

ΤΕ.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ
ΤΜΗΜΑ ΔΟΜΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΩΝ **ΕΝΕΜΑΤΩΝ** ΣΤΙΣ ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ ΚΤΙΡΙΩΝ ΑΠΟ ΦΕΡΟΥΣΑ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

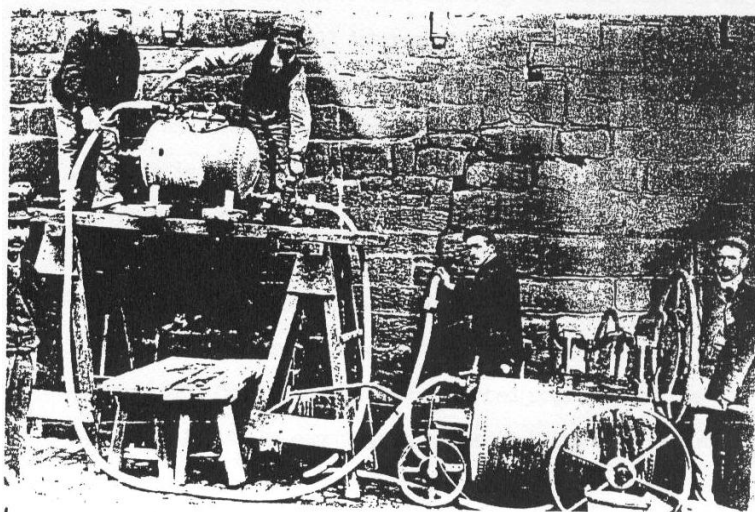
Κωστάκη Κ. Δήμητρας

Τζανέτου Δ. Αικατερίνης

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ

Νικολέττα Ψύλλα

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός



ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2009

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Εισαγωγή.....	7
---------------	---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ ΑΠΟ ΦΥΣΙΚΟΥΣ ΛΙΘΟΥΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΗΣ

2.1 Υλικά δόμησης φέρουσας τοιχοποιίας από φυσικούς λίθους.....	9
2.1.1 Φυσικά τοιχοσώματα.....	11
2.1.2 Συνδετικά κονιάματα.....	12
2.1.3 Φέρουσα τοιχοποιία.....	14
2.2 Κατηγορίες τοιχοποιιών.....	15

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΗΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ

3.1 Μηχανικά χαρακτηριστικά.....	26
3.1.1 Φυσικά τοιχοσώματα.....	26
3.1.2 Κονιάματα.....	27
3.1.3 Φέρουσα τοιχοποιία.....	29
3.2 Είδη φορτίσεων στην άοπλη τοιχοποιία.....	29
3.2.1 Θλιπτική αντοχή.....	30
3.2.2 Θλιπτικές παραμορφώσεις.....	39
3.2.3 Εφελκυστική αντοχή.....	42
3.2.4 Διατμητική αντοχή υπό θλίψη.....	44
3.25 Ανακυκλιζόμενη διάτμηση.....	58

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ ΦΕΡΟΥΣΩΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΩΝ

4.1 Αιτίες που προκαλούν τις βλάβες στη φέρουσα τοιχοποιία.....	60
4.2 Κατηγοριοποίηση βλαβών.....	63
4.3 Περιγραφή/Απεικόνιση βλαβών τοιχοποιιών.....	68

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ

5.1	Παράγοντες επιλογής του είδους επέμβασης.....	72
5.2	Μέθοδοι επέμβασης.....	72

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΕΝΕΜΑΤΩΝ

Γενικά.....	74
-------------	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΝΕΜΑΤΩΝ

7.1	Ορισμός.....	76
7.2	Διερεύνηση του εσωτερικού της τοιχοποιίας και του μικροκλίματος.....	77
7.3	Απαιτήσεις επιτελεστικότητας.....	77

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΝΕΜΑΤΩΝ

8.1	Πολυμερή ενέματα.....	82
8.2	Υδραυλικά ενέματα.....	83
8.3	Συνθέσεις ενεμάτων με λεπτόκοκκα υλικά.....	87

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΕΝΕΜΑΤΩΝ

9.1	Φάσεις υδραυλικού ενέματος.....	89
9.1.1	Ένεμα σε υγρή κατάσταση.....	89
9.1.2	Ένεμα κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης.....	89
9.1.3	Ένεμα μετά τη στερεοποίηση.....	90
9.2	Ενεσιμότητα υδραυλικού ενέματος.....	90
9.2.1	Διεισδυτικότητα.....	91
9.2.2	Σταθερότητα.....	97
9.2.3	Ρευστότητα.....	104
9.3	Μηχανικές ιδιότητες.....	110
9.3.1	Υδραυλικό ένεμα.....	110
9.3.2	Τοιχοποιία μετά την εφαρμογή της μεθόδου.....	113
9.4	Παράγοντες επιρροής ενεσιμότητας του υδραυλικού ενέματος.....	120
9.4.1	Πήξη.....	120

9.4.2	Αστάθεια μείγματος.....	120
9.4.3	Απορρόφηση νερού από λιθοδομή.....	121
9.4.4	Γεωμετρικοί παράγοντες.....	121

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10 ΠΡΩΤΕΣ ΥΛΕΣ - ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ

10.1	Τσιμέντο.....	123
10.2	Νερό.....	124
10.3	Ποζολάνη.....	124
10.4	Υδράσβεστος.....	125
10.4.1	Υδράσβεστος σε σκόνη.....	125
10.4.2	Υδράσβεστος σε πολτό.....	125
10.5	Πρόσθετα-Πρόσμικτα.....	125
10.6	Άμμος.....	126

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

11.1	Εξοπλισμός.....	127
11.1.1	Βαθμίδα ανάμιξης.....	127
11.1.2	Βαθμίδα ανάδευσης.....	127
11.1.3	Αντλία ενέματος.....	128
11.1.4	Αγωγοί.....	129
11.1.5	Σύστημα υποδοχής ενέματος.....	129
11.1.6	Επισημάνσεις.....	130
11.2	Ανάμιξη.....	130
11.3	Προσωπικό.....	130

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΕΝΕΜΑΤΩΝ

12.1	Προετοιμασία τοιχοποιίας.....	132
12.1.1	Ενέματα ομοιγενοποιημένης μάζας.....	132
12.1.2	Ενέματα σε θέσεις τοπικών φθορών-βλαβών ή επεμβάσεων.....	135
12.2	Μέθοδοι εφαρμογής.....	136
12.2.1	Εισαγωγή ενέματος υπό πίεση.....	136
12.2.2	Έκχυση ενέματος με το χέρι- Hand Grouting.....	140
12.2.3	Σύστημα βαρύτητας- Gravity Grouting.....	141
12.2.4	Συστήματα άντλησης.....	144
12.2.5	Αναρροφητικά συστήματα.....	144

12.3	Έλεγχοι.....	145
12.3.1	Οπτικός έλεγχος.....	145
12.3.2	Έλεγχος χαρακτηριστικών του ενέματος.....	146
12.3.3	Έλεγχος αποτελεσματικότητας της επέμβασης.....	146
12.4	Κριτήρια αποδοχής.....	146
12.4.1	Οπτικός έλεγχος.....	146
12.4.2	Έλεγχος χαρακτηριστικών του ενέματος.....	147
12.4.3	Έλεγχος αποτελεσματικότητας της επέμβασης των ενεμάτων.....	147
12.4.4	Επανέλεγχος – Διορθωτικά μέσα.....	147

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 13 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΦΕΡΟΥΣΑ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΕΝΕΜΑΤΩΝ

13.1	Ενέματα αποκατάστασης των πτερύγων κελιών του εσωτερικού περιβόλου της Ι. Μ. Δαφνίου.....	148
13.2	Στερέωση και αποκατάσταση της ΒΑ πτέρυγας των κελιών της Ι.Μ. Οσίου Λουκά Βοιωτίας.....	156
13.3	Στερέωση και αποκατάσταση του Ι.Ν. της Αγίας Ειρήνης στην Αθήνα.....	161

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 14 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΕΝΕΜΑΤΩΝ

Συμπεράσματα.....	166
-------------------	-----

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	169
--------------------------	------------

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία δε θα ήταν δυνατό να διεκπεραιωθεί χωρίς την ουσιαστική συμβολή ενός συνόλου ανθρώπων, τους οποίους θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά.

Αρχικά, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ειλικρινά την επιβλέπουσα της πτυχιακής μας εργασίας κ. Ψύλλα Νικολέττα, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, για την πολύτιμη υποστήριξη και καθοδήγηση που μας προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Επίσης, θα θέλαμε να την ευχαριστήσουμε για την υπομονή, την άψογη συνεργασία, την κατανόηση καθώς και για τη φιλική διάθεση με την οποία μας αντιμετώπισε.

Επίσης, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την κ. Μιλτιάδου-Fezans A., Δρ. Πολιτικός Μηχανικός και την κ. Καλαγρή A., MSc Χημικός Μηχανικός, για το πολύτιμο υλικό που μας παραχώρησαν. Υπήρξαν ιδιαίτερα συνεργάσιμες και πρόθυμες για την παροχή διευκρινήσεων.

Η ΕΜΦΡΑΣΗ
ΑΦΑΙΡΕΙΤΑΙ
ΑΦΟΥ
ΤΟΠΟΘΕΤΗΘΕΙ
ΤΟ ΕΝΕΜΑ

Απρίλιος 2009

Κωστάκη Κ. Δήμητρα

Τζανέτου Δ. Αικατερίνη

4m=ΠΕΡΙΠΛΟΥ 1.00K/g/cm²

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η φέρουσα τοιχοποιία από φυσικούς λίθους είναι το αρχαιότερο δομικό στοιχείο που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος προκειμένου να δημιουργήσει μόνιμες κατασκευές όπως κατοικίες, ναούς, γέφυρες κ.ά.

Ο συγκεκριμένος τρόπος δόμησης παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως την εξασφάλιση υψηλών αντοχών και ανθεκτικότητας, την ταχύτητα και ευκολία κατασκευής, την άμεση άντληση ποικίλων δομικών υλικών από το κοντινό περιβάλλον, το αισθητικό αποτέλεσμα κ.ά.

Αρχικά οι κατασκευές αυτές αποτελούνταν μόνο από φυσικά τοιχοσώματα ενώ αργότερα τις συναντάμε με συνδετικό κονίαμα, ο συνδυασμός των οποίων χρησιμοποιήθηκε για τη βελτίωση της συμπεριφοράς τους καθιστώντας τις πιο ανθεκτικές και κατά συνέπεια πιο ασφαλείς.

Δομικά έργα κατασκευασμένα από φυσικούς λίθους μεγάλης κοινωνικής και πολιτιστικής αξίας σχεδιάστηκαν, κατασκευάστηκαν και άντεξαν στο χρόνο επιδεικνύοντας ικανοποιητική συμπεριφορά. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο σωστό σχεδιασμό τους, στην επιλογή κατάλληλων υλικών και στην ορθή δόμησή τους προσαρμοσμένα όλα στις υπάρχουσες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Παραδείγματα τέτοιων έργων, από το μακρινό έως και το κοντινό παρελθόν, είναι η πλειοψηφία των αρχαίων ελληνικών μνημείων, το Σινικό Τείχος, οι κατοικίες/πύργοι της Μάνης, το γεφύρι της Άρτας κ.ά.

Εντούτοις, παράγοντες όπως η φυσική φθορά, η διάβρωση, οι τυχηματικές δράσεις κ.ά. επηρέασαν τις κατασκευές προκαλώντας τους βλάβες. Συνεπώς, η γνώση της μηχανικής συμπεριφοράς τέτοιου τύπου κατασκευών από φυσικούς λίθους κρίνεται απαραίτητη λόγω της ανάγκης συντήρησης, επισκευής και αποκατάστασης ή/και βελτίωσης της συμπεριφοράς τους, κυρίως όπου το παραδοσιακό στοιχείο επικρατεί και προστατεύεται από ιστορικής και αρχιτεκτονικής άποψης.

Οι λιθοδομές χαρακτηρίζονται από πολυμορφία σε ό,τι αφορά στα υλικά και στον τρόπο δόμησής τους, γεγονός που καθιστά δύσκολο το έργο της αποτίμησης της φέρουσας ικανότητάς του κάθε στοιχείου μεμονωμένα αλλά και του συνόλου της κατασκευής, καθώς επίσης και την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου επέμβασης.

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται η διερεύνηση και παρουσίαση των βασικών αρχών και απαιτήσεων για την επιλογή και υλοποίηση της τεχνικής των ενεμάτων ως μεθόδου επέμβασης σε υφιστάμενα κτίρια από φέρουσα τοιχοποιία με φυσικούς λίθους. Με τη μέθοδο των ενεμάτων επιτυγχάνεται η αποκατάσταση της συνέχειας, της συνοχής και της αντοχής των λιθοδομών με τη μικρότερη δυνατή διατάραξή τους, χωρίς να αλλοιώνεται η εξωτερική μορφή και γεωμετρία τους και χωρίς να αλλάζει το δομητικό σύστημά τους.

Για το σκοπό αυτό η εργασία διαρθρώνεται ως εξής. Αρχικά εξετάζεται η μηχανική συμπεριφορά των συνιστώντων υλικών της τοιχοποιίας (λιθοσώματα, κονιάματα) αλλά και της τοιχοποιίας ως σύνθετο υλικό, ενώ παρουσιάζονται οι συνήθεις τρόποι φόρτισης και αστοχίας τέτοιου τύπου κατασκευών.

Στη συνέχεια εξετάζονται οι βασικές αρχές και απαιτήσεις για την επιλογή και υλοποίηση της τεχνικής των ενεμάτων. Δεδομένου ότι πρόκειται για μια μη αναστρέψιμη μέθοδο είναι πολύ σημαντική η επιλογή των πρώτων υλών του ενέματος καθώς και η μεταξύ τους σύνθεση η οποία πρέπει να γίνεται μετά από εκτεταμένη έρευνα ώστε το τελικό μείγμα να καλύπτει τις επιθυμητές απαιτήσεις επιτελεστικότητας. Συνεπώς στο μέρος αυτό της εργασίας διερευνώνται οι επιθυμητές ιδιότητες των ενεμάτων οι οποίες είναι άμεσα εξαρτώμενες από τη φύση και την ανάγκη επισκευής/ενίσχυσης της λιθοδομής όπου πρόκειται να εφαρμοστούν (συμβατότητα παλαιών και νέων υλικών, ομοιογένεια στο σύνολο της λιθοδομής, απαιτούμενα μηχανικά χαρακτηριστικά). Τέλος, παρουσιάζονται θέματα σχετικά με τον απαιτούμενο εξοπλισμό, τις μεθόδους εφαρμογής των ενεμάτων καθώς και τα κριτήρια αποδοχής τέτοιου τύπου επεμβάσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ ΑΠΟ ΦΥΣΙΚΟΥΣ ΛΙΘΟΥΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΗΣ

2.1 Υλικά δόμησης φέρουσας τοιχοποιίας από φυσικούς λίθους

Τα κυρίως δομικά υλικά μίας κατασκευής από φέρουσα τοιχοποιία με φυσικούς λίθους είναι τα **φυσικά τοιχοσώματα** και το **συνδετικό κονίαμα των αρμών**. Άλλα υλικά που συναντάμε στις λιθοδομές είναι οι μεταλλικοί σύνδεσμοι, οι ξύλινοι δοκοί, ξύλινα ή κεραμικά στοιχεία σε οριζόντια διάταξη που λειτουργούν ως σενάζ, τα επιχρίσματα κ.ά.

Η αντοχή των υλικών μεμονωμένα αλλά και στο σύνολο τους και η σωστή δόμησή τους είναι παράγοντες που επηρεάζουν τη στατική λειτουργία της λιθοδομής με άμεσο ή έμμεσο τρόπο. Για οποιαδήποτε πιθανή επέμβαση επισκευής/ενίσχυσης είναι απαραίτητο να γίνονται γνωστά τα μηχανικά χαρακτηριστικά των παραπάνω στοιχείων, αλλά και της τοιχοποιίας ως ενιαίο υλικό, για την πιο σαφή εικόνα της υπάρχουσας κατάστασής της. Η προσέγγιση αυτή επιτυγχάνεται μετά από επιτόπιους και εργαστηριακούς ελέγχους.

Τα **φυσικά τοιχοσώματα** είναι τα κυρίως υλικά μίας λιθοδομής που αποσπώνται από το περιβάλλον και ορίζουν τον τρόπο δόμησης και το πάχος της λιθοδομής καθορίζοντας σε μεγάλο βαθμό τη γενικότερη συμπεριφορά της, καθώς καλύπτουν τη μεγαλύτερη επιφάνεια της. Τα υλικά αυτά χαρακτηρίζονται από την αντοχή (χαμηλής, μεσαίας και υψηλής τάξεως), το μέγεθος, τη γεωμετρία τους κ.ά. και συναντάται μεγάλη ποικιλία τέτοιων. Η επιλογή μίας ποιότητας τοιχοσωμάτων έχει σχέση με τις απαιτούμενες αντοχές που επιδιώκουμε να έχει η λιθοδομή, την ευκολία επεξεργασίας τους κ.ά.

Τα **συνδετικά κονιάματα** είναι μείγματα που παρασκευάζονται από λεπτόκοκκα αδρανή, κονίες, πρόσθετα συστατικά και νερό και εφαρμόζονται ανάμεσα στα τοιχοσώματα για τη σύνδεσή τους. Είναι σε ρευστή μορφή κατά την εφαρμογή τους και σκληραίνουν με την πάροδο

του χρόνου. Παρά το μικρό όγκο που καταλαμβάνουν στην τοιχοποιία η επιρροή τους στην αντοχή της είναι σημαντική.

Η ποιότητα μίας λιθοδομής έχει άμεση σχέση με αυτή των τοιχοσωμάτων, της συνδετικής κονιάς και των υλικών αγκύρωσής τους και εξαρτάται από την ποιότητα, την αναλογία και τη συνεργασία των υλικών που την αποτελούν, τον τρόπο δόμησής τους, την ομοιομορφία των ιδιοτήτων τους κ.ά.

Παραδείγματα κατασκευών φέρουσας τοιχοποιίας από φυσικούς λίθους



Εικ. 2.1: Κτίσμα από τοιχοσώματα και συνδετικό κονίαμα.



Εικ. 2.2 : Κτίσματα με επικάλυψη επιχρίσματος (σοβάς).



Εικ. 2.3: Μεταλλικοί σύνδεσμοι στο σημείο ένωσης εγκάρσιων τοίχων.



Εικ. 2.4: Ξύλινο στοιχείο στήριξης της τοιχοποιίας στο πρέκι.

2.1.1 Φυσικά τοιχοσώματα⁽⁷⁾

Τα φυσικά τοιχοσώματα είτε συλλέγονται από το φυσικό περιβάλλον για το μέγεθος και το σχήμα τους είτε αποσπώνται από μεγάλης επιφάνειας πετρώματα (βράχους) με τη βοήθεια ανατίναξης και σκαφτικών εργαλείων. Σύμφωνα με την προέλευσή τους, τα τοιχοσώματα είναι πετρώματα ιζηματογενή (ασβεστόλιθοι, ψαμμίτες), ηφαιστειογενή (γρανίτες) και μεταμορφωσιγενή (μάρμαρα, σχιστόλιθοι).

Όπως έχει προαναφερθεί, η επιλογή των τοιχοσωμάτων γίνεται με βάση τις επιθυμητές ιδιότητες που επιδιώκεται να έχουν στο σύνολο της κατασκευής. Η συμπεριφορά τους σε μία λιθοδομή εξαρτάται από την αντοχή, τον τρόπο δόμησης όπου πρέπει να εδράζονται με όλη την έδρα τους (βάση) και να εξασφαλίζουν αλληλεμπλοκή ώστε να μη σχηματίζονται κατακόρυφοι αρμοί, τον τύπο, το βαθμό κατεργασίας (γεωμετρία) για την καλή προσαρμογή τους κατά μήκος και πάχος της λιθοδομής, το μέγεθος και την υδατοαπορροφητικότητά τους. Οι λιθοδομές επιδιώκεται να κατασκευάζονται από σκληρά πετρώματα, τα οποία παρουσιάζουν υψηλές αντοχές σε θλίψη, εφελκυσμό, διάτμηση και άλλες δράσεις, για την εξασφάλιση των αντοχών τους στο σύνολο.

Η αντοχή των τοιχοσωμάτων είναι βασικός παράγοντας της αντοχής της λιθοδομής, συνεπώς επιβάλλεται να χρησιμοποιούνται τοιχοσώματα όσο το δυνατόν με γνωστά και όμοια μηχανικά χαρακτηριστικά μεταξύ τους ώστε να επιτυγχάνεται ομοιομορφία στο σύνολο της λιθοδομής και να μπορούν να πραγματοποιούνται οι επιτόπιοι και εργαστηριακοί έλεγχοι καταλληλότητας για την αποτίμηση της πραγματικής υπάρχουσας κατάστασης της λιθοδομής. Το συνήθες φαινόμενο είναι ότι μία λιθοδομή αποτελείται από τοιχοσώματα παρόμοιων αλλά όχι ιδίων ιδιοτήτων και αυτός είναι ένας από τους κυριότερους λόγους δυσκολίας εκτίμησης της αντοχής της στο σύνολο.

Κατηγορίες των φυσικών τοιχοσωμάτων

Τα φυσικά τοιχοσώματα διακρίνονται ανάλογα με τη σύστασή τους (υψηλής, μεσαίας ή χαμηλής αντοχής), ανάλογα με τη γεωμετρία τους (ορθογωνικές, πλακοειδείς κ.ά.), ανάλογα με το βαθμό επεξεργασίας (ανεπεξεργαστοι ή επεξεργασμένοι λίθοι), κ.ά.

2.1.2 Συνδετικά κονιάματα⁽¹⁶⁾

Συνδετικό κονίαμα ονομάζεται το μείγμα που παρασκευάζεται από λεπτόκοκκα αδρανή (άμμος με μέγιστη διάμετρο κόκκου αδρανούς 4mm), κονίες ως συνδετική ύλη (τσιμέντο, ασβέστης και άλλα πρόσθετα συστατικά που βελτιώνουν τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά) και νερό για την ανάμειξη και την επεξεργασία τους. Εκτελεί σημαντική λειτουργία όσον αφορά στη σύνδεση των τοιχοσωμάτων μεταξύ τους και στην αντίσταση στη θερμότητα και στην υγρασία παρόλο που η αναλογία του στο σύνολο της τοιχοποιίας αντιστοιχεί περίπου στο 7% της λιθοδομής.

Το κονίαμα έχει ρευστή μορφή κατά τη διάρκεια δόμησής του και την ιδιότητα να σκληραίνει με το χρόνο. Η ρευστή κατάσταση του κονιάματος οφείλεται στις κονίες (αερικές π.χ. πηλός, άσβεστος, γύψος, μαγνησιακή κονία και υδραυλικές π.χ. υδραυλική άσβεστος, ρωμαϊκή κονία, φυσικό τσιμέντο, τεχνητή κονία portland, ποζολανικά τσιμέντα, θηραϊκή γη κ.ά.) οι οποίες αν αναμειχθούν και υποστούν κατεργασία με ένα ρευστό μέσο, συνήθως νερό, γίνονται εύπλαστες και αποκτούν συγκολλητικές ιδιότητες. Με την πήξη τους (που συνίσταται στη μεταβολή του ιξώδους τους και στο στάδιο μετάπτωσης από ημίρρευστη κατάσταση σε στερεή) έχουμε αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων τους η οποία ολοκληρώνεται με την πάροδο του χρόνου και την επίδραση διαφόρων φυσικοχημικών φαινομένων. Το κονίαμα θα πρέπει να είναι εργάσιμο με την προσθήκη προσμίκτου ή την όσο το δυνατόν λιγότερη ποσότητα νερού.

Τα κονιάματα θα πρέπει να είναι ισχυρά χωρίς να ξεπερνούν την αντοχή των τοιχοσωμάτων. Τα οριζόντια διάταξης κονιάματα

παραλαμβάνουν τα επικείμενα φορτία (μόνιμα και κινητά) της κατασκευής, συνεπώς η ποιότητά τους και το πάχος τους θα πρέπει να είναι κατάλληλο ώστε να εκπληρώνουν το ρόλο τους.

Τα συνηθέστερα κονιάματα που χρησιμοποιούνται για την δόμηση τοιχοποιιών είναι τα ασβεστοκονιάματα, τα τσιμεντοκονιάματα, τα ασβεστοτσιμεντοκονιάματα και τα μαρμαροκονιάματα.

Κατηγορίες κονιαμάτων

- Ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη κονία:
 - Αερικά κονιάματα όπως ασβεστοκονιάματα, πηλοκονιάματα και ασβεστομαρμαροκονιάματα κ.ά.
 - Υδραυλικά κονιάματα όπως τσιμεντοκονιάματα.
 - Οργανικά κονιάματα όπως πλαστικά κονιάματα.
 - Ειδικά κονιάματα όπως κόλλες.
- Ανάλογα με τη μηχανική αντοχή τους:
 - Χαμηλής αντοχής (καμία απαίτηση αντοχής) όπως πηλοκονιάματα και ασβεστοκονιάματα.
 - Μέσης αντοχής ($\approx 2,5\text{MPa}$) όπως ασβεστοτσιμεντοκονιάματα κ.ά.
 - Υψηλής αντοχής ($\approx 10\text{MPa}$) όπως τσιμεντοκονιάματα, οργανικά κονιάματα κ.ά.

Επιδράσεις των κονιαμάτων στη φέρουσα τοιχοποιία

- Η επίστρωση του κονιάματος ενοποιεί και συγκρατεί τα κυρίως υλικά μεταξύ τους αυξάνοντας έτσι την αντοχή του συνόλου της τοιχοποιίας.
- Η αντοχή του κονιάματος δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 2.5-5MPa. Είναι προτιμότερο να επιλέγονται κονιάματα με μειωμένες αντοχές, αλλά πάντα εντός των επιτρεπομένων ορίων αφού έτσι παρουσιάζουν περισσότερα πλεονεκτήματα για την τοιχοποιία. Κονιάματα με μεγάλη περιεκτικότητα ασβέστου ή προσμίκτων, αυξάνουν την πλαστιμότητα και την εργασιμότητα ενώ ισχυρά κονιάματα (π.χ. τσιμεντοκονιάματα) μπορεί να προκαλέσουν ρηγματώσεις στην τοιχοποιία.

- Η αυξημένη αντοχή του κονιάματος επηρεάζει θετικά την αντοχή της τοιχοποιίας, όμως η υπερβολική αντοχή του μπορεί να της προκαλέσει ρηγματώσεις λόγω συστολής του. Κονιάματα με μεγαλύτερη ευκαμψία μπορεί να παρουσιάσουν μόνο τριχοειδείς ρωγμές κατά τις κινήσεις της τοιχοποιίας.
- Κονιάματα υψηλής αντοχής σε θλίψη έχουν μεγάλη ανθεκτικότητα στο χρόνο.
- Απαιτείται μεγάλη προσοχή στο στάδιο του κτισίματος για την προστασία του κονιάματος από φυσικούς παράγοντες (υγρασία, παγετό κ.ά.) οι οποίοι κρίνονται και οι πιο κρίσιμοι για την πιθανότητα προσβολής του.
- Με τη χρήση θαλάσσιας άμμου ενδέχεται να παρουσιαστούν εξανθήματα (λεκέδες) αν περιέχονται διαλυτά άλατα.
- Ενδέχεται να προκύψει μεταβολή του όγκου του κονιάματος κατά τη διαδικασία παραγωγής του, λόγω αλληπάλληλων εμφανίσεων ύγρανσης και ξήρανσης μεταβολής της θερμοκρασίας ή από συστατικά που παρουσιάζουν χημικές διαστολές.
- Η τάση και η έκταση της συνάφειας του κονιάματος, μίας από τις σημαντικότερες ιδιότητές του, εξαρτώνται από τα υλικά και τον τρόπο δόμησής τους.
- Το κονίαμα επηρεάζει σημαντικά το τελικό χρώμα της τοιχοποιίας.
- Ένα καλής ποιότητας κονίαμα διευκολύνει στη διεργασία δόμησης και μειώνει το χρόνο κατασκευής.

2.1.3 Φέρουσα τοιχοποιία

Η ποιότητα μίας λιθοδομής εξαρτάται από την ποιότητα, την αναλογία και τη συνεργασία των υλικών που την αποτελούν, τον τρόπο δόμησής τους, την ομοιομορφία των ιδιοτήτων τους κ.ά. Με το σωστό πάχος του συνδετικού κονιάματος, τον κατάλληλο τρόπο σύνδεσής του με τα τοιχοσώματα και τη σωστή αναλογία τους σε ό,τι αφορά στα μεγέθη τους εξασφαλίζονται μεγάλες αντοχές. Μεγάλο πλεονέκτημα της λιθοδομής είναι η ευκινησία των υλικών της προς όλες τις διευθύνσεις

και η επαναφορά τους στην αρχική τους θέση χωρίς σημαντικές παραμορφώσεις, σε περιπτώσεις ήπιων φορτίσεων, παρά το ότι αποτελείται από ψαθυρά υλικά. Η ποικιλία των υλικών δόμησης της λιθοδομής, στην οποία οφείλεται η ανομοιομορφία στο εσωτερικό της, δυσκολεύει την εκτίμηση της συνολικής της αντοχής. Τα επιχρίσματα είναι δευτερεύοντα δομικά στοιχεία της λιθοδομής τα οποία δεν υπολογίζονται στο σχεδιασμό της κατασκευής. Ωστόσο, υποβοηθούν την αντοχή της, ενοποιώντας τα κυρίως υλικά της ενώ τα προστατεύει από διάφορους περιβαλλοντικούς παράγοντες και άλλες δράσεις.

2.2 Κατηγορίες τοιχοποιιών⁽⁷⁾

Οι τοιχοποιίες που κατασκευάζονται από φυσικούς ή τεχνητούς λίθους μπορεί να είναι φέρουσες ή πληρώσεως. Οι φυσικοί λίθοι μπορούν να αποτελέσουν το φέροντα οργανισμό μιας κατασκευής και χαρακτηρίζονται από ποικίλα μηχανικά χαρακτηριστικά και γεωμετρία αναλόγα με τα οποία προσδίδουν υψηλές αντοχές και θερμομονωτικές ιδιότητες στην τοιχοποιία.

Οι τεχνητοί λίθοι είναι βιοτεχνικά ή βιομηχανικά προϊόντα και το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι το συγκεκριμένο σχήμα και οι σταθερές διαστάσεις που αυτά διατίθενται. Κάποιοι διαθέτουν ικανοποιητικές θερμομονωτικές ικανότητες λόγω της κυψελλωειδούς δομής της μορφής τους. Οι τοιχοποιίες από τεχνητούς λίθους δεν αποτελούν πλέον το φέροντα οργανισμό των κατασκευών λόγω των χαμηλών αντοχών που προσδίδουν.

Οι τοιχοποιίες από φυσικούς λίθους διακρίνονται:

1. Ανάλογα με το αν τα τοιχοσώματα έχουν συνδετικό κονίαμα μεταξύ τους:

- Ξηρολιθοδομές (ξηρολιθιές):

Το είδος αυτό αποτελείται από ακατέργαστους φυσικούς λίθους χωρίς συνδετικό κονίαμα μεταξύ τους. Λόγω της απουσίας του κονιάματος ανάμεσα στα τοιχοσώματα, η τοιχοποιία καθίσταται αδύναμη στο να

παραλάβει σημαντικές οριζόντιες δυνάμεις που αναπτύσσονται και για αυτό το λόγο η χρήση της περιορίζεται σε τμήματα μικρών απαιτήσεων (βλ. Εικ 2.5-Καραντώνη 2004).



Εικ. 2.5: Παράδειγμα ξηρολιθοδομής.

- Λιθοδομές:

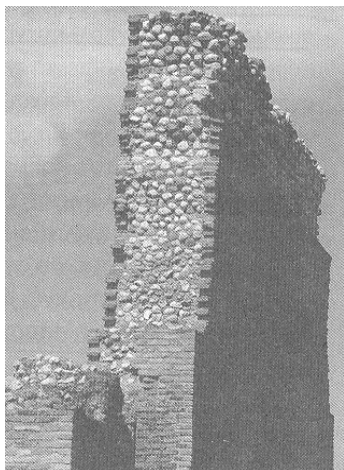
Οι λιθοδομές αποτελούνται από τα φυσικά τοιχοσώματα τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με κονίαμα. Η ύπαρξη του συνδετικού κονιάματος τους προσδίδει υψηλές αντοχές, δηλαδή την ικανότητα να παραλαμβάνουν φορτία προς όλες τις διευθύνσεις και για αυτό το λόγο τις συναντάμε σε κάθε είδος δομήματος (κατοικίες, ναούς, γέφυρες, τοίχους αντιστήριξης, οχυρά κ.ά.) (βλ. Εικ 2.6-προσωπικό αρχείο).



Εικ. 2.6: Παράδειγμα λιθοδομής.

- Χυτές τοιχοποιίες:

Οι χυτές τοιχοποιίες κατασκευάζονται από πλαστικά μείγματα πηλού, κροκάλων και σκυροδέματος τα οποία αποτελούν ένα ενιαίο σύνολο τοίχου (βλ. Εικ 2.7-Καραντώνη 2004).



Εικ. 2.7: Παράδειγμα χυτής τοιχοποιίας.

2. Ανάλογα με το είδος των τοιχοσωμάτων που τις αποτελούν:

- Αργολιθοδομές:

Λέγονται οι λιθοδομές που αποτελούνται από τελείως ακατέργαστους λίθους (αργοί λίθοι) ή ελαφρώς κατεργασμένους, λόγω της σκληρότητάς τους, ώστε να αποκτήσουν το επιθυμητό μέγεθος και σχήμα που απαιτεί μία κατασκευή καλής ποιότητας. Στις περισσότερες περιπτώσεις πραγματοποιούνται τέτοιου είδους τοιχοποιίες. Η επιλογή των λίθων γίνεται με βάση το μέγεθος και το σχήμα τους και επιδιώκεται οι πλευρές τους να είναι ομαλές και επίπεδες ώστε να ισοκατανέμονται οι τάσεις στο σώμα τους. Ανάμεσα στους μεγαλύτερους λίθους τοποθετούνται μικρά λιθαράκια (λατύπες ή τσιβίκια) για την πλήρωση των κενών. Πρέπει να αποφεύγεται η τοποθέτηση λίθων μεγάλου μήκους και μικρού ύψους ώστε σε περίπτωση κακής διάστρωσης του κονιάματος μεταξύ τους να μην αστοχήσουν από καμπτικό εφελκυσμό, όπως και η τοποθέτηση λίθων με το μήκος τους κατά την κατακόρυφη έννοια (παναγιές) οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για την διαμόρφωση παραστάδων (βλ. Εικ 2.8-προσωπικό αρχείο).



Εικ. 2.8: Παράδειγμα αργολιθοδομής.

- Κροκαλολιθοδομές:

Λέγονται οι λιθοδομές που αποτελούνται από κροκαλοειδούς μορφής λίθους, δηλαδή λίθους με λεία και στρογγυλεμένα άκρα, των οποίων το σχήμα έχει διαμορφωθεί από την τριβή που έχουν υποστεί από ύδατα ποταμών. Λόγω του σχήματός τους γίνεται δύσκολη η σύνδεση μεταξύ τους με αποτέλεσμα η αντοχή των τοιχοποιιών από αυτό το υλικό να είναι μειωμένη σε σχέση με άλλων τοιχοποιιών διαφορετικών τοιχοσωμάτων και τρόπου δόμησης. Η χρήση τέτοιου είδους λίθων απαγορεύεται για οποιοδήποτε είδος κατασκευής και ο λόγος για τον οποίο υπάρχουν σήμερα τέτοια έργα είναι γιατί το υλικό αυτό βρισκόταν σε αφθονία σε κάποιες περιοχές. Η μόνη περίπτωση που μπορεί να χρησιμοποιηθούν τέτοιοι λίθοι είναι για την κατασκευή χυτών λιθοδομών ή θεμελίων όπου αναμειγνύονται με ισχυρό τσιμεντοκονίαμα (βλ. Εικ 2.9-Καραντώνη 2004).



Εικ. 2.9: Παράδειγμα κροκαλολιθοδομής.

- Πλακολιθοδομές:

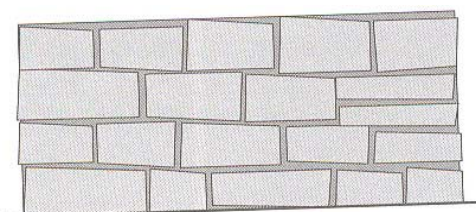
Λέγονται οι λιθοδομές που αποτελούνται στο μεγαλύτερο ποσοστό από λίθους με πλακοειδή μορφή προερχόμενοι από σχιστολιθικά πετρώματα. Οι λίθοι που χρησιμοποιούνται σε αυτό το είδος δόμησης απαιτείται να έχουν πάχος τουλάχιστον 10cm και μήκος το πολύ το πενταπλάσιο του πάχους τους. Για να μην αστοχήσει μία πλακολιθοδομή, κυρίως από καμπτικές ροπές, αποφεύγεται η δημιουργία συνεχών οριζόντιων αρμών, τοποθετούνται στις γωνίες μεγαλύτεροι λίθοι και δίνεται πολύ προσοχή στη διάστρωση του συνδετικού κονιάματος (βλ. Εικ 2.10 -Καραντώνη 2004)..



Εικ. 2.10: Παράδειγμα πλακολιθοδομής.

- Ημιλαξευμένες:

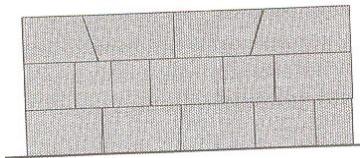
Λέγονται οι λιθοδομές αποτελούμενες από ημιεπεξεργασμένους λίθους όχι πολύ σκληρούς οι οποίοι επεργάζονται στις έδρες και το πρόσωπό τους. Οι λιθοδομές αυτές σπανίως επιχρίονται. Λόγω του σχήματός τους δε χρησιμοποιούνται σε κατασκευές που παραλαμβάνουν κατακόρυφες φορτίσεις αλλά ενδείκνυνται για αντιστηρίξεις πρανών (βλ. Εικ 2.11-Καραντώνη 2004)..



Εικ. 2.11: Παράδειγμα ημιλαξευμένης λιθοδομής.

- Λαξευμένες:

Λέγονται οι λιθοδομές που κατασκευάζονται από πλήρως κατεργασμένους λίθους σε όλες τις έδρες, επιτυγχάνοντας έτσι την άριστη επαφή των τοιχοσωμάτων μεταξύ τους. Κατά την κατακόρυφη έννοια η τοιχοποιία συμπεριφέρεται σαν ένα σώμα, κατά την οριζόντια έννοια η σύνδεση των τοιχοσωμάτων πραγματοποιείται με μεταλλικούς συνδέσμους τοποθετημένους σε κατάλληλες εγκοπές. Είναι ο τρόπος δόμησης που έχει χρησιμοποιηθεί στα σημαντικότερα και μεγαλύτερα έργα (αρχαίοι Ελληνικοί ναοί, Αιγυπτιακές πυραμίδες κ.ά.) (βλ. Εικ 2.12-Καραντώνη 2004)..



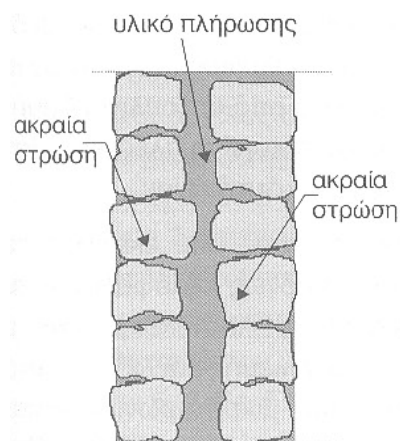
Εικ. 2.12: Παράδειγμα λαξευμένης λιθοδομής.

3. Ανάλογα με τον τρόπο δόμησης τους:

- Συμπαγείς:

Λέγονται οι τοιχοποιίες στις οποίες δε διακρίνονται κατακόρυφες στρώσεις τοίχων σε απόσταση μεταξύ τους. Τις συναντάμε ως:

- Μπατικές, οι οποίες έχουν πάχος περίπου 20-25cm.
- Υπερμπατικές, οι οποίες έχουν πάχος μεγαλύτερο από 25cm.
- Δίστρωτες: αποτελούμενες από δύο κατακόρυφες στρώσεις συνδεδεμένες μεταξύ τους με αρμό.



Εικ. 2.13: Παράδειγμα δίστρωτης τοιχοποιίας.

- Κοίλες ή με πυρήνα:

Λέγονται οι τοιχοποιίες οι οποίες αποτελούνται από δύο εξωτερικές στρώσεις τοίχου (πάχους τουλάχιστον 10cm ο καθένας), σχηματίζοντας κενό (πυρήνα) μεταξύ τους (πάχους 2.5-10cm) όπου είτε τοποθετούνται συνδετήριοι λίθοι ή μεταλλικοί σύνδεσμοι κατά την οριζόντια έννοια για τη συγκράτηση των δύο απέναντι στρώσεων είτε πληρώνεται το κενό (τρίστρωτες) με υλικά όπως κροκαλόδεμα, μικρές πέτρες, κεραμίδια και κονίαμα από σκυρόδεμα ή τσιμεντοκονίαμα.

- Ισόδομες:

Λέγονται οι τοιχοποιίες των οποίων οι λίθοι έχουν ισομεγέθη ορθογώνια παραλληλεπίπεδα σχήματα.

- Ανισόδομες:

Λέγονται οι τοιχοποιίες στις οποίες δεν υπάρχουν συνεχείς στρώσεις τοιχοσωμάτων σε όλη την έκτασή τους και η ορατή επιφάνεια των λίθων (πρόσωπο) δεν έχει ορθογωνικό σχήμα.

- Μικτές:

Λέγονται οι τοιχοποιίες οι οποίες αποτελούνται από στρώσεις διαφορετικού υλικού είτε κατά μήκος, είτε κατά πλάτος είτε καθ' ύψος.

4. Ανάλογα με τη στατική τους λειτουργία:

- Φέρουσες:

Λέγονται οι τοιχοποιίες μέσα από τις οποίες γίνεται η μεταφορά των κατακόρυφων και οριζόντιων φορτίων της στέγης και των πατωμάτων στο έδαφος και για αυτό απαιτείται να έχουν κάποιο ελάχιστο πάχος (όταν αυτοί οι τοίχοι συνεισφέρουν στη διατμητική αντίσταση μίας κατασκευής ονομάζονται διατμητικοί).

- Πληρώσεως:

Λέγονται οι τοιχοποιίες που κατασκευάζονται με σκοπό τη διαμόρφωση των εσωτερικών ή εξωτερικών χώρων μίας κατασκευής,

όπου η αντοχή τους σε καταπονήσεις είναι μικρή και για αυτό δε λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό της.

- Αντιστήριξης:

Λέγονται οι τοιχοποιίες που στηρίζουν γαιώδη πρηνή, όπου τα επιβαλλόμενα φορτία του εδάφους που ασκούνται στην κατακόρυφη πλευρά τους μεταφέρονται στη βάση τους και από εκεί στο έδαφος. Το γεωμετρικό τους σχήμα είναι αυτό που τους προσδίδει τις μεγάλες αντοχές που απαιτείται να έχουν για τον σκοπό που κατασκευάζονται.

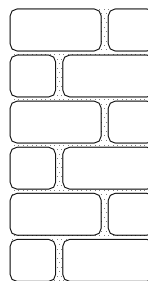
- Επένδυσης:

Λέγονται οι τοιχοποιίες που κατασκευάζονται εφαπτόμενες με άλλες επιφάνειες φερόντων στοιχείων για αισθητικούς λόγους, χωρίς να παραλαμβάνουν ασκούμενα φορτία. Ωστόσο η ορθή δόμησή τους και το ικανοποιητικό πάχος τους μπορούν να υποβοηθήσουν την υπόλοιπη κατασκευή.

5. Ανάλογα με την ύπαρξη οπλισμών και διαζωμάτων:

- Άοπλες:

Λέγονται οι τοιχοποιίες που κατασκευάζονται από τοιχοσώματα συνδεδεμένα μεταξύ τους με ή χωρίς κονίαμα, χωρίς προσθήκη οπλισμού ή άλλων ενισχυτικών μεθόδων για την αύξηση της αντοχής (βλ. Εικ 2.15).

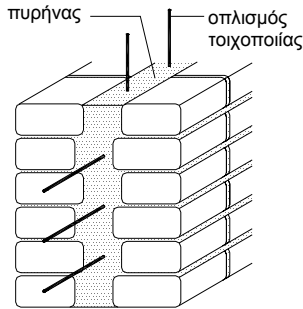


Εικ. 2.15: Παράδειγμα άοπλης τοιχοποιίας.

- Ωπλισμένες:

Λέγονται οι τοιχοποιίες που ενισχύονται με ράβδους οπλισμού, αυξάνοντας την αντοχή τους σε ανακυκλιζόμενη ένταση (για δράσεις μέσα και έξω από το επίπεδό τους) βοηθώντας στη μείωση της μάζας τους. Διακρίνονται σε τοιχοποιίες με οπλισμό μέσα στον πυρήνα τους (οριζόντιοι και κατακόρυφοι χαλύβδινοι ράβδοι/συνδετήρες και

γέμισμα του κενού με τσιμεντοκονίαμα) και σε τοιχοποιίες με διάσπαρτο οπλισμό εντός των λιθοσωμάτων (οριζόντιοι ράβδοι στα σημεία των αρμών και κατακόρυφοι ράβδοι στις ανοιγόμενες οπές των λιθοσωμάτων, βλ. Εικ 2.16).



Εικ. 2.16: Παράδειγμα οπλισμένης τοιχοποιίας.

- Διαζωματικές:

Λέγονται οι τοιχοποιίες που κατασκευάζονται από τοιχοσώματα και συνδετικό κονίαμα, ενισχυμένα, λόγω της ψαθυρής φύσης τους, με οριζόντια και κατακόρυφα στοιχεία (διαζώματα) είτε κεραμικά, είτε από ξύλο, είτε από μέταλλο, για την απόσβεση της ενέργειας ασκούμενων φορτίσεων. Τα οριζόντια διαζώματα τοποθετούνται κυρίως στις στάθμες των ορόφων των κατασκευών, κατά μήκος των τοίχων, με πιθανή επανάληψη τους σε διάφορα ύψη ενώ τα κατακόρυφα διαζώματα τοποθετούνται σε κατασκευές υψηλών απαιτήσεων (βλ. Εικ 2.14-Καραντώνη 2004)..



Εικ. 2.15: Παράδειγμα διαζωματικής τοιχοποιίας.

Οι τεχνιτοί λίθοι μπορεί να είναι:

- Ωμοπλινθοδομές που κατασκευάζονται από ωμοπλίνθους (άψητες χωματόπλιθες) και χαρακτηρίζονται από τη χαμηλή αντοχή τους.
- Οπτοπλινθοδομές που κατασκευάζονται από ψημένους πλίνθους (τούβλα) και συναντώνται είτε ως φέρουσες είτε ως τοιχοπληρώσεις σε κατασκευές με φέροντα οργανισμό από σκυρόδεμα ή χάλυβα.
- Τσιμεντοπλινθοδομές που κατασκευάζονται από τσιμεντόλιθους (τσιμεντόπλιθες), δηλαδή τοιχοσώματα με βάση το σκυρόδεμα. Χαρακτηρίζονται από την κακή θερμομονωτική ικανότητά τους και η χρήση τους απαγορεύεται για κατοικίες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΗΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

Για την κατανόηση της συμπεριφοράς της φέρουσας τοιχοποιίας κρίνεται απαραίτητη η γνώση των μηχανικών χαρακτηριστικών των τοιχοσωμάτων, του συνδετικού κονιάματος και του συνόλου της τοιχοποιίας.

Οι κατασκευές φέρουσας τοιχοποιίας εξετάζονται ως προς διάφορες μορφές φόρτισης όπως η θλιπτική, η καμπτική, η διατμητική, η θλιπτική και η διατμητική συγχρόνως, η οριζόντια πλευρική, η πολυαξονική και η τυχούσα φόρτιση. Στους ελέγχους λαμβάνεται ακόμα το μέτρο ελαστικότητας της τοιχοποιίας, το οποίο κρίνεται πολύ σημαντικό όπως σε όλα τα είδη των κατασκευών. Το μέγεθος και το είδος της φόρτισης και οι λοιποί εξωτερικοί παράγοντες είναι οι αιτίες που θα προκαλέσουν αλλαγές στη στατική λειτουργία της φέρουσας τοιχοποιίας.

Οι έλεγχοι της μηχανικής της φέρουσας τοιχοποιίας εστιάζουν κυρίως στη θλιπτική της αντοχή, που είναι η συνήθης τάση των ασκούμενων φορτίων ως προς το σώμα της. Ο προσδιορισμός της θλιπτικής ικανότητας μίας τέτοιας κατασκευής έχει άμεση συνάρτηση με αυτήν των τοιχοσωμάτων και του συνδετικού κονιάματος και πραγματοποιείται μέσα από υπολογιστικές σχέσεις που έχουν προταθεί.

Από μελετητές όπως ο Hendry και Malek (1996), Kirtching (1985), Haseltine (1987), Grimm (1975), Τάσιος (1986), Mann και Muller (1986) και Dialer (1991), προτάθηκαν τα ανισότροπα κριτήρια αντοχής της τοιχοποιίας και θεωρήθηκαν σημαντικά στοιχεία, όσον αφορά στα χαρακτηριστικά των τοιχοσωμάτων (η αντοχή, ο τύπος, η γεωμετρία τους και η υδατοαπορροφητικότητά τους), στα χαρακτηριστικά του συνδετικού κονιάματος, (η αντοχή και η σύνθεση του μείγματος, λόγος νερού προς τσιμέντο, συγκράτηση ύδατος, το πάχος του κονιάματος σε σχέση με το τοιχόσωμα και η σχετική παραμόρφωση των δύο υλικών) όπως και στις συνθήκες που επικρατούν στην ίδια την τοιχοποιία (ο

τρόπος εμπλοκής των τοιχοσωμάτων, η διεύθυνση φόρτισης, οι τοπικές αυξήσεις τάσεων, ο τρόπος επιβολής του φορτίου κ.ά).

3.1 Μηχανικά χαρακτηριστικά

3.1.1 Φυσικά τοιχοσώματα

Τα λιθοσώματα θεωρούνται ψαθυρά υλικά (ανελαστικά) και το διάστημα από τη διαρροή μέχρι τη θραύση τους είναι πολύ σύντομο έως ακαριαίο. Λιθοσώματα μεγάλης σκληρότητας παρουσιάζουν αυξημένες αντοχές έναντι θλιπτικών, εφελκυστικών, διατμητικών και άλλων δράσεων, μειώνοντας την πιθανότητα ρηγμάτωσής τους όπως φαίνεται στις παρακάτω ενδεικτικές τιμές και στον Πίνακα 3.1 (βλ. Καραντώνη 2004). Ανάλογα με το είδος τους, δεν επηρεάζονται εύκολα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (ύδατα, υγρασία, παγετός, μεταβολή θερμοκρασιών κ.ά.). Με τη σωστή επεξεργασία και έδρασή τους και με την εξασφάλιση αλληλεμπλοκής τους κατά τη δόμησή τους, παραλαμβάνουν ορθότερα τα ασκούμενα φορτία. Η συμπεριφορά μίας λιθοδομής είναι πολύ καλύτερη όταν χρησιμοποιούνται λίθοι με ίδια μηχανικά χαρακτηριστικά από ότι στην αντίθετη περίπτωση.

Μετά από εργαστηριακούς ελέγχους προέκυψαν ενδεικτικές τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών των τοιχοσωμάτων.

Ενδεικτική θλιπτική αντοχή τοιχοσωμάτων:

$$f_{bc1} = 25\text{MPa}-164\text{MPa (Vintzilaiou E. 2006)}$$

$$f_{bc2} = 164\text{MPa (Valuzzi et al. February 2004)}$$

$$f_{bc3} = 160\text{MPa (Valuzzi 2000)}$$

$$f_{bc4} = 55\text{MPa (Toumbakari 2002)}$$

$$f_{bc5} = 100\text{MPa (Vintzilaiou-Tassios 1995)}$$

Ενδεικτικό μέτρο ελαστικότητας τοιχοσωμάτων:

$$E_{bc1}=2210\text{MPa (Valuzzi M. 2000)}$$

$$E_{bc2}=720\text{MPa (Toumbakari 2002)}$$

$$E_{bc3}=4402\text{MPa (Vintzilaiou-Tassios 1995)}$$

$$E_{bc4}=1000\text{MPa (Vintzilaiou 2006)}$$

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1: Ελάχιστη θλιπτική αντοχή φυσικών πετρωμάτων
(κατά DIN 1053).

Ομάδα	Πέτρωμα	ελάχιστη f_{bc} (MPa)
A	ασβεστόλιθοι, τραβερτίνης, ηφαιστειακοί τόφφοι	20
B	μαλακοί ψαμμίτες (μετ' αργιλικής συνδετικής ύλης)	30
C	συμπαγείς ασβεστόλιθοι και δολομίτες (περιλαμβανομένου του μαρμάρου), βασαλτική λάβα	50
D	χαλαζιακοί ψαμμίτες, γραουβάκης κ.α.	80
E	γρανίτης, συηνίτης, διορίτης, χαλαζιακός πορφυρίτης, διαβάσης κ.α.	120

Άλλα μηχανικά χαρακτηριστικά των τοιχοσωμάτων είναι το φαινόμενο βάρος, υδατοαπορροφητικότητα της μάζας τους, αντοχή σε παγετό, περιεκτικότητα σε άλατα, πυραντίσταση, θερμομόνωση, ηχομόνωση, ανθεκτικότητα στη χρήση και στο χρόνο κ.ά.

Με βάση τον Ευρωκώδικα 6 (EC6) τα λιθοσώματα που χρησιμοποιούνται θα πρέπει να ανήκουν στους ακόλουθους τύπους:

- Λιθοσώματα από πυριτικό ασβέστιο, κατά το πρότυπο EN 771-2
- Λαξευτοί φυσικοί λίθοι, κατά το πρότυπο EN 771-6.

3.1.2 Κονιάματα

Μετά από εργαστηριακούς ελέγχους προέκυψαν ενδεικτικές τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών των κονιαμάτων.

Ενδεικτική θλιπτική αντοχή κονιάματος:

$$f_{mc1} = 1.60 \text{MPa (Valuzzi 2000)}$$

$$f_{mc2} = 3.4 \text{MPa (Toumbakari 2002)}$$

$$f_{mc3} = 1.7 \text{MPa (Vintzilaiou-Tassios 1995)}$$

$$f_{mc4} = 4.35 \text{MPa (Vintzilaiou 2006)}$$

Ενδεικτική εφελκυστική αντοχή κονιάματος:

$$f_{mt1} = 0.34 \text{MPa (Toumbakari 2002)}$$

Ενδεικτικό μέτρο ελαστικότητας κονιάματος:

$$E_{mc1} = 1506 \text{MPa (Valuzzi M. 2002)}$$

$$E_{mc2} = 5670 \text{MPa (Vintzilaiou-Tassios 1995)}$$

$$E_{mc3} = 1440 \text{MPa (Vintzilaiou 2006)}$$

Ελλείπει Ελληνικών προδιαγραφών παρουσιάζονται οι συνιστώμενες κατ' όγκο αναλογίες των συστατικών υλικών των κονιαμάτων κατά το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 998-2 όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.2 (βλ. Καραντώνη 2004).

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2: Αναλογία κατ' όγκο υλικών κονιαμάτων κατά EN 998-2).

Ποιότητα κονιάματος	Χαρακτηριστική Θλιπτική Αντοχή (MPa)	Κατ' όγκο αναλογία		
		Τσιμέντο	Άσβεστος	Άμμος
M 2.5	2.5	1	3	9
M 5	5.0	1	2	6
M 10	10.0	1	0.5	5
M 20	20.0	1	-	3

Για άοπλες λιθοδομές το χρησιμοποιούμενο κονίαμα πρέπει να είναι τουλάχιστον κατηγορίας M2.5 κατά το Εθνικό Κείμενο Εφαρμογής του EC6.

Βασικοί παράγοντες καταλληλότητας κονιαμάτων

- Κοκκομετρική διαβάθμιση της άμμου ώστε να επιτυγχάνεται ο μικρότερος δυνατός όγκος κενών.
- Η κατάλληλη αναλογία της ποσότητας της κονιάς προς την ποσότητα της άμμου.
- Η μορφή των κόκκων της άμμου.
- Το ποσοστό του νερού επεξεργασίας.

Έλεγχοι καταλληλότητας των κονιαμάτων

- Έλεγχος της αντοχής σε θλίψη και εφελκυσμό του κονιάματος.
- Έλεγχος εργασιμότητας κονιάματος.
- Έλεγχος της ικανότητας συγκράτησης του νερού επεξεργασίας.
- Έλεγχος των αναλογιών σύνθεσης.

3.1.3 Φέρουσα τοιχοποιία

Μετά από εργαστηριακούς ελέγχους προέκυψαν ενδεικτικές τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών των τοιχοποιιών.

Ενδεικτική θλιπτική αντοχή τοιχοποιίας:

$$f_{wc1}=2.02\text{MPa} -2.71\text{MPa} \text{ (Toumbakari 2002)}$$

$$f_{wc2}=1.36\text{MPa} -2.40\text{MPa} \text{ (Vintzilaiou-Tassios 1995)}$$

$$f_{wc3}=1.74\text{MPa} -2.26\text{MPa} \text{ (Vintzilaiou et al., Miltiadou et al. 2006)}$$

Ενδεικτική εφελκυστική αντοχή τοιχοποιίας:

$$f_{wt1} = 0.15\text{MPa} \text{ (Vintzilaiou 2006)}$$

$$f_{wt2} = 0.28\text{MPa}-0.47\text{MPa} \text{ (Toumbakari 2002)}$$

Ενδεικτικό μέτρο ελαστικότητας τοιχοποιίας:

$$E_{w1} = 0.72\text{MPa}-1.44\text{MPa} \text{ (Toumbakari 2002)}$$

$$E_{w2} = 0.18\text{MPa}-0.37\text{MPa} \text{ (Valuzzi 2003)}$$

$$E_{w3} = 4.44\text{MPa}-7.00\text{MPa} \text{ (Vintzilaiou-Tassios 1995)}$$

$$E_{w4} = 1.00\text{MPa}-1.50\text{MPa} \text{ (Vintzilaiou et al., Miltiadou et al. 2006)}$$

Ενδεικτική ανηγμένη παραμόρφωση τοιχοποιίας:

$$\varepsilon_{v1}=1.42-3.12 \text{ (Toumbakari 2006)}$$

$$\varepsilon_{v2}=0.39 -6.55 \text{ (Valuzzi 2003)}$$

$$\varepsilon_{v3}=0.58 -2.80 \text{ (Vintzilaiou-Tassios 1995)}$$

$$\varepsilon_{v4}=1.60-2.25 \text{ (Vintzilaiou et al., Miltiadou et al. 2006)}$$

Έλεγχοι καταλληλότητας της φέρουσας τοιχοποιίας

- Έλεγχος της αντοχής σε θλίψη και εφελκυσμό της τοιχοποιίας.
- Έλεγχος μέτρου ελαστικότητας.
- Έλεγχος ανηγμένης παραμόρφωσης.

3.2 Είδη φορτίσεων στην άοπλη τοιχοποιία⁽¹⁷⁾

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται αναλυτικά τα είδη φορτίσεων σε σχέση με την αντοχή της φέρουσας τοιχοποιίας (θλιπτική, εφελκυστική, διατμητική υπό θλίψη αντοχή, λυγισμός υπό έκκεντρη θλίψη, ανακυκλιζόμενη διάτμηση κ.ά.) και οι επιδράσεις/αποτελέσματα

(θλιπτικές παραμορφώσεις κ.ά.) αυτών που δρουν πάνω σε τέτοιου είδους κατασκευές.

3.2.1 Θλιπτική Αντοχή

Οι κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία υπόκεινται κυρίως σε θλίψη και για αυτό το λόγο θεωρείται σημαντικός ο προσδιορισμός της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας στο σύνολό της όπως και σε συνάρτηση με την αντοχή των τοιχοσωμάτων και του συνδετικού κονιάματος που την αποτελούν.

Παρακάτω δίνονται βασικοί παράγοντες επιρροής της θλιπτικής αντοχής των λιθοδομών, η θλιπτική αντοχή τους σε συνάρτηση με τα υλικά που την αποτελούν και σε συνάρτηση με τις αναλογίες των υλικών μεταξύ τους (λόγος πάχους αρμού προς ύψος λιθοσώματος), ενδεικτικές τιμές μηχανικών χαρακτηριστικών και εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού της θλιπτικής αντοχής που έχουν προκύψει μετά από ανάλογες δοκιμές θλίψης.

- **Βασικοί παράγοντες επιρροής της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας:**
 - Η αντοχή και γεωμετρία των λιθοσωμάτων.
 - Η αντοχή του κονιάματος.
 - Οι παραμορφώσεις των λιθοσωμάτων και του κονιάματος.
 - Το πάχος του αρμού.
 - Η υδροαπορροφητικότητα των λιθοσωμάτων.
 - Το σύστημα δόμησης.
- **Εμπειρικές σχέσεις θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας και συμπεράσματα όπως προέκυψαν μετά από δοκιμές θλίψης.**

Μετά την ολοκλήρωση τυποποιημένων δοκιμών της τοιχοποιίας σε θλίψη προέκυψαν οι παρακάτω εμπειρικές σχέσεις και συμπεράσματα ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών:

$$f_{wc} = \frac{f_{bc}}{6} + \frac{\sqrt{f_{bc} \times f_{mc}}}{4} - \frac{f_{mc}}{20} + 1.4 \quad (\text{MPa}) \quad (\text{Τάσιος, 1983})$$

$$f_{wc} = \begin{cases} (1 - 0.8\sqrt[3]{a}) \times f_{bc} & f_{bc} < f_{mc} \\ (1 - 0.8\sqrt[3]{a}) \times [f_{mc} + 0.4(f_{bc} - f_{mc})] & f_{bc} > f_{mc} \end{cases} \quad (\text{Τάσιος, 1985})$$

$$f_{wc} = \sqrt{f_{bc}} \quad (\text{MPa}) \quad (\text{Hendry, 1981})$$

$$f_{wc} = \sqrt[3]{f_{mc}} \quad \text{ή} \quad f_{wc} = \sqrt[4]{f_{mc}} \quad (\text{MPa}) \quad (\text{Hendry, 1981})$$

Όπου,

f_{wc} : θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας,

f_{bc} : θλιπτική αντοχή του λιθοσώματος,

f_{mc} : θλιπτική αντοχή του κονιάματος,

$\alpha = h_m/l_w$: λόγος ύψους προς πλάτος του τοίχου ή

$t_m:t_b$ (αρμός/λιθόσωμα).

Στις περιπτώσεις που το ποσοστό του κονιάματος είναι αυξημένο, τότε υπολογίζεται μία μειωμένη θλιπτική αντοχή που προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

$$\boxed{f'_{wc} \approx \xi f_{wc}} \quad \text{όταν} \quad \xi \approx \frac{1}{1 + 3.5(K - K_o)}$$

όπου,

K : το ποσοστό κατ' όγκο του κονιάματος στην τοιχοποιία,

K_o : το μέγιστο ποσοστό κονιάματος που θεωρείται ότι δεν προκαλεί μείωση της αντοχής του τοίχου και φυσικά εξαρτάται από το είδος της τοιχοποιίας. Όπου, K_o ισούται με 0.3 για αργολιθοδομή, με 0.2 για ημιλαξευμένη και με 0.1 για λαξευμένη λιθοδομή.

Επίσης, για σχετικές μέσες ποιότητες υλικών έχουν προταθεί οι παρακάτω σχέσεις υπολογισμού της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας:

$$f_{wc} = f_{bc} \frac{(4 + 0.1f_{mc})}{12 + 5 \frac{h_w}{b_w}} + 2 \quad (\text{MPa}) \quad (\text{O. Graf.})$$

$$f_{wc} = 0.7\sqrt{f_{bc}} \times \sqrt[3]{f_{mc}} \quad (\text{MPa}) \quad (\text{Brocker, 1961})$$

όπου,

h_w : ύψος τοίχου,

b_w : πλάτος τοίχου.

- **Η μηχανική της θραύσης σε θλίψη**

Θεωρείται ένα πρίσμα από λιθοσώματα και κονίαμα, που υπόκειται σε αξονική θλιπτική τάση σ_z . Σε αυτά που ακολουθούν, ο προσδιορισμός της θλιπτικής αντοχής του πρίσματος προϋποθέτει ελαστική συμπεριφορά των υλικών.

Για την εντατική κατάσταση του πρίσματος οι εγκάρσιες παραμορφώσεις (κατά τις διευθύνσεις x και y αντίστοιχα) είναι:

- για λιθόσωμα:

$$\varepsilon_{bx} = \frac{1}{E_b} [\sigma_{bx} + \nu_b (\sigma_z - \sigma_{by})]$$

$$\varepsilon_{by} = \frac{1}{E_b} [\sigma_{by} + \nu_b (\sigma_z - \sigma_{bx})]$$

- για κονίαμα:

$$\varepsilon_{mx} = \frac{1}{E_m} [-\sigma_{mx} + \nu_m (\sigma_z + \sigma_{my})]$$

$$\varepsilon_{my} = \frac{1}{E_m} [-\sigma_{my} + \nu_m (\sigma_z + \sigma_{mx})]$$

όπου,

σ_z : αξονική θλιπτική τάση,

σ_{bx} , σ_{mx} , σ_{by} , σ_{my} : προκύπτουσες πλευρικές τάσεις,

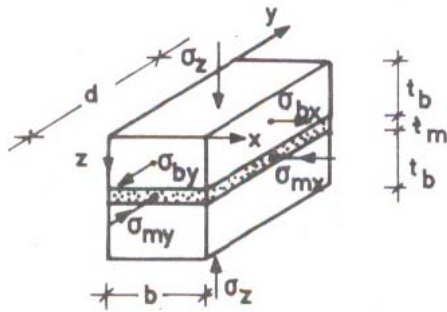
E_b και E_m : μέτρο ελαστικότητας λιθοσώματος και κονίαμα αντίστοιχα,

ν_b και ν_m : λόγος Poisson για λιθόσωμα και κονίαμα αντίστοιχα,

ε_{bx} , ε_{mx} , ε_{by} , ε_{my} : εγκάρσιες παραμορφώσεις και ισχύει

$$\varepsilon_{bx} = \varepsilon_{mx}, \quad \varepsilon_{by} = \varepsilon_{my}$$

Οι προκύπτουσες πλευρικές τάσεις στο λιθόσωμα και στο κονίαμα φαίνονται στην παρακάτω εικόνα 3.1 (Τάσιος 1992):



Εικ. 3.1: Τάσεις σε στοιχείο τοιχοποιίας λόγω εξωτερικής θλιπτικής εντάσεως.

Η ισορροπία απαιτεί η ολική εφελκυστική πλευρική δύναμη για το λιθόσωμα να είναι ίση με την ολική θλιπτική πλευρική δύναμη του κονιάματος και κατά τις δύο διευθύνσεις x, y .

$$\sigma_{bx} \times d \times t_b = \sigma_{mx} \times d \times t_m \rightarrow \sigma_{bx} = a \times \sigma_{mx} \quad \text{όπου, } a = t_m : t_b < 1$$

$$\sigma_{by} \times b \times t_b = \sigma_{my} \times b \times t_m \rightarrow \sigma_{by} = a \times \sigma_{my}$$

Με επεξεργασία των εξισώσεων παραμορφώσεων και τάσεων προκύπτει:

$$\sigma_{bx} = \sigma_{by} = \frac{a(v_m - \beta v_b)}{1 + \alpha\beta - v_m - \alpha\beta v_b} \times \sigma_z \quad \text{όπου, } \beta = E_m : E_b < 1 \quad (3.1)$$

όπου,

$\sigma_{bx}, \sigma_{mx}, \sigma_{by}, \sigma_{my}$: προκύπτουσες πλευρικές τάσεις,.

$\alpha = t_m/t_b$: λόγος πάχους αρμού προς το ύψος τοιχοσώματος,

$\beta = E_m/E_b$: λόγος του μέτρου ελαστικότητας του κονιάματος προς το αντίστοιχο του τοιχοσώματος,

ν : συντελεστής Poisson, ο οποίος μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση $\nu \approx 0.5 - 0.14\sqrt{f_c}$, όπου f_c είναι η θλιπτική αντοχή του υλικού (κονίαμα ή τοιχοποιία), του οποίου ο συντελεστής Poisson ζητείται.

Μείωση της θλιπτικής αντοχής λιθοσώματος λόγω εγκάρσιας εφελκυστικής τάσης

Η παρουσία της σ_{bx} μειώνει την τιμή της σ_z (σ_{zu}) για την οποία παρατηρείται θλιπτική αστοχία. Αν υποτεθεί ότι ισχύει γραμμική σχέση μεταξύ εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων για το λιθόσωμα, τότε:

$$\frac{\sigma_{zu}}{f_{bc}} + \frac{\sigma_t}{\lambda f_{bc}} = 1 \quad (3.2)$$

όπου,

σ_z : αξονική θλιπτική τάση,

f_{bc} : θλιπτική αντοχή του λιθοσώματος,

$\lambda = f_{bt}/f_{bc}$: λόγος της εφελκυστικής προς την θλιπτική αντοχή του τοιχοσώματος.

Για $\sigma_{zu} = f_{wc}$ και με τη βοήθεια των παραπάνω σχέσεων (3.1) και (3.2) προκύπτει:

$$\frac{f_{wc}}{f_{bc}} = 1 : \left[1 + \frac{\alpha(\nu_m - \beta\nu_b)}{\lambda(1 + \alpha\beta - \nu_m - \alpha\beta\nu_b)} \right] \quad (3.3)$$

Όπου, $f_{bc} \geq f_{wc}$, γιατί μόνο τότε οι παραμορφώσεις των υλικών είναι τέτοιες ώστε το λιθόσωμα να βρίσκεται υπό διαξονικό εφελκυσμό, όπως υποτέθηκε στην ελαστική συμπεριφορά των υλικών (μηχανισμός θραύσης υπό θλίψη).

Όπου,

f_{wc} : θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας,

f_{bc} : θλιπτική αντοχή του λιθοσώματος,

$\alpha = t_m/t_b$: λόγος πάχους αρμού προς το ύψος τοιχοσώματος,

$\beta = E_m/E_b$: λόγος του μέτρου ελαστικότητας του κονιάματος προς το αντίστοιχο του τοιχοσώματος,

$\lambda = f_{bt}/f_{bc}$: λόγος της εφελκυστικής προς τη θλιπτική αντοχή του τοιχοσώματος,

ν_b και ν_m : λόγος Poisson για λιθόσωμα και κονίαμα αντίστοιχα.

• **Εξάρτηση της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας από το λόγο πάχους αρμού προς ύψος λιθοσώματος**

Για τη διεξαγωγή συμπερασμάτων, όσον αφορά στην εξάρτηση της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας από το λόγο πάχους αρμού προς ύψος λιθοσώματος, πραγματοποιήθηκε ενδεικτική αριθμητική εφαρμογή (Τάσιος 1992) της παραπάνω σχέσης (3.3), για δύο κονιάματα (γερό και μαλακό) με τα παρακάτω χαρακτηριστικά και για διάφορες τιμές του $\alpha = t_m/t_b$ (λόγος πάχους αρμού προς ύψος λιθοσώματος).

a.	γερό κονίαμα	$\beta=1:3$	$v_b=0.15$	$v_m=0.25$	$\lambda=1:15$
b.	μαλακό κονίαμα	$\beta=1:10$	$v_b=0.15$	$v_m=0.35$	$\lambda=1:15$

$$\frac{f_{wc}}{f_{bc}} = 1: \left[1 + \frac{\alpha(v_m - \beta v_b)}{\lambda(1 + \alpha\beta - v_m - \alpha\beta v_b)} \right] \quad \text{όπου, λαμβάνεται } f_{bc} \geq f_{wc} \quad (3.4)$$

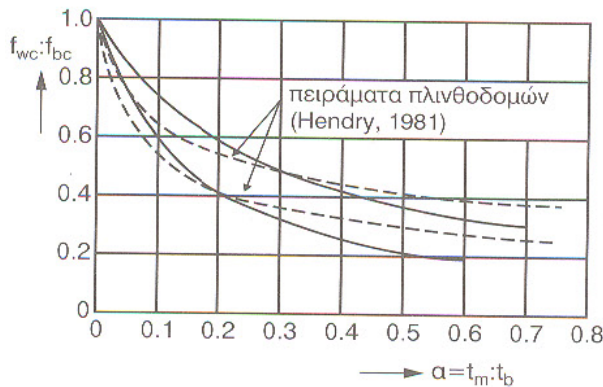
Στον Πίνακα 3.3 (Τάσιος 1992) δίνονται οι τιμές της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας όπως προέκυψαν μετά από την αριθμητική εφαρμογή του τύπου (3.4).

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3: Αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας για διάφορες τιμές του $\alpha = t_m/t_b$.

για $\alpha = t_m/t_b$ (πάχος αρμού/ύψος λιθοσώματος)	a. f_{wc}/f_{bc} (θλιπτική αντοχή τοιχοποιίας με γερό κονίαμα)	b. f_{wc}/f_{bc} (θλιπτική αντοχή τοιχοποιίας με μαλακό κονίαμα)
0.0	1.0	1.0
0.1	0.72	0.57
0.2	0.57	0.40
0.3	0.48	0.31
0.4	0.42	0.25
0.5	0.37	0.22
0.6	0.34	0.19
0.7	0.31	0.17

Συμπεράσματα αριθμητικής εφαρμογής:

- Τα αποτελέσματα της αριθμητικής εφαρμογής της σχέσης (3.4) συμφωνούν με τα πειραματικά αποτελέσματα όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2 (Τάσιος 1992).
- Επίσης, παρατηρείται ότι για δεδομένο ύψος λιθοσώματος, η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας μειώνεται σημαντικά με την αύξηση του πάχους του αρμού.



Εικ. 3.2: Επίδραση του λόγου πάχους αρμού/ύψους λιθοσώματος στην θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας.

- **Θεωρητική σχέση σύνδεσης της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας με τις θλιπτικές αντοχές των υλικών της**

Επεξεργασία της σχέσης (3.5):

$$\frac{f_{wc}}{f_{bc}} = 1 : \left[1 + \frac{\alpha(v_m - \beta v_b)}{\lambda(1 + \alpha\beta - v_m - \alpha\beta v_b)} \right] \quad \text{ή} \quad \frac{f_{wc}}{f_{bc}} = 1 : \left(1 + \frac{\alpha}{\lambda} \xi \right) \quad (3.5)$$

όπου,

f_{wc} : θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας,

f_{bc} : θλιπτική αντοχή του λιθοσώματος,

$\alpha = t_m/t_b$: λόγος πάχους αρμού προς το ύψος τοιχοσώματος,

$\beta = E_m/E_b$: λόγος του μέτρου ελαστικότητας του κονιάματος προς το αντίστοιχο του τοιχοσώματος,

$\lambda = f_{bt}/f_{bc}$: λόγος της εφελκυστικής προς την θλιπτική αντοχή του τοιχοσώματος,

ν_b και ν_m : λόγος Poisson για λιθόσωμα και κονίαμα αντίστοιχα.

$$\alpha\beta \cong 0 \quad \text{και} \quad \xi = \frac{\nu_m - \beta\nu_b}{1 - \nu_m} \geq 0.$$

Για τη διεξαγωγή συμπερασμάτων, όσον αφορά στη σύνδεση της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας σε σχέση με τις θλιπτικές αντοχές των υλικών της, πραγματοποιήθηκε ενδεικτική αριθμητική εφαρμογή της παραπάνω σχέσης (3.5), για δύο ποιότητες λιθοσώματος και δύο ποιότητες κονιάματος με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Θλιπτική αντοχή των δύο λιθοσωμάτων: $f_{bc1} = 50MPa$ και

$$f_{bc2} = 25MPa$$

Θλιπτική αντοχή των δύο κονιαμάτων: $f_{mc1} = 3.5MPa$ και

$$f_{mc2} = 21.0MPa$$

- $E_{bc} = 400f_{bc}$, $E_{mc} \cong 900f_{mc}$ (εμπειρικές σχέσεις)

$$\beta = \frac{E_{mc}}{E_{bc}} = 2.25 \left(\frac{f_{wc}}{f_{bc}} \right)$$

- $\nu \sim 0.5 - 0.14\sqrt[4]{f_c}$ (κατ' εκτίμηση)

$\lambda = f_{bt} : f_{bc} = 0.05$ (Maurwerk-Kalender 1982)

- $a = \frac{1}{7}$ Λαμβάνεται αυτή η τιμή για σύγκριση με Hendry

όπου,

f_{wc} : θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας,

f_{bc} : θλιπτική αντοχή του λιθοσώματος,

f_{mc} : θλιπτική αντοχή του κονιάματος,

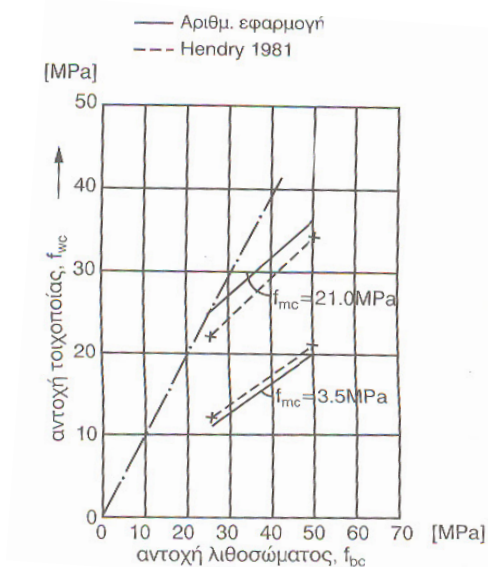
$\beta = E_{mc}/E_{bc}$: ο λόγος του μέτρου ελαστικότητας του κονιάματος προς το αντίστοιχο του τοιχοσώματος,

$\lambda = f_{bt}/f_{bc}$: ο λόγος της εφελκυστικής προς την θλιπτική αντοχή του τοιχοσώματος.

Στον Πίνακα 3.4 δίνονται οι τιμές της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας όπως προέκυψαν μετά από την αριθμητική εφαρμογή του τύπου (3.4).

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4: Θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας για τις δύο ποιότητες λιθοσώματος και κονιάματος

$f_{bc}=50\text{MPa}$ $\nu_b=0.23$	f_{mc} (MPa)	ν_m	β	ξ	$f_{wc}:f_{bc}$	f_{wc} (MPa)
		3.5	0.36	0.14	0.51	0.41
	21.0	0.285	0.84	0.13	0.73	36.60
$f_{bc}=25\text{MPa}$ $\nu_b=0.275$	f_{mc} (MPa)	ν_m	β	ξ	$f_{wc}:f_{bc}$	f_{wc} (MPa)
	3.5	0.36	0.28	0.44	0.44	11.07
	21.0	0.285	1.68	0.0	1.0	25.0



Εικ. 3.3: Θεωρητική θλιπτική αντοχή τοιχοποιίας συναρτήσεως των αντοχών τοιχοσώματος και κονιάματος (Τάσιος 1992).

Συμπεράσματα αριθμητικής εφαρμογής:

- η αντοχή της τοιχοποιίας αυξάνει γρήγορα με την αντοχή των λιθοσωμάτων, μόνο όταν χρησιμοποιείται πολύ ισχυρό κονίαμα, αλλιώς η αύξηση είναι βραδύτερη.
- Επίσης είναι φανερό η αύξηση της αντοχής της τοιχοποιίας σε συνάρτηση με την αντοχή του κονιάματος, χωρίς όμως να είναι γραμμική, αφού για να διπλασιαστεί η αντοχή της τοιχοποιίας πρέπει να πενταπλασιαστεί η αντοχή του κονιάματος.

3.2.2 Θλιπτικές παραμορφώσεις

- Διαγράμματα σ-ε τοιχοποιίας σε θλίψη:

Η σχέση σ-ε, υπό αδιάστατη μορφή, μπορεί να εκφραστεί από την παραβολή :

$$\frac{\sigma}{f_{wc}} = 2\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_u}\right) - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_u}\right)^2$$

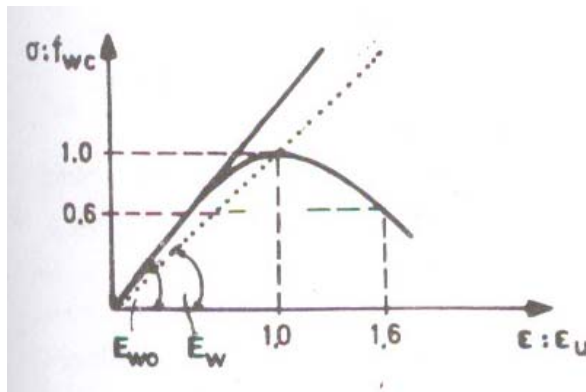
όπου,

σ : τάση,

f_{wc} : θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας,

ε : παραμορφώσεις.

Δίνεται διάγραμμα (βλ. Εικ. 3.4-Τάσιος 1992) με καμπύλη των σ-ε, που έχει προκύψει από την επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων (Hendry, 1981) με $\varepsilon_u = 2.5 \div 3.5\%$



Εικ. 3.4: Αδιαστατοποιημένη καμπύλη τάσεων/παραμορφώσεων τοιχοποιίας σε θλίψη (Τάσιος 1992).

- **Ενδεικτικές τιμές μηχανικών χαρακτηριστικών** (μέτρου ελαστικότητας, συντελεστή Poisson, και χρόνιων παραμορφώσεων), που έχουν προκύψει από εμπειρικές σχέσεις:

i. (Wesche, 1974)

Μέτρα ελαστικότητας λιθοσώματος και κονιάματος αντίστοιχα: $E_b \cong (300 \div 400)f_{bc}$, $E_m \cong 900f_{mc}$

όπου,

E_b και E_m : μέτρο ελαστικότητας λιθοσώματος και κονίαμα αντίστοιχα,

f_{mc} : θλιπτική αντοχή του κονιάματος,

f_{bc} : θλιπτική αντοχή του λιθοσώματος.

Για την τοιχοποιία:

Μέτρο ελαστικότητας: $E_w = k \times E_b$

Παραμορφώσεις στιγμιαίες: $\varepsilon_i = \frac{\sigma}{E_w}$

Παραμορφώσεις χρόνιες: $\varepsilon_t = \varepsilon_s + \phi \times \varepsilon_i$

όπου,

ε_s : συστολή ξήρανσης,

ϕ : συντελεστής ερπυσμού,

k : εμπειρικός συντελεστής.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.5: Τιμές k , ϕ , ε_s τοιχοποιίας.

κονίαμα	k	ϕ	ε_s	k	ϕ	ε_s
~M1	0.4	0.75	$\pm 1.10^{-4}$	0.4	1.50	$- 2.10^{-4}$
~M2, M3	0.7			0.6		
~M4	0.9			0.7		
Λιθοσώματα	οπτόπλινθοι			ασβεστοπυριτικά		

ii. (Hendry, 1981)

Μέτρο ελαστικότητας τοιχοποιίας:

Εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας: $E_{wo} = 2 \frac{f_{wc}}{\varepsilon_u}$

Τέμνον μέτρο ελαστικότητας: $E_w = 0.75 E_{wo} \cong (400 \div 1000) f_{wc}$,

για $\frac{\sigma}{f_{wc}} = 1.0$

iii. (Mauerwerk Kalender, 1982)

Εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας: $E_{wo} = (550 \div 800)f_{wc}$

Συντελεστής Poisson: $\nu = 0.1 \div 0.2$

Συντελεστής ερπυσμού: $\phi = 1.0 \div 2.0$

όπου,

f_{wc} : θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας,

E_{wo} : εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας.

iv. CIB, 1958

Τέμνον μέτρο ελαστικότητας της τοιχοποιίας: $E_w = 1000f_k$,

Συντελεστής Poisson: $\nu = 0.15$

όπου,

f_k : χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας.

Ερπυσμός: ο λόγος (ϕ) της μέγιστης τιμής της ερπυστικής παραμόρφωσης προς την ελαστική παραμόρφωση της τοιχοποιίας για μόνιμα φορτία.

Δίνεται παρακάτω ο λόγος (ϕ) για ορισμένα είδη υλικών τοιχοποιίας:

- Τοιχοποιία από οπτόπλινθους: $\phi=1.0$
- Τοιχοποιία από ασβεστοπυριτικά πυκνά λιθοσώματα: $\phi=2.0$
- Τοιχοποιία από λίθους ελαφροσκυροδέματος: $\phi=2.5$

v. Chuxian, 1984 (Κινέζικος κανονισμός για οπτοπλινθοδομή)

Η σχέση σ - ε δίνεται από την παρακάτω λογαριθμική σχέση:

$$\varepsilon = -\frac{1}{145\sqrt{f_{wc}}} \ln\left(1 - \frac{\sigma_o}{f_{wc}}\right)$$

Το τέμνον μέτρο ελαστικότητας είναι: $E_w = 115f_{wc}^{\frac{3}{2}}$

για $\sigma = 0.43f_{wc}$

όπου,

f_{wc} : θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας.

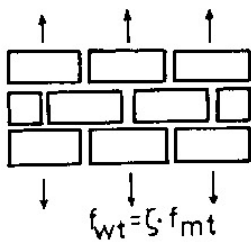
σ_o : ορθή τάση που δρα στην κορυφή του τοίχου.

ε : παραμορφώσεις.

3.2.3 Εφελκυστική αντοχή

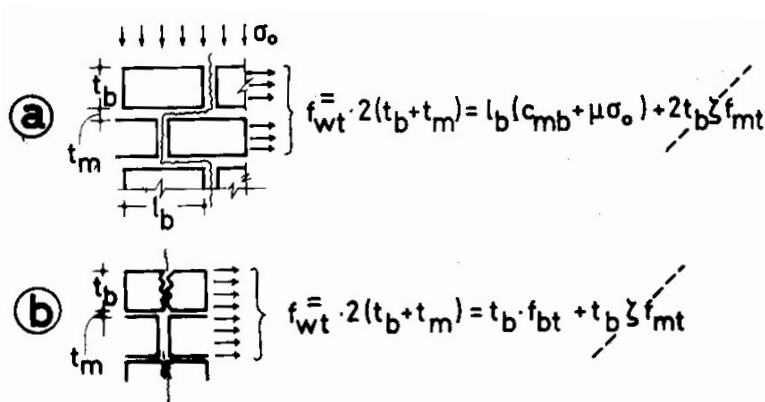
Η εφελκυστική αντοχή δεν είναι σαφές μηχανικό χαρακτηριστικό σε μία τοιχοποιία. Η αντίσταση της τοιχοποιίας σε εφελκυσμό είναι διαφορετική ανάλογα με τη γωνία εμφάνισης των εφελκυστικών ρωγμών και αυτό καθιστά δυσκολότερο τον υπολογισμό της.

Ο κατακόρυφος εφελκυσμός οδηγεί σε αποσύνδεση του κονιάματος (βλ. Εικ. 3.5), έτσι η εφελκυστική αντοχή μπορεί να εκφραστεί σαν ένα ποσοστό της εφελκυστικής αντοχής του κονιάματος: $f_{wt} = \zeta \times f_{mt}$ όπου, $\zeta = \frac{2}{3}$ και εξαρτάται πάρα πολύ από την προσυμπίεση και τις συνθήκες συντήρησης.



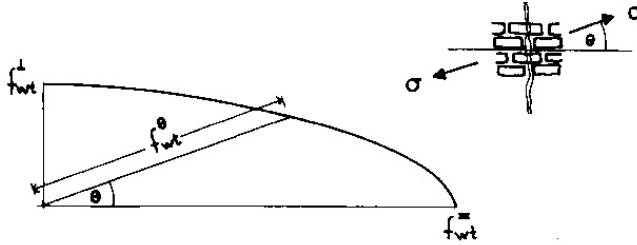
Εικ. 3.5: Κατακόρυφη εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας.

Η οριζόντια εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας προέρχεται από την αντίσταση ολίσθησης μεταξύ λιθοσώματος και κονιάματος (βλ. Εικ. 3.6α) και από την εφελκυστική αντοχή του λιθοσώματος (βλ. Εικ. 3.6β).



Εικ. 3.6: Μηχανισμοί οριζόντιας εφελκυστικής αντοχής της τοιχοποιίας (Γάσιος 1992).

Στις περιπτώσεις που εμφανίζεται **λοξή ή κύρια εφελκυστική τάση**, δεν είναι γνωστό το πώς υπολογίζεται η εφελκυστική αντοχή συναρτήσει της γωνίας (βλ. Εικ.3.7-Τάσιος 1992).



Εικ. 3.7: Εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας όταν η κύρια εφελκυστική τάση εμφανίζεται υπό γωνία θ .

Σημείωση:

Σε όλα τα παραπάνω δεν έχει υπεισεέλθει ακόμα ο δυσμενής ρόλος της εγκάρσιας θλιπτικής τάσης συνεπώς, κάθε θεωρία που βασίζεται στη σταθερά f_{wt} δεν περιγράφει την πραγματική κατάσταση της τοιχοποιίας με ακρίβεια.

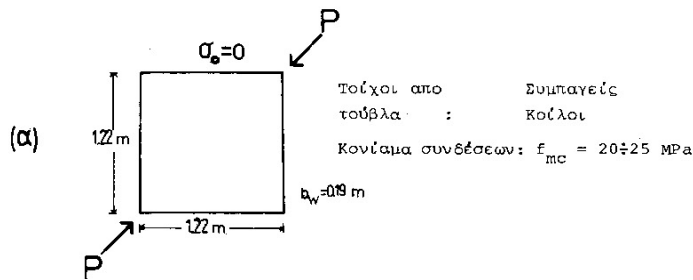
Τιμές εφελκυστικής αντοχής

Όταν η εφελκυστική τάση φτάσει την εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας, τότε επέρχεται η αστοχία της. Η εφελκυστική αντοχή μίας τοιχοποιίας εξαρτάται από την ποιότητα του κονιάματος, το κατακόρυφο θλιπτικό φορτίο και το κριτήριο θραύσης που χρησιμοποιείται στις δοκιμές για την εξέταση της αντοχής της.

Μετά τη διεξαγωγή τέτοιων δοκιμών, για τοίχους με τα παρακάτω χαρακτηριστικά, δόθηκαν τα έξης αποτελέσματα.

Εφελκυστική αντοχή τοιχοποιίας: $f_{wt} = 1.30 \div 1.65 MPa$ (Blume, 1967)

$$f_{wt} = 1.80 \div 2.25 MPa \text{ (Borchlet, 1970)}$$

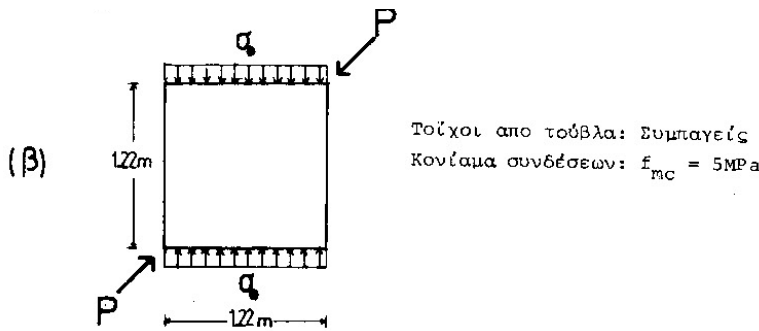


Εικ. 3.8: Πειραματικές διατάξεις για τον καθορισμό της εφελκυστικής αντοχής άοπλης τοιχοποιίας υπό διαγώνια θλίψη (Τάσιος 1992).

Εφελκυστική αντοχή τοιχοποιίας:

$$f_{wt} = 0.90 \div 1.90 \text{MPa} \quad (\text{Blume, 1968})$$

$$f_{wt} = 1.80 \div 3.70 \text{MPa} \quad (\text{Borchlet, 1970})$$



Εικ. 3.9: Πειραματικές διατάξεις για τον καθορισμό της εφελκυστικής αντοχής άοπλης τοιχοποιίας υπό διαγώνια θλίψη (Τάσιος 1992).

3.2.4 Διατμητική αντοχή υπό θλίψη

Οι φέρουσες τοιχοποιίες καλούνται να αναλάβουν επιπλέον των κατακόρυφων φορτίων (κινητά και μόνιμα), τα οποία δημιουργούνται είτε από καμπτική είτε από θλιπτική ένταση, και τέμνουσες δυνάμεις, οι οποίες εκδηλώνονται εντός ή εκτός του επίπεδου τους, προκαλώντας αστοχία στους αρμούς και τα τοιχοσώματα με ποικίλους τρόπους. Παράγοντες όπως η ύπαρξη και η ποιότητα των κονιαμάτων των αρμών για την συγκράτηση των τοιχοσωμάτων μεταξύ τους, η κατάλληλη αλληλεμπλοκή των τοιχοσωμάτων, η ύπαρξη οπλισμού στο εσωτερικό των αρμών κ.ά. επηρεάζουν την συμπεριφορά των λιθοδομών αυξάνοντας

το μέτρο αντίστασης έναντι διατμητικών δράσεων. Επίσης, έχει διαπιστωθεί ότι τοίχοι χωρίς κατακόρυφα φορτία έχουν μειωμένη διατμητική αντοχή σε σχέση με τοίχους που φέρουν σημαντικά κατακόρυφα φορτία λόγω πάκτωσης που αντιστοιχούν έως το 40% της θλιπτικής αντοχής.

Μορφές αστοχίας λόγω δράσεων εντός και εκτός επιπέδου των λιθοδομών

Με σκοπό τη μελέτη της συμπεριφοράς των λιθοδομών, κατά την παραλαβή τεμνουσών δυνάμεων εντός και εκτός του επιπέδου τους, έχουν πραγματοποιηθεί δοκιμές, χρησιμοποιώντας δοκίμια προσομοίωσης της λιθοδομής, σύμφωνα με τις οποίες παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα:

- **Καμπτική θραύση** (βλ. Εικ. 3.10α-Τάσιος 1992)

Η συγκεκριμένη μορφή αστοχίας θεωρείται δράση εκτός του επιπέδου της λιθοδομής, η οποία παρατηρείται σε περιπτώσεις με μεγάλες τιμές λόγου $\frac{h_w}{l_w}$ όπου συνήθως $\frac{h_w}{l_w} > 2.0$, τα αποτελέσματα της οποίας έχουν τοπικό χαρακτήρα. Οι μορφές με τις οποίες εκδηλώνονται οι εκτός του επιπέδου βλάβες της λιθοδομής είναι:

- Αποκολλήσεις/αποσυνδέσεις εγκάρσιων τοίχων.
- Τοπική αποδιοργάνωση τοίχου λόγω βλάβης ή ολικής θραύσης άλλων στοιχείων που βρίσκονται πάνω στην επιφάνειά του, όπως πλαίσια ανοιγμάτων (πόρτες, παράθυρα) διαζώματα και γενικά στοιχεία που θεωρούνται σύνδεσμοι.
- Τοπικές κρούσεις που μπορεί να λάβει ένας τοίχος από άλλα στοιχεία της κατασκευής όπως στέγες, πλάκες, καμάρες κ.ά. λόγω κακής στερέωσής τους ή λόγω μεγάλων διατομών ή μεγάλων αποστάσεων μεταξύ τους.
- Αστοχία λιθοδομής με την εμφάνιση μη συνεχών ρωγμών στην επιφάνειά της.

- **Θραύση από ολίσθηση τοίχου** (βλ. Εικ. 3.10β) σε στερεό σώμα ως προς τη βάση του. Παρατηρείται για μικρές τιμές του συντελεστή τριβής (μ) και εκδηλώνεται εντός του επιπέδου της λιθοδομής. Για το λόγο αυτό οι βλάβες που προκαλούνται στη λιθοδομή είναι καθολικές και κρίνονται σοβαρές. Τέτοιου είδους βλάβες είναι η ακόλουθη:

- Αστοχία από ολίσθηση κατά μήκος των αρμών μεταξύ των τοιχοσωμάτων, η οποία εκδηλώνεται απότομα.

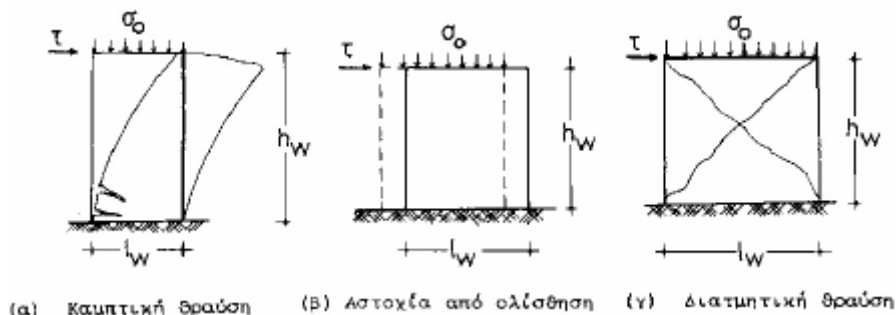
- **Διατμητική θραύση⁽²⁾** (βλ. Εικ. 3.10γ.)

Παρατηρείται σε τοίχους με μικρές τιμές λόγου $\frac{h_w}{l_w}$, όπου συνήθως

$\frac{h_w}{l_w} < 1.0$. Η συγκεκριμένη μορφή θραύσης εκδηλώνεται εντός του

επιπέδου της λιθοδομής και τα αποτελέσματά της είναι καθολικά με εμφάνιση χιαστί ρωγμών στο σώμα της. Τέτοιου είδους βλάβες είναι οι ακόλουθες:

- Δημιουργία “κοιλιάς” τοπικά σε σημεία του τοίχου.
- Αστοχία με την εμφάνιση ρωγμής κατά μήκος της φορτιζόμενης διαγωνίου, όπου η ρωγή ακολουθεί τους οριζόντιους και κατακόρυφους αρμούς διασχίζοντας τις διεπιφάνειες των τοιχοσωμάτων-κονιάματος, χωρίζοντας τους τοίχους σε δύο περίπου τριγωνικά τμήματα.
- Βλάβη ή/και ολοσχερή καταστροφή τοιχοσωμάτων και συνδετικού κονιάματος.



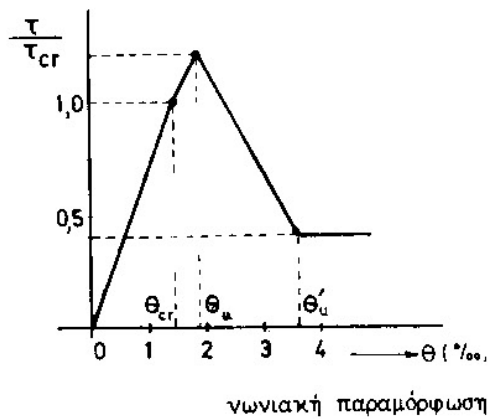
Εικ. 3.10: Μορφές θραύσης τοιχοποιιών.

Οι επιπλέον βλάβες, που μπορεί να παρατηρηθούν στις λιθοδομές και οφείλονται σε άλλους παράγοντες είναι:

- Κύκλοι διυγράνσεως και ξηράνσεως (κυρίως αμέσως πάνω από το έδαφος θεμελίωσης).
- Παρουσίαση υδρατμών στο εσωτερικό του τοίχου με αποτέλεσμα την αλλοίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του συνδετικού κονιάματος, κυρίως σε περίπτωση παγετού κάτω από ακραίες καιρικές συνθήκες (διαστολή).
- Αποδιοργάνωση των τοιχοσωμάτων και του συνδετικού κονιάματος του τοίχου λόγω της ασυμβατότητας συστολοδιαστολών αυτών των στοιχείων μεταξύ τους.
- Μηχανική διάβρωση των τοιχοσωμάτων και του συνδετικού κονιάματος λόγω ύπαρξης νερού στην επιφάνεια του τοίχου (κακή ποιότητα υλικού και στις δύο περιπτώσεις).
- Διάβρωση ενσωματωμένων στοιχείων σύνδεσης (σίδηρο, ξύλο).
- Ασυμβατότητα ηλικίας των δομικών στοιχείων μεταξύ τους σε μία κατασκευή.

Διαγράμματα διατημητικών τάσεων γωνιακών παραμορφώσεων

Με βάση πειραματικά αποτελέσματα (Τάσιος 1992), παρουσιάζονται οι θλιπτικές και οι διατημητικές τάσεις ενός τοίχου που καταπονείται στο παρακάτω διάγραμμα της Εικόνας 3.11 (Τάσιος 1992) διατημητικών τάσεων-γωνιακών παραμορφώσεων (τ - θ).



Σχ. 3.11: Σχηματοποιημένο διάγραμμα διατμητικών τάσεων-γωνιακών παραμορφώσεων για άοπλη τοιχοποιία. Πειραματικά αποτελέσματα (Jolley-1976, Benedetti et al-1980, Sheppard et al-1980, Tomazevic et al-1984).

Όπου, προέκυψαν οι παρακάτω ενδεικτικές τιμές γωνιακών παραμορφώσεων:

$$\theta_{cr} = 1 \div 2 ‰$$

$$\theta_u = 1 \div 3 ‰$$

$$\theta'_u = 3 \div 4 ‰$$

$$\frac{\theta_u}{\theta_{cr}} = 1 \div 2 ‰$$

όπου,

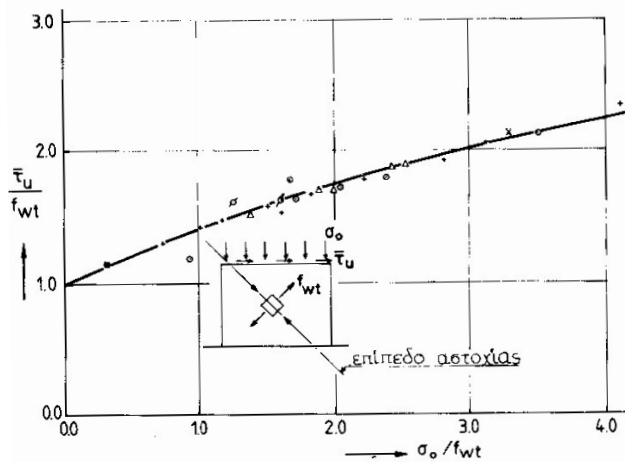
θ_{cr} : γωνιακή παραμόρφωση τη στιγμή ρηγμάτωσης του τοίχου,

θ_u : γωνιακή παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη διατμητική αντοχή του τοίχου,

θ'_u : γωνιακή παραμόρφωση μετά την οποία παρατηρείται σημαντική πτώση της διατμητικής αντοχής του τοίχου από την μέγιστη τιμή της.

Επίδραση της αξονικής θλίψης στη διατμητική αντοχή της τοιχοποιίας.

Δοκιμές έδειξαν ότι για μικρούς λόγους $\frac{\sigma_o}{f_{wc}}$ (≤ 0.40), η αύξηση της κατακόρυφης θλιπτικής τάσης προκαλεί την αύξηση της διατμητικής αντοχής, όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα της Εικόνας 3.12 (Τάσιος 1992).



Εικ. 3.12: Διατμητική αντοχή τοίχων από τοιχοποιία υπό ταυτόχρονη δράση κατακόρυφου θλιπτικού φορτίου σ_o . Πειραματικά αποτελέσματα (Hendry, 1981).

Από πειραματικά αποτελέσματα έχει προκύψει μία γραμμική σχέση της μορφής: $\tau_u = c_{mb} + f\sigma_o$ (βλ. Εικ. 3.13-Τάσιος 1992),

κονίαμα	M1	M2	M3	M4
$\xi =$	1:40.	1:30.	1:20.	1:15.

όπου,

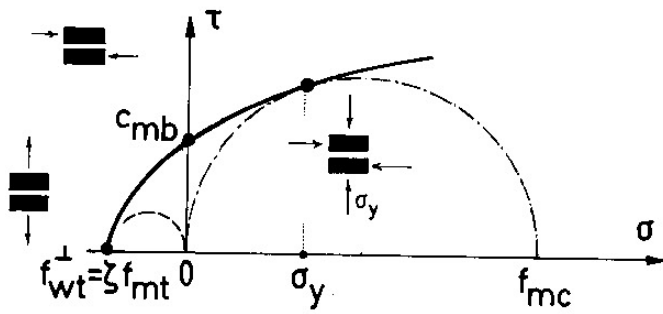
f_{wc} : θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας,

σ_o : ορθή (θλιπτική) τάση που δρα στην κορυφή του τοίχου,

τ_u : διατμητική αντοχή της τοιχοποιίας,

c_{mb} : η συνάφεια μεταξύ λιθοσώματος και κονιάματος, όπου, $c_{mb} = \xi f_{bc}$.

f : φαινόμενος συντελεστής τριβής.



Εικ. 3.13: Καμπύλη μηχανικών χαρακτηριστικών της διεπιφάνειας λιθοσώματος-κονιάματος.

Συντελεστής τριβής

- Φαινόμενος συντελεστής τριβή (μ):

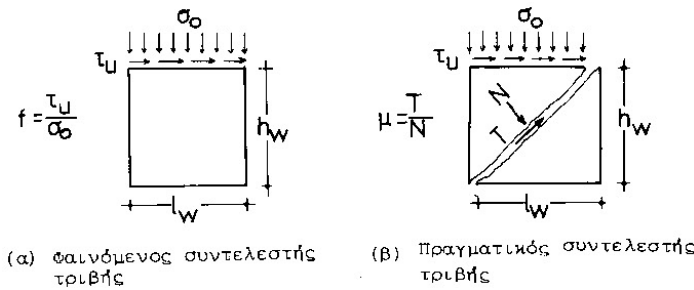
Εκφράζει την επίδραση της κατακόρυφης θλιπτικής τάσης στην διατμητική αντοχή της τοιχοποιίας και ορίζεται ως ο λόγος $\frac{\tau_u}{\sigma_o}$

και κυμαίνεται ανάμεσα στις τιμές $0.30 \div 0.80$. Χρησιμοποιείται στην περίπτωση αστοχίας του τοίχου λόγω ολίσθησης του κονιάματος προς το λιθόσωμα όπως και σε άλλες μορφές αστοχίας.

- Πραγματικός συντελεστής τριβής:

Εμφανίζεται στη δημιουργία διαγώνιας ρηγμάτωσης του τοίχου και ορίζεται ως ο λόγος N/T , όπου N και T είναι η παράλληλη και κάθετη δύναμη αντίστοιχα που εξασκούνται στη ρηγματωμένη επιφάνεια. Εξαρτάται από την κατακόρυφη θλιπτική που υπάρχει στην τοιχοποιία και εκφράζεται από την

$$\text{σχέση: } \mu = 0.17 : \left(\frac{\sigma_o}{f_{wc}} \right)^{\frac{2}{3}} \leq 2$$



Εικ. 3.14: Συντελεστής τριβής (Τάσιος 1992).

Η παραπάνω σχέση συμφωνεί με τα πειραματικά αποτελέσματα και παρατηρείται μείωση του συντελεστή τριβής (μ) καθώς αυξάνεται η κατακόρυφη θλιπτική τάση και αυτό γίνεται περισσότερο αισθητό όταν $\sigma_o : f_{wc} \leq 0.20$,

όπου,

f_{wc} : θλιπτική αντοχή τοίχου,

σ_o : ορθή τάση που δρα στην κορυφή του τοίχου,

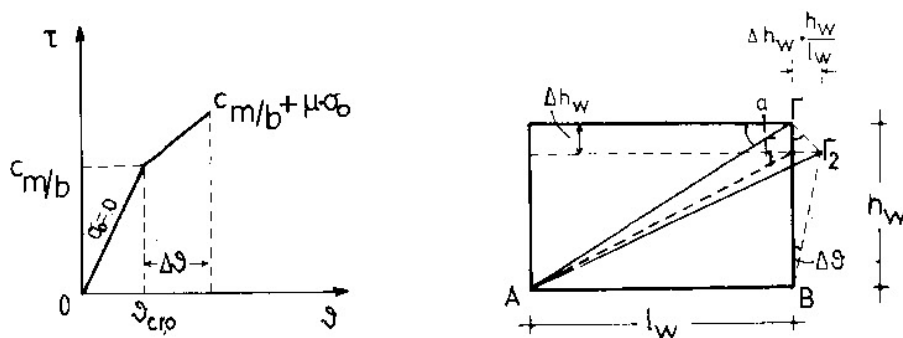
τ_u : η διατμητική αντοχή της τοιχοποιίας,

h_w : ύψος τοίχου,

l_w : μήκος στη βάση του τοίχου.

Ο ρόλος της αξονικής θλίψης στην γωνιακή παραμόρφωση.

Η παρουσία της κατακόρυφης θλιπτικής τάσης (σ_o), προκαλεί βράχυνση του ύψους του τοίχου κατά $\Delta h_w = \frac{\sigma_o}{E_w} h_w$ και μία πρόθλιψη της διαγωνίου από τη θέση ΑΓ στην θέση ΑΓ1 (βλ. Εικ. 3.15-Τάσιος 1992)).



Εικ. 3.15: Επίδραση της αξονικής θλίψεως στη γωνιακή παραμόρφωση.

Μετά την εφαρμογή της διατμητικής τάσης (τ), για να αρχίσει να εφελκύεται η διαγώνιος ΑΓ₁, εκδηλώνεται πρώτα μία γωνιακή παραμόρφωση $\Delta\theta = \frac{\sigma_o}{E_w} \times \frac{h_w}{l_w}$ που θα φέρει τη διαγώνιο στην θέση ΑΓ₂=ΑΓ. Επιπλέον χρειάζεται πρόσθετη γωνιακή παραμόρφωση θ_{cr} για να επιτευχθεί η ρηγμάτωση αυτής της διαγωνίου, άρα:

$$\theta_{cr} \cong \theta_{cr,o} + \frac{\sigma_o}{E_w} \times \frac{h_w}{l_w}$$

Πειραματικά αποτελέσματα (Τάσιος 1992) έδειξαν ότι:

$$h_w : l_w = 1.0 \quad \text{ή} \quad \Delta\theta \cong \sigma_o : E_w$$

όπου,

σ_o : ορθή (θλιπτική) τάση που δρα στην κορυφή του τοίχου,

E_w : μέτρο ελαστικότητας της τοιχοποιίας,

h_w : ύψος τοίχου,

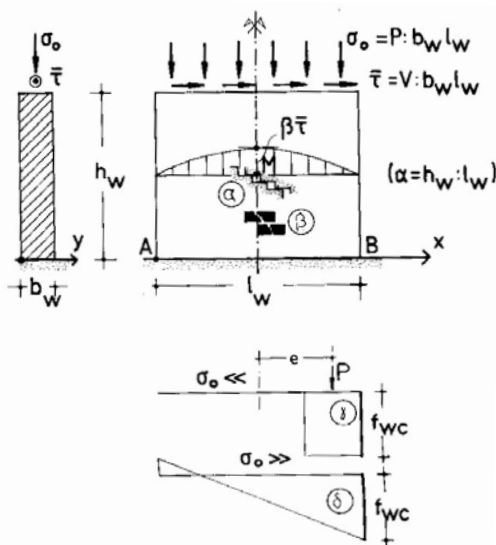
l_w : μήκος στη βάση του τοίχου,

c_{mb} : συνάφεια μεταξύ λιθοσώματος και κονιάματος.

Μηχανισμοί θραύσης και αντίστοιχες αναλυτικές σχέσεις

Για μεμονωμένο τοίχο, χωρίς ανοίγματα μπορεί να θεωρηθούν οι παρακάτω τρόποι αστοχίας.

- Διατμητική ολίσθηση στο μέσο του τοίχου.



Η κατανομή του διαγράμματος των διατμητικών τάσεων είναι παραβολική με μέγιστη τιμή $\beta \times \tau$ κατά το μήκος του άξονα του τοίχου, όπου $\beta = 1.5$ (βλ. Εικ. 3.16).

Εικ. 3.16: Διατμητικοί και θλιπτικοί μηχανισμοί αστοχίας μεμονωμένο τοίχου προβόλου από άοπλη τοιχοποιία χωρίς ανοίγματα.

Η αστοχία επέρχεται από την ολίσθηση του κονιάματος προς το λιθόσωμα και εκφράζεται από την σχέση: $\tau_u = \frac{1}{\beta} c_{mb} + \frac{\mu}{\beta} \times \sigma_o$ ή υπό

αδιάστατη μορφή $\frac{\tau_u}{f_{wc}} = \frac{1}{\beta} \left(\frac{c_{mb}}{f_{wc}} \right) + \frac{\mu}{\beta} \left(\frac{\sigma_o}{f_{wc}} \right)$,

όπου,

f_{wc} : θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας,

σ_o : ορθή τάση που δρα στην κορυφή του τοίχου,

τ_u : διατμητική αντοχή της τοιχοποιίας,

c_{mb} : συνάφεια του κονιάματος προς το λιθόσωμα,

μ : συντελεστής τριβής κατά μήκος του οριζόντιου αρμού που εκφράζεται ως συνάρτηση της κατακόρυφης θλιπτικής τάσης

(σ_o) από την εμπειρική σχέση $\mu \sim 0.17 : \left(\frac{\sigma_o}{f_{wc}} \right)^{\frac{2}{3}} \leq 2.0$.

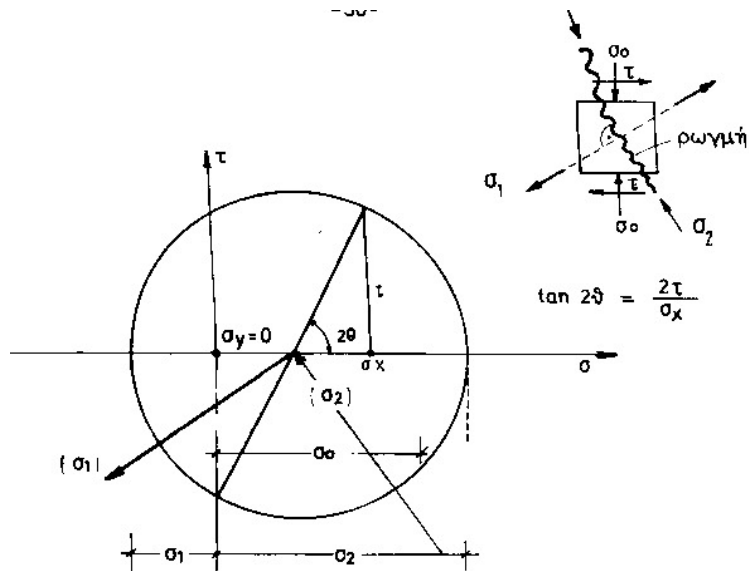
• **Θραύση λιθοσώματος στο μέσο του τοίχου**

Οι μέγιστες τιμές των διατμητικών τάσεων, που δρουν στα λιθοσώματα, παρατηρούνται κατά μήκος του άξονα του τοίχου, ενώ η κατακόρυφη θλιπτική τάση (σ_o) είναι σταθερή σε όλα τα σημεία. Η παρουσία και ο συνδυασμός των διατμητικών και των θλιπτικών τάσεων μπορεί να προκαλέσει συγκέντρωση τάσεων και αυτές να δημιουργήσουν θλιπτοδιατμητικές ρωγμές στο λιθόσωμα, των οποίων οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται αρχικά στο κέντρο του τοίχου.

• **Κριτήριο θραύσης για ένα λιθόσωμα υπό τις κύριες τάσεις σ_1 και σ_2 :**

$$\frac{\sigma_1}{f_{bc}} + \frac{\sigma_2}{f_{bt}} = 1 \quad (\text{ευθεία γραμμή}) \quad (3.7)$$

Όπου, $\sigma_{1,2} = \pm \frac{\sigma_o}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_o}{2} \right)^2 + (\beta \tau_u)^2}$ (κύκλος Mohr, βλ. Εικ. 3.17) (3.8)



Εικ. 3.17: Ερμηνεία της εμφάνισης των διατμητικών ρωγμών από το κέντρο του τοίχου προς τα άκρα.

Σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει:

$$\frac{\tau_u}{f_{wc}} = \frac{1}{\beta} \times \frac{\sqrt{\left(1 - \frac{\sigma_o}{f_{wc}}\right) \times \left(1 + \frac{\sigma_o}{f_{bt}}\right)}}{\frac{f_{wc}}{f_{bc}} + \frac{f_{wc}}{f_{bt}}} \quad (3.9)$$

όπου,

f_{wc} : θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας,

f_{bc} : θλιπτική αντοχή του λιθοσώματος,

f_{bt} : εφελκυστική αντοχή του λιθοσώματος,

σ_o : ορθή τάση που δρα στην κορυφή του τοίχου,

τ_u : διατμητική αντοχή της τοιχοποιίας.

- **Τοπική θλιπτική θραύση στην κάτω γωνία**

Εξετάζονται οι παρακάτω περιπτώσεις

- Για μικρές τιμές της σ_o , από την οποία επέρχεται θραύση της περιοχής B μετά τη ρηγμάτωση του τοίχου στη θέση A, ισχύουν τα παρακάτω:

$$\text{Ισορροπία δυνάμεων: } 2\left(\frac{l_w}{2} - e\right) f_{wc} \times b_w = \sigma_o \times l_w \times b_w$$

$$\text{Εκκεντρότητα: } e = \frac{M}{P} = \frac{V \times h_w}{P} \times \frac{\tau \times b_w \times l_w \times h_w}{\sigma_o \times b_w \times l_w} = \frac{\tau}{\sigma_o} \times h_w.$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει:

$$2\tau_u a f_{wc} = f_{wc} \sigma_o - \sigma_o^2 \quad \text{ή}$$

$$2a \frac{\tau_u}{f_{wc}} = \frac{\sigma_o}{f_{wc}} - \left(\frac{\sigma_o}{f_{wc}}\right)^2 \quad \text{όταν } a = h_w : l_w \quad (3.10)$$

όπου,

f_{wc} : θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας,

σ_o : ορθή τάση που δρα στην κορυφή του τοίχου,

τ_u : διατμητική αντοχή της τοιχοποιίας,

M : αναπτυσσόμενη ροπή,

V : οριζόντιο φορτίο φορτίο,

P : μόνιμο κατακόρυφο φορτίο,

h_w : ύψος τοίχου,

b_w : πλάτος τοίχου,

l_w : μήκος στη βάση του τοίχου.

- Για μεγάλες τιμές της σ_o , από την οποία επέρχεται θλιπτική θραύση της θέσης Β, όπου η περιοχή Α δεν έχει ρηγματωθεί, ισχύουν τα παρακάτω:

$$\sigma_B = \frac{P}{F} + \frac{M}{W} = \frac{P}{b_w \times l_w} + \frac{V \times h_w}{b_w \times l_w^2 : 6}$$

$$f_{wc} = \sigma_o + 6 \times \frac{V}{b_w \times l_w} \times \frac{h_w}{l_w} = \sigma_o + 6\tau_u a \quad \text{ή} \quad 6a\tau_u = f_{wc} - \sigma_o \quad \text{ή}$$

$$6a \frac{\tau_u}{f_{wc}} = 1 - \frac{\sigma_o}{f_{wc}}$$

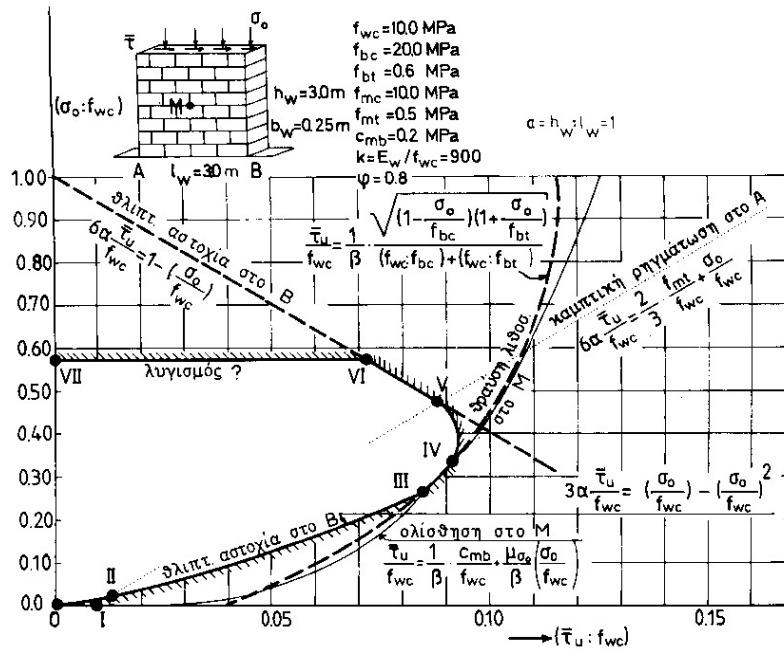
όπου,

W : ασκούμενο φορτίο,

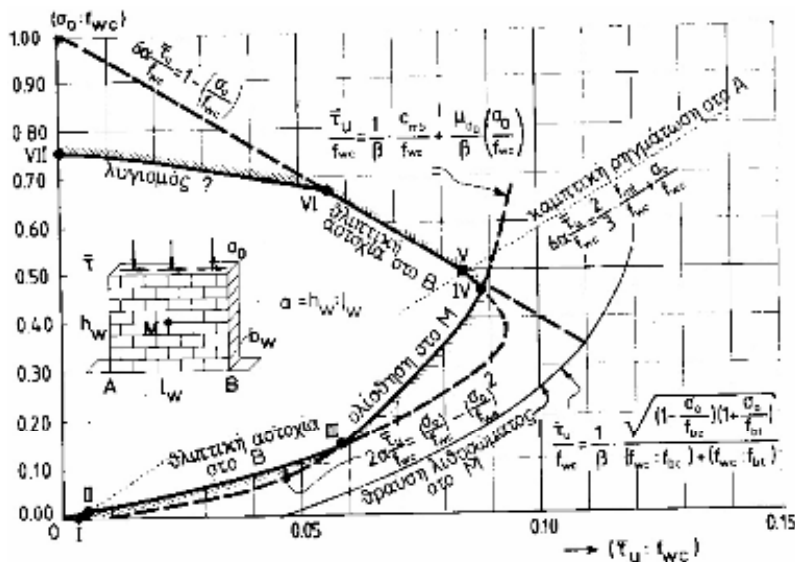
F : δύναμη τριβής κατά μήκος της θλιπτικής ζώνης της κεκλιμένης ρωγμής.

Διαγράμματα αλληλεπιδράσεως.

Παρακάτω δίνονται διαγράμματα που αφορούν μεμονωμένο τοίχο-πρόβολο για δεδομένη αξονική θλίψη (σ_0) και για ελάχιστες τιμές διατμητικής τάσης (τ_u) οι οποίες προκύπτουν από τις παραπάνω σχέσεις (βλ. Εικ. 3.18 και 3.19-Τάσιος 1992):



Εικ. 3.18: Υπολογιστικό διάγραμμα αλληλεπίδρασης για έναν τοίχο από άοπλη τοιχοποιία.



Εικ. 3.19: Διάγραμμα αλληλεπιδράσεως για έναν τοίχο από άοπλη τοιχοποιία που υπολογίστηκε με βάση πείραμα του Jolley-1976).

- **Απλοποιημένες σχέσεις διατμητικής αντοχής (τ_u) για μικρά αξονικά φορτία**

Το τμήμα του διαγράμματος αλληλεπιδράσεως που χρησιμοποιείται περισσότερο είναι το χαμηλό (για τιμές $\sigma_o/f_{wc} < 0.20$). Για το τμήμα αυτό οι μηχανισμοί διάτμησης και θλίψης ερμηνεύονται με τα δύο παρακάτω φαινομενικά μοντέλα. Για τη λειτουργία των μοντέλων αυτών θεωρείται ότι η τοιχοποιία συμπεριφέρεται ως ομογενές και ισότροπο υλικό.

- Διαγώνια ρηγμάτωση στο μέσον του τοίχου, όταν η κύρια εφελκυστική τάση της τοιχοποιίας υπερβεί την εφελκυστική της αντοχή f_{wt} .

Κύκλος Mohr:
$$\sigma_1 = -\frac{\sigma_o}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_o}{2}\right)^2 + (\beta\tau_u)^2}, \text{ όπου } \beta = 1.5$$

Επιλύοντας ως προς τ_u , προκύπτει:

$$\tau_u = \frac{f_{wt}}{\beta} \sqrt{1 + \frac{\sigma_o}{f_{wt}}}$$

όπου,

f_{wt} : εφελκυστική αντοχή του τοίχου,

τ_u : διατμητική αντοχή του τοίχου,

σ_o : ορθή τάση που δρα στην κορυφή του τοίχου.

Η παραπάνω σχέση διατμητικής τάσης τ_u προσεγγίζει τα πειραματικά αποτελέσματα διαφόρων ερευνητών όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.18.

- Μοντέλο ψευδοπροσφύσεως-ψευδοτριβής, όπου το μοντέλο αυτό θεωρεί την τοιχοποιία υλικό τύπου Coulomb (συνοχή-τριβή), όπου δημιουργείται μία οριζόντια ολίσθηση στο μέσο της τοιχοποιίας που δίνεται από την σχέση:

$$\tau_u = \tau_o + f \times \sigma_o$$

όπου,

τ_o : ψευδοσυνοχή,

f : συντελεστής ψευδοτριβής (όπου, $f = 0.3 \div 0.8$).

Παρατήρηση:

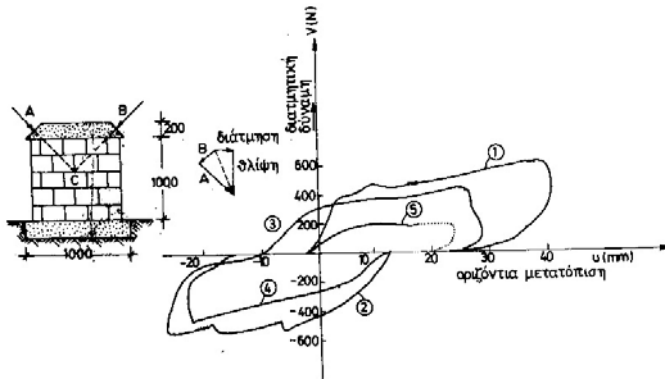
Επειδή αυτή η μορφή αστοχίας (διατμητική ολίσθηση στη βάση της τοιχοποιίας) παρατηρείται σπάνια και μόνο σε περιπτώσεις ασθενούς τοιχοποιίας, χρήση της παραπάνω σχέσης γίνεται μόνο σε τέτοιες περιπτώσεις και όχι σε άλλες γενικότερα.

3.2.5 Ανακυκλιζόμενη διάτμηση

Η γνώση πάνω στον τομέα της αστοχίας της τοιχοποιίας είναι αρκετά περιορισμένη και ειδικότερα στην περίπτωση της ανακυκλιζόμενης διάτμησης, η οποία επηρεάζει τις βασικές παραμέτρους της συμπεριφοράς της τοιχοποιίας (απόκριση, ακαμψία, απόσβεση, πλαστιμότητα). Παρόλα αυτά έχουν γίνει προσπάθειες επεξήγησης της συμπεριφοράς της τοιχοποιίας σε τέτοιες περιπτώσεις .

- **Απόκριση και ακαμψία**

Στην περίπτωση αύξησης του αριθμού των κύκλων φορτίσεως (επιρροή ανακυκλίσεως πάνω σε αυτές τις δύο ιδιότητες) τόσο η απόκριση όσο και η ακαμψία της τοιχοποιίας μειώνονται. Έχει παρατηρηθεί ότι εάν μειωθεί η ακαμψία αρκετών στοιχείων που αποτελούν μία κατασκευή φέρουσας τοιχοποιίας, μεγαλώνει η ιδιοπερίοδος ταλαντώσεως της κατασκευής με αποτέλεσμα τη μεταβολή της τέμνουσας δύναμης που οφείλει να αναλάβει η κατασκευή. Η μεταβολή αυτή μπορεί να επηρεάσει θετικά ή αρνητικά τη συμπεριφορά της τοιχοποιίας και αυτό εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της σεισμικής δράσης, από την αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής, από την ποιότητα της κατασκευής κ.ά. (βλ. Εικ. 3.19-Τάσιος 1992).

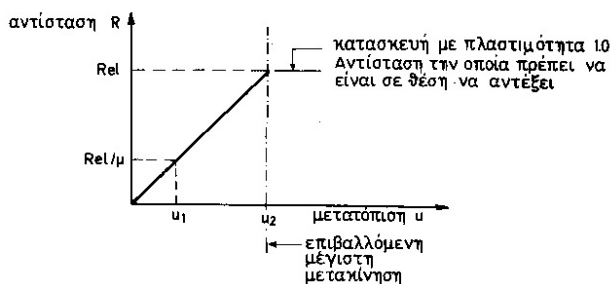


Εικ. 3.19: Τοπικό διάγραμμα ανακυκλιζόμενης φόρτισης τοίχου από άοπλη τοιχοποιία υπό σταθερό κατακόρυφο θλιπτικό φορτίο (Castellani et al, 1980)

• Πλαστιμότητα

Πλαστιμότητα είναι η ιδιότητα μίας κατασκευής να παραμορφώνεται πλαστικά μετά τη διαρροή της χωρίς να μειώνεται η αντίστασή της. Ειδικότερα, γνωρίζουμε ότι:

- Δείκτης πλαστιμότητας ($\mu = d_{M1}/D_{01}$) είναι ο λόγος της μέγιστης μετακίνησης (πέρα από την οποία το φορτίο αστοχίας δε μπορεί να διατηρηθεί σταθερό) ως προς τη μετακίνηση διαρροής (για την οποία πρώτη φορά επιτεύχθηκε το φορτίο αστοχίας) όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.20 (Τάσιος 1992).
- Στις άοπλες τοιχοποιίες παρουσιάζεται μικρή πλαστιμότητα λόγω ψαθυρής συμπεριφοράς, όπου λαμβάνεται ως $\mu=1.0$. Οι εν λόγω κατασκευές υπολογίζονται έτσι ώστε να βρίσκονται στην ελαστική τους φάση σε περίπτωση σεισμού και οι σεισμικοί συντελεστές πρέπει να διαιρούνται με 1.0 (για ελαστική γραμμική συμπεριφορά).



Εικ. 3.20: Αντίσταση σχεδιασμού κατασκευών από άοπλη τοιχοποιία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΑΘΟΛΟΓΙΑ ΦΕΡΟΥΣΩΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΩΝ

Για την επισκευή των φερουσών τοιχοποιιών, απαιτείται αρχικά να γνωρίζουμε τη σπουδαιότητα και το μέγεθος των βλαβών, τις απομένουσες αντοχές των βλαμμένων δομικών στοιχείων όπως και τους λόγους για τους οποίους παρουσιάστηκαν. Οι βλάβες μίας τοιχοποιίας στο σύνολό της, αλλά και μεμονωμένα στα δομικά της υλικά, είναι διαφόρων ειδών όπου άλλοτε είναι εμφανείς (εκδήλωση βλάβης στο εξωτερικό της) και άλλοτε όχι (εκδήλωση βλάβης στο εσωτερικό της), ελαφριάς μορφής ή επικίνδυνες για το σύνολο της κατασκευής. Και στις δύο περιπτώσεις κρίνεται αναγκαία η επισκευή/ενίσχυσή της.

4.1 Αιτίες που προκαλούν τις βλάβες στη φέρουσα τοιχοποιία⁽¹⁷⁾

Οι αιτίες που προκαλούν βλάβες στην τοιχοποιία είναι:

1. Ενδογενείς και σχετίζονται με:
 - Την κακή ποιότητα και ασυμβατότητα των υλικών της.
 - Την κακή ποιότητα δόμησης των υλικών της.
 - Τη λανθασμένη ή και ανύπαρκτη μελέτη σχεδιασμού της.
 - Την κακή μορφολογία της κατασκευής (ασυμμετρία).

2. Εξωγενείς, οι οποίες οφείλονται σε εξωτερικούς παράγοντες (δράσεις ποικίλων μορφών), όπως:
 - Περιβαλλοντικές δράσεις (αργή αλλά αυξανόμενη με τον χρόνο εκδήλωση):
 - Κύκλοι υγράνσεως και ξηράνσεως της τοιχοποιίας όπου η δράση του ύδατος μπορεί να είναι φυσική (αποδιοργάνωση των κονιαμάτων λόγω αύξησης του όγκου του ύδατος μετά την πήξη του), μηχανική (διάβρωση των λιθοσωμάτων και κυρίως του κονιάματος των αρμών), χημική (περιεκτικότητα χημικών οξέων).

- Κρυστάλλωση αλάτων όπου αν γίνεται στη μάζα των υλικών (κυρίως των κονιαμάτων των αρμών) οδηγεί σε επικίνδυνες διαρρήξεις της.
- Υγροποίησης υδρατμών στο εσωτερικό της τοιχοποιίας (συνέπεια φυσικοχημικής δράσης).
- Συγκράτηση υγρασίας στα σημεία έδρασης των στεγών, των υδρορροών, επαφής όμορων κτισμάτων όπου προκαλείται διάβρωση του συνδετικού κονιάματος.
- Παγετός.
- Ρίζες φυτών στο σώμα της λιθοδομής όπου δημιουργούνται τάσεις και αποσάθρωση του συνδετικού κονιάματος.
- Γήρανση της κατασκευής (φυσική φθορά).
- **Τυχηματικές** (σπάνιες αλλά με έντονη εκδήλωση):
 - Σεισμός.
 - Φωτιά.
 - Τοπικές κρούσεις κ.ά.
- **Δράσεις εδάφους** (διαφορικές καθιζήσεις, ολισθήσεις):
 - Κακή ποιότητα εδάφους.
 - Αστοχία θεμελίωσης λόγω υπερφόρτωσης όπως στην περίπτωση όπου υπάρχουν μεγάλα ανοίγματα στη στάθμη του ισογείου, με αποτέλεσμα τα φορτία να μεταφέρονται στο έδαφος συγκεντρωμένα και να του προκαλούν καθίζηση στα σημεία αυτά με απώτερη συνέπεια τη ρηγμάτωση της κατασκευής.
 - Διαφορικές καθιζήσεις εμφανίζονται πιθανότατα όταν:
 - Θεμελιώνονται κτίρια σε διαφορετικές στάθμες.
 - Τα θεμέλια μεταξύ τους κατασκευάζονται από διαφορετικά υλικά.
 - Οι διατομές μεταξύ των θεμελίων διαφέρουν.
 - Γίνεται προσθήκη κατ' επέκταση υπάρχοντος κτιρίου σε έδαφος που έχει μελετηθεί για λιγότερα ή διαφορετικά φορτία, όπου όταν οι εγκάρσιοι τοίχοι δε συνδέονται

μεταξύ τους με κοινά λιθοσώματα δημιουργούνται κατακόρυφες ρωγμές στην ένωση των δύο τμημάτων, ενώ όταν οι εγκάρσιοι τοίχοι συνδέονται μεταξύ τους με κοινά λιθοσώματα δημιουργούνται ρωγμές στα πιο ευαίσθητα σημεία της κατασκευής (ανώφλια, κατώφλια κ.ά.).

- Γίνεται προσθήκη κατ' επέκταση υπάρχοντος κτιρίου και το νέο κτίσμα είναι μικρό σε σχέση με το παλαιό, όπου το έδαφος κάτω από το υπάρχον υπερφορτίζεται σε αντίθεση με το έδαφος κάτω από το νέο με συνέπεια την αποκόλλησή του από το παλαιό, καθιστώντας τα σημεία ένωσή τους ευπαθή σε παράγοντες όπως την υγρασία κ.ά.
- Γίνεται προσθήκη κατ' επέκταση υπάρχοντος κτιρίου και το νέο κτίσμα είναι μεγάλο σε σχέση με το παλαιό, όπου τότε αναπτύσσονται αυξημένες τάσεις στο κοινό σημείο εδάφους και το υπάρχον κτίσμα τείνει να γείρει προς το νέο με συνέπεια τη δημιουργία ρωγμών στα σημεία ένωσής τους.
- Δύο βαριά κτίσματα απέχουν μικρή απόσταση μεταξύ τους, όπου μπορεί να συγκλίνουν λόγω των αυξημένων τάσεων που αναπτύσσονται στη μεταξύ τους περιοχή με αποτέλεσμα την ρηγμάτωσή τους.
- Κατασκευάζονται επιμήκη κτίσματα, όπου με πιθανή διαφοροποίηση των συνθηκών του εδάφους προκαλούνται ρηγματώσεις.
- Μετακίνηση θεμελίων από την αρχική τους θέση γεγονός που συμβαίνει πιθανότατα όταν:
 - Υπόγεια ύδατα ρέουν κάτω από τη θεμελίωση, τα οποία μπορούν να παρασύρουν τα στοιχεία της θεμελίωσης.
 - Ύδατα συστημάτων ύδρευσης ή αποχέτευσης ρέουν προς τη στάθμη της θεμελίωσης.

- Πραγματοποιούνται εκσκαφές όμορων οικοπέδων, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε εκτόνωση του εδάφους κάτω από τα θεμέλια και υποχώρηση αυτού.
- Συμπύκνωση του εδάφους της θεμελίωσης γεγονός που συμβαίνει πιθανότατα όταν οι κατασκευές πραγματοποιούνται πάνω σε σαθρό έδαφος το οποίο δεν έχει ήδη συμπυκνωθεί.
- Κίνηση του εδάφους θεμελίωσης γεγονός που συμβαίνει πιθανότατα όταν:
 - Το έδαφος όπου εδράζεται είναι αργιλικό και με την ύγρανση και ξήρανσή του διογκώνεται ή συρρικνώνεται αντίστοιχα, προκαλώντας ρηγματώσεις στην κατασκευή. Παρόμοιο φαινόμενο παρατηρείται και σε περίπτωση παγετού, όπου το έδαφος διογκώνεται προκαλώντας τις ίδιες συνέπειες.
 - Βρίσκονται δένδρα σε κοντινή απόσταση από τη θεμελίωση τα οποία μπορούν να επιφέρουν μετακινήσεις.
 - Το κτίσμα εδράζεται σε έδαφος αργιλικό με κλίση μεγαλύτερη ή ίση 1/10, όπου υπάρχει η τάση ολίσθησής του.

4.2 Κατηγοριοποίηση βλαβών⁽¹⁷⁾

Για την κατανόηση και την περιγραφή των βλαβών έχουμε, τους τυπικούς βαθμούς βλάβης, που αναφέρονται στα εναπομένοντα μηχανικά χαρακτηριστικά και διαθέσιμα περιθώρια ασφαλείας των βλαμμένων δομικών στοιχείων και το χαρακτήρα των βλαβών, που αναφέρεται στην ασφάλεια του συνόλου της κατασκευής και στον τρόπο επέμβασης που θα επιλεγεί.

- **Τυπικοί βαθμοί βλάβης**
 - Τα προβλήματα που μπορεί να εμφανιστούν στο επίπεδο της θεμελίωσης μίας κατασκευής (διαφορική καθίζηση, ολίσθηση

κ.ά.) κρίνονται πολύ σοβαρά στο σύνολό της και για αυτό έχουν αναπτυχθεί ειδικές τεχνικές επεμβάσεων.

- Στην περίπτωση της ανωδομής έχουμε:
 - **Βαθμό Α** (ελαφρές βλάβες): μεμονωμένες απλές ρωγμές μικρού πλάτους (μικρότερο από 5mm), κυρίως λόγω κάμψεως ή δευτερευόντων αιτιών.
 - **Βαθμό Β** (σοβαρές βλάβες): πολλές απλές ρωγμές (λόγω κάμψεως) ή μεμονωμένες διατμητικές ρωγμές μικρού πλάτους (μικρότερο από 2.5mm).
 - **Βαθμό Γ** (βαριές βλάβες): έντονη ρηγμάτωση μεγάλου πλάτους (μεγαλύτερη από 10mm για κατακόρυφες ή μεγαλύτερες από 5mm για λοξές ρωγμές), αποδιοργάνωση της τοιχοποιίας, βλάβες υπερθύρων, διαζωμάτων κ.ά.
- Χαρακτήρας βλαβών (έκταση βλαβών)
 - Βλάβες γενικού χαρακτήρα (καθολικές) θεωρούνται αυτές που εκτείνονται σχεδόν στο σύνολο των στοιχείων της κατασκευής.
 - Βλάβες μερικού χαρακτήρα θεωρούνται αυτές που εκτείνονται σε ποσοστό 1/3 έως 2/3 του συνόλου των στοιχείων της κατασκευής.
 - Βλάβες τοπικού χαρακτήρα (μεμονωμένες) θεωρούνται αυτές που εκτείνονται σε μεμονωμένα στοιχεία της κατασκευής.

Παραδείγματα απεικόνισης βλαβών κατασκευών από φέρουσα τοιχοποιία:



Εικ. 4.1



Εικ. 4.2



Εικ. 4.3



Εικ. 4.4



Εικ. 4.5



Εικ. 4.6



Εικ. 4.7



Εικ. 4.8

Εικ. 4.1-4.8: Παραδείγματα απεικόνισης βλαβών τοιχοποιιών.



Εικ. 4.9: Παράδειγμα απεικόνισης βλαβών στο πλαίσιο του ανοίγματος (πρέκι) και στο υπόλοιπο της τοιχοποιίας.

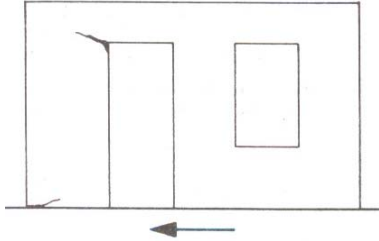


Εικ. 4.10, 4.11: Παραδείγματα απεικόνισης βλαβών επιχρισμάτων.

4.3 Περιγραφή/Απεικόνιση βλαβών τοιχοποιιών⁽¹⁷⁾

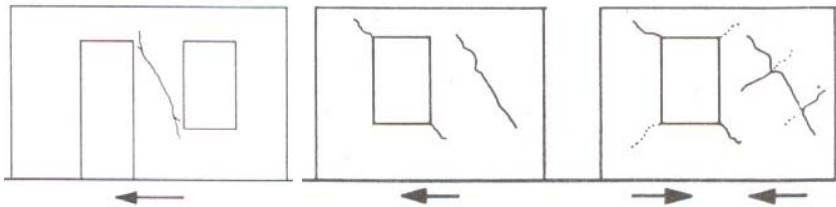
1. Βλάβες πεσσών (όχι συχνή μορφή):

- **Κάμψη πεσσών:**



Εικ. 4.12: Οριζόντιες ρωγμές.

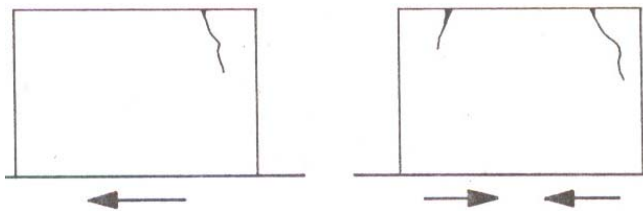
- **Διάτμηση πεσσών:**



Εικ. 4.13: Λοξές ή χιαστί ρωγμές.

2. Κατακόρυφα εφελκυστικά ρήγματα (στο πάνω μέρος των τοίχων, επιρροή άλλων στοιχείων):

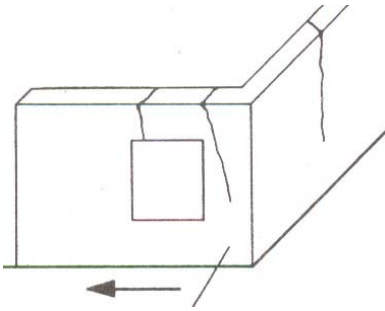
- **Πλημμελής έδραση στέγης (κακή στερέωση ή/και σε απόσταση):**



Εικ. 4.14: Ρωγμές στο πάνω τμήμα του τοίχου.

- **Κάμψη εγκάρσιων τοίχων – εφελκυσμός διαμήκων τοίχων (πολύ συχνή μορφή):**

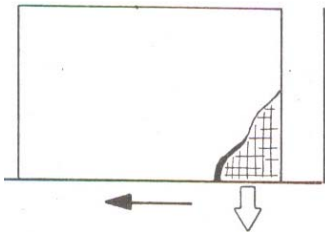
Στην περίπτωση εγκάρσιων τοίχων απαιτείται ισχυρή σύνδεση μεταξύ τους και ισχυρά καλοαγκυρωμένα πατώματα και στέγες αλλιώς υπάρχει κίνδυνος αποκόλλησης/αποσύνδεσής τους.



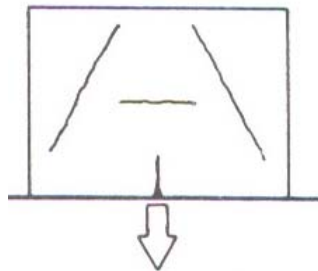
Εικ. 4.15: Ρωγμές στο πάνω τμήμα του τοίχου.

3. Κατακόρυφα εφελκυστικά ρήγματα (στο κάτω μέρος των τοίχων, επιρροή εδάφους):

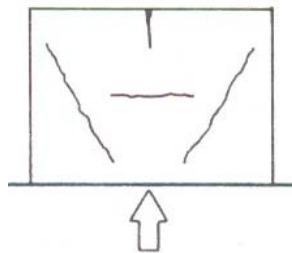
- Τοπική καθίζηση:



Εικ. 4.16: Κατάρρευση κάτω γωνίας

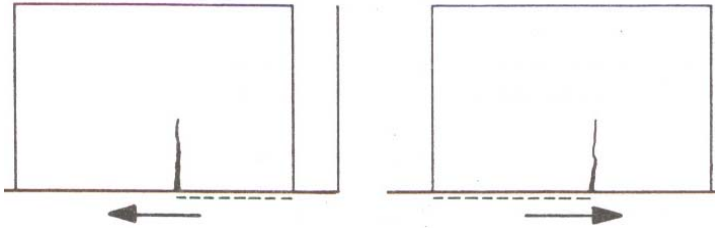


Εικ. 4.17: Καθίζηση στο μέσο (χωρίς σεισμό)



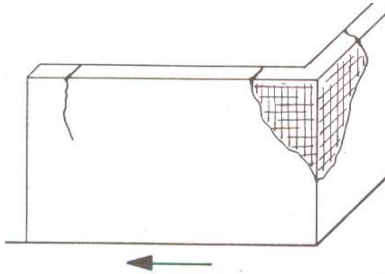
Εικ. 4.18: Διόγκωση στο μέσο.

- Τοπική ολίσθηση:



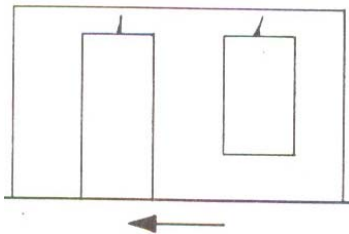
4. Βλάβες λόγω ισχυρής κατακόρυφης συνιστώσας σεισμού (περιοχές κοντά στο επίκεντρο):

- Ισχυρές διατμητικές τάσεις (διάφορο E για διάφορα τμήματα τοιχοσώματος)



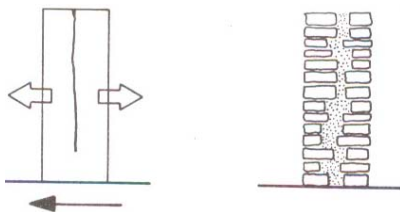
Εικ. 4.19: Κατάρρευση γωνίας.

- Κατακόρυφη κάμψη:



Εικ. 4.20: Ρωγμές στα πρέκια των ανοιγμάτων.

- Εγκάρσιες εφελκυστικές τάσεις διαρρήξεως (ανεξάρτητη δόμηση παρειών, έλλειψη εμπλοκής τοιχοσωμάτων, παραγέμισμα του πυρήνα του τοίχου):



Εικ. 4.21: Απολέπιση, κατάρρευση κατακόρυφων τμημάτων τοίχου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ

Στην περίπτωση εμφάνισης βλαβών σε μία τοιχοποιία γίνεται αποτίμηση του είδους και του μεγέθους τους (επανέλεγχος) και ανάλογα επιλέγεται η κατάλληλη μέθοδος επέμβασης (επισκευή/ενίσχυση), με σκοπό την πλήρη αποκατάσταση του τεχνικού έργου, προκειμένου να εξασφαλισθεί η ασφάλεια των ενοίκων και να διασωθεί το έργο.

Επισκευή βλαμμένων δομικών στοιχείων ονομάζεται η επαναφορά τους στην κατάσταση προ της βλάβης ενώ ενίσχυση βλαμμένων δομικών στοιχείων η βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών τους.

Κατά καιρούς έχουν γίνει επεμβάσεις επισκευής και ενίσχυσης σε κτίρια και άλλα τεχνικά έργα, όπου οι λιγοστές γνώσεις πάνω σε αυτό το θέμα οδήγησαν σε λανθασμένες επιλογές υλικών και σε κακή εφαρμογή τους, κάτι που ώθησε στη μελέτη για εξειδίκευση της γνώσης και δημιουργίας προδιαγραφών των υλικών και της δόμησής τους σε έργα από φέρουσα τοιχοποιία. Παρόλα αυτά πραγματοποιούνται εργασίες πάνω σε τέτοιου είδους κατασκευές λόγω άμεσης ανάγκης στήριξής τους, βασισμένες στους προς το παρόν συνταχθέντες κανονισμούς ενώ σε άλλες περιπτώσεις δυστυχώς, οι επιλύσεις βασίζονται σε εμπειρικές μεθόδους που έχουν εφαρμοστεί σε άλλες ανάλογες περιπτώσεις.



Εικ. 5.1, 5.2: Παραδείγματα επισκευασμένων κτιρίων (προσωπικό αρχείο)ν.

5.1 Παράγοντες επιλογής του είδους επέμβασης

Είναι αρκετοί οι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή του είδους της τεχνικής επέμβασης που θα εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε είδος κατασκευής από φέρουσα τοιχοποιία όπως:

- Σπουδαιότητα της κατασκευής, η οποία καθορίζει το είδος της επέμβασης όπως έργα ιστορικής και πολιτιστικής σημασίας, ιδιόκτητα έργα κ.ά.
- Απαίτηση ή όχι για αναστρεψιμότητα.
- Διατήρηση της μορφής της κατασκευής.
- Συμβατότητα των νέων υλικών επέμβασης με τα υπάρχοντα υλικά της κατασκευής.
- Δυνατότητα πρόσβασης των μηχανικών μέσων στα σημεία που χρειάζεται.
- Γνώση και εμπειρία του υποψήφιου εργατοτεχνικού προσωπικού που αναλαμβάνει το έργο της επισκευής.
- Συνολικό κόστος του έργου.
- Διάθεση του κατάλληλου εξοπλισμού για τέτοιου είδους εργασίες.

5.2 Μέθοδοι επέμβασης⁽⁷⁾

Η οποιαδήποτε διαδικασία επέμβασης προϋποθέτει πρώτα από όλα την ανάλυση της λιθοδομής σε όλα τα επίπεδα, τον καθορισμό του στόχου επέμβασης και την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου που έχει άμεση σχέση με τη διαθεσιμότητα των υλικών επέμβασης και της τεχνολογίας που διατίθεται στον τόπο εφαρμογής της. Παραδείγματα τέτοιων μεθόδων που μπορούν να εφαρμοστούν μεμονωμένα ή/και σε συνδυασμό είναι:

- Αρμολόγημα, όπου γίνεται αντικατάσταση του παλαιού κονιάματος, που έχει υποστεί βλάβη σε μικρό βάθος από την επιφάνεια του τοίχου, από νέο κονίαμα το οποίο πρέπει να είναι συμβατό με τα υπάρχοντα υλικά.
- Καθαίρεση των επιχρισμάτων που έχουν υποστεί βλάβη και ανακατασκευή τους με νέο υλικό.

- Ενέσεις ή εμποτισμοί εφαρμόζονται στο εσωτερικό της λιθοδομής σε περιπτώσεις ρωγμών και κενών, με την εισαγωγή ρευστού υλικού που στερεοποιείται με την πάροδο του χρόνου.
- Λιθοσυρραφή μεμονωμένου ή εγκάρσιων τοίχων όπου τα βλαμμένα λιθοσώματα αντικαθίστανται με νέους μακρόστενους λίθους συρραφής και εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν έντονες ρωγμές στους υπάρχοντες λίθους.
- Συρραφή τοίχου με χύτευση στοιχείου Ω/Σ όπου γίνεται καθαίρεση των υπάρχοντων λίθων και χυτεύεται υποστύλωμα από Ω/Σ στα σημεία αυτά.
- Συρραφή τοίχου με τζινέτια ή λάμες όπου γίνεται καθαίρεση των βλαμμένων λίθων και στις δύο παρειές του τοίχου, πλήρωση των κενών με ισχυρό και πηχτό τσιμεντοκονίαμα αφού τοποθετηθούν τζινέτια, ή αλλιώς ανακατασκευή του τοίχου ανάμεσα στις στρώσεις των τοιχοσωμάτων αφού τοποθετηθούν λάμες.
- Συρραφή εγκάρσιων τοίχων με ελκυστήρες ή σιδεροκατασκευή όπου μετά τη διάταξη των ελκυστήρων ή της σιδεροκατασκευής, ακολουθεί η προέντασή τους για την ανόρθωση των τοίχων και την σύσφιξη της γωνίας και γέμισμα των κενών ανάμεσα στους τοίχους με πλούσιο τσιμεντοκονίαμα.
- Λεπτές ζώνες ραφής τοίχου ή νευρώσεις όπου αφαιρούνται οι βλαμμένοι λίθοι και πληρώνεται το κενό από οπλισμένο γαρμπιλόδεμα το οποίο ωπλίζεται δημιουργώντας έτσι υποστύλωματα μικρής διατομής ή/και δοκούς.
- Πάκτωση αλληλοτεμνόμενων κοντών ράβδων οπλισμού (ριζοοπλισμοί) όπου τοποθετούνται χαλύβδινες ράβδοι οι οποίες πακτώνονται με ειδικά κονιάματα τα οποία συνήθως είναι καθαρά τσιμεντενέματα
- Μανδύες όπου γίνεται σκυροδέτηση με έγχυτο ή εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αγκυρωμένο στις φωλήες που δημιουργούνται στον υπάρχοντα τοίχο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΕΝΕΜΑΤΩΝ

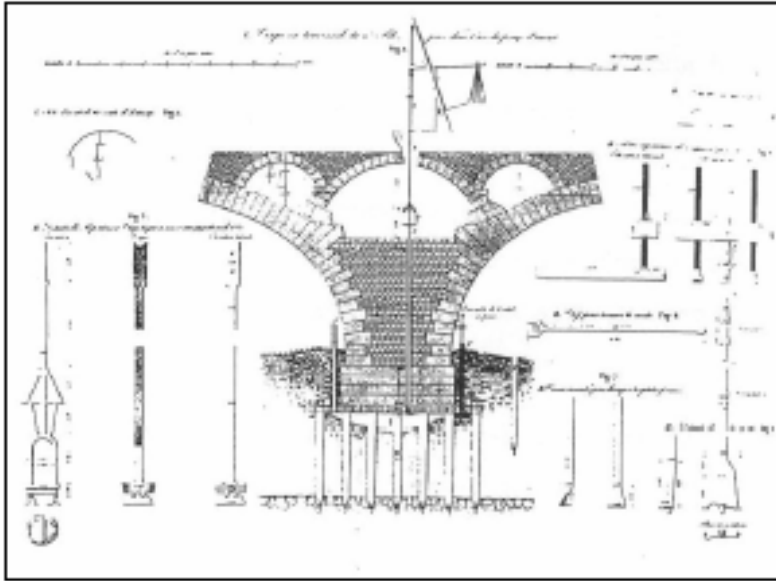
Γενικά⁽¹⁾

Η χρήση ενεμάτων, με τη μορφή ρευστού συστατικού που εισάγεται σε λιθοδομή, εμφανίζεται ήδη στην κατασκευή πολλών ρωμαϊκών και ρομανικών μνημείων όπου και υπάρχουν αποδείξεις για τη χρήση υδαρούς κονιάματος για την πλήρωση ρωγμών στην τοιχοποιία.

Τα ενέματα αρχίζουν να εφαρμόζονται για την επισκευή λιθοδομών από την αρχή του 19^{ου} αιώνα όταν ο Γάλλος μηχανικός Charles Berigny τα χρησιμοποίησε για να στερεώσει τοίχους από λιθοδομή στο λιμάνι της Dieppe. Λίγο αργότερα, τα ενέματα εφαρμόζονται για το γέμισμα κενών στα θεμέλια από λιθοδομή τριών βάθρων της γέφυρας της Tours στη Γαλλία.

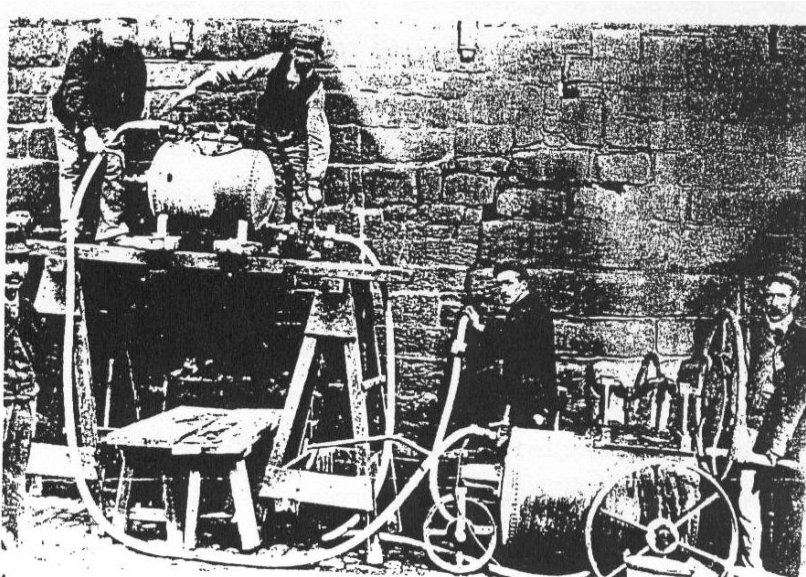
Γύρω στα μέσα του 19^{ου} αιώνα, η ανάγκη για την επέκταση των σιδηροδρομικών δικτύων με την εφεύρεση της ατμομηχανής, οδηγεί στην εκτεταμένη χρήση ενεμάτων, για την επισκευή και ενίσχυση των γεφυρών λόγω έντονης ανάγκης για ανάληψη αυξημένων φορτίων. Με την εφεύρεση της πρώτης μηχανής ενεμάτων υπό πίεση περίπου το 1888 από τον James Greathead στην Αγγλία, η χρήση της μεθόδου σε έργα εδάφους και υπεδάφους γίνεται συστηματική.

Παράλληλα, η μέθοδος χρησιμοποιείται συχνά σε λιθοδομές και αρχίζουν οι πρώτες εφαρμογές σε μνημεία. Ο sir Francis Fox το 1905, έχοντας εμπειρία στη χρήση της μηχανής κάνει τις πρώτες εφαρμογές στην κατασκευή του μετρό του Λονδίνου. Μέσα από την εμπειρία εφαρμογής του τσιμεντενέματος προκύπτει το πρόβλημα αδυναμίας του να διεισδύσει σε υλικά χαμηλής διαπερατότητας λόγω του μεγάλου ιξώδους του. Ήδη από το 1886 αρχίζει να αναπτύσσεται έρευνα για την αντιμετώπιση των προβλημάτων των ενεμάτων η οποία εστιάζει στη βελτίωση του εξοπλισμού εφαρμογής τους και την ανάπτυξη νέων υλικών.



Εικ. 6.1: Εφαρμογή ενεμάτων στη γέφυρα Tours στη Γαλλία.

Η επέκταση της εφαρμογής τόσο των τσιμεντενεμάτων όσο και των χημικών ενεμάτων στηρίχθηκε σε αξιόλογες έρευνες που έγιναν μετά το 1960, κυρίως για την εφαρμογή της μεθόδου σε έργα εδαφομηχανικής και θεμελιώσεων, επισκευής οπλισμένου σκυροδέματος κ.ά. Ειδικά για την εφαρμογή της μεθόδου σε λιθοδομές, η έρευνα είναι σε σχετικά αρχικό στάδιο και συγκεκριμένα αποτελέσματα δεν υπάρχουν ακόμα.



Εικ. 6.2: Η πρώτη μηχανή ενεμάτων υπό πίεση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΝΕΜΑΤΩΝ

7.1 Ορισμός⁽¹⁰⁾

Η τεχνική των ενεμάτων αφορά στην εισαγωγή ενός νέου υλικού σε ρευστή μορφή στην υπάρχουσα λιθοδομή με στόχο την πλήρωση ρωγμών, κενών και κοιλοτήτων. Με την πάροδο του χρόνου το νέο αυτό υλικό στερεοποιείται και βελτιώνει τόσο τα μηχανικά χαρακτηριστικά όσο και τη γενικότερη συμπεριφορά του μέλους στο οποίο έχει εισαχθεί. Τελικά, επιτυγχάνεται η αποκατάσταση της συνέχειας μεταξύ των αποσπασμένων ή ρηγματωμένων τμημάτων της λιθοδομής ή του αρχιτεκτονικού μέλους. Η εφαρμογή κατάλληλων ενεμάτων αποτελεί πλέον μια συνήθη πρακτική αποκατάστασης ρηγματωμένων και αποδιοργανωμένων αρχιτεκτονικών μελών ή κατασκευών από λιθοδομή, ιδιαίτερα σε σεισμογενείς περιοχές. Γίνεται είτε για τη συνολική (ομοιογενοποιημένη μάζα) είτε για την τοπική (ρωγμές, αποδιοργάνωση τοιχοποιίας κλπ) επισκευή/ενίσχυση της τοιχοποιίας.

Πρόκειται για μια μέθοδο που μπορεί να είναι τεχνικά αποτελεσματική και ταυτόχρονα ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα από την άποψη των αναστηλωτικών αρχών, καθώς διαθέτει το μεγάλο πλεονέκτημα να μπορεί, σε συνδυασμό με κατάλληλα αρμολογήματα και σφραγίσεις, να εξασφαλίζει εκ νέου συνέχεια, συνοχή και αντοχή των μελών ή του συνόλου της κατασκευής, χωρίς αλλοίωση της εξωτερικής μορφής και γεωμετρίας του και χωρίς αλλαγή του δομητικού συστήματός του. Οι αποκαταστάσεις με ενέματα έχουν εφαρμογή σε όλα τα είδη τοιχοποιίας.

Δεδομένου ότι πρόκειται για μια μη αναστρέψιμη επέμβαση που πραγματοποιείται στο εσωτερικό της τοιχοποιίας πριν από το σχεδιασμό του ενέματος θα πρέπει να εξετασθεί το σύνολο του δομητικού προβλήματος της κατασκευής ξεκινώντας από την εκτίμησή της και καταλήγοντας τελικά στο σχεδιασμό του υδραυλικού ενέματος.

7.2 Διρεύνηση του εσωτερικού της τοιχοποιίας και του μικροκλίματος⁽¹⁴⁾

Ο μελετητής, προκειμένου να σχεδιάσει την καταλληλότερη σύνθεση υδραυλικού ενέματος θα πρέπει να γνωρίζει πολύ καλά τι γίνεται στο εσωτερικό της. Ειδικότερα θα πρέπει να:

- Αναγνωρίσει τα υλικά τα οποία τη συνιστούν (φυσικοχημικά και μηχανικά χαρακτηριστικά, πορώδες υλικών κ.ά.).
- Γνωρίζει τον τρόπο δόμησης, τη γεωμετρία της (αρχιτεκτονικά μέλη τοποθετημένα εν ξηρώ, απλή τρίστρωτη τοιχοποιία, τρόπος οργάνωσης των στρώσεων κ.ά.).
- Υπολογίσει κατά προσέγγιση το ποσοστό των κενών και του ονομαστικού ελάχιστου εύρους των κενών της τοιχοποιίας στα οποία το ένεμα θα πρέπει να είναι ικανό να εισέλθει με ευκολία.
- Εκτιμήσει τις αντοχές των αρχιτεκτονικών μελών της τοιχοποιίας ως συνόλου πριν από την επισκευή. Στην περίπτωση λιθοδομών, γίνονται συνήθως προσεγγιστικές εκτιμήσεις δια μέσου εμπειρικών σχέσεων που συσχετίζουν την αντοχή των δομών, την αντοχή του κονιάματος και το μέσο εύρος των αρμών.

Εφόσον ολοκληρωθεί η παραπάνω διαδικασία, απαραίτητη είναι η γνώση της επιρροής των παραγόντων του εξωτερικού περιβάλλοντος όπως:

- Υγρασία, θερμοκρασία, κύκλοι παγετού.
- Ατμοσφαιρική ή υδρογεωλογική ρύπανση.

7.3 Απαιτήσεις επιτελεστικότητας⁽¹⁴⁾

Αφού ολοκληρωθούν η αναγνώριση της δομής της κατασκευής και προσδιοριστούν οι παράμετροι του μικροκλίματος, σειρά έχει ο προσδιορισμός των απαιτήσεων επιτελεστικότητας του ενέματος. Οι απαιτήσεις αυτές αφορούν:

- Στα επιθυμητά μηχανικά χαρακτηριστικά των αρχιτεκτονικών μελών ή της τοιχοποιίας ως συνόλου μετά την ενίσχυση όπως υπαγορεύονται από τη μελέτη δομητικής συμπεριφοράς. Με βάση τις απαιτήσεις της μελέτης και της δομής της κατασκευής εκτιμάται η

απαιτούμενη θλιπτική και εφελκυστική αντοχή του ενέματος, καθώς και η αντοχή συνάφειας με τα επί τόπου υλικά, το μέτρο ελαστικότητας κ.ά.

- Στις επιθυμητές φυσικοχημικές ιδιότητες των επί μέρους στοιχείων, αλλά και της τοιχοποιίας ως συνόλου μετά την επέμβαση.
- Στην προκαταρκτική επιλογή των πρώτων υλών με βάση όλες τις παραπάνω απαιτήσεις επιτελεστικότητας οι οποίες θα μπορούσαν εν δυνάμει να χρησιμοποιηθούν, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή τάξη μεγέθους των αντοχών, χωρίς όμως να διακινδυνεύεται η ανθεκτικότητα της κατασκευής.

Τόσο το ένεμα όσο και ο τρόπος εφαρμογής του θα πρέπει να σχεδιαστούν κατάλληλα ώστε να ικανοποιούνται όλες οι απαιτήσεις επιτελεστικότητας. Αφενός να εξασφαλιστεί η υψηλή ενεσιμότητα του ρευστού ενέματος και η πλήρωση των ρωγμών και κενών υπό χαμηλή πίεση (χωρίς περαιτέρω διατάραξη της υπό επισκευή κατασκευής) και αφετέρου να επιτευχθεί, μέσω της στερεοποίησής του, η βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών και της ανθεκτικότητας της κατασκευής χωρίς δευτερογενείς βλαπτικές επιπτώσεις στη συνολική συμπεριφορά της.

Ο σχεδιασμός του ενέματος θα πρέπει να γίνεται μέσω συγκεκριμένης μεθοδολογίας και κριτηρίων σχεδιασμού, καθώς μόνο με αυτό τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα της τεκμηρίωσης των αποφάσεων και των επιλογών των υλικών, αλλά και της εξεύρεσης εναλλακτικών λύσεων ανάλογα με τα εκάστοτε δεδομένα. Επιπλέον, σωστό είναι να αποφεύγεται η ανεξέλεγκτη χρήση συνταγών ή η διατύπωση προτάσεων για έτοιμες συνθέσεις που, αν και εύκολη και γρήγορη λύση, ενέχει σημαντικούς κινδύνους για το τελικό αποτέλεσμα. Κάθε περίπτωση λοιπόν, θα πρέπει να θεωρείται διαφορετική και να αντιμετωπίζεται ως τέτοια.

Οι απαιτήσεις του ενέματος μετά την εφαρμογή του τίθενται με βάση μια ολιστική θεώρηση της προς στερέωση κατασκευής και συμπεριλαμβάνουν την ενεσιμότητα, τις αντοχές και την ανθεκτικότητά

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

- Να είναι αιωρήματα σταθερά και επαρκώς ρευστά δηλαδή ομοιογενή αιωρήματα με κατάλληλα χαρακτηριστικά ρευστότητας, τα οποία να μπορούν να ενεθούν με χαμηλή πίεση (0.5-1.0Atm) και να διατηρούν την ομοιογένειά τους από τη στιγμή της παρασκευής τους μέχρι την ολοκλήρωση της διαδικασίας εισόδου τους στο εσωτερικό των ρωγμών/κενών των λιθοδομών και την έναρξη της πήξεως.
- Να διεισδύουν με ευκολία υπό χαμηλή πίεση 0.5-1.0Atm και σε λεπτές ρωγμές (εύρους λίγων δεκάτων του χιλιοστού), πράγμα που έχει κριθεί αναγκαίο προκειμένου να προσεγγισθούν δια μέσου του αποσαθρωμένου κονιάματος δομής ή των μικρού εύρους διόδων και να πληρωθούν κατά το μέγιστο δυνατό τα κενά και οι ρωγμές του εσωτερικού των επισκευαζόμενων δομικών στοιχείων (ιδιότητα που εξαρτάται από την κοκκομετρία της στερεάς φάσης του ενέματος).
- Να έχουν εύλογο χρόνο πήξης για να μπορεί να ολοκληρωθεί η εισαγωγή τους στο εσωτερικό των ρωγμών πριν την έναρξη της πήξης.
- Με τη στερεοποίησή τους να προσδίδουν στο αρχικό κονίαμα και στο υλικό πλήρωσης της λιθοδομής βελτιωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά και καλύτερα χαρακτηριστικά συνάφειας των υλικών αυτών με τους λίθους. Τα μηχανικά αυτά χαρακτηριστικά διαφοροποιούνται ανάλογα με την ποιότητα της επισκευαζόμενης τοιχοποιίας και ορίζονται από την εκάστοτε μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς της επισκευαζόμενης κατασκευής, ανάλογα με τις προσδοκούμενες αντοχές της τοιχοποιίας με τα ενέματα.
- Να έχουν διάρκεια στο χρόνο και φυσικοχημικές ιδιότητες συμβατές με τα υπάρχοντα υλικά (χημική σύνθεση, πορώδες κ.ά.).

Γενικά, μπορούμε να πούμε πως η μέθοδος των ενεμάτων συγκεντρώνει αρκετά θετικά χαρακτηριστικά για το ρόλο επισκευής και ενίσχυσης λιθοδομών συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεθόδους επειδή:

- Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή του μείγματος ενεμάτων έχουν ελεγχόμενες ιδιότητες, προσαρμοσμένες κάθε φορά στα απαιτούμενα μέτρα του υποψήφιου τεχνικού έργου.
- Εξασφαλίζεται η συνέχεια, η συνοχή και η αντοχή των στοιχείων της λιθοδομής.
- Χαρακτηρίζεται από την ευκολία χρήσης πρώτων υλών, για την παρασκευή του μείγματος των ενεμάτων ίδιας ή παρόμοιας σύστασης με αυτήν των υπαρχόντων στοιχείων της λιθοδομής.
- Διατηρείται το αρχιτεκτονικό στοιχείο των αρχιτεκτονικών μελών της κατασκευής, αλλά και του συνόλου της χωρίς να αλλοιώνεται η εξωτερική της μορφή, η γεωμετρία και η στατική της λειτουργία.
- Υπάρχει συνεχής βελτίωση των χρησιμοποιούμενων υλικών και των οργάνων εφαρμογής της μεθόδου.
- Διασφαλίζεται καλή συνεργασία με άλλες μεθόδους, όταν αυτές απαιτούνται.
- Το κόστος σχεδιασμού και εφαρμογής είναι χαμηλό.

Συνεπώς, η εφαρμογή τους καλύπτει την αποκατάσταση των βλαβών και τη διατήρηση της αρχικής μορφής της κατασκευής, δίνοντας ικανοποιητικά αποτελέσματα. Παρόλα αυτά δε μπορούμε να αγνοήσουμε τα προβλήματα που παρουσιάζονται σε τέτοιου είδους εργασίες επέμβασης όπως:

- Η δυσκολία διείσδυσης του μείγματος για την πλήρωση των κενών της λιθοδομής, λόγω του υψηλού ιξώδους και της θιξοτροπίας του.
- Η ευαισθησία των υλικών παραγωγής μείγματος των ενεμάτων σε περίπτωση πυρκαγιάς.
- Η σχετική δυσκολία εξασφάλισης της συνεργασίας των υλικών του μείγματος των ενεμάτων με τα υπάρχοντα υλικά της λιθοδομής.
- Η μη αναστρεψιμότητα της μεθόδου αυτής καθ' αυτής.

Για τους παραπάνω λόγους, επιδιώκονται συνεχώς, μέσα από τις εργαστηριακές δοκιμές, η βελτίωση του εξοπλισμού (μηχανήματα ελέγχου και εφαρμογής της μεθόδου) και η ανάπτυξη και χρήση νέων υλικών (συμβατών με τα υπάρχοντα) για τη δημιουργία ενεμάτων που να μπορούν να προσαρμόζονται στις διαφορετικές περιπτώσεις λιθοδομών που υπάρχουν, ελαχιστοποιώντας έτσι την αστοχία του ενέματος και κατά συνέπεια και της λιθοδομής.

Στο σημείο αυτό είναι αναγκαίο να γίνει κατανοητός ο διαχωρισμός της έννοιας του ενέματος από αυτή του κονιάματος. Ο ρόλος του ενέματος στη μάζα της λιθοδομής είναι να αποκαταστήσει τη συνέχειά της και τη συνεργασία των επί μέρους στοιχείων της. Παρά το ότι το ένεμα είναι ένας τύπος κονιάματος που καταλαμβάνει θέσεις όπου θεωρητικά θα έπρεπε να υπάρχει το αρχικό κονίαμα δόμησης της λιθοδομής διαφέρει από αυτό ριζικά γιατί:

- Το κονίαμα δόμησης μπορεί απλώς να είναι εργάσιμο γιατί εφαρμόζεται μαζικά και κατά στρώσεις ενώ το ένεμα εφαρμόζεται συχνά σε πολύ μικρές ποσότητες και πρέπει να έχει τη δυνατότητα να εισάγεται μέσα σε μία ήδη υπάρχουσα δομή και σε χώρους δυσπρόσιτους.
- Οι συνθήκες πήξεως ενέματος και κονιάματος είναι διαφορετικές.
- Υπάρχει η πρόσθετη απαίτηση το ένεμα να συνεργαστεί όχι μόνο με τους λίθους ή τις πλίνθους της τοιχοποιίας, αλλά και με το ήδη υπάρχον κονίαμα δομής.

Κατά συνέπεια το ένεμα είναι μια νέα σύνθεση που στόχο έχει την όσο το δυνατόν καλύτερη συνεργασία με τα ήδη υπάρχοντα στοιχεία της λιθοδομής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΝΕΜΑΤΩΝ

Τα ενέματα διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τα πολυμερή και τα υδραυλικά. Βασική διαφορά των δύο αυτών κατηγοριών είναι ότι τα πολυμερή έχουν ως κύριο συστατικό τους οργανικά υλικά ενώ τα υδραυλικά ανόργανα. Σε κάθε περίπτωση μπορεί να είναι αιωρήματα στερεών ή κολλοειδών σωματιδίων, διαλύματα αληθής ή κολλοειδής ή κονιάματα.

8.1 Πολυμερή ενέματα⁽⁹⁾

Τα πολυμερή ενέματα, δηλαδή τα οργανικά, παρουσιάζουν το πλεονέκτημα ότι το ιξώδες τους μπορεί να προσαρμόζεται ανάλογα με το εύρος της ρωγμής και των πόρων του υποδοχέα, προκειμένου να επιτυγχάνεται υψηλή διεισδυτικότητα. Η χρήση τους κρίνεται μάλλον ακατάλληλη σε περιπτώσεις ενίσχυσης/επισκευής λιθοδομής επειδή τα πολυμερή έχουν:

- Μηχανικά και φυσικά χαρακτηριστικά διαφορετικά από εκείνα της λιθοδομής.
- Προβληματική συνάφεια παρουσία υγασίας.
- Διάρκεια ζωής άγνωστη ως σήμερα.

Κατά συνέπεια, η χρήση τους θα πρέπει να γίνεται κατόπιν μεγάλης διερεύνησης και εκτεταμένης μελέτης. Μάλιστα περιορίζεται σε περιπτώσεις πλήρωσης ρωγμών, μικρότερων από 0.1mm, υλικών μεγάλης αντοχής και μικρού πορώδους ενώ είναι ακατάλληλα για αρχιτεκτονικά μέλη που εκτίθενται στη δράση του περιβάλλοντος.

Το χαρακτηριστικό των πολυμερών ενεμάτων είναι ότι εφαρμόζονται σε υγρή μορφή και στη συνέχεια μετατρέπονται σε στερεό υλικό αποτελώντας συγκολλητικό μέσο. Το οργανικό συστατικό τους μπορεί να είναι:

- Φυσικό σύστημα, όπου το πολυμερές εφαρμόζεται υπό τη μορφή διαλύματος και ξηραίνεται με την εξάτμιση του διαλύτη.

- Αντιδρόν σύστημα σε διάλυμα, όπου ο διαλύτης δεν αντιδρά στο σχηματισμό του πολυμερούς, αλλά χρησιμεύει για την εξασφάλιση ικανοποιητικού ιξώδους. Το διαλυτικό μέσο αντιδρά με άλλο συστατικό και σχηματίζει το πολυμερές ενώ μετά την εφαρμογή ο διαλύτης εξατμίζεται.
- Ενεργά συστατικά διαλυμένα σε ενεργό διάλυμα, όπου ο διαλύτης και το διαλυτικό αντιδρούν και σχηματίζουν το πολυμερές.
- Αντιδρόν σύστημα χωρίς διαλύτη, όπου στην περίπτωση αυτή τα συστατικά αντιδρούν χωρίς την παρουσία διαλύτη και σχηματίζουν το πολυμερές.

Ήδη εδώ και πολλά χρόνια τα πολυμερή ενέματα έχουν πάψει να χρησιμοποιούνται λόγω της μεγάλης φυσικοχημικής και μηχανικής τους ασυμβατότητας, αφού προκαλούν εξώθερμες αντιδράσεις και κρίνονται ακατάλληλα για τη στερέωση της τοιχοποιίας.

Άλλο ένα σύστημα πολυμερούς ενέματος είναι και οι ρητίνες η χρήση των οποίων δεν ενδείκνυται στην επισκευή φέρουσας τοιχοποιίας. Δημιουργούνται από πλαστικό και σκληρυντή και σχηματίζουν πολυμερές με διάφορες ιδιότητες, από μαλακό ελαστικό μέχρι σκληρό στερεό. Οι εποξειδικές ρητίνες χρησιμοποιούνται συνήθως για ενέσεις εντός ρωγμών προς συγκόλληση ρηγματωμένου σκυροδέματος ή για επικολλήσεις λεπτών μεταλλικών φύλλων πάνω στην επιφάνεια του σκυροδέματος.

8.2 Υδραυλικά ενέματα⁽⁹⁾

Τα υδραυλικά ενέματα είναι η κατεξοχήν κατηγορία ενεμάτων που χρησιμοποιείται για την αποκατάσταση της φέρουσας τοιχοποιίας. Τα ανόργανα υλικά όπως το τσιμέντο, η υδραυλική άσβεστος, η θηραϊκή γη, η αιωρούμενη τέφρα, η άργιλος κ.ά. έχουν μηχανικά και φυσικά χαρακτηριστικά αρκετά φιλικά και όμοια με αυτά των υλικών της λιθοδομής και ιδιαίτερα με τα κονιάματα. Η διάρκεια ζωής τους είναι γνωστή και παρουσιάζουν συνάφεια με την υπάρχουσα λιθοδομή που κρίνεται ικανοποιητική. Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματά τους

είναι ότι συντηρούνται στο νερό ή σε περιοδικά υγραινόμενο περιβάλλον χωρίς να διαλύονται. Υπάρχουν όμως και κάποιες αδυναμίες σε ό,τι αφορά στη διεισδυτικότητα τους σε μικρές ρωγμές, αλλά και στο υψηλό κόστος παρασκευής τους.

Η χρήση τους ενδείκνυται για την επισκευή παλαιών λιθοδομών και ρηγματωμένων λίθινων αρχιτεκτονικών μελών υπό την προϋπόθεση σωστού σχεδιασμού στο εργαστήριο, τόσο ως προς τη διεισδυτικότητα όσο και ως προς τη συμβατότητά τους με τα υπάρχοντα υλικά της υπό επισκευή/ενίσχυση λιθοδομής .

Τα υδραυλικά ενέματα μπορεί να αποτελούνται από τα εξής συστατικά:

- Συνθετική κονία: πρόκειται συνήθως για κάποιο τσιμέντο χαμηλής περιεκτικότητας σε θειικά αλκάλια ή υδραυλική άσβεστο. Αποτελεί το πρώτο υλικό που θα προσδώσει αντοχή στο μείγμα και με τις υδραυλικές συνδετικές της ιδιότητες προσδίδει στο ένεμα την αντοχή και την ικανότητα που απαιτείται για να επισκευαστεί η λιθοδομή.
- Ποζολάνες τεχνητές ή φυσικές δηλαδή θηραϊκή γη, πυριτική παιπάλη, αιωρούμενη τέφρα κ.ά: πρόκειται για πυριτικά ή αλουμονοπυριτικά υλικά τα οποία όταν είναι λεπτοαλεσμένα και περιέχουν κάποιο ποσοστό υγρασίας αντιδρούν με το υδροξείδιο του ασβεστίου (ποζολανική αντίδραση) δίνοντας σταθερές ενώσεις με συνδετικές ικανότητες παρόμοιες με εκείνες που προκύπτουν από την ενυδάτωση του τσιμέντου ή της υδραυλικής ασβέστου. Βασική τους ιδιότητα είναι ότι αυξάνουν την αντοχή και την ανθεκτικότητα του μείγματος.
- Υδράσβεστος: είναι απαραίτητη για να βελτιώσει τη ρευστότητα και τη σταθερότητα του μείγματος ενώ παράλληλα βελτιώνει τις αντοχές μέσω της ποζολανικής αντίδρασης.
- Πρόσμικτα: η επιλογή τους θα πρέπει να γίνεται με στόχο τη μείωση του χρησιμοποιούμενου από τη σύνθεση νερού, τη βελτίωση της ρευστότητας και της σταθερότητάς του.

- Άμμος (ή άλλο λεπτόκοκκο αδρανές υλικό μέγιστου κόκκου $d_{max}=1.0mm$): χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις πλήρωσης ρωγμών μεγάλου εύρους.

Μέχρι πρόσφατα, για την ενίσχυση της λιθοδομής χρησιμοποιούνταν ενέματα με βασικό συστατικό το τσιμέντο portland (τσιμεντενέματα). Τα ισχυρά αυτά ενέματα αυξάνουν πολύ τη θλιπτική αντοχή της φέρουσας τοιχοποιίας όμως δημιουργούν σημαντικά προβλήματα σε παλιές τοιχοποιίες από λιθοδομή και μνημεία λόγω της ασυμβατότητας των υλικών τους με αυτά της λιθοδομής. Προκαλούν σκουρόχρωμους λεκέδες, εξανθήματα και τοπικές επιφανειακές ρήξεις λόγω του σχηματισμού μερικώς αδιάλυτων υλικών κατά την αντίδραση της τοποθέτησης. Επιπλέον, δεν είναι πολύ αποτελεσματικά στην πλήρωση μεγάλων κενών διότι εκτός από την εμφάνιση διαλυτών αλάτων, δημιουργούν προβλήματα που συνδέονται με ανεπαρκή ευκινησία, μεγάλη συστολή και τελικά ευθραυστότητα. Αν και τέτοια ενέματα είναι ελκυστικά λόγω χαμηλής τιμής και απλότητας στο σχεδιασμό τους, δε συνίσταται η χρήση τους σε λιθοδομές.

Ο στόχος μας λοιπόν είναι να αντικαταστήσουμε το τσιμέντο με άλλα υλικά σε τέτοιο βαθμό ώστε τελικά το μείγμα που θα προκύψει να περιέχει τσιμέντο σε ποσοστό μέχρι 25%-30%. Με αυτό τον τρόπο προκύπτει τριμερές μείγμα το οποίο είναι πιο συμβατό σε ό,τι αφορά στα υλικά, στις μηχανικές και φυσικοχημικές ιδιότητες της λιθοδομής.

Στον Πίνακα 8.1 (Miha Tomazecic 1999) που ακολουθεί δίνονται τυπικές συνθέσεις τροποποιημένων μιγμάτων. Παρατηρούμε ότι αν η σύνθεση του ενέματος αλλάξει αντικαθιστώντας το τσιμέντο από αδρανή υλικά και γίνει ταυτόχρονα προσθήκη υδρόφοβων συστατικών, μειώνεται σημαντικά η θλιπτική αντοχή του αρχικού μείγματος χωρίς να επηρεάζεται η πλευρική αντίσταση της λιθοδομής.

ΠΙΝΑΚΑΣ 8.1: Σύνθεση τυπικών μειγμάτων για ενέματα λιθοδομών, επί % της μάζας⁽²⁰⁾.

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

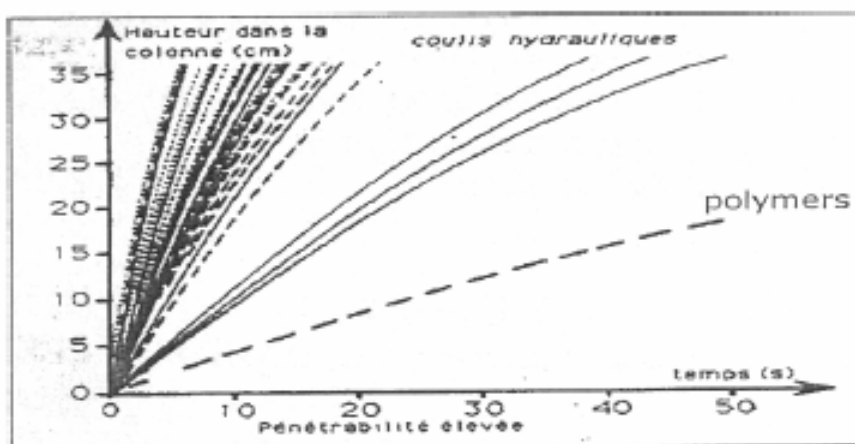
*επί % του συνόλου

Ένα από τα σημαντικότερα συστατικά των ενεμάτων μπορεί να είναι η ιπτάμενη τέφρα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (S). Η ιπτάμενη τέφρα σε συνδυασμό με τσιμέντο ή ασβέστη ή και τα δύο (και άλλα πρόσθετα υλικά) παρέχουν διόγκωση ή βοηθούν την κινητικότητα και την εναιώρηση του μείγματος. Ο συνδυασμός ιπτάμενης τέφρας και ασβεστοκονιάματος παράγει ένα ευκίνητο, χαμηλής προς μεσαίας αντοχής ένεμα, το οποίο συχνά είναι αυτό που απαιτείται για την πλήρωση κενών λιθοδομής. Η αντιδρούσα ιπτάμενη τέφρα είναι ένα ποζολανικό πρόσθετο υλικό το οποίο εκτός του ότι επιταχύνει την πήξη του ασβεστοκονιάματος σε υγρές συνθήκες, επιπλέον βοηθά στην εισχώρησή του.

Ο μπετονίτης είναι ένα άλλο πρόσθετο που βοηθά στη διατήρηση του τσιμέντου, της τέφρας, του ασβέστη σε μορφή εναιωρήματος αποφεύγοντας έτσι την καθίζησή του κατά τη διάρκεια της διαδικασίας έκχυσης του ενέματος.

8.3 Συνθέσεις ενεμάτων με λεπτόκοκκα υλικά⁽⁸⁾

Πειράματα έδειξαν πως η αντικατάσταση του τσιμέντου με λεπτόκοκκα υλικά στην κατάλληλη ποσότητα, επιτρέπει την παρασκευή υδραυλικών ενεμάτων διεισδυτικών σε πολύ λεπτές ρωγμές. Ο σχεδιασμός αυτού του τύπου υδραυλικού ενέματος είναι ο επιθυμητός σε περιπτώσεις ενίσχυσης/επισκευής λιθοδομών που εξετάζεται στην παρούσα εργασία. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 8.1 (Μιλιάδου 2004) τα υδραυλικά ενέματα που προκύπτουν έχουν καλή ενεσιμότητα.



Εικ. 8.1: Καμπύλες διεισδυτικότητας υδραυλικών ενεμάτων

Οι συνήθεις συνδυασμοί είναι:

- Ένεμα με βασικό συστατικό το τσιμέντο, κατάλληλης σύνθεσης και κοκκομετρίας με πολύ λεπτόκοκκα υλικά (φυσική ποζολάνη ή υδράσβεστος σε μορφή σκόνης) και χρήση μικρής ποσότητας ρευστοποιητή. Ο συνδυασμός λεπτόκοκκων υλικών με το τσιμέντο βελτιώνει τη διεισδυτικότητα και σταθερότητα του ενέματος, αλλά αυξάνει τη δυνατότητά του να συγκρατεί σημαντικό ποσοστό του νερού που χρησιμοποιήθηκε κατά την παρασκευή του, κυρίως λόγω της μεγάλης ειδικής επιφάνειας των κόκκων του λεπτόκοκκου υλικού. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται η επίτευξη των εκάστοτε κατάλληλων αντοχών. Το ακριβές ποσοστό και το είδος του ή των λεπτόκοκκων υλικών που θα χρησιμοποιηθούν, εξαρτάται από την κοκκομετρική διαβάθμιση του τσιμέντου ή της υδραυλικής

ασβέστου, τη στάθμη των επιθυμητών αντοχών του ενέματος που ορίζεται από τη μελέτη, αλλά και τις απαιτήσεις ανθεκτικότητας. Το υλικό αυτό πρέπει να έχει κόκκους διαμέτρου κατά προτίμηση μικρότερους από 32 μm στην περίπτωση που το ένεμα πρέπει να διεισδύσει σε ρωγμές εύρους 0.1mm – 0.2mm και μικρότερους από 64 μm στην περίπτωση ρωγμών εύρους 0.2mm – 0.4mm. Ως λεπτόκοκκο υλικό χρησιμοποιείται συνήθως συνδυασμός υδρασβέστου σε σκόνη και φυσικής ή τεχνητής ποζολάνης.

- Ένεμα με βάση τη φυσική υδραυλική άσβεστος ειδικών προδιαγραφών με λεπτόκοκκη φυσική ποζολάνη προκειμένου να βελτιωθούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του ενέματος και η ανθεκτικότητά του. Τα ενέματα στερέωσης με βάση τη φυσική υδραυλική άσβεστο είναι σε πολλές περιπτώσεις καταλληλότερα όσο αφορά στη φυσικοχημική τους συμβατότητα με τα αυθεντικά υλικά μιας παλιάς λιθοδομής. Λόγω των υδραυλικών ιδιοτήτων της εν λόγω κονίας, αποκτούν πρόιμη αντοχή η οποία αυξάνεται με το χρόνο. Επιπλέον ενίσχυση επέρχεται με την αντικατάσταση μικρού μέρους της από ποζολάνη (ποζολανική αντίδραση).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΕΝΕΜΑΤΩΝ

Οι επιθυμητές ιδιότητες των υδραυλικών ενεμάτων προσδιορίζονται σε σχέση με τον ιδιαίτερο ρόλο που καλούνται να παίξουν μέσα στη μάζα της λιθοδομής, ώστε να αποκατασταθεί η συνέχειά της και η συνεργασία των επί μέρους στοιχείων της.

9.1 Φάσεις υδραυλικού ενέματος⁽¹¹⁾

9.1.1 Ένεμα σε υγρή κατάσταση

Στην υγρή κατάσταση το ένεμα θα πρέπει:

- Να είναι αρκετά ρευστό καθ' όλη τη διάρκεια της ένεσης ώστε να μπορεί να εισχωρήσει και να γεμίσει τα κενά με χρήση χαμηλών πιέσεων (μέγιστη πίεση 1.0Atm) ώστε να μη διαταραχτεί η ήδη καταπονημένη λιθοδομή.
- Η πήξη του να μην επηρεάσει καθόλου τη διενέργεια της ένεσης.

9.1.2 Ένεμα κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης

Κατά τη διάρκεια στερεοποίησης του ενέματος θα πρέπει:

- Το ένεμα να αποκτήσει μια ελάχιστη διατμητική αντοχή σε εύλογο χρονικό διάστημα ώστε να μπορέσει να αντισταθεί στις δυνάμεις βαρύτητας και στις υδραυλικές πιέσεις που τείνουν να το μετακινήσουν.
- Το μείγμα να διατηρεί σταθερή σύνθεση μέχρι την πήξη του (αποφυγή καθίζησης).
- Να μη γίνουν ανεπιθύμητες φυσικοχημικές αντιδράσεις ανάμεσα στα συστατικά του ενέματος και σε αυτά της λιθοδομής.
- Να αποφευχθεί η συστολή ξήρανσης.
- Η πήξη του ενέματος να μην επηρεαστεί από το βαθμό υγρασίας της λιθοδομής ή από την απουσία αέρα.
- Ο χρόνος πήξης να είναι εύλογος και αξιόπιστος.

- Το ένεμα να μην εκλύει τοξικά ή επικίνδυνα προϊόντα κατά τη διάρκεια της πήξης.

9.1.3 Ένεμα μετά τη στερεοποίηση

Μετά τη στερεοποίηση του ενέματος θα πρέπει:

- Η μηχανική αντοχή του να είναι του ίδιου επιπέδου περίπου με αυτή του υπάρχοντος κονιάματος, εκτός εάν για ειδικούς λόγους απαιτείται από τη μελέτη μεγαλύτερη ή μικρότερη.
- Το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος Poisson και ο συντελεστής θερμικής διαστολής να προσεγγίζουν αυτά της λιθοδομής.
- Να επιτευχθεί ικανοποιητική αντοχή συνάφειας με τα υπάρχοντα υλικά ανεξάρτητα από την παρουσία υγρασίας, ξηρασίας, σκόνης κ.ά.
- Οι αποκτηθείσες μηχανικές ιδιότητες να διατηρούνται στο χρόνο και ο όγκος του ενέματος να μην επηρεάζεται από την υγρασία.
- Το πορώδες και η κατανομή των πόρων να είναι τέτοια ώστε να μην επηρεάζουν την ομαλή κυκλοφορία της υγρασίας στη λιθοδομή.
- Να αποφεύγεται ή να μειώνεται στο ελάχιστο ο σχηματισμός διαλυτών αλάτων κατά τη διάρκεια της πήξης του.

9.2 Ενεσιμότητα υδραυλικού ενέματος^(10, 14)

Όταν αναφερόμαστε στην ενεσιμότητα του υδραυλικού ενέματος, ως ιδιότητα, ουσιαστικά αναφερόμαστε στην υγρή του φάση και συγκεκριμένα μας ενδιαφέρει η σταθερότητα, η ρευστότητα και η διεισδυτικότητά του. Τα επιθυμητά χαρακτηριστικά για τη διασφάλιση της επιθυμητής ενεσιμότητας του ενέματος αφορούν:

- Στην ικανοποιητική διεισδυτικότητά του σε ρωγμές και κενά ονομαστικού ελάχιστου εύρους, όπως αυτό έχει οριστεί. Η διεισδυτικότητα ορίζεται ως η αρμόζουσα σχέση μεταξύ ενεργού μέγιστου μεγέθους κόκκων των στερεών συστατικών του ενέματος αφενός, και του ονομαστικού ελάχιστου εύρους των κενών της τοιχοποιίας αφετέρου.

- Στην κατάλληλη κοκκοδιαβάθμιση της στερεάς φάσης του ενέματος, προκειμένου να διασφαλίζεται ανεμπόδιστα η διέλευσή του μέσα από τα κενά της τοιχοποιίας,
- Στην επαρκή ρευστότητα και σταθερότητα του αιωρήματος.

9.2.1 Διεισδυτικότητα

Με τον όρο διεισδυτικότητα εννοούμε τη δυνατότητα του ενέματος να διεισδύει στις ρωγμές ή τους πόρους της λιθοδομής. Ένα υδραυλικό ένεμα είναι ένα κοκκώδες αιώρημα το οποίο πρέπει να εισαχθεί σε κάποια ρωγή με δεδομένο εύρος. Είναι φυσικό ότι ανάμεσα στο μεγαλύτερο κόκκο αυτού του αιωρήματος και στο εύρος της ρωγμής να υπάρχει μια σχέση. Αν οι κόκκοι είναι πολύ μεγάλοι είναι αδύνατο να περάσουν μέσα από μια λεπτή ρωγή. Πειραματικά και εμπειρικά έχει προκύψει το συμπέρασμα ότι τα ενέματα στα οποία χρησιμοποιείται κοινό τσιμέντο, δε μπορούν να διεισδύσουν σε εύρος ρωγμών μικρότερο των 3.0mm. Αν επιπλέον θεωρήσουμε ότι το μείγμα περιέχει και άμμο με κόκκους διαμέτρου περίπου 1.0mm τότε αυτό το όριο γίνεται ακόμη μεγαλύτερο, περίπου 1.0cm. Στην περίπτωση των λιθοδομών καταλαβαίνουμε εύκολα ότι οι λεπτές ρωγμές παίζουν ένα ιδιαίτερο ρόλο στην επιτυχία της ένεσης καθώς αποτελούν για το ένεμα θέση υποχρεωτικής διέλευσης.

Ο μαθηματικός τύπος που εκφράζει το λόγο μεταξύ του μεγέθους των μεγαλύτερων κόκκων της στερεάς φάσης του ενέματος και της αντιπροσωπευτικής διαμέτρου των διόδων ή του εύρους των ρωγμών που πρόκειται να ενεθούν είναι:

$$d < \frac{W_{nom}}{n} \quad (9.1)$$

όπου,

d : η χαρακτηριστική διάμετρος των μεγαλύτερων στερεών κόκκων του ενέματος,

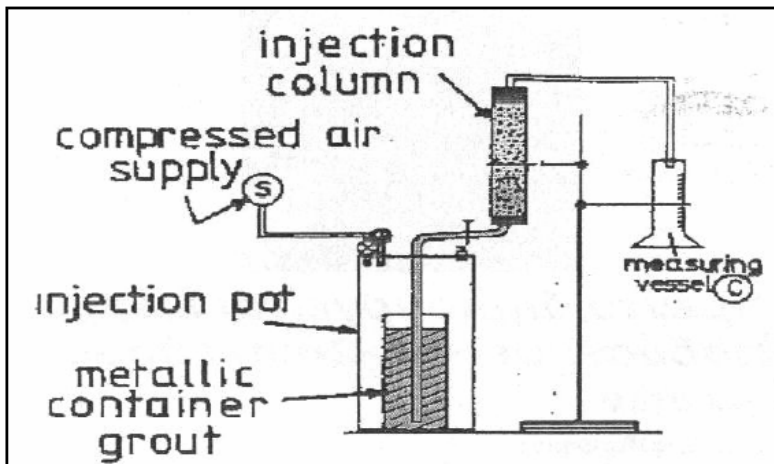
n : αριθμητικός παράγοντας σημαντικά μεγαλύτερος από τη μονάδα που «n» εκφράζει πρακτικά την απαίτηση οι κόκκοι του ενέματος

να είναι σημαντικά μικρότεροι από το χαρακτηριστικό άνοιγμα στο οποίο πρέπει να διεισδύσουν. Η εκτίμηση του «n» κυμαίνεται από 1.5 έως 5 και γίνεται συνήθως με εμπειρικό και ποιοτικό τρόπο. Το μεγάλο εύρος των τιμών οφείλεται στη μεγάλη ποικιλία των προς επισκευή υλικών και στη δυσκολία αναπαραγωγής τους σε συνθήκες εργαστηρίου.

W_{nom} : η ονομαστική τιμή του ανοίγματος των ρωγμών ή των επιστομιών των ανοιγμάτων που πρόκειται να ενεθούν.

Έλεγχος διεισδυτικότητας

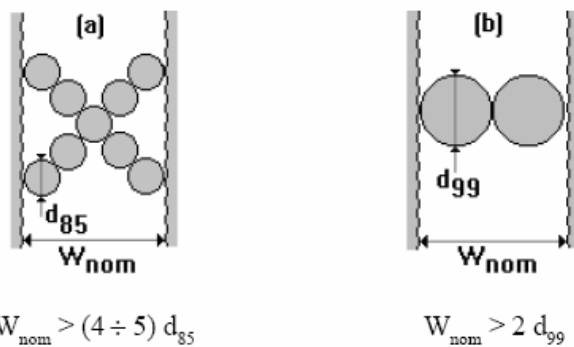
Για τον προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ της διαβάθμισης των κόκκων της στερεάς φάσης του ενέματος και της διεισδυτικότητας των υδραυλικών ενεμάτων χρησιμοποιήθηκε η πρότυπη δοκιμή της στήλης άμμου (βλ. Εικ.9.1-Μιλτιάδου 2004) η οποία επιτρέπει την προσομοίωση κενών και ρωγμών διαφορετικού εύρους σε κάθε περίπτωση. Γεμίζουμε μία στήλη με άμμο γνωστής διαβάθμισης και με τον τρόπο αυτό γνωρίζουμε σε τι κενά αντιστοιχεί. Όταν παρασκευάσουμε το μείγμα του ενέματος το περνάμε από τη στήλη της άμμου, με πολύ χαμηλή πίεση. Αν διέλθει από τη στήλη της άμμου τότε το ένεμα έχει ικανοποιητική ενεσιμότητα.



Εικ. 9.1: Διάταξη στήλης άμμου.

Φυσική έννοια της διεισδυτικότητας

Υιοθετείται ένας ενδεικτικός παράγοντας που εκφράζει το συχνότερο μέγεθος κόκκων του ενέματος. Ας θεωρήσουμε πως αυτός μπορεί να είναι d_{85} , δηλαδή η διάμετρος των κόκκων να αντιστοιχεί στο 85% του διερχόμενου υλικού. Προκειμένου να αποφευχθούν εμφράξεις σε μια δίοδο ονομαστικής διαμέτρου W_{nom} θεωρείται ότι τουλάχιστον πέντε συσσωματωμένοι κόκκοι μεγέθους d_{85} πρέπει να χωρέσουν κατά τη διαγώνιο, δηλαδή $W_{nom} > (4 + 5)d_{85}$, ενώ για το μικρό ποσοστό των κόκκων μεγέθους d_{99} δύο κόκκοι είναι αρκετοί, $W_{nom} > 2d_{99}$ (βλ. Εικ. 9.2, Μιλτιάδου-Fezans A. & Τάσιος Θ.).



Εικ. 9.2: Σχηματική αναπαράσταση των μέγιστων κόκκων που μπορούν να διεισδύσουν σε κενό με ονομαστικό εύρος W_{nom} :

- a) φαινόμενα εμφράξεων από τους σχετικά «συχνού μεγέθους» κόκκους, που πρέπει να αποφεύγονται,
 β) παρεμποδίσεις της κίνησης λόγω τριβής των σχετικά «σπάνιων» κόκκων.

Μετά από την επεξεργασία πλήθους πειραματικών αποτελεσμάτων σε ενέματα με βάση τσιμέντα διαφορετικής κοκκοδιαβάθμισης, με τον ίδιο λόγο νερού-τσιμέντου, με την ίδια τεχνική ανάμιξης και με βάση τη δοκιμή διεισδυτικότητας στη στήλη άμμου, διαπιστώνεται ότι είναι πράγματι εύλογες οι παρακάτω τιμές για τον παράγοντα n:

$$d_{85} < \frac{W_{nom}}{5} \quad (9.2) \quad \text{και} \quad d_{99} < \frac{W_{nom}}{2} \quad (9.3)$$

Στον Πίνακα 9.1 (Miltiadou-Fezans A. & Tassios T.P. 2003) παρουσιάζονται τρία παραδείγματα εφαρμογής των παραπάνω κριτηρίων

για την επιλογή των μέγιστων τιμών των χαρακτηριστικών διαμέτρων d_{85} και d_{99} της στερεάς φάσης ενέματος.

ΠΙΝΑΚΑΣ 9.1: Επιλογή των μέγιστων τιμών χαρακτηριστικών διαμέτρων.

Ονομαστικό εύρος κενών ή ρωγμών	Μέγιστες επιτρεπτές τιμές των χαρακτηριστικών διαμέτρων της στερεάς φάσης του ενέματος	
W_{nom} (μm)	d_{85} (μm)	d_{99} (μm)
100	20	50
200	40	100
500	100	250

Κριτήρια διεισδυτικότητας

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

Με βάση τα αποτελέσματα σχετικών πειραματικών διερευνήσεων με τη δοκιμή της στήλης άμμου, για να παραχθούν μείγματα τσιμέντου-

λεπτόκοκκων υλικών διεισδυτικά σε $W_{nom} = 108\mu\text{m}$, το ελάχιστο ποσοστό των λεπτόκοκκων υλικών $d_{max} = 32\mu\text{m}$ προσδιορίζεται από το κριτήριο:

$$f_v + \frac{R_{32}}{r_{32}} \geq 1 \quad (9.4)$$

όπου,

f_v : ποσοστό κατ' όγκο των προστιθέμενων λεπτόκοκκων υλικών έτσι ώστε το μείγμα των στερεών συστατικών να έχει συγκρατούμενο στα $32\mu\text{m}$ μικρότερο από 12%,

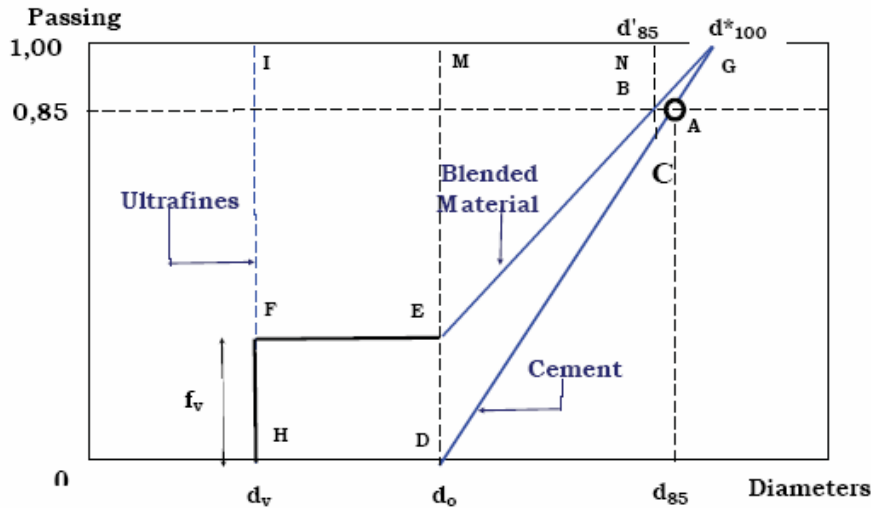
R_{32} : ποσοστό κατ' όγκο του αναμεμιγμένου υλικού που συγκρατείται στα $32\mu\text{m}$ (μέγιστη τιμή του $32\mu\text{m} = 12\%$ με βάση τα πειραματικά δεδομένα),

r_{32} : ποσοστό κατ' όγκο των αρχικών κόκκων τσιμέντου που συγκρατούνται στα $32\mu\text{m}$.

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

Με βάση το κριτήριο $d_{85} < \frac{W_{nom}}{5}$ που παρουσιάζεται στην Εικόνα

9.3 (Miltiadiou-Fezans A. & Tassios T.P. 2003) η καμπύλη διαβάθμισης του τσιμέντου ή της υδραυλικής ασβέστου καθώς και του αναμειγμένου υλικού μετά την προσθήκη ποσοστού f_v λεπτόκοκκων υλικών. Οι μεγαλύτεροι κόκκοι των λεπτόκοκκων υλικών πρέπει να είναι μικρότεροι από το d_{85} του τσιμέντου ή της υδραυλικής ασβέστου.



Εικ. 9.3: Χάρη στην προσθήκη ποσοστού f_v λεπτόκοκκων υλικών, η τιμή της χαρακτηριστικής διαμέτρου d_{85} του μείγματος ελαττώνεται σε σύγκριση με την καμπύλη διαβάθμισης ενός τσιμέντου ή μιας υδραυλικής ασβέστου (καμπύλη DG). Η τιμή d^*_{100} δηλώνει το ενεργό μέγιστο μέγεθος κόκκων μετά από τη γραμμική θεώρηση της καμπύλης του τσιμέντου ή της υδραυλικής ασβέστου, με βάση την τιμή d_{85} αυτού/αυτής.

Από την απλή γεωμετρία του διαγράμματος καταλήγουμε στη σχέση:

$$\frac{AB}{GN} = \frac{CB}{CN} (= \frac{DE}{DM}) \text{ και αντικαθιστώντας τα εν λόγω τμήματα με τα μεγέθη}$$

στα οποία αντιστοιχούν, και σε συνδυασμό με το κριτήριο $d_{85} < \frac{W_{nom}}{5}$

προκύπτει ότι το απαιτούμενο ελάχιστο ποσοστό προσθήκης λεπτόκοκκων υλικών για την εξασφάλιση διεισδυτικότητας είναι:

$$\min f_v \approx 1 - \frac{W_{nom}}{n \times d_{85}} \quad \text{με } n=5. \quad (9.5)$$

Ακολουθεί ο Πίνακας 9.2 (Μιλτιάδου-Fezans A. & Τάσιος Θ.) με κριτήρια διεισδυτικότητας εκφρασμένα ως μέγιστα επιτρεπτά ποσοστά των μεγαλύτερων κόκκων της στερεάς φάσης για διάφορες τιμές W_{nom} και αφορά σε ενέσιμα μείγματα σε διαφορετικά εύρη ρωγμών.

ΠΙΝΑΚΑΣ 9.2: Κριτήρια διεισδυτικότητας.

Κοκκομετρία στήλης άμμου Dmin/Dmax in mm	Αντίστοιχο ονομαστικό εύρος κενών	Κριτήριο κοκκοδιαβάθμισης της στερεάς φάσης του ενέματος για ενέσιμα μίγματα			
		Ανώτατα όρια του ποσοστού κόκκων μεγαλύτερων από			
		160 μm	80 μm	64 μm	32 μm
0,63/1,25	($W_{nom} = 108 \mu\text{m}$)	0	0	< 1	< 12
1,60/2,5	($W_{nom} = 260 \mu\text{m}$)	0	< 7	< 8	< 23
2,5/4,0	($W_{nom} = 408 \mu\text{m}$)	3	< 23	< 24	< 34

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

9.2.2 Σταθερότητα

Με τον όρο σταθερότητα εννοούμε την ικανότητα ενός ενέματος να διατηρεί, μετά την ανάμιξή του, την ομοιογένειά του κατά τη διάρκεια της εφαρμογής και της πήξης του.

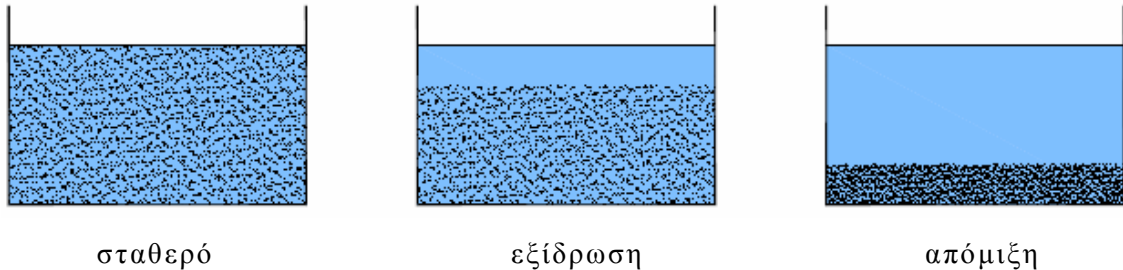
Όταν γεμίζουμε ένα δοχείο με ένεμα, οι κόκκοι της στερεάς φάσης του, πιο βαρείς από το νερό, έχουν την τάση να καθιζάνουν. Εκτός από τις βαρυτικές δυνάμεις, τα στερεά σωματίδια δέχονται την επίδραση και άλλων δυνάμεων όπως είναι οι δυνάμεις τριβής και οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις. Λόγω ηλεκτροστατικών δυνάμεων, οι διάφοροι κόκκοι των λεπτών υλικών που χρησιμοποιούνται στο ένεμα μπορεί να έλκονται ή να απωθούνται επειδή υπάρχουν ηλεκτρικά φορτία. Αυτή η κατάσταση

δημιουργεί κροκίδωση που είναι επιθυμητή ως ένα βαθμό προκειμένου το μείγμα μας να ρέει.

Το σύνολο αυτών των δράσεων οδηγεί το ένεμα, ως μείγμα, σε μία από τις εξής τρεις καταστάσεις (βλ Εικ. 9.4):

- Το δοχείο αποτελείται από ομοιογενές αιώρημα και το ένεμα τότε χαρακτηρίζεται ως σταθερό.
- Το περιεχόμενο του δοχείου αποτελείται από ένα τμήμα ομοιογενούς αιωρήματος πάνω από το οποίο υπάρχει μια στρώση νερού (φαινόμενο εξίδρωσης). Η στρώση αυτή αντιστοιχεί στο νερό που δε μπόρεσε να συγκρατηθεί από το αιώρημα. Η ποσότητα του επί πλέον νερού, αν υπερβαίνει το 5% του συνολικού νερού, θα δημιουργήσει κενά στο εσωτερικό της λιθοδομής μετά την εξάτμισή του. Επιπλέον, το νερό κατά τη διάρκεια της ένεσης θα απορροφάται από την τοιχοποιία παρασύροντας και διάφορους κόκκους οι οποίοι θα έρχονται στα τοιχώματα των ρωγμών. Σε αυτή την περίπτωση τα κενά δεν πληρώνονται σε ικανοποιητικό βαθμό, εμφανίζονται ετερογενή μηχανικά χαρακτηριστικά μεταξύ του στερεοποιημένου ενέματος και του επισκευαζόμενου μέσου, ενώ διακινδυνεύεται και η συνέχιση των ενέσεων λόγω έμφραξης των διόδων του ενέματος μέσα στην τοιχοποιία. Σε μια τέτοια περίπτωση η διαδικασία θα πρέπει να διακόπτεται άμεσα.
- Κανένα τμήμα του περιεχομένου του δοχείου δεν αποτελείται από ένα ομοιογενές αιώρημα. Στον πυθμένα του έχουν συγκεντρωθεί οι βαρύτεροι κόκκοι της στερεάς φάσης, μετά ακολουθούν οι ελαφρύτεροι και τέλος υπάρχει στρώση νερού. Η διαστρωμάτωση αυτή δεν είναι αποδεκτή για το ένεμα διότι αφ' ενός αμφισβητείται η πήξη του στο εσωτερικό της λιθοδομής και αφ' ετέρου εάν αυτή επέλθει, το στερεοποιημένο πια ένεμα θα έχει διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά από θέση σε θέση. Επιπλέον, κατά την εφαρμογή του, αν το ένεμα παρουσιάσει απόμιξη με ενδεχόμενη δημιουργία πυκνού ιζήματος, θα εμφράξει με την έναρξη των ενέσεων τα κενά της τοιχοποιίας χωρίς να επιτρέψει τη δίοδο του συνόλου του

ενέματος. Η καθίζηση μετράται είτε με τον έλεγχο της πυκνότητας του ενέματος είτε με την εξέταση του υλικού στον πυθμένα του σωλήνα.



Εικ. 9.4: Οι τρεις καταστάσεις του ενέματος.

Προκειμένου να μελετήσουμε με ορθολογικό τρόπο την εξίδρωση και την απόμιξη των υδραυλικών ενεμάτων, προσπαθούμε να προσεγγίσουμε τα δύο φαινόμενα καταρχήν με θεωρητικό τρόπο και στη συνέχεια να τεκμηριώσουμε αυτή την προσέγγιση με πειραματικές διερευνήσεις και να προτείνουμε σχέσεις προεπιλογής των βασικών παραμέτρων, δηλαδή του ποσοστού του νερού (W%) και του ποσοστού του ρευστοποιητή (SP%), έτσι ώστε να αποφεύγεται η εξίδρωση και η απόμιξη πέρα του επιθυμητού ορίου.

Το αιώρημα μετά την ολοκλήρωση της εξίδρωσης μπορεί να προσομειωθεί ως ένα μονόκοκκο υλικό, ακμής κύβου d και πλήθους κόκκων n . Έχει επίσης θεωρηθεί μια στρώση νερού μεταξύ των κόκκων πάχους ίσου με $2t_0$ χωρίς να λαμβάνεται υπ' όψη το δεσμευμένο νερό.

Με βάση το Σχήμα 9.5i & 9.5ii (Μιλτιάδου-Fezans A. & Τάσιος Θ.), προκύπτουν οι μαθηματικές σχέσεις για την ανηγμένη εξίδρωση (b):

$$b \cong \alpha \left[\frac{W}{C+F} - \lambda t_0 S \right] \quad (9.6)$$

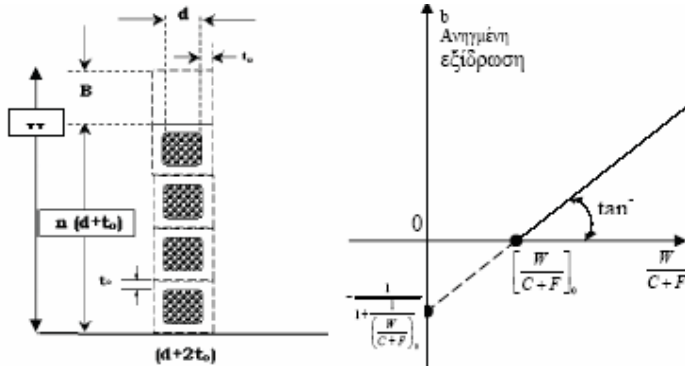
όπου, $\alpha = \frac{1}{1 + \lambda t_0 S}$ και $W/(C+F)$ ο λόγος νερού προς στερεά,

S : είναι η ειδική επιφάνεια cm^2/gr ,

λ : διορθωτικός συντελεστής,

t_0 : το ήμισυ της μέσης απόστασης γειτονικών κόκκων.

Η πρακτική αυτή αναλυτική προσέγγιση, επαληθεύει τη γραμμική εξάρτηση της εξίδρωσης από το λόγο νερού-στερεών (W/S), ενώ ο βαθμός της μεταβάλλεται ανάλογα με την ειδική επιφάνεια της στερεάς φάσης (βλ. Εικ. 9.5ii).



Εικ. 9.5: Απλοποιημένο προσομοίωμα της εξίδρωσης:

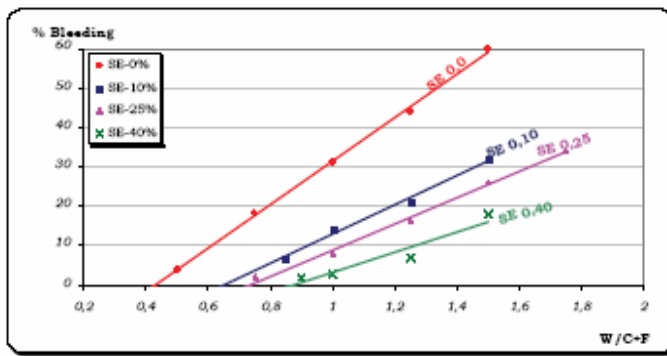
- (i) στήλη κόκκων με το απορ/μενο νερό t_0 και την εξίδρωση (b)
- (ii) ανηγμένη εξίδρωση ($b=B/H$) συναρτήσσει του λόγου νερού/στερεών.

Έγινε πειραματική εκτίμηση της ποσότητας λt_0 της εξίσωσης (9.6) για μείγματα τσιμέντου-θηραϊκής γης και τσιμέντου-υδρασβέστου και όπως προκύπτει από τις Εικόνες 9.6 και 9.7 (Μιλτιάδου-Fezans A. & Τάσιος Θ.) για τιμή $\lambda t_0 = \frac{1}{8000} gr/cm^3$ προέκυψε τελικά η ακόλουθη προσεγγιστική έκφραση για την πρόβλεψη του ποσοστού εξίδρωσης:

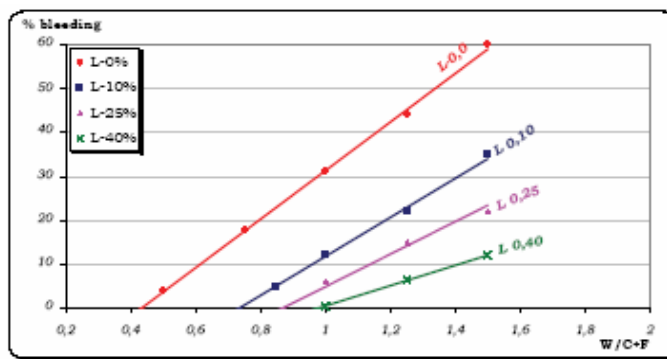
$$b \cong \left(\frac{\frac{2}{3}}{1 + \frac{S}{8000}} \right) \left[\left(\frac{W}{C+F} \right) - \left(\frac{S}{8000} \right) \right] \quad (9.7)$$

Η έκφραση αυτή είναι χρήσιμη για την προμελέτη των ενεμάτων πριν από την τελική πειραματική επαλήθευση. Μελετήθηκε επίσης και ο ρόλος του ρευστοποιητικού πρόσθετου (SP) σε ό,τι αφορά στην εξίδρωση και προέκυψε η παρακάτω μαθηματική σχέση:

$$\left(\frac{W}{C+F} \right) \cong 1.2 \left[1 - 0.25(SP)\% \right] \times 10^{-4} S (cm^2/g) \pm 0.10 \quad (9.8)$$

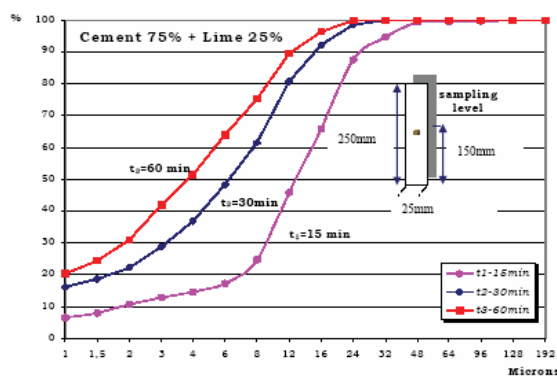


Εικ. 9.6: Τιμές της εξίδρωσης συναρτήσει του λόγου νερό/στερεά για μείγματα τσιμέντου-θηραϊκής γης.

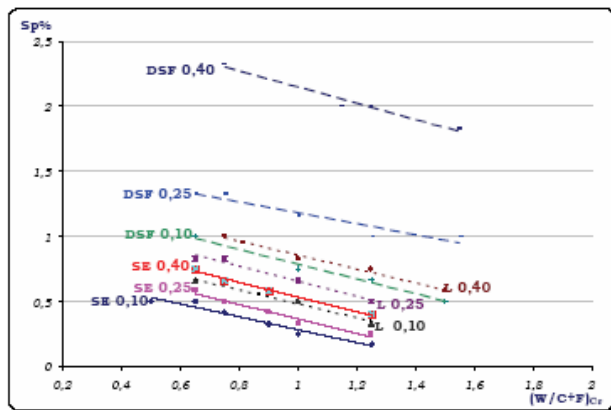


Εικ. 9.7: Τιμές της εξίδρωσης συναρτήσει του λόγου νερό/στερεά για μείγματα τσιμέντου-υδρασβέστου.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 9.8 (Μιλτιάδου-Fezans A. & Τάσιος Θ.) τα ασταθή αιωρήματα υπόκεινται σε μια ισχυρή μεταβολή της κοκκομετρικής τους διαβάθμισης της στερεάς τους φάσης, σε συνάρτηση με το χρόνο.



Εικ. 9.8: Η μεταβολή της κοκκομετρικής διαβάθμισης ενός ασταθούς ενέματος που περιέχει άσβεστο και παρουσιάζει απόμιξη.



Εικ. 9.9: Συνδυασμός τιμών λόγου W/S και $SP\%$ για τους οποίους εμφανίζεται απόμιξη με σχηματισμό πυκνού ιζήματος μεγαλύτερο από 1mm για διάφορα ενέματα, των οποίων η στερεά φάση αποτελείται από τσιμέντο σε συνδυασμό με διάφορα ποσοστά θηραϊκής γης, υδρασβέστου και πυριτικής παιπάλης.

Στην Εικόνα 9.9 (Μιλτιάδου-Fezans A. & Τάσιος Θ.) παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα μειγμάτων για διάφορες αναλογίες $W/(C+F)$ και SP , για τα οποία σχηματίζεται ίζημα με πάχος στρώματος μεγαλύτερο από 1mm . Η στερεή φάση των μειγμάτων αποτελείται από τσιμέντο και διάφορα ποσοστά θηραϊκής γης, υδρασβέστου και πυριτικής παιπάλης.

Για την περίπτωση υδραυλικών ενεμάτων με άσβεστο και θηραϊκή γη, οι γραμμικές σχέσεις που προκύπτουν και εκφράζονται μαθηματικά είναι:

$$\left(\frac{W}{C+F}\right)_{crit} \cong 0.80 + \left(\frac{S}{6000}\right) - 1.7(SP)\% \quad (9.9)$$

Για την περίπτωση υδραυλικών ενεμάτων με πυριτική παιπάλη, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η σχέση:

$$\left(\frac{W}{C+F}\right)_{crit} \cong 1.60 + \left(\frac{S}{30000}\right) - 1.7(SP)\% \quad (9.10)$$

Έλεγχος σταθερότητας

Ο έλεγχος της σταθερότητας πραγματοποιείται με τη μέτρηση της εξίδρωσης σύμφωνα με τον κανονισμό Norme Française NF P 18-

359/1988. Το ένεμα τοποθετείται σε τρεις απολύτως καθαρούς και στεγνούς ογκομετρικούς διαφανείς σωλήνες των 100ml, διαμέτρου 25mm και ύψους 25cm, σε κατάσταση θερμοκρασίας $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ και υγρασίας R.H. 65%. Αφήνεται σε ηρεμία, σκεπασμένο σε χώρο σκιερό για τρεις ώρες. Η σταθερότητα μετράται ως το ποσοστό του όγκου του νερού που εξιδρώνεται στο πάνω μέρος του σωλήνα μετά την πάροδο των τριών ωρών από την παρασκευή του μίγματος. Η εξίδρωση του ενέματος προκύπτει από το μέσο όρο των τριών μετρήσεων (βλ. Εικ. 9.10).

Το ποσοστό της εξίδρωσης θα πρέπει να είναι έως 5% όταν πρόκειται για τοιχοποιίες, με βάση τον κανονισμό. Ο στόχος μας είναι η παρασκευή ενέματος με όσο το δυνατόν μικρότερο ποσοστό εξίδρωσης. Συγκεκριμένα, επιδιώκουμε 0% εξίδρωση ώστε στο εργοτάξιο να μπορεί να υπάρχει ανεκτικότητα για κάποιο μικρό λάθος ή αστοχία.

Για την παρασκευή σταθερού ενέματος πολύ σημαντικό ρόλο παίζει η ανάμιξη του μείγματος που πρέπει να γίνεται σε αναμκτήρα υψηλού στροβιλώδους ή με υπερήχους. Επίσης μεγάλη σημασία έχουν τα λεπτόκοκκα υλικά. Τέλος η σταθερότητα του υδραυλικού ενέματος επηρεάζεται και από τα πρόσμικτα υλικά.



Εικ. 9.10: Έλεγχος σταθερότητας.

Έλεγχος απόμιξης

Ο έλεγχος της απόμιξης, ως κριτήριο σταθερότητας του ενέματος, γίνεται με τη μέτρηση της φαινομενής πυκνότητας του ενέματος και για

την πραγματοποίησή του απαιτείται ζυγαριά (περίπου 5kg) και δοκιμαστικοί σωλήνες όγκου 1000ml. Το ένεμα τοποθετείται στους δοκιμαστικούς σωλήνες και παραμένει σε ηρεμία. Από τον προσδιορισμό της μάζας γνωστού όγκου ενέματος που λαμβάνεται από συγκεκριμένη θέση στο άνω μέρος του δοκιμαστικού σωλήνα προσδιορίζεται η φαινόμενη πυκνότητα του μίγματος που δεν επιτρέπεται να ξεπερνάει το 5% (βλ. Εικ 9.11).



Εικ. 9.11: Έλεγχος απόμιξης-φαινόμενης πυκνότητας.

Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά το πέρας της ανάμιξης για τον προσδιορισμό της εξέλιξης της φαινόμενης πυκνότητας του ενέματος. Η λήψη του δείγματος γίνεται κάθε φορά από την ίδια θέση στο άνω μέρος του δοκιμαστικού σωλήνα, συνήθως στα 2/3 του ύψους του. Η φαινόμενη πυκνότητα του ενέματος προκύπτει από το μέσο όρο των συνολικών μετρήσεων που θα πραγματοποιηθούν.

9.2.3 Ρευστότητα

Με τον όρο ρευστότητα εννοούμε τη δυνατότητα ροής του ενέματος υπό συγκεκριμένες συνθήκες, δηλαδή τη σχέση που συνδέει την αντοχή και το ιξώδες του. Τα ενέματα κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες όσο αφορά στα χαρακτηριστικά της ροής τους:

- Σε αυτά που συμπεριφέρονται ως ιδανικά υγρά (ή Νευτώνεια υγρά).

Ένα ιδανικό υγρό χαρακτηρίζεται από μια γραμμική σχέση μεταξύ της διατμητικής τάσης του (τ) και της ταχύτητας παραμόρφωσής του (ϵ). Η σχέση αυτή μαθηματικά εκφράζεται ως:

$$\tau = \eta \times \epsilon \quad (9.11)$$

όπου η , το ιξώδες του υγρού.

Η ροή ενός ιδανικού υγρού χαρακτηρίζεται από το ιξώδες του. Όσο μεγαλύτερη τιμή έχει το ιξώδες ενός υγρού τόσο πιο αργή είναι η ροή του για μια δεδομένη δύναμη. Ως ιδανικά υγρά μπορούν να θεωρηθούν το νερό και πολλά οργανικά ενέματα.

- Σε αυτά που συμπεριφέρονται ως σώματα Bingham.

Ως σώματα Bingham ορίζονται τα υγρά των οποίων η ροή δεν αρχίζει παρά μόνο όταν η διατμητική τάση (τ) ξεπεράσει μια τιμή που ονομάζεται όριο διάτμησης (τ_0). Η εξάρτηση της διατμητικής τάσης, του ιξώδους και του ορίου διάτμησης μαθηματικά εκφράζεται από τη σχέση:

$$\tau = \tau_0 + \eta \times \epsilon \quad (9.12)$$

Η συμπεριφορά τους αυτή οφείλεται στην αλληλεπίδραση των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων του ενέματος, τα οποία όταν το αιώρημα είναι πυκνό σχηματίζουν ένα είδος χαλαρού στερεού αναπτύσσοντας διατμητική αντοχή.

Η διατμητική αντοχή ενός ενέματος εξαρτάται από:

- Το λόγο νερού – στερεών.
- Την ειδική επιφάνεια και το σχήμα των σωματιδίων.
- Τη φυσικοχημική τους “συγγένεια” με το νερό.
- Την καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης.
- Το βαθμό θρόμβωσης.

Η εκτίμηση της διατμητικής αντοχής στο σχεδιασμό του ενέματος είναι σημαντική γιατί καθορίζει μεταξύ άλλων και την πίεση που απαιτείται τόσο για να αρχίσει όσο και για να συνεχιστεί η ένεση.

Έλεγχος ρευστότητας

Η αποτίμηση της ρευστότητας γίνεται συνήθως με βάση τον κώνο του Marsh όπου γίνεται η μέτρηση του φαινόμενου ιξώδους του

μείγματος. Προσδιορίζεται ο χρόνος που απαιτείται για τη διέλευση ενέματος όγκου 500ml και 1000ml από κώνο διαμέτρου στομίου 4mm για ενέματα χωρίς άμμο και 10mm για ενέματα με άμμο, αντίστοιχα. Για κάθε κώνο πραγματοποιούνται τρεις δοκιμές (βλ. Εικ. 9.12). Η ρευστότητα θεωρείται ικανοποιητική όταν οι χρόνοι είναι:

$t=30\text{sec} - 45\text{sec}$ για $d=4\text{mm}$

$t=13\text{sec} - 25\text{sec}$ για $d=10\text{mm}$

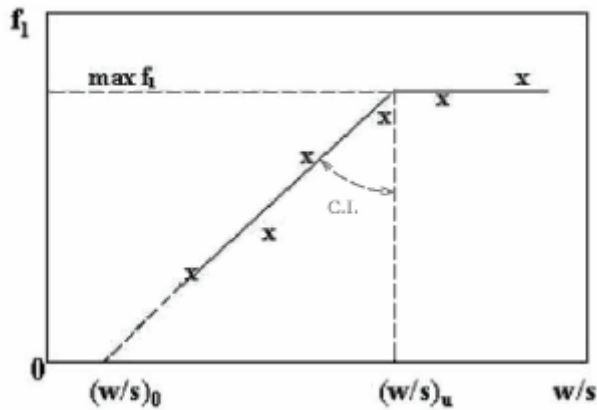


Εικ. 9.12: Έλεγχος ρευστότητας.

Υπάρχει όμως και η χρήση της Δοκιμής Τροποποιημένου Κώνου (ACT, Adjusted Cone Test). Στον κανονικό κώνο Marsh διατομής εκροής A μετράται ο χρόνος ροής t_f μόνο των πρώτων 100cm^3 υγρού. Εισάγεται η έννοια του δείκτη ρευστότητας f_l όπου μαθηματικά εκφράζεται από τη σχέση:

$$f_l = \frac{Q}{A * t_f} \quad (9.13)$$

Με βάση την παραπάνω σχέση και μεταβάλλοντας το λόγο W/S μπορούν να προσδιοριστούν πειραματικά πολύ σημαντικά ρεολογικά χαρακτηριστικά ενεμάτων με δεδομένη σύσταση ως προς τη στερεά φάση και διάφορους λόγους W/S (βλ. Εικ. 9.13, Μιλτιάδου-Fezans A. & Τάσιος Θ.).



Εικ. 13: Ρεολογικά χαρακτηριστικά των ενεμάτων με δεδομένη σύσταση ω προς τη στερεά φάση και διαφόρους λόγους W/S για την ACT.

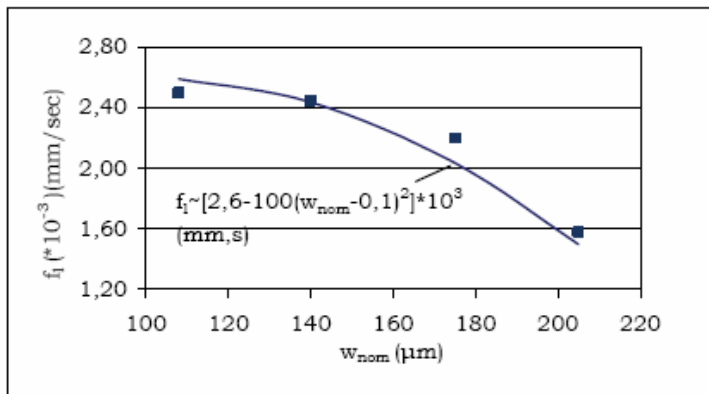
$(W/S)_0$: ο θεωρητικός ελάχιστος λόγος νερού προς στερεά,

$(W/S)_u$: μια μέγιστη τιμή W/S η οποία επιτυγχάνει τη μέγιστη δυνατή τιμή του δείκτη ρευστότητας

$\max f_1$: η μέγιστη δυνατή τιμή του δείκτη ρευστότητας

CI : δείκτης συνεκτικότητας.

Από την Εικόνα 9.14 (Μιλτιάδου-Fezans A. & Τάσιος Θ.) μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα για τις ελάχιστες τιμές του δείκτη ρευστότητας για μείγματα που είναι ενέσιμα στις στήλες άμμου που αντιστοιχούν σε διάφορα W_{nom} μέσω της δοκιμής ACT.

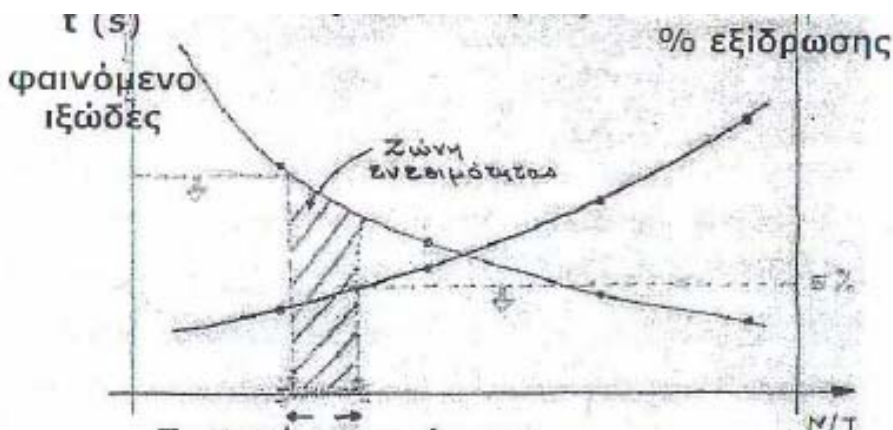


Εικ. 9.14: Ελάχιστες τιμές του δείκτη ρευστότητας για διάφορα ονομαστικά εύρη κενών.

Η επίτευξη της επιθυμητής τιμής δείκτη ρευστότητας f_1 (όπως αυτή προκύπτει από το ονομαστικό εύρος κενών W_{nom}) μπορεί να γίνει με τα εξής ακόλουθα μέσα:

- Αύξηση ποσότητας νερού, χωρίς όμως να προκαλείται εξίδρωση,
- Χρήση εξειδικευμένων μεθόδων ανάμιξης (διασποράς των συσσωματικών κόκκων).
- Προσθήκη κατάλληλων ρευστοποιητών (SP) υπό τον όρο ότι ελέγχονται η χημική τους συμβατότητα, η μείωση της σταθερότητας του αιωρήματος, η με το χρόνο μείωση της ρευστοποιητικής τους ικανότητας μετά την ανάμιξη κλπ.

Γενικεύοντας θα μπορούσαμε να πούμε πως η σταθερότητα και η ρευστότητα είναι ανταγωνιστικές ιδιότητες. Όσο πιο πολύ νερό έχουμε τόσο πιο ρευστό είναι το ένεμα. Ταυτόχρονα όμως υπάρχει ο κίνδυνος για μεγάλη εξίδρωση. Θα πρέπει λοιπόν η μελέτη σύνθεσης να σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε η ποσότητα του νερού να ικανοποιεί και τις δύο ιδιότητες του ενέματος χωρίς να προκαλεί προβλήματα στην ενεσιμότητά του (βλ. Εικ. 9.15, Μιλτιάδου-Fezans A. 2004).



Εικ. 9.15: Διάγραμμα σταθερότητας-ρευστότητας.

Εκτός από τη σταθερότητα, τη ρευστότητα και τη διεισδυτικότητα πολύ μεγάλη σημασία για την ενεσιμότητα του ενέματος έχει και η συνάφεια. Η ιδιότητα της συνάφειας εξαρτάται από το είδος του λίθου,

την επιφάνειά του, την υδρομέρειά του και από το αν αυτή είναι κορεσμένη ή ξηρή.

Για τον προσδιορισμό του ποσοστού των λεπτόκοκκων υλικών (%F), του λόγου νερού-στερεών (W/C) και του ποσοστού του ρευστοποιητή (%SP) σε μια σύνθεση, έχουν προκύψει εξισώσεις που εφαρμόζονται για την πυριτική παιπάλη (FSD), τη θηραϊκή γη (TS) και την υδράσβεστο (Cx). Εφαρμόζοντάς τες μπορούμε να ικανοποιήσουμε τα κριτήρια για την επίτευξη κατάλληλης ρευστότητας-σταθερότητας της σύνθεσής μας, αλλά και το κριτήριο για την αποφυγή της απόμιξης.

Οι εξισώσεις που εφαρμόζονται και αφορούν στην επίτευξη κατάλληλης ρευστότητας-σταθερότητας στο ένεμα είναι (Μιλτιάδου-Fezans A. 2004):

• **FSD**

$$\frac{\frac{E}{C} + F}{1 + 0,01 \times F} + \frac{SP}{0,5 + 0,1 \times F} = 1 \quad \text{όπου} \quad \frac{E}{C} + F > 0,6 + 0,005 \times F \quad (9.14)$$

• **TS**

$$\frac{\frac{E}{C} + F}{0,65 + 0,007 \times F} + \frac{SP}{2,5 - 0,02F} = 1 \quad \text{όπου} \quad \frac{E}{C} + F > 0,6 \quad (9.15)$$

• **Cx**

$$\frac{\frac{E}{C} + F}{0,72 + 0,008 \times F} + \frac{SP}{2,4 + 0,028F} = 1 \quad \text{όπου} \quad \frac{E}{C} + F > 0,6 + 0,004 \times F \quad (9.16)$$

Οι εξισώσεις που εφαρμόζονται και αφορούν στην αποφυγή της απόμιξης στο ένεμα είναι:

• **FSD**

$$\frac{\frac{E}{C} + F}{1,65 + 0,065 \times F} + \frac{SP}{1,15 + 0,02 \times F} < 1 \quad (9.17)$$

- **TS**

$$\frac{\frac{E}{C} + F}{1,35 + 0,013 \times F} + \frac{SP}{0,69 + 0,014F} < 1 \quad (9.18)$$

- **Cx**

$$\frac{\frac{E}{C} + F}{1,60 + 0,02 \times F} + \frac{SP}{0,9 + 0,012F} < 1 \quad (9.19)$$

9.3 Μηχανικές ιδιότητες

9.3.1 Υδραυλικό Ένεμα

Στην παρούσα εργασία έχει γίνει έρευνα για τις μηχανικές ιδιότητες τρίστρωτης τοιχοποιίας πριν και μετά την εφαρμογή ενεμάτων. Ανάλογα με τη γεωμετρία της, το είδος της κατασκευής της, το είδος των λίθων που χρησιμοποιούνται, η τοιχοποιία μπορεί να έχει μεγαλύτερη ή μικρότερη συνοχή μεταξύ των δύο εξωτερικών παρειών της και του πυρήνα της. Ο πυρήνας, το εσωτερικό δηλαδή της τοιχοποιίας, μπορεί να είναι ένα μείγμα από λιθοσώματα, κονία, μπάζα. Τα εξωτερικά τμήματα μπορεί να είναι ίδιου ή διαφορετικού πάχους, κατασκευασμένα με τον ίδιο ή διαφορετικό τρόπο, με ίδιους ή διαφορετικούς λίθους. Σε κάθε περίπτωση όλα τα είδη της τοιχοποιίας έχουν ως κοινό ότι είναι το ίδιο ευάλωτα στη γήρανση, στα φορτία, τους σεισμούς κ.ά. Οι αποκολλήσεις που μπορεί να προκληθούν μεταξύ των λίθων και του υλικού πλήρωσης μειώνει τη συνολική φέρουσα ικανότητα της τοιχοποιίας. Ένα κατάλληλο ένεμα μπορεί να γεμίσει τα κενά του υλικού πλήρωσης, αλλά και τα κενά που υπάρχουν μεταξύ των εξωτερικών τμημάτων και του πυρήνα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η ομοιογενοποίηση της τοιχοποιίας και η βελτίωση της συνολικής συμπεριφοράς της. Στόχος είναι η παρασκευή ενεμάτων υψηλής ενεσιμοτητας υπό χαμηλή πίεση (0.5Atm-1.0Atm) που θα μπορέσει να προσαρμοστεί σε κενά μικρού εύρους. Οι συνθέσεις δοκιμάζονται σε θλίψη, κάμψη και εφελκυσμό σε διάφορες ηλικίες⁽⁵⁾.

Από έρευνες που έχουν διεξαχθεί σε συνθέσεις που έχουν κοινά ρεολογικά και φυσικοχημικά χαρακτηριστικά προκύπτει πως η θλιπτική αντοχή των συνθέσεων που μελετήθηκαν αυξάνεται ή παραμένει η ίδια με το πέρασμα του χρόνου ενώ η αντοχή τους κάμψη παρουσιάζει μικρή μείωση⁽⁶⁾. Τα υδραυλικά ενέματα όμως έχουν μικρότερη αντοχή σε θλίψη από αυτά με βάση το τσιμέντο όπως φαίνεται και από την Εικόνα 9.16.

ΤΡΙΜΕΡΕΣ ΕΝΕΜΑ										
Λευκό τσιμέντο Δανίας	Υδρά-σβεστος (σκόνη)	Ποσο-λάνη (d _{max} < 75μm)	SP1 *	Νερό *	Αντοχή σε Θλίψη και Κάμψη (MPa)					
					Ηλικία (ημέρες)					
					28		90		180	
					f _{bc}	f _{bt}	f _{bc}	f _{bt}	f _{bc}	f _{bt}
G1: 30	25	45	1	80	4,08	2,11	8,16	2,29	10,6	3,13
ΕΝΕΜΑΤΑ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΑΙΒΕΛΣΤΟΥ										
NHL5 (St Astier)	SP2		Νερό							
G2:	100	1	80	2,82	1,90	4,50	2,52	6,36	3,87	
G3:	100		80	2,06	1,10	4,88	1,75	6,00	2,70	
Chaux Blanche	SP3									
G4:	100	0,7	80	3,10	1,65	4,67	2,19	6,72	1,05	
Calx Romana										
G5:	100		70	2,25	1,51	3,04	1,39	2,88	1,08	
Albaria Calce Albazzana										
G6:	100		70	1,69	1,02	2,60	0,88	2,49	0,65	
Unilit B Fluid 0/0										
G7:	100		70	1,53	1,27	2,56	1,53	2,53	0,98	

* % της στερεάς φάσης του ενέματος. SP1, SP2 και SP3 ρευστοποιητές με βάση τα ναφθαλενοσουλφονικά, λιγνοσουλφονικά άλατα και τον πολυκαρβοξυλικό αιθέρα αντίστοιχα

Εικ. 9.16: Ενδεικτικές τιμές αντοχών σε θλίψη και κάμψη διάφορων συνθέσεων ενεμάτων.

Ερευνήθηκαν υδραυλικά ενέματα που περιέχουν τσιμέντο σε ποσοστό 50%-75% τα οποία δοκίμασε σε εφελκυσμό και διάτμηση. Απέδειξε την επιρροή του πορώδους του υποστρώματος, το βαθμό κορεσμού των λίθων, το μέτρο λεπτότητας του υλικού συναρμογής του ενέματος και του ίδιου του ενέματος⁽¹⁰⁾. Μέτρησε σημαντικά υψηλότερη αντοχή στο συνδετικό υλικό, σε διάτμηση και εφελκυσμό, σε ενέματα με πολύ λεπτόκοκκα υλικά παρά στα ενέματα με βάση το τσιμέντο.

Έχει προκύψει το συμπέρασμα πως η βασικότερη και καθοριστικότερη ιδιότητα των υδραυλικών ενεμάτων δεν είναι η θλιπτική τους αντοχή, αλλά η εφελκυστική τους⁽⁵⁾.

Εξετάστηκε η αποτελεσματικότητα των τριμερών ενεμάτων. Υπέθεσε ότι αυτή σχετίζεται με τη σύνδεση του ενέματος και των υλικών της τοιχοποιίας⁽¹⁹⁾. Δοκιμές που πραγματοποίησε σε διάτμηση απέδειξαν ότι οι ιδιότητες της συγκόλλησης του ενέματος δεν είναι απαραίτητα αναλογικά της εφελκυστικής ή της θλιπτικής αντοχής του. Η ύπαρξη λεπτόκοκκων υλικών οδηγεί στην αύξηση της αντοχής του ενέματος. Έτσι παρά το γεγονός ότι το ένεμα έχει τσιμέντο σε ποσοστό 30% και αντοχές σε θλίψη και εφελκυσμό μικρότερες από αυτές του τσιμεντενέματος και οι δύο συνθέσεις οδηγούν σε ανάλογη αύξηση της αντοχής της τοιχοποιίας.

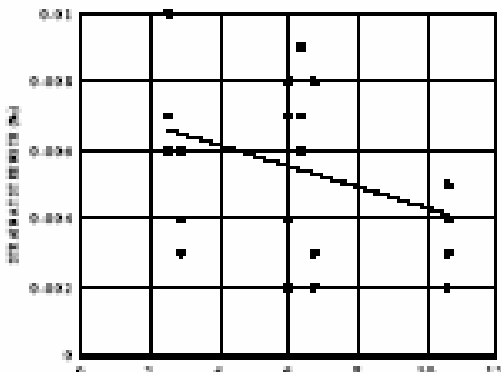
Χρησιμοποιήθηκε μια σύνθεση υδραυλικού ενέματος με βάση την υδραυλική άσβεστο και μια σύνθεση με βάση το τσιμέντο με κοινά ρεολογικά και φυσικοχημικά χαρακτηριστικά, όμοιες μηχανικές ιδιότητες με αυτές των υλικών που βρίσκονται στο εσωτερικό της προς επισκευή τρίστρωτης τοιχοποιίας⁽²³⁾. Το συμπέρασμα ήταν ότι τα υδραυλικά ενέματα παρουσίασαν μικρότερη θλιπτική αντοχή από τα ενέματα με βάση το τσιμέντο.

Χρησιμοποιώντας ένα τριμερές υδραυλικό ένεμα με μεγάλη περιεκτικότητα σε τσιμέντο και ένα υδραυλικό ένεμα με βάση την υδραυλική άσβεστο, κατέληξε πως η ροή του ενέματος εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος των κόκκων των υλικών του (δηλαδή την κοκκομετρική διαβάθμισή του), το σχήμα τους, την επιφάνειά τους όταν αυτά βρίσκονται σε στερεά φάση, την ποσότητα του νερού που περιέχεται στο μείγμα και τον τρόπο ανάμιξης των υλικών⁽³⁾.

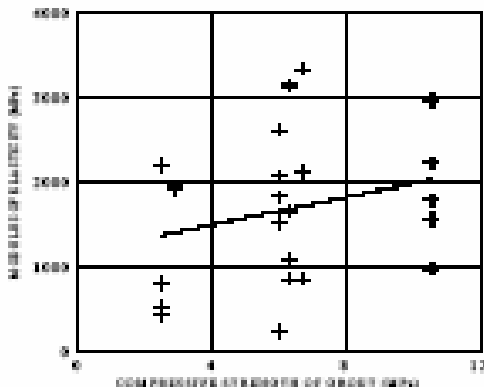
9.3.2 Τοιχοποιία μετά την εφαρμογή της μεθόδου

Εξετάστηκαν κυλινδρικά δοκίμια τα οποία προσομοιώνουν υλικό τρίστρωτης τοιχοποιίας με ποσοστό κενών τέτοιο που συναντάται πραγματικά σε μια κατασκευή⁽⁶⁾. Σε αυτά εφαρμόστηκαν συνθέσεις υδραυλικού ενέματος με βασικό συστατικό την υδραυλική άσβεστο και ένα τριμερές υδραυλικό ένεμα σύστασης 30% λευκό τσιμέντο Δανίας, 25% υδράσβεστο σε σκόνη, 45% φυσική ποζολάνη και 1% ρευστοποιητή. Και στις δύο περιπτώσεις τα μείγματα πληρούσαν τα βασικά κριτήρια ενεσιμότητας. Προσδιορίστηκε η αντοχή τους σε θλίψη πριν από την εφαρμογή τους και 6 μήνες μετά από αυτή.

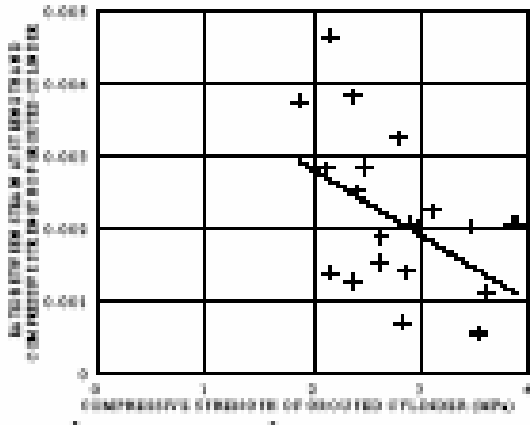
Γενικά η παραμόρφωση, η οποία αντιστοιχεί στη θλιπτική αντοχή των ενισχυμένων κυλίνδρων είναι μικρότερη για τα ενέματα των υψηλότερων αντοχών. Πράγματι, παρά την αναμενόμενη σχετικά μεγάλη διασπορά των τιμών φαίνεται η τάση των ισχυρότερων ενεμάτων να παράγουν πιο άκαμπτο ενισχυμένο υλικό πλήρωσης. Το μέτρο ελαστικότητας E , υπολογισμένο στο 1/3 της θλιπτικής αντοχής και ο λόγος ανηγμένης παραμόρφωσης προς την αντίστοιχη θλιπτική αντοχή απεικονίζονται, σε διάγραμμα που ακολουθεί, συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής του ενέματος (βλ. Εικ. 9.16-9.18).



Εικ. 9.16: Ανηγμένη παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη θραύση των ενισχυμένων κυλίνδρων, συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής του ενέματος.



Εικ. 9.17: Μέτρο ελαστικότητας των ενισχυμένων με ένεμα κυλίνδρων, σε συνάρτηση της θλιπτικής αντοχής του ενέματος.



Εικ. 9.18: Λόγος της ανηγμένης παραμόρφωσης προς τη θλιπτική αντοχή των ενισχυμένων κυλίνδρων σε συνάρτηση με τη θλιπτική αντοχή τους.

Με βάση δημοσίευση παρουσιάζεται εξίσωση η οποία επιτρέπει τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής της τρίστρωτης τοιχοποιίας μετά την ενίσχυσή της με υδραυλικά ενέματα⁽⁵⁾. Η εξαγωγή της σχέσης αυτής στηρίχθηκε στην παραδοχή ότι το ένεμα επηρεάζει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες κυρίως του υλικού πλήρωσης και ότι αυτό αποτελείται από υλικά συμβατά με αυτά που υπάρχουν στην τοιχοποιία.

$$f_{wc,i} = f_{wc,0} \left(1 + 1.25 \frac{V_i}{V_w} \frac{\sqrt{f_{gr,c}}}{f_{wc,0}} \right) \quad (9.20)$$

όπου,

$f_{wc,i}$: θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας μετά την εφαρμογή του ενέματος,

$f_{wc,0}$: θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας πριν την εφαρμογή του ενέματος,

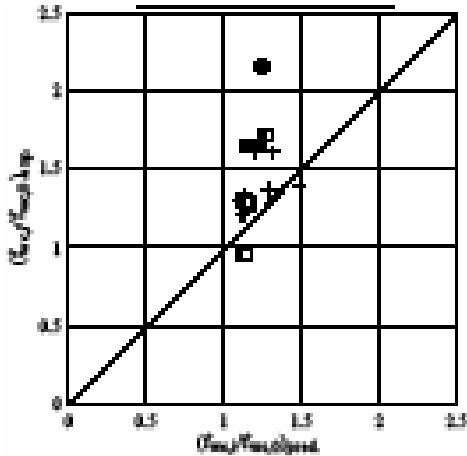
V_i : όγκος του υλικού πλήρωσης,

V_w : συνολικός όγκος της τοιχοποιίας,

$f_{gr,c}$: θλιπτική αντοχή του ενέματος.

Στην εξίσωση (9.20) εισάγεται η τετραγωνική ρίζα της θλιπτικής αντοχής του ενέματος ως μέτρο της εφελκυστικής του αντοχής. Αποδεικνύεται ότι η αύξηση της αντοχής του υλικού πλήρωσης μετά την εφαρμογή των ενεμάτων, άρα και η αύξηση συνολικά της αντοχής της τοιχοποιίας, είναι ανάλογη της εφελκυστικής αντοχής του ενέματος. Ο τύπος της αστοχίας των δοκιμίων τρίστρωτης τοιχοποιίας καθορίζεται περισσότερο από την εφελκυστική αντοχή και τη συνάφεια μεταξύ των υλικών παρά από τη θλιπτική αντοχή του ενέματος.

Η εφαρμογή της εξίσωσης (9.20) οδηγεί σε εκτιμώμενες τιμές της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας μετά την εφαρμογή των ενεμάτων οι οποίες συσχετίζονται καλά με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές (βλ. Εικ. 9.19).



Εικ. 9.19: Σύγκριση των πειραματικών με τις προβλεπόμενες τιμές.

Χρησιμοποιήθηκαν συνθέσεις υδραυλικής ασβέστου, ρευστοποιητή (F) και υλικού που μειώνει την υγρασία του μείγματος (water retentor R), σε διάφορες αναλογίες⁽²¹⁾.

Κατά τη διεξαγωγή του πειράματος διαπιστώθηκε πως οι κύλινδροι που είχαν διαβραχεί πριν από το πείραμα και στους οποίους εφαρμόστηκαν τα υδραυλικά ενέματα, δεν έδωσαν καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με αυτούς που ήταν στεγνοί. Τελικά η βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας ήταν της τάξης του 60%, ανεξάρτητα από την αντοχή του ενέματος.

Όταν γνωρίζουμε τη θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας πριν την επέμβαση με υδραυλικό ένεμα, μπορούμε να προσδιορίσουμε τη θλιπτική αντοχή της μετά την εφαρμογή του ενέματος μέσω της παρακάτω εμπειρικής σχέσης:

$$f_{wc,s} = f_{wc,0} + \left(\frac{V_{inf}}{V}\right)f_{inf,s} = \left(\frac{V_{ex}}{V}\right)f_{ex,c} + \left(\frac{V_{inf}}{V}\right)f_{inf,s} \quad (9.21)$$

όπου,

$f_{wc,s}$: θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας μετά την εφαρμογή του ενέματος,

$f_{wc,0}$: θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας πριν την εφαρμογή του ενέματος,

$f_{inf,c}$: θλιπτική αντοχή του ενέματος,

$f_{ex,c}$: θλιπτική αντοχή της εξωτερικής παρειάς της τοιχοποιίας,

V : συνολικός όγκος της τοιχοποιίας,

V_{inf} : όγκος του ενέματος,

V_{ex} : όγκος της εξωτερικής παρειάς της τοιχοποιίας.

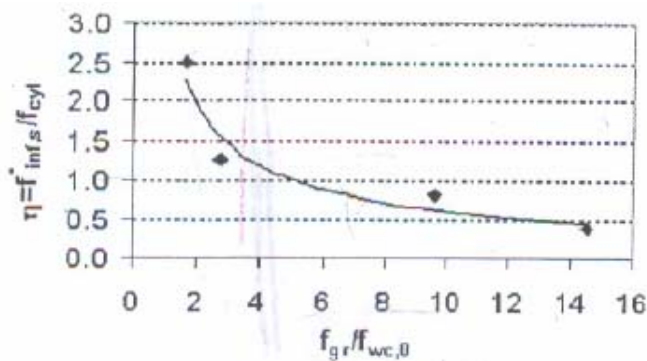
Η εξίσωση (9.21) είναι κατάλληλη για ενέματα με μηχανικές ιδιότητες συμβατές με αυτές της τοιχοποιίας και δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε ότι αφορά στη θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας μετά την επέμβαση.

Εξετάστηκαν ένα υδραυλικό ένεμα με βάση την υδραυλική άσβεστο και ένα υδραυλικό ένεμα με βάση το τσιμέντο⁽²²⁾. Παρά το ότι τα ενέματα είχαν διαφορετική θλιπτική αντοχή, τελικά η αντοχή που προσέδωσαν στην επισκευασμένη τοιχοποιία ήταν περίπου η ίδια. Μια καλή εκτίμηση της αποτελεσματικότητας του ενέματος δίνεται από το λόγο της θλιπτικής αντοχής του υλικού πλήρωσης που έχει εφαρμοστεί αποτελεσματικά από την τοιχοποιία και την αντοχή του υλικού πλήρωσης

όπως αυτό έχει μετρηθεί στα κυλινδρικά δοκίμια $\eta = \frac{f_{inf,s}^*}{f_{cyl}}$. Η συσχέτιση

μεταξύ της πραγματικής αποτελεσματικότητας του υλικού πλήρωσης και της αντοχής του ενέματος φαίνεται στην Εικόνα 9.20. Παρατηρούμε ότι όσο μεγαλώνει η αντοχή του ενέματος, τόσο μικραίνει η

αποτελεσματικότητά του η . Αν μάλιστα ο λόγος $\frac{f_{gr}}{f_{wc,0}} > 4$ τότε $\eta < 1$.



Σχ. 9.20: Συσχέτιση προβλεπόμενων τιμών και πειραματικών αποτελεσμάτων της αποτελεσματικότητας του ενέματος.

Σε ό,τι αφορά στα υδραυλικά ενέματα, με βάση την υδραυλική άσβεστο, λόγω της σύνθεσής τους κατανέμονται ομοιόμορφα στο εσωτερικό της τοιχοποιίας, ομοιογενοποιούνται και “δένουν” καλύτερα με τα υπάρχοντα υλικά χωρίς να αυξάνουν την ακαμψία του πυρήνα. Οι κατακόρυφες τάσεις κατανέμονται πιο ομοιόμορφα σε αυτή την περίπτωση και έτσι η συνολική συμπεριφορά της τοιχοποιίας βελτιώνεται. Συγκεκριμένα, αυξάνεται κατά 50% η φέρουσα ικανότητά του. Με τις εξωτερικές παρειές πιο άκαμπτες από τον πυρήνα και με τη βελτίωση της ένωσης των υλικών από την εφαρμογή του ενέματος, δρουν στον πυρήνα τριαξονικές δυνάμεις και η φέρουσα ικανότητα της τοιχοποιίας βελτιώνεται.

Αντίθετα, με τη χρήση του ισχυρού ενέματος με βάση το τσιμέντο, ο πυρήνας αποκτά μεγαλύτερη ακαμψία από τις εξωτερικές στρώσεις και η συνάφεια των υλικών δεν επιτυγχάνεται στον επιθυμητό βαθμό. Ο άκαμπτος πυρήνας απορροφά μεγαλύτερο φορτίο από τις εξωτερικές παρειές και δεν επιτυγχάνεται ομοιόμορφη κατανομή. Σε αυτή την περίπτωση είναι αναμενόμενη η κατάρρευση της τοιχοποιίας λόγω της σύνθλιψης του πυρήνα ο οποίος με τη σειρά του παρασύρει και τα εξωτερικά στρώματα.

Γενικά, η εκτίμηση των αποτελεσμάτων μας επιτρέπει να βγάλουμε το συμπέρασμα ότι οι συνθέσεις που χρησιμοποιήθηκαν δεν επηρεάζουν σημαντικά την τελική θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας. Μάλιστα, σε περιπτώσεις ισχυρής αντοχής ενεμάτων (δηλαδή μεγάλη περιεκτικότητα σε τσιμέντο) η τοιχοποιία λόγω της μορφολογίας της δεν αξιοποιεί όλη την αντοχή που της προσφέρει το ένεμα. Αντίθετα, η αντοχή των υδραυλικών ενεμάτων αξιοποιείται σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό και με αυτό τον τρόπο εξηγείται το γιατί τελικά η επισκευασμένη τοιχοποιία παρουσιάζει την ίδια περίπου αντοχή ανεξάρτητα με τη σύνθεση που εφαρμόστηκε.

Κατά τη χρησιμοποίηση ενός ριμερούς ενέματος με μεγάλη περιεκτικότητα σε τσιμέντο και ενός υδραυλικού ενέματος με βάση την

υδραυλική άσβεστο, προέκυψε πως η εφαρμογή σε δοκίμια τα οποία προσομοιώνουν υλικό τρίστρωτης τοιχοποιίας εμφανίστηκε η ίδια μορφή αστοχίας κατά τη δοκιμή της θλίψης: κατακόρυφες ρωγμές και στις δύο πλευρές του δοκιμίου. ⁽⁴⁾ Όμως το πιο κρίσιμο χαρακτηριστικό είναι η εμφάνιση κατακόρυφων ρωγμών οι οποίες διαχωρίζουν τις εξωτερικές παρειές από τον πυρήνα της τοιχοποιίας. Μόλις ολοκληρωθεί η αποκόλληση σε εγκάρσια διεύθυνση, η ευλυγισία του κάθε εξωτερικού στρώματος αυξάνεται σημαντικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η τοιχοποιία να μη μπορεί να φέρει άλλο φορτίο αφού δε συμπεριφέρεται σαν ενιαίο σώμα.

Ανεξάρτητα από το αν το ένεμα είναι τριμερές ή όχι, η πλήρωση μεγαλύτερου ποσοστού κενών με υψηλότερης αντοχής ένεμα οδηγεί σε υψηλότερης θλιπτικής αντοχής και μεγαλύτερου μέτρου ελαστικότητας υλικό πλήρωσης μετά την επισκευή του. Παρ' όλα αυτά η ενίσχυση των μηχανικών χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας δεν είναι ανάλογη με την αντοχή του ενέματος.

Το είδος της αστοχίας των ενεμένων δοκιμίων είναι ίδιο με αυτό των μη ενεμένων δοκιμίων. Σε κάθε περίπτωση εμφανίζονται κατακόρυφες ρωγμές στις τρεις στρώσεις σε εγκάρσια διεύθυνση σε φόρτιση όμως σημαντικά μεγαλύτερη στην περίπτωση των ενισχυμένων δοκιμίων. Αυτό συμβαίνει επειδή, ανεξάρτητα με την αντοχή του ενέματος, η περιοχή στην οποία έχει γίνει η επέμβαση με το ένεμα δεν εμφανίζει κάθετες ρωγμές σε ένταση ίση με αυτή της θλιπτικής της αντοχής. Καθώς το ένεμα γεμίζει τις ρωγμές, τα κενά του υλικού πλήρωσης αλλά και τους ίδιους τους πόρους του κονιάματος δημιουργείται ένα ομοιογενές υλικό. Η θλιπτική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας E του υλικού πλήρωσης αυξάνεται και το δέσιμο των στρώσεων βελτιώνεται και ενισχύεται. Γενικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά βελτιώνονται και η αποκόλληση των στρώσεων της τοιχοποιίας καθυστερεί.

Έχει προκύψει το συμπέρασμα ότι η τρίστρωτη τοιχοποιία δε συμπεριφέρεται καθόλου ως ένα ενιαίο σώμα⁽¹⁸⁾. Συγκεκριμένα, υπάρχει

σημαντική διαφορά σε επίπεδο τάσεων και παραμορφώσεων σε οριζόντιο και κάθετο επίπεδο λόγω της έντονης διαστολής των εξωτερικών στρωμάτων και του αδύναμου υλικού πλήρωσης. Παρά το γεγονός ότι τα εξωτερικά στρώματα φέρουν το μεγαλύτερο ποσοστό φορτίου, οι παραμορφώσεις του υλικού πλήρωσεως είναι σημαντικά μεγαλύτερες. Έτσι, το υλικό πλήρωσης ωθεί προς τα έξω τα εξωτερικά στρώματα. Λόγω της ασυμβατότητας των παραμορφώσεων των στρωμάτων της τοιχοποιίας πραγματοποιείται η αποκόλλησή τους και τελικά η τοιχοποιία εμφανίζει συνολική αστοχία.

Οι ρωγμές που εμφανίζονται σε εγκάρσια διεύθυνση στην τρίστρωτη τοιχοποιία τη στιγμή της μέγιστης αντίστασής της είναι πολύ περισσότερες από τα ανοίγματα, από κατακόρυφες ρωγμές, που εμφανίζονται στην εξωτερική επιφάνεια της τοιχοποιίας ($W_{trans} > W_{hor}$). Διαπιστώνουμε λοιπόν πως η αποκόλληση, σε εγκάρσια διεύθυνση, των διάφορων στρωμάτων της τοιχοποιίας είναι αποτέλεσμα της ευάλωτης φύσης της.

Έχει αναγνωρισθεί ο ρόλος του μηχανισμού συγκόλλησης στα μηχανικά χαρακτηριστικά του ενέματος είναι πολύ σημαντική για το σχεδιασμό και την επιλογή των ικανών ενεμάτων που θα έχουν συνδεθεί από υλικά όμοια με αυτά της υπάρχουσας τοιχοποιίας και θα είναι ταυτόχρονα και αποδοτικά⁽¹⁹⁾.

Η χρήση ενεμάτων με μειωμένη ποσότητα τσιμέντου οδηγεί σε μέτρια αύξηση της ακαμψίας της τοιχοποιίας. Αυτό θεωρείται θετικό ιδιαίτερα σε περιπτώσεις μερικής αποκατάστασης της τοιχοποιίας. Το ένεμα βελτιώνει σημαντικά τις αντοχές της τοιχοποιίας και η ενίσχυση δεν είναι αναλογική της αντοχής του ενέματος.

Μελετήθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες της τρίστρωτης τοιχοποιίας μετά την εφαρμογή τριμερούς ενέματος με τσιμέντο και υδραυλικού ενέματος χωρίς τσιμέντο με αποδεκτά αποτελέσματα σε ότι αφορά στην ενεσιμότητα και στη διεισδυτικότητά τους⁽¹³⁾.

Παρατηρήθηκε ότι στα δοκίμια που εφαρμόστηκε υδραυλικό ένεμα υδραυλικής ασβέστου η αύξηση της θλιπτικής αντοχής τους (σε σχέση με

την αρχική τους) ήταν μικρότερη από αυτή που μετρήθηκε στα δοκίμια στα οποία εφαρμόστηκε το τριμερές ένεμα. Επιπλέον τα ενέματα δεν αυξάνουν δραστικά το μέτρο ελαστικότητας της τοιχοποιίας ενώ το κατακόρυφο φορτίο που αντιστοιχεί στη θλιπτική αντοχή της ενεμένης τοιχοποιίας είναι μεγαλύτερο από αυτό της αρχικής τοιχοποιίας. Κατά συνέπεια δεν έχουμε μεγάλη ακαμψία στην τοιχοποιία το οποίο είναι πολύ σημαντικό ειδικά σε περιπτώσεις που έχουμε μερική εφαρμογή ενεμάτων και είναι απαραίτητο να διατηρήσουμε την ακαμψία της τοιχοποιίας σταθερή.

9.4 Παράγοντες επιρροής ενεσιμότητας του υδραυλικού ενέματος

9.4.1 Πήξη

Τα ενέματα είναι υλικά που σχεδιάζονται για να πήξουν μετά από ένα εύλογο χρονικό διάστημα. Όμως η πήξη δεν πρέπει να επηρεάζει τα χαρακτηριστικά ροής και κατά συνέπεια να εμποδίζει την ενεσιμότητα του μείγματος. Για τα τσιμεντενέματα η πήξη αρχίζει περίπου μια ώρα μετά την ανάμιξη των υλικών του μείγματος, επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και μπορεί να ρυθμιστεί από τη χρήση κατάλληλων πρόσμικτων.

Η αρχή της πήξης των ενεμάτων καθορίζει τη διάρκεια που επιτρέπεται η διοχέτευσή τους. Η χρήση του μείγματος απαγορεύεται μετά την έναρξή της διότι η κίνησή του θα επηρεάσει αρνητικά τη σκλήρυνση του ενέματος.

9.4.2 Αστάθεια μείγματος

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

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

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

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

Η αστάθεια του αιωρήματος μπορεί να βελτιωθεί:

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

9.4.3 Απορρόφηση νερού από λιθοδομή

Όταν μέρος του νερού του ενέματος απορροφάται από τα γύρω στεγνά υλικά της λιθοδομής η ένεση μπορεί να εμποδιστεί και το ένεμα να χάσει τη σταθερότητα της σύνθεσής του. Η απώλεια του νερού μπορεί να αποφευχθεί:

- Με προηγούμενη ύγρανση της λιθοδομής.
- Προσθέτοντας στο ένεμα ειδικά πρόσμικτα για τη συγκράτηση του νερού.

9.4.4 Γεωμετρικοί παράγοντες

Αφορούν στη σχέση μεταξύ των διαστάσεων των κόκκων του ενέματος και των διαστάσεων των κενών στα οποία το μείγμα πρόκειται να ενεθεί.

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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10 ΠΡΩΤΕΣ ΥΛΕΣ - ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται ως πρώτες ύλες για την παρασκευή των υδραυλικών ενεμάτων πρέπει να πληρούν συγκεκριμένες απαιτήσεις. Εδώ εμφανίζεται το μεγάλο πρόβλημα της έλειψης προτυποποίησης που υπάρχει και στη χώρα μας. Έχουν γίνει κάποιες προσπάθειες από το Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. και τη Γενική Διεύθυνση Αναστήλωσης Μουσείων και Τεχνικών Έργων του Υπουργείου Πολιτισμού προκειμένου να υπάρξουν συγκεκριμένες τυποποιήσεις σε ό,τι αφορά στις προδιαγραφές των υλικών. Η πιο ολοκληρωμένη προσπάθεια προσδιορισμού προδιαγραφών που αφορά στην αποκατάσταση της λιθοδομής με εφαρμογή ενεμάτων παρουσιάζεται στις Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές (ΠΕΤΕΠ 14-02-04-00). Με βάση αυτές τα εφαρμοζόμενα ενέματα βασίζονται στα ακόλουθα υλικά:

- Τσιμέντο
- Νερό
- Ποζολάνη
- Υδράσβεστος
- Πρόσθετα-Πρόσμικτα
- Άμμος

Σε περιπτώσεις ρωγμών μεγάλου εύρους (μεγαλύτερο από 10mm) μπορεί να προστεθεί και άμμος μέγιστου κόκκου $d_{max} < 1,00\text{mm}$.

10.1 Τσιμέντο⁽²⁴⁾

Για το τσιμέντο ισχύουν τα πρότυπα ΕΛΟΤ EN 197-1 & ΕΛΟΤ EN 197-2 σε ό,τι αφορά στη σύνθεση, στις προδιαγραφές, στα κριτήρια συμμόρφωσης, στην αξιολόγηση συμμόρφωσης, στην πιστοποίηση ποιότητας αλλά και στα τεχνικά χαρακτηριστικά του υλικού. Το τσιμέντο που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να συνοδεύεται από το αντίστοιχο πιστοποιητικό ποιότητας το οποίο θα αναφέρεται σε όλα τα απαιτούμενα

από τους ισχύοντες κανονισμούς στοιχεία. Θα πρέπει να είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε θειικά άλατα, αλκάλια και θα συνοδεύεται:

- Από τη χημική και ορυκτολογική του ανάλυση συμπεριλαμβανομένης της περιεκτικότητάς του σε SO_3 και υδατοδιαλυτά αλκάλια.
- Από την ειδική του επιφάνεια και την καμπύλη κοκκομετρικής κατανομής LASER.

10.2 Νερό⁽²⁴⁾

Για το νερό αναμίξεως και συντήρησης ισχύει το πρότυπο ΕΛΟΤ 345. Σε κάθε περίπτωση το νερό πρέπει να είναι φρέσκο, καθαρό και να μην περιέχει συστατικά που θα μπορούσαν να προκαλέσουν δυσμενείς επιπτώσεις επί της αντοχής και της ανθεκτικότητας του ενέματος.

10.3 Ποζολάνη⁽²⁴⁾

Η ποζολάνη μπορεί να είναι φυσική ή τεχνητή. Φυσικές ποζολάνες είναι η θηραϊκή γη, η ποζολάνη Νάπολης, ο τύπος Rhine Trass. Τεχνητές ποζολάνες είναι η πυριτική παιπάλη, η αιωρούμενη τέφρα. Σε κάθε περίπτωση θα είναι λεπτοαλεσμένη και θα διέρχεται σε ποσοστό περίπου 100% από το κόσκινο διαμέτρου οπής 0,075 mm ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό κόκκων ($\approx 90\%$) θα διέρχεται από κόσκινο διαμέτρου 0,045 mm, θα έχει χρώμα λευκό ή υπόλευκο, θα είναι απαλλαγμένη από υδατοδιαλυτά αλκάλια, ενώ τα διαθέσιμα αλκάλια δε θα υπερβαίνουν το 2% κατά ASTM C 618.

Η ποζολάνη που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να συνοδεύεται από το αντίστοιχο πιστοποιητικό ποιότητας (δελτίο τεχνικών χαρακτηριστικών υλικού) που θα αφορά στην ορυκτολογική της σύσταση, στην περιεκτικότητά της σε ενεργό πυρίτιο και σε αλκάλια (διαθέσιμα και υδατοδιαλυτά), στην ειδική της επιφάνεια, στην κοκκομετρική ανάλυση LASER και στο δείκτη ποζολανικότητας. Σε κάθε περίπτωση ο δείκτης ποζολανικότητάς της θα είναι τουλάχιστον 5 MPa με βάση το ΠΔ 244/80.

10.4 Υδράσβεστος⁽²⁴⁾

10.4.1 Υδράσβεστος σε σκόνη

Για την υδράσβεστο σε σκόνη ισχύει το πρότυπο ΕΛΟΤ – EN 459-1 και EN 459-2. Η υδράσβεστος θα διέρχεται σε ποσοστό περίπου 100% από κόσκινο διαμέτρου οπής 0,075 mm και το μεγαλύτερο ποσοστό των κόκκων ($\approx 90\%$) θα διέρχεται από κόσκινο διαμέτρου 0,045 mm, θα έχει ομοιόμορφο χρώμα. Θα προσκομίζεται σε σφραγισμένους χάρτινους σάκους ή ξύλινα κιβώτια και υποχρεωτικά θα αποθηκεύεται συσκευασμένη σε στεγασμένους, απόλυτα ξηρούς χώρους.

Η υδράσβεστος που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να συνοδεύεται από το αντίστοιχο πιστοποιητικό ποιότητας που θα αφορά στην πλήρη χημική της ανάλυση και σε όλα τα άλλα στοιχεία που απαιτούνται ώστε να πληρούνται οι απαιτήσεις των ισχυόντων κανονισμών. Επιπλέον, απαιτούνται τα στοιχεία της ειδικής επιφάνειας και της κοκκιομετρίας LASER.

10.4.2 Υδράσβεστος σε πολτό

Για την υδράσβεστο σε πολτό ισχύουν τα πρότυπα ΕΛΟΤ EN 459-1 και EN 459-2. Το ελεύθερο νερό θα είναι λιγότερο του 50%. Η αγορά της ποσότητας πρέπει να γίνεται με την έναρξη του έργου, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή περίοδος φύρασης του υλικού. Τέλος, η αποθήκευσή του υλικού γίνεται σε ειδικά διαμορφωμένες στεγανές δεξαμενές.

10.5 Πρόσθετα-Πρόσμικτα⁽²⁴⁾

Τα πρόσθετα-πρόσμικτα που θα χρησιμοποιηθούν στο ένεμα θα είναι συμβατά με το χρησιμοποιούμενο τύπο τσιμέντου ή υδραυλικής ασβέστου και θα συνοδεύονται από πιστοποιητικά ελέγχου. Τα τεχνικά τους φυλλάδια θα παρέχουν κατ' ελάχιστο τις εξής πληροφορίες:

- Χημική ονοματολογία των κυρίως ενεργών συστατικών τους.
- Περιεκτικότητα των πρόσθετων-πρόσμικτων σε χλώριο, εκφρασμένη σε άνυδρο CaCl_2 ως ποσοστό του βάρους του πρόσθετου.

- Πιθανότητα δημιουργίας φυσαλλίδων αέρα.
- Τυπική δοσολογία και επιπτώσεις σε περίπτωση μεγαλύτερης δόσης.
- Την περιεκτικότητα σε θειϊκές ρίζες.
- Λεπτομερείς οδηγίες χρήσεων.
- Τον επιτρεπόμενο χρόνο αποθήκευσης και οδηγίες για τις απαιτούμενες συνθήκες αποθήκευσης.

Τα πρόσθετα-πρόσμικτα που θα χρησιμοποιηθούν δε θα έχουν δευτερογενείς επιπτώσεις στο χρόνο πήξεως, στις αντοχές και στο τελικό χρώμα του αναμίγματος.

Απαγορεύεται η χρήση πρόσθετων που δημιουργούν ιόντα χλωρίου. Τα πρόσθετα-πρόσμικτα που θα χρησιμοποιηθούν στο έργο θα είναι του ίδιου εργοστασίου και θα έχουν την ίδια εμπορική ονομασία με εκείνα που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της σύνθεσης και θα προστίθενται στην αναλογία που προβλέπεται σε αυτή.

10.6 Άμμος⁽²⁴⁾

Σε περιπτώσεις που έχουμε μεγάλο εύρος ρωγμών υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης λεπτόκοκκου υλικού, κατά κύριο λόγο άμμου. Σε αυτή την περίπτωση η άμμος θα πληρεί τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος. Όμως η μέγιστη διάμετρος των κόκκων θα πρέπει να είναι $d_{max} < 1,00\text{mm}$ ενώ το ποσοστό παιπάλης θα πρέπει να είναι 0%.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

11.1 Εξοπλισμός⁽²⁵⁾

11.1.1 Βαθμίδα ανάμιξης

Το συνδετικό υλικό, το νερό, τα πρόσθετα και τα πρόσμικτα θα εισάγονται στις προβλεπόμενες αναλογίες και θα αναμιγνύονται έντονα. Ουσιώδης είναι όχι μόνο η ομογενοποίηση του μείγματος αλλά και η πλήρης αποδόμηση των υλικών (deflocculation). Για το λόγο αυτό ο αναμικτήρας πρέπει να εξασφαλίζει υψηλό βαθμό διάσπασης (shearing) και ομογενοποίησης ώστε το ένεμα να αποκτά ιδιότητες που πλησιάζουν την κατάσταση κολλοειδούς. Κατάλληλοι είναι οι υψηλού τυρβώδους ταχύστροφοι αναμικτήρες με τουλάχιστον 1500rpm (high turbulence mixers). Το παραγόμενο ένεμα πριν οδηγηθεί στον αναδευτήρα θα διέρχεται από φίλτρο για την παρακράτηση τυχόν ξένων σωμάτων ή κροκιδωμένων υλικών.

Ο αναμικτήρας πρέπει να επιτρέπει την παραγωγή ενός μείγματος σταθερού και ομοιογενούς χωρίς δημιουργία κροκιδώσεων των λεπτόκοκκων υλικών και του τσιμέντου. Ο χρόνος αναμίξεως για την παρασκευή του ενέματος καθορίζεται από τη μελέτη ή από την επίβλεψη, καθώς εξαρτάται από τα υλικά που τελικά θα χρησιμοποιηθούν για τη σύνθεση του ενέματος και τα χαρακτηριστικά του αναμικτήρα.

Στην έξοδο του ενέματος από τον αναμικτήρα πρέπει να τοποθετηθεί κατάλληλο φίλτρο προκειμένου να εμποδιστεί η είσοδος στο σωλήνα διοχέτευσης του ενέματος τυχόν ξένων σωμάτων, που θα μπορούσαν να είχαν εισέλθει στον αναμικτήρα κατά λάθος κατά την ανάμιξη των υλικών του ενέματος.

11.1.2 Βαθμίδα ανάδευσης

Στην έξοδο του αναμικτήρα θα παρεμβάλλεται αναδευτήρας πολλαπλών πτερυγίων στρεφόμενος με ταχύτητα 200-350rpm, για τη διατήρηση του μείγματος σε κατάσταση αιωρήματος. Δεδομένου ότι η

παραγωγή του ενέματος γίνεται κατά χαρμάνι, ενώ η εισπίεση είναι συνεχής δια μέσου της αντλίας, ο αναδευτήρας λειτουργεί και ως δεξαμενή φόρτισης της αντλίας (buffer).

11.1.3 Αντλία ενέματος

Ανάμεσα στον αναμικτήρα και την αντλία θα υπάρχει αναδευτήρας εφοδιασμένος με σύστημα αργής ανάμιξης (150/300 rpm), στον οποίο θα διοχετεύεται το ένεμα από τον αναμικτήρα ώστε να μη διακόπτεται η διαδικασία της εφαρμογής του ενέματος στην τοιχοποιία λόγω έλλειψης υλικού.

Οι αντλίες θα είναι ογκομετρικού τύπου ή συνεχούς ροής. Επισημαίνεται ότι οι ογκομετρικού τύπου αντλίες (δοσομετρικές) παρά το γεγονός ότι διοχετεύουν υπό μορφή παλμών το ένεμα, υστερούν έναντι των συνεχούς ροής γιατί κατά τη διακοπή της παροχής επενεργούν οι θιξοτροπικοί μηχανισμοί του ενέματος που επιδρούν επί της διείδυσης (το αποτέλεσμα δυσμενοποιείται ακόμα περισσότερο από το πορώδες της κατασκευής που συντελεί στην αφυδάτωση του ενέματος).

Η αντλία της μονάδας θα πρέπει να εξασφαλίζει επαρκή πίεση εξόδου (μετρούμενη ανά 0,1Atm) για την ισοστάθμιση της υδροστατικής πίεσης που αναπτύσσεται όταν το ένεμα εφαρμόζεται σε μεγάλο ύψος (πάνω από τη στάθμη τοποθέτησης του μηχανήματος). Λαμβανομένου υπόψη ότι το ειδικό βάρος του ενέματος είναι της τάξης των 1,6gr/cm³, για την ανύψωση του ενέματος στα 5,0m απαιτείται πίεση 8 Atm. Από την υψομετρική διαφορά ακροφυσίου (στο οποίο η μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση είναι 1Atm) θα καθορίζεται η μέγιστη πίεση της αντλίας, η οποία θα ελέγχεται με ενσωματωμένο μανόμετρο.

Για την προώθηση του ενέματος θα χρησιμοποιηθούν μηχανοκίνητες αντλίες (ηλεκτροκίνητες ή πεπιεσμένου αέρα) κατά προτίμηση συνεχούς ροής. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στη ρύθμιση της πίεσης εξόδου. Τυχούσα υπερπίεση μπορεί να έχει καταστροφικά αποτελέσματα επί τόπου του στοιχείου επί του οποίου γίνεται η επέμβαση. Για το λόγο αυτό τόσο η αντλία όσο και το ακροφύσιο θα έχουν υποχρεωτικά

ενσωματωμένα μανόμετρα σε λειτουργία με δυνατότητα μέτρησης πίεσης 0,1Atm.

Επιπλέον, η αντλία που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να έχει ενσωματωμένο ειδικό εξάρτημα, το οποίο να εμποδίζει την άνοδο της πίεσης από κάποιο όριο και πάνω. Το όριο αυτό θα καθορίζεται ανάλογα με τη θέση στην οποία βρίσκεται κάθε φορά η αντλία σε σχέση με εκείνη του τοίχου όπου γίνονται οι εργασίες, λαμβάνοντας υπόψη ότι στο ακροφύσιο η επιτρεπόμενη πίεση είναι 0,5-1,0 Atm.

Η διακοπή της εισπίεσης από ένα ακροφύσιο πριν εκδηλωθεί εξίδρωση σε επόμενο αποτελεί έναν από τους βασικότερους λόγους αστοχίας της επέμβασης. Συνιστάται ως εκ τούτου ο εξοπλισμός να έχει τη δυνατότητα συνεχούς τροφοδοσίας της αντλίας εισπίεσης (δηλαδή να διαθέτει και διάταξη αναδευτήρα buffer, όπως προαναφέρθηκε).

11.1.4 Αγωγοί

Θα είναι εύκαμπτοι σωλήνες, επαρκούς μήκους για την κάλυψη της περιοχής εφαρμογής των ενεμάτων, αναλόγως και με τις δυνατότητες μετακίνησης του εξοπλισμού βάσης. Η διατομή των αγωγών θα πρέπει να είναι επαρκώς μεγάλη, για τη μείωση των απωλειών, αλλά όχι ιδιαίτερα μεγάλη για να μην καθυστερεί η διακίνηση του ενέματος από την αντλία προς το ακροφύσιο εισαγωγής. Συνιστάται πάρα πολύ το σύστημα να διαθέτει και αγωγό επιστροφής ώστε το ένεμα να μην παραμένει για πολύ χρόνο στη σωλήνωση. Ο αγωγός επιστροφής θα καταλήγει στον αναδευτήρα.

11.1.5 Σύστημα υποδοχής ενέματος

Η διάταξη υποδοχής του ενέματος θα φέρει ταχυσυνδέσμους στεγανού τύπου και ρυθμιζόμενη τρίοδη βαλβίδα ελέγχου πίεσης του ενέματος στο ακροφύσιο. Όταν η πίεση είναι υψηλότερη από την επιλεγμένη, το ένεμα θα οδηγείται πίσω στον αναδευτήρα (ισοστάθμιση πίεσης). Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται συνεχής λειτουργία της αντλίας και διατήρηση της πίεσης στα εκάστοτε επιθυμητά επίπεδα,

ακόμη και κατά την εναλλαγή θέσεως εισπίεσης του ενέματος, καθώς επίσης και διαρκής κυκλοφορία του ενέματος εντός των σωληνώσεων.

11.1.6 Επισημάνσεις

Σε μικρής κλίμακας εφαρμογές είναι δυνατόν να χρησιμοποιούνται και χειροκίνητες αντλίες ενέματος εφοδιασμένες με ρυθμιστές και μανόμετρο. Όταν χρησιμοποιούνται μηχανοκίνητες αντλίες (ηλεκτροκίνητες ή πεπιεσμένου αέρα) απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στη ρύθμιση της πίεσης εξόδου. Τυχούσα υπερπίεση μπορεί να έχει καταστροφικά αποτελέσματα για το στοιχείο στο οποίο γίνεται η επέμβαση. Συστήματα εισπίεσης χωρίς αγωγό επιστροφής είναι επιρρεπή σε προβλήματα σχετικά με την ευστάθεια και τη θιξοτροπική συμπεριφορά του ενέματος.

11.2 Ανάμιξη⁽²⁵⁾

Για την παρασκευή του ενέματος θα χρησιμοποιούνται τα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί στη μελέτη σύνθεσης όπως τυχόν τροποποιήθηκαν κατά τις δοκιμαστικές εφαρμογές.

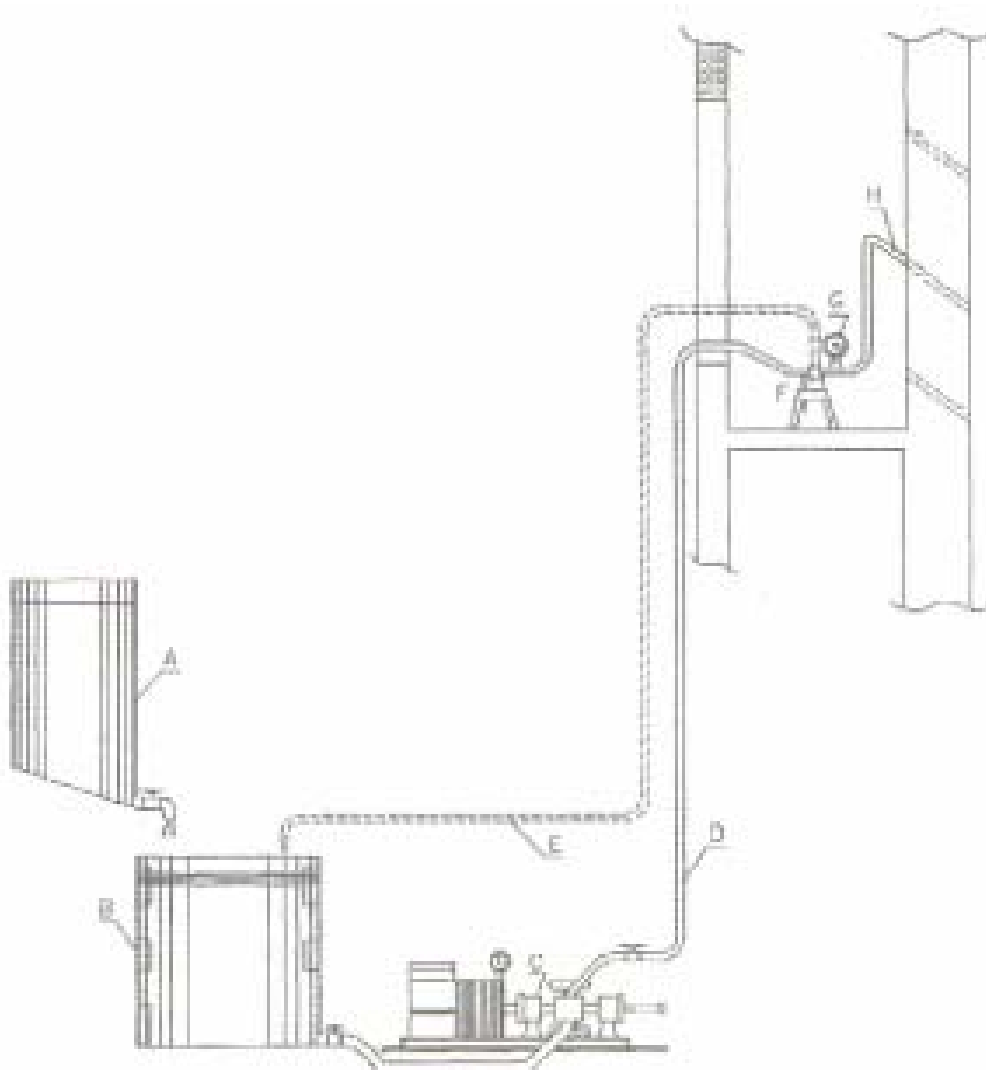
Η ανάμιξη γίνεται σε ταχύστροφο αναμικτήρα ενεμάτων, ώστε το μείγμα να είναι σταθερό, ομοιογενές και χωρίς κροκιδώσεις των λεπτόκοκκων υλικών και του τσιμέντου. Το παραγόμενο ένεμα πριν την εισπίεσή του στην τοιχοποιία, θα διέρχεται από φίλτρο για την παρακράτηση τυχόν ξένων σωμάτων ή κροκιδωμένων υλικών, και θα οδηγείται στον αναδευτήρα, από τον οποίο θα τροφοδοτείται η αντλία προώθησης.

11.3 Προσωπικό⁽²⁵⁾

Η επίβλεψη των εργασιών θα γίνεται από διπλωματούχο πολιτικό μηχανικό με εμπειρία σε παρόμοια έργα. Καθ' όλη τη διάρκεια εκτέλεσης των εργασιών θα βρίσκεται επί τόπου τεχνολόγος μηχανικός ή εργοδηγός με αποδεδειγμένη εμπειρία σε εργασίες επισκευών, αποδεικνυόμενη με πιστοποιητικά προϋπηρεσίας.

Το εργατοτεχνικό προσωπικό που θα ασχοληθεί με την εκτέλεση των εργασιών πρέπει να έχει αποδεδειγμένη εμπειρία σε παρόμοιας φύσης έργα.

Πριν την έναρξη των εργασιών θα εκτελείται δοκιμαστική εφαρμογή ενεμάτων για τον έλεγχο και την αποδοχή του εργατοτεχνικού προσωπικού και του εξοπλισμού καθώς και της σύνθεσης του ενέματος. Η σύνθεση του συνεργείου θα παραμένει καθ' όλη τη διάρκεια του έργου η ίδια με αυτή που πραγματοποίησε τη δοκιμαστική εφαρμογή.



- A: βαθμίδα ανάμιξης
- B: Βαθμίδα ανάδευσης
- C: Αντλία ενέματος
- D, E: Αγωγοί
- F,G,H: Συστήματα υποδοχής ενέματος

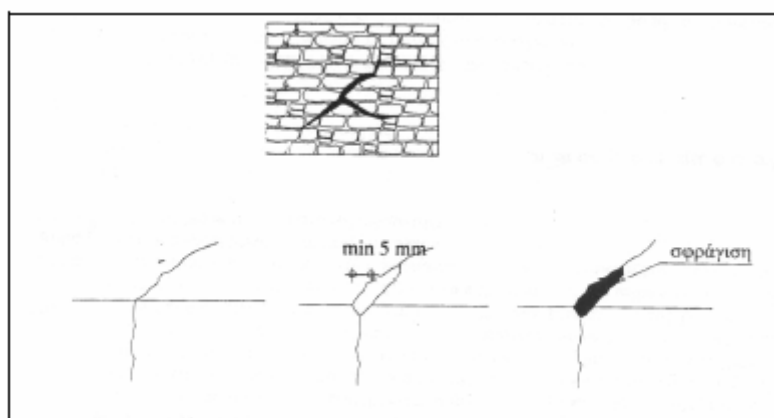
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΕΝΕΜΑΤΩΝ

12.1 Προετοιμασία τοιχοποιίας⁽²⁵⁾

12.1.1 Ενέματα ομοιογενοποιημένης μάζας

Περιλαμβάνονται οι ακόλουθες επιμέρους εργασίες:

- Καθαίρεση επιχρισμάτων, αν απαιτείται ως ΠΕΤΕΠ 14-02-01-01
- Διεύρυνση αρμών, αν απαιτείται από τη μελέτη του έργου, ως ΠΕΤΕΠ 14-02-01-03

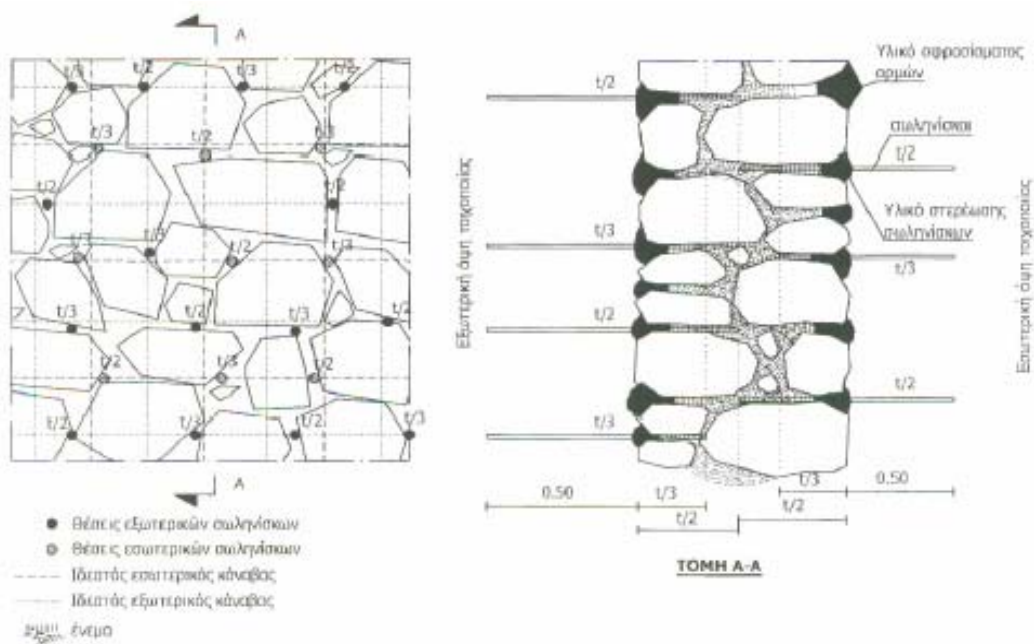


Εικ. 12.1: Προετοιμασία της τοιχοποιίας πριν την εφαρμογή του ενέματος.

- Χάραξη κορυφών ιδεατού κανάβου τοποθέτησης σωληνίσκων εισόδου και ελέγχου ενέματος, μονόπλευρα ή αμφίπλευρα, όπως αναφέρεται στη μελέτη του έργου. Αν στη μελέτη δεν καθορίζεται κανάβος σωληνίσκων, θα είναι πλευράς 0,50÷1,00m και όχι μεγαλύτερος από το πάχος της τοιχοποιίας. Οι κορυφές του εσωτερικού και εξωτερικού κανάβου δε θα ταυτίζονται και θα διατάσσονται έτσι ώστε να έχουν διαφορά βήματος κατά μισό κανάβο οριζόντια και κατακόρυφα.
- Τοποθέτηση διαφανών σωληνίσκων εισόδου και ελέγχου ενέματος, διαμέτρου 1÷10mm, σύμφωνα με τα καθοριζόμενα στη μελέτη του έργου. Οι σωληνίσκοι θα τοποθετούνται κυρίως στις θέσεις αρμών. Οι μισοί από αυτούς θα εισέχουν της τοιχοποιίας κατά το 1/3 του πάχους της, ενώ οι υπόλοιποι κατά το 1/2. Το

εξέχον τμήμα των σωληνίσκων θα είναι 0,50m περίπου (βλ. Εικ. 12.2).

- Στερέωση των σωληνίσκων.



Εικ. 12.2: Διάταξη σωληνίσκων ενέματος.

- Πλήρωση αρμών ως ΠΕΤΕΠ 14-02-03-00, για αποφυγή αφ' ενός μεν διαρροών, αφ' ετέρου για πλήρωση των τυχόν δημιουργούμενων διεπιφανειών.
- Εφαρμογή ενεμάτων από κάτω προς τα πάνω ως εξής:
 - ο Αριθμούνται οι σωληνίσκοι με αύξοντα αριθμό που αντιστοιχεί στην εξέλιξη της διαδικασίας εισπύεσης/εξόδου του ενέματος στις διάφορες θέσεις.
 - ο Συντάσσεται σκαρίφημα της διάταξης των σωληνίσκων.
 - ο Συντάσσεται πρωτόκολλο ανά θέση επεμβάσεων, στο οποίο αναγράφονται τα εξής:
 - οι κατά το ανωτέρω αριθμοί των σωληνίσκων από τους οποίους εξήλθε το ένεμα και σφραγίστηκαν.
 - η εξέλιξη κατανάλωσης ενέματος ανά σωληνίσκο που σφραγίζεται.

- ο όγκος του ενέματος που εισπιάστηκε από τη συγκεκριμένη θέση εισόδου/ι τυχόν σημαντικές αλλαγές πίεσης που παρατηρήθηκαν.
- Η τυχούσα υπερβολική κατανάλωση ενέματος (κριτήριο διακοπής εισπίεσης).
- Μετά το τέλος της διαδικασίας εισπίεσης και ελέγχου του ενέματος, τα άκρα των σωληνίσκων θα δένονται και θα στερεώνονται με το δεμένο άκρο τους προς τα πάνω, ώστε το ένεμα να διατηρείται στην τοιχοποιία υπό πίεση μέχρι και την ολοκλήρωση της πήξης.
- Η πίεση εφαρμογής του ενέματος στη θέση εισόδου θα είναι συνεχώς ελεγχόμενη, σταθερή κατά το δυνατόν, μικρότερη από την τάση διάρρηξης της τοιχοποιίας και δε θα υπερβαίνει την $0,05 \div 0,10 \text{MPa}$.
- Δε θα διακόπτεται η παροχή πριν η πίεση στη θέση εισόδου φθάσει τα $0,10 \text{MPa}$ εκτός αν οι ενδείξεις κατανάλωσης γίνουν μηδενικές (αδυναμία περαιτέρω εισπίεσης).
- Οι θέσεις εξόδου του ενέματος σφραγίζονται αφού εξέλθει όλος ο αέρας και τρέξει καθαρό ένεμα.
- Λήψη μέτρων για την εξασφάλιση συνεχούς παροχής ενέματος
- Λήψη μέτρων για την αποφυγή διάρρηξης ή άλλης βλάβης στην επισκευαζόμενη περιοχή (ειδικά μέτρα αντιστήριξης, όταν και αν προβλέπονται από τη μελέτη).



(α)



(β)



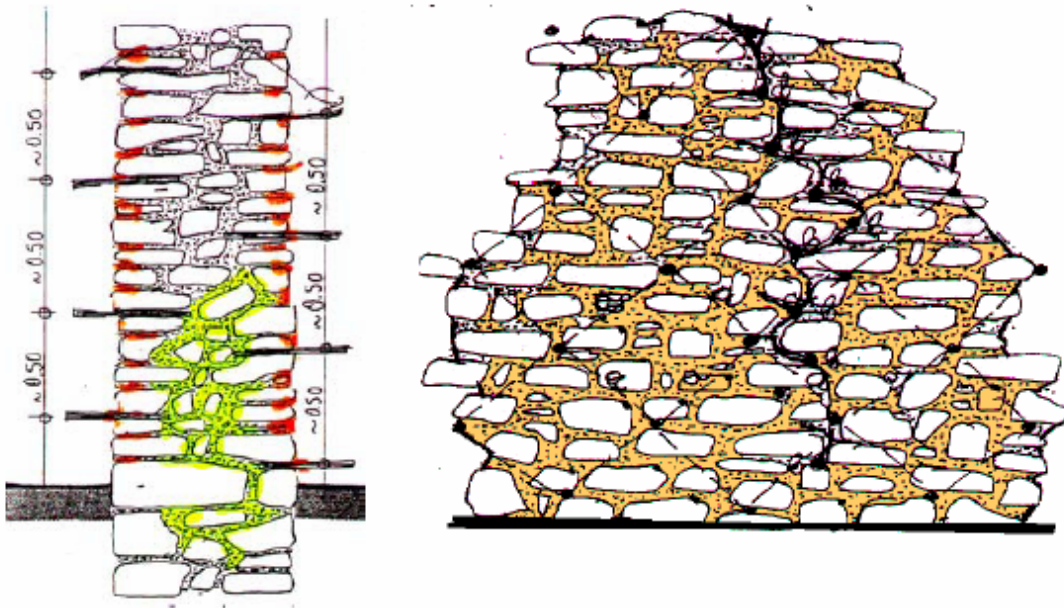
(γ)

Εικ. 12.3: (α) κύλινδρος πριν την εφαρμογή του ενέματος, (β) και (γ) κατά την εφαρμογή του ενέματος.

12.1.2 Ενέματα σε θέσεις τοπικών φθορών-βλαβών ή επεμβάσεων

Περιλαμβάνονται οι ακόλουθες επιμέρους εργασίες:

- καθαίρεση επιχρισμάτων εκατέρωθεν της περιοχής φθοράς/βλάβης ή επέμβασης, αν απαιτείται ως ΠΕΤΕΠ 14-02-01-01
- διεύρυνση αρμών, αν απαιτείται από τη μελέτη του έργου, ως ΠΕΤΕΠ 14-02-01-03
- χάραξη κορυφών τοποθέτησης σωληνίσκων εισόδου και ελέγχου ενέματος, μονόπλευρα ή αμφίπλευρα, σύμφωνα με τα καθοριζόμενα στη μελέτη του έργου. Αν δεν προβλέπεται διαφορετικά, στην περίπτωση πλήρωσης ρωγμών θα τοποθετούνται κατά μήκος αυτών ανά $0,30 \div 0,50\text{m}$ και εκατέρωθεν αυτών σε ζώνη ίση με το πάχος της τοιχοποιίας στη δε περίπτωση τοπικής επέμβασης θα τοποθετούνται ανά $0,50\text{m}$ περίπου και όχι περισσότερο από το πάχος της τοιχοποιίας. Οι κορυφές του εσωτερικού και εξωτερικού κανάβου δε θα ταυτίζονται.
- Τοποθέτηση διαφανών σωληνίσκων εισόδου και ελέγχου ενέματος, διαμέτρου $1 \div 10\text{mm}$, σύμφωνα με τα καθοριζόμενα στη μελέτη του έργου. Οι σωληνίσκοι θα τοποθετούνται κυρίως στις θέσεις αρμών. Οι μισοί από αυτούς θα εισέχουν της τοιχοποιίας κατά το $1/3$ του πάχους της, ενώ οι υπόλοιποι κατά το $1/2$. Το εξέχον τμήμα των σωληνίσκων θα είναι $0,50\text{m}$ περίπου.
- Στερέωση των σωληνίσκων με το κονίαμα αρμολόγησης.
- Πλήρωση των αρμών ως ΠΕΤΕΠ 14-02-03-00, για αποφυγή αφ' ενός μεν διαρροών, αφ' ετέρου για πλήρωση των τυχόν δημιουργούμενων διεπιφανειών.
- Κατά τα υπόλοιπα ισχύει ότι και για τα ενέματα ομογενοποίησης μάζας.



Εικ. 12.4: Διάταξη σωληνίσκων.

Η συντήρηση, και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις, θα γίνεται επί επταμέρου με υγρή λινάτσα εφαρμοζόμενη στην επιφάνεια της τοιχοποιίας. Η εργασία θα θεωρείται τελειωμένη όταν έχουν ολοκληρωθεί οι εργασίες ανάμιξης, εφαρμογής και συντήρησης σύμφωνα με τις οδηγίες του ΠΕΤΕΠ. Θα πρέπει επίσης να έχουν απομακρυνθεί τα εξέχοντα τμήματα των σωληνίσκων εισόδου και ελέγχου ενεμάτων και να έχουν συγκεντρωθεί, απομακρυνθεί και αποτεθεί στον τόπο φόρτωσης τα άχρηστα υλικά.

12.2 Μέθοδοι εφαρμογής⁽¹⁾

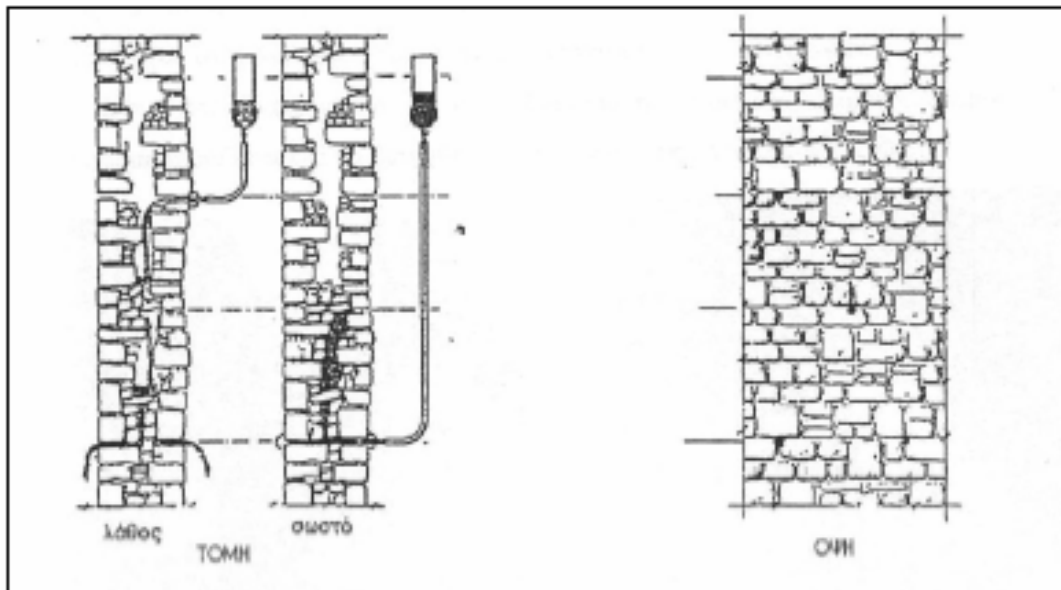
12.2.1 Εισαγωγή ενέματος υπό πίεση

Η εφαρμογή των ενεμάτων χρειάζεται προσωπικό με εμπειρία που λαμβάνοντας υπ' όψη τη δομή και την κατάσταση της τοιχοποιίας θα αποφασίσει για τον καλύτερο συνδυασμό των αποστάσεων των οπών, τη σύνθεση του ενέματος και την πίεση που απαιτείται για την ένεση σε κάθε περιοχή της κατασκευής.

Η περισσότερο χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι η εισαγωγή του ενέματος υπό πίεση. Το ένεμα διέρχεται μέσω των κενών και γεμίζει τα κενά συμπιέζοντας ή και εξωθώντας τον αέρα των κενών της τοιχοποιίας.

Η γνώση της εσωτερικής δομής της τοιχοποιίας και του ποσοστού των κενών είναι στοιχείο που συνεκτιμάται για την επίτευξη του κατάλληλου ιξώδους του ενέματος.

Η είσοδος του μείγματος γίνεται από ελαστικούς σωλήνες διαμέτρου ανάλογης με την ποσότητα του ενέματος που θα εισαχθεί. Οι σωλήνες εισάγονται είτε σε οπές που δημιουργούνται για το σκοπό αυτό, είτε σε υπάρχουσες ρωγμές ή χάσματα της τοιχοποιίας (βλ. Εικ. 12.5).



Εικ. 12.5: Εισαγωγή ενέματος υπό πίεση.

Οι συνήθεις αποστάσεις των οπών κυμαίνονται μεταξύ 0,30m–0,60m. Επειδή το ένεμα λαμβάνει τη θέση του αέρα ή του τυχόντος ύδατος των κενών, πρέπει να υπάρχει πρόνοια για την έξοδο τους από την τοιχοποιία, δηλαδή πρέπει σε κάθε περίπτωση να υπάρχουν τουλάχιστον δύο οπές σε μικρή απόσταση μεταξύ τους. Οι αποστάσεις μεταξύ των σωλήνων και απόσταση του ενέματος εξαρτώνται από:

- Τη φύση και το ιξώδες του ενέματος.
- Τη διάμετρο των σωλήνων.
- Τη διαπερατότητα της τοιχοποιίας.
- Την πίεση εισαγωγής του ενέματος.

Στην αρχή του εμποτισμού η πίεση είναι μέχρι 0,30MPa και κρατιέται σταθερή μέχρι να απορροφηθεί το ένεμα από τον τοίχο, στη συνέχεια αυξάνεται μέχρι 0,40MPa και κρατιέται σταθερή για 5–10 λεπτά έτσι ώστε να σταθεροποιηθεί το μείγμα και να στραγγίσει το επιπλέον νερό. Μεγάλη πίεση μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα σε τοιχοποιίες μικρής αντοχής, για το λόγο αυτό πρέπει να συνεκτιμάται η πίεση με την αντοχή της τοιχοποιίας.

Η εισαγωγή του ενέματος αρχίζει από τα χαμηλότερα σημεία και προχωρεί προς τα άνω με συστηματικό τρόπο. Η εισαγωγή από ένα σημείο συνεχίζεται μέχρι να υπερχειλίσει ένεμα από κάποιο υψηλότερο σημείο, που επικοινωνεί με το σημείο αυτό.

Στη συνέχεια σφραγίζεται ο χαμηλότερος σωλήνας (από όπου γινόταν η εισαγωγή) και η διαδικασία επαναλαμβάνεται από τα σημεία από όπου έχει εμφανιστεί υπερχειλίση του ενέματος. Εάν παρά το παρατεταμένο διάστημα εισαγωγής δεν παρατηρηθεί έξοδος του υλικού από ανώτερη οπή, τότε για τον έλεγχο της πορείας του ενέματος δημιουργείται νέα οπή χαμηλότερα εκείνης από όπου αναμένεται να τρέξει υλικό. Αν παρατηρηθεί ότι το υλικό χάνεται από μακριά από την επιθυμητή περιοχή, τότε πρέπει να ληφθούν κάποια μέτρα για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Ένα τέτοιο μέτρο είναι η προσθήκη πηκτικού, αλλά η λύση εγκυμονεί κινδύνους για τη συσκευή εισαγωγής. Πιο αποτελεσματική μπορεί να αποδειχθεί η παρασκευή περισσότερο παχύρρευστου ενέματος που θα εισέρχεται από οπές σε μικρότερες αποστάσεις.

Η εισαγωγή ενέματος στις ρωγμές των τοιχοποιιών απαιτεί μεγάλη προσοχή επειδή μπορεί το ένεμα από υπερχειλίση να λερώσει ανεπανόρθωτα τον τοίχο. Η διαδικασία σφράγισης των ρωγμών περιλαμβάνει απομάκρυνση του βλαμμένου κονιάματος στους αρμούς (μετά την αφαίρεση του επιχρίσματος), καθαρισμό της ρωγμής από χαλαρά μέρη με αέρα ή νερό υπό πίεση, εκτράχυνση των επιφανειών των αρμών, σφράγιση των χειλών της ρωγμής με γύψο, τσιμεντοκονία ή ειδικούς στόκους που κυκλοφορούν στο εμπόριο. Έπειτα τοποθετούνται

πλαστικοί σωλήνες για εξαέρωση (απομάκρυνση εγκλωβισμένου αέρα) και τον έλεγχο του πλήρους εμποτισμού του τοίχου. Απαιτείται καθαρισμός και ύγρανση με «μίγμα νερού–αέρα». Μετά το τέλος των εργασιών πρέπει να αφαιρούνται οι σωλήνες και να αποκαθίστανται οι αρμοί στις περιοχές των οπών.

Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που το άνοιγμα των ρωγμών της τοιχοποιίας δεν υπερβαίνει τα 10mm. Σε αντίθεση με το βαθύ αρμολόγημα που συνίσταται για τοιχοποιίες μικρού πάχους (από 300mm έως 400mm), συνίσταται και για τοιχοποιίες μεγαλύτερου πάχους. Αναλυτικά τα στάδια υλοποίησης είναι:

- Καθαίρεση του επιχρίσματος σε μεγάλο πλάτος γύρω από τις ρωγμές.
- Διεύρυνση της ρωγμής στην επιφάνεια της τοιχοποιίας.
- Διάνοξη οπών κατά το πάχος του τοίχου ανά αποστάσεις κατά μήκος της ρωγμής (η διάμετρος, οι αποστάσεις και το βάθος αυτών των οπών εξαρτώνται από το εύρος της ρωγμής και από το πάχος της τοιχοποιίας, καθώς και από το εάν οι ενέσεις πρόκειται να γίνουν από τη μια όψη του τοίχου ή και από τις δύο).
- Καθάρισμα της ρωγμής στο εσωτερικό της τοιχοποιίας με εισαγωγή ύδατος υπό πίεση.
- Τοποθέτηση πλαστικών σωληνίσκων μέσα στις οπές που έχουν ανοιχθεί.
- Σφράγιση της εξωτερικής επιφάνειας της ρωγμής με τσιμεντοκονίαμα ή γύψο (συνίσταται να γίνεται η σφράγιση των ρωγμών δύο μέρες περίπου πριν την εφαρμογή του ενέματος, κατά τις οποίες η επιφάνεια της τοιχοποιίας στην οποία θα εφαρμοστούν τα ενέματα πρέπει να διατηρείται υγρή).
- Προετοιμασία ενέματος. Τα υλικά του ενέματος τοποθετούνται στον αναμικτήρα και αναμιγνύονται με μεγάλη ταχύτητα για περιορισμένη διάρκεια προς αποφυγή πρόωρης σκλήρυνσης του μίγματος. Στη συνέχεια το ένεμα μεταγγίζεται σε άλλο αναμικτήρα μικρής ταχύτητας από όπου και αντλείται για την εισαγωγή του στην τοιχοποιία. Η αργή

ανάμιξη συνεχίζεται σε όλη τη διάρκεια της εφαρμογής του, έτσι ώστε να αποφεύγεται η απόμιξή του.

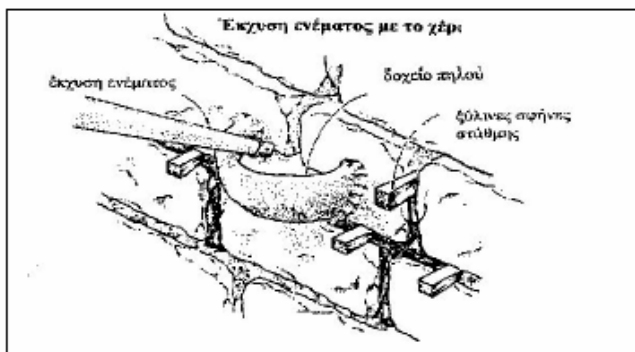
- Εφαρμογή του ενέματος. Οι ενέσεις εφαρμόζονται από κάτω προς τα πάνω. Η πίεση στο ακροφύσιο δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0,1MPa, προς αποφυγή του κινδύνου βλάβης στην τοιχοποιία λόγω υπερβολικής εσωτερικής πίεσης. Η εφαρμογή του ενέματος διακόπτεται κάθε φορά που εμφανίζεται ένεμα στον αμέσως υπερκείμενο σωληνίσκο. Στην περίπτωση που το ένεμα αντλείται, απαιτείται ταυτόχρονη μείωση της πίεσης στην αντλία. Απομακρύνεται το ακροφύσιο και φράσσεται ο σωληνίσκος εισαγωγής του ενέματος. Μετά από διακοπή 10–20 λεπτών η διαδικασία επαναλαμβάνεται στην επόμενη ανώτερη στάθμη ή (εάν υπάρχουν πολλά σημεία εισαγωγής στην ίδια στάθμη) στο επόμενο σημείο εισόδου κατά μήκος του τοίχου, μέχρι να ολοκληρωθεί η πλήρωση και να φραγούν όλοι οι σωληνίσκοι. Όταν το μίγμα προχωρεί κατακόρυφα είναι σημαντικό να αποφεύγεται η ανάπτυξη μεγάλης υδροστατικής πίεσης στο ένεμα που έχει ήδη εισαχθεί. Γι' αυτό το λόγο το μέγιστο ύψος στο οποίο εφαρμόζονται ενέματα δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1m την ημέρα.
- Τελικό επίχρισμα ή διάταξη κοτετσοσύρματος και τελικό επίχρισμα.

12.2.2 Έκχυση ενέματος με το χέρι- Hand Grouting

Στην έκχυση του ενέματος με το χέρι η διαδικασία επιτυγχάνεται με τη μεταφορά ενέματος από ένα κυλινδρικό δοχείο σε ένα πήλινο δοχείο που σχηματίζεται στην επιφάνεια του τοίχου. Κατά την παραδοσιακή τεχνική στερέωσης με το χέρι γίνεται χρήση μικρών πήλινων δοχείων (χελιδονοφωλιές), τα οποία σχηματίζονται στην επιφάνεια της λιθοδομής από πλάσιμο πηλό. Το ένεμα χύνεται μέσα στο πήλινο δοχείο και αφήνεται να διασκορπιστεί σε όλη την έκταση του κενού γύρω από τα οποία έχει σχηματιστεί το δοχείο. Το δοχείο εφοδιάζεται κανονικά με τέτοιο ρυθμό ώστε η στάθμη να διατηρείται σταθερή. Όταν το ένεμα πήξει, το δοχείο και το υπόλειμμα του ενέματος αποσπώνται από τον

τοίχο και η επιφάνεια βουρτσίζεται με ειδικά εργαλεία. Στη συνέχεια ακολουθεί καθάρισμα και γέμισμα των αρμών.

Στη συνηθισμένη μέθοδο της στερέωσης με το χέρι επιβάλλεται πριν από την έκχυση του ενέματος να προηγηθεί ξέπλυμα των ρωγμών ή των μικρών κενών με νερό. Οι πολύ μικρές ρωγμές πληρώνονται χρησιμοποιώντας υποδερμική σύριγγα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται εξαιρετικά αλεσμένη υδραυλική άσβεστος με προσθήκη ιπτάμενης τέφρας (PPA) ή σκόνης πλίνθου. Δίκτυα μικρών κενών, όπως ρωγμές κατά μήκος της επιφάνειας των αρμών διάστρωσης, πληρώνονται με διάτρηση και παρεμβολή αυτοεφρασσόμενων ράβδων έκχυσης ενέματος, που προσαρμόζονται με κατάλληλα υποστηρίγματα. Οι ράβδοι τοποθετούνται στις οπές με πιστόλι. Κατά τις διαδικασίες έκχυσης μέσω σύριγγας ή μέσω ράβδων, το κλασικό ένεμα μπορεί να αντικατασταθεί με εποξική κόλλα. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι το ιξώδες και η ισχύς τέτοιων υλικών τροποποιείται ανάλογα με τις απαιτήσεις όμως, λόγω του υψηλού κόστους, η χρήση τους σε μεγάλα κενά κρίνεται απαγορευτική (βλ. Εικ. 12.6).



Εικ. 12.6: Εισαγωγή ενέματος με το χέρι.

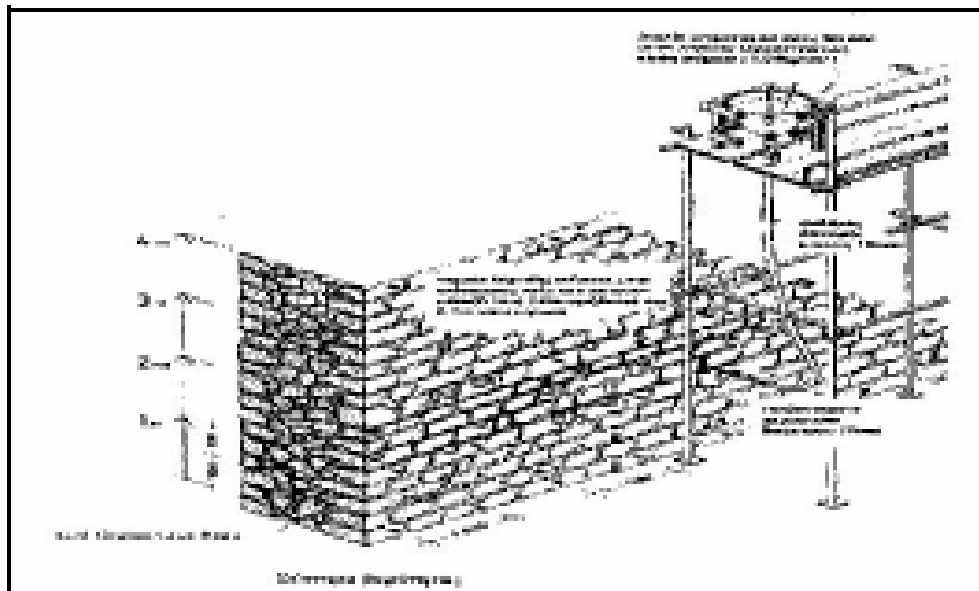
12.2.3 Σύστημα βαρύτητας- Gravity Grouting

Το σύστημα βαρύτητας είναι εξαιρετικά κατάλληλο όπου η λιθοδομή είναι ευπαθής στις υπό πίεση μετακινήσεις και είναι το σύστημα που χρησιμοποιείται συχνότερα στις εργασίες αναστήλωσης μνημείων.

Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται συνήθως για την έκχυση ενέματος σε λιθοδομή με μεγάλα εσωτερικά κενά. Η συσκευή που χρησιμοποιείται,

αποτελείται από ένα γαλβανισμένο σιδερένιο δοχείο με διέξοδο στον πυθμένα του, το οποίο τοποθετείται σε συγκεκριμένο ύψος σε σχέση με την περιοχή έκχυσης και εφοδιάζεται διαδοχικά με συγκεκριμένη ποσότητα ενέματος. Σε ορισμένες περιπτώσεις η συσκευή αποτελείται και από ένα δεύτερο όμοιο δοχείο στο οποίο αναμειγνύονται τα συστατικά του ενέματος ώστε να επιταχύνεται η διαδικασία της έκχυσης. Στη διέξοδο του δοχείου συνδέεται ένας εύκαμπτος γαλβανισμένος σωλήνας, που απολήγει σε ένα γαλβανισμένο σιδερένιο ακροφύσιο, στο οποίο είναι προσαρμοσμένη μια στρόφιγγα. Κάθε δοχείο εφοδιάζεται με ένα ξύλινο βύσμα πάχους τέτοιου ώστε να εφαρμόζει στην οπή του πυθμένα και με ένα έμβολο χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της ροής του ενέματος ώστε να δώσει μια επιπρόσθετη ώθηση σε περίπτωση θυλάκων αέρα (αεροπαγίδες) ή άλλων εμποδίων της ροής στο σωλήνα.

Πριν τη χρήση του συστήματος βαρύτητας γίνεται διάτρηση μικρών οπών στον τοίχο όπου υπάρχουν εξωτερικές ρωγμές ή έχουν προβλεφθεί εσωτερικά κενά. Οι οπές απέχουν μεταξύ τους 1m οριζόντια και 450mm κατακόρυφα σε εναλλασσόμενη διάταξη. Αφού γίνει η διάτρηση των οπών αυτές πρέπει να ξεπλυθούν με καθαρό νερό (βλ. Εικ. 12.7).



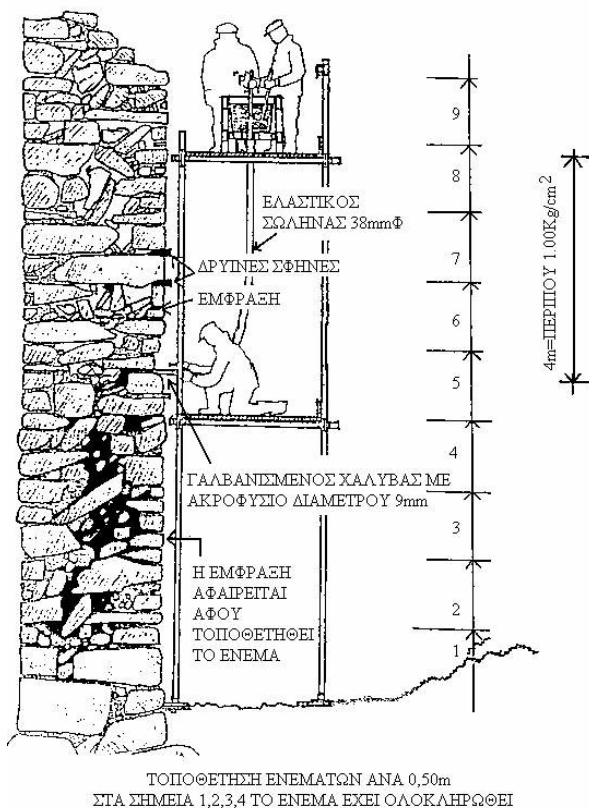
Εικ. 12.7: Σύστημα βαρύτητας.

Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας πρέπει να δοθεί προσοχή στους αρμούς μέσω των οποίων διαφεύγει το νερό. Έτσι λοιπόν πριν ξεκινήσει η διαδικασία έκχυσης ενέματος, οι αρμοί πληρώνονται ερμητικά με στουπί ή πηλό συμπιέζοντας καλά σε βάθος 40mm – 50mm. Στη συνέχεια, το ακροφύσιο του εύκαμπτου σωλήνα παροχής ενέματος (μάνικα) εισάγεται στην οπή όπου και σφηνώνεται κυκλικά με στουπί. Το ακροφύσιο εισάγεται διαδοχικά σε όλες τις οπές του τοίχου ξεκινώντας από τις χαμηλότερες.

Όταν το ένεμα αναμειχθεί στη σωστή συνοχή ροής, το ξύλινο βύσμα απομακρύνεται από τον πυθμένα του δοχείου και το ένεμα ρέει μέσα στο σωλήνα παροχής. Η στρόφιγγα του ακροφυσίου είναι ανοιχτή επιτρέποντας τη ροή τού ενέματος μέσα στον τοίχο μέχρι το επίπεδο του ενέματος να ανέβει αρκετά ώστε να αρχίζει να ξεχειλίζει από την αμέσως ανώτερη σειρά οπών. Στη συνέχεια αυτές οι οπές ταπώνονται, η ροή ενέματος διακόπτεται και η ίδια διαδικασία εφαρμόζεται σε ένα άλλο

τμήμα του τοίχου, ενώ το πρώτο τμήμα αρχίζει να πήζει.

Μετά την πήξη, το στουπί ή ο πηλός μπορεί να αφαιρεθεί από τους αρμούς ώστε σε ένα επόμενο στάδιο να γίνει η επεξεργασία τους. Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου γίνεται σε λωρίδες πάχους 1m. Η απόσταση αυτή πρέπει να λαμβάνεται ως η μέγιστη ανύψωση ώστε να αποφεύγεται η σταδιακή ανάπτυξη πίεσης από υγρό ένεμα πίσω από χαλαρούς επιφανειακούς λίθους (βλ. Εικ. 12.8).

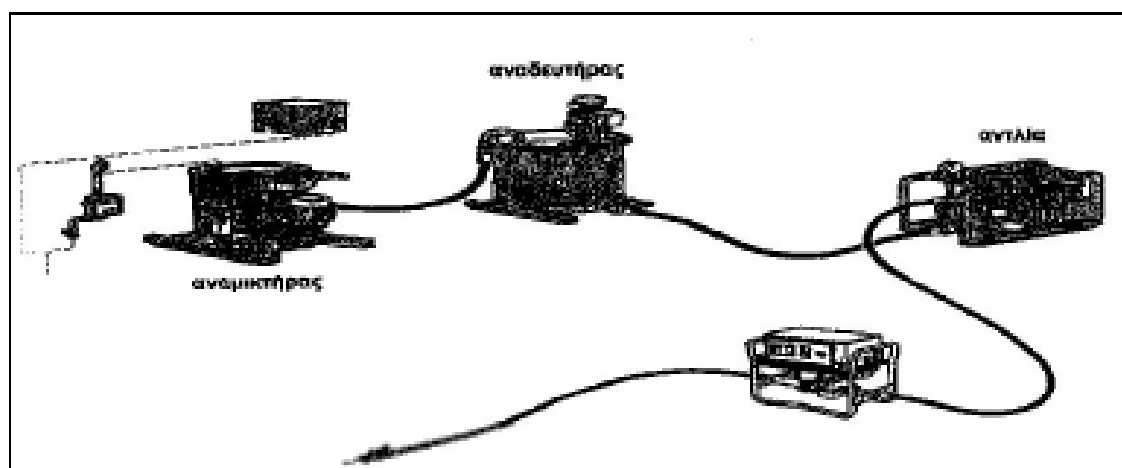


Εικ. 12.8: Σύστημα βαρύτητας.

12.2.4 Συστήματα άντλησης

Τα χειροκίνητα ή μηχανοκίνητα συστήματα αντλιών συνήθως αποτελούνται από έναν αναμικτήρα, έναν αναδευτήρα, μια αντλία, αναρροφητικούς σωλήνες και σωλήνες διανομής οι οποίοι απολήγουν σε μεταλλικά ακροφύσια στα οποία έχουν προσαρμοστεί κάνουλες.

Η προετοιμασία είναι ίδια με αυτή των συστημάτων βαρύτητας. Τα μεταλλικά ακροφύσια του συστήματος προσαρμόζονται στις οπές. Η διαδικασία ξεκινά με τη σύνδεση των σωλήνων διανομής με τα χαμηλότερα ακροφύσια. Το επίπεδο στο οποίο ανεβαίνει το ένεμα μέσα στον τοίχο καταδεικνύεται από το διαποτισμό του ενέματος από τις νωπές οπές οι οποίες μετά την πλήρωσή τους ταπώνονται με πηλό (βλ. Εικ. 12.9).



Εικ. 12.9: Σύστημα άντλησης.

Η μέγιστη πίεση που μπορεί να επιτευχθεί εξαρτάται από το μοντέλο που χρησιμοποιείται. Συνήθως, επιτυγχάνεται πίεση 70KPa - 280KPa. Με τις χειροκίνητες αντλίες επιτυγχάνονται πολύ μικρότερες πιέσεις. Όσο αφορά την απόδοση των δύο τύπων αντλιών, οι χειροκίνητες αντλίες έχουν απόδοση της τάξης των 18-45lt/min, ενώ οι μηχανοκίνητες έχουν απόδοση της τάξης των 1300-1800lt/min.

12.2.5 Αναρροφητικά συστήματα

Τα αναρροφητικά συστήματα είναι χρήσιμα όταν λεπτές σχισμές και μικρής κλίμακας κενά είναι ύποπτα. Η χρήση αυτών συνεπάγεται το

σκέπασμα της περιοχής της λιθοδομής που πρόκειται να ενισχυθεί με ένα αεροστεγές, διάφανο, ελαστικό κάλυμμα, όπως είναι τα φύλλα πολυαιθυλενίου. Μια ισχυρή αναρροφητική αντλία εκκενώνει την καλυμμένη περιοχή από τον αέρα και στη συνέχεια ανοίγεται η στρόφιγγα ενός δοχείου ενέματος, επιτρέποντας έτσι το «ρούφηγμα» του ενέματος από την καλυμμένη περιοχή. Το διάφανο κάλυμμα επιτρέπει την παρακολούθηση της διαδικασίας οπότε όταν αυτή ολοκληρωθεί, η στρόφιγγα κλείνει.

Η εφαρμογή της μεθόδου αυτής στις κατασκευές από λίθο είναι σήμερα πολύ περιορισμένη.

12.3 Έλεγχοι⁽²⁴⁾

Από τους αναφερόμενους στη συνέχεια ελέγχους ο οπτικός έλεγχος και ο έλεγχος χαρακτηριστικών του ενέματος είναι υποχρεωτικοί σε κάθε περίπτωση. Οι έλεγχοι αποτελεσματικότητας της επέμβασης θα διενεργούνται εφ' όσον προβλέπονται στη μελέτη, στην οποία θα καθορίζεται η σχετική διαδικασία, συχνότητα και απαιτήσεις (ΠΕΤΕΠ 14-02-04-00).

12.3.1 Οπτικός έλεγχος

Ο οπτικός έλεγχος συμπεριλαμβάνει τα εξής στάδια:

- Πριν την εκτέλεση της εισπίεσης των ενεμάτων:
πρέπει να γίνεται επιθεώρηση του χώρου εκτέλεσης των εργασιών, έλεγχος των συνθηκών εκτελέσεώς τους, έλεγχος ορθής τοποθέτησης των σωληνίσκων, έλεγχος της διεύρυνσης και πλήρωσης των αρμών τοιχοποιίας.
- Κατά τη διάρκεια της εισπίεσης των ενεμάτων:
ο έλεγχος εφαρμογής των κανόνων έντεχνης εκτέλεσης της εργασίας όπως αυτά περιγράφονται, με στόχο τον έγκαιρο εντοπισμό κακοτεχνιών και τις άμεσες διορθωτικές παρεμβάσεις για την αποκατάσταση των ελαττωμάτων πριν την ολοκλήρωση της εργασίας. Ως τέτοιες πιθανές κακοτεχνίες εδεικτικά αναφέρονται η μη αρίθμηση

των σωληνίσκων, η μη ορθή συμπλήρωση του πρωτοκόλλου, η μη εφαρμογή της ορθής εισπίεσης, η μη ορθή σφράγιση των σωληνίσκων κ.ά.

- Μετά το πέρας της εργασίας εντοπισμός τυχόν εμφανών κακοτεχνιών.

12.3.2 Έλεγχος χαρακτηριστικών του ενέματος

Τα χαρακτηριστικά του ενέματος θα ελέγχονται, σε συνδυασμό με όσα αναφέρονται με όσα πιο πάνω ως εξής:

- Με λήψη 9 πρισματικών δοκιμίων 40x40x160mm ανά ημέρα εισπίεσης. Τα δοκίμια θα συντηρούνται σε υγρό θάλαμο και θα δοκιμάζονται σε κάμψη και στη συνέχεια σε θλίψη σε ηλικίες 7, 14, 28 ημερών,
- Η σταθερότητα του μείγματος, η εξίδρωση, η πυκνότητα και η ρευστότητα θα ελέγχονται με δύο δοκιμές κατ' ελάχιστο κάθε ημέρα εισπίεσης.

12.3.3 Έλεγχος αποτελεσματικότητας της επέμβασης

Μετά το πέρας των εργασιών εισπίεσης των ενεμάτων και την πήξη τους, θα ελέγχεται η αποτελεσματικότητα της επέμβασης ως εξής:

- Με αποκοπή πυρήνων, διαμέτρου $d=10-20\text{cm}$ και μήκους $3xd$, ή ίσου με τα $2/3$ του πάχους της τοιχοποιίας, σε αναλογία 6 δειγματοληψιών ανά 10lt ενέματος.
- Με ενδοσκοπήσεις της τοιχοποιίας, σε τουλάχιστον 20 θέσεις ανά 10lt ενέματος.
- Με εφαρμογή υπερηχητικών μεθόδων σε 40 θέσεις ανά 10lt ενέματος (υπό την προϋπόθεση ότι οι ίδιες περιοχές έχουν ελεγχθεί και πριν την εφαρμογή των ενεμάτων).

12.4 Κριτήρια αποδοχής⁽²⁴⁾

12.4.1 Οπτικός έλεγχος

Η επέμβαση θεωρείται αποδεκτή όταν κατά τον οπτικό έλεγχο δε διαπιστωθούν κακοτεχνίες ή αυτές είναι ελάχιστες και επισκευάσιμες.

12.4.2 Έλεγχος χαρακτηριστικών του ενέματος

Η επέμβαση θεωρείται ότι είναι αποδεκτή όταν κατά τον έλεγχο των χαρακτηριστικών του ενέματος διαπιστωθεί ότι:

- Τα μηχανικά χαρακτηριστικά είναι το 80% κατ' ελάχιστο των αναμενόμενων αποτελεσμάτων με βάση την εργαστηριακή μελέτη σύνθεσης.
- Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά είναι το 95% κατ' ελάχιστο των αναμενόμενων αποτελεσμάτων με βάση την εργαστηριακή μελέτη σύνθεσης.

12.4.3 Έλεγχος αποτελεσματικότητας της επέμβασης των ενεμάτων

Η επέμβαση θεωρείται αποδεκτή όταν διαπιστώνεται ότι:

- Κατά τον έλεγχο με πυρηνοληψία
 - Έχει πληρωθεί το 85% τουλάχιστον του ορατού (στην επιφάνεια του πυρήνα) μήκους ρωγμής
 - Έχουν πληρωθεί με ένεμα το 85% τουλάχιστον των κενών της τοιχοποιίας
- Κατά τον έλεγχο με ενδοσκόπιο:
 - Τα κενά που παρατηρούνται στην επιφάνεια της τοιχοποιίας δεν επεκτείνονται πέραν του 10% στον εσωτερικό ιστό της τοιχοποιίας
- Κατά τον έλεγχο με υπερήχους:
 - Η ταχύτητα των υπερήχων είναι μεγαλύτερη από αυτή που είχε μετρηθεί στην ίδια θέση πριν την επέμβαση.

12.4.4 Επανεέλεγχος – Διορθωτικά μέσα

Αν από τα αποτελέσματα των ελέγχων προκύπτει ότι δεν ικανοποιούνται οι απαιτήσεις σχεδιασμού, ο μελετητής θα αξιολογεί τις μετρήσεις και θα κρίνει αν απαιτείται επανεέλεγχος ή λήψη διορθωτικών μέτρων ή/και συμπληρωματικές επεμβάσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 13 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΦΕΡΟΥΣΑ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΕΝΕΜΑΤΩΝ

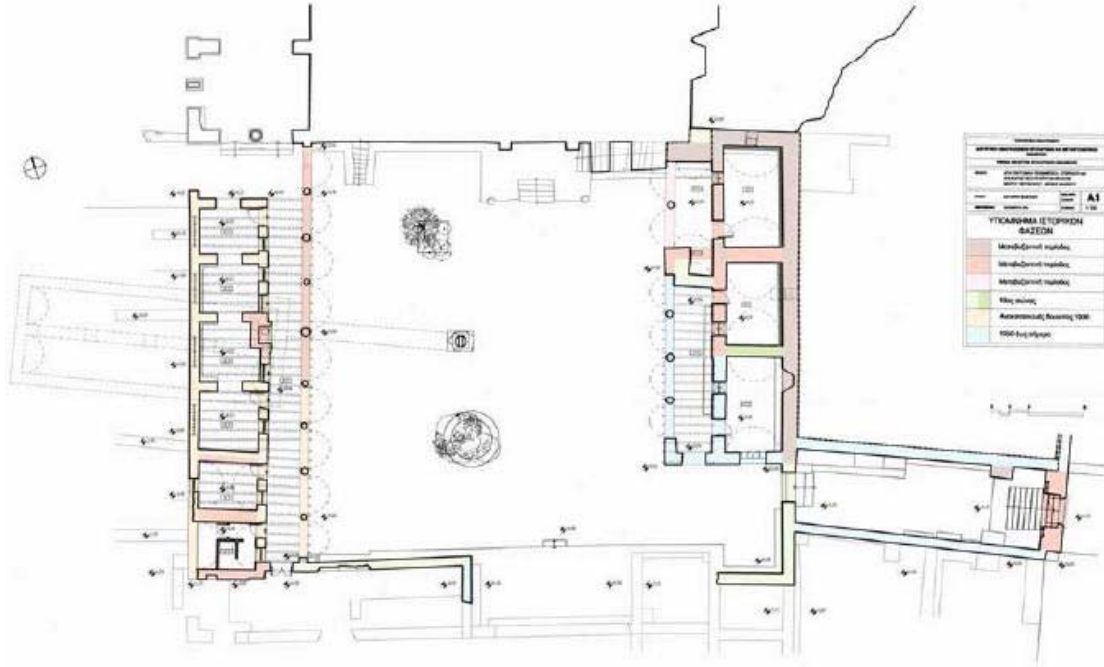
13.1 Ενέματα αποκατάστασης των πτερύγων κελιών του εσωτερικού περιβόλου της Ι. Μ. Δαφνίου (Καλαγρή Α., Μιλτιάδου-Fezans Α., Βιντζηλαίου Ε.)⁽¹⁵⁾

Ο εσωτερικός περίβολος της μονής αποτελείται σήμερα από δύο πτέρυγες κελιών, που διατάσσονται εκατέρωθεν της εσωτερικής αυλής. Η ανατολική πτέρυγα είναι διώροφο κτίσμα με θολωτούς χώρους στο ισόγειο και τοξωτή στοά προς την αυλή και ξυλόστεγους χώρους στον όροφο. Η δυτική πτέρυγα είναι ισόγεια και αποτελείται από δύο θολωτούς ισομεγέθεις χώρους, επιμήκη ξυλόστεγη αίθουσα και ξυλόστεγη τοξωτή στοά προς την αυλή.

Στη δυτική πτέρυγα, πέραν των δύο διατηρούμενων κυλινδρικών θόλων από την μεταβυζαντινή πτέρυγα κελιών, αποκαλύφθηκαν σπαράγματα μόνο από τις προ του 19^{ου} αι. οικοδομικές φάσεις και για το λόγο αυτό εφαρμόστηκε η ήδη εγκεκριμένη ανοικοδόμηση της ισόγειας αίθουσας. Στο ισόγειο της ανατολικής πτέρυγας αποκαλύφθηκαν σημαντικά στοιχεία για την αρχική και τις επόμενες οικοδομικές φάσεις που ελήφθησαν υπ' όψιν για την επιλογή του κονιάματος δομής και αρμολόγησης.

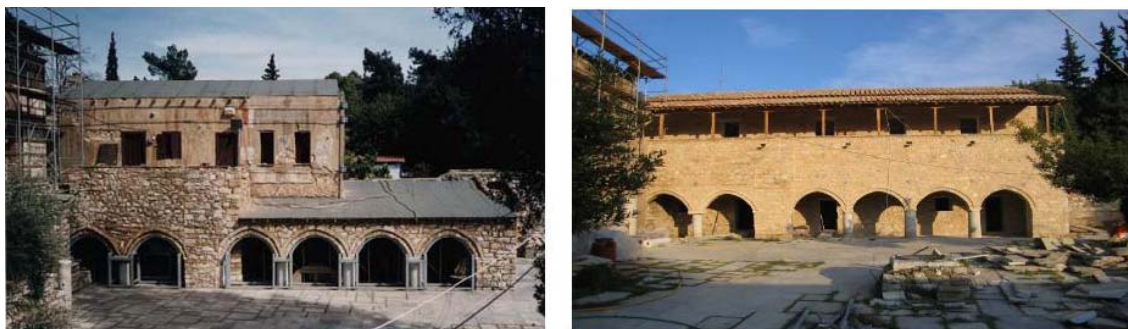
Οι έρευνες που πραγματοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της μελέτης στερέωσης και αποκατάστασης του εσωτερικού περιβόλου αλλά και κατά τη διάρκεια του έργου, συνέβαλαν στην ανάδειξη των παλαιότερων οικοδομικών φάσεων και στη σύνδεση τους με τα ανοικοδομούμενα τμήματα. Η παλιότερη οικοδομική φάση εντοπίζεται κυρίως στον ανατολικό και στον βόρειο τοίχο της ανατολικής πτέρυγας και διατηρεί μεγάλο ποσοστό των αρχικών κονιαμάτων. Η δεύτερη οικοδομική φάση της ανατολικής πτέρυγας είναι κτισμένο με ερυθρωπό κονίαμα. Η τρίτη

οικοδομική φάση είναι μεταβυζαντινή της όψιμης τουρκοκρατίας με υπόλευκο κονίαμα, μυστρίσματα και επανειλημμένα ασπρίσματα.



Εικ. 13.1: Κάτοψη του εσωτερικού περιβόλου και οικοδομικές φάσεις των περύγων του εσωτερικού περιβόλου της μονής. Η πρώτη και δεύτερη οικοδομική φάση (μεσοβυζαντινή και μεσοβυζαντινής ή πρώιμης τουρκοκρατίας) εμφανίζεται με το ίδιο χρώμα.

Για τις ανακτίσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο των πρόσφατων εργασιών στερέωσης και αποκατάστασης του μνημείου, ήταν αναγκαίο να προσδιοριστούν κονιάματα αρμολόγησης και δόμησης, καθώς και υδραυλικά ενέματα πλήρωσης των ρωγμών και κενών των τοιχοποιιών του μνημείου. Τα κονιάματα και τα ενέματα αυτά σχεδιάστηκαν από τη ΔΙΤΕΑ και εφαρμόστηκαν στο μνημείο από τη ΔΑΒΜΜ. Οι συνθέσεις και τα βασικά χαρακτηριστικά αυτών που τελικά επιλέγησαν παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικ. 13.2: Ανατολική πτέρυγα πριν και μετά τις εργασίες στερέωσης-αποκατάστασης.



Εικ. 13.3: Δυτική πτέρυγα πριν και μετά τις εργασίες στερέωσης-αποκατάστασης.

Στόχοι και αρχές της επέμβασης

Ενέματα αποκατάστασης

Οι στερεωτικές εργασίες στις πτέρυγες, λόγω του μεγάλου βαθμού βλάβης, περιλάμβαναν πέραν των εις βάθος επιφανειακών αρμολογημάτων και την εφαρμογή υδραυλικών ενεμάτων ομογενοποίησης, στο σύνολο των λιθοδομών των θολωτών χώρων και των τοξοστοιχιών συμπεριλαμβανομένων των θεμελίων, προκειμένου να αποκατασταθεί και να ενισχυθεί η αρχική συνοχή και αντοχή τους.

Τα κριτήρια σχεδιασμού της μελέτης επιβάλλουν τα ενέματα να είναι:

- Αιωρήματα επαρκώς ρευστά, αλλά και σταθερά καθ' όλη τη διαδικασία της εισόδου τους στο εσωτερικό των λιθοδομών και μέχρι την έναρξη της πήξης.

- Να διεισδύουν με ευκολία υπό χαμηλή πίεση 0.5-1.0Atm και σε λεπτές ρωγμές (εύρους 0.2-0.4mm), πράγμα που έχει κριθεί αναγκαίο προκειμένου να προσεγγισθούν, δια μέσου του αποσαθρωμένου κονιάματος δομής και πληρωθούν κατά το μέγιστο δυνατόν τα κενά και οι ρωγμές του εσωτερικού των λιθοδομών.
- Να έχουν ικανοποιητικό χρόνο έναρξης της πήξεως.
- Με την στερεοποίησή τους να προσδίδουν στο αρχικό κονίαμα και στο υλικό πλήρωσεως της λιθοδομής βελτιωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά καθώς και καλύτερα χαρακτηριστικά συνάφειας των υλικών αυτών με τους λίθους.
- Να έχουν διάρκεια στο χρόνο και φυσικοχημικές ιδιότητες συμβατές με τα υλικά επί τόπου (χημική σύνθεση, πορώδες, συντελεστή θερμικής διαστολής, μεταβολή όγκου κ.ά.).

Η ικανοποίηση των ανωτέρων ιδιοτήτων αποτέλεσε τη βάση για το σχεδιασμό υδραυλικών ενεμάτων με συνδυασμό λευκού τσιμέντου, λεπτόκκοκης φυσικής ποζολάνης και υδρασβέστου σε μορφή σκόνης, μικρής ποσότητας ρευστοποιητή και ικανή ποσότητα νερού ώστε να ικανοποιούνται τα κριτήρια ενεσιμότητας. Το ποσοστό του τσιμέντου επιλέχθηκε να είναι 30% κ.β. προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος σχεδιασμού όσον αφορά την αντοχή του ενέματος που ετέθει 7-10MPa στους 3 μήνες σκλήρυνσης. Σύμφωνα με τις σχέσεις που προτείνονται για τον υπολογισμό των αντοχών των τοιχοποιιών πριν και μετά τα ενέματα, η θλιπτική αντοχή της υπάρχουσας τοιχοποιίας εκτιμήθηκε 0.6MPa, ενώ σύμφωνα πάντα με την ίδια θεωρητική προσέγγιση, η εφαρμογή ενός ενέματος με θλιπτική αντοχή της τάξεως 7-10MPa στους 3 μήνες σκλήρυνσης μπορεί να εξασφαλίσει ενίσχυση των λιθοδομών τουλάχιστον κατά 80%

Πρώτες ύλες

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διερεύνηση για τον σχεδιασμό των ενεμάτων ήταν λευκό τσιμέντο τύπου CEMII/42.5N, ικανοποιητικής κοκκομετρίας, με χαμηλά αλκάλια και C₃A, λεπτόκκοκη

ποζολάνη με μέγιστο κόκκο πρακτικά μικρότερο από 0.075mm (συγκρατούμενο 0.66%) και συγκρατούμενο σε κόσκινο διαμέτρου οπής 0.045mm < 10% (συγκρατούμενο 8.43%) και δύο υδρασβέστοι του εμπορίου με διαφορετικές κοκκομετρίες. Η υδράσβεστος Α είχε συγκρατούμενο στα 90μm 3.4% και στα 200μm 0%, ενώ η υδράσβεστος Β είχε συγκρατούμενο στα 200μm 0.5%.

Πειραματική διερεύνηση

Προκειμένου να προσδιορισθούν οι βέλτιστες συνθέσεις ενεμάτων παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο της ΔΙΤΕΑ σειρές συνθέσεων ενεμάτων με 30% λευκό τσιμέντο και λόγους υδρασβέστου-ποζολάνης 1-1.8, 1-2.5, με χρήση των δύο διαφορετικών υδρασβέστων (Α και Β).

Τα ενέματα ελέγχθηκαν ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους και τις μηχανικές αντοχές τους. Συγκεκριμένα για τις δύο υδρασβέστους και λόγο υδρασβέστου-ποζολάνης 1/1.8, 1/2.5, εξετάστηκαν μείγματα με ποσοστά νερού 67%, 70%, 72.5% και 75% και ποσοστό ρευστοποιητικού πρόσθετου 1% επί της στερεάς φάσης του ενέματος.

Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι τα χαρακτηριστικά ενεσιμότητας των ενεμάτων με υδράσβεστο Α είναι από κάθε άποψη καλύτερα από εκείνα με την υδράσβεστο Β, λόγω του ότι η υδράσβεστος Α χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια και μικρότερο ποσοστό μεγάλων κόκκων. Επιπλέον, τα ενέματα με λόγο υδρασβέστου-ποζολάνης 1/1.8 παρουσιάζουν συγκριτικά καλύτερα αποτελέσματα από απόψεως ενεσιμότητας. Ως βέλτιστη σύνθεση επιλέχθηκε η I_{72.5} (Πιν. 13.1), καθώς με το ελάχιστο δυνατό νερό (72.5%) πληρούσε ταυτόχρονα όλα τα κριτήρια ενεσιμότητας. Η σύνθεση αυτή δοκιμάστηκε στη συνέχεια στο εργοτάξιο και εφαρμόστηκε για την στερέωση των τοιχοποιιών του μνημείου.

ΠΙΝΑΚΑΣ 13.1: Χαρακτηριστικά ενεσιμότητας των συνθέσεων ενεμάτων με λόγο υδρασβέστου-ποζολάνης 1/1.8 και 1/2.5 με χρήση των δύο υδρασβέστων και για λόγο νερού προς στερεά 0.725.

Σύνθεση ενέματος	%κ.β.			
	I _{72.5}	II _{72.5}	III _{72.5}	IV _{72.5}
Λευκό τσιμέντο	30%	30%	30%	30%
Υδράσβεστος Α	25%	20%		
Υδράσβεστος Β			25%	20%
Ποζολάνη	45%	50%	45%	50%
Υπερρυστοποιητής	1%	1%	1%	1%
Νερό	72.5%	72.5%	72.5%	72.5%
Χρόνος διέλευσης από τον κόνο Marsh 4.7mm, 500ml ενέματος – t _{d=4.7mm} (sec)	25	27	23	24
Χρόνος διέλευσης από τον κόνο Marsh 2mm, 500ml ενέματος – t _{d=2mm} (sec)	116	136	99	108
f _i (x10 ³ mm/sec)	1.7290	1.3263	1.7122	1.4469
Χρόνος διέλευσης από στήλη άμμου 1.25-2.50mm – T ₃₆ (sec) (αντιστοιχεί σε W _{nom} =205 μm)	43	94	∞	∞
Εξίδρωση	3%	5%	7%	10%

Δεδομένου ότι, πριν την εφαρμογή του ενέματος υψηλής διεισδυτικότητας στην ανωδομή των πτερύγων, ήταν αναγκαία η στερέωση των θεμελίων με παχύρρευστο ένεμα ικανό να λειτουργήσει σαν φραγμός, ώστε να αποφευχθούν διαρροές και τυχόν αλλοιώσεις των υποκείμενων παλαιότερων οικοδομικών φάσεων του μνημείου, σχεδιάστηκε επίσης μία σύνθεση ενέματος που περιείχε χαλαζιακή άμμο κατάλληλης κοκκομετρίας (<0.5mm). Το ένεμα με άμμο εφαρμόστηκε στα θεμέλια και μετά την πάροδο λίγων ημερών, συνεχίστηκε η κανονική προς τα πάνω διαδικασία εφαρμογής του λεπτόρρευστου ενέματος υψηλής διεισδυτικότητας.

ΠΙΝΑΚΑΣ 13.2: Χαρακτηριστικά ενεσιμότητας και μηχανικές αντοχές 7 ημερών του ενέματος-φραγμού για την στερέωση των θεμελίων.

Σύνθεση ενέματος με άμμο (%κ.β)	Λευκό τσιμέντο	Υδράσβεστος Β	Ποζολάνη	Άμμος (< 0.5mm)	Ρευστ.	Νερό
A ₇₀	32%	20%	28%	20%	1%	70%
Αντοχή 7 ημερών (MPa)					t _{d=4.7mm}	t _{d=2mm}
Κάμψη (f _i)	Θλίψη (f _c)	f _i (x10 ³ mm/sec)	Εξίδρωση	d* (gr/cm ³)	(sec)	(sec)
1.79	3.52	0.6771	1%	1.6250	43	∞

* d: φαινόμενη πυκνότητα ρευστού ενέματος

Επί τόπου έλεγχος κατά την εφαρμογή των ενεμάτων

Πέρα από τις αρχικές δοκιμές πριν την έναρξη της εφαρμογής των ενεμάτων, στο εργοτάξιο χρησιμοποιούνταν σε τακτά χρονικά διαστήματα μετρήσεις της ρευστότητας και της σταθερότητας των ενεμάτων και λαμβάνονταν πρισματικά δοκίμια (4x4x16cm) για την παρακολούθηση της εξέλιξης των αντοχών τους στο χρόνο. Όλα τα δοκίμια που ελήφθησαν στο εργοτάξιο συντηρήθηκαν επί τόπου τις πρώτες ημέρες σε δροσερό περιβάλλον μέσα σε κλειστά πλαστικά δοχεία στα οποία είχε τοποθετηθεί βαμβάκι εμποτισμένο με νερό μέχρι να είναι σε θέση να μεταφερθούν με ασφάλεια στον υγρό θάλαμο (20°C, 90%RH).

Ορισμένα από τα αποτελέσματα των ελέγχων των επί τόπου αναμειγμάτων παρουσιάζονται ενδεικτικά στους παρακάτω πίνακες (5, 6).

ΠΙΝΑΚΑΣ 13.3: Αποτελέσματα μηχανικών αντοχών σε διάφορες ηλικίες ως μέσος όρος των διαφόρων δειγματοληπτικών ελέγχων που πραγματοποιήθηκαν στο εργοτάξιο.

Σύνθεση ενέματος (%κ.β)	Λευκό τσιμέντο	Υδράσβεστος Α	Ποζολάνη	Ρευστ.	Νερό					
I _{72.5}	30%	25%	45%	1%	72.5%					
Αντοχή (MPa)	7 ημερών		28 ημερών		3 μηνών		6 μηνών		12 μηνών	
	f_i	f_c	f_i	f_c	f_i	f_c	f_i	f_c	f_i	f_c
	1.11	1.74	1.72	3.78	1.84	8.47	2.81	12.12	3.07	15.03

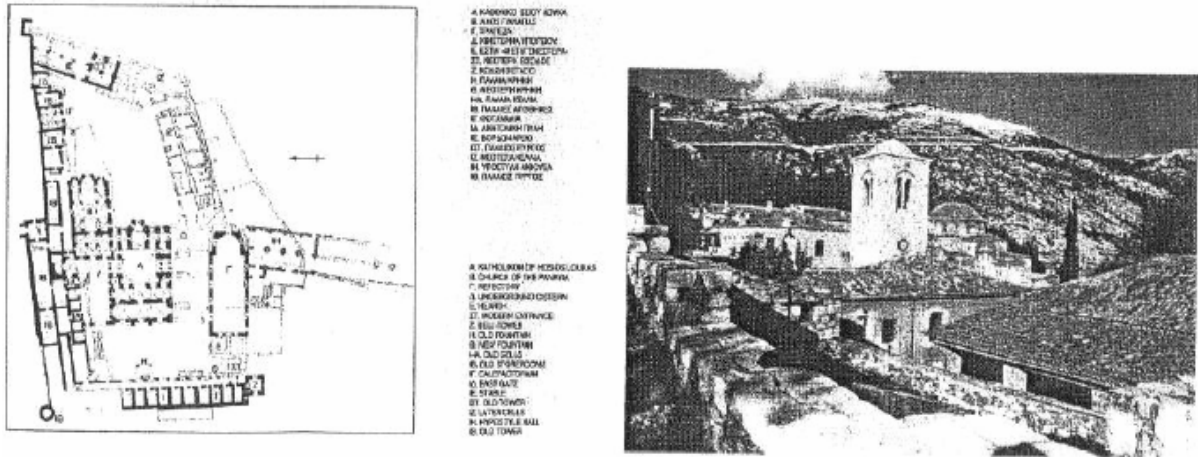
ΠΙΝΑΚΑΣ 13.4: Αποτελέσματα επί τόπου μετρήσεων των χαρακτηριστικών ενεσιμότητας του ενέματος που εφαρμόστηκε στην ανωδομή των περύγων.

Σύνθεση ενέματος (%κ.β)	Λευκό τσιμέντο	Υδράσβεστος Α	Ποζολάνη	Ρευστ.	Νερό	
I _{72.5}	30%	25%	45%	1%	72.5%	
		1 ^{ος} έλεγχος	2 ^{ος} έλεγχος	3 ^{ος} έλεγχος	4 ^{ος} έλεγχος	5 ^{ος} έλεγχος
Χρόνος διέλευσης από τον κώνο Marsh 4.7mm, 500ml ενέματος – $t_{d=4.7mm}$ (sec)		23.30	21.90	25.39	23.00	26.80
Χρόνος διέλευσης από τον κώνο Marsh 2mm, 500ml ενέματος – $t_{d=2mm}$ (sec)		94.38	84.60	101.54	89.60	90.30
f_i ($\times 10^3$ mm/sec)		1.9003	2.1997	1.6895	2.2736	1.5000
Εξίδρωση		3%	3.47%	1.5%	3.2%	3.1%
Φαινόμενη πυκνότητα (gr/cm ³)		1.4434	1.4031	1.4660	1.4140	1.4340

Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του συνόλου των επί τόπου ελέγχων του ρευστού ενέματος στην ανωδομή, διαπιστώθηκε ότι τα χαρακτηριστικά ενεσιμότητας παρουσίαζαν μία αναμενόμενη διασπορά, λόγω εργοταξιακών αλλά και των καιρικών συνθηκών, όμως σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις τα χαρακτηριστικά αυτά ικανοποιούσαν τα προαναφερθέντα κριτήρια. Στις ελάχιστες περιπτώσεις που παρατηρήθηκε απόκλιση, οι έλεγχοι αυτοί συνέβαλαν στην άμεση λήψη διορθωτικών μέτρων όπως άμεση αντικατάσταση παρτίδας τσιμέντου. Όσον αφορά στην εξέλιξη των αντοχών σε κάμψη και θλίψη του στερεοποιημένου ενέματος, τα αποτελέσματα των δοκιμών ήταν επίσης ικανοποιητικά, όπως προκύπτει από τον παραπάνω πίνακα (5), στον οποίο παρουσιάζεται ο μέσος όρος των αντοχών των αναμειγμάτων σε κάμψη και σε θλίψη. Η αντοχή του ενέματος σε θλίψη και σε κάμψη στους 3 μήνες προσδιορίστηκε σε 8.5MPa και 1.8MPa περίπου, εκπληρώνοντας τον στόχο που αρχικά είχε τεθεί, ενώ μετά την πάροδο ενός έτους οι αντοχές αυτές προσδιορίστηκαν στα 15MPa και 3.00MPa αντίστοιχα. Οι τιμές των αντοχών αυτών κρίνονται πολύ ικανοποιητικές συγκρινόμενες με τις αντοχές παρομοίων συνθέσεων ενεμάτων.

13.2 Στερέωση και αποκατάσταση της ΒΑ πτέρυγας των κελιών της Ι.Μ. Οσίου Λουκά Βοιωτίας⁽²⁶⁾

Η Ιερά Μονή του Οσίου Λουκά είναι ένα μοναστηριακό συγκρότημα σε χρήση, χτισμένο σε διάφορες εποχές, από το 10ο έως τον 20ο αιώνα.



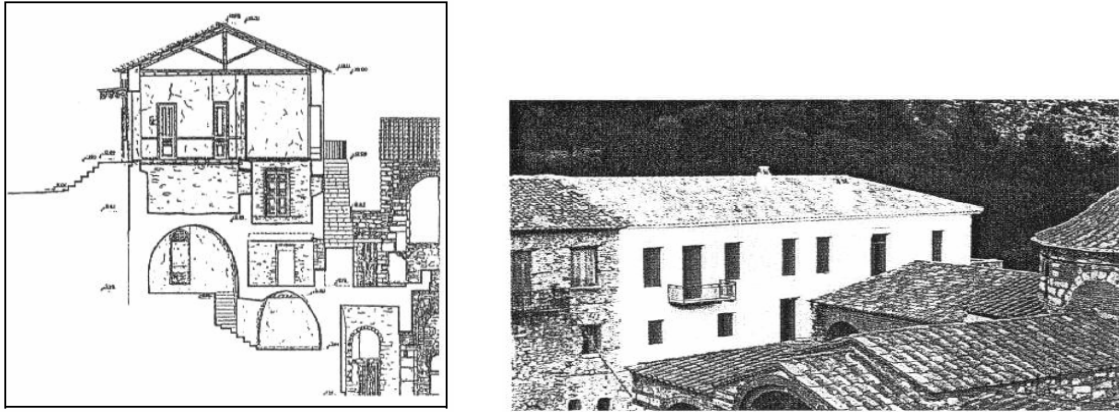
Εικ. 13.4: Αριστερά: Τοπογραφικό διάγραμμα της μονής.

Δεξιά: Αποψη της μονής ΝΔ.

Περιγραφή κτιρίου

Το ανατολικό τμήμα της πενταώροφης βόρειας πτέρυγας κελιών είναι κτισμένο επί επικλινούς βραχώδους εδάφους και αποτελείται από τον ανώτερο δ' όροφο με εξωτερική τοιχοποιία από λιθοδομή και εσωτερικούς τοίχους και οροφές από μπαγδατί, το γ' όροφο και τους υποκείμενους τρεις ορόφους.

Το ισόγειο, ο πρώτος και ο δεύτερος όροφος αποτελούνται από χώρους οι οποίοι είναι χτισμένοι με μικτή αργολιθοδομή αποτελούμενη από αργούς λίθους, μεγάλο ποσοστό συμπαγών οπτοπλίνθων και ασβεστοκονιάματα χαμηλής αντοχής. Στον τρίτο και τέταρτο όροφο το ποσοστό των συμπαγών οπτοπλίνθων μειώνεται σημαντικά ενώ τα κονιάματα δόμησης ομοιάζουν και μόνο σε τμήμα του δυτικού τοίχου του τέταρτου ορόφου χρησιμοποιείται πηλοκονίαμα.



Εικ. 13.5: Αριστερά: Εγκάρσια τομή της ΒΑ πτέρυγας. Δεξιά: Άποψη της ΒΑ πτέρυγας από ΝΔ, μετά την αποπεράτωση των εργασιών στερέωσης και αποκατάστασης.

Μεταξύ τρίτου και τέταρτου ορόφου υπάρχει ξύλινο πάτωμα που στηρίζεται στους περιμετρικούς και ενδιάμεσους τοίχους από λιθοδομή και σε ορισμένες θέσεις σε ξυλόπηκτους τοίχους. Στον τρίτο όροφο μόνο η βορειοδυτική αίθουσα σκεπάζεται με λιθόδητο θόλο. Στον τέταρτο όροφο επεκτείνονται μόνο οι τέσσερις εξωτερικοί τοίχοι του κτιρίου ενώ οι ενδιάμεσοι υποκείμενοι φέροντες τοίχοι από λιθοδομή σταματούν στο ύψος της οροφής του τρίτου ορόφου.



Εικ. 13.6: Άποψη της ΒΑ πτέρυγας από βορρά, μετά την αφαίρεση των επιχρισμάτων, όπου φαίνεται ο τρόπος δόμησης των τοιχοποιιών του 3^{ου} και 4^{ου} ορόφου και η κατάσταση διατήρησης του μνημείου.

Περιγραφή – Αιτίες βλαβών

Το κτίριο παρουσίαζε πλήθος δομικών βλαβών τόσο στις κατακόρυφες τοιχοποιίες όσο και στο ξύλινο πάτωμα και τη στέγη του τέταρτου ορόφου. Παρατηρήθηκαν τοπικές καταρρεύσεις, πλήθος ρωγμών διαμπερών και μη, αποδιοργάνωση μεγάλων τμημάτων λιθοδομών, αποσάθρωση κονιαμάτων και λιθοσωμάτων, ανυπαρξία σύνδεσης των φερουσών δοκών των πατωμάτων και των ζευκτών της στέγης με τους εξωτερικούς τοίχους. Στους χαμηλότερους ορόφους οι βλάβες ήταν παρόμοιες, μικρότερης όμως έκτασης και σοβαρότητας καθώς είναι κτισμένοι από λιθοδομές μεγαλύτερου πάχους με μικρά και λίγα ανοίγματα.

Η συσσώρευση βλαβών και παραμορφώσεων στον τρίτο και τέταρτο όροφο, που εξέχουν του βραχώδους σχηματισμού, εξηγείται από το γεγονός ότι πρόκειται για ένα επιμήκες ορθογωνικό κτίσμα χωρίς ενδιάμεσους φέροντες τοίχους και είναι αναμενόμενο να παρουσιάζει μια ιδιαίτερη ευαισθησία σε οριζόντιες καταπονήσεις, με διεύθυνση εγκάρσια στις κατά μήκος πλευρές του. Επιπλέον, οι μικρού πάχους φέρουσες τοιχοποιίες του είχαν πολλά ανοίγματα και ήταν αποδιοργανωμένες λόγω των αλλεπάλληλων μετατροπών, ενώ τα ευτελούς κατασκευής ξύλινα πατώματα και στέγη δεν ήταν ικανά να δέσουν το κτίριο και να λειτουργήσουν σαν οριζόντια διαφράγματα.

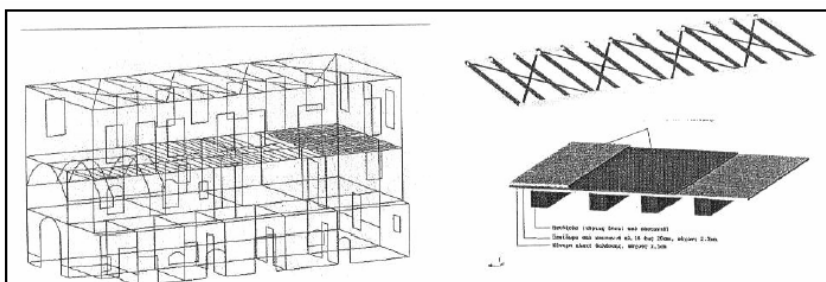
Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι η κατάσταση διατήρησης του συνόλου του κτιρίου ήταν γενικά κακή και σ' αυτό συνετέλεσε σε σημαντικό βαθμό η παντελής έλλειψη συντήρησης, λόγω της χρόνιας εγκατάλειψης και η διαβρωτική δράση της υγρασίας, που οδήγησαν στην επιδείνωση των βλαβών του, αλλά και στη φθορά των επιχρισμάτων, πατωμάτων, κουφωμάτων και λοιπών στοιχείων του.

Στόχοι και αρχές της επέμβασης

Η επέμβαση αποσκοπούσε αφ' ενός στη συντήρηση, στερέωση και επισκευή του φέροντα οργανισμού του μνημείου, αφ' ετέρου στη μορφολογική του αποκατάσταση στο βαθμό που τεκμηριώνεται επαρκώς

και προσαρμόζεται στη σημερινή του χρήση και μορφή, όπως αυτή προέκυψε κατά τη μακράιωνη ιστορική εξέλιξη της βόρειας πτέρυγας της Μονής.

Η συστηματική παρατήρηση και καταγραφή των βλαβών του κτιρίου μαζί με τις αναλύσεις της μηχανικής συμπεριφοράς του σε κατακόρυφα και σεισμικά φορτία οδήγησαν στην επεξήγηση των αιτιών που τις προκάλεσαν και στον εντοπισμό των «αδύνατων» σημείων της κατασκευής και καθοδήγησαν τη διαμόρφωση των προτάσεων για τη στερέωση του γ' και δ' ορόφου.



Εικ. 13.7: Συστηματική παρουσίαση του σκεπτικού των επεμβάσεων στο πάτωμα και τη στέγη του κτιρίου.

Το σκεπτικό των επεμβάσεων επισκευής του φέροντος οργανισμού του μνημείου συνοψίζεται στα εξής:

- Επισκευή των αποσθρωμένων και ρηγματομένων τοιχοποιιών για την αποκατάσταση και ενίσχυση της αρχικής συνοχής και αντοχής του.
- Ανακατασκευή του πατώματος του τέταρτου ορόφου έτσι ώστε να φέρει με ασφάλεια τα φορτία του κτιρίου και να έχει μια κατά το δυνατόν βελτιωμένη διαφραγματική λειτουργία.
- Ανακατασκευή του πατώματος του τέταρτου ορόφου διατηρώντας την ίδια με την υπάρχουσα μορφή, βελτώνοντας όμως και πάλι τη διαφραγματική λειτουργία της.

Τέλος, στους τρεις κατώτερους ορόφους του κτιρίου η επέμβαση περιορίστηκε:

- Στην πραγματοποίηση ερευνητικών εργασιών, με συνολική καθαίρεση των νεωτερικών δαπέδων από σκυρόδεμα και επιχρισμάτων από τσιμεντοκονία της μεγάλης και μικρής κρύπτης και παράλληλη

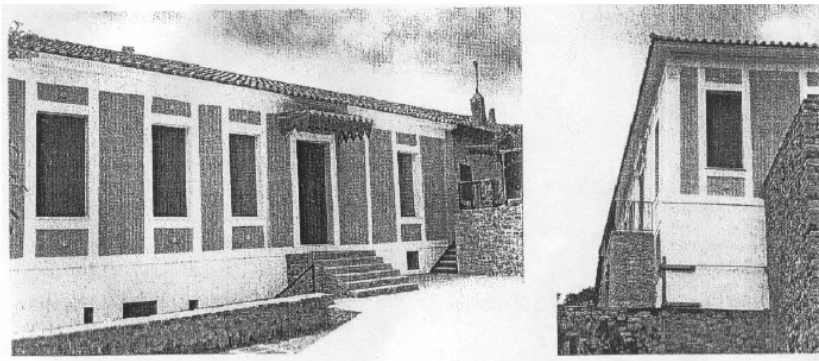
διατήρηση, κατά το δυνατό, των παλαιών αρμολογημάτων που διασώζονταν.

- Στην τοπική ενίσχυση της τοιχοποιίας με τη βοήθεια αρμολογημάτων και υδραυλικών ενεμάτων κατάλληλης σύνθεσης.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στις εργασίες στερέωσης του φέροντα οργανισμού του μνημείου (λιθοσώματα, κονιάματα, ενέματα κ.ά.) σχεδιάστηκαν ή επιλέχτηκαν έτσι ώστε να είναι συμβατά με εκείνα των επί τόπου υλικών ως προς την τελική τους απόχρωση όσο και ως προς τα φυσικομηχανικά και χημικά χαρακτηριστικά τους και ταυτόχρονα μεγάλης διάρκειας στο χρόνο.

Η επισκευή και ενίσχυση των αποσαθρωμένων και ρηγματωμένων φερουσών λιθοδομών του κτιρίου πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια μιας σειράς εργασιών που εξασφάλισαν εκ νέου τη συνέχεια, συνοχή και αντοχή τους. Οι εργασίες αυτές ήταν συνοπτικά: βαθύ αρμολόγημα της εξωτερικής και εσωτερικής παρειάς των τοίχων με χρήση ασβεστοτσιμεντοκονιάματος κατάλληλης σύνθεσης, τοπικές ανακτήσεις, τοποθέτηση διατμητικών συνδέσμων από κατάλληλους λίθους ή τσιμεντοκονία σταθερού όγκου όπου αυτό δεν ήταν εφικτό, και πραγματοποίηση υδραυλικών ενεμάτων κατάλληλης διεισδυτικότητας.

Με την έναρξη του έργου και μετά την ολοκλήρωση των ελέγχων των υπάρχοντων παλαιών κονιαμάτων πραγματοποιήθηκαν δείγματα κονιαμάτων και ενεμάτων στο εργοτάξιο, προκειμένου να καθοριστούν οι συνθέσεις που εφαρμόστηκαν τελικά στο έργο.



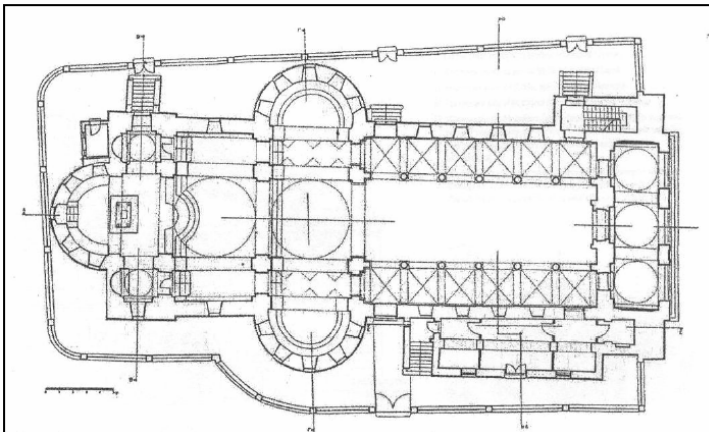
Εικ. 13.8: Άποψη του μνημείου μετά την αποκατάσταση από Β και Α αντίστοιχα.

13.3 Στερέωση και αποκατάσταση του Ι.Ν. της Αγίας Ειρήνης στην Αθήνα⁽²⁷⁾

Ο Ιερός Ναός της Αγίας Ειρήνης βρίσκεται στο ιστορικό κέντρο της Αθήνας και η οικοδόμηση και διακόσμησή του διήρκησε από το 1846 έως το 1892.

Περιγραφή κτιρίου

Ο ναός μορφολογικά ακολουθεί το νεοκλασικό ρυθμό, ενώ τυπολογικά αποτελεί μια ενδιαφέρουσα εκδοχή τρίκλιτης τρουλλαίας βασιλικής, με εγκάρσιο κλίτος και προστώο πλαισιωμένο από δύο πύργους κωδωναστασίων. Το δυτικό μισό του ναού είναι ξυλόστεγο, με ζωγραφισμένη φατνωματική οροφή, ενώ το ανατολικό μισό είναι θολοσκέπαστο και τριμερές. Ο γυναικωνίτης εκτείνεται μόνο επάνω από το προστώο και τα πλάγια κλίτη του ξυλόστεγου μέρους του ναού και στηρίζεται σε τοξοστοιχίες με μαρμάρινους δωρικούς κίονες.

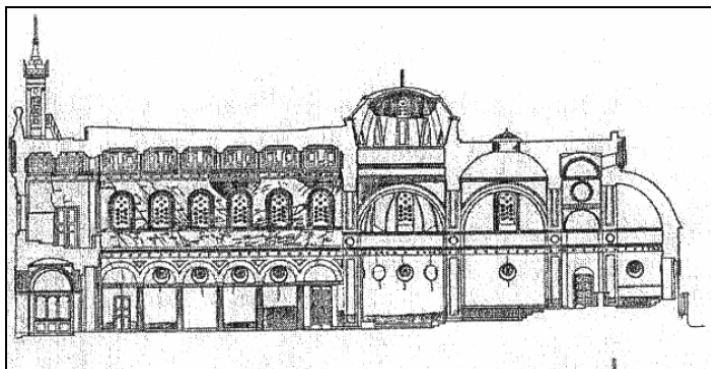


Εικ. 13.9: Κάτοψη του ναού.

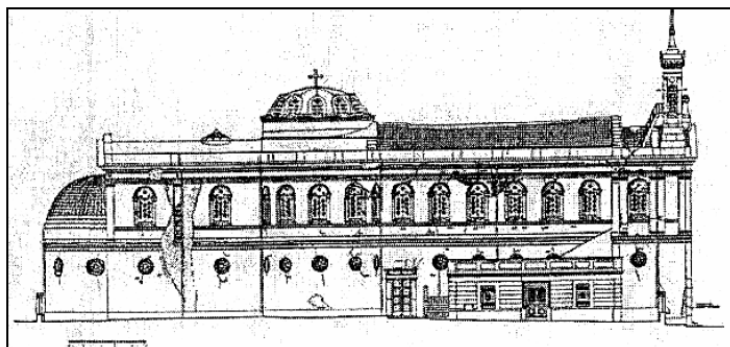
Περιγραφή – Αιτίες βλαβών

Ο Ιερός Ναός της Αγίας Ειρήνης παρουσίαζε ήδη από παλαιότερα βλάβες και παραμορφώσεις στη στέγη και τις τοιχοποιίες του δυτικού τμήματός του, που επιδεινώθηκαν με το σεισμό του 1981. Σύμφωνα με τη μελέτη στερέωσης και αποκατάστασης του μνημείου, οι σημαντικότερες βλάβες του ναού παρουσιάζονταν στο δυτικό τμήμα του, για το λόγο αυτό οι δομητικές επεμβάσεις περιορίστηκαν στο τμήμα αυτό του μνημείου

καθώς και στα κωδωναστάσια όπου υπήρχαν εκτεταμένες βλάβες λόγω οξειδωσης των αφανών συνδέσμων τους. Οι εργασίες επισκευής και ενίσχυσης των τοιχοποιιών με υδραυλικά ενέματα πραγματοποιήθηκαν μόνο στο δυτικό τμήμα του ναού και με τρόπο τέτοιο ώστε να διατηρηθούν τα αυθεντικά επιχρίσματα που έφεραν ζωγραφικό διάκοσμο.



Εικ. 13.10: Διαμήκης τομή, όπου διακρίνονται οι ρωγμές στην εσωτερική παρειά του βόρειου τοίχου.



Εικ. 13.11: Βόρεια όψη.

Προτάσεις στερέωσης και αποκατάστασης

Προκειμένου να αποκατασταθεί η συνέχεια και αντοχή των λιθοδομών του βορείου και νότιου τοίχου του δυτικού τμήματος του Ναού, αποφασίστηκε η εφαρμογή υδραυλικών ενεμάτων υψηλής διεισδυτικότητας, με σύγχρονη διατήρηση όμως όλων των αξιόλογων στοιχείων του εσωτερικού διακόσμου. Η επέμβαση αυτή επιλέχθηκε, διότι δεν είναι ορατή και επιτυγχάνει την επισκευή και ενίσχυση των λιθοδομών με τη μικρότερη δυνατή διατάραξη και χωρίς αλλαγή του

αρχικού φορέα, διατηρώντας έτσι στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό τις υπάρχουσες παραμορφώσεις και κάθε ιστορική πληροφορία.

Τα υδραυλικά ενέματα σχεδιάστηκαν έτσι ώστε:

- Να είναι σταθερά αιωρήματα και επαρκώς ρευστά σε όλη τη διάρκεια των ενέσεων και μέχρι την έναρξη της πήξης.
- Να διεισδύουν με ευκολία, υπό χαμηλή πίεση 0.5-1.0Atm και σε ρωγμές πολύ μικρού εύρους (0.4-0.5mm) πράγμα που κρίθηκε αναγκαίο προκειμένου να προσεγγιστούν, διαμέσου των αποδιοργανωμένων κονιαμάτων δόμησης, και πληρωθούν κατά το μέγιστο δυνατόν, τα κενά και οι ρωγμές των λιθοδομών.
- Να προσδίδουν, με τη στερεοποίησή τους στο αρχικό κονίαμα και στο υλικό πλήρωσης της λιθοδομής βελτιωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά, καθώς και καλύτερα χαρακτηριστικά συνάφειας των υλικών αυτών με τους λίθους.
- Να είναι ανθεκτικά στο περιβάλλον της Αγίας Ειρήνης (αποφυγή δημιουργίας διαλυτών ή διογκούμενων αλάτων, περιορισμός διάδοσης θεικών χλωριόντων κλπ) και με μικροδομή και εν γένει φυσικοχημικά χαρακτηριστικά (πορώδες, διανομή πόρων, συντελεστής θερμικής διαστολής κλπ) παρόμοια με εκείνα των υπαρχόντων υλικών.

Η υψηλή διεισδυτικότητα αυτών των ενεμάτων εξασφάλισε επιπλέον τη δυνατότητα εφαρμογής τους μέσω πολύ λεπτών σωληνίσκων, γεγονός που κατέστησε εφικτή τη διατήρηση όλων των επιχρισμάτων που έφεραν ζωγραφικό διάκοσμο ή επιγραφές.

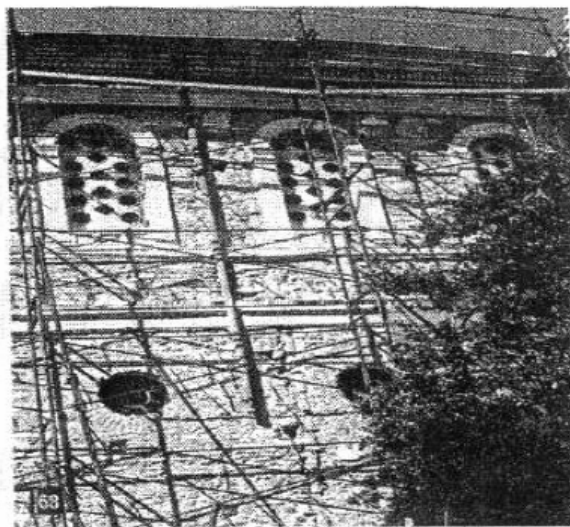
Για τη συγκόλληση των θραυσμένων μελών και την πλήρωση των ρωγμών των κωδωναστασιών χρησιμοποιήθηκαν υδραυλικά ενέματα υψηλής διεισδυτικότητας, ελαχιστοποιώντας με τον τρόπο αυτό τη χρήση νέου υλικού. Η λύση αυτή θεωρήθηκε ως η πλέον ενδεδειγμένη για λαξευτά μαρμάρια και λίθινα αρχιτεκτονικά μέλη με μεταλλικές συνδέσεις, όταν έχει μειωθεί η συνολική ευστάθεια και η εξείδωση των συνδέσμων τα ρηγματώνει προοδευτικά.

Τέλος, τα κριτήρια επιλογής των πρώτων υλών αλλά και σχεδιασμού των επιμέρους επεμβάσεων προσδιορίστηκαν με γνώμονα, όχι μόνο την

αντοχή και την ανθεκτικότητα στο χρόνο, αλλά και την απαίτηση συμβατότητας με τα παλαιά υλικά δόμησης του ναού, έτσι ώστε σε καμιά περίπτωση να μην προκύψει βλαπτική δράση στο φέροντα οργανισμό και το διάκοσμο του μνημείου.

Περιγραφή των επεμβάσεων

Η στερέωση και αποκατάσταση των τοιχοποιιών του Ναού πραγματοποιήθηκε με εφαρμογή βαθέων εξωτερικών αρμολογημάτων και υδραυλικών ενεμάτων υψηλής διεισδυτικότητας που εφαρμόστηκαν μόνο στο βόρειο και νότιο τοίχο του δυτικού τμήματος. Τα αρμολογήματα πραγματοποιήθηκαν με χρήση ασβεστοθηραϊκονιαμάτων, με μικρό ποσοστό λευκού τσιμέντου, ενώ για τα υδραυλικά ενέματα χρησιμοποιήθηκε λευκό τσιμέντο χαμηλής περιεκτικότητας σε αλκάλια και θειικά, σε συνδυασμό με λεπτόκοκκο ποζολανικό υλικό (πυριτική παιπάλη) και μικρή ποσότητα ρευστόποιητή.

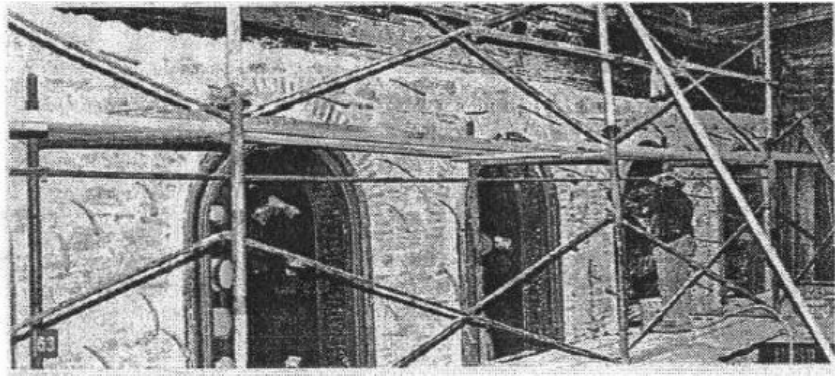


Εικ. 13.12: Βαθύ αρμολόγημα στην εξωτερική παρειά του βόρειου τοίχου και τοποθέτηση σωληνίσκων για την εφαρμογή ενεμάτων.

Στο εσωτερικό του Ναού, τα επιχρίσματα καθαιρέθηκαν τοπικά μόνο στο δυτικό τμήμα του, σε πειοχές που είχαν σημαντική ρηγμάτωση ή έντονη αποσάθρωση από την υγρασία και μόνο όπου δεν υπήρχε

ζωγραφικός διάκοσμος και ανακατασκευάστηκαν όμοια με τα αρχικά μετά την ολοκλήρωση των στερεωτικών εργασιών.

Η διάνοιξη οπών, μέσω διατρήσεων, για την τοποθέτηση των σωληνίσκων εφαρμογής των ενεμάτων έγινε επιλεκτικά σε θέσεις με απομίμηση ορθομαρμάρωσης, ενώ όπου υπήρχαν επιγραφές ή ζωγραφικός διάκοσμος, τοποθετήθηκαν πολύ λεπτοί σωληνίσκοι μόνο στις ρωγμές. Κατά τη διάρκεια εφαρμογής, για τη διασφάλιση της ποιότητας του ενέματος, γινόταν καθημερινός έλεγχος της σταθερότητας του μίγματος, με μέτρηση της εξίδρωσης και της πυκνότητάς του.



Εικ. 13.13: Εσωτερικό του ναού, κάναβος σωληνίσκων ενέματος και εφαρμογή ενεμάτων στο νότιο τοίχο του γυναικωνίτη.

Τα εξωτερικά επιχρίσματα καθαιρέθηκαν σχεδόν στο σύνολό τους και μετά από την εφαρμογή βαθέως αρμολογήματος στο σύνολο των τοιχοποιιών και ενεμάτων στο βόρειο και νότιο τοίχο του δυτικού τμήματος, ανακατασκευάστηκαν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 14 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΕΝΕΜΑΤΩΝ

Τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας συνοψίζονται παρακάτω:

- Η μέθοδος των ενεμάτων είναι μη ορατή επέμβαση που εφαρμόζεται στη μάζα της τοιχοποιίας βελτιώνοντας τη μηχανική συμπεριφορά της ως σύνολο χωρίς να διαταράσσεται η ευστάθεια του δομικού της συστήματος και χωρίς να αλλοιωθεί η εξωτερική της μορφή, αλλά και σε ρωγμές εύρους μερικών δεκάτων του χιλιοστού όταν σκοπός είναι η επισκευή/ενίσχυση των ίδιων των λίθων. Τα υλικά σύνθεσης του ενέματος θα πρέπει να είναι συμβατά με αυτά της υπάρχουσας λιθοδομής για την εξασφάλιση της καλύτερης δυνατής συνεργασίας των νέων υλικών με τα παλιά.
- Επειδή πρόκειται για μη αναστρέψιμη μέθοδο θα πρέπει η επιλογή των πρώτων υλών καθώς και η μεταξύ τους σύνθεση να γίνεται μετά από εκτεταμένη έρευνα ώστε το μείγμα που τελικά θα προκύψει να καλύπτει τις απαιτήσεις επιτελεστικότητας που έχουν οριστεί όπως την ενεσιμότητα, την αύξηση της αντοχής της τοιχοποιίας κ.ά.
- Η αντοχή του ενέματος εξαρτάται από τα φυσικοχημικά και μηχανικά χαρακτηριστικά όπως και τη γεωμετρία των επιμέρους υλικών που το αποτελούν, όταν αυτά βρίσκονται στη στερεά φάση, καθώς και από το μηχανισμό σύνδεσής τους. Με την πάροδο του χρόνου η θλιπτική και η καμπτική αντοχή του υδραυλικού ενέματος μπορεί να αυξηθεί έως και 60%.
- Η καθοριστικότερη ιδιότητα για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων της τοιχοποιίας είναι κυρίως η εφελκυστική αντοχή του ενέματος.

- Τα υδραυλικά ενέματα με βασικό συστατικό το τσιμέντο εμφανίζουν μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή από τα υδραυλικά ενέματα που περιέχουν υδραυλική άσβεστο. Αντίθετα, τα δεύτερα παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό και διάτμηση σε σχέση με τα πρώτα. Τελικά, όμως και οι δύο τύποι συνθέσεων αποδίδουν στη φέρουσα τοιχοποιία ανάλογη αύξηση των αντοχών ανεξάρτητα από το αν είναι υψηλής ή όχι αντοχής. Ειδικότερα στην περίπτωση των υδραυλικών ενεμάτων, η αντοχή που προσφέρουν αξιοποιείται περισσότερο σε περιπτώσεις αποκατάστασης βλαβών ή/και ενίσχυσης λιθοδομών.
- Υδραυλικά ενέματα που περιέχουν υλικά με μεγάλη ειδική επιφάνεια και μικρό ποσοστό μεγάλων κόκκων θεωρούνται περισσότερο ενέσιμα.
- Κατά το σχεδιασμό ενός υδραυλικού ενέματος επιδιώκεται η προσθήκη της μικρότερης δυνατής ποσότητας νερού ώστε το ποσοστό της εξίδρωσης να κυμαίνεται σε αποδεκτά όρια (έως 5%) και να εξαλειφθεί το φαινόμενο της απόμιξης.
- Τα ενέματα με βάση το τσιμέντο, όταν εφαρμοστούν στη λιθοδομή, αυξάνουν πολύ την ακαμψία του πυρήνα της σε σχέση με αυτή των εξωτερικών στρώσεων με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων και να υπάρχει κίνδυνος κατάρρευσης του πυρήνα συμπαρασύροντας και τα εξωτερικά στρώματα. Τα υδραυλικά ενέματα αντίθετα, οδηγούν σε πιο ήπια αύξηση της ακαμψίας της τοιχοποιίας και ενδείκνυνται σε περιπτώσεις μερικής αποκατάστασης.
- Η πλήρωση μεγαλύτερου ποσοστού κενών της τοιχοποιίας με υψηλής αντοχής ένεμα οδηγεί σε αύξηση της θλιπτικής αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας της κατασκευής. Η βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών της δεν είναι ανάλογη με την αντοχή του ενέματος.

- Γνωρίζοντας τη θλιπτική αντοχή του ενέματος και τη θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας πριν την εφαρμογή του ενέματος, μπορούμε να προσδιορίσουμε τη θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας μετά την επέμβαση με τρόπο ικανοποιητικό που συμφωνεί με τα πειραματικά αποτελέσματα.
- Λόγω της έλλειψης συγκεκριμένου κανονιστικού πλαισίου πρώτων υλών και εν γένει υλικών επεμβάσεων σε μνημεία, ο έλεγχος των διατιθέμενων πρώτων υλών και η επιλογή των καταλληλότερων για την κάθε συγκεκριμένη επέμβαση είναι μία προσέγγιση απαραίτητη, καθώς υπάρχει μεγάλη ποικιλία υλικών στο εμπόριο και τις περισσότερες φορές δεν είναι πιστοποιημένα. Επιπλέον, καθώς πρόκειται για φυσικά υλικά, ορισμένες ιδιότητές τους μπορεί σε κάθε περίπτωση να ποικίλουν από παραλαβή σε παραλαβή γεγονός που ισχύει ακόμα και για τα πιστοποιημένα υλικά όπως το τσιμέντο. Για το λόγο αυτό οι δειγματοληπτικοί έλεγχοι κατά τη διάρκεια του έργου, αλλά και μετά την ολοκλήρωσή του είναι εντελώς απαραίτητοι για την εξασφάλιση της ποιότητας των επεμβάσεων.
- Η πραγματοποίηση όλων των απαιτούμενων δοκιμαστικών εφαρμογών και ελέγχων πριν και κατά τη διάρκεια του έργου, αλλά και η λήψη δοκιμίων μετά την ολοκλήρωσή του, είναι απαραίτητο να περιλαμβάνονται στο συνολικό σχεδιασμό των εργασιών αποκατάστασης των κατασκευών από λιθοδομή.

Λόγω της έλλειψης προτυποποίησης των υλικών που συνθέτουν τα ενέματα καθώς και της αδυναμίας πρόβλεψης της συμπεριφοράς της ενισχυμένης λιθοδομής η οποία μόνο πειραματικά μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια, η σύνθεση και η συμπεριφορά των ενεμάτων εξακολουθεί να ερευνάται με στόχο τη συλλογή ακόμα περισσότερων πληροφοριών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ashrust John and Nicola, “*Practical Building Conservation*”, *Stone Masonry voll*, Ashgate 2003.
2. Βιντζηλαίου Ε.Ν., Παλιεράκη Β.Α., “Συμπεριφορά τοιχοπληρώσεων με διάζωμα Ω/Σ ή με οπλισμό οριζόντιων αρμών”, *15^ο Συνέδριο Σκυροδέματος, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, 25-27 Οκτωβρίου 2006, Αλεξανδρούπολη*.
3. Vintzilaiou E., “Grouting of Three-Leaf Masonry: Types of Grouts, Mechanical Properties of Masonry before and after Grouting”, *P.B. Lourenço, P. Roca, C. Modena, S. Agrawal (Eds), Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi 2006*.
4. Vintzilaiou E. et al, “Mechanical Properties of Three-Leaf Masonry”, *P.B. Lour`enço, P. Roca, C. Modena, S. Agrawal (Eds), Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi 2006*.
5. Vintzilaiou E., Tasios T.P. “*Three leaf Masonry strengthened by injecting cement grouts*”, *Journal of Structural Engineering, May 1995*.
6. Καλαγρή Α., Μιλτιάδου-Fezans Α., Βιντζηλαίου Ε., “Ενέματα Υδραυλικής Ασβέστου για την Επισκευή Ιστορικών Κατασκευών”, αρχείο ΔΙΤΕΑ, ΥΠΠΟ.
7. Καραντώνη Β. Φυλλίτσα, “Κατασκευές από Τοιχοποιία”, *Παπασωτηρίου, 2004*.
8. Μιλτιάδου-Fezans Α., “Η χρήση ενεμάτων ως μέθοδος επισκευής και ενίσχυσης λιθοδομών”, *Πρακτικά Διεθνούς Συμποσίου Θεσσαλονίκης 1985*.
9. Miltiadou-Fezans Α., “Criteria for the design of hydraulic grouts injectable into fine cracks and evaluation of their efficiency”, *European Conference-Compatible restoration materials for the protection of European cultural heritage, National Technical University of Athens, December 1998, Athens, Greece*.

10. Μιλτιάδου-Fezans A., “Κύκλος Διαλέξεων-Παθολογία Κατασκευών”, *Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας*, 2004.
11. Μιλτιάδου-Fezans A., “Η μέθοδος των υδραυλικών ενεμάτων για την επισκευή και ενίσχυση παλιών κατασκευών από λιθοδομή”, *Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας*, 2004.
12. Miltiadou-Fezans A., Tassios T.P., “Penetrability of Hydraulic Grouts in Structural Strengthening in Structural Research”, *Anniversary volume honouring Peter Linkei, Edited by Dr Barsony, University of Pecs, Hungary*, 2003.
13. Miltiadou-Fezans A. et al, “Mechanical Properties of Three-Leaf Masonry after Grouting”, *P.B. Lourenço, P. Roca, C. Modena, S. Agrawal (Eds), Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi 2006*.
14. Μιλτιάδου-Fezans A., Τάσιος Θ. Π., “Ορθολογικά κριτήρια για τον ολιστικό σχεδιασμό των υδραυλικών ενεμάτων”, *Συνέδριο Αναστηλώσεων ΕΤΕΠΑΜ, 14-17 Ιουνίου 2006, Θεσσαλονίκη*.
15. Μιλτιάδου-Fezans A., Αναγνωστοπούλου Σ., Καλαγρή Α., “Κονιάματα και ενέματα αποκατάστασης των πτερύγων κελιών του εσωτερικού περιβόλου της Ι.Μ. Δαφνίου”.
16. Μπαβελλάς Χ., Μπουζούκου Μ. “Συγκριτική μελέτη ενισχύσεων τοιχοποιίας με σύνθετα υλικά οργανικής και ανόργανης μήτρας”, *Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ιούνιος 2005*.
17. Τάσιος Θ.Π., “Η Μηχανική της Τοιχοποιίας”, *Συμμετρία*, 1992.
18. Tassios T.P., “Rehabilitation of three-leaf masonry. Evoluziane nella sperimentazione per le costruzioni, Seminario Internazionale, Crociera sul Mediterraneo 26 Settembre-3 Ottobre: Centro Internazionale di Aggiornamento Sperimentale-Scientifico (CIAS, 2004).
19. Toumbakari E.E., *Lime-Pozzolan-Cement grouts and their structural effects on composite masonry walls, PhD Thesis, Deartment of Civil Engineering, Voll*, 2002.

20. Tomazevic Miha, “Αντισεισμικός σχεδιασμός κτιρίων από τοιχοποιία”, *Imperial College Press 1999*.
21. Valluzzi M.R. et al., “Behavior of multi-leaf stone masonry walls strengthened by different intervention techniques”, *Historical Constructions, P.B. Lourenço, P. Roca (Eds), Guimarães, 2001*.
22. Valluzzi M.R. et al., “Grout requirements for the injection of stone masonry walls”, *A New Era of Building, Cairo, Egypt, 18-20 February, 2003*.
23. Valluzzi M.R. et al., “Behavior and modeling of strengthened three-leaf stone masonry walls”, *Materials and Structures, Vol 37, pp 184-192, April 2004*.
24. “Τεχνικές προδιαγραφές και απαιτούμενος εξοπλισμός για το Σχεδιασμό και την Εφαρμογή των Ενεμάτων”, *Υπουργείο Πολιτισμού, Γενική Διεύθυνση Αναστήλωσης Μουσείων και Τεχνικών Εργων, Διεύθυνση Τεχνικών Ερευνών Αναστήλωσης (ΔΙΤΕΑ)*.
25. “Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές”, *Υπουργείο ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ., 1^η Έκδοση, 14-02-04-00*.
26. “Αποκατάσταση των ιστορικών κατασκευών σε σεισμικές περιοχές, η περίπτωση των παραδοσιακών κτισμάτων”, *Πρακτικά Διεθνούς Σεμιναρίου, Μυτιλήνη, Λέσβος, Μάιος 2001*.
27. “Ήπιες επεμβάσεις για την προστασία Ιστορικών Κατασκευών”, *Πρακτικά 2^ο Εθνικού Συνεδρίου, Υπουργείο Πολιτισμού, Εφορία Νεοτέρων Μνημείων Κεντρικής Μακεδονίας, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας, Οκτώβριος 2004*.
28. “Σχεδιασμός Κατασκευών από Τοιχοποιία”, *Εθνικό Κείμενο Εφαρμογής του Ευρωκώδικα 6 (EC6)*.
29. Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης (ΕΛΟΤ), EN 197-1 “Τσιμέντο Μέρος 1: Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για τα κοινά τσιμέντα”, EN 197-2 “Τσιμέντο Μέρος 2: Αξιολόγηση συμμόρφωσης”
30. Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης (ΕΛΟΤ), EN 459-1 “Δομική άσβεστος-Μέρος 1: Ορισμοί, προδιαγραφές και κριτήρια

συμμόρφωσης”, EN 459-2 “Δομική άσβεστος-Μέρος 2: Αξιολόγηση συμμόρφωσης” 197-2, 459-1, 459-2.

31. Norme Francaise (NF), NF P 18-359, 1988.

