



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δέσποινα Γ. Καραγιαννάκη

Τίτλος:

**Πειραματική Αποτίμηση των Μηχανικών και
Ρεολογικών Χαρακτηριστικών Υδραυλικών Ενεμάτων
σε Φέρουσες Λιθοδομές με Πηλοκονίαμα**



Επιβλέπουσα: Ελισάβετ Βιντζηλαίου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος, 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δέσποινα Γ. Καραγιαννάκη

Τίτλος:

**Πειραματική Αποτίμηση των Μηχανικών και
Ρεολογικών Χαρακτηριστικών Υδραυλικών Ενεμάτων
σε Φέρουσες Λιθοδομές με Πηλοκονίαμα**

Επιβλέπουσα: Ελισάβετ Βιντζηλαίου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος, 2017

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ενίσχυση ιστορικών φερουσών τρίστρωτων και δίστρωτων αργολιθοδομών με ενέματα. Στις αργολιθοδομές οι οποίες εξετάζονται στην εργασία, η δόμηση των λίθων έχει πραγματοποιηθεί με την χρήση πηλοκονιάματος, ενώ-μέχρι τώρα-έχουν μελετηθεί τοιχοποιίες δομημένες με ασβεστοκονίαμα ή ασβεστοποζολανικό κονίαμα.

Το πηλοκονίαμα, είτε ως υλικό δόμησης των παρειών της τοιχοποιίας, είτε ως υλικό πληρώσεως του χώρου μεταξύ των παρειών, εμφανίζει ιδιαιτερότητες όπως μεγάλη διασπορά των ιδιοτήτων του, τρωτότητα του σε περιβαλλοντικές δράσεις και ελλιπή συνάφειά του με τους λίθους. Σχεδιάστηκαν δύο διαφορετικές συνθέσεις πηλοκονιάματος και, μέσω διεξαγωγής πειραμάτων, μελετήθηκαν τα μηχανικά (θλιπτική και καμπτική αντοχή) και φυσικά (πυκνότητα, μάζα και συστολή ξήρανσης) τους χαρακτηριστικά, στις 28, 60 και 90 ημέρες ωρίμανσής τους. Η επιλογή των υλικών και των αναλογιών τους στις συνθέσεις των κονιαμάτων βασίστηκε στην βιβλιογραφική έρευνα. Επιβεβαιώθηκε η χρήση των εν λόγω υλικών με χημικές αναλύσεις σε δείγματα από ιστορικές τοιχοποιίες. Τα αποτελέσματα των παραπάνω πειραμάτων συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα που βρέθηκαν από την βιβλιογραφική ανασκόπηση.

Ως τεχνική ενίσχυσης επιλέχθηκαν τα ενέματα ομογενοποίησης μάζας, προκειμένου να πληρωθούν τα εσωτερικά κενά χωρίς να αλλοιωθεί η όψη των υπό μελέτη λιθοδομών. Οι συνθέσεις των ενεμάτων σχεδιάστηκαν με γνώμονα την φυσικοχημική συμβατότητα, που ισχύει σε ιστορικές κατασκευές. Τα υλικά που επιλέχθηκαν ήταν κυρίως η υδραυλική άσβεστος κι ο πηλός, σε διάφορες αναλογίες. Περιορισμένο πλήθος συνθέσεων πραγματοποιήθηκε με την προσθήκη φυσικής ποζολάνης και υπερρυστοποιητή. Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε σε όρους ρεολογικών (σταθερότητα και ρευστότητα), μηχανικών (θλιπτική, καμπτική και διατμητική αντοχή) και φυσικών (πυκνότητα, μάζα και συστολή ξήρανσης) χαρακτηριστικών στις 28 και 90 ημέρες ωρίμανσής τους.

Προκειμένου να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα της εφαρμογής ενεμάτων στις λιθοδομές, κρίθηκε σκόπιμο να κατασκευαστούν 6 τοιχίσκοι αργολιθοδομής (4 δίστρωτοι και 2 τρίστρωτοι), οι οποίοι δοκιμάστηκαν σε θλίψη, πριν και μετά την εφαρμογή των ενεμάτων. Στην παρούσα διπλωματική, μελετήθηκε ένα αντιπροσωπευτικό τμήμα των αποτελεσμάτων των δοκιμών θλίψης, με σκοπό την αποτίμηση της συνεισφοράς των ενεμάτων στην ενίσχυση της τοιχοποιίας. Επίσης, παρατίθενται σχέδια ενδεικτικά της παθολογίας, καταγραφές οπτικών παρατηρήσεων από την διεισδυτικότητα των ενεμάτων καθώς και παρουσιάζεται η μέτρηση της ποσότητας του ενέματος που καταναλώθηκε από κάθε τοιχίσκο.

Λέξεις Κλειδιά:

Αργολιθοδομή, Φέρουσα Τοιχοποιία, Πηλός, Πηλοκονίαμα, Ενέματα, Υδραυλική Άσβεστος, Ποζολάνη, Ενίσχυση Ιστορικών Κατασκευών

Abstract

The purpose of this thesis is the reinforcement of historical three and two-leaf masonries with grouting. The rubble masonries, which are studied, are constructed with poor quality mud mortars, in contrast with the rubble masonries with lime or lime pozzolan mortars that were taken place until now.

Mud mortars, as a construction material or as an infill material between the masonry's leaves, display various particularities. Those may be great dispersion of its characteristics, vulnerability to environmental actions and low cohesion with the stones. Two compositions of mud mortars were designed, and through mechanical (flexural and compressive strength) and physical (drying shrinkage, density, mass) tests, their characteristics were studied at 28, 60 and 90 days of curing. The selection of the materials and their proportions in the mixes were based in similar studies. Their use was confirmed since they matched with chemical and mineralogical characteristics from samples that were taken from similar rubble masonries after respective analyses. The tests' results were also compared with the results of similar studies found in literature.

Grouting was found to be the most appropriate reinforcement technique, in order to fill all the masonries' voids, without altering their historical and architectural character. The grouts' mixes were designed according to the physicochemical requirements, which are applied in historical masonries. The materials that were used were natural hydraulic lime and clay, in different proportions. A limited number of compositions were performed with the use of pozzolan and superplasticizer. The grouts' mixes were tested by means of their injectability (penetrability, fluidity and stability), mechanical (flexural, compressive and shear strength) and physical (drying shrinkage, density, mass) properties at their 28 and 90 days of curing.

Moreover, there were constructed six walletes (4 two leaf and 2 three leaf walletes) so as to evaluate the effectiveness of grouting. The walletes were tested in compression, before and after grouting. They were studied for a representative amount of the compression's results, in order to evaluate the grouts' contribution at the masonries' reinforcement. Furthermore, the pathology of the walletes was examined and presented, along with observations regarding the grouts' penetrability and the grouts' quantity that was consumed per wallete.

Key Words:

Rubble Stone Masonry, Bearing Masonry, Clay, Mud mortar, Grouts, Hydraulic Lime, Pozzolan, Historical Structures' Reinforcement

Σκοπός εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας, είναι η μελέτη της συμπεριφοράς ιστορικών δίστρων και τρίστρων λιθοδομών με διάφορους τύπους συνδετικού πηλοκονιάματος, πριν και μετά από την εφαρμογή υδραυλικών ενεμάτων σε αυτές. Η ανάγκη για την μελέτη αυτών των λιθοδομών απορρέει από το κενό που υπάρχει στην βιβλιογραφία, όσον αφορά τόσο την μελέτη αυτού του τύπου λιθοδομής με τα συγκεκριμένα υλικά, όσο και του κατάλληλου τρόπου επέμβασης και ενίσχυσης του.

Μέσα από αυτήν την εργασία επιχειρήθηκε η μελέτη των επιμέρους υλικών που αποτελούν τις παραπάνω λιθοδομές, των υλικών ενίσχυσης τους, του τρόπου δόμησης τους και της παθολογίας τους πριν και μετά τα ενέματα. Η μελέτη των παραπάνω παραμέτρων πραγματοποιήθηκε μέσω της διεξαγωγής πειραμάτων για την αποτίμηση κι εξέταση:

- των μηχανικών χαρακτηριστικών (θλιπτικής και καμπτικής αντοχής) για δύο τύπους συνδετικού πηλοκονιάματος και 69 συνθέσεων ενεμάτων, σε ηλικίες ωρίμανσης 28, 60 και 90 ημερών ωρίμανσης,
- των φυσικών χαρακτηριστικών (συστολής ξήρανσης, μάζας και πυκνότητας) σε δύο τύπους πηλοκονιάματος και 69 συνθέσεις ενεμάτων, σε ηλικίες ωρίμανσης 28, 60 και 90 ημερών ωρίμανσης,
- της διατμητικής αντοχής τριών συνθέσεων ενεμάτων, μέσα από την μελέτη και πειραματική διερεύνηση σύνθετων δοκιμίων διεπιφανειών λίθων και ενεμάτων υπό δύο διαφορετικές θλιπτικές τάσεις (0,1 και 0,3 MPa) σε ηλικίες 28 και 90 ημερών ωρίμανσης,
- των ρεολογικών χαρακτηριστικών (σταθερότητας και ρευστότητας) σε 69 συνθέσεις ενεμάτων,
- της θλιπτικής αντοχής των λίθων που χρησιμοποιήθηκαν ως δομικές μονάδες στους τοιχίσκους,
- της θλιπτικής αντοχής για 6 τοιχίσκους αργολιθοδομής με πηλοκονίαμα, 4 δίστρων και 2 τρίστρων, πριν και μετά την εφαρμογή των ενεμάτων,
- της παθολογίας των παραπάνω τοιχίσκων πριν και μετά την εφαρμογή των ενεμάτων.

Ευχαριστίες

Θέλω να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια της διπλωματικής μου εργασίας κα Ελισάβετ Βιντζηλαίου, που με το συγκεκριμένο θέμα εργασίας που μου πρότεινε με έβαλε στον κόσμο της ενίσχυσης κι αποκατάστασης ιστορικών κατασκευών. Παρόλη την πολυπλοκότητα του θέματος, αποδείχθηκε ένα πολύ ενδιαφέρον πεδίο εφαρμογής και κάτι εντελώς διαφορετικό από το πρόγραμμα σπουδών της σχολής. Σπουδαίες ήταν οι συμβουλές της και η καθοδήγηση της καθόλη την διάρκεια της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Βίλλυ Νικολοπούλου, υποψήφια διδάκτορα στο Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος, για την βοήθεια της, τις συμβουλές της και την παρέα της καθόλη την διάρκεια των πειραμάτων, της συγγραφής του κειμένου και της παρουσίασης της διπλωματικής μου εργασίας.

Πολύ σημαντικές ήταν οι συμβουλές της Χρυσής- Ελπίδας Αδάμη, διδάκτορα Ε.Μ.Π. Με την εμπειρία της πάνω στο θέμα των ενεμάτων σε ιστορικές κατασκευές, μας βοήθησε στο να οργανώσουμε το πειραματικό κομμάτι της εργασίας.

Η συμβολή της κας Νίκης Μιλτιάδου-Fezans, επίκουρης καθηγήτριας της σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, για τον σχεδιασμό των συνθέσεων των ενεμάτων, καθώς και της αποτίμησης της ρεολογικής τους συμπεριφοράς ήταν ιδιαίτερος βοηθητική.

Δεν θα μπορούσα να παραλείψω τις σπουδαίες συμβουλές και την βοήθεια την οποία μου προσέφεραν η Βάσω Παλιεράκη, διδάκτορας Ε.Μ.Π., κι η Ερατώ Οικονομοπούλου στην συγγραφή του κειμένου καθώς και στην παρουσίαση της εργασίας.

Σπουδαία ήταν η βοήθεια του ηλεκτρονικού του Εργαστηρίου Ωπλισμένου Σκυροδέματος, Παναγιώτη Κορνέζου, ο οποίος ήταν πάντα πρόθυμος να με βοηθήσει σε όλα τα πειράματα. Ευχαριστώ πολύ και τον Δημήτρη Χατζιρούμπη, τεχνίτη του Εργαστηρίου Ωπλισμένου Σκυροδέματος.

Χωρίς την υποστήριξη και συμπαράσταση των γονιών μου και του αδερφού μου τίποτα δεν θα ήταν εφικτό. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον συνοδοιπόρο μου στις σπουδές μου, Γιάννη Τσαπέκη, για όλη την βοήθειά και την παρέα του.

Περιεχόμενα

| | |
|--|-----|
| Περίληψη..... | iii |
| Abstract..... | v |
| Σκοπός εργασίας..... | vii |
| Ευχαριστίες..... | ix |
| 1. Ο πηλός ως κατασκευαστικό υλικό..... | 22 |
| 1.1 Εισαγωγή..... | 22 |
| 1.2 Ιστορική αναδρομή..... | 23 |
| 1.3 Πηλός..... | 27 |
| 1.3.1 Συστατικά πηλού..... | 27 |
| 1.3.2 Ιδιότητες αργλικού ορυκτού..... | 29 |
| 1.4 Χρήσεις πηλού στην δόμηση..... | 30 |
| 1.4.1 Ωμοπλινθοδομές (adobe)..... | 30 |
| 1.4.2 Χυτές τοιχοποιίες από πηλό (rammed earth)..... | 31 |
| 1.4.3 Τοίχοι από συμπιεσμένους σβώλους πηλού (cob)..... | 31 |
| 1.4.4 Κονίαμα-Πηλοκονίαμα..... | 32 |
| 1.4.5 Πηλοεπιχρίσματα..... | 38 |
| 1.5 Παθολογία και προβλήματα φθοράς..... | 38 |
| 1.6 Πλεονεκτήματα χρήσης του πηλού στην δόμηση..... | 41 |
| 2. Φέρουσα τοιχοποιία..... | 44 |
| 2.1 Γενικά στοιχεία..... | 44 |
| 2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα της τοιχοποιίας..... | 44 |
| 2.3 Τύποι τοιχοποιίας..... | 45 |
| 2.3.1 Κατασκευαστικοί τύποι τοιχοποιίας..... | 45 |
| 2.3.2 Μορφολογικοί τύποι τοιχοποιίας..... | 46 |
| 2.4 Συμπεριφορά τοιχοποιίας πριν την εφαρμογή των ενεμάτων..... | 49 |
| 2.4.1 Μηχανισμός αστοχίας τοιχοποιίας..... | 49 |
| 2.4.2 Επιρροή παραμέτρων στην θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας..... | 51 |
| 2.5 Συμπεριφορά λιθοδομής μετά την εφαρμογή ενεμάτων..... | 52 |
| 2.5.1 Μηχανισμός αστοχίας τοιχοποιίας..... | 52 |
| 2.5.2 Επιρροή παραμέτρων στην θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας..... | 52 |
| 2.6 Βιβλιογραφικά συμπεράσματα..... | 54 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 3. | Ενίσχυση με Ενέματα | 55 |
| 3.1 | Γενικά στοιχεία | 55 |
| 3.2 | Βιβλιογραφικά στοιχεία | 56 |
| 3.2.1 | Συνθέσεις ενεμάτων σε λιθοδομές με συνδετικό ασβεστοκονίαμα | 56 |
| 3.2.2 | Συνθέσεις ενεμάτων σε τοιχοποιίες με συνδετικό πηλοκονίαμα | 58 |
| 3.3 | Υλικά ενεμάτων | 58 |
| 3.3.1 | Γενικά στοιχεία | 58 |
| 3.3.2 | Συμβατότητα ενεμάτων και αυθεντικών υλικών | 59 |
| 3.4 | Ιδιότητες ενεσιμότητας ενεμάτων | 63 |
| 3.4.1 | Διεισδυτικότητα Ενέματος | 64 |
| 3.4.2 | Ρευστότητα Ενέματος | 67 |
| 3.4.3 | Σταθερότητα Ενέματος | 68 |
| 3.5 | Συνάφεια Υποβάθρου-Ενεμάτων | 71 |
| 3.5.1 | Εισαγωγή | 71 |
| 3.5.2 | Μηχανισμός Συνάφειας | 72 |
| 4. | Πειραματικό Μέρος | 74 |
| 4.1 | Πηλοκονιάματα | 74 |
| 4.1.1 | Παρασκευή κονιάματος | 75 |
| 4.1.2 | Σύσταση και ανάλυση υλικών συνθέσεων πηλοκονιαμάτων | 76 |
| 4.1.3 | Συντήρηση δοκιμίων κονιάματος | 78 |
| 4.2 | Ενέματα | 78 |
| 4.2.1 | Παρασκευή συνθέσεων ενεμάτων | 80 |
| 4.2.2 | Σύσταση και ανάλυση υλικών συνθέσεων ενεμάτων | 81 |
| 4.2.3 | Συντήρηση δοκιμίων συνθέσεων ενεμάτων | 82 |
| 4.3 | Τεχνικές αποτίμησης | 85 |
| 4.3.1 | Κοκκομετρική ανάλυση | 85 |
| 4.3.2 | Συστολή ξήρανσης | 87 |
| 4.3.3 | Πυκνότητα | 88 |
| 4.3.4 | Μηχανική αντοχή | 89 |
| 4.3.5 | Χαρακτηριστικά Ενεσιμότητας Ενεμάτων | 91 |
| 4.3.6 | Σύνθετα δοκίμια διεπιφανειών– Δοκιμή Διάτμηση [Adami Ch., 2011] | 95 |
| 4.4 | Τοιχίσκοι | 100 |
| 4.4.1 | Κατασκευή τοιχίσκων | 101 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.4.2 | Υλικά δομικών μονάδων τοιχίσκων | 102 |
| 4.4.3 | Δοκιμή θλίψης | 103 |
| 4.5 | Ομογενοποίηση με ενέματα | 105 |
| 4.5.1 | Εξοπλισμός | 105 |
| 4.5.2 | Προετοιμασία τοιχίσκων | 105 |
| 5. | Αποτελέσματα | 108 |
| 5.1 | Κονιάματα | 108 |
| 5.1.1 | Μηχανικά χαρακτηριστικά | 108 |
| 5.1.2 | Φυσικά χαρακτηριστικά | 114 |
| 5.2 | Ενέματα | 117 |
| 5.2.1 | Μηχανικά χαρακτηριστικά | 117 |
| 5.2.2 | Φυσικά χαρακτηριστικά | 126 |
| 5.2.3 | Χαρακτηριστικά Ενεσιμότητας | 130 |
| 5.2.4 | Δοκιμές Διάτμησης – Διεπιφάνειες | 146 |
| 5.3 | Τοιχίσκοι | 158 |
| 5.3.1 | Μηχανικά χαρακτηριστικά | 158 |
| 5.3.2 | Παθολογία | 160 |
| 5.3.3 | Ποσότητα ενέματος | 164 |
| 5.3.4 | Οπτικές Παρατηρήσεις | 165 |
| 6. | Τελικά Συμπεράσματα | 175 |
| 6.1 | Μηχανικά Χαρακτηριστικά | 175 |
| 6.1.1 | Κονιάματα | 175 |
| 6.1.2 | Ενέματα | 175 |
| 6.2 | Φυσικά Χαρακτηριστικά | 176 |
| 6.2.1 | Κονιάματα | 176 |
| 6.2.2 | Ενέματα | 177 |
| 6.3 | Χαρακτηριστικά Ενεσιμότητας | 178 |
| 6.4 | Διεπιφάνειες | 178 |
| 6.5 | Τοιχίσκοι | 181 |
| 7. | Προτάσεις για έρευνα | 183 |
| | Παραρτήματα | 184 |
| | Παράρτημα Α: Μηχανικά και Φυσικά Χαρακτηριστικά πηλοκονιαμάτων και πηλοασβεστοκονιαμάτων | 184 |

| | |
|--|-----|
| Φυσικά Χαρακτηριστικά | 184 |
| Μηχανικά Χαρακτηριστικά..... | 186 |
| Παράρτημα Β: Μηχανικά και Φυσικά Χαρακτηριστικά συνθέσεων ενεμάτων | 188 |
| Φυσικά Χαρακτηριστικά | 188 |
| Μηχανικά Χαρακτηριστικά..... | 189 |
| Παράρτημα Γ: Διεπιφάνειες..... | 192 |
| Βιβλιογραφία | 196 |

Περιεχόμενα πινάκων

| | |
|---|-----|
| Πίνακας 1. Αναλογίες υλικών στις συνθέσεις των πηλοκονιαμάτων και πηλοασβεστοκονιαμάτων | 75 |
| Πίνακας 2. Συγκεντρωτικός πίνακας θλιπτικής αντοχής κυβικών δοκιμίων των λίθων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των τοιχίσκων | 103 |
| Πίνακας 3. Συγκεντρωτικός πίνακας κωδικών ονομασιών τοιχίσκων, με τον τύπο δόμησης τους, το συνδετικό τύπο πηλοκονιάματος που αποτελούνται και η επιλεγμένη σύνθεση ενέματος που τους αντιστοιχεί | 107 |
| Πίνακας 4: Χρόνοι ροής – Ποσοστά Εξίδρωσης – Δείκτης ρευστότητας συνθέσεων ενεμάτων με ποζολάνη | 132 |
| Πίνακας 5: Χρόνοι ροής – Ποσοστά Εξίδρωσης – Δείκτης ρευστότητας συνθέσεων ενεμάτων NHL 5: 90% Clay: 10% | 132 |
| Πίνακας 6: Χρόνοι ροής – Ποσοστά Εξίδρωσης – Δείκτης ρευστότητας συνθέσεων ενεμάτων NHL 5: 100% | 133 |
| Πίνακας 7: Χρόνοι ροής – Ποσοστά Εξίδρωσης – Δείκτης ρευστότητας συνθέσεων ενεμάτων NHL 5: 80% Clay: 20% | 135 |
| Πίνακας 8: Χρόνοι ροής – Ποσοστά Εξίδρωσης – Δείκτης ρευστότητας συνθέσεων ενεμάτων NHL 5: 70% Clay: 30% (Πρώτη η υδραυλική άσβεστος στην ανάμιξη)..... | 136 |
| Πίνακας 9: Χρόνοι ροής – Ποσοστά Εξίδρωσης – Δείκτης ρευστότητας συνθέσεων ενεμάτων Clay: 30% NHL 5: 70% (Πρώτος ο πηλός στην ανάμιξη) | 137 |
| Πίνακας 10: Χρόνοι ροής – Ποσοστά Εξίδρωσης – Δείκτης ρευστότητας συνθέσεων ενεμάτων Clay: 100% | 137 |
| Πίνακας 11: Χρόνοι ροής – Ποσοστά Εξίδρωσης – Δείκτης ρευστότητας συνθέσεων ενεμάτων NHL 5: 100% W/S: 0,9 (σύνθεση που χρησιμοποιήθηκε στους τοιχίσκους)... | 138 |
| Πίνακας 12: Χρόνοι ροής – Ποσοστά Εξίδρωσης – Δείκτης ρευστότητας συνθέσεων ενεμάτων NHL 5: 70% Clay: 30% W/S: 0,9 (σύνθεση που χρησιμοποιήθηκε στους τοιχίσκους)..... | 138 |
| Πίνακας 13. Συγκεντρωτικός πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών ενεμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στις διεπιφάνειες | 146 |
| Πίνακας 14. Συγκεντρωτικός πίνακας σύγκρισης αναλυτικών αποτελεσμάτων από [Adami Ch., 2011] με των πειραματικών αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας..... | 158 |
| Πίνακας 15. Συγκεντρωτικά στοιχεία παραμορφώσεων για τους τοιχίσκους πριν και μετά τα ενέματα | 159 |
| Πίνακας 16. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων πειραμάτων θλίψης από [Vintzileou et al., 2008] κι [Adami Ch., 2011]..... | 160 |
| Πίνακας 17. Συγκεντρωτικός πίνακας ποσότητας ενεμάτων που εφαρμόστηκε στους τοιχίσκους..... | 164 |
| Πίνακας 18. Φυσικά χαρακτηριστικά πρισμάτων πηλοκονιαμάτων στις 28, 60 και 90 ημέρες ωρίμανσης τους | 184 |
| Πίνακας 19. Φυσικά χαρακτηριστικά πρισμάτων πηλοασβεστοκονιαμάτων στις 28, 60 και 90 ημέρες ωρίμανσης τους | 185 |

| | |
|---|-----|
| Πίνακας 20. Καμπτική αντοχή πρισμάτων ηλοκονιαμάτων στις 28, 60 και 90 ημέρες ωρίμανσης τους | 186 |
| Πίνακας 21. Θλιπτική αντοχή πρισμάτων ηλοκονιαμάτων στις 28, 60 και 90 ημέρες ωρίμανσης τους | 186 |
| Πίνακας 22. Καμπτική αντοχή πρισμάτων ηλοασβεστοκονιαμάτων στις 28, 60 και 90 ημέρες ωρίμανσης τους | 186 |
| Πίνακας 23. Θλιπτική αντοχή πρισμάτων ηλοασβεστοκονιαμάτων στις 28, 60 και 90 ημέρες ωρίμανσης τους | 187 |
| Πίνακας 24. Φυσικά χαρακτηριστικά πρισμάτων ενεμάτων για τις 28 και 90 ημέρες | 188 |
| Πίνακας 25. Καμπτική αντοχή πρισμάτων ενεμάτων για τις 28 και 90 ημέρες ωρίμανσης | 189 |
| Πίνακας 26. Θλιπτική αντοχή πρισμάτων ενεμάτων για τις 28 και 90 ημέρες | 190 |
| Πίνακας 27. Συγκεντρωτικός πίνακας μεγεθών που προέκυψαν από το πείραμα των διεπιφανειών λίθων και ενεμάτων | 192 |
| Πίνακας 28. Αποτελέσματα Δοκιμών Διεπιφανειών για τις 28 ημέρες ωρίμανσης για ορθή τάση 0,30MPa..... | 193 |
| Πίνακας 29. Αποτελέσματα Δοκιμών Διεπιφανειών για τις 90 ημέρες ωρίμανσης για ορθή τάση 0,10MPa..... | 194 |
| Πίνακας 30. Αποτελέσματα Δοκιμών Διεπιφανειών για τις 90 ημέρες ωρίμανσης για ορθή τάση 0,30MPa..... | 195 |

Περιεχόμενα εικόνων

| | |
|--|----|
| Εικόνα 1. Χρήσεις του πηλού σε παραδοσιακές κατασκευές | 23 |
| Εικόνα 2. Εγκαταλελειμμένα σπίτια από ωμοπλίνθους στην Φλώρινα | 24 |
| Εικόνα 3. Οκτάωροφα κτίρια κατοικιών, 500 χρόνων, από ωμόπλινθους στο Shibam της Υεμένης [Πιτυτζόγια Α., 2014] | 25 |
| Εικόνα 4. Άγιος Δημήτριος, Μαρούσι (προσωπικό αρχείο κας Νικολοπούλου)..... | 25 |
| Εικόνα 5. Χαρακτηριστικό παράδειγμα παθολογίας σε λιθοδομές με πηλοκονίαμα στην Λήμνο (αποσάθρωση κονιάματος καθώς και ανάπτυξη φυτών)..... | 26 |
| Εικόνα 6. Εντατική κατάσταση μεταξύ κόκκων σε επαφή σε μη συνεκτικά εδάφη..... | 27 |
| Εικόνα 7. Δομή “house of cards” [Σταθόπουλος Κ., 2015] | 29 |
| Εικόνα 8. Χαρακτηριστική κατασκευή με ωμοπλίνθους | 30 |
| Εικόνα 9. Χαρακτηριστικές κτιριακές κατασκευές με την τεχνική “cob” | 31 |
| Εικόνα 10. Παραδοσιακή αργολιθοδομή με συνδετικό πηλοκονίαμα (Άγιος Δημήτριος, Μαρούσι) (προσωπικό αρχείο κας Νικολοπούλου) | 33 |
| Εικόνα 11. Χαρακτηριστικό παράδειγμα διάβρωσης της βάσης λιθοδομής..... | 40 |
| Εικόνα 12. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποσάθρωσης πηλοκονιάματος..... | 41 |
| Εικόνα 13. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τρίστρωτης λιθοδομής [Adami Ch, 2011]..... | 45 |
| Εικόνα 14. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ξηρολιθοδομής (ή αλλιώς ξερολιθιά) | 47 |
| Εικόνα 15. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αργολιθοδομής..... | 47 |
| Εικόνα 16. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ημιλαξευτής λιθοδομής με λαξευμένους γωνιόλιθους | 48 |
| Εικόνα 17. Χαρακτηριστικό παράδειγμα λαξευτής λιθοδομής..... | 48 |
| Εικόνα 18. Τύποι ρηγματώσεων και αστοχίας τοιχίσκων (ιδιαίτερα τρίστρωτων) υπό θλιπτικά φορτία πριν την εφαρμογή των ενεμάτων [Vintzileou et al., 2008]..... | 50 |
| Εικόνα 19. Ρηγματώσεις τρίστρωτων τοιχίσκων στην αστοχία α) πριν την εφαρμογή ενεμάτων β) μετά την εφαρμογή ενεμάτων [Vintzileou et al., 2008] | 52 |
| Εικόνα 20. Σχηματική απεικόνιση της εντατικής κατάστασης που αναπτύσσεται στην διεπιφάνεια στρώσεων τρίστρωτης τοιχοποιίας [Adami Ch., 2011]..... | 71 |
| Εικόνα 21. Ανάδευση των στερεών υλικών πρώτα εν ξηρώ, και στην συνέχεια με σταδιακή προσθήκη του απαιτούμενου νερού | 75 |
| Εικόνα 22. Μήτρες συντήρησης δοκιμίων κονιάματος από τυχαία χαρμάνια, καθώς και διαμόρφωσή (με σπάτουλα) της τελικής τους επιφάνειας | 78 |
| Εικόνα 23. Συσκευή υπερήχων κατά την διάρκεια ανάδευσης σύνθεσης ενέματος..... | 80 |
| Εικόνα 24. Καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης πηλού που χρησιμοποιήθηκε για τα ενέματα..... | 82 |
| Εικόνα 25. Αποθήκευση δοκιμίων στις μήτρες..... | 83 |
| Εικόνα 26. Συντήρηση δοκιμίων ενεμάτων στο αεροστεγές κουτί..... | 83 |
| Εικόνα 27. Φωτογραφία ρηγματωμένων δοκιμίων ενεμάτων με τον τρόπο συντήρησης Π | 84 |
| Εικόνα 28. Ξήρανση του πηλού για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί το κοσκίνισμα του 86 | |
| Εικόνα 29. Φωτογραφία κατά την διάρκεια της δοκιμής για την αποτίμηση της καμπτικής αντοχής δοκιμίων ενεμάτων και κονιαμάτων..... | 90 |

| | |
|---|-----|
| Εικόνα 30. Μηχανή θλίψης κατά την διάρκεια της δοκιμής..... | 91 |
| Εικόνα 31. Διάταξη στην οποία τοποθετούνται οι κώνοι..... | 92 |
| Εικόνα 32. Ενδεικτικό διάγραμμα δείκτη ρευστότητας συναρτήσει του λόγου W/S (Miltiadou et al, 2013)..... | 93 |
| Εικόνα 33. Φωτογραφία ογκομετρικών κυλίνδρων 100ml που χρησιμοποιούνται στην μέτρηση της εξίδρωσης | 95 |
| Εικόνα 34. Προετοιμασία σύνθετων δοκιμίων διεπιφανειών υποβάθρου ενέματος για πλήρωσης του αρμού..... | 96 |
| Εικόνα 35. Υλοποίηση του παραπάνω προτύπου καθώς και διατήρηση της ορθογωνικότητας και επιπεδότητας μέσω των δύσκαμπτων οδηγών εκατέρωθεν των σύνθετων δοκιμίων ... | 96 |
| Εικόνα 36. Τράχυνση των τμημάτων των υποβάθρων στις διεπιφάνειες τους με το ένεμα | 97 |
| Εικόνα 37. Έγχυση του ενέματος με σύριγγα, καθώς και τρόπος με τον οποίο διατηρείται ο άδειος αρμός σε σταθερό πλάτος (καλούπι)..... | 97 |
| Εικόνα 38. Φωτογραφία κατά την διάρκεια έγχυσης του ενέματος στον αρμό σε δύο στάδια | 98 |
| Εικόνα 39. Μηχανή στην οποία γίνεται η δοκιμή της διάτμησης των σύνθετων δοκιμίων διεπιφανειών (αριστερά) και δοκίμιο κατά την διάρκεια της δοκιμής της διάτμησης (δεξιά) | 99 |
| Εικόνα 40. Σχηματική απεικόνιση των φορτίσεων που επιβάλλονται στο σύνθετο δοκίμιο κατά την διάρκεια της δοκιμής [Adami Ch., 2011]..... | 99 |
| Εικόνα 41. Τυπική μορφή αστοχίας Δ.Z | 100 |
| Εικόνα 42. Τυπική μορφή αστοχίας Z..... | 100 |
| Εικόνα 43. Φωτογραφίες τοιχίσκων (αριστερά με πηλοκονίαμα, δεξιά με πηλοασβεστοκονίαμα)..... | 101 |
| Εικόνα 44. Φωτογραφίες από την κατασκευή σε στάδια των δίστρων τοιχίσκων | 101 |
| Εικόνα 45. Φωτογραφίες από την κατασκευή σε στάδια των τρίστρων τοιχίσκων..... | 102 |
| Εικόνα 46. Οι λίθοι που χρησιμοποιήθηκαν στους τοιχίσκους στην μηχανή θλίψης και μετά την δοκιμή τους | 103 |
| Εικόνα 47. Φωτογραφία διάταξης που αποτιμά την θλιπτική αντοχή των τοιχίσκων | 104 |
| Εικόνα 48. Θέσεις οργάνων στην μπροστινή και στην πλάγια όψη των τοιχίσκων | 104 |
| Εικόνα 49. Φωτογραφίες του εξοπλισμού ανάδευσης με υπερήχους κι εφαρμογής των ενεμάτων στους τοιχίσκους | 106 |
| Εικόνα 50. Τυπική μορφή καμπτικής αστοχίας δοκιμίων πηλοκονιαμάτων (πάνω) και πηλοασβεστοκονιαμάτων (μεσαίο) | 109 |
| Εικόνα 51. Διάγραμμα καμπτικής αντοχής συναρτήσει του χρόνου ωρίμανσης για τα πρίσματα πηλοκονιάματος | 109 |
| Εικόνα 52. Τυπική μορφή θλιπτικής αστοχίας δοκιμίων πηλοκονιάματος (πάνω) πηλοασβεστοκονιάματος (κάτω)..... | 110 |
| Εικόνα 53. Διάγραμμα θλιπτικής αντοχής συναρτήσει του χρόνου ωρίμανσης των δοκιμίων των πηλοκονιαμάτων..... | 110 |
| Εικόνα 54. Συγκριτικό διάγραμμα μέσης καμπτικής αντοχής συναρτήσει του χρόνου ωρίμανσης πρισμάτων πηλοκονιάματος και πηλοασβεστοκονιάματος | 112 |

| | |
|---|-----|
| Εικόνα 55. Συγκριτικό διάγραμμα μέσης θλιπτικής αντοχής συναρτήσει του χρόνου ωρίμανσης πρισμάτων ηλοκοκονιάματος και ηλοασβεστοκονιάματος | 113 |
| Εικόνα 56. Διάγραμμα μέσης συστολής ξήρανσης συναρτήσει του χρόνου ωρίμανσης των πρισμάτων των ηλοκοκονιαμάτων | 114 |
| Εικόνα 57. Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστού συστολής ξήρανσης πρισμάτων ηλοκοκονιάματος- ηλοασβεστοκονιάματος | 115 |
| Εικόνα 58. Συγκριτικό διάγραμμα πυκνότητας συναρτήσει χρόνου ωρίμανσης πρισμάτων ηλοκοκονιαμάτων και ηλοασβεστοκονιαμάτων..... | 116 |
| Εικόνα 59. Συγκριτικά διαγράμματα μάζας συναρτήσει του χρόνου ωρίμανσης πρισμάτων ηλοκοκονιαμάτων και ηλοασβεστοκονιαμάτων..... | 116 |
| Εικόνα 60. Τυπική μορφή καμπτικής αστοχίας δοκιμίων ενεμάτων | 117 |
| Εικόνα 61. Διάγραμμα καμπτικής αντοχής συναρτήσει του λόγου νερού προς στερεά για πρίσματα σύνθεσης ενέματος NHL 5: 100% | 117 |
| Εικόνα 62. Διάγραμμα θλιπτικής αντοχής συναρτήσει του λόγου νερού προς στερεά για πρίσματα σύνθεσης ενέματος NHL 5: 100% | 118 |
| Εικόνα 63. Διάγραμμα καμπτικής αντοχής συναρτήσει του λόγου νερού προς στερεά για πρίσματα σύνθεσης ενέματος NHL 5: 90% Clay: 10% | 118 |
| Εικόνα 64. Διάγραμμα καμπτικής αντοχής συναρτήσει του λόγου νερού προς στερεά για πρίσματα σύνθεσης ενέματος NHL 5: 80% Clay: 20% | 119 |
| Εικόνα 65. Διάγραμμα καμπτικής αντοχής συναρτήσει του λόγου νερού προς στερεά για πρίσματα σύνθεσης ενέματος NHL 5: 70% Clay: 30% | 119 |
| Εικόνα 66. Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής της μείωσης της καμπτικής αντοχής συναρτήσει του λόγου W/S για πρίσματα συνθεσεων με ηλό σε σύγκριση με την NHL 5: 100% | 120 |
| Εικόνα 67. Διάγραμμα καμπτικής αντοχής για διαφόρους λόγους νερού προς στερεά συναρτήσει του ποσοστού ηλού στις συνθέσεις..... | 120 |
| Εικόνα 68. Συγκριτικό διάγραμμα καμπτικής αντοχής συναρτήσει του λόγου W/S για πρίσματα σύνθεσης ενέματος NHL 5: 63% Clay: 30% Poz: 7%..... | 121 |
| Εικόνα 69. Συγκριτικό διάγραμμα καμπτικής αντοχής συναρτήσει του χρόνου ωρίμανσης για πρίσματα σύνθεσης ενέματος NHL 5: 63% Clay: 30% Poz: 7% | 121 |
| Εικόνα 70. Συνολικό συγκριτικό διάγραμμα καμπτικής αντοχής συναρτήσει του λόγου W/S για τις 28 ημέρες ωρίμανσης | 122 |
| Εικόνα 71. Τυπική μορφή θλιπτικής αστοχίας δοκιμίου ενέματος..... | 122 |
| Εικόνα 72. Συνολικό συγκριτικό διάγραμμα καμπτικής αντοχής συναρτήσει του λόγου W/S για τις 28, 60 και 90 ημέρες ωρίμανσης..... | 123 |
| Εικόνα 73. Διάγραμμα θλιπτικής αντοχής συναρτήσει του ποσοστού του ηλού για διάφορους λόγους W/S..... | 124 |
| Εικόνα 74. Συγκριτικό διάγραμμα θλιπτικής αντοχής συναρτήσει του λόγου W/S για την σύνθεση NHL 5: 63% Clay: 30% Poz: 7% | 124 |
| Εικόνα 75. Συγκριτικό διάγραμμα θλιπτικής αντοχής συναρτήσει του χρόνου ωρίμανσης για την σύνθεση NHL 5: 63% Clay: 30% Poz: 7% | 125 |
| Εικόνα 76. Συγκριτικό διάγραμμα συστολής ξήρανσης συναρτήσει του λόγου W/S για τις 28 και 60 ημέρες ωρίμανσης | 126 |

| | |
|---|-----|
| Εικόνα 77. Διάγραμμα εν χρόνω μεταβολής της συστολής ξήρανσης για την σύνθεση ενέματος NHL 5: 100% | 127 |
| Εικόνα 78. Συγκριτικό διάγραμμα πυκνότητας συναρτήσει του λόγου W/S για τις 28 ημέρες ωρίμανσης..... | 128 |
| Εικόνα 79. Διάγραμμα εν χρόνω μεταβολής της πυκνότητας για τις συνθέσεις ενεμάτων | 128 |
| Εικόνα 80. Συγκριτικό διάγραμμα μάζας συναρτήσει του λόγου W/S για τις 28 ημέρες ωρίμανσης..... | 129 |
| Εικόνα 81. Διάγραμμα εν χρόνω μεταβολής της μάζας για τις συνθέσεις ενεμάτων | 129 |
| Εικόνα 82. Συγκριτικό διάγραμμα φαινόμενης πυκνότητας συναρτήσει του λόγου W/S για τις 0 ημέρες ωρίμανσης | 130 |
| Εικόνα 83. Συγκριτικό διάγραμμα δείκτη ρευστότητας συναρτήσει του λόγου W/S για τις συνθέσεις NHL 5: 100% και Clay: 100% | 139 |
| Εικόνα 84. Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστού εξίδρωσης συναρτήσει του λόγου W/S για συνθέσεις ενεμάτων NHL 5: 100% και Clay: 100% | 140 |
| Εικόνα 85. Συσσωματώματα μετά την ανάμιξη των ενεμάτων με την τοποθέτηση του πηλού πρώτα στην ανάμιξη | 141 |
| Εικόνα 86. Συγκριτικό διάγραμμα δείκτη ρευστότητας συναρτήσει του λόγου W/S για την σύνθεση NHL 5: 70% Clay: 30% με διαφορετική σειρά ανάμιξης | 142 |
| Εικόνα 87. Συνολικό διάγραμμα δείκτη ρευστότητας συναρτήσει του λόγου W/S | 144 |
| Εικόνα 88. Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστού εξίδρωσης συναρτήσει του λόγου W/S για όλες τις συνθέσεις ενεμάτων | 145 |
| Εικόνα 89. Καμπύλες επιστρατευόμενης διατμητικής τάσης συναρτήσει της επιβαλλόμενης ολίσθησης | 147 |
| Εικόνα 90. Τρόπος αστοχίας των σύνθετων δοκιμίων των διεπιφανειών για $\sigma_n = 0,1\text{MPa}$ (αριστερά) και $\sigma_n = 0,3\text{MPa}$ (δεξιά) για 28 ημέρες ωρίμανσης NHL 5: 63% Poz: 7% Clay: 30%(αριστερά), NHL 5: 70% Clay: 30%(μεσαίο), NHL 5: 100%(δεξιά) | 147 |
| Εικόνα 91. Τρόπος αστοχίας των σύνθετων δοκιμίων των διεπιφανειών για $\sigma_n = 0,1\text{MPa}$ και 90 ημέρες ωρίμανσης NHL 5: 63% Poz: 7% Clay: 30%(αριστερά), NHL 5: 70% Clay: 30%(μεσαία), NHL 5: 100%(δεξιά) | 148 |
| Εικόνα 92. Τρόπος αστοχίας των σύνθετων δοκιμίων των διεπιφανειών για $\sigma_n = 0,3\text{MPa}$ και 90 ημέρες ωρίμανσης NHL 5: 63% Poz: 7% Clay: 30%(μεσαία), NHL 5: 70% Clay: 30%(αριστερά), NHL 5: 100%(δεξιά)..... | 148 |
| Εικόνα 93. Διάγραμμα μέγιστης διατμητικής τάσης $\tau_{u,f}$ συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής της σύνθεσης των ενεμάτων για τις 28 ημέρες ωρίμανσης (αριστερά για $\sigma_n = 0,1\text{MPa}$, δεξιά για $\sigma_n = 0,3\text{MPa}$)..... | 149 |
| Εικόνα 94. Διάγραμμα μέγιστης διατμητικής τάσης $\tau_{u,f}$ συναρτήσει της καμπτικής αντοχής της σύνθεσης των ενεμάτων για τις 28 ημέρες ωρίμανσης (αριστερά για $\sigma_n = 0,1\text{MPa}$, δεξιά για $\sigma_n = 0,3\text{MPa}$)..... | 149 |
| Εικόνα 95. Διάγραμμα ολίσθησης $s_{u,f}$ για τις 28 ημέρες ωρίμανσης για $\sigma_n = 0,3\text{MPa}$ συναρτήσει την καμπτική (αριστερά) και θλιπτική (δεξιά) αντοχή των ενεμάτων..... | 150 |

| | |
|---|-----|
| Εικόνα 96. Καμπύλες διατμητικής τάσης και επιβαλλόμενης ολίσθησης, για όλα τα δοκίμια, καθώς και οι μέσες καμπύλες αυτών, για όλες τις συνθέσεις για τις 28 ημέρες ωρίμανσης ($\sigma_n=0,1\text{MPa}$) | 151 |
| Εικόνα 97. Διάγραμμα μέγιστης διατμητικής αντοχής $\tau_{u,f}$ συναρτήσει του χρόνου ωρίμανσης για όλες τις συνθέσεις για ορθή επιβαλλόμενη θλιπτική τάση $\sigma_n= 0,1\text{MPa}$ (αριστερά) $\sigma_n= 0,3\text{MPa}$ (δεξιά)..... | 152 |
| Εικόνα 98. Διάγραμμα ολίσθησης $s_{u,f}$ συναρτήσει του χρόνου ωρίμανσης για όλες τις συνθέσεις για ορθή επιβαλλόμενη θλιπτική τάση $\sigma_n= 0,1\text{MPa}$ και $\sigma_n= 0,3\text{MPa}$ | 153 |
| Εικόνα 99. Διάγραμμα μέγιστης διατμητικής τάσης για τις 28 και 90 ημέρες ωρίμανσης για όλες τις συνθέσεις ενεμάτων | 154 |
| Εικόνα 100. Διάγραμμα ολίσθησης για τις 28 και 90 ημέρες ωρίμανσης για όλες τις συνθέσεις ενεμάτων συναρτήσει της ορθής θλιπτικής επιβαλλόμενης τάσης | 155 |
| Εικόνα 101. Διάγραμμα παραμένουσας τάσης για τις 28 και 90 ημέρες ωρίμανσης για όλες τις συνθέσεις ενεμάτων συναρτήσει της ορθής θλιπτικής επιβαλλόμενης τάσης..... | 156 |
| Εικόνα 102. Διάγραμμα Συντελεστή Μεταβλητότητας C_v (%) της μέγιστης διατμητικής τάσης $\tau_{u,f}$ συναρτήσει της επιβαλλόμενης ορθής τάσης σ_n για τις 28 και 90 ημέρες ωρίμανσης | 156 |
| Εικόνα 103. Διάγραμμα Συντελεστή Μεταβλητότητας C_v (%) $s_{u,f}$ συναρτήσει της επιβαλλόμενης ορθής τάσης σ_n για τις 28 και 90 ημέρες ωρίμανσης..... | 157 |
| Εικόνα 104. Παθολογία τοιχίσκου ΑΠ1 (αριστερά) και Π1 (δεξιά) πριν τα ενέματα | 161 |
| Εικόνα 105. Παθολογία τοιχίσκου ΑΠ1 πριν τα ενέματα..... | 162 |
| Εικόνα 106. Παθολογία τοιχίσκου ΑΠ1(αριστερά) και Π1 (δεξιά) μετά τα ενέματα | 163 |
| Εικόνα 107. Παθολογία τοιχίσκου ΤΑΠ1 μετά τα ενέματα..... | 164 |
| Εικόνα 108. Τυπικό πλάτος ρωγμών που πλήρωσαν τα ενέματα στον τοιχίσκο Π1 | 166 |
| Εικόνα 109. Συγκέντρωση μεγάλης ποσότητα ενέματος στο κέντρο της του τοιχίσκου Π1 | 166 |
| Εικόνα 110. Τυπικά παραδείγματα ρωγμών μικρότερου πλάτους στον τοιχίσκο Π1..... | 167 |
| Εικόνα 111. Δίκτυο ενέματος στον τοιχίσκο Π1 | 168 |
| Εικόνα 112. Δίκτυο ενέματος διαμέσου ρωγμών στον τοιχίσκο Π1 | 168 |
| Εικόνα 113. Συνάφεια ενέματος-λίθων-κονιάματος | 169 |
| Εικόνα 114. Τυπική πλήρωση πόρων κονιάματος | 169 |
| Εικόνα 115. Ρηγμάτωση ενέματος στον τοιχίσκο ΑΠ1 | 170 |
| Εικόνα 116. Συγκέντρωση ενέματος στο κέντρο της τοιχοποιίας και ισχυροποίηση διεπιφανειών στρώσεων | 170 |
| Εικόνα 117. Τυπικές εικόνες μη πληρωμένων ή εν μέρει πληρωμένων ρωγμών από το ένεμα στον τοιχίσκο ΑΠ1 | 171 |
| Εικόνα 118. Ενδεικτικό δίκτυο ενέματος στον τοιχίσκο ΤΑΠ1 | 173 |
| Εικόνα 119. Συνάφεια λίθων- ενέματος- κονιάματος | 174 |

1. Ο πηλός ως κατασκευαστικό υλικό

1.1 Εισαγωγή

Ο πηλός αποτελεί από τα αρχαιότερα, και όπως έχει αποδειχθεί, διαχρονικότερα, φυσικά δομικά υλικά. Τα δομήματα που αποτελούνται από φυσικά υλικά, είτε είναι πηλός, είτε λίθοι, αποτελούν ένα μεγάλο μέρος της δομημένης πολιτιστικής κληρονομιάς. Συγκεκριμένα, αυτό αντικατοπτρίζεται στο γεγονός ότι το ένα τρίτο του παγκόσμιου πληθυσμού κατοικεί σε τέτοια κτίρια. Ειδικά στις αναπτυσσόμενες χώρες περισσότερο από το ήμισυ του συνόλου των κατοικιών αποτελούνται από πηλό [Πιτυτζόγια Α., 2014]. Σε ορισμένα μέρη του κόσμου ο πηλός λαμβάνει την μορφή ωμοπλίνθων ή χυτών τοίχων (Υεμένη, Βόρεια και Νότια Αφρική), ενώ σε άλλα χρησιμοποιείται ως συνδετικό κονίαμα (Ν.Α. Ευρώπη, όπως π.χ. είναι η Ελλάδα). Σε κάθε περιοχή του κόσμου η αρχιτεκτονική των κατασκευών από φυσικά υλικά είναι προσαρμοσμένη στο κλίμα και στην κουλτούρα της εκάστοτε κοινωνίας. Έως και σήμερα διατηρούνται δομήματα που αποτελούνται εξ ολοκλήρου ή εν μέρει από πηλό, τα οποία βρίσκονται, κυρίως, στην περιφέρεια και όχι σε αστικά κέντρα [Ραπαγιάννη Ι., 2006].

Επομένως, είναι βασική η μελέτη των κατάλληλων τρόπων ενίσχυσης αυτού του είδους των τοιχοποιιών, οι οποίες αποτελούνται από πηλό είτε με την μορφή ωμοπλίνθων είτε με την μορφή συνδετικού κονιάματος. Συνήθως, κατασκευές τέτοιου τύπου είτε εγκαταλείπονται είτε υφίστανται ακατάλληλες επεμβάσεις. Η εγκατάλειψη τόσο του ίδιου του υλικού όσο και των διαφόρων τεχνικών κατασκευής που σχετίζονται με αυτό οφείλονται, κυρίως, στην κακή συμπεριφορά των κατασκευών από ωμοπλινθοδομή ή των λιθοκτιστων κατασκευών με πηλοκονίαμα έναντι σεισμού (π.χ. Ιράν, Λέσβος). Εκτός όμως από τον σεισμό, ένα επίσης σημαντικό πρόβλημα το οποίο αντιμετωπίζουν αυτές οι κατασκευές, είναι η διάβρωση από το νερό [Μπέη Γ., 2004]. Για να αντιμετωπιστούν αυτές οι δυο βασικές πηγές τρωτότητας, έχουν γίνει διάφορες προσπάθειες προστασίας ή/και ενίσχυσης τέτοιου τύπου κατασκευών.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, όμως, για την συντήρηση ή την επανάχρηση των κτιρίων αυτών χρησιμοποιούνται τεχνικές που δεν συνάδουν με την ιδιαιτερότητα της φύσης του υλικού. Παρόλο που τα υλικά δόμησης τέτοιων κατασκευών είναι φυσικά, βρίσκονται εν αφθονία και δεν έχουν υψηλό κόστος, το εγχείρημα της ενίσχυσής τους είναι πρόβλημα πολυσχιδές, χρονοβόρο και κοστοβόρο. [Ραπαγιάννη Ι., 2006]. Το βασικό κενό που υπάρχει στην προσπάθεια ενίσχυσης αυτών των κατασκευών, αφορά την έλλειψη κατάλληλων κι αποδοτικών υλικών τα οποία να είναι συμβατά (φυσικοχημικά, κοκκομετρικά, αισθητικά κ.α.) με τα ήδη υπάρχοντα υλικά. Η έλλειψη βασικής κι εφαρμοσμένης έρευνας εμποδίζει την βελτίωση και τυποποίηση των υλικών και τεχνικών σχετικών με τον πηλό [Σταθόπουλος Κ., 2015]. Οι κτιριακοί κανονισμοί σε πολλές χώρες αγνοούν τις κατασκευές που αποτελούνται εξ ολοκλήρου ή εν μέρει από πηλό, αν και τα τελευταία χρόνια, ειδικά στα τέλη του 19^{ου} αιώνα και στις αρχές του 20^{ου}, το ενδιαφέρον διεθνώς έχει αυξηθεί.

Η έρευνα γύρω από τις κατασκευές με πηλό περιορίζεται, κατά κύριο λόγο, στις ωμοπλινθοδομές, που έχουν αποτελέσει αντικείμενο μελέτης των [Ραπαγιάννη Ι., 2006],

[Μπέη Γ., 2004], [Earthen Constructions, 1989] κι άλλων. Σε αυτές τις έρευνες, γίνεται αναφορά στο συνδετικό κονίαμα που έχει ως βάση τον πηλό, ωστόσο η έρευνα αφορά τις κατασκευές αποκλειστικά ωμοπλινθοδομών. Υπάρχουν, όμως κι οι παραδοσιακές αργολιθοδομές, οι οποίες αποτελούν σημαντικό κομμάτι των ιστορικών κατασκευών, ειδικά στην χώρα μας, στις οποίες δεν έχει πραγματοποιηθεί λεπτομερής καταγραφή των χαρακτηριστικών τους και των υλικών τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην υπάρχει μία σαφής κατεύθυνση για την ενίσχυση τους, προστατεύοντας ταυτόχρονα τον ιστορικό τους χαρακτήρα.

1.2 Ιστορική αναδρομή

Η κατασκευή δομημάτων από πηλό είναι γνωστή πάνω από 9000 χρόνια. Ο πηλός έχει χρησιμοποιηθεί από τα προϊστορικά χρόνια ήδη, όχι μόνο ως δομικό υλικό κατοικιών, αλλά και θρησκευτικών κτιρίων [Πιτυτζόγια Α., 2014]. Από την νεολιθική εποχή κιόλας, οι άνθρωποι τον χρησιμοποιούσαν για την κατασκευή φέρουσας τοιχοποιίας, πλίνθων, πηλοκονιαμάτων, καθώς και πηλοεπιχρισμάτων, με την κατάλληλη ανάμιξη διαφόρων πηλών και αδρανών, μαζί με διάφορα πρόσμικτα (ίνες, κονίες κ.ο.κ.) και την απαραίτητη ποσότητα νερού.



Εικόνα 1. Χρήσεις του πηλού σε παραδοσιακές κατασκευές

Στον οικισμό Ιεριχώ (8000 π.Χ.) ανακαλύφθηκε μεγάλη ποικιλία σχημάτων ωμοπλίνθων, τα οποία αναπαριστούσαν την μορφή των τοπικών λίθων [Πάχτα Β., 2011]. Στο ρωσικό Τουρεστάν έχουν καταγραφεί κτίσματα με χρήση κατοικίας, τα οποία είναι κατασκευασμένα από ωμοπλίνθους, οι οποίοι χρονολογούνται από το 8000 έως το 6000 π.Χ. [Πιτυτζόγια Α., 2014]. Επίσης, τα προϊστορικά κτίσματα στην Ελλάδα, βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στον πηλό, με την μορφή της κοινής αργολιθοδομής με παχύ στρώμα συνδετικού πηλοκονιάματος. Τέτοια παραδείγματα υπάρχουν το 6000 π.Χ. στην Θεσσαλία, στο Σιδάρι Κέρκυρας, όπως επίσης και στους νεολιθικούς οικισμούς του Σέσκλου και

Διμηνίου [Πάχτα Β., 2011]. Στην Μεσοποταμία από το 4000 π.Χ. κιάλας, ο πηλός ήταν κυρίαρχο δομικό υλικό. Στις παραπάνω κατασκευές, συνήθης πρακτική ήταν ο “οπλισμός” τους με φυσικά υλικά για την παραλαβή εφελκυστικών δυνάμεων, όπως ξύλα, ίνες και καλάμια. Το Σινικό Τείχος, ηλικίας 4000 χρόνων, είχε κτιστεί αρχικά μόνο από συμπίεσμένο πηλό κι αργότερα προστέθηκε η επικάλυψη από πέτρες και πλίνθους, δίνοντάς του την ψευδαίσθηση ενός πέτρινου τείχους. Στην Γερμανία, ο πηλός χρησιμοποιούνταν από την εποχή του Χαλκού (2800-1100 π.Χ.) για την πλήρωση των ξύλινων πλαισίων των κτιρίων ή για να σφραγίσουν τοίχους που κατασκευάζονταν από κορμούς δέντρων [Πιτυτζόγια Α., 2014]. Στην Ελλάδα, κατά τους προϊστορικούς χρόνους, ο πηλός χρησιμοποιήθηκε ως κύριο δομικό υλικό από την Πρώιμη Εποχή του Χαλκού (2800-1900 π.Χ.) στις πλινθόκτιστες κατασκευές ως συνδετικό πηλοκονίαμα στους οριζόντιους αρμούς [Μπέη Γ., 2004]. Στον ελλαδικό χώρο η κατασκευή κτιρίων με την παραδοσιακή τεχνική των ωμοπλίνθων ήταν αρκετά διαδεδομένη κυρίως σε αγροτικές περιοχές, πρωτίστως πεδινές, πλησίον ποταμών και λιμνών (Θεσσαλία, Μακεδονία, νησιά του Βόρειου Αιγαίου, Κρήτη).¹ Σήμερα αντιπροσωπευτικά παραδείγματα τέτοιων κατασκευών συναντώνται στα Κορέστεια και στις Πρέσπες, στην περιοχή της Καστοριάς και της Φλώρινας, στα χωριά του Θεσσαλικού κάμπου και της Μακεδονίας καθώς και στα νησιά του Αιγαίου [Πιτυτζόγια Α., 2014].



Εικόνα 2. Εγκαταλελειμμένα σπίτια από ωμοπλίνθους στην Φλώρινα

Από πηλό ήταν κι οι περισσότερες επενδύσεις τοίχων και πατωμάτων. Στην μινωική αρχιτεκτονική (2000-1500 π.Χ.) της Κρήτης, όπου τα κτίρια κατέληγαν σε επίπεδο δώμα, έχουν βρεθεί σε πολλές θέσεις κομμάτια από παχύ στρώμα πηλού [Πιτυτζόγια Α., 2014]. Στο Μεξικό, στην Κεντρική και Νότια Αμερική, η κατασκευή κτιρίων από ωμοπλίνθους αποτελούσε ευρέως διαδεδομένη πρακτική σε όλους τους προ-Κολομβιανούς πολιτισμούς (1200-400 π.Χ.) [Πιτυτζόγια Α., 2014]. Στην Κλασική Ελλάδα (499-323 π.Χ.) οι τοιχοποιίες με δομικές μονάδες λίθων ήταν είτε ξερολιθιές, είτε είχαν πολύ λεπτούς αρμούς από πηλοκονίαμα. Επίσης, υπάρχουν καταγραφές από το 100 π.Χ. που αποκαλύπτουν την ύπαρξη φρουρίων από πηλό στην Ισπανία. Στην Οθωμανική περίοδο (15^{ος} αι. μ.Χ.) παρόλο που τα κονιάματα ήταν βασισμένα στην άσβεστο, ο πηλός χρησιμοποιούνταν ως ποζολάνη, προσδίδοντας υδραυλικές ιδιότητες στο κονίαμα [Παπαδημητρίου Δ., 2017].

¹ Η χρήση των ωμοπλίνθων περιορίστηκε περί τα τέλη της δεκαετίας του 1950.

Στην Μεσαιωνική περίοδο (13^{ος}-17^{ος} αι. μ.Χ.), ο πηλός χρησιμοποιήθηκε στην κεντρική Ευρώπη σαν υλικό πλήρωσης των ξύλινων πλαισίων των κατοικιών, όπως επίσης και για την κάλυψη σκεπών από άχυρο ώστε να έχουν αντίσταση στην φωτιά. Στην Γαλλία, η τεχνική του συμπιεσμένου χώματος (terre pisé) κυριάρχησε από τον 15^ο έως τον 19^ο αιώνα. Συγκεκριμένα, στην Λυόν υπάρχουν αρκετά κτίρια, τα οποία είναι αντιπροσωπευτικά αυτής της τεχνικής. Είναι ηλικίας τουλάχιστον 300 ετών, και αποτελούν λειτουργικά και κατοικήσιμα κτίσματα έως και σήμερα [Πιτυτζόγια Α., 2014]. Γενικότερα η χρήση του πηλού ως δομικού υλικού στην Αφρική είναι ιδιαίτερος διαδεδομένη ακόμα και σήμερα, δίνοντας έμφαση στην τεχνική των ωμόπλινθων (“adobe”), η οποία κυριάρχησε στην Μέση Ανατολή και στην Βόρεια Αφρική. Οι ωμόπλινθοι έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως και για την κατασκευή προστατευτικών τειχών ολόκληρων πόλεων, με ενδεικτικά παραδείγματα τις πόλεις Shibah και Tarim στην Βόρεια Υεμένη, τα τείχη των οποίων χρονολογούνται μεταξύ του 15^{ου} και 19^{ου} αι. [Πιτυτζόγια Α., 2014]. Στις Η.Π.Α. αναπτύχθηκε βιομηχανοποιημένη παραγωγή adobe.



Εικόνα 3. Οκταώροφα κτίρια κατοικιών, 500 χρόνων, από ωμόπλινθους στο Shibam της Υεμένης [Πιτυτζόγια Α., 2014]



Εικόνα 4. Άγιος Δημήτριος, Μαρούσι (προσωπικό αρχείο κας Νικολοπούλου)

Από μαρτυρίες τεχνιτών καθώς και μηχανικών που δραστηριοποιούνται στο κομμάτι της συντήρησης παραδοσιακών κατασκευών, συνάγεται ότι υπάρχουν κτίσματα από λιθόκτιστη

φέρουσα τοιχοποιία με συνδεδετικό πηλοκονίαμα σε αφθονία στην Ελλάδα. Εντοπίζονται κυρίως στις επαρχιακές περιοχές, αλλά και στο κέντρο της Αθήνα, και σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ακόμα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι λιθόκτιστες κατοικίες στην Λακωνική Μάνη, σε μορφή Πύργων. Σε πρόσφατες έρευνες στα σεισμόπληκτα νησιά του Β.Α. Αιγαίου, αποδείχθηκε ότι σε πολλούς οικισμούς συμπεριλαμβάνονται τέτοιου τύπου κατασκευές (π.χ. στην Βρύσσα της Λέσβου, στην Κω κ.α). Ξεφεύγοντας από τα ελληνικά σύνορα, δεν είναι λίγες οι κατασκευές τέτοιου τύπου που βρίσκονται στην Αλβανία και στην Π.Γ.Δ.Μ.. Όλα αυτά όμως αφορούν μόνο αποσπασματικές μαρτυρίες και μακροσκοπικές παρατηρήσεις.

Από τον 18^ο αι., η ανάπτυξη των αστικών κέντρων κι η βιομηχανική ανάπτυξη οδήγησε στην κατασκευή υψηλότερων κτιρίων και στην μαζική παραγωγή δομικών υλικών, που να ανταποκρίνονται στις σύγχρονες απαιτήσεις και τεχνικές κατασκευής. Από τον 20^ο αι. ιδιαίτερα, μετά την “κυριαρχία” του τσιμέντου στις κατασκευές, η κατασκευή με πηλό εγκαταλείφθηκε, με αποτέλεσμα οι κατασκευές που αποτελούν κομμάτια της πολιτιστικής κληρονομιάς να καταστρέφονται με τις επεμβάσεις που πραγματοποιούνταν σε αυτές. Τα τμήματα της κατασκευής που είχαν καταστραφεί ή παρουσίαζαν εκτεταμένες ζημιές, αντικαταστάθηκαν από σκελετό σκυροδέματος, ή ενισχύθηκαν με τσιμεντιτικά υλικά, πράγμα το οποίο οδήγησε στην καταστροφή του αυθεντικού υλικού, και κατ’ επέκταση στην ίδια την μορφολογία της κατασκευής. Ως άμεσο επακόλουθο των παραπάνω καταστάσεων, η χρήση του πηλού περιορίστηκε στις λιγότερο αναπτυγμένες, αγροτικές κοινωνίες, στις οποίες οι κάτοικοι κατασκεύαζαν μόνοι τους τα σπίτια τους [Σταθόπουλος Κ., 2015]. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εγκατάλειψη του πηλού ως υλικού δόμησης δεν είναι μόνο αποτέλεσμα της εισαγωγής νέων υλικών στην δόμηση: βασικός παράγοντας που έστρεψε το σύγχρονο ενδιαφέρον σε άλλα υλικά, αφορά την τρωτότητα των κατασκευών από πηλό στις σεισμικές και περιβαλλοντικές δράσεις, η οποία κατέστησε τις τοιχοποιίες αυτές ακατάλληλες ως σύγχρονο δομικό σύστημα.



Εικόνα 5. Χαρακτηριστικό παράδειγμα παθολογίας σε λιθοδομές με πηλοκονίαμα στην Λήμνο (αποσάθρωση κονιάματος καθώς και ανάπτυξη φυτών)

1.3 Πηλός

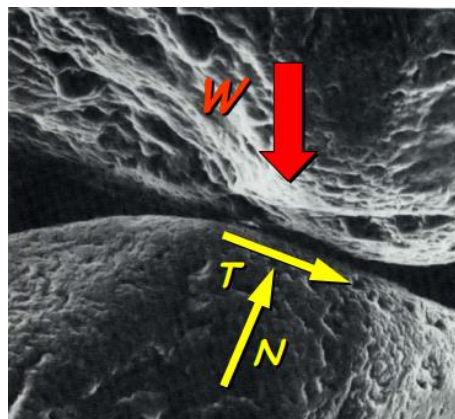
Ο πηλός αποτελείται από ένα μίγμα από χαλίκι, άμμο, ιλύ και άργιλο. Επίσης στον πηλό εμφανίζονται άλατα, οξείδια και οργανικά υλικά. Η ποικιλία των πηλών στην γη είναι πολύ μεγάλη. Η σύσταση και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους εξαρτώνται από τις τοπικές συνθήκες. Ο πηλός έχει χρησιμοποιηθεί αρκετά ως δομικό υλικό, λόγω του εύχρηστου και πρακτικού του χαρακτήρα. Μέσα από τον διαποτισμό του με νερό, προκύπτει πολτός μεγάλης πλαστικότητας. Η πήξη και σκλήρυνση του πολτού οφείλεται στην εξάτμιση του νερού και χαρακτηρίζεται από συστολή που είναι ανάλογη της περιεκτικότητας σε άργιλο. Ο διαποτισμός του πηλού με νερό επαναφέρει το υλικό στην αρχική του κατάσταση. Το υλικό αυτό αποτελεί την πρώτη ύλη για την κατασκευή πλίνθων, ολόσωμων τοιχίων, κονιαμάτων, επιχρισμάτων και προϊόντων κεραμευτικής.

Κάθε τύπος πηλού ανταποκρίνεται καλύτερα στις απαιτήσεις συγκεκριμένων κατασκευών. Για παράδειγμα, τα χαλικώδη ορεινά εδάφη είναι πιο κατάλληλα για καλουπωτές τοιχοποιίες (εφόσον περιέχουν αρκετή άργιλο), ενώ τα παραποτάμια εδάφη, που είναι πιο λασπώδη και άρα λιγότερο ανθεκτικά στις καιρικές συνθήκες έχουν μικρότερη αντοχή σε συμπίεση. Σε γενικές γραμμές, σχεδόν όλοι οι πηλοί μπορούν χρησιμοποιηθούν στην δόμηση αρκεί να μην περιέχουν οργανικές προσμίξεις. Ο πηλός μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να βελτιωθούν ορισμένα χαρακτηριστικά του. Τέτοιες τροποποιήσεις αφορούν στην αλλαγή της κοκκομετρικής του καμπύλης, προσθήκη υδραυλικών κονιών (τσιμέντο, άσβεστος, ποζολάνη), προσμίκτων ή ρητινών και στην προσθήκη φυτικών ζωικών ή και συνθετικών ινών [Parayianni I., 2006].

1.3.1 Συστατικά πηλού

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο πηλός συνίσταται από ένα μίγμα χαλικιού, άμμου, ιλύος και αργίλου. Πιο αναλυτικά, τα συστατικά αναλύονται ως εξής:

- Χονδρόκοκκα χημικώς αδρανή συστατικά, όπως είναι το ρυζάκι, οι χάλικες, τα σκύρα (4-32mm) και η άμμος (0,08–4mm) τα οποία προσδίδουν αντοχή στο υλικό μέσω της επαφής των αδρανών (μη συνεκτικά αδρανή),



Εικόνα 6. Εντατική κατάσταση μεταξύ κόκκων σε επαφή σε μη συνεκτικά εδάφη

- Λεπτόκοκκα χημικώς αδρανή συστατικά, τα οποία ονομάζονται ιλύες (0,002-0,08mm), που απορροφούν σχετικά λίγο νερό. Όπως θα αναφερθεί και παρακάτω, η ιλύς κι η άργιλος αποτελούν απόθεση υλικού αποσάθρωσης πετρωμάτων. Λόγω διακυμάνσεων της μεταφοράς και απόθεσης αυτού του υλικού εμφανίζονται συχνά στρωματοειδείς σχηματισμοί με μεταβαλλόμενη κοκκομετρική σύσταση. Από άποψη κοκκομετρικής διαβάθμισης, σύμφωνα με τις γερμανικές προδιαγραφές (DIN 66100) η άργιλος και η ιλύς είναι το κοκκομετρικό κλάσμα του ιζηματογενούς πετρώματος που έχει μέγεθος κόκκων <0.045mm. Στο αμερικάνικο σύστημα ταξινόμησης A.U.S.C.S. ορίζεται ως ιλύς (silt) το κλάσμα κόκκων διαμέτρου 2-50μm και ως άργιλος το κλάσμα κόκκων <2μm [Σταθόπουλος Κ., 2015]. Η ιλύς μειώνει σε κάποιο ποσοστό την τριβή μεταξύ των αδρανών. Επίσης, προσδίδει σταθερότητα στο έδαφος γεμίζοντας τα κενά μεταξύ των κόκκων [Earthen Constructions, 1989]. Τα φιλμ νερού ανάμεσα στους κόκκους των αδρανών της, της προσδίδουν ένα συγκεκριμένο βαθμό συνοχής. Χαρακτηρίζεται από μεγάλη διαπερατότητα, και μικρού βαθμού διόγκωση και συστολή.
- Λεπτόκοκκα χημικώς ενεργά συστατικά αργιλοπυριτικής βάσεως (συνεκτικά αδρανή). Αυτά αφορούν την άργιλο, με την ορυκτολογική της έννοια. Ο όρος άργιλος δεν είναι μονοσήμαντος. Αναφέρεται τόσο σε υλικά με μέγεθος κόκκων μικρότερο από 2μm όσο και στην κατηγορία ορυκτών (ιζηματογενές πέτρωμα με ορισμένο ποσοστό αργιλικού κλάσματος) με παρόμοια χημική σύνθεση και κοινά κρυσταλλικά χαρακτηριστικά. Στην Γεωλογία ως άργιλοι ή πελίτες χαρακτηρίζονται πολύ λεπτόκοκκα πετρώματα που δεν έχουν υποστεί μεταμόρφωση ή διαγένεση. Στην περίπτωση αυτή η ονομασία “άργιλος” αφορά κατά αποκλειστικότητα τον χαρακτηρισμό της αργίλου μέσα από την κοκκομετρία της, η οποία σχετίζεται άμεσα με τις συνθήκες σχηματισμού της. Συγκεκριμένα, οι άργιλοι σχηματίζονται μέσω απόθεσης προϊόντων αποσάθρωσης πετρωμάτων, τα οποία έχουν μεταφερθεί κυρίως από το νερό και σπανιότερα με τον αέρα, συχνά σε μεγάλες αποστάσεις, μέσω λεκανών ή κόλπων. Μαζί με αυτά συνυπάρχουν συχνά νεοσχηματισθέντα ορυκτά, κατάλοιπα οργανισμών και λεπτοδιαμερισμένες οργανικές ουσίες. Από φυσικής άποψης, συνήθως έχουν ένα πεπλατυσμένο επίμηκες σχήμα. Διαφέρουν από τους άλλους κόκκους αδρανών στην χημική τους σύσταση και στις φυσικές τους ιδιότητες. Η ειδική τους επιφάνεια είναι μεγαλύτερη από σκληρότερους στρογγυλούς ή γωνιώδεις κόκκους. Η άργιλος είναι ευάλωτη σε διόγκωση και συστολή, μέσω της προσθήκης ή αφαίρεσης αντίστοιχα νερού από αυτήν. Τα αργιλικά μόρια είναι φορτισμένα ηλεκτρικά και σε διάλυμα νερού δημιουργείται ένα δυναμικό μεταξύ των μορίων και του διαλύματος. Προσθέτοντας στο δυναμικό αυτό ανιόντα ή κατιόντα είναι δυνατό να τροποποιηθεί η συμπεριφορά των μορίων, ενδυναμώνοντας τα. Με αυτόν τον τρόπο ταξινομούνται σε στοιβάδες ενώ αντίθετα διαχωρίζονται. Σε ξηρή κατάσταση, οι ελκτικές δυνάμεις υπερέχουν με αποτέλεσμα τα μόρια-κόκκοι να πλησιάζουν. Αυτές οι ελκτικές δυνάμεις ονομάζονται Van der Waals και αποτελούν δυνάμεις συνοχής, με αποτέλεσμα την συγκόλληση των αργιλικών μορίων μεταξύ τους, αλλά και με τα υπόλοιπα αδρανή του μίγματος του πηλού, ανεξαρτήτως κοκκομετρίας και ορυκτολογικής σύστασης.
- Επίσης, στα συστατικά του πηλού περιλαμβάνονται και άλλα στοιχεία λεπτόκοκκα και δραστικά που μπορεί να έχουν είτε θετικές επιδράσεις, όπως είναι τα οξειδία του

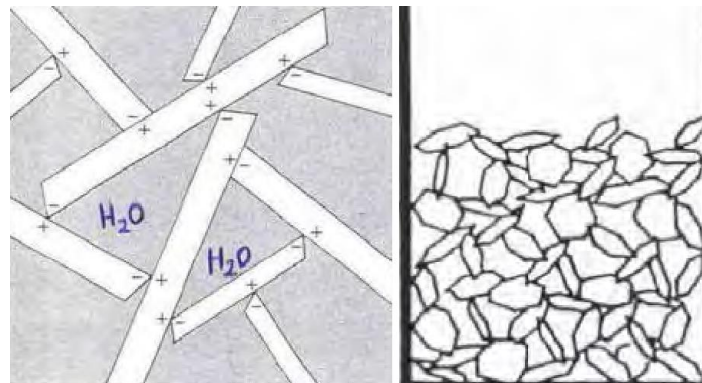
σιδήρου είτε αρνητικές όπως είναι τα θειικά οξέα, τα χλωρικά οξέα και τα οργανικά υλικά [Μπέη Γ., 2004].

1.3.2 Ιδιότητες αργιλικού ορυκτού

Οι ιδιότητες των κόκκων της αργίλου εξαρτώνται από i) την ορυκτολογική τους σύσταση, ii) το σχήμα και το μέγεθός τους, iii) την αντοχή των δομικών δεσμών τους, iv) την υφή και την κατάσταση (πυκνότητα και ποσοστό υγρασίας) τους. Θα πρέπει να τονιστεί πως τα χαρακτηριστικά του αργιλικού εδάφους εξαρτώνται σε βάθος από την αλληλεπίδραση με το νερό. Οι μικροί κόκκοι της αργίλου επηρεάζουν την αναπτυσσόμενη συνοχή, η οποία αποτελεί την κυριότερη από τις ιδιότητες των εδαφών και βασικό όρο της εδαφομηχανικής.

Τα υψηλά ποσοστά αργίλου στον πηλό αντικατοπτρίζονται στην υψηλή απορρόφηση και ικανότητα κατακράτησης νερού, στην χαμηλή διαπερατότητα, στην πλαστικότητα κ.α.. Εν γένει, όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό αργίλου τόσο μεγαλύτερη είναι η συμπίεστικότητα, μεγαλύτερη η συνοχή και μικρότερη η γωνία τριβής. Η πιο σημαντική από αυτές τις ιδιότητες είναι η συνεκτικότητα, που εκδηλώνεται μέσω της εφελκυστικής τους αντοχής. Τα εδάφη έχουν την ικανότητα να αντιστέκονται σε εφελκυστικές δυνάμεις. Αυτή η αντίσταση οφείλεται στην παρουσία των δομικών δεσμών μεταξύ των στερεών κόκκων [Σταθόπουλος Κ., 2015].

Τα αργιλικά ορυκτά χαρακτηρίζονται από την έντονη έλξη για το νερό, μερικά από αυτά διογκώνονται εύκολα και μπορούν ακόμα και να διπλασιάσουν το πάχος τους με την επαφή τους με το νερό. Η ενυδάτωση και η αφυδάτωση μπορεί να αλλάξει το πάχος ενός σωματιδίου πηλού σχεδόν 100%. Τα μόρια του νερού έλκονται δυνατά από τις επιφάνειες των αργιλικών ορυκτών ενώ η διαδικασία με την οποία ορισμένα ορυκτά αργίλου διογκώνονται όταν απορροφούν νερό είναι αναστρέψιμη. Η διογκωση και η συστολή ανταποκρίνεται στις αλλαγές των περιβαλλοντικών συνθηκών [Πιτυτζόγια Α., 2014].



Εικόνα 7. Δομή “house of cards” [Σταθόπουλος Κ., 2015]

Οι περισσότεροι πηλοί έχουν την ικανότητα να απορροφούν ιόντα (ηλεκτρικά φορτισμένα άτομα και μόρια) από ένα διάλυμα και να απελευθερώνουν τα ιόντα αργότερα, όταν αλλάζουν οι συνθήκες. Το φορτίο των φύλλων είναι κατά κανόνα αρνητικό. Αυτό σημαίνει ότι οι άργιλοι τείνουν να προσροφούν κατιόντα. Η ικανότητα ανταλλαγής ιόντων αφορά την φορτισμένη επιφάνεια των αργιλικών ορυκτών. Τα ιόντα μπορεί να έλκονται στην επιφάνεια

ενός σωματιδίου πηλού ή να παραλαμβάνονται εντός της δομής των ορυκτών, όμως αυτή η προσρόφηση χαρακτηρίζεται από τον ανταλλάξιμο χαρακτήρα της. Η προσρόφηση κατιόντων ή ανιόντων στοχεύει στην εξουδετέρωση του φορτίου των αργλικών φύλλων. Η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων χρησιμοποιείται στον προσδιορισμό του ποσού των ανταλλάξιμων ιόντων που μπορούν να συγκρατηθούν σε μια αργλική δομή. Η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων είναι από τις πιο σημαντικές ιδιότητες των αργλικών ορυκτών διότι “μετρά” την ειδική επιφάνεια και το φορτίο σε αυτήν την επιφάνεια καθώς και τον αριθμό των ιόντων που έχουν απορροφηθεί [Σταθόπουλος Κ., 2015].

1.4 Χρήσεις πηλού στην δόμηση

Ο πηλός, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, αποτέλεσε από τα πρώτα υλικά δόμησης στην ιστορία των κατασκευών, αρχικά σε άλλον ρόλο και όχι απαραίτητα φέροντα, όπως π.χ. σε ρόλο επιχρίσματος, κονιάματος δόμησης και επίστρωσης δαπέδων. Στην συνέχεια, με την πάροδο του χρόνου και με την ανάπτυξη της τεχνολογίας της δόμησης, χρησιμοποιήθηκε ως κύριο υλικό κατασκευής σε ποικίλες μορφές. Για λόγους πληρότητας στην παρούσα εργασία αναφέρονται όλοι οι καταγεγραμμένοι τύποι δόμησης με πηλό, που υπάρχουν στην βιβλιογραφία, ενώ στο πειραματικό μέρος, θα εξεταστεί μόνο η περίπτωση της αργολιθοδομής με δύο είδη πηλοκονιαμάτων.

1.4.1 Ωμοπλινθοδομές (adobe)



Εικόνα 8. Χαρακτηριστική κατασκευή με ωμοπλίνθους

Η μέθοδος παραγωγής των adobe, είναι πολύ παλιά –χιλιάδων χρόνων– με καταγωγή από την Μεσοποταμία [Μπέη Γ., 2004]. Η τεχνική των ωμοπλίνθων συμπεριλαμβάνει την χρήση πηλού με μεγάλο ποσοστό αργλικού ορυκτού, σε συνδυασμό με πρόσθετα κλάσματα εδάφους (όπως χαλίκια, άμμος) ή κεραμικά προϊόντα. Σε πολλές περιπτώσεις έχει παρατηρηθεί η μίξη του παραπάνω μίγματος με φυσικές ίνες, άχυρα ή ζωικές τρίχες. Σε γενικές γραμμές, τόσο από την βιβλιογραφία αλλά και από καταγραφές, η κατασκευή των πλίνθων γινόταν χωρίς ή μέσα σε καλούπια, τα οποία ήταν ανοιχτά πάνω και κάτω και το γέμισμα των οποίων γίνεται πάνω στο έδαφος. Η συμπύκνωσή τους πραγματοποιείται με το χέρι. Στην συνέχεια ακολουθούσε η αφαίρεση των καλουπιών και το στέγνωμά τους στον ατμοσφαιρικό αέρα. Στις κατασκευές από ωμοπλινθοδομές, οι φέροντες τοίχοι είναι

αποκλειστικά φτιαγμένοι από ωμοπλίνθους και συνδέονται μεταξύ τους με πηλοκονίαμα, συνήθως στους οριζόντιους αρμούς. Το ύψος των κτιρίων αυτών περιορίζεται συνήθως στους 2-3 ορόφους ενώ η χρήση τους προοριζόταν συχνά για κατοικία.

1.4.2 Χυτές τοιχοποιίες από πηλό (rammed earth)

Γίνεται μία σύντομη αναφορά στην κατασκευή χυτών τοιχοποιιών δεδομένου ότι δεν αποτελούν αντικείμενο αυτής της μελέτης. Εξάλλου, αυτό το είδος τοιχοποιίας δεν ανήκει στους παραδοσιακούς τρόπους κατασκευών από πηλό στην χώρα μας. Η χυτή τοιχοποιία (rammed earth) αφορά την κατασκευή που μπορεί να γίνει κατευθείαν από το έδαφος. Αποτελεί χαρακτηριστική τεχνική η οποία χρησιμοποιείται στις πεδιάδες της Βόρειας Κίνας και είναι αρκετά διαδεδομένη και στην Γαλλία με την ονομασία “terre pisé”. Αυτή η τεχνική είναι γνωστή και ιδιαίτερα διαδεδομένη και στην Γερμανία, αλλά επίσης και στην Ινδονησία και Αιθιοπία.

Για την κατασκευή της χρησιμοποιούνται καλούπια όπου χύνεται μίγμα υγρού πηλού σε στρώσεις και ακολουθεί το επαναλαμβανόμενο χτύπημα της στρώσης, παλιότερα με ένα βαρίδι και σήμερα με μηχανικούς τρόπους. Πρόκειται δηλαδή για ολόσωμους φέροντες τοίχους από πηλό, οι οποίοι κατασκευάζονται από λεπτόκοκκα υλικά (0-5mm), με υψηλό ποσοστό παιπάλης (πάνω από 50%) [Πιτυτζόγια Α., 2014]. Δεδομένου του μεγάλου ποσοστού αργίλου, εισάγονται στο μίγμα ίνες, οι οποίες, χάρη στην εφελκυστική αντοχή τους, αναλαμβάνουν τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στο υλικό κατά την συστολή ξήρανσης.

1.4.3 Τοίχοι από συμπιεσμένους σβώλους πηλού (cob)



Εικόνα 9. Χαρακτηριστικές κτιριακές κατασκευές με την τεχνική “cob”

Παρόμοια τεχνική της χυτής τοιχοποιίας είναι η κατασκευή από συμπιεσμένους σβώλους πηλού. Η χρήση της τεχνικής αυτής ξεκίνησε από τον 15^ο αι. και συνεχίστηκε μέχρι και τον 19^ο αι.. Σε αυτή την τεχνική, κατασκευάζονται σβώλοι από πηλό σε σχετικά υγρή κατάσταση, διαμορφώνονται χωρίς την χρήση καλουπιών και είτε τοποθετούνται με πίεση είτε ρίχνονται με δύναμη. Η τεχνική συνοψίζεται στην αρχική κατασκευή τμημάτων τοιχοποιίας ύψους 50-60cm, τα οποία αφού στεγνώσουν αποτελούσαν την βάση για τις επόμενες στρώσεις. Τα πάχη των τοιχοποιιών κυμαίνονταν από 45 έως 60cm. Βασικό μειονέκτημα αυτού του τύπου δόμησης είναι ότι τα υλικά και το μεγάλο ποσοστό νερού

οδηγούν σε υψηλό ποσοστό συστολής ξήρανσης. Παραδείγματα αυτού του τύπου δόμησης έχουν καταγραφεί στην Βόρεια Υεμένη με την ονομασία “zabour”, στην νότια Ινδία, στην Γκάνα, στην Γερμανία (“Wellerbau”) και στην Ν.Δ. Αγγλία, με το όνομα “cob” [Πιτυτζόγια Α., 2014].

1.4.4 Κονίαμα-Πηλοκονίαμα

Συνδετικό κονίαμα, ονομάζεται το μίγμα που αποτελείται από λεπτόκοκκα αδρανή (πηλός, άμμος), διάφορες κονίες ως συνδετική ύλη (ασβέστης, τσιμέντο) και νερό προκειμένου να αναμειχθεί η στερεή του φάση. Σε μία παραδοσιακή τοιχοποιία εκτελεί σημαντικό ρόλο στην σύνδεση των λιθοσωμάτων μεταξύ τους αν και αποτελεί μικρό ποσοστό αυτής (~7%). Πέρα από το βασικό υλικό του κονιάματος, χρησιμοποιούνται και πρόσθετα για να βελτιώσουν την συμπεριφορά του υλικού, όσον αφορά την αντοχή και την ανθεκτικότητά του.

Ιστορικά, η παρουσία των κονιαμάτων στην δόμηση, σε ρόλο φέροντα και μη, έχει καταγραφεί σε όλους τους πολιτισμούς, με διαφορετικά υλικά και αναλογίες, πάχος και λειτουργικότητα. Σε πολλά στάδια της ιστορίας το κονίαμα καθίσταται ένα από τα κύρια υλικά δόμησης. Η διαδεδομένη του εφαρμογή στις κατασκευές, είναι απολύτως δικαιολογημένη λόγω της φύσης του (ευμετάβλητη δομή, χρωματική προσαρμογή, ποικίλη λειτουργικότητα). Ο πηλός, τα αδρανή κι οι κονίες ποικίλουν στις ιδιότητες και αναλογίες τους, ανάλογα με τις αισθητικές ανάγκες της κατασκευής [Παπαδημητρίου Δ., 2017]. Η δομή τους μπορεί να είναι εξαιρετικά πορώδης. Μία κοινή ιδιότητα αυτών των κονιαμάτων είναι η εύπλαστη μορφή τους κι η δυνατότητα τους να διαχέουν την υγρασία. Σήμερα, ο όρος κονίαμα αφορά το μίγμα συνδετικής κονίας, αδρανών, προσθέτων και νερού και χρησιμοποιείται για την συντήρηση ή την κατασκευή σύγχρονων κτιρίων.

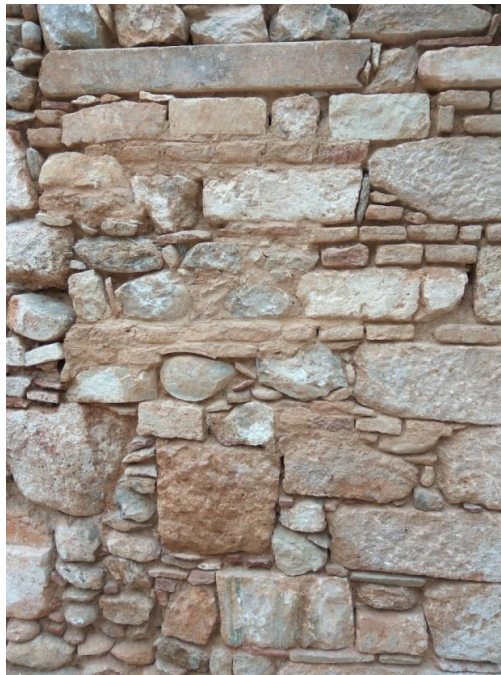
Ευρύτερα, τα κονιάματα ανάλογα με την χρήση τους στην κατασκευή κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες:

- Κονιάματα δόμησης, για την σύνδεση δομικών μονάδων τοιχοποιιών
- Κονιάματα αρμολόγησης, για την πλήρωση των κενών των τοιχοποιιών
- Ενέματα, για την πλήρωση των εσωτερικών ρωγμών και κενών των τοιχοποιιών, με σκοπό τόσο την μηχανική ενίσχυση όσο και την ανθεκτικότητα. Θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο
- Κονιάματα επίστρωσης και υποστρώματος σε δάπεδα, μωσαϊκά, ψηφιδωτά και τοιχογραφίες
- Επιχρίσματα, εσωτερικά και εξωτερικά, για την επένδυση των στοιχείων στις κατασκευές, με σκοπό την προφύλαξη, την μόνωση και την αισθητική των τοιχοποιιών.

Τα τελευταία χρόνια, έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες γύρω από τα ιστορικά και παραδοσιακά κονιάματα. Με τον όρο παραδοσιακά κονιάματα εννοούνται τα κονιάματα που συναντώνται σε μνημεία και ιστορικά κτίρια και στα οποία δεν έχει χρησιμοποιηθεί το τσιμέντο ως συνδετική κονία [Παπαδημητρίου Δ., 2017]. Τα κονιάματα αυτά είναι είτε κονιάματα επιχρισμάτων, είτε συνδετικά κονιάματα τοιχοποιιών. Η έρευνα έχει

επικεντρωθεί στα ασβεστοκονιάματα και ασβεστοποζολανικά κονιάματα (Βιντζηλαίου, Μιλτιάδου, Παπαγιάννη, Τουμπακάρη, Αδάμη, Καλαγρή), που έχουν ως βάση τους την άσβεστο. Ωστόσο ένα από τα πρώτα είδη κονιάματος αποτελεί το πηλοκονίαμα, δηλαδή το κονίαμα που έχει ως κύριο συνδετικό του υλικό τον πηλό. Αν κι η χρήση τους ήταν ευρεία, η καταγραφή τους μέχρι κάποια χρόνια πριν είχε παραμείνει ελλιπής, με τα τελευταία χρόνια να γίνεται προσπάθεια για συλλογή πληροφοριών γύρω από αυτά.

Το πηλοκονίαμα χρησιμοποιήθηκε από τα προϊστορικά χρόνια και παρέμεινε για χιλιετίες στην δόμηση, λόγω της αφθονίας της πρώτης ύλης και της απλής χρήσης του. Χρησιμοποιήθηκε ως συνδετικό υλικό στην τοιχοποιία, για να συγκρατήσει οικοδομικά υλικά (τούβλα, λίθους, ωμοπλίνθους κ.α.) μεταξύ τους και να καλύψει τα όποια κενά δημιουργούνταν, καθώς και ως πρώτο στρώμα σε τοίχους από αργολιθοδομή. Η παρασκευή των πηλοκονιαμάτων γινόταν με καλή ανάμιξη του πηλού, συνήθως με οργανικά (χόρτα, ρίζες, άχυρα, καλάμια) ή ανόργανα πρόσθετα (άμμος, χαλίκι) [Πιτυτζόγια Α., 2014]. Το κονίαμα κατά την διάρκεια της δόμησης έχει ρευστή μορφή και αποκτά αντοχές μέσα από την δράση φυσικοχημικών αντιδράσεων με τον χρόνο. Η ρευστή του μορφή οφείλεται στην ανάμιξη του πηλού, και σε ορισμένες περιπτώσεις και της περιεχόμενης ασβέστου, με νερό. Έτσι, γίνεται εύπλαστο κι αποκτά συγκολλητικές ιδιότητες. Είναι επιθυμητή η ελάχιστη δυνατή χρήση νερού για την απόκτηση της απαιτούμενης εργασιμότητας [Κωστάκη-Τζανέτου, 2009].



Εικόνα 10. Παραδοσιακή αργολιθοδομή με συνδετικό πηλοκονίαμα (Άγιος Δημήτριος, Μαρούσι) (προσωπικό αρχείο κας Νικολοπούλου)

Η συστηματική έρευνα γύρω από τα πηλοκονιάματα, ξεκίνησε από την ανάγκη που δημιουργήθηκε για την συντήρηση και ενίσχυση ιστορικών κατασκευών, αλλά και από την στροφή του κατασκευαστικού χώρου σε άλλα υλικά δόμησης πέρα από το σκυρόδεμα και τον χάλυβα. Μέσα από αυτήν την έρευνα έχει διαπιστωθεί ότι οι θεμελιώδεις παράγοντες

που επηρεάζουν την μηχανική συμπεριφορά και την ανθεκτικότητα των πηλοκονιαμάτων, αποτελούν η ποιότητα κι η ποσότητα του πηλού καθώς κι οι προστιθέμενες κονίες, διότι επιδρούν σημαντικά στα μηχανικά και φυσικά χαρακτηριστικά τους [Πιτυτζόγια Α., 2014]. Επιπλέον, μέσα από κοκκομετρικές και χημικές αναλύσεις, έχει διαπιστωθεί ότι ο πηλός που χρησιμοποιείται στα πηλοκονιάματα, είναι όμοιος με αυτόν που χρησιμοποιείται για τις τοιχοποιίες (π.χ. ωμοπλινθοδομές) αν και λίγο πιο λεπτόκοκκος (μέγιστος κόκκος το πολύ 2mm). Αποτελούν κονιάματα χαμηλής αντοχής (δηλαδή χωρίς καμία απαίτηση αντοχής).

Οι μηχανικές ιδιότητες ενός μίγματος πηλοκονιάματος δεν μπορούν εξαρχής να προκαθοριστούν (όπως συμβαίνει στα κονιάματα τσιμέντου κ.α.). Η αδυναμία αυτή βέβαια, δικαιολογείται λόγω της δυσκολίας τυποποίησης των πηλών, καθώς χρησιμοποιούνται σε ελάχιστο ποσοστό στην σύγχρονη δόμηση. Συνήθως, στις κατασκευές επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν υλικά τα οποία είναι κοντά στον τόπο κατασκευής, για οικονομικούς και πρακτικούς λόγους, διότι δεν είναι πάντα εύκολο να μεταφερθούν υλικά σε μεγάλες ποσότητες για μεγάλες αποστάσεις. Άρα ο παραπάνω λόγος αποτελεί ακόμα έναν παράγοντα αδυναμίας κατηγοριοποίησης του πηλού, εφόσον κάθε περιοχή έχει το “δικό” της έδαφος, με διαφορετικές φυσικές, χημικές και μηχανικές ιδιότητες.

1.4.4.1 Υλικά πηλοκονιαμάτων

Τα κονιάματα, που έχουν χρησιμοποιηθεί στην δόμηση, έχουν ως βάση διάφορες συνδετικές κονίες, οι οποίες έχουν επιλεγεί με σκοπό να εξυπηρετούν τον σκοπό και την λειτουργικότητα κάθε τέτοιου κονιάματος. Αυτές οι κονίες κατηγοριοποιούνται σε αερικές και υδραυλικές ως εξής:

- Αερικές είναι οι κονίες που “σκληραίνουν” και αποκτούν τις αντοχές τους στον αέρα, αποβάλλοντας νερό. Οι αερικές κονίες για να εξυπηρετήσουν τον σκοπό τους πρέπει να συντηρούνται σε περιβάλλον αέρα. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν η άσβεστος, η γύψος κι ο πηλός. Βασικός “εχθρός” αυτών των κονιών είναι το νερό καθώς και περιβάλλοντα με υψηλά ποσοστά υγρασίας, παράγοντες που μπορούν να τις οδηγήσουν σε αποσύνθεση. Επίσης, χαρακτηρίζονται γενικώς από χαμηλά μηχανικά χαρακτηριστικά
- Υδραυλικές είναι οι κονίες που υφίστανται πήξη και σκλήρυνση μέσα στο νερό ή σε υγρό περιβάλλον. Η ικανότητα αυτή των υδραυλικών κονιών, οφείλεται στις υδραυλικές ιδιότητες ορισμένων συστατικών τους. Τέτοιες κονίες είναι η υδραυλική άσβεστος, οι ποζολάνες, το τσιμέντο τύπου Portland κ.α.

Τα υλικά για την παρασκευή των κονιαμάτων που είχαν στην διάθεσή τους οι παλιοί τεχνίτες ήταν πηλός, άμμος, χαλίκια, θραυστά αδρανή ή κεραμικά, γύψος, άσβεστος, ποζολάνες, όπως επίσης άχυρα, καλάμια, ξύλα και ίνες (φυτικές και ζωικές). Τα υλικά αυτά χρησιμοποιήθηκαν με διάφορες αναλογίες, ανάλογα με την χρήση και τον ρόλο των κονιαμάτων στην κατασκευή. Άλλα κονιάματα είναι φέροντα, επομένως η σύστασή τους πρέπει να οδηγεί κυρίως σε μία ισχυρή μηχανικά δομή, ενώ άλλα είχαν ρόλο επίστρωσης, πράγμα που σημαίνει ότι έπρεπε να είναι ανθεκτικά.

Συγκεκριμένα, στα πηλοκονιάματα, παρατηρούνται διάφορα πρόσθετα, που έχουν σκοπό την τροποποίηση των ιδιοτήτων του πηλού ως δομικό υλικό ώστε να εξυπηρετηθούν οι ανάγκες της εκάστοτε κατασκευής. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι είναι εμφανής η “έμπνευση” των υλικών και τεχνικών σταθεροποίησης των πηλοκονιαμάτων από γεωτεχνικά έργα ενίσχυσης του εδάφους. Τα έργα σταθεροποίησης των εδαφών (π.χ. εδαφών θεμελίωσης) αφορούν είτε την μηχανική ενίσχυση, ή την στεγάνωση τους από το νερό για πρόληψη των φαινομένων αστοχίας που λαμβάνουν χώρα όταν το έδαφος έρχεται σε επαφή με το νερό, όπως είναι η ρευστοποίηση, η έκπλυση κ.α.. Τα συνήθη πρόσθετα σταθεροποίησης του πηλού είναι το τσιμέντο, ο ασβέστης ενώ, πλέον, βρίσκουν ευρεία εφαρμογή η υδραυλική άσβεστος, η ποζολάνη, ο μπετονίτης, οι ρητίνες κ.α. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για σταθεροποίηση του πηλού, υδραυλικά ή μη, αντιδρούν με το νερό πρωτογενώς ή/και με την παρουσία ποζολανικών υλικών (δευτερογενώς) για να σχηματίσουν σύνθετα υλικά με συγκολλητικές ιδιότητες.

Παρακάτω θα γίνει αναφορά των υλικών που χρησιμοποιούνται στα παραδοσιακά πηλοκονιάματα, σύμφωνα με την βιβλιογραφία ανασκόπηση και τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα αυθεντικών πηλοκονιαμάτων υφιστάμενων ιστορικών κατασκευών [Nikolopoulou V., 2017].

Πηλός

Στην Ενότητα 1.3 έχει γίνει εκτεταμένη αναφορά στις ιδιότητες του πηλού. Κρίνεται σκόπιμο να τονιστεί ότι η μεγάλη ποικιλία πηλών που εμφανίζεται, αποτελεί μεγάλο παράγοντα διασποράς των ιδιοτήτων των πηλοκονιαμάτων, λόγω της διαφορετικής χημικής κι ορυκτολογικής τους σύστασης, της κοκκομετρικής τους διαβάθμισης, στην ύπαρξη ή μη οργανικών υλικών, αλάτων και οξειδίων.

Χαλίκι

Έχει καταγραφεί η ύπαρξη χαλικιού (ρυζάκι) (4-32mm) στα πηλοκονιάματα, σε περιορισμένα ποσοστά, η οποία στοχεύει στην αλλαγή της κοκκομετρικής καμπύλης του πηλού. Ως πιο χονδρόκοκκο κλάσμα μέσω της επαφής των διάφορων κόκκων θα αναπτυχθούν εσωτερικές δυνάμεις τριβής. Επίσης, η χρήση μη συνεκτικών αδρανών τέτοιας κοκκομετρίας έχει αποδείξει ότι μπορεί να μειώσει σε ικανοποιητικό βαθμό την συστολή ξήρανσης, η οποία συμβαίνει μέσω αποβολής του νερού.

Άμμος

Αντίστοιχα οφέλη με αυτά του χαλικιού παρουσιάζει κι η χρήση της άμμου (80μm-4mm), με κύριο στόχο την αλλαγή της κοκκομετρικής καμπύλης του πηλού. Τα ποσοστά στα οποία χρησιμοποιείται η άμμος στα πηλοκονιάματα κυμαίνεται γύρω στο 10-20%. Σε μεγαλύτερα ποσοστά έχει αποδειχθεί ότι μειώνει ραγδαία την μηχανική αντοχή του κονιάματος. Η άμμος αποτελεί μη συνεκτικό αδρανές, με όμοια δράση με αυτή του χαλικιού στο μίγμα που προστίθεται. Ο πηλός είναι ένα μίγμα που περιέχει μεγάλο ποσοστό αργίλου, κάτι το οποίο τον καθιστά συνεκτικό υλικό. Μέσω των συνεκτικών υλικών αναπτύσσεται συνοχή. Οι δύο

μηχανισμοί αυτοί (συνεκτικών και μη υλικών) έρχονται σε αντίθεση μεταξύ τους κι ως εκ τούτου προκαλούν μείωση των μηχανικών αντοχών.

Άσβεστος

Ο ασβέστης παρέχει γενικά έναν οικονομικό τρόπο σταθεροποίησης. Η προσθήκη ασβέστη στον πηλό για την δημιουργία οικοδομικών υλικών έχει μια πολύ μακρά ιστορία από την αρχαία Μεσοποταμία και την Αίγυπτο, την αρχαία Ελλάδα και την Ρώμη μέχρι τις μέρες μας. Η συστηματική χρήση της ασβέστου για σταθεροποίηση του εδάφους είναι σχετικά πρόσφατη και εμφανίζεται γύρω στο 1920 στις Η.Π.Α., σε συγκοινωνιολογικές κατασκευές [Earthen Constructions, 1989].

Η άσβεστος παράγεται με έψηση ασβεστολιθικού πετρώματος, δηλαδή με έψηση ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3). Η σταθεροποίηση του πηλού μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με την χρήση ασβέστη CaO (Quicklime) ή υδρασβέστου Ca(OH)_2 (hydrated lime). Η άσβεστος (Quicklime) όμως, χρησιμοποιείται πιο συχνά καθώς παρέχει κάποια συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι της υδρασβέστου. Χαρακτηρίζεται από υψηλότερη διαθέσιμη περιεκτικότητα σε ελεύθερο ασβέστη ανά μονάδα μάζας, είναι πυκνότερη από τον ένυδρο ασβέστη (απαιτείται λιγότερος χώρος αποθήκευσης), αλλά κυρίως γιατί παράγει θερμότητα κατά την ενυδάτωσή της, η οποία επιταχύνει την ποζολανική αντίδραση, οδηγώντας σε αύξηση της αντοχής και μεγάλη μείωση της περιεκτικότητας σε υγρασία [Earthen Constructions, 1989].

Όλοι οι τύποι των αργιλικών ορυκτών αντιδρούν με τον ασβέστη. Η φύση της ανταλλαγής κατιόντων με την χρήση ασβέστη, δεν κάνει μεγάλη διαφορά στα καολινιτικά εδάφη, αλλά μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στα αργιλώδη εδάφη που περιέχουν μοντμοριλλονίτη. Στην πραγματικότητα οι διογκούμενοι άργιλοι τείνουν να αντιδρούν εύκολα με τον ασβέστη, χάνοντας αμέσως την πλαστικότητα τους.

Οι μηχανισμοί με τους οποίους σταθεροποιεί ο ασβέστης το έδαφος είναι οι εξής:

I. Απορρόφηση νερού

Η άσβεστος υπόκειται σε ενυδάτωση με την παρουσία νερού ή μέσω του νερού από το έδαφος. Η αντίδραση είναι ισχυρώς εξώθερμη.

II. Ανταλλαγή κατιόντων

Όταν προστίθεται άσβεστος σε ενυδατωμένο έδαφος, τότε σε αυτό εμφανίζονται ιόντα ασβεστίου. Στην συνέχεια πραγματοποιείται ανταλλαγή ιόντων τα οποία αντικαθιστούν κατιόντα του εδάφους, όπως μαγνήσιο, ποτάσιο, υδρογόνο και νάτριο. Ο όγκος αυτής της ανταλλαγής εξαρτάται από την ποσότητα των ανταλλάξιμων κατιόντων που κατέχει το έδαφος. Η ανταλλαγή ιόντων κι η συσσωμάτωση συμβαίνουν αμέσως μετά την ανάμιξη προκαλώντας άμεσες αλλαγές στην αντοχή, τον δείκτη πλαστικότητας και την εργασιμότητα.

III. Κροκκίδωση και συσσωμάτωση

Εξαιτίας της ανταλλαγής κατιόντων και της αύξησης των ηλεκτρολυτών στο νερό των πόρων, οι κόκκοι του εδάφους τείνουν να κροκκιδώνονται. Όσο πιο λεπτόκοκκο είναι το έδαφος τόσο πιο πολύ κροκκιδώνεται. Με αυτόν τον τρόπο, τόσο η κοκκομετρική διαβάθμιση όσο και η δομή του εδάφους αλλάζουν.

IV. Ενανθράκωση

Η άσβεστος που προστίθεται στο έδαφος αντιδρά με το διοξείδιο του άνθρακα από τον αέρα και σχηματίζει μία μορφή ασθενούς ενανθρακωμένου τσιμέντου, το οποίο αποτελεί έναν ασθενή παράγοντα συγκόλλησης που οδηγεί σε μια ταχεία αρχική αύξηση της αντοχής. Αυτή η αντίδραση χρησιμοποιεί μέρος της ασβέστου, το οποίο είναι διαθέσιμο για την ποζολανική αντίδραση.

V. Ποζολανική αντίδραση

Αποτελεί την πιο σημαντική αντίδραση. Η αντοχή του υλικού είναι, κυρίως, αποτέλεσμα της διάλυσης των αργιλωδών ορυκτών σε ένα αλκαλικό περιβάλλον που παράγεται από την άσβεστο και τον ανασυνδυασμό του πυριτίου και του αργιλίου με το πυρίτιο του ασβεστίου στον πηλό, προκαλώντας την τσιμεντοποίηση των κόκκων. Η άσβεστος πρέπει να προστεθεί στο έδαφος σε κατάλληλες ποσότητες ώστε να διατηρήσει υψηλό pH, το οποίο είναι απαραίτητο για τη διάλυση των αργιλικών ορυκτών για να πραγματοποιηθεί η σταθεροποίηση. Το εξαιρετικά αλκαλικό περιβάλλον που παράγεται με την προσθήκη ασβέστη, αυξάνει την διαλυτότητα των αργιλο-πυριτικών στην επιφάνεια των αργιλικών ορυκτών, δίνοντας δευτερογενώς ένυδρα τσιμεντιτικά προϊόντα. Η ποζολανική αντίδραση, είναι μια αργή διαδικασία που ευθύνεται κυρίως για την ανάπτυξη των αντοχών κατά την περίοδο της ωρίμανσης [Earthen Constructions, 1989].

Αποτελέσματα και αναλογίες:

Ποσοστά από 5-10% για σταθεροποίηση θεωρούνται επαρκή, ωστόσο το βέλτιστο ποσοστό εξαρτάται από το είδος του εδάφους. Όσον αφορά τα συστατικά του πηλού, έχει φανεί ότι τα αποτελέσματα εξαρτώνται ισχυρά από τα αργιλικά ορυκτά. Έχει αποδειχθεί ότι είναι η σταθεροποίηση του πηλού με άσβεστο είναι πιο αποδοτική σε πηλούς που περιέχουν πυριτικά άλατα, πυρίτια και υδροξείδια του σιδήρου. Τα οργανικά εμποδίζουν την ανταλλαγή ιόντων, όχι όμως την ποζολανική αντίδραση. Τα θειικά άλατα είναι λιγότερο επικίνδυνα από τα άλατα μαγνησίου, όμως στην υγρασία είναι και τα δύο επικίνδυνα [Earthen Constructions, 1989].

Γενικότερα η προσθήκη ασβέστη θεωρείται ιδανική για την ανάπτυξη των μηχανικών αντοχών στον πηλό, οδηγώντας παράλληλα σε σημαντική μείωση του δείκτη πλαστικότητας. Αντίστοιχα αυξάνεται η βέλτιστη περιεκτικότητα σε νερό, μειώνεται η μέγιστη ξηρή πυκνότητα κι η δυνατότητα συστολοδιαστολών [Earthen Constructions, 1989]. Η σταθεροποίηση του πηλού με άσβεστο αποσκοπεί στο να καταστήσει το κονίαμα ανθεκτικό στην διαβρωτική επίδραση του νερού και να μειώσει την απορρόφηση του νερού,

διότι από εκεί συνήθως πηγάζουν και οι μηχανικές αστοχίες σε μία κατασκευή που αποτελείται από πηλό. Αυτό θα επιτευχθεί μέσω της δημιουργίας μίας πιο πυκνής δομής με μικρότερο πορώδες. Γενικά, σε δοκίμια πηλού που έχουν σταθεροποιηθεί με άσβεστο έχουν σημειωθεί θλιπτικές αντοχές 2-5MPa [Earthen Constructions, 1989].

1.4.5 Πηλοεπιχρίσματα

Για χιλιάδες χρόνια, στην Ευρώπη (μέχρι και τον 18^ο αι.), στην Αφρική και την Ασία, ο πηλός χρησιμοποιούταν ως γέμισμα σε κατασκευές ξύλινων δικτυωμάτων. Υπάρχουν πολλές μορφές αυτής της κατασκευαστικής τεχνικής. Η πλέον γνωστή και καταγεγραμμένη μέθοδος αφορά την τοποθέτηση με δύναμη του υγρού μίγματος πηλού κι άχυρων σε πλέγμα από ξύλα και κλαδιά. Στην Ελλάδα, αυτός ο τρόπος δόμησης είναι γνωστός στην παραδοσιακή αρχιτεκτονική, με τους όρους των: i) τσατμαδότοιχων, όπου οι φέροντες τοίχοι αποτελούνται από ξύλινα πλαίσια, στα οποία η πλήρωση γινόταν με χυτό πηλό, και ii) μπαγδατότοιχων, όπου στα ξύλινα πλαίσια η επένδυση που εφαρμοζόταν αφορούσε σε επίχρισμα από μίγμα πηλού και ινών (κατά παράδοση άχυρο). Το μίγμα συνήθως καλύπτει τουλάχιστον 2cm πάχους των ξύλινων στοιχείων, έτσι ώστε να μην καταστρέφονται και διαβρώνονται εύκολα. Σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιείται χονδρό χαλίκι ή και πέτρες ως πρόσθετα μαζί με το μίγμα πηλού [Πιτυτζόγια Α., 2014]. Τα επιχρίσματα του πηλού κατά τους χρόνους έχουν χρησιμοποιηθεί για την επίχριση επιφανειών (δαπέδων, τοίχων και ορόφων) οικιών, δεξαμενών ή θαλάσσιων κατασκευών, καθώς επίσης και για την δημιουργία υποστρώματος κατάλληλου για την κατασκευή δαπέδων, τοιχογραφιών και ψηφιδωτών [Μπέη Γ., 2004].

1.5 Παθολογία και προβλήματα φθοράς

Όπως έχει τονιστεί σαφώς στην παρούσα εργασία, ο πηλός δεν είναι ένα τυποποιημένο υλικό, όπως τα σύγχρονα βιομηχανικά δομικά υλικά (σκυρόδεμα, χάλυβας κ.α.). Εφόσον είναι φυσικό υλικό, που προέρχεται από το έδαφος, ανάλογα με την τοποθεσία από όπου προέρχεται, αποτελείται από διάφορες ποσότητες και τύπους αργίλου, άμμου και αδρανών. Έτσι, τα χαρακτηριστικά του μπορούν να διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή. Η συμπεριφορά μιας φέρουσας λιθοδομής με πηλοκονίαμα, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τεχνική της δόμησης, την εμπειρία και την ικανότητα των τεχνιτών, την ποιότητα των υλικών καθώς και αν έχει γίνει η χρήση διάφορων προσθέτων. Αν ληφθούν υπόψη οι παραπάνω παράγοντες, παρατηρείται ότι η συμπεριφορά των κατασκευών από πηλό δεν μπορεί να καθοριστεί με σαφήνεια εκ των προτέρων, αφού επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες, που πολλές φορές δεν είναι δυνατόν να ποσοτικοποιηθούν.

Η κατάρρευση τέτοιων τοιχοποιιών οφείλεται, κυρίως, σε σεισμικές δράσεις, όπως αποδεικνύεται και από τα πρόσφατα γεγονότα σε Μυτιλήνη και Κω. Στις συγκεκριμένες κατασκευές βασικό πρόβλημα είναι η ελλειπής συνάφεια του πηλοκονιάματος με τους λίθους, καθώς επίσης κι η αδυναμία του κονιάματος να συνδέσει τις επιμέρους στρώσεις τους. Αυτό αποδίδεται τόσο στην φύση του πηλού, ο οποίος έχει την τάση να υπόκειται σε μεγάλη συστολή αφήνοντας πολλά τμήματα της τοιχοποιίας ουσιαστικά ασύνδετα, καθώς και του τρόπου δόμησης των εν λόγω λιθοδομών, ο οποίος χαρακτηρίζεται από μεγάλο

ποσοστό κενών στο εσωτερικό της τοιχοποιίας. Υπό αυτές τις συνθήκες, όταν μία δίστρωτη ή τρίστρωτη λιθοδομή με αυτά τα χαρακτηριστικά υπόκειται σε σεισμικές δράσεις, είναι πιθανόν να εμφανίσει αστοχία από κάμψη εκτός επιπέδου, μέσω της αποκόλλησης των επιμέρους στρώσεων της.

Η δράση του ανέμου είναι ακόμη ένας παράγοντας παθολογίας. Η άμμος που μεταφέρεται με τον άνεμο μπορεί να αποτελέσει παράγοντα διάβρωσης των επιχρισμάτων, των πηλοκονιαμάτων και των λίθων των τοιχοποιιών. Ιδιαίτερα ευαίσθητα σημεία είναι τα γωνιακά σημεία των κτιρίων [Πιτυτζόγια Α., 2014].

Επίσης, τα φυτά και τα έντομα αποτελούν φυσικά φαινόμενα τα οποία συμβάλλουν στην διάβρωση των κατασκευών από πηλό και μπορούν να δημιουργήσουν ρωγμές. Ο πηλός αποτελεί το φυσικό μέσο για την διατήρηση της ύπαρξης φυτών και εντόμων. Σε αυτό το φαινόμενο, βοηθητικός παράγοντας πέρα από τον πηλό, αποτελεί κι η ύπαρξη υγρασίας, που ενισχύει την ανάπτυξη φυτών, οι ρίζες των οποίων μπορούν να προκαλέσουν μετατροπή του πηλοκονιάματος σε χώμα ή ακόμη και θραύση τμήματος της τοιχοποιίας.

Η επίδραση της υγρασίας είναι καταστρεπτική για τις κατασκευές από πηλό, παράγοντας που μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρη κατάρρευση της κατασκευής χωρίς να εμπíπτουν παράγοντες μηχανικής αστοχίας από την δράση κάποιου φορτίου. Ο μηχανισμός με τον οποίο η υγρασία επιδρά αρνητικά στον πηλό, ενεργοποιείται μέσω του μεγάλου πορώδους που χαρακτηρίζει τα δομικά υλικά από πηλό, τα οποία απορροφούν μεγάλες ποσότητες νερού, με αποτέλεσμα την διόγκωση τους. Συνεπώς είναι σημαντική η μελέτη αυτών των υλικών σε κύκλους ύγρανσης-ξηράνσης. Επίσης, η δράση παγετού είναι ένας ακόμη παράγοντας που οδηγεί σε διόγκωση και πιθανόν σε ρηγματώσεις μέσα από τους κύκλους ψύξης-απόψυξης. Τα υψηλά επίπεδα υγρασίας επιδεινώνονται στις περιπτώσεις όπου έχουν γίνει ακατάλληλες επεμβάσεις, όπως η εφαρμογή υλικών επέμβασης από υλικά μεγαλύτερης αντοχής όπως το τσιμέντο. Στην περίπτωση του τσιμέντου, λόγω του ότι είναι υδατοστεγανό και δεν επιτρέπει την μεταφορά της υγρασίας από το εσωτερικό τμήμα του τοίχου στο εξωτερικό, δημιουργούνται ρηγματώσεις, που μπορούν με την σειρά τους ή να γίνουν δίοδος εισαγωγής περαιτέρω υγρασίας στην τοιχοποιία, ή να συμβάλλουν στην μηχανική αστοχία του τοίχου [Πιτυτζόγια Α., 2014].

Παρακάτω, για να τονιστεί η επίδραση της υγρασίας στην τοιχοποιία, γίνεται συνοπτική αναφορά στις αστοχίες που εμφανίζονται συχνά σε φέρουσες λιθοδομές με πηλοκονίαμα:

Διάβρωση της βάσης των τοίχων

Οφείλεται τόσο στην διείσδυση υγρασίας, προερχόμενης από το έδαφος, στην μάζα της τοιχοποιίας, αλλά και στην βλαβερή δράση της βροχής. Η διάβρωση του πηλοκονιάματος, αποτελεί σημαντικό παράδειγμα αστοχίας και απώλειας φέρουσας διατομής, κάτι που αποτελεί θεμελιώδες πρόβλημα, ειδικότερα στις παλαιότερες κατασκευές, όπου το πηλοκονίαμα αποτελούσε μεγάλο τμήμα της τοιχοποιίας. Επίσης, το κονίαμα, που βρίσκεται κοντά στην βάση της τοιχοποιίας, είναι ακόμα πιο ευάλωτο στην αποσάθρωση του λόγω

υγρασίας, λόγω της θέσης του. Αυτή η αποσάθρωση μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την εισαγωγή εκκεντροτήτων στο σύστημα, μέσω της μείωσης της ενεργού διατομής της.



Εικόνα 11. Χαρακτηριστικό παράδειγμα διάβρωσης της βάσης λιθοδομής

Διάβρωση του άνω τμήματος του τοίχου

Η βροχή σε λιθοδομές με πηλοκονίαμα μπορεί να προκαλέσει αποσάθρωση κι αποκόλληση των επιχρισμάτων και κονιαμάτων. Συνεπώς, άμεσο επακόλουθο είναι η διείσδυση του νερού στην μάζα της λιθοδομής μέσα από υπάρχουσες ρωγμές, προκαλώντας την διάβρωση των υλικών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό κατακόρυφων ασυνεχειών και ρωγμών στις περιοχές όπου έχει διεισδύσει η υγρασία [Πιτυτζόγια Α., 2014]. Όταν η επιφάνεια μιας κατασκευής από πηλό διαβραχεί, το νερό απορροφάται μέσα από το δίκτυο των πόρων της εξωτερικής στρώσης, και το πηλοκονίαμα διογκώνεται. Το αποτέλεσμα της διόγκωσης είναι το κλείσιμο των πόρων του υλικού και η μείωση του ποσοστού απορρόφησης νερού από το εξωτερικό στο εσωτερικό τμήμα της τοιχοποιίας. Η διείσδυση του νερού, όμως, συνεχίζεται με πιο αργούς ρυθμούς λόγω τριχοειδούς απορρόφησης, κάτι που έχει ως συνέπεια η επιφάνεια του πηλοκονιάματος να γίνεται πιο μαλακή από στρώση σε στρώση. Αν η βροχή είναι έντονη, τότε θα διαβρωθεί το κονίαμα, με άμεσες αρνητικές συνέπειες. Σε περίπτωση που η εξωτερική υγρή, πλέον, επιφάνεια δεν έχει διαβρωθεί, τότε, λόγω της πλήρωσης των πόρων της, θα εμποδίζει την εισαγωγή επιπλέον υγρασίας στην τοιχοποιία. Μετά την αποβολή της υγρασίας, η επιφάνεια αυτή πλέον θα είναι πιο σκληρή, αλλά περισσότερο ψαθυρή. Κάτω από αυτή την επιφάνεια, θα έχει σχηματιστεί μία στρώση πιο αδύναμη, ακόμα και μετά την απομάκρυνση της υγρασίας, διότι ενώ θα έχει διογκωθεί δεν θα καταφέρει, ακόμα και τότε, να επανέλθει στην αρχική της κατάσταση, καθώς θα έχει εμφανώς, μειωμένη πυκνότητα. Επομένως, η επόμενη επαφή αυτής της πλέον πιο εύθραυστης ζώνης με την υγρασία, θα επιφέρει σοβαρές βλάβες. Ο παραπάνω μηχανισμός αστοχίας, αποτελεί το φυσικό φαινόμενο των δοκιμών ανθεκτικότητας ύγρανσης-ξήρανσης.

Αποσάθρωση πηλοκονιάματος

Η προοδευτική ύγρανση του πηλοκονιάματος μπορεί να οδηγήσει μέχρι την πλήρη αποσάθρωση του υλικού, προκαλώντας, έτσι, απώλεια φέροντος υλικού από την ενεργό

διατομή της τοιχοποιίας κι απώλεια σύνδεσης των λιθοσωμάτων της. Όταν το πηλοκονίαμα βρεθεί σε κορεσμένη κατάσταση χάνει την συνοχή μεταξύ των κόκκων της στερεής του φάσης, αφού μηδενίζονται οι μεταξύ τους επιφανειακές τάσεις, επιτρέποντας την ανεξέλεγκτη κίνηση τους.



Εικόνα 12. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποσάθρωσης πηλοκονιάματος

Γενικά ο πηλός έχει την δυνατότητα να αυξάνει τον όγκο του έως έναν βαθμό, χωρίς να χάνει σημαντικό κομμάτι της θλιπτικής του αντοχής. Αυξάνεται, όμως, σε μεγάλο βαθμό η πλαστικότητα του κι η αύξηση του όγκου του συνοδεύεται από παραμορφώσεις. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε βύθιση και εν τέλει κατάρρευση του τοίχου, εάν τα επίπεδα υγρασίας φτάσουν τα όρια πλαστικοποίησης και ρευστοποίησης. Μετά την απομάκρυνση του νερού, ο πηλός έχει την δυνατότητα να αποβάλλει την υγρασία διατηρώντας όμως αυτές τις παραμορφώσεις, μεταφέροντας τα φορτία προς τα κάτω. Μέσω αυτής της επαναλαμβανόμενης διαδικασίας αλλάζει συνεχώς το σύστημα μεταφοράς φορτίων, κάτι που μπορεί να προκαλέσει θέματα λειτουργικότητας στο δόμημα [Πιτυτζόγια Α., 2014].

1.6 Πλεονεκτήματα χρήσης του πηλού στην δόμηση

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, λόγω της ανάπτυξης νέων σύγχρονων υλικών δόμησης (σκυρόδεμα, χάλυβας κ.α.), και της έντονης και, πολλές φορές, δύσκολα αντιμετωπίσιμης παθολογίας που εμφανίζουν οι λιθοδομές με πηλοκονίαμα, είχε εγκαταλειφθεί η προσπάθεια συστηματικής μελέτης των μεθόδων αποκατάστασης και ενίσχυσης αυτών. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μία στροφή του ενδιαφέροντος στον πηλό και την τοιχοποιία ως φέρον στοιχείο γενικότερα, τόσο για λόγους συντήρησης ιστορικών δομημάτων, όσο και για λόγους βιώσιμης ανάπτυξης. Στο πρίσμα της βιωσιμότητας, αναφέρονται τα βασικά πλεονεκτήματα μίας κατασκευής που περιέχει τον πηλό ως δομικό της υλικό, τα οποία είναι τα εξής:

I. Χαμηλό κόστος

Το πηλοκονίαμα έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να παράγεται τοπικά και να χρησιμοποιείται άμεσα. Η προετοιμασία, μεταφορά και χρήση του πηλού επί τόπου απαιτεί μόνο 1% της ενέργειας που χρειάζεται για την παραγωγή, μεταφορά και επεξεργασία του ωπλισμένου σκυροδέματος [Σταθόπουλος Κ., 2015]. Για παράδειγμα, ο πηλός μπορεί να ληφθεί απευθείας όταν γίνεται η εκσκαφή για την κατασκευή των θεμελίων ή του υπογείου της κατασκευής.

II. Μεγάλη θερμοχωρητικότητα, και χαμηλή θερμική αγωγιμότητα

Αυτό είναι ένα βασικό στοιχείο για τα ζεστά καλοκαίρια της Νότιας Ευρώπης, όπως αυτά που συναντώνται στον ελλαδικό χώρο. Ο πηλός, όπως όλα τα βαριά υλικά αποθηκεύει θερμότητα. Σε κλιματικές ζώνες με μεγάλες ημερήσιες θερμοκρασιακές μεταβολές ή όπου είναι απαραίτητο να αποθηκεύεται ηλιακή θερμότητα με παθητικά μέσα, η χρήση του πηλού μπορεί να ισορροπήσει το εσωτερικό κλίμα. Υπερνικά τις ακραίες εξωτερικές θερμοκρασίες και διατηρεί μία ικανοποιητική ισορροπία όσον αφορά την υγρασία [Parayianni I., 2006].

III. Εξισορρόπηση υγρασίας

Ο πηλός αποτελεί ένα κατεξοχήν οικολογικό υλικό καθώς έχει εξαιρετικές ιδιότητες βιοκλιματικής συμπεριφοράς. Είναι ένα πορώδες υλικό που έχει την δυνατότητα να απορροφά και να αναδίνει υγρασία γρηγορότερα και σε μεγαλύτερη ποσότητα από κάθε άλλο δομικό υλικό, επιτρέποντάς του να ισορροπεί στο εσωτερικό την υγρασία του αέρα. Από έρευνες έχει διαπιστωθεί ότι οι κατασκευές από πηλό παράγουν ένα πιο υγιεινό περιβάλλον διαβίωσης με μειωμένη υγρασία το καλοκαίρι και αυξημένη υγρασία το χειμώνα [Parayianni I., 2006]. Δεν πρέπει να παραληφθεί το γεγονός ότι τα υλικά που αποτελούν ένα κτίριο, διαμορφώνουν σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα του εσωτερικού αέρα των κτιρίων και μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση στην υγεία των χρηστών.

IV. Απεριόριστη επαναχρησιμοποίηση–ανακύκλωση

Ο πηλός που δεν έχει περάσει από την διαδικασία ψησίματος, αλλά έχει υποστεί μια παρατεταμένη περίοδο ξήρανσης (συνήθως στον ήλιο) μπορεί να διατηρηθεί μεν για εκατοντάδες χρόνια αλλά και να ανακυκλωθεί και να επαναχρησιμοποιηθεί άπειρες φορές για ένα εξαιρετικά μεγάλο χρονικό διάστημα. Μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί αφού εμποτιστεί στο νερό [Πιτυτζόγια Α., 2014].

V. Περιβαλλοντική καταλληλότητα

Αποτελεί ένα φυσικό υλικό που προέρχεται από το έδαφος και πολλές φορές χρησιμοποιείται χωρίς καμία περαιτέρω επεξεργασία. Είναι διαθέσιμο στις περισσότερες περιοχές του κόσμου.

VI. Εύκολη εργασιμότητα

VII. Πυροπροστασία

Συμπερασματικά, λοιπόν, ο πηλός είναι ένα υλικό που έχει χρησιμοποιηθεί στην δόμηση γιατί εκτός από το γεγονός ότι είναι διαθέσιμο στις περισσότερες περιοχές του κόσμου έχει πολλές ιδιότητες που του επιτρέπουν να παρουσιάζει πλεονεκτήματα, κυρίως ως προς το κόστος και το περιβαλλοντικό του “ίχνος”, σε σχέση με άλλα δομικά υλικά. Αυτοί είναι οι λόγοι για τους οποίους τα τελευταία χρόνια η μελέτη της συμπεριφοράς του πηλού ως δομικό υλικό έχει αποκτήσει ενδιαφέρον και μελετάται από την επιστημονική κοινότητα σε συστηματική βάση ως προς τις ιδιότητες του και τους τρόπους διατήρησης και αναβάθμισης του.

2. Φέρουσα τοιχοποιία

2.1 Γενικά στοιχεία

Η τοιχοποιία αποτελεί ένα από τα πιο αρχαιότερα δομικά υλικά. Κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία, και ιδιαίτερα λιθόκτιστη, με πληθώρα συνδετικών κονιαμάτων, συναντώνται μέχρι και σήμερα ειδικά σε επαρχιακές περιοχές, αλλά ακόμα και σε αστικά κέντρα, όπως είναι το κέντρο της Αθήνας. Αυτό το γεγονός, σε συνδυασμό με την διατήρηση της λειτουργικότητας τους μέχρι και σήμερα, αποδεικνύει ότι αν ο σχεδιασμός τους είναι σωστός και χαρακτηρίζεται από κατάλληλη υλοποίηση του, τότε τα κτίρια από τοιχοποιία είναι σε θέση να αναλαμβάνουν με ασφάλεια τις επιβαλλόμενες σε αυτά δράσεις, όπως είναι τα φορτία σχεδιασμού τους και οι περιβαλλοντικές δράσεις. Παραδείγματα ιστορικών κατασκευών από τοιχοποιία είναι η πλειοψηφία των αρχαίων ελληνικών ιστορικών και μνημειακών δομημάτων όπως είναι: οι κατοικίες/πύργοι της Μάνης, το γεφύρι της Άρτας.

Ο όρος τοιχοποιία, εμπεριέχει μία πληθώρα από κατασκευαστικούς τύπους που αφορά τα εξής: φέρουσα, διαχωριστική (φέρουσα και μη), δίστρωτη, τρίστρωτη, μονολιθική, μπατική, δρομική καθώς και πληθώρα άλλων τύπων. Πέρα από τους κατασκευαστικούς τύπους υπάρχει πληθώρα υλικών που χρησιμοποιούνται και επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την μηχανική της συμπεριφορά σε κατακόρυφα και οριζόντια φορτία, αλλά και σε θέματα λειτουργικότητας. Στην παρούσα εργασία θα δοθεί βάση στις φέρουσες τοιχοποιίες, οι οποίες είναι αυτές που προορίζονται για να μεταφέρουν στο έδαφος κατακόρυφα ή κι οριζόντια φορτία. Σε κτίρια χωρίς σκελετό, φέροντες είναι οι τοίχοι που μεταφέρουν τα κατακόρυφα φορτία από τη στέγη και τα πατώματα στο έδαφος.

Οι τοιχοποιίες διακρίνονται σε κατηγορίες με κοινά χαρακτηριστικά ανάλογα με το είδος των τοιχοσωμάτων από τα οποία είναι δομημένες, τη λειτουργία τους στο φορέα και τον τρόπο δόμησης τους. Θα δοθεί έμφαση στις δίστρωτες και τρίστρωτες λιθοδομές, μιας κι αυτό είναι το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα της τοιχοποιίας

Η ποιότητα της λιθοδομής εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες:

- I. Μηχανικές και φυσικές ιδιότητες λιθοσωμάτων
- II. Μηχανικές και φυσικές ιδιότητες συνδετικού κονιάματος, καθώς και οι αναλογίες των υλικών που το αποτελούν,
- III. Ομοιομορφία και συμβατότητα των ιδιοτήτων των δομικών υλικών που την απαρτίζουν,
- IV. Αναλογία λιθοσωμάτων- κονιάματος στο σύνολο της τοιχοποιίας,
- V. Αναπτυσσόμενη συνάφεια μεταξύ του κονιάματος και των λιθοσωμάτων,
- VI. Τρόπος δόμησης

2.3 Τύποι τοιχοποιίας

2.3.1 Κατασκευαστικοί τύποι τοιχοποιίας

Συναντώνται πολλοί διαφορετικοί τύποι φερουσών τοιχοποιιών. Η παρούσα εργασία θα εντυφήσει σε περιπτώσεις παραδοσιακών τοιχοποιιών από φέρουσα λιθοδομή, οι οποίες έχουν υλοποιηθεί κατασκευαστικά με δύο ή τρεις στρώσεις. Πέρα όμως από αυτούς τους τύπους δόμησης μίας τοιχοποιίας συναντάται πληθώρα άλλων όπως είναι οι: συμπαγείς, μπατικές, δρομικές, υπερμπατικές, κοίλες ή με πυρήνα, ισόδομες, ανισόδομες, μικτές κ.α.

Τρίστρωτη φέρουσα τοιχοποιία

Οι τρίστρωτες τοιχοποιίες αποτελούν έναν από τους συνηθέστερους τύπους τοιχοποιίας σε ιστορικές κατασκευές. Στις τρίστρωτες τοιχοποιίες, αυτό που ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό είναι το πάχος τους, που μπορεί να είναι από 40cm έως 2-3 μέτρα, στις περιπτώσεις ιστορικών οχυρωματικών έργων [Adami Ch, 2011]. Το σύνηθες είναι ότι κατασκευάζονται από δύο παράλληλους ανεξάρτητους τοίχους (χωρίς διάτονους λίθους στις περισσότερες περιπτώσεις), ενώ το μεταξύ τους κενό συμπληρώνεται με ένα χαλαρό υλικό αποτελούμενο από μικρούς λίθους ή σπασμένες οπτόπλινθους και κονίαμα. Στις ιστορικές κατασκευές απαντώνται διάφοροι τύποι τρίστρωτων τοιχοποιιών, με:

- I. ίδιο ή διαφορετικό πάχος εξωτερικών παρειών,
- II. διαφορετικό τρόπο κατασκευής στρώσεων (π.χ. η εξωτερική παρειά με ημιλαξευτούς και η εσωτερική με αργολιθοδομή)
- III. συνδυασμό λίθων με οπτόπλινθους ή αντικατάσταση εντελώς των λίθων με τις οπτόπλινθους.



Εικόνα 13. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τρίστρωτης λιθοδομής [Adami Ch, 2011]

Όπως γίνεται σαφές από τα παραπάνω στοιχεία, εφόσον μεταβάλλονται πολλά χαρακτηριστικά στην δόμηση μιας τρίστρωτης τοιχοποιίας, εισάγεται μεγάλο πλήθος παραμέτρων που αφορά τόσο τα μηχανικά της χαρακτηριστικά όσο και την απόκριση της έναντι διάφορων δράσεων. Παρόλη την ποικιλία των τύπων της τρίστρωτης τοιχοποιίας,

υπάρχουν κάποια αναμφισβήτητα κοινά στοιχεία που την χαρακτηρίζουν, τα οποία είναι τα εξής:

- I. μεγάλο ποσοστό κενών, τα οποία είναι ανομοιόμορφα διανεμημένα σε όλο τον όγκο της,
- II. απουσία συνάφειας μεταξύ των στρώσεων της, τόσο λόγω του τρόπου δόμησης της εξαιτίας της απουσίας διάτονων λίθων όσο και λόγω των υλικών των κονιαμάτων. Αυτή η απουσία συνάφειας μεταξύ των στρώσεων της, η οποία εξελίσσεται αρνητικά με τον χρόνο τόσο υπό την επίδραση οριζόντιων και κατακόρυφων δράσεων όσο και φθοράς/ γήρανσης των υλικών, οδηγεί στο να μην λειτουργούν ως ενιαίες,
- III. η αστοχία τους λόγω αποκόλλησης των παρειών τους, εξαιτίας φορτίων που δρουν εντός και εκτός επιπέδου της τοιχοποιίας, πράγμα που την καθιστά ιδιαίτερα ευάλωτη στην σεισμική δράση.

Δίστρωτη φέρουσα τοιχοποιία

Η δίστρωτη τοιχοποιία μοιάζει με την τρίστρωτη, υπό την έννοια ότι κι εκείνη κατασκευάζεται συνήθως από δύο ανεξάρτητες στρώσεις τοιχοποιίας, χωρίς την παρουσία διάτονων λίθων μεταξύ των επιμέρους στρώσεων. Ενώ στην τρίστρωτη ανάμεσα στις δύο εξωτερικές στρώσεις υπάρχει μία επιπλέον χαλαρή στρώση η οποία ονομάζεται γέμισμα, στην δίστρωτη δεν υπάρχει αυτό απλά οι δύο εξωτερικές στρώσεις βρίσκονται σε επαφή.

2.3.2 Μορφολογικοί τύποι τοιχοποιίας

Από μορφολογικής άποψης έχει παρατηρηθεί μεγάλο πλήθος υλικών τόσο ως δομικές λίθοι όσο κι ως κονιάματα δόμησης. Συνήθως είναι η χρήση διαφόρων τύπων φυσικών λίθων, κυρίως ασβεστόλιθων, και, πλέον, εμφανίζονται τοιχοποιίες με τεχνητά τοιχοσώματα, όπως οι οπτοπλινθοδομές και οι τσιμεντοπλινθοδομές. Οι φυσικοί λίθοι χαρακτηρίζονται από ποικίλα μηχανικά χαρακτηριστικά και γεωμετρία ανάλογα με τα οποία προσδίδουν μηχανικές αντοχές και θερμομονωτικές ιδιότητες στην τοιχοποιία. Οι τεχνητοί λίθοι έχουν ως βασικό τους χαρακτηριστικό τις σταθερές διαστάσεις αφού είναι βιομηχανικά προϊόντα, ικανοποιητικές θερμομονωτικές ικανότητες (τοιχοσώματα κυψελλωειδούς δομής) και συνήθως έχουν μη φέροντα ρόλο στην κατασκευή λόγω των χαμηλών τους αντοχών. Ωστόσο, ιστορικά και βιβλιογραφικά έχουν καταγραφεί και ωμοπλινθοδομές. Ως συνδετικό κονίαμα έχει χρησιμοποιηθεί το πηλοκονίαμα, ασβεστοκονίαμα, τσιμεντοκονίαμα κ.α.

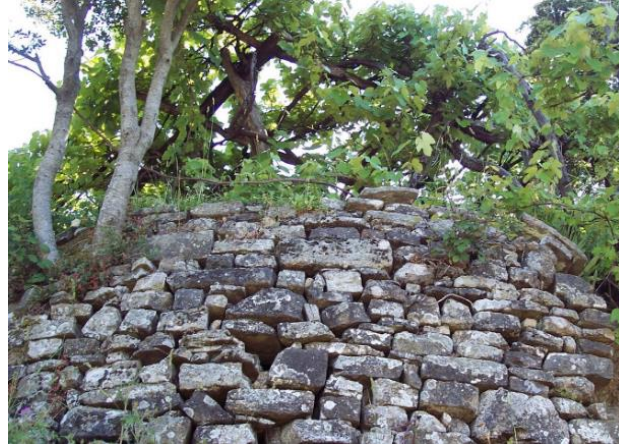
Τύποι δόμησης με λίθο

Στην ελληνική παραδοσιακή αρχιτεκτονική η δόμηση με φυσικούς λίθους είναι η συνηθέστερη. Στις μέρες μας, όμως, έχει εγκαταλειφθεί το κτίσιμο κτιρίων εξ ολοκλήρου από λίθους λόγω του υψηλού κόστους των υλικών και της εργασίας. Πλέον, οι λίθοι χρησιμοποιούνται μόνο για την επένδυση είτε κτιρίων με σκελετό από σκυρόδεμα και τοιχοποιιών πλήρωσης ή κι ακόμα κτιρίων από φέρουσα οπτοπλινθοδομή. Για λόγους πληρότητας, αναφέρονται όλες οι κατηγορίες λιθοδομών, αν και στην παρούσα εργασία θα γίνει λόγος για την αργολιθοδομή με συνδετικό υλικό το πηλοκονίαμα. Η λιθοδομή

χωρίζεται σε διαφορετικές κατηγορίες, ανάλογα με την επεξεργασία της πέτρας. Τα πιο γνωστά είδη λιθοδομών είναι:

I. Ξηρολιθοδομές

Ξηρολιθοδομές ή ξερολιθιές, είναι οι λιθοδομές που χτίζονται χωρίς κονίαμα και με σχετικά μικρή-επιτόπια επεξεργασία της πέτρας.



Εικόνα 14. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ξηρολιθοδομής (ή αλλιώς ξερολιθιά)

II. Αργολιθοδομές



Εικόνα 15. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αργολιθοδομής

Αργολιθοδομές λέγονται οι τοιχοποιίες που γίνονται με αργούς λίθους (έχουν υποστεί πολύ μικρή ή και καθόλου επεξεργασία) και συνδετικό κονίαμα. Ανάμεσα στους μεγαλύτερους λίθους τοποθετούνται μικρά λιθαράκια (τσιβίκια) για την πλήρωση των κενών. Κάποιες φορές ενισχύονταν με ξυλοδεσιές. Οι τοίχοι αυτοί καλύπτονταν με στρώμα λάσπης ή ασβέστη για λόγους προστασίας από τις δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες. Το ελάχιστο πάχος μιας αργολιθοδομής ποικίλλει και εξαρτάται κυρίως από τον τρόπο κατασκευής της, και κυμαίνεται γύρω στα είναι 30-50cm.

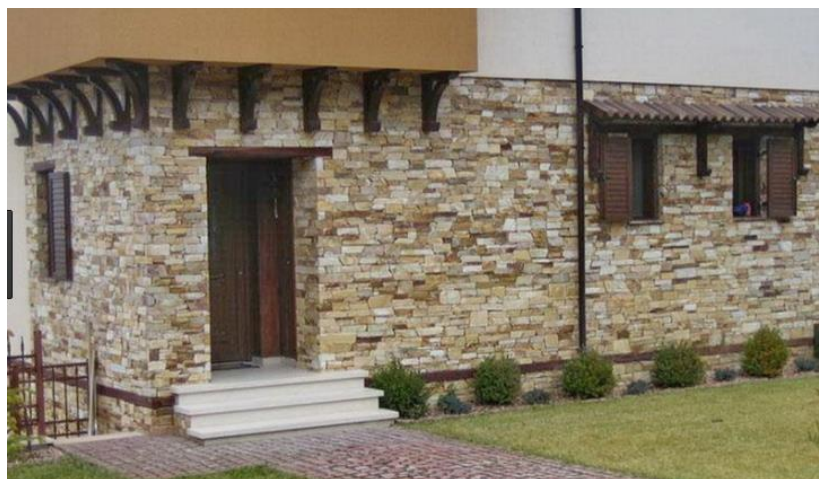
III. Ημιλαξευτές Λιθοδομές



Εικόνα 16. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ημιλαξευτής λιθοδομής με λαξευμένους γωνιόλιθους

Ημιλαξευτές είναι οι λιθοδομές οι οποίες κατασκευάζονται με μισολαξευμένες πέτρες (έχουν υποστεί μεγαλύτερη επεξεργασία από αυτή των αργολιθοδομών) και κονίαμα.

Λαξευτές Λιθοδομές



Εικόνα 17. Χαρακτηριστικό παράδειγμα λαξευτής λιθοδομής

Η λαξευτή τοιχοποιία είναι ο αρχαιότερος τρόπος κατασκευής λιθοδομών, με τον οποίο έχουν κτισθεί πολύ σημαντικά μνημεία (αρχαίοι Ελληνικοί ναοί, Αιγυπτιακές πυραμίδες κ.α.). Η κάθε πέτρα έχει υποστεί τέτοια επεξεργασία που έχει αποκτήσει πλήρως το σχήμα που χρειάζεται για την κατασκευή της λιθοδομής. Στην αρχαιότητα η δόμηση γινόταν χωρίς κονίαμα. Άλλωστε η αντοχή της τοιχοποιίας βασίζεται στην απόλυτη έδραση και στην εμπλοκή των λίθων.

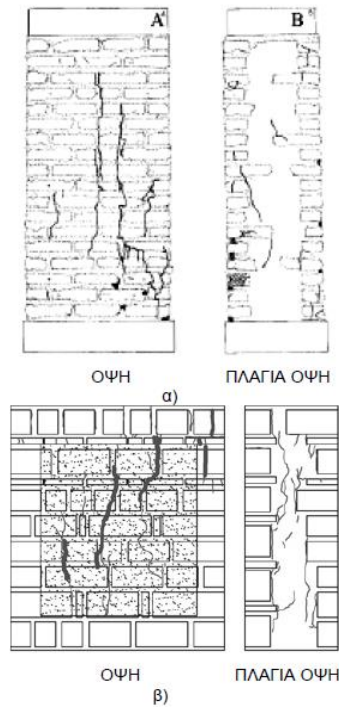
2.4 Συμπεριφορά τοιχοποιίας πριν την εφαρμογή των ενεμάτων

2.4.1 Μηχανισμός αστοχίας τοιχοποιίας

Είναι σαφές, ότι προκειμένου να γίνει η επιλογή των κατάλληλων υλικών για την ενίσχυση των τοιχοποιιών, είναι απαραίτητο να γίνει κατανοητός ο τρόπος αστοχίας τους, ο οποίος αναφέρεται τόσο σε μηχανικά ζητήματα όσο και σε θέματα ανθεκτικότητας. Επομένως, θα πρέπει να μελετηθούν σε βάθος οι παθογένειες και βλάβες της τοιχοποιίας. Η κατηγοριοποίηση και ταξινόμηση των ευαίσθητων σημείων των φερουσών τοιχοποιιών οδηγεί σε συστηματοποίηση της μελέτης τους. Οι βλάβες που αφορούν τη φέρουσα ικανότητα της κατασκευής, αλλά και την ανθεκτικότητά της είναι:

- Διαγώνιες ρωγμές εντός επιπέδου της τοιχοποιίας, προερχόμενες από σεισμική δόνηση,
- Κατακόρυφες ρωγμές, λόγω της προσθήκης φορτίων εξαιτίας των πιθανών αλλαγών χρήσης του κτιρίου, οι οποίες εμφανίζονται, είτε στις όψεις της λιθοδομής, ή ανάμεσα στις επιμέρους στρώσεις της ή στην ενδιάμεση στρώση μίας τρίστρωτης λιθοδομής
- Εκτός επιπέδου μετακίνηση του τοίχου, λόγω οριζόντιων ωθήσεων (άνεμος, σεισμός), ή και λόγω μη επαρκούς διαφραγματικής λειτουργίας των πατωμάτων και στεγών. Τέτοιου τύπου μετακίνηση εκτός επιπέδου μπορεί να οφείλεται και στον τρόπο δόμησης των δίστρων και τρίστρων λιθοδομών. Ο τρόπος δόμησης χαρακτηρίζεται από απουσία σύνδεσης των επιμέρους στρώσεων μεταξύ τους κι ύπαρξης διάτονων λίθων, κάτι το οποίο οδηγεί την αποκόλληση των στρώσεων τους ως τον κυρίαρχο τρόπο αστοχίας τους,
- Ρηγματώσεις που οφείλονται στην παρουσία υγρασίας. Το πηλοκονίαμα χαρακτηρίζεται από το μεγάλο πορώδες του, πράγμα που σημαίνει ότι η επαφή του με νερό οδηγεί στην διόγκωσή του. Από την άλλη πλευρά, η απομάκρυνση του νερού οδηγεί σε συστολή. Όλοι αυτοί οι κύκλοι ύγρανσης-ξήρανσης οδηγούν σε ρηγματώσεις. Αυτές οι ρηγματώσεις πέραν του ότι συμβάλλουν στην μηχανική αστοχία της λιθοδομής, αποτελούν και δίοδο για την είσοδο υγρασίας αλλά και άλλων ουσιών σε αυτήν καθιστώντας την ευάλωτη στις περιβαλλοντικές δράσεις. Στο ίδιο κλίμα κυμαίνεται και η αποσάθρωση των κονιαμάτων από την επίδραση του νερού.

Πιο συγκεκριμένα από αποτελέσματα πειραματικών διερευνήσεων, προκύπτει ότι ο τρόπος αστοχίας των υποβαλλόμενων σε θλίψη τοιχίσκων είναι ο ίδιος. Συγκεκριμένα όπως φαίνεται στις φωτογραφίες της Εικόνα 18, στις όψεις τους εμφανίζονται κατακόρυφες ρωγμές. Αυτές οι ρωγμές είναι δυνατόν να διέρχονται από τους αρμούς του κονιάματος, από τις διεπιφάνειες κονιαμάτων-λιθοσωμάτων καθώς και από τα ίδια τα λιθοσώματα ανάλογα με τα σχετικά μηχανικά χαρακτηριστικά των λιθοσωμάτων και των κονιαμάτων. Στις εγκάρσιες όψεις των τοιχίσκων εμφανίζονται κατακόρυφες ρωγμές, οι οποίες διέρχονται κυρίως μεταξύ των διεπιφανειών των επιμέρους στρώσεων δίστρων και τρίστρων τοιχοποιιών, καθώς και διαμέσου του υλικού πληρώσεως τρίστρων τοιχοποιιών. Οι κατακόρυφες ρωγμές στις εγκάρσιες όψεις των τοιχοποιιών έχουν αρκετά μεγαλύτερο εύρος σε σχέση με αυτές στις όψεις [Vintzileou E. et al., 2008].



Εικόνα 18. Τύποι ρηγματώσεων και αστοχίας τοιχίσκων (ιδιαίτερα τρίστρωτων) υπό θλιπτικά φορτία πριν την εφαρμογή των ενεμάτων [Vintzileou et al., 2008]

Συνεπώς, η κάθε παρειά συμπεριφέρεται, πρακτικώς, ανεξάρτητα και στην περίπτωση των τρίστρωτων τοιχοποιιών οι εξωτερικές παρειές, ως πιο δύσκαμπτες παραλαμβάνουν μεγαλύτερο φορτίο από το εσωτερικό γέμισμα. Λόγω του μικρότερου πάχους πλέον της κάθε παρειάς, στις οποίες μοιράζεται το φορτίο σε σχέση με την αρχική διάταξη, εμφανίζεται σημαντικά μεγαλύτερη λυγηρότητα. Συγκεκριμένα, στις τρίστρωτες τοιχοποιίες, καθώς αυξάνεται το θλιπτικό φορτίο και σε συνδυασμό με τις οριζόντιες μετακινήσεις που προκαλεί η διόγκωση της εσωτερικής στρώσης, αυξάνονται οι εκτός επιπέδου μετακινήσεις των εξωτερικών στρώσεων μέχρι την αστοχία τους από κάμψη εκτός επιπέδου. Η μηχανική συμπεριφορά μιας τοιχοποιίας απέναντι σε θλιπτικά φορτία μπορεί να περιγραφεί από δύο στάδια:

- I. Σε πρώτο στάδιο η συμπεριφορά της τοιχοποιίας θεωρείται ελαστική με τις εγκάρσιες κατακόρυφες παραμορφώσεις των τοιχίσκων να αυξάνονται γραμμικά με την αύξηση του θλιπτικού φορτίου. Οι εξωτερικές στρώσεις είναι αρηγμάτωτες κι οι επιμέρους παρειές διατηρούν τον μεταξύ τους δεσμό. Στις τρίστρωτες τοιχοποιίες, η ενδιάμεση στρώση λειτουργεί ελαστικά, συμμετέχοντας σε έναν περιορισμένο βαθμό στην παραλαβή μέρους τους φορτίου.
- II. Το δεύτερο στάδιο εξαρτάται από τις συνθήκες στήριξης των εξωτερικών παρειών, την γεωμετρία, τον λόγο ελαστικών σταθερών, την μηχανική συνάφεια μεταξύ των στρώσεων και σηματοδοτείται από την απώλεια της μηχανικής τους συνάφειας. Συγκεκριμένα στις τρίστρωτες τοιχοποιίες, καθώς αυξάνεται το θλιπτικό φορτίο, η ενδιάμεση στρώση η οποία βρίσκεται υπό τριαξονική ετερόσημη ένταση διαρρέει. Επομένως, μέσω της διαρροής της εσωτερικής στρώσης αυξάνεται το θλιπτικό φορτίο

και οι οριζόντιες ωθήσεις στις εξωτερικές στρώσεις, προκαλώντας σε αυτές αστοχία από κάμψη εκτός επιπέδου, με παράλληλες ή κάθετες στους οριζόντιους αρμούς ρωγμές.

2.4.2 Επιρροή παραμέτρων στην θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας

Όπως γίνεται σαφές με την βιβλιογραφική ανασκόπηση που αφορά τα πειράματα θλίψης που έχουν πραγματοποιηθεί σε τοιχίσκους, είναι ξεκάθαρο ότι υπάρχει πληθώρα στην γεωμετρία των δοκιμίων, στον τρόπο δόμησης, στα υλικά που χρησιμοποιούνται οδηγώντας σε συντελεστή μεταβλητότητας της θλιπτικής τους αντοχής της τάξης του 15-25% [Adami Ch, 2011]. Παρόλη την μεγάλη διασπορά είναι δυνατή η διεξαγωγή ορισμένων συμπερασμάτων για την επιρροή διαφόρων παραμέτρων (μηχανικά χαρακτηριστικά λίθων και κονιαμάτων) στα μηχανικά χαρακτηριστικά των τοιχίσκων πριν την ομογενοποίηση της μάζας τους με ενέματα. Μεγάλοι συντελεστές μεταβλητότητας εμφανίζονται και στις ιδιότητες του μέτρου ελαστικότητας, στις κατακόρυφες παραμορφώσεις αστοχίες, καθώς και στα ανοίγματα των κατακόρυφων ρωγμών που ανοίγουν μεταξύ των παρειών της τοιχοποιίας στις εγκάρσιες όψεις της (40-75%) [Adami Ch, 2011]. Επομένως, για τις παραπάνω ιδιότητες δεν μπορούν να προκύψουν ασφαλή συμπεράσματα για την επιρροή των διάφορων παραμέτρων σε αυτά. Γι αυτό παρακάτω θα γίνει ανάλυση κυρίως στις παραμέτρους που επηρεάζουν την θλιπτική αντοχή:

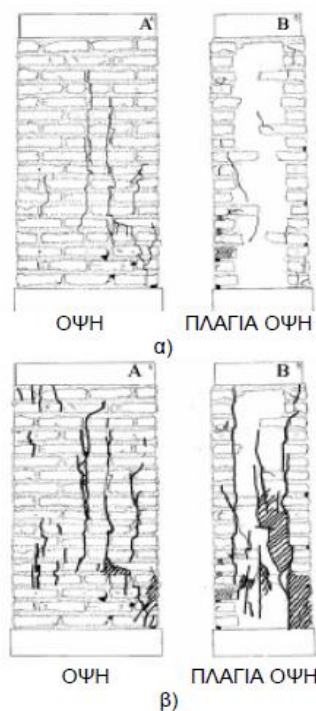
Θλιπτική αντοχή τοιχίσκων

Στις παραδοσιακές δίστρωτες και τρίστρωτες τοιχοποιίες, στις οποίες το συνδετικό κονίαμα (κι ιδιαίτερος το πηλοκονίαμα) καθώς και η ενδιάμεση στρώση, είναι χαμηλών μηχανικών χαρακτηριστικών, η θλιπτική αντοχή των λιθοσωμάτων δεν είναι καθοριστική παράμετρος της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας. Αντιθέτως, η θλιπτική αντοχή του υλικού πληρώσεως και του κονιάματος δόμησης έχει μεγαλύτερη επίδραση στην θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις θέσεις διάνοιξης των ρωγμών, όπου στις όψεις είναι κυρίως στους αρμούς του κονιάματος και στις πλάγιες όψεις στην διεπιφάνεια των παρειών και στο υλικό πλήρωσης. Ειδικά στις τρίστρωτες τοιχοποιίες, μπορεί να σημειωθεί αύξηση της θλιπτικής αντοχής μέσω της βελτίωσης των μηχανικών χαρακτηριστικών της ενδιάμεσης στρώσης, διότι μέσω αυτής της κίνησης, αυξάνεται το θλιπτικό φορτίο που αυτή παραλαμβάνει, οδηγώντας σε μικρότερη διόγκωση αυτής, η οποία αποτελεί μηχανισμό αστοχίας των εξωτερικών στρώσεων μέσω της εκτός επιπέδου παραμόρφωσης τους. Αύξηση στο παραλαμβανόμενο θλιπτικό φορτίο μπορεί να σημειωθεί και μέσω της αύξησης της διατομής της ενδιάμεσης στρώσης, η οποία όμως οδηγεί σε μείωση της θλιπτικής αντοχής. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί, μέσω του συμπεράσματος ότι όσο αυξάνεται η διατομή της ενδιάμεσης αδύναμης στρώσης, η οποία υπό θλιπτικό φορτίο μπορεί να διογκώνεται εντόνως, μειώνεται η επίδραση της περιέδεσης των εξωτερικών παρειών στην ενδιάμεση [Adami Ch, 2011].

2.5 Συμπεριφορά λιθοδομής μετά την εφαρμογή ενεμάτων

2.5.1 Μηχανισμός αστοχίας τοιχοποιίας

Η συνήθης μορφή αστοχίας των ενισχυμένων τοιχίσκων μετά την εφαρμογή των ενεμάτων είναι η ίδια με αυτήν πριν την εφαρμογή τους, με κατακόρυφες ρωγμές στις όψεις στους αρμούς του κονιάματος, αλλά και με κατακόρυφες ρωγμές στις εγκάρσιες όψεις ανάμεσα στις επιμέρους παρειές ή στην ενδιάμεση στρώση. Εμφανίζονται ρωγμές τόσο στις θέσεις των προηγούμενων ρωγμών πριν την εφαρμογή των ενεμάτων, αλλά περισσότερες είναι οι ρωγμές που εμφανίζονται σε νέες θέσεις, πράγμα που σημαίνει ότι τα ενέματα προσέφεραν επαρκή ενίσχυση στις αρχικές πληγείσες περιοχές, επομένως το θλιπτικό φορτίο βρήκε νέα δίοδο μέσα από εναλλακτικές διαδρομές [Adami Ch, 2011].



Εικόνα 19. Ρηγματώσεις τρίστρωτων τοιχίσκων στην αστοχία α) πριν την εφαρμογή ενεμάτων β) μετά την εφαρμογή ενεμάτων [Vintzileou et al., 2008]

2.5.2 Επιρροή παραμέτρων στην θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας

Γενικά, έχει αποδειχθεί ότι τα ενέματα υψηλής διεισδυτικότητας σε δίστρωτους και τρίστρωτους τοιχίσκους βελτιώνουν σε μεγάλο βαθμό την μηχανική τους συμπεριφορά μέσω της ομογενοποίησης της μάζας τους. Η βελτίωση αυτή αποδίδεται στους εξής παράγοντες:

- I. Στους τρίστρωτους τοιχίσκους, στην ομογενοποίηση της μάζας της ενδιάμεσης στρώσης, η οποία οδηγεί σε βελτίωση των μηχανικών τους χαρακτηριστικών. Αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη της συνεισφορά στην ανάληψη θλιπτικού φορτίου ανακουφίζοντας τις εξωτερικές παρειές, αλλά στην μείωση της διόγκωσης της και των

- ασκούμενων στις εξωτερικές παρειές οριζόντιων ωθήσεων, οι οποίες οδηγούν σε αστοχία από κάμψη εκτός επιπέδου,
- II. Μέσω της εφαρμογής των ενεμάτων, σε μικρότερο βαθμό βελτιώνονται και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των εξωτερικών στρώσεων,
- III. Ενισχύεται η συνάφεια μεταξύ των επιμέρους παρειών, επομένως καθυστερείται η διάνοιξη των κατακόρυφων ρωγμών στις διεπιφάνειες των στρώσεων στις εγκάρσιες όψεις, αυξάνοντας έτσι την θλιπτική αντοχή.

Παρακάτω αναλύεται το πως επηρεάζει ο τύπος των ενεμάτων και τα μηχανικά χαρακτηριστικά αυτών, τις μηχανικές ιδιότητες των τοιχίσκων μετά την εφαρμογή τους σε αυτούς.

Θλιπτική αντοχή ενισχυμένων τοιχίσκων

Η εφαρμογή κατάλληλων ενεμάτων υψηλής διεισδυτικότητας, πέρα από την βελτίωση στις τιμές της θλιπτικής αντοχής των τοιχίσκων, περιορίζει σε μεγάλο βαθμό τις ανομοιογένειες τους, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μια πιο ομοιόμορφη συμπεριφορά μετά τα ενέματα. Αυτό επιβεβαιώνεται μέσα από τον συντελεστή μεταβλητότητας της θλιπτικής τους αντοχής, ο οποίος είναι μικρός τόσο μεταξύ πανομοιότυπων τοιχίσκων με παρόμοια σύνθεση ενέματος όσο και μεταξύ διαφορετικών συνθέσεων ενεμάτων, πράγμα που επιβεβαιώνει ότι η θλιπτική αντοχή των ενεμάτων δεν ελέγχει την συμπεριφορά των τοιχίσκων μετά την ενίσχυση [Adami Ch, 2011]. Αυτή η παραδοχή ενισχύθηκε από το γεγονός ότι με λιγότερο ισχυρά ενέματα -ως προς την θλιπτική τους αντοχή-, παρατηρήθηκε αντίστοιχη αύξηση της θλιπτικής αντοχής των τοιχίσκων. Εξάλλου έχει αποδειχθεί ότι μέχρι μία τιμή της θλιπτικής αντοχής των ενεμάτων, η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας φαίνεται να αυξάνεται γραμμικά με την θλιπτική αντοχή των ενεμάτων, επομένως η εφαρμογή τσιμεντιτικών ενεμάτων φαίνεται ότι δε συνεισφέρει περαιτέρω στην θλιπτική ενίσχυση των τοιχοποιιών. Το ίδιο επιβεβαιώνεται σε δίστρωτους τοιχίσκους από οπτοπλινθοδομή οι οποίοι ενισχύθηκαν με συνθέσεις των [Miltiadiou 1990] [Adami Ch, 2011].

Έχει αποδειχθεί ότι η καμπτική αντοχή των ενεμάτων είναι καθοριστικότερη της θλιπτικής μιας κι όπως φαίνεται από την συλλογή στοιχείων, παρά τις διαφορές μεταξύ των δοκιμίων (στα υλικά, στη γεωμετρία κ.ο.κ.), η σχέση μεταξύ της θλιπτικής αντοχής των επισκευασμένων τοιχίσκων και της εφελκυστικής-καμπτικής αντοχής των ενεμάτων μπορεί να θεωρηθεί πρακτικώς γραμμική, ακόμα και με ενέματα τα οποία έχουν χαμηλά έως μέτρια μηχανικά χαρακτηριστικά. Μέσα από δοκιμές τοιχίσκων σε θλίψη, από (Vintzileou et al., 1995), (Valluzzi et al. 2004) και (Kalagri et al., 2007), και σε σύνθετα δοκίμια εφελκυσμού και διάτμησης επιβεβαιώθηκε ότι, παρόλο που η ενίσχυση των τρίστρωτων τοιχοποιιών αφορά την θλιπτική ενδυνάμωση της ενδιάμεσης στρώσης, ο τρόπος αστοχίας τους μέσω διαχωρισμού των στρώσεων τους είναι καμπτικός, άρα, εν τέλει, η καμπτική αντοχή των ενεμάτων είναι καθοριστική. Με ενέματα όπου προσφέρουν βελτιωμένες ιδιότητες της διεπιφάνειας μεταξύ των παρειών των διαφόρων στρώσεων, καθυστερείται η διάνοιξη των κατακόρυφων ρωγμών, που αυτές εν τέλει καθορίζουν την αστοχία. Η βελτίωση σχετίζεται με την πύκνωση της μικροδομής των διεπιφανειών, πράγμα που μπορούν να προσφέρουν διμερή και τριμερή ενέματα με μέτρια μηχανικά χαρακτηριστικά [Adami Ch, 2011].

Μέτρο Ελαστικότητας

Με την εφαρμογή των ενεμάτων αυξάνεται το μέτρο ελαστικότητας των ενισχυμένων τοιχίσκων χωρίς να φαίνεται κάποια συσχέτιση με τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ενεμάτων, καθώς την ίδια αύξηση σημείωσαν τόσο τα τσιμεντιτικά ενέματα όσο και τα ενέματα με μέτρια και χαμηλά μηχανικά χαρακτηριστικά [Adami Ch, 201].

Επίσης η βελτίωση του μέτρου ελαστικότητας δε φαίνεται να σχετίζεται με την αύξηση της θλιπτικής αντοχής του ενισχυμένου τοιχίσκου, αλλά το μόνο που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των τοιχίσκων είναι εν γένει μικρότερη από εκείνη της θλιπτικής τους αντοχής [Adami Ch, 2011].

Παραμορφώσεις αστοχίας

Στις παραμορφώσεις γίνεται ξεκάθαρη η επίδραση του ενέματος στην ενισχυμένη τοιχοποιία, καθώς η παραμορφωσιμότητα των τοιχίσκων ακολουθεί εκείνη των ενεμάτων, και επομένως όσο πιο ισχυρή είναι η μικροδομή ενός ενέματος, τόσο μικρότερες είναι οι παραμορφώσεις των τοιχίσκων. Συνεπώς με την χρήση διμερών ή τριμερών ενεμάτων ή ενεμάτων υδραυλικής ασβέστου εξασφαλίζεται επαρκής πλαστιμότητα στις τοιχοποιίες, επομένως αυτές οι συνθέσεις θα πρέπει να προτιμώνται έναντι άλλων ισχυρότερων υλικών επέμβασης [Adami Ch, 2011].

2.6 Βιβλιογραφικά συμπεράσματα

Σύμφωνα με όσο έχουν αναφερθεί παραπάνω, μπορεί να γίνει εξαγωγή συμπερασμάτων, τα οποία θα μελετηθεί αν ισχύουν, στους τοιχίσκους που κατασκευάστηκαν κι ενισχύθηκαν, στο πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας. Τα συμπεράσματα είναι τα εξής:

- I. Η μηχανική συμπεριφορά των τοιχίσκων πριν την εφαρμογή των ενεμάτων εξαρτάται από την γεωμετρία τους, τον λόγο των ελαστικών σταθερών των υλικών και την μηχανική συμπεριφορά των παρειών,
- II. Με την εφαρμογή υδραυλικών ενεμάτων αυξάνεται η θλιπτική και εφελκυστική αντοχή των τοιχίσκων, εμφανίζοντας ανταγωνιστικά χαρακτηριστικά ενέματα υδραυλικής ασβέστου και διμερείς-τριμερείς συνθέσεις ενεμάτων σε σχέση με τα αμιγώς τσιμεντιτικά,
- III. Μετά την ομογενοποίηση τους με ενέματα οι τοιχίσκοι εμφανίζουν μικρή αύξηση της δυσκαμψίας τους, ωστόσο όχι ανάλογη της θλιπτικής ή καμπτικής αντοχής των ενεμάτων,
- IV. Η εφαρμογή των ενεμάτων αποσκοπεί κυρίως στην παραμορφωσιμότητα των ενισχυμένων τοιχίσκων με μείωση των εκτός επιπέδου μετακινήσεων και εν γένει με αύξηση των διαμήκων. Τα ενέματα με μέτρια ή χαμηλά χαρακτηριστικά κρίνονται καλύτερα από τις τσιμεντιτικές συνθέσεις ενεμάτων, εφόσον εμφανίζουν περισσότερο πλάσιμη συμπεριφορά,
- V. Παρόλο που η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης εξαρτάται και από τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ενεμάτων, βασικότερη είναι η συνάφεια που αναπτύσσουν τα υλικά επέμβασης με τα ήδη υφιστάμενα υλικά.

3. Ενίσχυση με Ενέματα

3.1 Γενικά στοιχεία

Η τεχνική των ενεμάτων αφορά την εισαγωγή ενός νέου υλικού σε ρευστή μορφή στην υπάρχουσα λιθοδομή με στόχο την πλήρωση ρωγμών, κενών και κοιλιοτήτων. Με την πάροδο του χρόνου το νέο υλικό αυτό στερεοποιείται και βελτιώνει τα μηχανικά και φυσικά χαρακτηριστικά του συνόλου της τοιχοποιίας. Τα ενέματα αποτελούν γνωστή πρακτική ενίσχυσης των φερουσών τοιχοποιιών και κατασκευών από σκυρόδεμα τα τελευταία χρόνια. Τονίζεται η θεμελιώδης συνεισφορά τους σε ιστορικές λιθοδομές, δίστρωτες ή τρίστρωτες, λόγω της ελλιπούς σύνδεσης των επιμέρους φύλλων τους, της απουσίας διάτονων λίθων καθώς, επίσης, και του υψηλού ποσοστού των κενών τους. Επομένως, τα ενέματα αποσκοπούν στο να εξαλείψουν τις παραπάνω παθογένειες μέσω ομογενοποίησης της μάζας των τοιχοποιιών, με σεβασμό στο αυθεντικό υλικό.

Δεν θα πρέπει να παραληφθεί ότι πηγή “έμπνευσης” αυτής της τεχνικής αποτέλεσαν οι γεωτεχνικές πρακτικές σε έργα σταθεροποίησης του εδάφους με ενέματα. Έχουν γίνει ευρέως γνωστά με τον όρο “τσιμεντενέματα”, τα οποία αποτελούν δημοφιλή τεχνική σταθεροποίησης του εδάφους τα τελευταία 50 χρόνια. Ανάλογα με το αποτέλεσμα που αναμένεται από τα ενέματα, χρησιμοποιούνται διαφορετικά υλικά όπως το τσιμέντο, ο μπετονίτης, ο ασβέστης, ρητίνες κ.ο.κ.. Το τσιμέντο είναι γνωστό για τις μεγάλες αντοχές που προσδίδει σε σύντομο χρονικό διάστημα, καθώς επίσης και για την υδατοστεγανότητα που προσφέρει. Στην ίδια λογική κυμαίνεται και η χρήση των υπόλοιπων υλικών, τα οποία οδηγούν στη μείωση της συρρίκνωσης, στην αύξηση της αντοχής και στην βελτίωση της συνοχής. Όμως, στις κτιριακές, και πόσο μάλλον στις διατηρητέες κατασκευές, η χρήση του τσιμέντου είναι σχεδόν απαγορευτική λόγω ζητημάτων φυσικοχημικής συμβατότητας που θα αναλυθούν παρακάτω. Παρόλα αυτά δε θα πρέπει να παραληφθούν τα οφέλη που παρέχει σε μικρά ποσοστά.

Η χρήση των ενεμάτων, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα τελευταία χρόνια έχει συναντήσει μεγάλη αποδοχή στις ιστορικές κτιριακές κατασκευές, καθώς είναι ικανή να βελτιώσει την μηχανική συμπεριφορά των τοιχοποιιών, χωρίς να αλλοιώνει την εξωτερική όψη και την στατική λειτουργία τους. Παρόλο τον μη αναστρέψιμο χαρακτήρα της έχει κάποια αδιαφιλονίκητα οφέλη. Όπως είναι γνωστό από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, οι μηχανισμοί βελτίωσης της τοιχοποιίας μέσω της εφαρμογής των ενεμάτων είναι οι εξής:

- Σημαντική αύξηση των μηχανικών χαρακτηριστικών της ενδιάμεσης στρώσης, τρίστρωτων τοιχοποιιών και μικρή βελτίωση χαρακτηριστικών των εξωτερικών στρώσεων
- Αποκατάσταση συνεργασίας μεταξύ των στρώσεων, μέσω της οποίας επιτυγχάνεται καθυστέρηση της εμφάνισης κατακόρυφων ρωγμών ανάμεσα στις στρώσεις
- Κλείσιμο ρωγμών, κενών και προστασία από την περαιτέρω διείδυση νερού ή βλαβερών ουσιών

- Βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς της, χωρίς να αλλοιώνεται η εξωτερική της όψη και να αλλάζει η στατική της λειτουργία

Προκειμένου να σχεδιαστεί η κατάλληλη σύνθεση ενέματος, θα πρέπει να είναι γνωστά τα υλικά της τοιχοποιίας που θα ενισχυθεί, καθώς κι οι μηχανικές και φυσικοχημικές τους ιδιότητες, κάτι το οποίο θα επηρεάσει την επιλογή των κατάλληλων υλικών επέμβασης. Επίσης είναι βασικό να αντιστοιχισθεί ο τρόπος δόμησης με το κατάλληλο τύπο ενέματος, καθώς και να γίνει κι ένας εύλογος υπολογισμός του ποσοστού των κενών και του ελάχιστου ονομαστικού πλάτους ρωγμής που είναι επιθυμητό να εισχωρήσει το ένεμα. Το θέμα της σωστής εφαρμογής των ενεμάτων αφορά: i) την κατάλληλη προετοιμασία του εξωτερικού και εσωτερικού της τοιχοποιίας γι αυτά, ii) την δυνατότητα των τοίχων να ενεθούν, iii) το δίκτυο των οπών διαμέσου των οποίων θα εισαχθεί το ένεμα, iv) την μέθοδος ανάμιξης τους, v) την επιτόπου εφαρμογή τους στις κατάλληλες συνθήκες καθώς και vi) την σωστή μετέπειτα συντήρηση της τοιχοποιίας.

Η έρευνα γύρω από την τεχνική των ενεμάτων, στο επίπεδο των ιστορικών κατασκευών, έχει επικεντρωθεί γύρω από τις λιθοδομές με συνδετικό ασβεστοκονίαμα. Σε μία προσπάθεια σύνδεσης της παρούσας εργασίας με τις έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί για λιθοδομές με ασβεστοκονίαμα, πρέπει να τονιστεί ότι η προσέγγιση της λιθοδομής με συνδετικό πηλοκονίαμα σε σχέση με τις αντίστοιχες με ασβεστοκονίαμα, θα πρέπει να είναι διαφορετική διότι:

- Υπό μεγαλύτερη πίεση εισχώρησης του ενέματος στην λιθοδομή, λόγω ελλιπούς συνάφειας του πηλοκονιάματος με τους λίθους, υπάρχει πιθανότητα αστοχίας της
- Το μεγάλο ποσοστό των πόρων κι η μεγάλη ποικιλία στο μέγεθος των πόρων τους μειώνει τη ρευστότητα του ενέματος
- Το ένεμα δεν μπορεί να μετακινηθεί εύκολα μέσα στην κατασκευή, εξαιτίας του ότι ο πηλός έχει την τάση να συγκρατεί νερό
- Τίθενται διαφορετικά θέματα φυσικοχημικής συμβατότητας, εφόσον κι οι ιδιότητες του αυθεντικού υλικού είναι διαφορετικές

3.2 Βιβλιογραφικά στοιχεία

3.2.1 Συνθέσεις ενεμάτων σε λιθοδομές με συνδετικό ασβεστοκονίαμα

Για την παρούσα εργασία μελετήθηκαν ενισχυτικές επεμβάσεις με ενέματα που έχουν πραγματοποιηθεί σε λιθοδομές με ασβεστοκονίαματα και ασβεστοποζολανικά κονίαματα από [Miltiadou A., 2013, Rilem], [Miltiadou et al, 2007], [Adami Ch., 2011], [Vintzileou E. et al, 2008], [Toumbakari, 2008], [Kalagri et al, 2010]. Σε όλες τις έρευνες τονίζεται η αξία της χρήσης των ασβεστιτικών υλικών, αφού η άσβεστος αποτελεί το βασικό συστατικό των συνδετικών κονιαμάτων καθώς και του υλικού πλήρωσεως των τρίστρωτων τοιχοποιιών. Γενικά, έχουν σημειωθεί αμιγώς τσιμεντιτικές συνθέσεις ενεμάτων, διμερείς συνθέσεις τσιμέντου-ασβέστη ή τσιμέντου-ποζολάνης/βιομηχανικών παραπροϊόντων (τσιμέντο σε περιεκτικότητα 50-75% κ.β.), τριμερείς συνθέσεις τσιμέντου-ασβέστου-ποζολάνης (τσιμέντο σε περιεκτικότητα 10-50% κ.β.) καθώς και συνθέσεις υδραυλικής ασβέστου.

Μπορεί οι τριμερείς συνθέσεις και οι συνθέσεις υδραυλικής ασβέστου να έχουν σχετικά μειωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά ($f_c = 5-13$ MPa) σε σχέση με τα αμιγώς τσιμεντιτικά ενέματα, ωστόσο πληρούν τα κριτήρια φυσικοχημικής συμβατότητας και έχει αποδειχθεί ότι βελτιώνουν εξίσου καλά την μηχανική συμπεριφορά της τοιχοποιίας (σε όρους αντοχών και δυσκαμψίας). Τα αμιγώς τσιμεντιτικά ενέματα έχει αποδειχθεί ότι, εκτός του ότι δεν οδηγούν σε περαιτέρω βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας, προκαλούν δυσμενείς μεταβολές της παραμορφωσιμότητας της. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας τέθηκαν τα θεμέλια για την παρασκευή νέων συνθέσεων ενεμάτων κατάλληλων για αργολιθοδομές με συνδετικό πηλοκονίαμα, σύμφωνα με τον σχεδιασμό των συνθέσεων των ενεμάτων σε λιθοδομές με ασβεστοκονίαμα. Συγκεκριμένα, παρασκευάστηκαν οι παρακάτω συνθέσεις:

- I. Τριμερείς συνθέσεις αντίστοιχων των συνθέσεων τσιμέντου-υδρασβέστου-ποζολάνης, τις οποίες έχουν μελετήσει σε βάθος οι [Vintzileou E. et al., 2008], [Miltiadiou A., 2013], [Adami Ch., 2011], [Kalagri et al., 2010] και [Toumbakari, 2008], αποφεύγοντας όμως την χρήση τσιμέντου. Η λογική της παραπάνω σύνθεσης έγκειται στην ύπαρξη:
 - της βασικής κονιάς (τσιμέντου) η οποία έχει υδραυλικό χαρακτήρα, και συγκριτικά με τα υφιστάμενα υλικά ισχυρότερα μηχανικά χαρακτηριστικά
 - της ασβέστου (αερική κονία), η οποία αποτελεί ένα υλικό που αντιδρά με το τσιμέντο, και ισχυροποιεί τόσο τα μηχανικά όσο και φυσικά χαρακτηριστικά της σύνθεσης. Αποτελεί υλικό το οποίο βρίσκεται στο αυθεντικό ασβεστοκονίαμα, επομένως εξασφαλίζει την φυσικοχημική τους συμβατότητα
 - του ποζολανικού υλικού, που ενισχύει την εν χρόνω αύξηση των μηχανικών χαρακτηριστικών καθώς και την ανθεκτικότητα της σύνθεσης

Προσαρμόζοντας την παραπάνω σύνθεση στις απαιτήσεις της παρούσας εργασίας δημιουργήθηκαν τριμερείς συνθέσεις υδραυλικής ασβέστου-πηλού-ποζολάνης. Η υδραυλική άσβεστος αποτελεί την βασική υδραυλική κονία, ο πηλός το υλικό με το οποίο εξασφαλίζεται η συμβατότητα υλικού επέμβασης και αυθεντικού υλικού κι η ποζολάνη, η οποία συμβάλλει στην εν χρόνω ανάπτυξη των μηχανικών και φυσικών χαρακτηριστικών.

- II. Διμερών συνθέσεων αντίστοιχων των συνθέσεων τσιμέντου-υδρασβέστου και υδραυλικής ασβέστου-ποζολάνης. Η λογική της παραπάνω σύνθεσης έγκειται στην ύπαρξη:
 - Της βασικής κονιάς τσιμέντου ή υδραυλικής ασβέστου,
 - Της ασβέστου ή της ποζολάνης

Προσαρμόζοντας τα παραπάνω στην παρούσα εργασία δημιουργήθηκαν συνθέσεις διαφόρων ποσοστών υδραυλικής ασβέστου και πηλού.

- III. Συνθέσεων αναφοράς, που αποτελούνται από υδραυλική άσβεστο (NHL 5)

3.2.2 Συνθέσεις ενεμάτων σε τοιχοποιίες με συνδετικό πηλοκονίαμα

Οι έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί βιβλιογραφικά σε ενέματα για την ομογενοποίηση της μάζας τοιχοποιίας από πηλό, αναφέρονται σε ωμοπλινθοδομές με ή χωρίς πηλοκονίαμα. Τέτοιες έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί από την [Parayianni I., 2006]. Στις συγκεκριμένες μελέτες έχουν εφαρμοστεί συνθέσεις ενεμάτων με βάση τον πηλό με ή χωρίς την ανάμιξή του με άλλα εδάφη, σε συνδυασμό με υδραυλική άσβεστο ή τσιμέντο, ποζολάνες και διάφορα πρόσθετα όπως υπερρρευστοποιητή.

Επίσης, εκτός των ελληνικών συνόρων έχει πραγματοποιηθεί έρευνα με μίγμα λεπτόκοκκης άμμου, ασβέστου και πολυμερούς (Silbond 40), για την ενίσχυση εδαφικών κατασκευών adobe στην Chiripa [Charu Chaudhry, 2007]. Ωστόσο, μετά από διαφόρους ελέγχους η συγκεκριμένη έρευνα κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η σύνθεση ενέματος που εξέτασε δεν ήταν επιτυχημένη, χωρίς όμως να προτείνει κάποια άλλη.

3.3 Υλικά ενεμάτων

3.3.1 Γενικά στοιχεία

Η θέση των ενεμάτων στο εσωτερικό της λιθοδομής, προϋποθέτει τον υδραυλικό χαρακτήρα των επιμέρους υλικών τους, προκειμένου να σκληρυνθούν και να αποκτήσουν τις αντοχές σχεδιασμού τους. Τέτοια υλικά είναι η υδραυλική άσβεστος, οι ποζολάνες, το τσιμέντο (σε μικρά ποσοστά) κ.α.. Επιπροσθέτως, τα ενέματα, ως μη αναστρέψιμη μορφή ενισχυτικής επέμβασης, πρέπει να αποτελούνται από υλικά, τα οποία θα συνεργάζονται με τα υφιστάμενα υλικά (πηλοκονίαμα, λίθοι), χωρίς να δημιουργούνται δευτερογενή προβλήματα από την ασυμβατότητα παλαιών-νέων υλικών. Επιβάλλεται να ληφθεί σοβαρά υπόψη το αυθεντικό υλικό του ήδη υπάρχοντος κονιάματος, μιας κι ο σκοπός της επέμβασης σε ιστορικές και μνημειακές κατασκευές είναι να ενισχυθούν, αλλά κι η ενίσχυση αυτή να έχει διάρκεια στο χρόνο, χωρίς να προκαλούνται δευτερογενή προβλήματα.

Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν, η χρήση του τσιμέντου στις επεμβάσεις ιστορικών και μνημειακών κατασκευών πρέπει να αποφεύγεται. Παρά τα γνωστά κι αδιαμφισβήτητα πλεονεκτήματα του τσιμέντου ως δομικό υλικό (ταχεία πήξη, σκλήρυνση, επίτευξη υψηλών αντοχών, εμπειρία στην χρήση του, κτλ) η χρήση του στις επεμβάσεις παρουσιάζει προβλήματα και κρίνεται σχεδόν απαγορευτική. Το μικρό πορώδες των στοιχείων που έχουν ως βασικό υλικό το τσιμέντο (ως γνωστό το τσιμέντο είναι υδατοστεγανό) είναι μη συμβατό με τα παραδοσιακά δομικά στοιχεία. Στην περίπτωση της εφαρμογής τσιμεντιτικών ενεμάτων, οι δίστρωτοι και τρίστρωτοι τοιχίσκοι δεν εμφανίζουν την ίδια μορφή αστοχίας, με αυτήν πριν την εφαρμογή των ενεμάτων. Αστοχούν ως συμπαγείς χωρίς τον διαχωρισμό των επιμέρους στρώσεων τους, ή αποκολλούνται οι στρώσεις άλλα για φορτίο πολύ κοντά σε εκείνο που αντιστοιχεί στην αστοχία των τοιχίσκων λόγω εμφάνισης κατακόρυφων ρωγμών στις όψεις τους [Adami Ch., 2011]. Πολλές φορές, οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα ανάμεσα στο αυθεντικό υλικό και τα τσιμεντιτικά ενέματα παράγουν προϊόντα που προκαλούν συστολοδιαστολές στο υλικό, άρα και ρηγματώσεις. Τα προϊόντα των χημικών αντιδράσεων, που προκαλούν τσιμεντιτικά προϊόντα, μπορούν να

προκαλέσουν κι εξανθήματα, γι αυτό κι η χρήση τους αποφεύγεται σε περίπτωση τοιχογραφιών, ψηφιδωτών και μωσαϊκών [Παπαδημητρίου Δ., 2017], [Vintzileou et al., 2008]. Πάντως, η χρήση τους στις συνήθεις επεμβάσεις (αρμολογήματα, ανακατασκευές, στερεώσεις τοιχοποιιών), σε περιορισμένο πάντα ποσοστό, για την επίτευξη υψηλών αντοχών, δε θα πρέπει να αποκλειστεί.

Με την ίδια λογική αμφισβητείται και η αποτελεσματικότητα της χρήσης οργανικών συνθετικών υλικών (π.χ. ρητινενέματα), για τους παρακάτω λόγους:

- στην πρόκληση φθορών που προκαλούν στα υλικά των τοιχοποιιών, οι οποίες οφείλονται σε δυσμενή εν χρόνω ανάπτυξη των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων τους
- στην φυσικοχημική ασυμβατότητα τους με τα ήδη υπάρχοντα υλικά [Adami Ch, 2011] και
- στην προβληματική συνάφεια που αναπτύσσουν παρουσία υγρασίας

Εξάλλου στα ενέματα, η μεγάλη θλιπτική αντοχή των υλικών που τα αποτελούν δεν είναι απαραίτητα η καθοριστική ιδιότητα που θα ελέγξει την επιλογή ή όχι μίας σύνθεσης ενέματος. Γενικά, όμως άλλες μηχανικές ιδιότητες, όπως η καμπτική και διατμητική αντοχή, αποτελούν βασικά κριτήρια σχεδιασμού, τα οποία έχουν προκύψει από την μελέτη της επίδρασης των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών επέμβασης στην επισκευασμένη τοιχοποιία. Επομένως, οι ιδιότητες που αφορούν την συμβατότητα νέου-υπάρχοντος υλικού όπως είναι: το πορώδες, η κοκκομετρική διαβάθμιση, η λεπτότητα της άλεσης των κονιών κι η ορυκτολογική και χημική σύσταση, αποτελούν τα καθοριστικά κριτήρια επιλογής των υλικών των ενεμάτων. Οι χημικές απαιτήσεις σχετίζονται με τις αντιδράσεις, που είναι δυνατόν να λάβουν χώρα μεταξύ των υλικών της ενίσχυσης και των υφιστάμενων, οι οποίες μπορεί να συνοδεύονται με αλλαγές στον όγκο του ενέματος προκαλώντας ρηγματώσεις και μείωση της ανθεκτικότητας της επέμβασης. Αποτέλεσμα των χημικών αυτών αντιδράσεων μπορεί να είναι κι αισθητικά θέματα, που αποτελούν κυρίως, πρόβλημα σε μνημειακές κατασκευές με ιστορική αξία. Τα ρεολογικά χαρακτηριστικά των υλικών των ενεμάτων, τα οποία συνδέονται άμεσα με την κοκκομετρία και την ειδική επιφάνεια τους, θα καθορίσουν σε μεγάλο βαθμό την επιλογή των υλικών, και τις αναλογίες τους στα μίγματα των ενεμάτων. Ωστόσο, όπως θα φανεί και παρακάτω, ένα βασικό κριτήριο το οποίο θα καθορίσει εν τέλει τις επιλεγόμενες συνθέσεις είναι κι η οικονομία του όλου εγχειρήματος, θέλοντας να πραγματοποιηθεί μία ρεαλιστική κι εφαρμόσιμη πρόταση ενίσχυσης.

3.3.2 Συμβατότητα ενεμάτων και αυθεντικών υλικών

Ο αποτελεσματικός σχεδιασμός συμβατών ενεμάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις αποκαταστάσεις παρουσιάζει δυσκολίες επειδή η αρχή της συμβατότητας δεν έχει εκφραστεί με τεχνικούς όρους. Η συμβατότητα αποτελεί έναν γενικό όρο που μπορεί να αναφερθεί σε πληθώρα ιδιοτήτων. Αφού δεν υπάρχουν θεσπισμένοι κανόνες “συμβατότητας”, κατ’ επέκταση δεν υπάρχουν και κριτήρια επιλογής των κατάλληλων υλικών με βάση τα υφιστάμενα υλικά της υπό μελέτη λιθοδομής.

Γενικά, η επιλογή των υλικών επέμβασης σε ιστορικές λιθοδομές, απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή γιατί τα υλικά επέμβασης δεν πρέπει μακροπρόθεσμα να επιδεινώνουν τα προβλήματα φθοράς για την αποφυγή των οποίων έγινε η επέμβαση ή να προκαλούν νέα προβλήματα. Θα πρέπει στο σχεδιασμό της επέμβασης να λαμβάνεται υπόψη ο χαρακτήρας και η λειτουργικότητα της ιστορικής κατασκευής, με σεβασμό στο αυθεντικό υλικό. Αυτά αναφέρονται ή υπονοούνται και στις Διεθνείς Συμβάσεις ή Διακηρύξεις (Χάρτες), που αποτελούν σημαντικοί οδηγοί-εγχειρίδια για επεμβάσεις σε ιστορικές κατασκευές [Παπαδημητρίου Δ., 2017].

Αυτές οι αρχές, που συνοψίζονται στον όρο “συμβατότητα” των Χαρτών, δεν υλοποιούνται εύκολα διότι δεν έχουν εκφρασθεί με σαφήνεια, αλλά και με τεχνικούς όρους. Για να γίνει αυτό και να τεθεί το θέμα του σχεδιασμού των υλικών σε επιστημονική βάση απαιτείται:

- Πολύ καλή γνώση των χαρακτηριστικών και της συμπεριφοράς των υπό ενίσχυση υλικών των ιστορικών τοιχοποιιών και
- Πολύ καλή γνώση των ιδιοτήτων των υλικών που παράγονται σήμερα και θεωρούνται κατάλληλα για τέτοιες επεμβάσεις

Ένα υλικό ορίζεται ως συμβατό, όταν εναρμονίζεται αισθητικά με την υπάρχουσα κατασκευή, δε μεταβάλλει την λειτουργικότητα του αρχικού δομήματος και πληροί τις σύγχρονες απαιτήσεις για τα δομικά υλικά, δηλαδή σχετικά γρήγορη πρόοδο εργασίας με ταχεία απόκτηση επαρκούς αντοχής κι υψηλά επίπεδα ανθεκτικότητας ως προς το περιβάλλον. Τα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την συμβατότητα των παραδοσιακών κονιαμάτων με τα υλικά επέμβασης είναι:

- αισθητικά (χρώμα, υφή, τραχύτητα)
- η σύστασή τους (τύπος συνδετικής κονίας, κοκκομετρία αδρανών)
- το επίπεδο αντοχής τους (θλιπτική και εφελκυστική αντοχή)
- η μικροδομή και το πορώδες (κατανομή πόρων)
- ο συντελεστής θερμικής διαστολής

Παρακάτω, για λόγους πληρότητας, θα γίνει μία εν τάχει αναφορά των ιδιοτήτων των άλλων υλικών που συναντώνται βιβλιογραφικά σε συνθέσεις ενεμάτων, δίνοντας μεγαλύτερη έμφαση στην υδραυλική άσβεστο που χρησιμοποιήθηκε στο πειραματικό μέρος. Οι ιδιότητες του πηλού και της αερικής ασβέστου αναλύθηκαν παραπάνω.

3.3.2.1 Υδραυλική άσβεστος

Τα τελευταία χρόνια έχει επανέλθει στο προσκήνιο η έρευνα πάνω στην παραγωγή και την χρήση υδραυλικών κονιών, στο χώρο των κατασκευών, ειδικότερα σε εργασίες συντήρησης και αναστήλωσης ιστορικών μνημείων. Η χρήση της υδραυλικής ασβέστου γίνεται όλο και περισσότερο δημοφιλής, διότι ως ένα “αδύναμο τσιμέντο”, διαθέτει πιο γρήγορους μηχανισμούς απόκτησης αντοχών, είναι πιο ανθεκτική στην ρηγμάτωση, καθώς επίσης και στις συνθήκες συντήρησης πράγμα που την καθιστά σαφώς πιο ανθεκτική από την αερική

άσβεστο. Η φυσική υδραυλική άσβεστος χρησιμοποιούνταν κυρίως κατά την διάρκεια του 19^{ου} αι. και αποτελεί τον πρόδρομο του τσιμέντου Portland [Σταθόπουλος Κ., 2015].

Για την παραγωγή υδραυλικής άσβεστου κρίνονται κατάλληλοι οι ασβεστόλιθοι με περιεκτικότητα σε άργιλο 10-15% [Πιτυζόγια Α., 2014], αλλά συνήθως παράγεται από μαργαϊκούς ασβεστόλιθους που περιέχουν σημαντικά ποσοστά αργιλοπυριτικών προσμίξεων. Η βασική διαφορά στην παραγωγή μιας φυσικής υδραυλικής άσβεστου και ενός τσιμέντου τύπου Portland είναι η θερμοκρασία έψησης. Η όπτηση της υδραυλικής ασβέστου επιτυγχάνεται στα συνηθισμένα ασβεστοργικά καμίνια και σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 1000°C αλλά μικρότερη των 1300°C. Η όπτηση στη θερμοκρασία αυτή βοηθάει στον σχηματισμό οξειδίων αργιλίου, πυριτίου και σιδήρου με την άσβεστο. Τα οξείδια αυτά συνιστούν τους υδραυλικούς παράγοντες της κονιάς. Στην Ελλάδα δεν παράγονται υδραυλικοί άσβεστοι βιομηχανικά.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται συνθέσεις ενεμάτων σε διάφορα ποσοστά υδραυλικής ασβέστου και πηλού για την ομογενοποίηση της μάζας δίστρωτων και τρίστρωτων λιθοδομών με συνδετικό πηλοκονίαμα. Η υδραυλική άσβεστος έχει την ιδιότητα, όταν έρχεται σε επαφή με τον πηλό να ανταλλάσει ιόντα ασβεστίου με μεταλλικά ιόντα που συνδέονται με τις επιφάνειες των σωματιδίων αργίλου. Αυτή η ανταλλαγή μεταλλικών ιόντων οδηγεί στον σχηματισμό συσσωματωμάτων [Earthen Constructions, 1989]. Η ανταλλαγή κατιόντων και η συσσωμάτωση συμβαίνουν αμέσως μετά την ανάμιξη προκαλώντας άμεσες αλλαγές στην αντοχή, στον δείκτη πλαστικότητα και στην εργασιμότητα. Εν συνεχεία ακολουθούν μια σειρά από άλλες αντιδράσεις, οι οποίες έχουν διάρκεια στον χρόνο. Η ενυδάτωση των αργιλοπυριτικών ενώσεων C_2S και CA οδηγεί στην παράγωγή ένυδρου πυριτικού ασβεστίου $C-S-H$ και ένυδρου αργιλικού ασβεστίου CAH . Οι αντιδράσεις αυτές ευθύνονται κατά κύριο λόγο για την γρήγορη ανάπτυξη αντοχών και την ανθεκτικότητα στην διάβρωση από το νερό. Σε συνθήκες υγρασίας $RH=75\%$, ευννοείται, η διάλυση του CO_2 της ατμόσφαιρας στο νερό που αντιδράει με το περιεχόμενο $Ca(OH)_2$ [Σταθόπουλος Κ., 2015]. Η συγκεκριμένη αντίδραση ευθύνεται για την περεταίρω σκλήρυνση. Επομένως, όπως θα αναλυθεί παρακάτω λαμβάνεται ιδιαίτερη μέριμνα για τις σωστές συνθήκες συντήρησης.

3.3.2.2 Λευκό τσιμέντο

Δεν πρέπει να παραληφθεί το γεγονός ότι το τσιμέντο είναι από τα πιο δημοφιλή πρόσθετα στην σταθεροποίηση εδαφών. Θεωρείται ως πρωτογενές υδραυλικό συνδετικό υλικό, επειδή προκαλεί από μόνο του την σταθεροποιητική δράση που απαιτείται. Η αντίδραση του τσιμέντου δεν εξαρτάται άμεσα από τα ορυκτά του εδάφους, καθώς αρχικά αντιδρά μόνο με το νερό. Η διαδικασία ενυδάτωσης ξεκινά όταν το τσιμέντο αναμιγνύεται με νερό και άλλα συστατικά, έχοντας ως αποτέλεσμα την σκλήρυνσή του. Η σκλήρυνση του τσιμέντου θα περικλείει το έδαφος ως κόλλα, αλλά δε θα αλλάξει την δομή του εδάφους [Σταθόπουλος Κ., 2015]. Η αντίδραση ενυδάτωσης είναι αργή διαδικασία που ξεκινάει από την επιφάνεια των κόκκων τσιμέντου, με αποτέλεσμα το κέντρο των κόκκων να μπορεί να παραμείνει μη ενυδατωμένο. Τα ασβεστοπυριτικά προϊόντα, C_3S και C_2S είναι τα δύο κύρια τσιμεντιτικά προϊόντα που ευθύνονται για την ανάπτυξη αντοχής, ενώ το υδροξείδιο του ασβεστίου, και

αυτό ως προϊόν της ενυδάτωσης, αντιδρά δευτερογενώς με ποζολανικά υλικά (τα οποία είναι συνήθως διαθέσιμα στους αργίλους και τα εδάφη) σχηματίζοντας περαιτέρω τσιμεντιτικά προϊόντα. Όπως παρατηρείται και έχει τονιστεί και παραπάνω, τα προϊόντα των αντιδράσεων υδραυλικής ασβέστου–πηλού και τσιμέντου–πηλού είναι περίπου τα ίδια, καθώς και οι μηχανισμοί ενίσχυσης.

Επομένως, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το τσιμέντο έχει χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση εδαφών σε γεωτεχνικού τύπου έργα, με τον όρο “τσιμεντενέσεις”, λόγω των πολλαπλών οφελών που προσφέρει όπως, είναι η μείωση της συρρίκνωσης και διόγκωσης, η αύξηση της μηχανικής αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας, κι η υδατοστεγανότητα. Η ανεμπόδιστη θλιπτική αντοχή αυξάνει με την αύξηση της περιεκτικότητας σε τσιμέντο κυρίως για χονδρόκοκκα εδάφη, ενώ παράλληλα αυξάνουν η συνοχή και η αντοχή του. Άρα ένας από τους λόγους που το τσιμέντο τελικά δεν αποτέλεσε λύση της παρούσας εργασίας για την σύνθεση ενεμάτων, πέραν του θέματος φυσικοχημικής συμβατότητας όπως αναφέρθηκε αναλυτικά στην αρχή αυτήν της ενότητας, είναι ότι είναι πιο αποδοτικό σε χονδρόκοκκα εδάφη, πράγμα το οποίο δεν θα ταίριαζε στην κοκκομετρία του πηλού που επιλέχθηκε για τις συνθέσεις των ενεμάτων (μέγιστου κόκκου <63μm). Ενδεικτικά, η διάμετρος του μέγιστου κόκκου που προτείνεται για την κατάλληλη συνεργασία τσιμέντου και πηλού κυμαίνεται από τα 6-20mm. Επίσης, ως πιο χονδρόκοκκο υλικό από την υδραυλική άσβεστο, με μικρότερη ειδική επιφάνεια, θα προκαλούσε διάφορες αρνητικές επιδράσεις στα ρεολογικά χαρακτηριστικά των συνθέσεων των ενεμάτων, τόσο σε θέματα ρευστότητας και σταθερότητας, αλλά κυρίως σε θέματα διεισδυτικότητας.

Συνήθως, η επιλογή του τσιμέντου εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους προς σταθεροποίηση και την επιθυμητή τελική αντοχή. Γι' αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι τσιμέντου. Το πιο σύνηθες είναι το λευκό τσιμέντο, που είναι απαλλαγμένο από θειικά άλατα και χρησιμοποιείται συχνά για την παρασκευή κονιαμάτων που εφαρμόζονται σε περιπτώσεις αποκαταστάσεων με παραδοσιακά υλικά, καθώς βοηθάει στην ανάπτυξη αντοχών σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Η ειδική επιφάνεια του είναι 1,03 m²/g [Πιτυτζόγια Α., 2014].

3.3.2.3 Ποζολάνες

Ο ποζολάνες χρησιμοποιήθηκαν από πολύ νωρίς (2^ο π.Χ. αι. στην Δήλο), ως συνδετική κονία λόγω των ιδιοτήτων που αναπτύσσουν όταν αντιδρούν με άσβεστο. Πρόκειται για δραστικές αργιλο-πυριτικές ενώσεις που ενώνονται με την άσβεστο και σκληραίνουν, αποκτώντας υψηλές αντοχές, δημιουργώντας ασβεστο-πυριτικές ή ασβεστο-αργλικές ενώσεις παρουσία υγρασίας, οι οποίες αποτελούν ενώσεις με τσιμεντιτικές ιδιότητες. Βασική αντίδραση που εξελίσσεται με τον χρόνο, παρουσία ποζολανικών υλικών είναι η ποζολανική αντίδραση, μία σχετικά αργή αντίδραση, που προσδίδει, όμως, μια ιδιαίτερος πυκνή και ανθεκτική δομή.

Η φυσική ποζολάνη είναι ένα από τα βασικά συστατικά των ιστορικών κονιαμάτων μαζί με την άσβεστο και το κεραμάλευρο, τα οποία έδειξαν αξιοσημείωτη ανθεκτικότητα στις περιβαλλοντικές δράσεις, στον χρόνο και τους σεισμούς, πράγμα που φαίνεται από το πως

διατηρήθηκαν στο πέρασμα των αιώνων μέχρι σήμερα. Εφόσον οι ποζολάνες αποτελούν βασικά υλικά παραδοσιακών των ιστορικών κονιαμάτων, τότε η φυσικοχημική τους συμβατότητα για την χρήση τους σε ενέματα είναι εξασφαλισμένη. Αργιλικά ορυκτά, όπως ο καολινίτης, ο μοντμοριλλονίτης, οι μαρμαρυγίες κι ο ιλλίτης είναι ποζολανικά, πράγμα που επιβεβαιώνει την συμβατότητα (χημική και ορυκτολογική) των ποζολανών με τον πηλό, που μεγάλο του τμήμα αποτελείται από αργιλικά ορυκτά.

Σήμερα, ο ορισμός της ποζολάνης περιλαμβάνει κάθε ηφαιστειακό υλικό (ελαφρόπετρα ή ηφαιστειακή τέφρα) καθώς και τεχνητά υλικά με ποζολανικές ιδιότητες. Η φυσική ποζολάνη είναι βιομηχανικό ορυκτό ηφαιστειακής προέλευσης και περιέχει υψηλό ποσοστό ενεργού διοξειδίου του πυριτίου αλλά και οξείδιο του αργιλίου. Μεγάλη ποικιλία ορυκτών έχουν ποζολανικές ιδιότητες και μπορούν να χαρακτηριστούν φυσικές ποζολάνες. Οι φυσικές ποζολάνες περιλαμβάνουν διάφορες ηφαιστειακές γαίες ή βρίσκονται αυτούσιες στο περιβάλλον, όπως η ιταλική pozzolana, η γερμανική trass κ.α.. Στην Σαντορίνη, εκτός της στάχτης των ούτως ή άλλως σπάνιων ξύλων, αξιοποιήθηκε η θηραϊκή γη δίνοντας ιδιαίτερα ισχυρά και ανθεκτικά κονιάματα.

3.4 Ιδιότητες ενεσιμότητας ενεμάτων

Ο σχεδιασμός των υδραυλικών ενεμάτων για την ενίσχυση των ιστορικών τοιχοποιιών, συνήθως ακολουθεί εμπειρικές διαδικασίες και μεθόδους. Ωστόσο, σχετικά πρόσφατα, έγινε η προσπάθεια να διαμορφωθεί μια λογική μεθοδολογία από [Miltiadou A., 2013, RILEM] για τον σχεδιασμό τέτοιων ενεμάτων, η οποία στηρίζεται στα βασικά χαρακτηριστικά ενεσιμότητας τους, τα οποία είναι τα εξής:

- I. **Διεισδυτικότητα**, δηλαδή η δυνατότητα του ενέματος να διεισδύει στο μεγαλύτερο δυνατό φάσμα πλατών ρωγμών. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιλογή του κατάλληλου μεγίστου μεγέθους κόκκου της στερεής φάσης του ενέματος, σε σύγκριση με το ελάχιστο πλάτος των ρωγμών του τοίχου, όπως επίσης, και με την κατάλληλη κοκκομετρική διαβάθμιση της στερεάς φάσης του ενέματος
- II. **Ρευστότητα**, δηλαδή η ευκολία της ροής του ενέματος μέσα από τα κενά και τις ρωγμές της τοιχοποιίας, με την ελάχιστη δυνατή πίεση και απώλειες
- III. **Σταθερότητα**, δηλαδή η καταλλήλως μικρότερη εξίδρωση ενός συγκεκριμένου ορίου, καθώς επίσης κι η αποφυγή του επιβλαβούς διαχωρισμού των στερεών κόκκων του μίγματος στο εναιώρημα.

Για να μπορούν να οριστούν αυτές οι ιδιότητες, καθώς και τα κριτήρια που πρέπει να πληρούν τα ενέματα, είναι καθοριστικό να γίνει σαφής ο ρόλος των ενεμάτων σε μία δίστρωτη ή τριστρωτη φέρουσα τοιχοποιία. Επομένως, τα ενέματα στοχεύουν στο να γεμίσουν ρωγμές, κενά και ανοιχτούς κόμβους της τοιχοποιίας, επαναφέροντας την συνάφεια ανάμεσα στα στρώματα, δημιουργώντας ένα τρισδιάστατο σκελετό, πράγμα το οποίο επιβάλλεται να έχει αντίκτυπο και στην αντοχή της τοιχοποιίας ως σύνολο. Όμως, για να πραγματοποιηθεί αυτό, το ένεμα πρέπει να είναι ικανό να περάσει μέσα από τις πιο στενές πιθανές ασυνέχειες, με στόχο να φτάσει τον μεγαλύτερο δυνατό εσωτερικό όγκο κενών της τοιχοποιίας, αποφεύγοντας τυχόν εμφράξεις.

3.4.1 Διεισδυτικότητα Ενέματος

3.4.1.1 Εισαγωγή και ορισμός

Η διεισδυτικότητα, αφορά την ικανότητα του ενέματος να διεισδύει στο μεγαλύτερο μέρος των κενών, ρωγμών και ανοιχτών κόμβων της τοιχοποιίας, με σκοπό να ενοποιήσει τα επιμέρους στρώματα που την αποτελούν. Πρέπει να είναι ικανό να περάσει από τις στενότερες δυνατές ρωγμές και ασυνέχειες, για να φτάσει στο μεγαλύτερο δυνατό τμήμα του εσωτερικού της τοιχοποιίας έτσι ώστε να πληρώσει τα κενά που βρίσκονται εκεί. Μέσω αυτής της διαδικασίας το ένεμα συμβάλλει αποτελεσματικά στην αύξηση των μηχανικών χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας. Στις περιπτώσεις των δίστρωτων και τρίστρωτων τοιχοποιιών, αυτό που αναμένεται σαν αποτέλεσμα είναι η ενδυνάμωση του δεσμού ανάμεσα είτε στα δύο φύλλα, ή στα εξωτερικά φύλλα και το γέμισμα [Miltiadiou A., 2013, RILEM].

Πολλές φορές οι όροι διεισδυτικότητα και ρευστότητα τείνουν να ταυτίζονται. Πρέπει να γίνει σαφές ότι η ρευστότητα του ενέματος δεν θα επηρεαστεί αν μεγαλύτεροι κόκκοι προκαλέσουν έμφραξη στις ρωγμές της τοιχοποιίας, σε αντίθεση με την διεισδυτικότητα του [Miltiadiou, 2013, RILEM].

3.4.1.2 Παράμετροι

Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την διεισδυτικότητα του ενέματος είναι:

- I. Ο τύπος της τοιχοποιίας, ο οποίος το ελάχιστο ονομαστικό πλάτος ρωγμής

Η επιλογή της κοκκομετρικής διαβάθμισης της στερεής φάσης του ενέματος αφορά τον τύπο της υπό επισκευής τοιχοποιίας, και συνδέεται άμεσα με το επιθυμητό φάσμα ρωγμών και κενών που πρέπει να πληρωθούν. Στην παρούσα εργασία, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, εξετάζονται οι περιπτώσεις δίστρωτων και τρίστρωτων τοιχοποιιών, στις οποίες παρουσιάζονται μεγάλα κενά στο εσωτερικό τμήμα τους (π.χ. στο γέμισμα της τρίστρωτης τοιχοποιίας), όπως επίσης και ρωγμές ανάμεσα στις στρώσεις της τοιχοποιίας. Επιπλέον, στις προσόψεις των τοιχοποιιών, σε όλους τους τύπους δόμησης, εμφανίζονται ρωγμές, που προκαλούνται από σεισμικές δονήσεις ή από διαφορικές καθιζήσεις στο έδαφος θεμελίωσης αυτών, και από κατακόρυφα φορτία [Miltiadiou A., 2013, RILEM]. Το ένεμα για να προσεγγίσει αυτά τα μεγάλα κενά, ενδέχεται να χρειάζεται να περάσει από μικρότερες ασυνέχειες, οι οποίες θα καθορίσουν και το ελάχιστο ονομαστικό πλάτος ρωγμής, από το οποίο θα προκύψει κι η κοκκομετρία της στερεής φάσης. Επίσης, υπάρχουν και κάποιες δύσκολες περιοχές στην τοιχοποιία όπως είναι οι περιοχές επαφής των στρωμάτων, οι οποίες έχει αποδειχθεί ότι αποτελούν τον βασικό μηχανισμό ακεραιότητας και αντίστασης των πολυστρωματικών τοιχοποιιών μέσω των μηχανισμών του εφελκυσμού και της διάτμησης [Miltiadiou A., 2013, RILEM].

Για να προσδιοριστεί το ελάχιστο ονομαστικό πλάτος ρωγμής, βιβλιογραφικά έχουν χρησιμοποιηθεί πολλοί τρόποι. Μία από αυτές τις μεθόδους μπορεί να είναι στατιστικές τεχνικές, ωστόσο, είναι πολύ δύσκολο να δημιουργηθεί το ακριβές προσομοίωμα του

δικτύου των ρωγμών μίας τυπικής τοιχοποιίας. Επίσης, δεν πρέπει να παραληφθεί και το γεγονός ότι υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν την διεισδυτικότητα ενός ενέματος. Γι αυτόν τον λόγο προτείνεται η δοκιμή της στήλης άμμου, που αποτελεί ένα υποκατάστατο περιβάλλον το οποίο αναπαράγει το ελάχιστο ονομαστικό πλάτος ρωγμής [Miltiadiou A., 2013, RILEM].

Εναλλακτικοί πρακτικοί τρόποι προσδιορισμού του W_{nom} είναι:

- Μέσα από δοκιμή ενδοσκοπίου, σε κυλινδρικές επιφάνειες
- Μέσα από την πυρηνοληψία μεγάλων κομματιών από την υπό εξέταση τοιχοποιία
- Μέσα από την οπτική παρατήρηση σπασμένων κομματιών της τοιχοποιίας, μετά από τοπική αφαίρεση κάποιων δομικών της λίθων. Συνεπώς, η κοκκομετρική διαβάθμιση του πιο λεπτόκοκκου υλικού μπορεί να δώσει μία προσέγγιση για την τιμή της W_{nom} .

II. Η κοκκομετρική διαβάθμιση της στερεής φάσης του ενέματος (το ποσοστό των λεπτόκοκκων μέσα στο ένεμα)

Η κατανομή του μεγέθους των κόκκων της στερεάς φάσης, πρέπει να είναι συμβατή με τις χαρακτηριστικές διαστάσεις των ασυνεχειών (ρωγμών, κενών, διεπιφανειών, κ.α.) της υπό εξέταση τοιχοποιίας. Βασικά μεγέθη κόκκων που πρέπει να σημειωθούν, είναι:

- Το μέγεθος των μεγαλύτερων κόκκων (κυρίως d_{85})
- Και το μέγεθος των μικρότερων κόκκων (κυρίως d_{15})

Όπου $d_{85,15}$, οι διάμετροι των κόκκων που αντιστοιχούν στο 85% και 15% του διερχόμενου υλικού αντίστοιχα.

Συνήθως, στις κατασκευές η διεισδυτικότητα του ενέματος, εκφράζεται σε όρους του λόγου του μεγέθους των μεγαλύτερων κόκκων και της αντιπροσωπευτικής διαμέτρου των ανοιγμάτων ή του πλάτους των ρωγμών, οι οποίες θα ενεματωθούν, ως εξής:

$$d < \frac{W_{nom}}{n}$$

όπου:

d : η διάμετρος του μεγαλύτερου κόκκου της στερεής φάσης του ενέματος, η οποία συνήθως εκφράζεται ως d_{85} (ή d_{100})

W_{nom} : η ονομαστική τιμή του ελάχιστου πλάτους ρωγμών, διεπιφανειών ή ρωγμών που πρέπει να ενεματωθούν

n : ένας αριθμητικός παράγοντας που κυμαίνεται από 1–5. Εξαρτάται από το μέσο ενεμάτωσης και από τις συνθήκες στις οποίες εφαρμόζεται το ένεμα. Εκφράζει ότι οι κόκκοι πρέπει να είναι σημαντικά μικρότεροι από το άνοιγμα της ρωγμής λόγω:

- Τριβής που προκαλείται λόγω του ακανόνιστου σχήματος των κόκκων
- Ηλεκτροστατικών δυνάμεων ανάμεσα στους κόκκους

- Κροκκίδωσης, που συμβαίνει εξαιτίας της άμεσης ενυδάτωσης των λεπτόκοκκων

Μετά από πειραματική διερεύνηση [Miltiadiou A., 2013, RILEM], πρέπει να ικανοποιούνται τα δύο παρακάτω κριτήρια διεισδυτικότητας από τα ενέματα:

$$W_{nom} > (4-5) * d_{85}$$

$$W_{nom} > 2 * d_{99}$$

Τα παραπάνω κριτήρια προέκυψαν ως εξής:

- για το πιο συχνό χονδρόκοκκο στοιχείο (το οποίο είναι το d_{85}) πρέπει να υπάρχει μία ομαλή ροή αυτών των κόκκων, στο ονομαστικό πλάτος των ρωγμών ώστε να αποφεύγεται η κροκκίδωση. Έτσι, τουλάχιστον 5 κροκκιδωμένοι κόκκοι πρέπει να ληφθούν υπόψη
- Πιο σπάνιοι μεγάλοι κόκκοι (d_{99}) δεν θα πρέπει να εμποδίζουν την ροή, μέσω του μηχανισμού της τριβής. Για το μικρό ποσοστό των κόκκων d_{99} , δύο κόκκοι είναι αρκετοί. Ωστόσο, μπορεί να υπάρξει κροκκίδωση κόκκων και να δημιουργήσουν ένα μεγαλύτερο ενεργό μέγεθος κόκκου

Αν δεν ικανοποιείται ο 1^{ος} περιορισμός τότε θα πρέπει να προστεθεί λεπτόκοκκο υλικό (λεπτότερο από το d_{85} της βασικής κονιάς), σε ποσοστό του συνολικού όγκου ίσο με:

$$f_{vp} = 1 - \frac{W_{nom}}{n * d_{85}}$$

Τα παραπάνω κριτήρια πρέπει να αποδειχθούν πειραματικά με την δοκιμή της στήλης άμμου.

III. Ο τρόπος ανάμιξης

Ανάλογα με τα υλικά που αποτελούν το ένεμα, έχει αποδειχθεί ότι ο τρόπος ανάμιξης επηρεάζει την διεισδυτική τους ικανότητα, καθώς πρέπει να διασφαλισθεί η διαβροχή όλης της επιφάνειας και η ομοιογενής τους κατανομή στο νερό. Οι δυνάμεις ανάμεσα στα σωματίδια επηρεάζουν δραστικά την διεισδυτικότητα, ρευστότητα και σταθερότητα του εναιωρήματος. Καθώς αυτές οι δυνάμεις προκαλούν κροκκίδωση του ενέματος πρέπει να βρεθεί τρόπος να αποφευχθεί αυτό με μηχανική ανάμιξη υψηλού στροβιλώδους ή με υπερήχους. Σε γενικές γραμμές, η ανάδευση με υπερήχους δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

IV. Η απαραίτητη ρευστότητα που θα έχει το ένεμα, που εκφράζεται μέσα από το ποσοστό W/S

Θα αναλυθεί σε βάθος στο Κεφάλαιο της Ρευστότητας.

3.4.2 Ρευστότητα Ενέματος

3.4.2.1 Εισαγωγή και ορισμός

Πέραν από την επαρκή διεισδυτικότητα που απαιτείται να διαθέτει το ένεμα, θεμελιώδης ιδιότητα του είναι κι η ρευστότητα του. Το ένεμα σαν επέμβαση σε ιστορικές και μη, φέρουσες τοιχοποιίες στοχεύει στο να γεμίσει ρωγμές και κενά στο εσωτερικό της τοιχοποιίας, συνεισφέροντας στην αντοχή, στην συνοχή και στην ανθεκτικότητά της. Για να γίνει αυτό, ωστόσο, το ένεμα θα πρέπει να είναι ικανό να ρέει μέσα στις “στενότερες” πιθανές ασυνέχειες, και να ξεπεράσει οποιεσδήποτε αντιστάσεις στη ροή, έτσι ώστε να φτάσει στο μέγιστο δυνατό εσωτερικό όγκο των κενών της τοιχοποιίας, αποφεύγοντας όσο γίνεται τις εμφράξεις. Για να μπορεί να φτάσει στο εσωτερικό της τοιχοποιίας και να πληρώσει τα κενά, θα πρέπει να διαθέτει όλα τα απαραίτητα χαρακτηριστικά της ρευστότητας.

Ένα θεμελιώδες χαρακτηριστικό της ρευστότητας ενός υγρού είναι το ιξώδες, το οποίο καθορίζει την ταχύτητα με την οποία θα ρέει το ρευστό. Όμως, το ιξώδες είναι μία ιδιότητα που είναι αρκετά δύσκολο να μετρηθεί και προσδιοριστεί, ακόμα και σε καλά ορισμένες βιομηχανικές συνθήκες. Επιπλέον, η ιδιότητα της ρευστότητας είναι ένα χαρακτηριστικό που δεν μπορεί να προσδιοριστεί κατηγορηματικά από μία μόνο παράμετρο, ειδικά αν αυτή η παράμετρος είναι μόνο το ιξώδες του ρευστού. Επομένως, ένας παράγοντας που είναι συνυφασμένος με την ταχύτητα της ροής ενός υγρού είναι ο χρόνος ροής του.

3.4.2.2 Παράμετροι

Οι παράμετροι που επηρεάζουν την ρευστότητα του ενέματος σύμφωνα με την [Miltiadou A., 2013, RILEM], είναι:

- I. Το ποσοστό του περιεχόμενου νερού, εκφρασμένου μέσω του λόγου του νερού προς στερεά κ.β. (W/S), με ή χωρίς την χρήση υπερρευστοποιητή

Μέχρι ένα ποσοστό περιεχόμενου νερού, η ρευστότητα του ενέματος αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με το ποσοστό του νερού, μέχρι μια τιμή του W/S από την οποία και μετά, παραμένει πρακτικά σταθερή, διακινδυνεύοντας όμως την αντοχή και την ανθεκτικότητα αυτού και εν συνεχεία της κατασκευής στην οποία θα εισχωρήσει [Miltiadou A., 2013, RILEM].

Σε ορισμένες περιπτώσεις, για να αυξηθεί η ρευστότητα απαιτείται η χρήση υπερρευστοποιητή. Η χρήση του υπερρευστοποιητή οδηγεί στην δημιουργία ηλεκτροστατικών απωστικών δυνάμεων, και συνεπώς στην διασπορά των στερεών κόκκων μέσα στο εναιώρημα [Miltiadou A., 2013, RILEM]. Οι πτυχές που πρέπει να εξεταστούν, όσον αφορά τον υπερρευστοποιητή και το μίγμα του ενέματος είναι:

- i. Χημική συμβατότητα
- ii. Φαινόμενα αστάθειας (εξίδρωσης και διαχωρισμού), τα οποία μπορούν να προκληθούν από υψηλότερα ποσοστά υπερρευστοποιητή

- iii. Δημιουργία φυσαλίδων αέρα, οι οποίες μειώνουν αισθητά την διεισδυτικότητα του ενέματος
- II. Το σχήμα και το μέγεθος των κόκκων, η κοκκομετρική διαβάθμιση της στερεής φάσης του ενέματος, που εκφράζεται μέσω της ιδιότητας της ειδικής επιφάνειας των κόκκων

Η ρευστότητα είναι μία ιδιότητα συνυφασμένη με την διεισδυτικότητα του ενέματος, επομένως δε θα πρέπει να παραληφθεί η επιρροή του ποσοστού των λεπτόκοκκων μέσα στην στερεή φάση του ενέματος. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό των λεπτόκοκκων μέσα στο ένεμα παρατηρείται μείωση της ρευστότητας του, εφόσον αυξάνεται η ειδική επιφάνεια της στερεής του φάσης [Miltiadou A., 2013, RILEM].

- III. Ο τρόπος και σειρά ανάμιξης που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του ενέματος

Η ρευστότητα ενός υδραυλικού ενέματος μπορεί να επηρεαστεί δραστικά από την διαδικασία ανάδευσης, εφόσον οι δυνάμεις ανάμεσα στα σωματίδια επηρεάζουν σημαντικά τα ρεολογικά χαρακτηριστικά του ενέματος. Αυτές οι δυνάμεις, συνήθως, τείνουν προς την κροκκίδωση των στερεών κόκκων του ενέματος. Επομένως, μηχανικά μέσα ανάδευσης όπως η ανάδευση υψηλού στροβιλώδους και η ανάδευση με υπερήχους, μπορούν να συντελέσουν στην αποκροκκίδωση της στερεής φάσης του ενέματος και να καθιερώσουν διαφορετικά ρεολογικά χαρακτηριστικά σε αυτό. Με την αποκροκκίδωση των συσσωματωμάτων, γίνονται και πιο αποτελεσματικές οι χημικές αντιδράσεις οι οποίες εξελίσσονται τόσο μεταξύ των υλικών των ενεμάτων όσο και με τα ήδη υπάρχοντα. Σε αυτήν την φάση, κρίνεται σκόπιμο να τονιστεί η σημασία της σειράς ανάδευσης των υλικών. Σύμφωνα με έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί από [Miltiadou A., 2013, RILEM], πρώτα στην ανάδευση πρέπει να τοποθετούνται τα λεπτόκοκκα υλικά προκειμένου να πραγματοποιηθεί επαρκής αποκροκκίδωσή τους, κι αποτελεσματικότερη ανάμιξη με τα υπόλοιπα στερεά και την υγρή φάση.

- IV. Τα χημικά χαρακτηριστικά της στερεής φάσης

- V. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος στην οποία παρασκευάζεται το ένεμα

3.4.3 Σταθερότητα Ενέματος

3.4.3.1 Εισαγωγή και ορισμός

Πέρα από την επαρκή διεισδυτικότητα και ρευστότητα που πρέπει να διαθέτουν οι συνθέσεις ενεμάτων, το τρίτο βασικό χαρακτηριστικό ενεσιμότητας τους είναι η σταθερότητα. Η σταθερότητα αναφέρεται στην ικανότητα του ενέματος να διατηρεί την ομοιογένειά του κατά την διαδικασία της ενεμάτωσης, σύμφωνα με την προκαθορισμένη μορφή της σύνθεσής του. Η σταθερότητα του ενέματος, αφορά την αποφυγή: i) της εξίδρωσης πέραν ενός καθορισμένου ορίου, και ii) του διαχωρισμού του ενέματος, για να εξασφαλιστεί ικανοποιητική ενεσιμότητα [Miltiadou A., 2013, RILEM]. Αλλιώς, έμφραξη μπορεί να εμφανιστεί σύντομα, διακινδυνεύοντας σοβαρά την αποτελεσματικότητα και ποιότητα της επέμβασης.

Η απαίτηση μεγάλης ρευστότητας μπορεί να οδηγήσει στην αστάθεια της σύνθεσης ενέματος, μέσω της δημιουργίας ενός αραιωμένου μίγματος. Από την φύση του, το εναιώρημα αποτελείται από κόκκους διασκορπισμένους σε ένα υγρό κι ανάμεσα σε αυτούς τους κόκκους “κανάλια” διαφόρων διαστάσεων, δίνοντας στο νερό την δυνατότητα να κινείται. Μετά την ανάμιξη των υλικών του ενέματος, η χωρική διανομή των στερεών κόκκων καθορίζεται από την βαρύτητα και την τριβή καθώς και από τις μεταξύ τους δυνάμεις [Miltiadiou A., 2013, RILEM]. Έτσι, μπορούν να παρατηρηθούν τέσσερις μορφές ισορροπίας:

- I. Το ένεμα διατηρεί την ομοιογένεια του και φαίνεται σταθερό
- II. Μια ομοιόμορφη καθίζηση των κροκκιδωμένων στερεών λαμβάνει χώρα, αφήνοντας ένα λεπτό στρώμα καθαρού νερού στην επιφάνεια, το οποίο ονομάζεται εξίδρωση. Οι δυνάμεις μεταξύ των σωματιδίων, ωστόσο είναι αρκετά δυνατές ώστε να κρατήσουν την δομή του ενέματος σταθερή, καθώς και την ίδια την κατασκευή για την οποία προορίζονται. Η σύνθεση του ενέματος παραμένει πρακτικά αμετάβλητη. Γι’ αυτό τον λόγο, αν η εξίδρωση παραμείνει κάτω από ένα όριο τότε το ένεμα μπορεί να χρησιμοποιείται
- III. Η επιπρόσθετη εξίδρωση μπορεί να οδηγήσει σε ένεμα που δεν μπορεί να διεισδύσει ούτε να προσκολληθεί επαρκώς
- IV. Σε κάποιες περιπτώσεις, μια σχετικά γρήγορη καθίζηση των κροκκιδών παρατηρείται, ενώ τα στερεά κομμάτια ταξινομούνται σε διαφορετικά στρώματα σύμφωνα με το σχήμα και το βάρος τους, δημιουργώντας στρώματα κόκκων αυξανόμενης πυκνότητας προς τον πυθμένα. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται διαχωρισμός/απόμιξη. Σε αυτήν την περίπτωση οι δυνάμεις μεταξύ των σωματιδίων δεν ήταν επαρκείς για να διατηρήσουν το μίγμα ενωμένο. Το ένεμα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί

Σε μια κατάλληλη σύνθεση ενέματος δεν πρέπει να συμβούν τέτοιες αστάθειες τύπου III και IV. Ο διαχωρισμός κι η εξίδρωση μπορούν να διακινδυνεύσουν την ενεσιμότητα του ενέματος οδηγώντας σε έμφραξη των ρωγμών με μία επακόλουθη ξαφνική αύξηση της πίεσης [Miltiadiou A., 2013, RILEM]. Τέτοια ασταθή ενέματα μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την ποιότητα της κατασκευής, ως εξής:

- Αδυναμία πλήρωσης ρωγμών
- Ανομοιογενής προσκόλληση του ενέματος και χαρακτηριστικά αντοχής
- Χαμηλότερη ανθεκτικότητα και αντίσταση στις περιβαλλοντικές δράσεις, αφού η στερεή φάση του ενέματος έχει δημιουργήσει μια λιγότερο πυκνή δομή.

Πριν γίνει η ανάλυση των παραμέτρων που επηρεάζουν την σταθερότητα των συνθέσεων των ενεμάτων είναι βασικό να τονιστεί η διαφορά ανάμεσα στο φαινόμενο της εξίδρωσης και του διαχωρισμού. Και τα δύο προκαλούνται λόγω των πιθανών μεγάλων ποσοστών νερού που απαιτώνται για την αναγκαία ρευστότητα του ενέματος. Όμως η εξίδρωση μπορεί να μην επηρεάζει την σύνθεση της μάζας του ενέματος που είναι κάτω από το φιλμ νερού που δημιουργείται στην επιφάνεια, ενώ ο διαχωρισμός αφορά την κίνηση των μεγαλύτερων

κόκκων των στερεών προς τα κάτω με την πάροδο του χρόνου, αφήνοντας τις πιο λεπτόκοκκες μάζες του ενέματος σε υψηλότερα στρώματα [Miltiadiou A., 2013, RILEM].

3.4.3.2 Παράμετροι

Παρακάτω θα αναλυθούν οι παράγοντες που επηρεάζουν την σταθερότητα των ενεμάτων και κατ' επέκταση καθορίζουν το μέσο πάχος του φιλμ νερού και τις αποστάσεις ανάμεσα στα σωματίδια.

- I. Το περιεχόμενο νερό στην σύνθεση του ενέματος, που εκφράζεται μέσα από τον λόγο νερού προς στερεά (κ.β.) (W/S)

Η εξίδρωση αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με το ποσοστό του περιεχόμενου νερού. Συγκεκριμένα, ξεκινά από ένα συγκεκριμένο ποσοστό περιεχόμενου νερού, το οποίο εξαρτάται από την ειδική επιφάνεια των στερεών. Δεν πρέπει να παραληφθεί το συμπέρασμα που έχει προκύψει από την μελέτη των αποτελεσμάτων πολλών πειραμάτων, το οποίο αναφέρεται στο ότι ο βαθμός εξάρτησης της εξίδρωσης από το ποσοστό του νερού προς στερεά, μειώνεται με την αύξηση της ειδικής επιφάνειας των στερεών της σύνθεσης [Miltiadiou A., 2013, RILEM].

- II. Το ποσοστό του περιεχόμενου υπερρευστοποιητή

Η χρήση του υπερρευστοποιητή, οδηγεί σε μικρότερη εξίδρωση, εφόσον μέσω αυτήν συγκρατείται μεγαλύτερη ποσότητα νερού. Επίσης, αποσκοπεί και στην μείωση του νερού που απαιτείται για λόγους ρευστότητας. Είναι βασική, όμως, η συμβατότητα του υπερρευστοποιητή με τα υπόλοιπα υλικά του ενέματος [Miltiadiou A., 2013, RILEM].

- III. Το ποσοστό των λεπτόκοκκων υλικών μέσα στην σύνθεση του ενέματος, που εκφράζεται κυρίως μέσα από την ειδική επιφάνεια των στερεών

Η εξίδρωση ελαττώνεται όταν αυξάνεται η ειδική επιφάνεια. Σε αυτό το σημείο τονίζεται κι η αξία της αντικατάστασης ποσοστού των χονδρόκοκκων υλικών, με πιο λεπτόκοκκα υλικά, εφόσον μέσω αυτού του τρόπου επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια και μεγαλύτερη συγκράτηση νερού [Miltiadiou A., 2013, RILEM].

- IV. Η μέθοδος ανάμιξης

Είναι απαραίτητο να έχει χρησιμοποιηθεί μία μέθοδος ανάμιξης που να προσφέρει ομοιόμορφη και επαρκή κατανομή των κόκκων μέσα στο νερό. Επίσης, η μέθοδος ανάμιξης είναι πολύ σημαντική για την αποκροκκίδωση της στερεής φάσης των ενεμάτων.

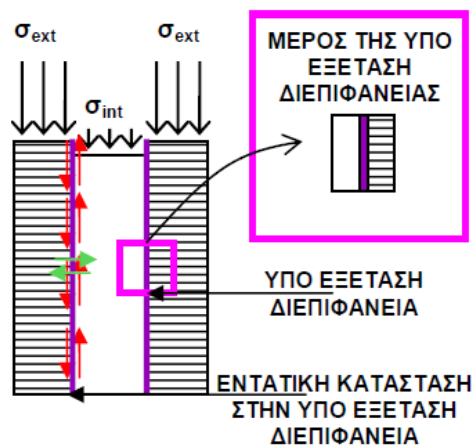
- V. Οι χημικές και φυσικές ιδιότητες της στερεής φάσης και η πιθανή παρουσία προσμίξεων είναι σημαντικοί παράγοντες, μιας και παρεμβαίνουν στην ισορροπία των δυνάμεων μεταξύ των σωματιδίων

3.5 Συνάφεια Υποβάθρου-Ενεμάτων

3.5.1 Εισαγωγή

Ένας από τους ρόλους των ενεμάτων ενίσχυσης είναι να διεισδύσουν σε υπάρχοντα κενά και ρωγμές των δίστρων και τρίστρων λιθοδομών. Επίσης, μέσω της εισχώρησης του ανάμεσα στις παρειές αυτών των λιθοδομών στοχεύουν να βελτιώσουν, ή ακόμα σε πολλές περιπτώσεις, να δημιουργήσουν την συνεργασία αυτών των παρειών. Γενικά, η ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς τρίστρων τοιχίσκων υπό κατακόρυφα θλιπτικά φορτία, πριν και μετά τα ενέματα, έδειξε ότι οι διεπιφάνειες ανάμεσα στις παρειές των τοιχίσκων, αναλόγως της καθ' ύψος θέσης τους, υποβάλλονται σε σύνθετη καταπόνηση με την ανάπτυξη:

- Διατμητικών τάσεων λόγω της διαφορετικής παραμορφωσιμότητας των στρώσεων (με την παρουσία, μάλλον, μικρής ορθής θλιπτικής τάσης οφειλόμενη στην διόγκωση της ενδιάμεσης στρώσης) και
- Εφελκυστικών τάσεων λόγω των οριζοντίων ωθήσεων της ενδιάμεσης στρώσης στις εξωτερικές παρειές [Adami Ch., 2011]



Εικόνα 20. Σχηματική απεικόνιση της εντατικής κατάστασης που αναπτύσσεται στην διεπιφάνεια στρώσεων τρίστρωτης τοιχοποιίας [Adami Ch., 2011]

Επομένως, οι φέρουσες τοιχοποιίες καλούνται να αναλάβουν πέραν των κατακόρυφων φορτίων, και τέμνουσες δυνάμεις που δημιουργούνται είτε από καμπτική ή θλιπτική ένταση. Οι δυνάμεις αυτές εκδηλώνονται εντός ή εκτός του επιπέδου της τοιχοποιίας. Οι παραπάνω καταπονήσεις επιβεβαιώνουν την ανάγκη μελέτης της διατμητικής συμπεριφοράς των διεπιφανειών του υποβάθρου με το ένεμα.

Ο κύριος παράγοντας που φαίνεται να επηρεάζει την συμπεριφορά των τοιχοποιιών μετά τα ενέματα είναι η συνάφεια της διεπιφάνειας μεταξύ των ενεμάτων και των ήδη υπάρχοντων υλικών. Η διεπιφάνεια του υλικού επέμβασης με τα ήδη υπάρχοντα υλικά μπορεί να αποτελέσει ισχυρή ή αδύναμη ζώνη ανάλογα με την συνάφεια που επιτυγχάνεται κι, επομένως ενδέχεται να επηρεάσει την απόκριση της κατασκευής έναντι μονοτονικών και ανακυκλιζόμενων δράσεων. Όσο αυξάνεται η συνάφεια μεταξύ του υλικού επέμβασης και των ήδη υφιστάμενων, τόσο καθυστερείται η διάνοιξη των εγκάρσιων ρωγμών μεταξύ των

στρώσεων, άρα και η αστοχία της τοιχοποιίας. Η συνάφεια μεταξύ ενεμάτων (ή κονιαμάτων) και υποβάθρων (λίθινων και πλίνθινων) έχει μελετηθεί από (Miltiadou A., 1990), (Miltiadou et al, 1998), (Toumbakari, 2002), (Toumbakari et al, 2007), (Μπέη Γ., 2004) και (Adami Ch., 2011). Η έρευνα, τόσο σε πειραματικό όσο και αναλυτικό επίπεδο, επικεντρώνεται σε ενέματα, που προορίζονται για τοιχοποιίες με συνδετικό ασβεστοκονίαμα. Παρά την μεγάλη σημασία του, ο μηχανισμός ανάπτυξης της συνάφειας δεν έχει μελετηθεί σε διεπιφάνειες ενεμάτων υδραυλικής ασβέστου και πηλού. Παρόλη την έλλειψη που εμφανίζεται στην βιβλιογραφία, είναι κάτι αδιαμφισβήτητα σημαντικό ιδιαίτερα στην χώρα μας, όπου οι ιστορικές κατασκευές υποβάλλονται συχνά σε σεισμικές, άρα και διατμητικές, δράσεις.

3.5.2 Μηχανισμός Συνάφειας

Η συνάφεια μεταξύ διεπιφανειών υποβάθρων ενεμάτων οφείλεται σε δύο μηχανισμούς:

- I. στην χημική συνάφεια, που οφείλεται στις χημικές αντιδράσεις μεταξύ των υλικών των διεπιφανειών και
- II. στην μηχανική συνάφεια, που σχετίζεται με την πρόσφυση και την αλληλεμπλοκή των προϊόντων ενυδάτωσης στην διεπιφάνεια και τους πόρους του υποβάθρου

Σε αρχικό στάδιο, οι δυνάμεις Van der Waals ευθύνονται για την ανάπτυξη συνάφειας μεταξύ των προϊόντων ενυδάτωσης και του υποβάθρου [Adami Ch., 2011]. Ωστόσο παράγοντες που επηρεάζουν το μέγεθος της αντοχής συνάφειας, αφορούν τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των επιμέρους υλικών (υποβάθρου και σύνθεσης ενέματος), κι είναι οι εξής:

- το μέγεθος και η κατανομή των πόρων στην διεπιφάνεια. Η διεπιφανειακή ζώνη σύμφωνα με τα προσομοιώματα που έχουν χρησιμοποιηθεί σε διεπιφάνειες αδρανών, σκυροδεμάτων και συνδετικών υλικών, χαρακτηρίζεται από μεγάλο πορώδες λόγω της παρουσίας μεγάλων κρυστάλλων πορτλανδίτη και εντριγκίτη (Adami Ch., 2011). Η παρουσία και η απουσία των παραπάνω προϊόντων εξαρτάται από το υπόβαθρο, την συνδετική κονία και τον λόγο νερού προς συνδετική κονία
- το πορώδες του υποβάθρου. Στα υπόβαθρα με μεγάλο πορώδες δεν εμφανίζονται κρύσταλλοι πορτλανδίτη, επομένως η διεπιφανειακή ζώνη είναι πιο πυκνή και η αναπτυσσόμενη συνάφεια καλύτερη. Σε υπόβαθρα με μικρό πορώδες, αναπτύσσονται μικρές τιμές της αντοχής συνάφειας λόγω της μη επαρκούς μηχανικής αλληλεμπλοκής του υποβάθρου με τα προϊόντα ενυδάτωσης
- η τραχύτητα του υποβάθρου, η οποία έχει θετική συνεισφορά στην αντοχή συνάφειας, λόγω της αύξησης της ενεργού επιφάνειας και της καλύτερης μηχανικής αλληλεμπλοκής (τριβή) των προϊόντων ενυδάτωσης των συνδετικών υλικών με τα υπόβαθρα. Επομένως, καθώς το εσωτερικό των δίστρωτων και τρίστρωτων τοιχοποιιών αποτελείται από λίθους με αδρή επιφάνεια, αναμένεται ότι η τραχύτητα θα αποτελέσει βασικό παράγοντα ανάπτυξης συνάφειας στις υπό μελέτη τοιχοποιίες αυτής της εργασίας (Adami Ch., 2011)
- τα μηχανικά και φυσικά χαρακτηριστικά των ενεμάτων. Αν και έχει αποδειχθεί ότι τα ενέματα με υψηλά μηχανικά χαρακτηριστικά αναπτύσσουν υψηλές αντοχές συνάφειας,

έχει βρεθεί ότι τα ενέματα με μέτρια μηχανικά χαρακτηριστικά φέρνουν ανταγωνιστικά αποτελέσματα σε όρους συνάφειας. Επίσης έχει αποδειχθεί ότι η αναπτυσσόμενη συνάφεια καθορίζεται από τις φυσικές ιδιότητες των υλικών των ενεμάτων

- Η σύνθεση του ενέματος. Σε συνθέσεις που περιέχουν υψηλούς λόγους νερού προς στερεά, οι οποίες αποτελούν συνθέσεις υψηλής διεισδυτικότητας, αναμένεται ο σχηματισμός πορώδων διεπιφανειακών ζωνών, λόγω της παρουσίας κρυστάλλων πορτλανδίτη, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται μικρές τιμές αντοχής συνάφειας. Αυτό ισχύει κυρίως για λίθινα υπόβαθρα μικρού πορώδους. Ωστόσο, η προσθήκη ποζολάνης στα ενέματα ενισχύει την εν χρόνω πύκνωση της μικροδομής μέσω της κατανάλωσης των κρυστάλλων πορτλανδίτη με την εξέλιξη της ποζολανικής αντίδρασης. Σε αυτή την δράση οφείλεται και η αύξηση της αντοχής συνάφειας με τον χρόνο, καθώς μειώνεται το πορώδες της διεπιφανειακής ζώνης με την μείωση των κρυστάλλων πορτλανδίτη. Βασικό ρόλο παίζει και η κατάλληλη κοκκομετρική διαβάθμιση της στερεής φάσης, με την συγκέντρωση των λεπτόκοκκων υλικών να είναι επαρκής αλλά σε τέτοια επίπεδα, ώστε να μην εμποδίζει την ροή τόσο στερεών όσο και υγρών προς το υπόβαθρο, πράγμα που θα είχε αρνητική επίδραση στην αναπτυσσόμενη συνάφεια (Adami Ch., 2011)
- Οι κατάλληλες συνθήκες συντήρησης. Σε περιπτώσεις ακραίων θερμοκρασιακών μεταβολών και χαμηλών τιμών σχετικής υγρασίας επηρεάζεται δυσμενώς η ανάπτυξη και το μέγεθος της αντοχής της διεπιφάνειας, λόγω μικρορηγματώσεων που προκαλούνται εξαιτίας συστολής ξήρανσης και ενανθράκωσης. Αυτός ο παράγοντας είναι μείζονος σημασία ειδικά για ενέματα υψηλής διεισδυτικότητας (Adami Ch., 2011)

4. Πειραματικό Μέρος

Στόχος του πειραματικού μέρους είναι η μελέτη των δομικών υλικών της υπό ενίσχυσης αργολιθοδομής προκειμένου να γίνουν γνωστές οι ιδιότητες τους και τα τυχόν αδύναμα σημεία τους. Κατ' αυτόν τον τρόπο θα εξασφαλισθεί η κατάλληλη επιλογή των συνθέσεων ενεμάτων, σύμφωνα με τα φυσικοχημικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των υφιστάμενων υλικών.

Διακρίνονται τρία στάδια όσον αφορά την μελέτη των ιστορικών λιθοδομών με συνδετικό πηλοκονίαμα καθώς και της ενίσχυσης τους με ενέματα. Τα στάδια είναι τα εξής:

- I. Παραγωγή συνθέσεων πηλοκονιαμάτων. Παρήχθησαν δύο διαφορετικές συνθέσεις πηλοκονιαμάτων, οι οποίες βασίστηκαν τόσο στην βιβλιογραφία, [Μπέη Γ., 2004], [Σταθόπουλος Κ., 2015] κ.α., όσο και σε αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν σε αυθεντικά πηλοκονιάματα, που ελήφθησαν από κτίρια προκειμένου να μελετηθούν τα χαρακτηριστικά τους. Οι συνθέσεις των κονιαμάτων εξετάστηκαν ως προς τα φυσικά και μηχανικά τους χαρακτηριστικά.
- II. Κατασκευή 6 λιθόκτιστων τοιχίσκων με συνδετικό πηλοκονίαμα. Οι παραχθείσες συνθέσεις κονιαμάτων χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των τοιχίσκων, οι οποίοι υποβλήθηκαν σε μονοτονική θλίψη πριν και μετά την εφαρμογή των ενεμάτων. Στην παρούσα έρευνα πραγματοποιήθηκε μελέτη των μηχανικών τους χαρακτηριστικών και της παθολογίας τους πριν και μετά την εφαρμογή των ενεμάτων καθώς και αξιολόγηση της συνεισφοράς των ενεμάτων στα μηχανικά και φυσικά τους χαρακτηριστικά.
- III. Παραγωγή συνθέσεων ενεμάτων. Πραγματοποιήθηκαν διάφορες συνθέσεις ενεμάτων, με τροποποιήσεις στα χρησιμοποιούμενα υλικά, στις αναλογίες των στερεών υλικών μεταξύ τους, στον λόγο νερού προς στερεά (W/S) και στην σειρά ανάμιξης των υλικών. Οι συνθέσεις αυτές των ενεμάτων δοκιμάστηκαν ως προς τα ρεολογικά τους χαρακτηριστικά, τις φυσικές και μηχανικές τους ιδιότητες.

4.1 Πηλοκονιάματα

Από την βιβλιογραφική μελέτη, λήφθηκαν πληροφορίες για τα υλικά, τις αναλογίες τους καθώς και την ποσότητα του απαιτούμενου νερού για την απόκτηση επαρκούς ρευστότητας και εργασιμότητας του μίγματος κονιάματος [Μπέη Γ., 2004], [Σταθόπουλος Κ., 2015]. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν από την [Νικολοπούλου V., 2017] χημικές και ορυκτολογικές αναλύσεις σε αυθεντικά παραδοσιακά πηλοκονιάματα από υπάρχουσες αργολιθοδομές, προκειμένου να παρασκευαστούν πηλοκονιάματα, όμοια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν στις κατασκευές. Μέσω αυτών των αναλύσεων επιβεβαιώθηκε η χρήση πηλού, άμμου και ασβέστη στα κονιάματα. Αυτό αποτέλεσε βασικό βήμα για την μελέτη των χαρακτηριστικών των εν λόγω κονιαμάτων και των παραμέτρων που επηρεάζουν τις φυσικές και μηχανικές τους ιδιότητες. Εξετάστηκαν δύο διαφορετικές συνθέσεις κονιαμάτων με τα υλικά και τις αναλογίες που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα [Νικολοπούλου V., 2017].

Πίνακας 1. Αναλογίες υλικών στις συνθέσεις των πηλοκονιαμάτων και πηλοασβεστοκονιαμάτων

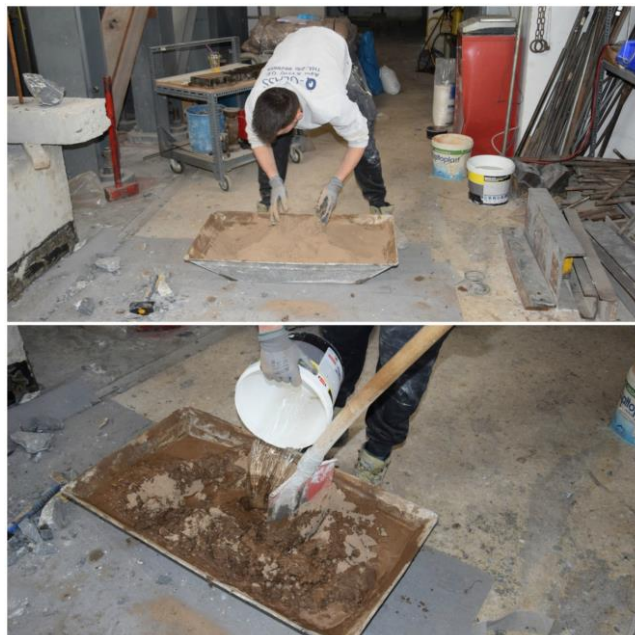
| <i>Αναλογίες συνθέσεων κονιαμάτων (%)</i> | | | | | |
|---|--------------|----------------------------|--------------------------------------|-----------------|------------------------|
| <i>Τύπος</i> | <i>Πηλός</i> | <i>Άμμος (0-2,5mm)</i> | <i>Χαλίκι-Ροζάκι (0,5-3,5mm)</i> | <i>Άσβεστος</i> | <i>W/S (% w/w)</i> |
| <i>Πηλοκονίαμα</i> | 80 | 16 | 4 | - | 34,15 |
| <i>Πηλοασβεστοκονίαμα</i> | 75 | 16 | 4 | 5 | 41,09 |

Τα δοκίμια των κονιαμάτων ελέγχθησαν ως προς:

- I. Τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά, (στις 28, 60 και 90 ημέρες ωρίμανσης τους):
 - i. καμπτική αντοχή
 - ii. θλιπτική αντοχή
- II. Τα φυσικά τους χαρακτηριστικά (στις 28, 60 και 90 ημέρες ωρίμανσης τους):
 - i. συστολή ξήρανσης
 - ii. μεταβολή μάζας
 - iii. μεταβολή πυκνότητας

Πρέπει να σημειωθεί ότι η διεθνής βιβλιογραφία δεν καταγράφει κανονισμούς ελέγχου πηλοκονιαμάτων. Στους ελέγχους των μηχανικών αντοχών των πηλοκονιαμάτων χρησιμοποιήθηκαν οι αντίστοιχοι αμερικάνικοι κανονισμοί τσιμεντοκονιαμάτων, ASTM C349, ASTM C348, ASTM C190.

4.1.1 Παρασκευή κονιάματος



Εικόνα 21. Ανάδευση των στερεών υλικών πρώτα εν ξηρώ, και στην συνέχεια με σταδιακή προσθήκη του απαιτούμενου νερού



Εικόνα 22. Φωτογραφίες από την παρασκευή του πηλοασβεστοκονιάματος.

Για την παρασκευή των κονιαμάτων, αρχικά, τοποθετήθηκαν όλα τα στερεά υλικά (πηλός, άμμος, ρυζάκι και άσβεστος) σε ένα δοχείο, αφού είχαν ζυγιστεί με τις σωστές τους αναλογίες. Σε αυτό το δοχείο αναδεύτηκαν, πρώτα, σε ξηρή μορφή. Τουλάχιστον σε αρχικό στάδιο, λόγω της ιδιαιτερότητας του υλικού, προτιμήθηκε η ανάμιξη με το χέρι. Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε σταδιακή προσθήκη νερού με ταυτόχρονη ανάμιξη. Στην αρχή το μίγμα ήταν πηχτό, γι αυτό κι η ανάμιξη συνεχίστηκε με το χέρι. Στην συνέχεια, η ανάδευση πραγματοποιήθηκε με μηχανικό αναδευτήρα. Δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην καλή ανάδευση, τόσο εν ξηρώ όσο και με το νερό, για την επαρκή ενυδάτωση όσο το δυνατόν περισσότερων κόκκων. Ο ίδιος τρόπος ανάδευσης ακολουθήθηκε και στους δύο τύπους κονιαμάτων που παρασκευάστηκαν.

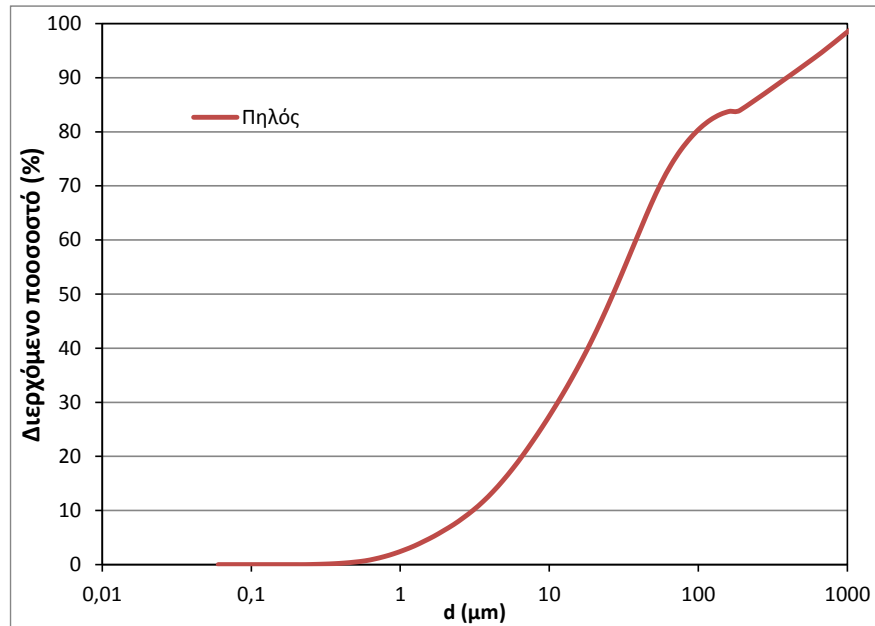
4.1.2 Σύσταση και ανάλυση υλικών συνθέσεων πηλοκονιαμάτων

Παρακάτω αναφέρονται τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τα κονιάματα, με κάποιες ενδεικτικές πληροφορίες για τις ιδιότητές τους, καθώς και τον τόπο προέλευσής τους.

Πηλός

Ο πηλός που χρησιμοποιήθηκε προέρχεται από το εργοστάσιο “Τζιτζικλής” στα Γιαννιτσά, το οποίο παράγει βυζαντινού τύπου οπτοπλίνθους.

Σύμφωνα με [Σταθόπουλος Κ., 2015] για την παρασκευή πηλοκονιάματος απαιτείται πηλός μέγιστου κόκκου 2mm. Ο πηλός που χρησιμοποιήθηκε είναι μέγιστου κόκκου μικρότερου από 1mm, επιβεβαιώνοντας την καταλληλότητα του συγκεκριμένου πηλού για την παρασκευή πηλοκονιάματος. Πραγματοποιήθηκε ανάλυση κοκκομετρίας με laser και με κόσκινα, όπως παρουσιάζεται στο συγκεντρωτικό διάγραμμα της Εικόνα .



Εικόνα 23. Καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης πηλού που χρησιμοποιήθηκε για τα κονιάματα (κοκκομετρική ανάλυση με Laser για διάμετρο κόκκου μικρότερο από 417μm και με κόσκινα για διάμετρο κόκκου μεγαλύτερο από 417μm)

Μέσα από χημικές και ορυκτολογικές αναλύσεις που πραγματοποίησε η [Νικολοπούλου V., 2017] εντοπίστηκε η ύπαρξη καολινίτη, μεταξύ των άλλων ορυκτών. Ωστόσο τονίζεται μόνο η ύπαρξη καολινίτη για λόγους που θα αναλυθούν παρακάτω. Επιπλέον, η περιεκτικότητα των υδατοδιαλυτών αλάτων (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^{2-}) ήταν κάτω από το όριο ανίχνευσης. Το ειδικό βάρος του δείγματος μετρήθηκε με τη μέθοδο της ληκύθου με θερμόμετρο δίνοντας τιμή $18,5 \text{ kN/m}^3$ χαρακτηριστική για τα μίγματα πυριτικών ορυκτών. Η υγρασία που περιέχεται στον πηλό βρίσκεται σε ποσοστό περί το 5% (κ.β.).

Χαλίκι

Χρησιμοποιήθηκε χαλίκι (άμμος τριβείου) κοκκομετρίας 0,5-3,5mm, το οποίο προέρχεται από το εργοστάσιο “Κριθάρη”.

Άμμος

Χρησιμοποιήθηκε άμμος Αλιάρτου, μέγιστου διαμέτρου κόκκου μικρότερη από 2,5mm.

Ασβέστης

Στα κονιάματα χρησιμοποιήθηκε πάστα ασβέστη, από την εταιρεία “Δουκέρης”. Αποτελείται από 50% νερό.

Νερό

Το νερό που χρησιμοποιήθηκε ήταν νερό ύδρευσης του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στην περιοχή του Ζωγράφου.

4.1.3 Συντήρηση δοκιμών κονιάματος

Τα δοκίμια των κονιαμάτων λήφθηκαν κατά την παραγωγή τους στο εργαστήριο στο πλαίσιο πειραμάτων, σε τυχαία επιλογή από τα διάφορα χαρμάνια. Συντηρήθηκαν σε μήτρες 40x40x160mm³ όπως καθορίζει το πρότυπο EN 1015-11:1999.

Η κάθε μήτρα αποτελείται από ένα ανοικτό πλαίσιο με κινητά τοιχώματα που όταν συναρμολογούνται σχηματίζουν τρία διαμερίσματα διαστάσεων 40x40x160mm³. Πριν την εισαγωγή των κονιαμάτων στις μήτρες είχαν λιπανθεί τα εσωτερικά τοιχώματα ώστε να αποφευχθεί πιθανή προσκόλληση των δοκιμίων και να είναι ευκολότερη η εξαγωγή τους. Το νωπό κονίαμα εισάγεται σε δύο ή τρεις στρώσεις. Το πρώτο στρώμα του νωπού κονιάματος συμπυκνώνεται με κρούσεις της μήτρας πάνω στον πάγκο εργασίας έως ότου επιπεδωθεί. Ομοίως, εισάγονται στην μήτρα το δεύτερο και το τρίτο στρώμα του κονιάματος. Μετά την πλήρωση της μήτρας, το υλικό της πάστας διαστρώνεται ομοιόμορφα με τη χρήση σπάτουλας. Έπειτα απομακρύνονται τα υπολείμματα του νωπού κονιάματος, έτσι ώστε να εξομαλυνθούν οι επιφάνειες των δοκιμίων στα διαμερίσματα. Η συντήρησή τους γίνεται με την προστασία υγρών λινατσών και σε θερμοκρασία δωματίου (20-25°C), προκειμένου να τους παρέχεται η απαιτούμενη υγρασία που απαιτείται για τις χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα. Η υγρή συντήρηση διήρκησε τις πρώτες 14 ημέρες της παρασκευής τους, και στην συνέχεια αφέθηκαν στο περιβάλλον του εργαστηρίου για να πήξουν. Καθώς ο πηλός αποτελεί αερική κονία, η έκθεσή του στον αέρα είναι απαραίτητη για την απόκτηση των αντοχών του.



Εικόνα 22. Μήτρες συντήρησης δοκιμών κονιάματος από τυχαία χαρμάνια, καθώς και διαμόρφωσή (με σπάτουλα) της τελικής τους επιφάνειας

4.2 Ενέματα

Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν 69 διαφορετικές συνθέσεις ενεμάτων, με στόχο την εύρεση των βέλτιστων συνθέσεων όσον αφορά τα ρεολογικά, φυσικοχημικά και μηχανικά

χαρακτηριστικά τους. Οι συνθέσεις αυτές κατηγοριοποιήθηκαν σε 9 διαφορετικές ομάδες, σύμφωνα με την αντικατάσταση ποσοστού της υδραυλικής ασβέστου με πηλό. Η πρώτη ομάδα αφορά την σύνθεση αναφοράς με ποσοστό υδραυλικής ασβέστου (NHL 5) 100% (της στερεής φάσης του ενέματος), η οποία έχει χρησιμοποιηθεί σε επεμβάσεις σε ιστορικές λιθοδομές με συνδετικό ασβεστοκονίαμα. Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκαν διάφορες συνθέσεις, με αντικατάσταση διαφόρων ποσοστών της υδραυλικής ασβέστου από πηλό, ως εξής: NHL 5: 90% - Πηλός: 10%, NHL 5: 80% - Πηλός: 20%, NHL 5: 70% - Πηλός: 30%. Παραλλήλως, μεταβαλλόταν και η τιμή του λόγου νερού προς στερεά (W/S), προκειμένου να διερευνηθεί η επιρροή αυτού του λόγου στις ιδιότητες των παραγόμενων ενεμάτων. Παρασκευάστηκαν, επίσης, και μερικές τριμερείς συνθέσεις (υδραυλικής ασβέστου–ποζολάνης-πηλού) με χρήση υπερρυστοποιητή. Πραγματοποιήθηκαν δύο μεμονωμένες συνθέσεις με υδραυλική άσβεστο (NHL 5) και ποζολάνη, καθώς επίσης και NHL5: 70% - Πηλός: 30% και υπερρυστοποιητή.

Η επιλογή αντικατάστασης μέρους της υδραυλικής ασβέστου με πηλό αποφασίστηκε για τους εξής λόγους:

- I. λόγοι φυσικοχημικής συμβατότητας των υλικών των ενεμάτων με των ήδη υπάρχοντων υλικών (δηλαδή του πηλοκονιάματος),
- II. οικονομικούς λόγους, μιας και η υδραυλική άσβεστος είναι ένα ακριβό υλικό. Τα ενέματα, σε συνδυασμό με τα υλικά και την εφαρμογή τους, αποτελούν μια κοστοβόρα τεχνική ενίσχυσης και επέμβασης σε ιστορικές κατασκευές, γεγονός που δρα ανασταλτικά για την υιοθέτησή τους. Επίσης η υδραυλική άσβεστος είναι ένα υλικό που δεν παράγεται στην Ελλάδα, κάτι που κάνει ακόμα πιο ακριβή και δύσκολη την προσέγγιση του,
- III. περιβαλλοντικοί και οικολογικοί παράγοντες, αφού η υδραυλική άσβεστος, είναι βιομηχανικό υλικό, το οποίο υπόκειται επεξεργασία, ενώ ο πηλός είναι ένα φυσικό υλικό, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς καμία επεξεργασία.

Έγινε μία αρχική διερεύνηση ως προς την επίδραση της σειράς ανάμιξης των υλικών στο τελικό μίγμα, εφόσον είχε διαπιστωθεί ότι ο συγκεκριμένος πηλός ($d < 63 \mu\text{m}$) κι η υδραυλική άσβεστος (NHL 5) είχαν παρόμοια κοκκομετρία. Έτσι, στις συνθέσεις NHL 5: 70%-Πηλός: 30%, έγινε η ανάμιξη και με τους δύο τρόπους, δηλαδή και με πρώτη την υδραυλική άσβεστο, αλλά και τον πηλό για διάφορους λόγους νερού προς στερεά. Στα πλαίσια της μελέτης της μεταβολής των ιδιοτήτων των ενεμάτων (ρεολογικών, φυσικών και μηχανικών), αλλάζοντας την σειρά στην ανάμιξη της υδραυλικής ασβέστου και του πηλού, έγινε και σύνθεση με ποσοστό Πηλού: 100%.

Τα δοκίμια των ενεμάτων ελέγχθησαν ως προς:

- I. Τα χαρακτηριστικά ενεσιμότητας τους:
 - i. ρευστότητα
 - ii. σταθερότητα
- II. Τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά, (στις 28, 60 και 90 ημέρες ωρίμανσης τους):
 - i. καμπτική αντοχή

- ii. θλιπτική αντοχή
 - iii. διατμητική αντοχή
- III. Τα φυσικά τους χαρακτηριστικά (στις 28, 60 και 90 ημέρες ωρίμανσης τους):
- i. συστολή ξήρανσης
 - ii. μεταβολή μάζας
 - iii. μεταβολή πυκνότητας

4.2.1 Παρασκευή συνθέσεων ενεμάτων

Εργαστηριακά τα ενέματα κατασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος, σε μηχανή υπερήχων 28 kHz, με ταυτόχρονη μηχανική ανάδευση. Πρώτα τοποθετήθηκε το νερό και, σε όποιες περιπτώσεις απαιτούνταν από την μελέτη, ο υπερρευστοποιητής, και πραγματοποιήθηκε ανάδευση για 30sec. Στην συνέχεια, τοποθετήθηκαν τα στερεά, ξεκινώντας από τα πιο λεπτόκοκκα και ακολούθησαν τα χονδρόκοκκα. Αυτό έγινε με στόχο την αποκροκκίδωση των λεπτόκοκκων υλικών και την ομοιόμορφη διασπορά τους στο νερό. Μέσω της αποκροκκίδωσης της στερεής φάσης, εμφανίζεται μεγαλύτερο ποσοστό λεπτόκοκκων υλικών αυξάνοντας την ειδική επιφάνεια της στερεής φάσης του ενέματος, με αποτέλεσμα να δεσμεύεται μεγαλύτερη ποσότητα ελεύθερου νερού, και να βελτιώνονται τα ρεολογικά χαρακτηριστικά αυτών. Επίσης δημιουργείται και μια πιο πυκνή δομή, με αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής και βελτίωση της ανθεκτικότητάς τους.



Εικόνα 23. Συσκευή υπερήχων κατά την διάρκεια ανάδευσης σύνθεσης ενέματος

Βασική είναι η διατήρηση του σωστού χρόνου ανάδευσης μετά την τοποθέτηση του κάθε στερεού υλικού, προκειμένου να προλάβει να γίνει η αποκροκκίδωση του και σε τελική φάση να γίνει ομοιόμορφο και ομοιογενές το μίγμα. Επομένως, στην παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκε ανάδευση μετά την τοποθέτηση κάθε υλικού για 3min. Είναι βασικό να διατηρείται σταθερός ο χρόνος ανάδευσης, προκειμένου να μη λαμβάνεται υπόψη κι άλλη παράμετρος που να επηρεάζει τα ρεολογικά χαρακτηριστικά των συνθέσεων των ενεμάτων.

4.2.2 Σύσταση και ανάλυση υλικών συνθέσεων ενεμάτων

Με βάση τα συστατικά των πηλοκονιαμάτων και του είδους της λιθοδομής που μελετάται, επιλέχθηκαν τα υλικά των ενεμάτων σύμφωνα με κριτήρια:

- I. φυσικοχημικής συμβατότητας (πορώδους, κοκκομετρικής διαβάθμισης, ορυκτολογική και χημική σύσταση των υλικών) με τα ήδη υφιστάμενα
- II. επαρκών χαρακτηριστικών διεισδυτικότητας, ρευστότητας και σταθερότητας
- III. συμβατών (αλλά και επαρκών) μηχανικών ιδιοτήτων με τα ήδη υφιστάμενα
- IV. ανθεκτικότητας της ενισχυμένης τοιχοποιίας και της επέμβασης
- V. οικονομικά και περιβαλλοντικά

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας για την παρασκευή των συνθέσεων των ενεμάτων είναι τα ακόλουθα:

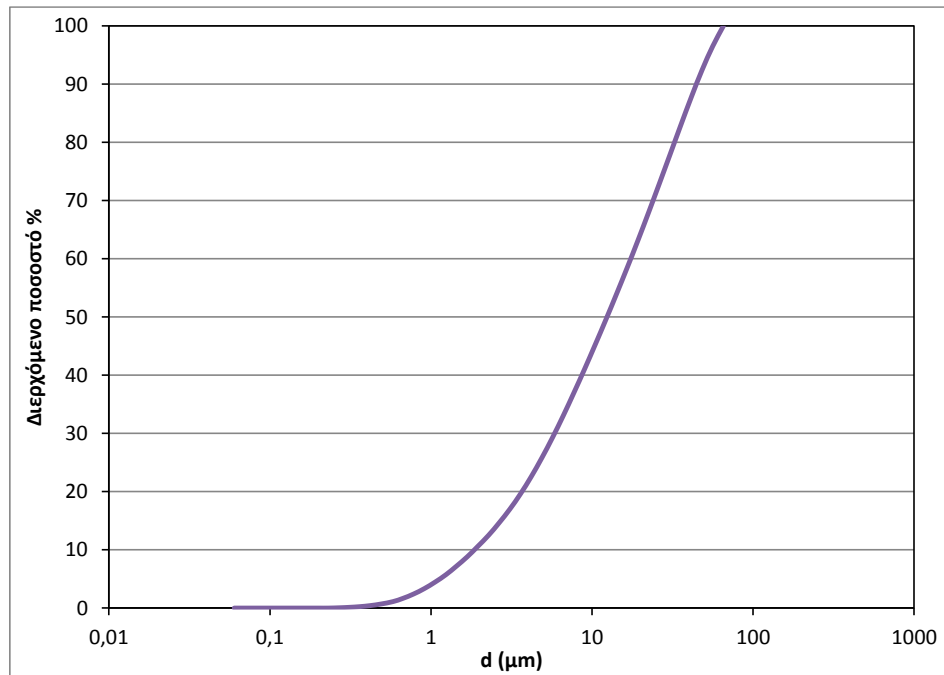
Υδραυλική άσβεστος

Η υδραυλική άσβεστος που χρησιμοποιήθηκε είναι τύπου NHL 5 St Astier, και προέρχεται από την εταιρεία CESA. Συσκευάζεται σε σακιά των 30kg. Προμηθεύτηκε από την εταιρεία ΠΡΟΛΑΤ. Η ειδική της επιφάνεια είναι $8000\text{cm}^2/\text{gr}$ και το ειδικό της βάρος 7kN/m^3 .

Πηλός

Ο πηλός που χρησιμοποιήθηκε για τα ενέματα, προέρχεται από το ίδιο εργοστάσιο με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε στα κονιάματα, ωστόσο είναι διαφορετικής κοκκομετρίας. Στις πρώτες συνθέσεις που πραγματοποιήθηκαν, χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος πηλός με τα κονιάματα, ωστόσο στον πυθμένα της συσκευής των υπερήχων παρατηρήθηκε μεγάλο ποσοστό καθίζησης των χονδρόκοκκων κλασμάτων του πηλού, πράγμα που θα οδηγούσε σε μία διαφορετική σύνθεση με διαφορετικές αναλογίες και κοκκομετρική διαβάθμιση από αυτές που μελετήθηκαν, αφού ένα μεγάλο ποσοστό του πηλού καθίζανε. Η καθίζηση σε μία σύνθεση ενέματος αποτελεί καταστροφικό γεγονός για λόγους διεισδυτικότητας και σταθερότητας του ενέματος. Επομένως, αποφασίστηκε για τους παραπάνω λόγους, να χρησιμοποιηθεί πηλός πιο λεπτόκοκκου κλάσματος που αναλογεί σε διάμετρο μικρότερη των $63\mu\text{m}$, το οποίο χαρακτηρίζεται ως παιπάλη. Η παιπάλη μπορεί να είναι άργιλος ή σκόνη από το ίδιο το υλικό και μπορεί να βρίσκεται προσκολλημένη στους κόκκους του υλικού. Έτσι, με την χρήση τόσο λεπτόκοκκου υλικού, πέρα από την αντιμετώπιση της καθίζησης, επιδιώχθηκε κι η καλύτερη πρόσφυση του υπάρχοντος υλικού με το υλικό επέμβασης.

Πραγματοποιήθηκε ξήρανση του πηλού σε κατάλληλες δοσολογίες περί των 2 κιλών στους 110°C . Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε το κοσκίνισμά του με το κατάλληλο κόσκινο των $63\mu\text{m}$ και χρησιμοποιήθηκε το κλάσμα που πέρασε από αυτό το κόσκινο. Η κοκκομετρική καμπύλη του πηλού που χρησιμοποιήθηκε για τα ενέματα είναι η εξής:



Εικόνα 24. Καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης πηλού που χρησιμοποιήθηκε για τα ενέματα

Ποζολάνη

Στις τριμερείς συνθέσεις υδραυλικής ασβέστου-πηλού-ποζολάνης, χρησιμοποιήθηκε φυσική ποζολάνη “Θηραϊκή Γη”, από την εταιρεία ΠΡΟΛΑΤ.

Υπερρευστοποιητής

Στις συνθέσεις με την ποζολάνη, τοποθετήθηκε και υπερρευστοποιητής, προκειμένου να αυξηθεί η ρευστότητα της σύνθεσης του ενέματος, χωρίς περαιτέρω αύξηση του λόγου νερού προς στερεά. Χρησιμοποιήθηκε τύπος υπερρευστοποιητή που χρησιμοποιείται και στο τσιμέντο, CHEM SPL, από την εταιρεία Domylo.

4.2.3 Συντήρηση δοκιμίων συνθέσεων ενεμάτων

Μετά την ανάδευση των συνθέσεων των ενεμάτων, τοποθετήθηκε το υγρό μίγμα σε μήτρες διαστάσεων $40 \times 40 \times 160 \text{mm}^3$, σε δύο φάσεις για να αποφευχθεί η ύπαρξη φυσαλίδων αέρα στο μίγμα, που θα μείωνε την αντοχή και την ανθεκτικότητα του. Σε πρώτη φάση τοποθετήθηκε ποσότητα ενέματος μέχρι την μέση του ύψους της μήτρας και στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε συμπύκνωση μέσω δόνησης και ανακίνηση του μίγματος. Τέλος, τοποθετήθηκε και η υπόλοιπη ποσότητα ενέματος μέχρι την πλήρωση της μήτρας και ξαναπραγματοποιήθηκε συμπύκνωση μέσω δόνησης.



Εικόνα 25. Αποθήκευση δοκιμίων στις μήτρες

Τα ενέματα είναι συνθέσεις που επηρεάζονται δραστικά από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, δηλαδή τις συνθήκες στις οποίες συντηρούνται. Λόγω της ιδιαιτερότητας του πηλού ως υλικό καθώς και των συνθέσεων των ενεμάτων του, διερευνήθηκε ο τρόπος συντήρησής τους. Η υδραυλικής άσβεστος αποτελεί υδραυλική κονία, άρα απαιτεί νερό για την ενυδάτωση και την απόκτηση των αντοχών της. Ο πηλός, ως αερική κονία, απαιτεί την έκθεση του στον αέρα, προκειμένου να “πήξει”. Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα, θα πρέπει να υπάρχει μία υγρή φάση συντήρησης προκειμένου να επιταχυνθούν οι υδραυλικές αντιδράσεις, και στην συνέχεια μία φάση συντήρησης στον αέρα για την σκλήρυνση του πηλού. Πραγματοποιήθηκαν τρεις διαφορετικοί τρόποι συντήρησης, με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου, οι οποίοι είναι οι εξής:

- I. Μετά την αποθήκευση του ρευστού ενέματος στις μήτρες, διατηρήθηκαν σε συνθήκες δωματίου θερμοκρασίας $20 \pm 5^\circ\text{C}$, με την κάλυψη υγρών λινάτσων, ώστε να παροχετεύεται η απαιτούμενη υγρασία, για 14 ημέρες. Μετά το πέρας των 14 ημερών, αφαιρέθηκαν τα πρίσματα των ενεμάτων από τις μήτρες και τοποθετήθηκαν σε αεροστεγές κουτί, με ένα δοχείο πληρωμένο με νερό, έτσι ώστε να διατηρείται η υγρασία του σε υψηλά και σταθερά επίπεδα.



Εικόνα 26. Συντήρηση δοκιμίων ενεμάτων στο αεροστεγές κουτί

- II. Αντί για την κάλυψη των μητρών με υγρές λινάτσες, επιλέχθηκε να τοποθετηθούν σε υγρό θάλαμο συντήρησης με σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ και σχετική υγρασία $\text{RH}=95\pm 5\%$, για τις 14 πρώτες ημέρες συντήρησης τους. Με την διατήρηση της υγρασίας σε τόσο υψηλά επίπεδα, επιταχύνεται η ενυδάτωση των υδραυλικών υλικών. Μετά το πέρας των 14 ημερών, μεταφέρθηκαν σε χώρο με σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ και σχετικής υγρασίας $\text{RH}=30\pm 5\%$. Έτσι, δόθηκε και η δυνατότητα στον πηλό, που είναι αερική κονία, να αποδώσει το νερό που πρέπει, προκειμένου να σκληρυνθεί, και να αποκτήσει τις αναμενόμενες αντοχές. Σε αυτές τις συνθήκες συντήρησης, τα δοκίμια στις 90 ημέρες ωρίμανσης τους παρουσίασαν έντονες ρηγματώσεις, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 27. Φωτογραφία ρηγματωμένων δοκιμίων ενεμάτων με τον τρόπο συντήρησης II

- III. Διατήρηση των μητρών με τις συνθέσεις των ενεμάτων, στον υγρό θάλαμο για τις πρώτες 28 ημέρες συντήρησης τους, και στην συνέχεια διατήρηση τους στο αεροστεγές κουτί, με σταθερή υγρασία.

Σημαντική είναι η διατήρηση σταθερών συνθηκών θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, ώστε να μην εισάγονται κι άλλες μεταβλητές στην μεταβολή των διάφορων ιδιοτήτων. Ωστόσο, είναι απαραίτητο να τονιστεί, ότι τα ενέματα σε μία κατασκευή βρίσκονται στο εσωτερικό της τοιχοποιίας επομένως, δεν υπόκεινται σε σημαντικές μεταβολές θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, ούτε κι έρχονται σε επαφή με τον αέρα, επομένως η ενανθράκωση τους δεν είναι τόσο έντονη. Σύμφωνα με τα παραπάνω, λοιπόν, οι παραπάνω συνθήκες συντήρησης δίνουν συντηρητικά αποτελέσματα, μιας κι είναι αρκετά δυσμενέστερες από τις συνθήκες στις οποίες θα υπόκεινται τα ενέματα στην πραγματικότητα. Οι τρεις παραπάνω τρόποι, παρουσίασαν και πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, επομένως το θέμα της συντήρησης των πρισμάτων των ενεμάτων χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

4.3 Τεχνικές αποτίμησης

4.3.1 Κοκκομετρική ανάλυση

Κοκκομετρική ανάλυση πραγματοποιήθηκε στον πηλό που χρησιμοποιήθηκε τόσο για τα κονιάματα, όσο και αργότερα για τα ενέματα. Ανάλυση της κοκκομετρικής τους διαβάθμισης πραγματοποιήθηκε και στα δείγματα πηλοκονιαμάτων που λήφθηκαν από τοιχοποιίες με αντίστοιχο τρόπο και υλικά δόμησης [Nikolopoulou V., 2017], με της παρούσας εργασίας (δηλαδή λιθοδομή με κάποιου είδους πηλοκονίαμα). Πραγματοποιήθηκε κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα στα πιο χονδρόκοκκα κλάσματα, καθώς επίσης και κοκκομετρική ανάλυση με laser για μεγαλύτερη ακρίβεια στα λεπτόκοκκα κλάσματα.

Επειδή στο εργαστήριο η εξέταση μιας μεγάλης ποσότητας δείγματος είναι πρακτικά δύσκολη, χρησιμοποιήθηκε μία μικρότερη ποσότητα, από τον πηλό, η οποία είναι αντιπροσωπευτική του όλου δείγματος. Η επιλογή και μείωση του αντιπροσωπευτικού δείγματος πραγματοποιήθηκε μέσω τετραμερισμού σύμφωνα με τα πρότυπα EN 932-1:1999 και EN 932-2:1999.

Κατά την δοκιμή της κοκκομετρικής ανάλυσης, γίνεται η κατανομή ενός υλικού, σε κλάσματα, μέσω της διέλευσής του από τα αντίστοιχα επιλεγμένα κόσκινα με μειούμενη διάμετρο. Η εναπομένουσα ποσότητα του υλικού που παρέμεινε, σε κάθε κόσκινο ζυγίζεται και έτσι είναι δυνατόν να υπολογιστεί η κατανομή του μεγέθους των κόκκων για το δείγμα. Το προς εξέταση δείγμα τοποθετείται στα κόσκινα, από το μεγαλύτερο μέγεθος οπής στο μικρότερο, και ανάλογα με το ίδιο το υλικό, από κάθε κόσκινο συγκρατείται και διέρχεται ένα συγκεκριμένο ποσοστό του δείγματος. Το κοσκίνισμα μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους:

- I. Χειρονακτικά με οριζόντιες και κάθετες κινήσεις, που συνοδεύονται με προσεκτικές ανακινήσεις του δείγματος. Το υλικό που διέρχεται από το κάθε κόσκινο ζυγίζεται, έτσι ώστε να αποτυπωθεί στην ζητούμενη κοκκομετρική καμπύλη. Το κοσκίνισμα θεωρείται ότι έληξε όταν τοποθετώντας ένα άσπρο χαρτί κάτω από το κόσκινο διαπιστώνεται ότι δεν διέρχεται άλλο υλικό. Γενικά, σε κάθε δείγμα για να διατηρηθεί μία κοινή αναφορά, διατηρείται σταθερός χρόνος κοσκίνισματος περί τα 10min. Η κοκκομετρική ανάλυση των δειγμάτων των πηλοκονιαμάτων από τα ήδη υπάρχοντα κτίρια έγινε, με τον παραπάνω τρόπο, με κόσκινα οπών No(2,36)mm, No(1mm), No(1,40mm), No(1,18mm), No(600μm) και No(90μm).
- II. Με ειδικές μηχανές κοσκίνισματος. Στις συσκευές αυτές τα κόσκινα τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο, με το κόσκινο μεγαλύτερης οπής στην κορυφή και τον υποδοχέα συλλογής του λεπτότερου υλικού στο κατώτερο σημείο. Η κοκκομετρική ανάλυση του πηλού στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο EN 933-1. Για τον πηλό χρησιμοποιήθηκε δείγμα 10kg αφού πρώτα είχε ξηρανθεί σε πυραντήριο στους 110°C. Τα κόσκινα που χρησιμοποιήθηκαν για την κοκκομετρική ανάλυση του πηλού ήταν το No(350μm), No(250μm), No(125μm), No(88μm) και No(63μm). Γενικά, σε κάθε δείγμα για να διατηρηθεί μία κοινή αναφορά, έτσι ώστε να μην

λαμβάνεται υπόψη κι άλλη μεταβλητή, διατηρείται σταθερός χρόνος κοσκίνισματος περί τα 10min.



Εικόνα 28. Ξήρανση του πηλού για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί το κοσκίνισμα του

Η ποσότητα του υλικού που παραμένει σε κάθε κόσκινο καλείται συγκρατούμενη και αυτή που πέρασε διερχόμενη. Τα συγκρατούμενα κλάσματα σε κάθε κόσκινο ζυγίζονται και στην συνέχεια μέσω υπολογισμών προσδιορίζεται η διερχόμενη μάζα και το ποσοστό (%) του διερχόμενου υλικού. Ο υπολογισμός του % διερχόμενου υλικού στο κόσκινο i δίνεται από την σχέση:

$$\text{διερχόμενο \% στο κόσκινο } i = \left(\frac{\text{διερχόμενο στο κόσκινο } i}{\text{μάζα δείγματος}} \right) \times 100$$

Για τα πιο χονδρόκοκκα αδρανή, όπως είναι η άμμος και το ρυζάκι, η κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα κρίνεται ικανοποιητικά ακριβής. Όμως, για τον πηλό και τα αυθεντικά πηλοκοινιάματα, πραγματοποιήθηκε και κοκκομετρική ανάλυση με laser για την επαρκή κοκκομετρική ανάλυση των πιο λεπτόκοκκων κλασμάτων τους. Η κοκκομετρική ανάλυση με laser βασίζεται στην σκέδαση και διάθλαση μίας δέσμης Laser που διέρχεται από το προς μέτρηση δείγμα (κονία). Το δείγμα ευρίσκεται σε διασπορά σε υγρό μέσο με την μορφή ομογενούς εναιωρήματος. Η δέσμη Laser είναι ισχύος 3mW και μήκους κύματος 680nm. Η δέσμη προσπίπτουσα στο εναιώρημα σκεδάζεται και διαθλάται. Οι προσθοσκεδάζουσες, οπισθοσκεδάζουσες και πλαγιοσκεδάζουσες ακτίνες από το εναιώρημα μετρώνται με ειδικό ανιχνευτή. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων επεξεργάζονται με την θεωρία του Fraunhofer και υπολογίζεται έτσι η σωματιδιακή κατανομή. Το εύρος μέτρησης των οργάνων αυτών κυμαίνεται από 0,03-700μm.

Τα αποτελέσματα αποτυπώνονται σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα όπου στον οριζόντιο άξονα x εμφανίζεται η διάμετρος της οπής των κοσκίνων και στον κατακόρυφο άξονα y το ποσοστό του διερχόμενου υλικού. Ο οριζόντιος άξονας είναι σε λογαριθμική κλίμακα

δεδομένου ότι είναι επιθυμητή η ανάπτυξη της περιοχής των μικρών διαμέτρων. Η ένωση των σημείων του διαγράμματος δίνει μια πολυγωνική γραμμή που ονομάζεται κοκκομετρική καμπύλη.

4.3.2 Συστολή ξήρανσης

Η συστολή ξήρανσης είναι το ποσοστό της μείωσης του όγκου των υπό μελέτη στοιχείων, χωρίς την εφαρμογή φορτίου, που οφείλεται σε:

- I. Μεταβολή της υγρασίας στην μάζα του, λόγω της επίδρασης του περιβάλλοντος
- II. Φυσιοκοημικές δράσεις στην μάζα του, από την εξέλιξη διαφόρων αντιδράσεων στο εσωτερικό της μάζας του, όπως ενυδάτωση κ.ο.κ.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την συστολή ξήρανσης είναι οι εξής:

- I. Οι διαστάσεις του υπό εξέταση στοιχείου. Όσο αυξάνονται οι διαστάσεις, μειώνεται η συστολή ξήρανσης
- II. Η σχετική υγρασία περιβάλλοντος. Όσο αυξάνεται η σχετική υγρασία, μειώνεται η συστολή ξήρανσης
- III. Η αντοχή του στοιχείου. Όσο αυξάνεται η αντοχή, τόσο μειώνεται η συστολή ξήρανσης
- IV. Η σύνθεση του δοκιμίου, υλικά, κοκκομετρική διαβάθμιση κ.ο.κ. Όσο πιο λεπτόκοκκα είναι τα υλικά, τόσο μειώνεται η συστολή ξήρανσης

Η συστολή ξήρανσης ως φαινόμενο, είναι πολύ σημαντικό, εφόσον επηρεάζει πολλούς παράγοντες στα υπό μελέτη στοιχεία. Είναι ένα φαινόμενο γνωστό για την μείωση όγκου και τις μικρορηγματώσεις που δημιουργεί στην μάζα των στοιχείων. Αυτές οι μικρορηγματώσεις, επιδρούν αρνητικά κυρίως σε θέματα ανθεκτικότητας, εφόσον επιτρέπουν την είσοδο σε εξωτερικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες στο εσωτερικό του στοιχείου, προσφέροντάς τους την δυνατότητα να προκαλέσουν βλάβες. Οι βλάβες μπορούν να προκληθούν είτε μέσω χημικής αντίδρασης ή μέσω διάφορων συστολοδιαστολών που προκαλούνται. Επίσης, οι μικρορηγματώσεις επηρεάζουν αρνητικά την καμπτική αντοχή των κονιαμάτων και ενεμάτων. Η καμπτική αντοχή είναι από μόνη της είναι μία πολύ ευαίσθητη ιδιότητα, η οποία με την πάροδο του χρόνου και την αύξηση της έντασης της συστολής ξήρανσης, μειώνεται δραστικά. Σημειώνεται και η μείωση της θλιπτικής αντοχής αυτών. Αυτή η διαδικασία πέρα από τις μικρορηγματώσεις που προκαλεί, μπορεί να δημιουργήσει και πολλά κενά στο εσωτερικό της τοιχοποιίας, λόγω της μείωσης του όγκου του κονιάματος, με αποτέλεσμα να μη συνδέονται επαρκώς οι λίθοι μεταξύ τους και τα επιμέρους στρώματα της τοιχοποιίας, και να μην είναι γνωστό τι ακριβώς συμβαίνει στο εσωτερικό της. Η επίδρασή του στις πραγματικές κατασκευές, αφορά κυρίως την κατακόρυφη συστολή των κονιαμάτων, η οποία, βιβλιογραφικά, έχει καταγραφεί να φτάνει και τα 2 cm, σε ένα συνηθισμένο ύψος τοιχοποιίας. Σε μικρότερο ποσοστό, αλλά υπαρκτή είναι και η συστολή κατά την οριζόντια διεύθυνση [Σταθόπουλος Κ., 2015].

Όπως αποδείχθηκε από την παραπάνω αιτιολόγηση, είναι χρήσιμο να εξεταστεί η εξέλιξη του φαινομένου της συστολής ξήρανσης, τόσο στα κονιάματα, όσο και στα ενέματα, σε σχέση με παράγοντες όπως είναι: τα διάφορα υλικά και αναλογίες αυτών, τα διαφορετικά

ποσοστά περιεχόμενου νερού, ο χρόνος ωρίμανσης κ.ο.κ.. Τόσο στα πρισματικά δοκίμια των κονιαμάτων όσο και των ενεμάτων, πραγματοποιήθηκε μέτρηση των διαστάσεων αυτών, στις 28, 60 και 90 ημέρες, προκειμένου να γίνει σαφής η εξέλιξη του φαινομένου με τον χρόνο. Η μέτρηση έγινε με την βοήθεια παχυμέτρου, ώστε να προσδιορισθούν με ακρίβεια οι διαστάσεις του μήκους, ύψους και πλάτους.

Από τις παραπάνω μετρήσεις, υπολογίστηκε ο όγκος του κάθε δοκιμίου και χρησιμοποιώντας τον τύπο που ακολουθεί υπολογίστηκε η συρρίκνωση (% κ.ο.).

$$\text{Shrin. (\%V)} = 100 - \left(\frac{V_t}{V_0} \right) \times 100$$

Όπου:

Shrin.(%V) : Η συρρίκνωση κατά όγκο (%)

V_t : Ο όγκος δοκιμίου στην χρονική στιγμή t (28, 60 και 90 ημερών), (mm^3)

V_0 : Ο αρχικός όγκος δοκιμίου, (mm^3)

4.3.3 Πυκνότητα

Η πυκνότητα των πρισματικών δοκιμίων των κονιαμάτων και των ενεμάτων προσδιορίζεται στις 28, 60 και 90 ημέρες, μέσω της μέτρησης του βάρους των πρισμάτων, αλλά και του όγκου τους μέσω της μέτρησης των διαστάσεων τους. Είναι χρήσιμο να μελετηθεί η εξέλιξη της ιδιότητας της πυκνότητας με τον χρόνο, και στα ενέματα για τους διάφορους λόγους W/S. Στα ενέματα, ως επιπλέον μέτρηση, πραγματοποιήθηκε μέτρηση του βάρους σε νωπό δείγμα της σύνθεσης του ενέματος. Και σε αυτήν την περίπτωση είναι χρήσιμο να μελετηθεί η εξέλιξη της πυκνότητας του νωπού δείγματος ενέματος, και της πυκνότητας του σκληρυμένου, πλέον δοκιμίου, και σε συναρτήσει με τους διαφορετικούς λόγους W/S.

Η πυκνότητα (ρ_m σε kg/m^3) υπολογίζεται βάσει του τύπου:

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V_v} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

Όπου:

m_1 : η μάζα του άδειου δοχείου

m_2 : η μάζα του δοχείου με το ένεμα

V_v : ο όγκος του δοχείου

Στην περίπτωση των σκληρυμένων δοκιμίων, όπου $m_2=m_1$, μπαίνει κατευθείαν η μάζα του σκληρυμένου δοκιμίου.

4.3.4 Μηχανική αντοχή

Στην παρούσα ενότητα θα γίνει ανάλυση των μεθόδων με τις οποίες έγινε αποτίμηση της αντοχής των κονιαμάτων, ενεμάτων και λίθων που αποτελούν δομικά συστατικά της φέρουσας τοιχοποιίας. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να υπολογιστεί και η συνολική αντοχή της τοιχοποιίας, πριν και μετά τα ενέματα, να εξεταστούν διάφορες παράμετροι, όπως η επιρροή του τύπου κονιάματος, ενέματος, τύπου δόμησης κ.ο.κ. Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει αποτίμηση της αντοχής των επιμέρους δομικών μονάδων ως προς τη θλιπτική αντοχή, την καμπτική αντοχή και την διατμητική αντοχή.

Τόσο η δοκιμή σε κάμψη όσο και η δοκιμή σε θλίψη πραγματοποιήθηκαν βάσει του προτύπου EN 1015-11:1999.

4.3.4.1 Κάμψη

Πραγματοποιείται προσδιορισμός της αντοχής σε κάμψη σύμφωνα με την μεθοδολογία της κάμψης τριών σημείων. Κατά την διαδικασία προσδιορισμού της αντοχής σε κάμψη, το πρισματικό δοκίμιο (διαστάσεων 40x40x160mm³), τοποθετείται στην συσκευή δοκιμής, με τέτοιο τρόπο που η όψη του να είναι η επιμήκης του πλευρά, έτσι ώστε ο επιμήκης άξονας του δοκιμίου να είναι κάθετος προς τα στηρίγματα. Επιλέγεται η πλευρά που θα είναι τοποθετημένη στα κυλινδρικά στηρίγματα της δοκιμής, να είναι η πιο επίπεδη από τις υπόλοιπες πλευρές, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να επηρεαστούν όσο λιγότερο γίνεται από παράγοντες μη επιπεδότητας, τραχύτητας κ.α. του δοκιμίου, μιας που η ιδιότητα της καμπτικής αντοχής, είναι από τις πιο ευαίσθητες και επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Το δοκίμιο φορτίζεται κατακόρυφα με εφαρμογή του κυλίνδρου φόρτισης στην απέναντι πλάγια πλευρά του πρίσματος. Τα πρισματικά δοκίμια φορτίστηκαν με συγκεντρωμένο φορτίο, στο μέσον του ανοίγματος που δημιουργούν οι δύο κυλινδρικές φορτίσεις, με διάσταση 100mm. Το φορτίο αυτό χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της εφελκυστικής/καμπτικής αντοχής και η εφαρμογή του γίνεται στο κέντρο του διαμήκη άξονα του πρισματικού δοκιμίου, δεδομένου ότι στο σημείο αυτό εμφανίζεται η μέγιστη αντοχή του.

Για κάθε δοκίμιο κονιάματος κι ενέματος πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στα δοκίμια, στα χρονικά διαστήματα των 28, 60 και 90 ημερών. Η αντοχή σε κάμψη (σ) υπολογίζεται θεωρητικά από την σχέση:

$$\sigma = \frac{M}{W} \text{ (MPa)}$$

όπου:

σ : η αντοχή σε κάμψη (MPa)

M: η ροπή που δημιουργείται στο σημείο μέγιστης έντασης (στο μέσον του μήκους του),
όπου $M = P * \frac{l}{4}$ (Nmm)

l : η απόσταση μεταξύ των στηριγμάτων (mm)

W : η ροπή αντίστασης, η οποία ισούται με $W = \frac{I}{h/2} = b * \frac{h^2}{6}$ (mm³)

I : ροπή αδράνειας του πρίσματος, όπου $I = b * \frac{h^3}{12}$ (mm⁴)

b : το πλάτος του πρίσματος (mm)

h : το ύψος του πρίσματος (mm)

P : το φορτίο που ασκείται στο μέσο του πρίσματος κατά τη θραύση (N)



Εικόνα 29. Φωτογραφία κατά την διάρκεια της δοκιμής για την αποτίμηση της καμπτικής αντοχής δοκιμίων ενεμάτων και κονιαμάτων

4.3.4.2 Θλίψη

Για τον προσδιορισμό της αντοχής σε θλίψη, χρησιμοποιούνται τα δύο θραυσμένα μέρη των δοκιμίων που έχουν υποστεί κάμψη. Η τοποθέτησή τους γίνεται κατά το μήκος τους, στο κέντρο των πλακών της συσκευής θλίψης, με κατάλληλες μεταλλικές πλάκες διαστάσεων 40x40mm². Η συσκευή θραύσης που χρησιμοποιείται είναι η TONIPACT 3000 (ρυθμός φόρτισης: 0,2mm/min). Τα δοκίμια κονιαμάτων και ενεμάτων στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής αποτιμήθηκαν στα χρονικά διαστήματα των 28, 60 και 90 ημερών.



Εικόνα 30. Μηχανή θλίψης κατά την διάρκεια της δοκιμής

Για να γίνει αποτίμηση της θλιπτικής αντοχής του λίθου, διαμορφώθηκαν κυβικά δοκίμια, τα οποία δοκιμάστηκαν σε θλίψη στην ίδια μηχανή. Η αντοχή σε θλίψη υπολογίζεται θεωρητικά από την σχέση:

$$\sigma = \frac{P}{A} \text{ (MPa)}$$

όπου:

σ : η αντοχή σε θλίψη (MPa),

P: το μέγιστο φορτίο στο σημείο θραύσης (N),

A: η επιφάνεια στην οποία ασκείται το φορτίο (mm²)

4.3.5 Χαρακτηριστικά Ενεσιμότητας Ενεμάτων

4.3.5.1 Ρευστότητα ενεμάτων

Το κριτήριο με το οποίο επιλέχθηκε να γίνει ο χαρακτηρισμός της ρευστότητας των ενεμάτων είναι ο χρόνος ροής τους. Στην βιβλιογραφία, αυτή η δοκιμή ονομάζεται “δοκιμή ρευστότητας μέσω του κώνου Marsh”, σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM C939-87, NF P 18-358 και από [Miltiadou A., 2013, RILEM]. Για την εν λόγω δοκιμή χρησιμοποιήθηκαν δύο κώνοι, με στόμιο διαμέτρου 4,7mm και 3mm. Οι κώνοι αυτοί είναι στερεωμένοι σε άκαμπτες διατάξεις που διασφαλίζουν την κατακορυφότητά τους, προκειμένου να μην εισάγονται και άλλες παράμετροι στην δοκιμή, πέρα από τον χρόνο ροής του ενέματος. Κάτω από αυτούς τους κώνους, τοποθετούνται ογκομετρικοί κύλινδροι χωρητικότητας 1lt, προκειμένου να μετράται η ποσότητα του υγρού που περνάει μέσα από τον κώνο, και ο χρόνος ροής του, μιας και αυτό είναι το ζητούμενο αυτής της δοκιμής. Ο κάθε ένας από αυτούς τους κώνους πληρώνεται με υλικό στην ποσότητα του 1lt, ενώ για λόγους

πληρότητας μετράται ο χρόνος ροής τους για κάθε 100ml, αν κι η πιο βασική μέτρηση είναι των πρώτων 100ml για τον κώνο με $d= 3\text{mm}$, ενώ για τον κώνο με $d= 4,7\text{mm}$ των 500ml και 1000ml. Ο λόγος αυτής της προτίμησης είναι ότι για τα πρώτα 100ml, η πίεση του ρευστού που ασκείται στο στόμιο του κώνου είναι πρακτικά σταθερή κατά την διάρκεια αυτής της γρήγορης δοκιμής, κι η επιρροή της σκληρότητας των τοιχωμάτων του κώνου ελαχιστοποιείται. Έτσι, εξηγείται η σημασία της εξέτασης μικρού όγκου ενέματος ως χρόνου αναφοράς για την ροή [Miltiadiou A., 2013, RILEM]. Τονίζεται η σπουδαιότητα αυτής της μεθόδου, εφόσον λόγω της ευκολίας της καθώς πραγματοποιείται και σε εργοταξιακό επίπεδο για την αξιολόγηση των συνθέσεων ενεμάτων επί τόπου.



Εικόνα 31. Διάταξη στην οποία τοποθετούνται οι κώνοι

Πρέπει να σημειωθεί ότι έγινε προσπάθεια, να γίνει φυσική ερμηνεία των αποτελεσμάτων του κώνου Marsh. Επομένως, πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός ενός δείκτη ρευστότητας, ο οποίος υπολογίζεται ως εξής:

$$F_1 = \frac{Q}{A \cdot t_f}, \text{ mm/s}$$

Όπου:

Q: ο όγκος του ενέματος, που αφορά την συγκεκριμένη δοκιμή, δηλαδή τα πρώτα 100ml του ενέματος που διαπερνούν το στόμιο του κώνου,

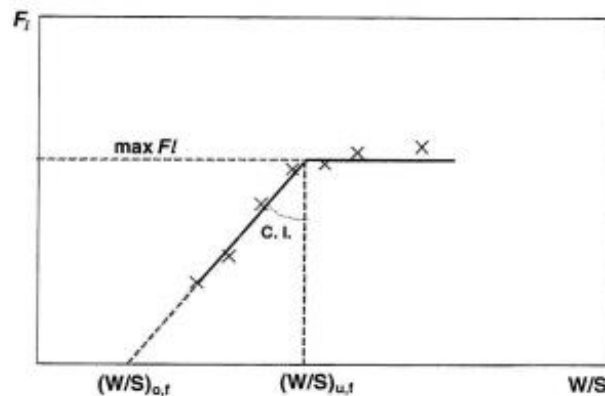
$A = \pi \cdot \frac{d^2}{4}$: που υποδηλώνει το εμβαδόν της διατομής του στομίου του κώνου ($d=$ η διάμετρος του κώνου)

t_f : ο χρόνος ροής των πρώτων 100ml του ενέματος από τον κώνο

Όπως φάνηκε και από τις μονάδες μέτρησης του δείκτη ρευστότητας, αποτελεί έναν παράγοντα μέτρησης της ταχύτητας του ενέματος, άρα όσο πιο ρευστό είναι το ένεμα, χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερες τιμές αυτού του δείκτη. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο δείκτης

ρευστότητας υπολογίζεται από τις μετρήσεις χρόνων ροής από τον κώνο της διαμέτρου των 3mm. Από τον κώνο με διάμετρο στομίου των 4,7mm, προκύπτουν διάφορα (πιο γενικά) κριτήρια για τον αποδεκτό χρόνο ροής ενός ενέματος που πληροί όλες τις απαιτήσεις ρευστότητας.

Είναι σημαντικό να πραγματοποιηθούν δοκιμές ρευστότητας, με μεγάλο φάσμα ποσοστών περιεχομένου νερού στο ένεμα (W/S), προκειμένου να γίνει ξεκάθαρο, πάνω από ποιον λόγο νερού προς στερεά δεν αυξάνεται ο δείκτης ρευστότητας, δηλαδή, στην ουσία, ο λόγος (W/S) πάνω από τον οποίο, η ταχύτητα παραμένει σταθερή. Μετά από αυτόν τον λόγο W/S, εφόσον κάθε αύξηση του νερού δεν οδηγεί σε βελτίωση της ρευστότητας, σίγουρα θα οδηγήσει σε θέματα αστάθειας, όπως είναι η εξίδρωση κι ο διαχωρισμός του μίγματος. Επίσης, οι δοκιμές πάνω σε διάφορους λόγους W/S, βοηθάνε στην εξισορρόπηση της διασποράς των μετρήσεων, καθώς και στην πιθανότητα συλλογής ρεολογικών πληροφοριών για το υπό μελέτη μίγμα ενέματος. Όλες αυτές οι πληροφορίες θα προσδιοριστούν μέσα από την κατασκευή του διαγράμματος δείκτη ρευστότητας (F_I) συναρτήσεως του λόγου W/S [Miltiadou A., 2013, RILEM]. Μέσα από την κατάλληλη διγραμμικοποίηση αυτού του διαγράμματος, προκύπτουν οι εξής πληροφορίες:



Εικόνα 32. Ενδεικτικό διάγραμμα δείκτη ρευστότητας συναρτήσεως του λόγου W/S (Miltiadou et al, 2013)

- Ο λόγος $(W/S)_{o,f}$, ο απόλυτος ελάχιστος λόγος νερού προς στερεά, στην ουσία ο λόγος W/S από τον οποίον το ένεμα αρχίζει να ρέει,
- Ο λόγος $(W/S)_{u,f}$, η απόλυτη τιμή του λόγου νερού προς στερεά, η οποία πρακτικά οδηγεί στον μέγιστο δυνατό δείκτη ρευστότητας, για την δεδομένη σύνθεση ενέματος,
- Ο μέγιστος F_I , η μέγιστη δυνατή τιμή του δείκτη ρευστότητας.

Ένα όριο χρόνου ροής επαρκούς ρευστότητας, αφορά τον χρόνο ροής των πρώτων 500ml, από τον κώνο Marsh με διάμετρο στομίου $d=4,7\text{mm}$, το οποίο είναι $t_{d=4,7\text{mm}} < 45\text{s}$. Συνολικά για το 1lt ο αποδεκτός χρόνος ροής για τον ίδιο κώνο είναι $t_{d=4,7\text{mm}} < 75\text{s}$ (σύμφωνα με το πρότυπο EN 12715:2000, EN 445) Για τον αποδεκτό δείκτη ρευστότητας τα συμπεράσματα βγαίνουν με πιο περίπλοκο συλλογισμό, εφόσον πρέπει να γίνει σύνδεση με την ιδιότητα της διεισδυτικότητας του ενέματος, και συγκεκριμένα με το ελάχιστο ονομαστικό πλάτος ρωγμής που έχει επιλεχθεί, με βάση την συγκεκριμένη σύνθεση ενέματος, και κυρίως, με βάση την υπό μελέτη κατασκευή.

Με την δοκιμή της στήλης άμμου, προκύπτουν συνδυαστικά αποτελέσματα που συνδέονται τόσο με την ρευστότητα όσο και με την διεισδυτικότητα του ενέματος, εφόσον ελέγχονται ταυτόχρονα:

- Η κατάλληλη λεπτότητα των κόκκων του ενέματος
- Η απαραίτητη ρευστότητα της σύνθεσης του ενέματος.

Πρέπει να τονιστεί ότι παρόλο που η στερεή φάση του ενέματος μπορεί να έχει επιλεγθεί ώστε να διεισδύει σε ένα συγκεκριμένο ελάχιστο ονομαστικό πλάτος ρωγμής (W_{nom}), άρα και στην αντίστοιχη στήλη άμμου, έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι το ένεμα δεν μπορεί να διεισδύσει αν ο δείκτης ρευστότητας δεν είναι μεγαλύτερος από ένα ελάχιστο όριο. Αυτό το όριο είναι πρακτικά σταθερό, για τις συνθέσεις ενεμάτων που έχουν σχεδιαστεί να εισχωρούν στο ίδιο W_{nom} . Η επιλογή του κατάλληλου W_{nom} σύμφωνα με την κοκκομετρική διαβάθμιση της στερεής φάσης του ενέματος γίνεται στην προηγούμενη ενότητα. Από την βιβλιογραφία, λοιπόν, προκύπτει ότι η απόλυτη ελάχιστη τιμή της απαιτούμενης ρευστότητας μπορεί να προκύψει με τον παρακάτω τύπο [Miltiadou et al, 2013]:

$$\min F_l = [1,2 - 45 * (W_{nom} - 0,1)^2] * 10^3 \left(\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right)$$

Για τα επιλεγμένα υλικά που συμπεριλαμβάνονται στις συνθέσεις των ενεμάτων, και την κοκκομετρική τους διαβάθμιση, όπως υπολογίστηκε και στην προηγούμενη ενότητα το στοχευόμενο ονομαστικό ελάχιστο πλάτος ρωγμής είναι το $W_{nom}=175\mu\text{m}$, άρα και το ελάχιστο όριο του δείκτη ρευστότητας είναι $\min F_l \geq 0.98 * 10^3 \text{ mm/s}$. (Πηλός: $d_{85}=38,50\mu\text{m}$ και $d_{99}=65,51\mu\text{m} \rightarrow W_{nom}>d_{85}*4=154\mu\text{m}$ και $W_{nom}>d_{99}*2=131\mu\text{m}$)

Επομένως τα κριτήρια επαρκούς ρευστότητας συνοψίζονται ως εξής:

Κριτήριο I: Για το 1lt $\rightarrow t_{d=4,7\text{mm}} < 75\text{s}$

Κριτήριο II: Για τα πρώτα 500ml $\rightarrow t_{d=4,7\text{mm}} < 45\text{s}$

Κριτήριο III: Για τα πρώτα 100ml $\rightarrow F_l \geq 0.98 * 10^3 \text{ mm/s}$

Εν τέλει, το επιλεγμένο ποσοστό νερού, μπορεί να είναι μεγαλύτερο, υποβοηθώντας έτσι την πιο ομοιόμορφη και ισόποση κατανομή του ενέματος στις πιο μικρές ρωγμές, όμως με προσοχή διότι υπάρχει κίνδυνος να διακινδυνευτεί, όπως θα αναλυθεί και παρακάτω, η σταθερότητα του ενέματος.

4.3.5.2 Σταθερότητα ενεμάτων

Εξίδρωση

Μετά την παρασκευή του ενέματος, δείγμα του τοποθετείται σε δύο ογκομετρικούς σωλήνες των 100ml. Για την αποφυγή εξάτμισης ύδατος του ενέματος, ο σωλήνας σφραγίζεται με πλαστική μεμβράνη. Ανά 15min για την 1^η ώρα και ανά μισή ώρα για τη 2^η ώρα, λαμβάνονται μετρήσεις για την ποσότητα του ύδατος, που συγκεντρώνεται στο άνω τμήμα του σωλήνα και την ποσότητα της κονίας που δε βρίσκεται σε αιώρηση (ίζημα). Σταθερό θεωρείται ένα ένεμα όταν δεν παρουσιάζει τιμές εξίδρωσης μεγαλύτερες από 5%. Η

συγκεκριμένη δοκιμή πραγματοποιείται με βάση το πρότυπο NF P-18359 και [Miltiadou A., 2013, RILEM].

Πραγματοποιείται σχεδιασμός της καμπύλης Ποσοστού Εξίδρωσης (Bleeding %), συναρτήσει του λόγου W/S. Οι καμπύλες για τις διάφορες συνθέσεις προσφέρουν χρήσιμες πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά των ενεμάτων.



Εικόνα 33. Φωτογραφία ογκομετρικών κυλίνδρων 100ml που χρησιμοποιούνται στην μέτρηση της εξίδρωσης

4.3.6 Σύνθετα δοκίμια διεπιφανειών– Δοκιμή Διάτμηση [Adami Ch., 2011]

Για την μελέτη της συμπεριφοράς διεπιφανειών υποβάθρου ενεμάτων σε διάτμηση, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της άμεσης διάτμησης. Μέσω αυτών των δοκιμών, πρακτικώς διερευνάται η συνάφεια σε ένα μικρό τμήμα της πραγματικής διεπιφάνειας. Συνήθως χρησιμοποιούνται δοκίμια μέσης κλίμακας, πράγμα που ακολουθήθηκε και στην παρούσα εργασία, προκειμένου να μπορεί να υπάρξει άμεση σύγκριση με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Σύμφωνα με τις έρευνες που πραγματοποιήθηκαν από [Adami Ch., 2011], κατασκευάστηκαν σύνθετα δοκίμια αποτελούμενα από δύο τεμάχια υποβάθρου, τα οποία ήταν συνδεδεμένα μεταξύ τους με έναν αρμό ενέματος σταθερού πάχους αντίστοιχου με το εύρος ρωγμών. Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε πάχος ίσο με 3mm.

Στην Εικόνα 35 φαίνονται τα σύνθετα δοκίμια διεπιφανειών που κατασκευάστηκαν για να μετρηθεί η διατμητική τους αντοχή. Οι διαστάσεις που επιλέχθηκαν για τα δοκίμια των διεπιφανειών υποβάθρου-ενεμάτων ήταν $40 \times 40 \times 20 \text{mm}^3$ το κάθε τμήμα του υποβάθρου, και συνολικά $40 \times 40 \times 43 \text{mm}^3$ όλο το δοκίμιο.



Εικόνα 34. Προετοιμασία σύνθετων δοκιμίων διεπιφανειών υποβάθρου ενέματος για πλήρωσης του αρμού



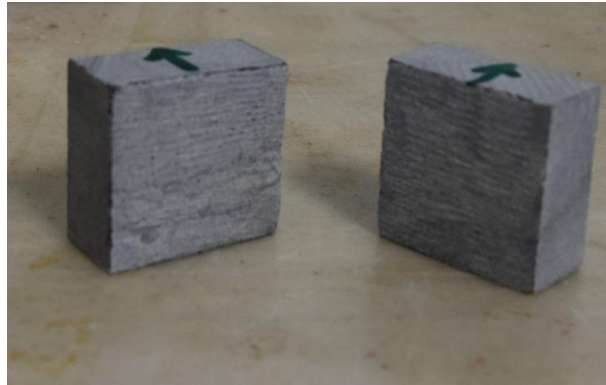
Εικόνα 35. Υλοποίηση του παραπάνω προτύπου καθώς και διατήρηση της ορθογωνικότητας και επιπεδότητας μέσω των δύσκαμπτων οδηγών εκατέρωθεν των σύνθετων δοκιμίων

4.3.6.1 Παρασκευή δοκιμίων

Ακολουθήθηκε η διαδικασία που αναπτύχθηκε από την [Adami Ch., 2011]. Στην παρούσα εργασία, για την κατασκευή των σύνθετων δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν τεμάχια λίθων Σπάρτης. Τα τεμάχια των λίθων κόπηκαν σε ορθογωνικά πρίσματα διαστάσεων $40 \times 40 \times 20 \text{mm}^3$. Επειδή στις δοκιμές διάτμησης υπεισέρχονται πολλές αβεβαιότητες σχετικά με την ευθυγραμμία του θλιπτικού φορτίου και της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή κατά την παρασκευή των δοκιμίων των διεπιφανειών, έτσι ώστε να απαλειφθούν όσο είναι δυνατόν εκκεντρότητες που θα μπορούσαν να οφείλονται στην γεωμετρία των σύνθετων δοκιμίων, όπως είναι η απουσία της επιπεδότητας και της ορθογωνικότητας των διατομών.

Για να προσομοιωθεί η τραχύτητα στις εσωτερικές στρώσεις των τριστηρωτων τοιχοποιιών, η επιφάνεια (το πρόσωπο) των δοκιμίων του υποβάθρου στο οποίο έγινε η έγχυση του ενέματος, τραχύνθηκε με μηχανικά μέσα. Έπειτα, για να διαμορφωθούν τα δοκίμια σε

κατάλληλη μορφή για την δοκιμή της διάτμησης, η επιφάνεια του υποβάθρου του λίθου καθαρίστηκε με πεπιεσμένο αέρα.

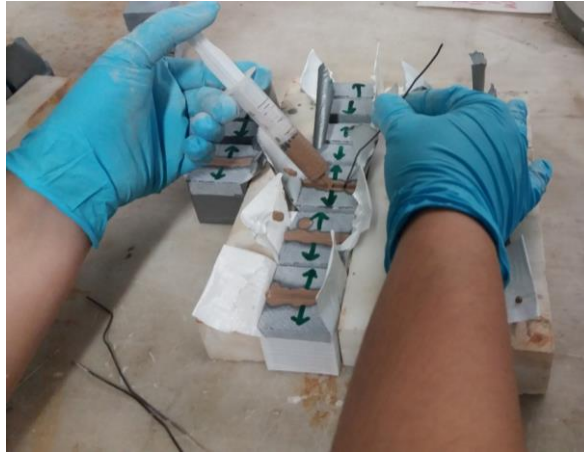


Εικόνα 36. Τράχυνση των τμημάτων των υποβάθρων στις διεπιφάνειες τους με το ένεμα



Εικόνα 37. Έγχυση του ενέματος με σύριγγα, καθώς και τρόπος με τον οποίο διατηρείται ο άδειος αρμός σε σταθερό πλάτος (καλούπι)

Καθ' όλη την διάρκεια της εισαγωγής ενέματος στον αρμό και της συντήρησης τα σύνθετα δοκίμια διατηρήθηκαν σε οριζόντια θέση, ενώ τοποθετήθηκαν εκατέρωθεν των δοκιμίων δύο άκαμπτα πρίσματα ως “οδηγοί”. Για την έγχυση του ενέματος στον αρμό του σύνθετου δοκιμίου, χρησιμοποιήθηκαν σύριγγες μίας χρήσης, χωρητικότητας 10 και 20 ml. Ιδιαίτερη μέριμνα ελήφθη για την αποφυγή εισαγωγής αέρα στον αρμό του ενέματος κατά την έγχυση. Για τον λόγο αυτό, η εφαρμογή του ενέματος με την σύριγγα πραγματοποιήθηκε αργά και σε δύο φάσεις: αρχικά εγχύθηκε η μισή ποσότητα του ενέματος, η οποία συμπυκνώθηκε με την βοήθεια μεταλλικού σύρματος. Ακολούθησε η έγχυση της υπόλοιπης ποσότητας του ενέματος με την ίδια διαδικασία.



Εικόνα 38. Φωτογραφία κατά την διάρκεια έγχυσης του ενέματος στον αρμό σε δύο στάδια

Ας σημειωθεί, ότι από ορισμένες δοκιμαστικές εγχύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα σύνθετα δοκίμια, διαπιστώθηκε ότι λόγω του σχετικώς υψηλού αρχικού ρυθμού υδατοαπορρόφησης, οι λίθοι απορροφούσαν μεγάλη ποσότητα ύδατος από το ένεμα, και γενικότερα λόγω αποβολής κάποιας ποσότητας του περιεχομένου του νερού, παρουσίασε συρρίκνωση στον αρμό. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την συσσωμάτωση των κονιών τοπικώς, και επομένως, την μη πλήρωση του αρμού του ενέματος γι' αυτά τα σύνθετα δοκίμια. Γι' αυτό σταδιακά, σε όποια δοκίμια παρατηρήθηκε καθίζηση του υλικού του ενέματος και μη πλήρωση του αρμού, έγινε πρόσθεση υλικού ενέματος μέχρι να διαπιστωθεί πλήρωση του αρμού.

Από όλες τις συνθέσεις που μελετήθηκαν, αυτές που επιλέχθηκαν να εφαρμοστούν στα σύνθετα δοκίμια ήταν τρεις σε αριθμό και αφορούν τις βέλτιστες από άποψη ρεολογικών και μηχανικών χαρακτηριστικών. Οι δύο από αυτές ήταν αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για ενεμάτωση στους τοιχίσκους (για λόγους πληρότητας της συγκεκριμένης μελέτης), και η τρίτη επιλέχθηκε με κριτήριο την ικανοποιητική ρευστότητα και σταθερότητα της. Οι συνθέσεις αναλυτικά είναι:

- I. NHL 5: 100 %, W/S=0,9
- II. NHL 5: 70 %, Πηλός: 30%, W/S=0,9
- III. NHL 5: 63 %, Πηλός: 30%, Ποζολάνη: 7%, W/S=0,875

Τέλος, τα σύνθετα δοκίμια συντηρήθηκαν, αρχικώς, σε συνθήκες περιβάλλοντος με την βοήθεια νωπής λινάτσας, μέχρι τις 28 ημέρες ωρίμανσης τους. Στην συνέχεια διατηρήθηκαν σε συνθήκες του Εργαστηρίου.

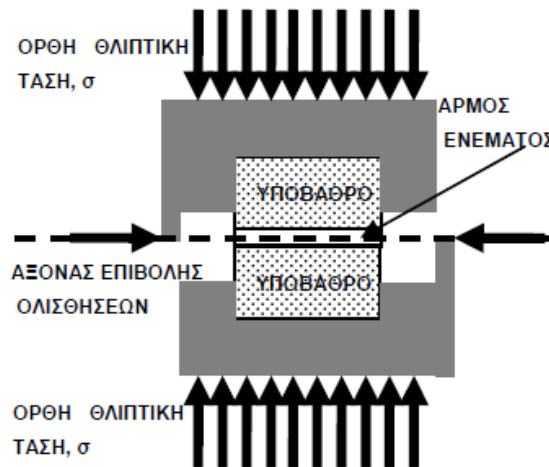
4.3.6.2 Περιγραφή δοκιμής

Προκειμένου να μετρηθεί η αντοχή συνάφειας διεπιφανειών ενεμάτων και υποβάθρων έναντι διάτμησης με την παρουσία θλιπτικού φορτίου, χρησιμοποιήθηκε μία διάταξη τύπου διατμητικού κιβωτίου, που είχε κατασκευαστεί στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής της [Adami Ch., 2011].



Εικόνα 39. Μηχανή στην οποία γίνεται η δοκιμή της διάτμησης των σύνθετων δοκιμίων διεπιφανειών (αριστερά) και δοκίμιο κατά την διάρκεια της δοκιμής της διάτμησης (δεξιά)

Στην Εικόνα 40 απεικονίζεται η λειτουργία της διάταξης που περιγράφηκε παραπάνω. Συνοψίζοντας όπως φαίνεται και στην εικόνα, επιβάλλονται οριζόντιες ολισθήσεις περί το μέσον του ύψους του δοκιμίου με μηδενική εκκεντρότητα. Ταυτόχροως, το δοκίμιο υποβάλλεται σε ορθή ένταση η οποία διατηρείται σταθερή καθ' όλη την διάρκεια της δοκιμής. Η αντίσταση ολίσθησης (τ), η οριζόντια ολίσθηση (s) και η εγκάρσια διόγκωση (w) καθ' όλη την διάρκεια της δοκιμής καταγράφονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.



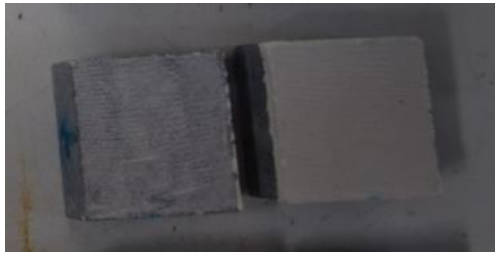
Εικόνα 40. Σχηματική απεικόνιση των φορτίσεων που επιβάλλονται στο σύνθετο δοκίμιο κατά την διάρκεια της δοκιμής [Adami Ch., 2011].

4.3.6.3 Τύποι αστοχίας σύνθετων δοκιμίων

Στις δοκιμές διάτμησης των σύνθετων δοκιμίων διεπιφανειών παρατηρήθηκαν 2 διαφορετικοί τύποι αστοχίας τους (σύμφωνα και με τα αποτελέσματα της [Adami Ch., 2011]), οι οποίοι είναι οι εξής:

- I. **Αστοχία στην διεπιφανειακή ζώνη ($\Delta.Z$):** Το ένεμα αποκολλάται από το ένα εκ των δύο υποβάθρων, και παραμένει ο αρμός προσκολλημένος στο άλλο τμήμα του

υποβάθρου. Συνεπώς, το επίπεδο αστοχίας, εμφανίζεται στην διεπιφανειακή ζώνη ενέματος–υποβάθρου [Adami Ch., 2011].



Εικόνα 41. Τυπική μορφή αστοχίας Δ.Z

- II. **Αστοχία και στις δύο διεπιφανειακές ζώνες (Z):** Είναι παρόμοιος τρόπος αστοχίας με τον παραπάνω, η μόνη διαφορά έγκειται στο ότι ο αρμός αποκολλάται από ένα τμήμα του ενός υποβάθρου και στην συνέχεια στο υπόλοιπό του τμήμα αποκολλάται από το άλλο υπόβαθρο. Επομένως, ένα τμήμα του αρμού του ενέματος παραμένει προσκολλημένο στο ένα υπόβαθρο και ο υπόλοιπος αρμός είναι προσκολλημένος στο άλλο υπόβαθρο, σχηματίζοντας έτσι ένα επίπεδο αστοχίας σχήματος “Z” [Adami Ch., 2011].



Εικόνα 42. Τυπική μορφή αστοχίας Z

4.4 Τοιχίσκοι

Στα πλαίσια της παρούσας έρευνας, κατασκευάστηκαν 6 λιθόκτιστοι τοιχίσκοι, 4 δίστρωτοι και 2 τρίστρωτοι, οι τρεις με συνδετικό πηλοκονίαμα και οι υπόλοιποι με πηλοασβεστοκονίαμα. Η κατασκευή των δοκιμίων των τοιχίσκων αποσκοπεί στην:

- I. μελέτη της συμπεριφοράς τους σε θλίψη,
- II. εξέταση του πως επηρεάζουν τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των δομικών υλικών τους το σύνολο της τοιχοποιίας,
- III. ομογενοποίηση της μάζας τους με ενέματα,
- IV. μελέτη της συμπεριφοράς τους μετά την εφαρμογή των ενεμάτων,
- V. εξέταση της αποτελεσματικότητας των ενεμάτων, ως προς τα χαρακτηριστικά της τοιχοποιίας, τα οποία έχουν σχεδιαστεί να ενισχύσουν.



Εικόνα 43. Φωτογραφίες τοιχίσκων (αριστερά με πηλοκονίαμα, δεξιά με πηλοασβεστοκονίαμα)

4.4.1 Κατασκευή τοιχίσκων

Οι τοιχίσκοι επιλέχθηκε να κατασκευαστούν με διαστάσεις μήκους: 1m και ύψους: 1,20m. Επιλέχθηκαν οι εν λόγω διαστάσεις, προκειμένου να είναι συγκρίσιμες με διαστάσεις τοιχίσκων που έχουν κατασκευαστεί για παρόμοιες έρευνες, καθώς και για να αποφευχθούν φαινόμενα κλίμακας. Τα πάχη των τοιχοποιιών επιλέχθηκε να είναι 0,30m για την δίστρωτη τοιχοποιία και 0,45m για την τρίστρωτη τοιχοποιία. Στην ουσία το κάθε στρώμα της τοιχοποιίας έχει σταθερό πάχος ίσο με 0,15m.

Όσον αφορά την κατασκευή τους, οι τοιχίσκοι κατασκευάστηκαν σε φάσεις, σε στρώσεις με ύψος των 30cm την ημέρα, προκειμένου να αποφευχθεί η κατάπτωση τους. Ο φόβος της κατάπτωσης προέκυψε κυρίως λόγω της πλαστικότητας του νωπού κονιάματος, το οποίο μέχρι την σκλήρυνση του δεν είχε καμία δυνατότητα συγκράτησης των λίθων.



Εικόνα 44. Φωτογραφίες από την κατασκευή σε στάδια των δίστρωτων τοιχίσκων



Εικόνα 45. Φωτογραφίες από την κατασκευή σε στάδια των τρίστρωτων τοιχίσκων

Συγκεκριμένα, για τις τρίστρωτες τοιχοποιίες η ενδιάμεση στρώση τους αποτελούταν από θραύσματα λίθων μικρού προς μεσαίου μεγέθους, οι οποίοι ήταν αναμεμιγμένοι με πηλοκονίαμα. Δεν αποτελεί στρώση ίδιου τύπου με τις δύο εξωτερικές, αλλά αποτελεί γέμισμα. Κατά την κατασκευή των τοιχίσκων (δίστρωτων και τρίστρωτων) δεν επιδιώχθηκε κανενός τύπου σύνδεση των στρώσεων μεταξύ τους, π.χ. με την παρουσία διάτονων λίθων, προκειμένου να μην εισαχθεί κι άλλη παράμετρος στο θέμα της εξέτασης των ιδιοτήτων των τοιχίσκων και, αργότερα, των ενεμάτων.

Η κατασκευή των 6 τοιχίσκων διήρκησε περίπου μία εβδομάδα. Συντηρήθηκαν σε κλειστό χώρο, στο εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος. Καλύφθηκαν με την χρήση υγρών λινάτσων, έτσι ώστε να μειωθεί η εμφάνιση μικρορηγματώσεων λόγω συστολής ξήρανσης. Ο χρόνος ωρίμανσης τους, μέχρι την δοκιμή τους σε θλίψη ήταν περίπου τρεις μήνες.

4.4.2 Υλικά δομικών μονάδων τοιχίσκων

Οι λίθοι που χρησιμοποιήθηκαν ως δομικές μονάδες για την τοιχοποιία, ήταν από λατομείο στην Σπάρτη. Η θλιπτική αντοχή του μετρήθηκε περί τα 70MPa. Η διαμόρφωση τους έγινε από το συνεργείο, που ανέλαβε το χτίσιμο των τοιχίσκων.

Πίνακας 2. Συγκεντρωτικός πίνακας θλιπτικής αντοχής κυβικών δοκιμίων των λίθων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των τοιχίσκων

| Όνομασία | Βάρος (gr) | Διάσταση 1 (cm) | Διάσταση 2 (cm) | A (cm ²) | ρ (kg/m ³) | F (kN) | σ (kN/cm ²) | σ (Mpa) |
|--------------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------------|-----------------------------|--------|--------------------------------|----------------|
| I | - | 6,60 | 6,48 | 42,77 | - | 214,20 | 5,008 | 50,08 |
| II | 673,9 | 6,33 | 6,30 | 39,88 | 2669,60795 | 294,20 | 7,377 | 73,77 |
| III | 546,93 | 5,77 | 5,92 | 34,16 | 2774,970769 | 269,90 | 7,901 | 79,01 |
| IV | 405,34 | 5,44 | 5,30 | 28,83 | 2584,317058 | 175,20 | 6,077 | 60,77 |
| V | 749,38 | 6,74 | 6,46 | 43,54 | 2553,581875 | 408,40 | 9,380 | 93,80 |
| VI | 628,21 | 6,16 | 6,17 | 38,01 | 2683,2322 | 230,30 | 6,059 | 60,59 |
| Μέσες τιμές | 600,752 | | | | 2653,14197 | | | 69,67 |



Εικόνα 46. Οι λίθοι που χρησιμοποιήθηκαν στους τοιχίσκους στην μηχανή θλίψης και μετά την δοκιμή τους

4.4.3 Δοκιμή θλίψης

Προκειμένου να εξεταστούν τα δοκίμια των τοιχίσκων σε θλίψη, μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας.

Η διάταξη περιλαμβάνει υδραυλική αντλία (μέγιστου φορτίου 6000kN), που ασκεί θλιπτικά φορτία. Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί χειροκίνητη διάταξη, προκειμένου να είναι ελεγχόμενη η άσκηση του φορτίου. Η υδραυλική αντλία στηρίζεται σε ένα μεταλλικό πλαίσιο, μέσω του οποίου το θλιπτικό φορτίο ασκείται από μία μεταλλική δοκό στο δοκίμιο του τοιχίσκου. Το δοκίμιο είναι τοποθετημένο πάνω σε μία πλάκα από σκυρόδεμα που εξασφαλίζει την οριζοντιότητα και κατακορυφότητα του δοκιμίου. Η χρησιμότητα της μεταλλικής δοκού έγκειται στο ότι μετατρέπει το σημειακό φορτίο σε ομοιόμορφο, κατά μήκους του δοκιμίου του τοιχίσκου.



Εικόνα 47. Φωτογραφία διάταξης που αποτιμά την θλιπτική αντοχή των τοιχίσκων

Οι μετακινήσεις των τοιχίσκων μετρώνται μέσω βελομέτρων (LVDT's). Συγκεκριμένα τοποθετήθηκαν 3 μετρητές σε κάθε όψη του τοιχίσκου. Στις δύο επιμήκειες όψεις τοποθετήθηκαν δύο κατακόρυφοι μετρητές και ένας οριζόντιος περί το μέσον του ύψους του τοιχίσκου, ενώ στις δύο εγκάρσιες όψεις τοποθετήθηκαν 3 οριζόντιοι μετρητές. Οι οριζόντιοι μετρητές των επιμηκών όψεων του τοίχου μετρούν το άνοιγμα των κατακόρυφων ρωγμών, ενώ οι κατακόρυφοι μετρητές την συμπίεση της τοιχοποιίας. Οι οριζόντιοι μετρητές που τοποθετήθηκαν στις εγκάρσιες όψεις των τοιχίσκων μετρούν το πόσο διαχωρίστηκαν κατά την εγκάρσια έννοια τα στρώματα των τοιχίσκων, πράγμα πολύ σημαντικό αφού όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ένας από τους βασικότερους τρόπους με τους οποίους αστοχούν οι δίστρωτες και τρίστρωτες λιθοδομές, αφορά τον διαχωρισμό των φύλλων τους. Οι θέσεις των μετρητών δεν ήταν πάντα σταθερές λόγω της ανομοιομορφίας των τοιχίσκων μεταξύ τους, τόσο ως προς το σχήμα και μέγεθος των λίθων όσο και ως προς την θέση και μέγεθος των αρμών του κονιάματος.



Εικόνα 48. Θέσεις οργάνων στην μπροστινή και στην πλάγια όψη των τοιχίσκων

Σε πρώτη φάση, μετά την κατασκευή τους οι τοιχίσκοι, αφού συντηρήθηκαν για τρεις μήνες, δοκιμάστηκαν σε θλίψη φτάνοντας στην φέρουσα ικανότητα τους, χωρίς όμως να προκληθεί η κατάρρευση τους. Στην συνέχεια, ακολούθησε η αποφόρτιση τους, η αφαίρεση τους από το μεταλλικό πλαίσιο της δοκιμής κι η μεταφορά τους στο σημείο στο οποίο θα πραγματοποιούταν η ομογενοποίηση της μάζας τους με ενέματα. Μετά το απαιτούμενο διάστημα συντήρησης των τοιχίσκων με τα ενέματα, ξαναδοκιμάστηκαν ξανά σε θλίψη, κι αυτή την φορά επιδιώχθηκε να φτάσει η δοκιμή σχεδόν μέχρι την κατάρρευση, όχι όμως στην πλήρη διάλυση για λόγους ασφαλείας τόσο όσων παρακολουθούσαν το πείραμα όσο και των οργάνων μέτρησης των μετακινήσεων.

4.5 Ομογενοποίηση με ενέματα

4.5.1 Εξοπλισμός

Η ανάδευση των συνθέσεων των ενεμάτων πραγματοποιήθηκε σε συσκευή ανάδευσης υπερήχων με ταυτόχρονη μηχανική ανάδευση. Μετά την ανάδευση, το ένεμα μέσω πλαστικών διάφανων σωλήνων διοχετεύτηκε σε αεροστεγές διάφανο κύλινδρο από Plexiglass, προκειμένου να είναι δυνατή η καταγραφή της ποσότητας ενέματος που εφαρμόζεται στην μάζα της τοιχοποιίας. Μέσα από τον σωλήνα που βρίσκεται στον πυθμένα του συγκεκριμένου κυλίνδρου γίνεται η μεταφορά του ενέματος στην τοιχοποιία μέσω των διάφορων σωληνίσκων που είναι εγκατεστημένοι σε αυτήν σε διάφορες θέσεις. Η πίεση με την οποία εισχωρεί το ένεμα στην τοιχοποιία ελέγχεται με μανόμετρο.

4.5.2 Προετοιμασία τοιχίσκων

Η ενεμάτωση των τοιχίσκων είχε σχεδιαστεί να πραγματοποιηθεί σε τρεις φάσεις, δηλαδή σε ένα στρώμα καθ' ύψος του τοιχίσκου των 40cm την ημέρα. Αυτό έγινε προκειμένου να μην υπάρξει κατάρρευση του τοιχίσκου λόγω ρευστοποίησης του κονιάματος, μιας και το πηλοκονίαμα μετά την επαφή του με το νερό, επαναφέρεται στην αρχική του ρευστή κι εύπλαστη κατάσταση.

Η διαδικασία της εφαρμογής των ενεμάτων στους τοιχίσκους πραγματοποιήθηκε από εξειδικευμένο συνεργείο πάνω στην χρήση των ενεμάτων σε ιστορικές κατασκευές. Σε κάθε τοιχίσκο, προκειμένου να διεισδύσουν τα ενέματα στην μάζα του πραγματοποιήθηκαν οπές. Οι θέσεις των οπών καθορίστηκαν από χάραξη κορυφών ιδεατού καννάβου πλευράς 0,30-0,45m κι όχι μεγαλύτερος από το πάχος της τοιχοποιίας. Οι κορυφές του εσωτερικού και εξωτερικού καννάβου δεν πρέπει να ταυτίζονται, αλλά διατάχθηκαν έτσι ώστε να έχουν διαφορά βήματος κατά μισό κάρναβο οριζόντια και κατακόρυφα. Επίσης, διανοίχθηκαν οπές και στις θέσεις των ρωγμών που δημιουργήθηκαν κατά την διάρκεια της 1^{ης} φόρτισης.

Πριν από την εφαρμογή των ενεμάτων και μετά την πρώτη τους δοκιμή σε θλίψη, λόγω του μεγάλου ποσοστού κενών στην τοιχοποιία, καθώς επίσης και ρηγματώσεων, τόσο λόγω συστολής ξήρανσης όσο και λόγω της δοκιμής της σε θλίψη, επιλέχθηκε να αρμολογηθούν τμήματα της τοιχοποιίας. Το αρμολόγημα δεν είχε ως σκοπό την μηχανική ενδυνάμωση της

τοιχοποιίας, αλλά κυρίως να την στεγανοποιήσει, προκειμένου να μην υπάρχει διαρροή υλικού ενεμάτων.

Στην συνέχεια ακολούθησε η τοποθέτηση των διάφανων σωληνίσκων εισόδου του ενέματος στις οπές. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η διάμετρος των σωληνίσκων που επιλέχθηκαν είναι 8mm. Οι σωληνίσκοι τοποθετήθηκαν στις θέσεις των αρμών. Συγκεκριμένα, αφαιρέθηκε το σαθρό κονίαμα γύρω από την οπή του σωληνίσκου και μετά σφραγίστηκε με αρμολόγημα. Για τους δίστρωτους τοιχίσκους επιλέχθηκε να μπουν όλοι οι σωληνίσκοι στο 1/2 του πάχους τους, για την ενίσχυση του δεσμού των στρώσεων της. Στις τρίστρωτες, τα σωληνάκια επιλέχθηκε να τοποθετηθούν στο 1/3 του πάχους της, δίνοντας έμφαση στην ενδυνάμωση της ενδιάμεσης στρώσης της, καθώς και των δεσμών των επιμέρους στρωμάτων της, κι όχι τόσο στην επιφανειακή ενδυνάμωση των εξωτερικών φύλλων.

Ακολούθησε η αρίθμηση των σωληνίσκων με αύξοντα αριθμό που αντιστοιχεί στην εξέλιξη της διαδικασίας εισπίεσης/εξόδου του ενέματος στις διάφορες θέσεις. Μετά την εξαγωγή του ενέματος από το κάθε σωληνάκι πραγματοποιούνταν σφράγιση και στερεοποίηση του. Η εφαρμογή των ενεμάτων έγινε από κάτω προς τα πάνω. Κατά την διάρκεια εφαρμογής των ενεμάτων, καταγράφηκαν διάφορα σημαντικά στοιχεία για κάθε τοιχίσκο όπως είναι:

- I. ο αριθμός του σωληνίσκου, από τον οποίο εξήλθε ένεμα,
- II. η εξέλιξη κατανάλωσης ενέματος ανά σωληνίσκο,
- III. ο όγκος ενέματος που εφαρμόστηκε από κάθε σωληνάκι εισόδου,
- IV. σημαντικές αλλαγές στην πίεση εισόδου,

Επιδιώχθηκε η εισχώρηση των ενεμάτων στους τοιχίσκους με μικρή πίεση (0,5-1bar) για την αποφυγή τυχούσας κατάρρευσης των τοιχίσκων, λόγω της εισαγωγής των ενεμάτων υπό μεγάλη πίεση στην μάζα τους.



Εικόνα 49. Φωτογραφίες του εξοπλισμού ανάδευσης με υπερήχους κι εφαρμογής των ενεμάτων στους τοιχίσκους

Επιλέχθηκαν δύο συνθέσεις ενεμάτων που πληρούν τα κριτήρια ρευστότητας, σταθερότητας και διεισδυτικότητας καθώς και μηχανικών και φυσικών χαρακτηριστικών. Η μία σύνθεση αφορά σε σύνθεση αναφοράς που έχει χρησιμοποιηθεί σε ενισχύσεις τοιχοποιιών με συνδετικό ασβεστοκονίαμα. Αφορά την σύνθεση NHL 5: 100% W/S=0.90, που έχει χρησιμοποιηθεί από [Miltiadiou A., 2013], [Adami Ch., 2011] κ.α. και χρησιμοποιήθηκε για λόγους σύγκρισης. Η δεύτερη σύνθεση αφορά την χρήση σύνθεσης με το μεγαλύτερο ποσοστό πηλού. Αυτό που επιδιώχθηκε να εξεταστεί στην προκειμένη φάση ήταν αν θα μπορούσε να αντικατασταθεί σημαντικό ποσοστό της υδραυλικής ασβέστου, που αποτελεί ένα ακριβό βιομηχανικό υλικό, με ένα φυσικό φτηνό υλικό που έχει απόλυτα φυσικοχημική συμβατότητα με το ήδη υφιστάμενο των πηλοκονιαμάτων. Η σύνθεση ενέματος που επιλέχθηκε ήταν η NHL 5: 70%-Πηλός: 30% W/S=0.90. Έτσι, θα συγκριθεί η αποτελεσματικότητα των δύο διαφορετικών συνθέσεων ενεμάτων πάνω στην ίδια τοιχοποιία, με το ίδιο πηλοκονίαμα. Θα πρέπει να τονιστεί, ότι για να μην ληφθούν υπόψη πολλοί παράμετροι και δεν είναι ξεκάθαρη η επιρροή τους πάνω στα μηχανικά χαρακτηριστικά της τοιχοποιίας, αλλά και στην αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης επιδιώχθηκε οι συνθέσεις που θα χρησιμοποιηθούν να έχουν τον ίδιο λόγο νερού προς στερεά (W/S=0,9).

Στο παρακάτω πίνακα φαίνεται η κωδική ονομασία των τοιχίσκων, με τον τύπο τους, το κονίαμα που διαθέτουν καθώς και την επιλεγμένη σύνθεση ενέματος που εν τέλει τοποθετήθηκε:

Πίνακας 3. Συγκεντρωτικός πίνακας κωδικών ονομασιών τοιχίσκων, με τον τύπο δόμησης τους, το συνδετικό τύπο πηλοκονιάματος που αποτελούνται και η επιλεγμένη σύνθεση ενέματος που τους αντιστοιχεί

| <i>Τοιχίσκος</i> | <i>Τύπος</i> | <i>Κονίαμα</i> | <i>Ένεμα</i> |
|------------------|--------------|--------------------|---------------------------|
| <i>ΤΑΠ1</i> | Τρίστρωτος | Πηλοασβεστοκονίαμα | NHL5:100% W/S=0,9 |
| <i>Π1</i> | Δίστρωτος | Πηλοκονίαμα | NHL5:100% W/S=0,9 |
| <i>ΑΠ1</i> | Δίστρωτος | Πηλοασβεστοκονίαμα | NHL5:100% W/S=0,9 |
| <i>ΑΠ2</i> | Τρίστρωτος | Πηλοκονίαμα | NHL5:70% Clay:30% W/S=0,9 |
| <i>Π2</i> | Δίστρωτος | Πηλοκονίαμα | NHL5:70% Clay:30% W/S=0,9 |
| <i>ΑΠ3</i> | Δίστρωτος | Πηλοασβεστοκονίαμα | NHL5:70% Clay:30% W/S=0,9 |

Κάτι που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι στους τοιχίσκους, στους οποίους επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η σύνθεση NHL 5: 70%-Clay: 30%-W/S= 0,90, παρατηρήθηκε διαρροή ενέματος. Συγκεκριμένα, στον τοιχίσκο ΑΠ2 στην εφαρμογή της δεύτερης στρώσης ενέματος, παρατηρήθηκε διόγκωση κατά το μέσον του ύψους του και εν τέλει θραύση τμήματος του. Επομένως, μετά την εφαρμογή της δεύτερης στρώσης των ενεμάτων, αποφασίστηκε να διακοπεί η ενεμάτωση των τοιχίσκων με την εν λόγω σύνθεση ενέματος και να συνεχιστεί μετά την πάροδο 28 ημερών, προκειμένου να αποφευχθούν τυχούσες καταρρεύσεις, και απώλεια υλικού. Με την ίδια λογική, εφόσον παρατηρήθηκε ότι η σύνθεση με τον πηλό, άργησε να σκληρυνθεί σε σχέση με αυτή της αμιγώς υδραυλικής ασβέστου, αποφασίστηκε να συντηρηθούν οι τοιχίσκοι μετά την εφαρμογή της εν λόγω σύνθεσης για τρεις μήνες έναντι των 28 ημερών που εφαρμόστηκε στην περίπτωση της σύνθεσης NHL 5: 100%.

5. Αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει ερμηνεία των πειραματικών αποτελεσμάτων, που πραγματοποιήθηκαν σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Όπου κρίνεται σκόπιμο θα παρατεθούν διαγράμματα, που θα απεικονίζουν τις τιμές των πειραμάτων και μέσω αυτών θα εξαχθούν συμπεράσματα για τα χαρακτηριστικά των υπό μελέτη δοκιμίων. Αυτά τα συμπεράσματα θα κρίνουν την καταλληλότητα μιας σύνθεσης ενέματος, θα απορρίψουν ή θα επιβεβαιώσουν μία υπόθεση που είχε γίνει σε θεωρητικό επίπεδο ή θα θέσουν νέες βάσεις για περαιτέρω μελέτη.

Για τα κονιάματα θα γίνει παράθεση διαγραμμάτων και ερμηνεία των αποτελεσμάτων σύμφωνα με την εν χρόνω μεταβολή των παρακάτω μεγεθών:

- I. καμπτικής και θλιπτικής αντοχής
- I. συστολής ξήρανσης,
- II. μάζας και πυκνότητας.

Για τα ενέματα θα γίνει παράθεση διαγραμμάτων και ερμηνεία των αποτελεσμάτων σύμφωνα με τον διαφορετικό λόγο W/S και την εν χρόνω μεταβολή των παρακάτω μεγεθών:

- I. ρευστότητας και σταθερότητας,
- II. καμπτικής και θλιπτικής αντοχής,
- III. συστολής ξήρανσης,
- IV. μάζας και πυκνότητας.

Στους τοιχίσκους θα παρατεθούν τα εξής αποτελέσματα:

- I. Φορτίο θραύσης,
- II. Παθολογία πριν και μετά την εφαρμογή των ενεμάτων,
- III. Ποσότητα ενέματος που χρησιμοποιήθηκε για την ενεμάτωση των τοιχίσκων,
- IV. Φωτογραφίες που αποτιμούν την διεισδυτική ικανότητα των ενεμάτων σε δίστρωτες και τρίστρωτες τοιχοποιίες με συνδετικό πηλοκονίαμα και πηλοασβεστοκονίαμα

5.1 Κονιάματα

5.1.1 Μηχανικά χαρακτηριστικά

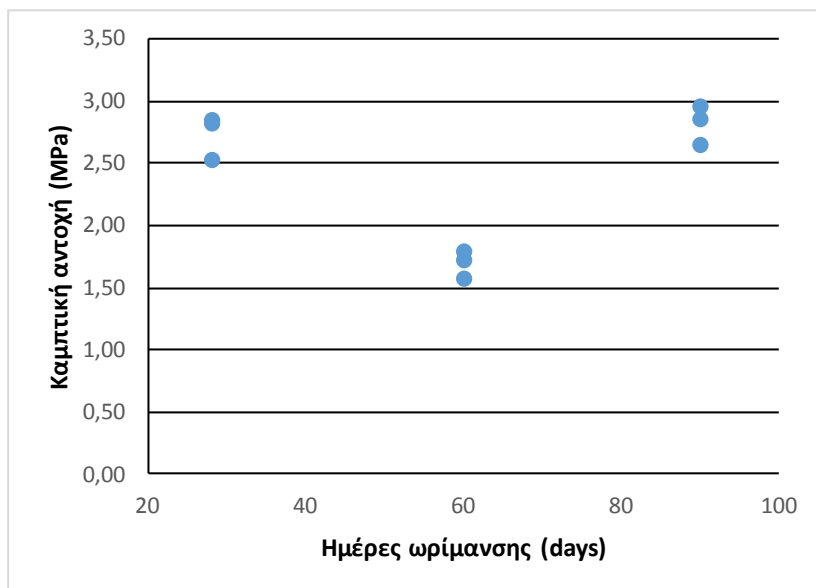
5.1.1.1 Πηλοκονίαμα

5.1.1.1.1 Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Τρόπος Θραύσης



Εικόνα 50. Τυπική μορφή καμπτικής αστοχίας δοκιμίων πηλοκονιαμάτων (πάνω) και πηλοασβεστοκονιαμάτων (μεσαίο)



Εικόνα 51. Διάγραμμα καμπτικής αντοχής συναρτήσει του χρόνου ωρίμανσης για τα πρίσματα πηλοκονιάματος

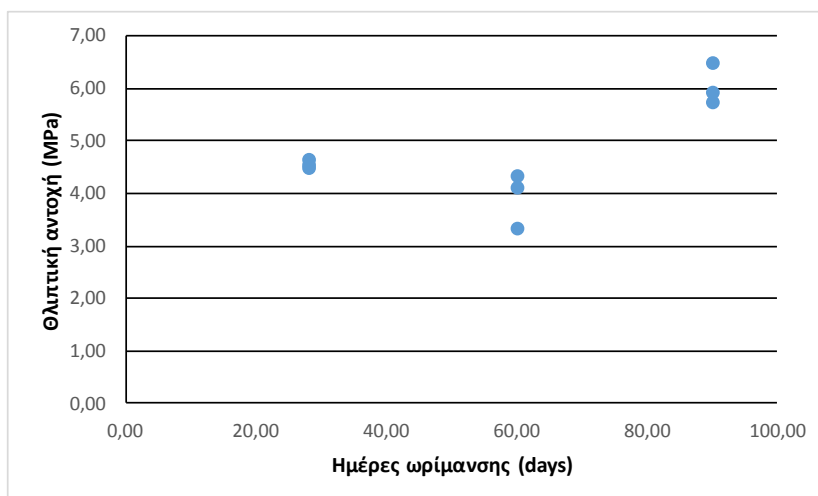
Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, που απεικονίζει την εν χρόνω μεταβολή της καμπτικής αντοχής, στην σύνθεση του πηλοκονιάματος, για τις 28 και τις 90 ημέρες η καμπτική αντοχή του πρίσματος παρέμεινε πρακτικά σταθερή (μέση τιμή 2,78MPa), με ελαφριά ποσοστιαία αύξηση της τάξης του 3,30%, στις 90 ημέρες. Η σταθερότητα της αντοχής για αυτό το χρονικό διάστημα πιθανόν να ευθύνεται στις μικρορηγματώσεις που δημιουργήθηκαν εξαιτίας της συστολής ξήρανσης. Με τις μικρορηγματώσεις, αυτό που συμβαίνει είναι ότι πλέον το κονίαμα παύει να είναι συνεχές μέσο, αποτελώντας πλέον μία λιγότερο πυκνή δομή. Επίσης, η καμπτική αντοχή επηρεάζεται σημαντικά από τις συνθήκες συντήρησης των δοκιμίων. Η πτώση που σημειώθηκε στις 60 ημέρες ωρίμανσης του πρίσματος, είναι μη αναμενόμενη και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

Θλιπτική αντοχή

Τρόπος Θραύσης



Εικόνα 52. Τυπική μορφή θλιπτικής αστοχίας δοκιμίων πηλοκονιάματος (πάνω) πηλοασβεστοκονιάματος (κάτω)



Εικόνα 53. Διάγραμμα θλιπτικής αντοχής συναρτήσεως του χρόνου ωρίμανσης των δοκιμίων των πηλοκονιαμάτων

Όσον αφορά των θλιπτική αντοχή των πηλοκονιαμάτων, υπάρχει μια πιο ξεκάθαρη ανοδική πορεία της τιμής της, από τις 28 στις 90 ημέρες, η οποία εκφράζεται ως ποσοστιαία αύξηση της τάξης του 30%. Είναι μια λιγότερο ευαίσθητη ιδιότητα, η οποία όμως κι αυτή επηρεάζεται από την μικρορηγματώση που έχει προκληθεί στην μικροδομή του πρίσματος, λόγω της συστολής ξήρανσης που έλαβε χώρα εξαιτίας των συνθηκών συντήρησης. Ωστόσο, το ότι επιλέχθηκαν αυτές οι συνθήκες συντήρησης αποτελεί μια συνειδητή απόφαση, μιας και ήταν επιθυμητό να βρεθεί η πραγματική συμπεριφορά του εν λόγω κονιάματος σε πραγματικές συνθήκες κατασκευών. Έτσι, επιδιώχθηκε να μην εφαρμοστούν συνθήκες συντήρησης οι οποίες δεν θα συναντηθούν ποτέ, προκύπτοντας από αυτήν την έρευνα πλασματικά συμπεράσματα. Και στην θλιπτική αντοχή παρατηρείται μείωση της τιμής της στις 60 ημέρες ωρίμανσης, πράγμα που προκλήθηκε από τα υψηλά ποσοστά συστολής ξήρανσης. Συγκεκριμένα με μικρή διαφορά, βέβαια, είχε το μεγαλύτερο ποσοστό από τις δύο άλλες μετρήσεις.

5.1.1.1.2 Σύγκριση με βιβλιογραφία

Θα γίνει σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας με παρόμοιες (όχι ίδιες συνθέσεις) πηλοκονιαμάτων, που έχουν συναντηθεί στην βιβλιογραφία. Η [Μπέη Γ., 2004] είχε υπολογίσει καμπτική αντοχή στις 90 ημέρες για την σύνθεση πηλοκονιάματος K3 (Πηλός: 80%- Άμμος: 20% και λόγο W/S: 0,253 μικρότερος από αυτόν που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα έρευνα) περί τα 1,32MPa. Εφόσον, είχε μικρότερο λόγο W/S θα έπρεπε να εμφανίζει ελαφρώς μεγαλύτερη αντοχή, ωστόσο εδώ παρατηρείται ποσοστιαία αύξηση στην παρούσα έρευνα σε σχέση με [Μπέη Γ., 2004] 114,40%. Συμπεραίνεται ότι τα υλικά (πηλός, φυσικά αδρανή, κονίες) που έχουν χρησιμοποιηθεί στα πηλοκονιάματα, παίζουν σημαντικό στα μηχανικά τους χαρακτηριστικά, καθώς λόγω της φυσικής τους προέλευσης διαθέτουν ποικιλία χημικών κι ορυκτολογικών ιδιοτήτων. Επιπροσθέτως, οι συνθήκες συντήρησης είναι κάτι το οποίο επηρεάζει πολύ αυτού του τύπου τις ιδιότητες, κάτι το οποίο φαίνεται και από την σύγκριση των αποτελεσμάτων των διάφορων ερευνών.

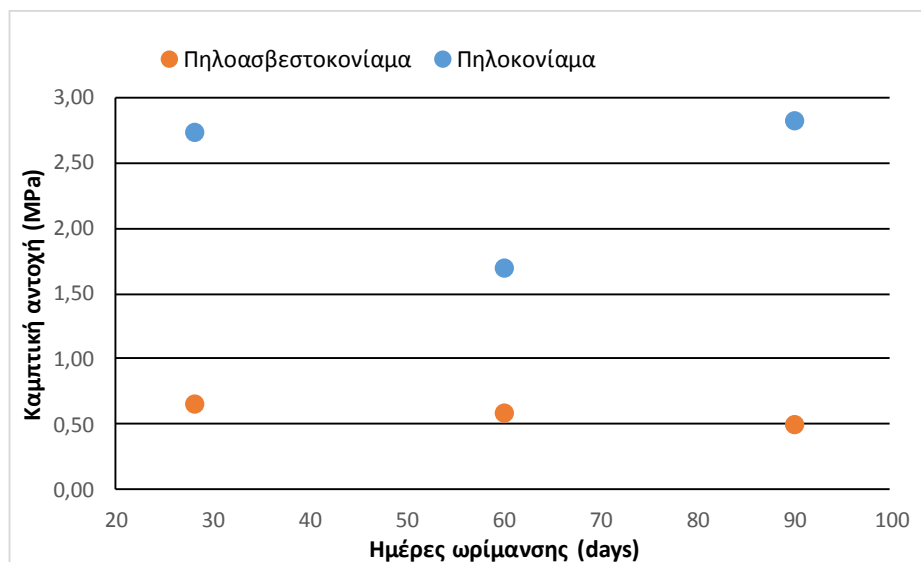
Για την θλιπτική αντοχή για λόγους σύγκρισης και περαιτέρω διερεύνησης αναφέρεται ενδεικτικά ότι η [Μπέη Γ., 2004] στην παρόμοια σύνθεση της (K3) είχε υπολογίσει στις 90 ημέρες 2,81MPa με ποσοστιαία αύξηση στα μετρηθέντα στην παρούσα έρευνα 110,70%. Παρατηρείται ότι η ποσοστιαία αύξηση τόσο της καμπτικής όσο και της θλιπτικής αντοχής σε σχέση με τις μετρήσεις της [Μπέη Γ., 2004] είναι περίπου οι ίδιες. Επομένως, αυτό που συμπεραίνεται ξανά είναι ότι παίζουν σημαντικό ρόλο τα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί, καθώς λόγω του ότι είναι φυσικά ακατέργαστα υλικά (πηλός, άμμος, χαλίκι κ.ο.κ.) είναι αδύνατη η τυποποίηση των ιδιοτήτων τους. Επιπροσθέτως, η συμφωνία στην ποσοστιαία μεταβολή και των δύο αυτών μηχανικών ιδιοτήτων ίσως έγκειται στις συνθήκες συντήρησης, οι οποίες επηρεάζουν πολύ αυτού του τύπου τις ιδιότητες. Παρόλο που η [Μπέη Γ., 2004] είχε ακολουθήσει τις προδιαγεγραμμένες συνθήκες συντήρησης (RH=95±5% και θερμοκρασία 20±2°C) δεν φάνηκε να είναι ο καθοριστικός παράγοντας για την βελτίωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων, πράγμα που αντικατοπτρίζεται στις μειωμένες τους τιμές σε σχέση με αυτές που προέκυψαν στην παρούσα εργασία.

5.1.1.2 Πηλοασβεστοκονίαμα

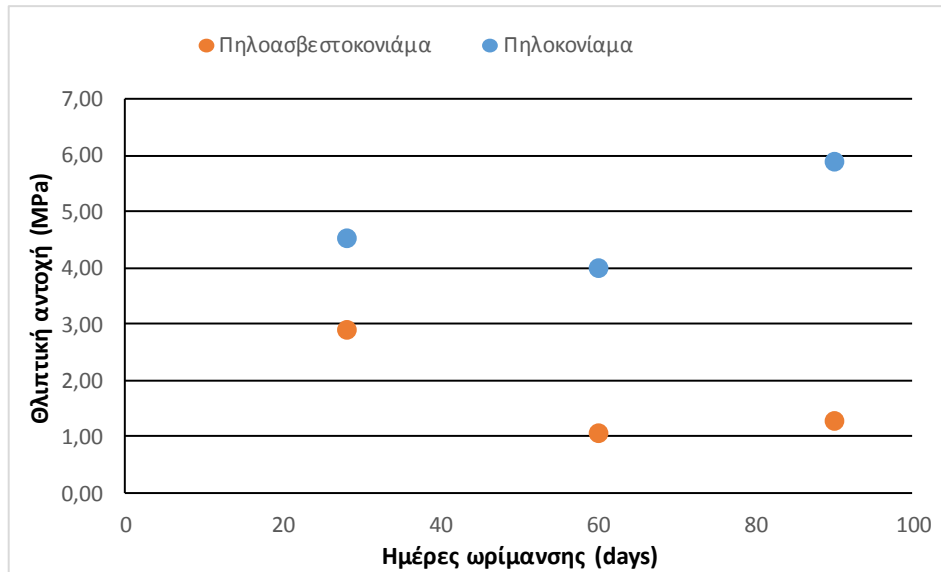
5.1.1.2.1 Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Καμπτική αντοχή

Για τα πηλοασβεστοκονιάματα, είχαν γίνει διαφορετικές υποθέσεις στην αρχή σύμφωνα με αυτά που είχαν βρεθεί στην βιβλιογραφία, αλλά κυρίως και από εμπειρικό επίπεδο. Με την αντικατάσταση 5% πηλού με ασβέστη (σε μορφή πάστας), αυτό που αναμενόταν ήταν σημαντική αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων και ιδιαίτερα της θλιπτικής αντοχής. Συγκεκριμένα στην βιβλιογραφία [Earthen Constructions, 1989] η προσθήκη ασβέστη σε ποσοστό 5-10% θα μπορούσε να αποφέρει τιμές θλιπτικής αντοχής έως 2-5MPa. Για την καμπτική αντοχή δεν υπάρχουν αντίστοιχα δεδομένα. Ωστόσο δεν παρατηρήθηκε κανενός είδους αύξηση, αλλά αντίθετα μειώθηκε η αντοχή περίπου στο μισό, σε σχέση με το μη σταθεροποιημένο πηλοκονίαμα. Ο ασβέστης είναι ένα υλικό το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο επίπεδο στην σταθεροποίηση του εδάφους τόσο σε γεωτεχνικό όσο και οικοδομικό επίπεδο. Όμως, κάτι που πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη είναι τα ορυκτά του πηλού και το είδος της ασβέστου που χρησιμοποιείται για την σταθεροποίηση του (π.χ. υδράσβεστος, ασβέστης σε πάστα, quicklime κ.α.). Συγκεκριμένα η προσθήκη ασβέστη δεν αποφέρει δραστική διαφορά στα καολινιτικά εδάφη αλλά μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στα αργιλώδη εδάφη που περιέχουν μοντμοριλλόνιτη. Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκε πηλός που περιείχε καολινίτη, επομένως σε αυτό μπορεί να οφείλεται η μη αποδοτική χρήση του ασβέστη στην μηχανική ενίσχυση του πηλοκονιάματος. Παρατίθενται παρακάτω τα συγκριτικά διαγράμματα της καμπτικής και θλιπτικής αντοχής των πηλοκονιαμάτων και πηλοασβεστοκονιαμάτων:



Εικόνα 54. Συγκριτικό διάγραμμα μέσης καμπτικής αντοχής συναρτήσει του χρόνου ωρίμανσης πρισμάτων πηλοκονιάματος και πηλοασβεστοκονιάματος



Εικόνα 55. Συγκριτικό διάγραμμα μέσης θλιπτικής αντοχής συναρτήσει του χρόνου ωρίμανσης πρισμάτων πηλοκονιάματος και πηλοασβεστοκονιάματος

Στις 90 ημέρες, όπου θεωρείται τυπικά ότι είναι η τελική αντοχή των πρισματικών δοκιμίων, η καμπτική αντοχή ανάμεσα στο πηλοκονίαμα και πηλοασβεστοκονίαμα σημειώνει ποσοστιαία μείωση περί το 83%, ενώ η θλιπτική αντοχή 78%. Για το πηλοασβεστοκονίαμα αυτό που θα μπορούσε να σημειωθεί είναι ότι η καμπτική αντοχή παρέμεινε κατά προσέγγιση σταθερή με την αρχική της τιμή των 28 ημερών, ενώ η θλιπτική αντοχή μειώθηκε με τον χρόνο κατά 56%, ενώ στην περίπτωση των πηλοκονιαμάτων αυξήθηκε κατά 30%. Η μείωση που σημειώνεται εν χρόνω στα μηχανικά χαρακτηριστικά του πηλοασβεστοκονιάματος οφείλεται στις μικρορηγματώσεις που προκαλούνται από τις διαφορές που σημειώνονται ανάμεσα στα τμήματα που είναι ενανθρακωμένα και μη. Επίσης, η ενυδάτωση του ασβέστη προκαλεί συστολή ξήρανσης και εφελκυστικές τάσεις (και κατ' επέκταση μικρορηγματώση) στις διεπιφάνειες των ενανθρακωμένων και μη κομματιών.

5.1.1.2.2 Σύγκριση με βιβλιογραφία

Σε παρόμοιες συνθέσεις αναφέρεται στο [Earthen Constructions, 1989], ότι η προσθήκη ασβέστου στον πηλό θα μπορούσε να αποδώσει θλιπτική αντοχή σε ένα πηλοασβεστοκονίαμα περί τα 2-5MPa. Λαμβάνοντας υπόψη την μέση τιμή (3,50MPa) η ποσοστιαία μείωση που εμφανίστηκε στην παρούσα έρευνα είναι γύρω στο 63% στις 90 ημέρες, ενώ αν ληφθεί υπόψη η τιμή των 28 ημερών (2,92MPa) η ποσοστιαία μείωση είναι πολύ μικρότερη και αφορά γύρω στο 17%. Η εν χρόνω μείωση καθώς και η γενικότερη μείωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του πηλοκονιάματος με προσθήκη ασβέστη χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.

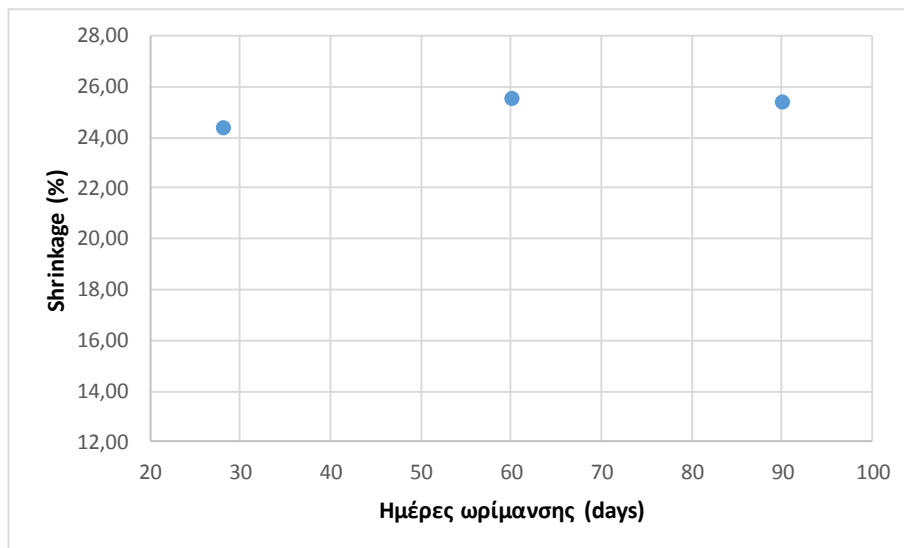
5.1.2 Φυσικά χαρακτηριστικά

5.1.2.1 Πηλοκονίαμα

5.1.2.1.1 Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Συστολή ξήρανσης

Η συστολή ξήρανσης είναι ένα φαινόμενο το οποίο εξελίσσεται με μεγαλύτερη ταχύτητα στις πρώτες μέρες παρασκευής των δοκιμών, και στην συνέχεια σταθεροποιείται. Συγκεκριμένα στα πηλοκονιάματα ξεκίνησε σε ποσοστό 24,4% για τις 28 ημέρες και στις 60 μέρες είχε φτάσει ποσοστό 25,6% πράγμα που σημαίνει 5% αύξηση. Στις 90 ημέρες η τιμή παρέμεινε πρακτικά ίδια με τις 60 ημέρες με ποσοστιαία μείωση γύρω στο 0,75%, που θεωρείται αμελητέα. Γενικά, όσο αυξάνεται ο χρόνος ωρίμανσης παρατηρείται μεγαλύτερη διασπορά των αποτελεσμάτων, πράγμα που επιβεβαιώνει την εξάρτηση των αποτελεσμάτων από τις συνθήκες συντήρησης, οι οποίες επιδεινώνουν την κατάσταση όσο περνάει ο χρόνος.



Εικόνα 56. Διάγραμμα μέσης συστολής ξήρανσης συναρτήσει του χρόνου ωρίμανσης των πρισμάτων των πηλοκονιαμάτων

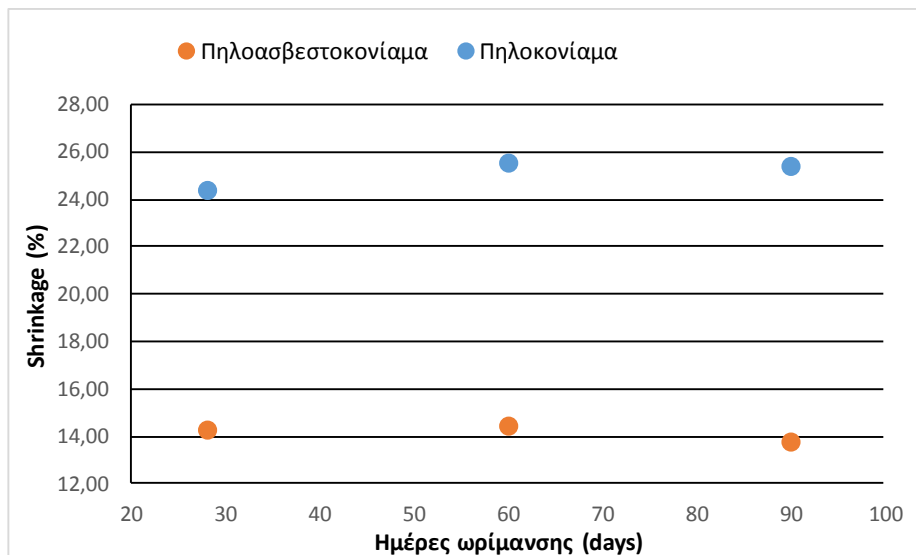
5.1.2.1.2 Σύγκριση με βιβλιογραφία

Είναι αρκετά μεγάλες τιμές σε σχέση με αυτές που έχουν συναντηθεί στην βιβλιογραφία σε παρόμοιες συνθέσεις πηλοκονιαμάτων. Ωστόσο, για λόγους σύγκρισης και περαιτέρω διερεύνησης αναφέρεται ενδεικτικά ότι η [Μπέη Γ., 2004] σε παρόμοια σύνθεση είχε υπολογίσει 6,768% συστολή ξήρανσης, οδηγώντας σε ποσοστιαία αύξηση των τιμών της παρούσας εργασίας περί τα 278,25%. Οι συνθήκες συντήρησης είναι κάτι το οποίο επηρεάζει άμεσα την συστολή ξήρανσης. Στην παρούσα εργασία, η σχετική υγρασία δεν διατηρήθηκε για μεγάλο χρονικό διάστημα σε υψηλά επίπεδα, πράγμα το οποίο είναι ξεκάθαρο στην συγκεκριμένη περίπτωση. Γενικά, η συστολή ξήρανσης αυξάνεται όταν μειώνεται η σχετική υγρασία. Επομένως, αυτό το γεγονός μπορεί να εξηγήσει τις αποκλίσεις των τιμών της στην παρούσα εργασία σε σχέση με τα αποτελέσματα της [Μπέη Γ., 2004], καθώς εκείνη διατηρούσε υψηλές τιμές σχετικής υγρασίας RH (περί το 95%), για μεγαλύτερο

χρονικό διάστημα. Ωστόσο ο πηλός σαν αερική κονία, προκειμένου να πήξει και να αποκτήσει αντοχές, είναι απαραίτητη η επαφή του με τον αέρα κι όχι τόσο με το νερό.

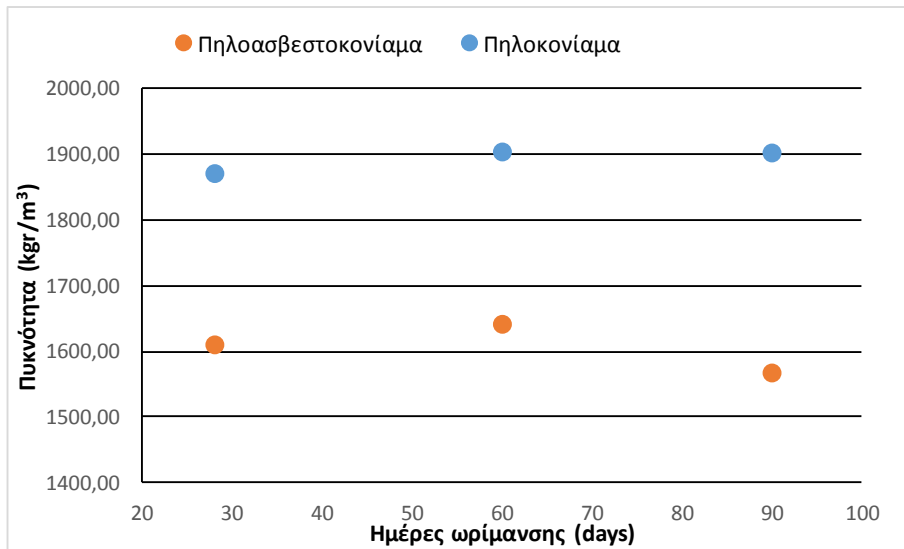
5.1.2.2 Πηλοασβεστοκονίαμα

Η συστολή ξήρανσης που εμφανίζουν τα πρίσματα των πηλοασβεστοκονιαμάτων είναι σχεδόν η μισή (ποσοστιαία μείωση περί το 46%) με αυτή των πηλοκονιαμάτων, πράγμα που φανερώνει μια σύνθεση που δεν επηρεάζεται τόσο από τις συνθήκες συντήρησης. Αυτό αποτελεί ένα πολύ σημαντικό στοιχείο για το κονίαμα που εμπεριέχεται σε μια κατασκευή, λόγω της ανθεκτικότερης του δομής έναντι των περιβαλλοντικών συνθηκών στις οποίες υπόκεινται. Σε μία σύνθεση κονιάματος με μικρότερη συστολή ξήρανσης, πέρα από την μείωση των ρηγματώσεων, οι οποίες επιφέρουν τόσο θέματα ανθεκτικότητας όσο και μείωση αντοχών, σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί και η αποδοτικότερη σύνδεση και συνάφεια αυτής με τους λίθους. Η προσθήκη της ασβέστου, είναι αδιαμφισβήτητα ο παράγοντας που οδήγησε σε μικρότερη συστολή ξήρανσης, σε σχέση με αυτήν του πηλοκονιάματος.

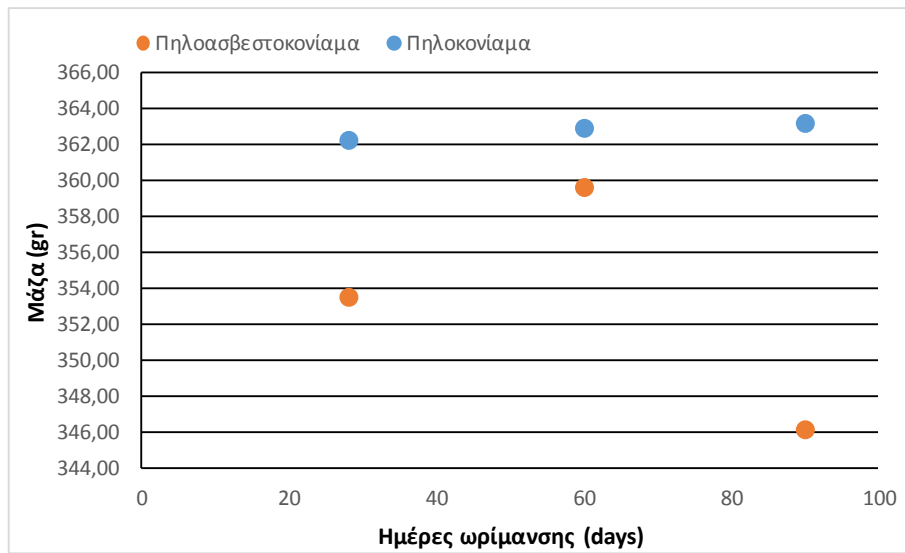


Εικόνα 57. Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστού συστολής ξήρανσης πρισμάτων πηλοκονιάματος-πηλοασβεστοκονιάματος

Εν χρόνω, παρατηρείται απώλεια μάζας, άρα και μείωση της πυκνότητας. Η σύνθεση του πηλοκονιάματος, που περιέχει 5% περισσότερο πηλό από αυτή του πηλοασβεστοκονιάματος, αποδεσμεύει λιγότερη ποσότητα νερού από ότι το πηλοασβεστοκονίαμα, λόγω της φύσης του πηλού, ο οποίος δεσμεύει χημικά το νερό. Επίσης, παρατηρείται μια σταθεροποιητική κατάσταση εν χρόνω χωρίς καμία ουσιαστική μεταβολή από τις 28 έως τις 90 ημέρες ωρίμανσης. Η μειωμένη πυκνότητα του πηλοασβεστοκονιάματος, δικαιολογεί τα μειωμένα του μηχανικά χαρακτηριστικά σε σχέση με του πηλοκονιάματος. Αντίθετα στο πηλοασβεστοκονίαμα, παρατηρείται ξεκάθαρα μικρότερη μάζα σε σχέση με το πηλοκονίαμα από τις 28 κιόλας ημέρες ωρίμανσης του, πράγμα που μπορεί να οφείλεται στην προσθήκη ασβέστη, η οποία προκαλεί νέες αντιδράσεις



Εικόνα 58. Συγκριτικό διάγραμμα πυκνότητας συναρτήσει χρόνου ωρίμανσης πρισμάτων πηλοκονιαμάτων και πηλοασβεστοκονιαμάτων



Εικόνα 59. Συγκριτικά διαγράμματα μάζας συναρτήσει του χρόνου ωρίμανσης πρισμάτων πηλοκονιαμάτων και πηλοασβεστοκονιαμάτων

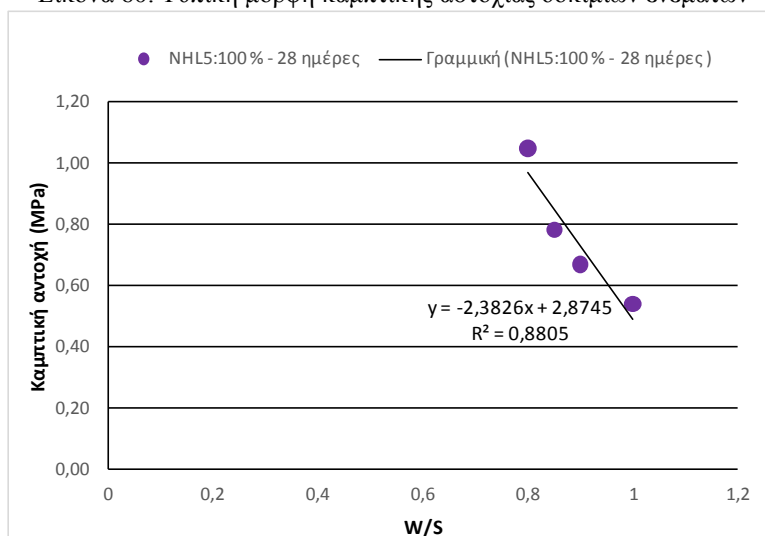
5.2 Ενέματα

5.2.1 Μηχανικά χαρακτηριστικά

5.2.1.1 Ερμηνεία Αποτελεσμάτων



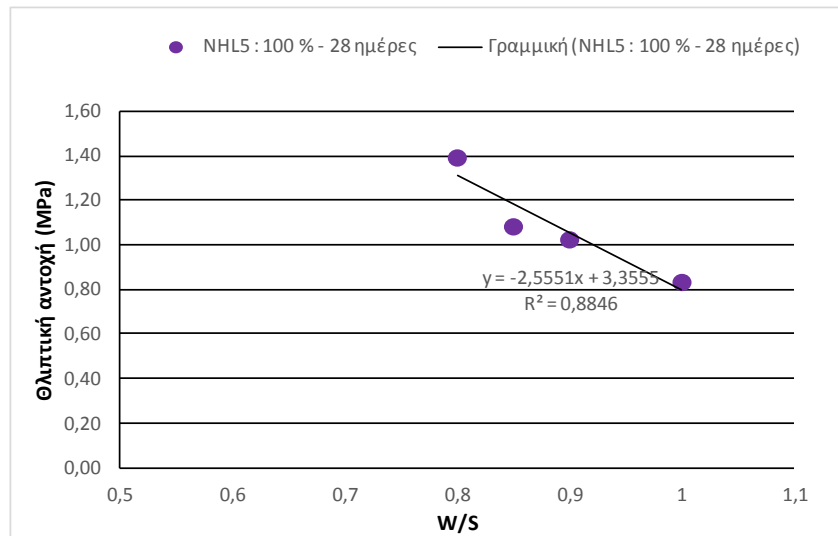
Εικόνα 60. Τυπική μορφή καμπτικής αστοχίας δοκιμίων ενεμάτων



Εικόνα 61. Διάγραμμα καμπτικής αντοχής συναρτήσει του λόγου νερού προς στερεά για πρίσματα σύνθεσης ενέματος NHL 5: 100%

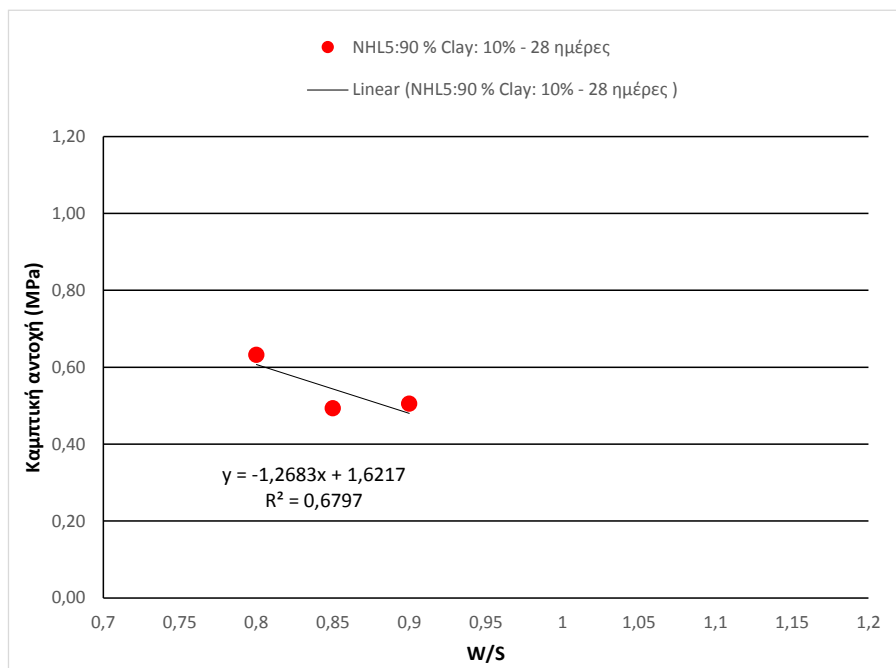
Όσον αφορά την μεταβολή της καμπτικής αντοχής συναρτήσει του λόγου νερού προς στερεά (W/S), αυτό που προκύπτει ως συμπέρασμα από το παραπάνω διάγραμμα είναι ότι όσο αυξάνεται ο λόγος W/S στην σύνθεση NHL 5: 100%, μειώνεται η αντοχή. Αυτό συμβαίνει διότι όσο αυξάνεται η παρουσία του νερού τόσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των κόκκων της στερεής φάσης (μέσω του ότι ισχυροποιούνται οι απωστικές ηλεκτροστατικές δυνάμεις μεταξύ των κόκκων) και δημιουργείται μια λιγότερο πυκνή δομή. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα προκύπτουν από τις 28 ημέρες ωρίμανσης των πρισμάτων, και όπως φαίνεται η σχέση της καμπτικής αντοχής συναρτήσει του λόγου νερού προς

στερεά, θα μπορούσε να είναι με μεγάλη ακρίβεια γραμμική. Όπως παρατηρείται γενικά, οι τιμές των αντοχών είναι αρκετά μικρές, κάτι το οποίο είναι επιθυμητό, για λόγους συμβατότητας μεταξύ των υφιστάμενων υλικών και των υλικών ενίσχυσης.



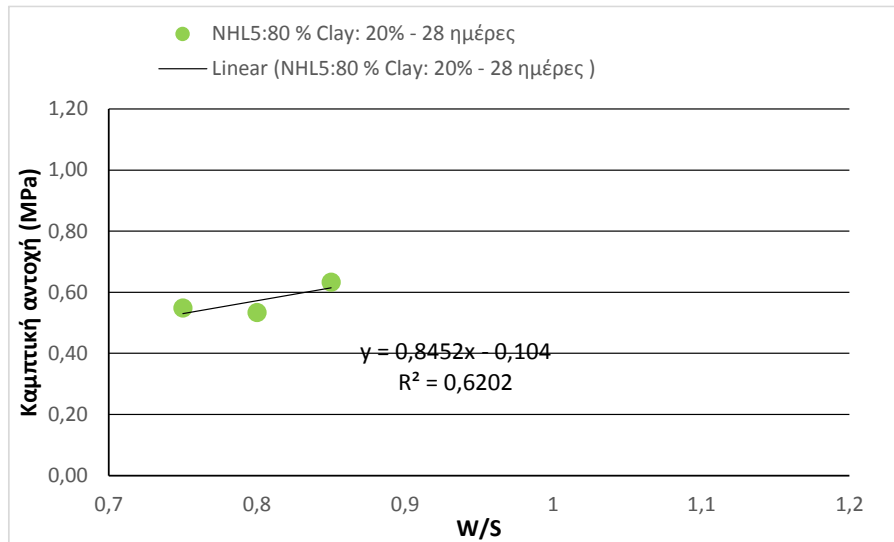
Εικόνα 62. Διάγραμμα θλιπτικής αντοχής συναρτήσει του λόγου νερού προς στερεά για πρίσματα σύνθεσης ενέματος NHL 5: 100%

Η ίδια εικόνα παρατηρείται και στην θλιπτική αντοχή. Όσο αυξάνεται ο λόγος νερού προς στερεά μειώνεται κι η θλιπτική αντοχή. Αυτό που παρατηρείται στην περίπτωση της καμπτικής και θλιπτικής αντοχής είναι ότι η γραμμική σχέση ανάμεσα σε αυτές και τον λόγο νερού προς στερεά (W/S) χαρακτηρίζεται από τον ίδιο συντελεστή R^2 .

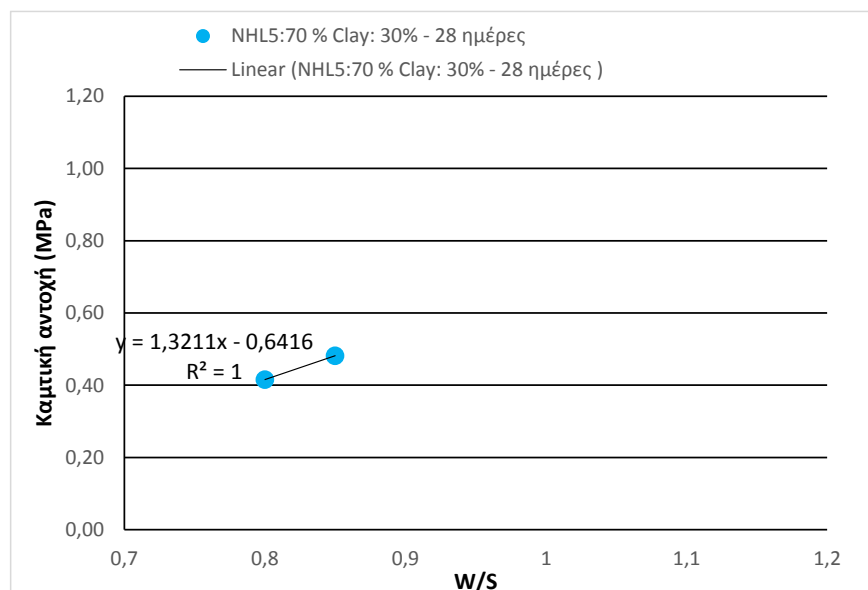


Εικόνα 63. Διάγραμμα καμπτικής αντοχής συναρτήσει του λόγου νερού προς στερεά για πρίσματα σύνθεσης ενέματος NHL 5: 90% Clay: 10%

Για την σύνθεση NHL 5: 90% Clay: 10% παρατηρείται η μείωση της καμπτικής αντοχής αυξανόμενου του λόγου W/S, όπως ήταν αναμενόμενο. Η κλίση της ευθείας, αν θεωρηθεί ότι είναι επαρκής η γραμμική προσέγγιση, αυξάνεται σε σχέση με της σύνθεσης NHL 5: 100%.



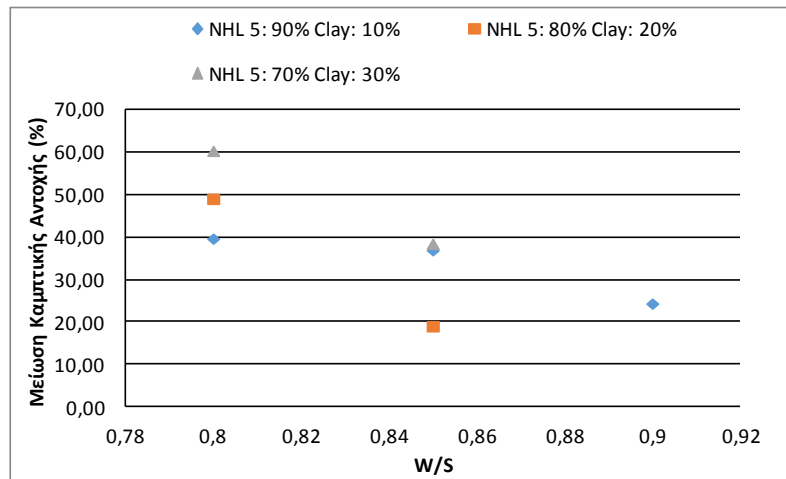
Εικόνα 64. Διάγραμμα καμπτικής αντοχής συναρτήσει του λόγου νερού προς στερεά για πρίσματα σύνθεσης ενέματος NHL 5: 80% Clay: 20%



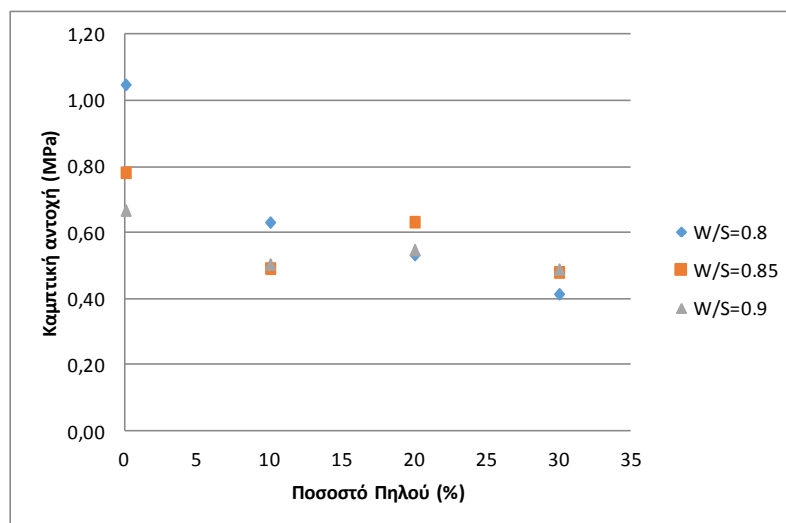
Εικόνα 65. Διάγραμμα καμπτικής αντοχής συναρτήσει του λόγου νερού προς στερεά για πρίσματα σύνθεσης ενέματος NHL 5: 70% Clay: 30%

Για τις συνθέσεις NHL 5: 80% Clay: 20% και NHL 5: 70% Clay: 30% παρατηρείται ότι η κλίση της ευθείας της γραμμικής σχέσης της καμπτικής αντοχής με τον λόγο νερού προς στερεά, αυξάνεται με την αύξηση του λόγου W/S. Επίσης, παρατηρείται η αύξηση της κλίσης της ευθείας της γραμμικής προσέγγισης με την αύξηση του ποσοστού του πηλού στην σύνθεση. Είναι κάτι μη αναμενόμενο και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης με δοκιμή περισσότερων δοκιμίων με διαφορετικούς λόγους W/S.

Όσον αφορά τις συνθέσεις με τον πηλό, επικρατεί μια πιο “ακατάστατη” εικόνα στην μεταβολή της καμπτικής αντοχής με την αύξηση του λόγου W/S. Ο πηλός από την φύση του είναι ένα υλικό που έχει μεγάλη δυνατότητα συγκράτησης νερού. Κάθε μόριο πηλού μπορεί να δεσμεύει γύρω του ένα φίλμ νερού ποικίλου πάχους. Όσο αυξάνεται το νερό, αυξάνεται και το πάχος του φίλμ νερού (μέχρι ενός ορίου κορεσμού) και κατ’ επέκταση η απόσταση μεταξύ των κόκκων, δημιουργώντας μια πιο αραιή δομή. Οι ηλεκτροστατικές απωστικές δυνάμεις αυξάνονται καθώς αυξάνεται το πάχος του φίλμ (άρα και ο λόγος W/S). Αυτό, ίσως, να δικαιολογεί ότι όσο αυξάνεται ο πηλός στις συνθέσεις των ενεμάτων, τόσο μειώνονται και οι τιμές των αντοχών. Επίσης, όσο αυξάνεται ο λόγος W/S η μείωση της τιμής των αντοχών σε σχέση με την σύνθεση NHL 5: 100%, ανά τις συνθέσεις με τον πηλό, μειώνεται. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι οι συνθέσεις με τον πηλό, λόγω της φύσης του να δεσμεύει νερό, δεσμεύει το απαιτούμενο νερό για την ενυδάτωση της υδραυλικής ασβέστου, η οποία αποτελεί το υλικό με την μεγαλύτερη αντοχή σε αυτές τις συνθέσεις.

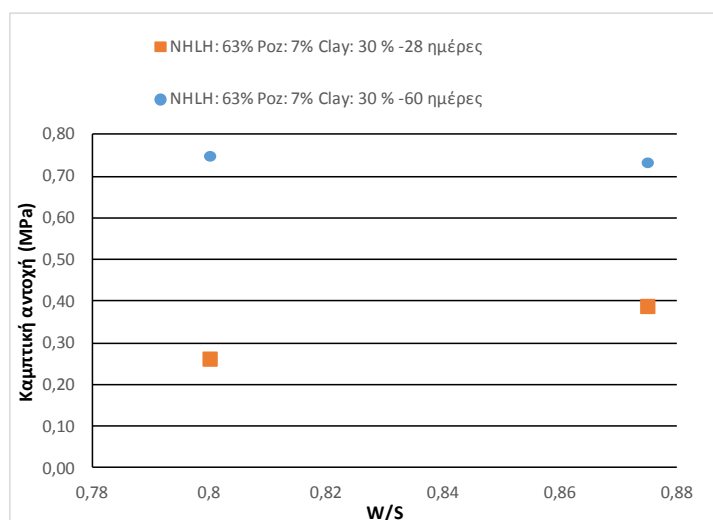


Εικόνα 66. Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστιαίας μεταβολής της μείωσης της καμπτικής αντοχής συναρτήσει του λόγου W/S για πρίσματα συνθεσεων με πηλό σε σύγκριση με την NHL 5: 100%

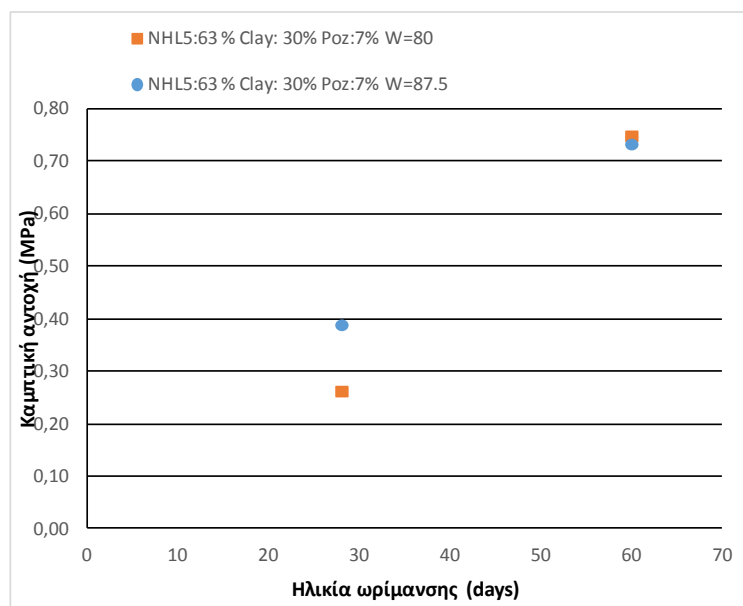


Εικόνα 67. Διάγραμμα καμπτικής αντοχής για διαφόρους λόγους νερού προς στερεά συναρτήσει του ποσοστού πηλού στις συνθέσεις

Στο παραπάνω διάγραμμα είναι εμφανής η μείωση της καμπτικής αντοχής όσο αυξάνεται το ποσοστό του πηλού στις συνθέσεις. Σε ποσοστό περί το 30% φαίνεται να σταθεροποιείται η τιμή της γύρω στο 0,50MPa.



Εικόνα 68. Συγκριτικό διάγραμμα καμπτικής αντοχής συναρτήσει του λόγου W/S για πρίσματα σύνθεσης ενέματος NHL 5: 63% Clay: 30% Poz: 7%

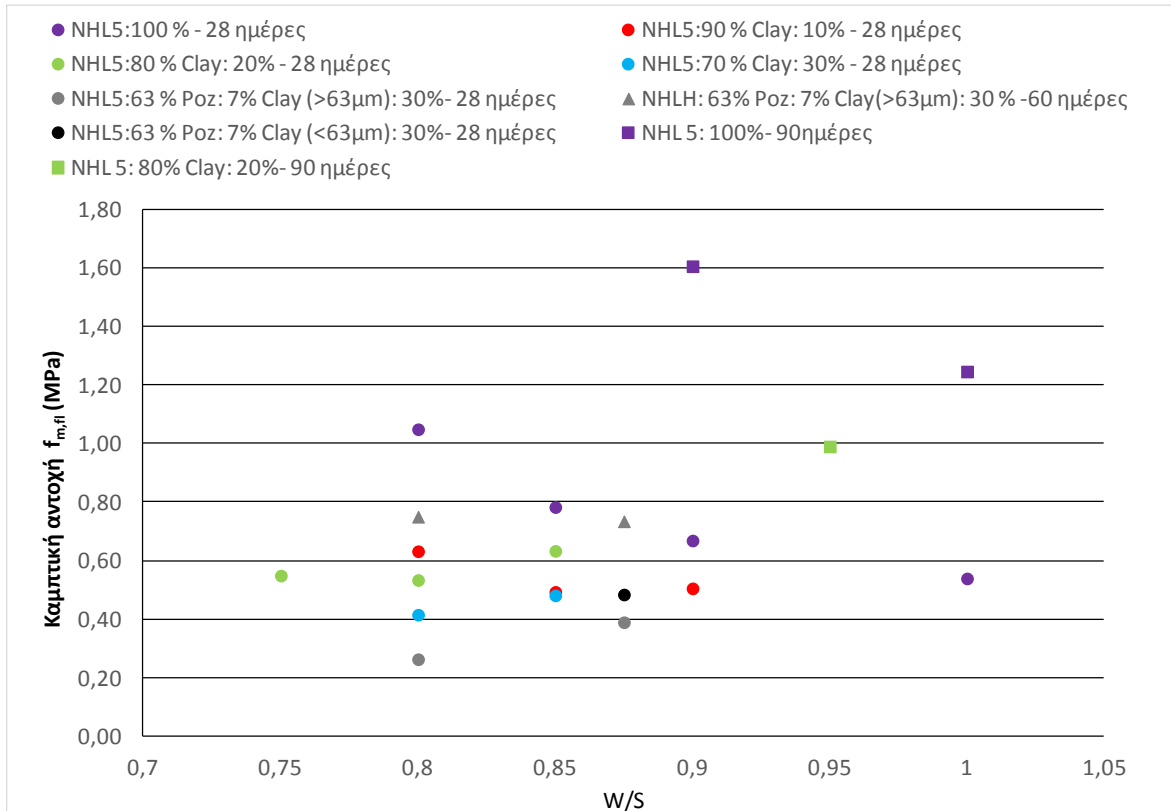


Εικόνα 69. Συγκριτικό διάγραμμα καμπτικής αντοχής συναρτήσει του χρόνου ωρίμανσης για πρίσματα σύνθεσης ενέματος NHL 5: 63% Clay: 30% Poz: 7%

Για την σύνθεση NHL 5: 63%-Clay: 30%-Poz: 7%, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε κάμψη στις 60 ημέρες ωρίμανσής τους, προκειμένου να καταγραφεί η πορεία της ενυδάτωσης και της ποζολανικής αντίδρασης με τον χρόνο. Όπως φαίνεται στο παρακάτω συνολικό διάγραμμα η αντοχή των συνθέσεων NHL 5: 63%-Clay: 30%-Poz: 7% από τις 28 στις 60 ημέρες ωρίμανσης έχει σημειώσει μεγάλη αύξηση προσεγγίζοντας τις αντοχές της σύνθεσης NHL 5: 100% στις 28 ημέρες ωρίμανσης της. Αυτό οφείλεται ξεκάθαρα στην εξέλιξη της ποζολανικής αντίδρασης της προστιθέμενης ποζολάνης με την υδραυλική άσβεστο και τον

πηλό. Η αντίδραση αυτή εξελίσσεται αργά και τα οφέλη της είναι εμφανή μετά τις 60 ημέρες ωρίμανσης των δοκιμίων.

Όσον αφορά την εν χρόνω αύξηση της αντοχής για την σύνθεση NHL 5: 100% W/S=0.9, είναι ξεκάθαρη η εξέλιξη της ενυδάτωσης της NHL 5. Η ποσοστιαία αύξηση αυτή, σε σχέση με την αντίστοιχη καμπτική αντοχή των 28 ημερών, αντιστοιχεί σε ποσοστό 132%.



Εικόνα 70. Συνολικό συγκριτικό διάγραμμα καμπτικής αντοχής συναρτήσει του λόγου W/S για τις 28 ημέρες ωρίμανσης

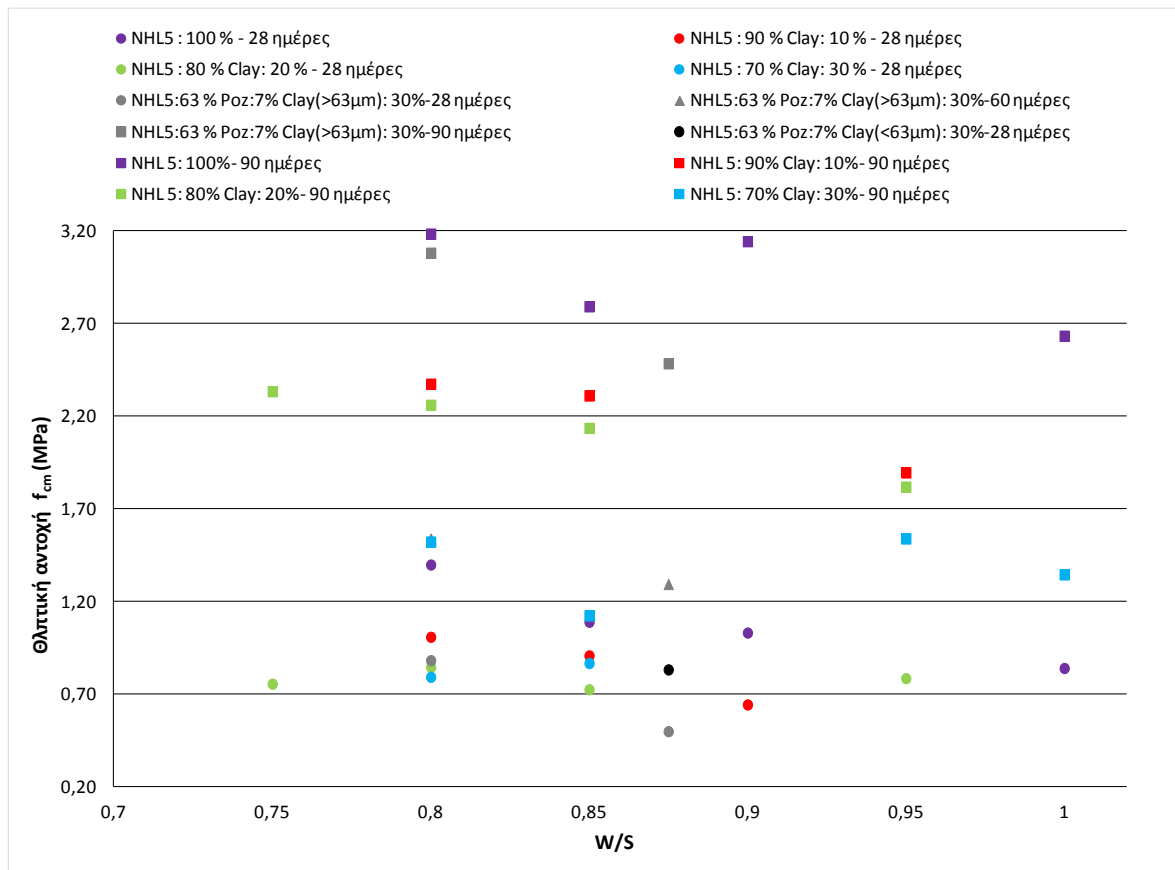
Θλιπτική αντοχή



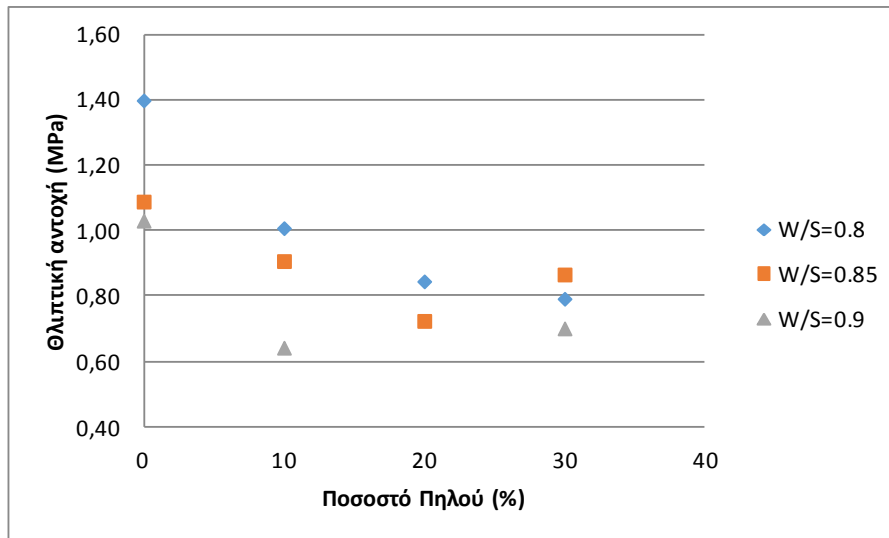
Εικόνα 71. Τυπική μορφή θλιπτικής αστοχίας δοκιμίου ενέματος

Στο συνολικό διάγραμμα της Εικόνα 72 για τις 28, 60 και 90 ημέρες ωρίμανσης των πρισμάτων των συνθέσεων των ενεμάτων παρατηρούνται τα εξής:

- I. Μείωση της θλιπτικής αντοχής με την αύξηση του λόγου W/S για όλες τις συνθέσεις ενεμάτων, με ικανοποιητική γραμμική προσέγγιση. Μέσω της αύξησης του λόγου W/S αυξάνονται οι αποστάσεις ανάμεσα στους κόκκους του υλικού, δημιουργώντας μία λιγότερο πυκνή και συνεκτική δομή,
- II. Η συνεισφορά της ποζολανικής αντίδρασης στην σύνθεση NHL 5: 63%-Poz: 7%-Clay: 30% γίνεται εμφανής μετά τις 60 ημέρες ωρίμανσης, που προσεγγίζει τις αντοχές της σύνθεσης NHL 5: 100% για τις 28 ημέρες ωρίμανσης της. Στις 90 ημέρες ωρίμανσης πλέον η θλιπτική για τις δύο αυτές συνθέσεις ταυτίζεται σε μία τιμή της τάξης των 3,15MPa με ποσοστιαία διαφορά της τάξης 3,25% για W/S= 0,80,
- III. Εν χρόνω ποσοστιαία αύξηση της θλιπτικής αντοχής για όλες τις συνθέσεις είναι της τάξης του 180%. Αποδίδεται στην εξέλιξη της ενυδάτωσης της υδραυλικής ασβέστου. Στις συνθέσεις που περιέχουν ποσοστό πηλού, πραγματοποιούνται κι άλλες αντιδράσεις ανάμεσα στον πηλό και στην NHL 5, όπως είναι η συσσωμάτωση και κροκκίδωση των κόκκων, η ανταλλαγή ιόντων κι η ενανθράκωση.

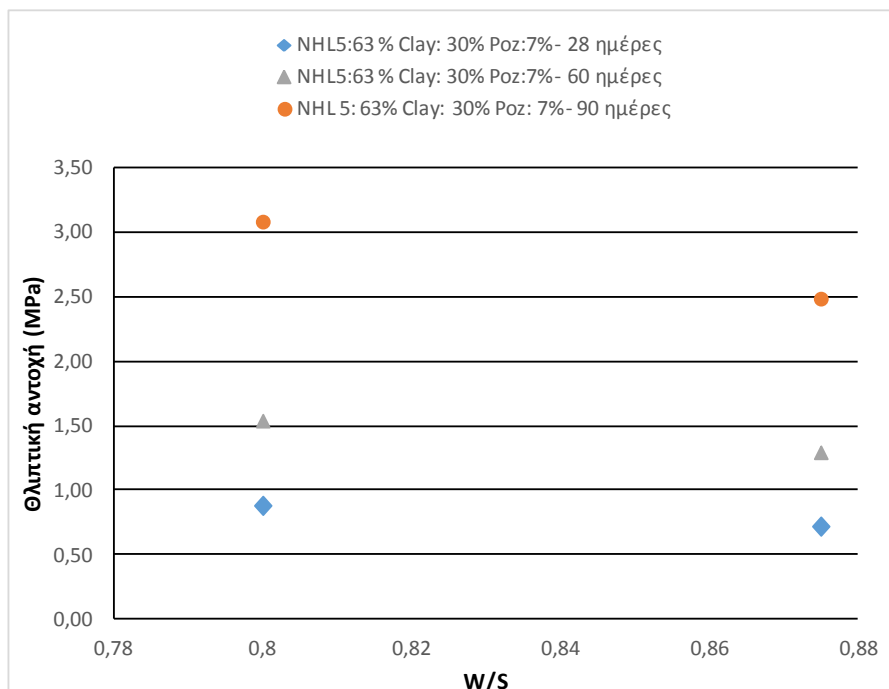


Εικόνα 72. Συνολικό συγκριτικό διάγραμμα καμπτικής αντοχής συναρτήσει του λόγου W/S για τις 28, 60 και 90 ημέρες ωρίμανσης

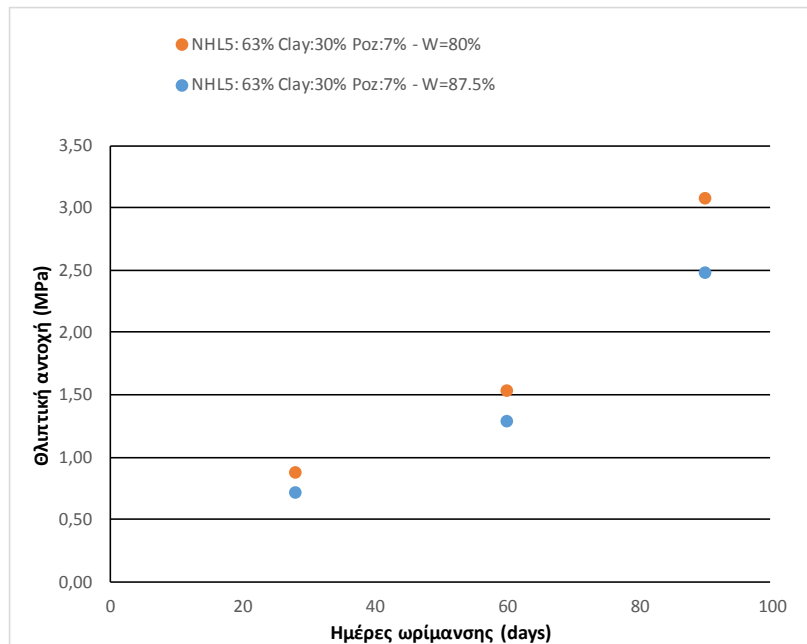


Εικόνα 73. Διάγραμμα θλιπτικής αντοχής συναρτήσει του ποσοστού του πηλού για διάφορους λόγους W/S

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα της Εικόνα 73 που αφορά την εξέλιξη της θλιπτικής αντοχής συναρτήσει του ποσοστού του πηλού, επιβεβαιώνεται ότι όσο αυξάνεται ο λόγος W/S μειώνεται η αντοχή. Επιπροσθέτως, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό του πηλού στις συνθέσεις μειώνεται κατά τρόπο σχεδόν γραμμικό η θλιπτική αντοχή, μέχρι το ποσοστό του 30%, που πρακτικά φαίνεται να σταθεροποιείται σε μία τιμή γύρω στα 0,80MPa. Αυτό συμβαίνει και στην καμπτική αντοχή, επομένως τα συμπεράσματα για τα δύο αυτά μηχανικά χαρακτηριστικά συνάδουν.



Εικόνα 74. Συγκριτικό διάγραμμα θλιπτικής αντοχής συναρτήσει του λόγου W/S για την σύνθεση NHL 5: 63% Clay: 30% Poz: 7%



Εικόνα 75. Συγκριτικό διάγραμμα θλιπτικής αντοχής συναρτήσει του χρόνου ωρίμανσης για την σύνθεση NHL 5: 63% Clay: 30% Poz: 7%

Για την σύνθεση NHL 5: 63%-Clay: 30%-Poz: 7%, επιβεβαιώνεται ότι όσο αυξάνεται ο λόγος W/S μειώνεται η θλιπτική αντοχή, καθώς και όσο αυξάνονται οι ημέρες ωρίμανσης αυξάνεται η θλιπτική αντοχή εξαιτίας της εξέλιξης της ποζολανικής αντίδρασης. Επίσης στην Εικόνα 75 φαίνεται ότι όσο περνάνε οι μέρες ωρίμανσης αυξάνεται η θλιπτική αντοχή με αρκετά ικανοποιητική γραμμική προσέγγιση. Με την χρήση της ποζολάνης, δημιουργείται μία πιο πυκνή κι ανθεκτική δομή στην συστολή ξήρανσης και στις μικρορηγματώσεις, κάτι το οποίο φαίνεται και στην ανεμπόδιστη εν χρόνω ανάπτυξη της θλιπτικής αντοχής.

Στο Παράρτημα Β παρουσιάζονται οι τιμές της θλιπτικής και καμπτικής αντοχής με τις κωδικές ονομασίες των συνθέσεων, τόσο αυτών που πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακά όσο και αυτών που λήφθηκαν κατά την εφαρμογή τους στους τοιχίσκους.

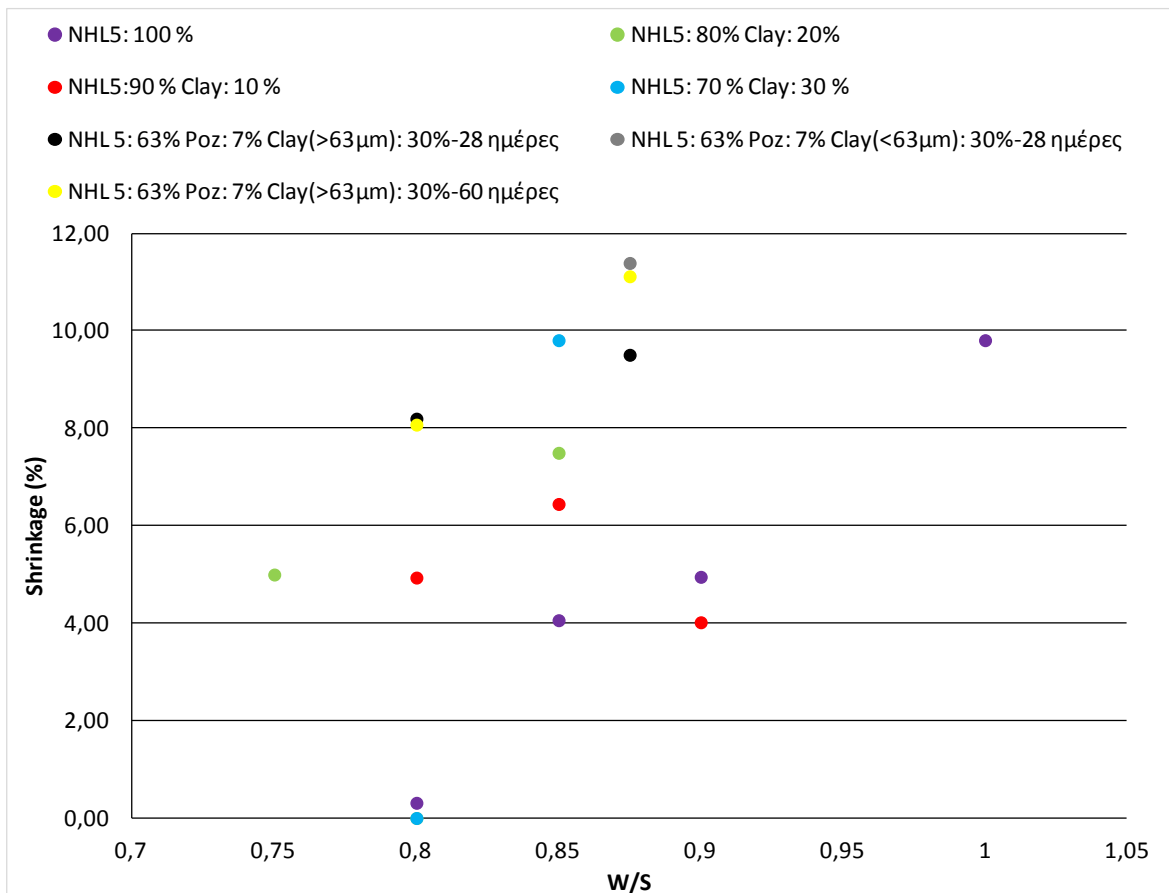
5.2.1.2 Σύγκριση με βιβλιογραφία

Για την καμπτική αντοχή, η [Kalagri et al., 2010] είχε πραγματοποιήσει έρευνα για συνθέσεις υδραυλικής ασβέστου σε τρίστρωτη λιθοδομή με ασβεστοκονίαμα. Συγκεκριμένα, σε σύνθεση ενέματος με αναλογίες NHL 5: 100% W/S= 0,80 είχε υπολογίσει καμπτική αντοχή 1,10MPa και 1,75MPa για τις 28 και 90 ημέρες ωρίμανσης αντίστοιχα, με ποσοστιαία διαφορά από την ίδια σύνθεση στην παρούσα εργασία, περί το 4,76% (μείωση) και 17,14% (αύξηση) αντίστοιχα. Για την θλιπτική αντοχή, η [Kalagri et al., 2010] είχε υπολογίσει 2,06MPa και 4,88MPa για τις 28 και 90 ημέρες ωρίμανσης αντίστοιχα, με ποσοστιαία διαφορά από την ίδια σύνθεση της παρούσας εργασίας περί το 32% (μείωση) και 35% (μείωση) αντίστοιχα.

Επίσης μία σύνθεση πηλοεπιχρίσματος της [Πιτυτζόγια, 2014], που μοιάζει με τις συνθέσεις NHL 5: 70%-Clay: 30% και NHL 5: 63%-Poz: 7%-Clay: 30%, αφορά την σύνθεση YA 2:1

NHL 5:πηλό και $W/S= 0,50$ (με κάποια πρόσθετα που δεν χρησιμοποιήθηκαν εδώ) παρατηρείται ότι η καμπτική αντοχή και με τις δύο συνθέσεις αυτές είναι σχεδόν η ίδια (ποσοστιαία μεταβολή της τάξης του 8% στην σύνθεση NHL 5: 63% Poz: 7% Clay: 30%), παρόλο που η σύνθεση της [Πιτυτζόγια, 2014] έχει πολύ μικρότερο λόγο W/S , από αυτόν της παρούσας εργασίας. Όσον αφορά την θλιπτική αντοχή σημειώνεται μεγαλύτερη ποσοστιαία μεταβολή της τάξης του 36%, πράγμα που πιθανόν να οφείλεται στις διαφορετικές συνθήκες συντήρησης, στην μικρορρηγμάτωση των δοκιμίων της παρούσας εργασίας, καθώς και στον μεγαλύτερο λόγο W/S που υπάρχει σε αυτές.

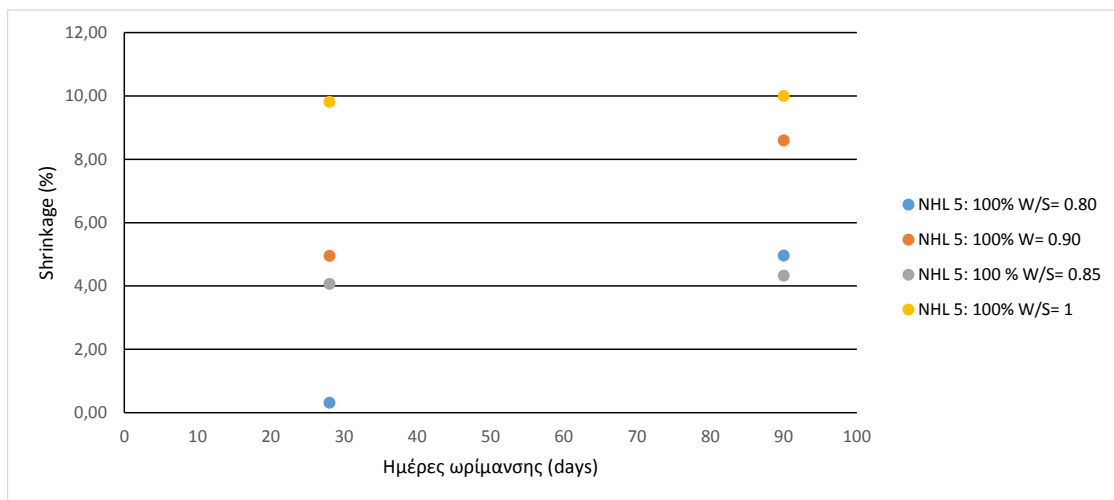
5.2.2 Φυσικά χαρακτηριστικά



Εικόνα 76. Συγκριτικό διάγραμμα συστολής ξήρανσης συναρτήσει του λόγου W/S για τις 28 και 60 ημέρες ωρίμανσης

Από το παραπάνω συνολικό διάγραμμα εξάγεται το συμπέρασμα ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό του πηλού στις συνθέσεις αυξάνεται και η συστολή ξήρανσης. Επομένως αυτή η παρατήρηση συνάδει με το ότι η υδραυλική άσβεστος είναι πιο λεπτόκοκκη από τον πηλό, έχοντας την τάση να δεσμεύει περισσότερο νερό από αυτόν. Η υδραυλική άσβεστος λόγω της φύσης της δεσμεύει χημικά νερό για την ενυδάτωση της, επομένως το αποδεσμεύει πιο δύσκολα από ότι οι συνθέσεις με τον πηλό. Ο πηλός, εξαιτίας της φύσης του ως αερική κονία, υπόκειται σε μεγάλα ποσοστά συστολής ξήρανσης. Επιπλέον οι συνθέσεις με την μεγαλύτερη αντοχή έχουν μικρότερη συστολή ξήρανσης, πράγμα που προκύπτει και από το παραπάνω διάγραμμα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της λογικής είναι οι συνθέσεις

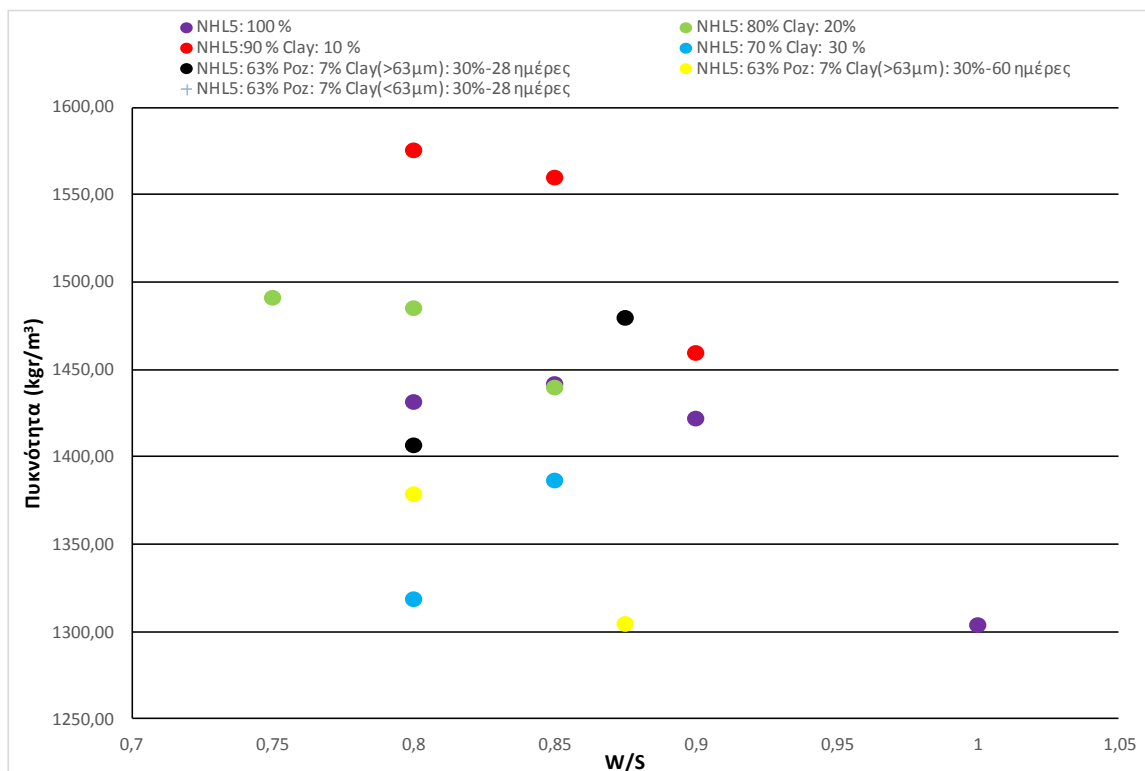
με λόγο $W/S= 0,85$ και $0,875$. Κάποια αποτελέσματα αντιβαίνουν αυτής της λογικής, πράγμα που χρήζει περαιτέρω διερεύνησης. Τέτοιες περιπτώσεις είναι στην σύνθεση NHL 5: 90% Clay: 10% $W/S=0,9$. Επιπροσθέτως, το λογικό είναι ότι όσο αυξάνεται ο λόγος W/S να αυξάνεται και η συστολή ξήρανσης, εφόσον υπάρχει περισσότερο νερό στο πρίσμα που μπορεί να αποδεσμευτεί. Αυτό παρατηρείται σε όλες τις μετρήσεις εκτός από τις μετρήσεις των συνθέσεων NHL 5: 90% Clay: 10% $W/S=0,9$ και NHL 5: 80% Clay: 20% $W/S=0,8$, όπου είναι μηδενική.



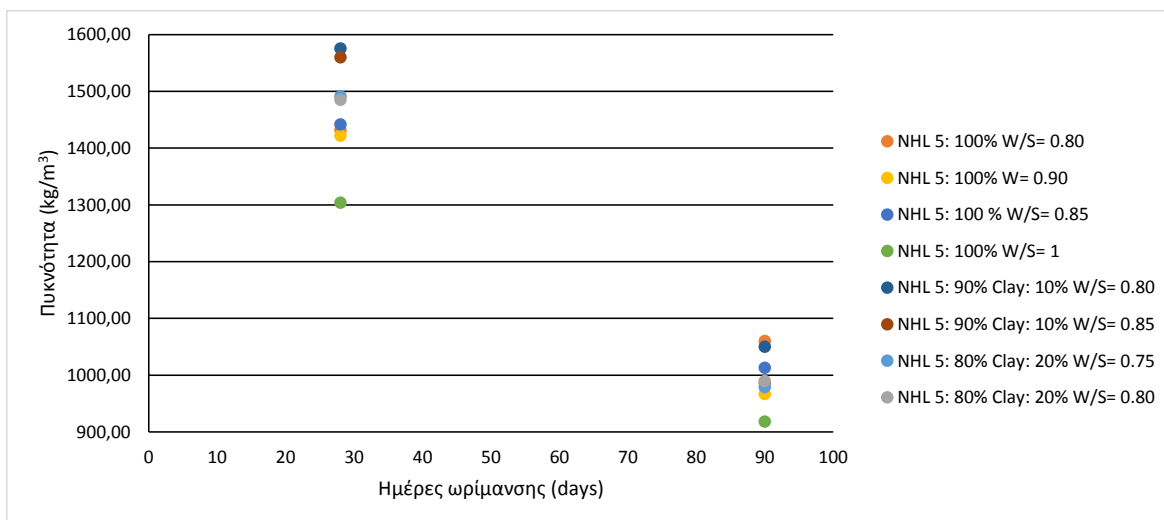
Εικόνα 77. Διάγραμμα εν χρόνω μεταβολής της συστολής ξήρανσης για την σύνθεση ενέματος NHL 5: 100%

Για την εν χρόνω μεταβολή της συστολής ξήρανσης της σύνθεσης NHL 5: 100% για τους διάφορους λόγους W/S , προκύπτει το συμπέρασμα ότι όσο αυξάνεται ο λόγος W/S τόσο μειώνεται η εν χρόνω μεταβολή της συστολής ξήρανσης. Αυτό είναι εμφανές κυρίως στις συνθέσεις με λόγους $W/S= 0,80$, $0,90$ και 1 όπου η ποσοστιαία αύξηση της συστολής ξήρανσης από τις 28 στις 90 ημέρες μειώνεται ως εξής : 150%, 80,81% και 2% αντίστοιχα. Επίσης, μειώνεται και η διασπορά των μετρήσεων για τους διαφορετικούς λόγους W/S από τις 28 στις 90 ημέρες.

Όσο αυξάνεται το ποσοστό του πηλού στις συνθέσεις, μειώνεται η πυκνότητά τους. Αυτό δικαιολογείται με γνώμονα την φύση του πηλού, ο οποίος έχει την τάση να δεσμεύει χημικά νερό στην επιφάνεια του, ενισχύοντας έτσι τις απωστικές δυνάμεις μεταξύ των σωματιδίων της σύνθεσης, δημιουργώντας μία πιο αραιή δομή.

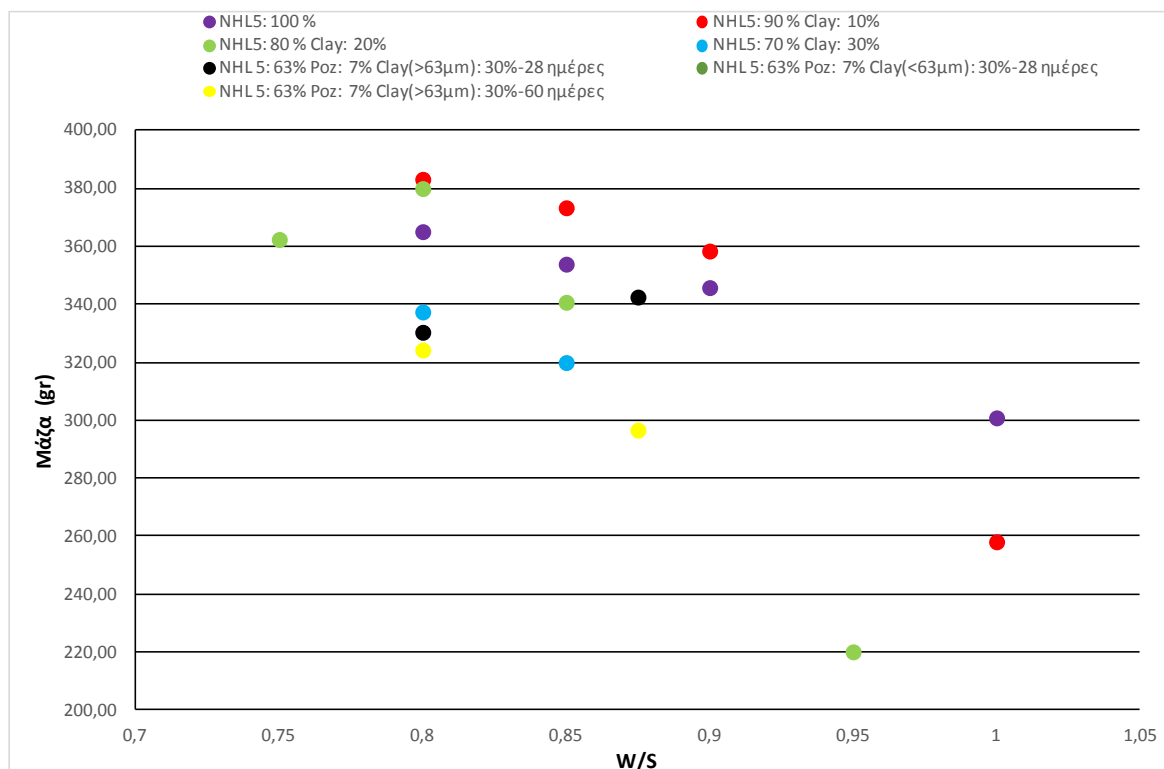


Εικόνα 78. Συγκριτικό διάγραμμα πυκνότητας συναρτήσει του λόγου W/S για τις 28 ημέρες ωρίμανσης



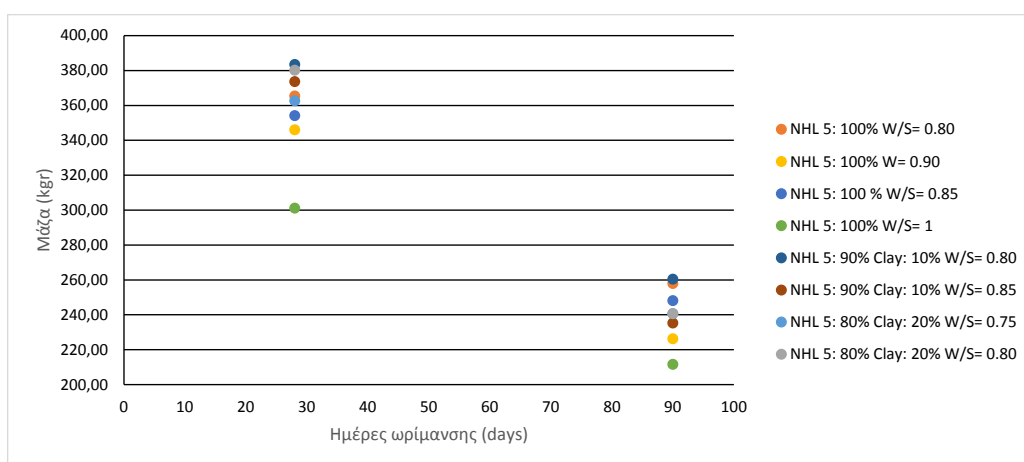
Εικόνα 79. Διάγραμμα εν χρόνω μεταβολής της πυκνότητας για τις συνθέσεις ενεμάτων

Όσον αφορά την εν χρόνω μεταβολή της πυκνότητας των συνθέσεων των ενεμάτων, παρατηρείται μία μειωτική τάση με την πάροδο του χρόνου ωρίμανσης, κάτι αναμενόμενο λόγω της απώλειας μάζας που σημειώνεται. Υπάρχει σημαντική μείωση της διασποράς, εφόσον οι τιμές στις 28 ημέρες ωρίμανσης κυμαίνονταν από 1304-1575,70 kgf/m³, ενώ στις 90 ημέρες 919-1060 kgf/m³.

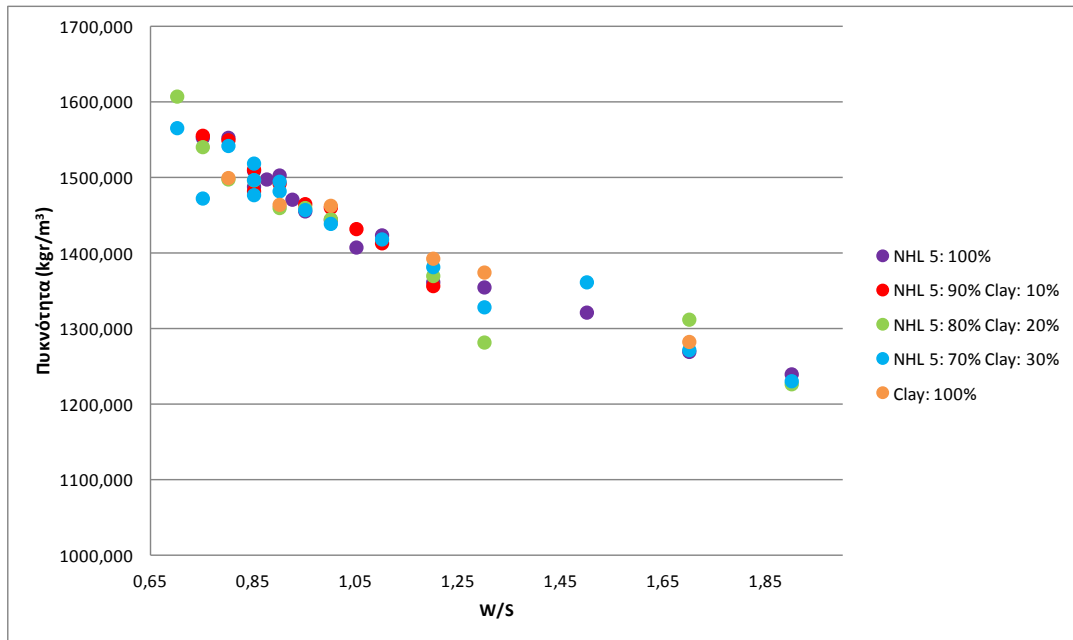


Εικόνα 80. Συγκριτικό διάγραμμα μάζας συναρτήσει του λόγου W/S για τις 28 ημέρες ωρίμανσης

Όσο αυξάνεται ο λόγος W/S, θα πρέπει να μειώνεται και η πυκνότητα αλλά και η μάζα. Γενικά στην προκειμένη περίπτωση, αυτό είναι εμφανές στα παραπάνω διαγράμματα, με κάποιες εξαιρέσεις, οι οποίες χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης. Τέτοιες μετρήσεις είναι η μέτρηση του όγκου στις 28 ημέρες ωρίμανσης της σύνθεσης NHL 5: 70% Clay: 30% W/S= 0,8, πράγμα που επηρεάζει και τον υπολογισμό της πυκνότητας. Ωστόσο, μπορεί να επιβεβαιωθεί από το διάγραμμα της μάζας, ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό της υδραυλικής ασβέστου στις συνθέσεις, αποβάλλεται το νερό πιο δύσκολα, συμφωνώντας με το ότι η υδραυλική ασβέστος είναι πιο λεπτόκοκκη από τον πηλό. Επίσης, η ασβέστος λόγω της υδραυλικής της φύσης δεσμεύει χημικά το νερό για την επίτευξη της ενυδάτωσης της.



Εικόνα 81. Διάγραμμα εν χρόνω μεταβολής της μάζας για τις συνθέσεις ενεμάτων



Εικόνα 82. Συγκριτικό διάγραμμα φαινόμενης πυκνότητας συναρτήσει του λόγου W/S για τις 0 ημέρες ωρίμανσης

Ως προς την φαινόμενη πυκνότητα που μετρήθηκε, ακριβώς μετά την παρασκευή του ενέματος, αυτό που παρατηρείται είναι ότι όσο αυξάνεται ο λόγος W/S, τόσο μειώνεται η φαινόμενη πυκνότητα προσεγγίζοντας αυτήν του νερού. Δεν υπάρχει μεγάλη και σαφής διαφοροποίηση για τις συνθέσεις με τα διαφορετικά ποσοστά υδραυλικής ασβέστου και πηλού, παρόλη την διαφορά του ειδικού τους βάρους.

5.2.3 Χαρακτηριστικά Ενεσιμότητας

Για την ρευστότητα χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις χρόνου ροής δύο κώνων με διαφορετική διάμετρο στομίου. Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων που θα αφορούν:

- I. την επάρκεια ή όχι μιας σύνθεσης σε ρευστότητα και σταθερότητα μέσα από τα διάφορα κριτήρια
- II. τον λόγο W/S από τον οποίο αρχίζει να ρέει το ένεμα
- III. τον λόγο W/S από τον οποίο θεωρείται ότι διεισδύει το ένεμα σε ένα συγκεκριμένο ονομαστικό πλάτος ρωγμών και
- IV. τον λόγο W/S από τον οποίο και μετά κάθε αύξηση του δεν προκαλεί ουσιαστική αύξηση του δείκτη ρευστότητας

Σε κάθε κώνο αντιστοιχούν διαφορετικά κριτήρια που εξασφαλίζουν την επάρκεια μιας σύνθεσης σε ρευστότητα. Τα κριτήρια ρευστότητας για τους δύο κώνους Marsh είναι τα εξής:

Κριτήριο I: Για το 1lt $\rightarrow t_{d=4,7mm} < 75s$

Κριτήριο II: Για τα πρώτα 500ml $\rightarrow t_{d=4,7mm} < 45s$

Κριτήριο III: Για τα πρώτα 100ml $\rightarrow F_1 \geq 0.98 * 10^3$ mm/s για $W_{nom} = 175 \mu\text{m}$

Μαζί με τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ρευστότητας των ενεμάτων, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν και τα αποτελέσματα των μετρήσεων της σταθερότητας, προκειμένου να προκύψει ένα συνολικό συμπέρασμα για την επάρκεια ή όχι μιας σύνθεσης. Οι μετρήσεις της σταθερότητας αφορούν την μέτρηση του ποσοστού της εξίδρωσης δύο ογκομετρικών κυλίνδρων 100ml μετά από 2hr , με αποδεκτό όριο μέχρι 5%.

Πίνακας 4: Χρόνοι ροής – Ποσοστά Εξίδρωσης – Δείκτης ρευστότητας συνθέσεων ενεμάτων με ποζολάνη

| A/A | Όνομα | Ημερομηνία παρασκευής | Μέση Εξίδρωση | Κριτήριο IV | Κόνος 4,7 mm (100ml) | Κόνος 3 mm (100ml) | Κόνος 4,7 mm (500ml) | Κριτήριο I | Κόνος 3 mm (500ml) | Κόνος 4,7 mm (1000ml) | Κριτήριο II | Fluidity factor (mm/s) | Κριτήριο III | Συμπέρασμα |
|-----|------------------------------|-----------------------|---------------|-------------|----------------------|--------------------|----------------------|------------|--------------------|-----------------------|-------------|------------------------|--------------|------------|
| 1 | <u>N90P10W90SPL</u> 0,75 | 12/4/2017 | 1,50% | Επαρκής | 3,8 | 18,21 | 16,81 | Επαρκής | 108,89 | 34,74 | Επαρκής | 776,89 | Άκυρη | Άκυρη |
| 2 | <u>N63P7C30W80SPL</u> 0.75 | 26/4/2017 | 4,25% | Επαρκής | 4,3 | 18,89 | 24,85 | Επαρκής | 107,07 | 55,06 | Επαρκής | 748,92 | Άκυρη | Άκυρη |
| 3 | <u>N63P7C30W95SPL</u> 0.75 | 12/4/2017 | 9,50% | Άκυρη | 3,45 | 9,76 | 15,86 | Επαρκής | 56,72 | 33,87 | Επαρκής | 1449,50 | Επαρκής | Άκυρη |
| 4 | <u>N63P7C30W82.5SPL</u> 0.75 | 19/5/2017 | 6,00% | Άκυρη | 4,33 | 15,45 | 23,26 | Επαρκής | 85,65 | 52,92 | Επαρκής | 915,67 | Άκυρη | Άκυρη |
| 5 | <u>N63P7C30W87.5SPL</u> 0.75 | 22/5/2017 | 3,25% | Επαρκής | 4,4 | 15 | 24,2 | Επαρκής | 91 | 55 | Επαρκής | 943,14 | Άκυρη | Άκυρη |

Πίνακας 5: Χρόνοι ροής – Ποσοστά Εξίδρωσης – Δείκτης ρευστότητας συνθέσεων ενεμάτων NHL 5: 90% Clay: 10%

| A/A | Όνομα | Ημερομηνία παρασκευής | Μέση Εξίδρωση | Κριτήριο IV | Κόνος 4,7 mm (100ml) | Κόνος 3 mm (100ml) | Κόνος 4,7 mm (500ml) | Κριτήριο I | Κόνος 3 mm (500ml) | Κόνος 4,7 mm (1000ml) | Κριτήριο II | Fluidity factor (mm/s) | Κριτήριο III | Συμπέρασμα |
|-----|-------------------|-----------------------|---------------|-------------|----------------------|--------------------|----------------------|------------|--------------------|-----------------------|-------------|------------------------|--------------|----------------|
| 23 | <u>N90C10W75</u> | 25/7/2017 | 1,36% | Επαρκής | 11,52 | 53,64 | 77,19 | Άκυρη | 422,1 | - | Άκυρη | 263,74 | Άκυρη | Άκυρη |
| 24 | <u>N90C10W80</u> | 15/5/2017 | 1,75% | Επαρκής | 6,39 | 28,14 | 35,69 | Επαρκής | 190,28 | 88,46 | Άκυρη | 502,74 | Άκυρη | Άκυρη |
| 25 | <u>N90C10W85</u> | 15/5/2017 | 3,25% | Επαρκής | 4,69 | 15,67 | 25,11 | Επαρκής | 97,6 | 57,95 | Επαρκής | 902,81 | Άκυρη | Άκυρη |
| 26 | <u>N90C10W85</u> | 23/6/2017 | 3,00% | Επαρκής | 4,56 | 16,88 | 26,08 | Επαρκής | 101,84 | 58,09 | Επαρκής | 838,10 | Άκυρη | Άκυρη |
| 27 | <u>N90C10W90</u> | 15/5/2017 | 3,75% | Επαρκής | 4,37 | 15,59 | 22,8 | Επαρκής | 84,2 | 53,05 | Επαρκής | 907,45 | Άκυρη | Άκυρη |
| 28 | <u>N90C10W95</u> | 4/7/2017 | 4,75% | Επαρκής | 3,81 | 11,36 | 20,24 | Επαρκής | 64,71 | 44,65 | Επαρκής | 1245,34 | Επαρκής | Επαρκής |
| 29 | <u>N90C10W100</u> | 23/6/2017 | 5,61% | Άκυρη | 3,34 | 9,55 | 18,96 | Επαρκής | 57,96 | 42,08 | Επαρκής | 1481,37 | Επαρκής | Άκυρη |
| 30 | <u>N90C10W105</u> | 4/7/2017 | 5,88% | Άκυρη | 3,5 | 9,45 | 18,19 | Επαρκής | 53,4 | 39,77 | Επαρκής | 1497,05 | Επαρκής | Άκυρη |
| 31 | <u>N90C10W110</u> | 5/7/2017 | 7,73% | Άκυρη | 3,4 | 9,49 | 17,83 | Επαρκής | 53,69 | 39,52 | Επαρκής | 1490,74 | Επαρκής | Άκυρη |
| 32 | <u>N90C10W120</u> | 24/7/2017 | 10,23% | Άκυρη | 2,79 | 8,88 | 16,6 | Επαρκής | 49,17 | 37,56 | Επαρκής | 1593,14 | Επαρκής | Άκυρη |

Πίνακας 6: Χρόνοι ροής – Ποσοστά Εξίδρωσης – Δείκτης ρευστότητας συνθέσεων ενεμάτων NHL 5: 100%

| A/A | Όνομα | Ημερομηνία παρασκευής | Μέση Εξίδρωση | Κριτήριο IV | Κόνος 4,7 mm (100ml) | Κόνος 3 mm (100ml) | Κόνος 4,7 mm (500ml) | Κριτήριο I | Κόνος 3 mm (500ml) | Κόνος 4,7 mm (1000ml) | Κριτήριο II | Fluidity factor (mm/s) | Κριτήριο III | Συμπέρασμα |
|-----|------------------|-----------------------|---------------|-------------|----------------------|--------------------|----------------------|------------|--------------------|-----------------------|-------------|------------------------|--------------|----------------|
| 6 | <u>N100W75</u> | 25/7/2017 | 1,97% | Επαρκής | 9,69 | 42,64 | 62,36 | Άκυρη | 328,07 | 446,5 | Άκυρη | 331,78 | Άκυρη | Άκυρη |
| 7 | <u>N100W80</u> | 10/5/2017 | 1,50% | Επαρκής | 6,5 | 39,1 | 35,3 | Επαρκής | 249,5 | 81,3 | Άκυρη | 361,82 | Άκυρη | Άκυρη |
| 8 | <u>N100W80</u> | 11/5/2017 | 2,00% | Επαρκής | 6,95 | 32,06 | 38,81 | Επαρκής | 205,3 | 106,02 | Άκυρη | 441,27 | Άκυρη | Άκυρη |
| 9 | <u>N100W85</u> | 11/5/2017 | 3,50% | Επαρκής | 5,09 | 17,49 | 27,11 | Επαρκής | 112,82 | 64,63 | Επαρκής | 808,87 | Άκυρη | Άκυρη |
| 10 | <u>N100W85</u> | 22/5/2017 | 3,00% | Επαρκής | 4,87 | 15,59 | 25,53 | Επαρκής | 96,73 | 59,07 | Επαρκής | 907,45 | Άκυρη | Άκυρη |
| 11 | <u>N100W87.5</u> | 22/5/2017 | 3,75% | Επαρκής | 4,58 | 14,39 | 23,61 | Επαρκής | 85,41 | 51,83 | Επαρκής | 983,12 | Επαρκής | Επαρκής |
| 12 | <u>N100W90</u> | 10/5/2017 | 2,75% | Επαρκής | 3,89 | 14,45 | 23,38 | Επαρκής | 88,08 | 53,49 | Επαρκής | 979,04 | Άκυρη | Άκυρη |
| 13 | <u>N100W92.5</u> | 5/7/2017 | 4,75% | Επαρκής | 3,83 | 12,11 | 20,65 | Επαρκής | 66,2 | 45,6 | Επαρκής | 1168,22 | Επαρκής | Επαρκής |
| 14 | <u>N100W95</u> | 22/5/2017 | 5,25% | Άκυρη | 3,7 | 10,48 | 19,85 | Επαρκής | 67,01 | 45,08 | Επαρκής | 1349,91 | Επαρκής | Άκυρη |
| 15 | <u>N100W100</u> | 11/5/2017 | 6,35% | Άκυρη | 3,98 | 10,82 | 19,53 | Επαρκής | 62,52 | 44,12 | Επαρκής | 1307,50 | Επαρκής | Άκυρη |
| 16 | <u>N100W105</u> | 7/7/2017 | 6,47% | Άκυρη | 3,32 | 9,88 | 18,77 | Επαρκής | 56,94 | 41,16 | Επαρκής | 1431,89 | Επαρκής | Άκυρη |
| 17 | <u>N100W110</u> | 5/7/2017 | 6,73% | Άκυρη | 3,15 | 9,14 | 18,08 | Επαρκής | 51,43 | 36,14 | Επαρκής | 1547,82 | Επαρκής | Άκυρη |
| 18 | <u>N100W120</u> | 25/7/2017 | 10,95% | Άκυρη | 2,92 | 8,32 | 16,51 | Επαρκής | 47,39 | 37,41 | Επαρκής | 1700,37 | Επαρκής | Άκυρη |
| 19 | <u>N100W130</u> | 19/7/2017 | 15,66% | Άκυρη | 2,92 | 8,55 | 16,85 | Επαρκής | 51,41 | 37,39 | Επαρκής | 1654,63 | Επαρκής | Άκυρη |
| 20 | <u>N100W150</u> | 19/7/2017 | 14,00% | Άκυρη | 2,4 | 7,65 | 15,51 | Επαρκής | 44,39 | 34,32 | Επαρκής | 1849,29 | Επαρκής | Άκυρη |
| 21 | <u>N100W170</u> | 19/7/2017 | 31,00% | Άκυρη | 2,81 | 7,19 | 15,53 | Επαρκής | 33,25 | 34,49 | Επαρκής | 1967,61 | Επαρκής | Άκυρη |
| 22 | <u>N100W190</u> | 19/7/2017 | 37,62% | Άκυρη | 2,4 | 7,18 | 15,18 | Επαρκής | 42,39 | 33,45 | Επαρκής | 1970,35 | Επαρκής | Άκυρη |

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν για την σύνθεση ενέματος NHL 5: 100% είναι τα εξής:

- I. το ένεμα αποκτά επαρκή ρευστότητα σύμφωνα με τα Κριτήρια I και II που αφορούν τον κώνο διάμετρου στομίου 4,7mm από τον λόγο $W/S=0,80$
- II. σύμφωνα με τα Κριτήριο III που αφορά τον κώνο διαμέτρου στομίου 3mm επαρκή ρευστότητα έχουν τα ενέματα από λόγο $W/S=0,875$ και πάνω. Είναι συνδυαστικό κριτήριο ρευστότητας και διεισδυτικότητας του ενέματος, το οποίο υποδηλώνει ότι το ένεμα πρέπει να ικανοποιεί, πέρα από την κριτήρια διεισδυτικότητας, και μία συγκεκριμένη τιμή ρευστότητας προκειμένου να διεισδύει στο επιλεγμένο ελάχιστο ονομαστικό πλάτος ρωγμής (στην προκειμένη $W_{nom}=175\mu m$)
- III. Οι συνθέσεις με λόγο W/S ίσο ή μικρότερο με 0,925 ικανοποιούν το κριτήριο της εξίδρωσης

Σημειώνεται σε αυτό το σημείο, ότι στην σύνθεση NHL 5: 100% $W/S=0,9$ η μέτρηση του χρόνου ροής, στον παραπάνω πίνακα πρέπει να επαναληφθεί διότι. Η ανάγκη επανάληψης της μέτρησης προκύπτει από το γεγονός ότι ο χρόνος ροής για $W/S=0,875$ είναι μεγαλύτερος από ότι για $W/S=0,9$, κάτι το οποίο είναι μη αναμενόμενο. Επομένως, θεωρήθηκε ότι είναι επαρκής αυτή η σύνθεση τόσο στα κριτήρια ρευστότητας όσο και σταθερότητας, πράγμα που αποδεικνύεται και από τις μετρήσεις που παρουσιάζονται στον Πίνακα 11, που αφορούν τα ενέματα που εν τέλει εφαρμόστηκαν στους τοιχίσκους και έχουν ικανοποιητική ρευστότητα καθώς και σταθερότητα. Στους Πίνακες 4-7 οι τιμές που είναι με γαλάζιο χρώμα χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης και επαναλήψεων.

Στον Πίνακα 4 είναι οι συνθέσεις που περιείχαν ποζολάνη καθώς και χρήση υπερρευστοποιητή CHEM SPL. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι οι (2) και (3) έχουν παρασκευαστεί με ακοσκίνιστο πηλό και (4) και (5) με κοσκινισμένο με την χρήση κλάσματος μικρότερου των 63 μm . Στην σύνθεση (4) με $W/S=0,825$ παρατηρείται μεγαλύτερη εξίδρωση από ότι στην σύνθεση με $W/S=0,875$, πράγμα που σημαίνει ότι πρέπει να επαναληφθεί η μέτρηση. Το ίδιο πρέπει να γίνει και στις μετρήσεις των χρόνων αφού όσο αυξάνεται ο λόγος W/S κανονικά θα έπρεπε να μειώνονται οι χρόνοι ροής ενώ εδώ υπάρχει μια μικρή αύξηση. Όπως έχει τονιστεί και παραπάνω, οι μετρήσεις του χρόνου είναι πολύ ευαίσθητες, διότι αφορούν στο πάτημα ενός κουμπιού (π.χ. καθυστερήσεις στο πάτημα του χρονοδιακόπτη).

Πίνακας 7: Χρόνοι ροής – Ποσοστά Εξίδρωσης – Δείκτης ρευστότητας συνθέσεων ενεμάτων NHL 5: 80% Clay: 20%

| A/A | Όνομα | Ημερομηνία παρασκευής | Μέση Εξίδρωση | Κριτήριο IV | Κόνος 4,7 mm (100ml) | Κόνος 3 mm (100ml) | Κόνος 4,7 mm (500ml) | Κριτήριο I | Κόνος 3 mm (500ml) | Κόνος 4,7 mm (1000ml) | Κριτήριο II | Fluidity factor (mm/s) | Κριτήριο III | Συμπέρασμα |
|-----|--------------------------------------|-----------------------|---------------|-------------|----------------------|--------------------|----------------------|------------|--------------------|-----------------------|-------------|------------------------|--------------|------------|
| 33 | <u>N</u> 80 <u>C</u> 20 <u>W</u> 75 | 24/7/2017 | 1,6% | Επαρκής | 0 | 0 | 0 | Επαρκής | 0 | - | Άκυρη | 0 | Άκυρη | Άκυρη |
| 34 | <u>N</u> 80 <u>C</u> 20 <u>W</u> 75 | 16/5/2017 | 3,5% | Επαρκής | 6,14 | 28,57 | 34,46 | Επαρκής | 294,03 | 91,87 | Άκυρη | 495,17 | Άκυρη | Άκυρη |
| 35 | <u>N</u> 80 <u>C</u> 20 <u>W</u> 80 | 16/5/2017 | 4% | Επαρκής | 4,82 | 16,65 | 25,97 | Επαρκής | 105,29 | 61,73 | Επαρκής | 849,68 | Άκυρη | Άκυρη |
| 36 | <u>N</u> 80 <u>C</u> 20 <u>W</u> 85 | 16/5/2017 | 4,75% | Επαρκής | 4,45 | 12,97 | 22,78 | Επαρκής | 82,99 | 52,85 | Επαρκής | 1090,76 | Επαρκής | Επαρκής |
| 37 | <u>N</u> 80 <u>C</u> 20 <u>W</u> 90 | 19/5/2017 | 6% | Άκυρη | 3,86 | 12,43 | 21,33 | Επαρκής | 74,52 | 49,46 | Επαρκής | 1138,14 | Επαρκής | Άκυρη |
| 38 | <u>N</u> 80 <u>C</u> 20 <u>W</u> 95 | 23/6/2017 | 6,19% | Άκυρη | 3,57 | 12,04 | 20,59 | Επαρκής | 69,19 | | Επαρκής | 1175,01 | Επαρκής | Άκυρη |
| 39 | <u>N</u> 80 <u>C</u> 20 <u>W</u> 100 | 7/7/2017 | 7,44% | Άκυρη | 3,18 | 10,46 | 18,67 | Επαρκής | 60,01 | 42,68 | Επαρκής | 1352,50 | Επαρκής | Άκυρη |
| 40 | <u>N</u> 80 <u>C</u> 20 <u>W</u> 120 | 24/7/2017 | 8,17% | Άκυρη | 2,8 | 8,27 | 16,75 | Επαρκής | 49,04 | 37,85 | Επαρκής | 1711,34 | Επαρκής | Άκυρη |
| 41 | <u>N</u> 80 <u>C</u> 20 <u>W</u> 130 | 19/7/2017 | 16,27% | Άκυρη | 3,06 | 8,24 | 16,32 | Επαρκής | 47,47 | 36,98 | Επαρκής | 1716,88 | Επαρκής | Άκυρη |
| 42 | <u>N</u> 80 <u>C</u> 20 <u>W</u> 170 | 19/7/2017 | 32,43% | Άκυρη | 2,87 | 7,59 | 15,39 | Επαρκής | 42,04 | 34,22 | Επαρκής | 1863,91 | Επαρκής | Άκυρη |
| 43 | <u>N</u> 80 <u>C</u> 20 <u>W</u> 190 | 20/7/2017 | 60,30% | Άκυρη | 2,73 | 7,5 | 15,21 | Επαρκής | 42,81 | 34,70 | Επαρκής | 1886,28 | Επαρκής | Άκυρη |

Πίνακας 8: Χρόνοι ροής – Ποσοστά Εξίδρωσης – Δείκτης ρευστότητας συνθέσεων ενεμάτων NHL 5: 70% Clay: 30% (Πρώτη η υδραυλική άσβεστος στην ανάμιξη)

| A/A | Όνομα | Ημερομηνία παρασκευής | Μέση Εξίδρωση | Κριτήριο IV | Κόνος 4,7 mm (100ml) | Κόνος 3 mm (100ml) | Κόνος 4,7 mm (500ml) | Κριτήριο I | Κόνος 3 mm (500ml) | Κόνος 4,7 mm (1000ml) | Κριτήριο II | Fluidity factor (mm/s) | Κριτήριο III | Συμπέρασμα |
|-----|--------------------------|-----------------------|---------------|-------------|----------------------|--------------------|----------------------|------------|--------------------|-----------------------|-------------|------------------------|--------------|------------|
| 44 | <u>N70C30W</u> 70 | 24/7/2017 | 1,73% | Επαρκής | 22,28 | 154,08 | - | Άκυρη | 1981,17 | - | Άκυρη | 91,82 | Άκυρη | Άκυρη |
| 45 | <u>N70C30W</u> 75 | 19/5/2017 | 2,50% | Επαρκής | 9,15 | 62,8 | 59,29 | Άκυρη | 434,92 | 157,71 | Άκυρη | 225,27 | Άκυρη | Άκυρη |
| 46 | <u>N70C30W</u> 80 | 18/5/2017 | 3,25% | Επαρκής | 5,9 | 27,8 | 35,4 | Επαρκής | 181,5 | 90,2 | Άκυρη | 508,89 | Άκυρη | Άκυρη |
| 47 | <u>N70C30W</u> 85 | 18/5/2017 | 4,25% | Επαρκής | 4,2 | 19,2 | 27,7 | Επαρκής | 122,2 | 67,3 | Επαρκής | 736,83 | Άκυρη | Άκυρη |
| 48 | <u>N70C30W</u> 85 | 22/5/2017 | 4,25% | Επαρκής | 4,76 | 19,1 | 27,89 | Επαρκής | 127,55 | 65,87 | Επαρκής | 740,69 | Άκυρη | Άκυρη |
| 49 | <u>N70C30W</u> 90 | 19/5/2017 | 5,75% | Άκυρη | 3,9 | 13,57 | 22,85 | Επαρκής | 87,07 | 52,48 | Επαρκής | 1042,53 | Επαρκής | Άκυρη |
| 50 | <u>N70C30W</u> 90 | 22/5/2017 | 5,00% | Επαρκής | 3,78 | 14,65 | 22,44 | Επαρκής | 84,18 | 51,95 | Επαρκής | 965,67 | Άκυρη | Άκυρη |
| 51 | <u>N70C30W</u> 95 | 5/7/2017 | 5,25% | Άκυρη | 3,72 | 11,68 | 21,21 | Επαρκής | 65,99 | 50,14 | Επαρκής | 1211,22 | Επαρκής | Άκυρη |
| 52 | <u>N70C30W</u> 100 | 5/7/2017 | 7,48% | Άκυρη | 3,65 | 10,61 | 19,61 | Επαρκής | 60,07 | 45,27 | Επαρκής | 1333,37 | Επαρκής | Άκυρη |
| 53 | <u>N70C30W</u> 110 | 5/7/2017 | 9,68% | Άκυρη | 3,32 | 9,28 | 18,14 | Επαρκής | 53,29 | 40,33 | Επαρκής | 1524,47 | Επαρκής | Άκυρη |
| 54 | <u>N70C30W</u> 120 | 7/7/2017 | 14,04% | Άκυρη | 2,81 | 8,63 | 16,74 | Επαρκής | 51,01 | 37,26 | Επαρκής | 1639,29 | Επαρκής | Άκυρη |
| 55 | <u>N70C30W</u> 130 | 19/7/2017 | 20,89% | Άκυρη | 2,5 | 8,305 | 15,96 | Επαρκής | 47,19 | 35,53 | Επαρκής | 1703,44 | Επαρκής | Άκυρη |
| 56 | <u>N70C30W</u> 150 | 24/7/2017 | 11,13% | Άκυρη | 2,98 | 8,24 | 17,14 | Επαρκής | 49,70 | 39,61 | Επαρκής | 1716,88 | Επαρκής | Άκυρη |
| 57 | <u>N70C30W</u> 170 | 19/7/2017 | 35,00% | Άκυρη | 2,59 | 7,67 | 15,14 | Επαρκής | 46,28 | 34,14 | Επαρκής | 1844,47 | Επαρκής | Άκυρη |
| 58 | <u>N70C30W</u> 190 | 20/7/2017 | 61,50% | Άκυρη | 2,27 | 7,33 | 14,79 | Επαρκής | 42,50 | 32,99 | Επαρκής | 1930,03 | Επαρκής | Άκυρη |
| 59 | <u>N70C30W85SPL</u> 0.75 | 22/5/2017 | 7,25% | Άκυρη | 3,58 | 11,23 | 20,07 | Επαρκής | 67,19 | 45,03 | Επαρκής | 1259,76 | Επαρκής | Άκυρη |

Πίνακας 9: Χρόνοι ροής – Ποσοστά Εξίδρωσης – Δείκτης ρευστότητας συνθέσεων ενεμάτων Clay: 30% NHL 5: 70% (Πρώτος ο πηλός στην ανάμιξη)

| A/A | Όνομα | Ημερομηνία παρασκευής | Μέση Εξίδρωση | Κριτήριο IV | Κόνος 4,7 mm (100ml) | Κόνος 3 mm (100ml) | Κόνος 4,7 mm (500ml) | Κριτήριο I | Κόνος 3 mm (500ml) | Κόνος 4,7 mm (1000ml) | Κριτήριο II | Fluidity factor (mm/s) | Κριτήριο III | Συμπέρασμα |
|-----|------------|-----------------------|---------------|-------------|----------------------|--------------------|----------------------|------------|--------------------|-----------------------|-------------|------------------------|--------------|------------|
| 60 | C30N70W90 | 14/7/2017 | 3,11% | Επαρκής | 4,8 | 18,54 | 25,75 | Επαρκής | 106,49 | 62,42 | Επαρκής | 763,06 | Άκορη | Άκορη |
| 61 | C30N70W100 | 14/7/2017 | 4,25% | Επαρκής | 3,7 | 11,63 | 21,51 | Επαρκής | 67,72 | 51,4 | Επαρκής | 1216,43 | Επαρκής | Επαρκής |
| 62 | C30N70W110 | 14/7/2017 | 5,00% | Επαρκής | 3,77 | 11,01 | 19,86 | Επαρκής | 64,7 | 47,45 | Επαρκής | 1284,93 | Επαρκής | Επαρκής |
| 63 | C30N70W120 | 14/7/2017 | 6,61% | Άκορη | 3,38 | 9,1 | 18,19 | Επαρκής | 43,13 | | Επαρκής | 1554,63 | Επαρκής | Άκορη |

Πίνακας 10: Χρόνοι ροής – Ποσοστά Εξίδρωσης – Δείκτης ρευστότητας συνθέσεων ενεμάτων Clay: 100%

| A/A | Όνομα | Ημερομηνία παρασκευής | Μέση Εξίδρωση | Κριτήριο IV | Κόνος 4,7 mm (100ml) | Κόνος 3 mm (100ml) | Κόνος 4,7 mm (500ml) | Κριτήριο I | Κόνος 3 mm (500ml) | Κόνος 4,7 mm (1000ml) | Κριτήριο II | Fluidity factor (mm/s) | Κριτήριο III | Συμπέρασμα |
|-----|----------|-----------------------|---------------|-------------|----------------------|--------------------|----------------------|------------|--------------------|-----------------------|-------------|------------------------|--------------|------------|
| 64 | C100W80 | 20/7/2017 | 1,99% | Επαρκής | 4,57 | 18,49 | 27,89 | Επαρκής | 114,96 | 78,24 | Άκορη | 765,12 | Άκορη | Άκορη |
| 65 | C100W100 | 25/7/2017 | 2,00% | Επαρκής | 4,1 | 14,85 | 23,41 | Επαρκής | 84,73 | 58,3 | Επαρκής | 952,67 | Άκορη | Άκορη |
| 66 | C100W100 | 19/7/2017 | 2,13% | Επαρκής | 3,45 | 10,98 | 20,17 | Επαρκής | 64,59 | 53,28 | Επαρκής | 1288,44 | Επαρκής | Επαρκής |
| 67 | C100W120 | 25/7/2017 | 14,25% | Άκορη | 3 | 8,37 | 16,91 | Επαρκής | 49,93 | 38,01 | Επαρκής | 1690,22 | Επαρκής | Άκορη |
| 68 | C100W130 | 20/7/2017 | 27,50% | Άκορη | 2,91 | 8,00 | 16,22 | Επαρκής | 48,63 | 37,11 | Επαρκής | 1769,27 | Επαρκής | Άκορη |
| 69 | C100W170 | 25/7/2017 | 39,75% | Άκορη | 2,4 | 7,24 | 16,21 | Επαρκής | 42,71 | 37,12 | Επαρκής | 1954,02 | Επαρκής | Άκορη |

Πίνακας 11: Χρόνοι ροής – Ποσοστά Εξίδρωσης – Δείκτης ρευστότητας συνθέσεων ενεμάτων NHL 5: 100% W/S: 0,9 (σύνθεση που χρησιμοποιήθηκε στους τοιχίσκους)

Τοιχίσκοι

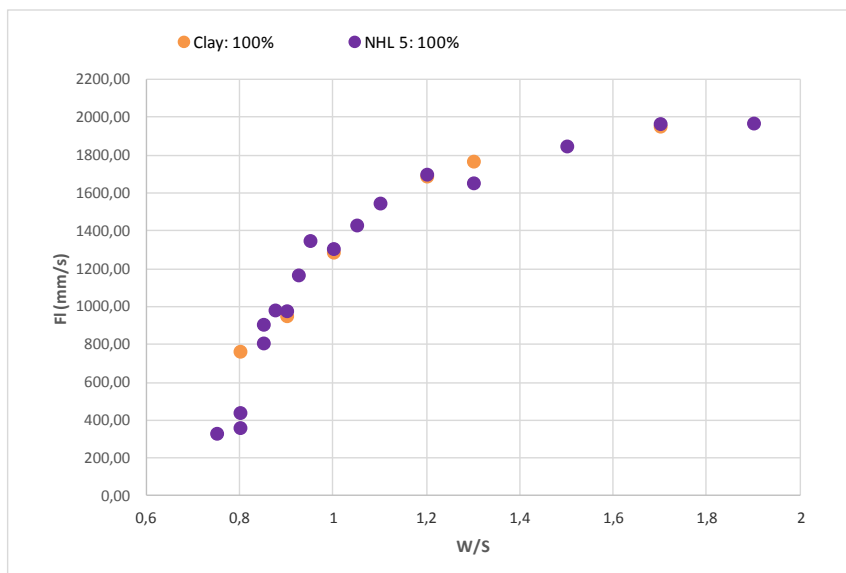
| A/A | Όνομα | Ημερομηνία παρασκευής | Μέση Εξίδρωση | Κριτήριο IV | Κόνος 4,7 mm (100ml) | Κόνος 3 mm (100ml) | Κόνος 4,7 mm (500ml) | Κριτήριο I | Κόνος 3 mm (500ml) | Κόνος 4,7 mm (1000ml) | Κριτήριο II | Fluidity factor (mm/s) | Κριτήριο III | Συμπέρασμα |
|-----|--------------------------|-----------------------|---------------|-------------|----------------------|--------------------|----------------------|------------|--------------------|-----------------------|-------------|------------------------|--------------|------------|
| 1 | <u>N</u> 100 <u>W</u> 90 | 24/5/2017 | 4,25% | Επαρκής | 3,95 | 13,19 | 20,17 | Επαρκής | 95,02 | 43,57 | Επαρκής | 1072,56 | Επαρκής | Επαρκής |
| 2 | <u>N</u> 100 <u>W</u> 90 | 24/5/2017 | 4,75% | Επαρκής | 4,18 | 12,75 | 21,79 | Επαρκής | 76,72 | 48,2 | Επαρκής | 1109,58 | Επαρκής | Επαρκής |
| 3 | <u>N</u> 100 <u>W</u> 90 | 25/5/2017 | 4,25% | Επαρκής | 3,77 | 12,82 | 20,56 | Επαρκής | 72,49 | 44,41 | Επαρκής | 1103,52 | Επαρκής | Επαρκής |
| 4 | <u>N</u> 100 <u>W</u> 90 | 25/5/2017 | 3,75% | Επαρκής | 4,35 | 13,95 | 23,18 | Επαρκής | 86,22 | 54,3 | Επαρκής | 1014,13 | Επαρκής | Επαρκής |
| 5 | <u>N</u> 100 <u>W</u> 90 | 26/5/2017 | 3,75% | Επαρκής | 4,11 | 13,49 | 21,92 | Επαρκής | 77,17 | 50,35 | Επαρκής | 1048,71 | Επαρκής | Επαρκής |
| 6 | <u>N</u> 100 <u>W</u> 90 | 26/5/2017 | 3,50% | Επαρκής | 3,83 | 13,44 | 21,54 | Επαρκής | 78,02 | 50,95 | Επαρκής | 1052,61 | Επαρκής | Επαρκής |

Πίνακας 12: Χρόνοι ροής – Ποσοστά Εξίδρωσης – Δείκτης ρευστότητας συνθέσεων ενεμάτων NHL 5: 70% Clay: 30% W/S: 0,9 (σύνθεση που χρησιμοποιήθηκε στους τοιχίσκους)

| A/A | Όνομα | Ημερομηνία παρασκευής | Μέση Εξίδρωση | Κριτήριο IV | Κόνος 4,7 mm (100ml) | Κόνος 3 mm (100ml) | Κόνος 4,7 mm (500ml) | Κριτήριο I | Κόνος 3 mm (500ml) | Κόνος 4,7 mm (1000ml) | Κριτήριο II | Fluidity factor (mm/s) | Κριτήριο III | Συμπέρασμα |
|-----|-------------------------------------|-----------------------|---------------|-------------|----------------------|--------------------|----------------------|------------|--------------------|-----------------------|-------------|------------------------|--------------|------------|
| 7 | <u>N</u> 70 <u>C</u> 30 <u>W</u> 90 | 24/5/2017 | 4,75% | Επαρκής | 4,38 | 14,4 | 22,33 | Επαρκής | 78,81 | 49,49 | Επαρκής | 982,44 | Επαρκής | Επαρκής |
| 8 | <u>N</u> 70 <u>C</u> 30 <u>W</u> 90 | 25/5/2017 | 6,00% | Ακυρη | 4,18 | 12,69 | 21,08 | Επαρκής | 76,96 | 46,27 | Επαρκής | 1114,82 | Επαρκής | Ακυρη |
| 9 | <u>N</u> 70 <u>C</u> 30 <u>W</u> 90 | 25/5/2017 | 5,84% | Ακυρη | 4,3 | 14,20 | 21,7 | Επαρκής | 78,8 | 48,5 | Επαρκής | 996,28 | Επαρκής | Ακυρη |
| 10 | <u>N</u> 70 <u>C</u> 30 <u>W</u> 90 | 25/5/2017 | 5,25% | Ακυρη | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 11 | <u>N</u> 70 <u>C</u> 30 <u>W</u> 90 | 26/5/2017 | 6,75% | Ακυρη | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 12 | <u>N</u> 70 <u>C</u> 30 <u>W</u> 90 | 19/6/2017 | 2,51% | Επαρκής | - | 18,41 | - | - | 107,6 | - | - | 768,45 | Ακυρη | Ακυρη |
| 13 | <u>N</u> 70 <u>C</u> 30 <u>W</u> 90 | 19/6/2017 | 4,37% | Επαρκής | - | 12,26 | - | - | 69,2 | - | - | 1153,92 | Επαρκής | Επαρκής |
| 14 | <u>N</u> 70 <u>C</u> 30 <u>W</u> 90 | 19/6/2017 | - | - | - | 13,09 | - | - | 72,24 | - | - | 1080,76 | Επαρκής | Επαρκής |
| 15 | <u>N</u> 70 <u>C</u> 30 <u>W</u> 90 | 19/6/2017 | 4,71% | Επαρκής | - | 14,14 | - | - | 77,93 | - | - | 1000,50 | Επαρκής | Επαρκής |
| 16 | <u>N</u> 70 <u>C</u> 30 <u>W</u> 90 | 19/6/2017 | - | - | - | 13,11 | - | - | 75,03 | - | - | 1079,11 | Επαρκής | Επαρκής |
| 17 | <u>N</u> 70 <u>C</u> 30 <u>W</u> 90 | 19/6/2017 | - | - | - | 13,12 | - | - | 73,74 | - | - | 1078,29 | Επαρκής | Επαρκής |

Και για τους υπόλοιπους πίνακες τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι παρόμοια. Αυτό που κρίνεται σκόπιμο να σημειωθεί είναι ότι στον Πίνακα 8 όπου αφορά την σύνθεση NHL 5: 70% Clay: 30% οριακά η σύνθεση με $W/S= 0,90$ δεν ικανοποιεί το κριτήριο ρευστότητας του δείκτη ρευστότητας. Ωστόσο όπως φαίνεται στον Πίνακα 12 με τα αποτελέσματα των δοκιμών ρευστότητας για τα ενέματα που εφαρμόστηκαν στους τοιχίσκους, τα ίδια κριτήρια για την ίδια σύνθεση ικανοποιούνται για όλες τις δοκιμές. Οι τιμές των μετρήσεων των ρεολογικών (μηχανικών και φυσικών) χαρακτηριστικών διαφέρουν σε εργαστηριακό επίπεδο, σε σχέση με το εργοταξιακό, λόγω του ότι παράγεται μεγαλύτερη ποσότητα. Ωστόσο, η τάξη μεγέθους των αποτελεσμάτων παραμένει η ίδια.

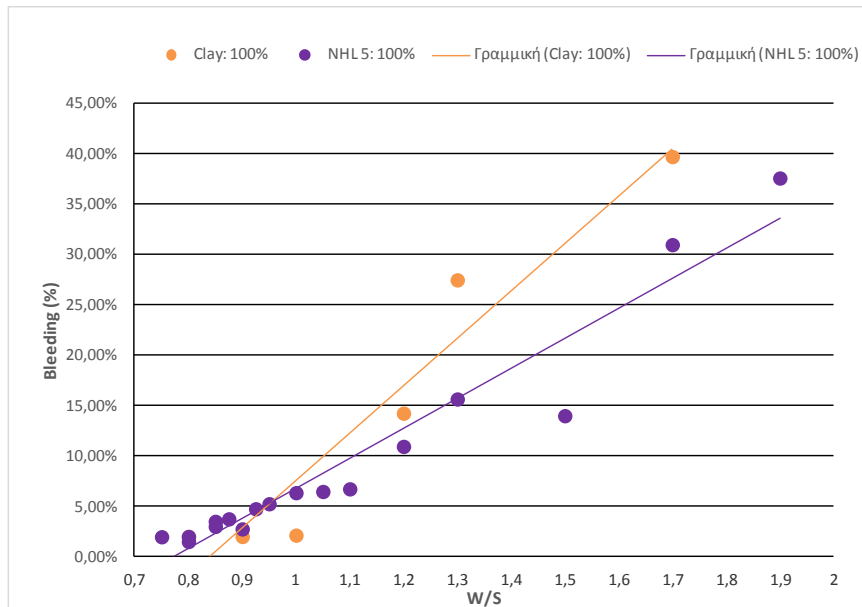
Μετά τις μετρήσεις των χρόνων ροής συγκεκριμένα του κώνου διαμέτρου στομίου 3mm των πρώτων 100ml, κατασκευάζεται η καμπύλη του δείκτη ρευστότητας συναρτήσεως του λόγου W/S . Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ρευστότητα των υλικών είναι η κοκκομετρική τους διαβάθμιση, ο λόγος W/S καθώς και η ειδική επιφάνεια των κόκκων των υλικών. Ο τρόπος και η σειρά ανάμιξης αποτελούν άλλον έναν πολύ βασικό παράγοντα. Η σειρά ανάμιξης καθορίζεται από την κοκκομετρική διαβάθμιση των υλικών, καθώς επιλέγεται να τοποθετηθεί πρώτο το πιο λεπτόκοκκο προκειμένου να διαθέτει επαρκή χρόνο για την αποκροκκίδωση του. Στην προκειμένη περίπτωση λόγω του ότι η NHL 5 είναι πιο λεπτόκοκκη από τον πηλό (σε μικρό βαθμό βέβαια), καθώς επίσης και αποτελούσε την μεγαλύτερη ποσότητα υλικού για όλες τις συνθέσεις, επιλέχθηκε να τοποθετηθεί πρώτη στην ανάμιξη, στην πλειονότητα των αναμίξεων.



Εικόνα 83. Συγκριτικό διάγραμμα δείκτη ρευστότητας συναρτήσεως του λόγου W/S για τις συνθέσεις NHL 5: 100% και Clay: 100%

Για την μελέτη της ρεολογικής συμπεριφοράς των δύο βασικών υλικών των ενεμάτων έγιναν δοκιμές ρευστότητας και σταθερότητας για διάφορους λόγους W/S για τις συνθέσεις NHL 5: 100%. και Πηλό (Clay): 100%. Όπως είναι σαφές από το παραπάνω

διάγραμμα (Εικόνα 83), όσον αφορά την ρευστότητα τα δύο υλικά συμπεριφέρονται το ίδιο μιας και η διασπορά των τιμών του δείκτη ρευστότητας για τους ίδιους λόγους W/S θεωρείται αμελητέα και σε κάποιες περιπτώσεις μηδαμινή. Με αυτόν τον τρόπο, επιβεβαιώνεται και η επιρροή της κοκκομετρίας στα ρεολογικά χαρακτηριστικά των υλικών.



Εικόνα 84. Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστού εξίδρωσης συναρτήσει του λόγου W/S για συνθέσεις ενεμάτων NHL 5: 100% και Clay: 100%

Η ίδια ταύτιση χαρακτηριστικών δεν εμφανίζεται και στις μετρήσεις της εξίδρωσης, που αφορούν την σταθερότητα του ενέματος. Παρόλο που οι παράγοντες που επηρεάζουν την ρευστότητα και την σταθερότητα των ενεμάτων είναι παρόμοιοι (κοκκομετρική διαβάθμιση και λόγος W/S), αυτό που αλλάζει είναι η φύση των επιμέρους υλικών. Οι κόκκοι του πηλού, έχουν την δυνατότητα ανάλογα με τα ορυκτολογικά τους χαρακτηριστικά να δεσμεύουν συγκεκριμένη ποσότητα νερού γύρω τους. Όσο αυξάνεται το ποσοστό νερού στην σύνθεση, αυξάνεται και το πάχος του φιλμ νερού γύρω από τα σωματίδια πηλού, μέχρι ενός σημείου κορεσμού τους. Σύμφωνα με το διάγραμμα της Εικόνα 84 αυτό είναι σαφές μέχρι λόγο W/S ~1,20, όπου η σύνθεση του πηλού εμφανίζει μικρότερη εξίδρωση από ότι αυτή της NHL 5. Από W/S= 1,20 και μετά, φαίνεται ότι ο πηλός έφτασε στο σημείο κορεσμού του, αφού η σύνθεση του εμφανίζει σαφώς μεγαλύτερη εξίδρωση από αυτή της NHL 5. Από το παρακάτω διάγραμμα υποδεικνύονται τα εξής:

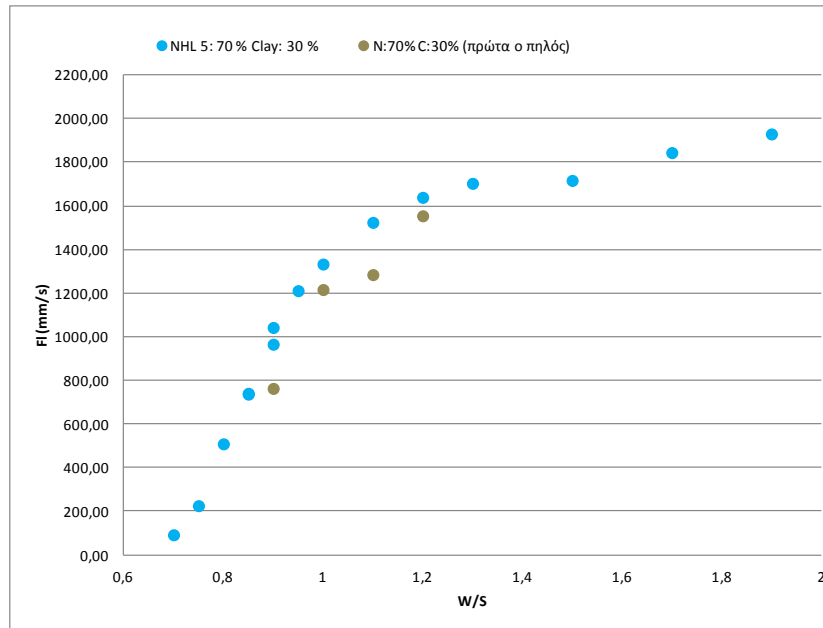
- I. επιβεβαίωση ότι ο πηλός είναι ελαφρώς πιο χονδρόκοκκος από ότι η υδραυλική άσβεστος
- II. όσο αυξάνεται ο λόγος W/S αυξάνεται η εξίδρωση και όσο αυξάνεται το ποσοστό των λεπτόκοκκων μειώνεται
- III. μεγαλύτερη εξάρτηση της εξίδρωσης και των χαρακτηριστικών σταθερότητας των συνθέσεων ενεμάτων παρατηρείται από την ιδιότητα της ειδικής επιφάνειας, η οποία στις έρευνες από [Miltiadou A., 2013, RILEM]

υπεισέρχεται σε εμπειρικούς τύπους για την πρόβλεψη του ποσοστού της εξίδρωσης, καθώς και άλλων στοιχείων σχετικών με την σταθερότητα. Γενικά όσο πιο λεπτόκοκκο είναι το υλικό η ειδική επιφάνεια τείνει να αυξάνεται και να μειώνεται το ποσοστό της εξίδρωσης, κάτι το οποίο παρατηρείται στο παρακάτω διάγραμμα για μεγαλύτερους λόγους W/S.

Επειδή η έρευνα γύρω από το υλικό του πηλού και των ενεμάτων που περιέχουν ποσοστό πηλού βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο, επιλέχθηκε να γίνει διερεύνηση για την σειρά ανάμιξης των υλικών, ανεξάρτητα από το κριτήριο της κοκκομετρίας τους. Σε αυτό συνέβαλε στην δεδομένη περίπτωση ότι η κοκκομετρία των δύο υλικών δεν έχει πολύ μεγάλες διαφορές, καθώς και το ότι η ρεολογική συμπεριφορά των δύο υλικών είναι παρόμοια. Συνεπώς, πέρα από τις συνθέσεις με την NHL 5 πρώτη στην ανάμιξη, παρασκευάστηκαν και συνθέσεις με τον πηλό πρώτα. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί η σύνθεση με NHL 5: 70%-Clay: 30%, με την δεδομένη σειρά ανάμιξης. Η επιλογή της σύνθεσης αυτής οφείλεται στο ότι έχει το μεγαλύτερο ποσοστό πηλού από τις συνθέσεις που παρασκευάστηκαν συνολικά στην παρούσα εργασία. Επομένως, σε αυτήν την περίπτωση, οι όποιες διαφορές στα ρεολογικά χαρακτηριστικά από την μεταβολή της σειράς ανάμιξης θα ήταν πιο έντονες. Κατά την διάρκεια της ανάμιξης αυτό που παρατηρήθηκε ήταν ότι όταν τοποθετήθηκε η NHL 5 σε δεύτερη φάση δημιουργήθηκαν συσσωματώματα καθώς και μεγάλη καθίζηση στον πυθμένα της συσκευής υπερήχων. Αυτό συνέβη τόσο σε εργαστηριακό επίπεδο που παρασκευάζεται μικρότερη ποσότητα, όσο και σε εργοταξιακό, σε ακόμα μεγαλύτερο βαθμό. Το φαινόμενο αυτό εμφανίστηκε πιο έντονο σε εργοταξιακό επίπεδο, λόγω της μεγαλύτερης ποσότητας ενέματος που απαιτείται για την ομογενοποίηση των τοιχίσκων. Μέσω της παραπάνω διερεύνησης, επιβεβαιώθηκε η ορθότητα της απόφασης της χρήσης της NHL 5 ως πρώτο υλικό στην ανάμιξη.



Εικόνα 85. Συσσωματώματα μετά την ανάμιξη των ενεμάτων με την τοποθέτηση του πηλού πρώτα στην ανάμιξη



Εικόνα 86. Συγκριτικό διάγραμμα δείκτη ρευστότητας συναρτήσεως του λόγου W/S για την σύνθεση NHL 5: 70% Clay: 30% με διαφορετική σειρά ανάμιξης

Τα συσσωματώματα σε μία σύνθεση ενέματος, δηλώνουν τον κίνδυνο προβλημάτων διεισδυτικότητας και έμφραξης στην σύνθεση του, και στην ουσία αφορούν σε μη επαρκή σύνθεση. Η Εικόνα 86 απεικονίζει τον δείκτη ρευστότητας συναρτήσεως του λόγου W/S για τις δύο σειρές ανάμιξης για την σύνθεση NHL 5: 70%-Clay: 30%. Οι διαφορές στις τιμές του δείκτη ρευστότητας δεν είναι μεγάλες, όμως η γενική τάση αφορά σε μικρότερους δείκτες ρευστότητας για τους ίδιους λόγους W/S, όταν μπαίνει πρώτος ο πηλός στην ανάμιξη από ότι όταν μπαίνει η NHL 5. Η ποσοστιαία μείωση του δείκτη ρευστότητας για την σύνθεση όπου μπαίνει πρώτα ο πηλός στην ανάμιξη κυμαίνεται από 6-21%. Στο διάγραμμα που απεικονίζεται στην Εικόνα 86 παρατηρείται ότι τα σημεία των μετρήσεων είναι διακριτά πιο κάτω από τις υπόλοιπες συνθέσεις.

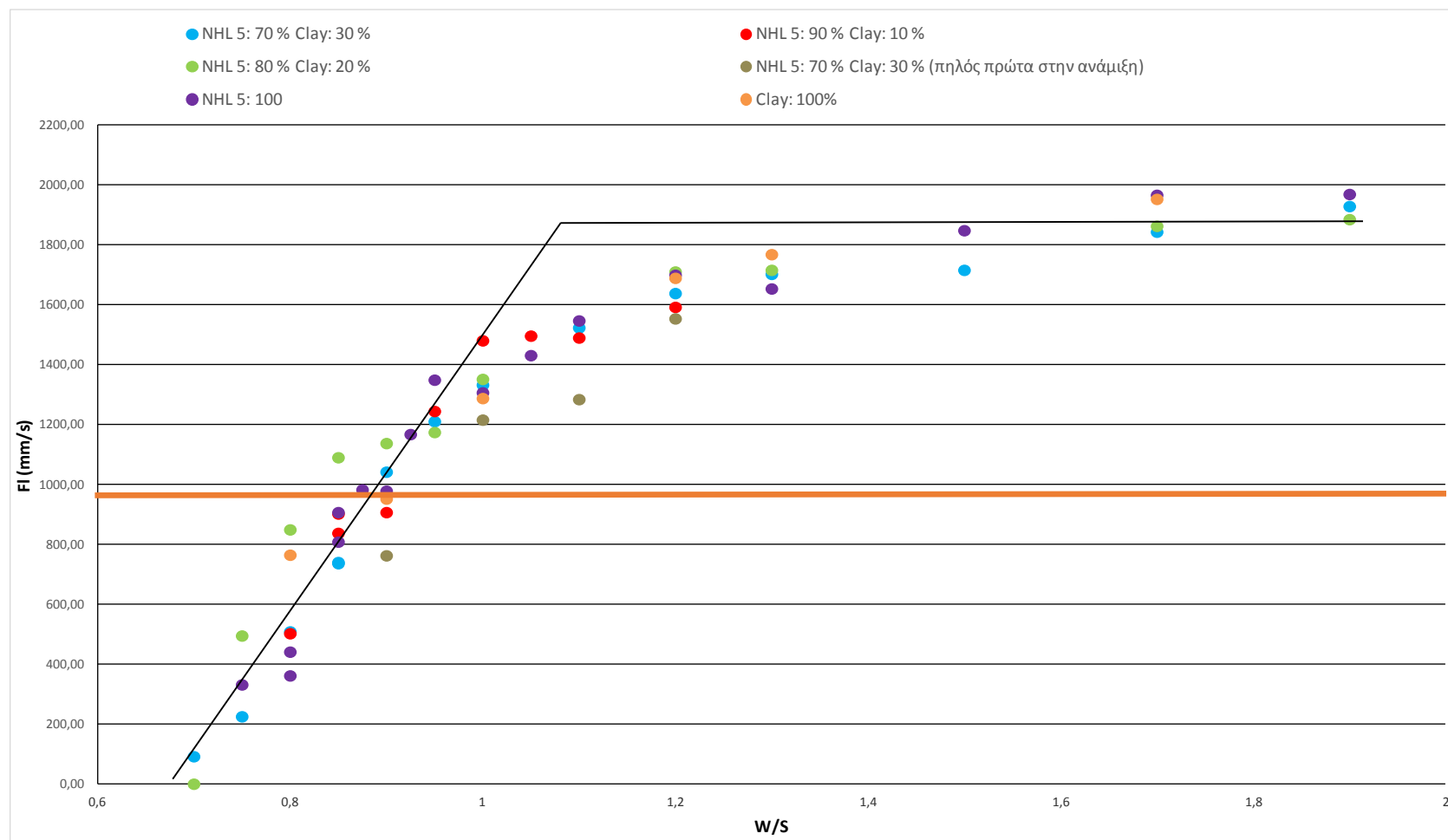
Όσον αφορά την ρευστότητα, προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι συνθέσεις που έχουν πρώτη στην ανάμιξη την NHL 5, ακόμα και αυτή με τον Clay: 100%, παρουσιάζουν πανομοιότυπη ρεολογική συμπεριφορά. Η ρεολογική συμπεριφορά των παραπάνω συνθέσεων έρχεται σε αντίθεση με την ρεολογική συμπεριφορά των συνθέσεων, στις οποίες μπαίνει πρώτα ο πηλός στην ανάμιξη. Παρόλη την παραλληλία των καμπύλων F_I -W/S για τις δύο σειρές ανάμιξης, οι τιμές των μετρήσεων για τις συνθέσεις που είχαν τον πηλό πρώτα στην ανάμιξη είναι εμφανώς πιο κάτω. Γι αυτόν τον λόγο, η διγραμμοποιημένη καμπύλη ρευστότητας F_I -W/S των ενεμάτων, λόγω της πανομοιότυπης κοκκομετρικής διαβάθμισης των δύο υλικών, καθώς και της ίδιας σειράς και τρόπου ανάμιξης τους επιλέγεται να είναι μια μέση καμπύλη που σχηματίζεται από όλες τις συνθέσεις (Εικόνα 87).

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από το συνολικό διάγραμμα της Εικόνα 87 είναι τα εξής:

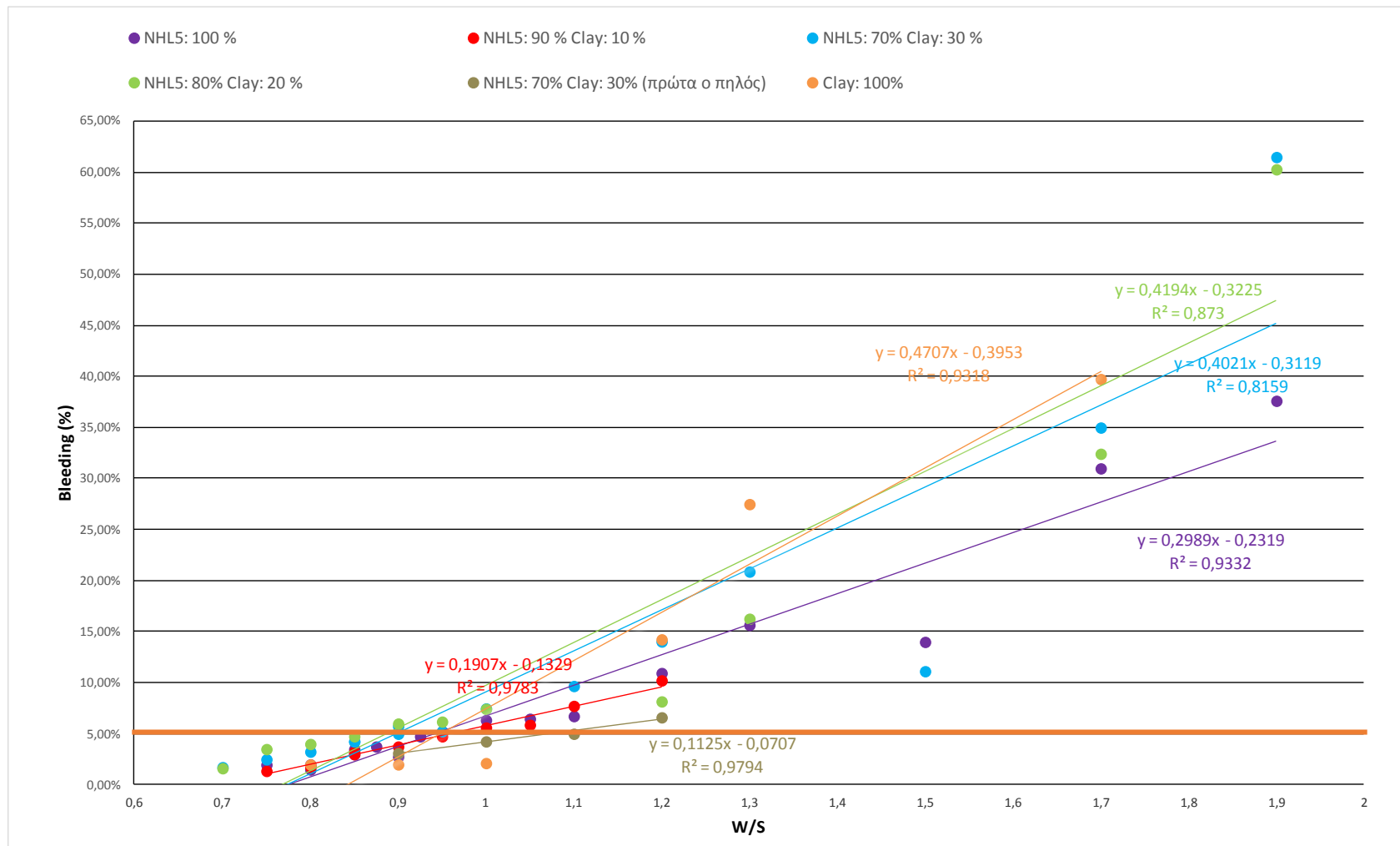
- I. με κόκκινη οριζόντια γραμμή ορίζεται το όριο πάνω από το οποίο εμφανίζεται ο επιθυμητός δείκτης ρευστότητας, από άποψη απαιτήσεων διεισδυτικότητας σε συγκεκριμένο ονομαστικό πλάτος ρωγμών (W_{nom})
- II. από την διγραμμικοποιημένη καμπύλη προκύπτει ότι ο λόγος W/S πάνω από τον οποίο δεν εμφανίζεται ουσιαστική αύξηση του δείκτη ρευστότητας είναι ο $W/S= 1,05-1,1$
- III. ο μέγιστος δείκτης ρευστότητας που μπορεί να επιτευχθεί είναι γύρω στο $Fl \sim 1970$ mm/s. Γενικά, η περιοχή του πλατώ του διγραμμικοποιημένου διάγραμματος δεν είναι επιθυμητή λόγω φαινομένων ασταθειών που εμφανίζονται, όπως είναι η αυξημένη εξίδρωση κι ο διαχωρισμός της στερεής φάσης του ενέματος. Γι αυτό και ορίστηκε αυτή η κόκκινη γραμμή που αποτελεί το κάτω όριο του επιθυμητού δείκτη ρευστότητας.

Το πάνω όριο του δείκτη ρευστότητας καθορίζεται από το διάγραμμα του ποσοστού εξίδρωσης (Bleeding%) συναρτήσεως του λόγου W/S (Εικόνα 88). Το αποδεκτό όριο του ποσοστού εξίδρωσης αφορά 5% σε διάστημα 2hr. Όπως φαίνεται στο παρακάτω συγκριτικό διάγραμμα της Εικόνα 88:

- I. ο λόγος W/S από τον οποίο αρχίζει να ξεπερνιέται το όριο της αποδεκτής εξίδρωσης κυμαίνεται γύρω στο $W/S= 0.925-0.975$.
- II. το πεδίο από το οποίο προκύπτουν επιτυχημένες συνθέσεις ενεμάτων, από άποψη ρευστότητας και σταθερότητας, αφορούν λόγο $W/S= 0,875-0,975$ και σε όρους δείκτη ρευστότητας $Fl= 980-1390$ mm/s.
- III. μέχρι λόγο $W/S= 1,00$ οι μετρήσεις της εξίδρωσης είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους με αμελητέα διαφορά. Για μεγαλύτερους λόγους W/S όμως η διασπορά των τιμών των μετρήσεων εξίδρωσης αυξάνεται διαχωρίζοντας σαφώς τις τιμές της εξίδρωσης ανά τις συνθέσεις. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό του πηλού μέσα στις συνθέσεις των ενεμάτων αυξάνεται και η εξίδρωση, πράγμα που συνάδει τόσο με την φύση του πηλού όσο και με το ότι η υδραυλική άσβεστος είναι πιο λεπτόκοκκη από τον πηλό.



Εικόνα 87. Συνολικό διάγραμμα δείκτη ρευστότητας συναρτήσει του λόγου W/S



Εικόνα 88. Συγκριτικό διάγραμμα ποσοστού εξίδρωσης συναρτήσει του λόγου W/S για όλες τις συνθέσεις ενεμάτων

5.2.4 Δοκιμές Διάτμησης – Διεπιφάνειες

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4.3.6. θα γίνει προσπάθεια να εξηγηθούν τα αποτελέσματα της μέγιστης διατμητικής αντοχής ($\tau_{u,f}$), της ολίσθησης για την οποία επιστρατεύεται η μέγιστη διατμητική αντοχή ($s_{u,f}$) καθώς και της παραμένουσας διατμητικής αντοχής (τ_{res}), σύμφωνα με τις παρακάτω παραμέτρους:

- Την συνδετική-συγκολλητική κονία (δηλαδή σύνθεση ενέματος), όσον αφορά τόσο τις μηχανικές της αντοχές (καμπτική και θλιπτική αντοχή), όσο και των φυσικών ιδιοτήτων τους,
- Τις φυσικοχημικές και μηχανικές ιδιότητες του υποβάθρου, όπως θλιπτική αντοχή, πορώδες κ.α.,
- Την ηλικία ωρίμανσης των σύνθετων δοκιμίων των διεπιφανειών, εξετάστηκαν στις ηλικίες 28 και 90 ημερών,
- Και την επιβαλλόμενη ορθή τάση που ασκείται ταυτόχρονα με την επιβαλλόμενη ολίσθηση, εξετάστηκαν οι τάσεις 0,1 MPa και 0,3 MPa.

Επίσης, θα παρατεθούν οι καμπύλες διατμητικής τάσης-παραμόρφωσης (τ - s) και θα γίνει σύγκριση με τα παραπάνω συμπεράσματα. Θα σχολιαστεί η μεταβολή των στατιστικών στοιχείων, όπως είναι η μέση τιμή, η διασπορά και ο συντελεστής μεταβλητότητας, σύμφωνα τις παραπάνω παραμέτρους. Παρόλα αυτά, δεν θα πρέπει να παραληφθεί να τονιστεί η μεγάλη διασπορά αποτελεσμάτων ίδιων δοκιμίων με όλες τις παραμέτρους σταθερές, ιδιαίτερα για την πιο μικρή θλιπτική τάση, πράγμα που κάνει την εξαγωγή συμπερασμάτων κάπως επισφαλή. Η διασπορά που εμφανίζεται στα αποτελέσματα των δοκιμών είναι ανάλογη με αυτήν που εμφανίζεται σε αντίστοιχες έρευνες στην βιβλιογραφία. Πολλές φορές για να είναι δυνατόν να σχολιασθεί η γενική εικόνα θα χρειαστεί να γίνει σύγκριση των μέσων τιμών των ίδιων δοκιμίων για την ίδια χρονική στιγμή ωρίμανσης και για την ίδια επιβαλλόμενη ορθή θλιπτική τάση.

5.2.4.1 Γενικά στοιχεία

Υλικά δοκιμίων διεπιφανειών κι ιδιότητες τους

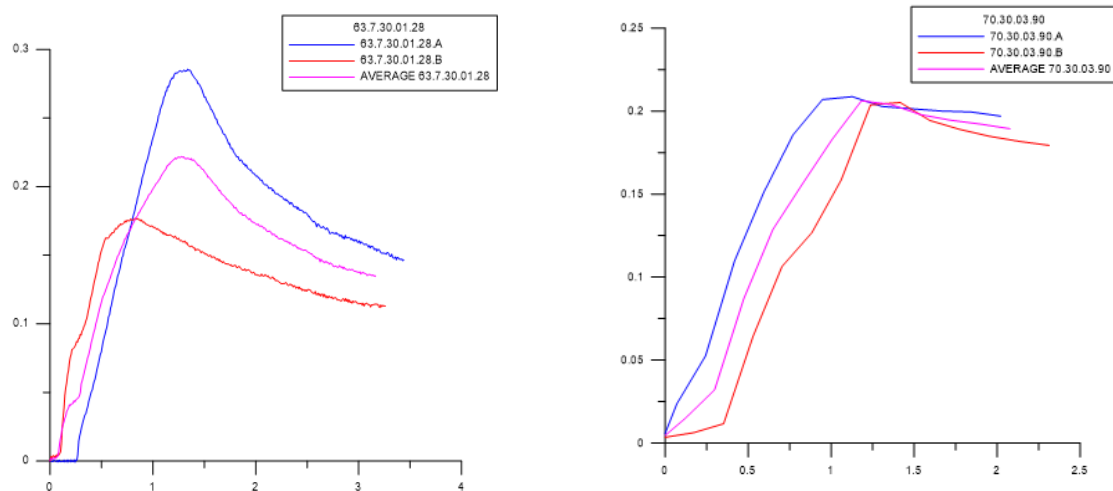
Χρησιμοποιήθηκε ως υπόβαθρο λίθος Σπάρτης με θλιπτική αντοχή $f_{bc}=70\text{MPa}$. Αποτελεί το ίδιο υπόβαθρο που χρησιμοποιήθηκε και για την δόμηση των τοιχίσκων. Επίσης, όπως αναφέρθηκε και στο Πειραματικό Μέρος, χρησιμοποιήθηκαν τρεις συνθέσεις ενεμάτων με τα παρακάτω μηχανικά χαρακτηριστικά:

Πίνακας 13. Συγκεντρωτικός πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών ενεμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στις διεπιφάνειες

| Σύνθεση | 28 ημέρες ωρίμανσης | |
|---------------------------|---------------------|----------------|
| | f_{gc} (MPa) | f_{gt} (MPa) |
| N100W90 | 1,3 | 0,67 |
| N70C30W90 | 0,7 | 0,49 |
| N63P7C30W87,5S0,75 | 0,8 | 0,62 |

Καμπύλες επιστρατευόμενης διατμητικής τάσης-επιβαλλόμενης ολίσθησης

Όσον αφορά τις καμπύλες επιστρατευόμενης διατμητικής αντοχής συναρτήσει της επιβαλλόμενης ολίσθησης, παρατηρείται ότι μέχρι την επίτευξη της μέγιστης διατμητικής αντοχής, η σχέση τους φαίνεται να είναι με αρκετά μεγάλη ακρίβεια γραμμική. Μετά την επίτευξη της μέγιστης διατμητικής αντοχής ακολουθεί ένας φθίνων κλάδος, ο οποίος καταλήγει σε μία τιμή, η οποία αποτελεί την παραμένουσα διατμητική τάση. Η παραμένουσα διατμητική τάση, αφορά την συνεισφορά του μηχανισμού της τριβής μετά την αστοχία της συνάφειας της διεπιφάνειας, σύμφωνα με τον νόμο αστοχίας Mohr-Coulomb ($\tau = \sigma \cdot \tan \varphi + c$). Αναλυτικά, τα αποτελέσματα σε πινακοποιημένη μορφή παρουσιάζονται στο Παράρτημα Γ.



Εικόνα 89. Καμπύλες επιστρατευόμενης διατμητικής τάσης συναρτήσει της επιβαλλόμενης ολίσθησης

Τρόπος Αστοχίας



Εικόνα 90. Τρόπος αστοχίας των σύνθετων δοκιμίων των διεπιφανειών για $\sigma_n = 0,1\text{MPa}$ (αριστερά) και $\sigma_n = 0,3\text{MPa}$ (δεξιά) για 28 ημέρες ωρίμανσης NHL 5: 63% Poz: 7% Clay: 30%(αριστερά), NHL 5: 70% Clay: 30%(μεσαίο), NHL 5: 100%(δεξιά)

Στις 28 ημέρες ωρίμανσης και για ορθή τάση $\sigma_n = 0,1\text{MPa}$ παρατηρούνται διακριτές ρωγμές στις συνθέσεις NHL 5: 63%-Poz: 7%-Clay: 30% και NHL 5: 70%-Clay: 30%. Οι ρωγμές αυτές μπορεί να οφείλονται στην δράση της συστολής ξήρανσης καθώς και

στην εξέλιξη των χημικών αντιδράσεων μεταξύ των υλικών. Εμφανίζεται κατά πλειοψηφία η μορφή αστοχίας Δ.Z, με μόνη εξαίρεση ένα δοκίμιο της σύνθεσης NHL 5: 100%.

Στις 28 ημέρες ωρίμανσης και για ορθή τάση $\sigma_n = 0,3\text{MPa}$ παρατηρούνται διακριτές ρωγμές στις συνθέσεις NHL 5: 63%-Poz: 7%- Clay: 30% και NHL 5: 70%-Clay: 30%. Εμφανίζεται κατά πλειοψηφία η μορφή αστοχίας Δ.Z, με μόνη εξαίρεση ένα δοκίμιο της σύνθεσης NHL 5: 63%-Poz: 7%-Clay: 30%.



Εικόνα 91. Τρόπος αστοχίας των σύνθετων δοκιμίων των διεπιφανειών για $\sigma_n = 0,1\text{MPa}$ και 90 ημέρες ωρίμανσης NHL 5: 63% Poz: 7% Clay: 30%(αριστερά), NHL 5: 70% Clay: 30%(μεσαία), NHL 5: 100%(δεξιά)



Εικόνα 92. Τρόπος αστοχίας των σύνθετων δοκιμίων των διεπιφανειών για $\sigma_n = 0,3\text{MPa}$ και 90 ημέρες ωρίμανσης NHL 5: 63% Poz: 7% Clay: 30%(μεσαία), NHL 5: 70% Clay: 30%(αριστερά), NHL 5: 100%(δεξιά)

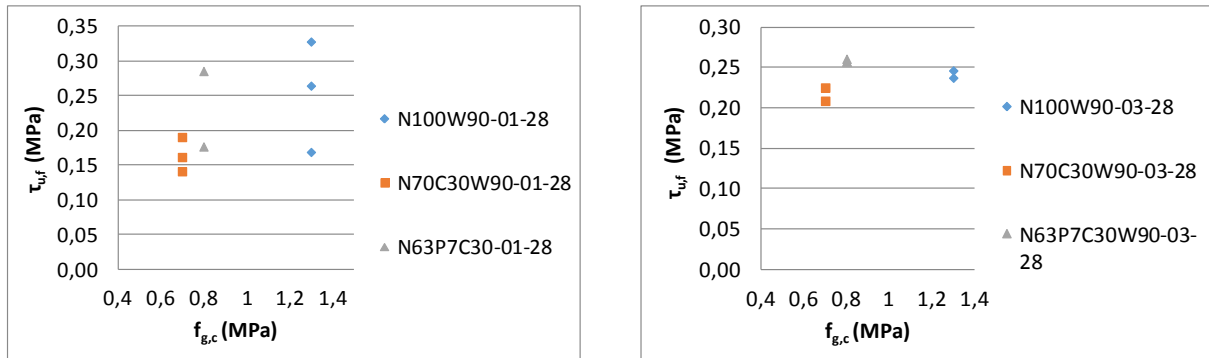
Στις 90 ημέρες ωρίμανσης και για ορθή τάση $\sigma_n = 0,1\text{MPa}$ και $\sigma_n = 0,3\text{MPa}$ παρατηρούνται διακριτές ρωγμές στις συνθέσεις NHL 5: 63%-Poz: 7%-Clay: 30% και NHL 5: 70%-Clay: 30%. Εμφανίζεται μόνο η μορφή αστοχίας Δ.Z, σε όλες τις συνθέσεις.

Για τα ισχυρά υπόβαθρα (όπως είναι αυτό της παρούσας εργασίας) εμφανίζονται τύποι αστοχίας Δ.Z και Z, λόγω της λιγότερο πυκνής δομής που αναπτύσσεται στην διεπιφάνεια υποβάθρου και ενέματος. Η λιγότερη πυκνή δομή σε αυτού του είδους τα ισχυρά υπόβαθρα οφείλεται στο μικρό τους πορώδες, και είναι εμφανής μέσω του εύθρυπτου των αρμών των ενεμάτων καθώς και την μικρορηγμάτωση που υπάρχει.

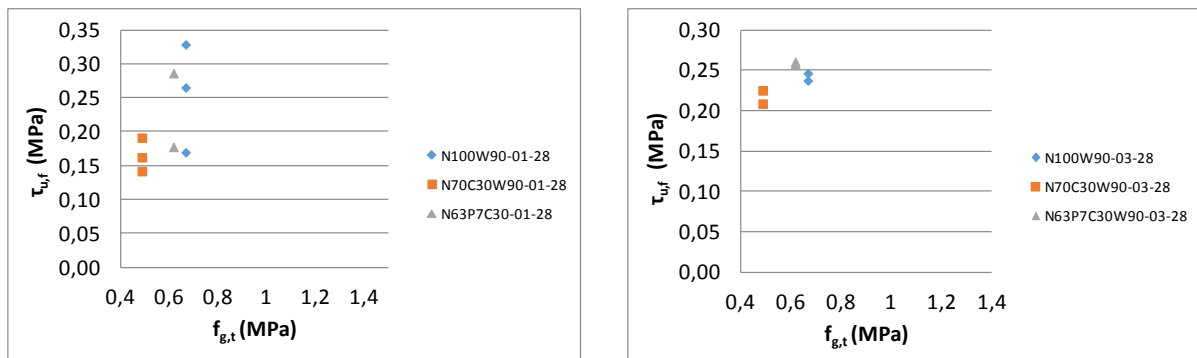
5.2.4.2 Σύνθεση ενέματος

Μέγιστη Διατμητική Τάση $\tau_{u,f}$

Φαίνεται να υπάρχει μια εξάρτηση των μηχανικών ιδιοτήτων των ενεμάτων με την μέγιστη αναπτυσσόμενη διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας. Παρατηρείται τόσο για την θλιπτική αντοχή των ενεμάτων όσο και για την καμπτική. Για την καμπτική αντοχή μάλιστα τα αποτελέσματα τείνουν να έχουν μια πιο ξεκάθαρη γραμμική σχέση σε σχέση με την θλιπτική αντοχή. Αυτή η παρατήρηση είναι λογική αφού η διατμητική και καμπτική αντοχή αποτελούν συνυφασμένες ιδιότητες, επηρεάζονται από τους ίδιους παράγοντες με τον ίδιο τρόπο καθώς επίσης και αποτελούν και οι δύο αρκετά ευαίσθητες ιδιότητες τόσο σε συνθήκες συντήρησης όσο και σε γεωμετρικούς παράγοντες. Αποτελούν και οι δύο τα αδύνατα σημεία της τοιχοποιίας. Κάτι το οποίο είναι ξεκάθαρο επίσης είναι ότι και για τις δύο μηχανικές ιδιότητες των ενεμάτων για την μεγαλύτερη ορθή τάση (0,3MPa) μειώνεται η διασπορά των μετρήσεων της μέγιστης διατμητικής αντοχής και τείνουν περισσότερο στην γραμμική σχέση.



Εικόνα 93. Διάγραμμα μέγιστης διατμητικής τάσης $\tau_{u,f}$ συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής της σύνθεσης των ενεμάτων για τις 28 ημέρες ωρίμανσης (αριστερά για $\sigma_n=0,1\text{MPa}$, δεξιά για $\sigma_n=0,3\text{MPa}$)

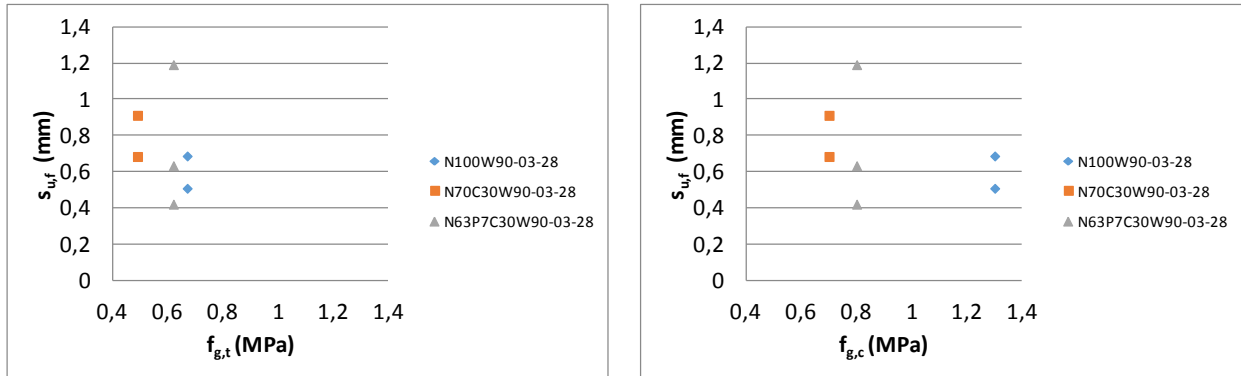


Εικόνα 94. Διάγραμμα μέγιστης διατμητικής τάσης $\tau_{u,f}$ συναρτήσει της καμπτικής αντοχής της σύνθεσης των ενεμάτων για τις 28 ημέρες ωρίμανσης (αριστερά για $\sigma_n=0,1\text{MPa}$, δεξιά για $\sigma_n=0,3\text{MPa}$)

Ολίσθηση $s_{u,f}$

Ακολουθώντας την παραπάνω λογική αποδεικνύεται ότι για τις 28 ημέρες ωρίμανσης και $\sigma_n=0,3\text{MPa}$, η $s_{u,f}$ είναι αντιστρόφως ανάλογη με την καμπτική αντοχή κυρίως, αλλά και με την θλιπτική αντοχή των ενεμάτων. Οι συνθέσεις με χαμηλότερη αντοχή

είναι πιο πλάσιμες από αυτές με τα ισχυρότερα μηχανικά χαρακτηριστικά, επιστρατεύοντας όμως την ίδια διατμητική τάση. Εμφανίζεται καλύτερη συσχέτιση της ολίσθησης για την οποία επιστρατεύεται η μέγιστη διατμητική τάση για σε σχέση με την καμπτική αντοχή. Όμως, και με την θλιπτική αντοχή είναι αρκετά ικανοποιητική η γραμμική προσέγγιση.



Εικόνα 95. Διάγραμμα ολίσθησης $s_{u,f}$ για τις 28 ημέρες ωρίμανσης για $\sigma_n = 0,3 \text{ MPa}$ συναρτήσει της καμπτικής (αριστερά) και θλιπτικής (δεξιά) αντοχή των ενεμάτων

Τύπος Αστοχίας

Όπως παρατηρείται στον συγκεντρωτικό πίνακα με τα αποτελέσματα των δοκιμών:

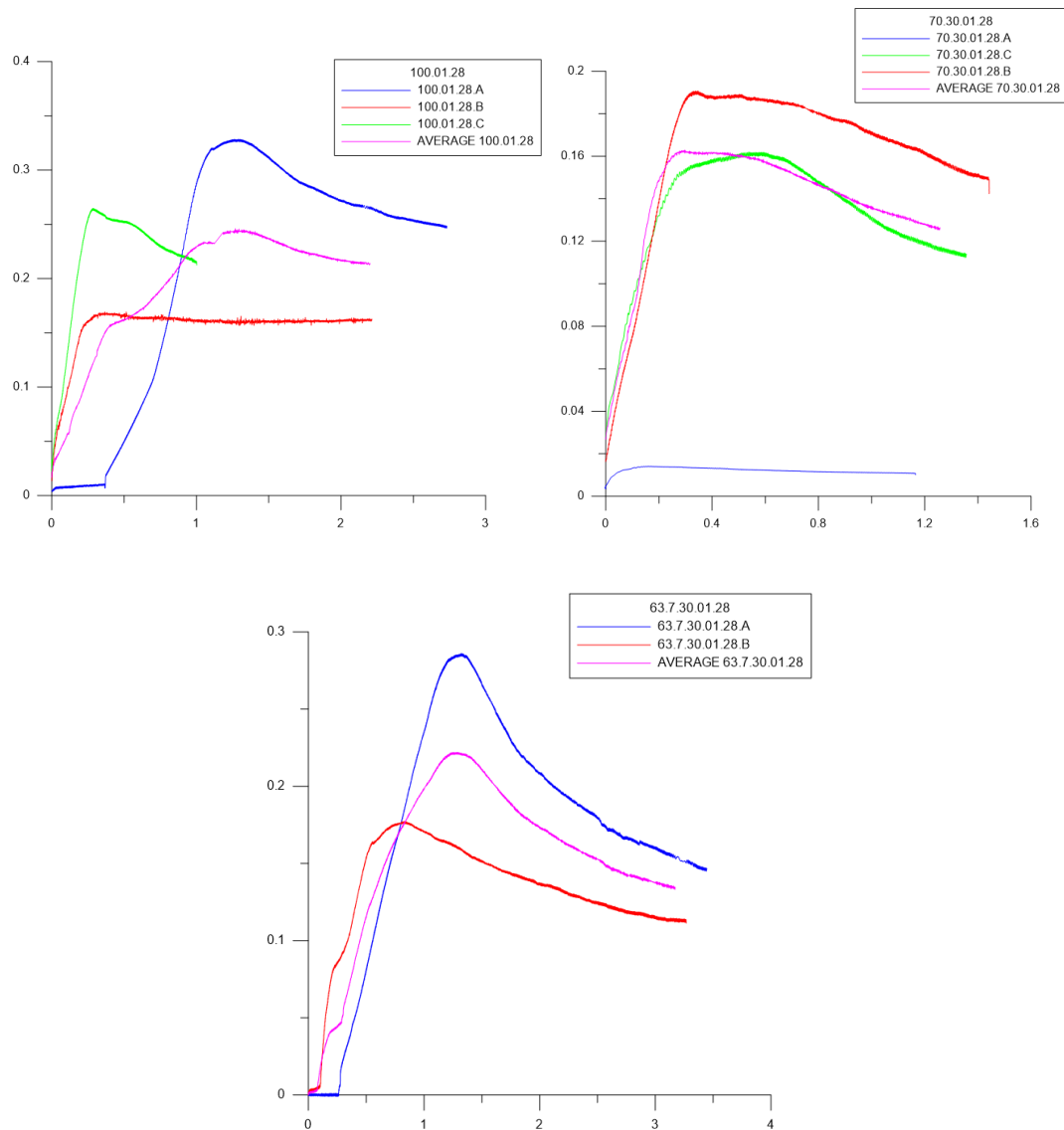
- I. για το πιο ασθενές ένεμα NHL 5: 70%-Clay: 30% εμφανίζεται μόνο η αστοχία εξ ολοκλήρου σε μία διεπιφανειακή ζώνη ($\Delta.Z$),
- II. για το ένεμα με την ενδιάμεση αντοχή NHL 5: 63%-Poz: 7%-Clay αυτό που μπορεί να βγει ως συμπέρασμα είναι ότι για θλιπτική τάση 0,1 MPa είναι εξ ολοκλήρου τύπος αστοχίας $\Delta.Z$, ενώ στην τάση 0,3 MPa, εμφανίζεται κυρίως η $\Delta.Z$, με μία εξαίρεση με την εμφάνιση αστοχία Z .
- III. για τα πιο ισχυρά ένεμα NHL 5: 100% παρατηρείται κατά κύριο λόγο ο τύπος αστοχίας $\Delta.Z$, αλλά κάποιες φορές και ο τύπος της Z .

Στα πιο ισχυρά ενέματα οι τύποι αστοχίας $\Delta.Z$ και Z , μπορεί να οφείλονται σε ρηγματώσεις που προκαλούνται από την μεγάλη ταχύτητα των πραγματοποιούμενων αντιδράσεων (π.χ. την ενυδάτωση). Στην σύνθεση με την ποζολάνη, λόγω της ποζολανικής αντίδρασης που εξελίσσεται ταυτόχρονα με την ενυδάτωση, εμφανίζονται επίσης ρηγματώσεις όπως φαίνονται στις Εικόνες 90-92. Ρηγματώσεις, οι οποίες σχηματίζονται εξαιτίας συστολής ξήρανσης μπορεί να οφείλονται και στις συνθήκες συντήρησης.

Παραμένουσα Διατμητική τάση τ_{res}

Γενικά, όπως παρατηρείται και από τις καμπύλες τ - s , για πιο ασθενή ενέματα, όπως είναι συγκριτικά με τα υπόλοιπα η σύνθεση NHL 5: 70%-Clay: 30, η παραμένουσα διατμητική τάση είναι σχεδόν ίση με την μέγιστη διατμητική τάση. Για τα πιο ισχυρά ενέματα, παρατηρείται ένας πιο ξεκάθαρος φθίνων κλάδος από την μέγιστη διατμητική αντοχή, μέχρι που καταλήγει σε μια μικρότερη τιμή, την τ_{res} . Επομένως στις πιο

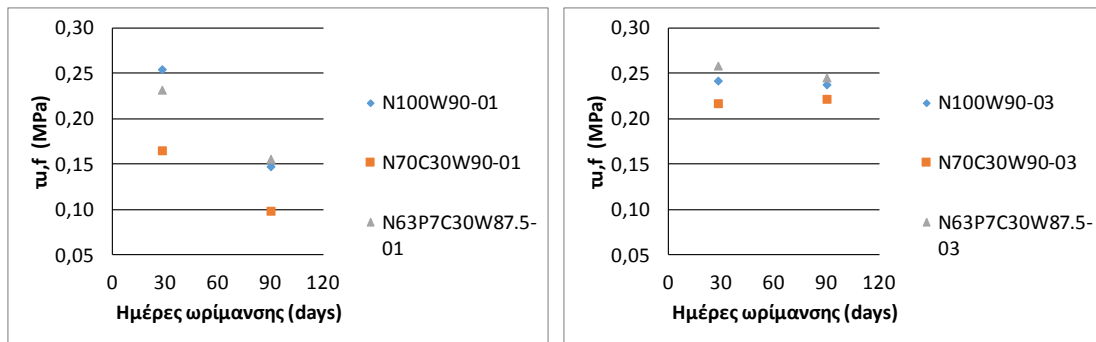
ασθενείς συνθέσεις που η συνοχή είναι μικρή, την μεγαλύτερη συνεισφορά την έχει ο μηχανισμός της τριβής που αναπτύσσεται. Για αυτό αυξανόμενης της επιβαλλόμενης θλιπτικής τάσης ενισχύεται η συνεισφορά του μηχανισμού τριβής.



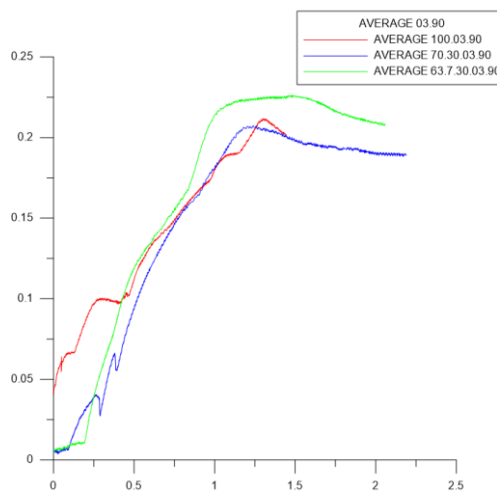
Εικόνα 96. Καμπύλες διατμητικής τάσης και επιβαλλόμενης ολίσθησης, για όλα τα δοκίμια, καθώς και οι μέσες καμπύλες αυτών, για όλες τις συνθέσεις για τις 28 ημέρες ωρίμανσης ($\sigma_n=0,1\text{MPa}$)

5.2.4.3 Ηλικία Ωρίμανσης

Στην εν χρόνω εξέλιξη των χαρακτηριστικών των σύνθετων δοκιμίων των διεπιφανειών σημαντικό ρόλο παίζει το υπόβαθρο, που στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε να είναι ένα. Επομένως θα φανεί, σε πολλές περιπτώσεις παρακάτω, ότι οι διαφορές των ιδιοτήτων των σύνθετων δοκιμίων των διεπιφανειών τείνουν να εξαλείφονται με την πάροδο του χρόνου μεταξύ των διαφόρων συνθέσεων.

Μέγιστη Διατμητική Τάση $\tau_{u,f}$ 

Εικόνα 97. Διάγραμμα μέγιστης διατμητικής αντοχής $\tau_{u,f}$ συναρτήσει του χρόνου ωρίμανσης για όλες τις συνθέσεις για ορθή επιβαλλόμενη θλιπτική τάση $\sigma_n = 0,1 \text{ MPa}$ (αριστερά) $\sigma_n = 0,3 \text{ MPa}$ (δεξιά)

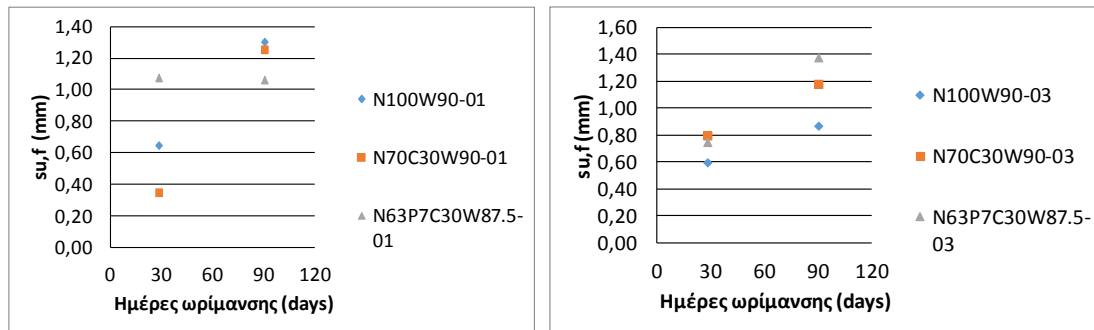


Εικόνα 97. Συγκριτικό διάγραμμα μέγιστης διατμητικής αντοχής $\tau_{u,f}$ συναρτήσει του χρόνου ωρίμανσης για όλες τις συνθέσεις για ορθή επιβαλλόμενη θλιπτική τάση $\sigma_n = 0,3 \text{ MPa}$ και 90 ημέρες ωρίμανσης

Όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα, στις 28 ημέρες ωρίμανσης η μέγιστη διατμητική αντοχή $\tau_{u,f}$ κυμαίνεται στα 0,217-0,26MPa, ενώ στις 90 ημέρες ωρίμανσης κυμαίνεται στα 0,21-0,23 MPa. Είναι εμφανές ότι με την αύξηση του χρόνου ωρίμανσης μειώνεται το εύρος των αντοχών των σύνθετων δοκιμίων για όλες τις συγκολλητικές κονίες, καταλήγοντας σε μία τιμή (~0,222MPa). Επίσης, εμφανίζεται μία μικρή μειωτική τάση της $\tau_{u,f}$ όσο αυξάνεται ο χρόνος ωρίμανσης για τις ισχυρότερες συνθέσεις ενέματος (~3,5%), ενώ για την ασθενέστερη μία ελαφρώς αυξητική τάση (~2,5%), οι οποίες είναι αμελητέες και μπορεί να θεωρηθεί ότι η $\tau_{u,f}$ παραμένει σταθερή με τον χρόνο. Η στασιμότητα αυτή της μέγιστης διατμητικής τάσης μπορεί να οφείλεται στις ρηγματώσεις που δημιουργούνται λόγω της συστολής ξήρανσης, καθώς και σε τυχούσα αποκόλληση του ενέματος από το υπόβαθρο. Για την σύνθεση NHL 5: 100% παρατηρείται μία ποσοστιαία μείωση της τάξης του 2,50%, για την NHL 5: 63%-Poz: 7%-Clay: 30% 5% και για την NHL 5: 70%-Clay: 30% αύξηση της τάξης του 3,80%

Για την ορθή τάση 0,1MPa εμφανίζεται ξεκάθαρη πτωτική τάση της $\tau_{u,f}$ εν χρόνω η οποία κυμαίνεται σε ποσοστιαία μείωση της τάξης του 42%. Σημαντικό ρόλο σε αυτήν την κατάσταση έχουν οι ρηγματώσεις που εμφανίζονται στον αρμό του ενέματος καθώς και η εύθρυπη του κατάσταση (Εικόνα 90, Εικόνα 91, Εικόνα 92)

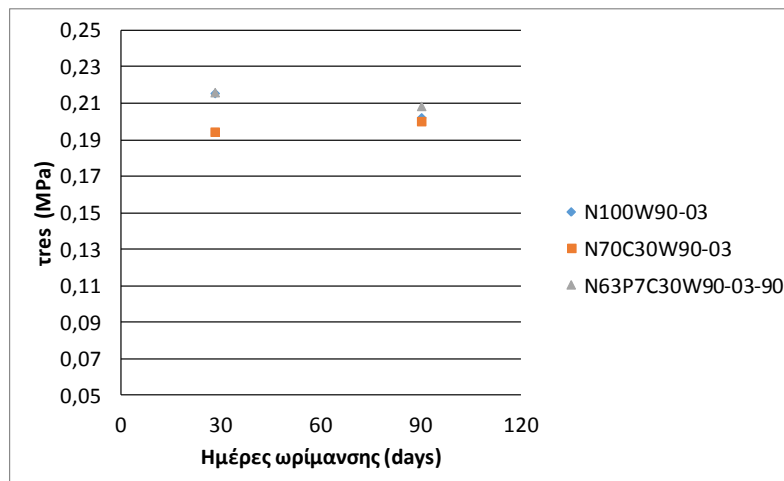
Ολίσθηση $s_{u,f}$



Εικόνα 98. Διάγραμμα ολίσθησης $s_{u,f}$ συναρτήσει του χρόνου ωρίμανσης για όλες τις συνθέσεις για ορθή επιβαλλόμενη θλιπτική τάση $\sigma_n = 0,1\text{MPa}$ και $\sigma_n = 0,3\text{MPa}$

Όσον αφορά την ολίσθηση στην οποία επιστρατεύεται η μέγιστη διατμητική αντοχή, παρατηρείται μία γενική αυξητική τάση στις 90 ημέρες ωρίμανσης των σύνθετων δοκιμίων. Για ορθή θλιπτική τάση 0,1MPa εμφανίζεται ολίσθηση της τάξης των 1,21mm στις 90 ημέρες ωρίμανσης. Σε ορθή θλιπτική τάση 0,3MPa παρατηρείται να αυξάνεται το εύρος των τιμών της ολίσθησης μεταξύ των διαφόρων συνθέσεων στις 90 ημέρες (0,87-1,40mm) σε σχέση με το αντίστοιχο των 28 ημερών (0,60-0,80mm).

Παραμένουσα Διατμητική Τάση τ_{res}



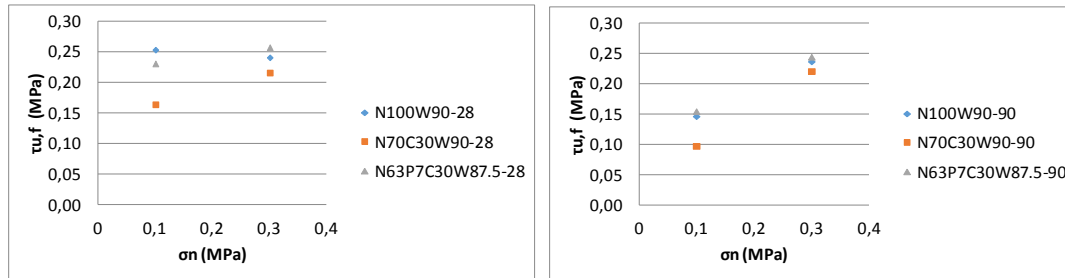
Εικόνα 99. Διάγραμμα μέγιστης διατμητικής αντοχής $\tau_{u,f}$ συναρτήσει του χρόνου ωρίμανσης για όλες τις συνθέσεις για ορθή επιβαλλόμενη θλιπτική τάση $\sigma_n = 0,3\text{MPa}$

Για την παραμένουσα διατμητική αντοχή δεν παρατηρείται σημαντική εν χρόνω μεταβολή για $\sigma_n = 0,30\text{MPa}$. Μπορεί να παρατηρηθεί μία μικρή μειωτική τάση της τάξης του 5% για τις πιο ισχυρές συνθέσεις και μία αυξητική για την πιο αδύναμη σύνθεση της τάξης του 3%, κάτι το οποίο έρχεται σε συμφωνία με την συμπεριφορά

της $\tau_{u,f}$. Επίσης, στις 90 ημέρες ωρίμανσης εμφανίζεται μικρότερη διασπορά της τ_{res} , εφόσον φαίνεται να καταλήγει σε μία τιμή της τάξης του 0,203MPa, για όλες τις συνδυετικές κονίες. Για ορθή τάση 0,10MPa εμφανίζεται σημαντική εν χρόνω μείωση της τ_{res} . Συγκεκριμένα, στις 28 ημέρες η τ_{res} κυμαίνεται από 0,12-0,21MPa ενώ στις 90 ημέρες από 0,081-0,13MPa.

5.2.4.4 Ορθή τάση

Μέγιστη Διατμητική Τάση $\tau_{u,f}$



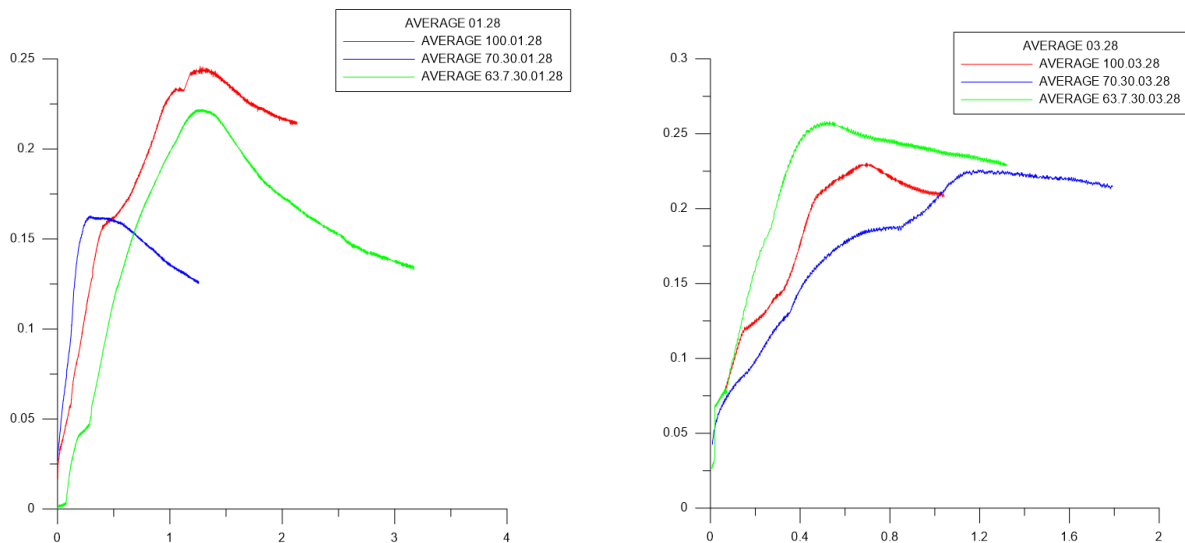
Εικόνα 99. Διάγραμμα μέγιστης διατμητικής τάσης για τις 28 και 90 ημέρες ωρίμανσης για όλες τις συνθέσεις ενεμάτων

Στην Εικόνα 99, για τις 28 ημέρες ωρίμανσης και ορθή θλιπτική τάση $\sigma_n = 0,3\text{MPa}$, παρατηρείται ότι για την πιο αδύναμη σύνθεση ενέματος NHL 5: 70%-Clay: 30% η μέγιστη καμπτική αντοχή αυξάνεται ραγδαία σε σχέση με την τιμή της στην τάση $\sigma_n = 0,1\text{MPa}$ (από 0,165 σε 0,217MPa) κάτι το οποίο δεν εμφανίζεται στις δύο ισχυρότερες συνθέσεις NHL 5: 63%-Poz: 7%-Clay: 30% και NHL 5: 100%. Οι τιμές της μέγιστης διατμητικής αντοχής για τις τελευταίες συνθέσεις, μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά σταθερή με την αύξηση της ορθής θλιπτικής τάσης. Για τις 90 ημέρες ωρίμανσης υπάρχει μία ξεκάθαρη αυξητική τάση της $\tau_{u,f}$ με την αύξηση της ορθής θλιπτικής τάσης, προσεγγίζοντας τις τιμές που εμφανίζονται στις 28 ημέρες ωρίμανσης για τάση 0,3MPa. Η ποσοστιαία αύξηση κυμαίνεται από 58-125% από την πιο ισχυρή στην πιο ασθενή σύνθεση αντίστοιχα. Εν χρόνω παρατηρείται σημαντική μείωση της συνοχής, ενώ αυξάνεται ραγδαία η συνεισφορά της τριβής, όπως φαίνεται στο Παράρτημα Γ.

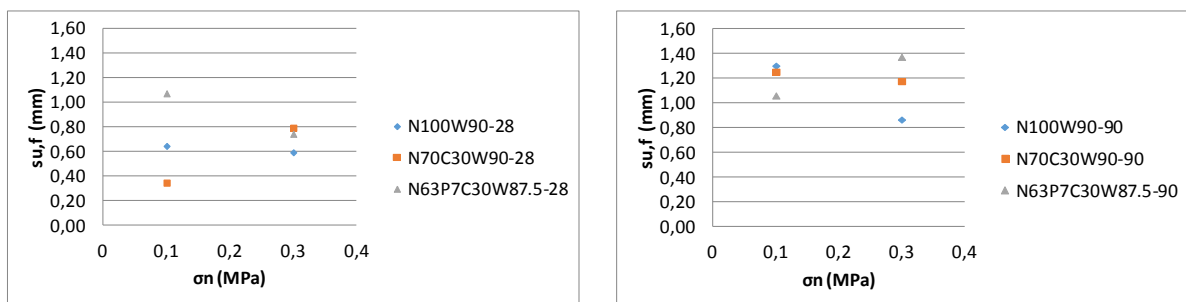
Ολίσθηση $s_{u,f}$

Όπως φαίνεται από τα παρακάτω διαγράμματα καθώς αυξάνεται η ορθή επιβαλλόμενη θλιπτική τάση παρατηρείται ότι η ολίσθηση για την οποία επιστρατεύεται η μέγιστη διατμητική αντοχή αφορά προσεγγιστικά την τιμή των 0,71mm, ανεξάρτητα της σύνθεσης ενέματος. Συγκεκριμένα, για τις 28 ημέρες ωρίμανσης, οι ολισθήσεις για τάση 0,3MPa κυμαίνονται από 0,6-0,8mm, ενώ για τάση 0,1MPa το εύρος είναι σαφώς μεγαλύτερο, της τάξης του 0,35-1,10mm. Για τις δύο πιο ισχυρές συνθέσεις με την αύξηση της επιβαλλόμενης ορθής τάσης παρατηρείται μείωση της ολίσθησης για την οποία επιστρατεύεται η μέγιστη διατμητική αντοχή, ενώ για την πιο ασθενή σύνθεση NHL 5: 70%-Clay: 30% η ολίσθηση αυξάνεται ραγδαία με ποσοστιαία αύξηση της τάσης του 128%. Αυξανόμενης της σ_n , η συμπεριφορά της πιο ασθενούς σύνθεσης γίνεται από ελαστική-ψαθυρή, ελαστοπλαστική-πλάσιμη. Επομένως, οι πιο ισχυρές

συνθέσεις γίνονται πιο δύσκαμπτες με την αύξηση της σ_n . Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του ότι η $\tau_{u,f}$ παραμένει σταθερή με την αύξηση της σ_n , αλλά μειώνεται η ολίσθηση στην οποία αυτή επιστρατεύεται.



Εικόνα 101. Μέσες καμπύλες διατμητικής αντοχής και επιβαλλόμενης ολίσθησης για $\sigma_n=0,1\text{MPa}$ (πάνω) και $\sigma_n=0,3\text{MPa}$ (κάτω)



Εικόνα 100. Διάγραμμα ολίσθησης για τις 28 και 90 ημέρες ωρίμανσης για όλες τις συνθέσεις ενεμάτων συναρτήσει της ορθής θλιπτικής επιβαλλόμενης τάσης

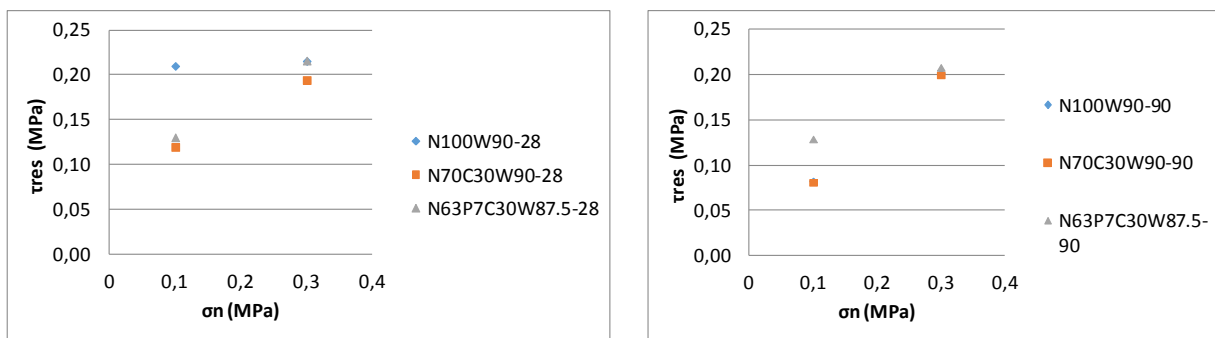
Για τις 90 ημέρες ωρίμανσης παρατηρείται ότι με την αύξηση της ορθής τάσης αμβλύνονται οι διαφορές ανάμεσα στις ολισθήσεις των διαφορετικών συνθέσεων. Ωστόσο οι τιμές είναι σημαντικά μεγαλύτερες από αυτές των 28 ημερών.

Παραμένουσα Διατμητική Τάση τ_{res}

Για τις 28 ημέρες ωρίμανσης, με την αύξηση της ορθής θλιπτικής τάσης, μειώθηκε και η ποσοστιαία διαφορά της παραμένουσας διατμητικής τάσης με την μέγιστη διατμητική αντοχή. Συγκεκριμένα, στην σύνθεση NHL 5: 100% μειώθηκε από 15,50% σε 11%, στην NHL 5: 70%-Clay: 30% μειώθηκε από 17,50% σε 10,30% και στην NHL 5: 63%-Poz: 7%-Clay: 30% μειώθηκε από 42,20% σε 16,40%. Επομένως, με την αύξηση της ορθής θλιπτικής τάσης, η παραμένουσα διατμητική τάση αυξάνεται και προσεγγίζει περισσότερο την μέγιστη διατμητική αντοχή. Επίσης, παρατηρείται και μία

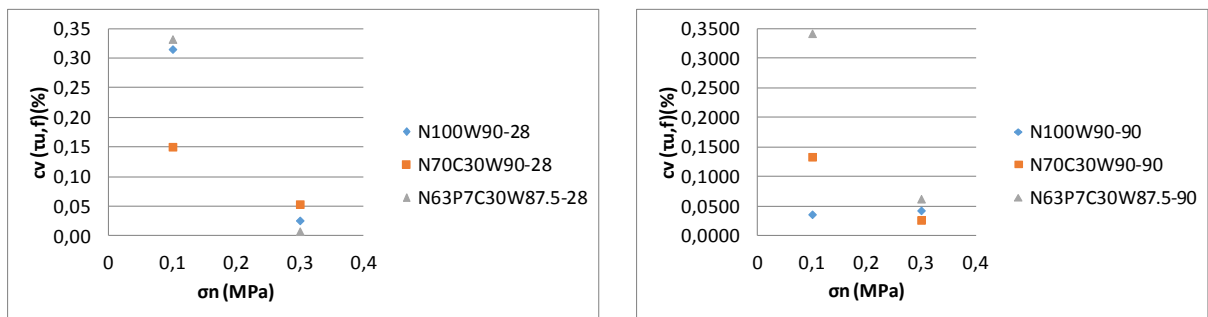
τάση σύγκλισης της τ_{res} Για την $\sigma_n = 0,3\text{MPa}$, οι διαφορές των τιμών της τ_{res} ανάμεσα στις συνδετικές κονιές εξαλείφονται προσεγγίζοντας την τιμή των $0,21\text{MPa}$.

Για τις 90 ημέρες ωρίμανσης παρατηρείται ακριβώς η ίδια αυξητική τάση της τ_{res} με την αύξηση της ορθής θλιπτικής τάσης. Στην ίδια λογική με πριν μειώθηκε και η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ παραμένουσας διατμητικής τάσης και μέγιστης διατμητικής αντοχής. Συγκεκριμένα, στην σύνθεση NHL 5: 100% μειώθηκε από 44% σε 15%, στην NHL 5: 70%-Clay: 30% μειώθηκε από 17% σε 10% και στην NHL 5: 63%-Poz: 7%-Clay: 30% μειώθηκε από 17% σε 15%. Και σε αυτήν την περίπτωση οι τιμές των παραμενουσών διατμητικών αντοχών για όλες τις συνδετικές κονιές καταλήγουν κατά προσέγγιση στην τιμή των $0,20\text{MPa}$ για την $\sigma_n = 0,3\text{MPa}$, όπως φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα.



Εικόνα 101. Διάγραμμα παραμένουσας τάσης για τις 28 και 90 ημέρες ωρίμανσης για όλες τις συνθέσεις ενεμάτων συναρτήσει της ορθής θλιπτικής επιβαλλόμενης τάσης

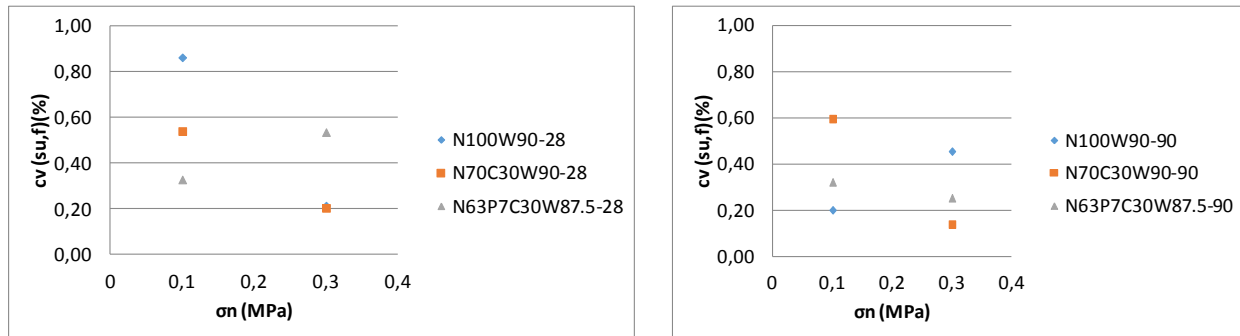
Στατιστικά στοιχεία



Εικόνα 102. Διάγραμμα Συντελεστή Μεταβλητότητας C_v (%) της μέγιστης διατμητικής τάσης $\tau_{u,f}$ συναρτήσει της επιβαλλόμενης ορθής τάσης σ_n για τις 28 και 90 ημέρες ωρίμανσης

Όσον αφορά τον συντελεστή μεταβλητότητας της μέγιστης διατμητικής τάσης και της ολίσθησης για την οποία επιστρατεύεται η μέγιστη διατμητική τάση για τις 28 ημέρες ωρίμανσης, παρατηρείται μια σαφής σταθεροποιητική μειωτική τάση, όπως φαίνεται στα παραπάνω διαγράμματα. Αυτό είναι κάτι αναμενόμενο, εφόσον η επιβαλλόμενη θλιπτική τάση επιδρά θετικά στην διάτμηση εξαιτίας της σπουδαιότητας του μηχανισμού της τριβής για την ανάπτυξη διατμητικής αντοχής. Αυτό προκύπτει από τον νόμο Mohr-Coulomb που ορίζει την διατμητική συμπεριφορά των διεπιφανειών της τοιχοποιίας ($\tau = \sigma * \tan\phi + c$). Στις 90 ημέρες ωρίμανσης εμφανίζεται η ίδια

μειωτική τάση του συντελεστή μεταβλητότητας με την αύξηση της ορθής τάσης, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο για τους προαναφερθέντες λόγους.



Εικόνα 103. Διάγραμμα Συντελεστή Μεταβλητότητας C_v (%) su,f συναρτήσει της επιβαλλόμενης ορθής τάσης σ_n για τις 28 κι 90 ημέρες ωρίμανσης

Στην ολίσθηση για την οποία επιστρατεύεται η μέγιστη διατμητική αντοχή τ_{u,f} για τις συνθέσεις NHL 5: 100% και NHL 5: 70%-Clay: 30% παρατηρείται μια σαφής σταθεροποιητική μειωτική τάση για σ_n= 0,3MPa σε σχέση με την σ_n= 0,1MPa, όμως η τιμή στην οποία καταλήγει είναι σαφώς μεγαλύτερη από ότι για την μέγιστη διατμητική αντοχή (~0,20%). Αντιθέτως για την σύνθεση NHL 5: 63%-Poz: 7%-Clay: 30% διακρίνεται μια αυξητική τάση αυξανόμενης της σ_n, χωρίς να προσεγγίζει τις υπόλοιπες συνθέσεις. Ο συντελεστής μεταβλητότητας της ολίσθησης είναι μεγαλύτερος από ότι της μέγιστης διατμητικής τάσης, αποδεικνύοντας έτσι την ευαισθησία και την αστάθεια αυτής της ιδιότητας. Το ίδιο φαινόμενο επιβεβαιώνεται και σε παρόμοιες έρευνες σε διεπιφάνειες υποβάθρων-ενεμάτων βιβλιογραφικά. Στις 90 ημέρες, αυτό που παρατηρείται συνολικά είναι ότι ο συντελεστής μεταβλητότητας έχει το ίδιο εύρος ανά τις συνθέσεις ενεμάτων για τις δύο ορθές τάσεις, έχοντας όμως μικρότερες τιμές από αυτές των 28 ημερών ωρίμανσης.

5.2.4.5 Σύγκριση με βιβλιογραφία

Σύμφωνα με την πειραματική κι αναλυτική έρευνα πάνω σε διεπιφάνειες διαφόρων υποβάθρων και ενεμάτων από την [Adami Ch., 2011] προέκυψαν αναλυτικές σχέσεις για τον υπολογισμό της μέγιστης διατμητικής αντίστασης (τ_{u,f}) (1), της ολίσθησης για την οποία επιστρατεύεται η τ_{u,f} (2) και της παραμένουσας διατμητικής τάσης (3), οι οποίες είναι οι εξής:

$$(1) \tau_{u,cal} = \sigma_n * \mu_{u,cal}, \text{ όπου } \mu_{u,cal} = 0.44 * \left(\frac{\sigma_n}{f_c}\right)^{-\beta}, \beta=0,4 \text{ και } f_c = \min(f_{bc}, f_{gc})$$

$$(2) s_{u,cal} = \frac{\gamma * \mu_{u,cal}}{3 * \left(1 - \frac{\sigma_n}{f_c}\right)}, \text{ όπου } f_c = \min(f_{bc}, f_{gc})$$

$$(3) \tau_{res} = 0.75 * \sigma_n$$

Σε αυτήν την φάση εξετάζεται κατά πόσο αυτές οι αναλυτικές σχέσεις μπορούν να εμφανίσουν επαρκή συσχέτιση με τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας

εργασίας. Αποδεικνύεται ότι η τιμή της ολίσθησης $s_{u,cal}$ σε όλες τις περιπτώσεις εμφανίζει μικρότερες τιμές από αυτές που προέκυψαν πειραματικά, επομένως δεν μπορεί να υπάρξει κάποια συσχέτιση με τα πειραματικά αποτελέσματα και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης. Όσον αφορά την συσχέτιση της $\tau_{u,f}$ και τ_{res} με τις παραπάνω αναλυτικές σχέσεις, είναι ικανοποιητική κυρίως για $\sigma_n=0.3\text{MPa}$ για τις 28 κι 90 ημέρες ωρίμανσης. Τα παραπάνω μεγέθη εμφανίζουν καλύτερη συσχέτιση για τις 90 ημέρες ωρίμανσης και $\sigma_n=0.1\text{MPa}$ σε σχέση με τις 28 ημέρες ωρίμανσης.

Πίνακας 14. Συγκεντρωτικός πίνακας σύγκρισης αναλυτικών αποτελεσμάτων από [Adami Ch., 2011] με των πειραματικών αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας

| Σύνθεση | σ_n (MPa) | Ημέρες ωρίμανσης | $\tau_{u,f}$ (MPa) | $\tau_{u,cal}$ (MPa) | Ποσοστιαία μεταβολή (%) | τ_{res} (MPa) | $\tau_{res,cal}$ (MPa) | Ποσοστιαία μεταβολή (%) |
|---------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------------|
| <u>N100W90</u> | 0,1 | 28 | 0,254 | 0,123 | -51,712 | 0,210 | 0,075 | -64,274 |
| <u>N70C30W90</u> | | | 0,165 | 0,096 | -41,848 | 0,120 | 0,075 | -37,356 |
| <u>N63P7C30W87,5S0,75</u> | | | 0,232 | 0,101 | -56,362 | 0,130 | 0,075 | -42,491 |
| <u>N100W90</u> | 0,3 | | 0,242 | 0,237 | -1,796 | 0,215 | 0,225 | 4,461 |
| <u>N70C30W90</u> | | | 0,217 | 0,185 | -14,529 | 0,194 | 0,225 | 15,853 |
| <u>N63P7C30W87,5S0,75</u> | | | 0,258 | 0,195 | -24,322 | 0,216 | 0,225 | 4,220 |
| <u>N100W90</u> | 0,1 | 90 | 0,147 | 0,123 | -16,584 | 0,083 | 0,075 | -9,434 |
| <u>N70C30W90</u> | | | 0,098 | 0,096 | -2,362 | 0,081 | 0,075 | -7,692 |
| <u>N63P7C30W87,5S0,75</u> | | | 0,155 | 0,101 | -34,950 | 0,129 | 0,075 | -41,935 |
| <u>N100W90</u> | 0,3 | | 0,237 | 0,237 | -0,074 | 0,202 | 0,225 | 11,340 |
| <u>N70C30W90</u> | | | 0,222 | 0,185 | -16,388 | 0,200 | 0,225 | 12,500 |
| <u>N63P7C30W87,5S0,75</u> | | | 0,245 | 0,195 | -20,292 | 0,208 | 0,225 | 8,000 |

5.3 Τοιχίσκοι

5.3.1 Μηχανικά χαρακτηριστικά

5.3.1.1 Πειραματικά Αποτελέσματα

Από την δοκιμή σε θλίψη των τοιχίσκων πριν την εφαρμογή των ενεμάτων προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα, όσον αφορά την θλιπτική τους αντοχή:

- Π1: $f_{wc,0}=0,658\text{MPa}$
- ΑΠ1: $f_{wc,0}=0,359\text{MPa}$
- ΤΑΠ1: $f_{wc,0}=0,298\text{MPa}$

Από την δοκιμή σε θλίψη των τοιχίσκων μετά την εφαρμογή των ενεμάτων προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα, όσον αφορά την θλιπτική τους αντοχή:

- Π1: $f_{wc,s}=1,794\text{MPa}$
- ΑΠ1: $f_{wc,s}=1,663\text{MPa}$
- ΤΑΠ1: $f_{wc,s}=1,815\text{MPa}$

Η ποσοστιαία αύξηση στην μηχανική αντοχή που σημειώθηκε μετά τα ενέματα σε κάθε τοιχίσκο είναι η εξής:

- Π1: 172,64%
- ΑΠ1: 363,23%
- ΤΑΠ1: 509,06%

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω τιμές, μετά την εφαρμογή των ενεμάτων, μειώθηκε η διασπορά των τιμών των αντοχών από 19,27% σε 8,24%. Αυτό οφείλεται στην ομογενοποίηση τόσο της μάζας όσο και των χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας που προκαλείται από την εφαρμογή των ενεμάτων σε αυτήν.

Όσον αφορά τις παραμορφώσεις που σημειώθηκαν κατά την διάρκεια της φόρτισης, και συγκεκριμένα την στιγμή που η τοιχοποιία έφτασε την φέρουσα ικανότητα της σε θλίψη σημειώθηκαν τα εξής μεγέθη:

Πίνακας 15. Συγκεντρωτικά στοιχεία παραμορφώσεων για τους τοιχίσκους πριν και μετά τα ενέματα

| Τοιχίσκος | ε_{v0} (‰) | ε_{vs} (‰) | $W_{hor,0}$ (mm) | $W_{hor,s}$ (mm) | $W_{tran,0}$ (mm) | $W_{tran,s}$ (mm) |
|-----------|------------------------|------------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| Π1 | -2,4 | -6,5 | 2,7 | 5,1 | 1,5 | 9,8 |
| ΑΠ1 | -3,5 | -9 | 1,6 | 5,1 | 2,5 | 11,9 |
| ΤΑΠ1 | -2,9 | -4,5 | 4,8 | 2,9 | 2 | 4,5 |

Όπου:

ε_{v0} , ε_{vs} οι κατακόρυφες παραμορφώσεις την στιγμή του μέγιστου θλιπτικού φορτίου πριν και μετά την εφαρμογή των ενεμάτων αντίστοιχα,

$W_{hor,0}$, $W_{hor,s}$ το οριζόντιο άνοιγμα των κατακόρυφων ρωγμών στις όψεις των τοιχίσκων την στιγμή του μέγιστου θλιπτικού φορτίου πριν και μετά την εφαρμογή των ενεμάτων αντίστοιχα,

$W_{tran,0}$, $W_{tran,s}$ το οριζόντιο άνοιγμα των κατακόρυφων ρωγμών στις εγκάρσιες όψεις των τοιχίσκων την στιγμή του μέγιστου θλιπτικού φορτίου πριν και μετά την εφαρμογή των ενεμάτων αντίστοιχα,

Είναι εμφανές ότι ο μηχανισμός αστοχίας δίστρωτων και τρίστρωτων λιθοδομών, υπό θλιπτικό φορτίο αφορά στον διαχωρισμό των επιμέρους στρώσεων τους, κάτι το οποίο αποτυπώνεται στα μεγάλα πλάτη των ρωγμών στις εγκάρσιες όψεις. Σαν μία γενική κατεύθυνση σύμφωνα με τα παραπάνω, η συνεισφορά των ενεμάτων στην τοιχοποιία έγκειται στην σημαντική αύξηση της θλιπτικής αντοχής, καθώς και στις περισσότερες φορές στην αύξηση της πλαστιμότητας της, μέσω της μεγαλύτερης δυνατότητας παραμορφώσεων σε μεγαλύτερο φορτίο.

5.3.1.2 Σύγκριση με βιβλιογραφία

Σε έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί από την [Vintzileou et al., 2008] κι [Adami Ch., 2011] σε τρίστρωτες τοιχοποιίες με ασβεστοκονίαμα και ασβεστοποζολανικό κονίαμα αντίστοιχα, εμφανίζονται τα παρακάτω συγκεντρωτικά αποτελέσματα:

Πίνακας 16. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων πειραμάτων θλίψης από [Vintzileou et al., 2008] κι [Adami Ch., 2011]

| Τοιχίσκος | $\varepsilon_{v,0}$ (%) | ε_{vs} (%) | $W_{hor,0}$ (mm) | $W_{hor,s}$ (mm) | $W_{tran,0}$ (mm) | $W_{tran,s}$ (mm) | $f_{wc,0}$ (MPa) | $f_{wc,s}$ (MPa) | Ποσοστιαία αύξηση (%) |
|---------------------------|-------------------------|------------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|-----------------------|
| [Vintzileou et al., 2008] | 1,60-2,25 | 1,76-3,39 | 1,6 | 0,8-2 | 4-8 | 1,5-8 | 1,74-2,26 | 3-3,75 | 65-116 |
| [Adami Ch., 2011] | 0,93-1,56 | 2,31-3,14 | 2 | 2-8 | 2-5,50 | 3,5-8 | 2,74-3,37 | 4,46-5,90 | 63-75 |

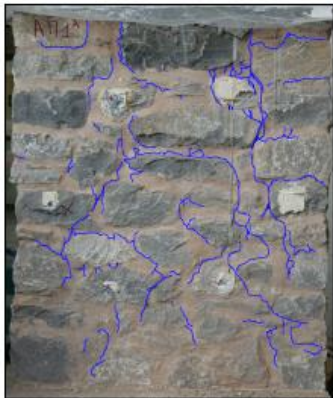
Η διασπορά των μηχανικών και παραμορφωσιακών αποτελεσμάτων, των λιθοδομών των Πινάκων 14 και 15, με τα διαφορετικά είδη κονιαμάτων, λιθοσωμάτων, και τρόπων δόμησης είναι αρκετά σαφής. Η ποικιλία των τιμών των παραπάνω ιδιοτήτων στις δοκιμές λιθοδομών επιβεβαιώνεται από την βιβλιογραφία σε πολλές παρόμοιες έρευνες. Ωστόσο, ανάμεσα στα αποτελέσματα του Πίνακα 16 και στα αποτελέσματα του τρίστρωτου τοιχίσκου με συνδετικό πηλοασβεστοκονίαμα (ΤΑΠ1) εμφανίζεται συμφωνία, με την έννοια ότι τα αποτελέσματα του ΤΑΠ1 βρίσκονται μέσα στα εύρη των αποτελεσμάτων του Πίνακα 16, ή τουλάχιστον έχουν την ίδια τάξη μεγέθους. Αυτών των αποτελεσμάτων εξαιρείται η τιμή της θλιπτικής αντοχής, πριν και μετά την εφαρμογή των ενεμάτων, η οποία για τον τοιχίσκο ΤΑΠ1 είναι σαφώς μικρότερη.

5.3.2 Παθολογία

Στις παρακάτω φωτογραφίες απεικονίζεται η παθολογία των τοιχίσκων που υποβλήθηκαν σε θλίψη πριν και μετά την εφαρμογή των ενεμάτων. Παρατηρούνται οι εξής τύποι ρωγμών

- Πριν την εφαρμογή των ενεμάτων:
 - I. Κατακόρυφες ρωγμές στις όψεις των τοιχίσκων στην θέση των αρμών του κονιαματος και στις διεπιφάνειες αρμών και λίθων. Υπάρχουν και μεμονωμένες περιπτώσεις λίθων που αστόχησαν
 - II. Περιμετρική αποκόλληση των αρμών των κονιαμάτων από τους λίθους. Αφορά την συνάφεια ανάμεσα στο κονίαμα και τους λίθους
 - III. Κατακόρυφες ρωγμές στις εγκάρσιες όψεις τους, ανάμεσα στις επιμέρους στρώσεις που τις αποτελούν. Σημειώνεται ότι είναι σαφώς μεγαλύτερου εύρους από αυτές των επιμήκων όψεων
 - IV. Κατακόρυφες ρωγμές στην ενδιάμεση στρώση των τρίστρωτων τοιχοποιιών

- V. Ρωγμές μικρότερου εύρους (τριχοειδείς) που οφείλονται σε συστολή ξήρανσης, οι οποίες υπήρχαν πριν την δοκιμή των τοιχίσκων σε θλίψη
- VI. Ο τρίστρωτος τοιχίσκος ΤΑΠ1 εμφανίζει μικρότερη και λιγότερη πυκνή ρηγμάτωση από ότι οι τρίστρωτοι, ειδικότερα στην μία όψη
- VII. Ο δίστρωτος τοιχίσκος Π1 εμφάνισε λιγότερη και πιο αραιή ρηγμάτωση στις μπροστινές όψεις από ότι ο ΑΠ1



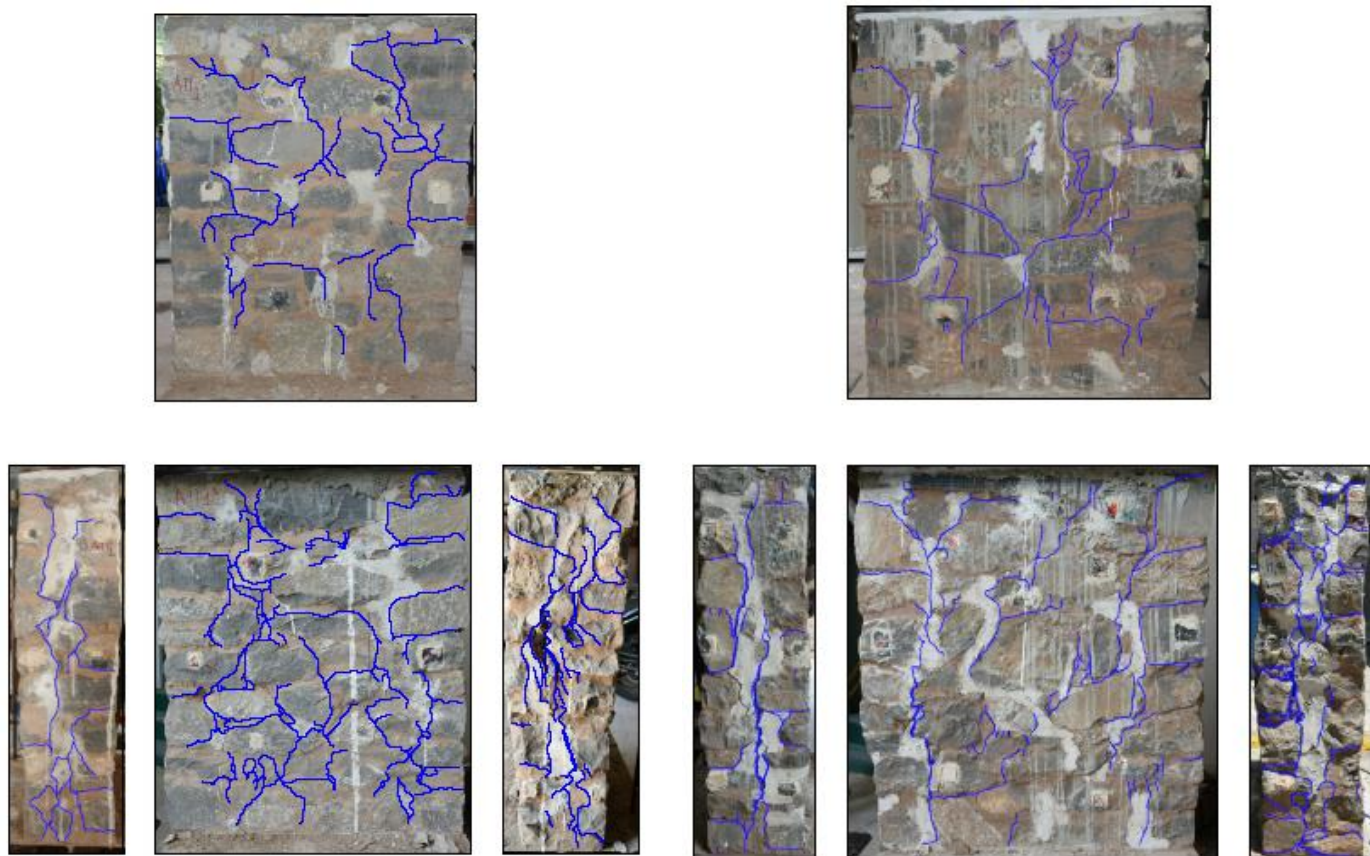
Εικόνα 104. Παθολογία τοιχίσκου ΑΠ1 (αριστερά) και Π1 (δεξιά) πριν τα ενέματα



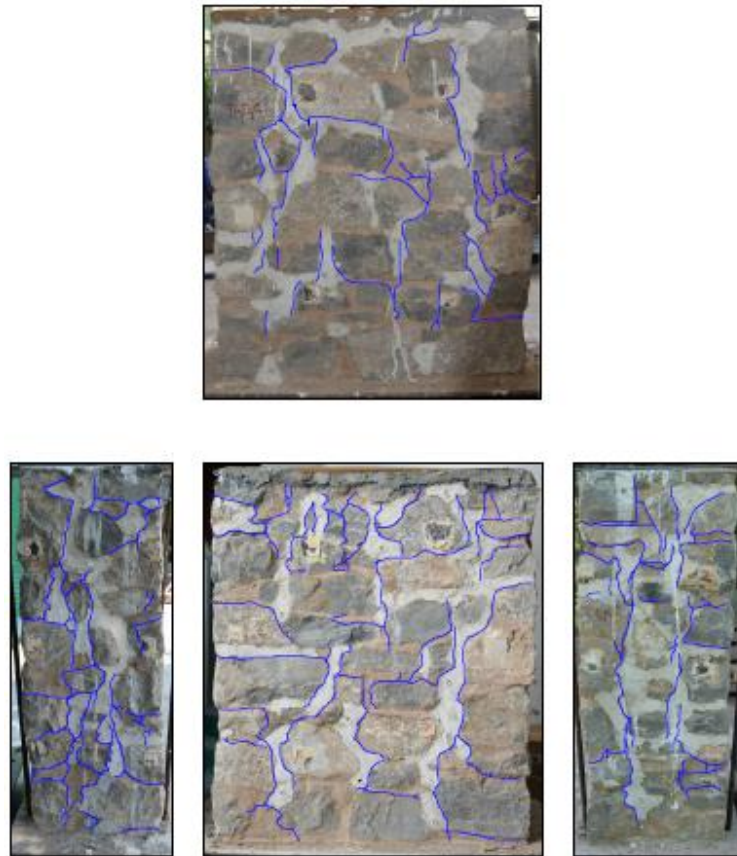
Εικόνα 105. Παθολογία τοιχίσκου ΑΠΙ πριν τα ενέματα

- Μετά την εφαρμογή των ενεμάτων σημειώθηκαν:
 - I. Κατακόρυφες ρωγμές στις όψεις των τοιχίσκων, τόσο στις ίδιες θέσεις, όσο και σε νέες. Αυτό υποδηλώνει ότι ο μηχανισμός αστοχίας των τοιχίσκων μετά την εφαρμογή των ενεμάτων παραμένει ο ίδιος. Όμως, αφού ανοίγουν ρωγμές σε νέες θέσεις πέρα από τις ήδη υπάρχουσες σημαίνει ότι το φορτίο βρίσκεται εναλλακτικές διαδρομές. Οι ρωγμές στις ήδη πληγείσες περιοχές άνοιξαν σε μεγαλύτερο φορτίο από ότι πριν την εφαρμογή των ενεμάτων, αποδεικνύοντας ότι τα ενέματα προσέφεραν επαρκή ενίσχυση
 - II. Κατακόρυφες ρωγμές στις εγκάρσιες όψεις των τοιχίσκων. Οι ρωγμές αυτές, όπως και πριν την εφαρμογή των ενεμάτων, είναι μεγαλύτερου εύρους από ότι αυτές των μπροστινών όψεων. Τονίζεται ότι η εφαρμογή των ενεμάτων καθυστέρησε σε μεγάλο βαθμό την διάνοιξη τους, πράγμα που αποτυπώνεται στην τιμή του φορτίου στην οποία εμφανίστηκαν. Επομένως, τα ενέματα πέρα από την επαρκή μηχανική ενίσχυση που προσέφεραν στην τοιχοποιία, βελτίωσαν και την συνάφεια μεταξύ των στρώσεων των τοιχοποιιών. Το γεγονός αυτό είναι υψίστης σημασίας, αφού ο βασικός μηχανισμός αστοχίας αυτών των τοιχοποιιών αφορά την αποκόλληση των στρώσεων μεταξύ τους, λόγω ελλιπούς τους σύνδεσης και συνάφειας
 - III. Μείωση του ρυθμού, που σχηματίζονται οι ρωγμές λόγω συστολής ξήρανσης
 - IV. Βελτίωση της συνάφειας μεταξύ λίθων και αρμών κονιάματος

Γενικά, οι περισσότερες ρωγμές σε όλους τους τύπους λιθοδομών που εξετάστηκαν εμφανίστηκαν στην διεπιφάνεια λίθου και κονιάματος, καθώς και στην διεπιφάνεια λίθου και αρμολογήματος. Λιγότερες ρωγμές εμφανίστηκαν στους αρμούς του κονιάματος, καθώς και στο ίδιο το αρμολόγημα.



Εικόνα 106. Παθολογία τοιχίσκου ΑΠ1(αριστερά) και Π1 (δεξιά) μετά τα ενέματα



Εικόνα 107. Παθολογία τοιχίσκου ΤΑΠ1 μετά τα ενέματα

5.3.3 Ποσότητα ενέματος

Κατά την διάρκεια της ενεμάτωσης, καταγράφηκε η ποσότητα ενέματος που εισχώρησε στην τοιχοποιία από κάθε σωληνάκι εισόδου, η στάθμη ενέματος στην οποία εξήλθε ένεμα από κάθε σωληνάκι εξόδου, καθώς και συνολικά τα χαρμάνια ενέματος που καταναλώθηκαν σε κάθε τοιχίσκο. Παρακάτω παρουσιάζονται οι ποσότητες ενέματος που εισχώρησαν σε κάθε τοιχίσκο, καθώς και το ποσοστό των κενών που έκλεισαν στο ενδιάμεσο στρώμα της τρίστρωτης λιθοδομής.

Πίνακας 17. Συγκεντρωτικός πίνακας ποσότητας ενεμάτων που εφαρμόστηκε στους τοιχίσκους

| Τοιχίσκος | Τύπος | Κονίαμα | Ένεμα | Συνολικός όγκος ενέματος (cm ³) | Πόσο ένεμα ποσοστό του τοίχου | Όγκος κενών ενδιάμεσης στρώσης |
|-----------|------------|--------------------|---------------------------|---|-------------------------------|--------------------------------|
| ΤΑΠ1 | Τρίστρωτος | Πηλοασβεστοκονίαμα | NHL5:100% W/S=0,9 | 134310,94 | 24,87 | 74,62 |
| Π1 | Δίστρωτος | Πηλοκονίαμα | NHL5:100% W/S=0,9 | 81202,32 | 22,56 | - |
| ΑΠ1 | Δίστρωτος | Πηλοασβεστοκονίαμα | NHL5:100% W/S=0,9 | 77199,93 | 21,44 | - |
| ΑΠ2 | Τρίστρωτος | Πηλοκονίαμα | NHL5:70% Clay:30% W/S=0,9 | 121380,14 | 22,48 | 67,43 |
| Π2 | Δίστρωτος | Πηλοκονίαμα | NHL5:70% Clay:30% W/S=0,9 | 84742,89 | 23,54 | - |
| ΑΠ3 | Δίστρωτος | Πηλοασβεστοκονίαμα | NHL5:70% Clay:30% W/S=0,9 | 76892,05 | 21,36 | - |

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

- I. Στους δίστρωτους τοιχίσκους το ποσοστό του ενέματος που εφαρμόστηκε κυμαίνεται από 21-24% ανεξάρτητα από τον τύπο του ενέματος. Συγκεκριμένα, οι τοιχίσκοι που αποτελούνται από συνδετικό πηλοκονίαμα φαίνεται να χρειάζονται 3-4% παραπάνω ποσότητα ενέματος από ότι οι τοιχίσκοι με το πηλοασβεστοκονίαμα
- II. Στους τρίστρωτους τοιχίσκους το ποσοστό του ενέματος που εισχώρησε στην μάζα τους, ως προς τον συνολικό τους όγκο κυμαίνεται από 22-25%. Το ποσοστό του ενέματος που εφαρμόστηκε στους τρίστρωτους τοιχίσκους είναι πιο εποπτικό να εκφραστεί ως ποσοστό του όγκου της ενδιάμεσης στρώσης τους, λόγω του ότι στόχος ήταν να ενδυναμωθεί ο δεσμός των εξωτερικών φύλλων με το ενδιάμεσο στρώμα, καθώς και το ίδιο το γέμισμα, κι όχι τόσο οι εξωτερικές παρειές. Εν προκειμένω, το ένεμα φαίνεται να κάλυψε το 67-75% της εσωτερικής στρώσης. Αυτό το μεγάλο ποσοστό των κενών στην ενδιάμεση στρώση δικαιολογείται από το μικρό ποσοστό του κονιάματος που τοποθετήθηκε, καθώς κι από τα υψηλά ποσοστά συστολής ξήρανσης στα οποία υπόκειται
- III. Τόσο στους δίστρωτους όσο και στους τρίστρωτους τοιχίσκους, παρατηρήθηκε ότι οι λιθοδομές που είχαν συνδετικό πηλοασβεστοκονίαμα χρειάστηκαν λιγότερο όγκο ενέματος κατά 3-8%. Αυτό ίσως να οφείλεται στο ότι το πηλοασβεστοκονίαμα σημείωσε σημαντικά μικρότερη συστολή ξήρανσης από ότι το πηλοκονίαμα, επομένως δημιούργησε μικρότερο ποσοστό κενών στο εσωτερικό της τοιχοποιίας
- IV. Ανά τύπο ενέματος, δεν σημειώθηκαν σημαντικές διαφορές ως προς την ποσότητα ενέματος που εν τέλει εφαρμόστηκε στους τοιχίσκους

Σύμφωνα με τις [Vintzileou E. et al., 2008], [Adami Ch., 2011] και [Kalagri, 2010], το ποσοστό των κενών που εμφανίζεται στην ενδιάμεση στρώση τρίστρωτων λιθοδομών με ασβεστοκονίαμα ή ασβεστοποζολανικό κονίαμα, αφορά το 40% του όγκου της. Όσον αφορά τα παραπάνω αποτελέσματα, παρατηρείται μία αύξηση της απαιτούμενης ποσότητας ενέματος στις τρίστρωτες λιθοδομές σε σχέση με τα βιβλιογραφικά αποτελέσματα. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στην φύση του πηλοκονιάματος, καθώς και του ίδιου του υλικού του πηλού, το οποίο εμφανίζει μεγάλη συστολή ξήρανσης, και κατ' επέκταση δημιουργεί κενά στο εσωτερικό της τοιχοποιίας.

5.3.4 Οπτικές Παρατηρήσεις

Μετά την εφαρμογή των ενεμάτων στους τοιχίσκους και την δεύτερη δοκιμή σε θλίψη, πραγματοποιήθηκε η αποδόμηση των τοιχίσκων σε στρώσεις προκειμένου να ληφθούν πληροφορίες για:

- I. Την ύπαρξη κενών μετά την εφαρμογή των ενεμάτων
- II. Το φάσμα των ρωγμών που πλήρωσαν τα ενέματα
- III. Αν τα ενέματα κατάφεραν να σχηματίσουν δίκτυο μέσω των ρωγμών και των διεπιφανειών λίθων και κονιάματος

- IV. Τυχούσες διαφορές στο δίκτυο των ενεμάτων ανάμεσα στα δύο διαφορετικά συνδετικά κονιάματα
- V. Διαφορές ανάμεσα στο δίκτυο των ενεμάτων ανάμεσα στην δίστρωτη και τρίστρωτη λιθοδομή

5.3.4.1 Τοιχίσκος Π1

Ο τοιχίσκος Π1 είναι δίστρωτος κι αποτελείται από συνδετικό ηλιοκονίαμα. Οι οπτικές παρατηρήσεις που σημειώθηκαν κατά την αποδόμηση του αφορούν τις εξής:

- Γενικές παρατηρήσεις:
 - I. Παρατηρήθηκε πολλή υγρασία στο κονίαμα, που ίσως να οφείλεται στον μεγάλο λόγο W/S που περιείχε το ένεμα,
- Παρατηρήσεις σε σχέση με το δίκτυο ρωγμών:
 - I. Εμφανίστηκαν ρωγμές με πλάτος μεγαλύτερο από ότι στο ηλιοασβεστοκονίαμα, εύρους 2,5-7mm. Οι ρωγμές αυτού του εύρους πληρώθηκαν στο μεγαλύτερο ποσοστό τους, ειδικά όσες βρίσκονταν κοντά στο μέσον της τοιχοποιίας. Τονίζεται εξάλλου ότι στόχος της εφαρμογής των ενεμάτων ήταν να πληρωθούν οι ρωγμές που βρίσκονταν κοντά στην διεπιφάνεια των στρώσεων, προκειμένου να ενισχυθεί ο δεσμός ανάμεσα τους. Με αυτόν τον τρόπο, καθυστέρησε η διάνοιξη των κατακόρυφων ρωγμών των εγκάρσιων όψεων, οι οποίες αποτελούν καθοριστικό μηχανισμό αστοχίας σε αυτού του τύπου τις λιθοδομές.

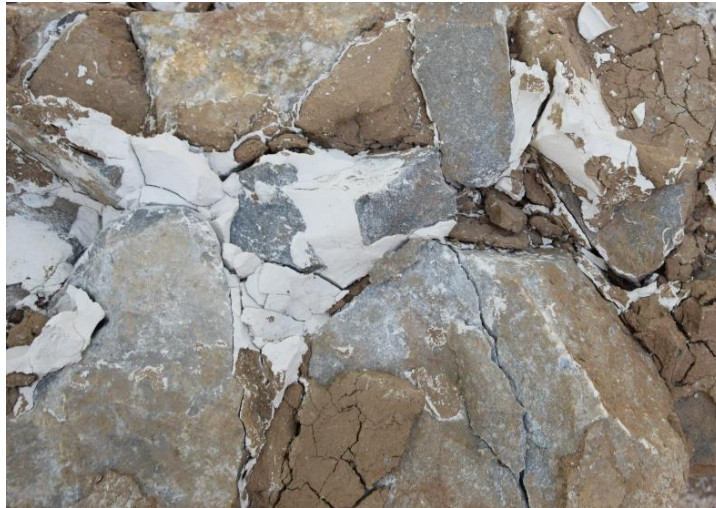


Εικόνα 108. Τυπικό πλάτος ρωγμών που πλήρωσαν τα ενέματα στον τοιχίσκο Π1



Εικόνα 109. Συγκέντρωση μεγάλης ποσότητας ενέματος στο κέντρο της του τοιχίσκου Π1

- II. Ρωγμές μικρότερου πλάτους 0,84-1,25mm, πληρώθηκαν εν μέρει σε συγκεκριμένες θέσεις, οι οποίες βρίσκονταν κοντά στο κέντρο της τοιχοποιίας. Η αιτία για την οποία σε κάποιες ρωγμές δεν έφτασε το ένεμα, δεν θεωρείται απαραίτητα αδυναμία του ενέματος να τις προσεγγίσει. Δικαιολογείται από το γεγονός της εκ νέου δοκιμής σε θλίψη των τοιχίσκων μετά την εφαρμογή των ενεμάτων και κατ' επέκταση στην διάνοιξη νέων ρωγμών από αστοχίες που σημειώθηκαν.

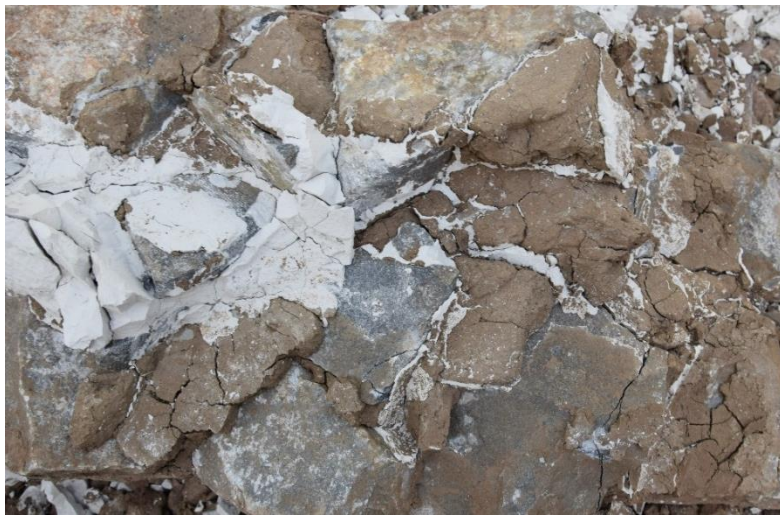


Εικόνα 110. Τυπικά παραδείγματα ρωγμών μικρότερου πλάτους στον τοιχίσκο Π1

- III. Σχηματίστηκε συνεχές δίκτυο ενέματος, διαμέσου των ρωγμών. Αυτό υποδηλώνει ικανοποιητική ρευστότητα και διεισδυτικότητα του ενέματος για τον εν λόγω τύπο λιθοδομής με πηλοκονίαμα. Το δίκτυο διέρχεται διαμέσου ρωγμών μεγαλύτερου πλάτους, διεπιφανειών λίθων και αρμών κονιάματος και μικρότερων ρωγμών.



Εικόνα 111. Δίκτυο ενέματος στον τοιχίσκο Π1



Εικόνα 112. Δίκτυο ενέματος διαμέσου ρωγμών στον τοιχίσκο Π1

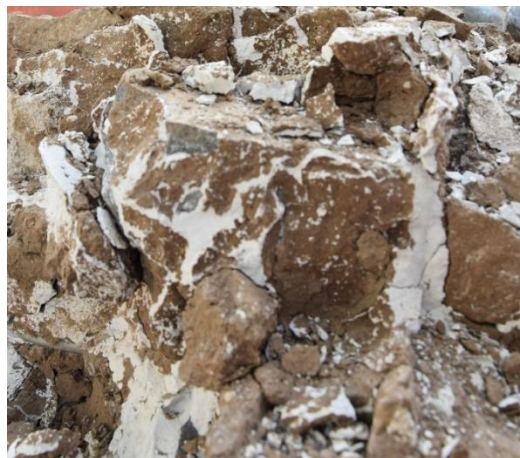
- IV. Πληρώθηκε σημαντικό κομμάτι των κενών που είχαν σχηματιστεί από την ελλιπή συνάφεια ανάμεσα στους λίθους και τους αρμούς των κονιαμάτων. Αυτό είναι κάτι που θεωρείται ιδιαίτερος σημαντικό, εφόσον επανακτήθηκε η συνάφεια ανάμεσα στις δομικές μονάδες της τοιχοποιίας κι ομογενοποιήθηκε η μάζα της.





Εικόνα 113. Συνάφεια ενέματος-λίθων-κονιάματος

- V. Επιφανειακή κάλυψη πόρων του πηλοκονιάματος από το ένεμα. Θεωρείται κάτι αναμενόμενο και επιθυμητό ως δράση της εφαρμογής του ενέματος. Η πλήρωση των πόρων του κονιάματος προσδίδει μία πιο πυκνή δομή σε αυτό, καθώς επίσης και μηχανική ενίσχυση. Μέσω της προσκόλλησης ενέματος στους πόρους του κονιάματος, δημιουργείται μεγαλύτερη συνάφεια του υλικού ενίσχυσης με το υφιστάμενο. Η συνάφεια είναι τόσο μηχανική όσο και χημική, μέσω της εισχώρησης των χημικών ενώσεων των αντιδράσεων νέων-υπαρχόντων υλικών, στους πόρους του κονιάματος.



Εικόνα 114. Τυπική πλήρωση πόρων κονιάματος

5.3.4.2 Τοιχίσκος ΑΠ1

Ο τοιχίσκος ΑΠ1 είναι δίστρωτος και αποτελείται από συνδετικό πηλοασβεστοκονίαμα.

- Γενικές παρατηρήσεις:
 - I. Το ένεμα στο εσωτερικό της τοιχοποιίας, είχε περισσότερες ρηγματώσεις. Επίσης, ήταν πιο “ελαφρύ” από ότι στον τοιχίσκο με το πηλοκονίαμα (Π1). Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι το πηλοασβεστοκονίαμα, λόγω του ότι περιέχει 5% ασβέστη, απορρόφησε μεγαλύτερη ποσότητα νερού από το ένεμα για την ενυδάτωση του, σε σχέση με το πηλοκονίαμα.



Εικόνα 115. Ρηγμάτωση ενέματος στον τοιχίσκο ΑΠ1

- II. Το πλάτος των ρωγμών που σχηματίστηκαν στο πηλοασβεστοκονίαμα ήταν μικρότερο από αυτό του πηλοκονίαματος.
- Παρατηρήσεις σε σχέση με το δίκτυο των ρωγμών:
 - I. Μεγάλο ποσοστό ενέματος συγκεντρώθηκε στην διεπιφάνεια των στρώσεων, κάτι το οποίο επιδιώχθηκε από τις θέσεις στις οποίες τοποθετήθηκαν τα σωληνάκια. Με αυτόν τον τρόπο ομογενοποιήθηκε η μάζα της τοιχοποιίας στο κέντρο της, αλλά κι ισχυροποιήθηκε ο δεσμός μεταξύ των στρώσεων.



Εικόνα 116. Συγκέντρωση ενέματος στο κέντρο της τοιχοποιίας και ισχυροποίηση διεπιφανειών στρώσεων

- II. Ρωγμές με πλάτος μεγαλύτερο από 2,20mm έχουν πληρωθεί εξ' ολοκλήρου. Ρωγμές πλάτους 1-2,20mm έχουν πληρωθεί εν μέρει ή καθόλου. Σε πολλές περιπτώσεις, ενώ το ένεμα ξεκινούσε να διεισδύει και να ρέει σε αυτές τις ρωγμές, από ένα σημείο και μετά σταματούσε να ρέει. Πιθανόν, αυτή η διακοπή της ροής να οφείλεται στην απορρόφηση νερού του ενέματος από το κονίαμα, και στην μείωση της ρευστότητας του.



Εικόνα 1171. Τυπικές εικόνες μη πληρωμένων ή εν μέρει πληρωμένων ρωγμών από το ένεμα στον τοιχίσκο ΑΠΙ

- III. Πληρώθηκε το κενό που είχε σχηματιστεί στις διεπιφάνειες λίθων κι αρμών κονιαμάτων από την αποκόλλησή τους, η οποία οφείλεται στην ελλιπή τους συνάφεια (πλάτος ρωγμής < 1mm).



Εικόνα 122. Συνάφεια λίθου-ενέματος-κονιάματος στον τοιχίσκο ΑΠΙ

- IV. Δεν σχηματίζεται ξεκάθαρο δίκτυο ενέματος μέσα στην τοιχοποιία, όπως στην περίπτωση της ΠΙ. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην απορρόφηση νερού του ενέματος από το κονίαμα και στην μείωση της ρευστότητας του. Στην προκειμένη περίπτωση δεν πληρώθηκαν οι ρωγμές προς το εξωτερικό μέρος των τοιχίσκων. Ωστόσο, σκοπός της ενεμάτωσης ήταν η ενίσχυση του δεσμού των επιμέρους παρειών της τοιχοποιίας, κι όχι η μηχανική ενίσχυση των εξωτερικών παρειών μέσω της πλήρωσης των ρωγμών τους. Επιπροσθέτως, εφόσον οι τοιχίσκοι δοκιμάστηκαν σε θλίψη και μετά την εφαρμογή των ενεμάτων, πρέπει να τονιστεί ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των μη πληρωμένων ρωγμών αφορά ρωγμές που δημιουργήθηκαν κατά την διάρκεια της δεύτερης δοκιμής τους.

5.3.4.3 Τοιχίσκος ΤΑΠ1

Ο τοιχίσκος ΤΑΠ1 είναι τρίστρωτος με συνδετικό πηλοασβεστοκονίαμα. Η εσωτερική στρώση (γέμισμα) αποτελείται από λίθους μεσαίου-μικρού μεγέθους αναμεμιγμένοι με μικρή ποσότητα κονιάματος.

- Παρατηρήσεις για το δίκτυο των ρωγμών
 - I. Γενικά παρατηρούνται μεγάλα κενά και ρωγμές στην ενδιάμεση στρώση της τρίστρωτης τοιχοποιίας. Σε αυτά στόχευσε κυρίως το ένεμα, εφόσον οι

σωληνίσκοι τοποθετήθηκαν το 1/3 του πάχους της λιθοδομής. Καθώς η λιθοδομή αποδομούταν ήταν ξεκάθαρο ότι η μεγαλύτερη ποσότητα του ενέματος συγκεντρώθηκε στην ενδιάμεση στρώση για την μηχανική της ενίσχυση και την ομογενοποίηση της μάζας της. Αυτό δικαιολογεί και το εξαιρετικά μεγάλο ποσοστό των κενών που υπολογίστηκε ότι πλήρωσαν τα ενέματα.



Εικόνα 123. Συγκέντρωση ενέματος στην ενδιάμεση στρώση για τον τοιχίσκο ΤΑΠΙ

- II. Πέρα από την πλήρωση των κενών του γεμίματος, παρατηρείται ότι γέμισαν και αρκετά μικρότερες ρωγμές (0,77-1,58mm) στην ευρύτερη περιοχή της επαφής των εξωτερικών παρειών με το γέμισμα. Δημιουργήθηκε εκεί ένα σαφές δίκτυο ενέματος που “γέμισε” τις μικρότερες ρωγμές εξασφαλίζοντας έτσι εν μέρει την μηχανική ενδυνάμωση των εξωτερικών στρώσεων, αλλά κυρίως την αποκατάσταση της συνάφειας των επιμέρους στρώσεων. Μέσω της ενίσχυσης των διεπιφανειών των παρειών καθυστέρησε η διάνοιξη των κατακόρυφων ρωγμών των εγκάρσιων όψεων, οι οποίες αφορούν και τον κύριο μηχανισμό αστοχίας στις τρίστρωτες τοιχοποιίες.



Εικόνα 118. Ενδεικτικό δίκτυο ενέματος στον τοιχίσκο ΤΑΠΙ

- III. Σημαντική ήταν και η πλήρωση των κενών στις διεπιφάνειες λίθων και κονιάματος και της αποκατάστασης της συνεργασίας αυτών των υλικών. Το εύρος των ρωγμών που καλύφθηκε αφορά τα 0,80-0,96mm.



Εικόνα 119. Συνάφεια λίθων- ενέματος- κονιάματος

6. Τελικά Συμπεράσματα

6.1 Μηχανικά Χαρακτηριστικά

6.1.1 Κονιάματα

Αυτό που θα μπορούσε να προκύψει ως συμπέρασμα για τα **κονιάματα**, είναι ότι θεμελιώδης παράγοντας για τις ιδιότητες τους είναι τα χαρακτηριστικά των υλικών που τα αποτελούν. Ωστόσο τα πηλοκονιάματα αποτελούνται κατά μεγάλο ποσοστό από φυσικά υλικά, στα οποία οι ιδιότητες τους ποικίλλουν ανάλογα με τον τόπο προέλευσης τους. Σε αυτό οφείλεται και η μεγάλη απόκλιση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας, με αυτά της βιβλιογραφίας.

Όσον αφορά την **καμπτική αντοχή**, για την σύνθεση του πηλοκονιάματος παρατηρείται μία σταθερή κατάσταση (~2,79MPa), αφού η διαφορά στις 28 και στις 90 ημέρες είναι αμελητέα. Στις 60 ημέρες εμφανίζεται μια μη αναμενόμενη μείωση, κάτι που μπορεί να οφείλεται στην ευαισθησία της ιδιότητας αυτής, η οποία επηρεάζεται δραστικά από την συστολή ξήρανσης και την μικρορηγμάτωση. Η μικρορηγμάτωση στην δομή του δοκιμίου δημιουργεί ένα ασυνεχές μέσο, πράγμα που αντικατοπτρίζεται στην μη αύξηση ή και μείωση της καμπτικής αντοχής σε αυτές τις συνθέσεις. Στην περίπτωση του πηλοασβεστοκονιάματος η καμπτική αντοχή εμφανίζεται να έχει μία ποσοστιαία μείωση της τάξης του 78% πράγμα που μπορεί να δικαιολογηθεί από την ύπαρξη του καολινίτη στην σύσταση του. Σε γενικές γραμμές εμφανίζεται μία σταθερή κατάσταση (~0,59MPa) με μία ελαφριά μείωση από τις 28 στις 90 ημέρες ωρίμανσης του.

Για την **θλιπτική αντοχή** του πηλοκονιάματος, εμφανίζεται μια ποσοστιαία αύξηση από τις 28 στις 90 ημέρες της τάξης του 30%, επιβεβαιώνοντας έτσι την ανθεκτικότητα αυτής της ιδιότητας, σε σχέση με την καμπτική αντοχή. Στα πηλοασβεστοκονιάματα, εμφανίζεται μία ξεκάθαρη μειωτική τάση από τις 28 στις 90 ημέρες, που εξελίχθηκε ραγδαία μέχρι τις 60 ημέρες ωρίμανσης και σταθεροποιήθηκε στις 90 ημέρες. Η ποσοστιαία μείωση αφορά ένα ποσοστό της τάξης του 56%, και μπορεί να οφείλεται στις μικρορηγματώσεις που δημιουργήθηκαν από την συστολή ξήρανσης που σημειώθηκε στην συγκεκριμένη σύνθεση.

6.1.2 Ενέματα

Συνολικά για την **καμπτική αντοχή** των ενεμάτων στις 28 ημέρες ωρίμανσης τους διαπιστώνεται ότι:

- I. όσο αυξάνεται ο λόγος νερού προς στερεά στις συνθέσεις μειώνεται η καμπτική αντοχή, όχι πάντα κατά τρόπο ανάλογο. Αυτό που μπορεί να ειπωθεί με την μέχρι τώρα έρευνα είναι ότι η μείωση της καμπτικής αντοχής με την αύξηση του λόγου νερού προς στερεά συμβαίνει κατά ανάλογο τρόπο. Όσο αυξάνεται

- ο λόγος W/S αυξάνονται κι οι αποστάσεις μεταξύ των κόκκων του υλικού δημιουργώντας μία λιγότερο συνεκτική δομή
- II. όσο αυξάνεται το ποσοστό του πηλού μειώνεται η καμπτική αντοχή σχεδόν με τρόπο ανάλογο. Αποτελεί ένα υλικό με διαφορετικό μηχανισμό πήξης και σκλήρυνσης από την υδραυλική άσβεστο, κάτι που μπορεί να δικαιολογήσει αυτή την μείωση στα μηχανικά χαρακτηριστικά
 - III. όσο αυξάνεται το ποσοστό του πηλού στις συνθέσεις, ελαττώνεται η μείωση τους με την αύξηση του λόγου W/S, πράγμα που μπορεί να οφείλεται στην φύση του πηλού. Ο πηλός δεσμεύει χημικά νερό, από αυτό που χρειάζεται η υδραυλική άσβεστος για την ενυδάτωση της, άρα όσο αυξάνεται το νερό, αυξάνεται και το διαθέσιμο για την ενυδάτωση της υδραυλικής ασβέστου νερό,
 - IV. για τις συνθέσεις με την ποζολάνη (NHL 5: 63%-Poz: 7%-Clay: 30%) παρατηρείται σημαντική εν χρόνω αύξηση της καμπτικής αντοχής μέχρι τις 60 ημέρες όπου προσεγγίζει σε μεγάλο βαθμό τις αντίστοιχες τιμές της καμπτικής αντοχής για την σύνθεση NHL 5: 100% (στις 28 ημέρες ωρίμανσης της). Αυτή η αύξηση στις αντοχές, οφείλεται στην εν χρόνω εξέλιξη της ενυδάτωσης της υδραυλικής ασβέστου και στην ποζολανική αντίδραση ανάμειξη στην NHL 5 και την ποζολάνη

Στην **θλιπτική αντοχή** των ενεμάτων παρατηρείται:

- I. πιο ξεκάθαρη μείωση της με την αύξηση του λόγου W/S. Είναι μία ιδιότητα πιο ανθεκτική στην μικρορηγμάτωση και την συστολή ξήρανσης, από ότι η καμπτική αντοχή. Ωστόσο, πολλές φορές η μικρορηγμάτωση στην δομή ενός δοκιμίου μπορεί να οφείλεται στην εν χρόνω σταθερότητα ή όχι τόσο μεγάλης αύξησης της θλιπτικής αντοχής σε ένα δοκίμιο
- II. γραμμική μείωση της με την αύξηση του ποσοστού του πηλού, για τους ίδιους λόγους, όπως και στην καμπτική αντοχή
- III. για τις συνθέσεις με την ποζολάνη (NHL 5: 63%-Poz: 7%-Clay: 30%) παρατηρείται εντυπωσιακή εν χρόνω εξέλιξη της θλιπτικής τους αντοχής. Στις 90 ημέρες η σύνθεση με λόγο W/S= 0,8 ξεπερνάει τα 3MPa κι η σύνθεση με λόγο W/S= 0,875 είναι περί τα 2,5MPa, προσεγγίζοντας τις τιμές των αντοχών της σύνθεσης NHL 5: 100% (για τις 90 ημέρες ωρίμανσης),

6.2 Φυσικά Χαρακτηριστικά

6.2.1 Κονιάματα

Όσον αφορά την **συστολή ξήρανσης** των κονιαμάτων προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- I. είναι ξεκάθαρο ότι το πηλοκονίαμα έχει σημαντικότερη συστολή ξήρανσης από ότι το πηλοασβεστοκονίαμα. Συγκεκριμένα σημειώνεται ποσοστιαία μείωση της τάξης του 46% στο πηλοασβεστοκονίαμα σε σχέση με το πηλοκονίαμα, πράγμα που δικαιολογείται από την προσθήκη του ασβέστη σε

αυτό, που τα καθιστά πιο ανθεκτικό στις συνθήκες συντήρησης και κατ' επέκταση στην συστολή ξήρανσης και την μικρορηγματώση.

- II. γενικά, παρατηρείται μία έντονα αυξητική τάση της συστολής ξήρανσης μέχρι τις 28 ημέρες ωρίμανσης των κονιαμάτων, μετά τις οποίες σταθεροποιείται πρακτικά στην ίδια τιμή.

Η εν χρόνω εξέλιξη της **πυκνότητας** στο πηλοκονίαμα είναι σχεδόν σταθερή σε μία τιμή, πράγμα που μπορεί να δικαιολογηθεί από την σκοπιά ότι όσο περισσότερος πηλός (άρα κι άργιλος) περιέχεται σε μία σύνθεση κονιάματος, τόσο πιο δύσκολα αποδεσμεύει το νερό. Στο πηλοασβεστοκονίαμα, παρατηρείται πτωτική τάση με τον χρόνο που αποτυπώνεται και στην πιο ξεκάθαρη εν χρόνω μείωση της **μάζας**, σε αντίθεση με το πηλοκονίαμα που η μάζα παραμένει πρακτικά σταθερή. Επομένως απώλεια μάζας, σημαίνει και μείωση της πυκνότητας. Στο πηλοασβεστοκονίαμα, αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί με γνώμονα ότι η προσθήκη ασβέστη στο πηλοκονίαμα, προκαλεί νέες αντιδράσεις σε αυτό.

6.2.2 Ενέματα

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 5, όσο αυξάνεται ο πηλός στις συνθέσεις, αυξάνεται και η **συστολή ξήρανσης**. Αυτό δικαιολογείται λόγω του ότι ο πηλός είναι κάπως πιο χονδρόκοκκος από την υδραυλική άσβεστο (όχι όμως με μεγάλη διαφορά, διότι συμπεριφέρονται παρόμοια ρεολογικά). Η υδραυλική άσβεστος από την φύση της ως υδραυλική κονία, δεσμεύει νερό χημικά για την ενυδάτωση της επομένως δεν υπάρχει τόσο διαθέσιμο νερό να αποδεσμευθεί όσο στις συνθέσεις με τον πηλό. Επιπροσθέτως, οι συνθέσεις που έχουν την μεγαλύτερη αντοχή, εμφανίζουν μικρότερη συστολή ξήρανσης. Παρατηρείται εν χρόνω αύξηση της συστολής ξήρανσης των ενεμάτων με NHL 5: 100%, αλλά και μείωση της αύξησης της με την αύξηση του λόγου W/S στις συνθέσεις. Οι συνθέσεις με τον πηλό δεν εμφανίζουν σημαντική εν χρόνω αύξηση της συστολής τους.

Όσο αυξάνεται ο πηλός στις συνθέσεις μειώνεται η **πυκνότητα** των συνθέσεων των ενεμάτων, καθώς επίσης και όσο αυξάνεται ο λόγος W/S. Το ίδιο αποτυπώνεται και στην εξέλιξη της **μάζας** τόσο με την αύξηση του ποσοστού του πηλού όσο και με την αύξηση του λόγου W/S. Έτσι, επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι η υδραυλική άσβεστος λόγω του ότι είναι υδραυλική κονία έχει την τάση να δεσμεύει νερό για την ενυδάτωση της. Στην προκειμένη περίπτωση η NHL 5 είναι λίγο πιο λεπτόκοκκη από τον πηλό, άρα πάλι έχει την τάση να διατηρεί περισσότερο νερό από τον πηλό που είναι πιο χονδρόκοκκος.

Όσον αφορά την **φαινόμενη πυκνότητα** που μετρήθηκε αμέσως μετά την παρασκευή των ενεμάτων, διαπιστώθηκε ότι δεν υπάρχει καμία ουσιαστική διαφορά ανάμεσα στην υδραυλική άσβεστο και τον πηλό. Επίσης, όσο αυξάνεται ο λόγος W/S μειώνεται η φαινόμενη πυκνότητα (σχεδόν γραμμικά) προσεγγίζοντας την πυκνότητα του νερού.

6.3 Χαρακτηριστικά Ενεσιμότητας

Όπως αναλύθηκε και στο Κεφάλαιο 5 με τα “Αποτελέσματα”, σύμφωνα με τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για την ρευστότητα και την σταθερότητα των ενεμάτων προέκυψαν κάποια συμπεράσματα.

- I. Ελέγχθηκαν όλα τα κριτήρια ρευστότητας, που αφορούν δύο κώνους με διαφορετικές διαμέτρους στομίων (4,7mm και 3mm), ωστόσο δόθηκε ιδιαίτερη βάση στα αποτελέσματα του κώνου με διάμετρο στομίου 3mm, από τον οποίο προκύπτει ο δείκτης ρευστότητας, καθώς και η καμπύλη του συναρτήσεως των διαφορών εξεταζόμενων λόγων W/S .
- II. Συνδέθηκε ο επιθυμητός δείκτης ρευστότητας με την ικανότητα της διεισδυτικότητας του ενέματος. Ο επιθυμητός δείκτης ρευστότητας πρέπει είναι μεγαλύτερος ή ίσος από το $0,98 * 10^3 \text{ mm/s}$, έτσι ώστε το ένεμα να μπορεί να διεισδύει σε δίκτυο ρωγμών ελάχιστου ονομαστικού πλάτους $W_{nom} = 175 \mu\text{m}$.
- III. Λόγω της παρόμοιας κοκκομετρίας της υδραυλικής ασβέστου και του πηλού, σχηματίστηκε μία μέση καμπύλη F_1-W/S , από την οποία προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα ενέματα αρχίζουν να ρέουν από λόγο $W/S_{o,f} \sim 0,7$. Επίσης δεν σημειώνεται ουσιαστική διαφορά στον δείκτη ρευστότητας μετά από λόγο $W/S_{u,f} \sim 1,1$.
- IV. Οι απαιτήσεις σταθερότητας των ενεμάτων, που απαιτούν η εξίδρωση του ενέματος να είναι μικρότερη ή ίση του 5%, στην ουσία περιορίζουν το αποδεκτό (ρεολογικά) πεδίο λόγων σε εύρος $W/S \leq 0,875-0,975$.
- V. Στην καμπύλη του δείκτη ρευστότητας συναρτήσεως του λόγου W/S προκύπτει μία μέση καμπύλη για όλες τις συνθέσεις λόγω της παρόμοιας κοκκομετρίας των δύο υλικών (καθώς και του ίδιου τρόπου και σειράς ανάμιξης), ωστόσο στην καμπύλη της εξίδρωσης δεν προκύπτει η ίδια μέση καμπύλη, λόγω της μεγαλύτερης εξάρτησης της από την ειδική επιφάνεια της στερεής φάσης.

6.4 Διεπιφάνειες

Όπως παρατηρείται στον συγκεντρωτικό πίνακα του Παραρτήματος Γ, φαίνεται ότι και σε ηλικία 28 και 90 ημερών ο κυρίαρχος **τρόπος αστοχίας** αφορά την ΔZ και σε μεμονωμένες περιπτώσεις τον Z , πράγμα που υποδηλώνει ασθενή μικροδομή της διεπιφάνειας υποβάθρου και ενεμάτων. Επίσης ειδικά στις 90 ημέρες ωρίμανσης οι αρμοί των ενεμάτων είναι εύθρυπτοι και εμφανίζουν ρηγματώσεις. Αυτό οφείλεται στο αδιαπέρατο του υποβάθρου, κάτι που επιβεβαιώνεται και από τα βιβλιογραφικά δεδομένα, που έχουν συμπεράνει ότι τα πιο αδύναμα και πορώδη υπόβαθρα εμφανίζουν πολύ καλύτερες ιδιότητες συνάφειας, από ότι τα πιο ισχυρά και αδιαπέρατα. Επομένως, όπως συμπεραίνεται είναι πολύ καθοριστικές οι φυσικοχημικές ιδιότητες του **υποβάθρου** γιατί προκύπτουν κάποια γενικά συμπεράσματα για όλες τις συνδετικές κόνιες και επιβαλλόμενες ορθές τάσεις.

Σημαντικό συμπέρασμα για τις 28 ημέρες ωρίμανσης είναι ότι για ορθή τάση $\sigma_n = 0,3 \text{ MPa}$ η **μέγιστη διατμητική τάση** $\tau_{u,f}$ κυμαίνεται σε εύρος τιμών $0,22-0,26 \text{ MPa}$.

Καθοριστική για αυτό το μειωμένο εύρος σε σχέση με την εικόνα που εμφανίζεται στην ορθή θλιπτική τάση $\sigma_n = 0,1\text{MPa}$ είναι η αύξηση της $\tau_{u,f}$ της πιο αδύναμης σύνθεσης NHL 5: 70%-Clay: 30%. Συνεπώς, η βελτίωση της $\tau_{u,f}$, με την αύξηση της θλιπτικής τάσης, είναι πιο εμφανής στα πιο ασθενή ενέματα, μιας και τα πιο ισχυρά εμφανίστηκαν πρακτικώς αμετάβλητα. Στις 90 ημέρες ωρίμανσης εμφανίζεται σημαντική αύξηση της $\tau_{u,f}$ με την αύξηση της επιβαλλόμενης ορθής τάσης καθώς κυμαίνεται για $\sigma_n = 0,30\text{MPa}$ στα $0,235\text{MPa}$ (εύρος $0,22-0,245\text{MPa}$). Αυτό οφείλεται στο ότι στις 90 ημέρες ωρίμανσης σημειώνεται μεγαλύτερη συνεισφορά του μηχανισμού τριβής με την αύξηση της ορθής τάσης. Ο συντελεστής μεταβλητότητας και για τις δύο ηλικίες ωρίμανσης μειώνεται με την αύξηση της ορθής τάσης δραστικά ($\sim 0,025\%$)

Αυτό που προέκυψε για την **ολίσθηση** στην οποία επιστρατεύεται η μέγιστη διατμητική αντοχή $s_{u,f}$ είναι κυρίως, ότι σε γενικές γραμμές μεγαλύτερες $s_{u,f}$ οδηγούν και σε πιο μεγάλες $\tau_{u,f}$. Αυτό που παρατηρήθηκε για τις 28 ημέρες ωρίμανσης για τη σύνθεση NHL 5: 63%-Poz: 7%-Clay: 30% είναι ότι η $\tau_{u,f}$ ενεργοποιείται για μεγαλύτερες $s_{u,f}$ από ότι οι άλλες συνθέσεις, σημειώνοντας και μεγαλύτερες τιμές (ειδικά για $\sigma_n = 0,3\text{MPa}$). Παρατηρείται το ίδιο για την συγκεκριμένη σύνθεση στις 90 ημέρες ωρίμανσης για $\sigma_n = 0,30\text{MPa}$. Για τις 28 ημέρες ωρίμανσης, με την αύξηση της ορθής τάσης η ολίσθηση συγκλίνει στα $0,71\text{mm}$, με την σύνθεση NHL 5: 70%-Clay: 30% να γίνεται πιο πλάσιμη με αύξηση της ολίσθησης της, ενώ οι υπόλοιπες να εμφανίζουν μείωση της, αποκτώντας μεγαλύτερη δυσκαμψία (διότι συνοδεύεται με αύξηση της $\tau_{u,f}$). Ο συντελεστής μεταβλητότητας της $s_{u,f}$ μειώνεται με την αύξηση της ορθής τάσης, όμως η τιμή του είναι μεγαλύτερη από αυτήν του $\tau_{u,f}$, λόγω της μεγαλύτερης διασποράς των μετρήσεων των ολισθήσεων.

Όσον αφορά την σύνδεση της μέγιστης διατμητικής αντίστασης με τις μηχανικές ιδιότητες των συνθέσεων των ενεμάτων, προέκυψε ότι παρουσιάζουν ικανοποιητικά γραμμική συσχέτιση τόσο για την θλιπτική όσο και καμπτική αντοχή. Πιο κοντά στην γραμμική προσέγγιση φάνηκε να είναι η συσχέτιση με την καμπτική αντοχή, πράγμα αναμενόμενο καθώς οι ιδιότητες της καμπτικής και διατμητικής αντοχής είναι σαφώς συνυφασμένες. Ωστόσο, σύμφωνα με την θεωρία αυτή η γραμμική σχέση δεν συνεχίζει επ' άοριστον για όλες τις τιμές της θλιπτικής αντοχής των ενεμάτων, αλλά σταθεροποιείται γύρω στα 15MPa , πράγμα που υποδηλώνει ότι η ιδιότητα της θλιπτικής αντοχής δεν είναι καθοριστική για μια επιτυχημένη επέμβαση με ενέματα σε ιστορικές κατασκευές. Αυτό που απαιτείται από μία σύνθεση ενέματος είναι η δυνατότητα ανάπτυξης επαρκούς συνάφειας με το υπόβαθρο, η φυσικοχημική συμβατότητα των υλικών καθώς και μηχανική ενίσχυση της τοιχοποιίας.

Για την **παραμένουσα διατμητική τάση** τ_{res} , προέκυψαν κάποια ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Συγκεκριμένα, για ορθή θλιπτική τάση $\sigma_n = 0,1\text{MPa}$ στα πιο ασθενή ενέματα, μετά την επίτευξη της μέγιστης διατμητικής αντοχής, δεν παρατηρείται σοβαρή μείωση της παραμένουσας τάσης. Όμως, στα πιο ισχυρά ενέματα, είναι σαφής ο φθιτός κλάδος που παρουσιάζεται μετά την επίτευξη της μέγιστης διατμητικής

αντοχής. Για την ορθή τάση $\sigma_n = 0,3\text{MPa}$, σε όλες τις συνθέσεις μειώνεται η διαφορά ανάμεσα στην $\tau_{u,f}$ και τ_{res} , σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές για $\sigma_n = 0,1\text{MPa}$. Για τις 28 ημέρες ωρίμανσης η τ_{res} καταλήγει για όλες τις συνδυαστικές κοινίες στα $0,21\text{MPa}$ ενώ για τις 90 ημέρες στα $0,203\text{MPa}$.

Όσον αφορά τις *καμπύλες διατμητικής τάσης και επιβαλλόμενης ολίσθησης* η τυπική συμπεριφορά των σύνθετων δοκιμίων λίθων και ενέματος είναι ελαστική-ελαστοπλαστική μέχρι την επίτευξη της διατμητικής αντοχής, όπως άλλωστε κι στις διεπιφάνειες κονιαμάτων ή άλλων ενεμάτων. Μετά την αστοχία ο μηχανισμός τριβής εξακολουθεί να μεταφέρει τέμνουσα, η οποία είναι της τάξης $0,12-0,21\text{MPa}$ για $\sigma_n = 0,1\text{MPa}$ και $0,2-0,216\text{MPa}$ $\sigma_n = 0,3\text{MPa}$. Από τα προαναφερθέντα εύρη είναι εμφανής η καθοριστική συνεισφορά της τριβής στην αναπτυσσόμενη διατμητική αντοχή, η οποία ενισχύεται όσο αυξάνεται η επιβαλλόμενη ορθή τάση στις πιο αδύναμες συνθέσεις. Η συμπεριφορά των διεπιφανειών της τοιχοποιίας εκφράζονται μέσω του νόμου Mohr-Coulomb ($\tau = \sigma * \tan\phi + c$). Έτσι σύμφωνα με την προηγούμενη παράγραφο που αναφέρθηκε ότι στις αδύναμες συνθέσεις η μέγιστη διατμητική αντοχή με την παραμένουσα διατμητική αντοχή είναι περίπου ίδια για $\sigma_n = 0,1\text{MPa}$, πράγμα που υποδεικνύει ότι η συνοχή σε αυτήν την σύνθεση είναι πολύ μικρή, επομένως αυξάνοντας την ορθή θλιπτική τάση λαμβάνει χώρα ο μηχανισμός τριβής, αυξάνοντας δραστικά την διατμητική αντοχή, προσεγγίζοντας τις πιο ισχυρές συνθέσεις.

Όσον αφορά την εν *χρόνω μεταβολή* των χαρακτηριστικών των διεπιφανειών προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- I. Τα εν χρόνω χαρακτηριστικά των σύνθετων δοκιμίων των διεπιφανειών εξαρτώνται από το υπόβαθρο. Στην προκειμένη περίπτωση το υπόβαθρο είναι ένα, επομένως οι μέσες τιμές των εν χρόνω χαρακτηριστικών συγκλίνουν σε μία τιμή, πράγμα που είναι σαφές για ορθή τάση $0,30\text{MPa}$
- II. Η μέγιστη διατμητική αντοχή $\tau_{u,f}$ για τις 90 ημέρες ωρίμανσης καταλήγει σε εύρος $0,21-0,23\text{MPa}$ για ορθή τάση $\sigma_n = 0,30\text{MPa}$, από εύρος $0,21-0,26\text{MPa}$ στις 28 ημέρες ωρίμανσης. Για ορθή τάση $0,10\text{MPa}$ σημειώνεται σημαντική εν χρόνω μείωση της $\tau_{u,f}$. Αυτό οφείλεται στην σημαντική μείωση της συνοχής των συνθέσεων. Παρόλα αυτά στις 90 ημέρες για $\sigma_n = 0,30\text{MPa}$ η τιμή της $\tau_{u,f}$ προσεγγίζει τις τιμές των 28 ημερών για την ίδια τάση, τονίζοντας έτσι την σημασία του μηχανισμού της τριβής (Mohr-Coulomb),
- III. Η ολίσθηση για την οποία επιστρατεύεται η μέγιστη διατμητική αντοχή για ορθή τάση $0,30\text{MPa}$ στις 90 ημέρες κυμαίνεται στα $0,87-1,40\text{mm}$, ενώ στις 28 ημέρες $0,60-0,80\text{mm}$. Επομένως για την ίδια ορθή θλιπτική τάση, οι διαφορές στην ολίσθηση $s_{u,f}$ αμβλύνονται. Για ορθή τάση $0,10\text{MPa}$ παρατηρείται σημαντική εν χρόνω αύξηση της $s_{u,f}$, αλλά μικρότερες τιμές της σε σχέση με τις αντίστοιχες για τάση $\sigma_n = 0,30\text{MPa}$,
- IV. Η παραμένουσα διατμητική τάση για $\sigma_n = 0,30\text{MPa}$ δεν εμφανίζει σημαντική εν χρόνω μεταβολή. Συγκεκριμένα, για τα 28 ημέρες κυμαίνεται σε εύρος $0,19-0,22\text{MPa}$ ενώ για 90 ημέρες $0,20-0,21\text{MPa}$. Για $\sigma_n = 0,10\text{MPa}$, όμως

παρουσιάζει σημαντική εν χρόνω μείωση. Στις 28 ημέρες ωρίμανσης το εύρος της ήταν 0,12-0,21MPa, ενώ στις 90 ημέρες 0,081-0,13MPa.

- V. Για επιβαλλόμενη ορθή τάση 0,10 και 0,30MPa στις 90 ημέρες ωρίμανσης, ο τρόπος αστοχίας όλων των σύνθετων δοκιμίων είναι Δ.Z, ενώ στις 28 ημέρες υπήρχαν κάποια μεμονωμένα δοκίμια με τρόπο αστοχίας Z.

6.5 Τοιχίσκοι

Συνοψίζοντας, όσον αφορά την *παθολογία* των τοιχίσκων που υποβλήθησαν σε θλίψη πριν και μετά τα ενέματα το συμπέρασμα είναι ότι ο μηχανισμός αστοχίας δεν άλλαξε, αλλά παρέμεινε ο ίδιος που αφορά την διάνοιξη κατακόρυφων ρωγμών τόσο στις μπροστινές όσο και εγκάρσιες όψεις, και στην αποκόλληση των επιμέρους στρώσεων. Αυτό που άλλαξε πριν και μετά την εφαρμογή των ενεμάτων είναι ότι καθυστέρησε η διάνοιξη αυτών των ρωγμών καθώς σημειώθηκαν σε σημαντικά μεγαλύτερο φορτίο. Επίσης, πέρα από τις υφιστάμενες ρωγμές που διανοίχθηκαν σε μεγαλύτερο φορτίο, το φορτίο βρήκε εναλλακτική δίοδο μέσα από την διάνοιξη άλλων ρωγμών σε νέες θέσεις.

Όσον αφορά την συνεισφορά των ενεμάτων ως προς την ενίσχυση των μηχανικών χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας, αποτυπώνεται σε ποσοστιαία αύξηση της θλιπτικής της αντοχής περί 172,64-509,06%. Η παραμορφωσιμότητα της στο μεγαλύτερο φορτίο που δέχεται είναι σαφώς αυξημένη, ιδιαίτερα ως προς τις εκτός επιπέδου μετακινήσεις των επιμέρους στρώσεων των δίστρων και τρίστρων τοιχοποιιών.

Οι *οπτικές παρατηρήσεις* που σημειώθηκαν κατά την αποδόμηση των τοιχίσκων μετά την εφαρμογή των ενεμάτων και την 2^η τους δοκιμή σε θλίψη συνοψίζονται ανά τους τοιχίσκους ως εξής:

- Τοιχίσκος Π1

Παρατηρείται πλήρωση της διεπιφάνειας ανάμεσα στις επιμέρους στρώσεις και ομογενοποίηση της μάζας της τοιχοποιίας. Εμφανίστηκε πλήρωση τόσο μεγαλύτερων ρωγμών (2,50-7mm) καθώς και μικρότερων ρωγμών (0,84-1,25mm) σχηματίζοντας δίκτυο ενέματος διαμέσου των διεπιφανειών λίθων και κονιάματος, μεγαλύτερων και μικρότερων ρωγμών.

- Τοιχίσκος ΑΠ1

Δεν εμφανίστηκε τόσο εκτεταμένο δίκτυο ενέματος διαμέσου μεγαλύτερων κι ιδιαίτερα μικρότερων ρωγμών, όπως στον τοιχίσκο Π1. Γενικότερα, εμφανίστηκαν ρωγμές με μικρότερο πλάτος από ότι στον τοιχίσκο Π1. Οι ρωγμές, που βρίσκονταν κοντά στην περιοχή της διεπιφάνειας των στρώσεων, με πλάτος μεγαλύτερου των 2,20mm πληρώθηκαν εξ' ολοκλήρου. Οι ρωγμές με πλάτος 1-2mm πληρώθηκαν έως έναν βαθμό αλλά όχι εξ' ολοκλήρου καθώς ενώ ξεκινούσε να ρέει το ένεμα σε αυτές διακοπτόταν, λόγω της πιθανής απορρόφησης νερού του ενέματος από το κονίαμα και την μείωση της ρευστότητας του.

- Τοιχίσκος ΤΑΠ1

Η μεγαλύτερη ποσότητα του ενέματος συγκεντρώθηκε στην ενδιάμεση στρώση και στην διεπιφάνεια των επιμέρους στρώσεων. Πληρώθηκαν σε πολύ μεγάλο βαθμό οι διεπιφάνειες των λίθων και των αρμών του κονιάματος (0,80-0,96mm) καθώς και πιο μικρές ρωγμές στην περιοχή κοντά το γέμισμα της τοιχοποιίας σε τάξη μεγέθους 0,77-1,58mm.

7. Προτάσεις για έρευνα

Μέσα από την παρούσα διπλωματική εργασία προέκυψαν διάφοροι προβληματισμοί τόσο σύμφωνα με τα αποτελέσματα των πειραμάτων όσο και με την εξέλιξη της μελέτης της ενίσχυσης των ιστορικών αργολιθοδομών με συνδετικό πηλοκονίαμα. Οι προτάσεις για έρευνα είναι οι εξής:

- I. Χρήση διαφορετικών τύπων πηλού, τόσο για την παρασκευή πηλοκονιαμάτων και ενεμάτων όσο και για την κατασκευή τοιχίσκων. Με αυτόν τον τρόπο θα γίνει σαφές πως τα διαφορετικά ορυκτά του πηλού επηρεάζουν τα φυσικά, μηχανικά και ρεολογικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων δοκιμίων,
- II. Παρασκευή πηλοκονιάματος με προσθήκη διαφορετικών τύπων ασβέστη, προκειμένου να προκύψει ένα συμπέρασμα σχετικά με την επίδραση του ασβέστη στην σταθεροποίηση των πηλοκονιαμάτων,
- III. Σχεδιασμός περισσότερων συνθέσεων ενεμάτων, με χρήση διαφορετικών αναλογιών και υλικών. Μπορεί να εξεταστούν συνθέσεις που έχουν μελετηθεί για την εφαρμογή τους σε τοιχοποιία με συνδετικό ασβεστοκονιάματα, π.χ. τριμερείς τσιμέντου-υδρασβέστου-ποζολάνης,
- IV. Εξέταση πέραν της σταθερότητας και της ρευστότητας των συνθέσεων των ενεμάτων, και της διεισδυτικότητας αυτών με την μέθοδο της στήλης άμμου, προκειμένου να επαληθευτούν τα παραπάνω συμπεράσματα,
- V. Στις επιτυχημένες ρεολογικά συνθέσεις ενεμάτων, να πραγματοποιηθούν, πέρα από μετρήσεις φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών, δοκιμές που να σχετίζονται με κύκλους ύγρανσης-ξήρανσης και ψύξης-απόψυξης. Στην παρούσα εργασία, έγιναν προσπάθειες να πραγματοποιηθούν αυτά τα πειράματα, αλλά λόγω της ιδιαιτερότητας του πηλού στις συνθέσεις των ενεμάτων, δεν μπορούσαν να προκύψουν αρηγμάτωτα δοκίμια από τις μήτρες που προτείνει το πρότυπο.
- VI. Εμπλουτισμός των συνθέσεων των ενεμάτων με χρήση υπερρευστοποιητή, προκειμένου να μελετηθεί η επιρροή της χρήσης του στα ρεολογικά χαρακτηριστικά των συνθέσεων των ενεμάτων,
- VII. Δοκιμή μεγαλύτερου όγκου σύνθετων δοκιμίων διεπιφανειών υποβάθρου-ενεμάτων σε διάτμηση,
- VIII. Κατασκευή επιπλέον τοιχίσκων και ενεμάτωσης αυτών με νέες συνθέσεις σε σχέση με αυτές που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία, προκειμένου να μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίο επιδρά το είδος του ενέματος σε αργολιθοδομές με συνδετικό πηλοκονίαμα,
- IX. Να εξεταστούν διαφορετικοί τρόποι συντήρησης των δοκιμίων των ενεμάτων (ειδικά αυτών που περιέχουν πηλό), έτσι ώστε να βρεθεί ο βέλτιστος, ο οποίος να ανταποκρίνεται στις περιβαλλοντικές συνθήκες που υπόκειται μία πραγματική κατασκευή,
- X. Ενεμάτωση κυλίνδρων που προσομοιώνουν την ενδιάμεση στρώση μίας τριστρωτής τοιχοποιίας, και δοκιμή τους σε θλίψη.

Παραρτήματα

Παράρτημα Α: Μηχανικά και Φυσικά Χαρακτηριστικά πηλοκονιαμάτων και πηλοασβεστοκονιαμάτων

Φυσικά Χαρακτηριστικά

Πίνακας 18. Φυσικά χαρακτηριστικά πρισμάτων πηλοκονιαμάτων στις 28, 60 και 90 ημέρες ωρίμανσης τους

| Όνομα δοκιμίου | Ημέρες ωρίμανσης | Βάρος (gr) | Μέσο βάρος (gr) | Μήκος (mm) | Ύψος (mm) | Πλάτος (mm) | Πλάγιες αποστάσεις (mm) | Μήκος ανοίγματος L (mm) | Αρχικός όγκος V_0 (mm^3) | Ποκνότητα (kg/m^3) | Μέση Ποκνότητα (kg/m^3) | Όγκος στην χρονική στιγμή t V_t (mm^3) | Συστολή ξήρανσης (%) | Μέση Συστολή ξήρανσης (%) |
|-----------------|------------------|------------|-----------------|------------|-----------|-------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------|------------------------|-----------------------------|--|----------------------|---------------------------|
| 14.03.2017, I | 28 | 361,36 | 362,29 | 147,60 | 36,97 | 35,74 | 23,80 | 100,00 | 256000 | 1852,89036 | 1872,55 | 195025,031 | 23,82 | 24,42 |
| 14.03.2017, II | | 362,30 | | 146,08 | 36,50 | 36,05 | 23,00 | 100,08 | 256000 | 1884,86149 | | 192215,716 | 24,92 | |
| 14.03.2017, III | | 363,21 | | 145,87 | 36,66 | 36,13 | 22,90 | 100,07 | 256000 | 1879,88547 | | 193208,578 | 24,53 | |
| 14.03.2017, I | 60 | 363,16 | 362,96 | 146,00 | 36,50 | 36,5 | 23,00 | 100,00 | 256000 | 1867,06494 | 1905,50 | 194508,5 | 24,02 | 25,58 |
| 14.03.2017, II | | 364,45 | | 145,00 | 36,50 | 35,50 | 22,50 | 100,00 | 256000 | 1939,76328 | | 187883,75 | 26,61 | |
| 14.03.2017, III | | 361,27 | | 146,00 | 35,50 | 36,50 | 23,00 | 100,00 | 256000 | 1909,6678 | | 189179,5 | 26,10 | |
| 15.03.2017, I | 90 | 363,28 | 363,23 | 147,00 | 37,00 | 35,00 | 23,5 | 100,00 | 256000 | 1908,33399 | 1903,97 | 190365 | 25,64 | 25,44 |
| 15.03.2017, II | | 359,71 | | 147,00 | 37,00 | 36,00 | 23,5 | 100,00 | 256000 | 1837,09219 | | 195804 | 23,51 | |
| 15.03.2017, III | | 366,71 | | 148,00 | 36,00 | 35,00 | 24 | 100,00 | 256000 | 1966,48434 | | 186480 | 27,16 | |

Πίνακας 19. Φυσικά χαρακτηριστικά πρισμάτων πηλοασβεστοκονιαμάτων στις 28, 60 και 90 ημέρες ωρίμανσης τους

| Όνομα δοκιμίου | Ημέρες ωρίμανσης | Βάρος (gr) | Μέσο βάρος (gr) | Μήκος (mm) | Ύψος (mm) | Πλάτος (mm) | Πλάγιες αποστάσεις (mm) | Μήκος ανοίγματος L (mm) | Αρχικός όγκος V_0 (mm ³) | Ποκνότητα (kg/m ³) | Μέση Ποκνότητα (kg/m ³) | Όγκος στην χρονική στιγμή $t V_t$ (mm ³) | Συστολή ξήρανσης (%) | Μέση Συστολή ξήρανσης (%) |
|-----------------|------------------|------------|-----------------|------------|-----------|-------------|-------------------------|-------------------------|--|--------------------------------|-------------------------------------|--|----------------------|---------------------------|
| 16.03.2017, ΑΠ1 | 28 | 353,94 | 353,56 | 154,00 | 38,50 | 37,50 | 27,00 | 0,1000 | 256000 | 1591,90 | 1611,52 | 222337,5 | 13,15 | 14,29 |
| 16.03.2017, ΑΠ2 | | 352,77 | | 153,00 | 38,50 | 37,00 | 26,50 | 0,1000 | 256000 | 1618,59 | | 217948,5 | 14,86 | |
| 16.03.2017, ΑΠ3 | | 353,96 | | 153,00 | 38,50 | 37,00 | 26,50 | 0,1000 | 256000 | 1624,05 | | 217948,5 | 14,86 | |
| 17.03.2017, ΑΠ4 | 60 | 360,82 | 359,67 | 153,00 | 37,50 | 37,50 | 26,50 | 0,1000 | 256000 | 1677,0138 | 1642,85 | 215156,25 | 15,95 | 14,46 |
| 17.03.2017, ΑΠ5 | | 361,84 | | 154,00 | 38,00 | 37,50 | 27,00 | 0,1000 | 256000 | 1648,8494 | | 219450 | 14,28 | |
| 17.03.2017, ΑΠ6 | | 356,34 | | 154,00 | 38,50 | 37,50 | 27,00 | 0,1000 | 256000 | 1602,6986 | | 222337,5 | 13,15 | |
| 18.03.2017, ΑΠ4 | 90 | 346,92 | 346,18 | 153,00 | 38,00 | 38,00 | 26,50 | 0,1000 | 256000 | 1570,25691 | 1568,66 | 220932 | 13,70 | 13,79 |
| 18.03.2017, ΑΠ5 | | 343,74 | | 154,00 | 38,00 | 38,00 | 27,00 | 0,1000 | 256000 | 1545,76033 | | 222376 | 13,13 | |
| 18.03.2017, ΑΠ6 | | 347,89 | | 154,00 | 38,40 | 37,00 | 27,00 | 0,1000 | 256000 | 1589,96761 | | 218803,2 | 14,53 | |

Μηχανικά Χαρακτηριστικά

Πίνακας 20. Καμπτική αντοχή πρισμάτων ηηλοκονιαμάτων στις 28, 60 και 90 ημέρες ωρίμανσης τους

| Όνομα δοκιμίου | Ημέρες ωρίμανσης | Φορτίο P (tons) | Φορτίο P (kN) | Ροπή M (kN*m) | Ροπή Αντίστασης W (m ³) | Καμπτική Αντοχή $f_{m,fl}$ (Μpa) | Μέση Καμπτική Αντοχή $f_{m,fl}$ (Μpa) |
|-----------------|------------------|-----------------|---------------|---------------|-------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| 14.03.2017, I | 28 | 0,093 | 0,93 | 0,0233 | 8,14E-06 | 2,86 | 2,74 |
| 14.03.2017, II | | 0,091 | 0,905 | 0,0226 | 8,00E-06 | 2,83 | |
| 14.03.2017, III | | 0,082 | 0,82 | 0,0205 | 8,09E-06 | 2,53 | |
| 14.03.2017, I | 60 | 0,058 | 0,5829 | 0,0146 | 8,10E-06 | 1,80 | 1,70 |
| 14.03.2017, II | | 0,050 | 0,4981 | 0,0125 | 7,88E-06 | 1,58 | |
| 14.03.2017, III | | 0,053 | 0,53 | 0,0133 | 7,67E-06 | 1,73 | |
| 15.03.2017, I | 90 | 0,085 | 0,8484 | 0,0212 | 7,99E-06 | 2,66 | 2,83 |
| 15.03.2017, II | | 0,094 | 0,9408 | 0,0235 | 8,21E-06 | 2,86 | |
| 15.03.2017, III | | 0,090 | 0,8968 | 0,0224 | 7,56E-06 | 2,97 | |

Πίνακας 21. Θλιπτική αντοχή πρισμάτων ηηλοκονιαμάτων στις 28, 60 και 90 ημέρες ωρίμανσης τους

| Όνομα δοκιμίου | Ημέρες ωρίμανσης | Πλακάκι (m) | Πλάτος (m) | Εμβαδόν A (m ²) | Φορτίο P (kN) | Τάση σ (Μpa) | Θλιπτική Αντοχή f_{cm} (Μpa) | Μέση Θλιπτική Αντοχή f_{cm} (Μpa) |
|------------------|------------------|-------------|------------|-----------------------------|---------------|--------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| 14.03.2017, IA | 28 | 0,04 | 0,03574 | 0,00143 | 6,80 | 4,76 | 4,50 | 4,55 |
| 14.03.2017, IB | | 0,04 | 0,03574 | 0,00143 | 6,06 | 4,24 | | |
| 14.03.2017, IIA | | 0,04 | 0,03605 | 0,00144 | 7,20 | 4,99 | 4,66 | |
| 14.03.2017, IIB | | 0,04 | 0,03605 | 0,00144 | 6,23 | 4,32 | | |
| 14.03.2017, IIIA | | 0,04 | 0,03613 | 0,00145 | 7,07 | 4,89 | 4,56 | |
| 14.03.2017, IIIB | | 0,04 | 0,03613 | 0,00145 | 6,10 | 4,22 | | |
| 14.03.2017, IA | 60 | 0,04 | 0,0365 | 0,00146 | 5,89 | 4,03 | 4,12 | 4,02 |
| 14.03.2017, IB | | 0,04 | 0,0365 | 0,00146 | 6,15 | 4,21 | | |
| 14.03.2017, IIA | | 0,04 | 0,0355 | 0,00142 | 5,3 | 3,73 | 3,35 | |
| 14.03.2017, IIB | | 0,04 | 0,0355 | 0,00142 | 4,2 | 2,96 | | |
| 14.03.2017, IIIA | | 0,04 | 0,0365 | 0,00146 | 5,99 | 4,10 | 4,35 | |
| 14.03.2017, IIIB | | 0,04 | 0,0365 | 0,00146 | 6,7 | 4,59 | | |
| 15.03.2017, I1A | 90 | 0,04 | 0,035 | 0,00140 | 8,2 | 5,86 | 6,50 | 5,92 |
| 15.03.2017, I1B | | 0,04 | 0,035 | 0,00140 | 10 | 7,14 | | |
| 15.03.2017, I2A | | 0,04 | 0,036 | 0,00144 | 8,1 | 5,63 | 5,94 | |
| 15.03.2017, I2B | | 0,04 | 0,036 | 0,00144 | 9 | 6,25 | | |
| 15.03.2017, I3A | | 0,04 | 0,035 | 0,00140 | 7,8 | 5,57 | 5,75 | |
| 15.03.2017, I3B | | 0,04 | 0,035 | 0,00140 | 8,3 | 5,93 | | |

Πίνακας 22. Καμπτική αντοχή πρισμάτων ηηλοασβεστοκονιαμάτων στις 28, 60 και 90 ημέρες ωρίμανσης τους

| Όνομα δοκιμίου | Ημέρες ωρίμανσης | Φορτίο P (tons) | Φορτίο P (kN) | Ροπή M (kN*m) | Ροπή Αντίστασης W (m ³) | Καμπτική Αντοχή $f_{m,fl}$ (Μpa) | Μέση Καμπτική Αντοχή $f_{m,fl}$ (Μpa) |
|-----------------|------------------|-----------------|---------------|---------------|-------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| 16.03.2017, ΑΠ1 | 28 | 0,025 | 0,25 | 0,0063 | 9,26406E-06 | 0,67 | 0,66 |
| 16.03.2017, ΑΠ2 | | 0,026 | 0,26 | 0,0065 | 9,14054E-06 | 0,71 | |
| 16.03.2017, ΑΠ3 | | 0,022 | 0,22 | 0,0055 | 9,14054E-06 | 0,60 | |
| 17.03.2017, ΑΠ4 | 60 | 0,023 | 0,23 | 0,0058 | 8,78906E-06 | 0,65 | 0,59 |
| 17.03.2017, ΑΠ5 | | 0,017 | 0,1735 | 0,0043 | 0,000009025 | 0,48 | |
| 17.03.2017, ΑΠ6 | | 0,024 | 0,2391 | 0,0060 | 9,26406E-06 | 0,65 | |
| 18.03.2017, ΑΠ4 | 90 | 0,016 | 0,1568 | 0,0039 | 9,14533E-06 | 0,43 | 0,51 |
| 18.03.2017, ΑΠ5 | | 0,019 | 0,1948 | 0,0049 | 9,14533E-06 | 0,53 | |
| 18.03.2017, ΑΠ6 | | 0,020 | 0,2017 | 0,0050 | 9,09312E-06 | 0,55 | |

Πίνακας 23. Θλιπτική αντοχή πρισμάτων πηλοασβεστοκονιαμάτων στις 28, 60 και 90 ημέρες ωρίμανσης τους

| Όνομα δοκιμίου | Ημέρες ωρίμανσης | Πλακάκι (m) | Πλάτος (m) | Εμβαδόν A (m ²) | Φορτίο P (kN) | Τάση σ (Μρα) | Θλιπτική Αντοχή f _{cm} (Μρα) | Μέση Θλιπτική Αντοχή f _{cm} (Μρα) |
|--------------------|------------------|-------------|------------|-----------------------------|---------------|--------------|---------------------------------------|--|
| 16.03.2017, IA | 28 | 0,04 | 0,03750 | 0,00150 | 1,53 | 1,02 | 1,73 | 2,92 |
| 16.03.2017, IB | | 0,04 | 0,03750 | 0,00150 | 3,65 | 2,43 | 3,20 | |
| 16.03.2017, IIA | | 0,04 | 0,03700 | 0,00148 | 4,80 | 3,24 | | |
| 16.03.2017, IIB | | 0,04 | 0,03700 | 0,00148 | 4,67 | 3,16 | | |
| 16.03.2017, IIIA | | 0,04 | 0,03850 | 0,00154 | 4,70 | 3,05 | 3,05 | |
| 16.03.2017, IIIB | | 0,04 | 0,03850 | 0,00154 | 4,69 | 3,05 | | |
| 17.03.2017, AP4, A | 60 | 0,04 | 0,03750 | 0,0015 | 1,3 | 0,867 | 0,967 | 1,08 |
| 17.03.2017, AP4, B | | 0,04 | 0,03750 | 0,0015 | 1,6 | 1,067 | 1,103 | |
| 17.03.2017, AP5, A | | 0,04 | 0,03750 | 0,0015 | 1,51 | 1,007 | | |
| 17.03.2017, AP5, B | | 0,04 | 0,03750 | 0,0015 | 1,8 | 1,200 | | |
| 17.03.2017, AP6, A | | 0,04 | 0,03750 | 0,0015 | 1,73 | 1,153 | 1,127 | |
| 17.03.2017, AP6, B | | 0,04 | 0,03750 | 0,0015 | 1,65 | 1,100 | | |
| 18.03.2017, AP4, A | 90 | 0,04 | 0,03800 | 0,00152 | 1,3 | 1,000 | 1,100 | 1,30 |
| 18.03.2017, AP4, B | | 0,04 | 0,03800 | 0,00152 | 1,6 | 1,200 | 1,500 | |
| 18.03.2017, AP5, A | | 0,04 | 0,03800 | 0,00152 | 1,51 | 1,500 | | |
| 18.03.2017, AP5, B | | 0,04 | 0,03800 | 0,00152 | 1,8 | 1,500 | | |
| 18.03.2017, AP6, A | | 0,04 | 0,03700 | 0,00148 | 1,73 | 1,300 | 1,250 | |
| 18.03.2017, AP6, B | | 0,04 | 0,03700 | 0,00148 | 1,65 | 1,200 | | |

Παράρτημα Β: Μηχανικά και Φυσικά Χαρακτηριστικά συνθέσεων ενεμάτων

Φυσικά Χαρακτηριστικά

Πίνακας 24. Φυσικά χαρακτηριστικά πρισμάτων ενεμάτων για τις 28 και 90 ημέρες

| Όνομα δοκιμίου | Κωδικός ενέματος | Ημέρες ωρίμανσης | Λόγος Νερού προς Στερεά | Βάρος (gr) | Μήκος (mm) | Ύψος (mm) | Πλάτος (mm) | Πλάγες αποστάσεις (mm) | Μήκος ανοίγματος L (mm) | Αρχικός όγκος V_0 (mm ³) | Ποκνότητα ρ (kg/m ³) | Όγκος στην χρονική στιγμή t V_t (mm ³) | Συστολή ξήρανσης (%) |
|----------------|---------------------------|------------------|-------------------------|------------|------------|-----------|-------------|------------------------|-------------------------|--|---------------------------------------|--|----------------------|
| 26.04.2017, E3 | N 63P 7C 30W 80SPL 0.75 | 28 | 0,8 | 330,65 | 163,00 | 39,50 | 36,50 | 31,50 | 0,100 | 256000,00 | 1406,99 | 235005,25 | 8,20 |
| 26.04.2017, E4 | N 63P 7C 30W 87.5SPL 0.75 | | 0,875 | 342,81 | 158,50 | 39,50 | 37,00 | 29,25 | 0,100 | 256000,00 | 1479,88 | 231647,75 | 9,51 |
| 9.06.2017, I1 | N 63P 7C 30W 87.5SPL 0.75 | | 0,875 | 250,22 | 156,50 | 39,50 | 37,00 | 28,25 | 0,100 | 256000,00 | 1093,98 | 228724,75 | 10,65 |
| 9.06.2017, I2 | N 63P 7C 30W 87.5SPL 0.75 | | 0,875 | 249,49 | 158,00 | 39,00 | 36,50 | 29,00 | 0,100 | 256000,00 | 1109,27 | 224913 | 12,14 |
| 26.04.2017, E3 | N 63P 7C 30W 80SPL 0.75 | 60 | 0,8 | 324,53 | 159,00 | 40,00 | 37,00 | 29,50 | 0,100 | 256000,00 | 1379,10 | 235320 | 8,08 |
| 26.04.2017, E4 | N 63P 7C 30W 87.5SPL 0.75 | | 0,875 | 296,88 | 158,00 | 40,00 | 36,00 | 29,00 | 0,100 | 256000,00 | 1304,85 | 227520 | 11,13 |
| 26.04.2017, E3 | N 63P 7C 30W 80SPL 0.75 | 90 | 0,8 | 225,83 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 26.04.2017, E4 | N 63P 7C 30W 87.5SPL 0.75 | | 0,875 | 244,79 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 10.05.2017 | N 100W 80 | 28 | 0,8 | 365,39 | 159,50 | 40,00 | 40,00 | 29,75 | 0,100 | 256000,00 | 1431,78 | 255200 | 0,31 |
| 11.05.2017 | N 100W 85 | | 0,85 | 354,17 | 161,50 | 39,50 | 38,50 | 30,75 | 0,100 | 256000,00 | 1442,05 | 245601,125 | 4,06 |
| 10.05.2017 | N 100W 90 | | 0,9 | 346,07 | 160,00 | 39,50 | 38,50 | 30,00 | 0,100 | 256000,00 | 1422,28 | 243320 | 4,95 |
| 10.05.2017 | N 100W 90 x.Y | | 0,9 | 351,61 | 160,00 | 40,00 | 38,00 | 30,00 | 0,100 | 256000,00 | 1445,76 | 243200 | 5,00 |
| 11.05.2017 | N 100W 100 | 28 | 1 | 301,11 | 160,00 | 39,00 | 37,00 | 30,00 | 0,100 | 256000,00 | 1304,18 | 230880 | 9,81 |
| 15.05.2017 | N 90C 10W 80 | | 0,8 | 383,46 | 160,00 | 39,00 | 39,00 | 30,00 | 0,100 | 256000,00 | 1575,69 | 243360 | 4,94 |
| 15.05.2017 | N 90C 10W 85 | | 0,85 | 373,63 | 159,50 | 39,00 | 38,50 | 29,75 | 0,100 | 256000,00 | 1560,11 | 239489,25 | 6,45 |
| 15.05.2017 | N 90C 10W 90 | | 0,9 | 358,69 | 159,50 | 39,50 | 39,00 | 29,75 | 0,100 | 256000,00 | 1459,81 | 245709,75 | 4,02 |
| 23.06.2017 | N 90C 10W 100 | 1 | 258,32 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 16.05.2017 | N 80C 20W 75 | 28 | 0,75 | 362,70 | 160,00 | 40,00 | 38,00 | 30,00 | 0,100 | 256000,00 | 1491,37 | 243200 | 5,00 |
| 16.05.2017 | N 80C 20W 80 | | 0,8 | 380,27 | 160,00 | 40,00 | 40,00 | 30,00 | 0,100 | 256000,00 | 1485,43 | 256000 | 0,00 |
| 16.05.2017 | N 80C 20W 85 | | 0,85 | 341,00 | 160,00 | 40,00 | 37,00 | 30,00 | 0,100 | 256000,00 | 1440,03 | 236800 | 7,50 |
| 23.06.2017 | N 80C 20W 95 | | 0,95 | 220,34 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 18.05.2017 | N 70C 30W 80 | 28 | 0,8 | 337,66 | 160,00 | 40,00 | 40,00 | 30,00 | 0,100 | 256000,00 | 1318,98 | 256000 | 0,00 |
| 18.05.2017 | N 70C 30W 85 | | 0,85 | 320,2 | 160,00 | 39,00 | 37,00 | 30,00 | 0,100 | 256000,00 | 1386,87 | 230880 | 9,81 |
| 10.05.2017 | N 100W 80 | 90 | 0,8 | 254,48 | 159,00 | 40,00 | 38,00 | 29,50 | 0,10 | 256000,00 | 1052,96 | 241680,00 | 5,59 |
| 11.05.2017 | N 100W 80 | | 0,8 | 261,47 | 159,00 | 39,50 | 39,00 | 29,50 | 0,10 | 256000,00 | 1067,49 | 244939,50 | 4,32 |
| 11.05.2017 | N 100W 85 | | 0,85 | 248,15 | 159,00 | 39,50 | 39,00 | 29,50 | 0,10 | 256000,00 | 1013,11 | 244939,50 | 4,32 |
| 10.05.2017 | N 100W 90 | | 0,9 | 226,3 | 160,00 | 39,00 | 37,50 | 30,00 | 0,10 | 256000,00 | 967,09 | 234000,00 | 10,38 |
| 10.05.2017 | N 100W 90 | 90 | 0,9 | 229,81 | 159,90 | 40,00 | 37,00 | 0,00 | 0,10 | 256000,00 | 971,09 | 236652,00 | 7,56 |
| 11.05.2017 | N 100W 100 | | 1 | 239,77 | 159,00 | 40,00 | 36,00 | 0,00 | 0,10 | 256000,00 | 1047,21 | 228960,00 | 10,56 |
| 11.05.2017 | N 100W 100 | 90 | 1 | 236,32 | 159,00 | 39,50 | 37,50 | 0,00 | 0,10 | 256000,00 | 1003,40 | 235518,75 | 8 |
| 15.05.2017 | N 90C 10W 80 | | 0,8 | 255,53 | 160,00 | 40,00 | 39,00 | 30,00 | 0,10 | 256000,00 | 1023,76 | 249600,00 | 2,5 |
| 15.05.2017 | N 90C 10W 80 | | 0,8 | 265,38 | 160,00 | 39,50 | 39,00 | 30,00 | 0,10 | 256000,00 | 1076,68 | 246480,00 | 3,72 |
| 15.05.2017 | N 90C 10W 85 | | 0,85 | 235,4 | 159,00 | 40,00 | 37,50 | 29,50 | 0,10 | 256000,00 | 987,00 | 238500,00 | 6,84 |
| 16.05.2017 | N 80C 20W 75 | 90 | 0,75 | 240,72 | 160,00 | 39,40 | 39,00 | 30,00 | 0,10 | 256000,00 | 979,11 | 245856,00 | 3,96 |
| 16.05.2017 | N 80C 20W 80 | | 0,8 | 240,72 | 160,00 | 40,00 | 38,00 | 30,00 | 0,10 | 256000,00 | 989,80 | 243200,00 | 5 |
| 23.06.2017 | N 80C 20W 95 | | 0,95 | 250,13 | 160,00 | 39,50 | 37,00 | 30,00 | 0,10 | 256000,00 | 1069,66 | 233840,00 | 8,66 |

Μηχανικά Χαρακτηριστικά

Πίνακας 25. Καμπτική αντοχή πρισμάτων ενεμάτων για τις 28 και 90 ημέρες ωρίμανσης

| Όνομα δοκιμίου | Κωδικός ενέματος | Ημέρες ωρίμανσης | Λόγος Νερού προς Στερεά W/S | Ημερομηνία δοκιμής | Φορτίο P (tons) | Φορτίο P (kN) | Ροπή M (kN*m) | Ροπή Αντίστασης W (m ³) | Καμπτική Αντοχή f_t (Μpa) | Μέση Καμπτική Αντοχή $f_{m,η}$ (Μpa) |
|----------------|----------------------------------|------------------|-----------------------------|--------------------|-----------------|---------------|---------------|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| 26.04.2017, E3 | <u>N 63P 7C 30W 80SPL 0.75</u> | 28 | 0,8 | 31.05.2017 | 0,0100 | 0,1 | 0,0025 | 9,49E-06 | 0,26 | 0,33 |
| 26.04.2017, E4 | <u>N 63P 7C 30W 87.5SPL 0.75</u> | | 0,875 | 31.05.2017 | 0,0150 | 0,15 | 0,0038 | 9,62E-06 | 0,39 | |
| 9.06.2017, I1 | <u>N 63P 7C 30W 87.5SPL 0.75</u> | | 0,875 | 7/7/2017 | 0,0238 | 0,238 | 0,0060 | 9,62E-06 | 0,62 | 0,48 |
| 9.06.2017, I2 | <u>N 63P 7C 30W 87.5SPL 0.75</u> | | 0,875 | 7/7/2017 | 0,0130 | 0,1297 | 0,0032 | 9,25E-06 | 0,35 | |
| 26.04.2017, E3 | <u>N 63P 7C 30W 80SPL 0.75</u> | 60 | 0,8 | 22.06.2017 | 0,0296 | 0,296 | 0,0074 | 9,87E-06 | 0,75 | 0,74 |
| 26.04.2017, E4 | <u>N 63P 7C 30W 87.5SPL 0.75</u> | | 0,875 | 22.06.2017 | 0,0282 | 0,282 | 0,0071 | 9,60E-06 | 0,73 | |
| 26.04.2017, E3 | <u>N 63P 7C 30W 80SPL 0.75</u> | 90 | 0,8 | 26.07.2017 | - | - | - | - | 0,00 | 0,00 |
| 26.04.2017, E4 | <u>N 63P 7C 30W 87.5SPL 0.75</u> | | 0,875 | 26.07.2017 | - | - | - | - | 0,00 | |
| 10.05.2017 | <u>N 100W 80</u> | 28 | 0,8 | 12.06.2017 | 0,0448 | 0,4475 | 0,0112 | 1,07E-05 | 1,05 | 0,76 |
| 11.05.2017 | <u>N 100W 85</u> | | 0,85 | 12.06.2017 | 0,0314 | 0,3136 | 0,0078 | 1,00E-05 | 0,78 | |
| 10.05.2017 | <u>N 100W 90</u> | | 0,9 | 12.06.2017 | 0,02678 | 0,2678 | 0,0067 | 1,00E-05 | 0,67 | |
| 10.05.2017 | <u>N 100W 90 X.Y</u> | | 0,9 | 12.06.2017 | 0,0361 | 0,3611 | 0,0090 | 1,01E-05 | 0,89 | |
| 11.05.2017 | <u>N 100W 100</u> | | 1 | 12.06.2017 | 0,0202 | 0,2023 | 0,0051 | 9,38E-06 | 0,54 | |
| 15.05.2017 | <u>N 90C 10W 80</u> | 28 | 0,8 | 12.06.2017 | 0,0250 | 0,25 | 0,0063 | 9,89E-06 | 0,63 | 0,54 |
| 15.05.2017 | <u>N 90C 10W 85</u> | | 0,85 | 12.06.2017 | 0,0193 | 0,1926 | 0,0048 | 9,76E-06 | 0,49 | |
| 15.05.2017 | <u>N 90C 10W 90</u> | | 0,9 | 12.06.2017 | 0,0205 | 0,205 | 0,0051 | 1,01E-05 | 0,51 | |
| 23.06.2017 | <u>N 90C 10W 100</u> | | 1 | 26.07.2017 | - | - | - | - | 0,00 | |
| 16.05.2017 | <u>N 80C 20W 75</u> | 28 | 0,75 | 12.06.2017 | 0,0223 | 0,2225 | 0,0056 | 1,01E-05 | 0,55 | 0,57 |
| 16.05.2017 | <u>N 80C 20W 80</u> | | 0,8 | 12.06.2017 | 0,0228 | 0,2278 | 0,0057 | 1,07E-05 | 0,53 | |
| 16.05.2017 | <u>N 80C 20W 85</u> | | 0,85 | 12.06.2017 | 0,0250 | 0,25 | 0,0063 | 9,87E-06 | 0,63 | |
| 23.06.2017 | <u>N 80C 20W 95</u> | | 0,95 | 26.07.2017 | - | - | - | - | 0,00 | |
| 18.05.2017 | <u>N 70C 30W 80</u> | 28 | 0,8 | 22.06.2017 | 0,0177 | 0,1772 | 0,0044 | 1,07E-05 | 0,42 | 0,45 |
| 18.05.2017 | <u>N 70C 30W 85</u> | | 0,85 | 22.06.2017 | 0,0181 | 0,1806 | 0,0045 | 9,38E-06 | 0,48 | |
| 10.05.2017 | <u>N 100W 90</u> | 90 | 0,9 | 26.10.2017 | 0,046 | 0,460 | 0,0115 | 9,87E-06 | 1,17 | 1,43 |
| 10.05.2017 | <u>N 100W 90</u> | | 0,9 | 26.10.2017 | 0,0768 | 0,768 | 0,0192 | 9,38E-06 | 2,05 | |
| 10.05.2017 | <u>N 100W 100</u> | | 1 | 26.10.2017 | 0,032 | 0,320 | 0,008 | 9,60E-06 | 0,83 | |
| 11.05.2017 | <u>N 100W 100</u> | | 1 | 26.10.2017 | 0,0647 | 0,647 | 0,0162 | 9,75E-06 | 1,66 | |
| 23.06.2017 | <u>N 80C 20W 95</u> | 90 | 0,95 | 26.10.2017 | 0,038 | 0,38 | 0,0095 | 9,62E-06 | 0,99 | |

Πίνακας 26. Θλιπτική αντοχή πρισμάτων ενεμάτων για τις 28 και 90 ημέρες

| Όνομα δοκιμίου | Κωδικός ενέματος | Ημέρες ωρίμανσης | Λόγος Νερού προς Στερεά W/S | Ημερομηνία δοκιμής | Πλακάκι (m) | Πλάτος (m) | Εμβαδόν A (m ²) | Φορτίο P (kN) | Θλιπτική Αντοχή f _{cm} (ΜΡα) | Μέση Θλιπτική Αντοχή f _{cm} (ΜΡα) |
|-------------------|----------------------------------|------------------|-----------------------------|--------------------|-------------|------------|-----------------------------|---------------|---------------------------------------|--|
| 26.04.2017, Ε3, Α | <u>N 63P 7C 30W 80SPL 0.75</u> | 28 | 0,8 | 31.05.2017 | 0,04 | 0,03650 | 0,00146 | 1,3 | 0,89 | 0,88 |
| 26.04.2017, Ε3, Β | <u>N 63P 7C 30W 80SPL 0.75</u> | | | 31.05.2017 | 0,04 | 0,03650 | 0,00146 | 1,27 | 0,87 | |
| 26.04.2017, Ε4, Α | <u>N 63P 7C 30W 87.5SPL 0.75</u> | 28 | 0,875 | 31.05.2017 | 0,04 | 0,03700 | 0,00148 | 0,75 | 0,51 | 0,50 |
| 26.04.2017, Ε4, Β | <u>N 63P 7C 30W 87.5SPL 0.75</u> | | | 31.05.2017 | 0,04 | 0,03700 | 0,00148 | 0,72 | 0,49 | |
| 09.06.2017, Ι1 | <u>N 63P 7C 30W 87.5SPL 0.75</u> | 28 | 0,875 | 07.07.2017 | 0,04 | 0,03700 | 0,00148 | 1,1 | 0,74 | 0,78 |
| 09.06.2017, Ι1 | <u>N 63P 7C 30W 87.5SPL 0.75</u> | | | 07.07.2017 | 0,04 | 0,03700 | 0,00148 | 1,2 | 0,81 | |
| 09.06.2017, Ι2 | <u>N 63P 7C 30W 87.5SPL 0.75</u> | 28 | 0,875 | 07.07.2017 | 0,04 | 0,03650 | 0,00146 | 1,3 | 0,89 | 0,88 |
| 09.06.2017, Ι2 | <u>N 63P 7C 30W 87.5SPL 0.75</u> | | | 07.07.2017 | 0,04 | 0,03650 | 0,00146 | 1,28 | 0,88 | |
| 26.04.2017, Ε3, Α | <u>N 63P 7C 30W 80SPL 0.75</u> | 60 | 0,8 | 22.06.2017 | 0,04 | 0,03700 | 0,00148 | 2,46 | 1,66 | 1,54 |
| 26.04.2017, Ε3, Β | <u>N 63P 7C 30W 80SPL 0.75</u> | | | 22.06.2017 | 0,04 | 0,03700 | 0,00148 | 2,09 | 1,41 | |
| 26.04.2017, Ε4, Α | <u>N 63P 7C 30W 87.5SPL 0.75</u> | 60 | 0,875 | 22.06.2017 | 0,04 | 0,03600 | 0,00144 | 1,96 | 1,36 | 1,29 |
| 26.04.2017, Ε4, Β | <u>N 63P 7C 30W 87.5SPL 0.75</u> | | | 22.06.2017 | 0,04 | 0,03600 | 0,00144 | 1,76 | 1,22 | |
| 26.04.2017, Ε3, Α | <u>N 63P 7C 30W 80SPL 0.75</u> | 90 | 0,8 | 26.07.2017 | 0,04 | 0,03700 | 0,00148 | 4,54 | 3,07 | 3,08 |
| 26.04.2017, Ε3, Β | <u>N 63P 7C 30W 80SPL 0.75</u> | | | 26.07.2017 | 0,04 | 0,03700 | 0,00148 | 4,58 | 3,09 | |
| 26.04.2017, Ε4, Α | <u>N 63P 7C 30W 87.5SPL 0.75</u> | 90 | 0,875 | 26.07.2017 | 0,04 | 0,03600 | 0,00144 | 3,92 | 2,72 | 2,48 |
| 26.04.2017, Ε4, Β | <u>N 63P 7C 30W 87.5SPL 0.75</u> | | | 26.07.2017 | 0,04 | 0,03600 | 0,00144 | 3,59 | 2,49 | |
| 26.04.2017, Ε4, Γ | <u>N 63P 7C 30W 87.5SPL 0.75</u> | | | 26.07.2017 | 0,04 | 0,03600 | 0,00144 | 3,22 | 2,24 | |
| 10.05.2017, Α | <u>N 100W 80</u> | 28 | 0,8 | 12.06.2017 | 0,04 | 0,04000 | 0,00160 | 2,16 | 1,35 | 1,40 |
| 10.05.2017, Β | <u>N 100W 80</u> | | | 12.06.2017 | 0,04 | 0,04000 | 0,00160 | 2,31 | 1,44 | |
| 11.05.2017, Α | <u>N 100W 85</u> | 28 | 0,85 | 12.06.2017 | 0,04 | 0,03850 | 0,00154 | 1,68 | 1,09 | 1,09 |
| 11.05.2017, Β | <u>N 100W 85</u> | | | 12.06.2017 | 0,04 | 0,03850 | 0,00154 | 1,67 | 1,08 | |
| 10.05.2017, Α | <u>N 100W 90</u> | 28 | 0,9 | 12.06.2017 | 0,04 | 0,03800 | 0,00152 | 1,74 | 1,14 | 1,19 |
| 10.05.2017, Β | <u>N 100W 90</u> | | | 12.06.2017 | 0,04 | 0,03800 | 0,00152 | 1,89 | 1,24 | |
| 10.05.2017, Α | <u>N 100W 90</u> | 28 | 0,9 | 12.06.2017 | 0,04 | 0,03850 | 0,00154 | 1,52 | 0,99 | 1,03 |
| 10.05.2017, Β | <u>N 100W 90</u> | | | 12.06.2017 | 0,04 | 0,03850 | 0,00154 | 1,65 | 1,07 | |
| 11.05.2017, Α | <u>N 100W 100</u> | 28 | 1 | 12.06.2017 | 0,04 | 0,03700 | 0,00148 | 1,11 | 0,75 | 0,84 |
| 11.05.2017, Β | <u>N 100W 100</u> | | | 12.06.2017 | 0,04 | 0,03700 | 0,00148 | 1,37 | 0,93 | |
| 15.05.2017, Α | <u>N 90C 10W 80</u> | 28 | 0,8 | 12.06.2017 | 0,04 | 0,03900 | 0,00156 | 1,58 | 1,01 | 1,01 |
| 15.05.2017, Β | <u>N 90C 10W 80</u> | | | 12.06.2017 | 0,04 | 0,03900 | 0,00156 | 1,56 | 1,00 | |
| 15.05.2017, Α | <u>N 90C 10W 85</u> | 28 | 0,85 | 12.06.2017 | 0,04 | 0,03850 | 0,00154 | 1,37 | 0,89 | 0,91 |
| 15.05.2017, Β | <u>N 90C 10W 85</u> | | | 12.06.2017 | 0,04 | 0,03850 | 0,00154 | 1,42 | 0,92 | |
| 15.05.2017, Α | <u>N 90C 10W 90</u> | 28 | 0,9 | 12.06.2017 | 0,04 | 0,03900 | 0,00156 | 0,98 | 0,63 | 0,64 |
| 15.05.2017, Β | <u>N 90C 10W 90</u> | | | 12.06.2017 | 0,04 | 0,03900 | 0,00156 | 1,02 | 0,65 | |
| 23.06.2017, Α | <u>N 90C 10W 100</u> | 28 | 1 | 26.07.2017 | 0,04 | 0,03900 | 0,00156 | 2,02 | 1,29 | 1,27 |
| 23.06.2017, Β | <u>N 90C 10W 100</u> | | | 26.07.2017 | 0,04 | 0,03900 | 0,00156 | 1,95 | 1,25 | |
| 16.05.2017, Α | <u>N 80C 20W 75</u> | 28 | 0,75 | 12.06.2017 | 0,04 | 0,03800 | 0,00152 | 1,13 | 0,74 | 0,75 |
| 16.05.2017, Β | <u>N 80C 20W 75</u> | | | 12.06.2017 | 0,04 | 0,03800 | 0,00152 | 1,16 | 0,76 | |
| 16.05.2017, Α | <u>N 80C 20W 80</u> | 28 | 0,8 | 12.06.2017 | 0,04 | 0,04000 | 0,00160 | 1,35 | 0,84 | 0,84 |
| 16.05.2017, Β | <u>N 80C 20W 80</u> | | | 12.06.2017 | 0,04 | 0,04000 | 0,00160 | 1,35 | 0,84 | |
| 16.05.2017, Α | <u>N 80C 20W 85</u> | 28 | 0,85 | 12.06.2017 | 0,04 | 0,03700 | 0,00148 | 1,08 | 0,73 | 0,72 |
| 16.05.2017, Β | <u>N 80C 20W 85</u> | | | 12.06.2017 | 0,04 | 0,03700 | 0,00148 | 1,06 | 0,72 | |
| 23.06.2017, Α | <u>N 80C 20W 95</u> | 28 | 0,95 | 26.07.2017 | 0,04 | 0,03800 | 0,00152 | 1,17 | 0,77 | 0,78 |
| 23.06.2017, Β | <u>N 80C 20W 95</u> | | | 26.07.2017 | 0,04 | 0,03800 | 0,00152 | 1,21 | 0,80 | |
| 18.05.2017, Α | <u>N 70C 30W 80</u> | 28 | 0,8 | 22.06.2017 | 0,04 | 0,04000 | 0,00160 | 1,22 | 0,76 | 0,79 |
| 18.05.2017, Β | <u>N 70C 30W 80</u> | | | 22.06.2017 | 0,04 | 0,04000 | 0,00160 | 1,31 | 0,82 | |
| 18.05.2017, Α | <u>N 70C 30W 85</u> | 28 | 0,85 | 22.06.2017 | 0,04 | 0,03700 | 0,00148 | 1,22 | 0,82 | 0,86 |
| 18.05.2017, Β | <u>N 70C 30W 85</u> | | | 22.06.2017 | 0,04 | 0,03700 | 0,00148 | 1,34 | 0,91 | |

| Όνομα δοκμίου | Κωδικός ενέματος | Ημέρες ωρίμανσης | Λόγος Νερού προς Στερεά W/S | Ημερομηνία δοκιμής | Πλακάκι (m) | Πλάτος (m) | Εμβαδόν A (m ²) | Φορτίο P (kN) | Θλιπτική Αντοχή f _{cm} (Μpa) | Μέση Θλιπτική Αντοχή f _{cm} (Μpa) | Ποσοστιαία Μεταβολή (%) |
|---------------|--------------------|------------------|-----------------------------|--------------------|-------------|------------|-----------------------------|---------------|---------------------------------------|--|-------------------------|
| 10.05.2017, A | <u>N100W80</u> | 90 | 0,8 | 11.09.2017 | 0,04 | 0,038 | 0,002 | 5,86 | 3,86 | 3,51 | 127,97 |
| 10.05.2017, B | <u>N100W80</u> | | | 11.09.2017 | 0,04 | 0,038 | 0,002 | 4,81 | 3,16 | | |
| 10.05.2017, A | <u>N100W80</u> | 90 | 0,8 | 11.09.2017 | 0,04 | 0,039 | 0,002 | 4,60 | 2,95 | 2,86 | 156,67 |
| 10.05.2017, B | <u>N100W80</u> | | | 11.09.2017 | 0,04 | 0,039 | 0,002 | 4,32 | 2,77 | | |
| 11.05.2017, A | <u>N100W85</u> | 90 | 0,85 | 11.09.2017 | 0,04 | 0,039 | 0,002 | 3,90 | 2,50 | 2,54 | 156,67 |
| 11.05.2017, B | <u>N100W85</u> | | | 11.09.2017 | 0,04 | 0,039 | 0,002 | 4,04 | 2,59 | | |
| 11.05.2017, A | <u>N100W85</u> | 90 | 0,85 | 11.09.2017 | 0,04 | 0,039 | 0,002 | 4,63 | 2,97 | 3,04 | 156,67 |
| 11.05.2017, B | <u>N100W85</u> | | | 11.09.2017 | 0,04 | 0,039 | 0,002 | 4,85 | 3,11 | | |
| 10.5.2017, A | <u>N100W90 X.Y</u> | 90 | 0,9 | 11.09.2017 | 0,04 | 0,037 | 0,001 | 4,76 | 3,22 | 3,24 | - |
| 10.5.2017, A | <u>N100W90 X.Y</u> | | | 11.09.2017 | 0,04 | 0,037 | 0,001 | 4,83 | 3,26 | | |
| 10.05.2017, A | <u>N100W90</u> | 90 | 0,9 | 11.09.2017 | 0,04 | 0,038 | 0,002 | 4,79 | 3,19 | 3,05 | 205,41 |
| 10.05.2017, B | <u>N100W90</u> | | | 11.09.2017 | 0,04 | 0,038 | 0,002 | 4,35 | 2,90 | | |
| 10.05.2017, A | <u>N100W90</u> | 90 | 0,9 | 11.09.2017 | 0,04 | 0,038 | 0,002 | 4,72 | 3,15 | 3,27 | 205,41 |
| 10.05.2017, B | <u>N100W90</u> | | | 11.09.2017 | 0,04 | 0,038 | 0,002 | 5,10 | 3,40 | | |
| 5.07.2017, A | <u>N100W90</u> | 90 | 0,9 | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 5,33 | 3,33 | 3,36 | 205,41 |
| 5.07.2017, B | <u>N100W90</u> | | | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 5,43 | 3,39 | | |
| 5.07.2017, A | <u>N100W90</u> | 90 | 0,9 | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 5,94 | 3,71 | 3,63 | 205,41 |
| 5.07.2017, B | <u>N100W90</u> | | | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 5,67 | 3,54 | | |
| 5.07.2017, A | <u>N100W90</u> | 90 | 0,9 | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 3,79 | 2,37 | 2,41 | 205,41 |
| 5.07.2017, B | <u>N100W90</u> | | | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 3,91 | 2,44 | | |
| 11.05.2017, A | <u>N100W100</u> | 90 | 1 | 11.09.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 2,50 | 1,56 | 1,36 | 214,24 |
| 11.05.2017, B | <u>N100W100</u> | | | 11.09.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 1,86 | 1,16 | | |
| 11.05.2017, A | <u>N100W100</u> | 90 | 1 | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 5,22 | 3,26 | 3,69 | 214,24 |
| 11.05.2017, B | <u>N100W100</u> | | | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 6,60 | 4,13 | | |
| 11.05.2017, A | <u>N100W100</u> | 90 | 1 | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 5,33 | 3,33 | 3,36 | 214,24 |
| 11.05.2017, B | <u>N100W100</u> | | | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 5,43 | 3,39 | | |
| 11.05.2017, A | <u>N100W100</u> | 90 | 1 | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 3,26 | 2,04 | 2,11 | 214,24 |
| 11.05.2017, B | <u>N100W100</u> | | | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 3,50 | 2,19 | | |
| 15.05.2017, A | <u>N90C10W80</u> | 90 | 0,8 | 11.09.2017 | 0,04 | 0,039 | 0,002 | 4,1 | 2,63 | 2,79 | 135,84 |
| 15.05.2017, B | <u>N90C10W80</u> | | | 11.09.2017 | 0,04 | 0,039 | 0,002 | 4,6 | 2,95 | | |
| 15.05.2017, A | <u>N90C10W80</u> | 90 | 0,8 | 11.09.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 3,48 | 2,20 | 2,25 | 135,84 |
| 15.05.2017, B | <u>N90C10W80</u> | | | 11.09.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 3,64 | 2,30 | | |
| 16.05.2017, A | <u>N90C10W80</u> | 90 | 0,8 | 26.10.2017 | 0,04 | 0,039 | 0,002 | 3,9 | 2,50 | 2,50 | 135,84 |
| 16.05.2017, B | <u>N90C10W80</u> | | | 26.10.2017 | 0,04 | 0,039 | 0,002 | 3,9 | 2,50 | | |
| 16.05.2017, A | <u>N90C10W80</u> | 90 | 0,8 | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 3,17 | 2,01 | 1,95 | 135,84 |
| 16.05.2017, B | <u>N90C10W80</u> | | | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 3 | 1,90 | | |
| 15.05.2017, A | <u>N90C10W85</u> | 90 | 0,85 | 11.09.2017 | 0,04 | 0,038 | 0,002 | 3,25 | 2,17 | 2,38 | 155,01 |
| 15.05.2017, B | <u>N90C10W85</u> | | | 11.09.2017 | 0,04 | 0,038 | 0,002 | 3,9 | 2,60 | | |
| 15.05.2017, A | <u>N90C10W85</u> | 90 | 0,85 | 26.10.2017 | 0,04 | 0,038 | 0,002 | 3,34 | 2,23 | 2,24 | 155,01 |
| 15.05.2017, B | <u>N90C10W85</u> | | | 26.10.2017 | 0,04 | 0,038 | 0,002 | 3,37 | 2,25 | | |
| 15.05.2017, A | <u>N90C10W95</u> | 90 | 0,95 | 26.10.2017 | 0,04 | 0,038 | 0,002 | 3,5 | 2,33 | 2,06 | 132,14 |
| 15.05.2017, B | <u>N90C10W95</u> | | | 26.10.2017 | 0,04 | 0,038 | 0,002 | 2,67 | 1,78 | | |
| 16.05.2017, A | <u>N90C10W95</u> | 90 | 0,95 | 26.10.2017 | 0,04 | 0,038 | 0,002 | 2,89 | 1,93 | 1,69 | 132,14 |
| 16.05.2017, B | <u>N90C10W95</u> | | | 26.10.2017 | 0,04 | 0,038 | 0,002 | 2,19 | 1,46 | | |
| 16.05.2017, A | <u>N90C10W95</u> | 90 | 0,95 | 26.10.2017 | 0,04 | 0,038 | 0,002 | 2,58 | 1,72 | 1,93 | 132,14 |
| 16.05.2017, B | <u>N90C10W95</u> | | | 26.10.2017 | 0,04 | 0,038 | 0,002 | 3,22 | 2,15 | | |
| 16.05.2017, A | <u>N90C10W95</u> | 90 | 0,95 | 26.10.2017 | 0,04 | 0,038 | 0,002 | 2,81 | 1,87 | 2,33 | 209,75 |
| 16.05.2017, B | <u>N90C10W95</u> | | | 26.10.2017 | 0,04 | 0,038 | 0,002 | 3,29 | 2,19 | | |
| 16.05.2017, A | <u>N80C20W75</u> | 90 | 0,75 | 11.09.2017 | 0,04 | 0,039 | 0,002 | 3,53 | 2,26 | 2,26 | 167,84 |
| 16.05.2017, B | <u>N80C20W75</u> | | | 11.09.2017 | 0,04 | 0,039 | 0,002 | 3,75 | 2,40 | | |
| 16.05.2017, A | <u>N80C20W80</u> | 90 | 0,8 | 11.09.2017 | 0,04 | 0,038 | 0,002 | 3,6 | 2,37 | 2,26 | 167,84 |
| 16.05.2017, B | <u>N80C20W80</u> | | | 11.09.2017 | 0,04 | 0,038 | 0,002 | 3,27 | 2,15 | | |
| 23.06.2017, A | <u>N80C20W85</u> | 90 | 0,85 | 26.10.2017 | 0,04 | 0,038 | 0,002 | 3,29 | 2,16 | 2,13 | 195,29 |
| 23.06.2017, B | <u>N80C20W85</u> | | | 26.10.2017 | 0,04 | 0,038 | 0,002 | 3,2 | 2,11 | | |
| 23.06.2017, A | <u>N80C20W95</u> | 90 | 0,95 | 26.10.2017 | 0,04 | 0,038 | 0,002 | 3,25 | 2,14 | 1,82 | 132,14 |
| 23.06.2017, B | <u>N80C20W95</u> | | | 26.10.2017 | 0,04 | 0,038 | 0,002 | 2,95 | 1,94 | | |
| 23.06.2017, A | <u>N80C20W95</u> | 90 | 0,95 | 26.10.2017 | 0,04 | 0,038 | 0,002 | 2,49 | 1,64 | 1,52 | 92,36 |
| 23.06.2017, B | <u>N80C20W95</u> | | | 26.10.2017 | 0,04 | 0,038 | 0,002 | 2,36 | 1,55 | | |
| 18.05.2017, A | <u>N70C30W80</u> | 90 | 0,8 | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 1,94 | 1,21 | 1,12 | 29,72 |
| 18.05.2017, B | <u>N70C30W80</u> | | | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 3,09 | 1,93 | | |
| 18.05.2017, Γ | <u>N70C30W80</u> | 90 | 0,85 | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 2,27 | 1,42 | 1,12 | 29,72 |
| 18.05.2017, A | <u>N70C30W85</u> | | | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 2,2 | 1,38 | | |
| 18.05.2017, B | <u>N70C30W85</u> | 90 | 0,85 | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 1,39 | 0,87 | 1,49 | 154 |
| 18.05.2017, A | <u>N70C30W95</u> | | | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 2,4 | 1,50 | | |
| 18.05.2017, B | <u>N70C30W95</u> | 90 | 0,95 | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 2,38 | 1,49 | 1,50 | 154 |
| 18.05.2017, A | <u>N70C30W95</u> | | | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 2,46 | 1,54 | | |
| 18.05.2017, B | <u>N70C30W95</u> | 90 | 0,95 | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 2,34 | 1,46 | 1,62 | 154 |
| 18.05.2017, A | <u>N70C30W95</u> | | | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 2,19 | 1,37 | | |
| 18.05.2017, B | <u>N70C30W95</u> | 90 | 1 | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 2,99 | 1,87 | 1,24 | 134 |
| 23.06.2017, B | <u>N70C30W100</u> | | | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 1,97 | 1,23 | | |
| 23.06.2017, A | <u>N70C30W100</u> | 90 | 1 | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 1,99 | 1,24 | 1,40 | 134 |
| 23.06.2017, B | <u>N70C30W100</u> | | | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 2,23 | 1,39 | | |
| 23.06.2017, A | <u>N70C30W100</u> | 90 | 1 | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 2,25 | 1,41 | 1,39 | 134 |
| 23.06.2017, B | <u>N70C30W100</u> | | | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 2,28 | 1,43 | | |
| 23.06.2017, A | <u>N70C30W100</u> | 90 | 1 | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 2,18 | 1,36 | 1,39 | 134 |
| 23.06.2017, B | <u>N70C30W100</u> | | | 26.10.2017 | 0,04 | 0,040 | 0,002 | 2,18 | 1,36 | | |

Παράρτημα Γ: Διεπιφάνειες

Πίνακας 27. Συγκεντρωτικός πίνακας μεγεθών που προέκυψαν από το πείραμα των διεπιφανειών λίθων και ενεμάτων

| Ημέρες ωρίμανσης | Σύνθεση ενέματος | σ (Μρα) | A/A δοκιμίου | Τύπος αστοχίας | P (tons) | $\tau_{u,f}$ (MPa) | $s_{u,f}$ (mm) | $w_{u,f}$ (mm) | $\tau_{r,f}$ (MPa) | $\mu_{u,f}$ | $\mu_{res,f}$ | $\tan\phi$ | Συνοχή |
|------------------|--------------------------------|----------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------|----------------|----------------|--------------------|--------------|---------------|------------|--------------|
| 28 | N 100W 90 | 0,1 | 1 | Δ.Z | 0,053 | 0,328 | 1,289 | -0,303 | 0,252 | 3,285 | 2,520 | -0,063 | 0,260 |
| | | | 2 | Z | 0,027 | 0,169 | 0,367 | -0,175 | 0,162 | 1,693 | 1,618 | | |
| | | | 3 | Δ.Z | 0,042 | 0,265 | 0,287 | 0,148 | 0,216 | 2,649 | 2,160 | | |
| | | 0,1 | 1 | μέση τιμή | m | 0,254 | 0,648 | -0,110 | 0,210 | 2,542 | 2,099 | - | - |
| | | | 2 | τυπική απόκλιση | σ | 0,080 | 0,557 | 0,232 | 0,045 | 0,801 | 0,454 | - | - |
| | | | 3 | συντελεστής μεταβλητότητας | cv | 0,315 | 0,860 | -2,116 | 0,216 | 0,315 | 0,216 | - | - |
| | N 70C 30W 90 | 0,1 | 1 | Δ.Z | 0,023 | 0,142 | 0,162 | 0,448 | 0,102 | 1,415 | 1,415 | 0,260 | 0,139 |
| | | | 2 | Δ.Z | 0,031 | 0,191 | 0,347 | 0,003 | 0,143 | 1,909 | 1,909 | | |
| | | | 3 | Δ.Z | 0,026 | 0,162 | 0,538 | 0,007 | 0,115 | 1,620 | 1,620 | | |
| | | 0,1 | 1 | μέση τιμή | m | 0,165 | 0,349 | 0,153 | 0,120 | 1,648 | 1,648 | - | - |
| | | | 2 | τυπική απόκλιση | σ | 0,025 | 0,188 | 0,256 | 0,021 | 0,248 | 0,248 | - | - |
| | | | 3 | συντελεστής μεταβλητότητας | cv | 0,150 | 0,538 | 1,678 | 0,175 | 0,150 | 0,150 | - | - |
| | N 63P 7C 30W 87,5S 0,75 | 0,1 | 1 | Δ.Z | 0,046 | 0,286 | 1,325 | -0,064 | 0,147 | 2,860 | 2,860 | 0,133 | 0,218 |
| | | | 2 | έσπασε πριν την δοκιμή | - | - | - | - | - | - | - | | |
| | | | 3 | Δ.Z | 0,028 | 0,177 | 0,828 | -0,121 | 0,114 | 1,773 | 1,773 | | |
| 0,1 | | 1 | μέση τιμή | m | 0,232 | 1,076 | -0,093 | 0,130 | 2,316 | 2,316 | - | - | |
| | | 2 | τυπική απόκλιση | σ | 0,077 | 0,351 | 0,040 | 0,023 | 0,769 | 0,769 | - | - | |
| | | 3 | συντελεστής μεταβλητότητας | cv | 0,332 | 0,326 | -0,435 | 0,178 | 0,332 | 0,332 | - | - | |

Πίνακας 28. Αποτελέσματα Δοκιμών Διεπιφανειών για τις 28 ημέρες ωρίμανσης για ορθή τάση 0,30MPa

| Ημέρες ωρίμανσης | Σύνθεση ενέματος | σ (MPa) | A/A δοκιμίου | Τύπος αστοχίας | P (tons) | $\tau_{u,f}$ (MPa) | $s_{u,f}$ (mm) | $w_{u,f}$ (mm) | $\tau_{r,f}$ (MPa) | $\mu_{u,f}$ | $\mu_{res,f}$ | $\tan\phi$ | Συνοχή |
|------------------|--------------------------------|----------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------|----------------|----------------|--------------------|--------------|---------------|------------|--------------|
| 28 | N 100W 90 | 0,3 | 1 | Δ.Z | 0,039 | 0,237 | 0,506 | -0,047 | 0,202 | 0,791 | 0,674 | -0,063 | 0,260 |
| | | | 2 | Δ. Z | 0,041 | 0,246 | 0,685 | -0,104 | 0,228 | 0,820 | 0,761 | | |
| | | | 3 | - | - | - | - | - | - | - | - | | |
| | | 0,3 | 1 | μέση τιμή | m | 0,242 | 0,596 | -0,075 | 0,215 | 0,805 | 0,718 | - | - |
| | | | 2 | τυπική απόκλιση | σ | 0,006 | 0,126 | 0,040 | 0,018 | 0,021 | 0,061 | - | - |
| | | | 3 | συντελεστής μεταβλητότητας | cv | 0,026 | 0,212 | -0,536 | 0,086 | 0,026 | 0,086 | - | - |
| | N 70C 30W 90 | 0,3 | 1 | Δ.Z | 0,034 | 0,209 | 0,682 | 0,020 | 0,193 | 0,695 | 0,643 | 0,260 | 0,139 |
| | | | 2 | Δ.Z | 0,036 | 0,225 | 0,910 | 0,101 | 0,196 | 0,750 | 0,652 | | |
| | | | 3 | - | - | - | - | - | - | - | - | | |
| | | 0,3 | 1 | μέση τιμή | m | 0,217 | 0,796 | 0,060 | 0,194 | 0,722 | 0,647 | - | - |
| | | | 2 | τυπική απόκλιση | σ | 0,012 | 0,161 | 0,057 | 0,002 | 0,039 | 0,007 | - | - |
| | | | 3 | συντελεστής μεταβλητότητας | cv | 0,054 | 0,202 | 0,947 | 0,010 | 0,054 | 0,010 | - | - |
| | N 63P 7C 30W 87,5S 0,75 | 0,3 | 1 | Δ.Z | 0,042 | 0,257 | 0,631 | -0,155 | 0,208 | 0,856 | 0,693 | 0,133 | 0,218 |
| | | | 2 | Δ.Z | 0,044 | 0,261 | 0,419 | -0,034 | 0,218 | 0,869 | 0,727 | | |
| | | | 3 | Z | 0,042 | 0,257 | 1,190 | -0,139 | 0,222 | 0,857 | 0,738 | | |
| 0,3 | | 1 | μέση τιμή | m | 0,258 | 0,747 | -0,109 | 0,216 | 0,861 | 0,720 | - | - | |
| | | 2 | τυπική απόκλιση | σ | 0,002 | 0,398 | 0,066 | 0,007 | 0,007 | 0,024 | - | - | |
| | | 3 | συντελεστής μεταβλητότητας | cv | 0,008 | 0,533 | -0,603 | 0,033 | 0,008 | 0,033 | - | - | |

Πίνακας 29. Αποτελέσματα Δοκιμών Διεπιφανειών για τις 90 ημέρες ωρίμανσης για ορθή τάση 0,10MPa

| Ημέρες ωρίμανσης | Σύνθεση ενέματος | σ (MPa) | A/A δοκμίου | Τύπος αστοχίας | P (tons) | $\tau_{u,f}$ (MPa) | $s_{u,f}$ (mm) | $w_{u,f}$ (mm) | $\tau_{r,f}$ (MPa) | $\mu_{u,f}$ | $\mu_{res,f}$ | $\tan\phi$ | Συνοχή |
|------------------|--------------------|----------------|-------------|----------------------------|----------------------------|--------------------|----------------|----------------|--------------------|--------------|---------------|------------|--------|
| 90 | N100W90 | 0,1 | 1 | Δ.Z | 0,050 | 0,313 | 1,267 | -0,319 | 0,169 | 3,125 | 1,688 | 0,382 | 0,109 |
| | | | 2 | Δ.Z | 0,024 | 0,151 | 1,489 | -0,195 | 0,088 | 1,508 | 0,875 | | |
| | | | 3 | Δ.Z | 0,023 | 0,144 | 1,119 | -0,540 | 0,078 | 1,435 | 0,781 | | |
| | | 0,1 | 1 | μέση τιμή | m | 0,147 | 1,304 | -0,367 | 0,083 | 1,472 | 0,828 | - | - |
| | | | 2 | τυπική απόκλιση | σ | 0,005 | 0,262 | 0,244 | 0,007 | 0,052 | 0,066 | - | - |
| | | | 3 | συντελεστής μεταβλητότητας | cv | 0,035 | 0,201 | -0,664 | 0,080 | 0,035 | 0,080 | - | - |
| | N70C30W90 | 0,1 | 1 | Δ.Z | 0,014 | 0,087 | 1,448 | -0,089 | 0,081 | 0,870 | 0,813 | 0,552 | 0,043 |
| | | | 2 | Δ.Z | 0,018 | 0,112 | 1,887 | -0,483 | 0,081 | 1,124 | 0,813 | | |
| | | | 3 | Δ.Z | 0,015 | 0,095 | 0,430 | -0,050 | 0,081 | 0,950 | 0,813 | | |
| | | 0,1 | 1 | μέση τιμή | m | 0,098 | 1,255 | -0,207 | 0,081 | 0,981 | 0,813 | - | - |
| | | | 2 | τυπική απόκλιση | σ | 0,013 | 0,747 | 0,239 | 0,000 | 0,130 | 0,000 | - | - |
| | | | 3 | συντελεστής μεταβλητότητας | cv | 0,133 | 0,596 | -1,155 | 0,000 | 0,133 | 0,000 | - | - |
| | N63P7C30W87,5S0,75 | 0,1 | 1 | Δ.Z | 0,020 | 0,124 | 1,171 | -0,168 | 0,088 | 1,241 | 0,875 | 0,386 | 0,117 |
| | | | 2 | Δ.Z | 0,035 | 0,217 | 0,680 | -0,103 | 0,213 | 2,167 | 2,125 | | |
| | | | 3 | Δ.Z | 0,020 | 0,125 | 1,338 | -0,149 | 0,088 | 1,254 | 0,875 | | |
| | | 0,1 | 1 | μέση τιμή | m | 0,155 | 1,063 | -0,140 | 0,129 | 1,554 | 1,292 | - | - |
| | | | 2 | τυπική απόκλιση | σ | 0,053 | 0,342 | 0,033 | 0,072 | 0,531 | 0,722 | - | - |
| | | | 3 | συντελεστής μεταβλητότητας | cv | 0,342 | 0,322 | -0,238 | 0,559 | 0,342 | 0,559 | - | - |

Πίνακας 30. Αποτελέσματα Δοκιμών Διεπιφανειών για τις 90 ημέρες ωρίμανσης για ορθή τάση 0,30MPa

| Ημέρες ωρίμανσης | Σύνθεση ενέματος | σ (MPa) | A/A δοκιμίου | Τύπος αστοχίας | P (tons) | $\tau_{u,f}$ (MPa) | $s_{u,f}$ (mm) | $w_{u,f}$ (mm) | $\tau_{r,f}$ (MPa) | $\mu_{u,f}$ | $\mu_{res,f}$ | $\tan\phi$ | Συνοχή |
|------------------|--------------------------------------|----------------|--------------|-----------------------------------|----------------------------|--------------------|----------------|----------------|--------------------|--------------|---------------|------------|--------------|
| 90 | <u>N100W90</u> | 0,3 | 1 | Δ.Z | 0,038 | 0,224 | 1,267 | -0,319 | 0,182 | 0,745 | 0,608 | 0,382 | 0,109 |
| | | | 2 | Δ.Z | 0,040 | 0,233 | 0,860 | -0,112 | 0,194 | 0,776 | 0,647 | | |
| | | | 3 | Δ.Z | 0,036 | 0,214 | 0,477 | -0,141 | 0,194 | 0,714 | 0,647 | | |
| | | 0,3 | 1 | μέση τιμή | m | 0,224 | 0,868 | -0,190 | 0,190 | 0,745 | 0,634 | - | - |
| | | | 2 | τυπική απόκλιση | σ | 0,009 | 0,395 | 0,112 | 0,007 | 0,031 | 0,023 | - | - |
| | | | 3 | συντελεστής μεταβλητότητας | cv | 0,042 | 0,455 | -0,590 | 0,036 | 0,042 | 0,036 | - | - |
| | <u>N70C30W90</u> | 0,3 | 1 | Δ.Z | 0,036 | 0,210 | 1,063 | -0,140 | 0,198 | 0,699 | 0,659 | 0,552 | 0,043 |
| | | | 2 | Δ.Z | 0,035 | 0,207 | 1,295 | -0,289 | 0,179 | 0,691 | 0,595 | | |
| | | | 3 | | Έσπασε | | | | | 0,000 | 0,000 | | |
| | | 0,3 | 1 | μέση τιμή | m | 0,209 | 1,179 | -0,214 | 0,188 | 0,695 | 0,627 | - | - |
| | | | 2 | τυπική απόκλιση | σ | 0,002 | 0,164 | 0,106 | 0,014 | 0,006 | 0,045 | - | - |
| | | | 3 | συντελεστής μεταβλητότητας | cv | 0,009 | 0,139 | -0,493 | 0,072 | 0,009 | 0,072 | - | - |
| | <u>N63P7C30W87,5</u> <u>S0,75</u> | 0,3 | 1 | Δ.Z | 0,036 | 0,217 | 1,629 | -0,230 | 0,190 | 0,724 | 0,635 | 0,386 | 0,117 |
| | | | 2 | Δ.Z | 0,041 | 0,244 | 1,519 | 0,105 | 0,202 | 0,812 | 0,675 | | |
| | | | 3 | Δ.Z | 0,040 | 0,237 | 0,979 | -0,166 | 0,200 | 0,790 | 0,667 | | |
| | | 0,3 | 1 | μέση τιμή | m | 0,233 | 1,376 | -0,097 | 0,198 | 0,775 | 0,659 | - | - |
| | | | 2 | τυπική απόκλιση | σ | 0,014 | 0,348 | 0,178 | 0,006 | 0,046 | 0,021 | - | - |
| | | | 3 | συντελεστής μεταβλητότητας | cv | 0,059 | 0,253 | -1,839 | 0,032 | 0,059 | 0,032 | - | - |

Βιβλιογραφία

1. Adami Ch.-E. et al., “The effect of hydraulic lime pozzolanic grouts on the mechanical properties of three-leaf stone masonry in compression”, Athens 2011
2. Adami Ch.-E. et al., Interventions to historic masonries: Investigation of the bond mechanism between stones or bricks and grouts, 2008
3. Charu Chaudhry, “Evaluation of Grouting as a Strengthening Technique for Earthen Structures in Seismic Areas: Case Study Chiripa”, Master Thesis, University of Pennsylvania, 2007.
4. Kalagri A., Miltiadou-Fezans A., Vintzileou E.. “Design and evaluation of hydraulic lime grouts for the strengthening of stone masonry historic structures”. In *Materials and Structures*, (2010) 43, pp 1135-1146 (DOI 10.1617/s11527-009-9572-1).
5. Miltiadou-Fezans A, Tassios TP (2016) “Holistic methodology for the mix-design of hydraulic grouts in strengthening historic masonry structures”. *Proc. of Inter. Historic Mortars Conference 2016, RILEM–AUTH, 10-12 Oct. 2016, Santorini, Greece.*
6. Miltiadou A. 1990. “Etude des coulis hydrauliques pour la réparation et le renforcement des structures et des monuments historiques en maçonnerie”. PhD Th., ENPC Pub. in 1991 by LCPC ISSN 1161-028X, Paris, France
7. Miltiadou-Fezans A., Kalagri A., Kakkinou S., Ziagou A., Delinikolas N., Zarogianni E., Chorafa E. (2008). “Methodology for in situ application of hydraulic grouts on historic masonry structures. The case of the Katholikon of Dafni Monastery”. In *proc. of the 6th Intern. conf. on Structural Analysis of Historic Construction, 2-4 july, Bath, UK, edited by D’ Ayala D. and Fodde, CRC Press/Balkema, Taylor and Francis Group, Vol. II, pp 1025-1033.*
8. Miltiadou–Fezans, T. P. Tassios (2013), “Fluidity of hydraulic grouts for masonry strengthening”. *RILEM Mater. Struct.*, doi: 10.1617/s11527-012-9872-8.
9. Miltiadou–Fezans, T. P. Tassios (2013), “Penetrability of hydraulic grouts”. *RILEM Mater. Struct.* doi: 10.1617/s11527-012-0005-1.
10. Miltiadou–Fezans, T. P. Tassios (2013), “Stability of hydraulic grouts for masonry strengthening”. *RILEM Mater. Struct.* doi: 10.1617/s11527-012-0003-3.
11. Nikolopoulou Vasiliki et al., “Design of grouts for strengthening three or two leaf masonry with mud mortars”. *COMPADYN* 2017.
12. Papayianni Ioanna, “Restoration of Earth Block Buildings in Vernacular Architecture. Materials and Techniques for their repair”. , AUTH, Laboratory of Building Materials, Dept. of Civil Engineering, 2006.

13. Urs Mueller, Lorenzo Miccoli, Patrick Fontana, “A lime-based grouting material for the repair of earthen structures”, CBI Swedish Cement and Concrete Research Institute, Boras, Sweden, 14 November 2016.
14. Vintzileou E., Miltiadou-Fezans A., (2008). “Mechanical properties of three-leaf masonry grouted with ternary or hydraulic lime based grouts”. In Engineering Structures, Volume 30, Issue 8, August 2008, Pages 2265-2276.
15. Vintzileou E. (2010) “Mechanics of three-leaf masonry before and after grouting”. To be published in Int J Archit. Herit.
16. Vintzileou E., Tassios TP. (1995) “Three leaf stone masonry strengthened by injecting cement grouts”. J. Struct. Eng. ASCE 121(5):848–856
17. Αδάμη Χρυσή–Ελπίδα, “Πειραματική και αναλυτική διερεύνηση της συμπεριφοράς διεπιφανειών υδραυλικών ενεμάτων υψηλής διεισδυτικότητας και λίθινων ή πλίνθινων υποβάθρων”, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα Ιανουάριος 2011.
18. Μπέη Γεωργία, “Τοιχοποιία από πηλό: Πειραματική διερεύνηση μηχανικών και φυσικών χαρακτηριστικών δομικών μονάδων και τοίχων από Συμπιεσμένες Ωμόπλινθους”, Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής, Τομέας Επιστήμης και Τεχνολογίας των Κατασκευών, Θεσσαλονίκη 2004.
19. Παπαδημητρίου Δημήτρης, “Αξιολόγηση μηχανικών χαρακτηριστικών κονιαμάτων με βάση την άσβεστο σε σχέση με τις παραμέτρους σύνθεσης, Διπλωματική Εργασία, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη Μάρτιος 2017
20. Πιτυτζόγια Αναστασία, “Μελέτη τροποποιημένων επιχρισμάτων με βάση τον πηλό για την προστασία ωμοπλινθοδομών έναντι υγρασία”, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη 2014
21. Σταθόπουλος Κωνσταντίνος, “Μελέτη Σταθεροποίησης Πηλοκονιαμάτων, Μεταπτυχιακή Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Αθήνα 2015.
22. Τουμπακάρη Ε.-Ε., Χ.-Ε. Αδάμη, Ε. Βιντζηλαίου, “Ιδιότητες και επιτελεστικότητα τριπλών ενεμάτων υδρασβέστου–φυσικής ποζολάνης–τσιμέντου με προσθήκη τεχνητών ποζολανών”, Πρακτικά 1ου Πανελληνίου Συνεδρίου για την Αξιοποίηση των Βιομηχανικών Παραπροϊόντων στη Δόμηση, ΕΒΙΠΑΡ, Θεσσαλονίκη, 24-26 Νοεμβρίου 2005