηρεάζουν την αυθεντικότητα αυτών. Ιδανικά όλες οι παρεμβάσεις που γίνονται, δεν θα πρέπει να προκαλούν αλλοιώσεις στη δομική και την αρχιτεκτονική αυθεντικότητα των κατασκευών και πρέπει να είναι όσο το δυνατόν αναστρέψιμες. Στον πολυδιάστατο και σύνθετο τομέα των αποκαταστάσεων, η έγκυση ενέματος έχει εδραιωθεί στις αρχαίες τοιχοποιίες, αφού ενισχύει μηχανικά τις κατασκευές χωρίς να προκαλεί αλλοιώσεις στην εμφάνιση αυτών.

Ωστόσο, η διαδικασία της ενεμάτωσης δεν είναι αναστρέψιμη. Γι' αυτό το λόγο η επιλογή των κατάλληλων υλικών και η συμβατότητα τους με την αρχική δομή χρήζει ιδιαίτερης σημασίας, ώστε να διαφυλαχθεί η αυθεντικότητα του μνημείου. Σχετικά με αυτόν τον προβληματισμό, τις τελευταίες δεκαετίες έχουν διεξαχθεί πολλές έρευνες τόσο σε ελληνικές πολυτεχνικές σχολές όσο και σε σχολές του εξωτερικού. Τα στοιχεία για τη διάλεξη που θα σας παρουσιάσω προκύπτουν από τις προαναφερθείσες έρευνες (ενδεικτικά θα αναφέρω τα ιδρύματα TUC, ΕΜΠ, ΑΠΘ και GCI), από ατομικές έρευνες επιστημών (ενδεικτικά αναφέρω Miltiadou F., Pacht V., Papayianni I. και Pacian Ch.) καθώς και από τεχνικά πρότυπα προδιαγραφών.

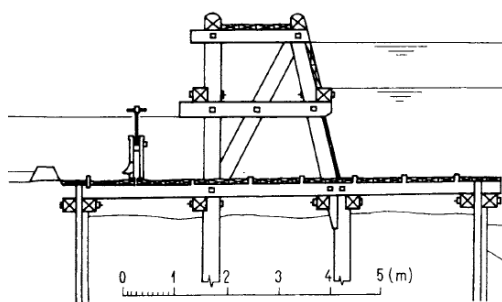
2. Γενικά χαρακτηριστικά ενεμάτων

Η ενεμάτωση είναι μια συνηθισμένη διαδικασία που εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια έργων αποκατάστασης με στόχο την ενίσχυση της κατασκευής. Η έγχυση υγρού ενέματος με χαμηλή πίεση στην τοιχοποιία έχει σκοπό τον σχηματισμό μιας ομοιογενούς δομής, χωρίς ρωγμές και κενά στην εσωτερική μάζα της τοιχοποιίας και χωρίς να διακυβεύεται η σταθερότητα των ασθενέστερων στοιχείων. Έτσι, συμβάλλει άμεσα στην αντοχή, τη στεγανότητα και την ανθεκτικότητα της κατασκευής. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει το μείγμα να έχει την ικανότητα να εισχωρήσει στις πιο λεπτές ρωγμές ξεπερνώντας την αντίσταση ροής, για να καλύψει το μέγιστο δυνατό όγκο κενών, αποφεύγοντας τα περισσότερα εμπόδια. Καθώς η ενεμάτωση αποτελεί μη αναστρέψιμη παρέμβαση, πολλά υλικά έχουν μελετηθεί και προταθεί για την εφαρμογή τους σε ιστορικές κατασκευές. Η επιλογή του κατάλληλου υλικού πρέπει να γίνεται σύμφωνα με τα φυσικά, χημικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών που βρίσκονται στην κατασκευή που χρήζει αποκατάστασης, λαμβάνοντας υπόψιν και τις απαιτήσεις σχετικά με τη δομική ακεραιότητα. (MILTADOU-FEZANS AND TASSIOS 2012A), (LAMPROPOULOS ET AL. 2022)

2.1. Ορισμός

Τα ενέματα αποτελούν ένα επισκευαστικό κονίαμα^[1]. Είναι ένα ανάμιγμα που χαρακτηρίζεται από υψηλό ιξώδες και περιέχει συνδετική κονία (άσβεστος, ποζολάνη, πηλός) και νερό ($\text{Νερό/Κονία} \geq 1$). Ανάλογα με τις ανάγκες της επισκευής το μείγμα μπορεί να περιέχει λεπτόκοκκα αδρανή υλικά (πούδρα ή λεπτή άμμο) και άλλα πρόσμικτα ή πρόσθετα. Με τα κατάλληλα συστήματα το ανάμιγμα εισάγεται με πίεση ($\leq 1 \text{ atm}$) σε ρωγμές της κατασκευής με στόχο την διεύθυνση και την πλήρωση των ρωγμών, των κενών και των κοιλοτήτων που σχηματίζονται στο ρηγματωμένο ιστό του σκυροδέματος ή της τοιχοποιίας. Η ενεμάτωση είναι μια μέθοδος αποκατάστασης που βελτιώνει την αντοχή και τη συνολική συμπεριφορά της κατασκευής χωρίς να αλλοιώνει την εξωτερική μορφή, τη γεωμετρία και το δομικό σύστημα αυτής.

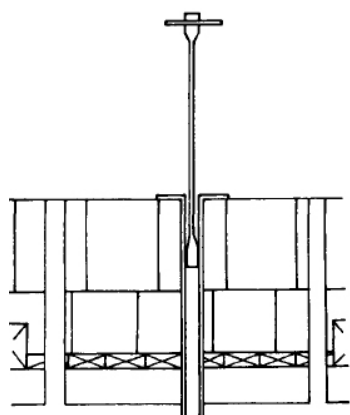
2.2. Ιστορική Αναδρομή



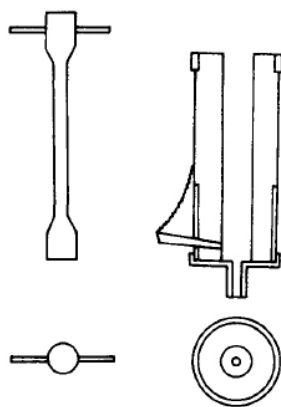
Εικ. 1: Διαμήκης τομή φράγματος Deppie, (VER-FEL J. 1989)

Η αρχή της εφαρμογής ενεμάτων χρονολογείται στις αρχές του 19ου αιώνα, όταν ο Γάλλος Berigny εφάρμοσε την εφεύρεση του για τη στεγανοποίηση του υπεδάφους του φράγματος στη Deppie (βλ. Εικ. 1, Εικ. 2). Το νερό διάβρωνε το χώμα της θεμελίωσης με αποτέλεσμα αυτό να υποχωρεί. Ο Berigny εισήγαγε στο κενό της θεμελίωσης πηλό, με μια αντλία η οποία περιλάμβανε ένα ξύλινο κύλινδρο διαμέτρου 8cm και ένα μεταλλικό ακροφύσιο διαμέτρου 3cm (βλ. Εικ. 3, Εικ. 4). Ο κύλινδρος γέμιζε με το υλικό και στην οπή του ήταν τοποθετημένο ένα πιστόνι, το οποίο χτύπαγαν με σφυρί για να πιέσει τον πηλό να περάσει στη θεμελίωση. Η διαδικασία επαναλαμβανόταν αρκετές φορές ώσπου να γεμίσει πλήρως το κενό της θεμελίωσης. Ο ίδιος εξέλιξε τη μέθοδο του αλλάζοντας τον πηλό με ένα μείγμα ποζολάνης.

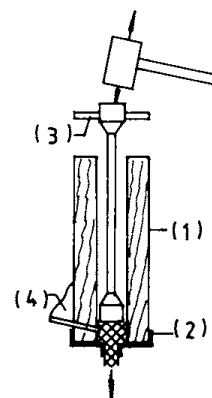
1 Ο όρος επισκευαστικό κονίαμα δεν είναι σαφής και μάλλον αποτελεί λεκτικό εύρημα για να περιγράψει ένα εύρος υλικών που χρησιμοποιούνται σε επισκευαστικές εργασίες, έναν σημαντικό κλάδο του δομικού τομέα.



Εικ. 2: Εγκάρσια τομή, στο σημείο ενεμάτωσης (VERFEL J. 1989)



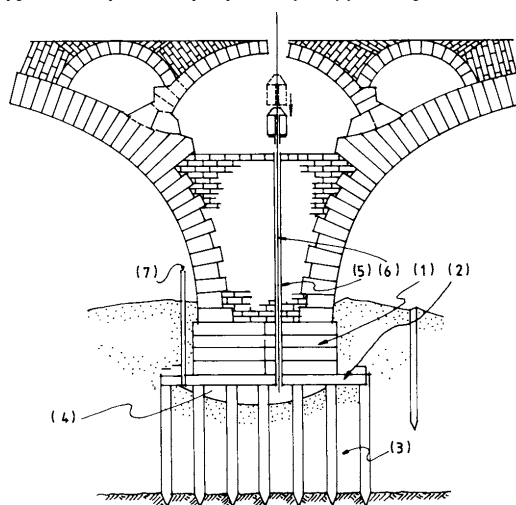
Εικ. 3: Η αντλία ενεμάτωσης, του Berigny 1802, (VERFEL J. 1989)



Εικ. 4: Η αντλία ενεμάτωσης, του Berigny 1802 (NONVEILLER 1989)

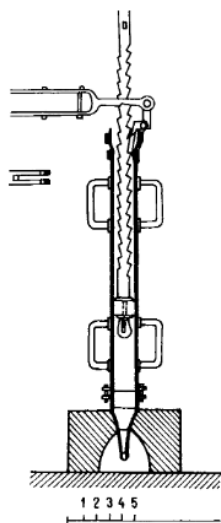
Τα επόμενα χρόνια έγιναν διάφοροι πειραματισμοί πάνω σε αυτή την τεχνική. Ο L. Ch. Mary το 1820 εφάρμοσε την ίδια μέθοδο στο κανάλι του Saint-Quentin, με μόνη διαφορά τη χρήση υδραυλικού κονιάματος. Ο Chartier το 1831, περιγράφοντας τη μέθοδο που χρησιμοποίησε για την κατασκευή του καναλιού μεταξύ Rhone και Rhine, πρότεινε το άνοιγμα δύο οπών στο σημείο εφαρμογής, η μια εξυπηρετεί την εισαγωγή του ενέματος και η δεύτερη βοηθά στην αποστράγγιση του νερού. Η συστηματική πλέον εφαρμογή των ενεμάτων χρησιμοποιήθηκε αργότερα για την ενίσχυση της θεμελίωσης της γέφυρας Tours της Γαλλίας το 1839 (βλ. Εικ. 5). Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για αυτή την επέμβαση ήταν ιδιαίτερα σημαντική για την εξέλιξη των ενεμάτων, αφού ο Beaudemoulin χρησιμοποίησε υδραυλική άσβεστο την οποία έσβησε με νερό. Ο Beaudemoulin μετά την επέμβαση που έκανε εξήγαγε τα εξής συμπεράσματα :

- Για τις εργασίες πρέπει να χρησιμοποιείται παχύρρευστο ανάμιγμα που δεν συνδυάζεται με το νερό.
- Πρέπει να είναι ρευστό ακόμα και στο κρύο.
- Να εισάγεται στη δομή όσο είναι ρευστό.
- Να μην συρρικνώνει κατά την πήξη και
- Να στερεοποιείται μετά από μερικές μέρες.
- Επιπλέον, πρόσθεσε πως η αντλία πρέπει να βγαίνει στο τέλος της έγχυσης για να διασφαλιστεί πλήρης σταθεροποίηση του μείγματος και αποφυγή συρρίκνωσης.

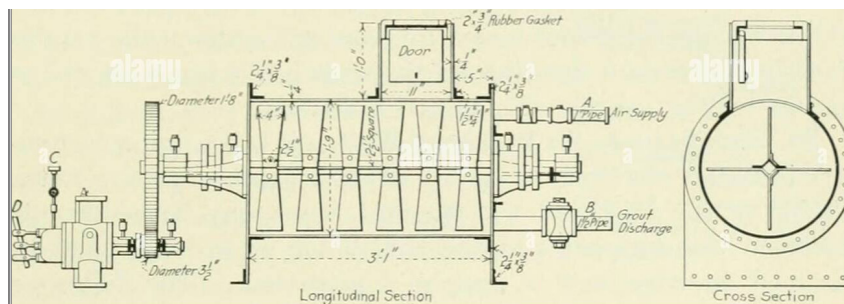


Εικ. 5: Τομή γέφυρας Tour, (NONVEILLER 1989)

Το 1839 ο Collin προσπάθησε για πρώτη φορά να εγχύσει ένεμα σε ρωγμές τοιχοποιίας στο φράγμα Grosbois της Γαλλίας με τη μέθοδο του Berigny. Τα αποτελέσματα της μεθόδου ήταν απογοητευτικά. Αυτό τον οδήγησε στην κατασκευή μιας νέας αντλίας έγχυσης με γρύλο, η οποία εισήγαγε το μείγμα στη λιθοδομή με σταθερή πίεση. (βλ.Εικ. 6).



Εικ. 6: Αντλία έγχυσης, Collin 1839, (VERFEL J. 1989)



Εικ. 7: Σχέδιο μηχανής ενεμάτωσης του Greathead, με κινητήρα πεπιεσμένου αέρα, (ALAMY STOCK PHOTO, 2020)

Τα επόμενα χρόνια πραγματοποιήθηκαν αρκετές επισκευές σε θεμελιώσεις γεφυρών και φράγματα με τη μέθοδο της ενεμάτωσης. Οι κατασκευαστές από τότε άρχισαν να πειραματίζονται με τα υλικά και τις κατάλληλες αναλογίες για την παρασκευή ρευστών αναμιγμάτων. Στα μέσα του 19ου αιώνα έκανε την εμφάνιση του το τσιμέντο Portland και σε συνδυασμό με την εφεύρεση της ατμομηχανής, δημιουργήθηκε η ανάγκη για επέκταση του σιδηροδρομικού δικτύου. Αυτό έδωσε μεγάλη ώθηση στην εξέλιξη των ενεμάτων, αφού προέκυψε ανάγκη ενίσχυσης των υφιστάμενων γεφυρών και κατασκευής υπόγειων σηράγγων μετρό. Το 1886 ο Greathead κατασκεύασε την πρώτη μηχανή ενεμάτωσης υπό πίεση (βλ.Εικ. 7) με συμπιεσμένο αέρα, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή μιας σήραγγας του Λονδίνου. Στις αρχές του 20ου αιώνα η τεχνική της ενεμάτωσης υπό πίεση είχε αρχίσει να διαδίδεται ευρέως στην επισκευή παλιών κτιρίων και κυρίως εκκλησιών, με το τσιμέντο να κυριαρχεί σαν βασικό συστατικό των ενεμάτων (VERFEL J. 1989), (NONVEILLER 1989).

Με τη συστηματική χρήση του τσιμέντου στα ενέματα άρχισαν να παρατηρούνται αρκετά προβλήματα. Μερικά από αυτά εντοπιζόνταν κατά τη διάρκεια της ενεμάτωσης και αφορούσαν την αδυναμία του υλικού να εισχωρήσει στις ρωγμές της κατασκευής. Σε άλλες περιπτώσεις τα προβλήματα εμφανίζονταν αρκετό καιρό αργότερα και αφορούσαν τη χρήση μη συμβατών υλικών κατά την ενεμάτωση. Το πρόβλημα της διεισδυτικότητας αντιμετωπίστηκε περίπου το 1940, όταν δύο νέα υλικά κατασκευάστηκαν σε χημικά εργαστήρια. Αυτά τα υλικά ήταν η φορμαλδεΰδη φαινόλης και η φορμαλδεΰδη ρεσορκινόλης. Όταν χρησιμοποιήθηκαν στα ενέματα, μειώθηκε σημαντικά το μέγεθος των ρωγμών που το υλικό μπορούσε να πληρώσει.

Μέχρι το 1980 η διαδικασία της ενεμάτωσης είχε γίνει αρκετά μεθοδευμένη, με πίνακες συνθέσεων ενεμάτων και τις ιδιότητες αυτών. Έτσι η μέθοδος άρχισε να εφαρμόζεται σταδιακά και σε ιστορικές κατασκευές. Η εφαρμογή ενεμάτων σε μνημεία δεν διήρκεσε πολύ, αφού σύντομα προκλήθηκαν προβλήματα κυρίως από την ασυμβατότητα των υλικών. Από τότε ξεκίνησε μια πιο επιστημονική έρευνα που ασχολείται τόσο με τη συμβατότητα των υλικών όσο και με ελέγχους για τις ιδιότητες των ενεμάτων. (FILIP AND RICKSTAL 2001), (LITTLEJOHN S. 2003)

2.3. Κατηγορίες ενεμάτων

2.3.1. Οργανικά

Τα οργανικά ή αλλιώς πολυμερή ενέματα, είναι κυρίως ρητίνες (ακρυλικές, εποξειδικές), αλλά και πολυουρεθάνες, σιλικόνες κ.α.. Αποτελούνται από υγρό πλαστικό σε συνδυασμό με κάποιο σκληρυντικό. Κάποια περίοδο η χρήση τους ήταν ιδιαίτερα εκτεταμένη, εξαιτίας της ικανότητας τους να εισχωρούν σε πολύ λεπτές ρωγμές. Τα οργανικά ενέματα χαρακτηρίζονται από χαμηλότερο ιξώδες, υψηλή αντοχή, ταχεία εφαρμογή και αντοχή σε διαβρωτικό περιβάλλον. Από την άλλη, οι φυσικές, μηχανικές και χημικές ιδιότητες του υλικού δεν συμβαδίζουν με τα υλικά των ιστορικών κατασκευών. Επιπλέον, ο χρόνος ζωής του υλικού είναι περιορισμένος και πριν την εφαρμογή του πρέπει να γίνεται θερμική μελέτη της περιοχής, αφού τα πολυμερή ενέματα έχουν την τάση να παρουσιάζουν σημάδια αποδόμησης όταν βρίσκονται σε περιβάλλον με υψηλές θερμοκρασίες. Όπως έχει προαναφερθεί η αρχή της συμβατότητας, αποτελεί ένα πολύ σημαντικό κριτήριο για την επιλογή του κατάλληλου ενέματος. Εξαιτίας αυτού δε θα γίνει περαιτέρω εξέταση αυτής της κατηγορίας ενεμάτων, αφού τα οργανικά ενέματα έχουν κριθεί ακατάλληλα για εφαρμογή σε ιστορικές κατασκευές και η χρήση τους περιορίζεται για λεπτές ρωγμές σε κατασκευές από σκυρόδεμα (ΓΟΥΛΑΣ Δ. 2020), (ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ Φ. 2018).



Εικ. 8: Παράδειγμα εφαρμογής μη συμβατού ενέματος, (FUNAHASHI AND SIROLA 2014)

2.3.2. Ανόργανα

Τα ανόργανα ενέματα αποτελούνται από συνδετική κονία, η οποία μπορεί να είναι το τσιμέντο, η άσβεστος σε όλες τις μορφές, ο πηλός, η ποζολάνη κ.α., καθώς και λεπτόκοκκα αδρανή και άλλα πρόσμικτα. Ως μέσο εναιώρησης συνήθως χρησιμοποιείται νερό ή ένα μείγμα νερού-αιθανόλης. Τα ανόργανα ενέματα έχουν μεγάλη συμβατότητα με τα υλικά των ιστορικών κατασκευών. Μπορούν να σκληραίνουν με την παρουσία υγρασίας και με την κατάλληλη σύνθεση μπορούν να επιτευχθούν παρόμοιες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες με αυτές των αρχικών υλικών της κατασκευής. Τα παραπάνω τα καθιστούν κατάλληλα για την εφαρμογή τους σε μνημεία. Ανάλογα με τη συνδετική κονία που έχουν σα βάση, τα ανόργανα ενέματα μπορούν να χωριστούν σε περαιτέρω κατηγορίες. Οι βασικότερες από αυτές είναι τα τσιμεντένια ενέματα και τα ενέματα με βάση την άσβεστο (ΓΟΥΛΑΣ Δ. 2020; ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ Φ. 2018)

3. Σύνθεση Ενεμάτων

3.1. Πρώτες ύλες ενεμάτων

Τα ενέματα αποτελούνται από τα συνδετικά υλικά, τα αδρανή και ένα μέσο εναιώρησης (συνήθως νερό). Το μέσο εναιώρησης επιτρέπει στα συστατικά να αναμειχθούν και να παραμείνουν σε εναιώρημα, καθώς και στο συνολικό μείγμα να είναι ρευστό και ενέσιμο. Συχνά τα ενέματα περιέχουν και πρόσμικτα (<3% w/w) για να επιτύχουν συγκεκριμένες ιδιότητες (ρευστότητα, αύξηση πορώδους κ.α.) (PASIAN CH. 2020).

Η επιλογή των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν στα ενέματα εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων. Οι πιο σημαντικοί από αυτούς είναι οι επιθυμητές ιδιότητες σχετικά με την εργασιμότητα και την τελική αντοχή του ενέματος, τα διαθέσιμα υλικά στην περιοχή που θα γίνουν οι εργασίες, καθώς και το κόστος των υλικών (BIÇER-SİMŞİR ET AL. 2009).

Η γενική αρχή για την επιλογή των υλικών αφορά τη συμβατότητα των ενεμάτων με τα αρχικά υλικά της κατασκευής. Επειδή η συμβατότητα του ενέματος έχει διάφορες παραμέτρους (φυσική, χημική, μηχανική), η έννοιά της δεν είναι πάντα ξεκάθαρη. Γι' αυτό τον λόγο, οι ερευνητές εξετάζουν κυρίως τη συμβατότητα του βασικού συνθετικού του ενέματος συγκριτικά με τα υλικά της αρχικής κατασκευής. Σε ορισμένες μελέτες για την επιλογή του κατάλληλου ενέματος εξετάζεται η σύσταση του αρχικού κονιάματος ή επιχρίσματος. Σε άλλες περιπτώσεις ελέγχονται οι ιδιότητες των αρχικών υλικών, ώστε να ταιριάξουν οι ιδιότητες του ενέματος με αυτές. Η προσπάθεια παρασκευής ενέματος με την ίδια σύσταση με το αρχικό υλικό, συνήθως δημιουργεί προβλήματα στην εργασιμότητα του υλικού, καθώς το αποτέλεσμα συνήθως δεν έχει την κατάλληλη ρευστότητα και ενεσιμότητα. Επιπλέον, το υπάρχον κονίαμα συνήθως είναι εξασθενημένο, γεγονός που καθιστά το νέο υλικό πιο ισχυρό, ιδιότητα που δεν είναι πάντα θεμιτή. Γενικά το ζήτημα της επιλογής υλικού δε έχει επιλυθεί πλήρως και γίνονται έρευνες για την επιλογή των κατάλληλων υλικών, τα οποία δε θα προκαλούν ανεπιθύμητες επιπτώσεις στην αρχική κατασκευή (BIÇER-SİMŞİR ET AL. 2009).

Παρακάτω καταγράφονται τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα ενέματα και θα μελετηθούν σε αυτή την ενότητα (βλ. Πίνακας 1).

Πίνακας 1: Υλικά που χρησιμοποιούνται στα ενέματα

ΣΥΝΔΕΤΙΚΑ		ΜΕΣΑ ΕΝΑΙΩΡΗΣΗΣ	ΠΡΟΣΜΙΚΤΑ
Τσιμέντο		Νερό	Υπερευστοποιητής
Τσιμέντο Portland	Λευκό τσιμέντο		
Άσβεστος		Αιθανόλη	Ρητίνες
Υδραυλική άσβεστος	Αερική άσβεστος		
Υδράσβεστος	Ασβεστοπολτός		Νανουλικά
Ποξολάνη			
Τεχνητές (π.χ. μετακαολίνης)	Φυσικές (π.χ. θηραϊκή γη, ζεόλιθος κ.ά.)		Ίνες

3.1.1. Συνδετικά υλικά

Τα συνδετικά υλικά έχουν σκοπό την συγκράτηση όλων των υλικών όσο το μείγμα στερεοποιείται

3.1.1.1. Τσιμέντο

Το τσιμέντο (cement) είναι μία υδραυλική συνδετική ύλη, δηλαδή ένα λεπτότατο αλεσμένο ανόργανο υλικό. Όταν αναμειχθεί με νερό, σχηματίζει έναν πολτό που πήζει και σκληραίνει μέσω αντιδράσεων και μηχανισμών ενυδάτωσης και το οποίο, μετά τη σκλήρυνση, διατηρεί την αντοχή και τη σταθερότητά του ακόμη και μέσα στο νερό (ΜΟΡΟΠΟΥΛΟΥ AND ΛΑΜΠΡΟΠΟΥΛΟΣ 2014).

Είναι το πιο δημοφιλές συνδετικό της σύγχρονης εποχής. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του χαμηλού κόστους και των πρώτων υλών για την παρασκευή του, οι οποίες είναι ευρέως διαθέσιμες. Από τεχνικής άποψης έχει ταχεία πήξη και επιτρέπει τη γρήγορη εφαρμογή φορτίων στην κατασκευή που εφαρμόστηκε.

Η σύνθεση ενεμάτων από τσιμέντο συνήθως περιλαμβάνει τσιμέντο και νερό. Η έγχυση σε δομές τοιχοποιίας γίνεται συνήθως με πίεση χαμηλότερη από 2 bar. Επειδή οι ρωγμές στις οποίες πρέπει να διεισδύσει το μείγμα συχνά είναι αρκετά λεπτές, το ένεμα του τσιμέντου χρειάζεται υψηλή ρευστότητα. Για να επιτευχθεί αυτό προστίθενται στο ανάμιγμα υπερρευστοποιητές. Η χρήση των υπερρευστοποιητών μειώνει τη ζήτηση του μείγματος σε νερό, χωρίς να επηρεάζεται η ρευστότητα του. Επιπλέον, η χρήση τους αποτρέπει τον σχηματισμό κροκιδώσεων στα σωματίδια του τσιμέντου. Οι υπερρευστοποιητές με βάση τη μελαμίνη φορμαλδεΰδη και τη σουλφονωμένη ναφθαλινοφορμαλδεΰδη είναι οι πιο δημοφιλείς, αφού μειώνουν τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις που κρατούν τα σωματίδια μαζί.

Τα ενέματα τσιμέντου έχουν την τάση να σχηματίζουν ετερογενή ενοποίηση. Τα μεγαλύτερα σωματίδια τσιμέντου βυθίζονται, ενώ τα πιο μικρά στέκονται στην επιφάνεια, με αποτέλεσμα τον διαχωρισμό του μείγματος. Σύμφωνα με έρευνες, πρόσμικτα, όπως η ποζολάνη, βελτιώνουν την διασπορά των σωματιδίων τσιμέντου στο νερό και προσφέρουν καλύτερη διεισδυτικότητα. Από την άλλη πλευρά, όσο μικρότερα είναι τα σωματίδια τόσο αυξάνεται η ζήτηση σε νερό, γεγονός που κάνει τη χρήση υπερρευστοποιητών αναπόφευκτη.

Παρά τις θετικές ιδιότητες του τσιμέντου, το υλικό δεν έχει συνάφεια με τα κονιάματα που έχουν χρησιμοποιηθεί σε ιστορικές κατασκευές. Ως εκ τούτου ιστορικοί τέχνης και αρχιτέκτονες αποδοκιμάζουν την εφαρμογή του σε ιστορικά κτίρια (FILIP AND RICKSTAL 2001).

Για το τσιμέντο που χρησιμοποιείται στα ενέματα στην Ελλάδα ισχύει το πρότυπο του ΕΛΟΤ EN197-1. Το πρότυπο αυτό ορίζει πως το τσιμέντο πρέπει να έχει συγκέντρωση σε θειικά άλατα και αλκάλια μικρότερη από 1,5 επί τοις εκατό βάρος κατά βάρος ($\leq 1,5\%$ w/w) και η μέγιστη συγκέντρωση χλωριόντων να μην ξεπερνά τα 0,03 επί τοις εκατό βάρος κατά βάρος ($\leq 0,03\%$ w/w). Η αγορά του πρέπει να συνοδεύεται από δήλωση, στην οποία θα αναφέρεται η χημική ανάλυση του τσιμέντου, η περιεκτικότητα σε υδατοδιαλυτά αλκάλια, η ειδική του επιφάνεια (m^2/g) και η κοκκομετρική του διαβάθμιση βάση ΕΛΟΤ EN 196-6. Στη χρήση λευκού τσιμέντου ισχύουν τα ανωτέρω εκτός και αν ορίζονται από τη μελέτη επιπλέον απαιτήσεις. Επιπρόσθετα, το υλικό πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του ευρωπαϊκού προτύπου ΕΛΟΤ EN 197-1, να συνοδεύεται από δήλωση επιδόσεων σύμφωνα με τον καν. (ΕΕ) 574/2014 και, τέλος, να φέρει σήμανση CE σύμφωνα με το άρθρο 9 του καν. (ΕΕ) 305/2011 (ΕΛΟΤ 2018; Τ.Ε.Ε. 2020).

Για την παραγωγή του τσιμέντου χρησιμοποιούνται πρώτες ύλες όπως ποζολάνη, ασβεστόλιθος και σκωρία υψικαμίνου, υλικά που συναντώνται σε κάθε χώρα. Με βάση τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή του καθώς και τις τελικές του ιδιότητες, έχουν δημιουργηθεί διάφοροι τύποι τσιμέντου (βλ. Πίνακας 2).

Πίνακας 2: Βασικοί τύποι τσιμέντου, (CEN 2002A)

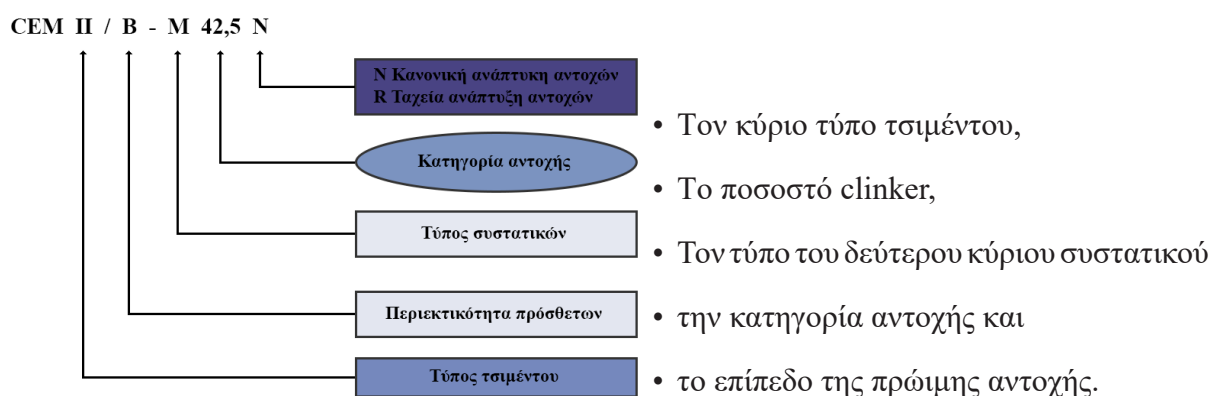
ΤΥΠΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
CEM I	Τσιμέντο Πόρτλαντ
CEM II	Σύνθετο Τσιμέντο Πόρτλαντ
CEM III	Σκωριοτσιμέντο
CEM IV	Ποζολανικό Τσιμέντο
CEM V	Σύνθετο Τσιμέντο

Μια ακόμα κατηγοριοποίηση των ειδών τσιμέντου αφορά την αντοχή του σε θλίψη, καθώς και τον χρόνο που απαιτείται για την ανάπτυξη της αντοχής του : (N) αφορά την κανονική ανάπτυξη αντοχής και το (R) ταχεία ανάπτυξη αντοχής (βλ. Πίνακας 3)

Πίνακας 3: Απαιτήσεις μηχανικές και φυσικές οριζόμενες ως χαρακτηριστικές τιμές, (CEN 2002A)

Κατηγορία Αντοχής	Αντοχή στη θλίψη MPa		
	Αρχική αντοχή		Τυπική αντοχή
	2 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες
32,5 N	-	≥ 16.0	
32,5 R	≥ 10.0	-	$\geq 32,5$
42,5 N	≥ 10.0	-	
42,5 R	≥ 20.0	-	$\geq 42,5$
52,5 N	≥ 20.0	-	
52,5 R	≥ 30.0	-	$\geq 52,5$

Με βάση το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1, ο συμβολισμός των διαφόρων τύπων τσιμέντου καθορίζεται από :

**Εικ. 9:** Ονοματολογία Τσιμέντων, (HCIA 2021)

3.1.1.2. Άσβεστος

Ο όρος άσβεστος (ασβέστης) αναφέρεται σε όλες τις φυσικές και χημικές μορφές που το οξείδιο και το υδροξείδιο του ασβεστίου και του μαγνησίου μπορούν να εμφανισθούν. Η διαδικασία παραγωγής αφορά την έμψηση και την επεξεργασία πετρωμάτων, όπως ασβεστόλιθους, δολομίτες και μάρμαρα. Υλικά που περιέχουν μεγάλη ποσότητα ανθρακικού ασβεστίου. Η πύρωση των πετρωμάτων παράγει κομμάτια άνυδρης ασβέστου (CaO) και παράλληλα αποβάλλει το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Το CaO , ονομάζεται καυστική άσβεστος και έχει λευκό χρώμα.

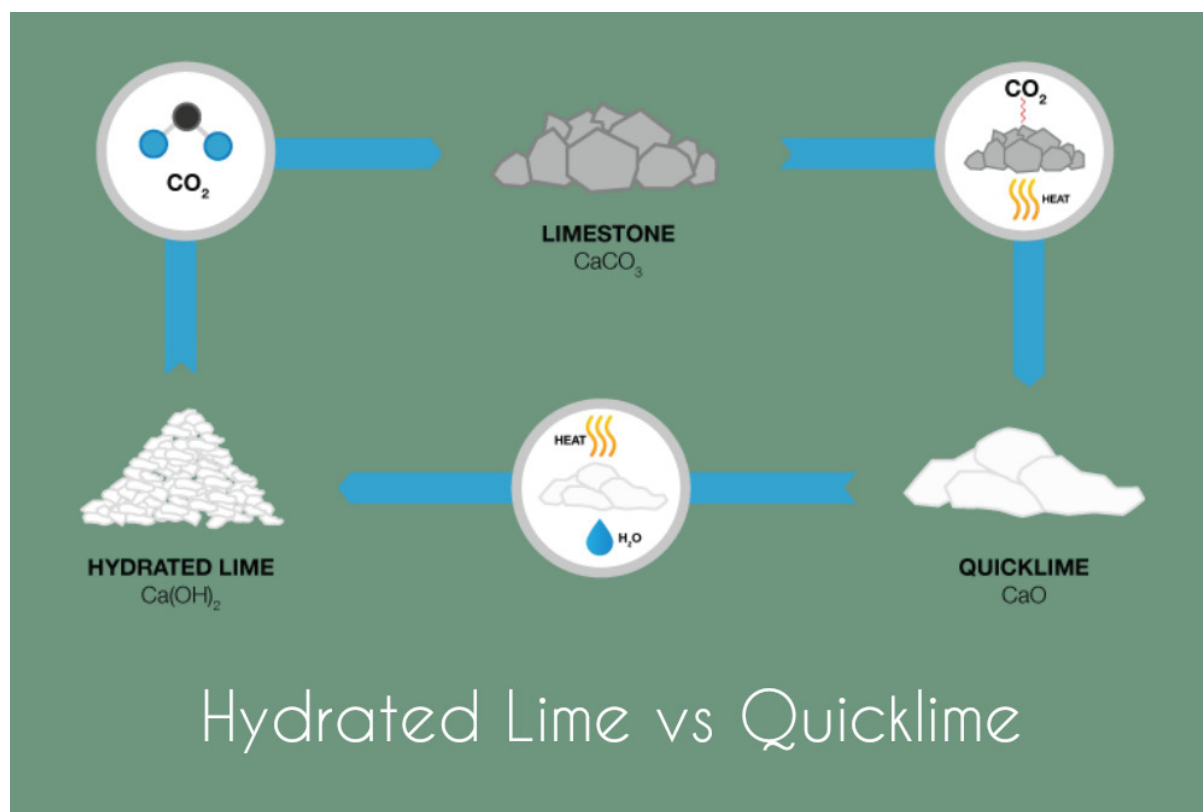
Συχνά προκαλείται σύγχυση με την ορολογία του ασβέστη. Γι' αυτό τον λόγο κρίνεται σκόπιμο να οριστούν οι βασικές κατηγορίες με βάση το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 459-1:2001 των δομικών άσβεστων, οι οποίες είναι κατάλληλες για την παρασκευή ενεμάτων (T.E.E. 2020; Παπαδόπουλος Φ. 2018).

Αερική Άσβεστος - air limes

Αερικές ονομάζονται οι άσβεστοι που συνίστανται από οξείδιο ή υδροξείδιο του ασβεστίου και σκληραίνουν αργά υπό την επίδραση του διοξειδίου του άνθρακα που υπάρχει στην ατμόσφαιρα. Κατά κανόνα δεν σκληραίνονται κάτω από το νερό, εφόσον δεν έχουν υδραυλικές ιδιότητες.

Οι αερικές άσβεστοι διακρίνονται σε δύο περεταίρω κατηγορίες: τις άσβεστες άσβεστους και τις σβησμένες άσβεστους.

1. **Άσβηστοι άσβεστοι (Quicklimes)** : Είναι αερικές άσβεστοι που συνίστανται κυρίως από οξείδιο του ασβεστίου και του μαγνησίου και παράγονται κατά την ασβεστοποίηση των ασβεστόλιθων (βλ. Εικ. 10). Παρουσιάζουν εξώθερμη αντίδραση, όταν έρχονται σε επαφή με το νερό. Ανάλογα με το μέγεθος τους χαρακτηρίζονται ως λίθοι, κοκκώδεις, αλεσμένες, πολύ αλεσμένες.



Εικ. 10: Κύκλος ασβέστου, (SHIVAM, 2020)

2. **Σβησμένες άσβεστοι** (slaked ή hydrated limes) : Είναι αερικές άσβεστοι που κυρίως συνίστανται από υδροξείδιο του ασβεστίου που προέρχεται από ελεγχόμενο σβήσιμο (προσθήκη νερού) των άσβηστων άσβεστων. Η θερμοκρασία της σβέσης πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 80-150°C. Για την παραγωγή σβησμένης ασβέστου απαιτείται 32% του βάρους της ασβέστου σε νερό, αλλά εξαιτίας της εξώθερμης αντίδρασης που προκαλείται, ένα μέρος του νερού εξατμίζεται. Γι' αυτό στη βιομηχανική παραγωγή η σβέση γίνεται με νερό σε αναλογία 60-65%. Όταν προστεθεί αυτή η ποσότητα νερού, το τελικό προϊόν έχει τη μορφή σκόνης (υδράσβεστος σε σκόνη). Αν η ποσότητα του νερού είναι μεγαλύτερη, τότε το παραγόμενο προϊόν έχει τη μορφή πολτού (ασβεστοπολτός). Άλλες μορφές σβησμένης ασβέστου είναι οι δολοματικές υδράσβεστοι που αποτελούνται από υδροξείδιο του ασβεστίου και του μαγνησίου καθώς και οξείδιο του μαγνησίου. Αυτές διακρίνονται σε α) ημιενυδατωμένες και συνίστανται από υδροξείδιο του ασβεστίου και οξείδιο του μαγνησίου και β) πλήρως ενυδατωμένες που αποτελούνται μόνο από υδροξείδια.

α. **Υδράσβεστος σε σκόνη** (βλ.Εικ. 11): Όπως σημειώθηκε προηγουμένως προκύπτει με ελεγχόμενη προσθήκη νερού στο οξείδιο του ασβεστίου (CaO). Μετά τη σβέση το προϊόν που παράγεται πρέπει να υποβληθεί σε καθαρισμό, δηλαδή διαχωρισμό των άσβεστων, των άψητων κόκκων και των κόκκων που έχουν ψηθεί υπερβολικά. Το προϊόν που περνάει τη διαλογή, κονιοποιείται και συσκευάζεται. Το τελικό προϊόν έχει λευκό ή υπόλευκο χρώμα και δεν περιέχει νερό για να δεσμεύσει το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας, ιδιότητα που το προστατεύει από τη μη θεμιτή σκλήρυνση. Υπερτερεί από τον ασβεστοπολτό που περιγράφεται στη συνέχεια, επειδή είναι πιο καθαρό υλικό, δεν απαιτεί φύραση^[1], έχει μεγαλύτερη αντοχή στο παγετό, εύκολη μεταφορά και εφαρμογή και παρουσιάζει μικρότερη συστολή κατά την πήξη του. Από την άλλη, δεν έχει μεγάλη ελαστικότητα εξαιτίας του οξειδίου του μαγνησίου, το οποίο συγκρατεί περισσότερο νερό και υπάρχει πιθανότητα να περιέχει κόκκους που δεν έχουν επεξεργαστεί σωστά (άσβεστους, άψητους και υπερψημένους).



Εικ. 11: Υδράσβεστος σε σκόνη, συσκευασία 25Kg, (MOLLA, 2020)



Εικ. 12: Ασβεστοπολτός, συσκευασία 20 Kg, (MOLLA, 2020)

β. **Ασβεστοπολτός** (βλ. Εικ. 12) : Όπως προαναφέρθηκε, ο ασβεστοπολτός προκύπτει από τη σβέση της ασβέστου με ελεγχόμενη περίσσεια νερού ή με την ανάμιξη της υδρασβέστου με νερό, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή συνεκτικότητα. Στη σύστασή του συναντάται κυρίως υδροξείδιο του ασβεστίου και υπάρχει πιθανότητα να περιέχει και υδροξείδιο του μαγνησίου. Η σβέση πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε το τελικό προϊόν να έχει κολλοειδή μορφή και να αποφεύγεται ο σχηματισμός κρυστάλλων. Η κολλοειδής μορφή έχει μεγάλο όγκο, υψηλή πλαστικότητα και ικανότητα να απορροφήσει μεγάλη ποσότητα αδρανών κατά την παρασκευή του ενέματος. Για να αποφεύγεται ο σχηματισμός κρυστάλλων, προτείνεται η ταχύτερη δυνατή σβέση της ασβέστου, η οποία επιτυγχάνεται με

1 Η διαδικασία ωρίμανσης της υδρασβέστου κατά την οποία παραμένει σε λάκκο για περίπου 15 ημέρες.

συνεχή ανάδευση. Το νερό που χρησιμοποιείται για τη σβέση πρέπει να είναι καθαρό, για να μην προκαλέσει εξάνθηση μετά την εφαρμογή. Η ποσότητα νερού που απαιτείται είναι πενταπλάσια από αυτή που χρειάζεται για την παραγωγή υδρασβέστου. Η ακριβής ποσότητα νερού αποτελεί βασικό παράγοντα για το σχηματισμό του πολτού, αφού η έλλειψη νερού μπορεί να προκαλέσει συσσωματώματα (σβόλους), ενώ η περίσσεια νερού μειώνει τη θερμοκρασία και το προϊόν αποκτά κρυσταλλική μορφή (κοκκώδης υδράσβεστος).

Αν κατά την παραγωγή του πολτού χρησιμοποιηθεί καλή ποιότητα άσβεστου και κατά τη σβέση τηρηθούν οι κανόνες, τότε προκύπτει η παχεία υδράσβεστος, η οποία έχει λιπαρή μορφή, υψηλή πλαστικότητα, ικανότητα να παραλάβει μεγάλη ποσότητα αδρανών, καθώς και καλύτερη πρόσφυση, υψηλότερη αντοχή και μεγαλύτερη συνεκτικότητα. Αν στην παρασκευή δεν ακολουθηθεί η σωστή μεθοδολογία, το προϊόν ονομάζεται ισχνή υδράσβεστος και η αποδοτικότητα της είναι σημαντικά μειωμένη (T.E.E. 2020; ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ Φ. 2018).

Υδραυλική Άσβεστος (hydraulic lime)

Διακρίνονται στις υδραυλικές και στις φυσικές υδραυλικές ασβέστους. Υδραυλική Άσβεστος με τη μεγαλύτερη αποδοχή θεωρείται η φυσική υδραυλική άσβεστος (NHL) (βλ. Εικ. 13), καθώς έχει φυσικές και μηχανικές ιδιότητες κατάλληλες για το σύνολο των εργασιών σε μια οικοδομή.

Η φυσική υδραυλική άσβεστος αποτελείται από πυριτικά άλατα του ασβεστίου και του αργίλου, καθώς και από υδροξείδιο του ασβεστίου. Παράγεται με την έμψηση μαργαϊκών ασβεστόλιθων που περιέχουν 5-20% άργιλο, σε θερμοκρασία 900-1300°C. Η πύρωση του πετρώματος ενεργοποιεί τα αργίλικα και τα πυριτικά άλατα που περιέχει προσδίδοντας στο τελικό προϊόν υδραυλικές ιδιότητες. Όταν η καυστική άσβεστος έρθει σε επαφή με το νερό (σβέση), προκαλείται εξώθερμη αντίδραση που την διασπάει σε μικρότερα και εύθρυπτα κομμάτια έως και σε πολύ λεπτά σωματίδια.

Οι υδραυλικές άσβεστοι έχουν την ιδιότητα να πήζουν και να στερεοποιούνται με την παρουσία νερού δημιουργώντας ασβεστοπυριτικές ενώσεις παρόμοιες με αυτές που προκαλεί η ενυδάτωση του τσιμέντου. Επιπλέον, έχουν υψηλή ελαστικότητα και διαπερατότητα στους υδρατμούς, ιδιότητες που σε συνδυασμό με τη συμβατότητα με τα παραδοσιακά υλικά τις καθιστούν κατάλληλες για εργασίες συντήρησης και αποκατάστασης σε ιστορικές κατασκευές.

Η χημική σύσταση της φυσικής υδραυλικής ασβέστου (NHL) μπορεί να ταξινομηθεί ως ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ του τσιμέντου και των αερίων ασβεστών. Η έμψηση γίνεται σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από αυτές του τσιμέντου. Μειονεκτεί σημαντικά σε σχέση με αυτό εξαιτίας των ελεύθερων οξειδίων του ασβεστίου (CaO). Γι' αυτό όταν χρησιμοποιείται για την παρασκευή ενεμάτων προτείνεται η προσθήκη ποζολάνης, η οποία περιέχει διοξείδιο του πυριτίου (SiO₂), ένωση δηλαδή που δεσμεύει το ελεύθερο οξείδιον του ασβεστίου (CaO). Οι NHL κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με την ελάχιστη θλιπτική αντοχή που αποκτούν σε διάστημα 28 ημερών ως εξής :



Εικ. 13: Φυσική υδραυλική άσβεστος (NHL 3.5), (EM4C, 2021)

- NHL 5 : 5 N/mm²
- NHL 3.5: 3.5 N/mm²
- NHL 2.2: 2.2 N/mm²

Από την άλλη, οι υδραυλικές άσβεστοι (HL) παρασκευάζονται με την ανάμιξη διαφόρων υλικών, όπως τσιμέντου, υδράσβεστου, πληρωτικών και πρόσμικτων. Δεν υπόκεινται σε έμψηση, παρά μόνο ανάμειξη, και η εφαρμογή τους δε συνιστάται για συντήρηση και αποκατάσταση ιστορικών κατασκευών (T.E.E. 2020; ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ Φ. 2018).

3.1.1.3. Ποζολάνες

Οι ποζολάνες είναι μια ευρεία κατηγορία πυριτικών και αργιλικών οξειδίων^[1]. Από μόνα τους αυτά τα υλικά δεν έχουν σημαντικές ιδιότητες, αλλά όταν είναι λεπτοαλεσμένα και με την παρουσία νερού, αντιδρούν με τα υδροξείδια του ασβεστίου και προσδίδουν στο ένεμα υδραυλικές ιδιότητες. Υπάρχουν οι φυσικές και οι τεχνητές ποζολάνες. Οι φυσικές ποζολάνες προέρχονται από ηφαιστειακές γαίες, όπως η ελληνική θηραϊκή γη, η Ιταλική pozzolana (η οποία έδωσε το όνομα της σε αυτή την κατηγορία υδραυλικών κονιών), η γερμανική trass κ.α.. Οι τεχνικές ποζολάνες παράγονται με θερμική επεξεργασία αργίλων και σχιστόλιθων, καθώς και από καύση λιθανθράκων και λιγνιτών (HILAL ET AL. 2015). Οι ποζολάνες που χρησιμοποιούνται στα ενέματα πρέπει να είναι λεπτοαλεσμένες με μέγιστη κοκκομετρία 75 μm και το μεγαλύτερο μέρος από κόκκους να έχει περάσει από κόσκινο 45 μm. Το χρώμα τους πρέπει να είναι λευκό ή υπόλευκο, να είναι απαλλαγμένες από διαλυτά αλκάλια και τα διαθέσιμα αλκάλια να μην ξεπερνούν το 2% του όγκου τους. Κατά την προμήθεια θα πρέπει να συνοδεύεται από δήλωση του παραγωγού σχετικά με την ορυκτολογική της σύσταση, την περιεκτικότητα της σε πυρίτιο και αλκάλια, την κοκκομετρική της ανάλυση και την ειδική της επιφάνεια (ΕΛΟΤ 2018).



Εικ. 14: Ποζολάνες, από αριστερά προς τα δεξιά Ιπτάμενη τέφρα κατηγορίας C, μετακαολίνης, πυριτική παιπάλη, ιπτάμενη τέφρα κατηγορίας F, σκωρία, θερμικά επεξεργασμένος σχιστόλιθος, (ΝΙΚΟΛΟΠΟΥΛΟΣ Ο., 2019)

Μετακαολίνης

Ο μετακαολίνης είναι θερμικά επεξεργασμένος άργιλος. Ο όρος άργιλος ή πηλός αναφέρεται σε ένα σύνολο ένυδρων αργιλούχων φυλλοπυριτικών ορυκτών που συνίστανται από μέταλλα, οξείδια μετάλλων και οργανικές ενώσεις. Ο πηλός στην ξηρά μορφή του έχει ηχομονωτικές και θερμομονωτικές ιδιότητες αλλά είναι ευαίσθητος στο νερό και στον πάγο. Θεωρείται από τα πρώτα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στη δόμηση με πρώτες εφαρμογές από τα προϊστορικά χρόνια. (ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΑΚΗ Δ. 2017)

1 Οξείδιο του αργιλίου ή αλουμίνα ονομάζεται η ανόργανη χημική ένωση του οξυγόνου και του αργίλου.

Αν και οι περισσότερες μορφές αργίλου μπορούν με διάφορα πρόσθετα να χρησιμοποιηθούν σε κονιάματα, η εφαρμογή τους στα ενέματα είναι περιορισμένη. Με βάση τη βιβλιογραφία, στο μείγμα του ενέματος προτείνεται η προσθήκη μετακαολίνη.

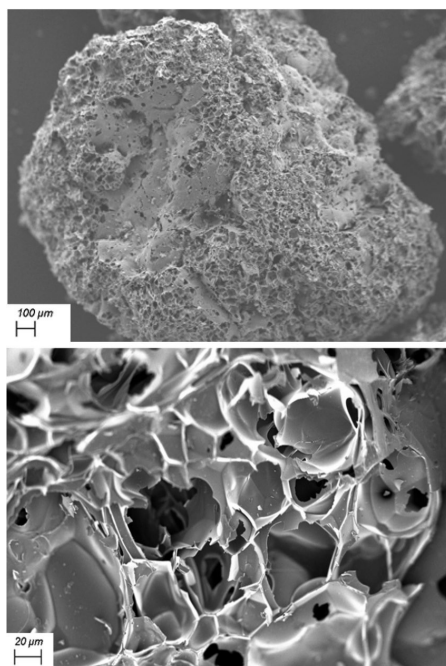
Ο μετακαολίνης είναι θερμικά επεξεργασμένος άργιλος, ο οποίος προέρχεται από ψήσιμο του καολινίτη σε θερμοκρασία 700-800°C. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες σχηματίζονται άλλες κρυσταλλικές ενώσεις και χάνει τις ποζολανικές του ιδιότητες. Η προσθήκη μετακαολίνης σε ενέματα με βάση την άσβεστο προκαλεί χημική αντίδραση με το διοξείδιο του ασβεστίου Ca(OH)_2 και παράγει τσιμεντοειδή πηκτώματα μαζί με κρυσταλλικά προϊόντα, τα οποία εξαρτώνται από την αναλογία διοξειδίου του ασβεστίου με μετακαολίνη και από τη θερμοκρασία της αντίδρασης. Η προσθήκη μετακαολίνης σε ενέματα με βάση το τσιμέντο και την άσβεστο αυξάνει τις μηχανικές ιδιότητες του ενέματος (θλιπτική και καμπτική αντοχή), την ανθεκτικότητά του και την αντοχή του σε χημική διάβρωση. Επιπλέον, μειώνεται η διαπερατότητα και οι αντιδράσεις του ενέματος με τα αλκάλια και τα διοξείδια του πυριτίου (T.E.E. 2020; Παπαδόπουλος Φ. 2018).

Παράγωγα περλίτη

Ο περλίτης είναι άμορφο, αργιλοπυριτικό ορυκτό που προέρχεται από ηφαιστειακά κοιτάσματα. Η φυσική του μορφή έχει υψηλή περιεκτικότητα σε νερό (2-5% w/w) σε κρυσταλλική μορφή. Με την απότομη θέρμανση (900-1200°C) το νερό εξατμίζεται σχηματίζοντας κενά αέρα στη δομή του και αυξάνοντας τον όγκο του έως και είκοσι φορές. Το παραγόμενο προϊόν που ονομάζεται διογκωμένος περλίτης (EP^[1]) είναι ελαφρύ υλικό με μονωτικές ιδιότητες. Η χημική του σύσταση αποτελείται από διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και άνυδρο οξείδιο του αργιλίου (Al_2O_3), ενώ μπορεί να περιέχει και άλλα οξείδια (νατρίου, καλίου, σιδήρου, ασβεστίου και μαγνησίου).

Η εφαρμογή του περλίτη αξιοποιούσε τις φυσικές του ιδιότητες (χαμηλή πυκνότητα και θερμική αγωγιμότητα και υψηλή θερμική αντοχή) με αποτέλεσμα να παράγουν ειδικές κατηγορίες υλικών, όπως ελαφρύ σκυρόδεμα, πυράντοχα επιχρίσματα κ.α.. Η βιομηχανική διαδικασία για την παραγωγή δομικού περλίτη έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό υποπροϊόντων που μέχρι πρόσφατα ήταν μη αξιοποιήσιμα. Η σταδιακή αύξηση των υποπροϊόντων του περλίτη και η συσσώρευση τους είχε αρχίσει να προκαλεί περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Με βάση πρόσφατες έρευνες, παρατηρήθηκε πως η προσθήκη υποπροϊόντων περλίτη (D1S, D1C) είτε ως συνδετικό υλικό είτε ως πρόσμικτο σε συνθέσεις ενεμάτων βελτιώνει τις ιδιότητες του μείγματος, τόσο σε νωπή όσο και σε σκληρυμένη κατάσταση. Επιπλέον, η υαλώδης μορφή και η περιεκτικότητά του σε διοξείδιο του πυριτίου και του αργιλίου το καθιστούν ποζολανικό υλικό. Η προσθήκη περλίτη σε μείγματα ενεμάτων μπορεί να αυξήσει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες του ενέματος (αύξηση 200-300% αντοχής) και ιδιαίτερα μετά από την πλήρη σκλήρυνση (90 μέρες). Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις φαίνεται πως τα υποπροϊόντα του περλίτη αποτελούν ένα νέο υλικό με το οποίο μπορούν να παραχθούν ενέματα χαμηλού κόστους και φιλικά προς το περιβάλλον (VASILIKI PACHTA, PAPADOPOULOS, AND STEFANIDOU 2019).



Εικ. 15: Κόκος περλίτη (πάνω) και δομή περλίτη (κάτω), (PETRELLA ET AL., 2018)

1 EP : expanded perlite (διογκωμένος περλίτης)

3.1.2. Μέσα εναιώρησης

3.1.2.1. Νερό

Το νερό αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο για την παρασκευή ενεμάτων. Επιτρέπει στα υλικά να αναμειχθούν και να παραμένουν σε μορφή εναιωρήματος. Η αντίδρασή του με τις κονίες επιτρέπει στο ανάμιγμα να στερεοποιηθεί και να αποκτήσει τις τελικές του ιδιότητες. Είναι σημαντική η ποσότητα νερού που θα προστεθεί στο ένεμα, αφού η αναλογία νερού προς κονία (N/K) επηρεάζει τη ρευστότητά του και τη σταθερότητα του όγκου του, δηλαδή τις δυο βασικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Η θεμιτή ποσότητα νερού στο μείγμα αυξάνει τη ρευστότητα, τη διεισδυτικότητα και το πορώδες του. Αν, όμως, προστεθεί περίσσεια ποσότητα, επιδρά αρνητικά στη σταθερότητα του όγκου, στις τελικές ιδιότητες αντοχής του και μπορεί να προκαλέσει ρηγμάτωση. Για το νερό αναμίξεως ενεμάτων ισχύει το πρότυπο EN 1008, το οποίο ορίζει πως πρέπει να είναι απαλλαγμένο από επιβλαβείς προσμίξεις, όπως άλατα, οργανικά και ανόργανα οξέα και λίπη (ΕΛΟΤ 2018; MILTIADOU-FEZANS AND TASSIOS 2012B).



Εικ. 16: Προσθήκη νερού σε ένεμα

3.1.2.2. Αιθανόλη

Όπως προαναφέρθηκε, το συνηθέστερο μέσο εναιώρησης στα ενέματα είναι το νερό, το οποίο βοηθά στην ενανθράκωση και στις ποζολανικές αντιδράσεις του μείγματος. Έρευνες έχουν δείξει πως η ενανθράκωση μπορεί να γίνει και χωρίς την παρουσία νερού, αλλά για τη διάλυση του διοξειδίου του άνθρακα και του υδροξειδίου του ασβεστίου το νερό είναι απαραίτητο. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι σε ορισμένες περιπτώσεις που κρίνεται απαραίτητο, σε ενέματα με βάση την άσβεστο μπορεί ένα μέρος νερού να αντικατασταθεί από αιθανόλη. Η αντικατάσταση αυτή προτείνεται για ενέματα που θα χρησιμοποιηθούν για επεμβάσεις σε κατασκευές, όπου τα αρχικά υλικά είναι ευαίσθητα στο νερό. Η παρουσία του μπορεί να προκαλέσει διαλυτοποίηση αλάτων, η οποία θα οδηγήσει στην εκ νέου κρυσταλλοποίηση τους και ενδεχομένως σε σοβαρές φθορές στα αρχικά υλικά. Τα ενέματα που παρασκευάζονται με μείγμα νερού- αιθανόλης παρουσιάζουν επαρκή συρρίκνωση, καλή συνοχή και πρόσφυση. Η αναλογία νερού αιθανόλης δεν είναι εφικτό να οριστεί, αφού εξαρτάται από την εκάστοτε περίπτωση (PASIAN ET AL. 2018).

3.1.3. Πρόσμικτα

Διάφορα πρόσμικτα έχουν χρησιμοποιηθεί διαχρονικά στα κονιάματα για να βελτιώσουν τις ιδιότητες τους, τόσο σε νωπή όσο και σε σκληρυμένη κατάσταση. Προστίθενται σε χαμηλή αναλογία (1-3% w/w) για να ενισχύσουν τη σταθερότητα του όγκου και να μειώσουν την πυκνότητα και τη συρρίκνωση του κονιάματος (*V. PACHTA 2021B*). Μερικά από αυτά είναι : άχυρο, πριονίδι, κοχύλια, τρίχες ζώων, γιούτα κ.α (*V. PACHTA 2021A*).

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν εφαρμοστεί διάφοροι τύποι πρόσμικτων στα ενέματα με βάση την άσβεστο και το τσιμέντο, όπως ίνες σκόνη γυαλιού κ.α. Τα χαρακτηριστικά τους (προέλευση, διαστάσεις, μηχανικές ιδιότητες) και η αναλογία τους μπορεί να βελτιώσουν σημαντικά τις φυσικομηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος (*V. PACHTA 2021B*).

Τα πρόσθετα - πρόσμικτα που θα χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να είναι συμβατά με τα χρησιμοποιούμενα υλικά. Τα τεχνικά φυλλάδια που συνοδεύουν τα πρόσθετα - πρόσμικτα παρέχουν κατ' ελάχιστο τις εξής πληροφορίες:

- Χημική ονοματολογία των κυρίως ενεργών συστατικών των πρόσμικτων.
- Λεπτομερείς οδηγίες χρήσεως.
- Επιτρεπόμενο χρόνο και απαιτούμενες συνθήκες αποθήκευσης.

Τα πρόσθετα/ πρόσμικτα που θα χρησιμοποιηθούν δεν θα έχουν δευτερογενείς επιπτώσεις στον χρόνο πήξεως, στις αντοχές και στο τελικό χρώμα του αναμίγματος. Αποφεύγεται η χρήση πρόσθετων που δημιουργούν ιόντα χλωρίου. Τα πρόσθετα / πρόσμικτα που θα χρησιμοποιηθούν στο έργο θα είναι του ίδιου εργοστασίου και θα έχουν την ίδια εμπορική ονομασία με εκείνα που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη συνθέσεως και θα προστίθενται στην αναλογία που προβλέπεται σε αυτήν.

Τα πρόσθετα / πρόσμικτα ικανοποιούν τις απαιτήσεις του προτύπου ΕΛΟΤ EN 934-2, συνοδεύονται από δήλωση επιδόσεων σύμφωνα με τον Καν (ΕΕ) 574/2014 και φέρουν σήμανση CE σύμφωνα με το άρθρο 9 του Καν. (ΕΕ) 305/2011 (*ΕΛΟΤ 2018*).

3.1.3.1. Υπερρευστοποιητές

Η προσθήκη στο ένεμα του κατάλληλου υπερρευστοποιητή βοηθά σημαντικά στην αύξηση της ρευστότητας του μείγματος. Με τη χρήση του ασκούνται στο ανάμιγμα ηλεκτροστατικές απωστικές δυνάμεις, οι οποίες προκαλούν καλύτερη διασπορά στερεών σωματιδίων.

Για την σωστή χρήση υπερρευστοποιητών στο ανάμιγμα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν οι εξής συνθήκες :

- Διασφάλιση χημικής συμβατότητας
- Αποφυγή υψηλού ποσοστού SP^[1] SP Superplasticizer (Υπερρευστοποιητής) στο μείγμα για να μην υπάρξουν παράπλευρες απώλειες, όπως η εξίδρωση.
- Αποφυγή μεγάλης δόσης SP για να μην εγκλωβιστεί αέρας στο ένεμα. Οι φυσαλίδες αέρα στο μείγμα μειώνουν σημαντικά την ενεσιμότητα (*MILTADOU-FEZANS AND TASSIOS 2012A*).

Ο πιο συνήθης ρευστοποιητής που χρησιμοποιείται στα ενέματα είναι ο πολυκαρβοξυλικός αιθέρας. Η προσθήκη του στο ένεμα βελτιώνει τη σταθερότητα του, μειώνει το ιξώδες του και τη ζήτησή του σε νερό, χωρίς να επηρεάζει την ρευστότητα και την διεισδυτικότητα του μείγματος. Είναι αρκετά διαδεδομένο προϊόν με πολλές εφαρμογές και καλή απόδοση. Γι' αυτό παράγεται από αρκετές εταιρίες και μπορεί να βρεθεί με τις ακόλουθες εμπορικές ονομασίες : MasterGlenium 11, ADIUM 110, Sikament® 240, κ.α.

1 SP : Superplasticizer (Υπερρευστοποιητής)

3.1.3.2. Ρητίνες

Φυσικές ρητίνες (π.χ. αραβικό κόμμη, Εικ. 17) έχουν χρησιμοποιηθεί ως πρόσμικτα σε κονιάματα από την αρχαιότητα προκειμένου να βελτιώσουν την αντοχή τους σε βάθος χρόνου. Η χρήση ρητινών αποτελεί ένα πολλά υποσχόμενο ερευνητικό πεδίο, το οποίο μπορεί να βελτιώσει ορισμένες ιδιότητες του ενέματος, όπως την εργασιμότητα, την αντοχή στις καιρικές συνθήκες και τη συγκολλητική ικανότητα αυτού.

Σύμφωνα με έρευνα (V. PACHTA AND PAPAYIANNI I. 2016) η προσθήκη ρητίνης σε ενέματα με βάση την άσβεστο αυξάνει σημαντικά τη ζήτηση σε νερό. Οι ρητίνες που μελετήθηκαν είναι καζεΐνη, δεξτρίνη, λινέλαιο (φυσικές ρητίνες), Primal AC33, υδρογονάνθρακας, Vinal PC2 και πυριτικό αιθύλιο. Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν είναι πως οι ρητίνες (εκτός από την καζεΐνη και τη δεξτρίνη) βελτιώνουν σημαντικά τη ρευστότητα του μείγματος και την ικανότητα συνοχής του. Για τις φυσικές ρητίνες τα καλύτερα συγκριτικά αποτελέσματα επιτυγχάνονται με το λινέλαιο, ενώ για τις συνθετικές με το Primal AC33 (V. PACHTA AND PAPAYIANNI I. 2016).



Εικ. 17: Παρασκευή ενέματος με αραβικό κόμμη, (DAVIS, ROBERTS, AND BATKIN-HALL 2018)

3.1.3.3. Λευκό τσιμέντο

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα ενέματα με βάση το τσιμέντο δεν ενδείκνυνται για την επισκευή ιστορικών τοιχοποιιών. Παρόλα αυτά η προσθήκη μικρής ποσότητας λευκού τσιμέντου σε ενέματα με βάση την άσβεστο μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τις ιδιότητες του ενέματος. Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα της έρευνας (VASILIKI PACHTA, PAPAYIANNI I., AND SPYRILLOTIS 2019), αν στο ένεμα ασβέστη-ποζολάνης προστεθεί λευκό τσιμέντο, βελτιώνεται σημαντικά τόσο η σταθερότητα του ενέματος σε ρευστή κατάσταση, όσο και η ανάπτυξη πρόωρης αντοχής κατά τη σκλήρυνση του μείγματος. (VASILIKI PACHTA, PAPADOPOULOS, AND STEFANIDOU 2019).

3.1.3.4. Ίνες

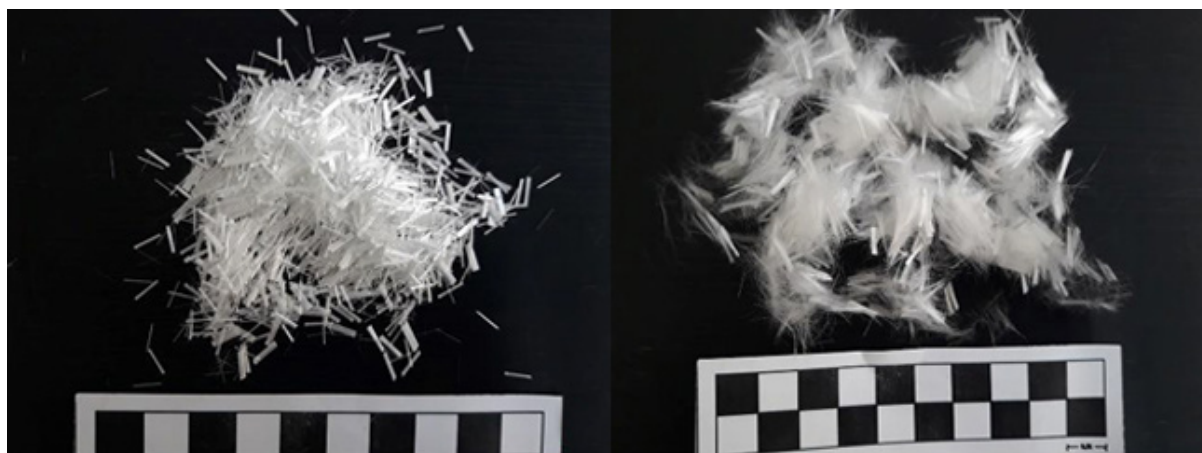
Η χρήση ινών (άχυρο, ξύλο) έχει εφαρμοστεί διαχρονικά σε κονιάματα ως μέσο βελτίωσης των ιδιοτήτων τους. Η προσθήκη ινών στο κονίαμα βοηθά στην ενίσχυση της πλαστικότητας, στη σταθερότητα του όγκου του μείγματος, στη μείωση της πυκνότητας και στη μείωση της τάσης ρηγματώσης λόγω συρρίκνωσης.

Από μελέτες που έχουν διεξαχθεί (*V. PACHTA 2021A*), (*V. PACHTA 2021B*), (*VASILIKI PACHTA AND GOULAS 2020A*), η προσθήκη ινών γυαλιού ή πολυπροπυλενίου, αν και δεν έχει σημαντική επίδραση στις νωπές ιδιότητες του ενέματος, βελτιώνει σημαντικά τη μακροπρόθεσμη αντοχή και την ικανότητα συγκόλλησής του. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα από τις έρευνες δείχνουν πως η προσθήκη ινών αυξάνει τη ζήτηση του μείγματος σε νερό και μειώνει ελαφρώς το χρόνο εργασιμότητας. Το πορώδες και η απορροφητικότητα του ενέματος παραμένουν σταθερά, ενώ το φαινόμενο ειδικό βάρος μειώνεται. Αναφορικά με τις μηχανικές ιδιότητες του ενέματος, το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή του σε θλίψη και κάμψη αυξάνονται αρκετά (10-25% ανάλογα τη σύνθεση), ιδιαίτερα σε ηλικία 210 ημερών. Σημαντική αύξηση παρατηρήθηκε στην πρόσφυση του ενέματος που θεωρείται από τις πιο κρίσιμες πτυχές της αποτελεσματικότητάς του. Σε κάθε περίπτωση η χρήση επιλεγμένων ινών σε ενέματα με βάση την άσβεστο είναι ένα πολλά υποσχόμενο ερευνητικό πεδίο.

Άλλες ίνες που ίσως να έχουν θετικές επιδράσεις στα ενέματα είναι ίνες άνθρακα, πολυεστέρα, ακρυλικές και ίνες βασάλτη.



Εικ. 18: Ίνες γυαλιού, (αριστερά 3mm, δεξιά 6mm), (*V. PACHTA 2021A*)



Εικ. 19: Αριστερά ίνες γυαλιού 6mm, δεξιά ίνες πολυπροπυλενίου 6mm, (*PACHTA 2021B*)

3.2. Προετοιμασία Ενέματος

Η προετοιμασία του ενέματος είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επηρεάζει την εργασιμότητα του και τα χαρακτηριστικά της τελικής του απόδοσης. Τόσο η μέθοδος ανάδευσης, όσο και ο χρόνος ανάμιξης έχουν ζωτική σημασία για τη συνοχή του μίγματος. Οι δυνάμεις στα μόρια του ενέματος τείνουν να σχηματίσουν συσσωματώματα. Αναδευτήρες υψηλής ταχύτητας σε συνδυασμό με τον κατάλληλο χρόνο ανάμιξης έχουν την ικανότητα να «σπάσουν» τα συσσωματώματα και να δημιουργήσουν ενέματα με καλύτερη ρευστότητα, διεισδυτικότητα και υψηλότερη σταθερότητα του όγκου.

Κατά την παρασκευή ενέματος στο πεδίο είναι σημαντικό η διαδικασία να είναι ίδια με αυτή του εργαστηρίου. Προτείνεται αναδευτήρας ρυθμιζόμενης ταχύτητας, παρόμοιος με αυτόν που χρησιμοποιείται στο εργαστήριο. Συχνά, ωστόσο, χρησιμοποιείται ηλεκτρικό τρυπάνι μεταβλητής ταχύτητας με φτερωτή.

Σε περίπτωση που χρησιμοποιούνται έτοιμα ενέματα, θα πρέπει να ακολουθούνται οι υποδείξεις του κατασκευαστή συμπεριλαμβανομένης της μεθόδου ανάδευσης, του χρόνου ανάμιξης και της περιεκτικότητας σε νερό. Σε περίπτωση που τα ενέματα είναι προσαρμοσμένα, είναι σημαντικό οι αναλογίες και η μέθοδος παρασκευής που έχει οριστεί στο εργαστήριο να ακολουθείται λεπτομερώς και κατά την προετοιμασία του ενέματος στο πεδίο.

Για τον περιορισμό σφαλμάτων ενδείκνυται οι αναλογίες όγκου των υλικών να μετατραπούν σε αναλογίες βάρους. Η ποσότητα του νερού που περιέχει το ένεμα είναι σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη ροή, τη συρρίκνωση και τη συγκόλληση αυτού. Προκειμένου να ληφθούν σταθερές παρτίδες ενέματος, η ποσότητα νερού θα πρέπει να μετράται με ακρίβεια τη στιγμή της ανάμιξης και η αναλογία νερού/ενέματος να διατηρείται σταθερή για κάθε ανάμιξη και να αποφεύγεται η εξάτμιση νερού. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα παράδειγμα διαδικασίας ανάμιξης (BIÇER-SIMSIR B. AND RAINER L. 2011).



Εικ.20: Αναδευτήρας ενέματος μεταβαλλόμενης ταχύτητας (BIÇER-SIMSIR B. AND RAINER L. 2011)

- Ρίξτε το προμετρημένο νερό (και τα υπόλοιπα ρευστά αν υπάρχουν) στον κάδο ανάμιξης.
- Προσθέστε τα προανανεμιγμένα ξηρά συστατικά εντός 30 δευτερολέπτων ενώ ανακατεύεται σε χαμηλή ταχύτητα (200-300 rpm) χρησιμοποιώντας αναδευτήρα γενικής χρήσης μεταβαλλόμενης ταχύτητας (π.χ. Cefra-mo Stirrer BDC 3030, βλ. Εικ.20).
- Αυξήστε την ταχύτητα στις 3000-4000 rpm (ανάλογα με το ένεμα) και συνεχίστε την ανάμιξη για 4 λεπτά.
- Μετά την ανάμιξη, περάστε το ένεμα από κόσκινο 1mm για να αφαιρέσετε τυχόν σβώλους για να βελτιωθεί η ενεσιμότητα.
- Στη συνέχεια, χρησιμοποιήστε μίξερ υψηλής ταχύτητας (6000 rpm) για 5 λεπτά.

Μερικές γενικές αρχές που πρέπει να ακολουθούνται για την αποτελεσματική ανάμιξη του ενέματος είναι (MILTADOU-FEZANS AND TASSIOS 2012B):

- Ανάμιξη συνδετικών υλικών ξηράς μορφής με το χέρι
- Σταδιακή προσθήκη νερού και υπερρευστοποιητών μέχρι να επιτευχθεί η κατάλληλη ρευστότητα. Ορισμένα πρόσμικτα (π.χ σφαιρίδια και φυσαλίδες γυαλιού) πρέπει να προστεθούν στο μείγμα σε αυτή τη φάση.
- Χρήση αναδευτήρα μεταβαλλόμενης ταχύτητας (εώς 6000 rpm).
- Προσθήκη ορισμένων πρόσμικτων (π.χ. ίνες γυαλιού, προπυλενίου) στο τέλος της διαδικασίας και ελαφρά ανάδευση με το χέρι για να αποφευχθούν συσσωματώματα.

3.3. Παραδείγματα σύνθεσης ενεμάτων

Η σύσταση των ενεμάτων έχει τόσο μεγάλη ποικιλία, όσο και οι συνθέσεις των κονιαμάτων και των επιχρισμάτων που υπάρχουν στις κατασκευές. Αν και στις περισσότερες περιπτώσεις το υλικό που χρησιμοποιείται είναι το τσιμέντο, το οποίο θεωρείται υλικό γενικής χρήσης, με χαμηλό κόστος και εύκολη εφαρμογή, πλέον η χρήση του είναι αμφιλεγόμενη. Τα προβλήματα που προκαλούνται από την εφαρμογή του είναι σκουρόχρωμοι λεκέδες, εξανθήματα και επιφανειακές ρωγμές. Μερικές ακόμα επιπτώσεις που μπορεί να προκαλέσει στην κατασκευή είναι εμφάνιση διαλυτών αλάτων, μεγάλη συστολή και ασυμβατότητα, παράγοντες που καθιστούν εύθραυστη την επέμβαση. Παρακάτω (βλ. Πίνακας 4) παρουσιάζονται μερικές συνθέσεις ενεμάτων που έχουν εφαρμοστεί σε ιστορικές κατασκευές με επιτυχία.

Πίνακας 4: Συνθέσεις ενεμάτων

Πηγή	Εφαρμογή	Σύνθεση Ενέματος							
		Τσιμέντο	NHL 5	Υδράβεστος	Άβεστος	Ποζολάνη	Υπερευστοποιητής *	Λινέλαιο *	Κόμμι *
(Vintzileou and Miltiadou-Fezans 2008)	Μονή Δαφνίου, Χαϊδάρι (11ος αι.)	30	(-)	25	(-)	45	1	(-)	(-)
		(-)	100	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
(Papayianni I., Karvounaris Th., and Pachta V. 2016)	Παναγία Φανερωμένη, Νέα Σκιάνη, Χαλκιδική (16ος αι.)	(-)	(-)	(-)	50	50	1	(-)	(-)
		(-)	(-)	(-)	50	50	1	1	(-)
(Davis, Roberts, and Batkin-Hall 2018)	El Kurru, Σουδάν (7ος αι. π.χ.)	(-)	(-)	(-)	43	57	(-)	(-)	1 - 3
(Lampropoulos et al. 2022)	Πανάγιος Τάφος, Ιερουσαλήμ (3ος αι.)	(-)	(-)	(-)	**MASTEREM-ACO S 285 TIX		(-)	(-)	(-)

* % w/w συνδετικών

** Έτοιμο έμπορικό ένεμα

Τα παραδείγματα αυτά αναλύονται στην ενότητα «**7. Παραδείγματα εφαρμογής ενεμάτων**» εκτενέστερα. Στο τέλος της εργασίας υπάρχει παραπομπή με συνθέσεις ενεμάτων που έχουν παρασκευαστεί στο εργαστήριο, καθώς και πίνακας με τις ιδιότητες αυτών.

4. Ιδιότητες και έλεγχοι ενεμάτων

Τα βασικά χαρακτηριστικά του ενέματος είναι η **αντοχή**, η **ανθεκτικότητα** και η **ενεσιμότητα**. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται αρκετές μεθοδολογίες για τον έλεγχο των ενεμάτων, οι οποίες διαφέρουν τόσο στον τρόπο που γίνεται όσο και στον εξοπλισμό που απαιτείται. Παρακάτω θα αναφερθούν οι πιο διαδεδομένοι έλεγχοι και αυτοί που πιστοποιούνται από τα Ευρωπαϊκά και Αμερικάνικα πρότυπα (βλ. Πίνακας 5), καθιστώντας έτσι τα αποτελέσματα συγκρίσιμα (*MILTADOU-FEZANS AND TASSIOS 2013A*).

Πίνακας 5: Ιδιότητες ενεμάτων

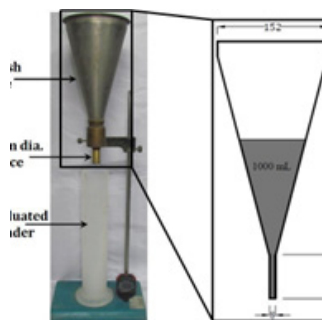
Ιδιότητες σε ρευστή κατάσταση	Ιδιότητες σε σκληρυμένη κατάσταση	
	Φυσικές ιδιότητες	Μηχανικές ιδιότητες
Χρόνος ροής (Ρευστότητα)	Συρρίκνωση	Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας
Ενεσιμότητα -Διεισδυτικότητα	Πορώδες - Φαινόμενο ειδικό βάρος	Αντοχή σε εφελκυσμό
Σταθερότητα όγκου - Κάθιση	Τριχοειδής απορρόφηση	Αντοχή σε κάμψη - θλίψη

4.1. Ιδιότητες σε ρευστή κατάσταση

Οι βασικές ιδιότητες των νωπών ενεμάτων που ελέγχονται αφορούν τη **ρευστότητα**, τη **διεισδυτικότητα** και τη **σταθερότητα του όγκου** (*MILTADOU-FEZANS AND TASSIOS 2012A*). Οι δύο πρώτες αφορούν το πόσο ρευστό είναι ένα ένεμα και κατά πόσο μπορεί να εισχωρήσει στις ρωγμές για τις οποίες θα χρησιμοποιηθεί. Η σταθερότητα του όγκου αφορά την ικανότητα του μείγματος να διατηρήσει την ομοιογένειά του με το πέρασμα του χρόνου και έχει δύο παραμέτρους. Μετριέται η κάθιση και η εφίδρωση του ενέματος. Οι έλεγχοι πραγματοποιούνται αμέσως μετά την παρασκευή κάθε ενέματος και για περαιτέρω αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προτείνεται η επανάληψη της διαδικασίας μία ώρα μετά..

4.1.1. Χρόνος Ροής (Ρευστότητα)

Η έννοια της ρευστότητας αφορά την ικανότητα ροής που έχει το ένεμα υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Τον πιο σημαντικό ρόλο για τη ρευστότητα του ενέματος έχει το **ιξώδες του**. Ωστόσο, η έννοια της ρευστότητας δεν μπορεί να εκφραστεί κατηγορηματικά με μια μόνο παράμετρο. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιούνται συχνά ορισμένες πιο **πρακτικές εκτιμήσεις** της ρευστότητας, όπως ο «χρόνος ροής» μέσω του **κώνου Marsh** (ASTM C939-87). Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τη ρευστότητα είναι η **αναλογία N/K**, η **χρήση υπερρευστοποιητών**, η **ομοιογενής κατανομή των συνθετικών**, η **χημική σύσταση του ενέματος** καθώς και η **μέθοδος ανάμιξης** και η **θερμοκρασία** (*MILTADOU-FEZANS AND TASSIOS 2012A*).

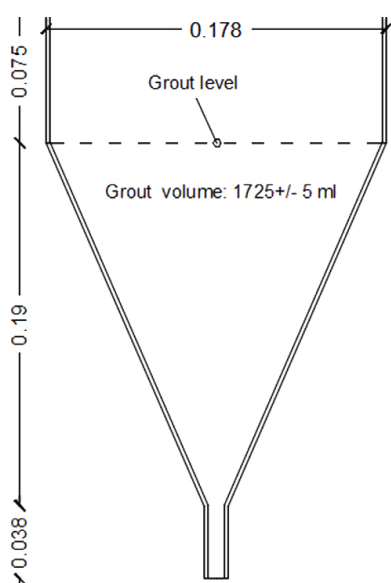


Εικ. 21: Ο κώνος Marsh, που χρησιμοποιείται για έλεγχο ρευστότητας, (*PILLAI & NAIR, 2013*)

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι ελέγχου της ρευστότητας παστών και ενεμάτων. Όλες όμως μετρούν τον χρόνο που χρειάζεται συγκεκριμένη ποσότητα υλικού να διέλθει μέσα από έναν τυποποιημένο αντεστραμμένο κώνο (βλ. Εικ. 21). Ο έλεγχος μπορεί να γίνει τόσο στο εργαστήριο όσο και στο πεδίο. Για την εκτέλεση της δοκιμής χρειάζεται ένας κώνος, μια βάση, ένας βαθμονομημένος κύλινδρος, ένα χρονόμετρο και ένα θερμόμετρο.

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, ο κώνος τοποθετείται σε βάση με τον άξονα του κατακόρυφο και τη μεγαλύτερη διάμετρο στραμμένη προς τα πάνω. Κατά τη διάρκεια του ελέγχου πρέπει να αποφεύγονται οι δονήσεις. Ένας βαθμονομημένος κύλινδρος τοποθετείται κάτω από την έξοδο του κώνου. Όλες οι επιφάνειες του κώνου πρέπει να είναι καθαρές και υγρές, χωρίς περιττά νερά. Έπειτα σφραγίζεται η έξοδος του κώνου και χύνεται το μείγμα μέσα σε αυτόν. Το ένεμα πρέπει να χύνεται αρκετά αργά για να αποφευχθεί η συσσώρευση αέρα. Αφού γεμίσει ο κώνος, ελευθερώνεται η έξοδος του και ταυτόχρονα αρχίζει η μέτρηση του χρόνου, μέχρι ο βαθμονομημένος κύλινδρος να γεμίσει με συγκεκριμένη ποσότητα ενέματος. Το μείγμα πρέπει να διατηρείται αναδευόμενο εάν απαιτείται περαιτέρω δοκιμή (BSI 2007).

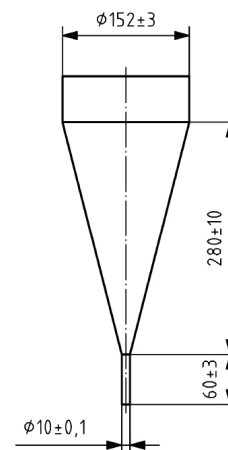
Οι δύο βασικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται αφορούν τον Αμερικάνικο κανονισμό ASTM C939 και τον Ευρωπαϊκό κανονισμό EN 445.



Εικ. 22: Σκίτσο κώνου εκροής βάση ASTM C939-02, (VASILIKI PACHTA AND GOULAS 2020B)

Το Αμερικάνικο πρότυπο προσδιορίζει τη διαδικασία ελέγχου του ενέματος με τον κανονισμό ASTM C939. Ο έλεγχος αφορά καθαρά ενέματα ή ενέματα που περιέχουν λεπτόκοκκα αδρανή (περνούν από κόσκινο 2,36 mm, κόσκινο No 8). Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται για ενέματα με χρόνο εκροής μικρότερο από 35s. Για μεγαλύτερο χρόνο εκροής η ρευστότητα προσδιορίζεται καλύτερα από τη μέθοδο C109/C109M. Με βάση τον κανονισμό, ο κώνος εκροής μπορεί να είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα, χυτό σίδηρο ή όποιο άλλο μέταλλο που δεν οξειδώνεται. Κώνοι από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας είναι αποδεκτοί για εφαρμογή στο πεδίο, όπου δεν απαιτείται υψηλή ακρίβεια. Ο κώνος πρέπει να έχει όγκο $1,725 \pm 0.005$ lt και το στόμιο να έχει διάμετρο 13 mm και μήκος 38 mm (βλ. Εικ. 22). Πριν αρχίσει η διαδικασία, πρέπει να γίνει έλεγχος του κώνου, ο οποίος περιλαμβάνει το σφράγισμα του κάτω στομίου και το γέμισμα του κώνου με 1,725 lt νερό. Αν ο χρόνος εκροής μετρηθεί στα 8 ± 2 s τότε μπορεί να αρχίσει ο έλεγχος που περιγράφεται νωρίτερα. Η δοκιμή πρέπει να γίνει εντός ενός λεπτού από την άντληση του ενέματος από τον αναμικτήρα και η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί σε επιλεγμένα διαστήματα για να αποδειχθεί ο χρόνος εργασιμότητας του υλικού (WSDOT 2017).

Το Ευρωπαϊκό Πρότυπο ορίζει τη μέθοδο ελέγχου ενεμάτων που καθορίζεται στο EN 447. Με βάση αυτόν τον κανονισμό ο κώνος πρέπει να είναι κατασκευασμένος από λείο, μη απορροφητικό υλικό και να έχει όγκο $1,7 \pm 0,17$ lt. Το κάτω μέρος του κώνου (στόμιο) έχει διάμετρο 10 ± 1 mm και μήκος 60 ± 3 mm (βλ. Εικ. 23). Για την προετοιμασία του ελέγχου ποσότητα μείγματος τουλάχιστον 1 lt πρέπει να περάσει από κόσκινο διαμέτρου 150 mm και διάμετρο κόκκου ≤ 2 mm, για να αποφευχθεί η δημιουργία σβόλων. Έπειτα ακολουθεί η διαδικασία που προαναφέρθηκε. Γίνεται έλεγχος σε ποσότητα ενός λίτρου και ο χρόνος μετριέται με ακρίβεια 0,5s. (BSI 2007).



Εικ. 23: Σκίτσο κώνου εκροής βάση EN 445: 2007, (BSI 2007)

4.1.2. Ενεσιμότητα – Διεισδυτικότητα

Ενεσιμότητα ονομάζεται η δυνατότητα του ενέματος να εισχωρήσει στα κενά, τις ρωγμές και τις ασυνέχειες της τοιχοποιίας και θεωρείται αποτέλεσμα των εξής ιδιοτήτων :

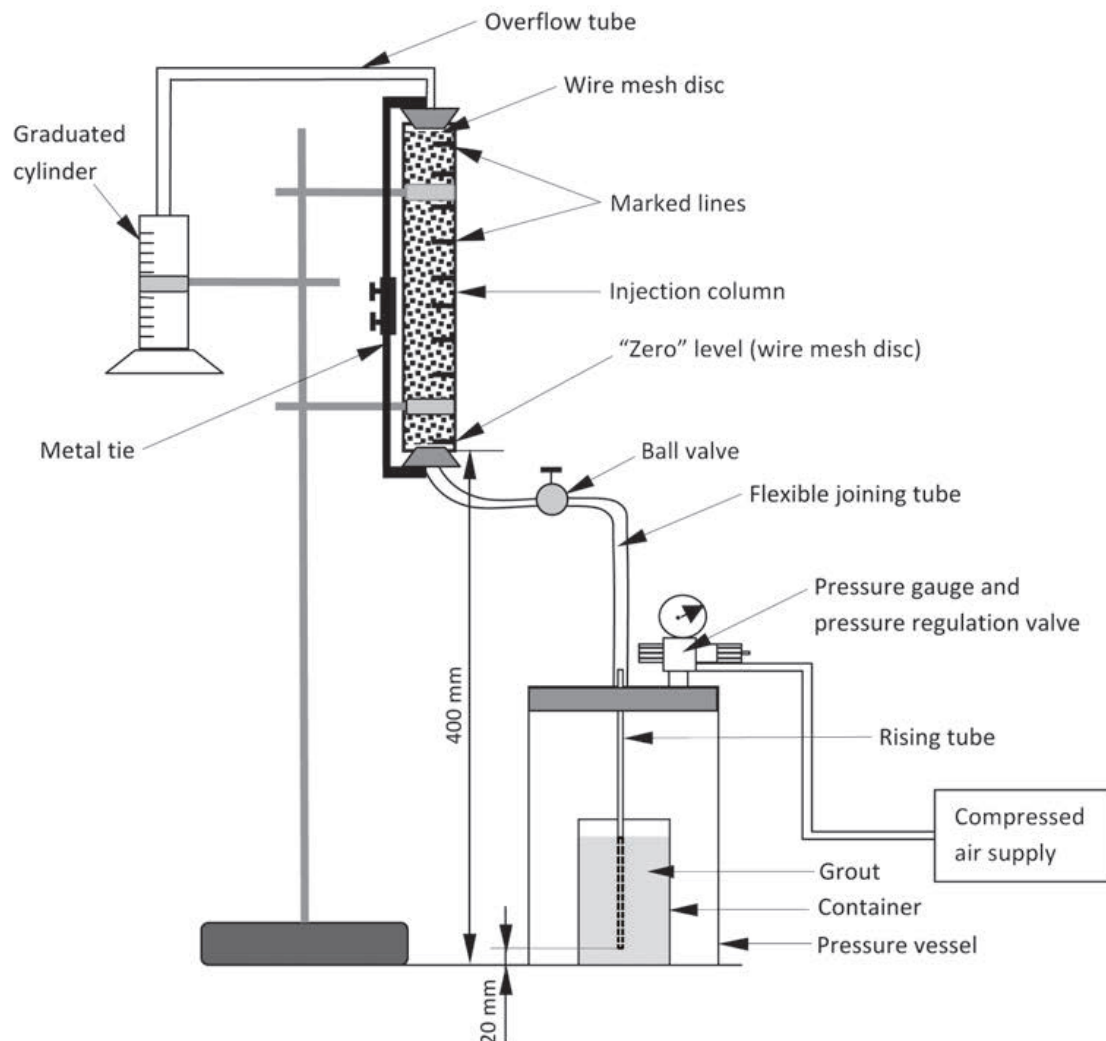
- **Ικανοποιητικά χαρακτηριστικά διεισδυτικότητας**, δηλαδή κατάλληλο μέγεθος αδρανών σε σχέση με το πλάτος των κενών που το ένεμα πρέπει να πληρώσει, καθώς και κατάλληλη ομοιομορφία του μείγματος, όταν αυτό στερεοποιηθεί.
- **Επαρκή ρευστότητα**, δηλαδή εύκολη ροή του ενέματος μέσα στις ρωγμές και τα κενά της τοιχοποιίας με τη λιγότερη δυνατή πίεση καθ' όλη τη διάρκεια της επέμβασης.
- **Ικανοποιητική σταθερότητα** του εναιωρήματος, δηλαδή χαμηλό ποσοστό εξίδρωσης και αποφυγή επιβλαβούς απόμικξης.

Τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει το ένεμα για να χαρακτηρίζεται από υψηλή ενεσιμότητα είναι **η λεπτότητα άλεσης των κονιών, ο τύπος και το μέγεθος των αδρανών** (στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται), **η ικανοποιητική σταθερότητα όγκου** και όλες οι παράμετροι που αναφέρθηκαν στη ρευστότητα (MILTADOU-FEZANS AND TASSIOS 2013A).

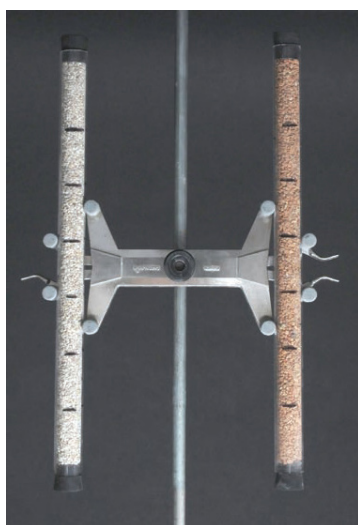
Για τον υπολογισμό της διεισδυτικότητας προτείνεται η εφαρμογή του κανονισμού EN 1771. Ο έλεγχος της ενεσιμότητας απαιτεί τη χρήση της συσκευής που παρουσιάζεται στην Εικ. 24. Το ένεμα εγχέεται υπό σταθερή πίεση σε μια στήλη, η οποία αποτελείται από έναν διαφανή, πλαστικό σωλήνα γεμάτο με κοκκώδες υλικό. Η στήλη είναι τοποθετημένη κατακόρυφα και το υλικό εγχέεται από τον πυθμένα του σωλήνα. Η απόσταση που διεισδύει το ένεμα στη στήλη και ο αντίστοιχος χρόνος χρησιμοποιούνται για τη χάραξη μιας καμπύλης που μετρά την ικανότητα έγχυσης.



Εικ. 24: Παράδειγμα συσκευής ελέγχου ενεσιμότητας, (BIÇER-SIMSIR B. AND RAINER L. 2011)



Εικ. 25: Σκίτσο συσκευής ελέγχου ενεσιμότητας, (BIÇER-SIMSIR B. AND RAINER L. 2011)



Εικ. 26: Στήλες που περιέχουν τριμμένο τούβλο και τραβερνίτη (BIÇER-SIMSIR B. AND RAINER L. 2011)

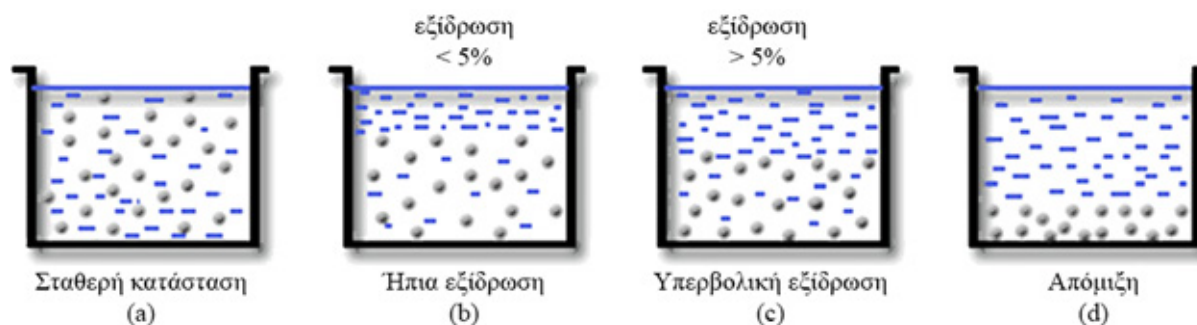
Το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 1771 ορίζει πως η στήλη θα γεμίσει με πυριτική άμμος, αλλά η πυριτική άμμος έχει χαμηλή απορροφητική ικανότητα. Συνεπώς, δεν αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μέρος των τοιχοποιιών. Ανάλογα με τη φύση των εργασιών αυτό μπορεί να τροποποιηθεί. Για παράδειγμα, η αντικατάσταση της πυριτικής άμμου με θρυμματισμένα κοκκώδη υλικά κάνει τον έλεγχο πιο αντιπροσωπευτικό για αρχαιολογικά και ιστορικά συστήματα. Πιο συγκεκριμένα, το θρυμματισμένο τούβλο και η θρυμματισμένη τραβερνίτη (βλ. Εικ. 26) είναι υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί για τα τυπικά υποστρώματα επιχρισμάτων, τοιχογραφιών και ψηφιδωτών και αντιπροσωπεύουν υλικά υψηλής και χαμηλής υδατοαπορρόφησης αντίστοιχα.

Επιπλέον, η άμμος που προτείνεται στο πρότυπο αφορά την πλήρωση ρωγμών 0,2 mm σε σκυρόδεμα. Με την αντικατάσταση της με τα υλικά που αναφέρθηκαν από πάνω (με διάμετρο κόκκου περίπου 2-4mm) προσομοιάζουν ρωγμές τοιχοποιίας πλάτους 0,3-0,6 mm (BIÇER-SIMSIR B. AND RAINER L. 2011), (V. PACHTA 2021B).

4.1.3. Σταθερότητα Όγκου

Η σταθερότητα του όγκου αφορά την ικανότητα του ενέματος να διατηρεί τη συνεκτικότητά του, δηλαδή την αποφυγή εξίδρωσης και απόμειξης καθ' όλη τη διάρκεια της επέμβασης μέχρι και την πήξη του. Αν δεν διασφαλιστεί ικανοποιητική σταθερότητα του εναιωρήματος, υπάρχει κίνδυνος αποκόλλησης, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει σοβαρά την ποιότητα της επέμβασης. Η διαφορετική σύνθεση των συστατικών του ενέματος έχει ως αποτέλεσμα τα πιο βαριά αδρανή να καθιζάνουν και σε συνδυασμό με τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις και την αντίσταση της τριβής το ένεμα έχει την τάση να οδηγείται σε μια από τις τέσσερις καταστάσεις ισορροπίας (βλ. Εικ. 27) :

- α. Σταθερή κατάσταση :** Το ένεμα διατηρεί ομοιογένεια μέχρι την πήξη του.
- β. Ήπια εξίδρωση (εξίδρωση <5%) :** Μια ομοιόμορφη αργή καθίζηση, η οποία αφήνει ένα λεπτό στρώμα νερού στο πάνω μέρος της επιφάνειας. Ωστόσο, οι διασωματικές δυνάμεις είναι αρκετά ισχυρές για να συγκρατήσουν τη δομή ενωμένη. Έτσι, η σύνθεση του μείγματος μένει πρακτικά αμετάβλητη.
- γ. Υπερβολική εξίδρωση (εξίδρωση >5%) :** Προκύπτει ένα ετερογενές μείγμα που χάνει τη διεσδυτικότητά του και την ικανότητα αποτελεσματικής προσκόλλησης.
- δ. Απόμειξη :** Προκαλείται όταν υπάρχει γρήγορη καθίζηση, με αποτέλεσμα τα αδρανή να διατάσσονται σε ξεχωριστά στρώματα με βάση το βάρος και το μέγεθος τους. Η ύπαρξη αυτού του φαινομένου δημιουργεί μη αποδοτικό ένεμα (*MILTADOU-FEZANS AND TASSIOS 2013B*).



Εικ. 27: Σχηματική απεικόνιση καταστάσεων ισορροπίας, (*MILTADOU-FEZANS AND TASSIOS 2013B*)



Εικ. 28: Ένεμα σε διαβαθμισμένο γυάλινο κύλινδρο, (*BIÇER-SIMSIR B. AND RAINER L. 2011*)

Για τον υπολογισμό της κάθισης εξετάζεται μειωμένη ποσότητα υλικού με βάση τον κανονισμό ASTM C940-98A. Η διαδικασία περιλαμβάνει το γέμισμα ενός δοκιμαστικού διαβαθμισμένου κυλίνδρου με το ένεμα (βλ. Εικ. 28). Ο κύλινδρος σκεπάζεται για την αποφυγή εξάτμισης νερού και παραμένει έτσι για μια ώρα. Έπειτα το νερό που έχει διαχωριστεί αφαιρείται με σύριγγα και μετριέται ο όγκος του (υπολογισμός εξίδρωσης). Ύστερα μετριέται ο όγκος του υπόλοιπου μείγματος και συγκρίνεται με τον αρχικό όγκο (κάθιση). Σύμφωνα με σχετικές μελέτες το ένεμα είναι αποδεκτό αν ο όγκος μειωθεί λιγότερο από το 5% του αρχικού μείγματος (*ΕΛΟΤ 2018*).

4.2. Ιδιότητες Σκληρυμένης Κατάστασης

Μετά την παρασκευή του το ένεμα καλουπώνεται σε πρισματικές μήτρες 4x4x16 cm και ακολουθεί σκλήρυνση σε θάλαμο με σταθερές συνθήκες ($90 \pm 2\%$ RH και $20 \pm 1^\circ\text{C}$) για συγκεκριμένες χρονικές περιόδους (28,90 και 210 μέρες). Σε καθένα από τα ορισμένα χρονικά διαστήματα μετριοούνται οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του ενέματος.

Οι φυσικές ιδιότητες (πορώδες, απορρόφηση και φαινόμενο ειδικό βάρος) ελέγχονται με το πρότυπο : RILEM CPC 11.3 και ο έλεγχος συρρίκνωσης με το ASTM C 474. Οι μηχανικές ιδιότητες, αντοχή σε κάμψη και θλίψη, ελέγχονται με το πρότυπο : BS EN1015-11:1999 και το μέτρο ελαστικότητας με το πρότυπο : BS 1881-209:1990. Οι μέθοδοι ελέγχου περιγράφονται στη συνέχεια.

4.2.1. Φυσικές Ιδιότητες

4.2.1.1. Έλεγχος Συρρίκνωσης, (μεταβολή όγκου/βάρους)

Η μέθοδος αυτή προσδιορίζει την ογκομετρική συρρίκνωση των ενεμάτων κατά την ξήρανση. Η ογκομετρική σταθερότητα ενός ενέματος είναι μια σημαντική παράμετρος, καθώς η συρρίκνωση επηρεάζει άμεσα την πρόσφυση και την αντοχή. Η δοκιμή αυτή παρέχει, επίσης, πληροφορίες σχετικά με την περιεκτικότητα του ενέματος σε νερό που οδηγεί σε ογκομετρική αστάθεια. Ενώ η αυξημένη περιεκτικότητα σε νερό μπορεί να φαίνεται ότι βελτιώνει ορισμένες ιδιότητες, όπως η ικανότητα έγχυσης, μειώνει όμως την ογκομετρική σταθερότητα και οδηγεί στο σχηματισμό ρωγμών, οι οποίες με τη σειρά τους θα προκαλέσουν απώλεια της σύνδεσης μεταξύ του ενέματος και των στρώσεων της δομής και απώλεια της αντοχής του. Η συρρίκνωση ξήρανσης που μετρείται με τη μέθοδο που περιγράφεται, πρέπει να είναι μικρότερη από 4% και κατά προτίμηση πρέπει να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη.

Ο έλεγχος αφορά τις διαδικασίες που περιγράφονται στο πρότυπο ASTM C 474. Η μέθοδος ελέγχου αρχίζει με την κατασκευή δείγματος ελέγχου γνωστού αρχικού όγκου (βλ. Εικ. 29). Αφού το μείγμα στερεοποιηθεί, μετρείται το βάρος του στον αέρα και ενώ είναι σε δεξαμενή που περιέχει υγρό (π.χ. κηροζίνη). Ο τελικός όγκος του υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη διαφορά βάρους των δύο μετρήσεων και η συρρίκνωση με τη διαφορά του αρχικού και του τελικού όγκου του δείγματος. Η τελική πυκνότητα μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας το βάρος που μετρήθηκε στον αέρα και από τον υπολογισμό του τελικού όγκου. Πιο συγκεκριμένα τα στάδια της διαδικασίας είναι τα εξής (BIÇER-SIMSIR B. AND RAINER L. 2011) :



Εικ. 29: Δοκίμια συρρίκνωσης χυτευμένα με χρήση πλαστικού φύλλου, BIÇER-SIMSIR B. AND RAINER L. 2011

1. Για να ελεγχθεί αν το υλικό εκτόπισης είναι κατάλληλο για το ένεμα που χρίζει μελέτη, ελέγχεται η απορροφητικότητα του υλικού με τον τύπο :

$$\Delta M = (M_{A2} - M_{A1}) / M_{A1}, \text{ όπου}$$

M_{A1} = Βάρος του δείγματος στον αέρα και

M_{A2} = Βάρος του δείγματος στο υγρό (βλ. Εικ. 30).

Αποδεκτές τιμές θεωρούνται αυτές που έχουν $\Delta M < 25\%$. Σε αντίθετη περίπτωση πρέπει να γίνουν αλλαγές στη σύσταση του ενέματος και στο υγρό εκτόπισης.



Εικ. 30: Μέτρηση όγκου δείγματος σε υγρό, (BIÇER-SIMSIR B. AND RAINER L. 2011)

2. Υπολογίζεται η πυκνότητα του υγρού εκτόπισης (π.χ. κηροζίνη). Για τον υπολογισμό απαιτείται η χρήση πυκνόμετρου. Η πυκνότητα $\rho_{\text{υγρού}}$ υπολογίζεται ως εξής :

$$\rho_{\text{υγρού}} = M_{\text{Πυκ+υγρού}} - M_{\text{Πυκ}} / V_{\text{Πυκ}} \text{ (g/cm}^3\text{)}, \text{ όπου}$$

$M_{\text{Πυκ+υγρού}}$ = Μάζα πυκνόμετρου και υγρού

$M_{\text{Πυκ}}$ = Μάζα πυκνόμετρου

$V_{\text{Πυκ}}$ = Όγκος Πυκνόμετρου

3. Ο αρχικός όγκος του δείγματος (V_i) υπολογίζεται με τη χρήση του τύπου :

$$V_i = M / \rho_{\text{wet}} \text{ (g/cm}^3\text{)}, \text{ όπου}$$

M = το βάρος του νωπού ενέματος

ρ_{wet} = η νωπή πυκνότητα του ενέματος (δίνεται από τον προμηθευτή).

4. Η διαφορά βάρους $M_{\text{διαφ}}$ του ενέματος όταν ζυγίζεται στον αέρα και στο υγρό υπολογίζεται από τον τύπο :

$$M_{\text{διαφ}} = M_{A2} - M_{\text{εκτ}} \text{ (g)}, \text{ όπου}$$

$M_{\text{εκτ}}$ = Το βάρος του δοκιμίου στο υγρό εκτόπισης.

5. Ο τελικός όγκος του δείγματος ($V_{\text{τελ}}$) μετά την ξήρανση προκύπτει από :

$$V_{\text{τελ}} = M_{\text{διαφ}} / \rho_{\text{υγρού}}, \text{ (cm}^3\text{)}$$

6. Το ποσοστό συρρίκνωσης (S) υπολογίζεται :

$$S = (V_i - V_{\text{τελ}}) / V_i$$

7. Η ξηρή πυκνότητα του ενέματος ($\rho_{\text{ξηρή}}$) είναι :

$$\rho_{\text{ξηρή}} = M_{A1} / V_{\text{τελ}}, \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

4.2.1.2. Πορώδες, Απορροφητικότητα, Φαινόμενο Ειδικό Βάρος

Το πορώδες είναι μια σημαντική ιδιότητα του ενέματος που λειτουργεί σε αντιστροφή αναλογία με την ανθεκτικότητα και την αντοχή του. Η τιμή του προσδιορίζεται με τη μέτρηση της απορροφητικότητάς του. Η απορροφητικότητα ή υδροαπορροφητικότητα είναι η ποσότητα νερού που μπορεί να απορροφήσει συγκεκριμένος όγκος ενέματος σε ορισμένο χρόνο και θερμοκρασία. Το ειδικό βάρος του ενέματος είναι ο λόγος του βάρους του υλικού προς τον όγκο του συμπαγούς υλικού και των αδιαπέραστων κενών (ΠΡΟΒΙΔΑΚΗΣ Κ. 2013).

Υπάρχουν διάφορα πρότυπα που ορίζουν την απορροφητικότητα και το πορώδες των κονιαμάτων και των ενεμάτων. Καθένα από αυτά τα πρότυπα περιλαμβάνει διαφορετικές διαδικασίες για την προετοιμασία και την δοκιμή δειγμάτων που οδηγούν σε διαφορετικά εύρη τιμών. Τα πρότυπα αφορούν προσδιορισμό απορρόφησης νερού (BS 1881: Part 122: 198), απορρόφηση νερού με εμβάπτιση (RILEM CPC 11.1), απορρόφηση νερού με βύθιση υπό κενό (RILEM CPC 11.3) και μέθοδος για την πυκνότητα, την απορρόφηση και τα κενά στο σκληρυμένο σκυρόδεμα (ASTM C 642–9). Επειδή τα περισσότερα υλικά ενεμάτων είναι ιδιαίτερα απορροφητικά και υπάρχει κίνδυνος φθοράς αυτών, το πρότυπο που ενδείκνυται είναι το RILEM CPC 11.3.



Εικ. 31: Εύρανη δειγματος συνδεδεμένο σε ζυγό, μέσα σε ένα δοχείο με νερό και μετριέται το βάρος του δοκιμίου μέσα σε νερό (W_{H_2O}). Τελικά το πορώδες, το φαινόμενο βάρος και η υδατοαπορρόφηση υπολογίζονται με τις εξής εξισώσεις (KEWALRAMANI AND KHARTABIL 2021):

- Πορώδες : $(W_{Kop} - W_{\Xi\eta\rho\acute{o}}) / (W_{Kop} - W_{H_2O}) * 100(\%)$
- Απορροφητικότητα: $(W_{Kop} - W_{\Xi\eta\rho\acute{o}}) / W_{\Xi\eta\rho\acute{o}} * 100(\%)$
- Φαινόμενο Ειδικό Βάρος : $W_{\Xi\eta\rho\acute{o}} / (W_{Kop} - W_{H_2O}) * 100(\%)$



Εικ. 32: Δοκίμιο σε δεξαμενή κενού πριν τον έλεγχο, (KEWALRAMANI AND KHARTABIL 2021)



Εικ. 33: Δοκίμιο σε δεξαμενή κενού κατά την αφαίρεση του αέρα, (KEWALRAMANI AND KHARTABIL 2021)

4.2.1.3. Τριχοειδής Απορρόφηση

Η τριχοειδής απορρόφηση αντιπροσωπεύει την ταχύτητα διείσδυσης του νερού στους πόρους του ενέματος λόγω των επιφανειακών δυνάμεων μεταξύ του νερού και των τοιχωμάτων των πόρων (SINGH 2018). Σκοπός του ελέγχου είναι ο ορισμός ενός συντελεστή που θα εκφράζει τον ρυθμό ρόφησης υγρασίας στους πόρους του σκληρυμένου ενέματος.

Ο πιο συνήθης έλεγχος για τη μέτρηση της τριχοειδούς απορρόφησης αφορά τα στάδια που ορίζει το πρότυπο EN 1015-18:2002. Ο έλεγχος γίνεται σε τρία πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 40x160 mm. Για την παρασκευή των δοκιμίων απαιτείται να τοποθετηθεί διηθητικό χαρτί τόσο στη βάση του καλούπιού όσο και στην επιφάνεια του ενέματος, όταν αυτό γεμίσει το καλούπι. Έπειτα, τα δείγματα πήζουν σε συγκεκριμένες συνθήκες. Μετά την πήξη σπάμε το δοκίμιο σε δυο μέρη και ακολουθεί η σκλήρυνση των ενεμάτων σε θάλαμο με σταθερές συνθήκες. Το πρότυπο ορίζει ψήσιμο σε θερμοκρασία 60 ± 5 °C, αλλά έρευνες αποδεικνύουν πως τα ενέματα με βάση την υδράσβεστο παρουσιάζουν ρηγμάτωσεις σε αυτές τις συνθήκες και προτείνουν συντήρηση σε θερμοκρασία 20 ± 2 °C και σχετική υγρασία $90 \pm 5\%$ R.H.. Στον παρακάτω πίνακα (βλ. Πίνακας 6) αναφέρεται αναλυτικά ο χρόνος που απαιτείται να μείνουν τα δοκίμια στο θάλαμο σκλήρυνσης (PAPAYIANNI AND PACHTA 2012), (PAPAYIANNI I., PACHTA V., AND STEFANIDOU M. 2012).

Πίνακας 6: Σκλήρυνση δοκιμίων

Είδος ενέματος	Χρόνος (σε ημέρες) σκλήρυνσης ενέματος σε θερμοκρασία $20 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$		
	95 % \pm 5 % RH (σχετική υγρασία)		65 % \pm 5 % RH
	Στο καλούπι*	Αφού το καλούπι αφαιρεθεί	Αφού το καλούπι αφαιρεθεί
Κονιάματα με βάση την άσβεστο	5	2	21
Κονιάματα ασβέστη/τσιμέντου (ασβέστη > 50%w/w)	5	2	21
Τσιμέντο και άλλα κονιάματα με ασβέστη-τσιμέντου	2	5	21
Κονιάματα με υδραυλικά πρόσθετα	2	5	21
Επιβραδυνόμενα κονιάματα	5	2	21

* Σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτείτε περισσότερος χρόνος σκλήρυνσης

Αφού ολοκληρωθεί η σκλήρυνση του ενέματος, μετριέται το βάρος του ($M_{\Xi\eta\rho\acute{o}}$). Στη συνέχεια, το δοκίμιο με τη σπασμένη όψη προς τα κάτω τοποθετείται σε δεξαμενή, στη βάση της οποίας υπάρχει σύστημα διατήρησης σταθερής στάθμης νερού. Το δοκίμιο πρέπει να είναι βυθισμένο στο νερό 5-10 mm κατά τη διάρκεια του ελέγχου και η δεξαμενή να σφραγίζεται για να αποφεύγεται η εξάτμιση της υγρασίας του δοκιμίου. Μετά από 24 ώρες το δοκίμιο βγαίνει από τη δεξαμενή και μετριέται ξανά το βάρος του ($M_{\text{Kop.}}$). Η τριχοειδής απορρόφηση προκύπτει από τον τύπο : $0,625(M_{\text{Kop.}} - M_{\Xi\eta\rho\acute{o}})$, (Kg/m²) και για τον υπολογισμό του βάθους διείσδυσης το δοκίμιο κόβεται εγκάρσια στη μέση και μετριέται το ύψος που έχει καλυφθεί με νερό στο κέντρο του δείγματος. Για περαιτέρω έλεγχο το βάρος του δοκιμίου ζυγίζεται σε πιο τακτά χρονικά διαστήματα (CEN 2002B).

4.2.2. Μηχανικές ιδιότητες

Σύμφωνα με τα πρότυπα του ΕΛΟΤ, οι μηχανικές ιδιότητες των ενεμάτων θα ελέγχονται με κυβικά και πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 50x50x50 mm και 40x40x160 mm αντίστοιχα. Θα δοκιμάζονται στις 7, 14, 28 ημέρες, σε θλίψη τα κυβικά δοκίμια και σε εφελκυσμό και κάμψη τα πρισματικά. Η διαδικασία δειγματοληψίας ορίζεται από το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 1015-2 (ΕΛΟΤ 2018).

4.2.2.1. Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (ΔΜΕ)

Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας αντιστοιχεί σε πολύ μικρή στιγμιαία παραμόρφωση που δίνεται κατά προσέγγιση συγκριτικά με το αρχικό εφαπτομενικό μέτρο, το οποίο είναι μια γραμμή με αφετηρία το μηδέν (KUMAR M. AND MONTAIRO P. 2009). Το ευρωπαϊκό πρότυπο BS 1881-209:1990 περιγράφει μια διαδικασία για τον υπολογισμό του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας με τη χρήση σονομέτρησης. Ο έλεγχος αφορά τον έλεγχο του Δ.Μ.Ε. στο σκυρόδεμα και υπολογίζεται με μια εμπειρική σχέση μεταξύ του Δ.Μ.Ε. και της συχνότητας των κυμάτων. Επειδή ο έλεγχος του ευρωπαϊκού προτύπου αφορά περιορισμένο εύρος υλικών για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας προτείνεται η χρήση του τύπου (QIXIAN AND BUNGEYT 1996) :

$$E_d = \frac{(1+\nu) \times (1-2 \times \nu)}{(1-\nu)} \times \rho \times V^2 \quad (1), \quad \text{όπου}$$

E_d = Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας

V = Ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων

ν = Δυναμικός λόγος Poisson

Το εργαστήριο δομικών υλικών του Α.Π.Θ. προτείνει τον απλοποιημένο τύπο :

$$E_d = 0.9245668 \times \rho \times V^2 \quad (\text{GPa}), \quad (2)$$



Εικ. 34: Δοκιμή σονομέτρησης, (ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ Φ. 2018).

Για τον υπολογισμό του χρόνου διάδοσης των υπερήχων στο δοκίμιο χρησιμοποιείται σονόμετρο (βλ. Εικ. 34). Αυτή η συσκευή περιλαμβάνει δύο πόλους. Στη μια πλευρά του δοκιμίου τοποθετείται ένας πομπός υπερήχων και στην άλλη ένας δέκτης. Η διαδικασία βασίζεται στην εκπομπή ενός παλμού υπερήχων στο υλικό και τη μέτρηση αυτών που φτάνουν στην άλλη πλευρά. Ο έλεγχος γίνεται πάντα στη διαμήκη πλευρά του δοκιμίου. Πριν αρχίσει ο έλεγχος, απαιτείται να εφαρμοστεί στις άκρες του δοκιμίου ειδικό γράσο, ώστε να επιτευχθεί απόλυτη επαφή του οργάνου με το δοκίμιο. Έπειτα, ρυθμίζεται το όργανο με τη χρήση ενός δοκιμίου βαθμονόμησης, μέχρι που η τιμή στην συσκευή να ταυτίζεται με την αναμενόμενη και, τέλος, ξεκινά ο έλεγχος στο δοκίμιο. Η ταχύτητα διάδοσης (V) υπολογίζεται από την αναλογία του μήκους του δοκιμίου προς το χρόνο διέλευσης του υπερήχου. Τελικά το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται από τη σχέση (1) που αναφέρθηκε (B.S. 1881 : PART 209 1990).

4.2.2.2. Αντοχή σε εφελκυσμό

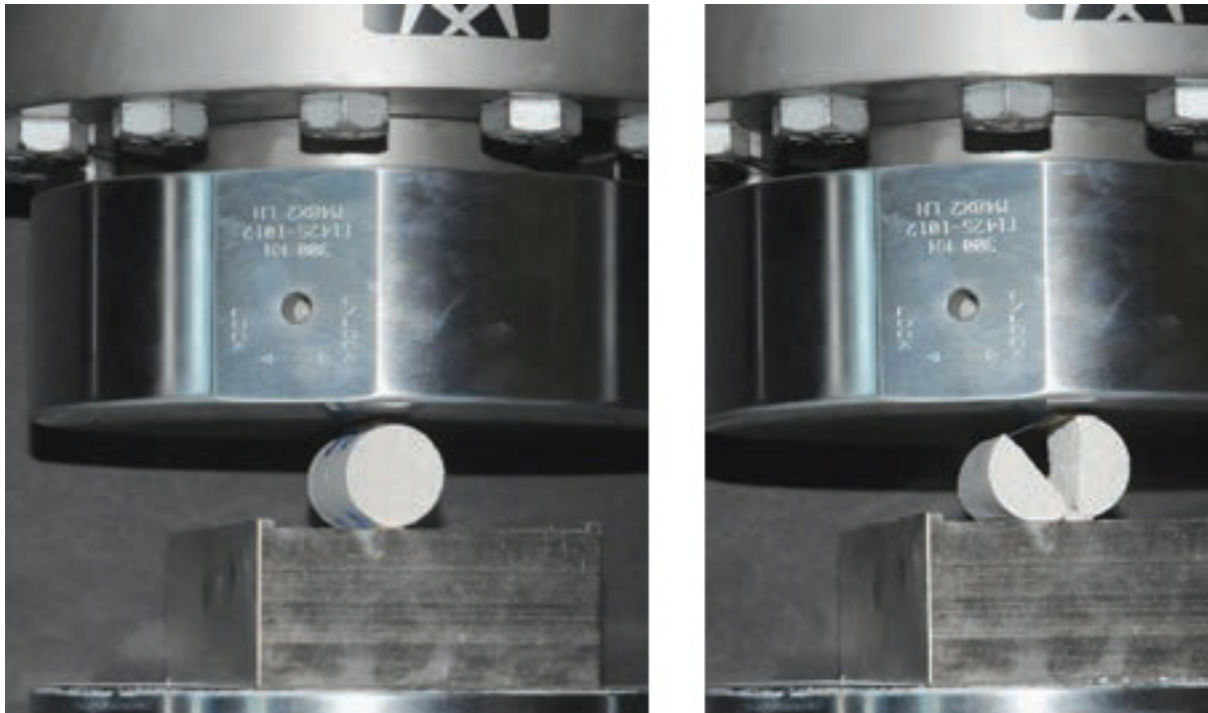
Η δοκιμή αυτή χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής των σκληρυμένων ενεμάτων μέσω μιας έμμεσης δοκιμής εφελκυσμού. Τα ενέματα που χρησιμοποιούνται για την επανασύνδεση αρχιτεκτονικών επιφανειών αναμένεται να αστοχούν τις περισσότερες φορές λόγω εφελκυστικών τάσεων και μερικές φορές λόγω διατμητικών τάσεων. Επομένως, παρόλο που η δοκιμή για την αντοχή σε θλίψη είναι η πιο συνηθισμένη δοκιμή μηχανικής αντοχής, στην περίπτωση των ενεμάτων η αντοχή τους σε εφελκυσμό και διάτμηση είναι πιο σημαντική για την αξιολόγησή τους από την αντοχή τους σε θλίψη. Σε αυτή τη μελέτη προτιμάται η ανάλυση της δοκιμής για την αντοχή σε εφελκυσμό έναντι του ελέγχου για την αντοχή σε διάτμηση, δεδομένου ότι είναι η κυρίαρχη παράμετρος για τις περισσότερες εφαρμογές ενεμάτων. Επιπλέον, η δοκιμή αντοχής σε εφελκυσμό διάσπασης χρησιμοποιεί το ίδιο δοκίμιο και τον ίδιο εξοπλισμό με τη δοκιμή αντοχής σε θλίψη, για την οποία είναι εξοπλισμένα τα περισσότερα εργαστήρια. Η αντοχή σε εφελκυσμό του σκληρυμένου ενέματος έγχυσης πρέπει να είναι παρόμοια αλλά μικρότερη από το αρχικό κονίαμα, για να αποφευχθεί η ρηγμάτωση του αρχικού υλικού.

Η δοκιμή για τον προσδιορισμό της αντοχής σε εφελκυσμό πραγματοποιείται σε κυλινδρικό δοκίμιο που καταπονείται στο πλάι του. Δεδομένου ότι τα ενέματα είναι πολύ ασθενέστερα σε εφελκυσμό από ότι σε θλίψη, ο κύλινδρος θα αστοχήσει συνήθως εξαιτίας των οριζόντιων δυνάμεων παρά των κατακόρυφων δυνάμεων συμπίεσης. Η αστοχία αυτή οδηγεί σε διάσπαση του κυλίνδρου στη μέση. Τα κυλινδρικά δοκίμια προετοιμάζονται και δοκιμάζονται σύμφωνα με το πρότυπο EN 1771. Με τη συσκευή που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ενεσιμότητας, εγχέεται ένεμα σε μια κενή πλαστική στήλη υπό σταθερή πίεση. Η στήλη συγκρατείται κατακόρυφα και το ένεμα εγχέεται από τον πυθμένα του σωλήνα. Αφού ολοκληρωθεί η στερεοποίηση του ενέματος αφαιρείται η πλαστική στήλη με πριόνι πλακιδίων.

Μια ώρα μετά την αφαίρεση του πλαστικού σωλήνα τοποθετούνται δύο ξύλινα φύλλα κατά μήκος της πάνω και της κάτω πλευράς των δοκιμίων, (βλ. Εικ. 35) τα οποία έπειτα θλίβονται σε μηχανή συμπίεσης με σταθερά αυξανόμενο θλιπτικό φορτίο ($0,5 \text{ N} \times \text{mm}^{-2} \times \text{s}^{-1}$) (βλ. Εικ. 36).



Εικ. 35: Δείγμα ελέγχου με προσαρτημένα ξύλινα φύλλα, (BİÇER-SIMSIR B. AND RAINER L. 2011)



Εικ. 36: Έλεγχος δοκιμίου σε εφελκυσμό (*BIÇER-SIMSIR B. AND RAINER L. 2011*)

Για τον υπολογισμό της εφελκυστικής αντοχής (f) χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος, όπου το μέγιστο φορτίο ορίζεται ως φορτίο θραύσης (F).

$$f = \frac{2 \times F}{\pi \times d \times l} \quad , \text{ όπου}$$

F = Φορτίο θραύσης

d = διάμετρος δοκιμίου

l = μήκος δοκιμίου.

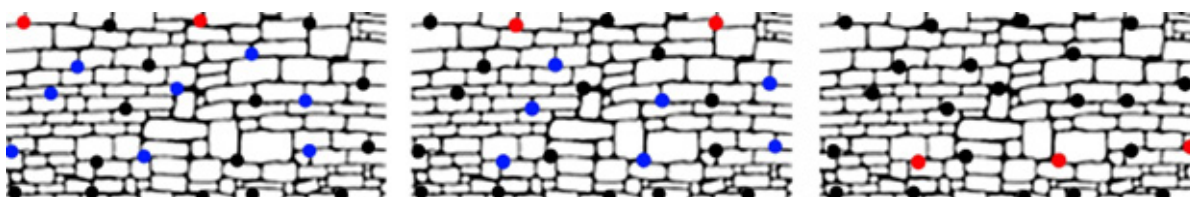
5. Διαδικασία Έγχυσης Ενεμάτων σε τοιχοποιίες

Η ενεμάτωση αποτελεί μια από τις βασικές μεθόδους αποκατάστασης ιστορικών κατασκευών, είτε σε θέσεις τοπικών φθορών (εφαρμογή σε ρωγμές) είτε για ομογενοποίηση της μάζας τους. Η διαφορά μεταξύ τους είναι πως τα πρώτα εφαρμόζονται σε ρωγμές που δεν υπερβαίνουν τα 10 mm και συνιστώνται για τοιχοποιίες μεγάλου πάχους. Αντίθετα, η τεχνική ομογενοποίησης της μάζας επιδιώκει την εισαγωγή ενέματος στη μάζα της τοιχοποιίας, όχι μόνο για την πλήρωση ενδεχόμενων ρωγμών αλλά όλων των κενών στο εσωτερικό της τοιχοποιίας (ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗ Μ. 2015).

5.1. Διαδικασία πριν την ενεμάτωση

Σε περίπτωση που η αρμολόγηση της τοιχοποιίας έχει αστοχήσει ή έχει υποστεί αποκόλληση, απαιτείται η εκ νέου αρμολόγηση αυτής. Πριν την εφαρμογή του ενέματος είναι υποχρεωτικός ο καθαρισμός (water flushing) της εσωτερικής δομής της τοιχοποιίας από υφιστάμενα υπολείμματα, όπως σαθρά κονιάματα ή άλλα υλικά που ενδέχεται να εμποδίσουν την πλήρωση.

Η διαδικασία του καθαρισμού γίνεται με τη χρήση νερού υπό πίεση, βασισμένη σε έναν νοητό κάναβο. Η τεχνική αφορά τη σταδιακή μετακίνηση των υπολειμμάτων από την υψηλότερη στη χαμηλότερη στάθμη μέχρι τον πλήρη καθαρισμό της τοιχοποιίας. Κάθε φάση της διαδικασίας θεωρείται επιτυχής, όταν από τα σημεία εκτόνωσης το νερό εξάγεται καθαρό. Πρέπει να αποφεύγεται η εφαρμογή της διαδικασίας στην κατώτατη στάθμη της δομής (κλειστή ροή). Η διαδικασία περιγράφεται ενδεικτικά στην Εικ. 37 (ΕΛΟΤ 2018).



Εικ. 37: Διαδικασία Πλύσης (● Είσοδος Ροής, ● Εκτόνωση Ροής, ● Κλειστή Ροή)

5.2. Εφαρμογή Ενέματος

Αφού έχει γίνει μελέτη για την παρασκευή του κατάλληλου ενέματος που είναι συμβατό με την εκάστοτε τοιχοποιία, σημαντικό ρόλο έχει η σωστή εφαρμογή του, ώστε να πληρώσει όλα τα εσωτερικά κενά αυτής. Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι εφαρμογής ενεμάτων. Η πιο διαδεδομένη είναι η μέθοδος ενεμάτωσης υπό πίεση. Άλλες μέθοδοι είναι η έγχυση ενέματος με το χέρι, το σύστημα βαρύτητας, το σύστημα άντλησης και τα αναρροφητικά συστήματα (ΜΠΟΥΝΤΑ ΟΥ. 2007).

5.2.1. Εισαγωγή ενέματος υπό πίεση

Το εργατοτεχνικό προσωπικό που θα ασχοληθεί με την εκτέλεση των εργασιών πρέπει να έχει αποδεδειγμένη εμπειρία σε παρόμοιας φύσεως έργα. Πρέπει να αποφασίσει για τον καλύτερο συνδυασμό αποστάσεων των οπών, τη σύνθεση του ενέματος και την απαιτούμενη πίεση για την βέλτιστη εισροή του ενέματος στην τοιχοποιία, λαμβάνοντας υπόψη τη δομή και την κατάσταση της.

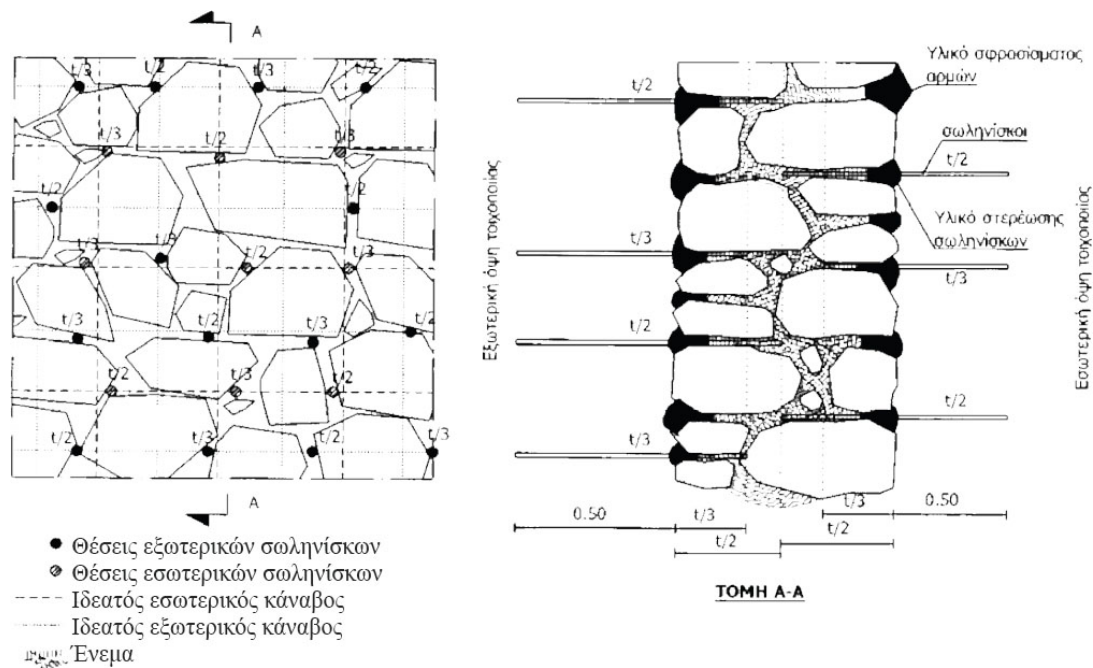
Με τη μέθοδο ενεμάτωσης υπό πίεση, το ένεμα εισχωρεί στις ρωγμές της τοιχοποιίας συμπιέζοντας ή εξωθώντας τον αέρα που υπάρχει σε αυτή. Η γνώση της εσωτερικής δομής της τοιχοποιίας και του μεγέθους των κενών είναι στοιχείο που βοηθά στην επιλογή του κατάλληλου μείγματος (ΕΛΟΤ 2018).

5.2.1.1. Ενέματα ομογενοποίησης μάζας

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η διαδικασία ομογενοποίησης της μάζας αφορά εργασίες που έχουν σκοπό να πληρώσουν όλα τα κενά της τοιχοποιίας και όχι μόνο τις ρωγμές. Αυτή η τεχνική είναι ιδιαίτερα αποδοτική αφού αυξάνει σημαντικά την αντοχή της κατασκευής. Προτείνεται για περιπτώσεις αργολιθοδομών με μεγάλο ποσοστό κονιάματος χαμηλής ποιότητας, καθώς και σε περιπτώσεις τρίστρωτων τοιχοποιιών. Η εφαρμογή της χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, αφού έχει πολύ υψηλό κόστος και πρέπει να εφαρμόζεται με φειδώ. Συγκεκριμένα για αύξηση της αντοχής της τοιχοποιίας 20-60% απαιτούνται 50 lt ενέματος/m³ και για αύξηση 200-400% απαιτούνται 150 lt/m³ (ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗ Μ. 2015).

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα στάδια εφαρμογής (ΕΛΟΤ 2018), τα οποία ενδέχεται να χρειαστούν τροποποιήσεις ανάλογα με τις απαιτήσεις και τη φύση της επέμβασης.

- Αφαιρείται το υφιστάμενο επίχρισμα, αν απαιτείται.
- Ελέγχεται η κατάσταση των αρμών και όπου υπάρχουν σαθρά κονιάματα αφαιρούνται και αρμολογούνται εκ νέου.
- Χαράσσεται νοητός κάναβος και στις κορφές του τοποθετούνται οι σωληνίσκοι εισόδου και ελέγχου του ενέματος. Ανάλογα με τη φύση της εργασίας οι σωληνίσκοι τοποθετούνται μονόπλευρα ή αμφίπλευρα. Αν στη μελέτη δεν έχει οριστεί κάναβος, οι μέγιστες αποστάσεις ορίζονται ως 0,50m και 1,00m, στο οριζόντιο και το κατακόρυφο επίπεδο αντίστοιχα. Σε κάθε περίπτωση οι αποστάσεις εισόδου του ενέματος δεν πρέπει να ξεπερνούν τα 2/3 του πάχους της τοιχοποιίας. Στην περίπτωση αμφίπλευρης εισαγωγής ενέματος ο εσωτερικός με τον εξωτερικό κάναβο δεν πρέπει να ταυτίζονται και πρέπει να έχουν βήμα κατά μισό κάναβο οριζόντια και κάθετα (βλ. Εικ. 38).



Εικ. 38: Διάταξη σωληνίσκων ενέματος, (ΕΛΟΤ 2018)

- Οι σωληνίσκοι εισόδου και ελέγχου του ενέματος πρέπει να είναι διάφανοι, με διάμετρο 1-10 mm, ανάλογα με τη μελέτη του έργου. Η τοποθέτηση τους γίνεται σε θέσεις αρμών και εισάγονται στην τοιχοποιία οι μισοί κατά 1/3 και οι υπόλοιποι κατά 1/2 του πάχους της τοιχοποιίας. Το εξέχον τμήμα των σωληνίσκων θα είναι περίπου 0,50m.
- Οι σωληνίσκοι στερεώνονται και αρμολογούνται περιμετρικά για να μην υπάρξουν διαρροές και για να πληρωθούν πιθανοί σχηματισμοί διεπιφανειών.

- Η εισαγωγή του ενέματος γίνεται από κάτω προς τα πάνω ως εξής :
 - a. Αριθμούνται οι σωληνίσκοι εισαγωγής – εξόδου του ενέματος με αύξοντα αριθμό
 - b. Σχεδιάζεται σκαρίφημα των σωληνίσκων
 - c. Συντάσσεται πρωτόκολλο για κάθε θέση της επέμβασης, στο οποίο αναγράφονται:
 1. Ο αριθμός του σωληνίσκου από το οποίο εξήλθε το ένεμα και σφραγίστηκε.
 2. Η εξέλιξη κατανάλωσης ενέματος ανά σωληνίσκο που σφραγίζεται.
 3. Ο όγκος του ενέματος που εισήχθη από τη συγκεκριμένη θέση εισόδου.
 4. Οι σημαντικές μεταβολές στην πίεση.
 - d. Αν παρατηρηθεί κατανάλωση ενέματος μεγαλύτερη από το 10% του όγκου της τοιχοποιίας, η διαδικασία σταματά και γίνεται έλεγχος για πιθανές διαρροές. Αφού ολοκληρωθεί η ενεμάτωση, οι σωληνίσκοι στρέφονται προς τα πάνω και δένονται μέχρι την ωρίμανση του ενέματος.
 - e. Η πίεση με την οποία εισάγεται το ένεμα στην τοιχοποιία είναι συνεχώς ελεγχόμενη, όσο το δυνατόν σταθερή και δεν πρέπει να ξεπερνά τα 0,05-0,15 MPa (0.5-1.5 bar).
 - f. Δε σταματά η εισαγωγή ενέματος σε μια θέση, πριν η πίεση στη θέση αυτή φτάσει το 1bar , εκτός αν δεν υπάρχει δυνατότητα να εισχωρήσει στη δομή άλλο ένεμα (οι ενδείξεις κατανάλωσης γίνουν μηδέν)
 - Η εφαρμογή σε κάθε θέση σωληνίσκου ολοκληρώνεται όταν από τη θέση εξόδου του αέρα εξέλθει όλος ο αέρας και τρέξει καθαρό ένεμα.
 - Πρέπει να ληφθούν μέτρα για τη συνεχή παροχή ενέματος, χωρίς αυτό να εξαντληθεί στη μέση της διαδικασίας.
 - Αν οι εργασίες το απαιτούν, πρέπει να ληφθούν μέτρα για την αποφυγή φθορών στην περιοχή που επισκευάζεται (μέτρα αντιστήριξης).

5.2.1.2. Ενέματα σε θέσεις τοπικών φθορών

Η διαδικασία αφορά την εισαγωγή ρευστού υλικού στη μάζα της κατασκευής, το οποίο με την πάροδο του χρόνου στερεοποιείται και προσδίδει μηχανικές ιδιότητες σε αυτή. Όπως αναφέρθηκε , εφαρμόζεται σε ρωγμές της τοιχοποιίας με διάμετρο μικρότερη από 10mm. Με την εφαρμογή ενέματος σε τοπικές φθορές αποκαθίσταται η αρχική αντοχή της τοιχοποιίας, χωρίς όμως να υπάρχει σημαντική αύξηση αυτής. Όταν εφαρμόζεται αυτή η τεχνική, πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή, αφού έχει πολύ υψηλό κόστος, απαιτείται ύπαρξη ειδικού εξοπλισμού και σχολαστική εργασία (ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗ Μ. 2015). Η διαδικασία μοιάζει με αυτή που περιεγράφηκε από πάνω (ομογενοποίηση της μάζας), αλλά είναι πιο απλοποιημένη αφού η κλίμακα εφαρμογής της είναι μικρότερη. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα στάδια εφαρμογής της:

- Εφαρμόζονται όλα τα στάδια που απαιτούνται πριν την ενεμάτωση.
- Αφαιρείται το υφιστάμενο επίχρισμα γύρω από την περιοχή της επέμβασης.
- Ελέγχεται η κατάσταση των αρμών και όπου υπάρχουν σαθρά κονιάματα αφαιρούνται και αρμολογούνται εκ νέου.
- Χαράσσεται κανάβος (30-50 cm) στο σημείο της επέμβασης και εκατέρωθεν αυτού και στις κορφές του ορίζονται οι θέσεις εισροής και εκροής του ενέματος. Σε περίπτωση αμφίπλευρης (εσωτερικής – εξωτερικής) εισαγωγής ενέματος, οι κορφές του κανάβου δεν πρέπει να ταυτίζονται.
- Τοποθετούνται διάφανοι σωληνίσκοι στις κορφές του κανάβου. Οι μισοί στο 1/3 του πάχους της λιθοδομής και οι υπόλοιποι στο 1/2. Το εξέχον τμήμα του σωληνίσκου πρέπει να είναι περίπου 0,50 m.
- Αρμολογούνται περιμετρικά για αποφυγή διαρροών.
- Εισάγεται το ένεμα.

6. Εφαρμογή ενεμάτων σε διακοσμημένες αρχιτεκτονικές επιφάνειες.

Διακοσμημένη αρχιτεκτονική επιφάνεια είναι κάθε διακόσμηση της οποίας η βάση είναι μια κατασκευή από μόνη της και αυτή είναι η κύρια ιδιότητα αυτής της μορφής της τέχνης. Σε σύγκριση με άλλα είδη ζωγραφικής όπως σε καμβά ή σε αντικείμενα, σε αυτό το είδος το έργο είναι αμετακίνητο. Επομένως, η διακόσμηση συνδέεται άρρηκτα με τη δομή του κτιρίου και αποτελεί μέρος του.

Οι αρχιτεκτονικές επιφάνειες μπορεί να περιλαμβάνουν **τοιχογραφίες, ανάγλυφα επιχρίσματα, ψηφιδωτά** και άλλα. Τέτοιες δομές μπορούν να είναι είτε απλές, δηλαδή να περιλαμβάνουν μόνο τη βάση και την τελική επιφάνεια, ή πιο περίπλοκες, δηλαδή να έχουν διάφορες στρώσεις κονιαμάτων, στρώσεις γύψου, προπαρασκευαστικές επιφάνειες, διάφορες στρώσεις χρώματος κ.α.. Αυτές οι δομές είναι εξαιρετικά πολύπλοκες. Το πορώδες των στρώσεων συνδέει τις στρώσεις μεταξύ τους και η τελική επιφάνεια συνδέεται με το φυσικό περιβάλλον. Αυτό καθιστά τις συνθήκες ελάχιστα ελεγχόμενες και συχνά αποτελούν λόγο της φθοράς του έργου. Σε άλλες περιπτώσεις το μέγεθος της τοιχογραφίας είναι πολύ μεγάλο. Συχνά εκτείνεται σε εκατοντάδες τετραγωνικά μέτρα και η υπόβαση πάνω στην οποία είναι σχεδιασμένο το τελικό έργο, μπορεί να διαφέρει από σημείο σε σημείο. Αυτοί οι παράγοντες καθιστούν τη συντήρηση των τοιχογραφιών εξαιρετική πρόκληση (PASIAN CH. 2020).



Εικ. 39: Επέμβαση σε ψηφιδωτό δάπεδο, (BIÇER-ŞİMŞİR AND RAINER 2011)

6.1. Φθορές αρχιτεκτονικών επιφανειών

Οι κύριες φθορές που εντοπίζονται σε παλιές αρχιτεκτονικές επιφάνειες σχετίζονται με την αποκόλληση των στρώσεων του επιχρίσματος από την τοιχοποιία, τη ρηγμάτωση και την απώλεια του επιχρίσματος (V. PACHTA AND PAPAYIANNI I. 2016).

Το φαινόμενο της αποκόλλησης προκαλείται λόγω απώλειας πρόσφυσης μεταξύ των στρώσεων. Στην περίπτωση των τοιχογραφιών, αυτές οι στρώσεις μπορεί να είναι δύο στρώσεις κονιάματος ή μια στρώση κονιάματος και η υπόβαση του έργου. Η αποκόλληση, όμως, δεν αφορά μια στρώση (π.χ κονίαμα ή τελική επίστρωση), της οποίας τα σωματίδια δεν είναι πλέον συνδεδεμένα μεταξύ τους.

Η αποκόλληση μπορεί να εκδηλωθεί με διάφορες μορφές. Μπορεί να είναι αρκετά προφανές να ανιχνευθεί, με παραδείγματα που αφορούν την παραμόρφωση ή την απώλεια του σοβά, καθώς και ρωγμές στην επιφάνεια ή να απαιτεί πιο προσεκτική και δύσκολη ανίχνευση, με κανένα σαφές σημάδι στην τελική επιφάνεια. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως οι αποκολλημένες επιφάνειες μιας τοιχογραφίας δε χρήζουν απαραίτητα διορθωτικών επεμβάσεων. Η επέμβαση προτείνεται μόνο όταν υπάρχει κίνδυνος απώλειας του αρχικού υλικού.

Η αποκόλληση της τοιχογραφίας και η μεταφορά της σε μια κινητή βάση, αν και εφαρμοζόταν στο παρελθόν, δεν αποτελεί θεμιτή λύση. Αυτό επηρεάζει ολόκληρη την ταυτότητα της κατασκευής. Το σύνολο των τοιχογραφιών και η σημασία τους είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με τη αξία της κατασκευής πάνω στην οποία δημιουργήθηκαν. Η απομάκρυνση της τοιχογραφίας θα ήταν ανεύθυνη πράξη, ενώ η σταθεροποίηση αυτής προτιμάται πάντα.

Η εφαρμογή ενέματος αποτελεί μια επανορθωτική επέμβαση που στοχεύει στην

αντιμετώπιση της αστοχίας της πρόσφυσης των υλικών, με την εισαγωγή συμβατού, συγκολλητικού υλικού. Η οπή από την οποία εγχέεται το ένεμα πρέπει να είναι νωπή από νερό ή διάλυμα νερού-αιθανόλης, με σκοπό να καθαρίσει η κοιλότητα και ο σοβάς να είναι νωπός, με στόχο τη μείωση της απορρόφησης νερού που περιέχεται στο ένεμα καθώς και τη μείωση της τάσης του για συρρίκνωση. Το ένεμα, σε ρευστή κατάσταση, εγχέεται με σύριγγα, με τη βοήθεια βελόνας ή λάστιχου, ανάλογα με το μέγεθος της οπής. Το υλικό πήζει γεμίζοντας το κενό και βελτιώνει την πρόσφυση μεταξύ των στρώσεων. Πρέπει να σημειωθεί πως δεν απαιτείται η πλήρωση όλων των κενών, το σημείο αγκύρωσης είναι επαρκές για να εξασφαλιστεί η σταθερότητα του συνόλου.

Αν και η ενεμάτωση είναι κρίσιμης σημασίας για να σωθούν υπό κατάρρευση έργα, είναι μια πολύπλοκη διαδικασία. Αρχικά, εφαρμόζεται σε εξαιρετικά εύθραυστες τοιχογραφίες και η αξιολόγηση τόσο του προβλήματος όσο και της επέμβασης παρουσιάζει δυσκολίες, αφού δεν έχουμε οπτική επαφή. Τέλος, η διαδικασία είναι μη αναστρέψιμη και δύσκολα μπορεί να επανεπεξεργαστεί.

Ως εκ τούτου η φυσικοχημική συνάφεια των υλικών του ενέματος με αυτά της τοιχοποιίας είναι θεμελιώδης και ο σχεδιασμός του ενέματος πρέπει να προσαρμόζεται ανάλογα με τη βαφή και τη φθορά της εκάστοτε επέμβασης (PASIAN CH. 2020).

6.2. Μεθοδολογία

Η δομή των διακοσμημένων αρχιτεκτονικών επιφανειών είναι πολύ σύνθετη. Αν αναλογιστούμε την **καλλιτεχνική και ιστορική τους αξία** σε συνδυασμό με το ότι η τεχνική της ενεμάτωσης είναι **μη αναστρέψιμη**, φαίνεται πως για κάθε στάδιο εφαρμογής του ενέματος πρέπει να γίνει πολύ προσεκτική και εξειδικευμένη μελέτη.

Η συστηματική αξιολόγηση της κατάστασης της κατασκευής είναι ζωτικής σημασίας για να κατανοηθεί αν η ενεμάτωση είναι η καταλληλότερη μέθοδος αποκατάστασης στη συγκεκριμένη περίπτωση. Για τον έλεγχο της κατάστασης της εσωτερικής δομής μιας αρχιτεκτονικής επιφάνειας υπάρχει μια ποικιλία μη καταστρεπτικών διαγνωστικών εργαλείων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Μερικές από αυτές είναι: **θερμογραφία υπερήχων, ενδοσκόπηση με τη χρήση οπτικών ινών, φωτομετρία με laser, ηχητική τομογραφία κ.α..** Επιπλέον υπάρχουν εργαστηριακές τεχνικές ελέγχου που αφορούν τη μελέτη δειγμάτων (σκόνη, μικρά τεμάχια) που έχουν συλλεχθεί από την κατασκευή, ώστε να εξεταστούν τα χημικά, τα φυσικά και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του δείγματος και να προσδιοριστεί το είδος της φθοράς που έχει η κατασκευή. Τέτοιες τεχνικές είναι η ανάλυση των στοιχείων του δείγματος με **ακτίνες X και με ηλεκτρονικά μικροσκόπια, η ανάλυση της σύστασης του επίστρωσης με κρυσταλλογραφία ακτίνων X (XRD), θερμοβαρυτική ανάλυση – φασματομετρία μάζας και πετρογραφία καθώς και η υγρή χημική ανάλυση**, η οποία περιλαμβάνει ανάλυση με κόσκινα για τον εντοπισμό αλάτων, μέτρηση πορώδους και απορρόφησης του νερού, διαπερατότητα των ατμών και ελέγχους αντοχής.

Με βάση τα αποτελέσματα από τους ελέγχους αξιολογείται η κατάσταση και κρίνεται αν η εφαρμογή ενεμάτων είναι απαραίτητη. Στην περίπτωση που επιλεγεί αυτή η τεχνική επέμβασης, ορίζονται οι επιθυμητές ιδιότητες του υλικού και σχεδιάζεται το ένεμα με βάση την αρχή της συμβατότητας. Αυτές οι αποφάσεις λαμβάνονται από μια διεπιστημονική ομάδα, η οποία αποτελείται από συντηρητές, επιστήμονες συντηρητές, αρχιτέκτονες συντήρησης και μηχανικούς. Η επιλογή της κατάλληλης σύνθεσης είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχία της επέμβασης και για την αποφυγή της ανάγκης μεταγενέστερων επεμβάσεων (BIÇER-ŞİMŞİR AND RAINER 2018).

6.3. Επιλογή του κατάλληλου ενέματος

Όπως έχει αναφερθεί, τα ενέματα πρέπει να είναι συμβατά με τα αρχικά υλικά της δομής στην οποία θα εφαρμοστούν (υποστρώματα, σοβάδες). Πρέπει να είναι ρευστά, ώστε να εισχωρήσουν στο μέγιστο βάθος των κενών και να έχουν ελάχιστο διαχωρισμό υλικών. Η συγκέντρωση διαλυτών αλάτων πρέπει να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη. Οι ιδιότητες μεταφοράς νερού (τριχοειδής απορρόφηση, διαπερατότητα υδρατμών) πρέπει να είναι παρόμοιες με αυτές του αρχικού υλικού και το ένεμα δεν πρέπει να δημιουργεί φράγμα υδρατμών. Με βάση τις αρχές της συντήρησης, οι μηχανικές ιδιότητες του σκληρυμένου ενέματος πρέπει να είναι παρόμοιες, αλλά και μικρότερες από αυτές του αρχικού υλικού. Το ίδιο ισχύει και για το πορώδες και τη συγκολλητική ικανότητα του υλικού. Τέλος, τα ενέματα που θα εφαρμοστούν πρέπει να έχουν επαρκή ανθεκτικότητα. Αυτές οι ιδιότητες πρέπει να ελέγχονται μεθοδικά από τους εργαστηριακούς ελέγχους που αναλύθηκαν στην ενότητα «Ιδιότητες και έλεγχοι ενεμάτων» και να επανελεγχθούν κατά την εφαρμογή τους στο πεδίο για τυχόν επιπλοκές εξαιτίας των συνθηκών του περιβάλλοντος στο οποίο θα εφαρμοστούν (BIÇER-ŞİMŞİR AND RAINER 2018).

6.4. Πριν την ενεμάτωση

Η προετοιμασία της περιοχής πριν την ενεμάτωση αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την επιτυχία της επέμβασης. Είναι σημαντικό να πραγματοποιηθούν επεμβάσεις όπως αφαλάτωση και εξυγίανση της επιφάνειας. Τα υπολείμματα που έχουν συσσωρευθεί στα κενά πρέπει να καθαριστούν. Αυτό μπορεί να γίνει με τη χρήση μικρής ηλεκτρικής σκούπας (αυτές που εφαρμόζονται για καθαρισμό H/Y), αντλίες αέρα και άλλων μικρών εξαρτημάτων. Για την έκπλυση της κοιλότητας μπορεί να εισαχθεί νερό ή προτιμότερα ένα μείγμα νερού- αιθανόλης (βλ. Εικ. 40). Αυτό εξυπηρετεί και την ενυδάτωση της δομής, ώστε το ένεμα να συναντήσει λιγότερη αντίσταση, να αποκτήσει καλύτερη πρόσφυση και να αποφευχθεί η ταχεία σκλήρυνση. Η εισχώρηση νερού πρέπει να γίνει με φειδώ, ώστε να αποφευχθεί περίσσεια νερού που θα επιφέρει άλλες συνέπειες. Αν στην επιφάνεια υπάρχουν βιολογικές φθορές, πρέπει να απομακρυνθούν για να μην προκαλέσουν προβλήματα στη εισροή του υλικού. Η διάνοιξη οπών σε διακοσμημένες επιφάνειες δε συνιστάται και προτιμάται η έγχυση ενέματος από τις υφιστάμενες ρωγμές (BIÇER-ŞİMŞİR AND RAINER 2018)



Εικ. 40: Πλύση τοιχογραφίας πριν την ενεμάτωση, (WIKIMEDIA COMMONS, 2020)

6.5. Έγχυση ενέματος



Εικ. 41: Έγχυση ενέματος με σύριγγα, (WIKIMEDIA COMMONS, 2020)

Αφού προετοιμαστεί η περιοχή της επέμβασης, παρασκευάζεται και γίνεται έγχυση του ενέματος. Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι είναι η έγχυση υπό πίεση και η μέθοδος της βαρύτητας. Αν υπάρχει πρόσβαση στο πάνω μέρος της δομής, το ένεμα μπορεί να εισαχθεί από εκεί και να αφηθεί να ρέει προς τα κάτω με τη βοήθεια της βαρύτητας. Αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε ψηφιδωτά δάπεδα. Σε άλλες περιπτώσεις εισάγεται με σύριγγα κατάλληλου μεγέθους (βλ. Εικ. 41). Σε περιπτώσεις που οι φθορές είναι εκτεταμένες, είναι απαραίτητη η εξωτερική στήριξη της επιφάνειας τόσο κατά την εφαρμογή όσο και κατά την πήξη του ενέματος. Αυτό εξυπηρετεί την αποφυγή κατάρρευσης εξαιτίας της πίεσης που προκαλείται, την ευθυγράμμιση του παραμορφωμένου σοβά και την καλύτερη πρόσφυση του ενέματος με το υπόστρωμα της δομής. Καθ' όλη τη διάρκεια της επέμβασης η διαδικασία πρέπει να παρακολουθείται με μη καταστρεπτικές μεθόδους (θερμογραφία, στρωματογραφία με laser) (BIÇER-ŞİMŞİR AND RAINER 2018).

6.6. Μετά την ενεμάτωση

Αφού ολοκληρωθεί η τεχνική της ενεμάτωσης, η επιφάνεια πρέπει να ελεγχθεί, ώστε να διασφαλιστεί πως δεν υπάρχουν υπολείμματα ενέματος σε αυτή. Το ένεμα μπορεί να ρέει εσωτερικά και να επανεμφανίζεται σε τυχαία σημεία της επιφάνειας. Αυτό μπορεί να προκαλέσει αποχρωματισμό αυτής, αν δεν αφαιρεθεί εγκαίρως. Επιπλέον, μετά την πήξη του ενέματος πρέπει να εφαρμοστούν μη καταστρεπτικές μέθοδοι (βλ. Εικ. 42) ελέγχου, για να διασφαλιστεί η επιτυχία της επέμβασής και για τον εντοπισμό πιθανών νέων φθορών (ρωγμές, κενά, αποκολλήσεις). Αυτές οι μέθοδοι πρέπει να επανεφαρμόζονται μετά από φυσικές καταστροφές (σεισμικές δονήσεις) ή οποιοδήποτε άλλο γεγονός που μπορεί να προκαλέσει φθορές (BIÇER-ŞİMŞİR AND RAINER 2018).



Εικ. 42: Υπέρυθρη ανακλαστογραφία στο Μυστικό Δείπνο, (E&T, 2021)

7. Παραδείγματα εφαρμογής ενεμάτων

7.1. Σταθεροποίηση τοιχοποιίας της Μονής Δαφνίου

Η Μονή Δαφνίου βρίσκεται στο Χαϊδάρι. Κατασκευάστηκε στη θέση που υπήρχε το Ιερό του Απόλλωνα, στο Δαφνί. Η εντυπωσιακή αρχιτεκτονική και τα ιδιαίτερα ψηφιδωτά της μονής την καθιστούν ένα σημαντικό μνημείο της Βυζαντινής τέχνης και από το 1990 σημειώθηκε ως μνημείο παγκόσμιας πολιτιστικής κληρονομιάς της UNESCO.

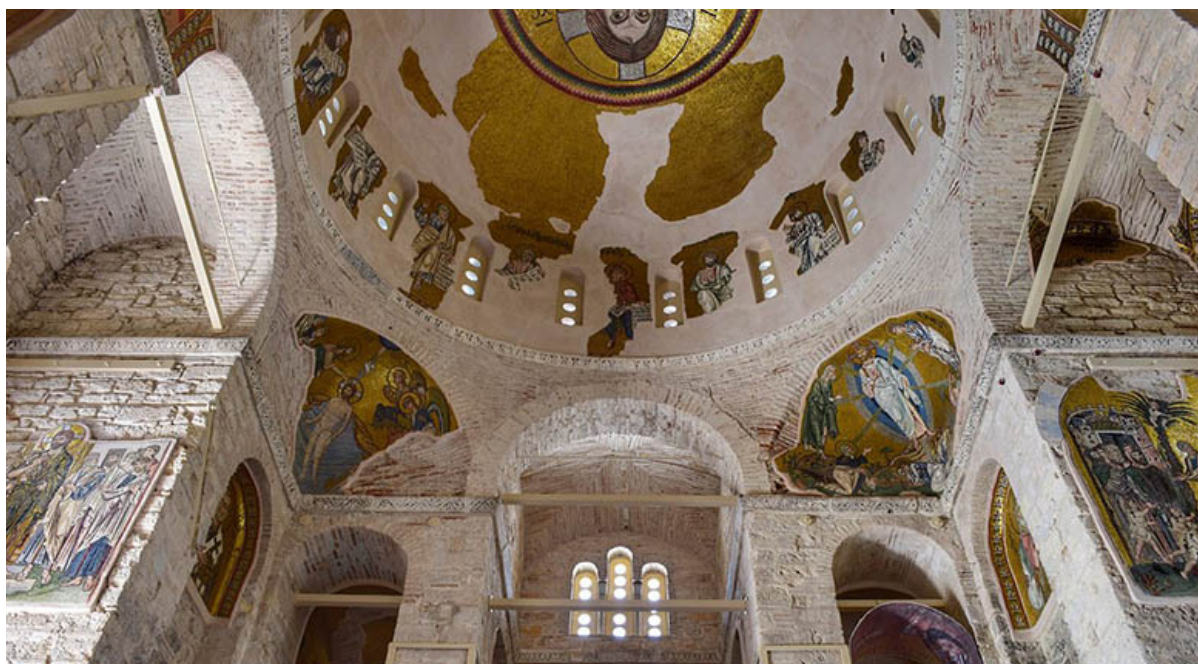
Η Βυζαντινή μονή αποτελείται από διάφορα κτίρια σε τετραγωνική κάτοψη που χρονολογούνται από τον 11ο αιώνα. Τα περισσότερα κτίρια είναι ερειπωμένα. Σε λειτουργία είναι το Καθολικό (βλ. Εικ. 43), μέρος της εσωτερικής πλευράς των κελιών, η κινστέρνα και τα βόρεια οχυρωματικά τείχη. Το Καθολικό ανήκει στον οκταγωνικό τύπο, διατηρεί ένα εκτεταμένο τμήμα τοιχογραφημένων ψηφιδωτών και περιλαμβάνει τον κύριο ναό, το νάρθηκα και τέσσερα παρεκκλήσια που συμπληρώνουν το ορθογώνιο σχήμα της κάτοψης. Στη δυτική πλευρά σώζονται μόνο οι περιμετρικοί του νάρθηκα και του καμπαναριού.



Εικ. 43: Κεντρικός ναός Μονής Δαφνίου (GREEK BOSTON 2021).

Η κάτοψη του κεντρικού ναού έχει σχήμα σταυρού. Στο κέντρο του ναού υψώνετε ένας τρούλος, ο οποίος στηρίζεται σε οκτώ εκκρεμή, σε τέσσερα ημικυκλικά τόξα και τέσσερες καμάρες στις γωνίες. Με αυτή τη δομή επιτυγχάνεται η μετάβαση από το κυκλικό σχήμα του τρούλου στο τετράγωνο σχήμα της κάτοψης (MILTADOU-FEZANS A. ET AL. 2003).

Το Καθολικό της Μονής Δαφνίου, διάσημο για τα ψηφιδωτά του (βλ. Εικ. 44), υπέστη σοβαρές ζημιές το 1999 εξαιτίας του μεγάλου σεισμού (6 βαθμοί ρίχτερ) που έπληξε την περιοχή της Αττικής. Ακολούθησε μια σειρά ερευνητικών προγραμμάτων για τον προσδιορισμό της κατάστασης του μνημείου και για τις περαιτέρω επεμβάσεις που απαιτούνταν. Οι έρευνες προσδιόρισαν τον τύπο της τοιχοποιίας και κατ' επέκταση την αντοχή αυτού και πρότειναν υλικά για την επέμβαση που είναι συμβατά με τη αρχική δομή. Για την ανάλυση της δομής χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές όπως σονομέτρηση και ενδοσκοπική κάμερα.



Εικ. 44: Ψηφιδωτό που απεικονίζει το Χριστό Παντοκράτορα, (HAGIA SOFIA, 2022)

Για τον έλεγχο των μηχανικών αντοχών του κτιρίου κατασκευάστηκαν δοκίμια που προσομοίωναν τη δομή της τοιχοποιίας και δοκιμάστηκαν σε θλίψη και διαγώνια θλίψη. Αξίζει να σημειωθεί πως κατασκευάστηκαν και ελέγχθηκαν δοκίμια για όλους του πιθανούς συνδυασμούς τοιχοποιίας που εντοπίστηκαν με τη σονομέτρηση και πάνω στα δοκιμαστικά τοιχία προσκολλήθηκαν ψηφιδωτά για να προσομοιάσουν στο μέγιστο βαθμό την αρχική δομή.

Με βάση τα υλικά της υφιστάμενης κατασκευής και τους μηχανικούς ελέγχους που πραγματοποιήθηκαν, παρασκευάστηκαν και ελέγχθηκαν έξι συνδυασμοί ενεμάτων, οι οποίοι αποτελούνταν από λευκό τσιμέντο^[1], άσβεστο σε σκόνη, φυσική υδραυλική άσβεστο και ποζολάνη. Μετά από μια σειρά ελέγχων των ενεμάτων (έλεγχοι ρευστότητας, διεισδυτικότητας, σταθερότητας, θλιπτική και εφελκυστική αντοχή), επιλέχθηκαν δύο ενέματα των οποίων η σύνθεση και οι μηχανικές ιδιότητες παρουσιάζονται (βλ. Πίνακας 7)

Τα ενέματα εγχύθηκαν με τη διαδικασία που ορίζεται από το Υπουργείο Πολιτισμού και περιγράφεται παραπάνω. Κάθε στάδιο αυτής της τεχνικής, από τον έλεγχο της υφιστάμενης

Πίνακας 7: Σύνθεση ενεμάτων και μηχανικές ιδιότητες

Τριμερής σύνθεση			NHL 5 (St Astier)	Υπερυστο- ποιητής (% w/w)	Νερό	Αντοχή σε θλίψη (MPa)			Αντοχή σε κάμψη (Mpa)		
Λευκό τσιμέντο Δανίας	Άσβεστος σε σκόνη	Ποζολάνη (dmax) < 75μm				28	90	180	28	90	180
30	25	45	(-)	1	80	4,08	8,16	10,06	2,11	2,29	3,13
(-)	(-)	(-)	100	1	80	2,82	4,5	6,36	2,47	2,52	3,87

κατάστασης μέχρι και την τελική έγχυση του ενέματος, σχεδιαστικές με μεγάλη προσοχή και με πλήρη συνείδηση της σημαντικότητας του μνημείου. Τελικά, η επιλογή της κατάλληλης σύνθεσης και η διαδικασία της ενεμάτωσης λειτούργησαν αποτελεσματικά και βελτιώθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες του ναού (VINTZILEOU AND MILTIADOU-FEZANS 2008)

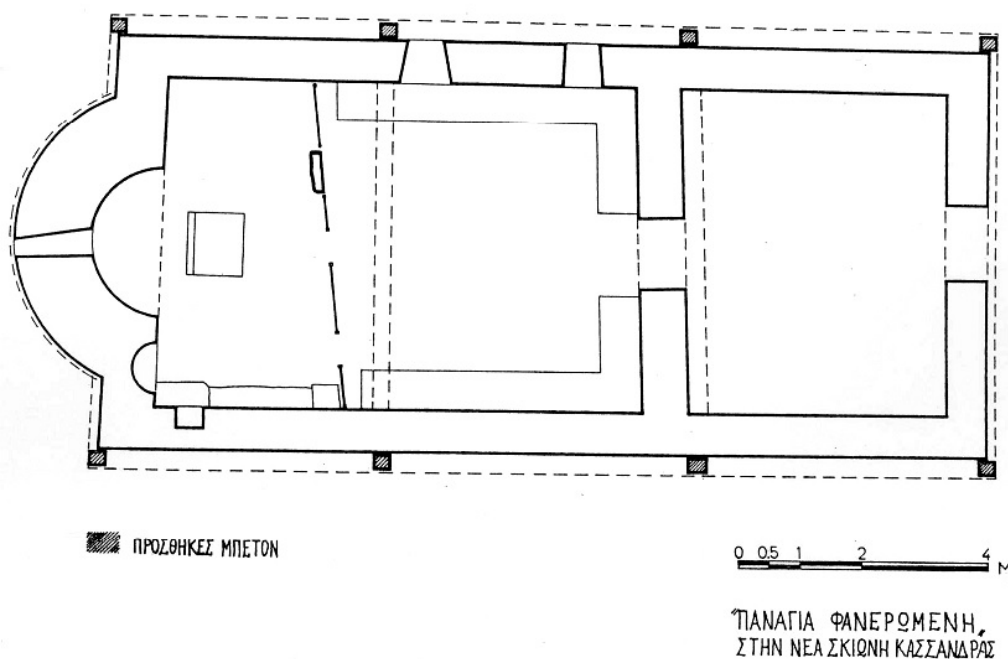
¹ Επιλέχθηκε Λευκό τσιμέντο Δανίας εξαιτίας της λεπτότατης άλεσής του και της χαμηλής περιεκτικότητάς του σε αλκάλια και θειικά άλατα.

7.2. Σταθεροποίηση τοιχογραφιών στην Παναγία τη Φανερωμένη στη Νέα Σκιάων της Χαλκιδικής



Εικ. 45: Παναγία Φανερωμένη, Νέα Σκιάωνη

Το παραθαλάσσιο εκκλησάκι της Παναγίας της Φανερωμένης (βλ. Εικ. 45) βρίσκεται περίπου 2 Km N.A του χωρίου Νέα Σκιάωνη, της Χαλκιδικής και η κατασκευή του χρονολογείται τον 16ο αιώνα. Πρόκειται για ένα μικρό ορθογώνιο ναό (βλ. Εικ. 46) εξωτερικών διαστάσεων (14,5 x 6,5 m²). Ανατολικά καταλήγει σε μια ημικυκλική κόγχη και δυτικά υπάρχει ένας ευρύχωρος νάρθηκας. Ο κύριος ναός αποτελείται από ενιαίο διαμέρισμα και το ιερό βήμα χωρίζεται από τον υπόλοιπο ναό με ένα ξύλινο τέμπλο. Η τοιχοποιία είναι δομημένη με πέτρα (αργολιθοδομή) και το πάχος της δεν είναι σταθερό (70-120 cm). Εσωτερικά η τοιχοποιία επενδύθηκε με τοιχογραφίες και εξωτερικά με επίχρυσμα. Η επικάλυψη του ναού γίνεται με δίρριχτη στέγη οπλισμένου σκυροδέματος, η οποία χτίστηκε στις αρχές της δεκαετίας του '80 και αντικατέστησε την παλαιά ξύλινη στέγη (ΚΑΡΒΟΥΝΑΡΗΣ Α. 2014).



Εικ. 46: Κάτοψη Παναγίας Φανερωμένης (ΚΑΡΒΟΥΝΑΡΗΣ Α. 2014)

Οι τοιχογραφίες του ναού απεικονίζουν χριστιανικές σκηνές. Ο ναός βρίσκεται δίπλα στη θάλασσα και τα υψηλά επίπεδα υγρασίας έχουν προκαλέσει σημαντικές φθορές στις τοιχογραφίες. Η ανθρώπινη παρέμβαση με επισκευαστικές εργασίες, χωρίς μελέτη για τη συμβατότητα των υλικών, επιδείνωσε αυτό το πρόβλημα.

Η ομάδα που ανέλαβε την αποκατάσταση μιας τοιχογραφίας στην νότια πλευρά του ναού, αρχικά επικεντρώθηκε στην παρατήρηση και την αξιολόγηση της κατάστασης. Τα προβλήματα που εντόπισαν αφορούσαν την αποκόλληση των στρώσεων του επιχρίσματος από την τοιχοποιία, επιφανειακές ρωγμές (πλάτους 0,25 – 2,00mm), κενά και ασυνέχειες του υποστρώματος καθώς και φθορές από την υγρασία. Για την επέμβαση εξετάστηκαν σε νωπή και σκληρυμένη κατάσταση δύο μείγματα ενεμάτων, τα οποία περιείχαν υδράσβεστο, ποζολάνη, υπερευστοποιητή και στο ένα προστέθηκε λινέλαιο. Η σύνθεσή τους φαίνεται στον Πίνακας 8, οι ιδιότητες σε ρευστή μορφή στον Πίνακας 9 και οι ιδιότητες σε σκληρυμένη κατάσταση στον Πίνακας 10.

Πίνακας 8: Σύνθεση ενεμάτων

Σύνθεση					
	Άσβεστος	Ποζολάνη	Υπερευστοποιητής (% w/w)	Λινέλαιο	N/Σ
A1	50	50	1	(-)	1,22
A2	50	50	1	1	1,32

Πίνακας 9: Ιδιότητες σε νωπή κατάσταση

	Ρευστότητα (sec)		Διεισδυτικότητα (sec)	Σταθερότητα (%)
	0h	1h		
A1	10,26	16,76	2,5	1,2
A2	9,76	9,85	1,97	2,5

Πίνακας 10: Ιδιότητες σε σκληρυμένη κατάσταση

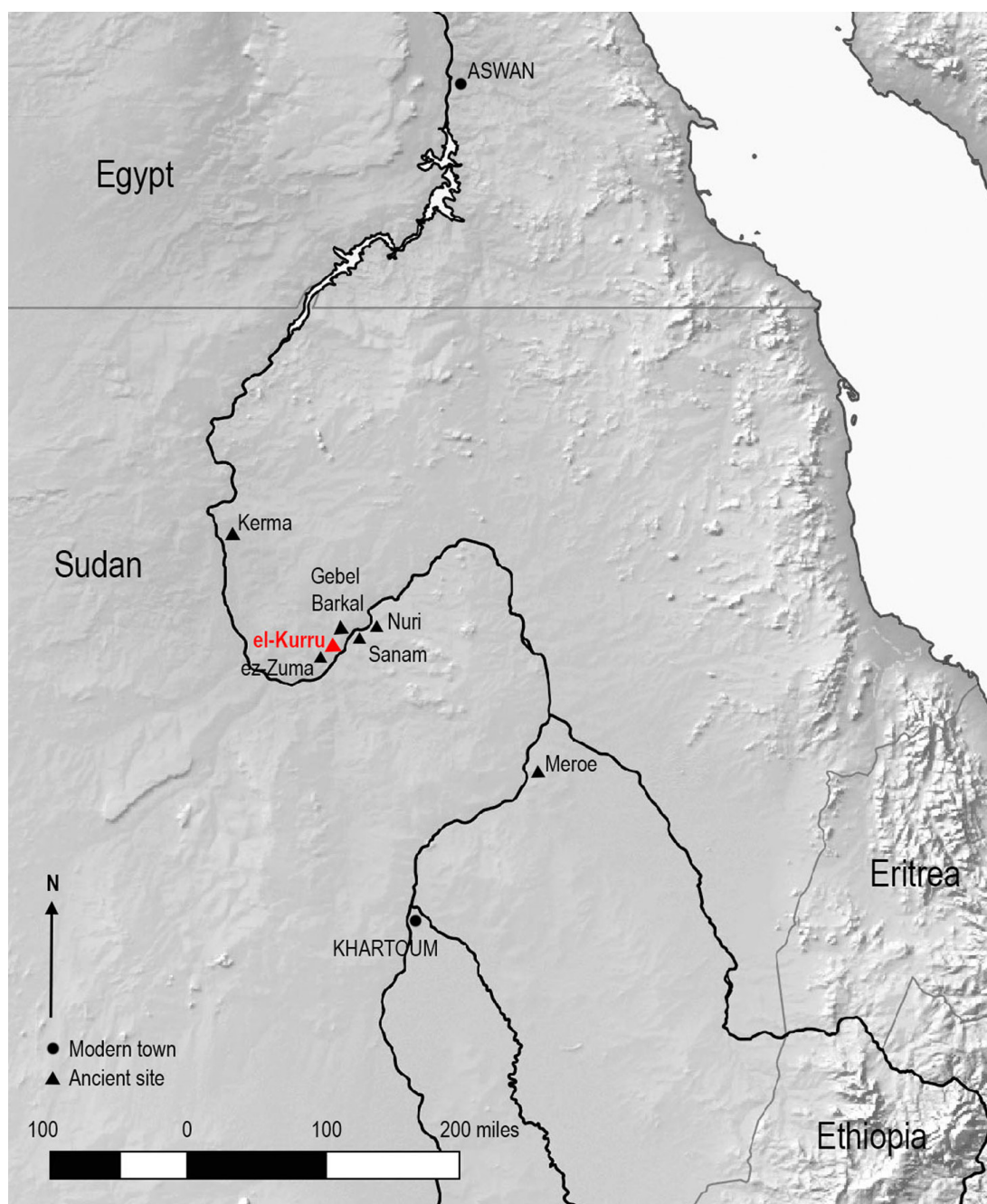
	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)		Αντοχή σε κάμψη (MPa)		Αντοχή σε θλίψη (MPa)	
	28 ημέρες	90 ημέρες	28 ημέρες	90 ημέρες	28 ημέρες	90 ημέρες
A1	0,021	0,023	0,04	0,1	1,14	2,29
A2	0,025	0,036	0,06	0,08	0,74	1,58

Τα αποτελέσματα έδειξαν πως, όταν στο μείγμα προστίθεται λινέλαιο, η ρευστότητά του βελτιώνεται και διατηρείται η εργασιμότητά του για αρκετή ώρα. Ιδιότητα που είναι θεμιτή, αφού η ενεμάτωση είναι μια αργή διαδικασία με σύντομες αλλά διαδοχικές εγχύσεις. Επιπλέον, μειώνεται ο χρόνος διείσδυσης (αύξηση διεισδυτικότητας), ιδιότητα που επιτρέπει στο ένεμα να εισχωρεί σε μικρότερα κενά. Από την άλλη, όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες, μειώνεται σημαντικά η θλιπτική αντοχή, γεγονός που επιτρέπει στο ένεμα να γίνεται πιο συμβατό με τα υφιστάμενα ταλαιπωρημένα επιχρίσματα.

Αφού εφαρμόστηκαν ενέματα στη φθαρμένη τοιχογραφία, με τα στάδια που έχουν περιγράψει, το ένεμα αφέθηκε για να στερεοποιηθεί. Τρεις μήνες μετά αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα των εργασιών. Ο έλεγχος έγινε με σονομέτρηση στα σημεία που είχε γίνει και πριν την επέμβαση. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η συνεκτικότητα της τοιχοποιίας είχε αυξηθεί κατά 60 % και με παρατηρήσεις που έγιναν επιτόπου δεν ανιχνεύθηκαν άλλες επιπτώσεις όπως εξάνθηση ή αλλοίωση της τοιχογραφίας. (PAPAYIANNI I., KARVOUNARIS TH., AND PACHTA V. 2016)

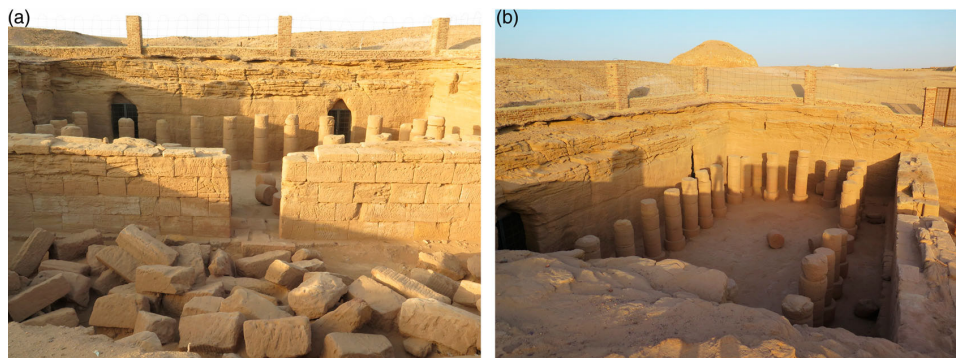
7.3. Συντήρηση αρχαίων Χαρακτικών στο El Kuru, Σουδάν

Το El Kuru βρίσκεται στο βόρειο Σουδάν, περίπου 450 km βόρεια του Χαρτούμ (βλ. Εικ. 47), σε μια περιοχή που από αρχαίες πηγές ονομαζόταν Kush. Η πρώτη αναφορά για το Kush χρονολογείται το 2000 – 1500 π.Χ.. Το El Kuru ήταν βασιλικό νεκροταφείο για τους περισσότερους από τους ηγεμόνες της 25ης δυναστείας της Αιγύπτου (715-653 π.Χ.) και αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα μνημεία του Σουδάν. Η πρώτη ανασκαφή στο El Kuru έγινε από τον George Reisner, ο οποίος διηύθυνε αρκετές αρχαιολογικές αποστολές στην Αίγυπτο και το Σουδάν για λογαριασμό του πανεπιστημίου Harvard και του μουσείου καλών τεχνών της Βοστώνης. Ο Reisner έκανε ανασκαφή στο μεγαλύτερο μέρος του αρχαιολογικού χώρου αλλά εξαιτίας εξωγενών παραγόντων που μπορούσαν να βλάψουν τα ευρήματα, το μνημείο σκεπαστηκε ξανά με χώμα. Το 2013 μια διεθνής αρχαιολογική ομάδα επέστρεψε με σύγχρονα μέσα για να απαντήσει σε ερωτήματα για την ιστορία της 25ης δυναστείας.



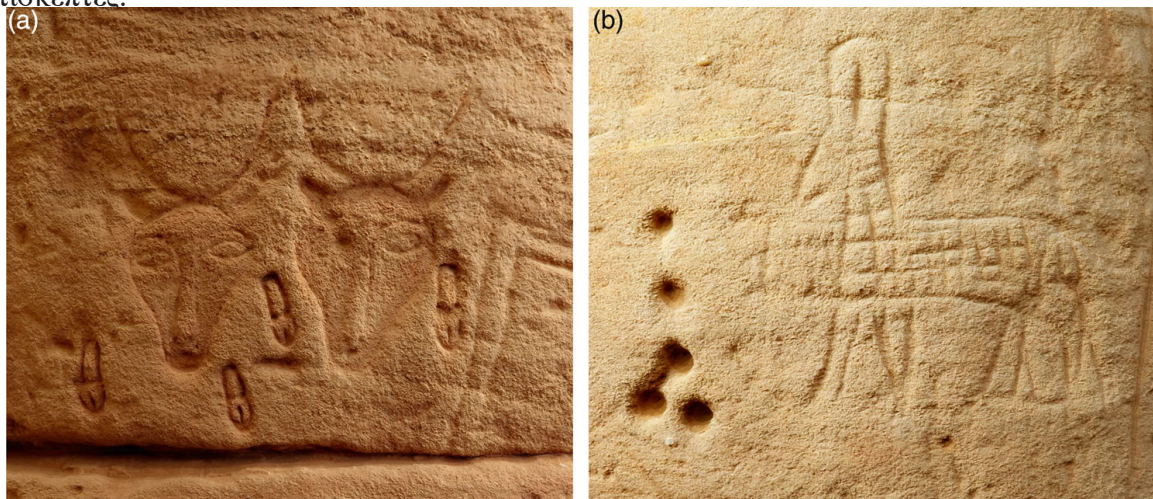
Εικ. 47: Χάρτης περιοχής, (DAVIS, ROBERTS, AND BATKIN-HALL 2018)

Ο ναός χτίστηκε στην ύστερη Ναπατιανή περίοδο (4ος αι. π.Χ.). Διαθέτει έναν εξωτερικό χώρο με σκάλες, μια κεντρική κιονοστοιχία που περικλείει την αυλή και έξι λαξευμένους σε βράχο θαλάμους που συνδέονται μεταξύ τους από μια υπόγεια δίοδο (βλ. Εικ. 48). Ο μεγαλύτερος χώρος (αυτός με τους κίονες) έχει διαστάσεις 15x6 m. Ο ναός επαναχρησιμοποιήθηκε στη Μεροϊτική περίοδο και τα περισσότερα σχέδια που είναι λαξευμένα στους τοίχους και τους κίονες σχεδιάστηκαν εκείνη την περίοδο.



Εικ. 48: Ναός El Kuru a. Δυτική όψη, b. Νότια όψη, (DAVIS, ROBERTS, AND BATKIN-HALL 2018)

Ο ναός διατρέχει πληθώρα κινδύνων, οι οποίοι έχουν σχέση με περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως άνεμοι βροχές και πλημμύρες, βανδαλισμοί από τους επισκέπτες και αμέλεια από τους υπευθύνους εξαιτίας των κοινωνικών συγκρούσεων που υπάρχουν στην περιοχή. Παρόλα αυτά ο μεγαλύτερος κίνδυνος προέρχεται από το ίδιο το υλικό που είναι κατασκευασμένο το μνημείο. Όπως όλα τα μνημεία της περιοχής, έτσι και οι τοιχογραφίες στο El Kuru είναι κατασκευασμένες από μαλακό ψαμμίτη, ο οποίος είναι ένα εξαιρετικά ασταθές υλικό. Τα χαραγμένα γλυπτά των τοίχων και των κίωνων υποφέρουν από κοκκώδη αποσύνθεση, αποκόλληση και απολέπιση (βλ. Εικ. 49). Σύγχρονες έρευνες έδειξαν, επίσης, πως υπάρχουν τουλάχιστον τριάντα σύγχρονα σχέδια χαραγμένα στην ιστορική δομή από ασυνείδητους επισκέπτες.



Εικ. 49: Χαρακτικά σε ψαμμίτη a. Ταύροι, b. Το κριάρι του Άμμωνα, (DAVIS, ROBERTS, AND BATKIN-HALL 2018)

Η μελέτη της αποκατάστασης ξεκίνησε με τη συλλογή μικρών δειγμάτων από τον ψαμμίτη του ναού και με τον εργαστηριακό έλεγχο αυτών. Τα δείγματα, μέχρι να φτάσουν στο πανεπιστήμιο του Michigan, είχαν αρχίσει να διαβρώνονται και να μετατρέπονται σε σκόνη. Τα υπολείμματα που είχαν κονιορτοποιηθεί, εξετάστηκαν με τη μέθοδο της κρυσταλλογραφίας. Μεγαλύτερα δείγματα (0,5 cm) υποβλήθηκαν σε φασματοσκοπία και τα υπόλοιπα (μέγεθος χαλκιού) χρησιμοποιήθηκαν για ελέγχους εξυγίανσης του υλικού.

Μετά τον έλεγχο της κατάστασης του μνημείου, οι ενέργειες που αποφασίστηκαν για την προστασία του αφορούσαν την εισαγωγή ενέματος στο πέτρωμα για να αποκαταστήσουν τη συνοχή των αποκολλημένων στρώσεων και τον σχεδιασμό ενός καλύμματος για να προστατεύσει το μνημείο από περιβαλλοντικές φθορές. Αν και έγινε μεγάλη έρευνα για την εξυγίανση του ψαμμίτη, αποδείχθηκε πως η εφαρμογή αυτής της τεχνικής δεν ήταν εφικτή.

Για τη διαδικασία της ενεμάτωσης, αρχικά προτάθηκε ένα μείγμα από υδράσβεστο σε σκόνη και αραβική κόμμι. Αυτή η σύνθεση χρησιμοποιούνταν ως προστατευτικό στρώμα για τις σύγχρονες κατασκευές από ωμόπλινθους της περιοχής και είχε ένα λαμπερό λευκό χρώμα. Για να προσαρμοστεί το χρώμα του ενέματος με αυτό του ψαμμίτη, προστέθηκε στο μείγμα και σκουρόχρωμη άμμος από τον ποταμό Νείλο. Το ένεμα παρασκευάστηκε επί τόπου χρησιμοποιώντας δύο μέρη άμμου και ενάμιση μέρος ασβέστου. Αφού αναμίχθηκε καλά, προστέθηκε η αραβική κόμμι, η οποία παρασκευάστηκε εκείνη τη στιγμή (ανάμιξη νερό με ακατέργαστο κόμμι). Πριν την εφαρμογή, η επιφάνεια που θα εισχωρούσε το ένεμα προ-βρέχτηκε με νερό για να βοηθήσει στην πρόσφυση του ενέματος. Το ένεμα διοχετεύτηκε στην κατασκευή με σπάτουλα ή με το χέρι και πιέστηκε για να εισχωρήσει στις ρωγμές. Μετά την εφαρμογή, η επιφάνεια ψεκάστηκε με νερό και καλύφθηκε με λινάτσα για να επιβραδυνθεί η ξήρανση (βλ. Εικ. 50) (DAVIS, ROBERTS, AND BATKIN-HALL 2018).



Εικ. 50: Τμήμα το μνημείο σκεπασμένο με λινάτσα και μεμβράνη κατά τη διάρκεια της ξήρανσης, (DAVIS, ROBERTS, AND BATKIN-HALL 2018)

Οι υπόλοιπες τεχνικές που εφαρμόστηκαν στο μνημείο δε κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν στην παρούσα εργασία. Ένα χρόνο μετά την εφαρμογή του ενέματος (το 2018), είχε οριστεί πως έπρεπε να γίνει έλεγχος για την αποδοτικότητα της μεθόδου της ενεμάτωσης αλλά δεν υπάρχουν ακόμα πηγές για τα αποτελέσματα.

7.4. Αποκατάσταση Ιερού Κουβουκλίου του Πανάγιου Τάφου, Ιερουσαλήμ

Η θολωτή κατασκευής στον Ιερό Ναό της Αναστάσεως είναι μια σύνθετη κατασκευή, η οποία περικλείει αυτό που πιστεύεται πως είναι ο Τάφος του Χριστού. Η δομή με τη σημερινή της μορφή έχει μια μακραίωνη ιστορία ξεκινώντας από την εποχή του Μέγα Κωνσταντίνου, ο οποίος περιέκλεισε για πρώτη φορά τον τάφο του Χριστού μέσα σε μια κατασκευή (Aedicule), για να τον αναδείξει και να τον προστατέψει. Αυτή η δομή καταστράφηκε και ανακατασκευάστηκε αρκετές φορές αλλά κάθε φορά ενσωμάτωναν στοιχεία της παλιάς κατασκευής στο νέο οικοδόμημα. Σήμερα ο Ναός του Πανάγιου Τάφου (βλ. Εικ. 51) αποτελείται από δύο θαλάμους, τον ταφικό θάλαμο (βλ. Εικ. 52) και τον προθάλαμο, Παρεκκλήσι του Αγγέλου (Εικ. 53) όπως ονομάζεται. Όλη η δομή έχει επένδυση από μάρμαρο (εσωτερικά και εξωτερικά), το οποίο αφαιρέθηκε για τις ανάγκες της αποκατάστασης και μετά το τέλος των εργασιών επανατοποθετήθηκε.



Εικ. 51: Ιερός Ναός του Πανάγιου Τάφου, (MADAIN PROJECT, 2022)



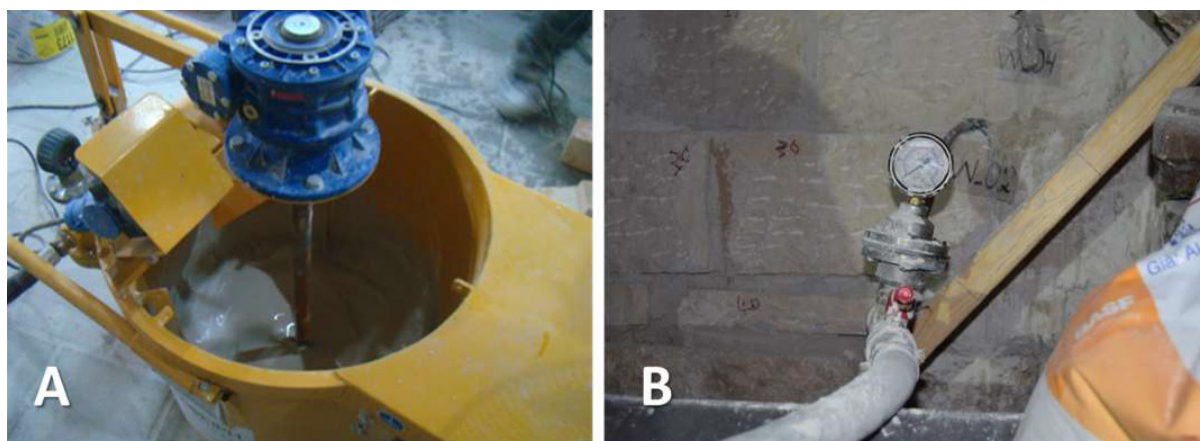
Εικ. 52: Ταφικός θάλαμος, (MADAIN PROJECT, 2022)

Εικ. 53: Παρεκκλήσι του Αγγέλου, (MADAIN PROJECT, 2022)

Για να ελεγχθεί η κατάσταση της τοιχοποιίας χρησιμοποιήθηκε Ραντάρ Διείσδυσης Εδάφους (GPR), με το οποίο λήφθηκαν γεωχωρικά και γεωφυσικά δεδομένα, τα οποία βοήθησαν στην κατανόηση της εσωτερικής δομής. Με βάση τον έλεγχο για την υφιστάμενη κατάσταση ορίστηκαν συγκεκριμένα κριτήρια για την επιλογή του κατάλληλου ενέματος, τα οποία αφορούσαν την συμβατότητα, την απόδοση και τους χρονικούς περιορισμούς καθώς και τους περιορισμούς του εργοταξίου. Το ένεμα που επιλέχθηκε για έγχυση στη δομή ήταν ένα εμπορικό προϊόν ασβέστη – μετακαολίνη (βλ. Εικ. 54 Α.), του οποίου η προμήθεια έγινε από την εταιρία BASF.

Το μείγμα είχε πολύ μικρή κοκκομετρία ($<12\mu\text{m}$), γεγονός που βοηθά στη ρευστότητα και τη διεισδυτικότητα, και εξαιρετική διατήρηση της εργασιμότητας. Επιπλέον, δεν περιείχε διαλυτά άλατα ούτε προκαλούσε το σχηματισμό τους. Αφού αφαιρέθηκαν οι μαρμαρίνες πλάκες, διαπιστώθηκε πως η κατασκευή ήταν σε πολύ άσχημη κατάσταση, οπότε ο καθαρισμός των σαθρών κονιαμάτων και η εκ νέου αρμολόγηση κρίθηκε απαραίτητη. Στο κατώτερο τμήμα της τοιχοποιίας εντοπίστηκαν αποσπασμένοι λίθοι, οι οποίοι απειλούσαν τη δομική ακεραιότητα του κτιρίου. Αυτοί οι λίθοι αφαιρέθηκαν και τοποθετήθηκαν νέοι. Για κονίαμα χρησιμοποιήθηκε το ίδιο με αυτό της αρμολόγησης. Η έγχυση έγινε μόνο από τη μία πλευρά της τοιχοποιίας (βλ. Εικ. 54 Β.), αφού η εσωτερική πλευρά της δομής ήταν μη προσβάσιμη. Για την προστασία των αρχιτεκτονικών μελών από πιθανή διαφυγή ενέματος λήφθηκαν μέτρα προστασίας. Η έγχυση έγινε σε δύο στάδια ανάλογα με το πάχος της τοιχοποιίας (1ο στάδιο : 1,5m, 2ο στάδιο 1,5-3m) και η πίεση δεν ξεπέρασε το 1 bar.

Κατά τη διάρκεια της ανάλυσης είχε γίνει λεπτομερής ανάλυση των ρωγμών της δομής. Αυτό βοήθησε στο να υπάρχει πλήρης έλεγχος για την ποσότητα ενέματος που απαιτούνταν, καθώς και στο να προσεγγιστεί από πιο σημείο θα εξέλθει το ένεμα. Μετά την εφαρμογή, το τρισδιάστατο μοντέλο που είχε σχεδιαστεί και περιείχε την ακριβή δομή της τοιχοποιίας ενημερώθηκε με νέα δεδομένα. Η μέθοδος που εφαρμόστηκε στο ναό, εκτός από την αποκατάσταση, παρείχε πληροφορίες για τα διάφορα στάδια της κατασκευαστικής περιόδου και δημιούργησε μια διεπιστημονική προσέγγιση, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλα μνημεία (LAMPROPOULOS ET AL. 2022).



Εικ. 54: Α. Ανάδευση ενέματος με κατάλληλη ποσότητα νερού, Β. Έγχυση ενέματος με ενσωματωμένο μανόμετρο στην αντλία, (LAMPROPOULOS ET AL. 2022)

7.5. Σταθεροποίηση τοιχογραφιών στο Hadi Rani Mahal, Nagaur, Ινδία

7.5.1. Γενικά Χαρακτηριστικά

Το Handi Rani Mahal, βρίσκεται στο φρούριο Ahhichatragarh, το οποίο περικλείει ένα συγκρότημα παλατιών, στην πόλη Nagaur της πολιτείας Rajasthan της Ινδίας. Το φρούριο ιδρύθηκε τον 4ο αιώνα, αλλά η σημερινή του μορφή οφείλεται στη φυλή Rathore Rajput, με επιρροές από τη Μογγολική αυτοκρατορία τον 18ο αιώνα. Τα παλάτια χτίστηκαν και διακοσμήθηκαν υπό την κυριαρχία του Maharaja Bakhat Singh (1725–1750).

Το Hadi Rani Mahal θεωρείται το πιο σημαντικό ζωγραφισμένο παλάτι του συγκροτήματος. Μια ανοιχτή Λότζια στο ισόγειο είναι διακοσμημένη με τοιχογραφίες που απεικονίζουν φτερωτές γυναικείες φιγούρες και πουλιά στην οροφή και πολεμικούς ελέφαντες στους τοίχους. Το ανάκτορο είναι χτισμένο με ντόπιους κόκκινους ψαμμίτες που συνδέονται με γυψοκονίαμα. Το επίχρισμα αποτελείται από δύο έως τέσσερις στρώσεις ασβεστοκονιάματος. Η βάση του σοβά έχει τραχύ ανάγλυφο και περιέχει πλινθόσκονη και άμμο, ενώ η τελική επιφάνεια είναι λεία και περιέχει μαρμαρόσκονη.



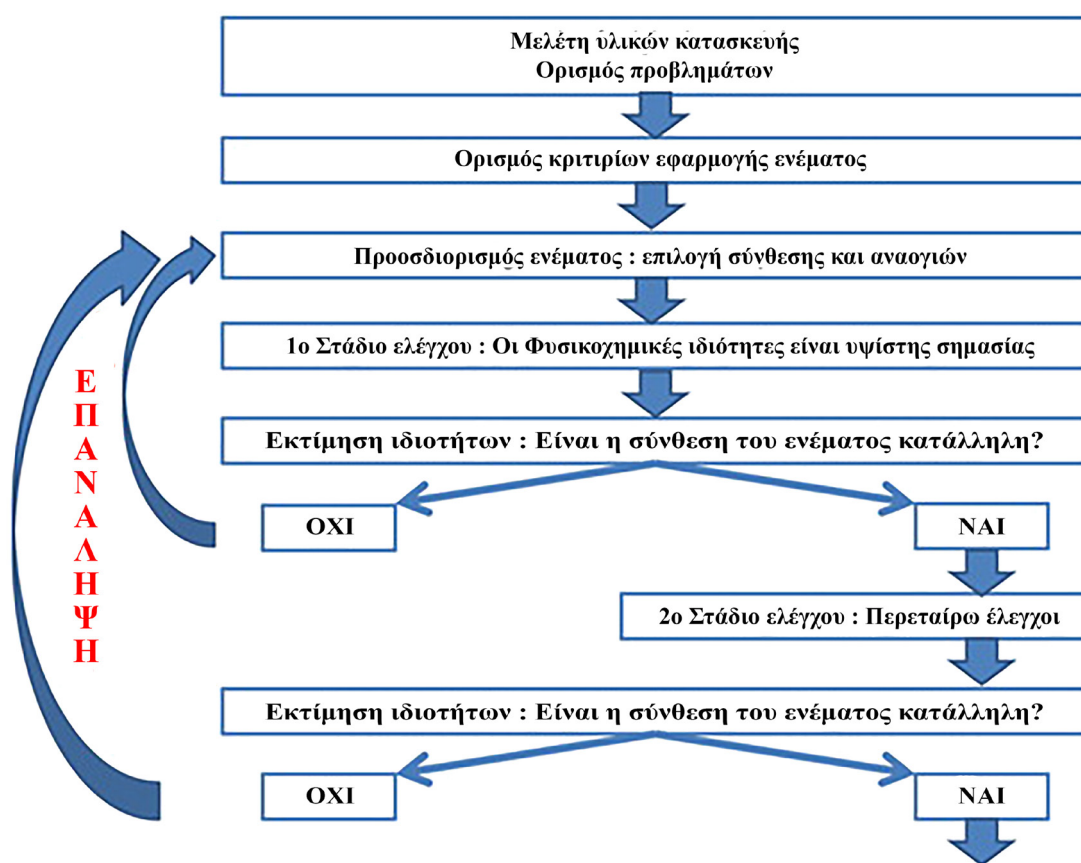
Εικ. 55: Αποκολλημένη τοιχογραφία οροφής, Λότζια Hadi Rani Mahal, (©THE COURTAULD INSTITUTE OF ART, 2015)

Τα προβλήματα που εντοπίζονται στο φρούριο αφορούν την διείσδυση νερού στην κατασκευή, την αποκόλληση των επιχρισμάτων και προβλήματα από μεταγενέστερες επεμβάσεις (βλ. Εικ. 55). Το 1990 οι τοιχογραφίες της οροφής της λότζια, κατέρρευσαν. Το μουσείο Mehrangarh Trust ανέλαβε την αποκατάσταση και πλήρωσε τα κενά της τοιχογραφίας με κονίαμα που είχε βάση το γύψο. Η αποκατάσταση παρουσιάζει σοβαρά προβλήματα κρυστάλλωσης αλάτων, ειδικά όπου η διείσδυση νερού είναι εκτεταμένη. Επειδή η Λότζια είναι ανοιχτή παρουσιάζει

μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές και ανεξέλεγκτες περιβαλλοντικές επιδράσεις, οι οποίες επιδεινώνουν τον κύκλο κρυστάλλωσης των αλάτων και απολέπισης του επιχρίσματος.

7.5.2. Μεθοδολογία ανάπτυξης, ελέγχου και εφαρμογής ενέματος

Η ανάπτυξη μιας κατάλληλης μεθοδολογίας περιλαμβάνει μια σταδιακή και επαναλαμβανόμενη διαδικασία για τον εντοπισμό και την επίλυση προβλημάτων. Ξεκινώντας από την αναγνώριση των υλικών είναι σημαντική η κατανόηση των προβλημάτων που προκύπτουν και ο ορισμός κριτηρίων για την απόδοση της επέμβασης. Τα συστατικά του ενέματος πρέπει να επιλεγθούν με βάση τη φυσικοχημική συμβατότητα με τα υλικά της κατασκευής. Στο πεδίο συχνά λείπουν πόροι όπως χρόνος, διαθέσιμα υλικά και αξιόπιστες μέθοδοι ελέγχου των υλικών. Επομένως, είναι απαραίτητο να αναπτυχθεί μια απλή αλλά και ουσιαστική μέθοδος ελέγχου. Η διαδικασία πρέπει να αρχίσει με τον ορισμό των ιδιοτήτων που είναι απαραίτητες για το ένεμα και ταχύτερα αξιολογήσιμες, μειώνοντας τον αριθμό των πιθανών μειγμάτων που απαιτούν πιο σύνθετες μεθόδους ελέγχου. Εάν είναι απαραίτητο το ένεμα πρέπει να τροποποιηθεί και να επανεξεταστεί μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας. (βλ. Εικ. 56)



Εικ. 56: Μεθοδολογία επιλογής και ελέγχου ενέματος (PASIAN, MARTIN DE FONJAUDRAN, AND RAVA 2020)

7.5.2.1. Ορισμός προβλημάτων και κριτηρίων εφαρμογής ενέματος

Η αξιολόγηση της κατάστασης της Λότζιας αποκάλυψε εκτεταμένες περιοχές ασταθούς αποκόλλησης που εμφανίζονται σε διάφορες θέσεις της στρωματογραφίας της κατασκευής. Κρυστάλλωση αλάτων που προκαλούν εξανθήσεις παρατηρήθηκαν τόσο στην επιφάνεια όσο και στην εσωτερική δομή της τοιχοποιίας. Εντοπίστηκαν δύο τύποι αποκόλλησης :

- Εκτεταμένη αποκόλληση και παραμόρφωση (έως 50 mm) μεταξύ πέτρινης δομής και χονδρόκοκκου επιχρίσματος.
- Ελαφρά αποκόλληση (έως 5 mm) μεταξύ χονδρόκοκκου επιχρίσματος και φινιρίσματος.

Τα κριτήρια που τέθηκαν για την επισκευή της λότζιας (βλ. Πίνακας 11) και οι απαιτήσεις των υλικών (βλ. Πίνακας 12), παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 11: Κριτήρια μακροπρόθεσμης και βραχυπρόθεσμης απόδοσης ενέματος

Κριτήρια μακροπρόθεσμης απόδοσης	Κριτήρια βραχυπρόθεσμης απόδοσης
<ul style="list-style-type: none"> • Ελάχιστη συρρίκνωση μετά την πήξη • Πορώδες, διαπερατότητα υδρατμών και υδροθερμική συμπεριφορά παρόμοια με το αρχικό επίχρισμα • Μηχανική αντοχή παρόμοια ή μικρότερη από το αρχικό επίχρισμα • Χαμηλή ξηρή πυκνότητα • Καλή πρόσφυση 	<ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλή υγρή πυκνότητα • Καλή ενεσιμότητα • Καλή ρευστότητα • Χαμηλή περιεκτικότητα σε νερό

Πίνακας 12: Ειδικά κριτήρια για ενέματα

Εκτεταμένη αποκόλληση (ένεμα G)	Ήπια αποκόλληση (ένεμα MG)
Πρόσφυση, ειδικά για οριζόντιες επιφάνειες όπου το ένεμα πρέπει να αντέχει το βάρος του επιχρίσματος	Υψηλή ρευστότητα
Χαμηλή πυκνότητα σε σχέση με τον όγκο για την κάλυψη μεγάλων κενών	
Υψηλή ρευστότητα, ειδικά για οριζόντιες επιφάνειες	Χαμηλή περιεκτικότητα νερού για επιχρίσματα που έχουν φθορές από άλατα
Χαμηλή περιεκτικότητα νερού για επιχρίσματα που έχουν φθορές από άλατα	

7.5.2.2. Σύνθεση ενεμάτων

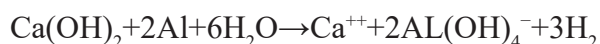
Όλα τα ενέματα που ελέγχθηκαν για την επέμβαση αποτελούνταν από υδράσβεστο ως συνδετικό και σκόνη κεραμικών και μικροσφαιρίδια βοριοπυριτικού γυαλιού. Η σκόνη κεραμικών επιδρά ως πληρωτικό και σε συνδυασμό με το υδροξείδιο του ασβεστίου προσδίδει υδραυλικές ιδιότητες στο μείγμα. Τα γυάλινα σφαιρίδια βελτιώνουν την ενεσιμότητα και τη ρευστότητα και αυξάνουν τον όγκο του μείγματος, ενώ διατηρούν τη χαμηλή πυκνότητά του. Στο μείγμα G, εκτός από σκόνη κεραμικών προστέθηκε και χαλαζιακή άμμος, η οποία βελτιώνει τη σύσταση του μείγματος ενισχύοντας τη συνοχή και περιορίζοντας τη συρρίκνωση. Στο ένεμα MG προστέθηκε και μαρμαρόσκονη. Εκτός από τα γυάλινα μικροσφαιρίδια, τα υπόλοιπα υλικά προήλθαν από την περιοχή.

Για την επέμβαση παράχθηκε ποικιλία σκευασμάτων με βάση τις ακόλουθες μεταβλητές

- **Μέγεθος σωματιδίων αδρανών :** Η ποικιλία του μεγέθους των συστατικών βελτιώνει τη σύσταση του ενέματος, μειώνοντας το ιξώδες. Επομένως αυξάνει τη ρευστότητα (DUFFY J. 2015). Ως εκ τούτου, υπήρχαν διάφορες διαβαθμίσεις αδρανών που σχημάτιζαν μια πλήρη κοκκομετρική καμπύλη (π.χ. πλινθόσκονη : <125 μm + χαλαζιακή άμμος : 125-250 μm, μαρμαρόσκονη : <125 μm + πλινθόσκονη: 125-250 μm).
- **Ποσότητα αδρανών :** Η αναλογία των αδρανών, επηρεάζει τη ρευστότητα, τη σταθερότητα του όγκου και τη συρρίκνωση.
- **Τύπος και ποσότητα πρόσμικτων :**

1. Για τη βελτίωση της πρόσφυσης : Προσθέτοντας στο μείγμα ωοαλοβαμίνη αυξάνεται το πορώδες και μειώνεται η ξηρή πυκνότητα. Άλλα πρόσμικτα που βελτιώνουν το πορώδες είναι ακρυλικά πολυμερή και αραβική κόμμι^[1].

2. Για τον περιορισμό της συρρίκνωσης : Η σκόνη αλουμινίου αντιδρά με την άσβεστο παράγοντας υδρογόνο και αυξάνει τον όγκο του μείγματος οδηγώντας έτσι σε μείγμα με υψηλότερο πορώδες και χαμηλότερη ξηρή πυκνότητα.



Στο ανάμικτο προστέθηκε σκόνη αλουμινίου για την επίτευξη της ελάχιστης διαστολής, με στόχο τη εξουδετέρωση της συρρίκνωσης, η οποία επιδεινώνεται με το ξηρό περιβάλλον. Κατά τη φάση της ενεμάτωσης η υψηλότερη θερμοκρασία μετρήθηκε στους 40°C και η χαμηλότερη υγρασία στο 20%.

¹ Αραβική κόμμι : Προέρχεται από το φυτό *Commiphora wightii* (Γκουγκούλ) και χρησιμοποιήθηκε από τους κτίστες του οχυρού. Είναι υποκατάστατο της ρητίνης της τσίχλας.

3. Τύπος και ποσότητα μέσου εναιώρησης : Το επίχρισμα είχε σημαντικές φθορές εξαιτίας των αλάτων. Γι' αυτό, ως μέσο εναιώρησης επιλέχθηκε ένα διάλυμα νερού – αιθανόλης, στο οποίο εργαστηριακές έρευνες αποδείκνυαν μειωμένη κινητοποίηση αλάτων προς το υπόστρωμα. Ωστόσο, οι δοκιμές αποκάλυψαν πως η αιθανόλη αναστέλλει την αντίδραση υδροξειδίου του ασβεστίου με το αλουμίνιο, γεγονός που επηρέασε σημαντικά στη λήψη της απόφασης για το ένεμα.

7.5.2.3. Πρώτο στάδιο ελέγχου

Κατά το στάδιο του πρώτου ελέγχου δοκιμάστηκαν τα ακόλουθα κριτήρια :

Για το μείγμα G (εκτεταμένη αποκόλληση) : Συρρίκνωση, πρόσφυση, διαστολή, υγρή και ξηρή πυκνότητα, ενεσιμότητα και ρευστότητα

Για το μείγμα MG (Ηπια αποκόλληση) : Συρρίκνωση, πρόσφυση, ενεσιμότητα και ρευστότητα.

Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά τα στάδια του κάθε ελέγχου που πραγματοποιήθηκε.

Συρρίκνωση

Για την προσομοίωση του χονδρόκοκκου επιχρίσματος, 50 mL ενέματος εγχύθηκαν σε προδιαβρεγμένα γύψινα κύπελλα. Τα κύπελλα καλυφθήκαν με δίσκους του ίδιου γύψου, για να προσομοιάσουν την ημίκλειστη αποκόλληση. Η συρρίκνωση εκτιμήθηκε τόσο στην επιφάνεια, όσο και σε βάθος ανασκάπτοντας το ένεμα με σπάτουλα και παρατηρώντας την πρόσφυση του ενέματος στο τοίχωμα του κυπέλλου σε βάθος 10 και 30 mm (βλ. Εικ. 58).



Εικ. 57: Προετοιμασία ελέγχου συρρίκνωσης (BIÇER-SIMSIR B. AND RAINER L. 2011)



Εικ. 58: Έλεγχος αποτελεσμάτων : Αριστερά δεν συρρικνώθηκε, κέντρο μέτρια συρρικνωση, δεξιά μεγάλη συρρικνωση (BİÇER-SIMSIR B. AND RAINER L. 2011)

Διόγκωση – Διαχωρισμός

Για τον έλεγχο της συρρικνωσης, 50mL ενέματος εγχύθηκαν σε σύριγγα με την οπή της σφραγισμένη με ταινία. Η πάνω πλευρά καλύφθηκε με μεμβράνη για την αποφυγή εξάτμισης του νερού. Η αύξηση του όγκου μετρήθηκε σε χρονικά διαστήματα ενός λεπτού για συνολικά πέντε λεπτά και υπολογίστηκε ως ποσοστό του αρχικού όγκου. Ο διαχωρισμός, όταν εμφανιζόταν, τον υπολόγιζαν και τον κατέγραφαν, αν και κανένα δείγμα δεν παρουσίασε διαχωρισμό. Αναφορικά με τη διαστολή του όγκου, το δείγμα G παρουσίασε αύξηση 2%, ιδιότητα που ήταν θεμιτή για αυτό το δείγμα ως αντιστάθμιση της συρρικνωσης.

Υγρή και Ξηρή πυκνότητα

Για τον έλεγχο της πυκνότητας, 50mL ενέματος εγχύθηκαν σε ένα τρυβλίο Πέτρι και ζυγίστηκαν ($m_{\text{νοπώ}}$). Το δείγμα ζυγιζόταν ώσπου η διακύμανση βάρους του σε 24 ώρες να είναι $<0,05\%$ ($m_{\text{ξηρό}}$). Η πυκνότητα υπολογίστηκε με τον τύπο $\rho = m/V$ και προτιμήθηκαν ενέματα με χαμηλή τόσο την ξηρή όσο και την νωπή πυκνότητα.

Ρευστότητα

Η ρευστότητα των δειγμάτων μετρήθηκε εγχύνοντας 10mL ενέματος σε ένα δοκίμιο που προσομοίωνε τη δομή ενός τοίχου από ψαμμίτη. Η ταχύτητα ροής υπολογίστηκε ως αναλογία του μήκους που κύλισε το ένεμα προς το χρόνο ροής αυτού (mm/s). Τα δείγματα που η αναλογία ήταν μεγαλύτερη από 25 mm/s χαρακτηρίστηκαν ως ενέματα υψηλής ρευστότητας. Όταν η αναλογία κυμαινόταν από 15-25 mm/s τα δείγματα χαρακτηρίζονταν ικανοποιητικής ρευστότητας και όταν η αναλογία ήταν κάτω από 15 mm/s χαρακτηριζόντουσαν χαμηλής ρευστότητας. Στον έλεγχο παρατηρήθηκαν ακόμα η ομοιογένεια του δείγματος και το πλάτος της ποσότητας που κύλισε στον τοίχο. Τα ενέματα που επιλέχθηκαν τελικά ήταν και τα δύο ομοιογενή κατά την κύλιση στον τοίχο. Για το δείγμα G τα κριτήρια που είχαν τεθεί ήταν ικανοποιητική ρευστότητα, ενώ για το δείγμα MG υψηλή ρευστότητα.

Ενεσιμότητα

Για τον υπολογισμό της ενεσιμότητας, έγινε έγχυση ενέματος με σύριγγα και μετρήθηκε η ποσότητα που εγχύθηκε σε 5 δευτερόλεπτα. Για το ένεμα G χρησιμοποιήθηκε λεπτός σωλήνας διαμέτρου 2,7 mm, ο οποίος εφαρμόστηκε στο άκρο της σύριγγας και για το μείγμα MG βελόνα G14 (διάμετρος 1,6 mm). Η διάμετρος για την παροχή ενέματος επιλέχθηκε με βάση το μέγεθος της αποκόλλησης όπου έπρεπε να εισχωρήσει το ένεμα. Τα δείγματα ταξινομήθηκαν στις εξής κατηγορίες: χαμηλής (<10 mL), ικανοποιητικής (10-15 mL) και υψηλής ενεσιμότητας (>15 mL), ανάλογα με την ποσότητα υλικού που περνούσε στον ορισμένο χρόνο.

Τα αποτελέσματα από όλους τους ελέγχους συγκρίθηκαν και τα ενέματα με τις καλύτερες αποδόσεις σε όλες τις δοκιμές επιλέχθηκαν για το δεύτερο στάδιο ελέγχου.

7.5.2.4. Δεύτερο στάδιο ελέγχου

Ο δεύτερος έλεγχος επικεντρώθηκε στον υπολογισμό της τριχοειδούς απορρόφησης και της πρόσφυσης (δοκιμή «Sandwich») που περιγράφεται παρακάτω. Ιδιαίτερα σημαντικός θεωρήθηκε ο έλεγχος της τριχοειδούς απορρόφησης για το ένεμα G που παρασκευάστηκε με σκόνη αλουμινίου, για να ελεγχθεί αν οι πόροι του αέρα που σχηματίστηκαν ήταν συνδεδεμένοι ή αυτόνομοι και αν το ένεμα επέτρεπε την εισχώρηση του νερού.

Τριχοειδής απορρόφηση

Για τον έλεγχο της τριχοειδούς απορρόφησης κατασκευάστηκαν κυλινδρικά δοκίμια σε πορώδες υπόστρωμα γύψου, διαμέτρου 50 mm και ύψους 20 mm. Αρχικά, μια σταγόνα νερού τοποθετήθηκε πάνω στο δοκίμιο και παρατηρήθηκε η απορρόφηση του. Έπειτα για τον έλεγχο της τριχοειδούς απορρόφησης πραγματοποιήθηκε η δοκιμή RILEM Π.6. Πιο αναλυτικά, υπολογίστηκε η πυκνότητα του δείγματος στα 60s και παρατηρήθηκε το μέτωπο του δείγματος για να εκτιμηθεί η διάχυση του νερού. Ως κριτήριο αποδοχής των δειγμάτων είχε οριστεί πως το ένεμα θα πρέπει να επιτρέπει εύκολη διέλευση του νερού δηλαδή $W_{60} = 0.2-0.3$, g/cm².

Έλεγχος «Sandwich»



Εικ. 59: Προετοιμασία δοκιμής «Sandwich» για αρμόστοκους MG, ©THE COURTAULD INSTITUTE OF ART, 2016.



Εικ. 60: Δοκιμή «Sandwich» για αρμόστοκους G, ©THE COURTAULD INSTITUTE OF ART, 2016.

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στο πεδίο, αφορούσε τον προσδιορισμό του πορώδους κάθε δείγματος και αποτελεί μια παραλλαγή της εργαστηριακής μεθόδου «Sandwich» (PASIAN ET AL. 2019). Για τον έλεγχο κατασκευάστηκαν δίσκοι από σοβά διαμέτρου 100 mm, οι οποίοι προσομοίωναν τόσο τον χονδρόκοκκο όσο και τον γύψινο σοβά. Οι δίσκοι κολλήθηκαν σε ένα τετράγωνο κόντρα πλακέ, στο οποίο είχε προσαρτηθεί πάνινη τσάντα για την πρόσθεση βάρους στο σύστημα. Τα ενέματα G εγχύθηκαν στους δίσκους με τον χονδρόκοκκο σοβά και το σύστημα προσαρτήθηκε στην κάτω πλευρά μιας πλάκας ψαμμίτη, η οποία τοποθετήθηκε οριζόντια για να προσομοιάσει τις οριζόντιες αποκολλημένες επιφάνειες. Αντίστοιχα, τα ενέματα MG εγχύθηκαν στους δίσκους αραβικού σοβά και μετά την πήξη τους τοποθετήθηκαν σε θέση που προσομοίαζε μια οριζόντια αποκόλληση. Βάρος 100 g προστέθηκε σταδιακά στην πάνινη τσάντα, μέχρι το σύστημα να αστοχήσει. Η μορφή της αστοχίας αξιολογήθηκε κριτικά:

- Η αστοχία στην διεπιφάνεια των υλικών δίνει πληροφορίες για την πραγματική πρόσφυση.
- Η αστοχία στη μέση του πάχους του ενέματος υποδηλώνει συνοχή αυτού.

Ο υπολογισμός της συνοχής υπολογίστηκε με τον τύπο $\sigma = F/A$, όπου σ = τάση, F = δύναμη και A = η επιφάνεια όπου σχηματίζεται η ρήξη. Για την επιλογή του κατάλληλου ενέματος επιλέχθηκαν ενέματα που η ρήξη παρουσιάστηκε στη μέση αυτών, γεγονός που υποδηλώνει ότι η αντοχή του δεσμού πέτρα – ένεμα – σοβάς είναι υψηλότερη από τη συνοχή του ενέματος και ταυτόχρονα η συνοχή του ενέματος είναι χαμηλότερη από αυτή των αρχικών υλικών.

7.5.2.5. Εφαρμογή και αξιολόγηση

Εκτεταμένη αποκόλληση (Ένεμα G)

Τα ένεμα που παρασκευάστηκαν με σκόνη αλουμινίου, χωρίς κόλλες, είχαν καλή απόδοση σε όλες τις δοκιμές. Σε όλα τα δείγματα το ένεμα αστοχούσε στη μέση του ενέματος, δηλαδή η πρόσφυση ήταν υψηλότερη από τη συνοχή του ενέματος (το αντίστροφο παρατηρήθηκε όταν στο μείγμα προστέθηκε κόλλα). Στα δείγματα που ως μέσο εναιώρησης χρησιμοποιήθηκε νερό-αιθανόλη (50-50%) παρουσιάστηκε υψηλότερη πυκνότητα, εξαιτίας της αυξημένης ποσότητας χαλαζία που απαιτούσε το μείγμα για την αντιμετώπιση της συρρίκνωσης, σε σχέση με τα ένεμα με βάση το νερό. Αυτό το ένεμα επιλέχθηκε για τις τοιχογραφίες της οροφής της Λότζιας που είχαν άμεσο κίνδυνο αποκόλλησης. Η χαμηλή ξηρή πυκνότητα ορίστηκε ως κριτήριο υψίστης σημασίας εξαιτίας της βαρυτικής δύναμης σε συνδυασμό με την μεγάλη ποσότητα ενέματος που θα χρειαζόταν για την αποκατάσταση της πρόσφυσης. Το ένεμα G με βάση το νερό είχε μεγαλύτερη διαστολή, καλή σταθερότητα όγκου και χαμηλότερη πυκνότητα σε σύγκριση με το ένεμα νερού αιθανόλης. Επομένως θεωρήθηκε ασφαλέστερο για την εφαρμογή στη συγκεκριμένη περιοχή.

Η εξάνθηση αφαιρέθηκε από την ασταθή περιοχή, στην οποία θα γινόταν ενεμάτωση και λήφθηκαν δείγματα και από την τριγύρω περιοχή. Τα δείγματα αναλύθηκαν με ταινίες ιόντων και τα αποτελέσματα έδειξαν την παρουσία θεικών και χλωριούχων αλάτων καθώς και καλίου σε όλα τα δείγματα, τόσο στην επιφάνεια όσο και σε 6mm βάθος. Η ανάλυση της στρωματογραφίας έδειξε πως σε μεγαλύτερο βάθος (έως 18mm) εντοπίστηκαν κυρίως θειικά άλατα και σε ορισμένα σημεία νιτρικά άλατα. Η ανακρυστάλλωση αλάτων στην επιφάνεια περιορίστηκε με τη χρήση ενός συστήματος απορροφητικής πρέσας πολλών στρώσεων με βάση τον πηλό που εξασφάλιζε και την ασφάλεια της τοιχογραφίας. Μετά την αφαίρεση της πρέσας ελέγχθηκε με ταινία ιόντων ο πηλός, πάνω στον οποίο εντόπισαν θειικά, χλωριούχα και νιτρικά άλατα και κάλιο, στοιχεία που εντοπίστηκαν και στο επίχρισμα. Έλεγχοι στην περιοχή πραγματοποιήθηκαν 14 μέρες μετά την επέμβαση και δεν εμφανίστηκε περαιτέρω εξάνθηση στην επιφάνεια.

Ήπια αποκόλληση (Ένεμα MG)

Σχετικά με τα ένεμα MG, τα δείγματα που δεν περιείχαν συγκολλητική ουσία είχαν καλή απόδοση στη δοκιμή «Sandwich». Στις φθορές των τοίχων με ήπια αποκόλληση, η χαμηλή πυκνότητα δεν θεωρήθηκε τόσο σημαντική. Για αυτόν τον λόγο προτιμήθηκε το μείγμα με μέσο εναιώρησης νερό-αιθανόλη. Η ποσότητα σε αιθανόλη περιορίστηκε στο 30%, εξαιτίας των περιβαλλοντικών συνθηκών (οι υψηλές θερμοκρασίες οδηγούσαν σε πρόωρη εξάτμιση, με αποτέλεσμα μειωμένη εργασιμότητα και αυξημένη συρρίκνωση). Με 70% νερό πραγματοποιούνταν οι απαραίτητες χημικές αντιδράσεις, με αποτέλεσμα τη μείωση των διαλυτών αλάτων και την καλύτερη ενεσιμότητα και διεισδυτικότητα του ενέματος.

7.5.3. Συμπεράσματα

Τα ένεμα που εφαρμόστηκαν στη Λότζια του Hadi Rani Mahal (Nagaur, Ινδία), απαιτούσαν μειωμένη περιεκτικότητα σε νερό εξαιτίας των προσβεβλημένων επιχρισμάτων με άλατα. Για την επιλογή τους ακολουθήθηκε μια αυστηρή μεθοδολογία προσαρμοσμένη στους περιορισμούς της περιοχής. Ο περιορισμός του νερού (30-50% αιθανόλη) στο ένεμα πραγματοποιήθηκε στον βαθμό που ήταν δυνατό με βάση τις κλιματικές συνθήκες. Στα σημεία με ήπια αποκόλληση εφαρμόστηκε ένεμα με 70% νερό. Σε πιο εύθραυστες περιοχές επιλέχθηκε το ένεμα G με βάση το νερό λόγω της χαμηλής πυκνότητας και της μεγάλης διαστολής. Ωστόσο μια εκδοχή του μείγματος G με μέσο εναιώρησης νερό-αιθανόλη (50-50%) χρησιμοποιήθηκε σε άλλες περιοχές της λότζιας, με υψηλή δραστηριότητα αλάτων και ήπια αποκόλληση, όπου η πυκνότητα του μείγματος δεν αποτελούσε πρωταρχική απαίτηση (κατακόρυφες επιφάνειες).

8. Συμπεράσματα

Η διάβρωση του υπεδάφους πάνω στο οποίο εδράζονται τα μνημεία και οι φθορές των κτιρίων, οι οποίες προκαλούνται από την πάροδο του χρόνου, τις σεισμικές δονήσεις καθώς και από την επιδεινούμενη περιβαλλοντική κατάσταση που επιφέρει η κλιματική αλλαγή, καθιστά την εφαρμογή ενεμάτων υψίστης σημασίας για τη διατήρηση των ιστορικών κατασκευών και των μνημείων. Η διάδοση των ενεμάτων και η εφαρμογή τους σε πληθώρα κατασκευών (κυρίως τη δεκαετία του '80) προκάλεσε αρκετά προβλήματα, λόγω ανεπαρκών μελετών για την χρήση των ενεμάτων. Η παρατήρηση, τόσο των βραχυπρόθεσμων όσο και των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων που προκάλεσαν στις κατασκευές, βοήθησε στον ορισμό της αρχής της συμβατότητας, ως βασική παράμετρο για την εφαρμογή ενεμάτων. Αυτή η παρατήρηση άνοιξε το δρόμο για επιστημονική έρευνα που εξετάζει συνθέσεις ενεμάτων και τις ιδιότητες αυτών. Οι εργαστηριακές μελέτες οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι τα οργανικά ενέματα είναι μη συμβατά με τις ιστορικές κατασκευές και έχουν αρνητικές επιπτώσεις κατά την εφαρμογή τους και έφερε στο προσκήνιο μια σειρά από ανόργανες ύλες που θεωρούνται κατάλληλες για εφαρμογή σε μνημεία και ιστορικές κατασκευές. Τα υλικά που προτείνονται από τη βιβλιογραφία ως συμβατά υλικά με τα παραδοσιακά κονιάματα είναι η άσβεστος (σε όλες τις μορφές), οι ποζολάνες, αδρανή υλικά με πολύ μικρή κοκκομετρία και διάφορα πρόσμικτα. Εφαρμογές που έγιναν με τη χρήση των υλικών που παρουσιάστηκαν είχαν θετικά αποτελέσματα και αντιμετώπισαν δραστικά αδυναμίες και αστοχίες των κτιρίων. Από εφαρμογές ενεμάτων και μελέτες υπάρχει πληθώρα πειραματικών δεδομένων που στηρίζουν τη χρήση ανόργανων ενεμάτων και που αποδεικνύουν τη συμβατότητα τους με τα ιστορικά υλικά. Στην εργασία παρουσιάστηκαν διάφορες συνθέσεις ενεμάτων που είναι κατάλληλες για τοιχοποιίες καθώς και συνθέσεις που είναι κατάλληλες για την εφαρμογή τους σε ιδιαίτερες περιπτώσεις, όπως διακοσμημένες αρχιτεκτονικές επιφάνειες. Τέτοιου είδους επεμβάσεις είναι εξαιρετικά σημαντικές, αφού οι διακοσμημένες αρχιτεκτονικές επιφάνειες μεταφέρουν μια σειρά από ιδιαίτερα μηνύματα σε σχέση με απλές επιφάνειες, γεγονός που καθιστά την επέμβαση σε αυτές εξαιρετικά ευαίσθητη υπόθεση. Αν και για τα υλικά των ενεμάτων και τις ιδιότητες αυτών υπάρχει πληθώρα βιβλιογραφίας, καλύτερη δυνατή απόδοση των ενεμάτων με χρήση νέων καινοτόμων υλικών με ικανοποιητική συμβατότητα βρίσκεται συνεχώς υπό διερεύνηση. Τέλος, όπως κατέδειξαν και τα παραδείγματα εφαρμογών που παρουσιάστηκαν παραπάνω, κάθε μνημείο και κατασκευή χρήζει ειδικής μελέτης και ανάλυσης για την επιλογή του κατάλληλου μέσου αποκατάστασης, τη χρήσης ή μη ενεμάτων καθώς και της σύνθεσης αυτών.

Η παρούσα έρευνα μπορεί να αποτελέσει έναν οδηγό για τη σύνθεση ενεμάτων, την επιλογή των πρώτων υλών, τις δοκιμές αποτίμησης καθώς και τον τρόπο εφαρμογής τους.

9. Παραπομπές

9.1. Π1. Συνθέσεις ενεμάτων

Πηγές	Σύνθεση μείγματος	A/A	Σβησμένη Άσβεστος Σκόνη	Υδραυλική Άσβεστος NHL 3,5	Λευκό τσιμέντο	Θηραϊκή Γη	Ινές Γυαλιού 3 mm	Ινές Γυαλιού 6 mm	Ινές Πολυπροπυλενίου 6 mm	Σφαιρίδια Γυαλιού	Φυσαλίδες Γυαλιού	Πολυκαρβοξυλικό αιθέρας % w/w συνδετικών	N/K
(Pachta, 2021A)	1	1	1	-	-	1	-	-	-	-	-	1	0,97
	2	2	1	-	-	1	0,3	-	-	-	-	1	1,11
	3	3	1	-	-	1	-	0,3	-	-	-	1	1,20
	4	4	1	-	-	1	-	-	-	3	-	1	1,02
	5	5	1	-	-	1	-	-	-	-	1	1	1,01
(Pachta, 2021B)	A1	6	1	-	-	1	-	-	-	-	-	1	0,97
	A2	7	1	-	-	1	-	0,3	-	-	-	1	1,20
	A3	8	1	-	-	1	-	-	0,3	-	-	1	1,18
	B1	9	-	1	-	-	-	-	-	-	-	1	0,66
	B2	10	-	1	-	-	-	0,3	-	-	-	1	0,66
	B3	11	-	1	-	-	-	-	0,3	-	-	1	0,74
(Pachta & Goulas, 2020)	LP	12	1	-	-	1	-	-	-	-	-	1	0,97
	LP/3 1	13	1	-	-	1	0,1	-	-	-	-	1	1,06
	LP/3 3	14	1	-	-	1	0,3	-	-	-	-	1	1,11
	LP/6 1	15	1	-	-	1	-	0,1	-	-	-	1	1,12
	LP/6 3	16	1	-	-	1	-	0,3	-	-	-	1	1,20
	LP/1	17	1	-	-	1	-	-	0,1	-	-	1	1,18
	NHL	18	-	1	-	-	-	-	-	-	-	1	0,66
	NHL/3 1	19	-	1	-	-	0,1	-	-	-	-	1	0,74
	NHL/3 3	20	-	1	-	-	0,3	-	-	-	-	1	0,81
	NHL/6 1	21	-	1	-	-	-	0,1	-	-	-	1	0,79
	NHL/6 3	22	-	1	-	-	-	0,3	-	-	-	1	0,82
	NHL/1	23	-	1	-	-	-	-	0,1	-	-	1	0,74
(Pachta, et al., 2020)	LP	24	1	-	-	1	-	-	-	-	-	1	1,05
	LPC	25	1	-	0.2	0,8	-	-	-	-	-	1	0,98
	NHL	26	-	1	-	-	-	-	-	-	-	1	1,01

Πηγές	Σύνθεση μείγματος	A/A	Σβησιμένη Άσβεστος Σκόνη	Αερική Άσβεστος	Υδραυλική Άσβεστος NHL 3,5	Λευκό τσιμέντο	Θηραϊκή Γη	Περλίτης D1S	Περλίτης D1C	Μετακαολίνη	Χώμα Τύπου Α	Χώμα Τύπου Β	Πολυκαρβοξυλικό αιθέρας % w/w συνδετικών	N/K
(Pachta, et al., 2019A)	LPs	27	-	1	-	-	1	-	-	-	-	-	1	1,14
	HLs	28	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	1	1,03
	D1S L	29	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	1,17
	D1S Ls	30	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	1	1,07
	D1S LC	31	-	0,8	-	0,2	-	1	-	-	-	-	-	1,17
	D1S HL	32	-	-	1	-	-	2	-	-	-	-	-	1,17
	D1S HLs	33	-	-	1	-	-	2	-	-	-	-	1	0,91
	D1S LM	34	-	1	-	-	-	0,8	-	0,2	-	-	-	1,33
	D1S LMs	35	-	1	-	-	-	0,8	-	0,2	-	-	1	1,07
	D1C L	36	-	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1,17
	D1C LC	37	-	1,0	-	0,2	-	-	0,8	-	-	-	-	1,17
	D1C HLs	38	-	-	1	-	-	-	2	-	-	-	1	0,91
(Pachta, et al., 2019C)	LP	39	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	1	1,05
	LPWC	40	1	-	-	0,2	0,8	-	-	-	-	-	1	0,98
	NHL	41	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	1	1,01
(Papayianni, I.; Pachta, V., 2018)	A1	42	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	2,00
	A2	43	0,5	-	-	-	0,5	-	-	-	1	-	1	1,25
	A3	44	-	-	-	0,2	-	-	-	-	1	-	1	1,87
	A4	45	-	-	-	0,3	-	-	-	-	1	-	1	1,56
	A5	46	0,5	-	-	0,5	-	-	-	-	1	-	1	1,11
	B1	47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	2,00
	B2	48	0,5	-	-	-	0,5	-	-	-	-	1	1	1,22
	B3	49	-	-	-	0,2	-	-	-	-	-	1	1	0,69
	B4	50	-	-	-	0,3	-	-	-	-	-	1	1	1,12
	B5	51	0,5	-	-	0,5	-	-	-	-	-	1	1	1,21
	AB1	52	-	-	-	0,5	0,5	-	-	-	0,8	0,2	1	1,25

Πηγές	Σύνθεση μείγματος		A/A											
			Σβησιμένη Άσβεστος Σκόνη	Αερική Άσβεστος	Υδραυλική Άσβεστος NHL 3,5	Λευκό τσιμέντο	Θηραϊκή Γη	Περλίτης D1S	Περλίτης D1C	Μετακαολίνη	Χώμα Τύπου A	Χώμα Τύπου B	Πολυκαρβοξυλικό αιθέρας % w/w συνδετικών	N/K
(Papayianni, I.; Pachta, V.;, 2018)	AB2	53	0,5	-	-	-	0,5	-	-	-	0,8	0,2	1	1,43
	AB3	54	-	-	-	0,2	-	-	-	-	0,8	0,2	1	1,96
	AB4	55	-	-	-	0,3	-	-	-	-	0,8	0,2	1	1,60
	AB5	56	0,5	-	-	0,5	-	-	-	-	0,8	0,2	1	1,43
Πηγές	Σύνθεση μείγματος		A/A											
			Σβησιμένη Άσβεστος Σκόνη	Θηραϊκή Γη	Κασεΐνη	Δεξτρίνη	Λινέλαιο	MSG	Primal AC33	Hydrogrund	Vinavil PC2	Πυριτικός αιθυλεστέρας	Πολυκαρβοξυλικό αιθέρας % w/w συνδετικών	N/K
(Pachta & Papayianni, 2016)	A1	57	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1,22
	A2	58	1	1	1,5	-	-	-	-	-	-	-	1	1,33
	A3	59	1	1	-	1,5	-	-	-	-	-	-	1	1,50
	A4	60	1	1	-	-	1,0	-	-	-	-	-	1	1,32
	A5	61	1	1	-	-	-	1,0	-	-	-	-	1	1,47
	A6	62	1	1	-	-	-	-	1,0	-	-	-	1	1,32
	A7	63	1	1	-	-	-	-	-	1,0	-	-	1	1,62
	A8	64	1	1	-	-	-	-	-	-	1,0	-	1	1,47
	A9	65	1	1	-	-	-	-	-	-	-	1,0	1	1,62

Πηγές	Σύνθεση μείγματος	Α/Α	Σβησιμένη Άσβεστος Σκόνη	Άσβεστοπολτός	Υδραυλική Άσβεστος NHL 3,5	Λευκό τσιμέντο	Θηραϊκή Γη	Πηλός	Σκόνη από τούβλο	Πληρωτικό Άσβεστόλιθου	Διατομίτης	Πολυκαρβοξύλιο (Master Glenium 11) % w/w συνδετικών	N/K
(Papayianni & Pachta, 2015)	L1	66	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1,06
	L2	67	0,83	-	-	0,17	-	-	-	-	-	1	0,93
	L3	68	0,77	-	-	0,23	-	-	-	-	-	1	0,83
	L4	69	-	1,00	-	-	-	-	-	-	-	1	2,52
	L5	70	-	0,83	-	0,17	-	-	-	-	-	1	2,28
	L6	71	-	0,77	-	0,23	-	-	-	-	-	1	2,11
	L7	72	-	-	1,00	-	-	-	-	-	-	1	0,61
	L8	73	-	-	0,67	-	-	-	-	-	-	1	0,42
	LP1	74	0,50	-	-	-	0,50	-	-	0,33	-	1	1,10
	LP2	75	0,50	-	-	0,10	0,40	-	-	-	-	1	1,00
	LP3	76	0,50	-	-	0,15	0,35	-	-	-	-	1	0,97
	LP4	77	-	0,50	-	-	0,50	-	-	-	-	1	1,34
	LP5	78	-	0,50	-	0,10	0,40	-	-	-	-	1	1,02
	LP6	79	0,40	-	-	-	0,40	-	-	-	-	1	0,86
	LP7	80	0,40	-	-	0,12	0,28	-	-	0,20	-	1	0,83
	LP8	81	0,50	-	-	-	-	-	-	0,20	0,50	1	0,86
	LP9	82	0,40	-	-	-	-	-	-	-	0,40	1	0,71
	LPB1	83	0,50	-	-	-	0,30	0,20	-	0,20	-	1	0,93
	LPB2	84	0,46	-	-	0,09	0,27	0,18	0,20	-	-	1	0,90
	LPB3	85	0,43	-	-	0,13	0,36	0,18	0,18	-	-	1	0,98
	LPB4	86	0,50	-	-	-	0,25	0,25	0,18	-	-	1	1,00
	LPB5	87	0,45	-	-	0,09	0,23	0,23	0,25	-	-	1	0,96
	LPB6	88	0,43	-	-	0,13	0,22	0,22	0,30	-	-	1	0,93
	LPC1	89	0,50	-	-	-	0,40	-	0,22	-	-	1	1,17
	LPC2	90	0,46	-	-	0,09	0,36	-	-	-	-	1	1,12
	LPC3	91	0,46	-	-	-	0,36	-	-	-	-	1	1,14
	LPC4	92	0,42	-	-	0,08	0,33	-	-	-	-	1	0,89
	LPC5	93	0,25	-	-	-	0,25	-	-	-	-	1	1,25
	LPC6	94	0,25	-	-	0,25	-	-	-	-	-	1	1,11

Πηγές	Σύνθεση μείγματος	A/A	Σβησιμένη Άσβεστος Σκόνη										N/K
			Υδραυλική Άσβεστος NHL 3,5	Λευκό τσιμέντο			Θηραϊκή Γη	Διατομίτης	Καπνισμένο Νανοπορώτιο 150nm	Καπνισμένο Νανοπορώτιο 140nm	Πολυκαρβοξυλικό (Master Glenium 11) % w/w συνδετικών	Επιβραδυντής % w/w συνδετικών	
(Papayianni, et al., 2012)	A1	95	1,00	-	-	1,00	-	-	-	1	0,5	1,09	
	A2	96	1,00	-	-	1,00	-	-	-	2,5	0,5	1,14	
	A3	97	1,00	-	-	1,00	-	1,00	-	1	0,5	1,18	
	A4	98	1,00	-	-	1,00	-	-	1,00	1	0,5	1,43	
	A5	99	1,00	-	-	1,00	-	-	1,00	2,5	0,5	1,29	
	A6	100	1,00	-	-	1,00	-	-	0,50	2,5	0,5	1,14	
	B1	101	1,00	-	-	-	1,00	-	-	1	0,5	0,86	
	B2	102	1,00	-	-	-	1,00	1,00	-	1	0,5	1,03	
	C1	103	1,00	-	0,20	0,80	-	-	-	2,5	0,5	1,07	
	C2	104	1,00	-	0,20	0,80	-	-	0,50	2,5	0,5	1,14	
	C3	105	1,00	-	0,20	0,80	-	-	1,00	2,5	0,5	1,12	
	D1	106	1,00	-	0,30	0,70	-	-	-	1	0,5	0,97	
	D2	107	1,00	-	0,30	0,70	-	1,00	-	1	0,5	1,24	
	E1	108	-	1,00		-	-	-	-	1	0,5	0,61	
	E2	109	-	1,00		-	-	1,00	-	1	0,5	0,59	

Πηγές	Σύνθεση μείγματος	A/A										
			Σβησιμένη Άσβεστος Σκόνη	Άσβεστοπολτός	Υδραυλική Άσβεστος NHL 3,5	Λευκό τσιμέντο	Θηραϊκή Γη	Πηλός	Πλινθόσκονη	Πληρωτικό Άσβεστόλιθου	Διατομίτης	N/K
(Papayianni & Pachta, 2012)	L1	110	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	1,06
	L2	111	1,00	-	-	0,20	-	-	-	-	-	0,93
	L3	112	1,00	-	-	0,30	-	-	-	-	-	0,83
	L4	113	-	1,00	-	-	-	-	-	-	-	2,52
	L5	114	-	1,00	-	0,20	-	-	-	-	-	2,28
	L6	115	-	1,00	-	0,30	-	-	-	-	-	2,11
	L7	116	1,00	-	-	-	-	-	-	-	1,00	0,86
	L8	117	1,00	-	-	-	-	-	-	0,50	1,00	0,71
	L9	118	-	-	1,00	-	-	-	-	-	-	0,61
	L10	119	-	-	1,00	-	-	-	-	0,50	-	0,42
	LP1	120	1,00	-	-	-	1,00	-	-	-	-	1,10
	LP2	121	1,00	-	-	0,20	0,80	-	-	-	-	1,00
	LP3	122	1,00	-	-	0,30	0,70	-	-	-	-	0,97
	LP4	123	-	1,00	-	-	1,00	-	-	-	-	1,34
	LP5	124	-	1,00	-	0,20	0,80	-	-	-	-	1,02
	LP6	125	1,00	-	-	-	1,00	-	-	0,50	-	0,86
	LP7	126	1,00	-	-	0,30	0,70	-	-	0,50	-	0,83
	LPB1	127	1,00	-	-	-	0,60	-	0,40	-	-	0,93
	LPB2	128	1,00	-	-	0,20	0,60	-	0,40	-	-	0,90
	LPB3	129	1,00	-	-	0,30	0,60	-	0,40	-	-	0,98
	LPB4	130	1,00	-	-	-	0,50	-	0,50	-	-	1,00
	LPB5	131	1,00	-	-	0,20	0,50	-	0,50	-	-	0,96
	LPB6	132	1,00	-	-	0,30	0,50	-	0,50	-	-	0,93
	LPC1	133	1,00	-	-	-	0,80	0,20	-	-	-	1,17
	LPC2	134	1,00	-	-	0,20	0,80	0,20	-	-	-	1,12
	LPC3	135	1,00	-	-	-	0,80	0,40	-	-	-	1,14
	LPC4	136	1,00	-	-	0,20	0,80	0,40	-	-	-	0,89
	LPC5	137	0,50	-	-	-	0,50	1,00	-	-	-	1,25
	LPC6	138	0,50	-	-	0,50	-	1,00	-	-	-	1,11

9.2. Π.2. Ιδιότητες σε νωπή κατάσταση

Πηγές	Σύνθεση μείγματος	A/A	Ρευστότητα						Ενεσιμότητα EN 1771 0h (sec)	Μείωση του όγκου %	Εξίδρωση %
			ASTM cone			EN cone					
			0h (sec)	1h (sec)	Αύξηση (%)	0h (sec)	1h (sec)	Αύξηση (%)			
(Pachta, 2021A)	1	1	10,14	10,30	1,58	6,85	6,86	0,15	2,45	2,00	1,00
	2	2	10,27	10,54	2,63	6,34	6,42	1,26	2,47	2,90	2,40
	3	3	10,34	10,77	4,16	6,37	6,53	2,51	2,90	3,10	2,80
	4	4	10,70	10,88	1,68	6,58	6,83	3,80	3,28	1,40	0,90
	5	5	10,60	10,75	1,42	6,22	6,45	3,70	2,95	2,00	3,00
(Pachta, 2021B)	A1	6	10,14	10,30	1,58	6,85	6,91	0,88	2,45	2,10	1,20
	A2	7	10,34	10,77	4,16	6,37	6,53	2,51	2,90	3,10	2,80
	A3	8	10,23	10,42	1,86	5,90	6,10	3,39	2,79	3,30	3,20
	B1	9	10,43	11,01	5,56	7,12	7,40	3,93	3,08	4,20	1,60
	B2	10	10,27	11,02	7,30	6,23	6,85	9,95	3,95	2,20	0,90
	B3	11	10,40	10,91	4,90	6,89	7,01	1,74	3,17	0,40	0,10
(Pachta & Goulas, 2020)	LP	12	10,14	10,30	1,58	6,85	6,91	0,88	2,45	2,10	1,20
	LP/31	13	10,27	10,47	1,95	6,33	6,48	2,37	2,57	2,30	1,80
	LP/3 3	14	10,27	10,54	2,63	6,34	6,42	1,26	2,47	2,90	2,40
	LP/6 1	15	10,31	10,70	3,78	6,43	6,57	2,18	2,57	1,30	1,20
	LP/6 3	16	10,34	10,77	4,16	6,37	6,53	2,51	2,90	3,10	2,80
	LP/1	17	10,23	10,42	1,86	5,90	6,10	3,39	2,79	3,30	3,20
	NHL	18	10,43	11,01	5,56	7,12	7,40	3,93	3,08	4,20	1,60
	NHL/3 1	19	10,50	10,80	2,86	6,54	6,75	3,21	3,12	1,10	0,50
	NHL/3 3	20	10,14	10,73	5,82	6,33	6,49	2,53	3,82	1,20	0,70
	NHL/6 1	21	10,15	10,75	5,91	6,40	6,79	6,09	3,28	1,30	0,80
	NHL/6 3	22	10,27	11,02	7,30	6,23	6,85	9,95	3,95	2,20	0,90
(Pachta, et al., 2020)	NHL/1	23	10,40	10,91	4,90	6,89	7,01	1,74	3,17	0,40	0,10
	LP	24	10,95	10,98	0,27	6,94	6,86	-1,15	2,93	4,50	1,50
	LPC	25	10,27	10,54	2,63	6,74	6,80	0,89	4,85	2,80	0,50
	NHL	26	10,41	10,62	2,02	6,65	6,87	3,31	3,34	5,00	3,00

Πηγές	Σύνθεση μείγματος	A/A	Ρευστότητα						Ενεσιμότητα EN 1771 0h (sec)	Μείωση του όγκου %	Εξίδρωση %
			ASTM cone			EN cone					
			0h (sec)	1h (sec)	Αύξηση (%)	0h (sec)	1h (sec)	Αύξηση (%)			
(Pachta, et al., 2019A)	LPs	27	10,60	11,04	4,15	6,60	6,72	1,82	2,09	3,8	1,2
	HLs	28	10,27	10,68	3,99	6,28	6,81	8,44	2,57	7,7	3,6
	D1S L	29	10,12	10,40	2,77	6,88	7,07	2,76	2,53	13,3	13,3
	D1S Ls	30	10,81	11,23	3,89	7,35	7,64	3,95	3,15	10	12
	D1S LC	31	11,03	11,31	2,54	7,50	7,69	2,53	3,13	1,30	2,00
	D1S HL	32	10,32	10,30	-0,19	7,02	7,41	5,56	2,50	6,70	13,30
	D1S HLs	33	10,59	11,22	5,95	7,20	7,63	5,97	3,42	6,70	8,00
	D1S LM	34	11,01	11,65	5,81	7,49	7,92	5,74	2,62	6,70	11,30
	D1S LM _s	35	10,96	11,63	6,11	7,45	7,91	6,17	2,31	5,30	5,30
	D1C L	36	9,90	9,95	0,51	6,73	6,70	-0,45	1,99	26,70	26,70
	D1C LC	37	10,34	10,38	0,39	7,03	7,06	0,43	2,12	16,70	16,70
	D1C HL _s	38	10,85	11,15	2,76	7,38	7,58	2,71	2,95	20,00	20,00
(Pachta, et al., 2019C)	LP	39	10,95	10,98	0,27	6,94	6,86	-1,15	2,93	4,50	1,50
	LPWC	40	10,27	10,54	2,63	6,74	6,80	0,89	4,85	2,80	0,50
	NHL	41	10,41	10,62	2,02	6,65	6,87	3,31	3,34	5,00	3,00
(Papayianni, I.; Pachta, V., 2018)	A1	42	9,90						2,81	9,78	
	A2	43	10,05						3,32	6,96	
	A3	44	9,10						1,93	1,68	
	A4	45	10,90						2,73	2,11	
	A5	46	10,81						2,50	5,93	
	B1	47	10,10						2,18	45,60	
	B2	48	9,72						2,07	32,41	
	B3	49	10,39						3,98	2,38	
	B4	50	9,59						1,22	5,35	
	B5	51	9,71						1,21	45,60	
	AB1	52	10,40						3,50	5,16	
	AB2	53	10,89						1,05	8,45	
	AB3	54	11,10						2,41	3,76	
	AB4	55	11,40						3,20	3,85	
	AB5	56	10,58						4,20	8,45	

Πηγές	Σύνθεση μείγματος	A/A	Ρευστότητα						Ενεσιμότητα EN 1771 0h (sec)	Μείωση του όγκου %	Εξίδρωση %
			ASTM cone			EN cone					
			0h (sec)	1h (sec)	Αύξηση (%)	0h (sec)	1h (sec)	Αύξηση (%)			
(Pachta & Papayianni, 2016)	A1	57	10,26	16,76	63,35				2,50	1,2	
	A2	58	9,20	9,55	3,80				1,60	8,80	
	A3	59	9,70	9,80	1,03				1,90	20,00	
	A4	60	9,76	9,85	0,92				1,97	2,50	
	A5	61	9,04	9,22	1,99				1,84	1,60	
	A6	62	9,56	10,00	4,60				1,33	0,90	
	A7	63	10,32	10,44	1,16				1,30	1,00	
	A8	64	9,56	9,72	1,67				2,83	1,50	
	A9	65	9,72	9,90	1,85				2,92	1,70	
	L1	66	10,80						3,15	1,50	
	L2	67	9,90						2,50	0,65	
	L3	68	10,00						1,62	0,55	
	L4	69	10,20						1,90	1,00	
	L5	70	9,50						1,50	0,50	
	L6	71	9,80						1,20	0,40	
(Papayianni & Pachta, 2015)	L7	72	9,33						3,41	0,70	
	L8	73	10,04						8,50	0,80	
	LP1	74	9,80						4,80	1,20	
	LP2	75	9,34						3,10	0,80	
	LP3	76	9,70						2,10	0,60	
	LP4	77	9,78						2,50	1,10	
	LP5	78	9,38						2,30	0,70	
	LP6	79	10,55						7,50	1,30	
	LP7	80	9,61						1,52	1,30	
	LP8	81	9,48						2,86	11,90	
	LP9	82	9,94						2,47	13,90	
	LPB1	83	9,59						2,10	1,50	
	LPB2	84	10,20						1,95	1,00	
	LPB3	85	9,90						2,67	1,10	
	LPB4	86	9,90						3,80	1,50	
	LPB5	87	10,15						3,20	1,10	
	LPB6	88	9,60						4,20	1,10	
	LPC1	89	9,50						7,50	1,80	
	LPC2	90	9,09						6,40	1,20	
	LPC3	91	9,17						9,30	1,70	

Πηγές	Σύνθεση μείγματος	A/A	Ρευστότητα						Ενεσιμότητα EN 1771 0h (sec)	Μείωση του όγκου %	Εξίδρωση %
			ASTM cone			EN cone					
			0h (sec)	1h (sec)	Αύξηση (%)	0h (sec)	1h (sec)	Αύξηση (%)			
(Papayianni & Pachta, 2015)	LPC4	92	9,70						7,00	1,10	
	LPC5	93	10,05						9,32	6,95	
	LPC6	94	10,81						6,50	5,93	
	A1	95	10,19	12,99					6,47	0,90	
	A2	96	10,08	9,95					2,70	0,80	
	A3	97	9,80	9,89					1,41	0,20	
(Papayianni, et al., 2012)	A4	98	9,89	9,96					2,04	3,10	
	A5	99	10,39	9,99					3,22	1,70	
	A6	100	10,56	10,38					3,28	3,70	
	B1	101	9,48	8,96					2,86	11,90	
	B2	102	10,51	10,23					0,92	6,80	
	C1	103	10,35	10,28					3,31	2,00	
	C2	104	10,12	10,03					3,26	1,50	
	C3	105	10,20	10,07					3,20	3,50	
	D1	106	10,26	11,79					2,10	0,60	
	D2	107	10,13	13,77					1,20	0,30	
(Papayianni & Pachta, 2012)	E1	108	9,33	9,84					3,41	0,70	
	E2	109	10,59	10,23					2,68	0,30	
	L1	110	10,80						3,15	1,50	
	L2	111	9,90						2,50	0,65	
	L3	112	10,00						1,62	0,55	
	L4	113	10,20						1,90	1,00	
	L5	114	9,50						1,50	0,50	
	L6	115	9,80						0,80	0,40	
	L7	116	9,48						2,86	11,90	
	L8	117	9,94						2,47	13,90	
	L9	118	9,33						3,41	0,70	
	L10	119	10,04						8,50	0,80	
LP1	120	9,80						4,80	1,20		

Πηγές	Σύνθεση μείγματος	A/A	Ρευστότητα						Ενεσιμότητα EN 1771 0h (sec)	Μείωση του όγκου %	Εξίδρωση %
			ASTM cone			EN cone					
			0h (sec)	1h (sec)	Αύξηση (%)	0h (sec)	1h (sec)	Αύξηση (%)			
(Papayianni & Pachta, 2012)	LP2	121	9,34						3,10	0,80	
	LP3	122	9,70						2,10	0,60	
	LP4	123	9,78						2,50	1,10	
	LP5	124	9,38						2,30	0,70	
	LP6	125	10,55						7,50	1,30	
	LP7	126	9,61						1,52	1,30	
	LPB1	127	9,59						2,10	1,50	
	LPB2	128	10,2						1,95	1,00	
	LPB3	129	9,9						2,67	1,10	
	LPB4	130	9,9						3,80	1,50	
	LPB5	131	10,15						3,20	1,10	
	LPB6	132	9,6						4,20	1,10	
	LPC1	133	9,5						7,50	1,80	
	LPC2	134	9,09						6,40	1,20	
	LPC3	135	9,17						2,30	1,70	
	LPC4	136	9,7						2	1,1	
	LPC5	137	10,05						3,32	6,95	
	LPC6	138	10,81						2,5	5,93	

9.3.Π.3. Ιδιότητες σε σκληρυμένη κατάσταση

Πηγές	Σύνθεση μείγματος	A/A	Δυν. Μέτρο Ελαστικότητας (Gpa)			Αντοχή σε Κάμψη (Mpa)			Αντοχή σε Θλίψη (Mpa)		
			28d	90d	180d	28d	90d	180d	28d	90d	180d
(Pachta, 2021A)	1	1	4,534	4,763	5,967	0,74	0,80	0,88	0,95	1,46	2,03
	2	2	2,107	2,772	4,016	0,53	0,82	1,02	1,30	1,71	2,76
	3	3	1,395	3,209	4,680	0,72	0,86	1,02	1,27	1,69	2,30
	4	4	4,228	4,288	5,255	0,64	0,89	0,97	0,93	1,98	2,47
	5	5	4,120	4,171	5,146	0,62	0,87	0,99	0,07	1,93	2,31
(Pachta, 2021B)	A1	6	2,083	2,770	5,951	0,74	0,80	0,88	0,95	1,45	2,02
	A2	7	1,398	3,209	4,675	0,72	0,87	1,01	1,27	1,68	2,31
	A3	8	1,874	3,856	5,324	0,58	0,86	1,01	1,36	1,62	2,54
	B1	9	3,494	4,371	6,599	1,44	1,78	1,82	1,65	3,26	3,59
	B2	10	2,694	3,322	4,733	0,98	1,81	1,90	1,66	3,48	3,75
	B3	11	3,170	3,685	5,800	0,92	1,75	1,99	1,58	3,71	4,08
(Pachta & Goulas, 2020)	LP	12	4,542	4,762		0,74	0,80		0,95	1,46	
	LP/31	13	2,038	4,311		0,51	0,82		1,14	1,70	
	LP/3 3	14	2,088	2,777		0,53	0,82		1,28	1,71	
	LP/6 1	15	1,962	3,015		0,46	0,75		1,29	1,47	
	LP/6 3	16	1,402	3,237		0,72	0,85		1,29	1,69	
	LP/1	17	1,897	3,863		0,58	0,86		1,35	1,63	
	NHL	18	6,265	4,368		1,43	1,78		1,65	3,27	
	NHL/3 1	19	3,209	3,438		1,18	1,79		1,94	3,67	
	NHL/3 3	20	2,520	3,478		0,90	1,82		1,38	3,69	
	NHL/6 1	21	2,791	3,493		0,91	1,72		1,77	3,47	
	NHL/6 3	22	2,688	3,324		0,98	1,81		1,67	3,49	
	NHL/1	23	5,164	5,797		0,92	1,75		1,59	3,72	
(Pachta, et al., 2020)	LP	24	1,900	2,800	3,300	0,59	0,64	0,72	1,00	2,10	3,00
	LPC	25	2,000	2,500	3,400	0,63	0,97	1,08	1,40	2,20	2,70
	NHL	26	1,800	3,200	3,800	0,60	1,15	1,20	0,99	2,35	3,15

Πηγές	Σύνθεση μείγματος	A/A	Δυν. Μέτρο Ελαστικότητας (Gpa)			Αντοχή σε Κάμψη (Mpa)			Αντοχή σε Θλίψη (Mpa)		
			28d	90d	180d	28d	90d	180d	28d	90d	180d
(Pachta, et al., 2019A)	LPs	27	1,450	2,150		0.58	0.65		1,01	2,15	
	HLs	28	1,170	1,980		0.61	0.92		0,99	2,33	
	D1S L	29	1,640	2,030		0.32	0.65		0,57	1,21	
	D1S Ls	30	1,040	6,180		0.10	0.35		1,36	3,45	
	D1S LC	31	1,120	2,600		0.19	0.70		0,63	1,29	
	D1S HL	32	3,280	6,380		0.42	0.57		1,25	4,55	
	D1S HLs	33	4,510	8,260		0.32	0.50		1,29	5,97	
	D1S LM	34	1,960	5,730		0.09	0.12		1,14	3,27	
	D1S LM _s	35	3,090	6,840		0.25	0.32		1,72	4,07	
	D1C L	36	0,680	1,180		0.14	0.20		0,35	0,82	
	D1C LC	37	0,610	1,020		0.12	0.10		0,79	1,86	
	D1C HL _s	38	4,410	9,570		0.38	0.44		1,59	3,98	
(Pachta, et al., 2019C)	LP	39	1,892	2,573	3,297	0,59	0,63	0,71	0,99	2,09	3,98
	LPWC	40	2,000	2,500	3,407	0,62	0,96	1,07	1,39	2,19	2,69
	NHL	41	1,791	3,148		0,60	1,15	1,20	0,98	3,34	3,14
(Papayianni, I.; Pachta, V., 2018)	A1	42									
	A2	43	0,004			0,13			0,55		
	A3	44	0,002			0,10			0,37		
	A4	45	0,002			0,09			0,32		
	A5	46	0,006			0,23			0,66		
	B1	47									
	B2	48	0,002			0,18			0,30		
	B3	49	0,003			0,16			0,33		
	B4	50	0,003			0,21			0,28		
	B5	51	0,002			0,19			0,34		
	AB1	52	0,002			0,70			1,02		
	AB2	53	0,002			0,27			0,38		
	AB3	54	0,001			0,09			0,13		
	AB4	55	0,001			0,15			0,20		
	AB5	56	0,002			0,35			0,76		

Πηγές	Σύνθεση μείγματος	A/A	Δυν. Μέτρο Ελαστικότητας (Gpa)			Αντοχή σε Κάμψη (Mpa)			Αντοχή σε Θλίψη (Mpa)		
			28d	90d	180d	28d	90d	180d	28d	90d	180d
(Pachta & Papayianni, 2016)	A1	57	0,021	0,023		0,04	0,10		1,14	2,29	
	A2	58									
	A3	59									
	A4	60	0,025	0,036		0,06	0,08		0,74	1,58	
	A5	61	0,031	0,043		0,04	0,07		0,58	1,44	
	A6	62	0,020	0,037		0,04	0,07		0,55	1,30	
	A7	63	0,017	0,037		0,04	0,10		0,73	1,80	
	A8	64	0,037	0,044		0,07	0,10		1,01	2,18	
	A9	65	0,032	0,048		0,05	0,12		0,76	1,69	
(Papayianni & Pachta, 2015)	L1	66	–	0,005		–	0,21		–	0,69	
	L2	67	0,010	0,009		0,25	0,29		0,29	0,75	
	L3	68	0,011	0,009		0,29	0,44		0,47	1,06	
	L4	69	–	–		–	–		–	–	
	L5	70	0,013	–		0,08	–		0,12	–	
	L6	71	0,013	0,003		0,12	0,38		0,24	0,67	
	L7	72	0,046	–		1,15	–		1,76	2,25	
	L8	73	0,046	–		1,18	–		2,17	3,00	
	LP1	74	0,018	–		0,57	0,22		0,89	4,45	
	LP2	75	0,023	0,032		0,75	0,30		1,73	4,79	
	LP3	76	0,033	0,046		1,04	1,24		2,51	5,39	
	LP4	77	0,003	–		0,01	–		0,26	–	
	LP5	78	0,004	–		0,06	–		0,85	–	
	LP6	79	0,051	–		1,03	–		2,49	–	
	LP7	80	0,048	–		0,97	–		2,94	–	
	LP8	81	0,019	–		0,58	–		1,17	–	
	LP9	82	0,018	–		0,66	–		1,37	–	
	LPB1	83	0,022	0,018		0,54	–		0,82	3,33	
	LPB2	84	0,025	0,028		0,84	1,18		1,72	4,75	
	LPB3	85	0,025	0,032		0,87	1,30		1,91	5,07	
	LPB4	86	0,010	0,019		0,41	0,55		0,71	2,92	
	LPB5	87	0,017	0,018		0,54	0,60		1,46	3,06	
	LPB6	88	0,022	0,027		0,77	2,13		1,84	5,05	
	LPC1	89	0,014	0,014		0,27	0,38		0,46	2,17	
	LPC2	90	0,017	0,017		0,55	0,68		0,88	2,89	
	LPC3	91	0,037	0,028		0,28	0,63		0,29	1,84	

Πηγές	Σύνθεση μείγματος	A/A	Δυν. Μέτρο Ελαστικότητας (Gpa)			Αντοχή σε Κάμψη (Mpa)			Αντοχή σε Θλίψη (Mpa)		
			28d	90d	180d	28d	90d	180d	28d	90d	180d
(Papayianni & Pachta, 2015)	LPC4	92	0,043	0,031		0,94	0,71		1,52	3,57	
	LPC5	93	0,004	–		0,13	–		0,21	1,12	
	LPC6	94	0,006	0,008		0,23	0,28		0,66	1,22	
(Papayianni, et al., 2012)	A1	95	0,046			0,76			1,15		
	A2	96	0,029			0,47			0,74		
	A3	97	0,033			0,74			0,71		
	A4	98	0,030			0,67			0,59		
	A5	99	0,022			0,55			0,95		
	A6	100	0,031			0,30			0,79		
	B1	101	0,019			0,58			0,90		
	B2	102	0,017			0,51			0,69		
	C1	103	0,038			0,45			0,87		
	C2	104	0,021			0,39			0,87		
	C3	105	0,027			0,41			1,01		
	D1	106	0,049			1,09			1,64		
	D2	107	0,032			0,70			0,99		
	E1	108	0,046			1,15			1,76		
	E2	109	0,055			1,20			2,93		
(Papayianni & Pachta, 2012)	L1	110	-	0,005		-	0,21		-	0,69	
	L2	111	0,010	0,009		0,25	0,29		0,29	0,75	
	L3	112	0,011	0,009		0,29	0,44		0,47	1,06	
	L4	113	-	-		-	-		-	-	
	L5	114	0,013	-		0,08	-		0,12	-	
	L6	115	0,013	0,003		0,12	0,38		0,24	0,67	
	L7	116	0,019	-		0,58	-		1,17	-	
	L8	117	0,018	-		0,46	-		0,87	-	
	L9	118	0,046	-		1,15	-		1,76	-	
	L10	119	0,046	-		1,18	-		2,17	-	
	LP1	120	0,018	-		0,57	0,22		0,89	4,45	

Πηγές	Σύνθεση μείγματος	A/A	Δυν. Μέτρο Ελαστικότητας (Gpa)			Αντοχή σε Κάμψη (Mpa)			Αντοχή σε Θλίψη (Mpa)		
			28d	90d	180d	28d	90d	180d	28d	90d	180d
(Papayianni & Pachta, 2012)	LP2	121	0,023	0,032		0,75	0,30		1,73	4,79	
	LP3	122	0,033	0,046		1,04	1,24		2,51	5,39	
	LP4	123	0,003	-		0,01	-		0,26	-	
	LP5	124	0,004	-		0,06	-		0,85	-	
	LP6	125	0,051	-		1,03	-		2,49	-	
	LP7	126	0,048	-		0,97	-		2,34	-	
	LPB1	127	0,022	0,018		0,54	-		0,82	3,33	
	LPB2	128	0,025	0,028		0,84	1,18		1,72	4,75	
	LPB3	129	0,025	0,032		0,87	1,30		1,75	4,27	
	LPB4	130	0,010	0,019		0,41	0,55		0,88	4,16	
	LPB5	131	0,017	0,018		0,54	0,60		1,46	3,06	
	LPB6	132	0,022	0,027		0,77	2,13		1,84	5,05	
	LPC1	133	0,014	0,014		0,27	0,38		0,46	2,17	
	LPC2	134	0,017	0,017		0,55	0,68		0,88	2,89	
	LPC3	135	0,037	0,028		0,28	0,63		0,29	3,34	
	LPC4	136	0,043	0,031		0,94	0,71		1,52	3,57	
	LPC5	137	0,004	-		0,13	-		0,55	-	
	LPC6	138	0,006	0,008		0,23	0,28		0,66	1,22	

Βιβλιογραφία

- Biçer-Simsir B., and Rainer L.** (2011). Evaluation of Lime-Based Hydraulic Injection Grouts for the Conservation of Architectural Surfaces A Manual of Laboratory and Field Test Methods. Los Angeles.
- Biçer-şimsir, Beril, Isobel Griffin, Bénédicte Palazzo-Bertholon, and Leslie Rainer.** (2009). “Lime-Based Injection Grouts for the Conservation of Architectural Surfaces.” *Studies in Conservation* 54 (sup1): 3–17. <https://doi.org/10.1179/sic.2009.54.supplement-1.3>.
- Biçer-Şimsir, Beril, and Leslie Rainer.** (2018). “Grouting in Conservation.” In *The Encyclopedia of Archaeological Sciences*, 1–5. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781119188230.saseas0273>.
- B.S. 1881 : part 209.** (1990). “British Standard Testing Concrete Part 209. Recommendation for the Measurment of Dynamic Modulus of Elasticity.”
- BSi.** (2007). Grout for Prestressing Tendons-Test Methods. British Standard.
- CEN.** (2002a). “Cement - Part 1: Composition, Specifications and Conformitycriteria for Common Cements.” EN 197-1. EUROPEAN STANDARD.
- . (2002b). “Determinationof Water Absorption Coefficient Due to Capillary Action of Hardened Mortar.” EN 1015-18. European Standar.
- Davis, Suzanne L., Caroline Roberts, and Janelle Batkin-Hall.** (2018). “A Comprehensive Approach to Conservation of Ancient Graffiti at El Kurru, Sudan.” *Journal of the American Institute for Conservation* 57 (1–2): 1–18. <https://doi.org/10.1080/01971360.2018.1424601>.
- Duffy J.** (2015). “Controlling Suspension Rheology: The Physical Characteristics of Dispersed Particles Have a Large Impact on Overall Rheological Properties.” *Chemical Engineering* 122 (1).
- Filip, Doctoraatsthesis, and Van Rickstal.** (2001). “Grout Injection of Masonry, Scientific Approach and Modeling.”
- Funahashi, Miki, and Todd Sirola.** (2014). “Cost Effective Cathodic Protection System for Concrete Structures Rebar Corrosion Control View Project Innovation-Cost Effective Cathodic Protection System for Concrete Structures.” <https://www.researchgate.net/publication/293109666>.
- Greek Boston.** (2021). “Daphni-Monastery-Athens-720x480.Jpg (720×480).” 2021. <https://www.greekboston.com/wp-content/uploads/2009/07/Daphni-Monastery-Athens-720x480.jpg>.
- Hilal, Nahla, Assist A Ibrahim S AL-Jumaily, Nahla Naji, and Qays Kareem.** (2015). “An Overview on the Influence of Pozzolan Materials on Properties of Concrete.” *Science Technology & Engineering*. Vol. 4. <https://www.researchgate.net/publication/283578812>.
- Kewalramani, Manish, and Ahmad Khartabil.** (2021). “Porosity Evaluation of Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials for Durability Assessment through Volume of Permeable Voids and Water Immersion Conditions.” *Buildings* 11 (9). <https://doi.org/10.3390/buildings11090378>.
- Kumar M., and Montairo P.** (2009). Σκυρόδεμα Μικροδομή, Ιδιότητες Και Υλικά . Κλειδάριθμος.
- Lampropoulos, Kyriakos C., Maria Apostolopoulou, Elisavet Tsilimantou, and Antonia Moropoulou.** (2022). “The Grouting Process as an Innovative Tool for the Assessment of the State of Preservation and Internal Features of the Holy Aedicule of the Holy Sepulchre.” *Heritage* 5 (1): 61–87. <https://doi.org/10.3390/heritage5010004>.
- Littlejohn S.** (2003). “The Development of Practice in Permeation and Compensation Grouting A History Review (1802-2002) Part 1 Permeation Grouting.” In *Third International Conference on Grouting and Ground Treatment*.

- Miltiadou-Fezans, A., and T. P. Tassios.** (2013a). “Penetrability of Hydraulic Grouts.” *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 46 (10): 1653–71. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-0005-1>.
- . (2013b). “Stability of Hydraulic Grouts for Masonry Strengthening.” *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 46 (10): 1631–52. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-0003-3>.
- Miltiadou-Fezans A., Tassios T. P., Delinikolas N., Chorafa E., Zarogianni E., and Chandrinos I.** (2003). “Earthquake Structural Problems and Urgent Measures Undertaken to Support the Katholikon of Dafni Monastery in Athens, Greece.” *Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture VIII* 66. www.witpress.com.
- Miltiadou-Fezans, A., and Th. Tassios.** (2012a). “Fluidity of Hydraulic Grouts for Masonry Strengthening.” *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 45 (12): 1817–28. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9872-8>.
- Miltiadou-Fezans, A., and Theodossios P. Tassios.** (2012b). “Fluidity of Hydraulic Grouts for Masonry Strengthening.” *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 45 (12): 1817–28. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9872-8>.
- Nonveiller, E.** (1989). *Grouting Theory and Practice*. Elsevier.
- Pachta, V.** (2021a). “Development and Testing of Fiber Reinforced Lime-Based Grouts.” In 14th International Congress on Advances in Civil Engineering. Istanbul: ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/354947102>.
- . (2021b). “The Role of Glass Additives in the Properties of Lime-Based Grouts.” *Heritage* 4 (2): 906–16. <https://doi.org/10.3390/HERITAGE4020049>.
- Pachta, V., and Papayianni I.** (2016). “Influence of Resins on the Properties of Lime-Pozzolan Grouts for Surface Consolidation.” In 4th Historic Mortars Conference. Santorini: ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/310603700>.
- Pachta, Vasiliki, and Dimitrios Goulas.** (2020a). “Fresh and Hardened State Properties of Fiber Reinforced Lime-Based Grouts.” *Construction and Building Materials* 261 (November). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119818>.
- . (2020b). “Fresh and Hardened State Properties of Fiber Reinforced Lime-Based Grouts.” *Construction and Building Materials* 261 (November). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119818>.
- Pachta, Vasiliki, Fotis Papadopoulos, and Maria Stefanidou.** (2019). “Development and Testing of Grouts Based on Perlite By-Products and Lime.” *Construction and Building Materials* 207 (May): 338–44. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.157>.
- Pachta, Vasiliki, Papayianni I., and Thomas Spyrliotis.** (2019). “Lime-Based Grouts for Architectural Surface Repair. Comparison of Their Performance by Using Laboratory and Field Test Methods.” <https://www.researchgate.net/publication/337561389>.
- Papayianni I., Karvounaris Th., and Pachta V.** (2016). “Reattachment of a Wall Painting in a 16th Century Post-Byzantine Church.” In 4th Historic Mortars Conference. Santorini: ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/310603887>.
- Papayianni I., Pachta V., and Stefanidou M.** (2012). “Experimental Study of Nano-Modified Lime-Based Grouts.” *Word Journal of Engineering* 9 (6): 501–8.
- Papayianni, Ioanna, and Vasiliki Pachta.** (2012). “HIGH PERFORMANCE LIME BASED GROUTS FOR REPAIR OF HISTORIC MASONRIES.” In 8th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions. Wrocław, Poland.
- Pasian Ch.** (2020). “Injection Grouting for Delaminated Wall Paintings: Approach, Design, Challenges.” India.
- Pasian, Chiara, Charlotte Martin de Fonjaudran, and Amarilli Rava.** (2020). “Innovative Water-Reduced Injection Grouts for the Stabilisation of Wall Paintings in the Hadi Rani

- Mahal, Nagaur, India: Design, Testing and Implementation.” *Studies in Conservation* 65 (S1): 244–50. <https://doi.org/10.1080/00393630.2020.1761179>.
- Pasian, Chiara, Francesca Piqué, Albert Jornet, and Sharon Cather.** (2019). “A ‘Sandwich’ Specimen Preparation and Testing Procedure for the Evaluation of Non-Structural Injection Grouts for the Re-Adhesion of Historic Plasters.” *International Journal of Architectural Heritage* 15 (3): 455–66. <https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1626513>.
- Pasian, Chiara, Michele Secco, Francesca Piqué, Gilberto Artioli, Stephen Rickerby, and Sharon Cather.** (2018). “Lime-Based Injection Grouts with Reduced Water Content: An Assessment of the Effects of the Water-Reducing Agents Ovalbumin and Ethanol on the Mineralogical Evolution and Properties of Grouts.” *Journal of Cultural Heritage* 30 (March): 70–80. <https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2017.10.003>.
- Qixian, Luo, and J H Bungeyt.** (1996). “Using Compression Wave Ultrasonic Transducers to Measure the Velocity of Surface Waves and Hence Determine Dynamic Modulus of Elasticity for Concrete.” *Construction and Building Materials*. Vol. 10.
- Singh, Malkit.** (2018). “Coal Bottom Ash.” In *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete*, 3–50. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00001-8>.
- THE VENICE CHARTER.** (1964). *INTERNATIONAL CHARTER FOR THE CONSERVATION AND RESTORATION OF MONUMENTS AND SITES (THE VENICE CHARTER 1964)*.
- Verfel J.** (1989). “The History of Grouting.” *Developments in Geotechnical Engineering* 55 (C): 19–29. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-98890-4.50006-1>.
- Vintzileou, Elizabeth, and Androniki Miltiadou-Fezans.** (2008). “Mechanical Properties of Three-Leaf Stone Masonry Grouted with Ternary or Hydraulic Lime-Based Grouts.” *Engineering Structures* 30 (8): 2265–76. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.11.003>.
- WSDOT.** (2017). “Test Method for ASTM C 939 1 Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method).”
- Γουλάς Α.** (2020). “Επίδραση Ειδικών Προσθέτων Στις Ιδιότητες Ενεμάτων Βασισμένων Στην Άσβεστο.” Θεσσαλονίκη: Α.Π.Θ.
- ΕΛΟΤ.** (2018). “Εφαρμογή Ενεμάτων Σε Υφιστάμενες Τοιχοποιίες Application of Grouting in Existing Mansory.” ΕΛΟΤΤΠ 1501-14-02-04-00.
- Καραγιαννάκη Α.** (2017). “Πειραματική Αποτίμηση Των Μηχανικών Και Ρεολογικών Χαρακτηριστικών Υδραυλικών Ενεμάτων Σε Φέροντες Λιθοδομές Με Πηλοκονίαμα.” Αθήνα: ΕΜΠ.
- Καρβουνάρης Α.** (2014). “Μελέτη Ενεμάτων Στερέωσης Και Εφαρμογή Στις Τοιχογραφίες Του Μνημείου : Ι.Ν. Παναγίας Φανερωμένης / Ν. Σκιώνης Χαλκιδικής.” Θεσσαλονίκη : ΑΠΘ.
- Μοροπούλου, Α, and Κ Λαμπρόπουλος.** (2014). “Τσιμέντο & Σκυρόδεμα.” Διάλεξη Για “Δομικά Υλικά.” Αθήνα: ntua.
- Μπουντά Ου.** (2007). “Η Εφαρμογή Των Ενεμάτων Στην Αποκατάσταση Των Μνημείων.” Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Παπαδόπουλος Φ.** (2018). “Παρασκευή Και Έλεγχος Ενεμάτων Βασισμένα Στην Άσβεστο Και Σε Βιομηχανικά Παραπροϊόντα Επεξεργασίας Του Πετρίτη.” Θεσσαλονίκη: Α.Π.Θ.
- Προβιάκης Κ.** (2013). “Τευχος 3 : Εργαστηριακές Ασκήσεις.” Διάλεξη Για “Αρχιτεκτονική Τεχνολογία : Οπλισμένο Σκυρόδεμα.” Χανιά: TUC.
- Σταυρουλάκη Μ.** (2015). “Προστασία Και Ανάδειξη Αρχαιολογικών Χώρων Και Μνημείων.” Χανιά.
- T.E.E.** (2020). “Κονιάματα.” *Material Guides*. December 5, 2020. http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/P_KONIAMATA/ko1.htm.

Πηγές Εικόνων

- ANNA Zagorski A.** (2019). An International Conservation Partnership Is Preserving Herculaneum, Ancient Roman Town Buried by Vesuvius | Getty Iris. <https://blogs.getty.edu/iris/an-international-conservation-partnership-is-preserving-herculaneum-ancient-roman-town-buried-by-vesuvius/>
- FIXMAX.** (2019). Products - Perlite. <http://www.fixmaxperlite.com/en/products>
- Hagia Sofia.** (2022). 25 Images of Byzantine Mosaics from Daphni - Hagia Sophia History. <https://www.pallasweb.com/deesis/25-images-from-the-daphni-monastery-church.html>
- Madain Project.** (2022). Aedicule - Madain Project. <https://madainproject.com/aedicule>
- Mounier, A., Daniel, F., & Bechtel, F.** (2011). Gilding Techniques in Mural Paintings: Three Examples from the Romanesque Period in France. Proceedings of the 37th International Symposium on Archaeometry, 13th - 16th May 2008, Siena, Italy, 273–278. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14678-7_39
- Petrella, A., Spasiano, D., Rizzi, V., Cosma, P., Race, M., & de Vietro, N.** (2018). Lead ion sorption by perlite and reuse of the exhausted material in the construction field. Applied Sciences (Switzerland), 8(10). <https://doi.org/10.3390/APP8101882>
- SHIVAM.** (2020). Differences Between Hydrated Lime and Quicklime | Shivam Chemicals Blog. <https://www.shivamchem.com/blog/differences-between-hydrated-lime-and-quicklime/>
- SOFTWARE INFO.** (2017). marsh cone test for passing ability of mortar. <http://softwareinfo06.blogspot.com/2017/04/marsh-cone-test-for-passing-ability-of.html>
- Wikimedia Commons.** (2020). Restoration Wall Paintings, Ephesus. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Restoration_Wall_Paintings,_Ephesus.jpg
- E&T.** (2021). Art restoration and conservation: restoring former glories | E&T Magazine. <https://eandt.theiet.org/content/articles/2019/05/art-restoration-and-conservation-restoring-former-glories/>
- ΝΙΚΟΛΟΠΟΥΛΟΣ Ο.** (2019). Διερεύνηση της ποζολανικής ιδιότητας Ζεολίθου, Περλίτη και φυσικής Ποζολάνας με χρήση υδρασβέστου [Διπλωματική]. TUC.