



Πειραματικός προσδιορισμός μηχανικών χαρακτηριστικών τρίστρωτης τοιχοποιίας κατασκευασμένης με φυσικούς λίθους και αργιλικά κονιάματα (πηλοκονιάματα)





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΜΝΗΜΕΙΩΝ
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ «ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ»

Πειραματικός προσδιορισμός μηχανικών
χαρακτηριστικών τρίστρωτης τοιχοποιίας
κατασκευασμένης με φυσικούς λίθους
και αργιλικά κονιάματα (πηλοκονιάματα)

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικηφόρος Μείμαρογλου

Επιτροπή Επίβλεψης και Υποστήριξης

Καθ. Α. Μοροπούλου, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ

Επικ. Καθ. Χ. Μουζάκης, Σχ. ΠΜ ΕΜΠ
(επιβλέπων)

Επικ. Καθ. Α. Μπακόλας, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ

Α. Δελέγκου, Δρ., ΕΔΙΠ Σχ. ΧΜ ΕΜΠ

† Π. Μούνδουλας, Δρ., ΕΔΙΠ Σχ. ΧΜ ΕΜΠ

Επιτροπή εξέτασης

Καθ. Α. Μοροπούλου, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ

Καθ. Κ. Σπυράκος, Σχ. ΠΜ ΕΜΠ

Επικ. Καθ. Χ. Μουζάκης

Αν. Καθ. Π. Αστερή, ΑΣΠΑΙΤΕ

Επικ. Καθ. Α. Μπακόλας, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ – ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Τα αργιλικά κονιάματα (πηλοκονιάματα) αποτελούν τον πρώτο τύπο κονιαμάτων που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος στη δόμηση και συνέχισε να χρησιμοποιεί μέχρι το πρόσφατο παρελθόν στην παραδοσιακή αρχιτεκτονική. Κύριοι λόγοι για την χρησιμοποίηση κονιαμάτων με βάση το χώμα για χιλιάδες χρόνια είναι η προσιτότητα και η αφθονία στη φύση της πρώτης ύλης, οι εύκολα κατανοητές ιδιότητες τους καθώς και η οικονομία και η σχετική ευκολία παρασκευής τους. Οι πρώτες αργολιθοδομές που έχουμε χρήση πηλοκονιαμάτων είναι από την όγδοη χιλιετία π.Χ., πριν δηλαδή από την κατασκευή ωμοπλινθοδομών, ενώ στον Ελλαδικό χώρο τα πρώτα παραδείγματα χρονολογούνται από την έκτη χιλιετία π.Χ. Παρά την ευρεία και διαχρονική χρήση τους όμως, η μελέτη των πηλοκονιαμάτων και του δομικού συστήματος στο οποίο εντάσσονταν υπολείπεται κατά πολύ της μελέτης άλλων τύπων κονιαμάτων.

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν ο προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών της τρίστρωτης τοιχοποιίας κατασκευασμένης με λίθους και αργιλικά κονιάματα (πηλοκονιάματα).

Η κατασκευή και η δοκιμή σε θλιπτική φόρτιση των δοκιμών τοιχοποιίας έγινε στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Σε αυτό το σημείο οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον επιβλέποντα Χαράλαμπο Μουζάκη για την μάλλον απρόσμενη ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, την επιστημονική υποστήριξη και καθοδήγηση του σε κάθε βήμα της εργασίας αυτής, αλλά και για τις γνώσεις που αποκόμισα συζητώντας μαζί του. Θέλω επίσης να ευχαριστήσω τη Λ. Καραπίπτα για τη συχνή βοήθεια της, αλλά και το σύνολο του προσωπικού του εργαστηρίου.

Η παρασκευή και η αποτίμηση των κονιαμάτων έγινε στο Εργαστήριο Τεχνικών Υλικών της σχολής Αρχιτεκτόνων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Θέλω να ευχαριστήσω θερμά τους Ε. Εφεσίου, Ε. Τσακανίκα και Φ. Σαργέντη από το εργαστήριο για την φιλοξενία, την έμπρακτη πολλές φορές βοήθεια, το ειλικρινές ενδιαφέρον και για το γεγονός ότι με άφησαν να πειραματιστώ και να χρησιμοποιήσω πλήθος συσκευών σαν να ήμουν κομμάτι του εργαστηρίου.

Οι θερμικές αναλύσεις (DTA-TG) και η περίθλαση ακτινών Χ (XRD) πραγματοποιήθηκαν από το Εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Θα ήθελα να αποδώσω ευχαριστίες στους Α. Μοροπούλου, Α. Μπακόλα και Α. Δελέγκου αλλά δοθείσης της ευκαιρίας και στο σύνολο των ανθρώπων που συνέβαλλαν και συμβάλλουν στο μεταπτυχιακό αυτό. Ιδιαίτερη ήταν η συνεισφορά του Πέτρου Μούνδουλα τόσο στην εργασία αυτή όσο και στην πορεία μου στις σπουδές που δυστυχώς δεν είναι ανάμεσα μας.

Ο προσδιορισμός της κοκκομετρικής σύστασης με αραιόμετρο, της οργανικής ουσίας και των διαλυτών αλάτων έγινε στο Εργαστήριο Εδαφολογίας και Γεωργικής Χημείας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Για τις δοκιμές αυτές ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Σ. Δάλλα που με βοήθησε χωρίς περιστροφές παρότι προέρχομαι από άλλη σχολή.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα επίσης τους Α. Καπετάνιο και Γ. Λιάππη από την Εφορεία Αρχαιοτήτων Ανατολικής Αττικής για την βοήθεια τους αλλά και για το γεγονός ότι μου μετέδωσαν την αγάπη τους για την πολύ όμορφη και σημαντική από αρχαιολογική και ιστορική σκοπιά περιοχή της Σούριζας Λαυρίου, καθώς και την Λ. Λάμπρου από την ίδια Εφορεία και συμφοιτήτρια.

Ευχαριστώ τέλος τους Β. Αντωνάτου και Κ. Λαμπρόπουλο για την πολύπλευρη βοήθεια τους καθώς και τους ανθρώπους των συλλογικοτήτων του Σαλίγκαρου και της Ανέλιξης που ασχολούνται τόσα χρόνια ανιδιοτελώς με τη φυσική δόμηση.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο πειραματικός προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών τρίστρωτης τοιχοποιίας κατασκευασμένης με λίθους και συνδετικό πηλοκονίαμα, όταν υποβάλλεται σε θλιπτική φόρτιση. Προκειμένου επίσης να τεκμηριωθεί η χρήση τους και να διερευνηθούν κάποιες ιδιότητες τους, έγινε δειγματοληψία και ανάλυση πηλοκονιαμάτων του 4ου αιώνα π.Χ. από την περιοχή Σούριζα Λαυρίου. (κεφάλαιο 5)

Παρασκευάστηκαν δύο συνθέσεις κονιαμάτων. Ένα συνδετικό για την πλήρωση των αρμών και ένα για την ενδιάμεση στρώση με μικρότερες αντοχές και μικρότερη συρρίκνωση ώστε να αποφευχθεί η μεγάλη συστολή ξήρανσης που θα οδηγούσε σε αποκόλληση των στρώσεων. Προκειμένου να παρασκευαστούν τα κονιάματα επιλέχθηκε να μην χρησιμοποιηθούν πηλοί του εμπορίου αλλά να γίνει συλλογή του χώματος από έκταση στον Άγιο Στέφανο Αττικής, έτσι ώστε να ακολουθηθεί όλη η διαδικασία κοπανίσματος των σβώλων του χώματος, κοσκίνισματος, ξήρανσης και τέλος ανάμιξης με ποταμίσις άμμο και νερό. Η αναλογία του νερού στα κονιάματα προσδιορίστηκε με την δοκιμή της τράπεζας εξάπλωσης. Η αποτίμηση των πρώτων υλών έγινε με κοκκομετρική ανάλυση με αραιόμετρο, με κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα, με έλεγχο ύπαρξης οργανικής ουσίας και με έλεγχο για ύπαρξη διαλυτών αλάτων ενώ των σκληρυμένων κονιαμάτων με μέτρηση της θλιπτικής, καμπτικής και εφελκυστικής αντοχής και με μέτρηση της μεταβολής όγκου. Προσδιορίστηκε επίσης και η θλιπτική αντοχή του λιθοσώματος. (κεφάλαια 6 και 7)

Με αυτά τα κονιάματα και με λίθους από την περιοχή της Παραμυθιάς κατασκευάστηκαν τρία δοκίμια τρίστρωτης τοιχοποιίας. Οι εξωτερικές στρώσεις χτίστηκαν δρομικές χωρίς μπατικούς η διάτονους λίθους και ο πυρήνας χτίστηκε με επάλληλες στρώσεις μικρών λίθων και κονιαμάτων. Τα δοκίμια τοιχοποιίας υποβλήθηκαν σε δοκιμή μονότονης φόρτισης ύστερα από έξι μήνες ωρίμανσης των κονιαμάτων τους. Παρουσίασαν αρκετά υψηλή θλιπτική αντοχή και μικρό μέτρο ελαστικότητας, καθώς και μεγάλες εγκάρσιες και διαμήκεις παραμορφώσεις. Κατά την αστοχία τους πολλοί λίθοι παρουσίασαν συμπεριφορά καμπτόμενου στοιχείου. Ενδιαφέρον είναι ότι τα πειραματικά αποτελέσματα των θλιπτικών αντοχών σχεδόν συμπίπτουν με τα αποτελέσματα από την εφαρμογή ημιεμπειρικών σχέσεων από τη βιβλιογραφία. (κεφάλαιο 8)

Στα πρώτα τρία κεφάλαια παρουσιάζονται κάποια θεωρητικά στοιχεία. Στο πρώτο μία συνοπτική ιστορική καταγραφή της χρήσης του πηλού στη δόμηση, στο δεύτερο τα αργιλικά ορυκτά και οι ιδιότητες τους και στο τρίτο ένα σύντομο θεωρητικό υπόβαθρο της θλιπτικής αντοχής και αστοχίας της τοιχοποιίας.

ABSTRACT

The main objective of this thesis is to experimentally investigate the mechanical properties of three-leaf masonry constructed with natural stones and clay (mud) mortars, under compressive load. In order also to document their use and to explore some of their properties, samples of mud mortars from of the 4th century BC from Souriza were taken and analyzed. (Chapter 5)

Two different mortar mixes were designed. One for filling the joints of the external leaves and one for the internal core, designed to have lower mechanical characteristics and lower shrinkage in order to avoid the early separation of the layers. It was chosen not to use commercial clays but to collect the soil from the area of Agios Stefanos Attikis, in order to follow all the process of crushing the clay clods, sieving, drying and finally mixing with river sand and water. The water content was defined by the flow table test. Evaluation of the raw materials used for the production of the mortars was done by examining the particle size distribution by hydrometer and by sieves, the concentration of the total soluble salts and the organic material while the hardened mortar evaluation was done by measuring the compressive, flexural and tensile strength and the volumetric change. The compressive strength of masonry units was also determined. (Chapters 6 and 7)

Using natural stone from the region of Paramythia and mud mortars, three three-leaf masonry specimens were constructed. The walls were constructed without any type of transversal connection between the leaves and the internal core was constructed with alternate layers of stone fragments and mud mortar. Masonry specimens were subjected to monotonic compression after a six month maturation period. They exhibited sufficiently high compressive strength, low modulus of elasticity and high transversal and longitudinal deformations. Upon failure, many stones exhibited a bendable element behavior. Interestingly, the experimental results of compressive strength are nearly identical to the results from the application of semi-empirical formulas. (Chapter 8)

In the first three chapters elements of the theoretical framework are presented. In the first chapter a brief historical account of the use of clay as a structural element, in the second the clay minerals and their properties and in the third a short theoretical background of the compressive strength and failure of the masonry are presented.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1°

.....	15
ΣΥΝΤΟΜΟ ΙΣΤΟΡΙΚΟ	15
1.1 Προϊστορικά χρόνια	15
1.2 Ιστορικά χρόνια	16
1.3 Πηλοκονιάματα	17

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°

.....	21
ΣΥΝΘΕΣΗ ΔΟΜΙΚΟΥ ΠΗΛΟΥ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΡΓΙΛΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ	21
2.1 Σύνθεση δομικού πηλού	21
2.2 Γεωλογική προέλευση της αργίλου	22
2.3 Δομή αργιλικών ορυκτών	23
2.3.1 Γενικά στοιχεία	23
2.3.2 Δομικές μονάδες αργιλικών ορυκτών	24
2.3.3 Διαφοροποιήσεις βάση της δομής	25
2.4 Ομάδες αργιλικών ορυκτών δομικού πηλού	26
2.5 Χαρακτηριστικές ιδιότητες των αργιλικών ορυκτών που καθορίζουν τη μηχανική συμπεριφορά τους.	30
2.6 Ο ρόλος του νερού	32

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3°

.....	37
ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ – ΤΡΙΣΤΡΩΤΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ	37
3.1 Θλιπτική αντοχή - εισαγωγικά στοιχεία	37
3.1.1 Χαρακτηριστικά τοιχοποιίας και παράγοντες που επηρεάζουν τη θλιπτική αντοχή	38
3.1.2 Σχέση θλιπτικής αντοχής με λιθόσωμα /κονίαμα /τοιχοποιία.	40
3.1.3 Αστοχία τοιχοποιίας υπό θλιπτική φόρτιση	41
3.1.4 Προσδιορισμός θλιπτικής αντοχής τοιχοποιίας.....	42

3.1.5 Ελαστικά χαρακτηριστικά και θλιπτικές παραμορφώσεις τοιχοποιίας.....	44
3.2 Τρίστρωτη τοιχοποιία	46
3.2.1 Γενικά στοιχεία-παθολογία.....	46
3.2.2 Η συμβολή του Egermann.....	47
3.2.3 Μηχανισμός και εμφάνιση της θλιπτικής αστοχίας στην τρίστρωτη τοιχοποιία.....	50
3.2.4 Υπολογισμός της θλιπτικής αντοχής της τρίστρωτης τοιχοποιίας με χρήση ημιεμπειρικών τύπων	50
3.2.5 Πειραματικός προσδιορισμός της θλιπτικής αντοχής της τρίστρωτης τοιχοποιίας	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4°	
.....	55
ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ ΚΑΙ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ	55
4.1 <i>Bouyoucos hydrometer method (Κοκκομετρική ανάλυση με αραιόμετρο)</i>	<i>55</i>
4.2 Προσδιορισμός της οργανικής ουσίας κατά <i>Walkley-Black</i>	57
4.3 Προσδιορισμός της ολικής αλατότητας με την μέθοδο της μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης κορεσμένης εδαφικής πάστας	57
4.4 Δοκιμή τράπεζας εξάπλωσης	58
4.5 Κοκκομετρική ανάλυση με κοσκίνισμα	59
4.6 Μηχανικά χαρακτηριστικά κονιάματος: Καμπτική, θλιπτική και εφελκυστική αντοχή κονιάματος και μέτρο ελαστικότητας.....	60
4.7 Αντοχή πετρώματος	62
4.8 Περίθλαση ακτινών χ (XRD)	63
4.9 Διαφορική θερμική ανάλυση(DTA).....	64
4.10 Θερμοβαρυμετρική ανάλυση (TGA).....	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°	
.....	67
Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΛΑΥΡΕΩΤΙΚΗΣ	67
5.1 Ιστορικά στοιχεία	67
5.2 Επεξεργασία και καθαρισμός του μεταλλεύματος.	68
5.3 Μεταλλουργικό εργαστήριο <i>Jones</i>	68
5.4 Χαρακτηρισμός κονιαμάτων	69
5.4.1 γενική εικόνα τοιχοποιιών	69

5.4.2 Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης με αραιόμετρο	71
5.4.3 Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης με κόσκινα	71
5.4.4 Αποτελέσματα περίθλασης ακτινών Χ (XRD).....	72
5.4.5 Αποτελέσματα διαφορικής θερμικής ανάλυσης και θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης (DTA-TG).	74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6°	
.....	77
ΠΗΛΟΚΟΝΙΑΜΑΤΑ: ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ, ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ.	77
6.1 Γενικά στοιχεία	77
6.1.1 Κατάταξη κονιαμάτων.....	77
6.1.2 Χαρακτηριστικά πήλοκονιαμάτων	77
6.1.3 Παθολογία πήλοκονιαμάτων	78
6.2 Προμήθεια και έλεγχος πρώτων υλών	79
6.2.1 Προμήθεια υλικών	79
6.2.2 Έλεγχος πρώτων υλών	80
1. Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης με αραιόμετρο.	80
2. Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης με κόσκινα της άμμου του πηλού.....	81
3. Αποτελέσματα έλεγχου οργανικής ουσίας.	82
4. Αποτελέσματα Προσδιορισμού ολικών διαλυτών αλάτων.	82
5. Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυση αδρανών.....	83
6.3 Παρασκευή πήλοκονιαμάτων	87
6.3.1 Επεξεργασία του χώματος.....	87
6.3.2 Ανάμιξη	89
6.3.3 Παρασκευή δοκιμίων.....	89
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7°	
.....	91
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΛΙΘΟΥ	91
7.1 Χαρακτηριστικά σκληρυμένων κονιαμάτων	91
7.1.1 Αποτελέσματα μεταβολής του όγκου δοκιμίων πήλοκονιαμάτων (συστολή ξήρανσης).....	91
7.1.2 Αποτελέσματα μηχανικών χαρακτηριστικών κονιαμάτων (θλιπτική, καμπτική, εφελκυστική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας).....	92

7.2 Θλιπτική αντοχή λίθου	93
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8°	
.....	95
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΡΙΣΤΡΩΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ.....	95
8.1 Κατασκευή δοκιμών τοιχοποιίας	95
8.2 Προετοιμασία και ενοργάνωση των δοκιμών.....	99
8.3 Πειραματικά αποτελέσματα	100
8.3.1 Πρώτο δοκίμιο	100
8.3.2 Δεύτερο δοκίμιο	103
8.3.3 Τρίτο δοκίμιο	105
8.4 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων θλιπτικής αντοχής με σχέσεις από τη βιβλιογραφία.	107
8.5 Συμπεράσματα.....	109
8.5.1 Αποτίμηση των χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας	109
8.5.2 Συμπεράσματα όσον αφορά την αστοχία.....	110
8.6 Προοπτικές.....	112
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	115

ΣΥΝΤΟΜΟ ΙΣΤΟΡΙΚΟ

1.1 Προϊστορικά χρόνια

Ο πηλός με αδρανή και άλλα πρόσθετα (ξύλο και αργότερα άχυρα) αποτέλεσε τον πρώτο τύπο κονιάματος που χρησιμοποιήθηκε για χιλιάδες χρόνια στη δόμηση και χρησιμοποιείται ακόμα.

Σύμφωνα με τον Βιτρούβιο οι πρώιμοι κατασκευαστικοί τύποι όπου έχουμε χρήση πηλού είναι οι εξής:

- Κατασκευή σπηλιών με εκσκαφή χωμάτων
- Ξύλινα δικτυώματα επιχρισμένα από πηλό
- Τοίχοι από συμπιεσμένους σβώλους πηλού
- Τοίχοι από συμπιεσμένους σβώλους πηλού με ξύλινα πλέγματα (rise de terre η πηλόδομοι τοίχοι)
- Ωμοπλινθοδομές
- Σύμμεικτες κατασκευές με λίθινα θεμέλια και πλίνθινους τοίχους.

Στη Ελλάδα έχουμε χρήση πηλού στα κεντρικά και βόρεια ηπειρωτικά τμήματά από τα τέλη της έβδομης και αρχές της έκτης χιλιετίας. Στους πρώιμους νεολιθικούς οικισμούς τα κτίρια έχουν φέροντα σκελετό από πακτωμένους πασσάλους που κλείνει με επίχρισμα πηλού η με κλαδιά (Πάχτα, 2011).

Στο Σέσκλο στη Θεσσαλία έχουμε έναν από τους σπουδαιότερους νεολιθικούς οικισμούς της Ελλάδας που έφτασε στην ακμή του τα 500-800 σπίτια. Στην Προκεραμική Νεολιθική περίοδο έχουμε ελλειψοειδή ορύγματα μέσα στο έδαφος με τοίχους που προεξείχαν από το έδαφος, φτιαγμένους από κλαδιά δένδρων και λάσπη. Αργότερα στην Αρχαιότερη Νεολιθική (έκτη χιλιετία), τα σπίτια κτίζονται με πέτρινα θεμέλια, τοίχους από ωμά πλιθιά και δάπεδα από πατημένο πηλό. Στην Μέση Νεολιθική (πέμπτη χιλιετία) τα σπίτια έχουν λίθινο θεμέλιο, κιστή βάση από αργούς λίθους, πλίνθινη ανωδομή, δίκλινη στέγη με δοκούς σκεπασμένη με πηλό και με μία οπή για την έξοδο του καπνού (Σταμέλου, 2012).

Στο νεολιθικό οικισμό του Αρχοντικού Γιαννιτσών(2100π.Χ.-1900π.Χ.) έχουμε και εδώ ελλειψοειδή κτίρια με πακτωμένους πάσσαλους τα οποία όμως είναι φτιαγμένα με στοιβαχτό πηλό(πρώιμο terre rise). Τα ιδιαίτερο στοιχείο αυτού του οικισμού είναι ότι ο πηλός πιθανόν μεταφέρθηκε από άλλη περιοχή κάτι που θα υποδήλωνε γνώση των ανθρώπων της εποχής της σημασίας της αργίλου και των αδρανών (Πάχτα, 2011).

Στο ακρωτήρι της Θήρας έχουμε χτίσιμο με ωμόπλινθους που έχουν φτιαχτεί χωρίς τη χρήση καλουπιού και έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε άχυρα. Πλιθιά σε συνδυασμό με ξυλοδεσιές χρησιμοποίησαν και οι Μυκηναίοι ακολουθώντας το ισόδομο σύστημα σε ψηλότερα σημεία ανακτόρων και σπιτιών (Πάχτα, 2011). Χρήση πηλού και συγκεκριμένα πλιθιών με άχυρα και φύκια έχουμε επίσης και στην Μινωική Κρήτη στα Μάλια, στη Ζάκρος και στη Φαιστό καθώς και στις περιοχές του Μόχλου, της Βασιλικής και του Μακρού Γυαλού. Σε δείγματα από τις τρεις

τελευταίες περιοχές μάλιστα έχει γίνει και χαρακτηρισμός με αναλυτικές μεθόδους και συγκεκριμένα NAA, XRF και XRD προκειμένου να προσδιοριστεί η σύνθεση και η τεχνολογία κατασκευής (Nodarou, Frederick, & Hein, 2008).

1.2 Ιστορικά χρόνια

Ευρεία χρήση του πηλού γίνεται στον Ελλαδικό χώρο από τους αρχαίους Έλληνες και κατά τους ιστορικούς χρόνους. Οι ωμοπλινθοδομές το σύννηθες ήταν να κατασκευάζονται με συνδετικό πηλοκονίαμα και υπόβαση αργών και σε λίγες περιπτώσεις λαξευτών λίθων. Από ωμοπλινθοδομή κατασκευάζονταν τόσο ναοί (όπως το Ηραϊόν της Ολυμπίας, το Ηραϊόν του Άργους και ο ναός της όρθιας Αρτέμιδος στη Σάρπη) και βωμοί όσο και δημόσια κτίρια (γυμνάσιο Επίδαυρου, γυμνάσιο και παλαιόστρα Ολυμπίας) και ιδιωτικές οικίες. Ανάμεσα στα πιο μεγαλειώδη έργα με ωμόπλινθους συγκαταλέγονται και το μαυσωλείο της Αλικαρνασσού και το ανάκτορο του Κροίσου στις Σάρδεις. Ευρεία χρήση ωμόπλινθων και πηλοκονιαμάτων γινόταν και στα τείχη των πόλεων που ονομάζονταν και γήινα τείχη. Πιστεύανε μάλιστα ότι λόγω της μεγαλύτερης ελαστικότητας, οι ωμόπλινθοι παρείχαν μεγαλύτερη προστασία από τους λίθους στις κρούσεις πολεμικών μηχανών. Οι πλινθόκτιστοι τοίχοι συνήθως είχαν βάση από λίθους, το λιθολόγημα (Ορλάνδος, 1955).

Η παρασκευή των ωμόπλινθων γινόταν σε συγκεκριμένα εργαστήρια τα "πλινθεία" ή "πλινθουργεία" ή "πλινθούλκια" από εξειδικευμένους τεχνίτες τους "πηλοποιούς" ή "πηλουργούς" ή "πλινθουργούς". Ιδιαίτερο βάρος δινόταν στην επιλογή του χώματος το οποίο το συλλέγανε από επιλεγμένα μέρη ή ακόμα και το αγοράζανε προκειμένου να είναι κατάλληλο για δόμηση. Στη συνέχεια το κοσκινίζανε και το αναμιγνύανε με την κατάλληλη ποσότητα νερού καθώς και άχυρα ή τρίχες ζώων. Η ανάμιξη και η μάλαξη του πηλού ονομαζόταν φυράν τον πηλόν η οργάζειν η πηλοδουστειν και γινόταν σε μεγάλες λεκάνες είτε με τα χέρια, είτε με τα πόδια, είτε με τη χρήση εργαλείου, του λεγόμενου πηλοστροφίου. Στην συνέχεια τοποθετούνταν σε καλούπια προκειμένου να λάβουν το επιθυμητό σχήμα και έπειτα αφήνονταν να ξεραθούν υπό σκιά, για να αποφευχθεί η ρηγματώση, πάνω σε πλέγματα από καλάμια ονομαζόμενων και ταρσιών ή τρασιών. Οι διαστάσεις των ωμόπλινθων ποικίλλουν ανάλογα με την εποχή και τη χρήση και μπορεί να είναι και τετράγωνες και ορθογώνιες. Κάποιες χαρακτηριστικές που αναφέρει ο Βιτρούβιος είναι την λύδια πλίνθο(0,491m*0,327m), την πεντάδωρον με μήκος πλευράς 0,409m με κύρια χρήση σε δημόσια έργα και την τετράδωρον με μήκος 0,327 και κύρια χρήση σε ιδιωτικά έργα. Στους προϊστορικούς χρόνους οι διαστάσεις ποικίλουν (στο Σέσκλο π.χ. έχουμε διαστάσεις 0,36*0,28*0,075 ενώ στην Κνωσό 0,45*0,45*0,12) (Ορλάνδος, 1955).

Η σύνδεση των ωμόπλινθων και η εξωτερική επίχριση, η πήλωσις των ωμόπλινθων, γινόταν με κονιάματα υδαρούς πηλού καθώς ο ασβέστης, παρότι γνωστός από τα προϊστορικά χρόνια, χρησιμοποιούνταν για επιχρίσματα. Η μεταφορά του πηλού για συνδετικά κονιάματα η επιχρίσματα λεγόταν πηλοφορρείν (Ορλάνδος, 1955).



Εικόνα 1.1: Αναπαράσταση εξόρυξης αργιλώδους χώματος η μεταλλεύματος (Ορλάνδος, 1955)

1.3 Πηλοκονιάματα

Ο πηλός λόγω της αφθονίας του στη φύση, των εύκολα αντιληπτών ιδιοτήτων του, και του γεγονότος ότι δεν χρειάζεται κάποια εξεζητημένη επεξεργασία αποτέλεσε το πρώτο συνδετικό υλικό που χρησιμοποίησε σε κατασκευές ο άνθρωπος. Τα πηλοκονιάματα έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως από την προϊστορική εποχή, έως τις μέρες μας ως συνδετικό κονίαμα στην τοιχοποιία παραδοσιακών κατασκευών, αλλά και σε πιο σύνθετες αρχιτεκτονικές δημιουργίες όπως τα νεοκλασικά κτίρια, κυρίως ως υλικό πλήρωσης του πυρήνα τριστηρωτων τοιχοποιιών. Παρά την ευρεία, διαχρονική και σχεδόν παγκόσμια χρήση τους, η μελέτη των ιδιοτήτων και των μηχανικών χαρακτηριστικών τους υπολείπεται κατά πολύ της μελέτης άλλων κονιαμάτων. Οι πρώτες αργολιθοδομές που έχουμε χρήση πηλοκονιαμάτων είναι από την όγδοη χιλιετία π.Χ., πριν δηλαδή από την κατασκευή ωμοπλινθοδομών στη Μεσοποταμία και στη Βαβυλωνία, και τα χαρακτηριστικά τους είναι όμοια με αυτά των ωμόπλινθων με διαφορετική επεξεργασία (Pachta, Stefanidou, & Konopisi, 2014). Στην Ιερική έχουμε ίσως την πρώτη εμφάνιση του συστήματος πηλοκονιάματος – λίθου περισσότερο από 10000 χρόνια πριν, με τα τείχη και τον πύργο της Ιερικής. Ένα αξιοθαύμαστο από δομική σκοπιά έργο του οποίου η χρήση δεν μας είναι ακόμα γνωστή. Το πάχος της τοιχοποιίας είναι περίπου 1,5 m και το ύψος 8,25m ενώ υπάρχει σκάλα στο εσωτερικό (Liran&Barkai, 2011).



Εικόνα 1.2: Ο πύργος της Ιεριχούς

Στον Ελλαδικό χώρο λιθοδομή με πηλοκονιάματα έχουμε από την έκτη χιλιετία και έπειτα, σε διάφορους νεολιθικούς οικισμούς όπως του Σέσκλου που αναφέρθηκε παραπάνω, στο Σιδάρι Κέρκυρας, στον πολύ καλά οχυρωμένο οικισμό και λιμάνι στο Παλαμάρι Σκύρου (πρώιμης και μέσης περιόδου του Χαλκού 2500 – 1800 π.Χ.), στο Δίμηνη όπου μαζί με το Σέσκλο είναι οι πιο συστηματικά ανασκαμμένες νεολιθικές θέσεις της Θεσσαλίας και έχουμε συνέχεια της κατοίκησης από τη Νεότερη Νεολιθική έως το τέλος της Ύστερης Εποχής του Χαλκού κ.α. Τα κονιάματα παρασκευάζονταν δίπλα στο υπό ανέγερση κτίσμα και το χώμα συχνά αναμιγνυόταν με οργανικά (φυτά, ρίζες, άχυρα και καλάμια) και ανόργανα πρόσθετα προκειμένου να βελτιωθούν διάφορες ιδιότητες όπως η ανθεκτικότητα (Pachta, Stefanidou, & Konoipisi, 2014).



Εικόνα 1.3: τοιχοποιία στο παλαμάρι σκύρου

Και στη Μινωική Κρήτη ο πηλός χρησιμοποιείται εκτός από την παρασκευή ωμόπλινθων που αναφέρθηκε προωτέρα, στην δημιουργία συνδετικών κονιαμάτων για λιθοδομές ενώ σε κάποια πηλοκονιάματα χρησιμοποιείται και άχυρο. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα πηλοκονιάματα των αργολιθοδομών στο ακρωτήριο της Θήρας. Αφενός λόγω του μεγάλου πάχους αρμού και αφετέρου λόγω των πολλών προσμίξεων όπως χαλίκια, κογχύλια, κάρβουνο και άχυρα. Ο πηλός ήταν τοπικής προέλευσης και το χτίσιμο γινόταν με συμπίεση των λίθων σε παχιά στρώση πηλοκονιάματος. Τα κονιάματα δόμησης σταματούσαν 2-3 cm από την εξωτερική επιφάνεια και σε κάποιες περιπτώσεις το κενό αυτό καλύπτονταν με ασβεστοκονίαμα (Πάχτα, 2011).



Εικόνα 1.4: τοιχοποιία στο ακρωτήριο θήρας

Στην κλασική περίοδο εκτός από την εν ξηρώ δόμηση που χρησιμοποιείται κυρίως σε μνημειακές κατασκευές έχουμε και χρήση συνδετικών κονιαμάτων. Σε κάποιες περιπτώσεις όπως της Ολύνθου ή του Λαυρίου, τα κονιάματα αυτά είναι από πηλό. Στην Όλυνθο τα συνδετικά κονιάματα των λιθοδομών είναι συνήθως πηλοκονιάματα εκτός από κάποιους ειδικούς χώρους όπως ευρύχωρα δωμάτια για άντρες, ή χώρους όπου η ανθεκτικότητα έναντι της υγρασίας ήταν απαραίτητη. Εκεί υπάρχει χρήση ασβέστη με ποζολάνη (Ραραγιαννί&Stefanίδου, 2007). Στην περίπτωση του Λαυρίου θα αναφερθούμε εκτενώς σε επόμενο κεφάλαιο.

Η χρησιμοποίηση πηλοκονιαμάτων στην δόμηση είναι αδιάλειπτη έως τις μέρες μας. Μερικά παραδείγματα χρήσης του στην ελληνική παραδοσιακή αρχιτεκτονική είναι τα ακόλουθα:

- Το κατώι στη νότια Μάνη μεταξύ 15^{ου} και 18^{ου} αιώνα καλυπτόταν από κυλινδρική καμάρα κατασκευασμένη από αργούς λίθους και πηλοκονίαμα ή ασθενές ασβεστοκονίαμα. (Σαΐτας, 1987)
- Στα παραδοσιακά κτίσματα της Κρήτης οι λίθοι συνδέονται με συνδετικό κονίαμα που συνήθως είναι μίγμα χώματος με ασβέστη (Μουτσοπούλου Ε. , 2008).
- Στα παραδοσιακά σπίτια της Σύρου τα χρησιμοποιούμενα υλικά είναι το ξύλο, κυρίως το κυπαρίσσι και οι φείδες, τα καλάμια, η μαυρόπετρα (μαλακός, σκούρος πράσινος σχιστόλοθος), η πέτρα (είδος ασβεστόλιθου) και το σίδερο. Σαν συνδετικό κονίαμα χρησιμοποιούνταν η λάσπη χωρίς ασβέστη στην αρχή και με ελάχιστο αργότερα (Κάρτας, 1988).
- Στους παραδοσιακούς οικισμούς της Σίφνου τα κύρια υλικά είναι πέτρα και το ξύλο ενώ σε δεύτερη μοίρα ο ασβέστης, η άμμος, το χώμα, τα αργιλικά χώματα, η θηραϊκή γη και

τα φύκια. Σε αρκετά μεγάλο ποσοστό ο ασβέστης και η ξυλεία ήταν εισαγόμενα. Ο ντόπιος σχιστόλιθος δίνει τοιχοποιίες πολύ καλής τεχνικής με συνδετικό κονίαμα την απλή λάσπη. Φύκια και χώμα χρησιμοποιούνταν για την μόνωση στο δώμα καθώς και αργιλόχωματα για στεγανοποίηση (Τζάκου, 1988).

- Οι τοίχοι στα παραδοσιακά σπίτια της Ρόδου κατασκευάζονταν από πέτρα που υπάρχει στην γύρω περιοχή, από καγιά (ατσακόπετρα στις ορεινές περιοχές (Έμπωνα, Άγιος Ισίδωρος), από χοντρές στρογγυλεμένες πέτρες που βρίσκονται κοντά στα ποτάμια (Γεννάδι) και τέλος από πωρόλιθο (Λίνδος, Παραδείσι). Στα παλιότερα σπίτια το χτίσιμο της πέτρας γινόταν με κονίαμα από χώμα, συνήθως κοκκινόχωμα. Φύκια με από πάνω κοκκινόχωμα η ασπρόχωμα και τέλος αργιλόχωμα η λεγόμενη πατελιά χρησιμοποιούνταν για το δώμα (Μουτσοπούλου Α. , 1990).

Κεφάλαιο 2°

ΣΥΝΘΕΣΗ ΔΟΜΙΚΟΥ ΠΗΛΟΥ - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΡΓΙΛΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ

2.1 Σύνθεση δομικού πηλού

Λέγοντας δομικό πηλό εννοούμε χώμα λεπτής κοκκομετρίας που αποτελείται από υλικά διαφορετικής χημικής προέλευσης και σύνθεσης και τα οποία συγκολλούνται μεταξύ τους με φυσική ορυκτή συγκολλητική ύλη, την άργιλο. (ΑΝΕΛΙΞΗ, 2013). Τα βασικά συστατικά είναι χάλικες, άμμοι, ιλύες και άργιλοι ενώ μπορεί να υπάρχουν και οργανικές προσμίξεις, άλατα, οξειδία κ.α. Βάση κοκκομετρίας έχουμε τις εξής κατηγορίες:

Άργιλοι	Ιλεις			Άμμοι			Χάλικες			Κροκάλες		
	Λεπτές	Μέσες	Χονδρές	Λεπτές	Μέσες	Χονδρές	Λεπτές	Μέσες	Χονδρές			
0.001	0.002	0.006	0.02	0.06	0.2	0.6	2	6	20	60	100	200

Διαστάσεις κόκκων (mm)

Πίνακας 2.1: Όρια μεγεθών κόκκων εδαφικών υλικών (Καββαδάς, 2004)

Πιο αναλυτικά έχουμε τα εξής:

Α) Χονδρόκοκκα συστατικά (άμμοι, χάλικες και κροκάλες). Είναι χημικά αδρανή και εξασφαλίζουν τη συνοχή του υλικού. Για να προσδώσουν αντοχή στο υλικό, πρέπει να υπάρξει ένα ελάχιστο όριο επαφής μεταξύ των αδρανών ώστε να ενεργοποιηθούν εσωτερικές δυνάμεις συνοχής (Μπέη, 2004). Τα χαλίκια προέρχονται από την αποσάθρωση του μητρικού πετρώματος και αποτελούν τον σκελετό του χώματος. Η άμμος είναι συνήθως πυριτική η χαλαζιακή και οι κόκκοι της παρουσιάζουν έντονη εσωτερική τριβή και έλλειψη συνοχής. Η ανοιχτή δομή και η διαπερατότητα είναι τυπικά χαρακτηριστικά της άμμου η οποία συμβάλλει στον περιορισμό της διόγκωσης παρουσίας νερού και της συρρίκνωσης.

Β) Ιλύες. Από χημική και φυσική σκοπιά η ιλύς είναι παρόμοια με την άμμο με μόνη διαφορά τις διαστάσεις των κόκκων. Η ιλύς γεμίζει τα κενά και αυξάνει την εσωτερική τριβή προσφέροντας σταθερότητα. Παρουσιάζει επίσης μια ελάχιστη συνοχή και συρρίκνωση. Λόγω της μεγάλης διαπερατότητας παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία στον παγετό (Houben&Guillaud, 1994).

Γ) Άργιλοι. Ο όρος άργιλος δεν είναι μονοσήμαντος. Μπορεί να αναφέρεται τόσο σε υλικά μέγεθος σωματιδίων μικρότερο από 2μm όσο και σε μια οικογένεια ορυκτών με παρόμοια χημική σύνθεση και κοινά κρυσταλλικά χαρακτηριστικά (Σταθόπουλος, 2015). Οι άργιλοι με την ορυκτολογική έννοια διαφέρουν από τα υπόλοιπα συστατικά όσον αφορά τόσο τα χημικά όσο και τα φυσικά χαρακτηριστικά. Οι άργιλοι ανήκουν στις αργιλοπυριτικές ενώσεις που είναι μικτές ενώσεις αργιλίου, πυριτίου και νερού. Στις αργίλους περιέχονται προσμίξεις όπως οξειδία του σιδήρου, του ασβεστίου, του νατρίου κ.α. Τα κυριότερα ορυκτά από τα οποία προέρχονται οι άργιλοι είναι οι άστριοι και ειδικότερα οι άστριοι καλίου με χημικό τύπο $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$. (Παπαδόπουλος, Παπαϊωάννου, & Τσαπόγα, 2005). Οι άργιλοι συγκρατούν μεγάλες

ποσότητες νερού και ευθύνονται για την διόγκωση και την συρρίκνωση και διαδραματίζουν τον ρόλο της κονίας στα πηλοκονιάματα προσφέροντας συνοχή και μηχανικές αντοχές.

Δ) Άλλα στοιχεία λεπτόκοκκα και δραστικά: Μερικά στοιχεία μπορεί να έχουν πολύ θετική επίδραση στη συμπεριφορά των εδαφών και να ευνοούν κάποιες χημικές αντιδράσεις παρουσία υδραυλικών πρόσθετων όπως τα οξειδία του σιδήρου σε λατεριτικά εδάφη. Άλλα στοιχεία μπορεί να επιδρούν αρνητικά στη συμπεριφορά των εδαφών όπως είναι τα θειικά οξέα, τα χλωρικά οξέα και τα οργανικά υλικά (Μπότη, 2004).

2.2 Γεωλογική προέλευση της αργίλου

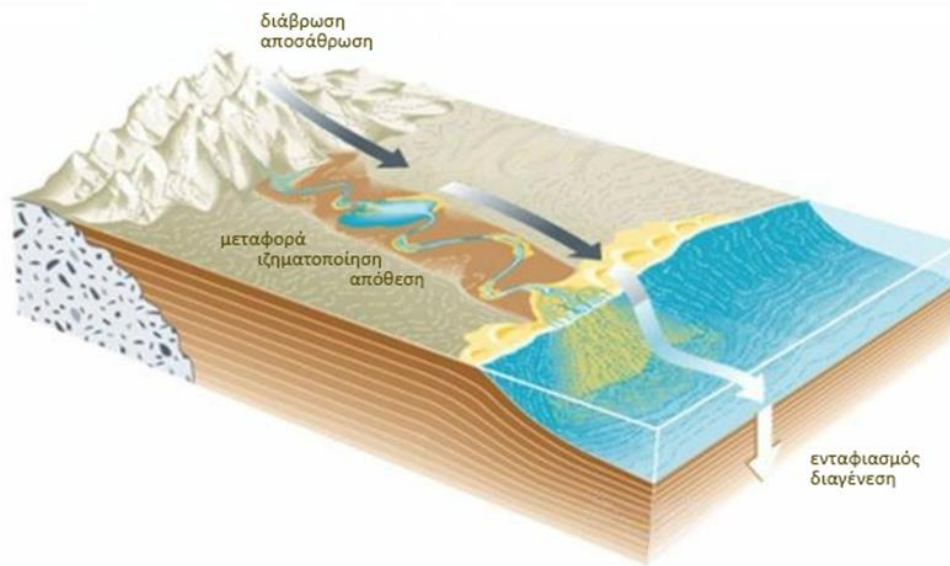
Το πέτρωμα από το οποίο προέρχεται η άργιλος είναι οι γρανίτες που είναι πυριτικά πετρώματα και προέρχονται από το ρευστό, διάπυρο μάγμα του ανώτερου μανδύα και του κατώτερου φλοιού της γης που ψύχεται και κρυσταλοποιείται στο εσωτερικό του φλοιού τουλάχιστον 2 km κάτω απ 'την επιφάνεια. Τα ορυκτά που συνθέτουν τους γρανίτες είναι οι άστριοι (οξείδιο αργίλου και πυριτίου), οι χαλαζίες (οξείδια πυριτίου) και οι μαρμαρυγίες ή μίκα όπως ο βιοτίτης και ο μοσχοβίτης (οξείδια αργιλίου, πυριτίου και μαγνησίου). Κατόπιν γεωλογικών ανακατατάξεων οι γρανίτες ανέρχονται στην επιφάνεια όπου διαβρώνονται και αποσαθρώνονται (ΑΝΕΛΙΞΗ, 2013).

Η αποσάθρωση των γεωλογικών σχηματισμών μπορεί να οφείλεται σε φυσικά, μηχανικά, χημικά ή βιολογικά αίτια. Τα εδάφη που προέρχονται από φυσικές διεργασίες αποσάθρωσης, δηλαδή τα κλαστικά ιζήματα, διατηρούν την ίδια σύσταση ορυκτών με το μητρικό πέτρωμα. Στα εδάφη που προκύπτουν από τη δράση παραγόντων χημικής αποσάθρωσης, δηλαδή στα χημικά ιζήματα, λαμβάνουν χώρα εξαλλοιώσεις των πρωτογενών ορυκτών, από τη δράση νερού, CO₂, O₂, κλπ και δημιουργούνται ομάδες σωματιδίων ή κρυσταλλικά σωματίδια μεγέθους κολλοειδούς (<0,002mm) που καλούνται αργιλικά ορυκτά. Τα αργιλικά ορυκτά καθορίζουν συνήθως τη γεωτεχνική συμπεριφορά των εδαφικών σχηματισμών (Λουπασάκης, 2013).

Οι μικρότεροι κόκκοι αυτής της αποσάθρωσης των ορυκτών του γρανίτη αποτελούνται από οξείδια αργιλίου και πυριτίου και αποτελούν την πρωτογενή άργιλο, τον καολίνη. Τα πέταλα του καολίνη είναι γωνιώδη, μεγαλύτερα από αυτά των άλλων αργίλων και οι μεταξύ τους δυνάμεις συνοχής ασθενέστερες. Τα αποσαθρωμένα υλικά όμως μπορεί εξαιτίας του αέρα και του νερού να μεταφερθούν σε περιοχές που προσφέρονται από το εδαφικό ανάγλυφο. Κατά την μεταφορά δημιουργούνται πρόσθετοι θρυμματισμοί και ιζήματα και αναμιγνύονται με πρόσθετα υλικά και χημικά στοιχεία. Οι άργιλοι που δημιουργούνται είναι δευτερογενείς όπως ο ιλλίτης και ο μοντμοριλλονίτης. Τα πέταλα των δευτερογενών αργίλων είναι μικρότερης διαμέτρου απ' αυτά των πρωτογενών και οι δυνάμεις συνοχής ισχυρότερες (ΑΝΕΛΙΞΗ, 2013).

Μια διάκριση του δομικού πηλού που μπορεί να γίνει βάση της γεωλογίας είναι η εξής:

- Ο ορεινός πηλός που περιέχει συνήθως περισσότερα χαλίκια και κροκάλες έχει καλά μηχανικά χαρακτηριστικά και είναι κατάλληλος για κατασκευή καλουπωτού πηλού (rammed dearth).
- Ο πεδινός πηλός περιέχει συνήθως περισσότερη ιλύ και άρα έχει μειωμένες αντοχές σε περιβαλλοντικά φορτία και μειωμένη θλιπτική αντοχή (Minke, 2006).



Σχήμα 2.1: από την αποσάθρωση μέχρι τη διαγένεση (στερεοποίηση ιζημάτων) (ΑΝΕΛΙΞΗ, 2013)

2.3 Δομή αργιλικών ορυκτών

2.3.1 Γενικά στοιχεία

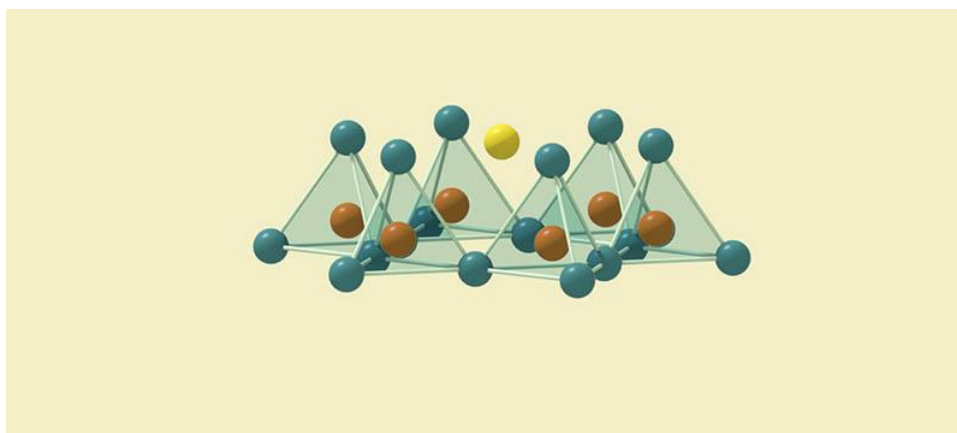
Ο φλοιός της γης απαρτίζεται από ένα σύνολο πετρωμάτων κυρίαρχα εκ των οποίων είναι τα πυριγενή που προέρχονται από τη στερεοποίηση διάπυρου υλικού. Λέγοντας πετρώματα εννοούμε μεγάλες μονάδες υλικών που συνιστούν ένα συνεκτικό σύνολο και αποτελούνται από διάφορα ορυκτά ενώ ορυκτά είναι όλα τα ομογενή κρυσταλλικά υλικά με συγκεκριμένη μοριακή δομή και σύσταση (Παυλίδης, 2009). Ένα μεγάλο ποσοστό των ορυκτών του φλοιού της γης (περίπου 92%) είναι πυριτικά ορυκτά, με συνήθη χημικά στοιχεία το οξυγόνο σε ποσοστό 62,5%, το πυρίτιο σε ποσοστό 21,2% και το αλουμίνιο σε ποσοστό 6,5%. Βασική μονάδα των πυριτικών ορυκτών είναι το τετράεδρο του πυριτίου όπου στο κέντρο του βρίσκεται το ιόν πυριτίου και στις κορυφές τέσσερα άτομα οξυγόνου. Οι έξι δομικές μονάδες των πυριτικών είναι τα νησοπυριτικά, τα σωροπυριτικά, τα κυκλοπυριτικά, τα ινοπυριτικά (μονής και διπλής αλυσίδας), τα τεκτοπυριτικά και τα φυλλοπυριτικά. Οι ομάδες των φυλλοπυριτικών ορυκτών τώρα είναι η ομάδα των σερπεντίνων, η ομάδα των μαρμαρυγίων, η ομάδα του τάλκη, η ομάδα των χλωριτών και η ομάδα των αργιλικών ορυκτών που μας ενδιαφέρει στην παρούσα εργασία και έχει μέγεθος κόκκων μικρότερο από 2 μm (Χατζηθεοδωρίδης, 2007). Χαρακτηριστικό των φυλλοπυριτικών ορυκτών είναι ότι απαρτίζονται από παράλληλες στρώσεις τετραεδρικών και οκταεδρικών σπιβάδων που έχουν μεγάλη ανάπτυξη σε δύο άξονες και μικρή στον κάθετο αυτών.

Τα ορυκτά της αργίλου κατατάσσονται ως ορυκτά με σταθερή κρυσταλλική δομή, έυκαμπτη, η ενδιάμεση κρυσταλλική δομή. Παραδείγματα αργιλικών εδαφών με σταθερή κρυσταλλική δομή είναι τα ορυκτά της ομάδας του καολινίτη, ενώ ο μοντμοριλονίτης και οι μαρμαρυγίες είναι τυπικά παραδείγματα εύκαμπτης και ενδιάμεσης κρυσταλλικής δομής. Το σχήμα των αργιλικών συστατικών όπως φαίνεται στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο μπορεί να μοιάζει με νιφάδες, πετάλια ή πτερύγια (Σταθόπουλος, 2015).

2.3.2 Δομικές μονάδες αργιλικών ορυκτών

Οι βασικές δομικές μονάδες των αργιλικών ορυκτών είναι οι εξής δύο:

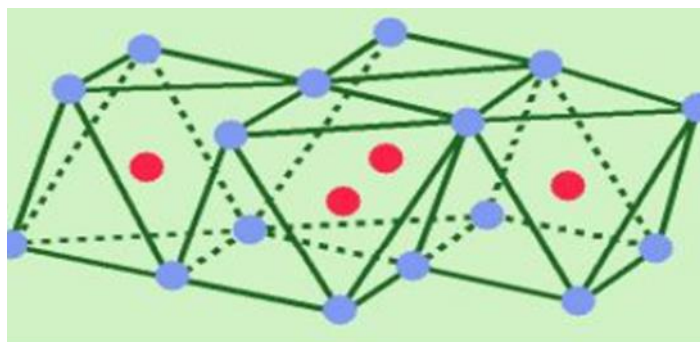
1. Το τετράεδρο του πυριτίου. Το τετράεδρο του πυριτίου αποτελείται από 4 άτομα οξυγόνου (O) διατεταγμένα γύρω από ένα άτομο Πυριτίου(Si). Πιο συγκεκριμένα το πυρίτιο βρίσκεται στο κέντρο του τετραέδρου και στις τέσσερις κορυφές του από ένα άτομο οξυγόνου. Τα τετράεδρα αυτά συνδέονται μεταξύ τους με τα οξυγόνα των κορυφών τους και κατά τρόπο ώστε να σχηματίζουν εξαγωνικούς δακτυλίους οι οποίοι επαναλαμβάνονται απεριόριστα (Κοτρώτσιου & Φραντζεσκάκη, 2011). Στην κορυφή των τετραέδρων παραμένει το τέταρτο οξυγόνο ελεύθερο που μπορεί να συνδεθεί με άλλα κατιόντα ενώ στο κέντρο του κάθε δακτυλίου και στο ύψος των οξυγόνων των κορυφών των τετραέδρων βρίσκεται ένα υδροξύλιο (OH). Τα τετράεδρα είναι προσανατολισμένα έτσι ώστε όλες οι βάσεις τους να βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο και όλες οι κορυφές να έχουν τον ίδιο προσανατολισμό. Από τη σύνδεση των τετραέδρων σχηματίζεται το λεγόμενο φύλλο πυριτίου (τετραεδρική στρώση) το οποίο απεικονίζεται σχηματικά με ένα τραπέζιο. Μεταξύ των τετραεδρικών στρωμάτων βρίσκονται στρώματα κατιόντων, όπως αργιλίου, μαγνησίου ή σιδήρου (Al, Fe, Mg) (ΑΝΕΛΙΞΗ, 2013).



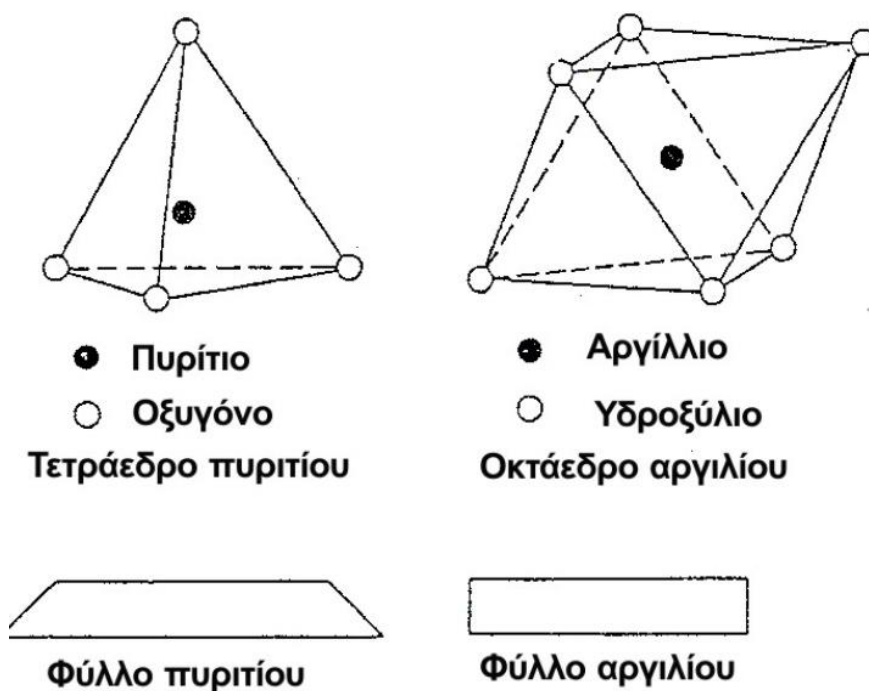
Σχήμα 2.2: εξαμελής δακτύλιος με το υδροξύλιο στο κέντρο (ΑΝΕΛΙΞΗ, 2013)

2. Το οκτάεδρο του Αργιλίου. Το οκτάεδρο του αργιλίου συνίσταται από 6 άτομα υδροξυλίου γύρω από ένα άτομο αργιλίου (Al). Στα οκτάεδρα του Αργιλίου έξι υδροξύλια κατέχουν τις γωνίες ενός οκτάεδρου στο κέντρο του οποίου βρίσκονται ιόντα αργιλίου ή σιδήρου ή μαγνησίου ή άλλο ιόν. Τα οκτάεδρα του αργιλίου, συνδέονται μεταξύ τους και σχηματίζεται το λεγόμενο φύλλο αργιλίου (οκτάεδρη στρώση) ή φύλλο του Γκιψίτη (Gibbsite) το οποίο απεικονίζεται σχηματικά με ένα ορθογώνιο. Αν αντί αργιλίου στο οκτάεδρο έχουμε μαγνήσιο (Mg), ο συνδυασμός των οκτάεδρων δίνει Βρουσίτη (Brucite). Τα ορυκτά Γκιψίτης και Βρουσίτης είναι σταθερά καθώς είναι ηλεκτρικά ουδέτερα. Αντίθετα οι οκταεδρικές στρώσεις δεν είναι ουδέτερες

ηλεκτρικά γι' αυτό και δεν συναντώνται μόνες τους στη φύση. Κατά τη σύνδεση τους τα επιμέρους οκτάεδρα μοιράζονται μια ακμή. (Κοτρώτσιου & Φραντζεσκάκη, 2011).



Σχήμα 2.3: Διάταξη οκτάεδρων στο χώρο (Περράκη-Λοϊσίου, 2006)



Σχήμα 2.4: Βασικές δομικές μονάδες αργιλικών ορυκτών (Κοτρώτσιου & Φραντζεσκάκη, 2011)

2.3.3 Διαφοροποιήσεις βάση της δομής

Τα τετραεδρικά και τα οκταεδρικά στρώματα εναλλάσσονται μεταξύ τους με διάφορους τρόπους και ακολουθίες, σχηματίζοντας διαφορετικούς τύπους κρυσταλλικών πετάλων, που σε συνδυασμό και με τα κατιόντα διαφορετικών κάθε φορά μετάλλων, δίνουν τα διάφορα είδη των αργιλικών ορυκτών. Μεταξύ των πετάλων παρεμβάλλεται κενός χώρος που ονομάζεται ενδοστρωματικός χώρος. Καταλαμβάνεται από ανταλλάξιμα ιόντα και ενδοστρωματικό νερό

(ΑΝΕΛΙΞΗ, 2013). Το κρυσταλλικό πλέγμα των αργιλικών ορυκτών χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη ηλεκτρικών φορτίων, κύρια αρνητικών, η δημιουργία των οποίων ερμηνεύεται ως εξής:

Στο πλέγμα των αργιλικών ορυκτών, συμβαίνουν ισόμορφες υποκαταστάσεις, τόσο του Si^{4+} των τετραεδρικών θέσεων, όσο και του Al^{3+} των οκταεδρικών θέσεων, από ιόντα μικρότερου σθένους (Al^{3+} , Fe^{3+} και Mg^{2+} , Fe^{2+}). Με τις υποκαταστάσεις αυτές δημιουργείται περίσσεια αρνητικών φορτίων, τα οποία εξουδετερώνονται, είτε με δέσμευση ορισμένων κατιόντων π.χ. K^+ , όπως συμβαίνει στα ορυκτά της ομάδας του ιλλίτη-μοσχοβίτη, είτε με προσρόφηση κατιόντων υπό ανταλλάξιμη μορφή, π.χ. Na^+ , Ca^{++} τόσο από τις εσωτερικές όσο και από τις εξωτερικές επιφάνειες του κρυστάλλου, όπως συμβαίνει στα ορυκτά της ομάδας του μοντμοριλλονίτη. Η διαφορά ιλλίτη-μοντμοριλλονίτη έγκειται στο ότι στον ιλλίτη η περίσσεια αρνητικών φορτίων που προκύπτει από υποκαταστάσεις Si από Al εξουδετερώνεται με δέσμευση K^+ , στο διαστρωματικό του χώρο, ενώ στον μοντμοριλλονίτη η περίσσεια αρνητικών φορτίων που προκύπτει, κύρια από υποκαταστάσεις Al από Mg , εξουδετερώνεται με προσρόφηση υπό ανταλλάξιμη μορφή κατιόντων Na^+ , Ca^{++} κλπ, τόσο από τις εσωτερικές, όσο και από τις εξωτερικές επιφάνειες του κρυστάλλου (Περράκη-Λοϊσίου, 2006). Τα αργιλικά ορυκτά, σύμφωνα με τη διάταξη των τετραεδρικών και των οκταεδρικών φύλλων στο πλέγμα τους, υποδιαιρούνται σε:

1. Ορυκτά δομής 1:1. Τα πέταλα των ορυκτών δομής 1:1 σχηματίζονται από την εναλλαγή ενός φύλλου τετραέδρων και ενός φύλλου οκταέδρων. Ορυκτά της ομάδας αυτής είναι ο καολινίτης με χημικό τύπο $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$, ο αλλοϋσίτης με χημικό τύπο $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8 \cdot 4H_2O$, ο μετα-αλλοϋσίτης με χημικό τύπο $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8 \cdot 2H_2O$, ο νικίτης με χημικό τύπο $2[Al_4Si_4O_{10}(OH)_8]$ και ο νακρίτης με χημικό τύπο $6[Al_4Si_4O_{10}(OH)_8]$.
2. Ορυκτά δομής 2:1. Τα πέταλα των ορυκτών δομής 2:1 αποτελούνται από ένα φύλλο οκταέδρων που βρίσκεται ανάμεσα σε δύο φύλλα τετραέδρων. Στα ορυκτά δομής 2:1 ανήκουν εκτός από τα ορυκτά της ομάδας των σμεκτιτών ($Al_4Si_8O_{20}(OH)_4 \cdot nH_2O$) και τα ορυκτά της ομάδας του ιλλίτη $K_yAl_4(Si_8-\gamma, Al)_2O_{20}(OH)_4$, όπου $1 < \gamma < 1.5$, καθώς και οι βερμικουλίτες (vermiculite group). Δομή 2:1 έχει και ο μοντμοριλλονίτης (Περράκη-Λοϊσίου, 2006).
3. Ορυκτά δομής 2:1:1. Αυτά είναι ορυκτά παρόμοια σε μορφολογία με τα 2:1 δηλαδή δύο τετράεδρα με ενδιάμεσο οκτάεδρο. Σε αυτήν την περίπτωση όμως υπάρχει ένα ακόμα ενδιάμεσο φύλλο που είναι οξείδιο του μαγνησίου. Το φύλλο αυτό ονομάζεται γέφυρα βρουσίτη. Κύριος εκπρόσωπος τους είναι ο χλωρίτης (Κοτρώτσιου & Φραντζεσκάκη, 2011).

2.4 Ομάδες αργιλικών ορυκτών δομικού πηλού

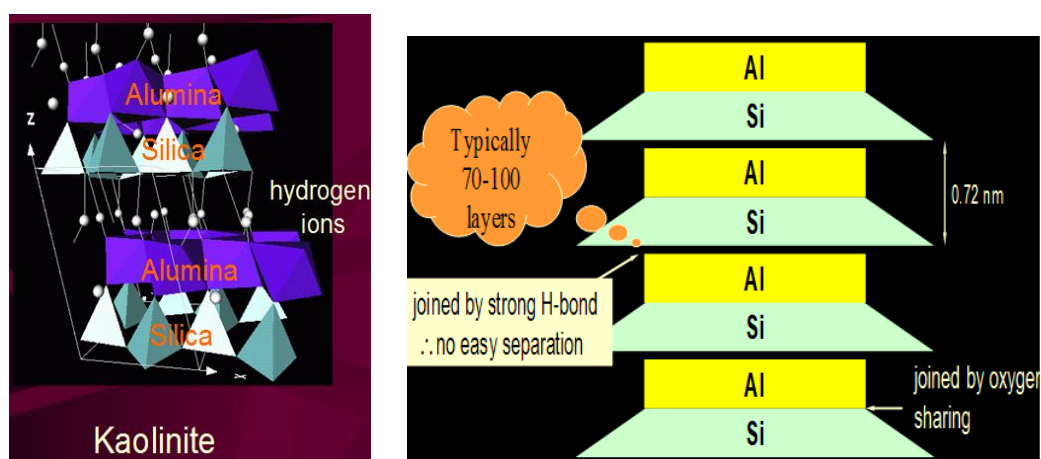
Υπάρχουν πολλές ομάδες αργιλικών ορυκτών. Αυτές που συναντάμε πιο συχνά όμως είναι η ομάδα του καολινίτη με αντιπροσωπευτικό ορυκτό τον καολινίτη, η ομάδα του ιλλίτη με κύριο ορυκτό τον ιλλίτη και η ομάδα του μοντμοριλλονίτη ή των σμεκτιτών με κύριο ορυκτό τον μοντμοριλλονίτη. Ένα κοινό χαρακτηριστικό των αργιλικών όλων των αργιλικών ορυκτών είναι

ότι λόγω του μικρού μεγέθους και της πλακοειδούς δομής των κόκκων οι επιφανειακές ηλεκτρικές δυνάμεις υπερτερούν των δυνάμεων βαρύτητας διότι οι ηλεκτρικές δυνάμεις είναι ανάλογες της επιφάνειας και οι δυνάμεις βαρύτητας ανάλογες του όγκου. (Μπελόκας, 2014)

Αργιλικό ορυκτό	Πάχος(μm)	Τυπική διάμετρος(μm)	Ειδική επιφάνεια(m ² /gr)
Μοντμοριλλονίτης	0,003-0,01	0,1-1	800
Ιλλίτης	0,02-0,2	5-10	80
καολινίτης	0,05-2	0,3-40	15

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικά αργιλικών Ορυκτών

Α) Ομάδα του καολινίτη: Τα ορυκτά της ομάδας αυτής παρουσιάζουν δομή 1:1 δηλαδή επαναλαμβανόμενες στρώσεις τετραεδρικού και οκταεδρικού φύλλου. Η κύρια διαφορά μεταξύ των ορυκτών αυτής της ομάδας έγκειται στη διαφορετική γεωμετρία σύνδεσης των στρωμάτων. Η διαφορά αυτή αντανακλάται στον διαφορετικό βαθμό ανάπτυξης των δεσμών υδρογόνου μεταξύ των υδροξυλίων του ενός στρώματος και των ατόμων οξυγόνου του άλλου. Εκτός από τον καολινίτη σε αυτήν την ομάδα ανήκει και ο νικίτης, ο νακρίτης και ο αλλοϋσίτης. Οι άργιλοι αυτής της ομάδας με την εξαίρεση του αλλοϋσίτη παρουσιάζουν μικρή διόγκωση με το νερό λόγω των μεγάλων δυνάμεων συνοχής μεταξύ των στρωμάτων. Στα ορυκτά της ομάδας του καολινίτη τα άτομα του υδρογόνου (του επιπέδου των OH-, που ανήκει στο φύλλο των οκταέδρων), τείνουν να σχηματίσουν δεσμούς υδρογόνου με τα οξυγόνα των παρακείμενων οκταεδρικών φύλλων. Ο δεσμός υδρογόνου είναι ένας σχετικά ασθενής δεσμός ηλεκτροστατικής φύσης μεταξύ Η και Ο. Οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις συνοχής ενισχύονται σε κάποιο βαθμό από τις δυνάμεις Van der Waals. Οι ισχυρές δυνάμεις συνοχής και η μικρή απόσταση μεταξύ των στρωμάτων (περίπου 7 Å) δεν επιτρέπουν στο νερό ούτε σε κατιόντα να εισχωρήσουν στον ενδοστρωματικό χώρο (Silva, 2013).



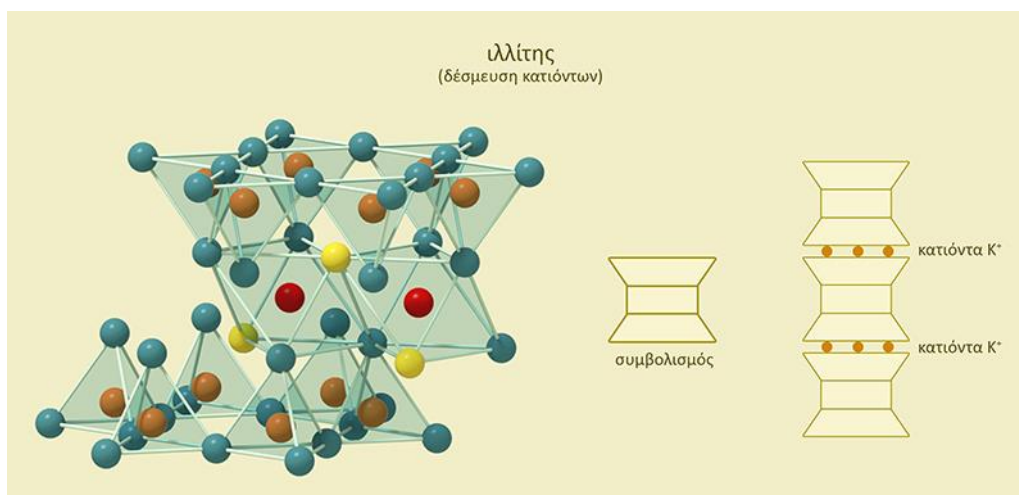
Σχήμα 2.5: σύνδεση στρωμάτων καολινίτη (Περράκη-Λοϊσίου, 2006)

Ο καολινίτης προέρχεται από την εξαλλοίωση (καολινιτίωση) των αστρίων και άλλων πυριτικών ορυκτών στα εκρηξιγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα, όπως ο γρανίτης ο γνεύσιος κλπ (Λουπασάκης, 2013). Πήρε το όνομά του από το χωριό Kao-ling, της πόλης Jingdezhen, της περιφέρειας Jiangxi στην Κίνα και είναι πρωτογενές αργιλοπυριτικό ορυκτό. Ο σχετικά ισχυρός δεσμός υδρογόνου εκτός από το να εμποδίζει την προσρόφηση νερού στον ενδοστρωματικό χώρο επιτρέπει στα στρώματα να στοιβάζονται και να δημιουργούν ένα σχετικά μεγάλο κρύσταλλο που μπορεί να έχει πάχος 70 έως 100 στρωμάτων. Παρουσιάζει μικρή διόγκωση και συρρίκνωση, εμφανίζει μειωμένη πλαστικότητα και έχει πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά (ΑΝΕΛΙΞΗ, 2013).

Ο Αλλουσίτης αποτελεί μέλος της οικογένειας του Καολινίτη με δομή 1:1 με ουδέτερα (χωρίς φορτίο) διοκταεδρικά φύλλα και χημικό τύπο: $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$. Ο αλλουσίτης συνίσταται από όχι καλά διευθετημένα φύλλα τύπου καολινίτη που χωρίζονται από ποικίλα στρώματα νερού μεταξύ των φύλλων και είναι σχήματος σωληνοειδή (tubular). Όταν αφυδατώνεται (μετά από θέρμανση τους στους $100^{\circ}C$) παίρνουμε τον μεταλλουσίτη. Η αφυδάτωση του αλλουσίτη μπορεί να μην είναι πλήρης. Ο μεταλλουσίτης που προκύπτει διατηρεί ένα περιεχόμενο σε νερό που δεν είναι αμελητέο (Κοτρώτσιου & Φραντζεσκάκη, 2011).

Β) Ομάδα των Ιλλιτών: Τα ορυκτά της ομάδας αυτής παρουσιάζουν δομή 2:1, δηλαδή από ένα φύλλο οκταέδρων του αργιλίου που βρίσκεται ανάμεσα σε δύο φύλλα τετραέδρων του πυριτίου. Ιόντα του μαγνησίου και του σιδήρου μπορεί να υποκαταστήσουν σε κάποιο βαθμό τα ιόντα αργιλίου στα οκτάεδρα φύλλα και άτομα αργιλίου τα άτομα του πυριτίου στα τετραέδρα φύλλα. Το αρνητικό φορτίο που δημιουργείται από την ισόμορφη υποκατάσταση αντισταθμίζεται από κατιόντα καλίου που συνδέουν τα γειτονικά στρώματα με ηλεκτροστατικούς δεσμούς (Houben & Guillaud, 1994). Παρά το ότι η απόσταση μεταξύ των στρωμάτων στις αργίλους αυτής της ομάδας είναι μεγαλύτερη από αυτήν της ομάδας των σμεκτιτών (10\AA), ο μεγαλύτερος βαθμός ισόμορφων υποκαταστάσεων οδηγεί σε ισχυρότερες δυνάμεις συνοχής. Οι ηλεκτροστατικές αυτές δυνάμεις δεν αφήνουν το νερό να εισχωρήσει στον ενδοστρωματικό χώρο και είναι υπεύθυνες για την έλλειψη ενδοστρωματικής διόγκωσης αυτών των αργίλων (Silva R., 2013).

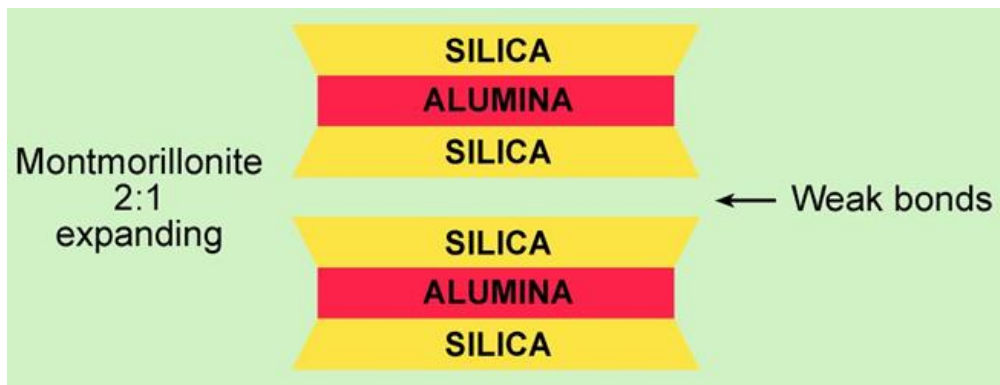
Ο ιλλίτης πήρε το όνομά του από το Illinois των ΗΠΑ. Προέρχεται κυρίως από τους μαρμαρυγίτες (μίκτες) αλλά και από άστριους των γρανιτών. Είναι δευτερογενές αργιλοπυριτικό ορυκτό, που ενσωμάτωσε κάλιο κατά τη διαδικασία της διαγένεσης. Έχει πλατειά και λεπτά εξαγωνικά πέταλα, με λόγο διαμέτρου προς πάχος 3 / 1 και αυξημένη ικανότητα ανταλλαγής ιόντων. Όταν στεγνώσει, συρρικνώνεται περισσότερο από τον καολίνη, λιγότερο όμως από τον μοντμοριλλονίτη. (ΑΝΕΛΙΞΗ, 2013).



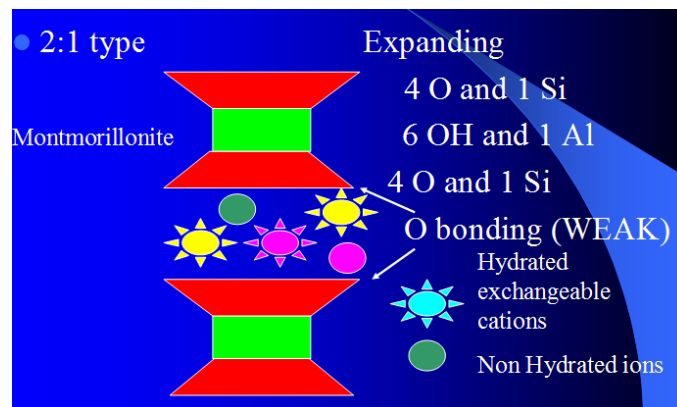
Σχήμα 2.6: δομή και σύνδεση στρωμάτων ιλλίτη. (ΑΝΕΛΙΞΗ, 2013)

Γ) Ομάδα των σμεκτιτών: Η δομή των αργιλικών ορυκτών αυτής της ομάδας είναι παρόμοια με αυτήν της ομάδας των ιλλιτών(2:1). Η διαφορά έγκειται στο ότι η ισόμορφη υποκατάσταση λαμβάνει χώρα στο οκταεδρικό φύλλο του αργιλίου. Ιόντα αργιλίου μπορεί να υποκατασταθούν από ιόντα μαγνησίου, σιδήρου κ.α. και η εξισορρόπηση των αρνητικών φορτίων γίνεται με προσρόφηση κατιόντων Na, Ca. Έτσι στον ενδοστρωματικό χώρο αντί για κατιόντα καλίου που είχαμε στην περίπτωση των ιλλιτών έχουμε κατιόντα Na, Ca σε ανταλλάξιμη μορφή και μόρια νερού (Houben & Guillaud, 1994). Τα ορυκτά αυτής της ομάδας παρουσιάζουν τους ασθενέστερους δεσμούς μεταξύ των στρωμάτων τους. Οι σμεκτίτες παρουσιάζουν τεράστια διόγκωση παρουσία νερού καθώς το νερό έχει τη δυνατότητα να εισχωρήσει μεταξύ των στρωμάτων προκαλώντας ενδοστρωματική διόγκωση. Η ενδοστρωματική διόγκωση μπορεί να αυξήσει την απόσταση των στρωμάτων από το τυπικό 9,6 Å σε ξηρή κατάσταση, σε τιμές από 12,5-20Å αναλόγως του είδους της αργίλου, οδηγώντας σε σχεδόν διπλασιασμό του όγκου της ξηρής αργίλου (Silva R. , 2013). Ορυκτά αυτής της ομάδας είναι ο μπαϊντελλίτης, ο νοντρονίτης, ο εκτορίτης και ο σαπονίτης.

Ο μοντμοριλλονίτης έχει χημικό τύπο $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot nH_2O$. Ο μοντμοριλλονίτης προσροφά πολλά μόρια νερού, τόσο στην επιφάνειά του όσο κυρίως στον διαστρωματικό του χώρο (interlayerspace) λόγω των ασθενών δυνάμεων που αναπτύσσονται μεταξύ των κρυστάλλων του. Έτσι, τα μόρια του νερού τα οποία εισδύουν μεταξύ των κρυστάλλων προκαλούν την απομάκρυνση των κρυστάλλων αυτών μέχρι την πλήρη διασπορά τους σε ιξώδες αιώρημα. Ο μοντμοριλλονίτης εκτός από το Al_2O_3 και το SiO_2 , περιέχει Fe_2O_3 και MgO , εξαίτιας των υποκαταστάσεων που συμβαίνουν στο πλέγμα του. Περιέχει επίσης και K_2O , Na_2O και CaO , δεδομένου ότι προσροφά τα αντίστοιχα κατιόντα, προκειμένου να εξουδετερωθεί η περίσσεια των αρνητικών φορτίων και να επέλθει ηλεκτροστατική ισορροπία (Περράκη, 2006). Ο μοντμοριλλονίτης προέρχεται από την εξαλλοίωση ηφαιστειακών πετρωμάτων και πήρε το όνομά του από την πόλη Montmorillon στη Γαλλία. Ο δομικός πηλός του μοντμοριλλονίτη διογκώνεται με το νερό περισσότερο από τους άλλους πηλούς. Οι ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των αργιλικών πετάλων του αυξάνονται και αποκτά μεγάλη πλαστικότητα. Μετά το στέγνωμα συρρικνώνεται περισσότερο από τον καολίνη και τον ιλλίτη (ΑΝΕΛΙΞΗ, 2013).



Σχήμα 2.7: Δομή μοντμοριλλονίτη



Σχήμα 2.8: Δομή και σύνδεση στρωμάτων μοντμοριλλονίτη (Περράκη-Λοϊσίου, 2006)

2.5 Χαρακτηριστικές ιδιότητες των αργιλικών ορυκτών που καθορίζουν τη μηχανική συμπεριφορά τους.

- **Ιοντοανταλλακτική ικανότητα (Ion Exchange Capacity I.E.C).**

Ιοντοανταλλακτική ικανότητα είναι η ικανότητα που έχουν τα αργιλικά ορυκτά να προσροφούν και να συγκρατούν ορισμένα ιόντα, τα οποία κάτω από ειδικές συνθήκες είναι δυνατό ν' ανταλλάγουν με ιόντα άλλων στοιχείων που βρίσκονται στο περιβάλλον τους. Διακρίνεται σε κατιοντοανταλλακτική & ανιοντοανταλλακτική ικανότητα, ανάλογα με το εάν το υπό ανταλλαγή ιόν είναι κατιόν ή ανιόν. Το φορτίο των φύλλων είναι κατά κανόνα αρνητικό εκτός και εάν βρίσκονται σε εξαιρετικά όξινες συνθήκες. Αυτό σημαίνει ότι οι άργιλοι τείνουν να προσροφούν κατιόντα και έχουν μια ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει λοιπόν η κατιοντοανταλλακτική ικανότητα, η οποία μετριέται σε χιλιοστοϊσοδύναμα ανταλασσόμενου ιόντος ανά 100 g προσροφητικού μέσου (meq/100 g) (Περράκη-Λοϊσίου, 2006). Η κύρια προέλευση του αρνητικού ηλεκτρικού φορτίου στα μόρια των αργίλων είναι το φαινόμενο της ισόμορφης υποκατάστασης κατά το οποίο τα κατιόντα των οκταέδρων ή των τετραέδρων υποκαθίστανται από κατιόντα μικρότερου φορτίου που έχουν παρόμοιο μέγεθος ώστε να προσαρμόζονται στη δομή (Κοτρώτσιου & Φραντζεσκάκη, 2011).

Η ιοντοανταλλακτική ικανότητα έχει μεγάλη σημασία για τις ιδιότητες των αργίλων. Αν, π.χ. σε μια ασβεστούχο άργιλο προστεθεί Na_2CO_3 , τα ιόντα Ca^{2+} θα ανταλλάγουν με τα ιόντα Na . Έτσι προκύπτει Na -άργιλος, που είναι περισσότερο πλαστική. Επίσης, η ιοντοανταλλακτική ικανότητα επηρεάζει τις ρεολογικές ιδιότητες (διογκωσιμότητα, ιξώδες κλπ.) όταν πρόκειται για μπεντονίτες και άλλα παρόμοια υλικά. Η τιμή της ιοντοανταλλακτικής ικανότητας είναι χαρακτηριστική για τις διάφορες ομάδες των αργιλικών ορυκτών. Είναι μεγάλη για την ομάδα του μοντμοριλλονίτη (80-150 meq/100 g), ενδιάμεση για τον ιλλίτη (10-40 meq/100 g) και μικρή για τα ορυκτά της ομάδας του καολινίτη (3-5 meq/100 g) (Περράκη-Λοϊσίου, 2006).

Η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων είναι συνάρτηση :

1. Της περιεκτικότητας του εδάφους σε άργιλο και μάλιστα είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα της αργίλου σε ορυκτά τύπου 2:1.
2. Της περιεκτικότητας του εδάφους σε οργανική ουσία.
3. του pH (Γασπαράτος, Καβασίλης, & Γιαννακοπούλου, 2011)

- **Πλαστικότητα**

Πλαστικότητα είναι η ιδιότητα του μείγματος αργίλου-νερού να μορφοποιείται κάτω από την επίδραση εξωτερικών δυνάμεων και να διατηρεί αυτή τη μορφή μετά την ξήρανση και το ψήσιμο. Κατά την επαφή με το νερό τ' αργιλικά ορυκτά περιβάλλονται από ένα λεπτό υδάτινο υμένιο εξαιτίας του οποίου εξασθενίζουν οι δυνάμεις συνοχής και ελαττώνεται η τριβή, με αποτέλεσμα το μίγμα αργίλου-νερού να γίνεται πλαστικό.

Η πλαστικότητα εξαρτάται από:

1. Τη μορφή των σωματιδίων (φυλλώδης ή πρισματική).
2. Τις δυνάμεις που συνδέουν τα σωματίδια μεταξύ τους (ασθενέστερες στον μοντμοριλλονίτη, ισχυρότερες στον καολινίτη).
3. Το είδος των προσροφημένων ιόντων (Na^+ , Ca^{2+} ,...).
4. Το πάχος των υδάτινων υμενίων.

Μέτρο της πλαστικότητας είναι η ποσότητα του νερού που χρειάζεται μια άργιλος για ν' αποκτήσει τη μέγιστη πλαστικότητά της. Λέγεται νερό πλαστικότητας και εκφράζεται σε cm^3 επί τοις εκατό. Η πλαστικότητα μιας αργίλου ποικίλλει ανάλογα με την περιεκτικότητά της σε αργιλικό κλάσμα, σε μοντμοριλλονίτη, σε οργανική ουσία κλπ (Περράκη-Λοϊσίου, 2006).

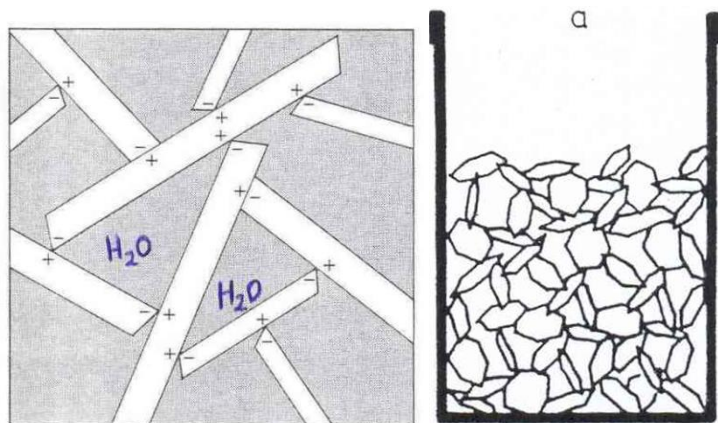
- **Θιξοτροπία**

Αν αναμιχθεί κάποια άργιλος με περίσσεια νερού είναι δυνατόν εφ' όσον το μέγεθος των αργιλικών ορυκτών είναι μικρό να σχηματισθεί ένα αιώρημα το οποίο μετά από λίγο πήζει δημιουργώντας ένα πήκτωμα. Το πήκτωμα αυτό δεν ρέει όταν υποστεί κλίση, εάν όμως ανακινηθεί μετατρέπεται ξανά σε αιώρημα.

Η ιδιότητα αυτή, αναστρέψιμη και χρονοεπηρεαζόμενη, είναι γνωστή ως θιξοτροπία και οφείλεται στο ότι τα αιωρούμενα αργιλικά σωματίδια σταδιακά παίρνουν τέτοιες θέσεις έτσι ώστε τα μόρια του νερού εγκλωβίζονται στα κενά που δημιουργούνται ανάμεσα στ' αργιλικά ορυκτά και δεν μπορούν να κινηθούν ελεύθερα. Πρόκειται για την ονομαζόμενη δομή "house of cards", όπου τα αργιλικά σωματίδια είναι συνδεδεμένα σ' ένα τρισδιάστατο δίκτυο. Κάθε δυνατό χτύπημα μπορεί να χαλάσει αυτό το σκελετό και το αιώρημα μπορεί να κινηθεί πάλι ελεύθερα.

Ο μοντμοριλλονίτης αναπτύσσει θιξοτροπία σε μεγάλο βαθμό. Θιξοτροπία σε μικρό βαθμό είναι δυνατό να αναπτύξουν μερικοί καολίνες ιζηματογενούς προέλευσης, όταν είναι επεξεργασμένοι με Na_2CO_3 .

Στη θιξοτροπία βασίζεται η διαδικασία καθαρισμού των γεωτρήσεων με τη βοήθεια κατάλληλων δονητών. (Μετατροπή του πηκτοματοποιημένου μπεντονιτικού πολφού των τοιχωμάτων των γεωτρήσεων σε ρευστή μορφή).



Σχήμα 2.9: Δομή "house of cards"

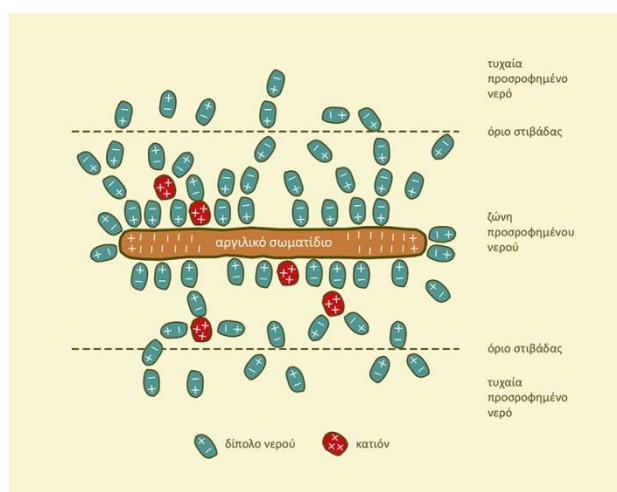
- **Διασπορά-θρόμβωση**

Τα αργιλικά ορυκτά σε υδάτινο περιβάλλον (αιωρήματα) διαμορφώνουν συσσωματώματα η διατηρούνται σε διασπορά, ανάλογα με την παρουσία ορισμένων ηλεκτρολυτών (Λουπασάκης, 2013).

2.6 Ο ρόλος του νερού

Η επιρροή του νερού στη μηχανική συμπεριφορά των χονδρόκοκκων εδαφών είναι πρακτικά μηδενική, εφόσον η επιβολή της φόρτισης γίνεται με επαρκώς βραδύ ρυθμό. Αντίθετα όμως, η συμπεριφορά των λεπτόκοκκων εδαφών όπως είναι τα αργιλικά εδάφη επηρεάζεται σημαντικά από την παρουσία και την ποσότητα του νερού στους πόρους. Η επιρροή αυτή οφείλεται κυρίως στην ηλεκτρική αλληλεπίδραση του νερού με τις

φορτισμένες επιφάνειες των αργιλικών πλακιδίων. Όπως είναι γνωστό, το μόριο του νερού, αν και ηλεκτρικά ουδέτερο, παρουσιάζει τις ιδιότητες ηλεκτρικού δίπολου, με κέντρα θετικού και αρνητικού φορτίου που δεν ταυτίζονται. Τα ηλεκτρικά αυτά δίπολα έλκονται προς την ηλεκτρικά φορτισμένη επιφάνεια των αργιλικών πλακιδίων και προσροφώνται σε αυτή, δηλαδή συνδέονται ισχυρά με την επιφάνεια των αργιλικών πλακιδίων και αποτελούν ενιαίο σώμα. Η έλξη των δίπολων του νερού προς τα αργιλικά πλακίδια είναι πολύ ισχυρή κοντά στην επιφάνεια και μειώνεται ραγδαία με την απόσταση από την επιφάνεια, επειδή, ως γνωστόν, οι ηλεκτρικές δυνάμεις είναι αντιστρόφως ανάλογες του τετραγώνου της απόστασης. Έτσι, δημιουργείται μια ζώνη γύρω από το αργιλικό πλακίδιο, στην οποία το προσροφημένο νερό έχει ιδιότητες πολύ διαφορετικές από το ελεύθερο νερό που βρίσκεται έξω από τη ζώνη αυτή. Η ζώνη (στρώση) του προσροφημένου νερού γύρω από το αργιλικό πλακίδιο ονομάζεται διπλή στρώση, επειδή αναπτύσσεται και στις δύο επιφάνειες του πλακιδίου.



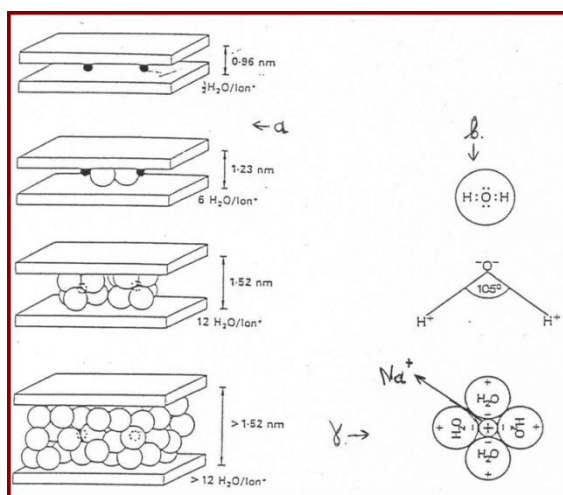
Σχήμα 2.10: Προσροφημένα δίπολα νερού σε αργιλικό πλακίδιο (ΑΝΕΛΙΞΗ, 2013)

Η ύπαρξη και το μέγεθος της διπλής στρώσης είναι καθοριστικοί παράγοντες των μηχανικών ιδιοτήτων των αργιλικών εδαφών. Έτσι, π.χ., με την αύξηση της υγρασίας (δηλαδή της ποσότητας του νερού στους πόρους των αργιλικών εδαφών) αυξάνει αρχικά και το πάχος της διπλής στρώσης, επειδή ένα μέρος του διαθέσιμου νερού προσροφάται στην επιφάνεια των αργιλικών πλακιδίων. Εάν το ποσοστό της υγρασίας αυξηθεί πέρα από κάποιο όριο, το πάχος της διπλής στρώσης γίνεται πολύ μεγάλο, οπότε τα μόρια του νερού που βρίσκονται στο απομακρυσμένο από το πλακίδιο όριο της διπλής στρώσης και είναι ασθενώς συνδεδεμένα με τη διπλή στρώση (λόγω της πτώσης του ηλεκτρικού δυναμικού με την απόσταση) αποκτούν ιδιότητες ελεύθερου νερού (δηλαδή εμφανίζουν μικρή έως μηδενική διατμητική αντοχή). Κατά συνέπεια, οι επαφές μεταξύ των πλακιδίων, μέσω των μορίων του νερού που είναι ασθενώς συνδεδεμένα με τις διπλές στρώσεις, οδηγεί στη βαθμιαία μείωση της διατμητικής αντοχής της αργίλου και τη μετάπτωσή της από τη στερεά μορφή (για μικρά ποσοστά υγρασίας) στην υδαρή κατάσταση. Αντίθετα, η μείωση της υγρασίας έχει σαν συνέπεια τη μείωση του πάχους των διπλών στρώσεων, την ισχυρότερη ηλεκτρική αλληλεπίδραση μεταξύ των αργιλικών πλακιδίων (έλξη της θετικά φορτισμένης περιφέρειας ενός πλακιδίου προς τις αρνητικά φορτισμένες παρειές του γειτονικού πλακιδίου) και την αύξηση της διατμητικής αντοχής (Καββαδάς, 2004).

Βάσει και των παραπάνω οι κύριες ιδιότητες που αφορούν το νερό είναι:

- Προσρόφηση του ύδατος

Τα αργιλικά ορυκτά έχουν την ικανότητα να προσροφούν H₂O στον ενδοστρωματικό τους χώρο και να διογκώνονται. Το ποσοστό του H₂O που προσροφάται εξαρτάται κύρια από το είδος του αργιλικού ορυκτού και από την κοκκομετρία του. Είναι π.χ. μεγάλο για τον μοντμοριλλονίτη, λόγω των ασθενών δεσμών που αναπτύσσονται μεταξύ των διαδοχικών του στρωμάτων, σε αντίθεση με τον καολινίτη μεταξύ των στρωμάτων του οποίου αναπτύσσονται ισχυροί δεσμοί που δεν επιτρέπουν την προσρόφηση του νερού. Προκειμένου για το μοντμοριλλονίτη, το ποσοστό του νερού που προσροφάται εξαρτάται εκτός από το είδος των δεσμών και από το είδος των κατιόντων (Ca⁺², Na⁺¹κ.λ.π), τα οποία βρίσκονται προσροφημένα στο ενδοστρωματικό του χώρο (Περράκη-Λοϊσίου, 2006).



Σχήμα 2.11: στάδια προσρόφησης νερού στον ενδοστρωματικό χώρο μοντμοριλλονίτη (Περράκη-Λοϊσίου, 2006)

- Διόγκωση – συρρίκνωση

Μία σοβαρή δυσκολία στη δόμηση του πηλού είναι η διόγκωση του κατά την προσθήκη νερού και η συρρίκνωσή του μετά την απομάκρυνση του νερού. Η απομάκρυνση του νερού κατά το στέγνωμα του δομικού στοιχείου, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του όγκου του με συνέπεια την δημιουργία ρωγμών. Ο βαθμός συρρίκνωσης και ρηγμάτωσης εξαρτάται:

1. Από το είδος της αργίλου που περιέχει το δομικό στοιχείο. Ο μοντμοριλλονίτης διογκώνεται ή συρρικνώνεται με την προσθήκη ή την απομάκρυνση του νερού πολύ περισσότερο από τον καολίνη και τον ιλλίτη.
2. Από την περιεκτικότητα του πηλού σε χονδρόκοκκα αδρανή υλικά. Η παρουσία ή η προσθήκη τους (κυρίως άμμου και σκύρων) στο μείγμα του πηλού είναι αποφασιστικής σημασίας για τη μείωση του βαθμού διόγκωσης και συρρίκνωσης. Η βελτιστοποίηση της κοκκομετρικής σύνθεσης ελαχιστοποιεί και μάλιστα μπορεί και να αποτρέψει την εμφάνιση ρωγμών κατά την ξήρανση.

Τα στεγνά δομικά στοιχεία του πηλού είναι υδρόφιλα. Απορροφούν και αποβάλλουν υγρασία, χωρίς όμως να μεταβάλουν πλέον σημαντικά τον όγκο τους. (ΑΝΕΛΙΞΗ, 2013)

- **Υδατοπερατότητα**

Δεδομένου του πολύ μικρού μεγέθους των κόκκων των αργιλικών ορυκτών, όπως και της διόγκωσης που δημιουργείται σ' αυτά έπειτα από προσρόφηση νερού, τα στρώματα τα οποία αποτελούνται από αργιλικά ορυκτά είναι μη υδατοπερατά (Περράκη-Λοϊσίου, 2006).

ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ – ΤΡΙΣΤΡΩΤΗ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ

3.1 Θλιπτική αντοχή - εισαγωγικά στοιχεία

Η τοιχοποιία είναι από τα αρχαιότερα δομικά υλικά. Εντούτοις, οι γνώσεις μας για τη μηχανική της συμπεριφορά και την απόκριση κτιρίων από φέρουσα τοιχοποιία είναι σχετικά περιορισμένες. Η αντίφαση αυτή μπορεί να αποδοθεί στους ακόλουθους λόγους :

A). Η ανάπτυξη της επιστήμης της μηχανικής σχεδόν συνέπεσε με την εμφάνιση νέων, ισχυρών και εύπλαστων δομικών υλικών – χάλυβας, σκυρόδεμα – που μείωσαν το κόστος του φέροντα οργανισμού και βαθμιαία περιόρισαν την τοιχοποιία στο ρόλο του οργανισμού πλήρωσης.

B). Η τοιχοποιία έχει σχετικά χαμηλές αντοχές και εμφανίζει ψαθυρή συμπεριφορά, γεγονός που οδηγεί στην ανάγκη αύξησης των διατομών και του κόστους του φέροντα οργανισμού και περιορίζει τον αριθμό των ορόφων, ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλή σεισμικότητα.

Γ). Η τοιχοποιία είναι υλικό πολυφασικό, πολύμορφο και "απείθαρχο". Τα βασικά συστατικά της είναι οι πλίνθοι και το συνδετικό κονίαμα. Οι πλίνθοι μπορεί να είναι τεχνητές ή τεμάχια φυσικών λίθων και παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία υλικών, κατεργασίας, σχημάτων και μεγεθών. Το κονίαμα παρουσιάζει μεγάλη ποικιλία συνθέσεων και αντοχών αλλά μπορεί και να απουσιάζει εντελώς (ξηρολιθοδομές). Ένας επί πλέον παράγοντας πολυμορφίας είναι και ο τύπος δόμησης (πλέξη) της τοιχοποιίας. Κατά συνέπεια απαιτείται θεμελιώδης έρευνα των επί μέρους φάσεων (πλίνθοι – κονίαμα) και της μηχανικής "συνεργασίας" τους στο σώμα της τοιχοποιίας για την κατανόηση της συμπεριφοράς της.

Έτσι, μέχρι τις αρχές του 20ου αιώνα ο σχεδιασμός κτιρίων με φέροντα οργανισμό από τοιχοποιία ήταν σχεδόν εμπειρικός. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται διεθνώς έντονη ευαισθητοποίηση της κοινής γνώμης για τη συντήρηση και ανάδειξη της οικιστικής πολιτιστικής κληρονομιάς. Μέσα στο κλίμα αυτό αναζωπυρώθηκε και η έρευνα της μηχανικής συμπεριφοράς της τοιχοποιίας καθώς η συντριπτική πλειοψηφία των μνημείων και διατηρητέων κτιρίων και συνόλων είναι κτίσματα από φέρουσα τοιχοποιία. Παράλληλα άρχισαν να ανακαλύπτονται ξανά τα ξεχασμένα προτερήματα της τοιχοποιίας όπως: θερμομόνωση, πυρασφάλεια, αντοχή στο χρόνο, αισθητική υπεροχή. Τροχοπέδη στην ανάπτυξη της διεθνούς συνεργασίας για την προώθηση της έρευνας της φυσικής και μηχανικής συμπεριφοράς της τοιχοποιίας είναι η πολυμορφία και πολυτυπία του ίδιου του υλικού, που έχει σαν αποτέλεσμα τη μεγάλη δυσκολία προτυποποίησης υλικών και μεθόδων. Πολλές χώρες, μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα, σχετικά πρόσφατα απέκτησαν κανονισμό για κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία (Ιγνατάκης & Στυλιανίδης, 2009).

3.1.1 Χαρακτηριστικά τοιχοποιίας και παράγοντες που επηρεάζουν τη θλιπτική αντοχή

Τρία βασικά χαρακτηριστικά της τοιχοποιίας που καθορίζουν την μηχανική συμπεριφορά της, είναι τα εξής:

A) Η τοιχοποιία είναι ένα ανομοιογενές υλικό. Τα δύο βασικά της στοιχεία, το κονίαμα και τα λιθοσώματα έχουν συνήθως πολύ διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά. Εκτός από αυτά τα δύο πολλές φορές έχουμε τη χρήση άλλων υλικών όπως το ξύλο και το σίδερο που αυξάνουν την ανομοιογένεια αυτή.

B) Η τοιχοποιία είναι ένα ανισότροπο υλικό. Αυτό σημαίνει ότι τα μηχανικά της χαρακτηριστικά αλλάζουν σε κάθε διεύθυνση φόρτισης.

Γ) Η τοιχοποιία είναι ένα ψαθυρό υλικό. Οι παραμορφώσεις κατά την αστοχία είναι σχετικά μικρές και ακολουθεί ένας απότομος φθίνων κλάδος (Βινζηλαίου, 2014).

Επειδή η τοιχοποιία υπό συνήθης συνθήκες δέχεται κυρίως θλιπτικά φορτία, ο προσδιορισμός της θλιπτικής αντοχής και οι μηχανισμοί αστοχίας έχουν γίνει αντικείμενο αρκετών ερευνητών.

Κάποιοι γενικοί, κοινώς αποδεκτοί παράγοντες που επηρεάζουν την θλιπτική αντοχή είναι οι εξής:

1. Τα χαρακτηριστικά των τοιχοσωμάτων: Η θλιπτική τους αντοχή, ο τύπος, η υδροαπορροφητικότητα, το πορώδες, καθώς και η γεωμετρία τους. Όσον αφορά τη γεωμετρία στην περίπτωση των αργολιθοδομών, όπως η δική μας περίπτωση, αξίζει να αναφερθούν τα εξής: Είναι επιθυμητό οι πλευρές να είναι όσο το δυνατό ομαλές και επίπεδες ώστε να υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων και η συνιστώμενη αναλογία ύψους- πλάτους-μήκους είναι 1:2:3 ή 1:2:3,5. Λίθοι μικρού ύψους σε σχέση με τις άλλες διαστάσεις, η λίθοι επιμήκεις πρέπει να αποφεύγονται καθώς υπάρχει ο κίνδυνος να αστοχήσουν από καμπτικό εφελκυσμό. Μεγάλοι λίθοι επίσης είναι δύσκολο να τους χειριστούν οι εργάτες και μικροί αυξάνουν τον λόγο ύψους αρμού προς ύψος λιθοσώματος μειώνοντας την αντοχή της τοιχοποιίας. Ιδανικές διαστάσεις λιθοσώματος μπορούν να θεωρηθούν οι εξής: ύψος 0,10-0,25 m, πλάτος 0,15-0,30 m και μήκος 0,30-0,40 m (Καραντώνη, 2012).
2. Τα χαρακτηριστικά του κονιάματος: η θλιπτική του αντοχή, το είδος της χρησιμοποιούμενης κονίας, το είδος και η κοκκομετρία των αδρανών, ο λόγος νερού προς κονία και γενικότερα η σύνθεση, η συγκράτηση ύδατος και η παραμόρφωση του σε σχέση με αυτή του λιθοσώματος.
3. Χαρακτηριστικά της τοιχοποιίας: η συνάφεια κονιάματος- τοιχοσώματος, η διεύθυνση της φόρτισης και οι τοπικές αυξήσεις φορτίου (Hendry, Sinha, & Davies, 1997).

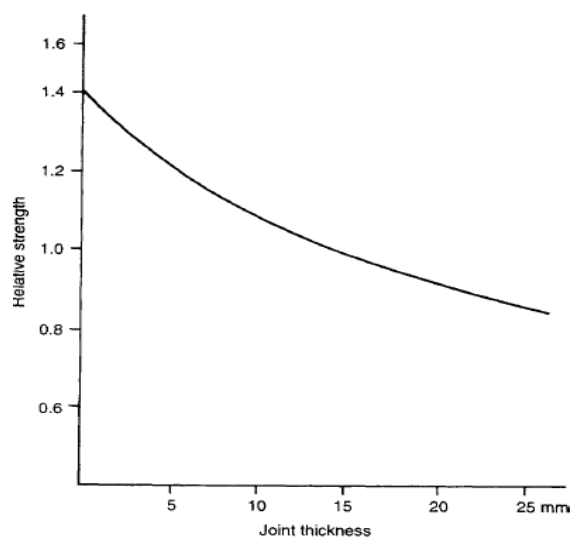
Κάποιοι πρόσθετοι παράγοντες που επηρεάζουν την θλιπτική αντοχή είναι οι εξής:

1. Το πάχος του αρμού και τα χαρακτηριστικά του χρησιμοποιούμενου υλικού. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας του Morsy (Morsy, 1989)

Υλικό αρμού	Fwc(MPa)	Fwc/fbc
χάλυβας	56,48	1,40
Συγκολλητή ξυλεία	46,39	1,15
hardboard	43,89	1,09
πολυαιθυλένιο	16,99	0,42
Καουτσούκ με ίνες	11,71	0,42
Μαλακό καουτσούκ	6,99	0,17
Χωρίς υλικό αρμών	37,2	0,93
Κονίαμα(1:0,25:3) (τσιμέντο-ασβέστης-άμμος)	14	0,35

Πίνακας 3.1: επίδραση υλικού αρμού στην θλιπτική αντοχή οπτοπλινθοδομής (Morsy 1989)

Στην περίπτωση του καουτσούκ είχαμε εφελκυστική αστοχία των τούβλων λόγω μεγάλης παραμόρφωσης του υλικού του αρμού. Αντίθετα στην περίπτωση του χάλυβα είχαμε αλλαγή των ρόλων. Αυτή τη φορά τα τούβλα ήταν σε τριαξονική θλίψη αυξάνοντας την αντοχή του τοίχου. Από τον πίνακα αυτό γίνεται κατανοητό ότι οι ελαστικές ιδιότητες του υλικού του αρμού παίζουν σημαντικό ρόλο στην τελική αντοχή της τοιχοποιίας. Άρα και το πάχος του αρμού αναμένεται να έχει αρνητική επίδραση στην αντοχή της τοιχοποιίας αφού όσο μεγαλώνει θα μειώνεται η περίσφιγξη του κονιάματος. Το στοιχείο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τοιχοποιίες ιστορικών μνημείων, κυρίως Ρωμαϊκών και Βυζαντινών όπου το κονίαμα αποτελεί περίπου το 50% του όγκου τους και συνεπώς η αντοχή της τοιχοποιίας και τα μηχανικά της χαρακτηριστικά καθορίζονται από το κονίαμα (Μπέη,2004). Η επιρροή του πάχους του αρμού επιβεβαιώνεται και πειραματικά όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 3.1: επίδραση του πάχους αρμού στην αντοχή της τοιχοποιίας. (Hendry, Sinha, & Davies, 1997)

2. Η ποιότητα της κατασκευής. Κάποια συνηθισμένα λάθη που έχουν να κάνουν με την ποιότητα της κατασκευής είναι τα εξής:

A) Η λανθασμένη αναλογία η και λάθη στην παρασκευή του κονιάματος με αποτέλεσμα τη μείωση της θλιπτικής του αντοχής. Η μειωμένη αντοχή του κονιάματος έχει μεγαλύτερη επίδραση σε λιθοδομές με λίθους υψηλής θλιπτικής αντοχής απ' ότι σε οπτοπλινθοδομές.

B) Ο μη κανονικός ρυθμός απορρόφησης της υγρασίας. Αυτή η παράμετρος αφορά ως επί το πλείστον οπτοπλινθοδομές.

Γ) Η κακή αρμολόγηση. Κακή διάστρωση των οριζόντιων αρμών μπορεί να επιφέρει μείωση της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας ως και 33%. Αντίθετα η ύπαρξη μη κονιάματος στους κατακόρυφους αρμούς φαίνεται να μην έχει σοβαρή επίδραση στη θλιπτική αντοχή αλλά στην διατμητική αντοχή κάτι που συνεκτιμά στον υπολογισμό της ο ευρωκώδικας 6.

Δ) Η απόκλιση από την κατακόρυφο. Εκτός από κατασκευαστικό λάθος η απόκλιση από την κατακόρυφο μπορεί να οφείλεται σε δράσεις όπως ο σεισμός, οι πλάγιες ωθήσεις από θόλους η στέγες, η υποχώρηση του εδάφους και δονήσεις. Η μετατόπιση του κέντρου βάρους σε συνάρτηση με το ύψος και το πάχος του τοίχου, συνεπάγεται διατάραξη των συνθηκών ευστάθειας του τοίχου. (Μακρής , Γουλιέλμος, Εφεσίου, & Μυλωνάς, 1987). Έχει αποδειχθεί ότι μια συγκεκριμένη απόκλιση από την κατακόρυφο οδηγεί στην ίδια μείωση αντοχής με ίση εκκεντρότητα φορτίου σε έναν τελείως κατακόρυφο τοίχο. (Καραντώνη, 2012). Συνήθεις κατασκευαστικές αποκλίσεις είναι εντός του ορόφου +/- 13mm και από τη βάση στην κορυφή +/- 20mm. Η τελική μείωση αντοχής είναι της τάξης του 15%.

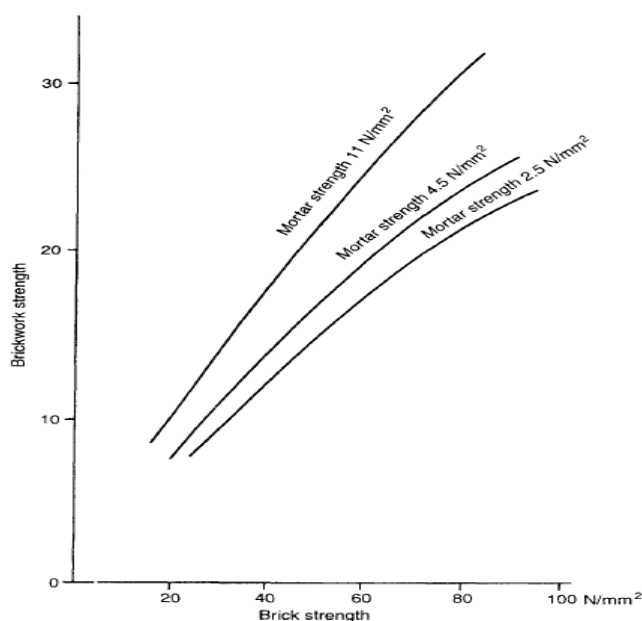
E) Έχει παρατηρηθεί επίσης ότι η αν η κατασκευή γίνει σε υψηλές θερμοκρασίες ($T > 35^{\circ}\text{C}$) έχουμε μείωση της αντοχής κατά 10%, ενώ για κατασκευή σε θερμοκρασίες $T < 15^{\circ}\text{C}$ δεν μετρήθηκαν διαφορές.

3.1.2 Σχέση θλιπτικής αντοχής με λιθόσωμα /κονίαμα /τοιχοποιία.

Από εργαστηριακές δοκιμές τοιχοποιίας σε θλίψη έχουν προκύψει διάφορα στοιχεία. Έχει αποδειχθεί ότι η αστοχία υπό ομοιόμορφη θλίψη θα προκύψει είτε από την ανάπτυξη εφελκυστικών ρωγμών παράλληλες στην διεύθυνση της φόρτισης, είτε από ένα είδος διατμητικής αστοχίας σε αδύναμες περιοχές. Ο τρόπος αστοχίας προκύπτει από το αν το κονίαμα είναι αρκετά ισχυρό σε σχέση με τοιχόσωμα. Έχει επίσης παρατηρηθεί ότι η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας είναι μικρότερη από την ονομαστική θλιπτική αντοχή των λιθοσωμάτων και αρκετά μεγαλύτερη τις περισσότερες φορές από την αντοχή του κονιάματος. Έχει αποδειχθεί επίσης ότι εξαρτάται από την τετραγωνική ρίζα της θλιπτικής αντοχής των λιθοσωμάτων και την τρίτη η την τέταρτη ρίζα της θλιπτικής αντοχής του κονιάματος. Βάσει των παρατηρήσεων στις εργαστηριακές δοκιμές έχει γίνει φανερό ότι:

A) Η αδυναμία περαιτέρω παραμόρφωσης του κονιάματος στους οριζόντιους αρμούς προκαλεί εφελκυστικές τάσεις και οδηγεί σε αστοχία εφελκυστικής ολίσθησης. (secondary tensile stresses).

Β) Η θλιπτική αντοχή του τοιχοσώματος σε πρότυπη αντοχή θλίψης δεν αντιστοιχεί στην αντοχή του τοιχοσώματος στην τοιχοποιία καθώς η αστοχία του εδώ οφείλεται σε εφελκυστικές τάσεις στις εγκάρσιες πλευρές του. (Hendry, Sinha, & Davies, 1997)

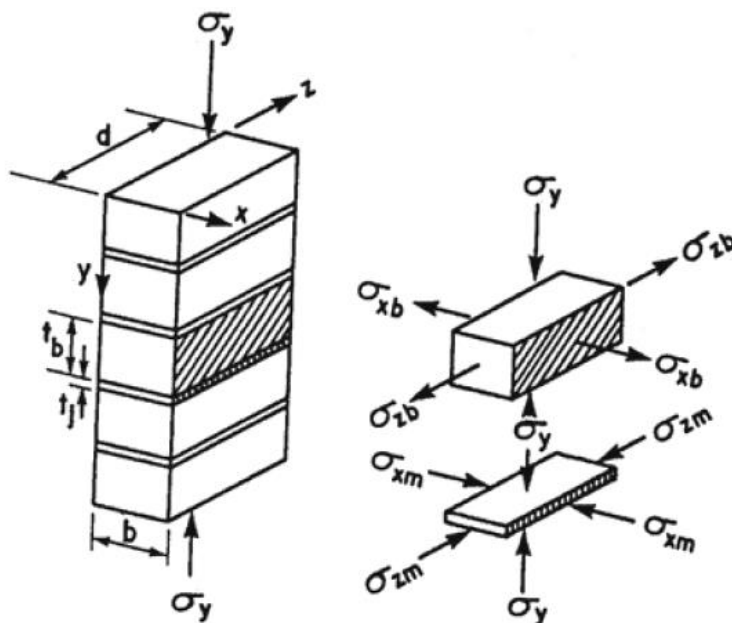


Σχήμα 3.2: σχέση θλιπτικής αντοχής τοιχοσώματος και θλιπτικής αντοχής τοιχοποιίας για κονιάματα διαφορετικών αντοχών. (Hendry, Sinha, & Davies, 1997)

3.1.3 Αστοχία τοιχοποιίας υπό θλιπτική φόρτιση

Με την επιβολή θλιπτικών φορτίων στην τοιχοποιία και όσο πλησιάζουμε προς την αστοχία έχουμε την εμφάνιση κατακόρυφων ρωγμών. Παρότι θα περιμέναμε ότι αυτές οι ρωγμές θα περνούν από το κονίαμα που είναι και το ασθενέστερο, παρατηρείται πολλές φορές να διέρχονται και από τα λιθοσώματα που η θλιπτική τους αντοχή είναι πολλές φορές μεγαλύτερη. Σύμφωνα με τον Hilsdorf (Hilsdorf, 1964) αυτό συμβαίνει διότι το κονίαμα βρίσκεται σε ευνοϊκή τριαξονική θλίψη ενώ στα λιθοσώματα επιβάλλονται αφενός τα κατακόρυφα θλιπτικά φορτία και αφετέρου τα οριζόντια εφελκυστικά φορτία από το κονίαμα και έτσι βρίσκονται σε ετερόσημη τριαξονική ένταση. Οι Zucchini και Lourenco σε συνέχεια των προαναφερθέντων επισήμαναν ότι στην περίπτωση ενός πολύ αδύναμου κονιάματος η πλαστική του παραμόρφωση ξεκινάει στα πρώτα στάδια της φόρτισης ενώ η πλαστική συμπεριφορά του λιθοσώματος ξεκινάει αργότερα. Η εντατική κατάσταση τότε είναι αυτή που φαίνεται στην εικόνα 15 και που οδηγεί τελικά σε εφελκυστική αστοχία του λιθοσώματος με το κονίαμα των αρμών να μην επηρεάζεται ιδιαίτερα. Στην περίπτωση όμως που το κονίαμα είναι μεν αρκετά δύσκαμπτο, αλλά με μικρότερη θλιπτική αντοχή από αυτήν του λιθοσώματος, η αστοχία της τοιχοποιίας επέρχεται από θλιπτική αστοχία του λιθοσώματος και όχι εφελκυστική γιατί η διαφορά της δυσκαμψίας μεταξύ των δύο υλικών δεν είναι επαρκής (Zucchini & Lourenco, 2006). Σύμφωνα με τους McNary και Abrams ένα πιο "μαλακό" κονίαμα οδηγεί σε αύξηση των εγκάρσιων εφελκυστικών τάσεων στο λιθοσώμα και μείωση της συνολικής δυσκαμψίας της τοιχοποιίας ενώ επισήμαναν ότι η σχέση τάσεων παραμορφώσεων γίνεται μη γραμμική όσο μειώνεται η αντοχή του κονιάματος (McNary & Abrams, 1985).

Τα παραπάνω ισχύουν με την προϋπόθεση ότι ο δεσμός λιθοσώματος-κονιάματος έχει διατηρηθεί. Όσο όμως πλησιάζουμε προς την αστοχία υπάρχει η τάση στο κονίαμα να διογκωθεί προς την εγκάρσια διεύθυνση και έτσι έχουμε μείωση των ευνοϊκών εγκάρσιων θλιπτικών φορτιών στο κονίαμα και ακόλουθα πιθανή εξαφάνιση του δεσμού με το λιθόσωμα. Έτσι μειώνεται η τάση για αστοχία του λιθοσώματος. (Hatzinikolas, Longworth , & Warwaruk , 1980)ⁱ



Σχήμα 3.3: εντατική κατάσταση σε κατακόρυφη αξονική φόρτιση

3.1.4 Προσδιορισμός θλιπτικής αντοχής τοιχοποιίας

Επειδή δεν είναι εύκολο κάθε φορά ο προσδιορισμός της θλιπτικής αντοχής να γίνεται με την κατασκευή δοκιμών, έχουν προταθεί από διάφορους ερευνητές τύποι που προσπαθούν να προσεγγίσουν την αντοχή της τοιχοποιίας συναρτήσει των υλικών που είναι κατασκευασμένη και διάφορων χαρακτηριστικών της. Οι προτεινόμενοι τύποι καταλήγουν σε ένα πολύ μεγάλο εύρος τιμών που πολλές φορές είναι μακριά από την πραγματικότητα. Οι Garcia et al προχώρησαν στην κατασκευή τοιχαριών λαξευμένης τοιχοποιίας, αργολιθοδομής και ξηρολιθοδομής και αφού προσδιόρισαν πειραματικά την θλιπτική αντοχή συνέκριναν τα αποτελέσματα με πάρα πολλές από τις προτεινόμενες σχέσεις. Για την κατασκευή χρησιμοποίησαν ψαμίτες με αντοχή $f_{bc}=40\text{MPa}$ και $f_{bc}=64,6\text{MPa}$ και ένα ιδιαίτερα αδύναμο κονίαμα με $f_{mc}=0,26\text{MPa}$ καθώς και ένα κονίαμα υψηλής αντοχής. Από τις 13 σχέσεις που εφάρμοσαν βρήκαν ότι η σχέση του Ευροκώδικα 6 προσεγγίζει ικανοποιητικά τα πειραματικά δεδομένα στην περίπτωση της λαξευμένης τοιχοποιίας. Στην περίπτωση όμως της αργολιθοδομής καμία σχέση δεν πλησιάζει στα πειραματικά δεδομένα (Garcia, San-Jose, Garmendia, & San-Mateos, 2012). Παρακάτω παρατίθενται κάποιες από τις σχέσεις που υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία.

Οι Τάσσιος και Χρονόπουλος πρότειναν το 1986 την παρακάτω σχέση προκειμένου να προσδιοριστεί η αντοχή ιστορικών τοιχοποιιών και γενικότερα λιθοδομών χαμηλής αντοχής :

$$f_{wc} = \xi \cdot \left[\left(\frac{2}{3} \sqrt{f_{bc}} - f_0 \right) + \lambda f_{mc} \right]$$

Όπου:

f_0 : είναι ένας μειωτικός συντελεστής εξαιτίας της απόκλισης των λίθων από το ορθογώνιο σχήμα. Παίρνει τιμή 0,5 για λαξευμένους λίθους και 2,5 για αργολιθοδομή.

λ : Είναι ένας συντελεστής που λαμβάνει υπ όψιν την συνάφεια λίθου- κονιάματος και παίρνει τιμές $\lambda=0,5$ για τραχείς λίθους και $\lambda=0,1$ για λίθους με πολύ λεία επιφάνεια.

ξ : Εκφράζει την επιρροή του πάχους του αρμού και δίνεται από τη σχέση:

$$\xi = 1: [1 + 3,5(k - k_0)] < 1$$

όπου: $k = \text{όγκος κονιάματος} / \text{όγκος τοιχοποιίας}$

k_0 : Είναι το μέγιστο ποσοστό του κονιάματος που θεωρείται ότι δεν προκαλεί μείωση της αντοχής του τοίχου. Είναι $k_0 = 0,3$ για αργολιθοδομή, $k_0 = 0,2$ για ημιλαξευμένη και $k_0 = 0,1$ για λαξευμένη τοιχοποιία. (Tassios, 2010).

Η σχέση που δίνει ο Ευρωκώδικας 6 για κονίαμα γενικής εφαρμογής είναι η εξής:

$$f_k = K f_b^{0,7} f_m^{0,3}$$

Όπου:

K : είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από τον τύπο των τοιχοσωμάτων (λίθος, αργιλικό, από σκυρόδεμα κ.α) και οι τιμές του δίνονται από πίνακα.

f_b : Είναι η ανηγμένη αντοχή των τοιχοσωμάτων δηλαδή η θλιπτική αντοχή των τοιχοσωμάτων μετατρεπόμενη σε ισοδύναμο τοιχόσωμα, με 100mm πλάτος και 100mm ύψος με χρήση πίνακα.

f_m : Η θλιπτική αντοχή του κονιάματος.

Η σχέση αυτή δεν ισχύει σε ιστορικές τοιχοποιίες και προκειμένου να χρησιμοποιηθεί πρέπει να συντρέχουν οι εξής προϋποθέσεις:

- 1) Η f_b δεν θα ληφθεί μεγαλύτερη από 75 MPa για κονίαμα γενικής χρήσης και η f_m μεγαλύτερη από 20 MPa η $2 \cdot f_b$
- 2) Το πάχος των αρμών δεν υπερβαίνει τα 15mm
- 3) Ο συντελεστής μεταβλητότητας της αντοχής των τοιχοσωμάτων δεν υπερβαίνει το 25%.
- 4) Οι οριζόντιοι αρμοί είναι πληρωμένοι με κονίαμα και δεν υπάρχει συνεχής κατακόρυφος αρμός.

Μια από τις πρώτες σχέσεις που προτάθηκε είναι αυτή του Engesser το 1907 που αναθεωρήθηκε από τον Huerta:

$$f_{wc} = \frac{1}{3} f_{bc} + \frac{2}{3} f_{mc}$$

Οι Garcia et al παραθέτουν και τις παρακάτω σχέση του C.Rozza που χρησιμοποιείται στην Ιταλία.

Για λαξευμένη τοιχοποιία και οπτοπλινθοδομή:

$$f_{wc} = \frac{0,8v_b \cdot f_{bc} + 1,2v_m \cdot f_{mc}}{10}$$

Και για αργολιθοδομή:

$$f_{wc} = \frac{v_b \cdot f_{bc} + 0,8v_m \cdot f_{mc}}{12,5}$$

Όπου v_m ο σχετικός όγκος του κονιάματος και v_b ο σχετικός όγκος των λίθων.

Οι Francis et al πρότειναν την παρακάτω σχέση:

$$f_{wc} = f_{bc} \frac{1}{1 + \frac{\alpha\varphi(\beta v_m - v_b)}{\beta(1 - v_m)}}$$

Με $a = \frac{h_m}{h_b}$ $\beta = \frac{E_b}{E_m}$ και $\varphi = \frac{f_{bc}}{f_{bt}}$

Όπου h_m και h_b είναι το ύψος του αρμού και το ύψος του λιθοσώματος, E_b και E_m τα μέτρα ελαστικότητας λιθοσώματος και κονιάματος, f_{bc} η θλιπτική αντοχή λιθοσώματος και f_{bt} η εφελκυστική του αντοχή.

Οι Hendry and Malek παραθέτουν με τη σειρά τους την παρακάτω σχέση:

$$f_{wc} = 0,317f_{bc}^{0,531} f_{mc}^{0,208}$$

Οι Kaushik et al προτείνουν την εξής:

$$f_{wc} = 0,63f_{bc}^{0,49} f_{mc}^{0,32}$$

Το ACI (American concrete institute) δίνει για κατασκευές από τοιχοποιία την σχέση:

$$f_c = A(2,758 + Bf_{bc})$$

Όπου ο συντελεστής A εξαρτάται από την επίβλεψη της κατασκευής και παίρνει τιμές μέχρι το 1 και ο συντελεστής B εξαρτάται από το κονίαμα και παίρνει τιμές γύρω στο 0,2.

Ενώ η πάλι Αμερικάνικη MSJC (Masonry Standards Joint Committee) δίνει την εξής σχέση:

$$f_{wc} = \frac{(400 + 0,25f_{bc})}{145}$$

3.1.5 Ελαστικά χαρακτηριστικά και θλιπτικές παραμορφώσεις τοιχοποιίας

Το μέτρο ελαστικότητας ως νεότερη έννοια της μηχανικής δεν έχει ακόμα προσδιοριστεί μονοσήμαντα και έτσι κατά περιπτώσεις λαμβάνεται άλλοτε το εφαπτομενικό και άλλοτε το τέμνον μέτρο, ενώ τα πειραματικά στοιχεία οδηγούν σε μια μεγάλη διασπορά των τιμών του (Καραντώνη, 2012). Το μέτρο ελαστικότητας είναι σημαντική παράμετρος για τον σχεδιασμό

της τοιχοποιίας και για τον υπολογισμό της σχετικής ακαμψίας των στοιχείων της τοιχοποιίας ώστε να οριστούν πλευρικές ανακατανομές φορτίου. Υπολογισμοί παραμορφώσεων, καθώς και περίοδοι ταλάντωσης στη δυναμική ανάλυση απαιτούν τη χρήση των μέτρων ελαστικότητας της τοιχοποιίας. Υποτίμηση ή υπερίμηση των τιμών αυτών μπορεί να οδηγήσει σε μη συντηρητικές αναλύσεις και σχεδιασμούς. Οι περισσότερες προσπάθειες αναλυτικής προσέγγισης των πειραματικών καμπύλων καταλήγουν σε κάποιας μορφής παραβολή (Μπέη, 2004). Η σχέση τάσεων παραμορφώσεων υπό αδιάστατη μορφή μπορεί να εκφραστεί σύμφωνα με τον Τάσσιο από την παραβολή:

$$\frac{\sigma}{f_{wc}} = 2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_u} \right) - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_u} \right)^2 \quad (\text{Τάσσιος, 1992})$$

Τα μέτρα ελαστικότητας των υλικών της τοιχοποιίας είναι προσεγγιστικά $E_b = (300-400) \cdot f_{bc}$ για τα λιθωσώματα και $E_m = 900 \cdot f_{mc}$ για το κονίαμα. Ο Hendry προτείνει για οριακή παραμόρφωση 0,25-0,35% τον προσδιορισμό του εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας με την εξής σχέση:

$$E_{wo} = 2 \frac{f_{wc}}{\varepsilon_u},$$

και για το τέμνων μέτρο ελαστικότητας: $E_w = 0,75 \cdot E_{wo} \approx (400-1000) \cdot f_{wc}$ για $\sigma/f_{wc} = 1$ δηλαδή στην περίπτωση της αστοχίας (Τάσσιος, 1992). Ο Ευρωκώδικας 6 προτείνει τον πειραματικό προσδιορισμό της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης κατά το πρότυπο EN 1052-1 για τον καθορισμό του βραχυχρόνιου τέμνοντος μέτρου ελαστικότητας για τάση $(1/3)f_{wc}$. Γενικά συνίσταται να παραλείπεται το πρώτο 5% της καμπύλης γιατί επηρεάζεται έντονα από τον τρόπο επιβολής του φορτίου και τις τοπικές συνθήκες. Σε περίπτωση απουσίας πειραματικών αποτελεσμάτων προτείνεται ο υπολογισμός του βραχυχρόνιου τέμνοντος μέτρου ελαστικότητας για το σχεδιασμό των κατασκευών να λαμβάνεται από την εξής σχέση:

$$E = 1000 f_{wk}$$

Όπου f_{wk} η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας. Για το μακροχρόνιο τέμνον μέτρο ελαστικότητας λαμβάνονται υπόψη ερπυστικά φαινόμενα και άρα το μέτρο ελαστικότητας δίνεται από τη σχέση:

$$E_{μακρ} = \frac{E}{1+\varphi}.$$

Το φ είναι ένας ερπυστικός συντελεστής που δίνεται από πίνακα και στην περίπτωση τοιχοποιίας με φυσικούς λίθους παίρνει τιμή πολύ κοντά στο μηδέν. Το μέτρο διάτμησης δίνεται από τη σχέση:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Με τον συντελεστή Poisson να κυμαίνεται από $\nu=0,12$ έως $\nu=0,35$ (Καραντώνη, 2012).

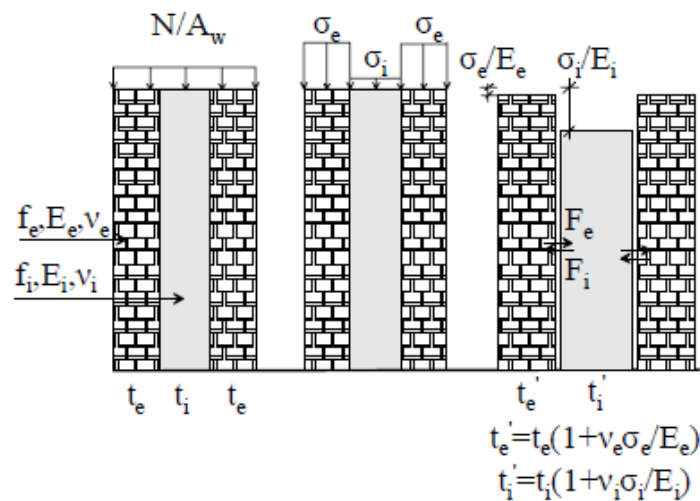
3.2 Τρίστρωτη τοιχοποιία

3.2.1 Γενικά στοιχεία-παθολογία

Την τρίστρωτη τοιχοποιία (three leaf masonry) την συναντάμε σε τοίχους που έπρεπε να έχουν μεγάλο πάχος, από την αρχαιότητα μέχρι και σε λιθοδομές χτισμένες στο πρόσφατο παρελθόν. Η τυπολογία αυτή χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη δύο επιμελώς χτισμένων τοίχων στις εξωτερικές πλευρές και ένα κενό ανάμεσα τους που πληρώνεται από κονίαμα και μικρούς λίθους. Το κονίαμα πολλές φορές είναι κακής ποιότητας και οι λίθοι είναι ότι είχε περισσέψει από το χτίσιμο των δύο πλευρών. Μεγάλα προβλήματα αντιμετωπίζουν αυτές οι τοιχοποιίες από το γεγονός ότι ο πυρήνας έχει διαφορετική θλιπτική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας από τις εξωτερικές παρειές (άλλη τάξη μεγέθους), από την απουσία σύνδεσης μεταξύ των φύλλων, και από τη φθορά των κονιαμάτων των εξωτερικών στρώσεων (Binda, Anzani, & Lourenco, 2006). Εκτός από τα παραπάνω οι τρίστρωτες τοιχοποιίες παρουσιάζουν μεγάλη τρωτότητα κυρίως από την απώλεια της σύνδεσης μεταξύ της εσωτερικής και των εξωτερικών στρώσεων οπότε και παύουν να συμπεριφέρονται σαν σύνολο. Η απώλεια αυτή μπορεί να προκύψει είτε από την φθορά των υλικών είτε από δράσεις εντός και εκτός επιπέδου.

Η τρωτότητα αυτών των τοιχοποιιών αυξάνει από το γεγονός ότι σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας είναι συνδεδεμένες (ατελώς, χωρίς στρωτήρα πολλές φορές) είτε με ξύλινα πατώματα και στέγες που έχουν μειωμένη δυσκαμψία στο επίπεδο τους και δεν προσφέρουν επαρκή διαφραγματική λειτουργία, είτε με τοξωτά στοιχεία. Και στις δύο περιπτώσεις έχουμε έκκεντρη φόρτιση και άρα και χωρίς να συμβεί κάποιος σεισμός, η τοιχοποιία βρίσκεται τόσο σε θλίψη όσο και σε εκτός επιπέδου κάμψη. Τρίστρωτες τοιχοποιίες υπό έκκεντρη θλίψη μελετήθηκαν πειραματικά στο πανεπιστήμιο της Κατάνια στη Σικελία από την Laura Anania που κατέδειξε ότι η αστοχία τους είναι ψαθυρή και ότι οι παραμορφώσεις είναι δυσανάλογα μεγαλύτερες στην εξωτερική στρώση που δέχεται το μεγαλύτερο φορτίο (Anania, 2014). Σε υφιστάμενες τρίστρωτες τοιχοποιίες είναι δυνατό, λόγω φθοράς των υλικών και προηγούμενους σεισμούς, να έχουμε ρωγμές στο πάχος της τοιχοποιίας οι οποίες δεν είναι ορατές. Έτσι αντί να έχουμε μια συμπαγή τοιχοποιία έχουμε διαχωρισμένες στρώσεις με αυξημένη λυγηρότητα και μειωμένη ικανότητα παραλαβής οριζόντιων και κατακόρυφων φορτίων. (Vintzileou E. , 2014).

Η κατανομή των τάσεων εξαρτάται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά των στρώσεων, τις διαστάσεις τους και απ' το αν είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους και πως. Κατά κύριο λόγο πάντως τα θλιπτικά φορτία παραλαμβάνονται από τις εξωτερικές στρώσεις. Σύμφωνα με τους Eggermann και Newald-Burg οι εξωτερικές στρώσεις παρουσιάζουν μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή αν φορτιστούν μόνες τους απ' ότι αν βρίσκονται μέσα στο σύστημα της τρίστρωτης τοιχοποιίας. Το αντίθετο ακριβώς συμβαίνει με τον πυρήνα που έχει μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή μέσα στην τοιχοποιία απ' ότι αν φορτιστεί μόνος του. Μία ερμηνεία που μπορούμε να δώσουμε σε αυτό το φαινόμενο είναι η εξής: Οι εξωτερικές στρώσεις όταν φορτίζονται μόνες τους βρίσκονται σε καθαρή θλίψη. Στην τρίστρωτη τοιχοποιία όμως εκτός απ' τα θλιπτικά φορτία που επιβάλλονται, η μεγαλύτερη παραμόρφωση του πυρήνα λόγω μικρότερου μέτρου ελαστικότητας, θα προκαλέσει και οριζόντια εφελκυστικά φορτία στις εξωτερικές στρώσεις με αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής τους. Αντίθετα ο πυρήνας θα βρίσκεται σε ευμενή τριαξονική θλίψη, αφού εκτός από τα θλιπτικά που επιβάλλονται κατακόρυφα θα δέχεται θλιπτικά φορτία και οριζόντια, από τις εξωτερικές στρώσεις και θα παρουσιάζει αυξημένη αντοχή. Η διαφορετική αυτή παραμόρφωση της εσωτερικής στρώσης στην επιβολή θλιπτικών φορτίων μπορεί να προκαλέσει και απώλεια της σύνδεσης μεταξύ των στρώσεων και ακόλουθη αστοχία σε εκτός επιπέδου κάμψη.



Σχήμα 3.4: τάσεις και παραμορφώσεις στην τρίστρωτη τοιχοποιία (Vintzileou, 2007)



Σχήμα 3.5: μονόπλευρο φούσκωμα τρίστρωτης λιθοδομής με ασύνδετες όψεις υπό κατακόρυφα θλιπτικά φορτία

3.2.2 Η συμβολή του Egermann

Όπως γίνεται φανερό η συμβολή του Egermann (Egermann, 1993) στην κατανόηση της συμπεριφοράς της τρίστρωτης τοιχοποιίας υπό θλίψη, μέσω της εργασίας του με τον τίτλο 'investigation on the load bearing behaviour of multiple leaf masonry' το 1993, ήταν καθοριστική και για αυτό θα αναφερθούμε λίγο πιο διεξοδικά. Στο πειραματικό μέρος κατασκευάστηκαν δοκίμια τοιχοποιίας με σταθερό πάχος και ίδια μηχανικά χαρακτηριστικά των δύο εξωτερικών παρειών που στον πυρήνα περιείχαν:

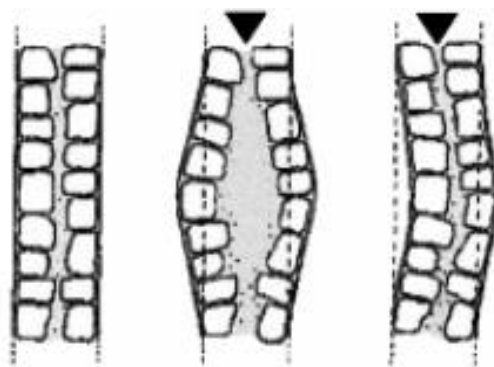
- A) Αέρα (δοκίμια αναφοράς).
- B) Κονίαμα μεγαλύτερης θλιπτικής αντοχής και δυσκαμψίας από τις δύο παρειές.
- Γ) Κονίαμα με κακή συνάφεια, και θλιπτική αντοχή και δυσκαμψία μικρότερη από αυτήν των εξωτερικών στρώσεων.
- Δ) Εναλλασσόμενες στρώσεις κονιάματος και χαλικιών.

Ε) Μίγμα κονιάματος και θραυστών κεραμικών.

Κατά την φόρτιση μπορούμε να διακρίνουμε δύο φάσεις:

Πρώτη φάση : Υπάρχει πλήρης σύνδεση μεταξύ της εσωτερικής στρώσης και των δύο εξωτερικών. Οι πλευρικές παραμορφώσεις αυξάνουν γραμμικά με το κατακόρυφο φορτίο και δεν παρατηρούνται ρωγμές.

Δεύτερη φάση : Έχουμε αστοχία της σύνδεσης μεταξύ των στρώσεων. Εξαιτίας της μειωμένης εγκάρσιας συγκράτησης έχουμε αυξημένες εγκάρσιες παραμορφώσεις. Μετά από κάποιο σημείο φόρτισης ο πυρήνας περνάει το όριο διαρροής και οι εγκάρσιες παραμορφώσεις αυξάνουν δυσανάλογα. Η τάση διαρροής εξαρτάται από την τριαξονική εντατική κατάσταση στον πυρήνα που με τη σειρά της εξαρτάται από την κατακόρυφη τάση και την αντίσταση σε πλευρική παραμόρφωση. Σαν αποτέλεσμα έχουμε την εμφάνιση μόνιμων οριζόντιων φορτίων στις εξωτερικές παρειές και το συνεπακόλουθο "φούσκωμά" τους.

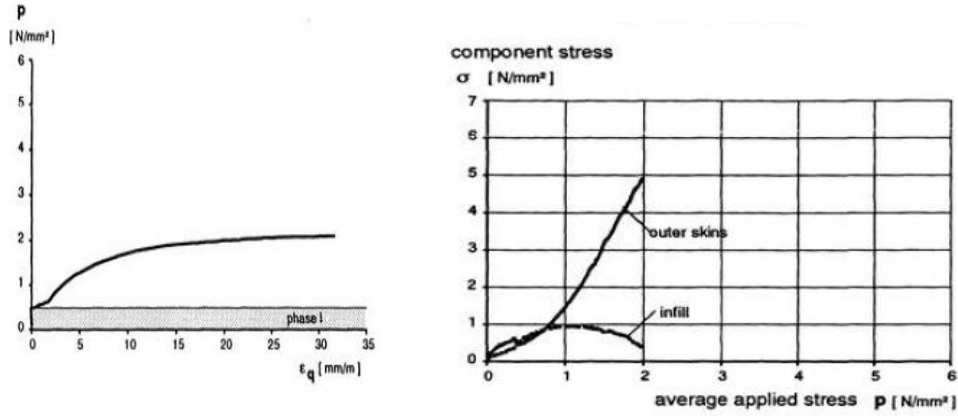


Σχήμα 3.6: αστοχία υπό κατακόρυφο φορτίο (Giuffre 1993)

Τρόποι αστοχίας: α) Σε περίπτωση που έχουμε έναν πιο δύσκαμπτο πυρήνα η αστοχία επέρχεται από την θλιπτική του αστοχία. Η οριζόντια φόρτιση και παραμόρφωση των παρειών λαμβάνει χώρα λίγο πριν την αστοχία, η οποία και είναι απότομη και χωρίς προειδοποίηση. β) Στην συνήθη περίπτωση, όταν δηλαδή ο πυρήνας έχει φτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά, η αστοχία προκύπτει από εκτός επιπέδου κάμψη των εξωτερικών παρειών. Μεγάλες καμπτικές παραμορφώσεις και ρωγμές προαναγγέλλουν την επερχόμενη αστοχία. Κρίσιμοι παράγοντες στην φέρουσα ικανότητα της τοιχοποιίας σε αυτήν την περίπτωση είναι το πάχος των εξωτερικών στρώσεων σε σχέση με το πάχος του πυρήνα, η θλιπτική αντοχή των επιμέρους στοιχείων και η σύνδεση μεταξύ τους.

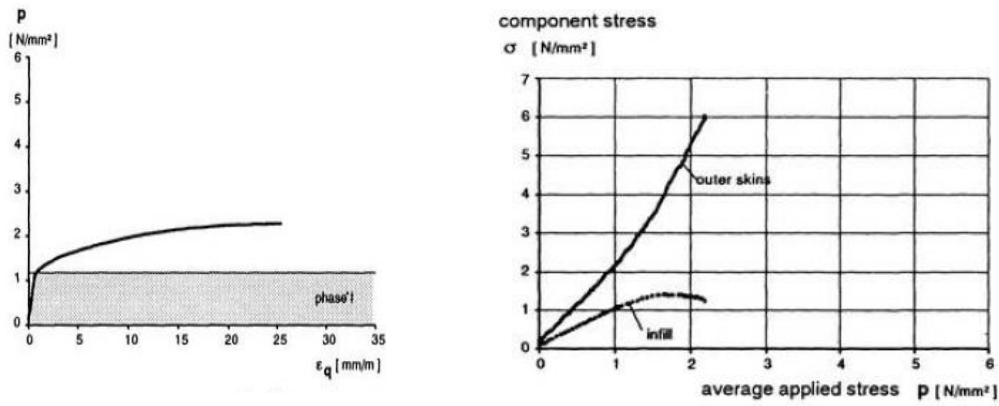
Στα παρακάτω διαγράμματα του Egermann καταδεικνύεται εμφανώς η κατανομή των φορτίων και των τάσεων στις στρώσεις τις τοιχοποιίας. Στην αρχή της φόρτισης έχουμε ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων ενώ ακολούθως ο ισχυρός εταίρος του συστήματος της τοιχοποιίας, είτε είναι ο πυρήνας, είτε οι εξωτερικές στρώσεις ως είθισται, θα παραλάβουν το μεγαλύτερο τμήμα της φόρτισης. Στα διαγράμματα γίνεται επίσης αντιληπτή η αύξηση των εγκάρσιων παραμορφώσεων μετά την διαρροή του πυρήνα και την απώλεια της σύνδεσης μεταξύ των στρώσεων.

Σχήμα 3.7: τοίχος με αδύναμο πυρήνα



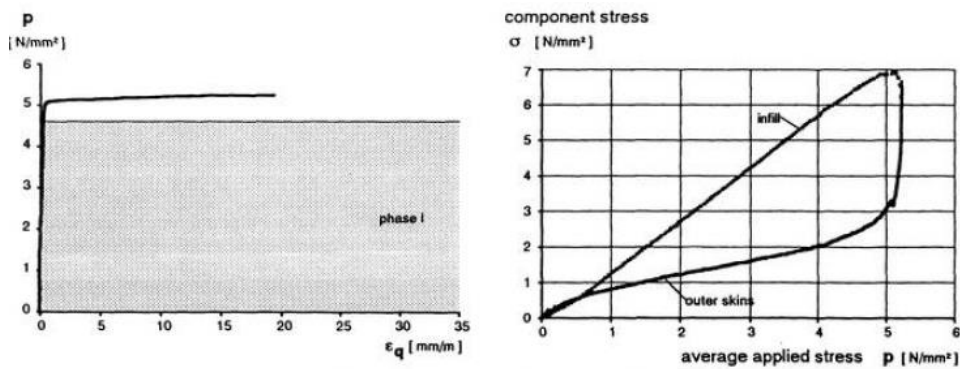
Σχήμα 3.7 Αριστερά: εγκάρσιες παραμορφώσεις σε σχέση με το επιβαλλόμενο φορτίο. Δεξιά: κατανομή των τάσεων στις εξωτερικές παρειές και στον πυρήνα.

Σχήμα 3.8: τοίχος με κονίαμα και χαλίκια στον πυρήνα



Σχήμα 3.8: Αριστερά: εγκάρσιες παραμορφώσεις σε σχέση με το επιβαλλόμενο φορτίο. Δεξιά: κατανομή των τάσεων στις εξωτερικές παρειές και στον πυρήνα.

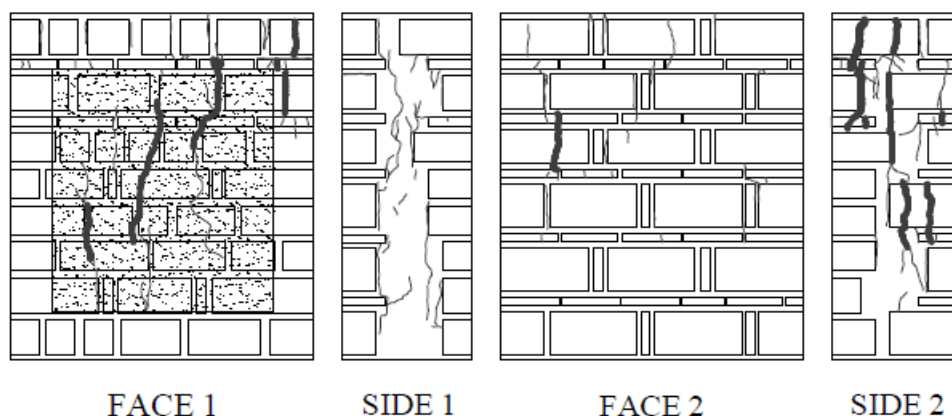
Σχήμα 3.9: Τοίχος με πιο δύσκαμπτο πυρήνα



Σχήμα 3.9: Αριστερά: εγκάρσιες παραμορφώσεις σε σχέση με το επιβαλλόμενο φορτίο. Δεξιά: κατανομή των τάσεων στις εξωτερικές παρειές και στον πυρήνα.

3.2.3 Μηχανισμός και εμφάνιση της θλιπτικής αστοχίας στην τρίστρωτη τοιχοποιία

Όσο αυξάνεται το θλιπτικό φορτίο έχουμε την εμφάνιση ρωγμών τόσο στο πρόσωπο όσο και στις πλάγιες όψεις της τοιχοποιίας. Ανάλογα με τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών, οι κατακόρυφες ρωγμές στο πρόσωπο μπορεί να διέρχονται μόνο από το κονίαμα ή και από τα λιθοσώματα. Παράλληλα έχουμε και την εμφάνιση κατακόρυφων ρωγμών στην πλάγια όψη που τις περισσότερες φορές διέρχονται από την διεπιφάνεια εξωτερικής και εσωτερικής στρώσης αν και ορισμένες φορές διέρχονται από το κονίαμα πλήρωσης του πυρήνα. Το άνοιγμα των ρωγμών στις πλάγιες όψεις είναι αρκετά μεγαλύτερο από το άνοιγμα των ρωγμών στο πρόσωπο κάτι που καταδεικνύει ότι μόλις σχηματιστούν αυτές οι ρωγμές οι στρώσεις αναπτύσσουν ανεξάρτητη συμπεριφορά ή μία από την άλλη. Καθώς η λυγηρότητα κάθε στρώσης είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν του συνόλου έχουμε την εμφάνιση εκτός επιπέδου παραμορφώσεων των εξωτερικών παρειών που επιτείνεται από τα οριζόντια φορτία και τις αντίστοιχες παραμορφώσεις που επιβάλλονται από τον πυρήνα. (Vintzileou, 2007)



Σχήμα 3.10: μηχανισμός αστοχίας τρίστρωτης τοιχοποιίας υπό θλιπτικά φορτία (Vintzileou & Miltiadou-Fezans, 2008)

3.2.4 Υπολογισμός της θλιπτικής αντοχής της τρίστρωτης τοιχοποιίας με χρήση ημιεμπειρικών τύπων

Ο Ευρωκώδικας 6 προτείνει έναν εμπειρικό τύπο κατάλληλο για τοιχοποιία που έχει κατασκευαστεί βάσει συγκεκριμένων κανόνων όπως όρια στο πάχος των αρμών, εγκάρσιες συνδέσεις στην περίπτωση ύπαρξης διαφορετικών στρώσεων κ.α. Είναι προφανές ότι αυτά τα κριτήρια δεν πληρούνται από τις ιστορικές τοιχοποιίες οπότε έχουν προταθεί μια σειρά εμπειρικών τύπων (Vintzileou E. , 2014). Ο Egermann το 1993 για τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής της τρίστρωτης τοιχοποιίας πρότεινε την παρακάτω σχέση:

$$f_{wc,0} = \left(\frac{V_{ext}}{V_w} \right) \theta_{ext} \cdot f_{ext,k} + \left(\frac{V_{inf}}{V_w} \right) \theta_{inf} \cdot f_{inf,0}$$

Όπου:

$f_{wc,0}$: η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας.

V_{ext}/V_w : Ο όγκος των εξωτερικών στρώσεων προς τον όγκο της τοιχοποιίας.

V_{inf}/V_w : Ο όγκος του πυρήνα προς τον όγκο της τοιχοποιίας.

$f_{ext,k}$: Θλιπτική αντοχή των εξωτερικών στρώσεων.

$f_{inf,0}$: Θλιπτική αντοχή της εσωτερικής στρώσης.

θ_{ext} , θ_{inf} : Εμπειρικοί διορθωτικοί συντελεστές.

Ο συντελεστής θ_{inf} περιγράφει την συσχέτιση μεταξύ της τάσης στον πυρήνα κατά την αστοχία και της θλιπτικής του αντοχής. Η τιμή του είναι μεγαλύτερη της μονάδας και εξαρτάται από τον τρόπο δόμησης. Ο συντελεστής θ_{ext} εξαρτάται από την καμπτική δυσκαμψία και τις καμπτικές ροπές που αναπτύσσονται στις εξωτερικές στρώσεις και παίρνει τιμές μικρότερες της μονάδας. Οι απλοποιητικές παραδοχές που έχουν γίνει στην διατύπωση αυτού του τύπου είναι ότι έχουμε α) ελαστική συμπεριφορά των στρώσεων, β) απλή, επίπεδη σύνδεση μεταξύ τους, γ) οι εγκάρσιες παραμορφώσεις αγνοούνται.

Το 1995 οι Βιντζηλαίου και Τάσσιος πρότειναν την παρακάτω σχέση για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής της τριστρωτής τοιχοποιίας:

$$f_{wc,0} = \left(\frac{V_{ext}}{V_w} \right) \cdot f_{ext,c}$$

Η υπόθεση που έχει γίνει σε αυτήν την περίπτωση ότι η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας οφείλεται στις εξωτερικές στρώσεις και αγνοείται η συμμετοχή του πυρήνα.

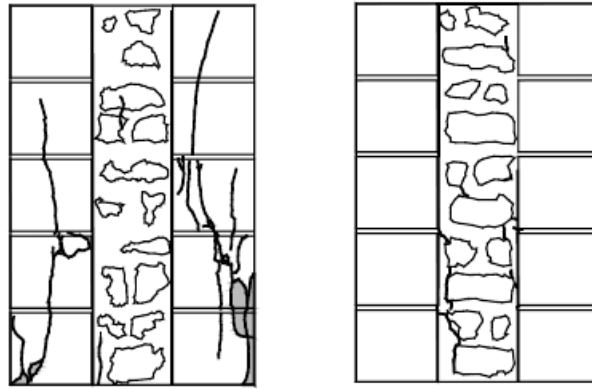
3.2.5 Πειραματικός προσδιορισμός της θλιπτικής αντοχής της τριστρωτής τοιχοποιίας

Προσδιορισμός της θλιπτικής αντοχής τριστρωτής τοιχοποιίας με συνδεδεμένα πηλοκονιάματα σε εργαστηριακές συνθήκες πιθανόν δεν έχει γίνει μέχρι σήμερα. Έχει γίνει όμως προσδιορισμός της θλιπτικής αντοχής τριστρωτών τοιχοποιιών που προσομοιάζουν διάφορες ιστορικές τοιχοποιίες τόσο στην Ελλάδα όσο και στο εξωτερικό, παρέχοντας μας σημαντικές πληροφορίες για τα μηχανικά χαρακτηριστικά και τους μηχανισμούς αστοχίας τους. Σκοπός των ερευνητικών προγραμμάτων που παρατίθενται παρακάτω δεν ήταν μόνο ο προσδιορισμός της θλιπτικής αντοχής αλλά και η αποτίμηση διάφορων τεχνικών αποκατάστασης και ενίσχυσης με κυριότερη τα ενέματα. Στην παρούσα εργασία όμως θα αναφερθούμε μόνο στα στοιχεία που αφορούν την θλιπτική αντοχή. Πιο συγκεκριμένα στην Ελλάδα έχουμε τις εξής περιπτώσεις:

1. Η Βιντζηλαίου και ο Τάσσιος το 1995 υπέβαλλαν 8 δοκίμια τριστρωτής τοιχοποιίας σε θλίψη. Η θλιπτική αντοχή του λιθοσώματος ήταν $f_{bc}=100\text{MPa}$ και του κονιάματος $f_{mc}=1,7\text{MPa}$. Η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας κυμάνθηκε από $f_{wc}=1,3\text{MPa}$ έως $f_{wc}=2,4\text{MPa}$ και το μέτρο ελαστικότητας από 2710MPa έως 7000MPa .
2. Οι Τουμπακάρη και Van Gemert το 1997 δοκίμασαν σε θλίψη τέσσερα δοκίμια τοιχοποιίας με ασβεστολιθικά λιθοσώματα και χρήση θραυσμάτων στον πυρήνα. Η διακύμανση της θλιπτικής αντοχής ήταν από $f_{wc}=2\text{MPa}$ έως $f_{wc}=2,7\text{MPa}$ και του μέτρου ελαστικότητας από 3670MPa έως 5900MPa .
3. Η Τουμπακάρη πάλι το 2002 στα πλαίσια ενός ερευνητικού προγράμματος δοκίμασε σε θλίψη τέσσερα τοιχάρια τριστρωτής τοιχοποιίας όπου οι λίθοι είχαν διαφορετικό πάχος μεταξύ τους και θλιπτική αντοχή $f_{bc}=55\text{MPa}$ ενώ το κονίαμα είχε αντοχή $f_{mc}=3,4\text{MPa}$.

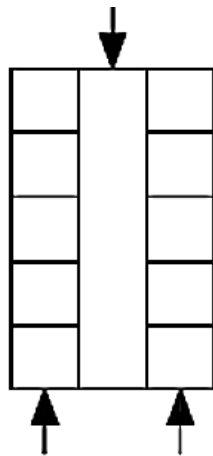
Η διακύμανση της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας ήταν από $f_{wc}=2,02$ MPa έως $f_{wc}=2,71$ MPa και του μέτρου ελαστικότητας από 720 MPa έως 1440 MPa.

4. Οι Βιντζηλαίου και Μιλτιάδου-Fezans το 2008 προσδιόρισαν την θλιπτική αντοχή τριών τοιχαριών τρίστρωτης τοιχοποιίας επιβεβαιώνοντας ότι ο κύριος μηχανισμός αστοχίας είναι η εκτός επιπέδου καμπτική αστοχία. Η θλιπτική αντοχή του λιθοσώματος υπολογίστηκε σε $f_{bc}=15$ MPa, αυτή του κονιάματος $f_{mc}=4,35$ MPa και η αντοχή της τοιχοποιίας κυμάνθηκε $f_{wc}=1,74$ MPa ~2,26 MPa. Το μέτρο ελαστικότητας πήρε τιμές από 1000 MPa έως 1500 MPa.
5. Οι Tomazenic και Sheppard προχώρησαν το 1982 σε μια από τις πρώτες εργαστηριακές δοκιμές της θλιπτικής αντοχής τρίστρωτης τοιχοποιίας κατασκευάζοντας 11 δοκίμια με ασβεστολιθικά λιθοσώματα στις παρειές και μικρότερους λίθους στο εσωτερικό. Η διακύμανση της θλιπτικής αντοχής ήταν από $f_{wc}=0,31$ MPa έως $f_{wc}=0,82$ MPa και του μέτρου ελαστικότητας από 190 MPa έως 2870 MPa (Silva B. , 2012).
6. Οι Egermann και Newald-Burg στα αποτελέσματα της έρευνας των οποίων έγινε εκτενής αναφορά προηγουμένως, κατασκεύασαν 19 τοιχάρια με θλιπτική αντοχή από $f_{wc}=1,8$ MPa έως $f_{wc}=11$ MPa και μέτρο ελαστικότητας από 1480 MPa έως 20100 MPa.
7. Η Valuzzi et al (Valluzzi, Da Porto, & Modena, 2001) το χρονικό διάστημα 2000-2004 προχώρησε στην κατασκευή 17 δοκιμών τρίστρωτης τοιχοποιίας. Προκειμένου να τις ενισχύσει, χρησιμοποίησε εκτός από ενέματα και την τεχνική του αρμολογήματος με μηχανική απομάκρυνση του παλιού κονιάματος και εγκάρσια αγκύρωση με μεταλλικά στοιχεία. Στην εσωτερική στρώση χρησιμοποιήθηκαν μικροί λίθοι μαζί με κονίαμα ενώ υπήρχε μεγάλο ποσοστό κενών. Τα λιθοσώματα που χρησιμοποιήθηκαν είχαν θλιπτική αντοχή $f_{bc}=160$ MPa και το κονίαμα με βάση τον υδραυλικό ασβέστη, $f_{mc}=1,57$ MPa. Η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας κυμάνθηκε από $f_{wc}=1$ MPa έως $f_{wc}=1,97$ MPa και το μέτρο ελαστικότητας από 1450 MPa έως 2390 MPa.
8. Οι Oliveira και Lourenco το 2006 προχώρησαν στην κατασκευή 16 δοκιμών τρίστρωτης τοιχοποιίας με μεγάλο ποσοστό κενών στον πυρήνα. Η θλιπτική αντοχή των λιθοσωμάτων ήταν $f_{bc}=52$ MPa και του κονιάματος $f_{mc}=2,9$ MPa. Η διακύμανση της θλιπτικής αντοχής ήταν από $f_{wc}=1,4$ MPa έως $f_{wc}=2,4$ MPa και του μέτρου ελαστικότητας από 1450 MPa έως 1500 MPa.
9. Οι Binda et al το 2006 (Binda, Anzani, & Lourenco, 2006) προχώρησαν στην κατασκευή δοκιμών τρίστρωτης τοιχοποιίας με λίθους διαφορετικής αντοχής (ασβεστόλιθους και ψαμμίτες) και διαφορετικές συνδέσεις μεταξύ των στρώσεων προκειμένου να διερευνήσουν την κατανομή των τάσεων και τους μηχανισμούς μεταβίβασης των φορτίων. Η κονία ήταν υδραυλικός ασβέστης. Η θλιπτική αντοχή των λιθοσωμάτων ήταν $f_{bc}=20,6$ MPa και $f_{bc}=104,2$ MPa αντίστοιχα και του κονιάματος $f_{mc}=9,2$ MPa σε όλες τις περιπτώσεις. Η θλιπτική αντοχή υπολογίστηκε σε $f_{wc}=5,8$ MPa και $f_{wc}=6,4$ MPa στην πρώτη περίπτωση και $f_{wc}>15,1$ MPa στη δεύτερη. Το μέτρο ελαστικότητας πήρε τιμές από 1770 MPa έως 2940 MPa. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μορφή της θλιπτικής αστοχίας. Στους αδύναμους ψαμμίτες οι ρωγμές περνούν μέσα από τα λιθοσώματα ενώ στους ασβεστόλιθους έχουμε διαχωρισμό των στρώσεων.

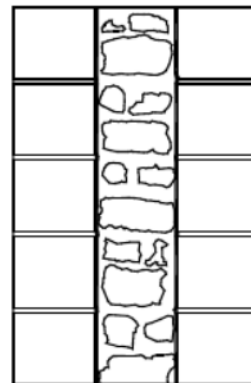


Σχήμα 3.11: Θλιπτική αστοχία τρίστρωτης τοιχοποιίας. Αριστερά για ψαμμίτη. Δεξιά για ασβεστόλιθο.

Ένα εύρημα αυτής της έρευνας που αφορά την μηχανική της τρίστρωτης τοιχοποιίας και αξίζει να αναφερθεί είναι το εξής: Ο ψαμμίτης είχε πολύ μικρότερη θλιπτική αντοχή από τον ασβεστόλιθο αλλά είχε και πολύ μεγαλύτερο ανοικτό πορώδες, 15,4% έναντι 2,1%. Στην περίπτωση της κατακόρυφης σύνδεσης μεταξύ των στρώσεων, που είναι και αρκετά συνήθης, η θλιπτική αντοχή του λίθου έχει πολύ μικρότερη σημασία στη διατμητική αντοχή της τοιχοποιίας απ' ό,τι άλλα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την συνάφεια λίθου κονιάματος όπως το πορώδες. Έτσι η τοιχοποιία που κατασκευάστηκε με ψαμμίτη εμφάνισε σχεδόν διπλάσια διατμητική αντοχή από αυτήν με ασβεστόλιθο, $\tau_{\psi}=0,17$ MPa έναντι $\tau_{\alpha}=0,09$ MPa.

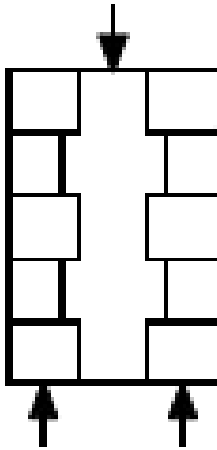


Σχήμα 3.12 : τρίστρωτη τοιχοποιία υπό διάτμηση

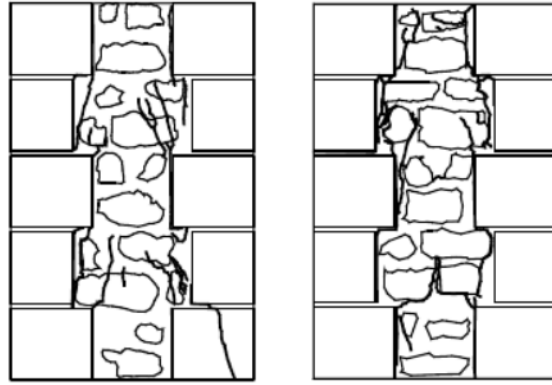


Σχήμα 3.13: ρωγμές διατμητικής αστοχίας

Αντίθετα στην περίπτωση που υπήρχε κάποια σύνδεση μεταξύ του πυρήνα και των εξωτερικών παρειών μέσω μπατικών λίθων είχαμε τα εξής: 1) Η διατμητική αντοχή ήταν αφενός μεγαλύτερη και στις δύο περιπτώσεις. 2) Η θλιπτική αντοχή του λιθοσώματος παίζει καθοριστικό ρόλο στην διατμητική αντοχή της τοιχοποιίας και άρα, $\tau_{\psi}=0,58$ MPa έναντι $\tau_{\alpha}=0,81$ MPa.



Σχήμα 3.14: τρίστρωτη τοιχοποιία υπό διάτμηση



Σχήμα 3.15: ρωγμές διατμητικής αστοχίας. Αριστερά για ψαμμίτη. Δεξιά για ασβεστόλιθο.

Βάσει πειραματικών δεδομένων που αναφέρθηκαν μπορούμε να προβούμε στις εξής παρατηρήσεις:

1. Η θλιπτική αντοχή του λιθοσώματος δεν είναι καθοριστικός παράγοντας τα θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας. Αυτό γίνεται φανερό από τα πειραματικά δεδομένα, όπου τοιχοποιίες με λιθοσώματα μικρότερης αντοχής παρουσιάζουν μεγαλύτερες αντοχές. Αυτό που είναι πιθανό είναι ότι σημαντικότερο ρόλο παίζει η θλιπτική αντοχή του κονιάματος καθώς και του υλικού πλήρωσης του πυρήνα. (Vintzileou, 2007)
2. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των τρίστρωτων τοιχοποιιών παρουσιάζουν πολύ μεγάλη διακύμανση, ακόμα και μεταξύ τοιχοποιιών του ίδιου ερευνητικού προγράμματος. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στα διαφορετικά χαρακτηριστικά των δομικών υλικών, δηλαδή του κονιάματος και του λιθοσώματος καθώς και της διεπιφάνειας τους, την ανομοιογένεια και την πολυπλοκότητα της τοιχοποιίας καθώς και στην διαφοροποίηση στις συνθήκες δοκιμής. (Silva B. , 2012)

ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ ΚΑΙ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ

4.1 Bouyoucos hydrometer method (Κοκκομετρική ανάλυση με αραιόμετρο)

Αρχή της μεθόδου: Κατά τη μέθοδο αυτή, εδαφικό δείγμα γνωστού ξηρού βάρους, διασπείρεται σε μια στήλη ύδατος και η πυκνότητα του αιωρήματος μετράται σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα. Επειδή τα χονδρόκοκκα υλικά καθιζάνουν ταχύτερα από ότι τα λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά, επιλέγονται οι χρόνοι μετρήσεως πυκνότητας έτσι ώστε να έχουν καθιζάνει αρχικά η άμμος και στη συνέχεια η ιλύς (η άργιλος παραμένει σε αιώρηση). Στη συνέχεια υπολογίζεται η εκατοστιαία αναλογία άμμου, ιλύος και αργίλου στο έδαφος. Τα προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα μέτρησης της πυκνότητας του αιωρήματος καθορίζονται σύμφωνα με το νόμο του Stokes που σχετίζει την ταχύτητα πτώσης των εδαφικών τεμαχιδίων σε ένα ομογενές υδατικό μέσο, με την ακτίνα τους (Γασπαράτος, Καβασίλης, & Γιαννακοπούλου, 2011).

Απαραίτητες συσκευές:

1. Ηλεκτρικός αναμεικτης
2. Ογκομετρικός κύλινδρος Βουγιούκου
3. Πυκνόμετρο
4. Εργαστηριακή ζυγαριά
5. Θερμόμετρο



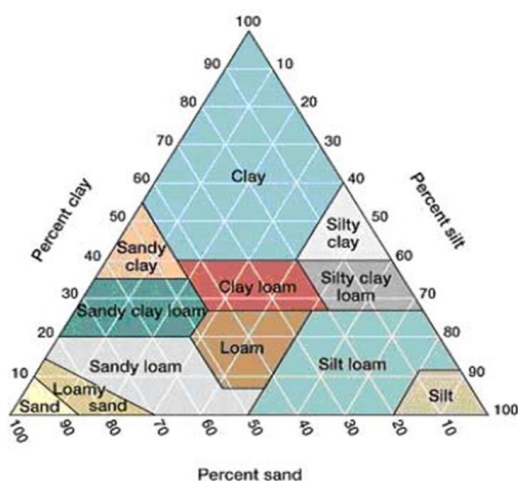
Εικόνα 4.1: Αριστερά: ηλεκτρικός αναμεικτης. Δεξιά: κύλινδρος Βουγιούκου με πυκνόμετρο εντός

Αντιδραστήρια:

1. Διάλυμα διασποράς calgon (εξαμεταφωσφορικό νάτριο σε συνδυασμό με ανθρακικό νάτριο).
2. Αμυλική αλκοόλη

Μεθοδολογία: Το εδαφικό δείγμα ξηραίνεται σε ξηραντήρα μέχρι να σταθεροποιηθεί το βάρος του. Στη συνέχεια λειοτριβείται και κοσκινίζεται ώστε η διάμετρος των εδαφικών κόκκων να είναι

μικρότερη από 2mm. Έπειτα ζυγίζονται 50g και τοποθετούνται στο κύπελλο του ηλεκτρικού αναμεικτη. Στην συνέχεια προστίθενται 50 ml calgon (διάλυμα διασποράς) και απιονισμένο νερό μέχρι 5 cm κάτω από το χείλος του κυπέλλου και γίνεται ανάδευση με τον αναμεικτη για 5 λεπτά, εκτός και αν το δείγμα έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε άργιλο, οπότε η ανάδευση φτάνει τα 8 λεπτά. Ξεπλένεται το περιεχόμενο του ποτηριού μέσα στον κύλινδρο Βουγιούκου με αποσταγμένο νερό. Έπειτα στον κύλινδρο προστίθεται αποσταγμένο νερό μέχρι η στάθμη να φτάσει στην χαραγή των 1000ml. Τοποθετείται το πυκνόμετρο μέσα στον κύλινδρο και συμπληρώνεται ο όγκος μέχρι τα 1130ml. Εν συνεχεία τοποθετείται το πλαστικό πώμα στον κύλινδρο ο οποίος ανακινείται χειροκίνητα για 30 δευτερόλεπτα. Ακολούθως, τοποθετείται ο κύλινδρος σε σταθερό μέρος, εισάγεται το πυκνόμετρο, και μετά από 40 sec γίνεται η λήψη της πρώτης ένδειξης, που δείχνει την πυκνότητα του διαλύματος σε ιλύ και άργιλο, αφού η άμμος έχει καθιζάνει. Αφαιρείται το πυκνόμετρο και μετριέται η θερμοκρασία του διαλύματος. Μετά από δύο ώρες από την ανάμειξη γίνεται η λήψη της δεύτερης ένδειξης του πυκνομέτρου και του θερμομέτρου. Η ένδειξη αυτή αφορά την άργιλο, αφού η άμμος και η ιλύς έχουν καθιζάνει. Ανάλογα με τα ποσοστά της άμμου, της αργίλου και της ιλύος που προκύπτουν, γίνεται η κατάταξη των εδαφών, κατά το αμερικανικό σύστημα, με το τρίγωνο κοκκομετρικής σύστασης (Γασπαράτος, Καβασίλης, & Γιαννακοπούλου, 2011).



Σχήμα 4.1: Πάνω Τρίγωνο κλάσεων κοκκομετρικής σύστασης του εδάφους σύμφωνα με το υπουργείο γεωργίας των Η.Π.Α. Κάτω ο αντίστοιχος Πίνακας.

Οι κλάσεις κοκκομετρικής σύστασης είναι 12 :

1.αμμώδης	S	Sand
2.πηλοαμμώδης	LS	Loamy Sand
3.αμμοπηλώδης	SL	Sandy Loam
4.πηλώδης	L	Loam
5.ιλοπηλώδης	SiL	Silty Loam
6.ιλώδης	Si	Silt
7.αμμοαργιλοπηλώδης	SCL	Sandy Clay Loam
8.αργιλοπηλώδης	CL	Clay Loam
9.ιλοαργιλοπηλώδης	SiCL	Silty Clay Loam
10.αμμοαργιλώδης	SC	Sandy Clay
11.ιλοαργιλώδης	SiC	Silty Clay
12.αργιλώδης	CL	Clay

4.2 Προσδιορισμός της οργανικής ουσίας κατά Walkley-Black

Οργανική ουσία και η επιρροή της στο δομικό πηλό: Η οργανική ουσία περιλαμβάνει ζωικά και φυτικά υπολείμματα σε διάφορα στάδια και βαθμό αποσύνθεσης, ζωντανούς μικροοργανισμούς του εδάφους καθώς και νεοσχηματισθείσες ενώσεις οι οποίες είναι αποτέλεσμα συνθετικής δραστηριότητας των μικροοργανισμών του εδάφους (Γασπαράτος, Καβασίλης, & Γιαννακοπούλου, 2011). Η οργανική ουσία είναι δηλαδή αποτέλεσμα αποσυνθετικής όσο και συνθετικής δραστηριότητας των μικροοργανισμών. Από τη σκοπιά της δόμησης αυτό που κυρίως μας αφορά είναι ο χούμος, το μέρος δηλαδή της οργανικής ουσίας του εδάφους που είναι τελείως άμορφο και δεν έχει κυτταρική δομή χαρακτηριστική του φυτού ή του οργανισμού που προήλθε. Ο χούμος δίνει σκοτεινό χρώμα και επηρεάζει τις θερμικές ιδιότητες του εδάφους και κάνει το έδαφος περισσότερο εύθρυπτο ελαττώνοντας την πλαστικότητα και την συνεκτικότητα του (Λαζαρίδου-Αθανασιάδου, 2012). Ο χούμος είναι κολλοειδής και όξινος με μεγάλη ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων και την ικανότητα να απορροφά νερό αυξάνοντας τον όγκο του. Η οξύτητα αυτή μπορεί να προκαλέσει όξινες αντιδράσεις με το νερό στο χώμα και να οδηγήσει σε φαινόμενα διάβρωσης στα υλικά που θα έρθουν σε επαφή. Αντίθετα η πρόσφατα δημιουργημένη οργανική ουσία είναι σχετικά αδρανής από φυσική και χημική σκοπιά. Η οργανική ουσία έχει σημαντική επιρροή στον δομικό πηλό αν υπερβεί το 2-4% (Houben & Guillaud, 1994).

Αρχή της μεθόδου: Ο προσδιορισμός της οργανικής ουσίας κατά Walkley-Black στηρίζεται στην οξείδωση του οργανικού άνθρακα, με ένα ισχυρό οξειδωτικό μέσο ($K_2Cr_2O_7$) σε ισχυρό όξινο περιβάλλον (πυκνό H_2SO_4).

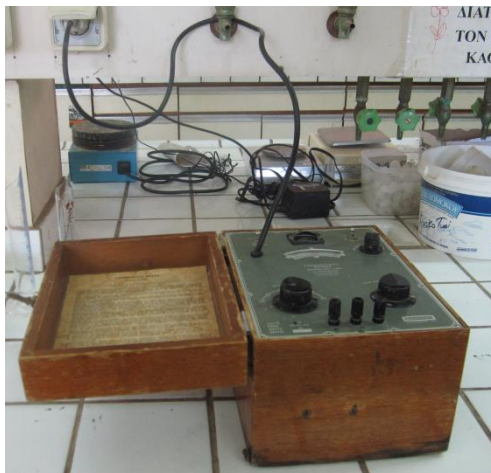
Μεθοδολογία: Μεταφέρεται 1 g εδάφους σε κωνική φιάλη των 500 ml, προστίθενται 10 ml διαλύματος $K_2Cr_2O_7$ με προχοΐδα και αναδεύεται περιστρέφοντας την φιάλη για να αναμιχθεί το αντιδραστήριο με το έδαφος. Στην συνέχεια (κάτω από τον απορροφητήρα) προστίθενται με συνεχή ροή 20 ml πυκνού H_2SO_4 . Αναδεύεται χειροκίνητα η φιάλη και αφήνεται σε ηρεμία για 30 λεπτά. Προστίθενται στη συνέχεια 200 ml ύδατος και 10 ml H_3PO_4 και αφήνεται η φιάλη να ψυχθεί. Μετά την ψύξη προστίθενται 0,5 ml διαλύματος Διφαινυλαμινοσουλφονικού βαρίου και γίνεται πιλοδότηση της περίσσεια του $K_2Cr_2O_7$ με το δισθενή θειικό σίδηρο. Στο σημείο εξουδετέρωσης το χρώμα μεταβάλλεται απότομα σε πράσινο (Γασπαράτος, Καβασίλης, & Γιαννακοπούλου, 2011).

4.3 Προσδιορισμός της ολικής αλατότητας με την μέθοδο της μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης κορεσμένης εδαφικής πάστας

Ως αλατότητα του εδαφικού υλικού θεωρούμε το σύνολο των υδατοδιαλυτών αλάτων του που είναι τα ανθρακικά, δισανθρακικά, θειικά, χλωριούχα, νιτρικά και βορικά άλατα με Ca, Mg, Na, K και NH_4 . Η ύπαρξη αλάτων εδαφικό υλικό μπορεί να οδηγήσει σε αισθητικά προβλήματα αλλά και σε κρυστάλλωση αλάτων και μία πιο ψαθυρή συμπεριφορά. Τα άλατα είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα στη περίπτωση που έχουμε προσθήκη τσιμέντου στο χώμα προκειμένου να βελτιώσουμε τα χαρακτηριστικά του (Houben & Guillaud, 1994).

Μεθοδολογία: 200 g εδαφικού υλικού με μέγιστο μέγεθος κόκκων 2 mm τοποθετούνται σε κυλινδρικό δοχείο και προστίθεται αποσταγμένο νερό με προχοΐδα η ογκομετρικό κύλινδρο,

ενώ ταυτόχρονα το μίγμα ανακατεύεται με σπάτουλα μέχρι να κορεστεί. Στη κατάσταση κορεσμού το μίγμα ρέει αργά, δεν παρατηρείται περίσσεια νερού και αν χαράξουμε την επιφάνεια της πάστας με αυλακιά, αυτή σταδιακά σβήνει. Στη συνέχεια γεμίζουμε το κύπελλο με την πάστα και το τοποθετούμε στην ειδική υποδοχή του οργάνου. Συγχρόνως με την μέτρηση της αντίστασης μετρούμε και την θερμοκρασία της πάστας.



Εικόνα 4.2: Συσκευή μέτρησης ηλεκτρικής αντίστασης

4.4 Δοκιμή τράπεζας εξάπλωσης

Ο έλεγχος της εργασιμότητας και της κανονικής ποσότητας νερού έγινε με την τράπεζα εξάπλωσης σύμφωνα με το πρότυπο EN 1015-3 που αναφέρεται στην συνεκτικότητα κονιαμάτων υδραυλικού ασβέστη (CEN, 1999). Το πρότυπο αναφέρει ότι η συνεκτικότητα του νωπού κονιάματος είναι μέτρο της ρευστότητας και της παραμορφωσιμότητας του.

Απαραίτητες συσκευές:

1. τράπεζα εξάπλωσης. Η τράπεζα είναι ένας γυάλινος δίσκος με διάμετρο 300mm.
2. Συσκευή που κινείται κατακόρυφα και προκαλεί παλινδρομική κατακόρυφη κίνηση της τράπεζας με μέγιστη ανύψωση 10mm.
3. μεταλλικός κουλουροκωνικός δακτύλιος με ύψος 60mm και διαμέτρους βάσεων 70mm και 100mm.
4. ξύλινος κυλινδρικός κόπανος
5. μεταλλικός κανόνας



Εικόνα 4.3: Τράπεζα εξάπλωσης

Μεθοδολογία: Τοποθετείται στη μέση της τράπεζας το κουλουροκωνικό δοχείο, γεμίζεται μέχρι τη μέση με κονίαμα το οποίο συμπυκνώνεται με τον κόπανο με 10 ελαφρά χτυπήματα. Στην συνέχεια γεμίζεται μέχρι πάνω, το κονίαμα χτυπιέται άλλες 10 φορές και στη συνέχεια επιπεδώνεται με τον κανόνα. Ακολούθως αφαιρείται το δοχείο και η τράπεζα δονείται 15 φορές με ρυθμό περίπου 1 χτύπημα το δευτερόλεπτο. Η μέτρηση της εξάπλωσης γίνεται με τη μέτρηση της διαμέτρου σε δύο κατευθύνσεις. Τα κονιάματα ανάλογα με την εργασιμότητα μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες: α) Σκληρά κονιάματα με εξάπλωση μικρότερη από 140mm, β) πλαστικά κονιάματα με εξάπλωση από 140mm έως 200mm και γ) μαλακά κονιάματα με εξάπλωση μεγαλύτερη από 200mm (CEMEX Mortars, 2012).

4.5 Κοκκομετρική ανάλυση με κοσκίνισμα

Η Κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα έγινε σύμφωνα με το πρότυπο NP EN 933-1 (CEN, 1997).

Απαραίτητες συσκευές:

1. συσκευή δόνησης
2. σειρά πρότυπων κοσκίνων
3. ζυγαριά ακριβείας



Εικόνα 4.4: Σειρά κοσκίνων και συσκευή κοσκίνισματος

Μεθοδολογία: Το δείγμα θερμαίνεται στους 105°C και αφού ξηραθεί ζυγίζονται 500g και εισάγονται στη σειρά των κοσκίνων. Τα κόσκινα που χρησιμοποιούνται είναι αυτά με άνοιγμα, 4mm, 2mm, 1mm, 0,5mm, 0,25mm, 0,125mm και 0,063mm. Τοποθετούνται από το μεγαλύτερο στο μικρότερο και στο τέλος μπαίνει το τυφλό κόσκινο. Η στήλη με τα κόσκινα μπαίνει στην αυτόματη συσκευή δόνησης για 15'. Το υλικό που έχει μείνει σε κάθε κόσκινο ζυγίζεται με ακρίβεια, καθώς και το υλικό που έχει περάσει από το κόσκινο των 0,063 mm και βρίσκεται στο τυφλό κόσκινο. Η διαφορά βάρους ανάμεσα στο αρχικό ζύγισμα και στο σύνολο των συκρατούμενων υλικών δεν πρέπει να ξεπερνάει το 1% του αρχικού βάρους (5g) (Λουπασάκης, 2013). Στην περίπτωση της κοκκομετρικής ανάλυσης των αδρανών το ποσοστό του υλικού που περνάει από το κόσκινο των 0,063mm είναι παιπάλη που μπορεί να είναι άργιλος ή σκόνη από το ίδιο το υλικό. Η παιπάλη είναι ανεπιθύμητη και δεν πρέπει να ξεπερνάει το 3%(15g). Στην περίπτωση της κοκκομετρικής ανάλυσης κονιάματος το υλικό που συγκεντρώνεται στο τυφλό κόσκινο θεωρείται κονία. Τα αποτελέσματα αποτυπώνονται σε ημιλογαριθμική κλίμακα όπου στον άξονα χ είναι η διάμετρος της οπής των κοσκίνων και στον άξονα ψ το ποσοστό του διερχόμενου υλικού.

4.6 Μηχανικά χαρακτηριστικά κονιάματος: Καμπτική, Θλιπτική και εφελκυστική αντοχή κονιάματος και μέτρο ελαστικότητας

Όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο η θλιπτική αντοχή του κονιάματος, που στο σύστημα της τοιχοποιίας βρίσκεται σε ευνοϊκή τριαξονική συμπίεση, παίζει σημαντικό ρόλο στην θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας και για αυτό υπεισέρχεται στους περισσότερους από τους προτεινόμενους τύπους για τον υπολογισμό της. Ιδιαίτερα στην τυπολογία της τριστρωτης η θλιπτική αντοχή του κονιάματος σε συνδυασμό με το υλικό του πυρήνα φαίνεται να διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην τελική αντοχή (Vintzileou, 2007). Ανάπτυξη τάσεων στα κονιάματα εκτός από τα συνήθη φορτία, μπορεί να έχουμε από τους διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής μεταξύ των υλικών καθώς και από τη δημιουργία πάγου η αλάτων στο εσωτερικό της τοιχοποιίας. Κάποια γενικά στοιχεία που μπορούμε να αναφέρουμε για την αντοχή των πηλοκονιαμάτων είναι τα εξής:

1. Ο βαθμός ξήρανσης του υλικού επηρεάζει την τιμή της θλιπτικής αντοχής.
2. Η ξηρή πυκνότητα δεν χαρακτηρίζει το υλικό κατά απόλυτη τιμή και η υψηλή τιμή της δεν εγγυάται σημαντική αύξηση της αντοχής για συγκεκριμένο υλικό.
3. Η θλιπτική αντοχή επηρεάζεται από το είδος της αργίλου. Πηλοί που περιέχουν каоλίνη παρουσιάζουν συνήθως χαμηλές αντοχές (έως 1 MPa) και παρουσιάζουν μειωμένη συνοχή. Πηλοί με ιλλίτη παρουσιάζουν αυξημένες τιμές θλιπτικής αντοχής (έως 3 MPa) και μεγάλη διασπορά στις τιμές αντοχής-ξηρής πυκνότητας. Πηλοί με μοντμοριλονίτη διαφέρουν στη συμπεριφορά για παρόμοιες κοκκομετρίες με άλλες αργίλους, παρουσιάζουν χαμηλές ξηρές πυκνότητες και αντοχή ως και 5 MPa. (Μπέη, 2004).

Ο προσδιορισμός της θλιπτικής και καμπτικής αντοχής του κονιάματος αναφέρεται στο πρότυπο EN 1015-11 (CEN, 1999). Το κονίαμα τοποθετείται σε καλούπια διαστάσεων 40mm*40mm*160mm στα οποία έχει προηγουμένως απλωθεί μικρή ποσότητα λιπαντικού. Η τοποθέτηση γίνεται σε δύο στρώσεις οι οποίες συμπυκνώνονται ελαφρά προκειμένου να μην υπάρχουν κενά. Κατά τον προσδιορισμό της καμπτικής αντοχής το δοκίμιο τοποθετείται με την πλάγια όψη στους κυλίνδρους στήριξης για να εξασφαλιστεί η καλή επαφή και η απέναντι πλάγια όψη φορτίζεται στο μέσο με τον κύλινδρο φόρτισης. Η αντοχή σε κάμψη υπολογίζεται από τη σχέση:

$$f = \frac{1,5 * F * l}{b * d^2}$$

Όπου b και d το πλάτος και το βάθος του πρίσματος, l η απόσταση μεταξύ των στηρίξεων και F η ασκούμενη δύναμη κατά τη θραύση του δοκιμίου. Τα δύο τμήματα του δοκιμίου χρησιμοποιούνται έπειτα για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής. Η αντοχή σε θλίψη υπολογίζεται από τη σχέση:

$$f = \frac{F}{A}$$

Όπου F η δύναμη κατά την αστοχία και A το εμβαδόν της επιφάνειας που ασκείται το φορτίο.

Ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας έγινε σύμφωνα με το πρότυπο ISO 6784 (International organization of standardization, 1982), πρότυπο που αφορά τσιμεντοκονιάματα. Η τεχνική είναι μη καταστρεπτική για το δοκίμιο και συνίσταται από τρεις επαναλαμβανόμενες φορτίσεις, με την τρίτη να γίνεται με μια χρονική απόσταση από τις υπόλοιπες και να είναι μεγαλύτερη.

Ο προσδιορισμός της εφελκυστικής αντοχής έγινε με την παρακάτω συσκευή που δίνει το φορτίο στο οποίο αστοχούν δοκίμια σχήματος οκτώ. Μετρώντας το εμβαδό της επιφάνειας θραύσης και διαιρώντας το φορτίο με το εμβαδό αυτό υπολογίζεται η εφελκυστική αντοχή.



Εικόνα 4.5: Συσκευή μέτρησης εφελκυστικής αντοχής κονιάματος.



Εικόνα 4.6: Αριστερά: Συσκευή μέτρησης θλιπτικής αντοχής και μέτρου ελαστικότητας. Δεξιά: Συσκευή μέτρησης καμπτικής αντοχής.

4.7 Αντοχή πετρώματος

Αναφέρεται στην αντοχή του πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη. (ASTM C170-50, ΕΛΟΤ 749). Υπολογίζεται σε κυλινδρικά δοκίμια πυρήνων με διάμετρο 2 in και ύψος διπλάσιο της διαμέτρου, ή σε κυβικά δοκίμια διαστάσεων 5cm*5cm*5cm με καλά μορφοποιημένες παράλληλες έδρες. Η αντοχή υπολογίζεται ως ο λόγος της εφαρμοζόμενης δύναμης θραύσης προς την επιφάνεια εφαρμογής της δύναμης και δίνεται σε MPa. Τα πετρώματα ταξινομούνται ως προς την αντοχή τους βάση του παρακάτω πίνακα: (Χρηστάρας, 2003)

Αντοχή (MPa)	Χαρακτηρισμός
1,5-15	Μαλακό
15-50	Μέτρια σκληρό
50-120	Σκληρό
120-230	Πολύ σκληρό
>230	Εξαιρετικά σκληρό

Πίνακας 4.1: Κατάταξη πετρωμάτων



Εικόνα 4.7: Συσκευή προσδιορισμού θλιπτικής αντοχής δοκιμίου λίθου διαστάσεων 5cm*5cm*5cm

4.8 Περίθλαση ακτινών χ (XRD)

Η μέθοδος αυτή επιτυγχάνει με απόλυτη ακρίβεια τον προσδιορισμό των ορυκτών. Η ταυτοποίηση των κρυσταλλικών ενώσεων με την περίθλαση ακτινών Χ την καθιστά κατάλληλη για ορυκτολογική μελέτη και ακατάλληλη για χαρακτηρισμό υλικών που μπορεί να περιέχουν συστατικά σε άμορφες φάσεις. Η χρήση της μεθόδου σε δομικά υλικά αποκαλύπτει εκτός από σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την κρυσταλλική δομή, και πληροφορίες για μικροσκοπικές καταπονήσεις και σε έναν μικρό βαθμό ποσοτική ανάλυση των ορυκτολογικών φάσεων. Γενικά η ποσοτική ανάλυση πολύπλοκων μιγμάτων είναι προβληματική λόγω του διαφορετικού βαθμού κρυσταλλικότητας των ορυκτών φάσεων στα διάφορα κονιάματα. Είναι δυνατόν όμως να συνάγουμε συμπεράσματα όσον αφορά τη σχετική ποσότητα (ημιποσοτική) των περιεχόμενων ορυκτών φάσεων συγκρίνοντας μεταξύ τους τις εντάσεις των αντίστοιχων κορυφών στα διάφορα φάσματα (Σταθόπουλος, 2015). Μπορεί να φανεί ιδιαίτερα χρήσιμη στην ορυκτολογική εξέταση των πρώτων υλών κονιαμάτων και των ποζολανικών τους πρόσμικτων. Μπορούμε επίσης να προσδιορίσουμε κάποιους τύπους φθοράς όπως αυτούς που προέρχονται από άλατα και να χαρακτηρίσουμε λίθινα στοιχεία της κατασκευής.

Αρχή της μεθόδου: Οι αποστάσεις μεταξύ των δικτυωτών επιπέδων των κρυστάλλων ενός ορυκτού, το είδος των ατόμων και η κατανομή τους στα δικτυωτά επίπεδα είναι χαρακτηριστικά για κάθε ορυκτό είδος. Επειδή το μήκος κύματος των ακτινών χ είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την απόσταση των δικτυωτών επιπέδων, οι κρύσταλλοι των ορυκτών είναι δυνατόν να προκαλέσουν περίθλαση των ακτινών Χ. Για να λάβει χώρα η περίθλαση των ακτινών Χ από ένα δικτυωτό επίπεδο πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη του Bragg:

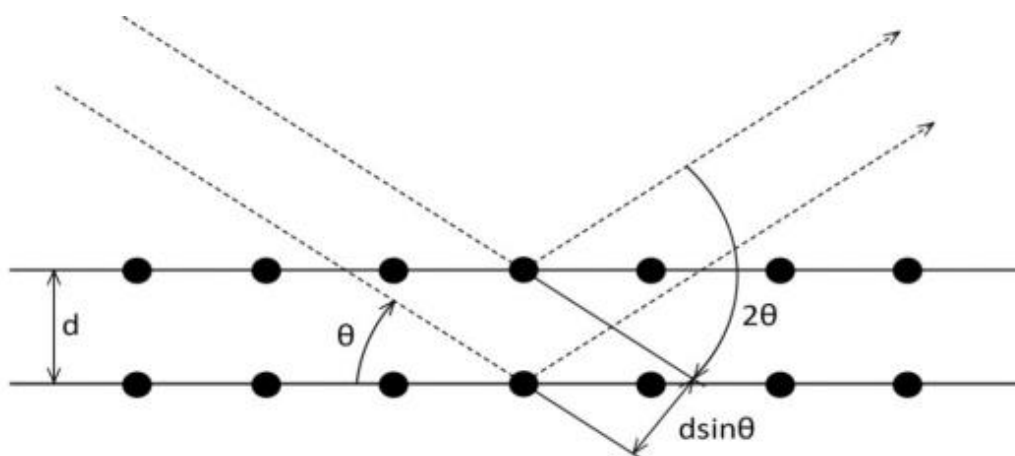
$$n * \lambda = 2 * d * \eta \mu \theta$$

Όπου: $n = 1, 2, 3$

λ = μήκος κύματος ακτίνων Χ

d = απόσταση δύο δικτυωτών επιπέδων

θ = γωνία προσπίπτουσας η περιθλώμενης δέσμης ακτίνων χ και δικτυωτού επιπέδου (Μοροπούλου, 2013)



Σχήμα 4.2: Προσπίπτουσα μονοχρωματική δέσμη σε κρυσταλλικό πλέγμα σύμφωνα με το νόμο του Bragg

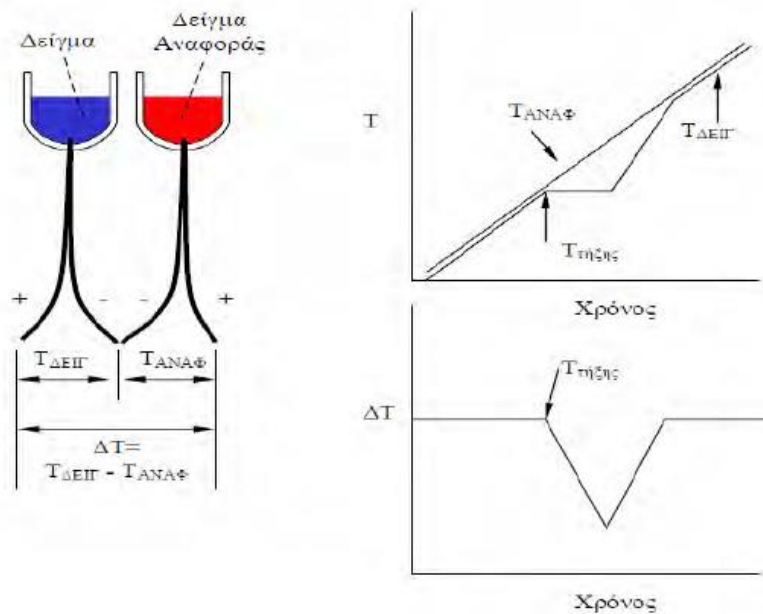
4.9 Διαφορική Θερμική ανάλυση(DTA)

Κατά τη θέρμανση ή την ψύξη των υλικών μπορούν να συμβούν χημικές ή φυσικές μεταβολές κατά την διάρκεια των οποίων λαμβάνει χώρα μεταφορά θερμότητας (ενδόθερμες ή εξώθερμες μεταβολές). Οι θερμικές αυτές μεταβολές μπορούν να ανιχνευθούν με την μέθοδο της διαφορικής θερμικής ανάλυσης.

Αρχή της μεθόδου: Η μέθοδος της διαφορικής θερμικής ανάλυσης βασίζεται στη μέτρηση της διαφοράς θερμοκρασίας ($\Delta T = T_{\text{δείγμα}} - T_{\text{αναφ}}$) μεταξύ του προς μέτρηση δείγματος ($T_{\text{δείγμα}}$) και ενός δείγματος αναφοράς ($T_{\text{αναφ}}$), όταν τα δύο δείγματα υπόκεινται σε ένα προκαθορισμένο θερμοκρασιακό πρόγραμμα. Όταν λαμβάνει χώρα μία χημική η φυσική μεταβολή που συνοδεύεται από έκλυση ή απορρόφηση θερμότητας, τότε αρχίζει να παρουσιάζεται διαφορά θερμοκρασίας στο προς μέτρηση δείγμα και στο δείγμα αναφοράς (Μοροπούλου, 2012).

Η διαφορά θερμοκρασίας παρακολουθείτε ως συνάρτηση του χρόνου ή της θερμοκρασίας και μπορεί να αποκαλύψει τα ακόλουθα:

- Χαρακτηριστικές Θερμοκρασίες
- Υαλώδης Μεταβολές
- Συμπεριφορά τήξης και κρυστάλλωσης
- Καθαρότητα του δείγματος
- Κινητική Αντιδράσεων
- Θερμική Σταθερότητα



Σχήμα 4.3: Σχηματική διάταξη διαφορικής θερμικής ανάλυσης

4.10 Θερμοβαρουμετρική ανάλυση (TGA)

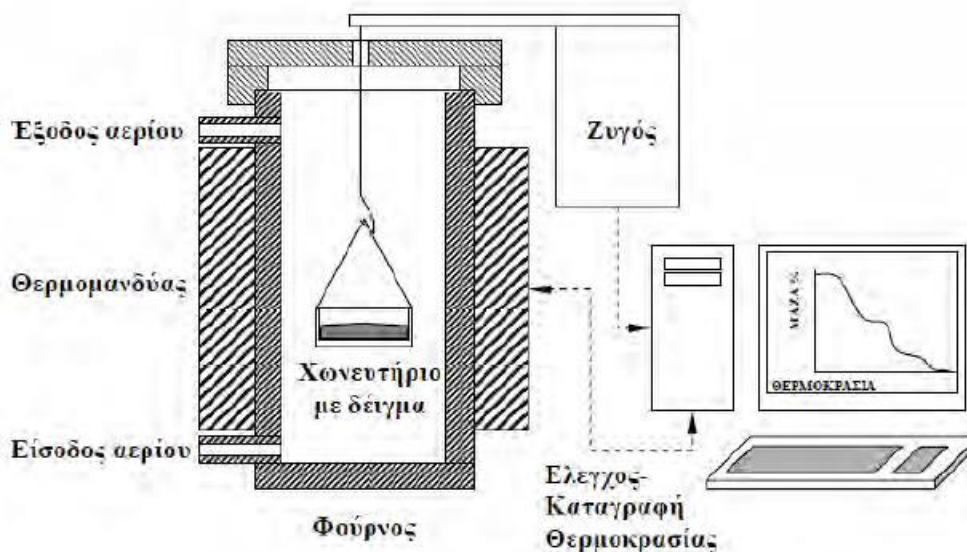
Αρχή της μεθόδου: Στη θερμοβαρουμετρική ανάλυση μετράται η μεταβολή της μάζας δείγματος κατά την εξέλιξη ενός προκαθορισμένου προγράμματος μεταβολής της θερμοκρασίας. Οι κύριες διεργασίες που μπορούν να μελετηθούν με την βοήθεια της Θερμοβαρουμετρικής Ανάλυσης είναι:

- Απορρόφηση ή προσρόφηση (αύξηση ή μείωση βάρους)
- Ξήρανση – απομάκρυνση διαλύτη (μείωση βάρους)
- Εξάτμιση (μείωση βάρους)
- Αποσύνθεση (μείωση βάρους)
- Αντιδράσεις στερεάς – στερεάς φάσης (μείωση βάρους)
- Αντιδράσεις στερεάς – υγρής φάσης (αύξηση ή μείωση βάρους)

Οι κύριες εφαρμογές της θερμοβαρουμετρικής ανάλυσης είναι:

- Θερμική σταθερότητα: Η θερμοβαρουμετρική καμπύλη μπορεί να αποκαλύψει τους μηχανισμούς αποσύνθεσης κάποιου υλικού σε υψηλές θερμοκρασίες και υπό διάφορες ατμόσφαιρες.
- Κινητική αντιδράσεων-διεργασιών: Η ανάλυση TGA χρησιμοποιείται συχνά και για την μελέτη των κινητικών χαρακτηριστικών κάθε είδους διεργασίας αύξησης ή μείωσης της μάζας του προς εξέταση υλικού.
- Χαρακτηρισμός υλικών: Οι θερμοβαρουμετρικές καμπύλες (με τις χαρακτηριστικές κορυφές για κάθε υλικό) χρησιμοποιούνται για την ταυτοποίηση υλικών και τον ποιοτικό έλεγχο.

- Μελέτη διάβρωσης: Η ανάλυση TGA επιτρέπει την μελέτη αντιδράσεων οξείδωσης ή άλλου τύπου, μιας και είναι δυνατή η εφαρμογή διαφόρων τύπων ατμόσφαιρας (ενεργά αέρια ή/και ατμοί). (Μοροπούλου, 2012)



Σχήμα 4.4: Σχηματική διάταξη θερμοβαρουμετρικής ανάλυσης

Οι δύο αυτές μέθοδοι θερμικής ανάλυσης χρησιμοποιούνται συνήθως μαζί και εξυπηρετούν τις ποιοτικές και ποσοτικές απαιτήσεις χαρακτηρισμού των υλικών, αποτίμησης της συμβατότητας διαφόρων υλικών σε ένα σύστημα και συμπεριφοράς των σύνθετων υλικών σε διάφορες συνθήκες του λειτουργικού τους περιβάλλοντος. Μπορούμε με αυτές τις μεθόδους π.χ. να έχουμε μια εικόνα της σύνθεσης ενός κονιάματος, της υδραυλικότητας του αλλά και της εξέλιξης της ενανθράκωσης του.

Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΛΑΥΡΕΩΤΙΚΗΣ

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, παρόλη την ευρεία και διαχρονική χρήση των αργιλοκονιαμάτων, η μελέτη των ιδιοτήτων τους και η συστηματική καταγραφή της χρήσης τους στις διάφορες ιστορικές περιόδους υπολείπεται κατά πολύ των υπόλοιπων κονιαμάτων. Σε αυτό το πλαίσιο και προκειμένου να τεκμηριωθεί η χρήση τους σε λιθοδομές της κλασσικής περιόδου, έγινε δειγματοληψία και χαρακτηρισμός συνδεδειγμένου κονιάματος από εργαστήρια επεξεργασίας μεταλλεύματος του τέταρτου αιώνα π.Χ. στην περιοχή Σούριζα του Λαυρίου.

5.1 Ιστορικά στοιχεία

Η ευρύτερη περιοχή του Λαυρίου έχει αξιολογηθεί ως το σπουδαιότερο μνημείο της μεταλλευτικής και μεταλλουργικής δραστηριότητας των αρχαίων Ελλήνων και ως ένα από τα μεγαλύτερα και τα πιο σύνθετα μεταλλεία όλου του αρχαίου Μεσογειακού κόσμου επειδή υπερέχει ανάμεσα στα όμοια του όχι μόνο ως προς τη διάρκεια του παραγωγικού βίου του, αλλά και ως προς τα μεγέθη της παραγωγής, ως προς το επίπεδο των τεχνολογικών εφαρμογών και ως προς τον ορθολογισμό της οργάνωσης της εκμετάλλευσής του. Ασχολούμενοι, ως κράτος και ως άτομα, με την παραγωγή κυρίως αργύρου και μολύβδου, αλλά και άλλων μετάλλων οι Αθηναίοι των κλασσικών χρόνων επιτέλεσαν έναν άθλο του οποίου οι καρποί επηρέασαν την εξέλιξη της πολιτείας τους σε ανυπολόγιστο βαθμό. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι τον μεταλλευτικό πλούτο της περιοχής τον εκμεταλλεύονταν από κοινού το κράτος και όσοι από τους Αθηναίους αλλά και ξένους κατοίκους της Αττικής επιχειρούσαν έργα μεταλλευτικά. Το κράτος κέρδιζε όχι από τα μεταλλεία αλλά από τους μεταλλευτές και είχε έσοδα μόνο εφ' όσον εκείνοι δημιουργούσαν αυτοβούλως καρποφόρες μεταλλευτικές επιχειρήσεις (Κακαβογιάννης, 2005).

Έχουμε λοιπόν την εμφάνιση ιδιωτικής πρωτοβουλίας, την ανάληψη επιχειρηματικού ρίσκου και την συνεργασία κράτους-επιχειρηματιών. Πρέπει να αναφερθεί βέβαια ότι η τεράστια αυτή σε έκταση και ένταση δραστηριότητα τόσο για την εξόρυξη όσο και για την επεξεργασία, στηρίχτηκε στη δουλεία δεκάδων χιλιάδων δούλων-ανδράποδων για τη ζωή των οποίων λίγα πράγματα είναι γνωστά και για τους οποίους υπάρχουν ποικίλες ενδείξεις εξαγέρσεων. Για το πλήθος των δούλων που εργάζονταν στην περιοχή είναι χαρακτηριστικό ότι ο στρατηγός Νικίας νοίκιαζε 1000 δούλους για μεταλλευτικές εργασίες (Κορδέλλας, 2014).

Ένα ιστορικό στοιχείο που καταδεικνύει τη σημασία της μεταλλευτικής δραστηριότητας για το μεγαλείο της πόλης των Αθηνών είναι το εξής: Στην εποχή του Θεμιστοκλή και πριν από την εισβολή του Ξέρξη, τα κρατικά έσοδα από τη φορολογία των μεταλλείων μοιράζονταν στους πολίτες των Αθηνών και κάθε πολίτης λάμβανε το ποσό των 10 δραχμών. Δεδομένου ότι οι φόροι αντιπροσώπευαν το 1/24 της αξίας της ετήσιας παραγωγής των μεταλλείων και πολίτες ήταν τουλάχιστον 20.000 μπορεί να εκτιμηθεί η ετήσια παραγωγή σε 4.800.000 δραχμές. Ο Θεμιστοκλής συμβούλευσε τους Αθηναίους να ανασταλεί η διανομή και να χρησιμοποιηθούν οι πόροι για την κατασκευή 200 τριήρων. Η άποψη έγινε δεκτή, πέρασε ο ναυτικός νόμος και έτσι η Αθήνα κατασκεύασε τον περίφημο στόλο της και προετοιμάστηκε η νίκη της μάχης της Σαλαμίνας (Κορδέλλας, 2014).

Ένα άλλο στοιχείο που αξίζει να αναφερθεί γιατί δείχνει την το μέγεθος της μεταλλευτικής δραστηριότητας στην αρχαιότητα είναι το εξής: Η πρώτη ουσιαστική εμφάνιση βιομηχανίας στην Ελλάδα του 18^{ου} αιώνα είναι στο Λαύριο, με την ιταλογαλλική εταιρεία «Hilariou Roux et Cie», που συμμετείχε και ο Ανδρέας Κορδέλλας, και εγκαινίασε το 1865 πλήρες εργοστάσιο με 18 κάμινους, μικρά μεταλλοπλύσια, μηχανουργείο και σιδηρόδρομο. Το 1867 απασχολούσε 1.200 εργάτες, τεράστιο αριθμό για τα μεγέθη της απασχόλησης σε εθνικό επίπεδο. Πρώτη ύλη αυτής της εταιρείας ήταν τα κατάλοιπα των αρχαίων μεταλλουργικών δραστηριοτήτων (σκωρίες) τα οποία ανακαμινεύονταν (Κορδέλλας, 2014).

5.2 Επεξεργασία και καθαρισμός του μεταλλεύματος.

Επειδή στα αργυρούχα κοιτάσματα της Λαυρεωτικής υπήρχαν συνήθως διάφορα ανάμικτα μεταλλεύματα και αμέταλλα ορυκτά, το εξορυσσόμενο υλικό έπρεπε να υποβάλλεται σε ειδική επεξεργασία για να αφαιρεθούν από αυτό τα συστατικά που δεν περιείχαν αργυρούχο μόλυβδο. Ο καθαρισμός άρχιζε με την θραύση των τεμαχίων σε πολύ μικρότερα που γινόταν με σφυριά πάνω σε μεγάλους, σχεδόν κυβικούς λίθους που είχαν πλευρές περίπου ένα μέτρο. Κατά τον θρυμματισμό πραγματοποιούνταν και χειροδιαλογή κατά την οποία οι μεταλλουργοί κρατούσαν όσα θραύσματα περιείχαν ικανοποιητικό ποσοστό γαληνίτη (Ο γαληνίτης (PbS) είναι το ορυκτό από το οποίο γίνεται ανάκτηση μολύβδου και συνήθως αργύρου) η κερουσίτη (ανθρακικό ορυκτό του μολύβδου).

Τα θραύσματα που απέμεναν διακρίνονταν σε αυτά που ήταν πλούσια σε αργυρούχο μόλυβδο και στέλνονταν απευθείας για τήξη και αυτά που είχαν ακόμα σε μεγάλο βαθμό άλλα συστατικά. Για τα τελευταία έπρεπε να γίνει θραύση του μεταλλεύματος με μέγιστο κόκκο 1mm και διαχωρισμός μεταξύ των κόκκων του μετάλλου και των κόκκων του στείρου. Για να επιτευχθεί αυτό, οι μεταλλουργοί συνέχιζαν τον θρυμματισμό μέσα σε γουδιά από τραχύτη όπου τα κτυπούσαν με σιδερένιους ύπερους (κόπανους) και ακολούθως τα άλεθαν σε μύλους από τραχύτη για να μετατρέψουν το υλικό σε "αλεύρι"(παιπάλη). Οι μύλοι αυτοί ήταν πανομοιότυποι με τους χρησιμοποιούμενους κατά τους κλασσικούς χρόνους για άλεσμα των δημητριακών (Κακαβογιάννης, 2005).

Στη συνέχεια το κονιοποιημένο μέταλλευμα τοποθετούνταν στα πλυντήρια. Τα πλυντήρια είναι ειδικές κατασκευές των αρχαίων μεταλλευτών, στις οποίες μεταφέρονταν τα μεταλλεύματα μετά την εξόρυξη, το θρυμματισμό και το κοσκίνισμά τους, για τον εμπλουτισμό τους, δηλαδή για να καθαριστούν ακόμη καλύτερα. Πρόκειται για ορθογώνιες η κυκλικές εγκαταστάσεις με περιμετρικό ρείθρο στις οποίες έπεφτε με δύναμη το νερό της βασικής δεξαμενής παρασύροντας όλα τα άχρηστα υλικά που υπήρχαν στο μέταλλευμα. Αυτά τα άχρηστα υλικά αφήνονταν στον πυθμένα των δεξαμενών καθιζήσεως. Έτσι κατακάθιζε πρώτος ο αργυρούχος μόλυβδος επειδή είναι πιο βαρύτες, στη συνέχεια απλωνόταν στο στεγνωτήριο του πλυντηρίου και μεταφερόταν στο εργαστήριο για τον παραπέρα καθαρισμό του (Παπαδόπουλος Δ. , 2012).

5.3 Μεταλλουργικό εργαστήριο Jones

Η δειγματοληψία έγινε από το μεταλλουργικό εργαστήριο Jones, χτισμένο τον τέταρτο αιώνα π.Χ. και ανασκαμμένο το 1976 από τον διευθυντή της Βρετανικής αρχαιολογικής σχολής Jones προς τιμή του οποίου πήρε και το όνομά του, και από ένα άλλο εργαστήριο πλησίον του Jones. Τα εργαστήρια βρίσκονται στο βουνό Μιχάλη στην περιοχή Αγριλέζα του δήμου

Λαυρεωτικής. Στο εργαστήριο Jones γίνονται εργασίες συντήρησης και ανάδειξης από την εφορεία αρχαιοτήτων ανατολικής Αττικής. Το εργαστήριο εκτείνεται σε δύο επίπεδα. Στο κάτω βρίσκεται το πλυντήριο-στεγνωτήριο και δωμάτια που χρήζουν ερμηνείας χρήσης, πιθανόν οικιστικοί χώροι. Στο πάνω επίπεδο υπάρχει μία δεξαμενή και άλλα δωμάτια, πιθανόν και αυτά οικιστικοί ή εργαστηριακοί χώροι. Άλλη μια δεξαμενή παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο επιπέδων. Οι τοίχοι των δωματίων είναι χτισμένοι με φυσικούς λίθους μέχρι περίπου το ύψος των 60cm και ωμόπλινθους στη συνέχεια τμήματα των οποίων σώζονται σε μία μόνο θέση.

Στην περιοχή υπάρχει ένας πολύ μεγάλος αριθμός στοών και εργαστηρίων ποικίλης παραγωγικής δυνατότητας με χαρακτηριστικό το μεταλλουργικό συγκρότημα της Σούριζας που έχει τον χαρακτήρα «βιομηχανίας» της εποχής λόγω της μεγάλης έκτασης που καταλαμβάνει και του μεγέθους των κατασκευών που το απαρτίζουν. Εκτός από μεταλλουργικά εργαστήρια της κλασικής εποχής υπάρχουν στην περιοχή και εγκαταστάσεις της γαλλικής μεταλλευτικής εταιρείας του 19^{ου} αιώνα. Η περιοχή είναι γενικά άνυδρη και γι αυτό ήταν απαραίτητη η κατασκευή δεξαμενών τόσο για την επεξεργασία του μεταλλεύματος όσο και για την εξυπηρέτηση των αναγκών του εργατικού δυναμικού που έφταναν τα 1.500 κυβικά μέτρα.



Εικόνα 5.1: δεξαμενές του 4^{ου} αιώνα π.χ. από το εργαστήριο της Σούριζας που χάρη στα επιχρίσματα τους δεν έχουν απολέσει την ικανότητα να συγκρατούν νερό.

5.4 Χαρακτηρισμός κονιαμάτων

5.4.1 γενική εικόνα τοιχοποιιών

Στην περιοχή όπως προαναφέρθηκε υπάρχει ένα μεγάλο πλήθος εργαστηρίων εμπλουτισμού μεταλλεύματος σε πολύ κοντινή απόσταση το ένα από το άλλο (μερικά σε απόσταση λίγων μέτρων). Παρότι παρουσιάζουν μια κοινή τυπολογία με την ύπαρξη κάποιων κοινών χαρακτηριστικών όπως το πλυντήριο μεταλλεύματος, η δεξαμενή, κάποια παράπλευρα κτίσματα και ο κατασκευαστικός τους προσανατολισμός είναι κοινός που είναι η χρηστικότητα και όχι η πολυτέλεια ή η ανάδειξη, εντούτοις έχουν και αρκετές διαφοροποιήσεις. Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στο ότι η κατασκευή τους γινόταν με ιδιωτική και όχι κρατική πρωτοβουλία και άρα αντανακλάται η οικονομική επιφάνεια και η βούληση του ιδιοκτήτη και στο ότι κάποια είναι κατασκευασμένα τον πέμπτο και κάποια τον τέταρτο αιώνα.

Οι τοιχοποιίες δεν παρουσιάζουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά και αντανακλούν την οικονομική δυνατότητα αλλά και την χρήση. Έτσι π.χ. οι τοίχοι των δεξαμενών είναι ιδιαίτερα μεγάλοι πάχους και υψηλής ποιότητας χτισίματος ενώ κάποιες τοιχοποιίες δευτερευόντων κτισμάτων είναι χτισμένες με μικρούς και πλακοειδής λίθους ενώ παρουσιάζουν και κατασκευαστικές ατέλειες όπως σχηματισμό κατακόρυφων αρμών σε κάποια σημεία τους. Η

τυπολογία πάλι ποικίλει αφού κάποιοι τοίχοι είναι διπλοί και κάποιοι με πυρήνα. Στις τρίστρωτες τοιχοποιίες έχει γίνει χρήση μπατικών λίθων. Τα λιθοσώματα προέρχονται από μικρά λατομεία σε κοντινή απόσταση που έχουν προσδιοριστεί από την εφορεία αρχαιοτήτων.

Κάποια κοινά χαρακτηριστικά τους είναι ότι πρόκειται για αργολιθοδομές και σε κάποιες περιπτώσεις οι λίθοι είναι ημιπελεκημένοι. Ένα άλλο συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί από οπτικό έλεγχο και από την αφή είναι ότι το σύνολο των συνδετικών κονιαμάτων είναι αργιλοκονιάματα χωρίς σταθεροποίηση με ασβέστη, ενώ χρησιμοποιούνταν ιδιαίτερου πάχους και αποτελεσματικότητας, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για στεγανοποίηση, επιχρίσματα.



Εικόνα 5.2: δύο εξωτερικές παρειές, μικρότεροι λίθοι και κονίαμα στην ενδιάμεση στρώση, διάτονοι λίθοι.



Εικόνα 5.3: όψη και κάτοψη τρίστρωτης τοιχοποιίας: άριστη προσαρμογή μικρότερων λίθων στις εξωτερικές παρειές.



Εικόνα 5.4: τοιχοποιίες χαμηλής ποιότητας δόμηση. Αριστερά: μικροί λίθοι και πλούσιο κονίαμα φέρουν πολύ μεγαλύτερο λίθο. Δεξιά: Μικροί λίθοι και ατελής σύνδεση στις γωνίες.

Όπως προαναφέρθηκε, η δειγματοληψία έγινε σε δύο τοιχοποιίες, μία του εργαστηρίου Jones (E1), και μία σε εργαστήριο πλησίον του Jones (E2). Πραγματοποιήθηκε κοκκομετρική ανάλυση με αραιόμετρο, κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα, περίθλαση ακτινών χ (XRD), διαφορική θερμική ανάλυση(DTA) και θερμοβαρυμετρική ανάλυση (TG).

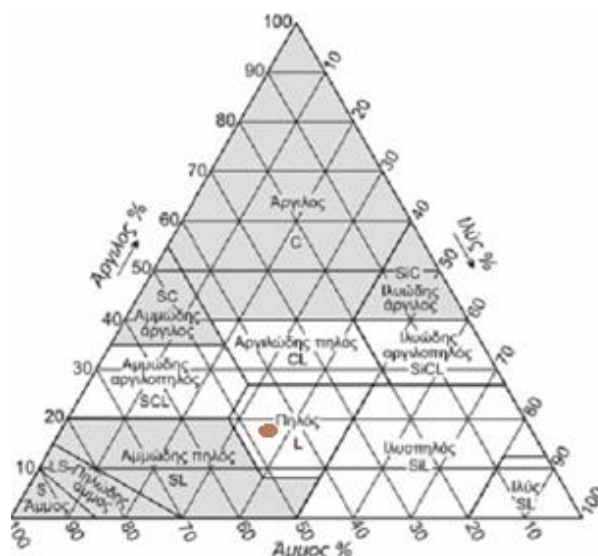
5.4.2 Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης με αραιόμετρο.

Σκοπός της μεθόδου είναι ο υπολογισμός της εκατοστιαίας αναλογία άμμου, ιλύος και αργίλου στο έδαφος. Καθώς τη διαβάθμιση της άμμου μπορούμε να την προσδιορίσουμε με κόσκινα, αυτό που κυρίως μας ενδιαφέρει με την μέθοδο αυτή είναι:

α) το κλάσμα της ιλύος, που έχει τα χαρακτηριστικά πολύ λεπτής άμμου (<0,063mm) και στα πηλοκονιάματα καλύπτει τα κενά.

β) Το κλάσμα της αργίλου, που στα πηλοκονιάματα έχει τον ρόλο της κόνιας και ευθύνεται αφενός για τη συνοχή και την ανάπτυξη αντοχών και αφετέρου για την συρρίκνωση και την μεγάλη μεταβολή όγκου που παρουσιάζουν αυτά τα κονιάματα.

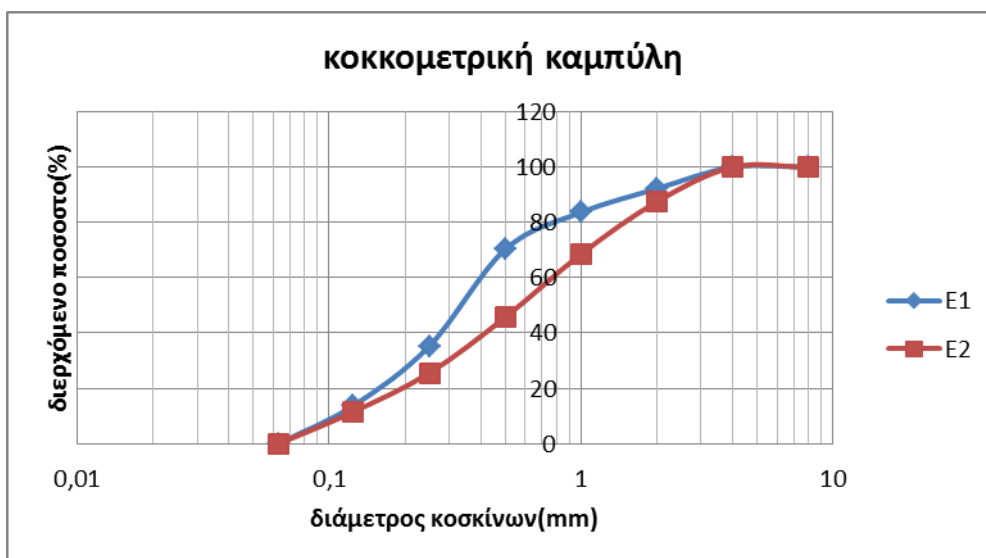
Κοκκομετρική ανάλυση πραγματοποιήθηκε στο δείγμα E2 καθώς η μέθοδος απαιτεί 50 g ξηραμένου δείγματος και είναι καταστρεπτική. Τα αποτελέσματα είναι: άργιλος 18,2% ιλύς 35,4% και άμμος 46,4%. Σύμφωνα με την κατάταξη του υπουργείου Γεωργίας της Αμερικής εντάσσεται στην κατηγορία πηλός (L).



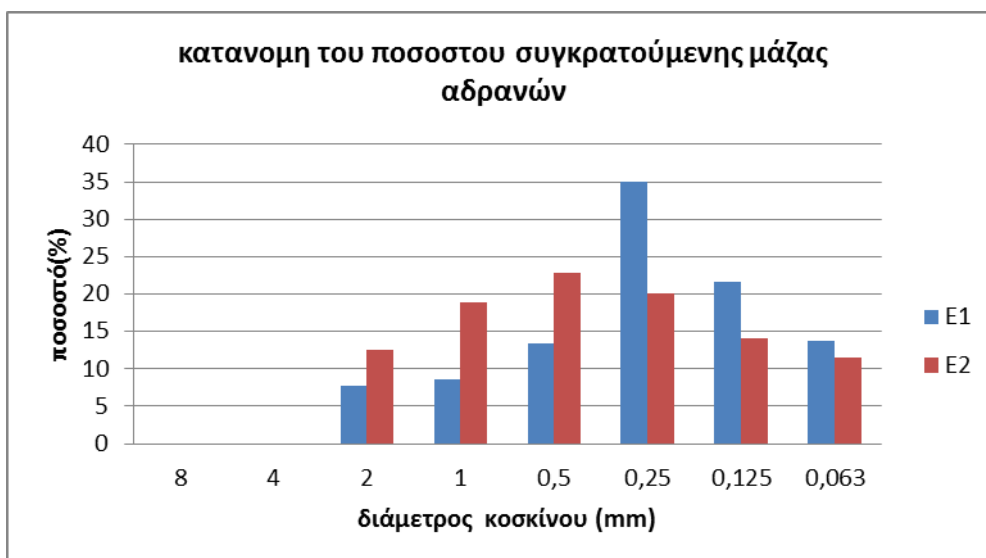
Σχήμα 5.1: Τρίγωνο κατάταξης εδαφών

5.4.3 Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης με κόσκινα

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η κοκκομετρική ανάλυση το κονίαμα τρίφτηκε επιμελώς ώστε να διαλυθούν αργιλικά συσσωματώματα και ξηράνθηκε ώστε μην έχουμε παραμένουσα υγρασία που θα επηρέαζε τη ζύγιση. Όπως φαίνεται και στα διαγράμματα και στα δύο κονιάματα έχουμε συγκρατούμενο υλικό στο σύνολο των κοσκίνων από 2mm έως 0,063 mm που μαρτυρά μία ικανοποιητική διαβάθμιση. Το E2 είναι πιο χοντρόκοκκο, με πιο ομοιόμορφη κατανομή, ενώ η καμπύλη του E1 παρουσιάζει μια απότομη μεταβολή της κλίσης στο 0,25mm όπου συγκρατείται και το 35% του υλικού.



Σχήμα 5.2: Ποσοστό διερχόμενου υλικού από κάθε κόσκινο



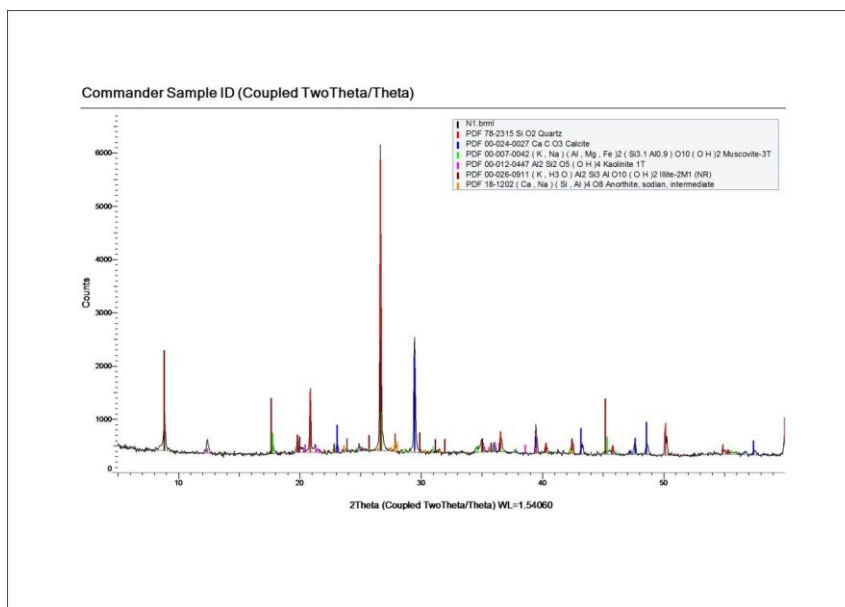
Σχήμα 5.3: Ποσοστό συγκρατούμενου υλικού σε κάθε κόσκινο

5.4.4 Αποτελέσματα περιθλάσης ακτινών Χ (XRD)

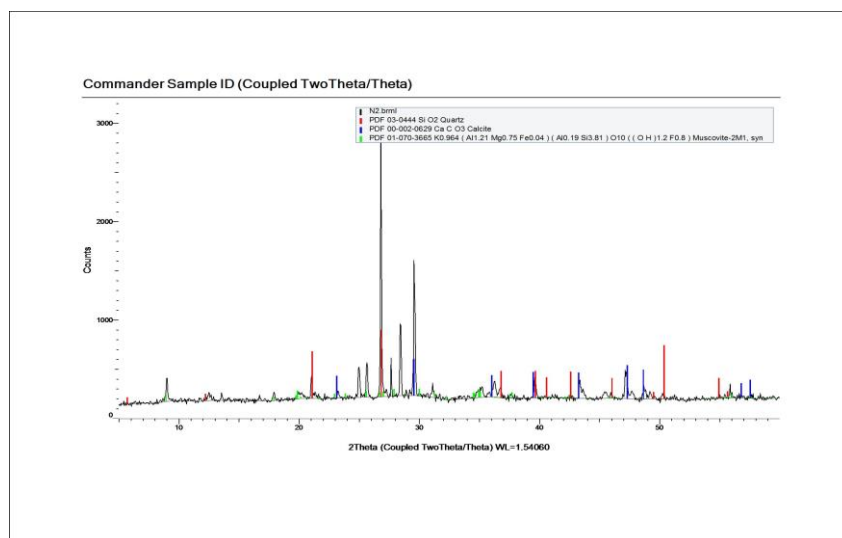
Η περίθλαση ακτινών Χ, καθώς και οι ακόλουθες θερμικές αναλύσεις έγιναν από το Εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Από κάτω παρουσιάζονται τα ακτινοδιαγράμματα περιθλάσης ακτινών Χ (XRD) του δείγματος Ε1 και του Ε2. Οι ορυκτολογικές φάσεις που ταυτοποιήθηκαν σημειώνονται στο υπόμνημα του κάθε διαγράμματος. Διαπιστώθηκε πως η πρωτεύουσα φάση που αναγνωρίστηκε είναι ο χαλαζίας ενώ οι δευτερεύουσες είναι ο ασβεστίτης, ο μοσχοβίτης και ίσως για το Ε1 ο ιλλίτης(;), ο καολινίτης(;). Η ταυτοποίηση των αργιλικών ορυκτών και κυρίως του ιλλίτη είναι αβέβαιη. Ο ασβεστίτης είναι ορυκτό του ασβεστίου και κύριο συστατικό πολλών πετρωμάτων. Ο μοσχοβίτης είναι φυλλοπυριτικό ορυκτό το και το κοινότερο μέλος της ομάδας των μαρμαρυγιών. Ο καολινίτης είναι αργιλικό ορυκτό που είναι υποκατηγορία των φυλλοπυριτικών ορυκτών. Αυτό που συμπεραίνεται από το διάγραμμα είναι τα αδρανή του

κονιάματος είναι κυρίως αργιλοπυριτικής αλλά και ασβεστιτικής φύσης. Ενδεχομένως επίσης στο αργιλικό κλάσμα να έχουμε τα ορυκτά του καολινίτη και του ιλλίτη. Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, κονιάματα με κυρίαρχο αργιλικό ορυκτό τον καολινίτη παρουσιάζουν μικρή διόγκωση με το νερό λόγω των μεγάλων δυνάμεων συνοχής μεταξύ των στρωμάτων, μειωμένη πλαστικότητα και μειωμένες γενικά μηχανικές αντοχές ενώ κονιάματα με ιλλίτη έχουν καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά και μεγαλύτερη διόγκωση.

Αποτελέσματα περιθλάσης ακτίνων X	
Δείγμα	Ορυκτολογική Σύσταση
E1	Χαλαζίας, ασβεστίτης, μοσχοβίτης, καολίνης
E2	Χαλαζίας, ασβεστίτης, μοσχοβίτης



Σχήμα 5.4: Διάγραμμα ορυκτών φάσεων κονιάματος E1

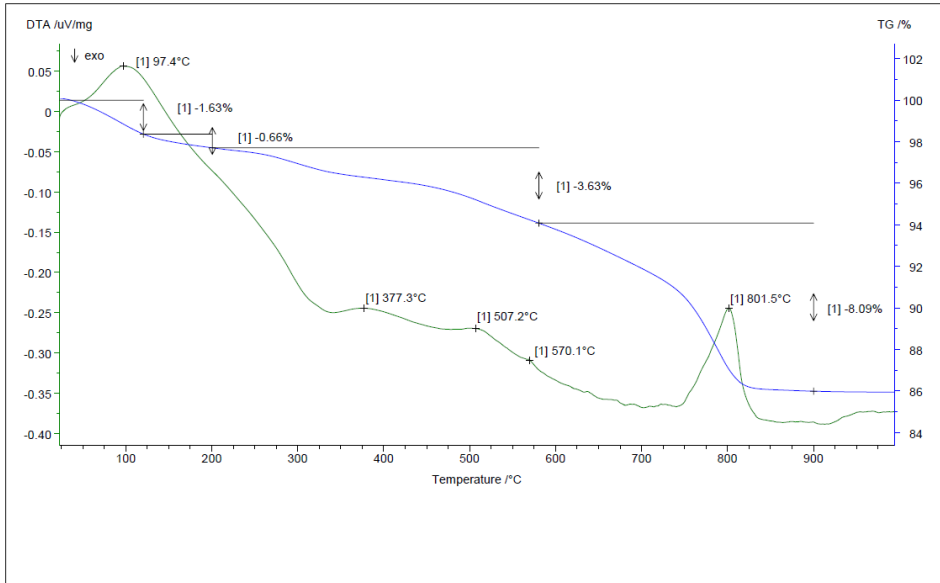


Σχήμα 5.5. Διάγραμμα ορυκτών φάσεων κονιάματος E2

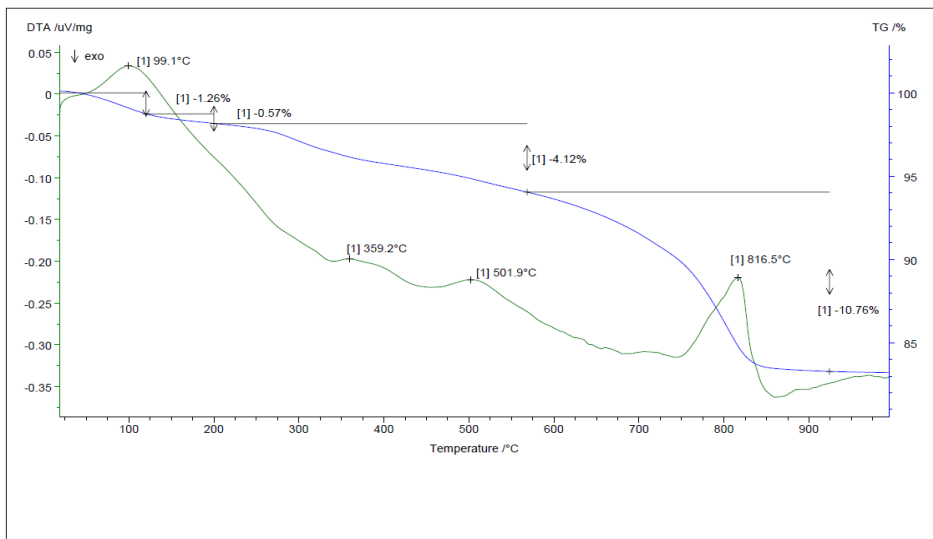
5.4.5 Αποτελέσματα διαφορικής θερμικής ανάλυσης και θερμοβαρυμετρικής ανάλυσης (DTA-TG).

Βάσει των διαγραμμάτων τα δείγματα E1 και E2 που παρουσιάζονται παρακάτω μπορεί εξαχθεί το συμπέρασμα ότι αποτελούν τυπικά δείγματα πηλοκονιαμάτων τα οποία έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- 1) Ικανή ποσότητα παραμένουσας υγρασίας, φυσικά ροφημένης. Κάτω από τους 120°C η απώλεια μάζας οφείλεται στο φυσικά δεσμευμένο νερό.
- 2) Υπάρχει επίσης ενδοστρωματικό νερό εξαιτίας του οποίου έχουμε την απώλεια μάζας στο διάστημα 120-200°C.
- 3) Η απώλεια μάζας στο επόμενο διάστημα οφείλεται στο χημικά δεσμευμένο νερό από τις αργίλους. Στο E2 υπάρχει περισσότερο χημικά δεσμευμένο νερό.
- 4) Οι ενδόθερμες κορυφές στους 377,3°C και 507,2°C στο E1, και στους 359,2°C και 501,9°C στο E2, αποδίδονται στα αργιλικά ορυκτά. Πιθανόν να πρόκειται για τα ίδια ορυκτά.
- 5) Η ενδόθερμη κορυφή στους 570,1°C στο E1 οφείλεται στην μετατροπή της φάσης του χαλαζία-α σε χαλαζία-β και δεν συνοδεύεται από απώλεια μάζας.
- 6) Στους 801,5°C στο E1 και 816,5°C στο E2, εντοπίζονται οι κορυφές λόγω αποσύνθεσης του ανθρακικού ασβεστίου. Βάσει της απώλειας μάζας η περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο μπορεί να υπολογιστεί σε 18,4% στο E1 και 24,5% στο E2.



Σχήμα 5.6: Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης DTA-TG για το E1



Σχήμα 5.7: Διάγραμμα θερμικής ανάλυσης DTA-TG για το E2

ΠΗΛΟΚΟΝΙΑΜΑΤΑ: ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ, ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ.

6.1 Γενικά στοιχεία

6.1.1 Κατάταξη κονιαμάτων

Συνδετική ύλη ή κονία ονομάζεται κάθε υλικό το οποίο με κατάλληλη προεργασία μπορεί να γίνει πλαστικό και να εκδηλώσει συγκολλητικές ιδιότητες και το οποίο βαθμιαία στερεοποιείται έως ότου σχηματίσει σκληρή και συμπαγή μάζα. Οι περισσότερες συνδετικές ύλες γίνονται πλαστικές και εμφανίζουν συγκολλητικές ιδιότητες όταν αναμειχθούν με το νερό. Στερεοποιούνται είτε λόγω εξατμίσεως του νερού όπως ο πηλός, είτε λόγω χημικών αντιδράσεων όπως η άσβεστος. Αν αναμειχθεί μία κονία με νερό και αδρανείς ύλες (π.χ. άμμο ή σκύρα) λαμβάνεται ένα πλαστικό μίγμα που ονομάζεται κονίαμα ή σκυρόδεμα. Τα κονιάματα είναι μίγματα λεπτόκοκκων αδρανών, με μέγιστη διάμετρο κόκκου <4mm, με κονίες και νερό. Τα σκυροδέματα είναι μίγματα χονδρόκοκκων αδρανών με διάμετρο κόκκου >4mm με κονίες και νερό (Τσίμας, 2001).

Σύμφωνα με την RILEM τα κονιάματα διακρίνονται ανάλογα με τη χρήση τους α) σε κονιάματα για επιχρίσματα, β) σε κονιάματα υποστρωμάτων, γ) σε κονιάματα για διακόσμηση, δ) σε κονιάματα για τοιχοποιία που και αυτά με τη σειρά τους διακρίνονται σε κονιάματα για δόμηση, σε επισκευαστικά κονιάματα, σε κονιάματα αρμολογήματος, σε σφραγιστικά κονιάματα κ.α. Μια άλλη διάκριση γίνεται ανάλογα με την κονία. Έτσι έχουμε:

1. Αερίκες κονίες που πήζουν και σκληρύνονται μόνο όταν έρχονται σε επαφή με τον αέρα. Τέτοιες είναι ο γύψος, η άργιλος, η υδράσβεστος.
2. Υδραυλικές κονίες που πήζουν και σκληρύνονται με την παρουσία νερού, με ή χωρίς την παρουσία αέρα και παραμένουν σκληρές ακόμα και κάτω από το νερό. Τέτοια είναι ο υδραυλικός ασβέστης που παράγεται από την όπτηση μαργαϊκών ασβεστόλιθων και το τσιμέντο.

6.1.2 Χαρακτηριστικά πηλοκονιαμάτων

Η πηλοκονία ανήκει στην κατηγορία των αεροπαγών κονιών η οποία για να σταθεροποιηθεί θα πρέπει να εκτεθεί στον ατμοσφαιρικό αέρα, οπότε εξατμίζεται το νερό που περιέχεται σε αυτή. Όταν ξηραθεί, συγκολλούνται τα μόρια των αδρανών υλικών με τους κόκκους της κονίας και μεταξύ τους. Επάνω σε αυτήν την ιδιότητα βασίζεται και η κατασκευή των δομικών στοιχείων από πηλό (χωρίς όπτηση). Μετά την ξήρανση, (αν δεν έχει προηγηθεί όπτηση), το μίγμα δεν μετατρέπεται σε σταθερή ένωση, με συνέπεια, αν διαποτιστεί πάλι με νερό να επανέρχεται η κονία στην πλαστική της κατάσταση (Θεουλάκης, Στεφανής, & Γερογιάννης, 2009).

Το πηλοκονίαμα που χρησιμοποιείται για δόμηση είναι το ίδιο υλικό με αυτό που χρησιμοποιείται για ωμόπλινθους, μόνο που είναι πιο λεπτόκοκκο με μέγιστο κόκκο 3 mm και χωρίς άχυρο. Το πάχος του αρμού ποικίλλει από 1 -2,5cm για ωμοπλινθοδομές. Ιδιαίτερη

σημασία πρέπει να δοθεί στην κατακόρυφη συρρίκνωση που προκαλείται από τα πηλοκονιάματα υπό την δράση των κατακόρυφων φορτίων, και μπορεί να φτάσει τα 3 cm για κάθε 3 μέτρα τοίχου (Doat, Hays, Houben, Matuk, & Vitoux, 1985). Αντίστοιχα η οριζόντια συρρίκνωση μπορεί να φτάσει τα 2mm για 5 μέτρα μήκους τοίχο (Houben & Guillaud, 1994). Στη σύγχρονη δόμηση ο πηλός συνοδεύεται συχνά από τσιμέντο για κονιάματα δόμησης και άσβεστο για τα επιχρίσματα. Τα πρόσθετα αυτά χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν την συμπεριφορά του υλικού, όσον αφορά την αντοχή και την ανθεκτικότητα του. Για το επίχρισμα, η προσθήκη άσβεστου μαζί με ελάχιστο τσιμέντο 1/10 κάνει το κονίαμα πιο ανθεκτικό στο νερό και στην ατμοσφαιρική διάβρωση, χωρίς ωστόσο να παρεμποδίζει την κυκλοφορία του αέρα κατά την εξάτμιση του νερού. Εν γένει όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό αργίλου, τόσο μεγαλύτερη είναι η πλαστικότητα, μικρότερη η διαπερατότητα, μεγαλύτερη η συμπίεστικότητα, μεγαλύτερη η συνοχή και μικρότερη η γωνία τριβής (Μπέη, 2004).

Η ποιότητα του πηλού καθορίζει τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του πηλοκονιάματος. Όταν το ποσοστό της άμμου που περιέχεται στη σύνθεση του πηλοκονιάματος είναι υψηλό, (>30%) περιορίζεται η συστολή και οι μικρορηγματώσεις, ενώ μειώνονται και οι αντοχές του. Το απαιτούμενο ποσοστό νερού στη σύνθεση, ώστε το κονίαμα να γίνει εργάσιμο εξαρτάται από το περιεχόμενο ποσοστό αργίλου του πηλού. Όσο υψηλότερο είναι το περιεχόμενο ποσοστό αργίλου, τόσο περισσότερο νερό απαιτείται με αποτέλεσμα να μειώνεται η αντοχή του πηλοκονιάματος. Η ορυκτολογική σύσταση επίσης επηρεάζει τη συμπεριφορά του πηλού. Παραδείγματος χάριν, οι κρύσταλλοι σμεκτίτη χαρακτηρίζονται από την υψηλή προσρόφηση νερού και την έντονη αλλαγή του όγκου του υλικού (Μπέη, 2004).

6.1.3 Παθολογία πηλοκονιαμάτων

Η διάβρωση εμφανίζεται με τη μορφή εκτεταμένων και ακανόνιστων αποσαθρώσεων και οδηγεί σε σημαντική απώλεια υλικού και σταδιακά σε σοβαρή αλλοίωση της μορφής. Ο τύπος αυτός της φθοράς σχετίζεται πιθανότατα με τη συμπεριφορά γενικά των αργιλούχων υλικών στις ατμοσφαιρικές συνθήκες, με τη σύσταση και τη μικροδομή του υλικού, καθώς και με τις μεταβαλλόμενες, ακόμα και ήπια, συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας. Κατά την ρόφηση του νερού τα αργιλικά συστατικά έχουν την τάση να ενυδατώνονται και να αυξάνουν τον όγκο τους. Η διόγκωση αυτή έχει ως συνέπεια την ανάπτυξη ισχυρών τάσεων στο εσωτερικό των πηλών που τελικά οδηγούν στη διάρρηξη τους. Κατά την φάση της ξήρανσης, όταν αποβάλλουν το νερό, οι άργιλοι συρρικνώνονται και μετατρέπονται σε σκόνη (θιξοτροπική συμπεριφορά). Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας διάβρωσης είναι η ύπαρξη διαλυτών αλάτων των οποίων οι κύκλοι κρυστάλλωσης προκαλούν την διάρρηξη των πόρων του υλικού και οδηγούν στην κατάρρευσή του. Τέλος ο παγετός συντελεί δραστικά στην αποσάθρωση του υλικού (Θεουλάκης, Στεφανής, & Γερογιάννης, 2009). Οι μεταβολές επίσης του όγκου των πηλοκονιαμάτων μπορεί να οδηγήσουν σε διάρρηξη του δεσμού μεταξύ κονιάματος και τοιχοσώματος κάτι που οδηγεί σε μείωση της αντοχής της τοιχοποιίας αλλά και στον σχηματισμό διόδων για το νερό και άλλων διαλυμάτων. Επιδεινώνεται έτσι η διάβρωση και επηρεάζεται η αντίσταση σε χημικούς παράγοντες φθοράς (IS 13077, Bureau of Indian standards; 1991). Γενικά πηλοκονιάματα με μεγάλη περιεκτικότητα σε άμμο παρουσιάζουν μικρή αντίσταση στη διάβρωση που προκαλεί το νερό αλλά πολύ καλή συμπεριφορά απέναντι στον παγετό. Αντίθετα κονιάματα με μεγάλη περιεκτικότητα σε άργιλο αναπτύσσουν συνήθως τριχοειδής ρωγμές στην επιφάνεια τους και άρα έχουν πολύ κακή συμπεριφορά απέναντι στον παγετό. Αν δεν εμφανίσουν αυτές τις ρωγμές έχουν πολύ αυξημένη αντίσταση στη διάβρωση που προκαλεί το νερό (Minke, 2006).

6.2 Προμήθεια και έλεγχος πρώτων υλών

Τα κονιάματα παρασκευάστηκαν χωρίς σταθεροποίηση του εδαφικού υλικού. Λέγοντας σταθεροποίηση εννοούμε την μόνιμη βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών και των ιδιοτήτων του εδαφικού υλικού με βελτίωση των αντοχών, μείωση της συρρίκνωσης και της διόγκωσης παρουσίας νερού και μείωση της διάβρωσης που προκαλεί το νερό. Τα κύρια υλικά που χρησιμοποιούνται για σταθεροποίηση είναι ο ασβέστης, το τσιμέντο και η πίσσα (Norton, 1986). Πέρα από αυτά υπάρχουν καταγεγραμμένα τουλάχιστον εκατό υλικά που χρησιμοποιούνται για σταθεροποίηση του δομικού πηλού. Κάποια από αυτά είναι η υδραυλική άσβεστος, οι ποζολάνες σε συνδυασμό με κάποια κονία, τα κόπραντα και το αίμα ζώων, το λινέλαιο, διάφορες ρητίνες κ.α.

Παρασκευάστηκαν δύο διαφορετικές συνθέσεις κονιαμάτων. Τα συνδυαστικά κονιάματα των αρμών και τα κονιάματα του πυρήνα.

Οι πρώτες ύλες λοιπόν που χρησιμοποιήθηκαν είναι :

1. Πηλός από τη περιοχή του Άγιου Στεφάνου Αττικής.
2. Ποταμίσιτα άμμος.(0-2 mm).
3. Ποταμίσιτο λεπτόκοκκο χαλίκι(2-6 mm).

6.2.1 Προμήθεια υλικών

Η εύρεση και προμήθεια κατάλληλου υλικού ήταν αρκετά μεγάλο πρόβλημα δεδομένου ότι δεν χρησιμοποιείται στις μέρες μας πηλός για δόμηση και οι πηλοί του εμπορίου προορίζονται κυρίως για άλλες χρήσεις όπως κεραμική και γλυπτική και είναι επεξεργασμένοι, υγροί και ιδιαίτερα λεπτόκοκκοι και ακατάλληλοι εν γένει για δόμηση. Αρχικά υπήρξε επαφή με κοντινές κεραμοποιίες, στον Ασπρόπυργο και στη Χαλκίδα οι οποίες όμως είχαν σταματήσει την παραγωγή εκείνο το χρονικό διάστημα και δεν μπορούσαν να προμηθεύσουν πηλό. Υπήρξε επίσης επικοινωνία και επισκέψεις σε εργαστήρια αγγειοπλαστικής και εταιρίες κεραμικών καθώς και με μια εταιρεία που ειδικεύεται σε παραδοσιακά δομικά υλικά. Τέλος υπήρξε επαφή και με μη κερδοσκοπικές οργανώσεις που ειδικεύονται στην φυσική δόμηση, την Ανέλιξη και τον Σαλίγκαρο οι οποίες υπέδειξαν μία μάντρα οικοδομικών υλικών στον Άγιο Στέφανο που ειδικεύεται στην πώληση της πρώτης ύλης, του χώματος, σε βιοτεχνίες που αφού το επεξεργαστούν θα το μεταπωλήσουν σε εργαστήρια κεραμικής.

Ανάμεσα σε τυποποιημένους πηλό εισαγωγής, τυποποιημένους πηλό με κόστος όμως μεγαλύτερο του τσιμέντου και χώμα από τον Άγιο Στέφανο επιλέχθηκε το τρίτο για τους εξής λόγους: Βασικό λόγος χρήσης πηλοκονιαμάτων ανά τους αιώνες είναι η **προσιότητα** και η **οικονομία**. Αν επιλεγόταν κάποια από τις δύο πρώτες περιπτώσεις αναιρούνταν και οι δύο αυτοί λόγοι. Εκτός του ότι προσιδιάζει περισσότερο στην παραδοσιακή δόμηση, η επιλογή που έγινε έδινε επιπλέον τη δυνατότητα να υπάρξει επεξεργασία του χώματος και να ακολουθηθούν όλα τα στάδια προκειμένου ένα έδαφος να μετατραπεί σε κονίαμα.

Το χώμα προέρχεται από την ίδια την έκταση της μάντρας που βρίσκεται πλησίον ενός ρέματος, όπου το έδαφος σκάβεται και φορτώνεται σε μεγασάκους (big bags) του ενός m². Ύστερα από υπόδειξη, το χώμα που συλλέχθηκε δεν ήταν επιφανειακό, ώστε να αποφευχθούν τυχόν ανεπιθύμητες οργανικές προσμίξεις. Τελικά έγινε προμήθεια δύο big bags του μισού κυβικού μέτρου, προκειμένου να μην αντιμετωπίσουν πρόβλημα τα ανυψωτικά μηχανήματα του εργαστηρίου κατά την παραλαβή λόγω βάρους.

6.2.2 Έλεγχος πρώτων υλών

Πριν την προμήθεια του χώματος είχε γίνει δειγματοληψία του εδάφους προκειμένου να προηγηθεί ο έλεγχος του. Ο προσδιορισμός της οργανικής ουσίας, των διαλυτών αλάτων και η κοκκομετρική ανάλυση με αραιόμετρο έγιναν στο εργαστήριο εδαφολογίας και γεωργικής χημείας του Γ.Π.Α. και οι κοκκομετρικές αναλύσεις με κόσκινα από Εργαστήριο Τεχνικών Υλικών της σχολής Αρχιτεκτόνων του Ε.Μ.Π.

1. Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης με αραιόμετρο.

Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη καθώς μπορεί να προσδιοριστεί το ποσοστό του υλικού με διάμετρο κόκκων κάτω από 63μm, αλλά κυρίως μας δίνει το ποσοστό του υλικού με διάμετρο κόκκων κάτω από 2μm, δηλαδή το ποσοστό της αργίλου που στα πηλοκονιάματα έχει τον ρόλο της κονίας. Μεγάλο ποσοστό αργίλου μπορεί να αυξήσει τις μηχανικές αντοχές, αλλά αυξάνει και την απαίτηση σε νερό προκειμένου το κόνιαμα να καταστεί εργάσιμο καθώς και την συρρίκνωση. Σημαντικό ρόλο βέβαια στις αντοχές και στην συρρίκνωση έχουν και άλλοι παράγοντες όπως τα ορυκτά της αργίλου που υπάρχουν στο χώμα καθώς και το νερό που θα προστεθεί.

Γενικά αυτό που προτείνεται είναι στο υλικό να υπάρχει μεγάλο ποσοστό άμμου (55-75%), το ποσοστό της ιλύος να κυμαίνεται από 10%-30% και της αργίλου από 15-20%. (Doat, Hays, Houben, Matuk, & Vitoux, 1985). Αυτέ όμως οι προτεινόμενες αναλογίες είναι σχετικές και διαφοροποιούνται ανάλογα με την περιοχή και τον συγγραφέα. Έτσι το Ινδικό πρότυπο καθορίζει σαν ιδανικές αναλογίες η άργιλος να είναι μεταξύ 20-22%, η ιλύς ιδιαίτερα αυξημένη στο 40-45% και η άμμος στο 30-40% (IS 13077, Bureau of Indian standards, 1991), ενώ στην περιοχή του Νέου Μεξικού της Αμερικής προτείνεται ο αργιλικό ποσοστό να είναι 20% και η άμμος και η ιλύς 80% (Cornerstones Community Partnership, 2006). Από την άλλη ο G.Minke προτείνει το αργιλικό ποσοστό στα πηλοκονιάματα να είναι ιδιαίτερα χαμηλό μόλις 4-10% (Minke, 2006).

Μια εξήγηση ενδεχομένως είναι ότι η μεγάλη διαφορά στο κλάσμα της αργίλου ανάμεσα στον Minke και τους υπόλοιπους οφείλεται στη διαφορετική γεωγραφική αναφορά που έχουν. Το ποσοστό 20% αφορά την πολιτεία του Νέου Μεξικού στις ΗΠΑ όπου υπάρχει μεγάλη παράδοση δόμησης με adobe. Το ίδιο ποσοστό περίπου αναφέρεται και στο πρότυπο και σε δημοσιεύσεις από την Ινδία. Αντίθετα το 4-10% αναφέρεται στη Γερμανία. Γενικά όσο μεγαλύτερο ποσοστό αργίλου έχουμε τόσο μεγαλύτερη είναι η συνοχή αφού η άργιλος δρα ως κονία. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως όμως, όσο μεγαλώνει το ποσοστό μεγαλώνει και η επιφανειακή ρηγματώση που θα εμφανιστεί που ενώ δεν επιδρά αν δεν είναι εκτεταμένη στην αντοχή, επιδρά στην ανθεκτικότητα έναντι του παγετού. Ακόμα και τριχοειδής ρωγμές να υπάρχουν, η διείσδυση του νερού και η διόγκωση λόγω παγετού μπορεί να οδηγήσει σε αποκολλήσεις. Αυτό είναι κάτι που ίσως δεν αφορά μάλλον το κλίμα της Ινδίας και του Νέου Μεξικού αλλά αφορά το κλίμα της Γερμανίας και γι αυτό έχουμε τόσο μεγάλες διαφορές.

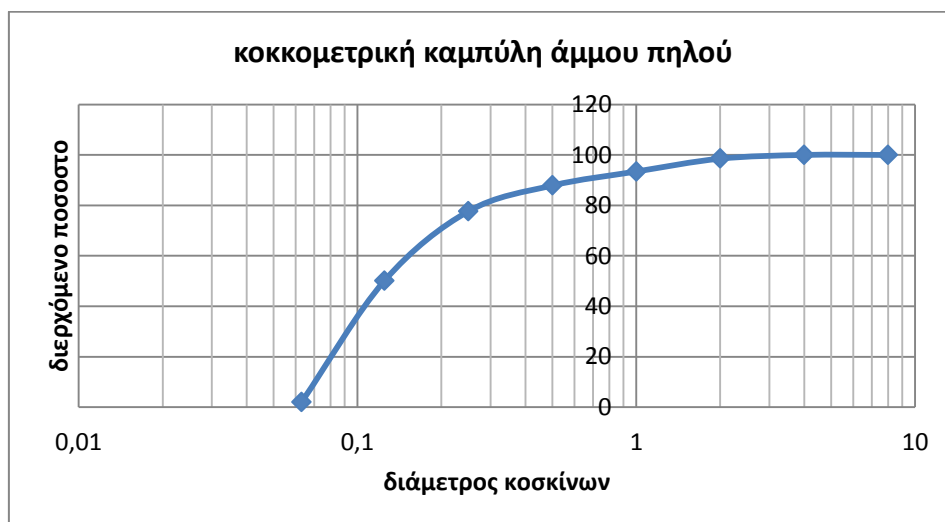
Το χώμα από την περιοχή του Αγίου Στεφάνου είχε την εξής κοκκομετρική σύσταση.

- άργιλος 36,28%
- ιλύς 33,36%
- άμμος 30,36%

Το αργιλικό ποσοστό σε μετρήσεις από άλλες θέσεις έφτανε το 41%. Το ποσοστό αυτό κρίνεται υπερβολικό και άρα προκρίθηκε η ανάμιξη με άμμο σε ποσοστό 50% ώστε το τελικό ποσοστό να είναι 18-21% για τα συνδετικά κονιάματα. Για τα κονιάματα του πυρήνα χρησιμοποιήθηκε μεγαλύτερο ποσοστό αδρανών και η ανάμιξη ήταν 40% χώμα και 60% αδρανή εκ των οποίων 57% ήταν η ποταμίσις άμμος και 43% το ποταμίσιο χαλίκι (Για 50kg υλικού αναμιγνύονταν 20kg χώμα, 17kg ποταμίσις άμμος και 13 kg ποταμίσιο χαλίκι.)

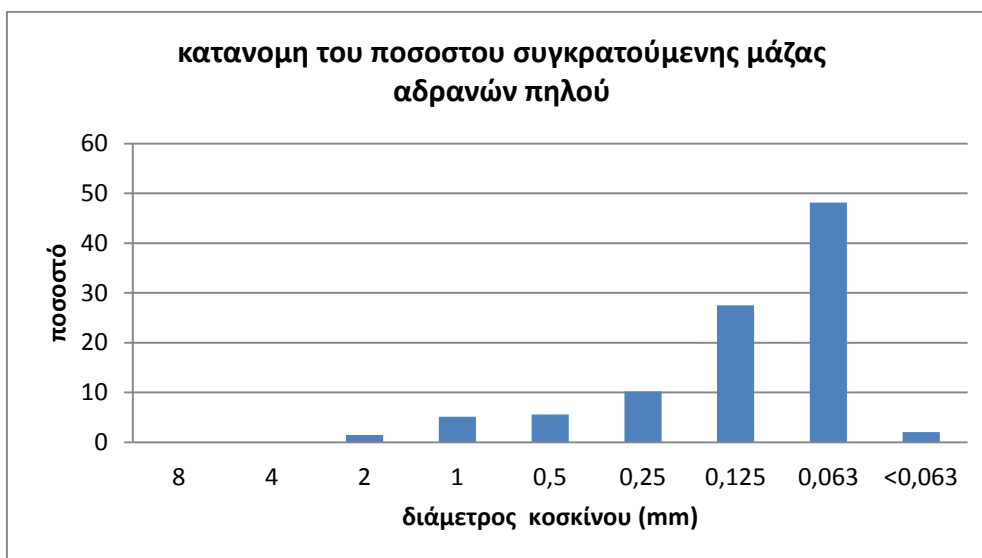
2. Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης με κόσκινα της άμμου του πηλού.

Αφού κρίθηκε απαραίτητη η προσθήκη άμμου έπρεπε να γίνει κοκκομετρική ανάλυση της άμμου του πηλού ώστε με την προσθήκη να επιτευχθεί μία ομαλή κοκκομετρική καμπύλη. Προκειμένου να απομακρυνθεί η ιλύς και η άργιλος από το εδαφικό δείγμα χρησιμοποιήθηκε το κόσκινο με άνοιγμα βροχίδας 0,063 mm. Το διερχόμενο υλικό από αυτό το κόσκινο συνιστούν το κλάσμα της άργιλος και της ιλύος και απομακρύνθηκαν αφού το δείγμα είχε προηγουμένως υγρανθεί. Το συγκρατούμενο υλικό συνιστά το κλάσμα της άμμου που αφού ξηράνθηκε στους 110°C έδωσε την παρακάτω κοκκομετρική καμπύλη:



Σχήμα 6.1: Ποσοστό διερχόμενου υλικού από κάθε κόσκινο (άμμος πηλού)

Όπως φαίνεται στην παραπάνω καμπύλη η άμμος του πηλού είναι στο μεγαλύτερο ποσοστό της λεπτή, με διάμετρο κόκκου μικρότερη από 0,2 mm και σε ένα μικρότερο ποσοστό μέση με διάμετρο από 0,2 mm έως 0,6 mm ενώ το ποσοστό της χονδρής άμμου από 0,6-1mm και 1-2mm είναι πολύ μικρό. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουμε βλέποντας και το παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 6.2: Ποσοστό συγκρατούμενου υλικού σε κάθε κόσκινο (άμμος πηλού)

3. Αποτελέσματα έλεγχου οργανικής ουσίας.

Όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο η ύπαρξη οργανικών προσμίξεων στο χώμα μπορεί να έχει ιδιαίτερα αρνητική επίδραση σε δομικά στοιχεία από πηλό. Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δοθεί στην ύπαρξη χούμου, που έχει μικρές μηχανικές αντοχές, περιεχόμενη υγρασία από 100-500%, είναι όξινος με PH μικρότερο του 6 και μειώνει σημαντικά τη συνοχή. Για αυτό και σε όλη τη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι το επιλεγμένο χώμα πρέπει να προέρχεται από βάθος μεγαλύτερο των 40 cm. Ένα γενικό όριο όπως προειπώθηκε είναι το ποσοστό της οργανικής ουσίας να μην ξεπερνά το 2-4%. Η ύπαρξη οργανικών προσμίξεων δίνει στο χώμα μια έντονη οσμή μούχλας και χρώμα συνήθως σκούρο καφέ προς μαύρο (Houben & Guillaud, 1994).

Στον έλεγχο οργανικής ουσίας που έγινε στο χώμα διαπιστώθηκε ότι υπάρχει οργανική ουσία σε ποσοστό 0,078%.

4. Αποτελέσματα Προσδιορισμού ολικών διαλυτών αλάτων.

Η ύπαρξη μεγάλου ποσοστού διαλυτών αλάτων μπορεί να οδηγήσει τόσο σε αισθητικά προβλήματα με τις εξανθήσεις αλάτων στην επιφάνεια της τοιχοποιίας, όσο και σε δομικά με την κρυστάλλωση αλάτων στο εσωτερικό και την διάρρηξη των πόρων του υλικού. Σε κατασκευές από πηλό οδηγούν σε μια πιο ψαθυρή συμπεριφορά των δομικών στοιχείων. Το όριο το οποίο τα διαλυτά άλατα δεν πρέπει να υπερβούν προκειμένου να μην προκληθεί φθορά είναι ο 3%.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα στο χώμα από τον Άγιο Στέφανο υπολογίστηκε σε 2,9 mhos /cm και το ποσοστό των ολικών διαλυτών αλάτων που προκύπτει από αυτό είναι 0,21%.

5. Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυση αδρανών

Στην κοκκομετρική διαβάθμιση των κονιαμάτων προτιμάται η χρήση αδρανών με σχετικά μεγάλο εύρος προκειμένου να καλύπτονται οι μικροί κόκκοι τα κενά που αφήνουν οι μεγαλύτεροι. Επιδιώκεται όμως το <0,25mm κλάσμα να είναι το 10-25% του συνολικού βάρους της άμμου. Εάν το κλάσμα αυτό αντιπροσωπεύει ποσοστό μικρότερο του 10%, τότε θα υπάρξουν κενά και τότε θα πρέπει να προστεθεί κονία για να βελτιωθεί η εργασιμότητα. Αυξημένο όμως ποσοστό κονίας θα οδηγήσει σε ρωγμές λόγω αυξημένης συστολής ξήρανσης. Όταν όμως υπάρχουν αδρανή υλικά με αυξημένο λεπτόκοκκο κλάσμα (με μέγεθος κόκκου μικρότερο των 63μm) σε ποσοστό μεγαλύτερο του 5% τότε δημιουργείται έντονο πρόβλημα καθόσον καλύπτονται οι κόκκοι του αδρανούς. Το λεπτόκοκκο αυτό κλάσμα λέγεται παιπάλη. Σε γενικές γραμμές, όταν η κοκκομετρική σύνθεση είναι τέτοια ώστε να περιορίζει το ποσοστό των κενών λαμβάνονται ισχυρότερα κονιάματα (Τσίμας, 2001).

Τα παραπάνω δεν ισχύουν απόλυτα στα πηλοκονιάματα αφού έτσι και αλλιώς υπάρχουν αδρανή σε αρκετά μεγάλο ποσοστό με διαβάθμιση από 2μm έως 63μm, η ιλύς. Η βελτιστοποίηση πάντως της κοκκομετρικής σύνθεσης της άμμου μπορεί να επιφέρει σημαντική αύξηση της θλιπτικής αντοχής. Βάση της παραβολής Fuller για την καλή διαβάθμιση αδρανών στο σκυρόδεμα έχει προταθεί από τον Voeshan η παρακάτω ημιεμπειρική σχέση για τα δομικά στοιχεία από πηλό λαμβάνοντας υπόψιν το αργιλικό ποσοστό στο 10%.

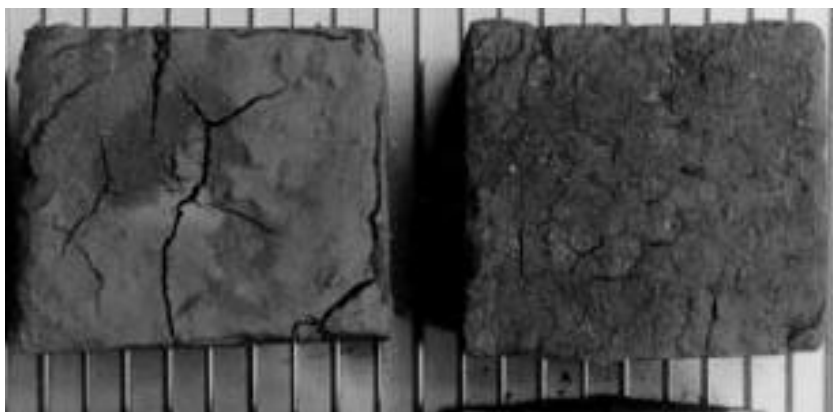
$$a = 100 \sqrt{\frac{d}{D} + 10}$$

Όπου:

a: είναι το βάρος των αδρανών με διάμετρο μικρότερη από d.

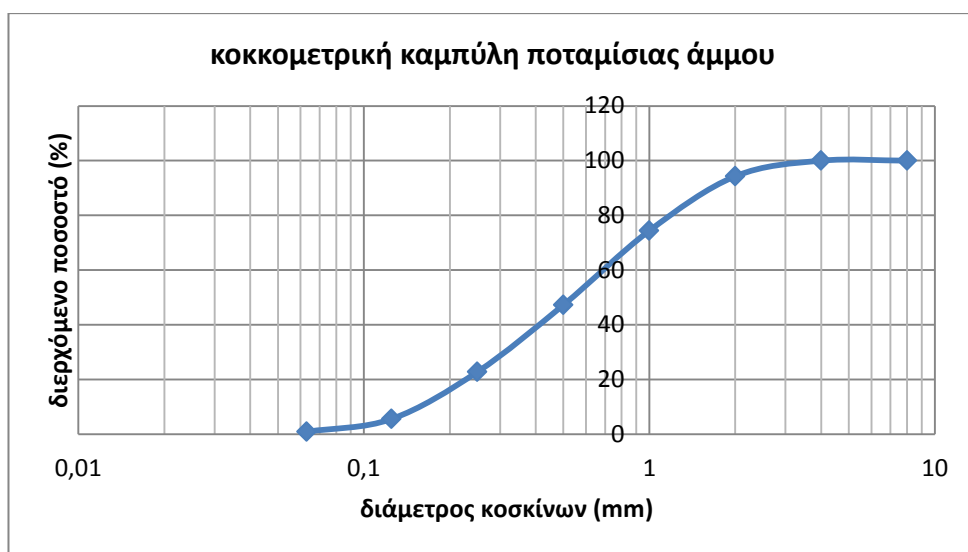
D: η διάμετρος του μέγιστου κόκκου (Minke, 2006).

Η επίδραση της διαβάθμισης της άμμου είναι σημαντική και στον βαθμό εμφάνισης ρωγμών συρρίκνωσης. Αυτό γίνεται φανερό και στο παρακάτω σχήμα. Τα δύο δοκίμια παρασκευάστηκαν με την ίδια άργιλο και ιλύ, σε ίδιες αναλογίες και την ίδια ποσότητα νερού. Η μόνη διαφορά ήταν ότι στο δεξιά δοκίμιο χρησιμοποιήθηκε μια καλά διαβαθμισμένη άμμος (Minke, 2006).

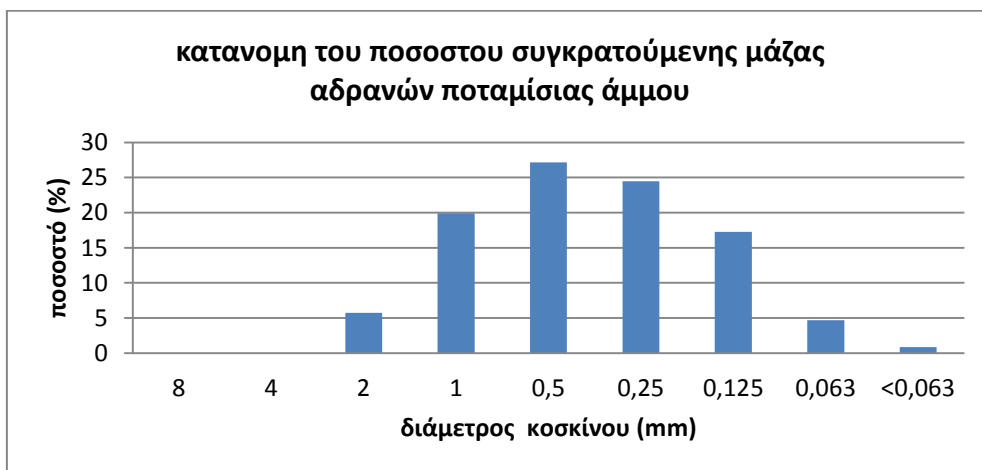


Εικόνα 6.1: Ρηγμάτωση για διαφορετική διαβάθμιση άμμου (Minke, 2006)

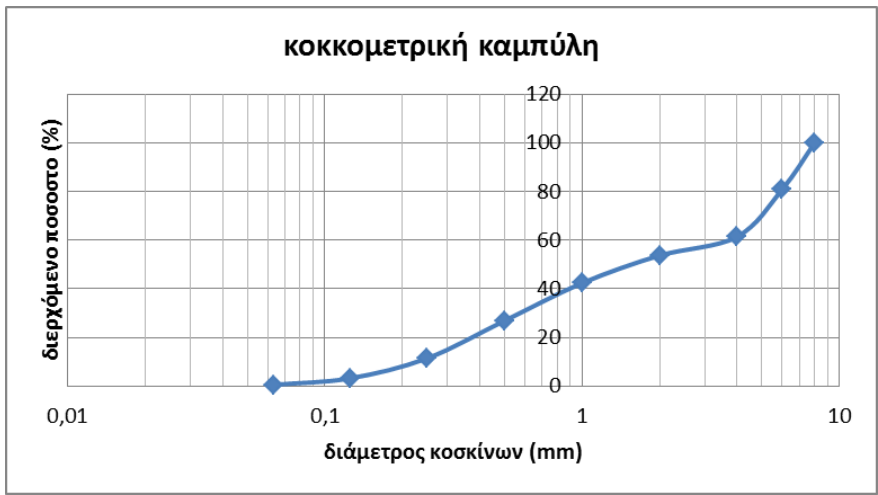
Παρακάτω παρατίθενται οι κοκκομετρικές καμπύλες της ποταμίσις άμμου που χρησιμοποιήθηκε στα συνδεδετικά κονιάματα, η καμπύλη των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν στον πυρήνα, η τελική κοκκομετρική καμπύλη του συνδεδετικού κονιάματος που προκύπτει από ανάμιξη 50% του χώματος του Άγιου Στέφανου και 50% άμμο και η τελική κοκκομετρική των αδρανών του πυρήνα που προκύπτει από ανάμιξη 60% αδρανών και 40% χώματος. Άρα βάσει της κοκκομετρικής ανάλυσης με αραιόμετρο που έχει γίνει στο χώμα, η άμμος του κονιάματος περιέχει κατά 77% την ποταμίσις άμμο και κατά 23% την άμμο του χώματος. Αντίστοιχα για τα αδρανή του κονιάματος του πυρήνα είναι 17% άμμος του χώματος και 83% ποταμίσις άμμος και αδρανή. Αυτό που παρατηρούμε στην τελική ανάμιξη των συνδεδετικών κονιαμάτων είναι ότι στα κόσκινα 0,125mm, 0,25mm, 0,5mm και 1mm έχουμε παρόμοια συγκράτηση υλικού που κυμαίνεται από 17-22%, ενώ έχουμε μικρότερη συγκράτηση στα κόσκινα των 0,063mm και 2mm. Γενικά η τελική κοκκομετρική καμπύλη είναι ομαλή χωρίς ιδιαίτερες μειώσεις η αυξήσεις της κλίσης της. Στις καμπύλες των αδρανών του πυρήνα έχουμε μια απότομη αύξηση της κλίσης μετά τα 4mm που οφείλεται στην προσθήκη του χαλικιού.



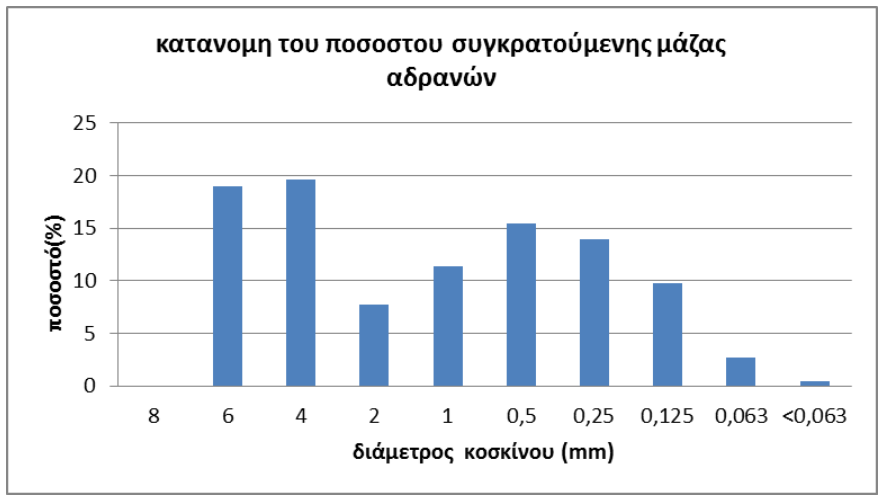
Σχήμα 6.3: ποσοστό διερχόμενου υλικού από κάθε κόσκινο (ποταμίσις άμμος)



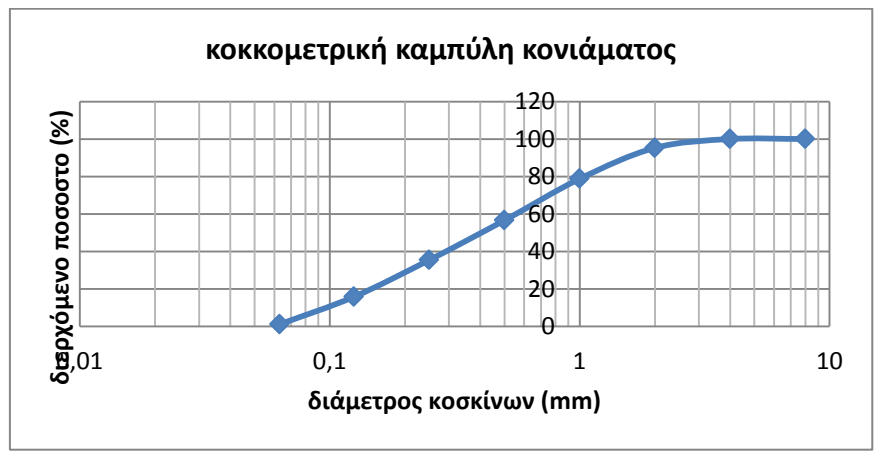
Σχήμα 6.4: Ποσοστό συγκρατούμενου υλικού σε κάθε κόσκινο(ποταμίσις άμμος)



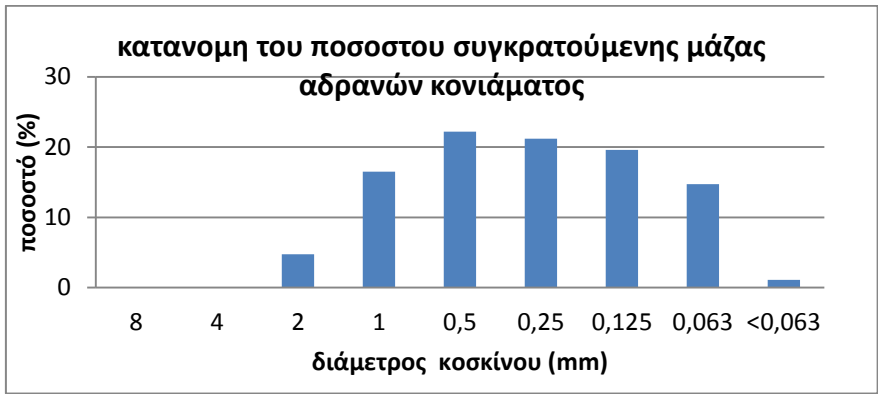
Σχήμα 6.5: ποσοστό διερχόμενου υλικού από κάθε κόσκινο (αδρανή κονιάματος πυρήνα)



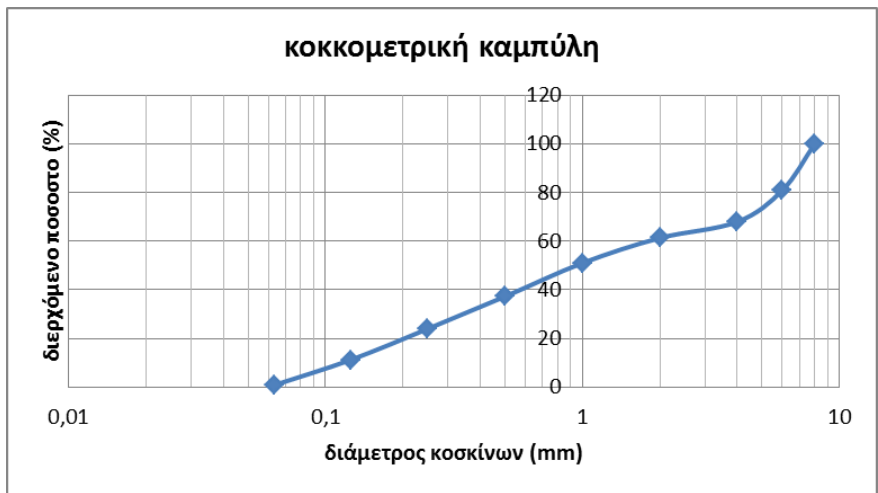
Σχήμα 6.6: : Ποσοστό συγκρατούμενου υλικού σε κάθε κόσκινο (αδρανή κονιάματος πυρήνα)



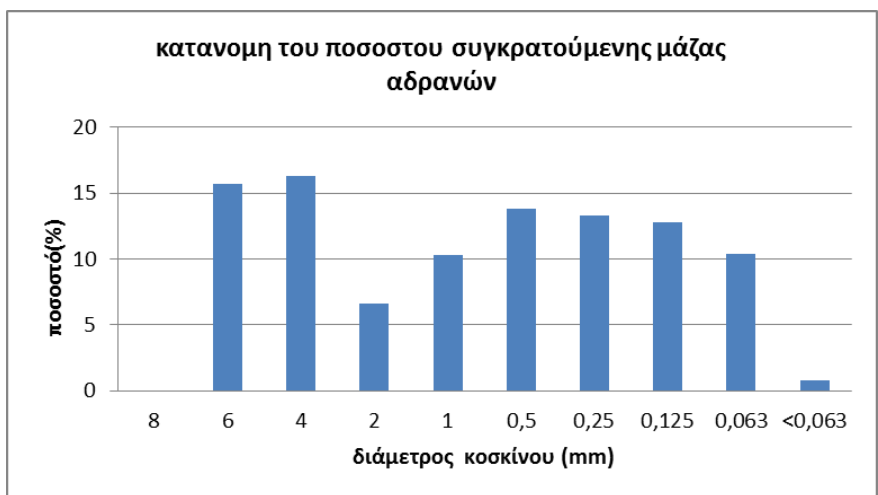
Σχήμα 6.7: ποσοστό διερχόμενου υλικού από κάθε κόσκινο (τελικό συνδετικό κονίαμα)



Σχήμα 6.8: Ποσοστό συγκρατούμενου υλικού σε κάθε κόσκινο (τελικό συνδετικό κονίαμα)



Σχήμα 6.9: ποσοστό διερχόμενου υλικού από κάθε κόσκινο (τελικό κονίαμα πυρήνα)



Σχήμα 6.10: Ποσοστό συγκρατούμενου υλικού σε κάθε κόσκινο (τελικό κονίαμα πυρήνα)

6.3 Παρασκευή πηλοκονιαμάτων

Παρασκευάστηκαν όπως γράφτηκε και παραπάνω δύο είδη κονιαμάτων. Το συνδετικό κονίαμα των αρμών, με μεγαλύτερο αργιλικό ποσοστό και άμμο 0-2 mm και το κονίαμα της εσωτερικής στρώσης, με μικρότερο αργιλικό ποσοστό και αδρανή 0-6mm. Αυτό έγινε για τον εξής λόγο: Όσο μεγαλώνει το αργιλικό ποσοστό μεγαλώνουν και οι αντοχές, αλλά ταυτόχρονα μεγαλώνει και η συστολή ξήρανσης. Αντίθετα όσο μεγαλώνει το ποσοστό των αδρανών και το εύρος της διαμέτρου τους μικραίνουν τόσο οι αντοχές όσο και η μεταβολή του όγκου. Επιδιώχθηκε το κονίαμα του πυρήνα να μην παρουσιάσει μεγάλη συστολή ώστε να μπορεί να συνδέσει τις στρώσεις μεταξύ τους χωρίς να έχουμε εμφάνιση μεγάλου εύρους ρωγμές στις διεπιφάνειες των στρώσεων. Οι αντοχές από την άλλη των κονιαμάτων της εσωτερικής στρώσης στις τρίστρωτες τοιχοποιίες είναι σύνηθες να έχουν μικρότερες αντοχές από τα συνδετικά κονιάματα των τοιχοσωμάτων. Για αυτό λοιπόν επιλέχθηκε τα κονιάματα του πυρήνα να είναι μεν πιο αδύναμα με μικρότερο αργιλικό ποσοστό και μεγάλο ποσοστό αδρανών, αλλά ταυτόχρονα να παρουσιάζουν μικρότερη συστολή. Η παρασκευή των αργιλοκονιαμάτων έγινε στο Εργαστήριο Τεχνικών Υλικών της σχολής Αρχιτεκτόνων μηχανικών του Ε.Μ.Π. και ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

6.3.1 Επεξεργασία του χώματος

Η προμήθεια του χώματος έγινε στα τέλη της άνοιξης και μέσα σε λίγες ημέρες στέγνωσε, δημιουργώντας συσσωματώματα ιδιαίτερης αντοχής που ήταν αδύνατον να σπάσουν με το χέρι. Το πρώτο βήμα ήταν λοιπόν ο **θρυμματισμός- κονιοποίηση** που έγινε με έναν βαρύ μεταλλικό κόπανο μέσα σε ένα μεταλλικό πλαίσιο. Η παραδοσιακή τεχνική είναι το χώμα να τοποθετείται σε αβαθή δοχεία ή λάκκους και να αφήνεται για δύο με τέσσερις μέρες προκειμένου να μετατραπεί σε μαλακή, εύπλαστη μάζα. Κάτι τέτοιο όμως θα καθιστούσε αδύνατο το κοσκίνισμα καθώς και τον ακριβή υπολογισμό κατά βάρος της αναλογίας χώματος-άμμου.



Εικόνα 6.2: θρυμματισμός του χώματος με μεταλλικό κόπανο

Το επόμενο βήμα ήταν το **κοσκίνισμα**. Σε αντίθεση με την μηχανή προσδιορισμού της κοκκομετρικής σύστασης που διέθετε όλη τη σειρά των πρότυπων κοσκίνων αλλά μπορούσε να δεχθεί μικρές ποσότητες, η μηχανή που χρησιμοποιήσαμε δεν είχε κόσκινο των 2 mm που ενδεχομένως θα ήταν πιο κατάλληλο. Το θρυμματισμένο χώμα λοιπόν τοποθετούνταν στο κόσκινο των 3mm σε μηχανή κοσκίνισματος που μπορούσε να δεχθεί περίπου 5 kg υλικού. Έτσι απομακρύνθηκαν τα χαλίκια και οι πέτρες που υπήρχαν σε αρκετά μικρό ποσοστό στο χώμα. Τα συσσωματώματα του εδάφους που δεν είχαν θρυμματιστεί στην πρώτη φάση, επανατοποθετούνταν στο μεταλλικό πλαίσιο και κοπανίζονταν πάλι. Έπειτα ακολουθεί η **ξήρανση** που έγινε με τοποθέτηση του κοσκινισμένου χώματος σε ανοιχτές λεκάνες για αρκετές εβδομάδες.



Εικόνα 6.3: κοσκίνισμα θρυμματισμένου χώματος



Εικόνα 6.4: Οι δύο μηχανές κοσκίνισματος και κοσκινισμένο χώμα

6.3.2 Ανάμιξη

Το νερό που θα προσθέσουμε κατά την ανάμιξη είναι ένας πολύ σημαντικό παράγοντας στα κονιάματα και δη στα πηλοκονιάματα. Προσθήκη μεγάλης ποσότητας νερού αυξάνει την εργασιμότητα αλλά μειώνει τις τελικές αντοχές και αυξάνει τη συρρίκνωση. Ο προσδιορισμός της προστιθέμενης ποσότητας νερού έγινε με την δοκιμή της τράπεζας εξάπλωσης και ως επιθυμητή εξάπλωση ορίστηκαν, βάση βιβλιογραφίας, τα 14 cm. Το κονίαμα τοποθετείται έτσι στο όριο ανάμεσα στο σκληρό κονίαμα (εξάπλωση έως 14 cm) και στο πλαστικό κονίαμα (εξάπλωση από 14 cm έως 20 cm) (CEMEX Mortars, 2012). Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι ο χρόνος ανάμιξης. Στο πανεπιστήμιο του Κάσσελ στη Γερμανία διαπιστώθηκε ότι στο ίδιο κονίαμα, ανάμιξη για δέκα λεπτά αντί για ένα, αύξησε την εφελκυστική αντοχή κατά 57% (Minke, 2006).

Η ανάμιξη έγινε σε ανοικτό κυλινδρικό αναμικτήρα με οριζόντιο κάδο, που διαθέτει τρία πτερύγια ανάδευσης με δυνατότητα κυκλικής κίνησης, ένα σταθερό πτερύγιο και ένα πτερύγιο χειρισμού που δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να ελέγχει τη ροή χειροκίνητα. Ο κάδος περιστρέφεται και αριστερόστροφα και δεξιόστροφα. Αρχικά τα υλικά ζυγίζονταν και τοποθετούνταν στον κάδο όπου αναμιγνύονταν εν ξηρώ έως ότου το μίγμα γίνει ομοιογενές. Στη συνέχεια προσθέταμε με αργό ρυθμό νερό μέχρι να φτάσει περίπου το 20% κατά βάρος των ξηρών υλικών. Από εκείνο το σημείο το νερό προστίθετο με πολύ προσοχή και ξεκίναγαν οι δοκιμές στην τράπεζα εξάπλωσης μέχρι να προσεγγιστούν τα 14 cm. Το χρησιμοποιούμενο νερό υπολογίστηκε στο 22-23%. Μόλις ικανοποιούνταν το προαπαιτούμενο των 14 cm το κονίαμα αναμιγνυόταν περαιτέρω για 5-7 λεπτά και με δεξιόστροφη κίνηση του κάδου και με αριστερόστροφη. Στο τέλος το κονίαμα τοποθετούνταν σε πλαστικά τσουβάλια τα οποία σφραγίζονταν προσεχτικά ώστε να μην έχουμε εξάτμιση του νερού αφού τις περισσότερες φορές επρόκειτο να χρησιμοποιηθεί την επόμενη μέρα.



Εικόνα 6.5: Ανάμιξη κονιαμάτων

6.3.3 Παρασκευή δοκιμών.

Μόλις το κονίαμα έφτανε στη επιθυμητή εξάπλωση και πριν τοποθετηθεί στα πλαστικά τσουβάλια λαμβανόταν τμήμα του προκειμένου να παρασκευαστούν δοκίμια. Τα δοκίμια αυτά φτιάχτηκαν με τοποθέτηση του κονιάματος σε μεταλλικές μήτρες διαστάσεων 4cm*4cm*16cm όπως ορίζεται από το πρότυπο EN 1015-11 (CEN, 1999), οι οποίες είχαν προηγουμένως τριφτεί, πλυθεί και αφού είχαν στεγνώσει είχαν περαστεί με ένα λεπτό στρώμα προστατευτικού λαδιού. Η τοποθέτηση έγινε σε δύο στρώσεις. Η πρώτη στρώση του νωπού κονιάματος

συμπυκνώθηκε με τη χρήση ειδικού για αυτό το σκοπό ξύλινου κόπανου, και η δεύτερη με κρούσεις της μήτρας στο πάτωμα. Η επάνω επιφάνεια επιπεδώθηκε με τη χρήση μεταλλικού χάρακα. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν βρεγμένα υφάσματα πάνω από τα νωπά κονιάματα προκειμένου να εξασφαλισθούν συνθήκες υψηλής υγρασίας τις πρώτες ημέρες και να εμποδιστεί η απότομη ξήρανση που θα οδηγούσε σε εκτεταμένη ρηγμάτωση.



Εικόνα6.6: Παρασκευή δοκιμίων διαστάσεων 4 cm*4 cm*16 cm

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΛΙΘΟΥ

7.1 Χαρακτηριστικά σκληρυμένων κονιαμάτων

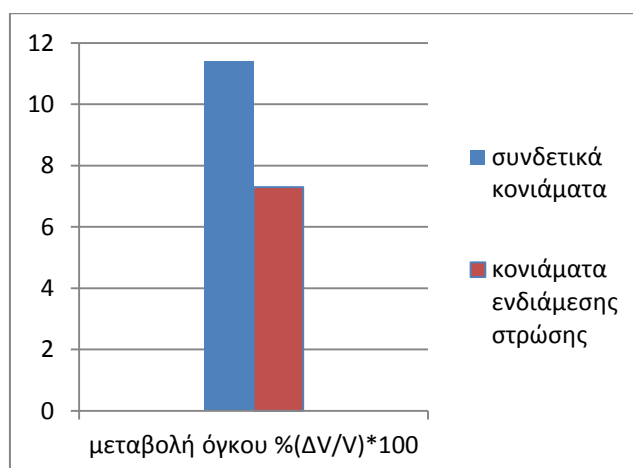
Η αποτίμηση των χαρακτηριστικών των κονιαμάτων έγινε στο Εργαστήριο Τεχνικών Υλικών της σχολής Αρχιτεκτόνων του Ε.Μ.Π., την περίοδο που έγινε ο πειραματικός προσδιορισμός της θλιπτικής αντοχής τοιχοποιίας προκειμένου να μπορεί να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις σχέσεις που προτείνονται από τη βιβλιογραφία. Προσδιορίστηκαν πειραματικά τα εξής χαρακτηριστικά των κονιαμάτων της ενδιάμεσης στρώσης και των αρμών:

1. η θλιπτική αντοχή
2. η καμπτική αντοχή (εφελκυστική αντοχή από κάμψη)
3. η αντοχή υπό άμεσο εφελκυσμό
4. το μέτρο ελαστικότητας
5. η μεταβολή του όγκου λόγω συστολής ξήρανσης

7.1.1 Αποτελέσματα μεταβολής του όγκου δοκιμίων πηλοκονιαμάτων (συστολή ξήρανσης)

Η πολύ μεγάλη μεταβολή του όγκου σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους κονιαμάτων και η συμπεριφορά τους απέναντι στο νερό είναι τα μεγάλα μειονεκτήματα των πηλοκονιαμάτων. Η μεγάλη αυτή μεταβολή του όγκου έχει σαν συνέπεια την δημιουργία ρωγμών και κενών στην τοιχοποιία που μπορεί να οδηγήσει στην απώλεια σύνδεσης λίθου-κονιάματος και στην αύξηση της ανομοιογένειας της.

Ο προσδιορισμός της μεταβολής του όγκου έγινε με μέτρηση με παχύμετρο και χάρακα και των τριών διαστάσεων των δοκιμίων που αρχικά ήταν 4cm*4cm*16cm. Τα κονιάματα του πυρήνα είχε επιδιωχθεί να έχουν μικρότερη μεταβολή του όγκου προκειμένου να παρουσιάσουν σε μικρότερο βαθμό ρωγμές συρρίκνωσης και να εξασφαλίσουν, όσο το δυνατόν γίνεται, τη σύνδεση μεταξύ των στρώσεων κάτι που φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 7.1: Μεταβολή όγκου κονιαμάτων πυρήνα και αρμών.

7.1.2 Αποτελέσματα μηχανικών χαρακτηριστικών κονιαμάτων (θλιπτική, καμπτική, εφελκυστική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας)

Η θλιπτική αντοχή είναι ανάλογη του αργιλικού κλάσματος και αντιστρόφως ανάλογη του κλάσματος της άμμου στη σύνθεση (Μπέη, 2004). Συνεπώς τα κονιάματα των αρμών παρουσίασαν αυξημένες αντοχές σε σχέση με τα κονιάματα της ενδιάμεσης στρώσης. Αυτό ήταν και ζητούμενο αφού στις τρίστρωτες τοιχοποιίες είναι σύνηθες το κονίαμα του πυρήνα να είναι πιο αδύναμο από το κονίαμα των αρμών. Και οι δύο τύποι κονιαμάτων παρουσίασαν πολύ καλά μηχανικά χαρακτηριστικά. Από κάτω παρατίθεται ένας από τους πίνακες από το λογισμικό της συσκευής που προσδιορίζει τις αντοχές, όπου φαίνεται το φορτίο που αστόχησαν τα δοκίμια του κονιαματος των αρμών. Συνολικά υποβλήθηκαν σε κάμψη και θλίψη επτά πρισματικά δοκίμια του κονιαματος των αρμών και τρία δοκίμια του κονιαματος της ενδιάμεσης στρώσης.

Nr	Evaluation	ID	Shape	F _m kN
1	3-Point flexure tes		Prism 16	0,5
2	Compression tests		Prism 16	5,5
3	Compression tests		Prism 16	5,8
5	3-Point flexure tes		Prism 16	0,3
6	Compression tests		Prism 16	6,1
7	Compression tests		Prism 16	5,6
8	3-Point flexure tes		Prism 16	0,5
9	Compression tests		Prism 16	6,1
10	Compression tests		Prism 16	5,6

Σχήμα 7.2: φορτίο αστοχίας σε θλίψη και κάμψη πρισματικών δοκιμίων

Η καμπτική αντοχή προκύπτει με χρήση της σχέσης: $f = \frac{1,5 \cdot F \cdot l}{b \cdot d^2}$ και η θλιπτική αντοχή χρήση της σχέσης: $f = \frac{F}{A}$. Η εφελκυστική αντοχή προσδιορίστηκε πειραματικά με συσκευή άμεσου εφελκυσμού σε δοκίμια σχήματος οκτώ για τα κονιάματα των αρμών. Ο μέσος όρος των αντοχών παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

	Κονιάματα ενδιάμεσης στρώσης (πυρήνα)	Συνδετικά κονιάματα (αρμών)
Θλιπτική αντοχή(MPa)	2,75	3,9
Καμπτική αντοχή(MPa)	0,9	1,2
Εφελκυστική αντοχή(MPa)		0,7

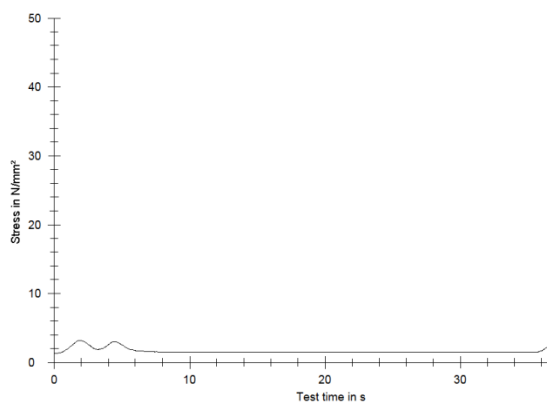
Πίνακας 7.1: μηχανικά χαρακτηριστικά κονιαμάτων

Έγινε προσπάθεια υπολογισμού και του μέτρου ελαστικότητας των συνδετικών κονιαμάτων που είχαν και μεγαλύτερη αντοχή. Η συσκευή υπολογισμού του όμως ήταν καλιμπραρισμένη για ισχυρότερα κονιάματα και το πρότυπο αναφέρεται σε τσιμεντοκονιάματα, με αποτέλεσμα τα δοκίμια να αστοχούν κατά το τελευταίο στάδιο της δοκιμής. Η τιμή 2900 MPa, αν και ανταποκρίνεται στη βιβλιογραφία, πρέπει να γίνει δεκτή με πολύ επιφύλαξη. Ακολουθεί το διάγραμμα από το λογισμικό της συσκευής όπου φαίνονται οι δύο πρώτες φορτίσεις και η θραύση κατά την τρίτη.

ults:

Nr	EmDIN1048-5 N/mm ²	EmISO 6784 N/mm ²
3	2900,00	2900,00

es graphics:



Σχήμα 7.3: υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας

7.2 Θλιπτική αντοχή λίθου

Οι λίθοι που χρησιμοποιήθηκαν για το χτίσιμο των τοίχων είναι από την περιοχή της Παραμυθιάς. Προκειμένου να υπολογιστεί η θλιπτική αντοχή έπρεπε να κοπούν δοκίμια διαστάσεων 5cm*5cm*5cm. Η κοπή λίθων έγινε σε μαρμαράδικο στο Μαρούσι με χρήση τροχού σε συνδυασμό με ρίψη νερού. Τα δοκίμια που προέκυψαν υποβλήθηκαν σε μονοαξονική θλίψη τόσο παράλληλα όσο και κάθετα στα νερά του πετρώματος. Η θλιπτική

αντοχή που προέκυψε παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα και βάσει της κατάταξης της σελίδας 61 το πέτρωμα χαρακτηρίζεται σκληρό.

Αντοχή κάθετα στα νερά (MPa)	107,5
Αντοχή παράλληλα στα νερά (MPa)	83,5

Πίνακας 7.2: Θλιπτική αντοχή λιθοσωμάτων



Εικόνα 7.1: δημιουργία δοκιμών λίθου

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΡΙΣΤΡΩΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

Συνολικά τρία δοκίμια λιθοδομής με συνδεδειγμένο αργιλοκονίαμα υποβλήθηκαν σε δοκιμή μονότονης θλίψης. Σκοπός ήταν ο προσδιορισμός των καμπυλών μεταβολής της θλιπτικής τάσης σε σχέση με την κατακόρυφη και την εγκάρσια παραμόρφωση, καθώς και η εύρεση της θλιπτικής αντοχής, του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου του Poisson της τοιχοποιίας.

8.1 Κατασκευή δοκιμών τοιχοποιίας

Ένα από τα κύρια ζητούμενα της παρούσας εργασίας ήταν ο προσδιορισμός των μηχανικών και ελαστικών χαρακτηριστικών τριστρωτης τοιχοποιίας με κονίαμα δόμησης μη σταθεροποιημένο αργιλοκονίαμα. Πιο συγκεκριμένα, και από τη στιγμή που η τοιχοποιία δέχεται κυρίως θλιπτικά φορτία, επιδιώχθηκε ο προσδιορισμός της θλιπτικής αντοχής και των εγκάρσιων και κατακόρυφων παραμορφώσεων όταν η τοιχοποιία υπόκειται σε μονότονη, επίπεδη φόρτιση εντός του επιπέδου της, αλλά και ο η καταγραφή του τρόπου αστοχίας της. Η κατασκευή των δοκιμών τοιχοποιίας και ο προσδιορισμός των μηχανικών χαρακτηριστικών τους έγινε στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας της σχολής Πολιτικών μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Από τη στιγμή που δεν υπάρχει κάποιο πρότυπο να καλύπτει τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής τριστρωτης τοιχοποιίας ακολουθήθηκε, στο βαθμό που ήταν εφικτό για αυτήν την τυπολογία, η διαδικασία και τα χαρακτηριστικά του πρότυπου EN που αναφέρεται σε «κανονική» τοιχοποιία (ΕΛΟΤ EN 1052-01, 1998). Οι διαστάσεις των δοκιμών ήταν 70cm*55cm*50cm και το πάχος του αρμού από 10-20mm. Το να πετύχουμε ενιαίο πάχος αρμού ήταν ανέφικτο δεδομένου ότι οι λίθοι ήταν μεν ημιλαξευμένοι αλλά δεν παρουσίαζαν ίδιο πάχος, ύψος και πλάτος σε όλες τις πλευρές τους σε επίπεδο μονάδας αλλά είχαν και αρκετά διαφορετικές διαστάσεις μεταξύ τους. Για το χτίσιμο των εξωτερικών στρώσεων χρησιμοποιήθηκαν κάποιοι μεγάλοι λίθοι και κάποιοι μικροί.

- Οι μεγάλοι λίθοι που χρησιμοποιήθηκαν είχαν βάρος από 10 έως 13 kg, το ύψος τους ήταν από 9 έως 12 cm, το μήκος τους από 29 έως 35 cm και το πλάτος τους από 15 έως 18 cm.
- Οι μικροί λίθοι είχαν βάρος από 3,5 έως 6kg, ύψος από 8 έως 11 cm και το πλάτος και το μήκος τους ήταν παρόμοια από 13 έως 17 cm.
- Χρησιμοποιήθηκαν επίσης και κάποιοι πολύ μικροί λίθοι ποικίλου βάρους και διαστάσεων τα λεγόμενα τσιβίκια η αναθρέμματα προκειμένου να καλύπτουν κενά και να πατάνε καλά οι λίθοι της επόμενης στρώσης. Αυτοί οι πολύ μικροί λίθοι παίρνονταν ανάλογα με το τι είχαμε ανάγκη με το σπάσιμο μεγάλων λίθων με μεταλλικό σφυρί η βαριά.

Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν πάνω σε μεταλλικές λάμες ειδικά διαμορφωμένη για αυτό το σκοπό. Στα πλάγια της κάθε λάμας προσκολλήθηκαν με χρήση σφινγκτήρων μεταλλικοί ορθοστάτες, οι οποίοι με αλφάδι τοποθετήθηκαν εντελώς κατακόρυφοι. Σε κάθε ζεύγος ορθοστατών δέθηκαν προσεχτικά και τεντώθηκαν δύο σπάγκοι με δυνατότητα κατακόρυφης κίνησης τα λεγόμενα ράμματα που χρησιμεύουν ως οδηγό κατακόρυφωσης του τοίχου.

Μεταξύ της λάμας και της πρώτης στρώσης των λίθων απλώθηκε μια λεπτή στρώση πηλοκονιάματος. Κάθε φορά που μία στρώση ή ένα δοκίμιο τοιχοποιίας ολοκληρωνόταν σκεπαζόταν με λινάτσα ώστε να μην είναι σε άμεση επαφή με την ηλιακή ακτινοβολία και διαβρεχόταν τακτικά για περίοδο μίας βδομάδας ώστε να περιοριστεί η συστολή ξήρανσης.

Οι εξωτερικές στρώσεις χτίστηκαν δρομικές χωρίς την τοποθέτηση μπατικών ή διάτονων λίθων καθώς θεωρήσαμε ότι κάτι τέτοιο είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα. Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα ήταν η επιλογή κάθε φορά του κατάλληλου λίθου ώστε αφενός να έχουν επαρκές πλάτος και να πατάνε καλά στην υποκείμενη στρώση και αφετέρου οι λίθοι κάθε στρώσης να έχουν περίπου το ίδιο ύψος και τα μήκη τους αθροιστικά να είναι λίγο μικρότερα ή ίδια με το μήκος της υποκείμενης στρώσης, ώστε να μην δημιουργείται μεγάλος κατακόρυφος αρμός, ούτε να έχουμε μεγάλη ελάττωση του μήκους καθ' ύψος του δοκιμίου. Πολλοί λίθοι παρουσίαζαν διαφορετικό μήκος μεταξύ των δύο προσώπων τους και διαφοροποίηση του ύψους και του πλάτους στο μήκος τους, κάτι που δυσκόλευε πολύ την επιλογή κάθε φορά του καταλληλότερου. Πριν από την τοποθέτησή τους τα λιθοσώματα διαβρέχονταν και τρίβονταν προκειμένου να απομακρυνθούν χώματα και φυτικά υπολείμματα που είχαν στην επιφάνεια τους. Η δόμηση των εξωτερικών στρώσεων έγινε ως εξής:

A στρώση. Πάνω στη λεπτή στρώση του κονιάματος που κάλυψε τη μεταλλική λάμα, τοποθετούνταν δύο αρκετά μεγάλοι λίθοι ώστε η κατώτερη στρώση να έχει όσο το δυνατόν μικρότερο κατακόρυφο αρμό και επαρκές πλάτος ώστε να πατήσουν καλά οι επόμενες στρώσεις. Στη συνέχεια χτυπιούνταν ελαφρά στο κέντρο τους με το κάτω μέρος του μεταλλικού σφυριού ώστε να αυξηθεί η συνάφεια λίθου-κονιάματος και να μειωθεί η ποσότητα του χρησιμοποιούμενου κονιάματος. Για να διαπιστωθεί αν βρίσκονταν στο ίδιο κατακόρυφο επίπεδο γινόταν οπτικός έλεγχος με τα ράμματα και για να δούμε αν βρίσκονται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο χρησιμοποιούσαμε αλφάδι. Βέβαια το τελευταίο δεν ήταν πάντα απόλυτα εφικτό λόγω των αρκετά μεγάλων αποκλίσεων που παρουσίαζαν τα λιθοσώματα στο ύψος τους. Στη συνέχεια πληρωνόταν ο κατακόρυφος αρμός και η κεφαλή των λίθων με κονίαμα.

B στρώση. Με άξονα τον κατακόρυφο αρμό της πρώτης στρώσης τοποθετούνταν ένας μεγάλος λίθος, ώστε να αποφευχθεί συνεχής κατακόρυφος αρμός που είναι από τα σημαντικότερα δομικά λάθη, και δεξιά και αριστερά του δύο μικροί λίθοι. Σε στρώσεις με έναν μεγάλο λίθο και δύο μικρούς ήταν πολύ συχνή η χρήση μικρότερων λίθων καθώς το σχήμα των μικρών λίθων απείχε τις περισσότερες φορές από το ορθογώνιο. Ακολουθούσε πάλι χτύπημα με το σφυρί και έλεγχος για το κατακόρυφο και οριζόντιο επίπεδο.

Γ,Δ,Ε στρώση. Η τρίτη και η πέμπτη στρώση ήταν παρόμοιες με την πρώτη και η τέταρτη με τη δεύτερη. Εξαιτίας της ανομοιομορφίας των λίθων υπήρχε μία μικρή ελάττωση του πλάτους της εξωτερικής στρώσης καθ' ύψος του δοκιμίου. Ένα πρόβλημα που αντιμετωπίσαμε σε αυτές τις στρώσεις ήταν το να τις φέρουμε στο ίδιο κατακόρυφο επίπεδο με τις υποκείμενες. Καθώς οι λίθοι ήταν ημίξεστοι, παρουσίαζαν συχνά μια διαφοροποίηση του ύψους τους κατά πλάτος, με αποτέλεσμα να πρέπει να βρούμε τη χρυσή τομή ανάμεσα στο λιθοσώμα να πατήσει καλά και να έρθει περασιά με τον υποκείμενο λίθο.

Εσωτερική στρώση-πυρήνας τοιχοποιίας: Το πλάτος της εσωτερικής στρώσης ήταν περίπου 15-17 cm και χρησιμοποιήθηκε το κονίαμα που αναφέρθηκε στο έκτο κεφάλαιο. Δομήθηκε με εναλλασσόμενες στρώσεις κονιάματος και μικρών λίθων που τους παίρναμε σπάζοντας με βαριά μεγαλύτερους. Οι λίθοι αυτοί πιέζονταν ελαφρά ώστε να μην έχουμε πολύ παχιές στρώσεις κονιάματος.

Ακολουθούν φωτογραφίες από τη διαδικασία χτισίματος των δοκιμίων.



Εικόνα 8.1: πίσω όψη_ τοποθέτηση λίθου



Εικόνα 8.2: μπροστά όψη_ απομάκρυνση
περίσσειας κονιάματος



Εικόνες 8.3 και 8.4: Δεξιά(8.4)_ Στρώση κονιάματος ανάμεσα στη μεταλλική λάμα και την πρώτη στρώση λίθων.
Αριστερά(8.3)_ Τοποθέτηση μικρού λίθου ανάμεσα στα λιθοσώματα προκειμένου να γεφυρωθεί το κενό.

Με μια μικρή βοήθεια!



Εικόνες 8.5 και 8.6: Αριστερά(8.5)_Οπτικός έλεγχος με τα ράμματα για τη σωστή τοποθέτηση στο κατακόρυφο επίπεδο. Δεξιά(8.6)_Τοποθέτηση μικρών λίθων στον πυρήνα.



Εικόνες 8.7 και 8.8: Αριστερά(8.7)_ Στρώσεις κονιάματος και λίθων στην εσωτερική στρώση. Δεξιά(8.8)_ Το δοκίμιο ολοκληρωμένο



Εικόνες 8.9 και 8.10: Αριστερά(8.9)_ Εξωτερικές στρώσεις που μόλις έχουν τελειώσει. Δεξιά(8.10)_ Η εσωτερική στρώση που μόλις έχει τελειώσει.

8.2 Προετοιμασία και ενοργάνωση των δοκιμίων

Για την μέτρηση των μετατοπίσεων χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα. Τοποθετήθηκαν δύο μηκυνσιόμετρα σε κάθε εξωτερική στρώση για την μέτρηση των κατακόρυφων μετατοπίσεων, και ένα σε κάθε όψη, δηλαδή τέσσερα στο σύνολο, για την μέτρηση των οριζώντιων μετατοπίσεων. Τα δοκίμια μεταφέρθηκαν με κλαρκ στον χώρο της δοκιμής και δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή ώστε να τοποθετηθούν κεντρικά ως προς τον άξονα φόρτισης. Πριν τις δοκιμές τοποθετήθηκε ένα λεπτό στρώμα γύψου με ξύλινο καλούπι στην άνω επιφάνεια κάθε δοκιμίου προκειμένου αυτή να επιπεδωθεί και να κατανεμηθούν καλύτερα τα φορτία. Η ομοιόμορφη κατανομή των φορτίων βέβαια δεν είναι αναμενόμενη σε ένα τόσο ανομοιογενές δομικό στοιχείο όπως η τριστρωτη τοιχοποιία, αλλά ούτε και απόλυτο ζητούμενο της παρούσας εργασίας. Αυτό γιατί πέρα από την ανομοιογένεια, σε πραγματικές συνθήκες φόρτισης είναι πολύ σύνηθες οι εσωτερική και εξωτερική στρώση να βρίσκονται σε διαφορετική εντατική κατάσταση λόγω στεγών, τόξων ή πλακών τα φορτία των οποίων δεν κατανέμονται ομοιόμορφα.



Εικόνα 8.11: ξύλινο καλούπι στο οποίο χύνεται ρευστό γυψοκονίαμα



Εικόνα 8.12: Τοποθέτηση μεταλλικής πλάκας με χρήση αλφαδιού πάνω στο γυψοκονίαμα. Θέσεις μηκυνσιόμετρων.

8.3 Πειραματικά αποτελέσματα

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν ξεχωριστά τα μηχανικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων καθώς και η μορφή της αστοχίας τους. Οι δοκιμές έγιναν ύστερα από έξι μήνες ωρίμανσης των κονιαμάτων. Η γενική εικόνα της αστοχίας είναι κοινή, με την δημιουργία κατακόρυφων εφελκυστικών ρωγμών στις εξωτερικές στρώσεις που διαπερνούν τόσο το κονίαμα όσο και τους λίθους και ρωγμών αποκόλλησης στη διεπιφάνεια εσωτερικής και εξωτερικής στρώσης, που και πάλι παρατηρήθηκε να διέρχονται από τους λίθους κυρίως όταν αυτοί είχαν διαφορετικό πλάτος καθ' ύψος. Παρατηρήθηκε επίσης φούσκωμα των εξωτερικών στρώσεων λόγω εγκάρσιων εφελκυστικών φορτίων που δημιουργούνται από την μεγάλη παραμόρφωση του πυρήνα. Θα ονομαστούν Π1 και Π2 η μπροστά και πίσω όψη αντίστοιχα και Π3 και Π4 η πλάγια δεξιά και πλάγια αριστερά όψη των δοκιμίων.

8.3.1 Πρώτο δοκίμιο

Η ρηγμάτωση αυτού του δοκιμίου ξεκινάει από τον κατακόρυφο αρμό της πέμπτης στρώσης της Π1 και διαπερνάει τον μεσαίο λίθο της τέταρτης στρώσης σε αρκετά χαμηλή φόρτιση. Οι επόμενες ρωγμές που γίνονται εμφανείς είναι στον αριστερά λίθο πέμπτης στρώσης της Π1 καθώς και ρωγμές αποκόλλησης μεταξύ των στρώσεων που γρήγορα διευρύνονται. Καθώς πλησιάζουμε στην αστοχία γίνεται εμφανές το φούσκωμα των εξωτερικών παρειών λόγω εκτός επιπέδου κάμψης και ρωγμές στο σύνολο σχεδόν των λίθων. Στην φάση της αστοχίας παρατηρείται αποφλοίωση τμημάτων των λίθων. Η κατανομή των φορτίων δεν ήταν ομοιόμορφη στις δύο στρώσεις και έτσι οι ρωγμές στην πίσω όψη, αν και εκτείνονται πάλι σχεδόν στο σύνολο των λίθων και ακολουθούν την ίδια περίπου σειρά με την μπροστά όψη, δεν παρουσιάζουν τόσο μεγάλο εύρος. Ακολουθεί φωτογραφική αποτύπωση.



Εικόνες 8.13 και 8.14: Αριστερά(8.13)_ εμφάνιση πρώτης ρωγμής. Δεξιά(8.14)_ εμφάνιση ρωγμών αποκόλλησης.



Εικόνες 8.15 και 8.16: Αριστερά(8.15)_μορφή αστοχίας μπροστά στρώση. Δεξιά(8.16) _λεπτομέρεια θρυμματισμού αριστερού λίθου.

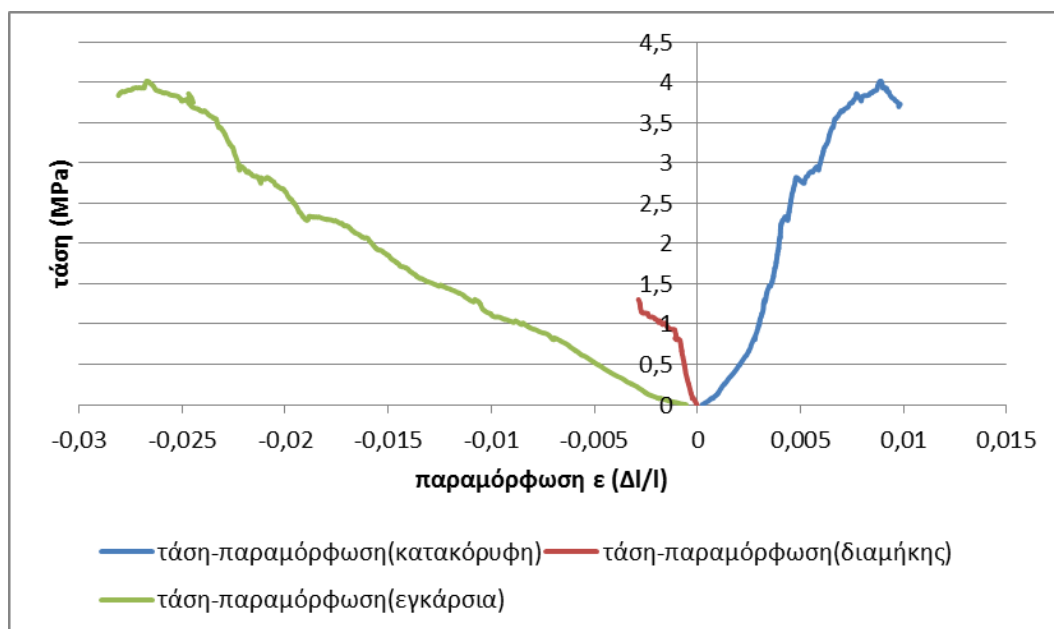


Εικόνες 8.17 και 8.18: Αριστερά(8.17)_ ρωγμές αποκόλλησης των στρώσεων που διέρχονται και από τους λίθους με ταυτόχρονο φούσκωμα. Δεξιά(8.18)_ Μορφή αστοχίας πίσω στρώση.

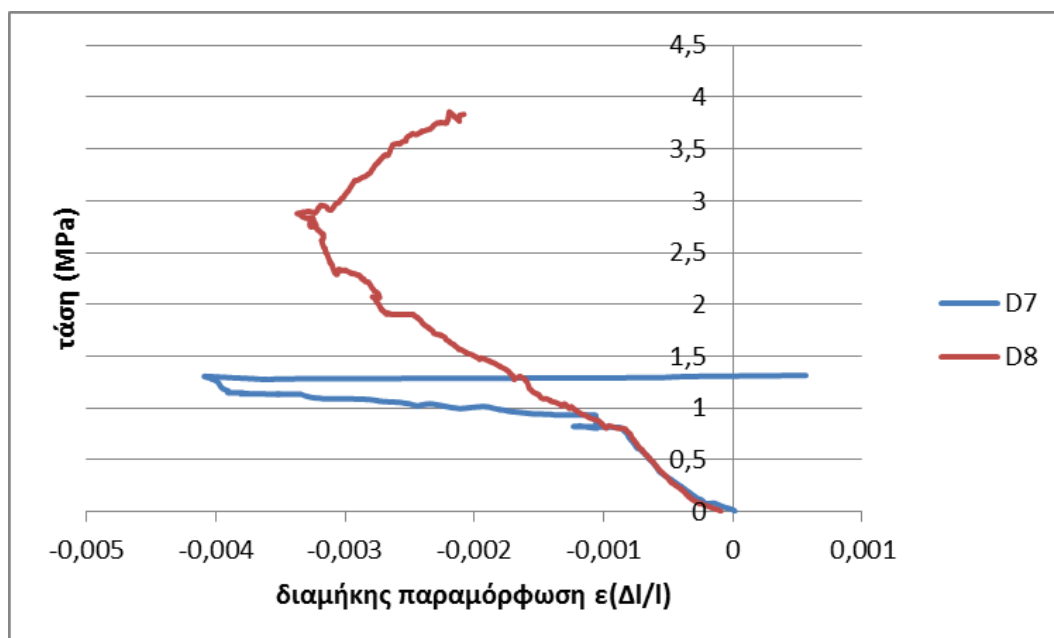
Η μεγαλύτερη τάση που καταγράφηκε είναι $f_{wc}=4,01\text{MPa}$. Το μέτρο ελαστικότητας υπολογίστηκε στο 30% στο 70% και στο 100% της τελικής αντοχής. Για τον προσδιορισμό του λήφθηκε η μέση κατακόρυφη παραμόρφωση από τα τέσσερα όργανα στις εξωτερικές παρειές. Αξιοσημείωτο είναι ότι παρουσίασε χαμηλές γενικά τιμές και σταδιακή αύξηση μέχρι το 70% της φόρτισης οπότε αρχίζει να μειώνεται. Στο 30% είναι $E_w=377,8\text{ MPa}$, στο 70% είναι $E_w=535,11\text{ MPa}$ και στο 100% είναι $451,02\text{ MPa}$.

Ο λόγος Poisson υπολογίστηκε και για την διαμήκη και για την εγκάρσια διεύθυνση. Ο σχηματισμός ρωγμής στην Π1 στη θέση συγκόλλησης του μηκυσιομέτρου και η πτώση του τελευταίου καθιστά προβληματικές τις μετρήσεις της παραμόρφωσης στην μία εξωτερική στρώση οπότε ο λόγος προσδιορίστηκε και βάση της οριζόντιας και κατακόρυφης παραμόρφωσης της Π2. Η εγκάρσια παραμόρφωση είναι πολύ μεγαλύτερη και από την διαμήκη και από την κατακόρυφη και άρα και ο λόγος Poisson ιδιαίτερα υψηλός. Οι εγκάρσιες παραμορφώσεις εξάλλου είναι αυτές που οδηγούν στην αστοχία. Στο 30% της τελικής αντοχής ($1,2\text{ MPa}$) ο λόγος είναι $-0,86$ αφού η ρωγμή έχει ήδη ανοίξει, ενώ το μηκυσιόμετρο πέφτει στα $1,3\text{ MPa}$ και δεν έχουμε μετρήσεις της διαμήκους παραμόρφωσης στην πλευρά Π1. Αν λάβουμε υπόψιν τις διαμήκεις παραμορφώσεις της πλευράς Π2 και τις συσχετίσουμε με τις κατακόρυφες παραμορφώσεις της ίδιας πλευράς έχουμε στο 30% του φορτίου ο λόγος είναι $\nu_{diam} = -0,37$, στο 70% είναι $\nu_{diam} = -0,6$ και στο 100% $\nu_{diam} = -0,31$. Αν λάβουμε τον συνολικό

Poisson στα 0,93 MPa, πριν το άνοιγμα της ρωγμής, δηλαδή στο 23% της αντοχής είναι $\nu_{\text{διαμ}} = -0,38$. Στην εγκάρσια διεύθυνση λόγω των μεγάλων τιμών ο λόγος Poisson χρησιμοποιείται καταχρηστικά. Στο 30% είναι $\nu_{\text{εγκ}} = -3,2$, στο 70% είναι $\nu_{\text{εγκ}} = -4,3$ και στο 100 % $\nu_{\text{εγκ}} = -3,01$. Το άνοιγμα της ρωγμής στα 0,9 MPa και η πτώση του οργάνου στα 1,2MPa φαίνονται στο διάγραμμα τάσης-διαμήκους παραμόρφωσης που ακολουθεί.



Σχήμα 8.1: Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων πρώτου δοκιμίου



Σχήμα 8.2: Διαμήκεις παραμορφώσεις D7(Π1),D8(Π2). Άνοιγμα ρωγμής στα 0,9 MPa στην Π1 και πτώση του οργάνου στα 1,3MPa

8.3.2 Δεύτερο δοκίμιο

Η ρηγματώση του δοκιμίου ξεκινάει πάλι από την πλευρά Π1 σε χαμηλό φορτίο με σχηματισμό λοξής ρωγμής υπό την επίδραση των πλακών στον δεξιό λίθο της πέμπτης στρώσης που γρήγορα προχωράει στον μεσαίο της τέταρτης στρώσης και στις υποκείμενες στρώσεις. Σταδιακά έχουμε εμφάνιση κατακόρυφων ρωγμών σχεδόν σε όλους τους λίθους στις πλευρές Π1 και Π2 και κατακόρυφες ρωγμές αποκόλλησης στις πλευρές Π3 και Π4, που με την αύξηση του φορτίου διέρχονται από τους λίθους. Εντύπωση προκαλεί η μεγάλη αύξηση της διαμήκου παραμόρφωσης για φόρτιση 0,4 MPa όπως φαίνεται και στο διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων, που οφείλεται σε απότομη αύξηση της οριζόντιας παραμόρφωσης στην πλευρά Π1. Αυτό πιθανόν να μπορεί να αποδοθεί σε εμφανή ρωγμή στο σημείο σύνδεσης του οργάνου. Ένα άλλο στοιχείο που αξίζει να αναφερθεί, είναι ότι ενώ οι συνολικές παραμορφώσεις των Π1 και Π2 δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφοροποιήσεις, η εικόνα της αστοχίας τους δεν ταυτίζεται. Στην Π1 έχουμε σύνθλιψη λίθων και μεγάλου εύρους ρωγμές ενώ στην Π2 η εικόνα είναι πιο ήπια.



Εικόνες 8.19 και 8.20: εμφάνιση ρωγμών Αριστερά (8.19) στην πλευρά Π1 και Δεξιά (8.20) στην Π2



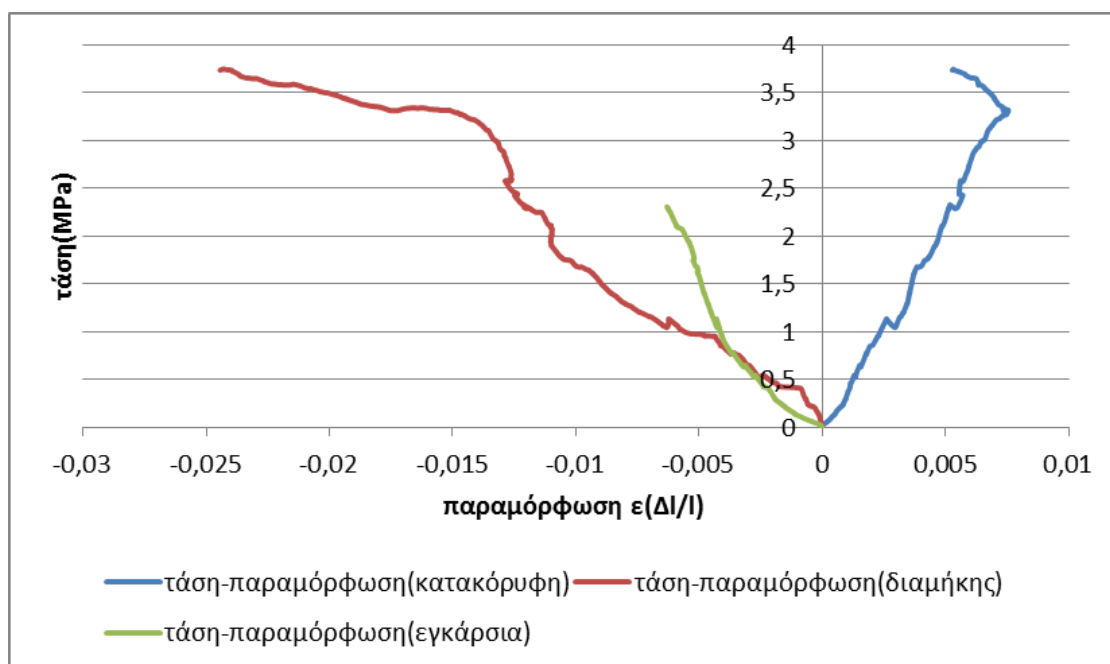
Εικόνες 8.21 και 8.22: εικόνα αστοχίας_ Αριστερά (8.21) πλευράς Π2 με κατακόρυφες ρωγμές στο σύνολο των λίθων και Δεξιά (8.22) πλευράς Π1 με σύνθλιψη λίθων.



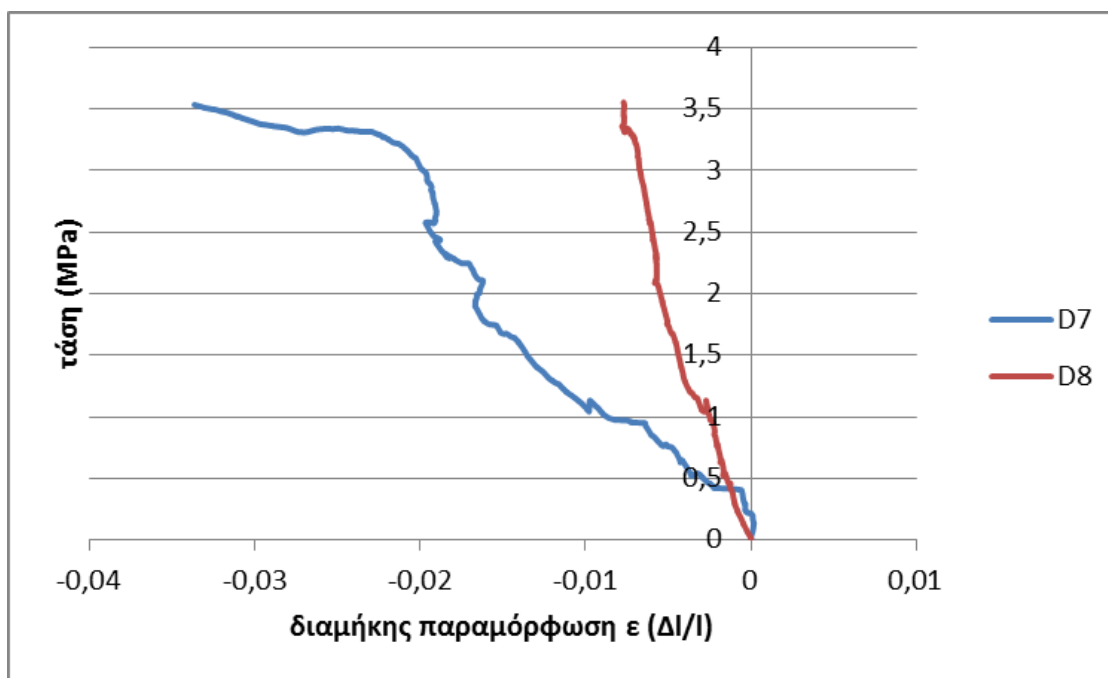
Εικόνα 8.23: Αστοχία ενδιάμεσης στρώσης με κατακόρυφες ρωγμές σε όλο το ύψος.

Η θλιπτική αντοχή προσδιορίστηκε $f_{wc}=3,74$ MPa. Το μέτρο ελαστικότητας στο 30% του μέγιστου φορτίου ήταν $E_w=362,6$ MPa, στο 70% 452 MPa και στο 100% 701 MPa. Αυτή η τελευταία τιμή μπορεί να αποδοθεί στην υποχώρηση των παραμορφώσεων και τις έντονα διαφοροποιημένες μετρήσεις ενδεχομένως λόγω της συμπεριφοράς του δοκιμίου κατά την αστοχία με την πτώση λίθων και άνοιγμα εκτεταμένων ρωγμών κατά την τελική φάση, κάτι που φαίνεται και στο διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων. Στο 90% της αντοχής (3,36 MPa) το μέτρο ελαστικότητας είναι 467 MPa, στο 95% 541,6 MPa και στο 99% 650,3 MPa.

Και εδώ έχουμε απότομη αύξηση της διαμήκουσ παραμόρφωσης για πολλή μικρή φόρτιση. Συγκεκριμένα ο λόγος διαμήκουσ/κατακόρυφης παραμόρφωσης έχει για τάση 0,4 MPa την τιμή -0,77 και αυξάνεται απότομα στα 0,42 MPa όπου παίρνει την τιμή -1,56 κάτι που οφείλεται σε τεράστια αύξηση της διαμήκουσ παραμόρφωσης στην πλευρά Π1 λόγω ρηγμάτωσης. Στο 30% της φόρτισης ο λόγος παίρνει την τιμή -2,12, στο 70% την τιμή -2,18 και στο 100% την τιμή -4,5. Στην εγκάρσια διεύθυνση ο λόγος της εγκάρσιας/κατακόρυφης παραμόρφωσης παίρνει τιμές στο 30% της αντοχής τιμή -1,4 και στο 62% τιμή -1,23. Μετά έχουμε απώλεια του μηκυνσιόμετρου στην πλευρά Π4.



Σχήμα 8.3: Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων δεύτερου δοκιμίου



Σχήμα 8.4: Διαμήκεις παραμορφώσεις D7(Π1),D8(Π2). Απότομη αύξηση της παραμόρφωσης στην πλευρά Π1 για πολύ χαμηλή φόρτιση (0,4MPa)

8.3.3 Τρίτο δοκίμιο

Η εικόνα της αστοχίας σε αυτό το δοκίμιο είναι σχετικά ομοιόμορφη στις πλευρές Π1 και Π2. Αρχικά έχουμε κατακόρυφες ρωγμές στον μεσαίο λίθο που σταδιακά εξαπλώνονται στο σύνολο των λίθων διαπερνώντας τους περίπου από τη μέση. Έχουμε και εδώ μεγάλου εύρους κατακόρυφες ρωγμές αποκόλλησης των στρώσεων που διέρχονται και από τα λιθοσώματα καθώς αυξάνεται η φόρτιση. Η αστοχία επέρχεται με σύνθλιψη του αριστερά λίθου της πρώτης στρώσης και αποκόλληση τριγωνικού τμήματος του λίθου της υπερκείμενης στρώσης της πλευράς Π2. Η αστοχία στο συγκεκριμένο σημείο προκαλείται από την άνιση κατανομή των φορτίων στην στρώση Π2, με συγκέντρωση τους στη πλευρά που τελικά αστόχησε. Χαρακτηριστικό είναι ότι τόσο οι κατακόρυφες παραμορφώσεις όσο και οι διαμήκεις είναι πολύ μεγαλύτερες, σχεδόν διπλάσιες, σε όλη τη διάρκεια της φόρτισης στην πλευρά Π1 και παρατηρείται μια απότομη αύξηση της παραμόρφωσης στο αριστερό τμήμα της Π2 που και τελικά αστόχησε, στο τελικό στάδιο της δοκιμής.

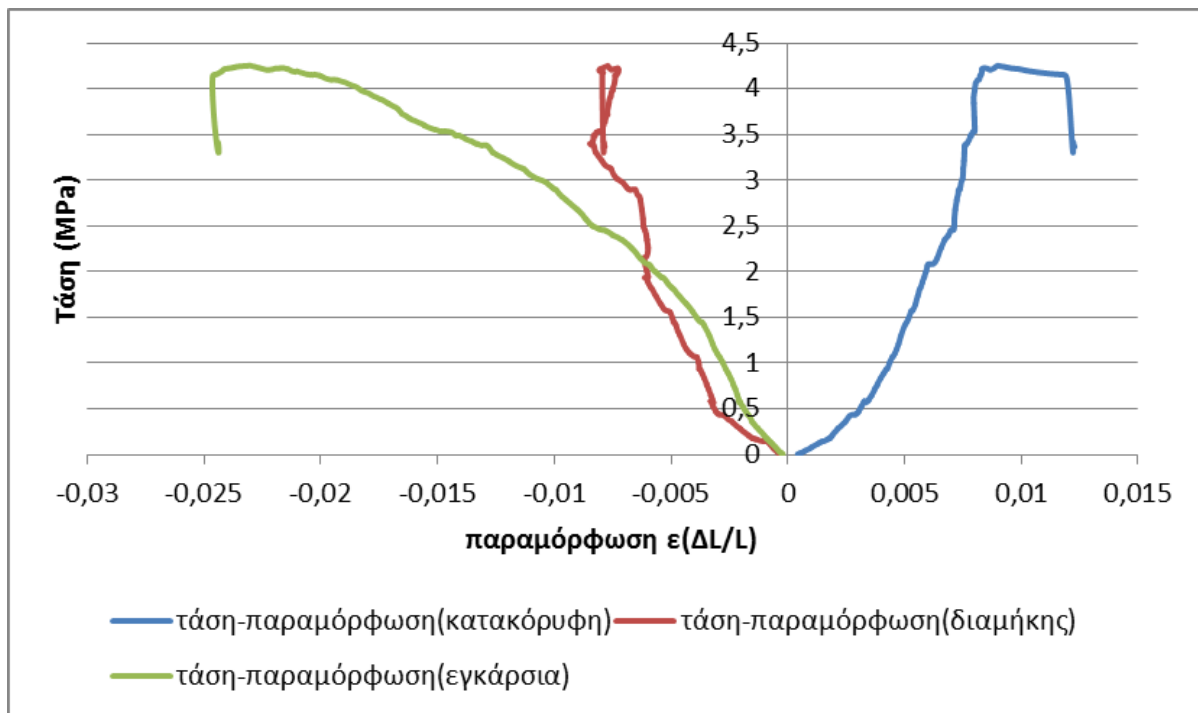


Εικόνες 8.24 και 8.25: λίγο πριν την αστοχία. Αριστερά(8.24) η Π1, δεξιά(8.25) η Π2



Εικόνες 8.26 και 8.27: Σύνθλιψη λίθου πρώτης στρώσης και αποκόλληση τμήματος του υπερκείμενου λίθου.

Η μέγιστη τάση που καταγράφηκε ήταν 4,25 MPa. Το μέτρο ελαστικότητας στο 30% της φόρτισης ήταν 269 MPa, στο 70% 400,5 MPa και στο 100% 468,46 MPa. Και εδώ έχουμε αύξηση του μέτρου ελαστικότητας με την αύξηση της τάσης. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων οι διαμήκεις παραμορφώσεις είναι μεγάλες από μικρές τιμές τάσης. Αυτό οφείλεται σε εμφάνιση πολύ μεγάλης διαμήκου παραμόρφωσης της πλευράς Π1 όπου έχουμε πάλι την εμφάνιση ρωγμής. Οι εγκάρσιες παραμορφώσεις έχουν όπως αναμενόταν υψηλές τιμές και αποκτούν μια έντονα αυξητική τάση, που φαίνεται από την μείωση της κλίσης της αντίστοιχης καμπύλης στο παρακάτω διάγραμμα, καθώς το δοκίμιο πλησιάζει στην αστοχία. Ο λόγος Poisson παίρνει τιμές στο 30% της φόρτισης $\nu_{εγκ}=0,69$ και $\nu_{διαμ}=0,94$, στο 70% του φορτίου $\nu_{εγκ}=1,39$ και $\nu_{διαμ}=0,95$ και στο 100% $\nu_{εγκ}=2,56$ και $\nu_{διαμ}=0,86$.



Σχήμα 8.5: Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων τρίτου δοκιμίου

8.4 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων θλιπτικής αντοχής με σχέσεις από τη βιβλιογραφία.

Οι σχέσεις που έχουν προταθεί για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής τοιχοποιίας και τριστρωτής τοιχοποιίας αναφέρθηκαν στα κεφάλαια 3.1.4 και 3.2.4. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε να γίνει χρήση της σχέσης που πρότειναν οι Τάσσιος και Βιντζηλαίου η οποία έχει καταφέρει να προβλέψει σε ικανοποιητικό βαθμό την θλιπτική αντοχή τριστρωτών τοιχοποιιών προηγούμενων ερευνητικών προγραμμάτων (Silva, 2012). Η σχέση αυτή είναι η εξής:

$$f_{wc} = \left(\frac{V_{ext}}{V_w} \right) * f_{ext}$$

Όπου: f_{wc} : η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας.

V_{ext}/V_w : Ο όγκος των εξωτερικών στρώσεων προς τον όγκο της τοιχοποιίας.

f_{ext} : θλιπτική αντοχή των εξωτερικών στρώσεων.

Προκειμένου να προσδιοριστεί η θλιπτική αντοχή της εξωτερικής στρώσης χρησιμοποιήθηκε η σχέση που πρότειναν οι Τάσσιος και Χρονόπουλος και που αναφέρεται σε τοιχοποιίες χαμηλής αντοχής.

$$f_{wc} = \xi \cdot \left[\left(\frac{2}{3} \sqrt{f_{bc}} - f_0 \right) + \lambda f_{mc} \right]$$

Όπου: f_0 : είναι ένας μειωτικός συντελεστής εξαιτίας της απόκλισης των λίθων από το ορθογώνιο σχήμα. Παίρνει τιμή 0,5 για λαξευμένους λίθους και 2,5 για αργολιθοδομή.

λ : Είναι ένας συντελεστής που λαμβάνει υπ' όψιν την συνάφεια λίθου- κονιάματος και παίρνει τιμές $\lambda=0,5$ για τραχείς λίθους και $\lambda=0,1$ για λίθους με πολύ λεία επιφάνεια.

ξ : Εκφράζει την επιρροή του πάχους του αρμού και δίνεται από τη σχέση:

$$\xi = 1: [1 + 3,5(k - k_0)] < 1$$

όπου: k = όγκος κονιάματος/όγκος τοιχοποιίας

k_0 : Είναι το μέγιστο ποσοστό του κονιάματος που θεωρείται ότι δεν προκαλεί μείωση της αντοχής του τοίχου. Είναι $k_0 = 0,3$ για αργολιθοδομή, $k_0 = 0,2$ για ημιλαξευμένη και $k_0 = 0,1$ για λαξευμένη τοιχοποιία.

Προκειμένου να εφαρμοστούν οι παραπάνω τύποι χρησιμοποιήθηκαν τα εξής στοιχεία και έγιναν οι εξής παραδοχές:

- Η θλιπτική αντοχή λίθου και κονιάματος προσδιορίστηκαν πειραματικά (7.1,7.2) σε $f_{mc}=3,9$ MPa και $f_{bc}=107,5$ MPa
- Ο συντελεστής ξ λαμβάνει την τιμή 1 αφού στις εξωτερικές στρώσεις το κονίαμα δεν ξεπερνάει το 20% του όγκου της τοιχοποιίας (θεωρήθηκε $k_0= 0,2$).
- Ο συντελεστής λ λαμβάνει την ενδιάμεση τιμή 0,3 αφού οι λίθοι δεν ήταν ούτε λείοι ούτε πολύ τραχείς.
- Ο συντελεστής f_0 λαμβάνει την ενδιάμεση τιμή 1,5.
- Ο λόγος V_{ext}/V_w προσδιορίστηκε βάσει του πλάτους των στρώσεων σε 0,65.

Βάσει των παραπάνω προκύπτουν οι ακόλουθοι πίνακες. Παρατηρούμε ότι παρόλο που έγινε χρήση δύο ημιεμπειρικών τύπων, ενός για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής της εξωτερικής στρώσης και ενός για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής της τρίστρωτης τοιχοποιίας, η αντοχή που προκύπτει είναι πολύ κοντά στα πειραματικά δεδομένα όπου είχαμε μέση θλιπτική αντοχή 4 MPa.

	f_{bc} (MPa)	f_{mc} (MPa)	λ	f_0	f_{ext} (MPa)
Εξωτερική στρώση	107,5	3,9	0,3	1,5	6,58

Πίνακας 8.1: Θλιπτική αντοχή εξωτερικής στρώσης

	f_{ext} (MPa)	V_{ext}/V_w	f_{wc} (MPa)
Τρίστρωτη τοιχοποιία	6,58	0,65	4,28

Πίνακας 8.2: Θλιπτική αντοχή τοιχοποιίας

8.5 Συμπεράσματα

8.5.1 Αποτίμηση των χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας

- Όπως φάνηκε και τα τρία δοκίμια εμφάνισαν παρόμοιες τιμές θλιπτικής αντοχής με μέσο όρο $f_{wc}=4$ MPa που είναι μια αρκετά υψηλή αντοχή για την συγκεκριμένη τυπολογία τοιχοποιίας.
- Το μέτρο ελαστικότητας παρουσίασε χαμηλές τιμές χωρίς μεγάλη διασπορά μεταξύ των δοκιμών και αυξητική τάση, με τον μέσο όρο στο 30% να είναι $E_w=336,5$ MPa, στο 70% 462,53 MPa και στο 100% 487,03 MPa (χρησιμοποιώντας την τιμή στο 95% για το δεύτερο δοκίμιο.)
- Όπως φάνηκε και παραπάνω τα δοκίμια παρουσίασαν πολύ υψηλές τιμές εγκάρσιας και διαμήκουσ παραμόρφωσης με αποτέλεσμα ο λόγος Poisson να χρησιμοποιείται καταχρηστικά. Μόνο στο 10% της φόρτισης μπορούμε να ενδεχομένως να μιλάμε για λόγο Poisson στην διαμήκη διεύθυνση, όπου ο μέσος όρος των τριών δοκιμών και πάλι παίρνει την υψηλή τιμή $\nu_{diam}=0,68$. Αυτό εξηγείται απ' το ότι υπάρχει ρηγματώση των κατακόρυφων αρμών από πολύ μικρή φόρτιση όπως φαίνεται και στα διαγράμματα. Οι κατακόρυφοι αρμοί, ιδίως οι κεντρικοί, ήταν αδύνατα σημεία της τοιχοποιίας εξαρχής. Οι λίθοι παρουσίαζαν κατά μήκος μείωση της διατομής τους και στο ύψος και στο πλάτος με αποτέλεσμα στον κεντρικό αρμό να χρειάζεται πολύ κονίαμα παρότι οι λίθοι μπορεί σημειακά να εφάπτονταν.

Όπως γίνεται φανερό, η τοιχοποιία αυτή παρουσιάζει κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τα οποία είναι τα εξής:

- 1) Δεν διακρίνεται ελαστική συμπεριφορά.
- 2) Παρουσιάζει πολύ χαμηλό μέτρο ελαστικότητας για την δεδομένη αντοχή.
- 3) Παρουσιάζει πολύ μεγάλες διαμήκεις και εγκάρσιες παραμορφώσεις.

Για τα παραπάνω αφενός ευθύνεται αφενός η ίδια η φύση της τρίστρωτης τοιχοποιίας με την έντονη ανομοιογένεια της και αφετέρου η φύση του χρησιμοποιούμενου κονιάματος. Το πηλοκονίαμα παρότι παρουσίασε ικανοποιητικά μηχανικά χαρακτηριστικά είχε πολύ μεγάλη συστολή ξήρανσης όπως συνηθίζεται σε τέτοιου είδους κονιάματα. Έτσι είχαμε 11,4% μεταβολή του όγκου για το κονίαμα των αρμών και 7,3% για το κονίαμα της εσωτερικής στρώσης. Σαν συνέπεια στα ήδη υπάρχοντα κενά εκ κατασκευής της ενδιάμεσης στρώσης, προστίθενται τα κενά της συστολής ξήρανσης η θέση των οποίων δεν είναι γνωστή ούτε μπορεί να ελεγχθεί. Στο κονίαμα των οριζόντιων αρμών μπορεί να γίνει ο ισχυρισμός ότι αυτό το φαινόμενο είναι πιο περιορισμένο. Η μεγάλη συστολή του πηλοκονιάματος σημειώνεται όταν είναι νωπό, όποτε το γεγονός ότι τα λιθοσώματα χτυπιούνται κατά το χτίσιμο με το κάτω μέρος του σφυριού ώστε να αυξηθεί η συνάφεια λίθου-κονιάματος, αλλά και το ίδιο βάρος των λίθων περιορίσαν το φαινόμενο. Αντίθετα στην ενδιάμεση στρώση και στους κατακόρυφους αρμούς, ιδιαίτερα τους κεντρικούς που χρησιμοποιήθηκε πολύ κονίαμα, δεν υπάρχει κάποια οριζόντια φόρτιση να περιορίσει τις επιπτώσεις της συρρίκνωσης με αποτέλεσμα τη δημιουργία κενών και την πιθανή απώλεια σύνδεσης λίθου-κονιάματος στην κατακόρυφη διεύθυνση.

8.5.2 Συμπεράσματα όσον αφορά την αστοχία

- Το άνοιγμα της πρώτης ρωγμής γίνεται για αρκετά μικρή φόρτιση η οποία είναι σχετικά δύσκολο να γίνει διακριτή λόγω αφενός του χρώματος του κονιάματος και αφετέρου των ήδη υπαρχόντων μικρορωγμών στο κονίαμα λόγω της φύσης του υλικού. Βάσει των οπτικών παρατηρήσεων στο 10-15% του οριακού φορτίου δημιουργείται ρηγμάτωση στο κονίαμα ενώ στο 20-25% έχουμε εμφανή ρωγμή στους λίθους.
- Η αποκόλληση των στρώσεων οδηγεί σε αύξηση της λυγηρότητας των διαχωρισμένων πλέον στρώσεων αλλά μπορεί να υποτεθεί και σε έκκεντρη φόρτιση των εξωτερικών στρώσεων. Άρα έχουμε εμφάνιση εκτός επιπέδου κάμψης και της αντίστοιχης παραμόρφωσης, φαινόμενο που επιδεινώνεται από τις οριζόντιες φορτίσεις και παραμορφώσεις που επιβάλλονται από την ενδιάμεση στρώση. Η διεύρυνση των ρωγμών αποκόλλησης και η πλευρική διόγκωση γίνονται αισθητά στην φάση της αστοχίας που με αυτόν τον τρόπο προαναγγέλλεται και δεν είναι ψαθυρή. Η μεγάλη αυτή παραμόρφωση φαίνεται και στα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων. Οι μερικές αποφλοιώσεις των λιθοσωμάτων μπορούν να αποδοθούν στην εκτός επιπέδου διεύθυνση φόρτισης του δοκιμίου.
- Υπάρχει ανομοιομορφία στην κατανομή του φορτίου λόγω της φύσης και των υλικών της τοιχοποιίας, αλλά και συνεχής αναδιανομή του λόγω των ασυνεχειών που δημιουργούν οι ρωγμές.
- Οι κατακόρυφες ρωγμές στην ενδιάμεση στρώση παρατηρούνται όχι μόνο στη διεπιφάνεια με την εξωτερική στρώση, αλλά και στο εσωτερικό της, κάτι που ενδεχομένως υποδεικνύει μία συμμετοχή της στην ανάληψη των φορτίων.
- Η ρηγμάτωση των λίθων γίνεται τις περισσότερες φορές σε θέσεις που βρίσκονται στη συνέχεια της ευθείας των κατακόρυφων αρμών οι οποίοι αποκολλούνται ή ρηγματώνονται σε χαμηλές τιμές φόρτισης. Η τοιχοποιία αστοχεί από εγκάρσια διάρρηξη των λίθων λόγω ισχυρών εφελκυστικών τάσεων σε συνδυασμό με πλευρική διόγκωση λόγω εκτός επιπέδου κάμψης. Στην φάση της αστοχίας δημιουργούνται ρωγμές μεγάλου εύρους στους λίθους και στο πλάτος τους.
- Η αστοχία πολλών λιθοσωμάτων παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά καμπτόμενου στοιχείου, προβολικού, αμφίεριστου ή και αμφίπακτου. Αυτή η υπόθεση μπορεί να βασιστεί στα εξής στοιχεία:
 1. Στη μορφή και τη θέση των ρωγμών. Σχηματίζονται κατακόρυφες ρωγμές στο κέντρο των λιθοσωμάτων οι οποίες είναι πιο διευρυμένες στην κάτω πλευρά τους και το πλάτος της ρωγμής μειώνεται καθ' ύψος. Έχουμε επίσης σχηματισμό ρωγμών στα άκρα των λιθοσωμάτων οι οποίες είναι πιο διευρυμένες στην πάνω πλευρά τους.
 2. Στη γεωμετρία των λιθοσωμάτων. Ο λόγος μήκος/ύψος λιθοσώματος είναι αρκετά υψηλός και κυμαίνεται από 3 έως 3,5. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το ότι οι μικρότεροι λίθοι των οποίων ο λόγος μήκος/ύψος είναι από 1 έως 1,5 παρουσιάζουν ρηγμάτωση σε πολύ υψηλότερα φορτία, μπορεί επίσης να οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι στους επιμήκεις λίθους έχουμε την δημιουργία καμπτικών ροπών.
 3. Όπως προαναφέρθηκε αρκετά λιθοσώματα εμφάνιζαν μείωση της διατομής τους κατά μήκος, τόσο στο πλάτος όσο και στο ύψος τους. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το ότι η κεφαλή και η έδρα τους δεν ήταν λείες και ότι χτυπιόντουσαν μετά την τοποθέτησή τους με το κάτω μέρος του σφυριού προκειμένου να αυξηθεί η συνάφεια, μπορεί να είχε σαν αποτέλεσμα κάποιοι λίθοι να ακουμπούν σημειακά με τους υποκείμενους λίθους στη δεξιά πλευρά τους ή την αριστερή, ή να εξασφάλισαν

συνθήκες στήριξης σε σχέση με το κέντρο τους που βρίσκεται πάνω από τον αδύναμο κατακόρυφο αρμό. Σε συνδυασμό με το κατακόρυφο θλιπτικό φορτίο, μπορεί να υποτεθεί η δημιουργία άρθρωσης ή και πάκτωσης. Ακολουθεί φωτογραφική τεκμηρίωση.



Εικόνα 8.28:Στον αριστερά λίθο παρατηρείται ρωγμή στο κέντρο με μεγαλύτερο εύρος στο κάτω τμήμα του. Στον δεξιά ρωγμή περί το κέντρο με μεγαλύτερο εύρος στο κάτω τμήμα του και ρωγμές στα άκρα με μεγαλύτερο εύρος στο πάνω τμήμα του (ομοιότητα με αμφίπακτο στοιχείο).



Εικόνες 8.29 και 8.30. Αριστερά(8.29)_ Ρωγμή στο κέντρο του λίθου της πάνω στρώσης με φορά από κάτω προς τα πάνω (ομοιότητα με αμφιέρειστο στοιχείο) και ρωγμή στο δεξιό τμήμα του λίθου της τρίτης στρώσης με φορά από πάνω προς τα κάτω (ομοιότητα με προβολικό στοιχείο).

Δεξιά(8.30)_Ρωγμή από κάτω προς τα πάνω στο κέντρο του λίθου και ρωγμές με φορά από πάνω προς τα κάτω στο δεξιό τμήμα του.



Εικόνες 8.31 και 8.32. Αριστερά(8.31)_ Μεγάλου εύρους ρωγμή στο κέντρο με φορά από κάτω προς τα πάνω και σχηματισμός ρωγμών από πάνω προς τα κάτω στο δεξιό τμήμα. Δεξιά (8.32)_ Κατακόρυφη ρωγμή από κάτω προς τα πάνω στο κέντρο του λίθου για χαμηλή φόρτιση.



Εικόνα 8.33: Κατακόρυφη αποκόλληση τμημάτων λίθου πιθανότατα λόγω εγκάρσιου εφελκυσμού σε συνδυασμό με θλιπτική φόρτιση.

8.6 Προοπτικές

Πολλές φορές στη συντήρηση και αποκατάσταση μνημείων τα πηλοκονιάματα και τα δομικά στοιχεία από πηλό γενικότερα, αντιμετωπίζονται ως «ευτελή» παρόλο που έχουν καταφέρει να επιβιώσουν για χιλιάδες χρόνια. Έτσι κρίνεται συχνά απαραίτητη η αντικατάσταση τους από άλλους τύπους κονιαμάτων που έχουν μελετηθεί διεξοδικά. Προκειμένου να αποφευχθεί αυτό στο μέλλον θα ήταν σκόπιμο:

- A) Η επιστημονική επεξεργασία μίας διαδικασίας ταυτοποίησης και χαρακτηρισμού τους.
- B) Η ανάπτυξη συμβατών και επιτελεστικών υλικών συντήρησης και αποκατάστασης που να μπορούν να παραχθούν με έναν ελεγχόμενο τρόπο, ώστε να είναι δυνατόν να αναπαραχθούν και να μελετηθούν σε βάθος οι ιδιότητες τους και να μην βασίζονται σε διαφορετική πρώτη ύλη κάθε φορά.

Βιβλιογραφία

- Anania, L. (2014). Performance of multi-leaf masonry wall under eccentric loads. Conference paper.
- Binda, L., Anzani, A., & Lourenco, P. (2006). A contribution for the understanding of load-transfer mechanisms in multi-leaf masonry walls: Testing and modelling. *engineering structures*.
- CEMEX Mortars. (2012). Educational guide to mortar testing.
- CEN. (1997). NP EN 933-1, Tests for geometrical properties of aggregates-part 10: Determination of particle size distribution-Sieving method.
- CEN. (1999). "BS EN 1015-3:1999 Methods of test for mortar for masonry-part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)".
- CEN. (1999). prEN1015-11, Methods of test for mortar for masonry-part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.
- Cornerstones Community Partnership. (2006). *Adobe Conservation, a preservation handbook*. Santa Fe.
- Doat, P., Hays, A., Houben, H., Matuk, S., & Vitoux, F. (1985). *Building with Earth*. Paris: Editions Alternatives.
- Egermann, R. (1993). Investigation on the load bearing behaviour of multiple leaf masonry. IABSE reports = Rapports AIPC = IVBH Berichte
- Garcia, D., San-Jose, J., Garmendia, L., & San-Mateos, R. (2012). Experimental study of traditional stone masonry under compressive load and comparison of results with design codes. *materials and structures*.
- Hatzinikolas, M., Longworth, J., & Warwaruk, J. (1980). Failure modes for eccentrically loaded concrete block masonry walls. *ACI Journal*.
- Hendry, A., Sinha, B., & Davies, S. (1997). *Design of masonry structures*. Edinburgh: Taylor and Francis.
- Hilsdorf, H. (1964). Investigation into the failure mechanism of brick masonry loaded in axial compression. *Designing, engineering and construction with masonry products*.
- Houben, H., & Guillaud, H. (1994). *Earth construction*. CRATerre-EAG.
- International organization of standardization. (1982). *ISO 6784, Determination of static modulus of elasticity*.
- IS 13077, Bureau of Indian standards;. (1991, JULY). IS 13077. Guide of preparation and use of mud mortar in masonry.
- Liran, R., & Barkai, R. (2011, March). Casting a shadow on Neolithic Jericho. *Antiquity*.
- McNary, W., & Abrams, D. (1985). *Mechanics of masonry in compression*.

- Minke, G. (2006). *Building with Earth, design and technology of a sustainable architecture*. Basel: BIRKHAUSER.
- Morsy, E. (1989). an investigation of mortar properties influencing brickwork strength.
- Nodarou, E., Frederick, C., & Hein, A. (2008). Another (mud)brick in the wall: scientific analysis of Bronze Age earthen construction materials from East Crete. *Journal of Archaeological Science*.
- Norton, J. (1986). *Building with earth: A handbook*. London: Intermediate Technology Development Group limited.
- Pachta, V., Stefanidou, M., & Konopisi, S. (2014, July). Technological evolution of historic structural mortars. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, σσ. 846-854.
- Papayianni, I., & Stefanidou, M. (2007). Durability aspects of ancient mortars of the archeological site of Olynthos. *Journal of Cultural Heritage*, σσ. 193-196.
- Silva, B. (2012). Supervisor: Fancesca da Porto. *diagnosis and strengthening of historical masonry structures: Numerical and experimental analysis*. PhD thesis. University of Brescia.
- Silva, R. (2013, december). Supervisor: Oliveira D. Repair of Earth Constructions by Means of Grout Injection. PhD thesis. University of Minho.
- Tassios, T. (2010, october 6). Seismic engineering of monuments. *Bull Earthquake Eng.*
- Valluzzi, M., Da Porto, F., & Modena, C. (2001). Behaviour of multi-leaf stone masonry walls strengthened by different intervention techniques. *Historical constructions*.
- Vintzileou. (2007). Grouting of three leaf masonry: experimental results and prediction of mechanical properties.
- Vintzileou, E. (2014). Testing history masonry elements and/or building models. *Perspectives on European earthquake engineering and seismology*.
- Vintzileou, E., & Miltiadou-Fezans, A. (2008). Mechanical properties of three-leaf stone masonry grouted with ternary or hydraulic lime based grouts. *Eng. Struct.*
- Χρηστάρας, Β. (2003). *Φυσικοί δομικοί λίθοι, τεχνικά χαρακτηριστικά, μ καταστροφικές μέθοδοι έρευνας, διδακτικές σημειώσεις ΔΠΜΣ προστασία μνημείων Β κατεύθυνση*. Ε.Μ.Π.
- Zucchini, A., & Lourenco, P. (2006). Mechanics of masonry in compression: Results from an homogenisation approach. *Computers and structures*.
- ΑΝΕΛΙΞΗ. (2013). <http://www.anelixi.org/>.
- Βινζυλαίου. (2014). *σημειώσεις μαθήματος 'εισαγωγή στην παθολογία και αποκατάσταση μνημείων και υλικών'*.
- Γασπαράτος, Δ., Καβασίλης, Σ., & Γιαννακοπούλου, Φ. (2011). *Ασκήσεις γενικής Εδαφολογίας*. Αθήνα: Γεωπονικό Πανεπιστήμιο, τμήμα αξιοποίησης φυσικών πόρων και γεωργικής μηχανικής, τομέας εδαφολογίας και γεωργικής χημείας.

- ΕΛΟΤ EN 1052-01. (1998). *Methods of test for masonry-part 1: Determination of compressive strength*. Ελληνικός οργανισμός τυποποίησης Α.Ε.
- Θεουλιάκης, Π., Στεφανής, Ν.-Α., & Γερογιάννης, Γ. (2009). Η διατήρηση in situ των πήλινων αρχιτεκτονικών κατασκευών στο Δισπηλιό. Χαρακτηρισμός του υλικού και ανάπτυξη πειραματικής μεθοδολογίας για την στερέωση του. ανασκαφικό περιοδικό *Ανάσκαμμα*, τεύχος 3.
- Ιγνατάκης, Χ., & Στυλιανίδης, Κ. (2009). *Κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία. Κανονισμός-βλάβες-αποκατάσταση*. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, τμήμα κεντρικής Μακεδονίας.
- Καββαδάς, Μ. (2004). *Στοιχεία Εδαφομηχανικής*. Αθήνα: Ε.Μ.Π.
- Κακαβογιάννης, Ε. (2005). *Μέταλλα εργάσιμα και συγκεχωρημένα*. Αθήνα: Υπουργείο πολιτισμού, δημοσιεύματα του αρχαιολογικού δελτίου αρ.90.
- Καραντώνη, Φ. (2012). *Κατασκευές από τοιχοποιία. Σχεδιασμός και επισκευές*. Αθήνα: εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- Κάρτας, Α. (1988). *Ελληνική παραδοσιακή αρχιτεκτονική, τόμος 2, Κυκλάδες, Σύρος*. Αθήνα: εκδοτικός οίκος Μέλισσα.
- Κορδέλλας, Α. (2014). Το Λαύριον. Στο πρώτο κεφάλαιο, ιστορία (σσ. 86-87). Λαύριο: Βιβλιοθήκη της εταιρείας μελετών Λαυρεωτικής-αριθ.9.
- Κοτρώτσιου, Β., & Φραντζεσκάκη, Ε. (2011, Σεπτέμβριος). Επιβλέπουσα: Πλαστήρα Β. Μελέτη της επίδρασης του φαινομένου της αναζύμωσης στις μηχανικές ιδιότητες των αργιλικών εδαφών. Πτυχιακή εργασία. τμήμα Πολιτικών Δομικών έργων, Τ.Ε.Ι. Πειραιά.
- Λαζαρίδου-Αθανασιάδου, Μ. (2012). Βιολογικές ιδιότητες των δασικών εδαφών, διδακτικές σημειώσεις. ΤΕΙ Καβάλας, τμήμα Δασοπονίας και Διαχείρισης Φυσικού Περιβάλλοντος.
- Λουπασάκης, Κ. (2013). Εργαστηριακές δοκιμές Εδαφομηχανικής-Βραχομηχανικής. Διδακτικές σημειώσεις. " Σχολή Μηχανικών μεταλλείων-Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π.
- Λουπασάκης, Κ. (2013). *Σημειώσεις διαλέξεων μαθήματος "τεχνική γεωλογία 1". Σχολή Μηχανικών μεταλλείων-Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π.*
- Μακρής, Γ., Γουλιέλμος, Φ., Εφesiού, Ε., & Μυλωνάς, Κ. (1987). *Σημειώσεις για την συντήρηση και τις επισκευές παραδοσιακών κτιρίων*. Αθήνα: Ε.Μ.Π.
- Μοροπούλου, Α. (2012). *Χαρακτηρισμός, έλεγχος ποιότητας, διάγνωση φθοράς και συντήρηση δομικών υλικών. Μεθοδολογία ενόργανων και μη καταστρεπτικών τεχνικών*. Αθήνα: Ε.Μ.Π.
- Μοροπούλου, Α. (2013). *Μη καταστρεπτικές και ενόργανες μέθοδοι χαρακτηρισμού και διάγνωσης της φθοράς και ελέγχου υλικών και επεμβάσεων συντήρησης. Διδακτικές σημειώσεις. Δ.Π.Μ.Σ. Προστασία μνημείων, Ε.Μ.Π.*
- Μουτσοπούλου, Α. (1990). *Ελληνική παραδοσιακή αρχιτεκτονική, τόμος 3, Δωδεκάνησα-Κρήτη, Ρόδος*. Αθήνα: εκδοτικός οίκος Μέλισσα.
- Μουτσοπούλου, Ε. (2008). *Αποκατάσταση παραδοσιακών κτιρίων*. Ηράκλειο: ΤΕΕ ανατολικής Κρήτης.

- Μπέη, Γ. (2004). Επιβλέπουσα: Παπαγιάννη Ι. Τοιχοποιία από πηλό: Πειραματική διερεύνηση μηχανικών και φυσικών χαρακτηριστικών δομικών μονάδων και τοίχων απο Συμπιεσμένες Ωμόπλινθους. Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Μπελόκας, Γ. (2014). Εδαφομηχανική. Διδακτικές σημειώσεις. Τμήμα πολιτικών έργων υποδομής, τεχνολογικό εκπαιδευτικό ίδρυμα Αθήνας.
- Ορλάνδος, Α. (1955). Τα υλικά δομής των αρχαίων Ελλήνων κατά τους συγγραφείς, τας επιγραφάς και τα μνημεία, τεύχος 1, το ξύλο και ο πηλός. Στο κεφάλαιο Β, ο πηλός (σσ. 65-90). Αθήνα: εν αθήναις αρχαιολογική εταιρεία.
- Παπαδόπουλος, Δ. (2012). Αργύρου πηγή. Λαύριο: ΚΠΕ Λαυρίου(έκδοση στα πλαίσια εκπαιδευτικού προγράμματος).
- Παπαδόπουλος, Μ., Παπαϊωάννου, Έ., & Τσαπόγα, Μ. (2005). Άργιλοι-Πηλοί-Μπαντανάδες για χρήση στους υποκλάδους της κεραμικής. Ελληνικό κέντρο αργιλόμαζας.
- Παυλίδης, Σ. (2009). Ορυκτά και Πετρώματα. Τα "ανόργανα" συστατικά της γης. Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Πάχτα, Β. (2011). Μελέτη εξέλιξης τεχνολογίας κονιαμάτων. Διδακτορική διατριβή. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Περράκη, Θ. (2006). Βιομηχανικά ορυκτά και πετρώματα - Μπεντονίτης. Διδακτικές σημειώσεις. Σχολή Μηχανικών μεταλλείων-Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π.
- Περράκη-Λοΐσιου, Θ. (2006). Βιομηχανικά ορυκτά και πετρώματα - Άργιλος. Διδακτικές σημειώσεις. Σχολή Μηχανικών μεταλλείων-Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π.
- Σαΐτας, Γ. (1987). Ελληνική παραδοσιακή αρχιτεκτονική-τόμος 5, Πελοπόννησος- Στερεά Ελλάδα, Μάνη. Αθήνα: εκδοτικός οίκος Μέλισσα.
- Σταθόπουλος, Κ. (2015). Επιβλέπων: Μπακόλας Α. Μελέτη σταθεροποίησης πηλοκονιαμάτων. Διπλωματική εργασία, Δ.Π.Μ.Σ. επιστήμη και τεχνολογία των υλικών, Ε.Μ.Π.
- Σταμέλου, Ε. (2012). Ιστοσελίδα Υπουργείου πολιτισμού, www.odysseus.culture.gr, αρχαιολογικός χώρος Σέσκλου.
- Τάσσιος, Θ. (1992). Η μηχανική της τοιχοποιίας (υπό στατικές και σεισμικές συνθήκες). Αθήνα: εκδόσεις Συμμετρία.
- Τζάκου, Α. (1988). Ελληνική παραδοσιακή αρχιτεκτονική, τόμος 2, Κυκλάδες, Σίφνος. Αθήνα: εκδοτικός οίκος Μέλισσα.
- Τσίμας, Σ. (2001). ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ (Τσιμέντο-Ασβέστης-Κονιάματα). Αθήνα: Ε.Μ.Π.
- Χατζηθεοδωρίδης, Η. (2007, Απρίλιος). Πυριτικά ορυκτά. ορυκτά Διδακτικές σημειώσεις. Σχολή Μηχανικών μεταλλείων-Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π.
- Χρηστάρας, Β. (2003). Φυσικοί δομικοί λίθοι, τεχνικά χαρακτηριστικά και μη καταστροφικές μέθοδοι έρευνας. Διδακτικές σημειώσεις. Δ.Π.Μ.Σ. Προστασία μνημείων, Ε.Μ.Π.
