ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

Διπλωματική Εργασία

«ΜΕΛΕΤΗ ΠΟΙΟΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΔΥΤΙΚΗΣ ΚΡΗΤΗΣ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥΣ ΩΣ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»

Ακριβή Καραπαναγιώτη

Εξεταστική Επιτροπή

Καθηγητής Μαρκόπουλος Θεόδωρος (επιβλέπων)
Καθηγητής Εμμανουήλ Μανούτσογλου
Επίκ. Καθηγητής Γεώργιος Αλεβίζος

Χανιά 2012

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Πολυτεχνείου Κρήτης, του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, κ. Θεόδωρου Μαρκόπουλου και βασίζεται σε δεδομένα τα οποία προέκυψαν από πειραματικές διαδικασίες, οι οποίες διενεργήθηκαν στο εργαστήριο Πετρολογίας και Οικονομικής Γεωλογίας του Τμήματος.
Στην εργασία αυτή γίνεται αξιολόγηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών κ έλεγχος 10 εδαφικών δειγμάτων και πετρωμάτων, που ελήφθησαν από συγκεκριμένες περιοχές της Κρήτης ως προς την καταλληλότητά τους για παρασκευή δομικών στοιχείων που εφαρμόζονται σε κατασκευές βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής.
Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Θεόδωρο Μαρκόπουλο για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα θέμα τόσο ενδιαφέρον που συνδυάζει το αντικείμενο της σχολής με εκείνο της αρχιτεκτονικής. Η παρούσα διπλωματική δεν θα είχε ολοκληρωθεί χωρίς τη συμβολή και την καθοδήγηση της Μηχανικού Ορυκτών Πόρων, MSc, Πάολα Ροτόντο την οποία θέλω να ευχαριστήσω για τις χρήσιμες συμβουλές της και την συμπαράστασή της.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας που εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Πετρολογίας και Οικονομικής Γεωλογίας του Τμημ. Μηχ.Ο.Π. του Πολυτεχνείου Κρήτης, δέκα εδαφικά δείγματα – αργιλούχοι σχηματισμοί και πετρώματα από το Ν.Χανίων, τη Δυτική Κρήτη (και συγκεκριμένα τις περιοχές Αγιά, Αλικιανό, Γεράνι, Πατελάρι, Σούδα, Σπηλιά, Καμπανό, Πλάτανο) μελετήθηκαν ως προς μερικά από τα βασικά ποιοτικά τους χαρακτηριστικά προκειμένου να εξεταστεί η δυνατότητα χρήσης τους ως δομικά προϊόντα ή σε δομικές οικολογικές εφαρμογές βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής (πχ. παραγωγή ωμοπλίνθων, πηλοκονιαμάτων, εφαρμογή rammed earth κλπ)
Προσδιορίστηκαν κυρίως η ορυκτολογική σύσταση των δειγμάτων, φυσικές ιδιότητες όπως τα όρια πλαστικότητας και η κοκκομετρική τους διαβάθμιση καθώς και οι μηχανικές αντοχές σε θλίψη και κάμψη μορφοποιημένων κυβικών δοκιμίων και ράβδων αντίστοιχα τόσο αυτούσιων των εδαφικών δειγμάτων όσο και μιγμάτων αυτών με οργανικά (προσθήκη άχυρου σε αναλογία 1:1 κ.ο) και ανόργανα πρόσθετα (προσθήκη 5% υδρασβέστου).

Σύμφωνα με την κοκκομετρική τους διαβάθμιση και το τριγωνικό σύστημα ταξινόμησης εδαφών USDA τα δείγματα κατατάσσονται σε ιλυώδεις αργίλους (silty clay), αργιλούχους άμμους (clay sand), ιλυώδεις άμμους (silty sand), αργιλούχο ιλύ (clay silt) και αμμώδη ιλύ (sandy silt).
Τα κύρια ορυκτολογικά τους συστατικά είναι χαλαζίας και αργιλικά ορυκτά ενώ σε διαφορετικά ποσοστά ανιχνεύθηκαν μαρμαρυγίες, χλωρίτες, οξείδια και υδροξείδια σιδήρου, ανθρακικά άλατα και άστριοι.
Η προσθήκη άχυρου ή υδρασβέστου έγινε σε μία προσπάθεια διερεύνησης της βελτίωσης της τεχνικής συμπεριφοράς των δομικών προϊόντων (π.χ. αντοχή, θερμομονωτική ικανότητα, υδατοστεγανότητα κλπ) και στα πλαίσια ευρύτερης έρευνας που εκπονείται στο Εργαστήριο Πετρολογίας και Οικονομικής Γεωλογίας γύρω από τα

εδαφικά υλικά και τις δυνατότητες χρήσης τους σε οικολογικές ή βιοκλιματικές κατασκευές.

Η μηχανική συμπεριφορά των δοκιμίων των δειγμάτων με ή χωρίς οργανικά πρόσθετα εξαρτάται άμεσα από την ορυκτολογική σύσταση, την κοκκομετρική διαβάθμιση (περιεχόμενο άμμου – ιλύος – αργίλου) και τους δείκτες πλαστικότητας των μελετώμενων εδαφικών υλικών.

Τα περισσότερα από τα μελετώμενα δείγματα εμφανίζουν κατάλληλες τιμές αντοχών σε θλίψη ούτως ώστε να ικανοποιούν την ελάχιστη προδιαγραφή των 2 MPa σύμφωνα με Ευρωπαϊκά πρότυπα που αφορούν στη δόμηση με πηλό.

Τα περισσότερα από τα δείγματα με περιεχόμενο σε άργιλο <60% είναι κατάλληλα για παραγωγή ωμοπλίνθων και εφαρμογή σε κατασκευή rammed earth.

Τα πιο λεπτόκοκκα από τα μελετώμενα δείγματα (πχ. ιλυώδης άργιλος και αργιλούχος ιλύς) θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως δομικά πηλοκονιάματα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας
1.2 Βιοκλιματική Αρχιτεκτονική- Βιοκλιματικός Σχεδιασμός
1.3 Βιοκλιματική κατοικία- Πράσινα κτίρια
1.4 Οικολογική Δόμηση
1.5 Η χρήση του πηλού ως υλικό δόμησης
1.6 Τα πλεονεκτήματα της χρήσης αργιλικής γης ως δομική ύλη στην οικολογική δόμηση
1.7 Κύρια είδη δομικών υλικών και τυπολογίες οικολογικής δόμησης με αργιλούχους σχηματισμούς
1.7.1 Ωμόπλινθος (adobe), πλίθα (mudbrick)
1.7.2 Ρευστή Γη (poured earth)
1.7.3 Το κομπ (cob)
1.7.4 Χώμα σε καλούπια (Rammed earth)
1.7.5 Άχυρο με πηλό (light clay straw)
1.7.6 Πηλοκονιάματα- επιχρίσματα
1.8 Ελληνικό νομοθετικό πλαίσιο- σημαντικές ιδιότητες και συντελεστές δόμησης
1.9 Συστατικά του εδάφους – Κριτήρια καταλληλότητας εδάφους
1.10 Δοκιμές καταλληλότητας στην ύπαιθρο (site tests)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2- ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 Δειγματοληψία εδαφικών υλικών- μακροσκοπική περιγραφή
2.2 Μεθοδολογία αναλύσεων των δειγμάτων
2.2.1 Τεταρτομερισμός δειγμάτων
2.2.2 Κοσκίνηση εν ξηρώ
2.2.3 Κοκκομετρική ανάλυση με τη μέθοδο Bouyoucos βάσει του νόμου του Stokes

2.2.4 Περιθλασιμετρία ακτίνων Χ
2.2.5 Προσδιορισμός ορίων ATTERBERG
2.2.6 Μηχανικές αντοχές

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3- ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

3.1 Υγρή κοκκομετρική ανάλυση με τη μέθοδο Bouyoucos
3.2 Ορυκτολογική ανάλυση περιθλασιμετρίας ακτίνων Χ (XRD)
3.3 Προσδιορισμός των ορίων ATTERBERG

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

4.1 Συμπεράσματα
4.2 Συζήτηση – Προτάσεις

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΙΣΤΟΓΡΑΦΙΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Η εφαρμογή του αργιλικού εδάφους ως δομικής ύλης μπορεί να καλύψει ανάγκες αειφορίας στην ύπαιθρο κ ενεργειακής οικονομίας στις αρχιτεκτονικές αστικές εφαρμογές.
Η άργιλος είναι ένα διαθέσιμο υλικό που υπάρχει άφθονο στη φύση, είναι οικονομικό και οικολογικό αφού είναι άπειρα ανακυκλώσιμο και η παραγωγή προϊόντων του απαιτεί χαμηλή κατανάλωση ενέργειας ώστε να μην προκαλεί περιβαλλοντική επιβάρυνση, ενώ παράλληλα εμφανίζει ικανοποιητικές ιδιότητες σε μια πληθώρα δυνητικών δομικών εφαρμογών ώστε να μπορεί να ανταπεξέλθει ακόμα και στις απαιτήσεις της σημερινής μοντέρνας αρχιτεκτονικής που έχει σαν κεντρικό γνώμονα την περιβαλλοντική διατήρηση άρρηκτα συνδεδεμένη με την ανθρώπινη διαβίωση.

Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση αργιλούχων σχηματισμών αλλά και πετρωμάτων (ανώτερων στρωμάτων υπεδάφους) της Κρήτης ως προς την καταλληλότητά τους για την παραγωγή δομικών στοιχείων - υλικών (πχ. ωμοπλίνθων, πηλοκονιαμάτων, επιχρισμάτων) ή τη δυνατότητα εφαρμογή τους σε άλλους τύπους δόμησης με πηλό (πχ. rammed earth) για τη χρήση τους σε κατασκευές ή σε επεμβάσεις αποκατάστασης ιστορικών κτηρίων, είτε γενικότερα σε εφαρμογές βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής.
Στα πλαίσια αυτής της αξιολόγησης μελετάται επιπλέον η επίδραση της προσθήκης άμμου, άχυρου ή υδραυλικής ασβέστου στη μηχανική συμπεριφορά των παραγόμενων προϊόντων με σκοπό να διερευνηθεί η δυνατότητα βελτίωσης των τεχνικών τους χαρακτηριστικών.
Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των πρώτων υλών προσδιορίζονται με τη βοήθεια τυποποιημένων εργαστηριακών αναλύσεων όπως η ορυκτολογική ανάλυση, η κοκκομετρική ανάλυση, τα όρια Atterberg (υδαρότητας – πλαστικότητας), ενώ ελέγχεται η τεχνική συμπεριφορά των

παραγόμενων δομικών προϊόντων με τυποποιημένες μηχανικές δοκιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και σε κάμψη 3 σημείων.

Η γενικευμένη επιλογή αργιλούχων σχηματισμών προς μελέτη, δηλαδή όχι ακριβώς εδαφών αλλά πετρωμάτων των ανώτερων στρωμάτων του υπεδάφους, πραγματοποιήθηκε με γνώμονα το γεγονός ότι τα επιλεγμένα δείγματα βάσει των πετρολογικών τους χαρακτηριστικών και των ιδιοτήτων τους πρέπει να μελετηθούν κυρίως με τη βοήθεια soil mechanics και όχι rock mechanics.

Τα σημαντικότερα ορυκτολογικά συστατικά των δειγμάτων είναι ο χαλαζίας, διάφορα αργιλικά ορυκτά καθώς και χλωρίτες, οξείδια σιδήρου και υδροξείδια, ανθρακικά άλατα και άστριοι τα οποία ανιχνεύονται σε διάφορα ποσά.
Τα δείγματα αξιολογούνται, ως προς την καταλληλότητά τους κυρίως για rammed earth και παραγωγή ωμοπλίνθων σχετικά με την κοκκομετρική τους διαβάθμιση και την ορυκτολογική τους σύνθεση.
Όλα τα δείγματα μετά τη μορφοποίησή τους σε δοκίμια εμφανίζουν ικανοποιητική αντοχή σε θλίψη σύμφωνα με την ελάχιστη απαίτηση των 2.0 MPa των ευρωπαϊκών προτύπων.
Τα περισσότερα από τα εξεταζόμενα αυτά υλικά περιέχουν άμμο σε ποσοστό μικρότερο από 60% και είναι κατάλληλα για σταθεροποίηση όπως συμβαίνει με την τεχνική rammed earth (εγκυβωτισμένο αργιλοσκυρόδεμα) και την παραγωγή πλίνθων.

1.2. Βιοκλιματική αρχιτεκτονική – Βιοκλιματικός σχεδιασμός

Η βιοκλιματική αρχιτεκτονική αφορά στο σχεδιασμό κτιρίων και χώρων (εσωτερικών και εξωτερικών-υπαίθριων) με βάση το τοπικό κλίμα, με σκοπό την εξασφάλιση συνθηκών θερμικής και οπτικής άνεσης, αξιοποιώντας την ηλιακή ενέργεια και άλλες περιβαλλοντικές πηγές αλλά και τα φυσικά φαινόμενα του κλίματος.

Βασικά στοιχεία του βιοκλιματικού σχεδιασμού αποτελούν τα παθητικά συστήματα που ενσωματώνονται στα κτίρια με στόχο την αξιοποίηση των περιβαλλοντικών πηγών για θέρμανση, ψύξη και φωτισμό των κτιρίων.[1]

Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός – αν και είναι ενσωματωμένος στην αρχιτεκτονική που χαρακτηρίζει κάθε τόπο σε ολόκληρη τη γη – θεωρείται από πολλούς ως μία νέα «θεώρηση» στην αρχιτεκτονική και σχετίζεται με την οικολογία περισσότερο, παρά με την ενέργεια και την εξοικονόμηση που δύναται να επιφέρει. Παρά ταύτα, η βιοκλιματική αρχιτεκτονική έχει αποτελέσει τις τελευταίες δεκαετίες βασική προσέγγιση στην κατασκευή κτιρίων παγκοσμίως, ενώ στα περισσότερα κράτη πλέον αποτελεί βασικό κριτήριο σχεδιασμού μικρών και μεγάλων κτιρίων το οποίο λαμβάνεται υπόψη από όλους τους μελετητές αρχιτέκτονες και μηχανικούς. Κι αυτό, λόγω των χαμηλότερων απαιτήσεων ενέργειας για την θέρμανση, τον δροσισμό και τον φωτισμό των κτιρίων που προκύπτουν από την πρακτική της βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής και πολλαπλά οφέλη που την συνεπάγουν: ενεργειακά (εξοικονόμηση και θερμική/οπτική άνεση), οικονομικά (μείωση κόστους ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων), περιβαλλοντικά (μείωση ρύπων) και κοινωνικά.

Ειδικότερα, το ενεργειακό όφελος που προκύπτει από την εφαρμογή του βιοκλιματικού σχεδιασμού αποδίδεται με τους παρακάτω τρόπους:
- εξοικονόμηση ενέργειας από την σημαντική μείωση απωλειών λόγω της βελτιωμένης προστασίας του κελύφους και συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων,
- παραγωγή θερμικής ενέργειας (θερμότητας) μέσω των ηλιακών συστημάτων με συμβολή στις θερμικές ανάγκες των χώρων προσάρτησης και μερική κάλυψη των απαιτήσεων θέρμανσης του κτιρίου,
- δημιουργία συνθηκών θερμικής άνεσης και μείωση των απαιτήσεων όσον αφορά στη ρύθμιση θερμοστάτη (σε χαμηλότερες θερμοκρασίες τον χειμώνα και υψηλότερες το καλοκαίρι),
- διατήρηση της θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα σε επίπεδα υψηλά τον χειμώνα (και αντίστοιχα χαμηλά το καλοκαίρι), με αποτέλεσμα την

μείωση του φορτίου για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων από τα επικουρικά συστήματα κατά την χρήση του κτιρίου.
Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας και των περιβαλλοντικών πηγών, γενικότερα, όπως προκύπτει από το βιοκλιματικό σχεδιασμό, επιτυγχάνεται στα πλαίσια της συνολικής θερμικής λειτουργίας του κτιρίου και της σχέσης κτιρίου – περιβάλλοντος.
Η θερμική λειτουργία ενός κτιρίου αποτελεί μία δυναμική κατάσταση, η οποία:
εξαρτάται από τις τοπικές κλιματικές και περιβαλλοντικές παραμέτρους (την ηλιοφάνεια, τη θερμοκρασία εξωτερικού αέρα, τη σχετική υγρασία, τον άνεμο, τη βλάστηση, το σκιασμό από άλλα κτίρια), αλλά και τις συνθήκες χρήσης του κτιρίου (κατοικία, γραφεία, νοσοκομεία κλπ.) και βασίζεται στην αντίστοιχη ενεργειακή συμπεριφορά των δομικών του στοιχείων και των ενσωματωμένων παθητικών ηλιακών συστημάτων, αλλά και το ενεργειακό προφίλ που προκύπτει από την λειτουργία του κτιρίου.
Ο βαθμός στον οποίο ο βιοκλιματικός σχεδιασμός σήμερα αξιοποιεί το τοπικό κλίμα ποικίλει, γεγονός που παρέχει μία ευελιξία ως προς τους τρόπους αρχιτεκτονικής έκφρασης και δυνατοτήτων εφαρμογής μέσα από πολύ απλές τεχνικές και επεμβάσεις έως και πολύπλοκα παθητικά ηλιακά συστήματα.

1.3 Βιοκλιματική κατοικία – Πράσινα κτίρια

Ο όρος «βιοκλιματική κατοικία» προσδιορίζει ακριβώς ένα κτίριο που εκμεταλλεύεται φυσικούς παράγοντες αλλά και αρχιτεκτονικές πρακτικές, για τη θέρμανση και το δροσισμό του χωρίς να επιβαρύνει όσο είναι δυνατόν το περιβάλλον. Παράλληλα μία τέτοια κατοικία δεν μπορεί παρά να εστιάζεται και στο θέμα της ποιότητας της υγείας αυτών που θα την κατοικήσουν. Συνεπώς επιλέγει κυρίως φυσικά υλικά τα οποία είναι φιλικά προς τον άνθρωπο, τα ζώα και το περιβάλλον.
Δεν κοστίζει παραπάνω από την κατασκευή μιας συμβατικής κατοικίας.
Μια βιοκλιματική κατοικία ξεκινά από τον μεσημβρινό προσανατολισμό της (Βορράς –Νότος). Εστιάζεται ιδιαίτερα στην ισχυρή θερμομόνωση

του κτιρίου με φυσικά υλικά και εκμεταλλεύεται τη θερμική αδράνεια, τη θερμοχωρητικότητα των τοίχων κσθώς επίσης τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, γεωθερμικά συστήματα για τη θέρμανση αλλά και ψύξη του κτιρίου, ενεργειακά τζάκια ή σόμπες, ηλιακές καμινάδες για το φυσικό φωτισμό, υπόγειους σωλήνες μεταφοράς αέρα για το δροσισμό του κτιρίου, πράσινα δώματα κλπ).

1.4 Οικολογική δόμηση

Η οικολογική δόμηση είναι η δόμηση που προσεγγίζει το κτίριο ολιστικά, ώστε να είναι φιλικό προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο.
Ο σχεδιασμός του κτιρίου είναι βιοκλιματικός, δηλαδή λαμβάνει υπόψη τον προσανατολισμό, φωτισμό από τον ήλιο, σκιασμό και αερισμό, το σχήμα, το μέγεθος αλλά και θέση των κουφωμάτων, τη θερμομόνωση του κελύφους, τη χρήση παθητικών ηλιακών και αιολικών συστημάτων, κ.α.
Οι λύσεις θέρμανσης και ψύξης βασίζονται σε εναλλακτικές και ανανεώσιμες πηγές (πχ.ήλιος, άνεμος, βιομάζα, γεωθερμία) και όχι σε ρυπογόνα ορυκτά καύσιμα.
Στην επιλογή θέσης του κτιρίου λαμβάνεται υπόψη το υπέδαφος, τα γεωμαγνητικά πεδία, το ραδόνιο, τα καλώδια και οι πυλώνες υψηλής τάσης.
Τα υλικά που χρησιμοποιούνται δε ρυπαίνουν τον εσωτερικό αέρα και καταναλώνουν τη λιγότερη δυνατή ενέργεια στην παραγωγή, μεταφορά και κατεδάφισή τους. Τέλος, στο εργοτάξιο γίνεται εναλλακτική διαχείριση των αποβλήτων και ανακύκλωση.
Ένα οικολογικό κτίριο μπορεί να έχει οικονομία από 50-100%, όταν ο σχεδιασμός του είναι εναρμονισμένος με το κλίμα της περιοχής του ενώ σε σχέση με ένα συμβατικό κτίριο υπεύθυνα κατασκευασμένο (και σωστά θερμομονωμένο) από σκυρόδεμα, το κόστος κατασκευής του είναι χαμηλότερο.[2]

1.5 Η χρήση του πηλού ως υλικό δόμησης

Το φυσικό έδαφος και κατ' επέκταση το κύριο συστατικό του ο πηλός, αποτελεί ένα από τα πρωταρχικά δομικά υλικά στην ιστορία της ανθρωπότητας το οποίο χρησιμοποιείται μέσα από πολυάριθμες εφαρμογές από τους προϊστορικούς χρόνους (στους πολιτισμούς των Περσών, Αιγυπτίων, Συρίων, Βαβυλωνίων, Φοινίκων).[3]
Ο πηλός, είναι μίγμα αργίλου με αμμώδη συστατικά μικρής και μεσαίας κοκκομετρικής διαβάθμισης (ιλύς)[Κορωναίος Α., Πουλάκος Γ., 2006].
Εκτιμάται δε, ότι πάνω από το μισό του παγκόσμιου ανθρώπινου πληθυσμού κατοικεί σε τέτοια "χωμάτινα" κτίσματα.

Το 19^{ο} αιώνα το φυσικό αργιλικό έδαφος εξακολουθεί να αποτελεί ένα από τα κύρια υλικά δόμησης σε όλο τον κόσμο και γύρω στα μέσα του 20ού αιώνα εξοστρακίζεται ολοκληρωτικά από την οικοδομική δραστηριότητα των ανεπτυγμένων χωρών, ενώ εξακολουθεί να παίζει κυρίαρχο ρόλο στον τρίτο κόσμο. Σαν δομικό υλικό κυριαρχεί σε σχεδόν ολόκληρη την Αφρική, τη Μέση Ανατολή, τη Λατινική Αμερική, στην Κίνα σε μία ιδιότυπη μορφή κατοικίας ενώ στην Ευρώπη η εφαρμογή του έχει περιοριστεί σημαντικά έως εγκαταλειφθεί αλλά τα 'χωμάτινα' οικοδομήματα αποτελούν ένα κομμάτι του αστικού τοπίου ή της υπαίθρου (στη Δανία, Γερμανία, Σουηδία, Μ. Βρετανία, Ισπανία, Γαλλία κ σε Ανατολικές Ευρωπαϊκές χώρες).

Η σταδιακή περιθωριοποίηση του αργιλικού εδάφους ως δομικό υλικό επήλθε κυρίως εξαιτίας της ανάπτυξης νέων τεχνολογικά υλικών και λόγω των μοντέρνων αρχιτεκτονικών εφαρμογών. Όμως, παρά το γεγονός ότι ακόμα αντιμετωπίζεται με σκεπτικισμό εξαιτίας των δευτερευόντων αρχιτεκτονικών εφαρμογών με τις οποίες έχει συνδεθεί και εξαιτίας της ίδιας της ασταθούς του φύσης απέναντι στη διαλυτική ικανότητα του νερού, σήμερα οι θεωρητικές νομοτέλειες της αρχιτεκτονικής και η διαχρονικότητά τους (όπως π.χ. αυτή της δόμησης με πέτρα) τίθενται υπό αμφισβήτηση και ταυτόχρονα έχει

ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός του παγκόσμιου αρχιτεκτονικού εκδημοκρατισμού όπου για οποιαδήποτε εφαρμογή αναζητείται η οικονομικότερη λύση [3].
Επιπλέον, εξαιτίας της αναγκαιότητας εξεύρεσης οικολογικών και συνάμα οικονομικών λύσεων, ο πηλός επανεμφανίζεται σε όλες τις αναπτυγμένες χώρες έχοντας βελτιωμένη μορφή, καθώς οι ιδιότητές του, από περιβαλλοντική άποψη, τον κατατάσσουν μεταξύ των οικοδομικών υλικών του μέλλοντος αλλά και γιατί μέσω των σύγχρονων αναπτυγμένων τεχνολογιών μπορεί να ανταποκριθεί ικανοποιητικά στις υψηλές απαιτήσεις του σημερινού τρόπου ζωής [4].

Παρά την ελλιπή εξειδικευμένη έρευνα σχετικά με την εφαρμογή τεχνικών με πηλό στην ελληνική αρχιτεκτονική και πολεοδομία είναι γνωστό με βεβαιότητα ότι το υλικό αυτό χρησιμοποιείτο ακατάπαυστα από την προϊστορική εποχή (Διμήνι, Σέσκλο κ.ά.) έως τα μέσα του περασμένου αιώνα σε πολλές περιοχές ελληνικής χερσονήσου κυρίως με την τεχνική των ωμών πλίθων και την μικτή τεχνική ξύλου και ωμού πηλού [Th. Markopoulos et al., 2009]
Εφαρμογές με ωμό πηλό έχουν επιβεβαιωθεί σε σημαντικούς αρχαιολογικούς χώρους στην κτήριο-δόμηση και την οχυρωματική. Ιδιαίτερα στη Μινωική Κρήτη, στον αρχαιολογικό χώρο της Κνωσού, εντοπίζονται οι πρώτες αρχαιολογικές αποδείξεις ύπαρξης κατοικιών με τοιχοποιία από ωμούς πλίνθους (που είχαν στεγνώσει με τη βοήθεια του ήλιου) κατά τη Νεολιθική περίοδο, πριν από το 3400 π.Χ., ενώ κατά την Πρώιμη Μινωική Περίοδο η οποία εκτείνεται από το 3400 ως το 2200 π.Χ. κατασκευάζονται μνημειώδη οικοδομήματα από ωμόπλινθους που δεν έχουν εντελώς στεγνώσει πάνω στους οποίους εφαρμόζεται κυρίως ένα τραχύ επίχρισμα ασβέστη και ακολουθεί το φινίρισμα των επιφανειών με λεπτόκοκκη βαθυκόκκινη ώχρα διαμορφώνοντας ένα σοβά συμπαγή σαν τσιμέντο. [5]
Στην παραδοσιακή ελληνική αρχιτεκτονική έχουμε πολυάριθμες μαρτυρίες τόσο σε αστικές και ημιαστικές όσο και σε αγροτικές περιοχές ποικίλης τυπολογικής μορφής και χρήσης [Papaioannou K., 2003].

Στα νεώτερα χρόνια παρατηρείται σημαντική ωρίμανση των τεχνικών με ωμούς πλίθους σε πολλές περιοχές της Ελλάδος με την δημιουργία ακόμα και οικισμών (Κορεστιά, εικ.1,2,3,4) νεοκλασικού αρχιτεκτονικού ύφους αλλά και οικισμών υποδοχής προσφύγων (Κοκκινιά, Ν. Πεύκη, Μαγικό Ξάνθης κ.ά.) μετά την ανταλλαγή πληθυσμών με τη Τουρκία το 1922 [Filippidis D., 1991].

.

Εικ.1,2,3,4. Παραδοσιακός οικισμός με πλινθόκτιστα σπίτια στον Κρανιώνα Καστοριάς [6]

Σήμερα η εφαρμογές με πηλό στον ελληνικό χώρο περιορίζονται σε μικρές αναστηλωτικές εργασίες (Ταμπάκικα Άμφισσας), σε νέες επεμβάσεις ιστορικού-μουσειακού χαρακτήρα (Χάνι της Γραβιάς) και σε μικρές πειραματικές ιδιωτικές κατασκευές. Όσον αφορά στη

χωροθέτηση των κτιρίων από πηλό σε σχέση με την κατανομή των σεισμογενών περιοχών στον ελληνικό χώρο είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα η συγκέντρωση μεγάλου αριθμού τέτοιων κατασκευών γύρο από τον έντονα σεισμογενή Κορινθιακό κόλπο [Filippidis D., 1991].

1.6 Τα πλεονεκτήματα της χρήσης αργιλικής γης ως δομική ύλη στην οικολογική δόμηση

Σήμερα πάνω από το 30% του παγκόσμιου πληθυσμού χρησιμοποιεί τα εδαφικά υλικά ως δομικά υλικά [7].
Η χρήση της αργιλικής γης στην οικολογική δόμηση ανταποκρίνεται στις βιοκλιματικές απαιτήσεις της σύγχρονης αρχιτεκτονικής με κύριους λόγους τις δυνατότητες εφαρμογών στον κατασκευαστικό τομέα, την οικονομικότητα των λύσεων λόγω ενεργειακής εξοικονόμησης και τη διατήρηση του περιβάλλοντος [4].
Ειδικότερα:

- Η αργιλική γη είναι εύκολα διαθέσιμο υλικό καθώς αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της υπαίθρου και υπάρχει άφθονο στη φύση, με ταυτόχρονο ελάχιστο κόστος εξόρυξης και επεξεργασίας. Η επιτόπια διαθεσιμότητα και η δυνατότητα ανακύκλωσής του προάγει την εξοικονόμηση κόπου, χρόνου και χρήματος που απαιτούνται για την παραγωγή των υλικών, τη μεταφορά τους κλπ., άρα συνολικά προωθείται η εξοικονόμηση ενέργειας.
- Λόγω της ορυκτολογικής της σύστασης από φυλλοπυριτικά ορυκτά είναι ελαστικό, εργάσιμο, ενισχυμένο υλικό με αξιοσημείωτες ιδιότητες πλαστικότητας αλλά και θερμικής αδράνειας. Δεν καίγεται και επομένως συμβάλλει στην πυρασφάλεια μιας κατασκευής.
- Με την κατάλληλη εφαρμογή δομικών υλικών από πηλό σε συνδυασμό με άλλα φέροντα φορτίων δομικά στοιχεία όπως πχ. ξυλοδεσιές, ξυλότυπους, ή/και θεμελίωση με δομικούς λίθους και σκυρόδεμα, μία κατασκευή δύναται να εμφανίζει βέλτιστη αντισεισμική συμπεριφορά.

- Είναι υλικό ευπροσάρμοστο σε κλιματολογικές μεταβολές. Έχει θερμομονωτικές ιδιότητες και 'αναπνέει' καθώς μπορεί να συγκρατεί την υγρασία από ένα ψυχρό εσωτερικό περιβάλλον και να την αποδίδει όταν ο χώρος αυτός γίνεται ιδιαίτερα θερμός και ξηρός.
- Ανάλογα με την εκάστοτε οικοδομική εφαρμογή και τα διαθέσιμα επιτόπια υλικά το φυσικό έδαφος, η άργιλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσιο ή σε ανάμιξη με άλλα φυσικά υλικά φυτικής ή ζωικής προέλευσης (πχ. άχυρο, ξύλο, καλάμι, φυσικές ρητίνες, τρίχες ζώων) είτε με άλλα φυσικά υλικά εδάφους ή πετρωμάτων (π.χ. άμμος) ή παράγωγα φυσικών πρώτων υλών μετά από κατεργασία τους (πχ. υδραυλικός ασβέστης) σε κονιάματα δόμησης, επιχρίσματα, στα δάπεδα, στα δώματα σαν μονωτικό υλικό και σαν υλικό πλήρωσης, αλλά και στην παραγωγή ωμοπλίνθων, πλιθρών, οπτοπλίνθων κλπ.
- Είναι άπειρα ανακυκλώσιμο ή βιοαποικοδομήσιμο υλικό, ατοξικό εκτός μεμονωμένων περιπτώσεων (εξαιτίας επιβλαβών στοιχείων που μπορεί να έχουν δεσμευτεί στο κρυσταλλικό πλέγμα των αργιλικών ορυκτών όταν π.χ. αυτά έχουν προέλθει από εξαλλοίωση γρανιτών).
- Ασκεί πάνω στο χρήστη του οικοδομήματος ωφέλιμες επιδράσεις, δρώντας σαν βιολογικός εξισορροπητικός παράγοντας (ως ένα από τέσσερα βασικά στοιχεία που απαντώνται στη φύση και διέπουν τη ζωή μας –αέρας, νερό, γη, φωτιά).
- Από πλευράς περιβαλλοντικών επιπτώσεων, η επεξεργασία του αργιλοχώματος για τη παραγωγή άλλων δομικών υλικών είναι δυνατό να απαιτεί ελάχιστες ποσότητες συμβατικής ενέργειας και επομένως έτσι αποφεύγεται η εκπομπή ρυπογόνων ουσιών στην ατμόσφαιρα. Ιδιαίτερα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν πρώτη ύλη για την παραγωγή ωμοπλίνθων και πλιθρών χωρίς κατανάλωση συμβατικής ενέργειας, αφού η όπτηση επιτυγχάνεται με την ηλιακή ενέργεια και το στέγνωμα, η ξήρανση με την αιολική.

- Η άργιλος και τα παράγωγα απ' αυτήν δομικά υλικά αποτελούν τα κύρια δομικά στοιχεία πολλών μνημείων, ιστορικών κτιρίων, οικισμών σε ολόκληρο τον κόσμο αλλά και στην Ελλάδα, επομένως απαιτείται η βαθύτερη και ενδελεχής μελέτη αυτών των υλικών στα πλαίσια της φιλοσοφίας αποκατάστασης και ανάδειξης της πολιτιστικής μας κληρονομιάς μέσα από την οποία αντλούνται σημαντικές πληροφορίες για τη βιοκλιματική δόμηση και την ενεργειακή οικονομία.
- Στον Ελληνικό χώρο οι εφαρμογές με αργιλική γη στον κατασκευαστικό τομέα θα προωθήσουν την αειφορία της χώρας η οποία αντιμετωπίζει σοβαρή οικονομική κρίση. Η αειφόρος (βιώσιμη) ανάπτυξη έχει στόχο την ορθολογική διαχείριση των φυσικών πόρων, με τρόπο ώστε να καλύπτονται οι ανθρώπινες ανάγκες του παρόντος, ενώ ταυτόχρονα να μην υπονομεύεται η κάλυψη των αναγκών του μέλλοντος.[4]

1.7 Κύρια είδη δομικών υλικών και τυπολογίες οικολογικής δόμησης με αργιλούχους σχηματισμούς

Οι τεχνικές οικολογικής δόμησης που εφαρμόζονται σήμερα είναι η δόμηση με πλίνθους (adobe), η δόμηση με κομπ (cob), η δόμηση με ρευστή γη (poured earth), η δόμηση με αργιλοσκυρόδεμα (rammed earth) και η δόμηση με αχυροπηλό (light clay straw).
Στην Ελλάδα, αρκετές φορές οικοδομήθηκαν κτίρια δημόσια αλλά και ιδιωτικά με κύριο δομικό υλικό ωμόπλινθους που είχαν στεγνώσει στον ήλιο. Η εμφάνισή τους ιστορικά αντιπροσωπεύει τον «εκπολιτισμό». Στην ελληνική αρχιτεκτονική το φυσικό έδαφος παίζει έναν σημαντικό ρόλο και ως στοιχείο οικοδόμησης και ως διακοσμητικό χαρακτηριστικό [Papaioannou K., 2003].

1.7.1. Ωμόπλινθος (adobe), πλίθα ή πλιθιά (mudbrick)

Η πλίθα είναι ένα από τα παλαιότερα φυσικά οικοδομικά υλικά. Μία πλίθρα (mudbrick) είναι ωμός πλίνθος που έχει παραχθεί από άργιλο

ή λάσπη (μάργα) με ένα συνδετικό υλικό όπως είναι ο φλοιός ριζιού ή το άχυρο. [8]

Ο ωμόπλινθος, με το διεθνή χρησιμοποιούμενο όρο 'Adobe' είναι ένα φυσικό δομικό υλικό που έχει παρασκευαστεί από την ανάμιξη αργιλικού εδάφους, άμμου και νερού με την προσθήκη ινωδών ή οργανικών βιοϋλικών (πχ. άχυρο, κοπριά) για την ενίσχυση της αντοχής και της συνεκτικότητας, έχει μορφοποιηθεί χρησιμοποιώντας ειδικά ανοιχτά πλαίσια-καλούπια του επιθυμητού σχήματος και αφήνεται να στεγνώσει στον ήλιο στο επιθυμητό σχήμα.[9]

Ο ασβέστης, το τσιμέντο πόρτλαντ και η ποζολάνη ή η υψηλού πυριτικού περιεχομένου ιπτάμενη τέφρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν χημικά πρόσθετα (μεμονωμένα ή σε συνδυασμό μεταξύ τους) για τη βελτίωση των τεχνικών χαρακτηριστικών των γαιωδών δομικών υλικών.
Η προσθήκη τσιμέντου σε εδάφη φτωχά σε αργιλικό περιεχόμενο αυξάνει σημαντικά την αντοχή των παραγόμενων πλίνθων αλλά η προσθήκη του δεν πρέπει να υπερβαίνει το ποσοστό 5-10% λόγω της μεγάλης ενεργειακής κατανάλωσης που απαιτείται κατά την παραγωγή του.[10]

Συνήθως οι ωμόπλινθοι έχουν σχήμα παραλληλεπίπεδο, διαστάσεων 25cm (10 inches) x 36cm (14 inches) και χτίζονται όπως τα τούβλα (εικ.5). Σχηματίζονται είτε χύνοντας το μίγμα σε καλούπια μέχρι να στεγνώσει είτε συμπιέζοντάς το σε υδραυλικές πρέσες. Η σταδιακή ξήρανσή τους σε σκιώδες μέρος μειώνει τις σχηματιζόμενες ρωγμές.
Το μεγαλύτερο πάχος των ωμόπλινθων σε σύγκριση με εκείνο των κοινών οπτόπλινθων προτιμάται κυρίως εξαιτίας της μεγαλύτερης θερμομονωτικής ικανότητας αλλά και λόγω της σταθερότητας του ωμόπλινθου σε μία κατασκευή.
Ανάλογα με το είδος της εφαρμογής οι ωμόπλινθοι μπορούν να παραχθούν σε οποιοδήποτε σχεδόν μέγεθος και σχήμα λαμβάνοντας υπόψη τον απαραίτητο χρόνο ξήρανσης ενώ κατά την παραγωγή μεγάλων ωμόπλινθων στο αρχικό μίγμα προστίθενται επιπλέον συστατικά

ενίσχυσή του όπως άχυρο, φλοιός ριζιού, τρίχες ζώων, κοπριά, τσιμέντο κ.α. [9]
Ουσιαστικά ο ωμόπλινθος είναι ένα είδος πλίθας αν όχι ταυτόσημα δομικά υλικά.[8]

Εικ.5 Ωμόπλινθοι κοντά σε μία κατασκευή στο **Milyanfan, Kyrgyzstan** [9].

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, το ιδανικό έδαφος για παραγωγή ωμόπλινθου ή πλιθιάς πρέπει να περιέχει άργιλο σε ποσοστό 10%-40% για συνοχή, ενώ το υπόλοιπο είναι επί το πλείστον αμμώδες ή με ή αδρανή μεγαλύτερου μεγέθους (μικρά χαλίκια). Ιδιαίτερα το ιδανικό έδαφος περιέχει: άμμο 10-40%, ιλύ 20-40% και άργιλο 10-40%.

Η σύνθεση ενός ωμόπλινθου είναι κατά προσέγγιση: 1/2 μέρος άμμος (50%), 1/3 μέρος άργιλος (35%) και 1/6 μέρος άχυρο (15%). Μεγαλύτερο ποσοστό αργίλου θα έχει σαν αποτέλεσμα τη συρρίκνωση του ωμοπλίνθου και τη δημιουργία ρωγμών ή σπασίματος της μάζας ενώ μικρότερο ποσοστό αργίλου θα έχει σαν αποτέλεσμα να είναι εύθρυπτος ο ωμόπλινθος. Σε κάποιες περιπτώσεις προστίθεται μία μικρή ποσότητα τσιμέντου ή ασφαλτικών γαλακτωμάτων προκειμένου να σταθεροποιηθεί το υλικό και να προστατευτεί από τη διάβρωση λόγω των καιρικών συνθηκών.[9] Το ίδιο μίγμα παραγωγής ωμόπλινθων, χωρίς την προσθήκη άχυρου, συχνά χρησιμοποιείται σαν πηλοκονίαμα ή επίχρισμα σε εσωτερικές και εξωτερικές τοιχοποιίες.

Οι πλιθιές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε πατώματα, αφού επιστρωθούν και χρωματιστούν με ένα λεπτό στρώμα πηλού και κατόπιν με φυσικό λάδι.

Σε πολλές αρχαίες πόλεις με κτήρια από πλιθιά έχει παρατηρηθεί η προσθήκη υδραυλικού ασβέστη σε εξωτερικά επιχρίσματα ώστε να εξασφαλιστεί υδατοστεγανότητα έναντι της καταστροφικής δράσης της βροχής.[9, 10]
Επίσης στην προσπάθεια να προστατευθούν από τη δράση των περιβαλλοντικών παραγόντων πολλά παλαιά πλίθινα κτίρια έχουν σοβαντιστεί εξωτερικά με τσιμέντο. Αυτή η μέθοδος έχει αποτύχει γιατί όταν η βροχή διαπεράσει το τσιμέντο από κάποια σχισμή, περαιτέρω δεν μπορεί να εξατμιστεί εύκολα, δεδομένου ότι το τσιμέντο εμποδίζει την διαπνοή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το σκάσιμο του σοβά.
Τα κτήρια από πλιθιά που διαθέτουν υδρορροές για την προστασία των τοίχων και θεμελιώσεις πάνω στις οποίες χτίζονται οι ωμόπλινθοι ούτως ώστε να μένουν εκτός επαφής με το έδαφος, απαιτούν λιγότερες εργασίες για την συντήρησή τους.

Οι κατασκευές πλίθας – ωμοπλίνθων είναι εξαιρετικά ανθεκτικές και μεταξύ τέτοιων συγκαταλέγονται μερικά από τα παλαιότερα μνημεία του πλανήτη. Τα κτήρια πλίθας έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε ζεστά, ξηρά κλίματα αφού παραμένουν δροσερά, λόγω της θερμομονωτικής ικανότητας της πρώτης ύλης (αργίλου), δεδομένου ότι η πλίθα αποθηκεύει και απελευθερώνει τη θερμότητα πολύ αργά. Αρκετές φορές, με σκοπό την αποτελεσματικότερη θερμομόνωση, χρησιμοποιείται διπλή τοιχοποιία με αέρα ή άλλη μόνωση στη μέση.

Η δόμηση με ωμοπλίνθους δεν καταναλώνει ενέργεια και επιπλέον εξασφαλίζει ένα οικολογικό τρόπο θερμομόνωσης της κατασκευής. Ωστόσο, θεωρείται πιο επιρρεπής σε σεισμική δραστηριότητα γι’ αυτό σε σεισμογενείς περιοχές θα πρέπει να υποστηρίζεται με ξύλινο σκελετό και όχι να αποτελεί φέρουσα τοιχοποιία.

Μεταξύ πλιθών και ωμοπλίνθων γίνεται κάποιες φορές μία διάκριση η οποία σχετίζεται με τη διαστασιολόγησή των. Υπάρχουν πλίθες στο μέγεθος των συνηθισμένων οπτόπλινθων και μεγαλύτερα *adobines* μερικά από τα οποία φθάνουν το 1 έως 2 μέτρα σε μήκος.

Κτήρια φτιαγμένα από αργιλική γη που έχει στεγνώσει στον ήλιο είναι συνήθη στη Μέση Ανατολή, Βόρεια Αφρική, Νότια Αμερική και Ισπανία (όπου υιοθετείται το αρχιτεκτονικό ύφος Mudijar), ωστόσο η πλίθα χρησιμοποιήθηκε χιλιετίες πριν, από τους γηγενείς λαούς της Αμερικής, στις νοτιοδυτικές Ηνωμένες Πολιτείες, και στην περιοχή των Άνδεων της Νότιας Αμερικής (εικ.6,7,8). Η μέθοδος παραγωγής ωμοπλίνθων εισήχθη στην Ισπανία το 16ο αιώνα από Ισπανούς που είχαν ταξιδέψει στο Μεξικό και το Περού.[11]

Εικ.6,7,8. Κατοικίες από ωμόπλινθους (Μεξικό 2001) [12].

1.7.2 Αργιλοσκυρόδεμα poured earth)

Η τεχνική του αργιλοσκυροδέματος είναι όμοια με το κοινό μπετόν γιατί τα υλικά αναμιγνύονται με τον ίδιο τρόπο χρησιμοποιώντας τσιμέντο σαν συνδετικό υλικό. Η μόνη διαφορά είναι ότι αντί για άμμο και χαλίκια εδώ χρησιμοποιείται κοινό χώμα (αν και το χώμα αυτό πρέπει να έχει κάποιες συγκεκριμένες ιδιότητες). Επίσης χρησιμοποιείται λιγότερο τσιμέντο. Δεν απαιτείται ιδιαίτερη συντήρηση σε αυτούς τους τοίχους μια και έχουν αυξημένη αντίσταση στον ήλιο και την βροχή.
Το ιδανικό χώμα για παραγωγή αργιλοσκυροδέματος πρέπει να έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε πηλό. Πρέπει να γίνονται τα κατάλληλα τεστ για να διασφαλιστεί ότι το μίγμα δεν συρρικνώνεται ή συρρικνώνεται ελάχιστα και έχει συμπιεστική δύναμη 800-1200 psi. Το χώμα που υπάρχει διαθέσιμο στον χώρο κτισίματος μπορεί να αναμιχθεί με άλλο για να βελτιωθεί η συμπεριφορά του ώστε να χρησιμοποιηθεί.
Η χρήση ασβέστη και οξειδίου του μαγνησίου ως πρόσθετα μπορεί να ελαττώσει το προστιθέμενο τσιμέντο έως και 50%.[13]

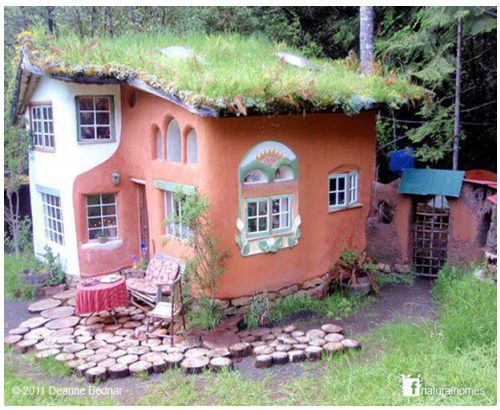
Εικ.9,10 Τοιχοποιίες από αργιλοσκυρόδεμα [14]

1.7.3 Το κομπ (cob)

Το **«κομπ» ε**ίναι μία μορφή γλυπτικής με πηλό και αποτελεί μία από τις αρχαιότερες τεχνικές δόμησης με αργιλούχα υλικά όπου

χρησιμοποιούνται τα χέρια και τα πόδια για να σχηματιστούν μάζες πηλού αναμεμιγμένου με άμμο και άχυρο οι οποίες κατόπιν τοποθετούνται η μία πάνω στην άλλη διαμορφώνοντας μονολιθικές κατασκευές με μεγάλη σταθερότητα. Η διαφορά του cob από το κτίσιμο με πλίνθους συνίσταται στην ευκολία της κατασκευής και την ελευθερία του σχεδιασμού. Εφόσον δεν απαιτούνται ίσιες φόρμες ή καλούπια το ίδιο το υλικό οδηγεί σε οργανικά σχήματα: καμπύλοι τοίχοι, θόλοι και αψίδες (εικ.11, 12, 13).

Εικ.11,12. Η τεχνική κομπ [15]



Εικ. 13 Ένα από τα ωραιότερα φυσικά σπίτια στο Coquille του Όρεγκον. [16]

Γενικά η δόμηση με πλιθιές πλεονεκτεί έναντι της δόμησης κομπ (πχ.στην ταχύτητα κατασκευής) αλλά μειονεκτεί όσον αφορά στην συνοχή και στην στιβαρότητα του κτιρίου καθώς το κομπ συμπεριφέρεται μονολιθικά.

Τα σπίτια από κομπ είναι ανθεκτικά σε διάφορες καιρικές συνθήκες, βιώσιμα στα πιο κρύα κλίματα αλλά και σε συνθήκες ερήμου.
Οι τοίχοι με πάχος που κυμαίνεται από 40 έως και 60 εκατοστά έχουν τεράστια θερμική μάζα και επαρκή μόνωση για χρήση παθητικών ηλιακών συστημάτων θέρμανσης. Απαιτείται μία ελάχιστη πρόσθετη θέρμανση τον χειμώνα και καθόλου ψύξη ακόμη και τις πιο ζεστές μέρες. [Saxton, R. H. 1995].
Το «κομπ» χρησιμοποιήθηκε επί χιλιετίες στις σκληρές κλιματολογικές συνθήκες των βρετανικών ακτών στο ύψος των Αλεούτιων νήσων. Χιλιάδες άνετα και γραφικά σπίτια από κομπ στην Αγγλία κατοικούνται εδώ και αιώνες έχοντας μάλιστα πολύ μεγάλη τρέχουσα εμπορική αξία.[15]
Η αναβίωση της τεχνικής κομπ ξεκίνησε από την Αμερική με συνεχώς αυξανόμενη δημοτικότητα όχι μόνο λόγω των παραπάνω πλεονεκτημάτων αλλά και λόγω της δυνατότητας που προσφέρει στον ιδιοκτήτη – κατασκευαστή να αποφύγει τα τεράστια οικονομικά φορτία και τις δεσμεύσεις που συνεπάγεται η αγορά κατοικίας. Επιπλέον η τεχνική αυτή δεν συνεισφέρει στην καταστροφή των δασών, την κατασπατάληση ορυκτών πόρων, την μόλυνση και ούτε εξαρτάται από βιομηχανικά υλικά και βαριά μηχανήματα.

1.7.4 Εγκιβωτισμένο αργιλοσκυρόδεμα (Rammed earth)

Η μέθοδος δόμησης rammed earth (ή pisé) χρονολογείται πιο παλιά (2000 π.Χ) από το Σινικό Τείχος.
Κατασκευές από rammed earth βρίσκονται σε όλες τις ηπείρους εκτός από την Ανταρκτική και σε ένα εύρος κλιματολογικών συνθηκών που περιλαμβάνουν τις ξηρές και υγρές περιοχές της βόρειας Ευρώπης, τις ημιάγονες ερήμους, περιοχές κοντά σε οροσειρές και στους τροπικούς.
Οι κύριοι λόγοι που ευνοούν την εφαρμογή αυτού του είδους δόμησης είναι η διαθεσιμότητα των εδαφικών σχηματισμών και ο κατάλληλος κτιριακός σχεδιασμός σύμφωνα με τις επιτόπιες κλιματολογικές συνθήκες.

Η τοιχοποιία που προκύπτει κατασκευάζεται εύκολα, είναι ανθεκτική, άφλεκτη, συγκρατεί τη θερμότητα, είναι συμπαγής και ογκώδης. Η κατασκευή τοίχων rammed earth μπορεί να γίνει αποκλειστικά από εργατικό δυναμικό χωρίς τη χρήση μηχανημάτων αλλά οι τοίχοι αυτοί είναι ευπρόσβλητοι από το νερό αν δεν είναι επαρκώς προστατευμένοι.

Η τεχνική του rammed earth είναι όμοια με την τεχνική για adobe και κομπ όσον αφορά στο χρησιμοποιούμενο μίγμα το οποίο είναι κυρίως μίγμα άμμου και πηλού.
Η διαφορά είναι ότι το γεώδες μίγμα τοποθετείται και συμπιέζεται σε ένα στηριζόμενο εξωτερικά προσωρινό πλαίσιο ή καλούπι από ξύλο ή κοντραπλακέ είτε για τη δημιουργία ενός ενιαίου τοίχου είτε μεμονωμένων τμημάτων τοιχοποιίας, οπότε δημιουργούνται πλέον επίπεδες και κάθετες επιφάνειες.

Οι πλευρές του καλουπιού πρέπει να είναι ενισχυμένες και καλά στερεωμένες μεταξύ τους ούτως ώστε να αποτραπούν τυχόν φαινόμενα διόγκωσης ή παραμόρφωσης λόγω των μεγάλων δυνάμεων συμπίεσης.
Στο υλικό προσθέτονται εφόσον απαιτείται αμμοχάλικα, πηλός καθώς και κάποιος σταθεροποιητής όπως υδράσβεστος, τσιμέντο ή ασφαλτικά γαλακτώματα.
Το υγρό μίγμα ρίπτεται πρώτα σε βάθος 10 – 25 cm στο καλούπι και κατόπιν συμπυκνώνεται μέχρι ~50% του συνολικού αρχικού του ύψους. Η συμπύκνωση γίνεται σταδιακά μέχρι την πλήρωση του καλουπιού ως την κορυφή.

Παλαιότερα χρησιμοποιούνταν μακριές σφύρες και η χειρωνακτική αυτή εργασία ήταν αρκετά επίπονη. Στις σύγχρονες κατασκευές από rammed earth πλέον χρησιμοποιούνται μηχανικές σφύρες και γενικά βαρύς μηχανολογικός εξοπλισμός για τη μεταφορά του πρωτογενούς υλικού και των δομικών προϊόντων τοιχοποιίας.

Μετά την ολοκλήρωση μιας τοιχοποιίας τα πλαίσια απομακρύνονται αμέσως ούτως ώστε να πραγματοποιηθεί η επιθυμητή επεξεργασία της εξωτερικής επιφάνειας καθώς οι τοίχοι σκληραίνουν και δε δουλεύονται εύκολα μετά από περίπου 1 ώρα. Προτιμάται να είναι ζεστός ο καιρός κατά την κατασκευή μιας τοιχοποιίας για να στεγνώνει και ταυτόχρονα να σκληραίνει γρήγορα. Η αντοχή των δομών rammed earth αυξάνεται με την ωρίμανσή τους καθώς απαιτείται κάποιος χρόνος για να στεγνώσουν εντελώς και περίπου 2 χρόνια μέχρι να αποκτήσουν την τελική αντοχή τους. Οι εκτεθειμένες στις καιρικές συνθήκες τοιχοποιίες θα πρέπει να σφραγίζονται ώστε να προστατεύονται από την επιβλαβή επίδραση του νερού. Σε σύγχρονες εφαρμογές αυτής της μεθόδου, οι τοιχοποιίες κατασκευάζονται πάνω σε συμβατικές θεμελιώσεις (πέδιλα) είτε σε βάση με πλάκες από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Οι τοιχοποιίες από rammed earth χτίζονται όπως οι συνήθεις τοιχοποιίες αλλά συνδέονται μεταξύ τους με μία λεπτόρρευστη λάσπη αντί του τσιμέντου. Υπάρχουν ειδικά μηχανήματα που είναι συνήθως και χρησιμοποιούνται για να συμπιέσουν το υλικό μέσα στα καλούπια.

Η τεχνική rammed earth μειονεκτεί σε σχέση με τις άλλες φυσικές μεθόδους δόμησης στο ότι απαιτεί επεξεργασία με μηχανικό εξοπλισμό ο οποίος ανεβάζει το κόστος. Από την άλλη μεριά βέβαια αυτό γίνεται προς όφελος της ταχύτητας.
Οι τοίχοι κατασκευάζονται με πάχος τουλάχιστον 35 εκατοστά για να είναι σταθεροί και να έχουν ικανοποιητική θερμική μάζα.
Ένα από τα σημαντικά οφέλη του rammed earth είναι η υψηλή θερμική μάζα. Μπορεί να απορροφήσει τη θερμότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας και να την απελευθερώσει τη νύχτα. Κατ’αυτόν τον τρόπο συγκρατεί τις ημερήσιες θερμοκρασιακές μεταβολές και μειώνει τις ανάγκες για κλιματισμό και θέρμανση. Σε ψυχρά κλίματα απαιτείται η επένδυση των τοίχων με μονωτικά υλικά (όπως το Styrofoam). Επίσης θα πρέπει να προστατευτούν από δυνατή βροχή και να μονωθούν με ατμούς αδιάβροχων επικαλυπτικών υλικών.

Είναι προτιμότερο να μονώνεται η εξωτερική πλευρά του κτιρίου για να διατηρείται σταθερή η εσωτερική θερμοκρασία.
Η τοιχοποιία rammed earth έχει την ικανότητα να ρυθμίζει την υγρασία στην περίπτωση που τοίχοι βρίσκονται ακάλυπτοι σε ένα εσωτερικό χώρο.
Το ποσοστό της υγρασίας διατηρείται σε επίπεδα μεταξύ 40% έως 60%, τιμές ιδανικές για τα άτομα που υποφέρουν από άσθμα ή για ευπρόσβλητα αντικείμενα όπως είναι τα βιβλία. Η θερμική μάζα και το περιεχόμενο σε άργιλο των rammed earth κατασκευών επιτρέπουν στο κτίριο να «αναπνέει» σε μεγαλύτερο βαθμό από όσο επιτυγχάνεται με τις κατασκευές από μπετόν, αποφεύγοντας έτσι τα προβλήματα συμπύκνωσης και δίχως σημαντικές θερμικές απώλειες. [17]

Η θλιπτική αντοχή του rammed earth φθάνει τα 4.3 MPa δηλαδή μικρότερη από εκείνη του σκυροδέματος αλλά ικανοποιητική για κατασκευές κατοικιών. Υπάρχουν αρχαίες κατασκευές από rammed earth σε όλο τον κόσμο οι οποίες αντιστέκονται σε φορτία για χιλιάδες χρόνια.
Οι εφαρμογές rammed earth που χρησιμοποιούν ενίσχυση με ξύλα ή μπαμπού μπορούν να προστατευτούν από κατάρρευση κατά τη διάρκεια σεισμών ή σφοδρών καταιγίδων.

Η προσθήκη τσιμέντου σε φτωχά σε άργιλο εδαφικά μίγματα μπορεί να αυξήσει τη φέρουσα ικανότητα μιας κατασκευής σε φορτία. Το κόστος μίας τέτοιας κατασκευής δεν ξεπερνά τα 2/3 του κόστους μίας συμβατικής τυποποιημένης κατασκευής με σκελετό.
Η χρήση αδιάβροχων σοβάδων, όπως πχ. επιχρισμάτων με τσιμέντο, αποφεύγονται γιατί εξασθενούν την ικανότητα του τοίχου να αποβάλλει την υγρασία, γεγονός απαραίτητο για να διατηρείται η αντοχή του. Οι τοίχοι που έχουν αποκτήσει την τελική αντοχή τους μπορούν να τρυπηθούν εύκολα με καρφιά ή βίδες και να επιδιορθωθούν αποτελεσματικά με το ίδιο υλικό που που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή τους. Οι ατέλειες μπορούν να επιδιορθωθούν εφαρμόζοντας

ένα εδαφικό μίγμα σαν επίχρισμα και κατόπιν ένα μίγμα άμμου για ομαλοποίηση της επιφάνειας.
Το τυπικό πάχος των τοίχων rammed earth που είναι γύρω στα 30 με 35 cm καθώς και η πυκνότητά τους προσδίδει ικανότητα ηχομόνωσης. Τέλος είναι ανθεκτικοί σε τερμίτες, μη τοξικοί, εγγενώς αλεξίπυροι και βιοδιασπώμενοι.

Επειδή οι κατασκευαζόμενες δομές από rammed earth χρησιμοποιούν τοπικά τα διαθέσιμα υλικά, έχουν ως συνήθως χαμηλή ενσωματωμένη ενέργεια και παράγουν πολύ λίγα απόβλητα.
Τα χρησιμοποιούμενα εδάφη είναι συνήθως: υπεδάφη με χαμηλή περιεκτικότητα σε άργιλο (μεταξύ 5% και 15%), ενώ το ανώτερο στρώμα εδάφους αξιοποιείται για τη γεωργική χρήση. Στις περιπτώσεις όπου το έδαφος της ανασκαφής για την προετοιμασία της θεμελίωσης του κτηρίου είναι κατάλληλο για χρήση, το κόστος και η ενεργειακή κατανάλωση για μεταφορά είναι ελάχιστα.
Οι εφαρμογές rammed earth μειώνουν την ανάγκη χρήσης ξυλείας καθώς οι εγκιβωτισμοί είναι αποσπώμενοι και μπορούν να χρησιμοποιηθούν επανειλημμένα.
Όταν χρησιμοποιείται τσιμέντο στο αργιλώδες μίγμα, τότε τα αειφόρα οφέλη της χαμηλής ενσωματωμένης ενέργειας και της ελεγχόμενης υγρασίας δε θα πραγματοποιούνται. Επιπλέον η παραγωγή του ίδιου του τσιμέντου επιβαρύνει το παγκόσμια εκλυόμενο διοξείδιο του άνθρακα σε ένα ποσοστό 1.25 τόνους ανά τόνο τσιμέντου.
Η μερική αντικατάσταση του τσιμέντου με άλλα εναλλακτικά υλικά όπως η λειοτριβημένη σκωρία κλιβάνων έχει αποδειχτεί ότι δεν είναι αποτελεσματική και εγείρει περαιτέρω ερωτήματα βιωσιμότητας.

Η εφαρμογή του rammed earth μπορεί να συνεισφέρει στην ολική ενεργειακή απόδοση των κτιρίων. Η πυκνότητα, το πάχος και η θερμική αγωγιμότητα του rammed earth το κάνουν ένα ιδιαίτερα κατάλληλο υλικό για παθητική θέρμανση με τον ήλιο. Η ζέστη χρειάζεται περίπου 12 h να μεταδοθεί και να εξαπλωθεί σ’ένα χώρο από ένα τοίχο πάχους 35 cm (14 in).

Επίσης έχει αποδειχθεί ότι μπορεί να επιλύσει προβλήματα με άστεγους που έχουν προκληθεί λόγω του υψηλού κτιριακού κόστους και να βοηθήσει στον περιορισμό των οικολογικών επιπτώσεων λόγω του αφανισμού των δασών και της τοξικότητας των δομικών υλικών που σχετίζονται με τις συμβατικές μεθόδους δόμησης.
Οι κύριοι λόγοι που ευνοούν την εφαρμογή της τεχνικής rammed earth είναι η διαθεσιμότητα των πρώτων υλών και η δυνατότητα ενός κατάλληλου κτιριακού σχεδιασμού σύμφωνα με τις επιτόπιες κλιματικές συνθήκες.[17]

Εικ.14,15,16,17,18. Τοιχοποιίες και σύγχρονες κατοικίες από rammed earth (εγκιβωτισμένο αργιλοσκυρόδεμα).[18]

1.7.5 Πηλός με άχυρο (light clay straw)

Μίγμα πηλού με άχυρο το οποίο χρησιμοποιείται ως γέμισμα σε ξύλινο σκελετό κατασκευής εμφανίστηκε από το 12 αι. στη Γερμανία και σε άλλα μέρη της Ευρώπης.[19]

Το **άχυρο με πηλό** χρησιμοποιείται για τοιχοποιίες που δεν φέρουν φορτία. Κατασκευάζεται από άχυρα, κατά προτίμηση με μακριά ίνα τα οποία αναμιγνύονται με διάλυμα πηλού ο οποίος παίζει και τον συνεκτικό ρόλο.

Το άχυρο εμποτίζεται με πηλό ο οποίος είναι διαλυμένος σε νερό και στη συνέχεια συμπιέζεται σε καλούπια με μέγιστο ύψος 0,50 μέτρα. Μόλις το υλικό στεγνώσει συνεχίζεται το χτίσιμο από πάνω.

Πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η ταχύτητα κατασκευής και η εξαιρετική θερμομόνωση. Στα μειονεκτήματα συγκαταλέγεται το υψηλότερο κόστος κατασκευής λόγω της ανάγκης χρήσης σκελετού στο κτίριο.

Εικ.19, 20. Προετοιμασία μίγματος άχυρου – πηλού με νερό και εφαρμογή του στον ξύλινο σκελετό της κατασκευής [19].

1.7.6. Πηλοκονιάματα – επιχρίσματα

Όταν το αργιλικό έδαφος αναμιχθεί με νερό δημιουργείται μια εύπλαστη μάζα που στερεοποιείται, αφού εκτεθεί στον ήλιο. Η στερεοποίηση αυτή οφείλεται στην ύπαρξη μιας συγκολλητικής ουσίας του πηλού.

Η πηλοκονία έχει ασθενείς συγκολλητικές ιδιότητες που τις χάνει όταν ξαναβραχεί και τις διατηρεί μόνο όταν ψηθεί. Με την πάροδο του χρόνου ανακαλύφθηκαν ισχυρότερες ύλες, όπως π.χ. ο ασβέστης,

το τσιμέντο, τα ασφαλτικά υλικά. Οι ύλες αυτές διατηρούν την συγκολλητική τους ιδιότητα κάτω από διάφορες συνθήκες υγρασίας, θερμότητας κλπ.

Ο όρος κονίαμα αποδίδεται σε μίγμα που έχει την ικανότητα να συνδέει τους δομικούς λίθους των κατασκευών. Τα συστατικά μέρη του κονιάματος αποτελούν συνδετικά υλικά, αδρανή και νερό.

Συνδετική ύλη ή κονία καλείται κάθε υλικό, που με κατάλληλη προεργασία μπορεί να γίνει πλαστικό και να παρουσιάσει συγκολλητικές ιδιότητες: το υλικό αυτό στερεοποιείται βαθμιαία, ώσπου να σχηματισθεί σκληρή και συμπαγής μάζα.

Όταν αναμιχθούν μία κονία (π.χ. ασβέστης ή τσιμέντο) με νερό και αδρανή (π.χ. άμμο ή σκύρα), προκύπτει ένα πλαστικό μίγμα, που ονομάζεται κονίαμα (λάσπη) ή σκυρόδεμα (μπετόν) αντίστοιχα. Όταν η κονία σκληρυνθεί, οι κόκκοι των αδρανών συνδέονται μεταξύ τους και έτσι σχηματίζουν ένα στερεό σώμα. Οι ιδιότητες του στερεού αυτού εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το είδος της κονίας που χρησιμοποιήθηκε. Έτσι διακρίνονται σε: πηλοκονιάματα, ασβεστοκονιάματα, γυψοκονιάματα, τσιμεντοκονιάματα ή μπορεί να είναι συνδυασμός δύο ή περισσοτέρων συνδετικών υλικών όπως ασβεστοτσιμεντοκονιάματα κλπ. Τα κονιάματα χρησιμεύουν ως συνδετικά και επικαλυπτικά υλικά.
Η σύνδεση ή η εξωτερική επίχριση των ωμοπλίνθων στα οικήματα με ωμόπλινθους στην Ελλάδα γινόταν με υγρό πηλό διότι η άσβεστος αν και ήταν γνωστή από τα προϊστορικά χρόνια δεν χρησιμοποιήθηκε από τους Έλληνες τα ιστορικά χρόνια ως συνδετικό μέσο αλλά μόνο ως επίχρισμα.[Μπέη Γ., 2004][20]

Ο ωμός πηλός χρησιμοποιήθηκε από τα προϊστορικά χρόνια ως συνδετική ύλη των μικρών λίθινων τοίχων, για δάπεδα, κυκλοτερείς εστίες, και στέγες είτε ως υπόθημα καλάμων ή ως επίχρισμα ξηλόπλεκτων θόλων, ακόμη και για την κατασκευή θόλων από ωμοπλίνθους κατά το σύστημα της εκφοράς. Κατά τους ιστορικούς χρόνους χρησιμοποιήθηκε ενίοτε ο

πηλός και ως υπόθεμα των πήλινων κεραμίδων των στεγών όπου και πάλι αναμίχθηκε με κοπανισμένο άχυρο.[20]

Στα πηλοκονιάματα χρησιμοποιείται ως κονία ο πηλός, ο οποίος είναι μίγμα αργίλου με αμμώδη συστατικά μικρής και μεσαίας κοκκομετρικής διαβάθμισης. Παρουσιάζει καλή πρόσφυση, θερμομονωτικές ιδιότητες και παρέχει πυροπροστασία. Όταν διαβραχεί επανέρχεται από την ξηρή κατάσταση στην πλαστική. Χρησιμοποιείται για την παρασκευή κεράμων και πλίνθων με ή χωρίς όπτηση.

Για την βελτίωση των ποιοτικών και τεχνικών χαρακτηριστικών των πηλοκονιαμάτων προστίθενται πολλές φορές οργανικές ύλες η ανόργανες ύλες. Οργανικά πρόσθετα όπως άχυρο, τρίχες ζώων, καζεΐνη, κόπρανα ζώων, πίσσα, κτλ. Ανόργανα πρόσθετα όπως ποζολάνες, υδράσβεστος, τσιμέντο, ασβέστης, υδραυλική άσβεστος, κτλ.[20]

- Το **τσιμέντο** είναι μία υδραυλική συνδετική ύλη, δηλαδή ένα λεπτότατα αλεσμένο ανόργανο υλικό το οποίο, όταν αναμειχθεί με νερό, σχηματίζει ένα πολτό που πήζει και σκληραίνει δια μέσου αντιδράσεων και μηχανισμών ενυδάτωσης και το οποίο, μετά τη σκλήρυνση, διατηρεί την αντοχή και τη σταθερότητά του ακόμη και μέσα στο νερό. Τα βασικά συστατικά του τσιμέντου από στοιχειακή άποψη είναι το ασβέστιο ,το πυρίτιο, το αργίλιο και ο σίδηρος. Τα στοιχεία αυτά λαμβάνονται από μη μεταλλικές ορυκτές ύλες , όπως ο ασβεστόλιθος ,οι ασβεστολιθικές μάργες , οι σχιστόλιθοι ,οι άργιλοι κ.ά . Για λόγους αριστοποίησης της ποιότητος ή οικονομικότητας της παραγωγικής διαδικασίας χρησιμοποιούνται και άλλες ύλες όπως βωξίτης, πυριτική άμμος καολίνης, αποφρύγματα σιδηροπυρίτη. [21]

  Τα μίγματα ασβεστούχων και αργιλοπυριτικών πετρωμάτων ψήνονται σε υψηλές θερμοκρασίες (1450°C) και σχηματίζουν το ενδιάμεσο προϊόν κλίνκερ. Το κλίνκερ συναλέθεται με γύψο και

άλλα συνείσακτα σε καθορισμένες αναλογίες και λεπτότητες για την παραγωγή διαφόρων τύπων και κατηγοριών τσιμέντου τύπου πόρτλαντ. Το τσιμέντο αποτελείται από 4 κύριες ορυκτολογικές ενώσεις :

α)το **πυριτικό τριασβέστιο** ($3CaO.SiO_2$) συμβολιζόμενο ως **C3S**
β)το **πυριτικό διασβέστιο** ($2CaO.SiO_2$) συμβολιζόμενο ως **C2S**
γ)το **αργιλικό τριασβέστιο** ($3CaO.Al_2O_3$) συμβολιζόμενο ως **C3A**
δ)το **αργιλοσιδηρικό τετρασβέστιο** ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$) συμβολιζόμενο ως **C4AF**

Επίσης υπάρχει παρουσία μικρών ποσοστών CaO, MgO και αλκαλίων (Na_2O,K_2O) μη συνδεδεμένων ορυκτολογικά καθώς επίσης και παρουσία άλλων στοιχείων σε πάρα πολύ μικρά ποσοστά ή ίχνη. Τα πλέον βασικά ορυκτολογικά συστατικά C3S και C2S αντιδρούν με το νερό και σχηματίζουν ένυδρες ασβεστοπυριτικές ενώσεις και υδροξείδιο του ασβεστίου. Οι αντιδράσεις αυτές είναι εξώθερμες και ταχύτατες. Προκειμένου να ελέγχεται ο χρόνος των αντιδράσεων προστίθεται στην άλεση του τσιμέντου γύψος που δρα ως ρυθμιστής.[21]

Ο όρος **άσβεστος** (ασβέστης) είναι ένας γενικός όρος που περιλαμβάνει όλες τις φυσικές και χημικές μορφές των διαφόρων ποιοτήτων με τις οποίες το οξείδιο ή/και το υδροξείδιο του ασβεστίου και του μαγνησίου μπορούν να εμφανισθούν.

Συγκεκριμένα, οι υδραυλικοί άσβεστοι είναι άσβεστοι που κυρίως συνίστανται από πυριτικά άλατα του ασβεστίου και του αργιλίου καθώς και υδροξείδιο του ασβεστίου. Παράγονται με έψηση πλουσίων σε αργίλιο ασβεστολίθων και στην συνέχεια σβήσιμο και άλεση ή με την ανάμειξη των κατάλληλων υλικών με υδροξείδιο του ασβεστίου. 'Εχουν την ιδιότητα να πήζουν και να σκληραίνονται όταν έρχονται σε επαφή με το νερό. Το διοξείδιο του άνθρακα συμβάλλει θετικά στην διαδικασία της

σκλήρυνσης. Διακρίνονται στις υδραυλικές και στις φυσικές υδραυλικές ασβέστους. Δεν παράγονται βιομηχανικά στην Ελλάδα.

Η **φυσική υδραυλική άσβεστος** προέρχεται από έψηση ειδικών μαργαϊκών ασβεστόλιθων που περιέχουν 5-20% άργιλο. Η έψηση γίνεται σε θερμοκρασίες μικρότερες από αυτές του τσιμέντου και συγκεκριμένα από 900-1300°C Η άσβεστος αυτή έχει υδραυλικές ιδιότητες που οφείλονται στις ενώσεις του ασβεστίου με το πυρίτιο το αργίλιο και τον σίδηρο που αποτελούν τους υδραυλικούς παράγοντες της κονίας. Μειονεκτεί όμως σημαντικά λόγω του μεγάλου ποσοστού του ελεύθερου CaO που περισσεύει. Για τον λόγο αυτόν δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσια στα διάφορα κονιάματα, αλλά απαιτεί ποζολάνες ώστε να δεσμευτεί το ελεύθερο CaO με το ενεργό SiO_2 που αυτές ως γνωστόν έχουν.
Οι σχηματιζόμενες υδραυλικές φάσεις στις οποίες οφείλεται η αντοχή του κονιάματος είναι ταυτόσημες με εκείνες του τσιμέντου:

<u>Υδραυλική άσβεστος</u>

$CaO+Al_2O_3 \rightarrow CaO.Al_2O_3$

$2CaO+SiO_2 \rightarrow 2CaO.SiO_2$

$CaO+H2O \rightarrow Ca(OH)_2$
$C2S+CA+H_2O \rightarrow CSH+CAH+Ca(OH)_2$

$Ca(OH)_2+CO_2+H_2O \rightarrow CaCO_3+2H_2O$

<u>Τσιμέντο</u>
$CaO+A.S.F. \rightarrow C2S+C3S+C3A+C4AF$
$C2S+C3S+C3A+ H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + CSH+CAH$

Παρουσία $CaSO_4.2H_2O$, K_2O, Na_2O

Οι **σβησμένες άσβεστοι** είναι αερικές άσβεστοι που κυρίως συνίστανται από υδροξείδιο του ασβεστίου που προέρχεται από ελεγχόμενο σβήσιμο (προσθήκη νερού) των άσβηστων ασβέστων. Παράγονται ως ξηρά σκόνη (σκόνη υδρασβέστου ή υδράσβεστος) και στην Ελλάδα κυρίως ως πολτός και δεν εμφανίζουν εξώθερμη αντίδραση σε επαφή με το νερό. Με τις μορφές αυτές συμμετέχουν στα κονιάματα. Σε αυτές υπάγονται και οι *Δολομιτικές υδράσβεστοι* που είναι σβησμένες άσβεστοι που συνίστανται κυρίως από υδροξείδιο του ασβεστίου και του μαγνησίου καθώς και οξείδιο του μαγνησίου. Διακρίνονται σε α) ημιενυδατωμένες που αποτελούνται από υδροξείδιο του ασβεστίου και οξείδιο του μαγνησίου και β) σε πλήρως ενυδατωμένες που είναι μόνο υδροξείδια. Δεν παράγονται βιομηχανικά στην Ελλάδα. Ειδική περίπτωση είναι το *Γαλάκτωμα ή γάλα ασβέστου (milk of lime)*, που είναι το προϊόν που παρασκευάζεται όταν αραιωθεί με νερό, αρίστης ποιότητας πολτός ασβέστου. Χρησιμοποιείται κυρίως στους λευκούς χρωματισμούς σε συνδυασμό με άλλα υλικά που του επαυξάνουν τις ιδιότητες του. Το αιώρημα αυτό συνήθως περιέχει έως 40% κ.β. στερεά. [22]

- Οι **ποζολάνες** είναι φυσικές ή τεχνητές κονίες πυριτικής ή αργιλοπυριτικής σύστασης, οι οποίες ανήκουν στην κατηγορία των υδραυλικών κονιών γιατί όταν αντιδρούν παρουσία υγρασίας με την υδράσβεστο ($Ca(OH)_2$) δίνουν ενώσεις με αυξημένες υδραυλικές ιδιότητες. Οι ποζολάνες διακρίνονται σε φυσικές και σε τεχνητές ανάλογα με την προέλευσή τους. Οι φυσικές ποζολάνες είναι κυρίως ηφαιστιογενείς, όπως η ελληνική θηραϊκή γη, η ιταλική pozzolana (η οποία έδωσε το όνομα της σ' αυτή την κατηγορία των κονιών), η γερμανική trass, κ.ά.
  Οι τεχνητές ποζολάνες παρασκευάζονται από αργίλους και σχιστόλιθους με θερμική κατεργασία, δηλαδή πύρωση σε θερμοκρασίες μεταξύ 770 ÷ 900 ^{o}C.[22]

Εικ.21. Καθεδρικός ναός Vank Cathedral, Ισπαχάν, με ενισχυμένο ασβεστοπηλοκονίαμα

1.8. Ελληνικό νομοθετικό πλαίσιο – σημαντικές ιδιότητες και συντελεστές δόμησης

Στην ιστορία της ελληνικής δόμησης καταγράφονται οικήματα ή παραδοσιακοί οικισμοί με κυρίαρχο δομικό υλικό την αργιλική γη και τα προϊόντα της, τα οποία κινδυνεύουν από αφανισμό ελλείψει των απαιτούμενων εφαρμοζόμενων πρακτικών και μεθόδων αναστήλωσης – αποκατάστασής των.

Η συγκριτική αξιολόγηση του πηλού με άλλα οικοδομικά υλικά ευρείας χρήσης στην Ελλάδα όπως το οπλισμένο σκυρόδεμα υποδεικνύει τα σημαντικά πλεονεκτήματα του πηλού κυρίως σε ότι αφορά με την εκπλήρωση των περιβαλλοντικών κριτηρίων (ενεργειακό κόστος εξόρυξης, επεξεργασίας, κατασκευής, ανακυκλωσιμότητα, αξιοποίηση τοπικών φυσικών και ανθρώπινων πόρων, περιβαλλοντικές επιπτώσεις κ.α.). Δυστυχώς η περιθωριοποίηση του πηλού ως οικοδομικό υλικό, τουλάχιστον στη χώρα μας, έχει συμβάλει στην υποβάθμισή του όσον αφορά το θεσμικό και το ερευνητικό πλαίσιο. Επιπλέον η βιώσιμη αειφόρος ανάπτυξη στον Ελλαδικό χώρο, λόγω της υπάρχουσας οικονομικής κρίσης, πρέπει να συνδυάζει τα κριτήρια περιβαλλοντικής προτεραιότητας με εκείνα της κοινωνικής και οικονομικής ανάπτυξης οπότε η μελέτη και εφαρμογή αυτών των

υλικών στον τομέα της δόμησης πρέπει να τοποθετηθεί σε νέο πλαίσιο. [Markopoulos et al., 2008]

Η Ελλάδα στην προσπάθεια της να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια εφαρμόζει από το 1979 σχετικό κανονισμό θερμομόνωσης (ΦΕΚ 362/4-7-79) όπου διαιρεί την χώρα σε 3 ζώνες ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν και καθορίζει τα βασικά στοιχεία θερμομονωτικού σχεδιασμού. Ο νόμος αυτός πρόσφατα αντικαταστάθηκε από το Νόμο 3661 - «Μέτρα για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων» (ΦΕΚ 89/19-05-2008), ο οποίος προβλέπει την έκδοση Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης των κτιρίων, και σύμφωνα με τον οποίο η Ελλάδα πλέον εναρμονίζεται με την σχετική κοινοτική οδηγία 2002/91/ΕΚ (άρθρο 15) για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων. Σε κάθε περίπτωση πάντως βασική θερμομονωτική ιδιότητα του επεξεργασμένου πηλού θεωρείται και στην χώρα μας η θερμική αγωγιμότητα εκφρασμένη από τον αντίστοιχο συντελεστή.[23]

Όσο αφορά τον στατικό σχεδιασμό των κατασκευών σύνθετων (light clay-straw infills) ή απλών (earth bricks) με πηλό στην Ελλάδα δεν υπάρχει ειδικός κανονισμός αλλά θα πρέπει να εφαρμόζεται ο ισχύον ελληνικός αντισεισμικός κανονισμός (ΕΑΚ) παράλληλα με τον ευρωκώδικα 5 ή 6 αντίστοιχα. Βασική παράμετρος που πρέπει εκτός των άλλων να λαμβάνεται υπ' όψη στον στατικό σχεδιασμό κυρίως των απλών κατασκευών είναι η θλιπτική αντοχή του δομικού υλικού από πηλό που θα χρησιμοποιηθεί. Στην άλλη περίπτωση το υλικό αντιμετωπίζεται ως υλικό πλήρωσης [Markopoulos et al., 2009].

1.9 Συστατικά του εδάφους – Κριτήρια καταλληλότητας εδάφους

Τα εδάφη αποτελούνται από ποικίλα ποσοστά τεσσάρων τύπων υλικών: διάφορα είδη αμμοχάλικου, άμμος, ιλύς, και άργιλος. Κάθε ένα από αυτά συμπεριφέρεται με έναν χαρακτηριστικό τρόπο έτσι ώστε, παραδείγματος χάριν, όταν εκτίθεται σε μεταβολές του περιεχόμενου

υγρασίας κάποια αλλάζουν όγκο και άλλα όχι. Οι πρώτοι 3 τύποι παραμένουν σταθεροί ενώ οι υπόλοιποι είναι ασταθείς.
Αυτή η έννοια της σταθερότητας, δηλαδή της δυνατότητας των εδαφικών σχηματισμών να αντιστέκονται στις μεταβολές της υγρασίας ή ξηρασίας χωρίς κάποια αλλαγή στην εμφάνιση των ιδιοτήτων των υλικών, είναι θεμελιώδους σπουδαιότητας για ένα δομικό υλικό.
Υλικά εδάφους:

a) Το ***αμμοχάλικο*** αποτελείται από κομμάτια πετρωμάτων ποικίλης σκληρότητας με μέγεθος που κυμαίνεται μεταξύ περίπου 2 και 100mm. Είναι ένα από τα σταθερά συστατικά ενός εδάφους. Οι μηχανικές ιδιότητές του δεν υποβάλλονται σε καμία αντιληπτή τροποποίηση όταν εκτίθεται στο νερό.

b) Η ***άμμος*** αποτελείται από κόκκους ορυκτών και πετρωμάτων το μέγεθος των οποίων κυμαίνεται περίπου μεταξύ 0,080 και 2mm. Είναι ένα σταθερό συστατικό του εδάφους. Στερείται την συνοχή εν ξηρώ, αλλά έχει υψηλό βαθμό εσωτερικής δύναμης τριβής, που της προσδίδει μία πολύ μεγάλη μηχανική δυνατότητα αντίστασης στη μετακίνηση των σωματιδίων όταν οι κόκκοι βρίσκονται σε επαφή. Όταν είναι ελαφρώς υγρή, παρουσιάζει συνοχή ως αποτέλεσμα της επιφανειακής τάσης των μορίων του νερού που καταλαμβάνει τα διαστήματα μεταξύ των κόκκων.

c) Η ***ιλύς*** αποτελείται από κόκκους το μέγεθος των οποίων κυμαίνεται μεταξύ περίπου 0,002 και 0.080mm τα οποία δεν έχουν καμία συνοχή όταν αυτή είναι ξηρή. Δεδομένου ότι η δύναμη τριβής της είναι γενικά χαμηλότερη από αυτή της άμμου, όταν βρέχεται επιδεικνύει καλή συνοχή και μπορεί κάτω από διαφορετικά ποσοστά υγρασίας να υποστεί αντιληπτές αλλαγές στον όγκο, διόγκωση ή συρρίκνωση.

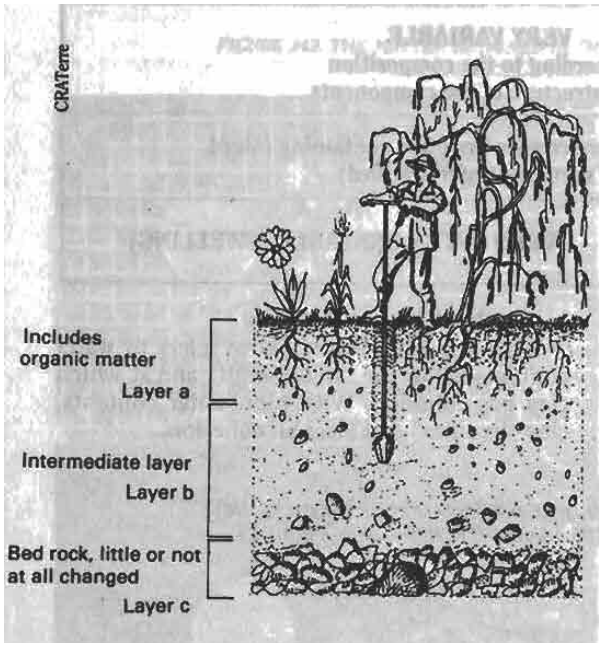
d) Η ***άργιλος***, αποτελεί το λεπτότερο και κύριο συστατικό του εδάφους με μέγεθος κόκκου μικρότερο από 2μ και αρκετά διαφορετικά χαρακτηριστικά από εκείνα των άλλων συστατικών του. Αποτελείται κυρίως από μικροσκοπικά ψήγματα μεταλλικών οξειδίων και μετάλλων συμπεριλαμβανομένων εκείνων της αργίλου μεταξύ των οποίων είναι

ο καολινίτης, ο ιλλίτης και ο μοντμοριλλονίτης. Τα σωματίδια της αργίλου είναι επενδυμένα με μία ταινία προσροφημένου κρυσταλλικού νερού και το μικρό μέγεθός τους υποδηλώνει ότι το βάρος τους είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με τη δύναμή που οφείλεται στην επιφανειακή τάση και η οποία εμφανίζεται στην ζώνη του προσροφημένου νερού. Κατά συνέπεια η δύναμη του όγκου τους είναι χαμηλή έναντι της δύναμης της επιφάνειας. Επειδή το προσροφημένο νερό συγκρατεί πολύ στενά τις διεπιφάνειες των σωματιδίων, συνδέει τα μικρομόρια του χώματος μεταξύ τους και έτσι προσδίδει στην άργιλο συνοχή η οποία ενισχύει τη μηχανική αντοχή του εδάφους. Αυτή η ικανότητά της αργίλου μπορεί να καταστραφεί με εκτεταμένη ξήρανση. Η άργιλος δρα ως το συνδετικό υλικό των πιο αδρομερών συστατικών του εδάφους και συμβάλει στην τελική συνοχή του. Ωστόσο, αντίθετα από την άμμο και το αμμοχάλικο, η άργιλος είναι ασταθής και μεταβάλλεται όταν εκτίθεται σε διαφορετικούς βαθμούς υγρασίας. Επειδή είναι ισχυρά υδρόφιλη όταν η περιεκτικότητα σε νερό αυξάνει τότε αυξάνονται σε πάχος οι ζώνες του προσροφώμενου νερού και ο συνολικός όγκος της αργίλου αυξάνεται σημαντικά. Αντιθέτως, κατά τη διάρκεια της συρρίκνωσης σε περιόδους ξηρασίας, μπορεί να εμφανιστούν ρωγμές στη μάζα της αργίλου και να μειωθεί η αντοχή της. Με την επόμενη υγρή περίοδο το νερό θα διαπεράσει χάρη στην ύπαρξη αυτών των ρωγμών απευθείας στο εσωτερικό του δομικού υλικού. Αυτή η μεταβλητότητα του όγκου των αργιλούχων εδαφών ως αποτέλεσμα της περιεκτικότητάς τους σε νερό είναι το βασικό πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί στην περίπτωση εφαρμογών της στις κατασκευές. Όταν η προστιθέμενη ποσότητα νερού υπερβεί την απαιτούμενη σύμφωνα με το όριο υδαρότητας (liquid limit) της αργίλου τότε αυτή παύει να έχει συνοχή.

Η πρώτη μέριμνα του κατασκευαστή πριν την ανέγερση μίας οικολογικής κατασκευής με εδαφικά υλικά είναι ο προσδιορισμός της καταλληλότητας των διαθέσιμων υλικών σε σχέση με την επιλεγόμενη τυπολογία δόμησης.

Ο έλεγχος των εδαφικών πρώτων υλών πραγματοποιείται με εργαστηριακές αναλύσεις των δειγμάτων εδάφους που συλλέχθηκαν προηγουμένως ή με τις δοκιμές προσδιορισμού οι οποίες είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν in situ στην ύπαιθρο και οι οποίες δίνουν ικανοποιητικές ενδείξεις για την ποιότητα του εδάφους που αναμένεται να χρησιμοποιηθεί.

Το ανώτερο στρώμα του γήινου φλοιού διαμορφώνεται συνήθως από τις μηχανικές και χημικές αλλαγές που πραγματοποιούνται στα πετρώματα. Αν και το πάχος του ποικίλλει πολύ, σχεδόν πάντα έχει περίπου το ίδιο ανάπτυγμα (εικ.22). Το topsoil ή αγρονομικό χώμα είναι πλούσιο σε οργανικό υλικό και κάτω από αυτό βρίσκεται ένα στρώμα πετρώματος, το οποίο μπορεί να παραμένει αμετάβλητο στα διάφορα στάδια της διαγένεσης. [Minke, 2000], [24].



Εικ.22. Στρωματογραφία των επιφανειακών σχηματισμών εδάφους και πετρωμάτων [Minke, 2000].

Σε γενικές γραμμές όταν τα ενδιάμεσα επιφανειακά στρώματα (δηλαδή περίπου 0.5μ κάτω από την επιφάνεια) αποτελούνται από χαλαρό χώμα και περιέχουν λίγο οργανικό υλικό μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή ενός «γήινου» κτηρίου.

1.10 Δοκιμές καταλληλότητας στην ύπαιθρο (site tests)

Οι δοκιμές ελέγχου των εδαφών in situ είναι πρακτικής φύσεως, δεν απαιτούν κανένα ειδικό εξοπλισμό όπως οι εργαστηριακές δοκιμές και μπορούν να πραγματοποιηθούν στην περιοχή όπου τα δείγματα συλλέγονται. Παρέχουν ποιοτικά στοιχεία ταξινόμησης των εδαφών και επιτρέπουν μια άμεση αξιολόγηση της πιθανής χρήσης τους. [Norton, 1997]

1) **Μυρωδιά**

Τα οργανικά χώματα αναδύουν μία μυρωδιά μούχλας, ιδιαίτερα όταν είναι πρόσφατα σκαμμένο το χώμα. Αυτή η μυρωδιά γίνεται ισχυρότερη όταν είναι υγρά ή θερμά. Σε γενικές γραμμές δεν πρέπει να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές δόμησης.

2) **Μάσημα**

Αυτό είναι ένας εύκολος τρόπος για να διαπιστωθεί η παρουσία άμμου, ιλύος ή αργίλου: λαμβάνεται μία πολύ μικρή ποσότητα χώματος και μασιέται ελαφριά μεταξύ των δοντιών:

a) **Αμμώδες χώμα(sandy soil):** οι κόκκοι της άμμου είναι δυσάρεστα σκληροί και τραχείς μεταξύ των δοντιών, ακόμα κι αν η άμμος είναι πολύ λεπτή.
b) **Λασπώδες χώμα (silty soil) :** οι κόκκοι της ιλύος είναι πολύ μικρότεροι από εκείνους της άμμου και παρά την τραχιά υφή τους η αίσθηση μεταξύ των δοντιών δεν είναι τόσο δυσάρεστη όσο με την άμμο.
3) **Χώμα αργίλου (clay soil):** οι κόκκοι της αργίλου δεν είναι καθόλου χαλικώδεις και σκληροί. Αντίθετα, η αίσθηση που αφήνουν μεταξύ των δοντιών είναι ομαλή και ομοιογενής. Ένα μικρό κομμάτι ξηρού χώματος που περιέχει πολύ άργιλο κολλάει στη γλώσσα και δουλεύεται δύσκολα.

4) Λάμψη

Λαμβάνεται ένα μικρό κομμάτι εδάφους, διαβρέχεται ώστε να υγρανθεί ελαφρά, πλάθεται σε μορφή σφαίρας και κόβεται στα δύο με ένα μαχαίρι. Εάν η εγκάρσια επιφάνεια κοπής φαίνεται λαμπερή, η γη περιέχει άργιλο σε πλαστική μορφή ενώ εάν η επιφάνεια κοπής είναι θαμπή το πιο πιθανό είναι το έδαφος να είναι λασπώδες (silty soil) δηλαδή να περιέχει ιλύ.

5) Αφή

Ένας αρκετά ακριβής τρόπος στην εξακρίβωση του κύριου συστατικού ενός εδάφους είναι με την αφή. Λαμβάνεται ένα δείγμα και αφαιρούνται τα αδρόκοκκα αδρανή άνω των 5mm (αμμοχάλικο). Τα δείγμα πλάθεται ή θρυμματίζεται μεταξύ των δαχτύλων και στην παλάμη του χεριού. Αυτό επιτρέπει σε κάποιον να αξιολογήσει το μέγεθος των συστατικών:

Άμμος: οι κόκκοι της ξηρής άμμου δίνουν μία τραχιά αίσθηση.

Ιλύς: η ξηρή ιλύς είναι επίσης τραχιά στην αφή αλλά λιγότερο σε σχέση με την άμμο. Η υγρή ιλύς εμφανίζει μία ενδιάμεση πλαστικότητα.

Άργιλος: η ξηρή άργιλος φαίνεται άμορφη ή αποτελείται από αρκετά μεγάλα συσσωματώματα κόκκων και είναι πολύ ανθεκτική στη συντριβή. Η υγρή άργιλος είναι πλαστική και κολλάει στα δάχτυλα.

6) Πλύσιμο στο χέρι

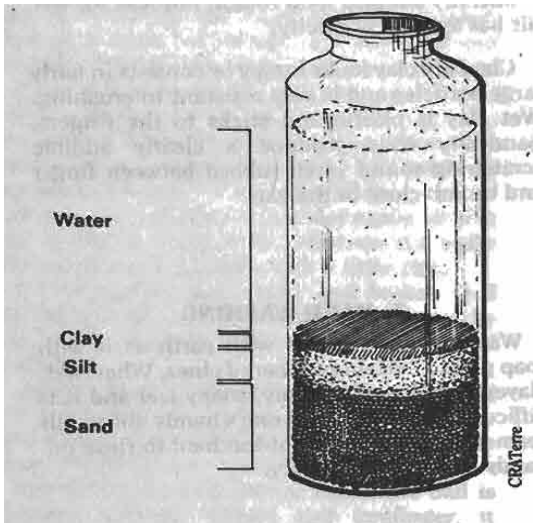
Το πλύσιμο με μία ποσότητα χώματος στα χέρια όπως όταν χρησιμοποιείται σαπούνι δίνει ορισμένες ενδείξεις.

Τα αργιλώδη εδάφη όταν βρέχονται έχουν μία κρεμώδη – σαπωνώδη αίσθηση και είναι αρκετά δύσκολο να ξεπλυθούν από τα χέρια. Τα λασπώδη εδάφη έχουν μία κονιώδη υφή και είναι σχετικά δύσκολο να ξεπλυθούν. Τα αμμώδη εδάφη ξεπλένονται εύκολα.

7) **Οπτική παρατήρηση**Με την οπτική παρατήρηση δίνεται μια ιδέα της αναλογίας και του μεγέθους των μικρών μορίων που αποτελούν τα πιο χονδροειδή συστατικά. Εντούτοις, τα λεπτότερα μόρια ορατά στο γυμνό μάτι είναι εκείνα των 0,08 χιλ. μεμονωμένοι κόκκοι της αργίλου και η ιλύς είναι αόρατη.

8) Απλουστευμένη δοκιμή καθίζησης

Σε ένα γυάλινο κυλινδρικό δοχείο, με επίπεδη βάση, με άνοιγμα τόσο μεγάλο ώστε να μπορεί να σφραγιστεί με την παλάμη του χεριού, χωρητικότητας τουλάχιστον 0.5 l πληρώνεται με το έδαφος κατά το ένα τέταρτο του ύψους του και το υπόλοιπο συμπληρώνεται με νερό. Το στόμιο του δοχείου σφραγίζεται με την παλάμη του χεριού και το δοχείο ανακινείται δυνατά και κατόπιν τοποθετείται σε μια επίπεδη επιφάνεια. Μετά από μια ώρα, επαναλαμβάνεται η ανακίνηση και το περιεχόμενο αφήνεται να ηρεμήσει. Μετά από 45 λεπτά, παρατηρείται ότι η άμμος έχει καθιζήσει πρώτη στον πάτο του δοχείου και από πάνω της βρίσκεται το στρώμα της ιλύος με τελευταίο ανώτερο στρώμα αυτό της αργίλου. Μετά από 8 ώρες μετριέται το ύψος κάθε διαφορετικού στρώματος ιζήματος και το συνολικό ύψος όλων των στρωμάτων. Αυτό δίνει μια ένδειξη των ποσοστών κάθε συστατικού του εδάφους.[24], [Minke, 2000]



Εικ.23. Δοκιμή καθίζησης για την κοκκομετρική ταξινόμηση εδάφους.[Minke, 2000]

8)Δοκιμή λεπτομερών συστατικών εδάφους

Οι ακόλουθες δοκιμές αφορούν τα λεπτότερα κλάσματα του εδάφους τα οποία πρέπει προηγουμένως πρέπει να απομονωθούν με κοσκίνισμα ή μετάγγιση βάσει της αρχής των συγκοινωνούντων δοχείων.
Η προετοιμασία είναι ίδια με τη δοκιμή ιζηματογένεσης. Το δοχείο ανακινείται δυνατά και κατόπιν αφήνεται ώστε να ηρεμήσει ο πολφός για 30 δευτερόλεπτα. Με ένα λαστιχένιο σωλήνα μεταγγίζεται σταδιακά σε ένα δεύτερο δοχείο, όλο το νερό με τα αιωρούμενα μέσα σ'αυτό λεπτομερή συστατικά του εδάφους. Αυτό συνεχίζεται μέχρις ώτου να απομακρυνθεί όλο σχεδόν το νερό. Το υπόλοιπο νερό που αφήνεται στο δείγμα αποβάλλεται με την εξάτμιση ενώ στο δεύτερο δοχείο το νερό χύνεται μόλις καθιζήσουν στον πάτο του τα λεπτά εδαφικά κλάσματα. Για τη διευκόλυνση της διαδικασίας ο λαστιχένιος σωλήνας πληρώνεται από την αρχή με νερό και κρατιέται σφραγισμένος από τις δύο άκρες του με τα δάχτυλα, κατόπιν βυθίζεται και ελευθερώνεται η μία άκρη στο δοχείο με το δείγμα ενώ ταυτόχρονα ελευθερώνεται η άλλη άκρη που είναι βυθισμένη στο δεύτερο δοχείο το οποίο έχει προηγουμένως τοποθετηθεί σε μία επιφάνεια με χαμηλότερο ύψος.

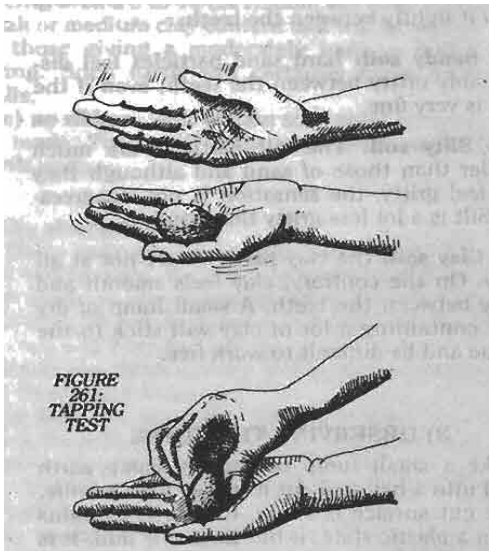
9)Δοκιμή διάτρησης (tapping test)

Μία ποσότητα του δείγματος εδάφους διαμορφώνεται σε μια σφαίρα 2 έως 3 εκατ. μέσα στην παλάμη του χεριού. Το χώμα πρέπει να είναι αρκετά μαλακό για να μορφοποιηθεί σε σφαίρα και να διατηρήσει αυτή τη μορφή του χωρίς να κολλήσει στα δάχτυλα. Η σφαίρα πιέζεται με το δείκτη του άλλου χεριού για να τρυπηθεί σε διάφορα σημεία. Με τον τρόπο αυτό εξέρχεται η περιεχόμενη υγρασία του δείγματος και παρατηρείται αν το χώμα εμφανίζεται ομαλό, λαμπερό ή λιπαρό. Η γη συμπιέζεται έπειτα μεταξύ του αντίχειρα και του δείκτη του άλλου χεριού στις δύο περίπου επίπεδες επιφάνειες που έχουν διαμορφωθεί και η επιρροή αυτού στη σφαίρα παρατηρείται. (εικ.24)

a) **Γρήγορη αντίδραση:** με 5 – 10 τρυπήματα έχει απομακρυνθεί το περιεχόμενο νερό και κατά την πλευρική συμπίεση του δείγματος, το τυχόν υπάρχον νερό φεύγει αμέσως και το δείγμα γίνεται αμέσως θαμπό. Με εντονότερη συμπίεση, το δείγμα θρυμματίζεται. Αυτό σημαίνει ότι πρόκειται για μια πολύ λεπτή άμμο ή αδρόκοκκη ιλύ χωρίς οργανική ουσία. Η παρουσία αργίλου σε μικρό ποσοστό θα επηρέαζε διαφορετικά την συμπεριφορά του δείγματος.

b) **Αργή αντίδραση:** απαιτούνται 20 έως 30 χτυπήματα προτού εξέρθει το περιεχόμενο νερό. Κατόπιν όταν το δείγμα συμπιέζεται, ούτε ραγίζει ούτε θρυματίζεται, αλλά μάλλον γίνεται πιο επίπεδο. Αυτό υποδηλώνει μια ελαφρά πλαστική ιλύ ή μια ιλυώδη άργιλο

c) **Πολύ αργή ή καμία αντίδραση:** όση περισσότερη άργιλο περιέχει το χώμα, τόσο πιο αργή η αντίδραση που έχει. Όταν συμπιέζεται, η επιφάνεια παραμένει λαμπερή.



Εικ.24. Δοκιμή διάτρησης

9) Δοκιμή «κορδόνι» (String test)

Αυτή η δοκιμή συμπληρώνει τη δοκιμή τρυπήματος και δεν είναι απαραίτητη εάν από την πρώτη δοκιμή υπάρχει ένδειξη για την συμπεριφορά του δείγματος. Λαμβάνεται ένα μέρος εδάφους στο

μέγεθος μιας μεγάλης ελιάς και βρέχεται ούτως ώστε να είναι εύκολο να διαμορφωθεί με το χέρι χωρίς να κολλήσει. Κατόπιν σε μια καθαρή επίπεδη επιφάνεια μορφοποιείται με κύλιση σε κορδόνι και λεπταίνει προοδευτικά. Εάν αυτό το κορδόνι σπάσει όταν έχει μία διάμετρο μεγαλύτερη από 3 mm, το χώμα είναι πολύ ξηρό και απαιτείται η μικρή προσθήκη νερού. Όταν η περιεκτικότητα σε νερό του εδάφους είναι ικανοποιητική, το κορδόνι αυτό θα σπάσει αφού φθάσει τα 3 mm διάμετρο. Εάν το δείγμα εδάφους θρυμματίζεται εύκολα ή δεν δύναται να διαμορφωθεί σε κορδόνι όποια κι αν είναι η περιεκτικότητά του σε νερό, τότε έχει χαμηλό περιεχόμενο αργίλου.

Στην περίπτωση που το δείγμα σπάει αφού μορφοποιηθεί σε κορδόνι διαμέτρου 3 mm, λαμβάνονται αμέσως τα κομμάτια και αναδιαμορφώνονται σε σφαίρα η οποία κατόπιν συντρίβεται ανάμεσα στον αντίχειρα και τον δείκτη.

a) **Σκληρό κορδόνι:** εάν η σφαίρα είναι δύσκολο να συντριφθεί και ούτε ραγίζει ούτε θρυμματίζεται, το χώμα περιέχει πολύ άργιλο. Πιθανά δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσιο χωρίς προσθήκη και άλλων υλικών σε εφαρμογή κατασκευής.

b) **Μέτρια σκληρό κορδόνι:** όταν η σφαίρα συμπιέζεται μεταξύ του αντίχειρα και του δείκτη, ραγίζει ή θρυμματίζεται τότε το χώμα αυτό μπορεί να είναι κατάλληλο για την κατασκευή.

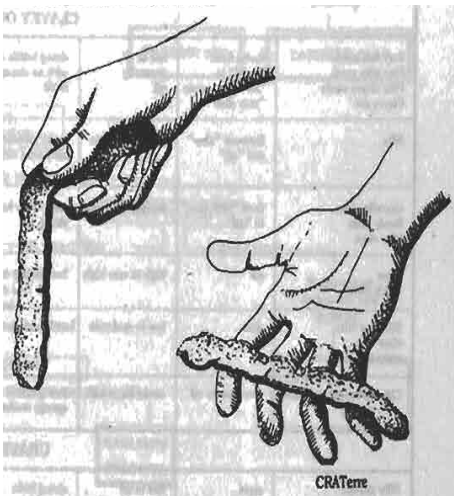
c) **Ελαφρά εύθραυστο κορδόνι:** όταν το χώμα έχει πολλή ιλύ και λίγη άργιλο, είναι δυνατό να αναδιαμορφωθεί σε μια σφαίρα χωρίς να σπάει ή να θρυμματίζεται. Τέτοιο χώμα είναι κατάλληλο για την ανέγερση τοιχοποιίας.

d) **Μαλακό, σπογγώδες κορδόνι:** μερικές φορές τόσο τα κορδόνια όσο και οι σφαίρες είναι μαλακές και δίνουν την εντύπωση σπογγώδους αφής μεταξύ των δάχτυλων. Αυτό υποδηλώνει ότι το έδαφος είναι οργανικό και επομένως ακατάλληλο για εφαρμογή σε για κατασκευή.

10) Δοκιμή κορδελών (ribbon test)

Αυτή η δοκιμή συμπληρώνει την προηγούμενη δοκιμή. Λαμβάνεται μια ικανοποιητική ποσότητα δείγματος ούτως ώστε να διαμορφωθεί ένα κυλινδρικό δοκίμιο σε μέγεθος περίπου ενός πούρου και διάμετρο γύρω στα 12 mm. Το δείγμα εδάφους δεν πρέπει να είναι κολλώδες, αλλά αρκετά υγρό ώστε να είναι σε θέση να διαμορφωθεί σε ένα κορδόνι πάχους 3 mm όπως και στην προηγούμενη δοκιμή. Παίρνουμε το ρολό στην παλάμη του χεριού και αρχίζοντας από τη μία του άκρη, το ισιώνουμε προσεχτικά μεταξύ αντίχειρα και δείκτη ώστε να διαμορφωθεί μία κορδέλα με 3-6 mm πλάτος και όσο πιο μακριά γίνεται (εικ.25). Το μήκος της κορδέλας μετριέται προτού αυτή κοπεί.

a) **Μακριά κορδέλα:** Όταν η κορδέλα φθάνει τα 25-30 cm δίχως σπάσιμο, τότε το έδαφος περιέχει πολύ άργιλο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν δομικό υλικό αλλά απαιτείται σταθεροποίηση με πρόσθετα υλικά.



Εικ. 25. Δοκιμή κορδέλας (ribbon test)

b) **Κοντή κορδέλα:** Εάν διαμορφώνεται κορδέλα μήκους το πολύ 5 – 10 cm, το έδαφος έχει μία μικρή έως μέση περιεκτικότητα σε άργιλο και θα είναι κατάλληλο για την ανέγερση τοιχοποιίας.

c) **Καμία κορδέλα:** Με ορισμένα εδάφη δεν είναι δυνατή η μορφοποίηση τους σε κορδέλα. Τα εδάφη αυτά είναι κατάλληλα για τοιχοποιίες rammed earth.

11) Dry strength tests

Αυτές οι δοκιμές πραγματοποιούνται συνήθως σε λεπτόκοκκα εδάφη. Μορφοποιούνται δύο ή τρεις βόλοι μαλακού χώματος περίπου 12 mm πλάτος και 25 έως 30 mm διάμετρο. Αφήνονται να ξηραθούν στον ήλιο και στη συνέχεια σε ένα φούρνο. Ακολούθως οι βόλοι σπάζονται και επιχειρείται η κονιοποίησή τους μεταξύ του αντίχειρα και του δείκτη.

a) **Μεγάλη αντίσταση θραύσης:** αν είναι πολύ δύσκολο να σπάσει ο βόλος ή σπάει σε δύο τεμάχια όπως ένα ξηρό μπισκότο και δεν μπορεί να συμπιεστεί μεταξύ αντίχειρα και δείκτη, τότε πρόκειται για μία σχεδόν καθαρή άργιλο.

b) **Μέτρια αντίσταση θραύσης:** όταν ο βόλος δεν είναι δύσκολο να σπάσει και σχετικά εύκολα μπορεί να κονιορτοποιηθεί με τη συμπίεσή του μεταξύ του αντίχειρα και του δείκτη. Αυτό δείχνει μία ιλυώδη ή αμμώδη άργιλο.

c) **Χαμηλή αντίσταση θραύσης:** δεν υπάρχει κανένα πρόβλημα στο σπάσιμο του βόλου που μειώνεται γρήγορα σε σκόνη. Αυτό δείχνει ότι το εδαφικό δείγμα αποτελείται κυρίως από ιλύ ή πολύ λεπτή άμμο είτε πρόκειται για ένα χώμα που περιέχει μικρή ποσότητα αργίλου.[Minke, 2000], [24].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

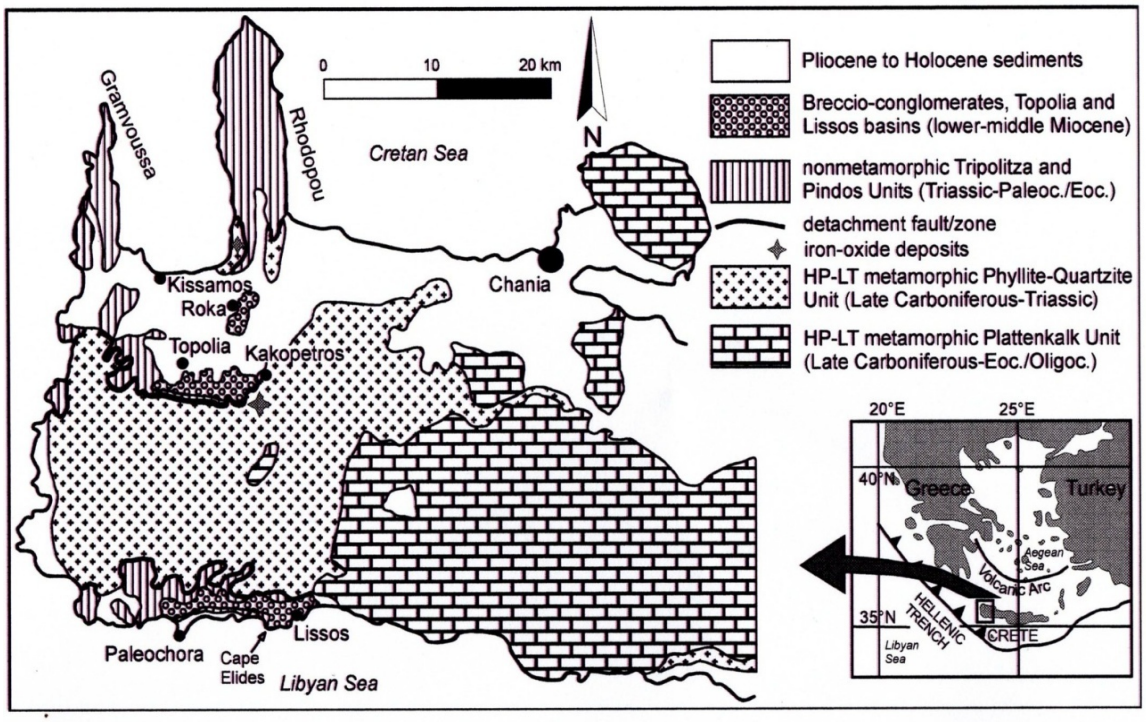
2.1 Δειγματοληψία εδαφικών υλικών – μακροσκοπική περιγραφή

Δείγματα αργιλούχων σχηματισμών, πετρωμάτων, διαφορετικού χρώματος και σύστασης λήφθηκαν από τη Δυτική Κρήτη και

συγκεκριμένα από μία έκταση 10 έως 20 km στα νότια του νομού Χανίων με σκοπό να αξιολογηθούν ορισμένες ιδιότητές τους και να διερευνηθεί η καταλληλότητά τους ως πρώτες ύλες για την παραγωγή δομικών προϊόντων και γενικά για δομικές εφαρμογές με εδαφικά υλικά.

Οι αργιλούχοι σχηματισμοί (mudstones) εμφανίζονται σε νεογενείς λεκάνες στην Κρήτη (εικ.26).

Η λήψη των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε στις επιφανειακές βαθμίδες και σε βάθος μισό μέτρο βάθος κάτω από το επίγειο επίπεδο ούτως ώστε να αποφευχθεί οποιοδήποτε οργανικό περιεχόμενο το οποίο δεν είναι επιθυμητό.



Εικ.26. Γενικευμένος γεωλογικός χάρτης της δυτικής Κρήτης (τροποποιημένος από τους Creutzburg et al., 1977; (Seidel et al. 2000). Περιλαμβάνει ιζήματα Πλειόκαινου – Ολόκαινου, breccia Κάτω ως Μέσου Μειόκαινου, μη μεταμορφωμένα ιζήματα από τις ενότητες Τριπολιτσάς και Πίνδου (Τριασικού – Παλαιόκαινου – Ηώκαινου), φυλλίτες και χαλαζίτες της μεταμορφωμένης σειράς ύστερης φάσης Τριασικού και ύστερης φάσης Λιθανθρακοφόρου – Ηώκαινου – Ολιγόκαινου.

Τα δείγματα και οι χρησιμοποιούμενοι κωδικοί αναφοράς τους είναι:

1. Αργιλόχωμα κιτρινόφαιο από τη Σούδα 'SOU'
2. Αργιλόχωμα κόκκινο από εκσκαφή στην Αγιά 'AG'
3. Σχηματισμός μικρού αναπτύγματος, κιτρινόφαιο λιπαρό αργιλόχωμα (τοπικός όρος: «ξιγκόχωμα») στη θέση Αλικιανού-Φουρνέ, 'AL1' (εικ.27, 28)
4. Κόκκινο αργιλόχωμα από πρανές πάνω στο δρόμο πλησίον της γέφυρας Αλικιανού,'AL2'
5. Αργιλομάργα φαιή από πρανές σε χωράφι δυτικά από την πλατεία του χωριού Πατελάρι, 'PAT' (εικ.29)
6. Αργιλόμαργα κιτρινόφαιη από τομή επί της εθνικής οδού με κατεύθυνση προς Γεράνι Χανίων, 'GER'
7. Λιπαρή φαιοκίτρινη αργιλομάργα από το χωριό Σπηλιά 'SPH1'
8. Αργιλομάργα φαιοκάστανη από το χωριό Πλάτανος 'PL'
9. Αργιλόχωμα σκούρο καστανό από το χωριό Καμπανός 'KAM'
10. Τεφρό αργιλόχωμα (τοπικός όρος: «σιδερίτης») λιπαρό σε φλέβες - προσχώσεις ποταμού από το χωριό Σπηλιά, (σειρά φυλλιτών-χαλαζιτών) 'SPH2'.

Εικ.27, 28. Θέση δειγματοληψίας του δείγματος AL2, από το δεξί πρανές στο τέλος του δρόμου που περνάει μπροστά από τη στάνη (στο βάθος της φωτογραφίας), προς τα νότια.

Εικ.29. Θέση δειγματοληψίας εδάφους PAT από περιοχή Πατελάρι.

Εικ. 30. Θέση δειγματοληψίας του δείγματος GER

2.2. Μεθοδολογία αναλύσεων των δειγμάτων

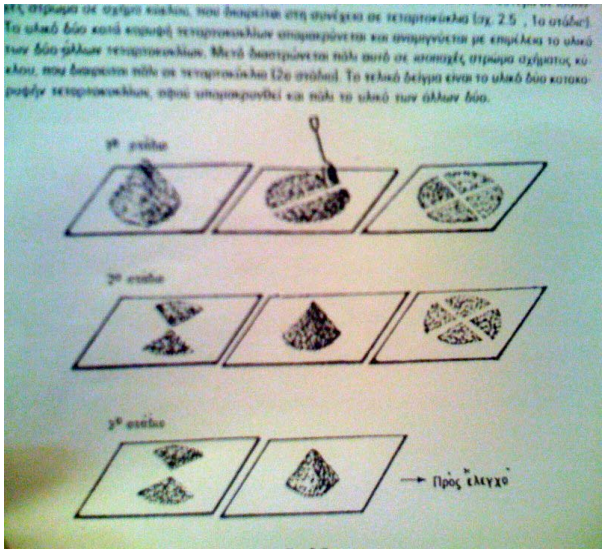
Για την αξιολόγηση των δειγμάτων προσδιορίστηκαν ορισμένα από τα κύρια φυσικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά τους όπως είναι η κοκκομετρική διαβάθμιση, τα όρια Atterberg, (όρια πλαστικότητας – υδαρότητας), ο βαθμός συρρίκνωσης, η ορυκτολογική σύσταση, η υδατοαπορροφητικότητα, οι μηχανικές αντοχές μορφοποιημένων δοκιμίων από το αρχικό εδαφικό υλικό κ.α. με τη βοήθεια διαφόρων

αναλυτικών μεθόδων και τυποποιημένων ελέγχων που αντίστοιχα είναι: η κοκκομετρική ανάλυση με τυποποιημένα κόσκινα εν ξηρώ και ο υγρός κοκκομετρικός διαχωρισμός με τη μέθοδο Bouyoucos, η μέθοδος Casagrande και cone test, η περιθλασιμετρία ακτίνων X (XRD), ο προσδιορισμός του ρυθμού υδατοαπορρόφησης και το περιεχόμενο νερό σε αυτοσχέδια πειραματική διάταξη και η δοκιμή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.

2.2.1 Τεταρτομερισμός δειγμάτων

Πριν τη διεξαγωγή των εργαστηριακών αναλύσεων, αντιπροσωπευτικό μέρος από τα ληφθέντα δείγματα απομονώθηκε με τη μέθοδο του τεταρτομερισμού, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι τα αποτελέσματα των δοκιμών εκφράζουν τις ιδιότητες όλης της ποσότητας των υλικών που ελήφθησαν. Η μέθοδος του τεταρτομερισμού αποτελεί ελληνική πρότυπη δοκιμή (ΕΛΟΤ) και αφορά στη λήψη αντιπροσωπευτικών δειγμάτων αδρανών υλικών (εικ. 31).
Η μέθοδος αυτή προβλέπει τα εξής:
Λαμβάνεται ποσότητα τέσσερις φορές μεγαλύτερη από την απαιτούμενη για το τελικό δείγμα. Αναμοχλεύονται τα αδρανή επάνω σε καθαρό και σκληρό δάπεδο και απλώνονται ύστερα σε ισοπαχές στρώμα σε σχήμα κύκλου, που διαιρείται στη συνέχεια σε τεταρτοκύκλια (1° στάδιο). Το υλικό δύο κατά κορυφή τεταρτοκύκλιων απομακρύνεται και κατόπιν αναμιγνύεται προσεχτικά το υλικό των δύο άλλων τεταρτοκύκλιων. Μετά αυτό πάλι διαστρώνεται σε ισοπαχές στρώμα σχήματος κύκλου, που διαιρείται πάλι σε τεταρτοκύκλια (2° στάδιο). Το τελικό δείγμα είναι το υλικό δύο κατά κορυφή τεταρτοκυκλίων, αφού απομακρυνθεί και πάλι το υλικό των άλλων δύο.

Για τη διεκπεραίωση των εργαστηριακών αναλύσεων τα δείγματα επιμερίστηκαν έως τελικού βάρους περίπου 200 gr ενώ για την παρασκευή των κυβικών δοκιμίων των δειγμάτων έγινε λήψη εδάφους από το εκάστοτε σακί της αρχικής δειγματοληψίας.



Εικ. 31. Λήψη δείγματος με την πρότυπη μέθοδο του τεταρτομερισμού.

2.2.2 Διαχωρισμός εν ξηρώ με κόσκινα ASTM

Πραγματοποιήθηκε διαχωρισμός εν ξηρώ με τη βοήθεια κοσκίνων ASTM (8 mm, 4.75mm, 2mm, βάση κοσκίνων) 500 gr εκάστοτε εδαφικού δείγματος, προκειμένου να αφαιρεθούν τυχόν αδρανή (πχ. αμμοχάλικα) ή οργανικά υλικά (σπόροι, υπολείμματα φυτών, κλπ.) με μέγεθος >2mm και να προσδιοριστεί το ποσοστό τους στο σύνολο κάθε δείγματος.

2.2.3 Υγρή κοκκομετρική ανάλυση με τη μέθοδο Bouyoucos βάσει του νόμου του Stokes

Εξαιτίας της φύσης των δειγμάτων και συγκεκριμένα λόγω του αργιλικού περιεχομένου των που προκαλεί τη δημιουργία συσσωματωμάτων καθώς και της μεγαλύτερης συμμετοχής των λεπτών κλασμάτων στο σύνολο κάθε δείγματος, επιλέχθηκε, για λόγους ακρίβειας των αποτελεσμάτων, η υγρή κοκκομετρική ανάλυσή τους με τη μέθοδο Bouyoucos ώστε να εξακριβωθούν η κοκκομετρική διαβάθμιση κάθε δείγματος σύμφωνα με το περιεχόμενό του σε άμμο, ιλύ και άργιλο.

Υπολογίζονται ο χρόνος καθίζησης των κλασμάτων του υλικού σε δοκιμαστικό σωλήνα βάσει της κοκκομετρίας του και του νόμου του

Stokes. Χρησιμοποιείται ένα μικρό υπολογιστικό πρόγραμμα (excel, περιβάλλον Windows) όπου το περιεχόμενο του δείγματος σε άμμο, ιλύ και άργιλο προσδιορίζεται βάσει του μεγέθους των κόκκων, της πυκνότητας του υλικού και του χρόνου καθίζησης.

Προετοιμασία πειράματος:

Υλικά:

Ένας σωλήνας 'Βουγιούκο' ή αλλιώς μία στήλη Atterberg, διάλυμα πολυφωσφορικού νατρίου με ρυθμισμένο PH από 8.3 έως 8.5, ένα αραιόμετρο ή πυκνόμετρο, ένας μηχανικός αναδευτήρας.

Παρασκευή διαλύματος πολυφωσφορικού νατρίου:

100gr πολυφωσφορικό νάτριο μπαίνουν σε ένα δοχείο baker των 2 λίτρων και προσθέτουμε περίπου 180 ml απιονισμένο νερό. Το νερό το βάζουμε πρώτα στο δοχείο και το τοποθετούμε σε μαγνητικό αναδευτήρα με 2 μαγνητάκια. Προσθέτουμε πολύ αργά το πολυφωσφορικό νάτριο. Για να ρυθμίσουμε το PH προσθέτουμε ανθρακικό νάτριο σταδιακά και ελέγχουμε το PH με πεχάμετρο. Αφού ρυθμίσουμε το διάλυμα σε σε PH 8,3-8,5 το μεταφέρουμε σε ογκομετρική φιάλη των 2 λίτρων και αραιώνουμε έως τα 2 λίτρα. [Day. P., 1960]

Διεργασία:

Ζυγίζουμε 50gr δείγματος σε δοχείο και προσθέτουμε 100ml διαλύματος πολυφωσφορικού νατρίου με ρυθμισμένο PH. Το δείγμα παραμένει 24h εμβαπτισμένο στο διάλυμα. Το πολυφωσφορικό νάτριο λειτουργεί σαν διασπορέας. Την επόμενη μέρα αδειάζουμε το μίγμα σε δοχείο εργαστηριακού μίξερ όπου το αναδεύουμε για 1,5 λεπτό. Έχουμε ξεπλύνει το δοχείο baker με απιονισμένο νερό για να πάρουμε όλο το δείγμα. Η ανάδευση βοηθά τη διάσπαση των συσσωματωμάτων που έχουν παραμείνει παρά την προσθήκη του πολυφωσφορικού νατρίου. Μετά την ανάδευση αδειάζουμε το περιεχόμενο σε στήλη Βουγιούκο μεταφέροντας όλο το δείγμα αλλά προσέχοντας να μην παραγεμίσουμε τη στήλη. Πρέπει να φτάνει περίπου 5cm κάτω από την 1η χαραγή. Παίρνουμε ένα αραιόμετρο και το βυθίζουμε στη στήλη απαλά.

Προσθέτουμε απιονισμένο νερό μέχρι την πρώτη χαραγή. (ένδειξη 1130ml) χωρίς να υπολογίσουμε τον αφρό που πιθανά έχει δημιουργηθεί. Βγάζω το αραιόμετρο και με το έμβολο αναδεύω το μίγμα ώσπου να γίνει ομοιογενές. Μόλις βγάλω το έμβολο από την ανάδευση βυθίζω πάλι το αραιόμετρο και κρατάω χρόνο 40’’. Διαβάζουμε την ένδειξη στο αραιόμετρο. Αν εμποδίζει ο αφρός βάζουμε μερικές σταγόνες ακετόνη. Στα πρώτα 40’’ έχει καθιζάνει η άμμος και αυτό που μετράμε στο αιώρημα είναι η ιλύς και η άργιλος. Στις 2 ώρες έχει καθιζάνει και η ιλύς και αυτό που μετράμε στο αιώρημα είναι η άργιλος.

Υπολογισμός της πυκνότητας υλικού με σύμμεικτη ορυκτολογική σύσταση:

Βάζουμε το δείγμα (πχ. έδαφος) σε ένα βαθμονομημένο δοκιμαστικό σωλήνα και το ζυγίζουμε (έχουμε μηδενίσει το βάρος του σωλήνα). Στη συνέχεια πληρώνουμε με νερό το δοχείο, με μια γνωστή ποσότητα νερού τέτοια ώστε να υπερβαίνει το ύψος του δείγματος μέσα στο σωλήνα και αφαιρούμε από αυτό την ποσότητα του νερού που προσθέσαμε βρίσκοντας έτσι τον όγκο του. V δείγματος = B-α(ml) και d δείγματος = m δείγματος/V δείγματος.

Εικ.32: Ογκομετρική στήλη Attemberg και βυθισμένο αερόμετρο.

Απαιτούμενες ποσότητες υλικού:

- Για συνεκτικά εδάφη χωρίς άμμο 30 έως 50 gr

- Για συνεκτικά εδάφη με άμμο 75 gr
- Για καθαρή άργιλο από 10 έως 30 gr

Για την ανάλυση απαιτούνται:

- Αραιόμετρο (υδρόμετρο) Casagrande
- Ογκομετρικός κύλινδρος 1000 ml Ø< 60 mm
- Θερμόμετρο
- Αναδευτήρας (Mixer)
- Ζυγός ακριβείας 0.01 gr
- Χρονόμετρο
- Σπάτουλα
- Υλικό διασποράς (NaOH, $NaCO_3$, μεταπυριτικό νάτριο, κλπ)
- Απεσταγμένο νερό

2.2.4 Περιθλασιμετρία ακτίνων Χ (XRD)

Η ορυκτολογική ανάλυση των εδαφικών δειγμάτων έγινε με τη βοήθεια της περιθλασιμετρίας ακτίνων Χ (XRD).

Περιγραφή της μεθόδου:

Σαν ακτίνες Χ εννοούνται συνήθως οι ακτίνες εκείνες που καλύπτουν το μέρος του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που βρίσκεται μεταξύ 0.1 και 100Å.

Το περιθλασίμετρο ακτίνων Χ που χρησιμοποιήθηκε, είναι τύπου D-8 Advance.

Με τη μέθοδο του περιθλασιμέτρου ακτίνων Χ είναι δυνατή η απευθείας μέτρηση τόσο των γωνιών όσο και των εντάσεων των ανακλάσεων των ακτίνων Χ, που προσπίπτουν πάνω σε ένα παρασκεύασμα κρυσταλλικής κόνεως.

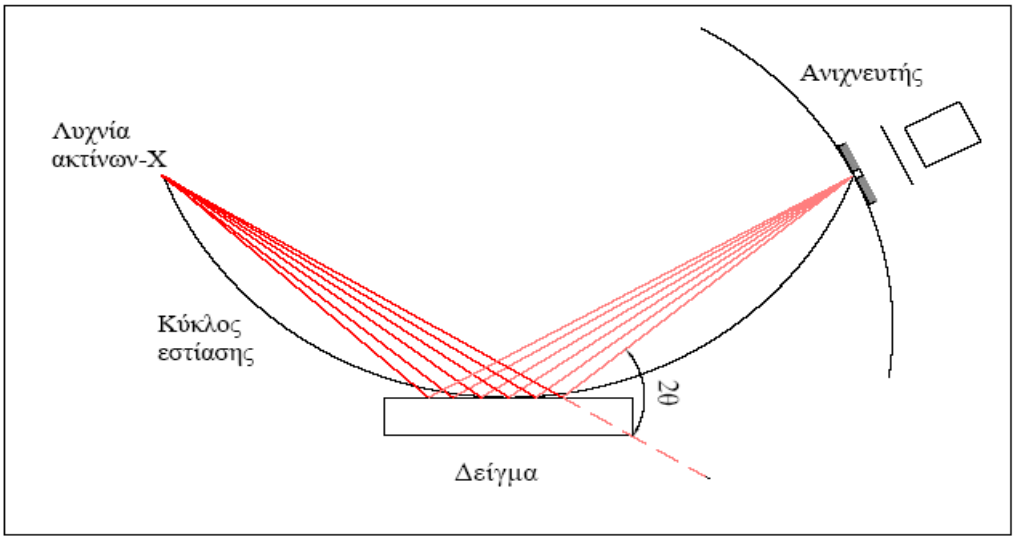
Οι βασικές μονάδες που συνθέτουν ένα σύγχρονο περιθλασίμετρο ακτίνων Χ είναι η μονάδα παραγωγής της υψηλής τάσης, η λυχνία των ακτίνων Χ, το γωνιόμετρο *(Σχήμα 12)*, ο απαριθμητής των ακτίνων Χ με την ηλεκτρονική μονάδα επεξεργασίας και καταγραφής των κρούσεων

και τέλος η μονάδα του μικροϋπολογιστή μέσω του οποίου καθοδηγείται ολόκληρο το σύστημα και αξιολογούνται τα δεδομένα που προκύπτουν από την εξέταση του δείγματος.

Διαδικασία εκτέλεσης των μετρήσεων:

Το προς ανάλυση δείγμα ευρίσκεται υπό μορφή σκόνης μέσα στην κοιλότητα ενός μεταλλικού ή πλαστικού πλακιδίου. Η κοιλότητα αυτή έχει βάθος περίπου 1mm και έκταση μερικών cm^2 έτσι που να προσφέρει χώρο για μάζα δείγματος της τάξης του1 g, την οποία κατανέμουμε έτσι στη κοιλότητα του πλακιδίου ώστε να σχηματίζει επίπεδη επιφάνεια. Το επίπεδο αυτό παρασκεύασμα τοποθετείται στο δειγματοφορέα του γωνιομέτρου του περιθλασιμέτρου ο οποίος βρίσκεται σε τέτοια θέση ώστε να παραμένει πάντα στο κέντρο του κύκλου που διαγράφει ο απαριθμητής των ακτίνων Χ.

Ο απαριθμητής περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα 2θ/min ενώ το επίπεδο του δείγματος με γωνιακή ταχύτητα θ/min. Αυτό συμβαίνει διότι με τη σύγχρονη μετατόπιση του απαριθμητή και την περιστροφή του δείγματος σκόπιμο είναι ο απαριθμητής να σχηματίζει την ίδια γωνία ως προς το επίπεδο του δείγματος, όπως και με το σημείο εξόδου των ακτίνων Χ της λυχνίας. Με τον τρόπο αυτό γίνεται δυνατή η καταγραφή των ακτίνων που πληρούν την εξίσωση BRAGG.

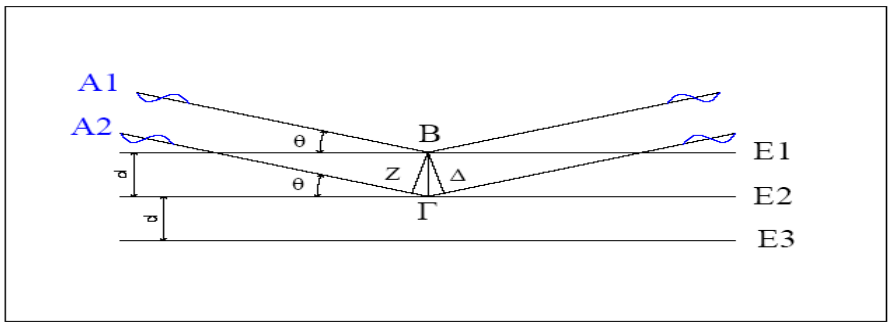


Σχήμα 1:Σχηματική παράσταση γωνιομέτρου

Εξίσωση BRAGG

Κατά τον W.L.BRAGG η περίθλαση των ακτίνων Χ στους κρυστάλλους ερμηνεύεται σαν ανάκλαση των ακτίνων Χ, οι οποίες προσπίπτουν υπό ορισμένη γωνία στα πλεγματικά επίπεδα του κρυστάλλου.

Η ανάκλαση των ακτίνων Χ διαφέρει από την ανάκλαση του ορατού φωτός λόγω της μεγάλης ικανότητας διείσδυσης της προσπίπτουσας δέσμης των ακτίνων Χ στον κρύσταλλο, η οποία διαπερνά ένα μεγάλο αριθμό πλεγματικών επιπέδων πριν να απορροφηθεί (Σχήμα 1).



Σχήμα 2: Περίθλαση των ακτίνων Χ σύμφωνα με την εξίσωση του BRAGG

Στο (Σχήμα 2) φαίνονται δύο παράλληλες ακτίνες Χ που προσπίπτουν με γωνία θ πάνω στα πλεγματικά επίπεδα.

$ZΓ + ΓΔ = 2ZΓ$

Δεδομένου ότι για το τρίγωνο ΒΖΓ ισχύει $ZΓ = BΓ$, $ημθ = d \times ημθ$, προκύπτει η σχέση :

$n \times λ = 2 \times d \times ημθ$,

εξίσωση του Bragg, όπου λ : μήκος κύματος, d : πλεγματική απόσταση των επιπέδων ανάκλασης του κρυστάλλου, θ : γωνία πρόσπτωσης και n : τάξη ανάκλασης.

Η συνηθέστερη λυχνία ακτίνων Χ είναι του χαλκού (Cu) με μήκος κύματος, λ≈1,54Å. [Κωστάκης, (1988)]

Αξιολόγηση διαγραμμάτων περιθλασιμετρίας ακτίνων-Χ:

Τα διαγράμματα περιθλασιμετρίας ακτίνων Χ αξιολογούνται με το ειδικό λογισμικό EVA, το οποίο προσδιορίζει αυτόματα τις γωνίες περίθλασης με τις αντίστοιχες εντάσεις. Η ταυτοποίηση των κρυσταλλικών φάσεων γίνεται με την βοήθεια της βάσης δεδομένων PDF (Powder Diffraction File), στην οποία υπάρχουν δεδομένα όλων των γνωστών κρυσταλλικών φάσεων, ανόργανων και οργανικών.

2.2.5 Προσδιορισμός ορίων ATTERBERG

Για τα πλέον λεπτόκοκκα εδάφη, όπως είναι η άργιλος και η ιλύς, οι βασικοί δείκτες για την κατάταξή τους είναι τα όρια Atterberg. Τα όρια Atterberg είναι τιμές της περιεχόμενης υγρασίας, στις οποίες παρατηρείται μετάπτωση της κατάστασης του εδάφους από την " υγρή" στην "πλαστική" και στη συνέχεια στην "ημιστερεή" και στη "στερεή" κατάσταση. [Χρηστάρας, 2005], [Στειακάκης, 2004]

Ειδικότερα τα όρια Atterberg ορίζονται ως εξής:

<u>1.Όριο υδαρότητας (LL)</u> : Όριο υδαρότητας (LL): όριο υδαρότητας είναι η τιμή της περιεχόμενης υγρασίας, εξαιτίας της οποίας τα τοιχώματα διαμορφωμένης εγκοπής ενός δείγματος εδάφους, που τοποθετείται στη συσκευή Casagrande, έρχονται σε επαφή μεταξύ τους μετά από 25 κρούσεις (Εικόνα 33).

<u>Μέθοδος Casagrande</u>

Κλάσμα εδάφους ζυμώνεται με τόσο νερό ώστε να σχηματιστεί μια εύπλαστη μάζα. Μέρος αυτής της μάζας τοποθετείται με κατάλληλο τρόπο στο κύπελλο της συσκευής Casagrande και δημιουργείται μια χαραγή στο μέσον του υλικού που βρίσκεται στο κύπελλο έτσι ώστε να το χωρίσει σε δύο μέρη. Περιστρέφουμε το στρόφαλο της συσκευής με σταθερό ρυθμό 2 γύρους/sec και μετράμε τους χτύπους του κυπέλλου μέχρι αυτή η χαραγή να κλείσει.

Για κάθε δείγμα διεξάγονται τουλάχιστον τρείς δοκιμές. Τα αποτελέσματα των δοκιμών μεταφέρονται σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα (αριθμός χτύπων σε λογαριθμική κλίμακα και περιεχόμενη υγρασία σε δεκαδική κλίμακα). Το όριο υδαρότητας είναι η περιεκτικότητα σε νερό που αντιστοιχεί σε 25 χτύπους.

Εικόνα 33: Από αριστερά προς τα δεξιά, συσκευή Casagrande, το δείγμα πριν τη δοκιμή και το δείγμα μετά τη δοκιμή

Μέθοδος πενετρόμετρου πίπτοντος κώνου (Cone test)

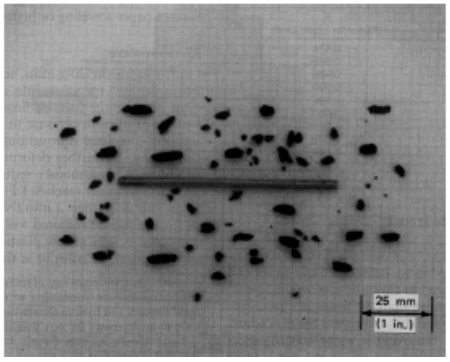
Είναι εργαστηριακή μέθοδος που χρησιμοποιείται συνήθως για λεπτόκοκκα εδάφη. Κατά τη μέθοδο αυτή κωνικό βαρίδιο συγκεκριμένου βάρους και γωνίας ανοίγματος κρέμεται με την κορυφή του κώνου σε επαφή με το εδαφικό δείγμα.

Το βαρίδιο απελευθερούμενο βυθίζεται εντός του εδάφους (Εικόνα 34). Το βάθος διείσδυσης του κώνου, ανάλογα με το βάρος του, σχετίζεται με την διατμητική αντοχή του εδάφους.Χρησιμοποιείται το κωνικό βαρίδιο με βάρος 60 gr και γωνία 60° και εκτελείται η δοκιμή για διάφορα ποσοστά υγρασίας. Κατασκευάζεται δεκαδικό διάγραμμα «βάθος διείσδυσης (mm)-περιεκτικότητα σε νερό (%)» και το όριο υδαρότητας υπολογίζεται από την περιεκτικότητα σε νερό που αντιστοιχεί σε 10 mm βάθους διείσδυσης.

Εικόνα 34: Συσκευή εκτέλεσης της δοκιμής Cone test

Για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας των εδαφικών δειγμάτων πραγματοποιήθηκε δοκιμή με τη συσκευή Casagrande και με τη μέθοδο πενετρόμετρου πίπτοντος κώνου (Cone test).

2.Όριο πλαστικότητας (PL) : αντιστοιχεί στο χαμηλότερο ποσοστό υγρασίας στον οποίο το έδαφος μεταβαίνει από την πλαστική στην ημιστερεή κατάσταση και μπορεί να κυλινδρωθεί σε παβδίσκο διαμέτρου 3mm χωρίς να θραύεται (ASTM D-4318/83). Πέραν του σημείου αυτού χάνει τις πλαστικές ιδιότητες και προσδιορίζουμε το όριο πλαστικότητας υλικού ως περιεκτικότητα σε νερό.(Εικόνα 35).



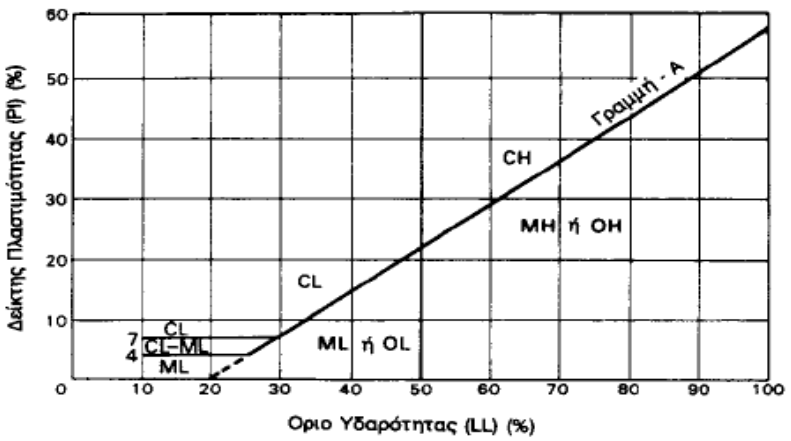
Εικόνα 35:Διαμόρφωση δείγματος για τον προσδιορισμό του ορίου πλαστικότητας

Λαμβάνεται ποσότητα εδάφους περίπου 20gr από υλικό δοερχομένου από το κόσκινο No.40. Το δείγμα αναμιγνύεται καλά με αποσταγμένο νερό μέχρι που η μάζα καταστεί αρκετά πλαστική ώστε να μορφώνεται σε

βώλο. Σαν δείγμα δοκιμής λαμβάνεται μέρος αυτού βάρους περίπου 8gr. Η μάζα αυτή κυλινδρώνεται μεταξύ των δακτύλων και της σμυριδωμένης γυάλινης πλάκας με την ακριβώς απαιτούμενη πίεση ώστε να κυλινδρωθεί η μάζα σε ραβδίσκο ομοιόμορφου διαμέτρου σε όλο το μήκος του. Όταν η διάμετρος του ραβδίσκου καταστεί 3 mm, ο ραβδίσκος θραύεται ξανά σε έξι ή οκτώ τεμάχια. Συμπιέζονται τα τεμάχια μεταξύ τους προς ομοιόμορφη μάζα και επαναλαμβάνεται η κυλίνδρωση. Η εναλλαγή συνεχίζεται με κυλίνδρωση σε ραβδίσκο διαμέτρου 3mm, με συνένωση, με αναζύμωση και επανακυλίνδρωση, μέχρι που ο ραβδίσκος θρυμματισθεί με την απαιτούμενη για την κυλίνδρωση πίεση και το έδαφος δεν μπορεί πλέον να κυλινδρωθεί σε ραβδίσκο. Ο θρυμματισμός μπορεί να επέλθει όταν ο ραβδίσκος έχει διάμετρο μεγαλύτερη από 3mm. Αυτό πρέπει να θεωρηθεί ικανοποιητικό σημείο περατώσεως, με τον όρο ότι το έδαφος κυλινδρώθηκε προηγουμένως σε ραβδίσκο διαμέτρου 3mm. Το όριο πλαστικότητας υπολογίζεται σαν τη περιεχόμενη υγρασία που περιέχεται στους ραβδίσκους των 3mm και προκύπτει σαν ο μέσος όρος τριών δοκιμών.

3.<u>Δείκτης πλαστικότητας (PI)</u> : ονομάζεται η διαφορά μεταξύ των ορίων υδαρότητας και πλαστικότητας PI=LL-PL. Τα συνεκτικά εδάφη παρουσιάζουν διαφορετικό βαθμό πλαστικότητας, ο οποίος εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων τους (όσο πιο λεπτόκοκκο είναι το έδαφος, τόσο ο δείκτης πλαστικότητας είναι μεγαλύτερος) και από τη σύσταση τους. Με ελαττούμενη περιεκτικότητα σε νερό τα εδάφη αυτά μεταβαίνουν από τη στερεή δια μέσου της πλαστικής, στην ημιστερεή κατάσταση. Με το διάγραμμα (Σχήμα 3), γίνεται η κατάταξη των εδαφών κατά τους κανονισμούς ASTM. [Χρηστάρας, 2005], [Στειακάκης, 2004].

Προκειμένου να γίνει η ταξινόμηση σχεδιάζεται το σημείο (LL, PI) στον χάρτη πλαστικότητας και ανάλογα με την περιοχή που βρίσκεται, ταξινομείται το λεπτόκοκκο υλικό σε κάποια από τις κατηγορίες που έχει ο χάρτης.



Σχήμα 3: Χάρτης πλαστικότητας Casagrande

Τα σημεία κάτω της γραμμής «Α» χαρακτηρίζουν κάποιο ιλυώδες υλικό ενώ τα σημεία μεταξύ της γραμμής «Α» και της γραμμής «U» χαρακτηρίζουν κάποιο αργιλώδες υλικό.

Η ονοματολογία που ακολουθείται είναι η παρακάτω:

- **CL** Ισχνή άργιλος
- **ML** Ιλύς
- **CL-ML** Ιλυώδης άργιλος
- **CH** Παχιά άργιλος
- **MH** Ελαστική ιλύς
- **OH – OL** Οργανική ιλύς ή άργιλος

Εξαίρεση αποτελούν οι εξής περιπτώσεις :

1.Όταν το όριο υδαρότητας ή το όριο πλαστικότητας δεν μπορούν να προσδιοριστούν, αναφέρεται ο δείκτης πλαστικότητας σαν NP (μη πλαστικό).

2.Όταν το έδαφος είναι εξαιρετικά αμμώδες, η δοκιμή για το όριο πλαστικότητας πρέπει να εκτελείται πριν από το όριο υδαρότητας.

3.Αν το όριο πλαστικότητας δεν μπορεί να προσδιοριστεί, αναφέρονται και το όριο υδαρότητας και το όριο πλαστικότητας σαν NP (μη πλαστικό).

4.Όταν το όριο πλαστικότητας είναι ίσο ή μεγαλύτερο από το όριο υδαρότητας, αναφέρεται ο δείκτης πλαστικότητας σαν NP.

2.2.6 Μηχανικές αντοχές

Προσδιορισμός αντοχής δοκιμίων σε μονοαξονική θλίψη

Περιγραφή της μεθόδου

Ο στόχος του συγκεκριμένου πειράματος είναι ο προσδιορισμός της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη ενός δοκιμίου, χρησιμοποιώντας δοκίμια κανονικής γεωμετρίας.

Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν αναφέρονται στις μηχανικές ιδιότητές του και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κριτήριο για τον χαρακτηρισμό και την αξιολόγησή του. Τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιούνται είναι η μηχανή θλίψης (πρέσα), της οποίας η ακρίβεια και η αξιοπιστία πρέπει να πιστοποιείται τουλάχιστον κάθε δυο χρόνια από μια εγκεκριμένη για τον σκοπό αυτό υπηρεσία, συμπεριλαμβανομένου και του αυτόματου συστήματος καταγραφής (Εικόνα 36). [Αγιουτάντης, 2002].

Εικόνα 36: Σύστημα καταγραφής

Εικόνα 37: Μηχάνημα μονοαξονικής θλίψης

Η μηχανή για μονοαξονική θλίψη (Εικ. 36, 37) αποτελείται από:

1. Συσκευή δοκιμής: η συσκευή πρέπει να μπορεί να επιβάλλει σταθερό ρυθμό φόρτισης στο δοκίμιο και συγχρόνως να έχει τη δυνατότητα να μετρήσει ή και να καταγράψει το επιβαλλόμενο φορτίο.
2. Πλάκες φόρτισης: οι πλάκες φόρτισης χρησιμεύουν στο να μεταφέρουν το φορτίο στο δοκίμιο και πρέπει να είναι παράλληλες μεταξύ τους.
3. Χαλύβδινοι δίσκοι: οι δίσκοι (platens) τοποθετούνται ανάμεσα στις πλάκες φόρτισης και στο δοκίμιο και αποσκοπούν στο να ελαττώσουν την υπερβολική πλευρική παραμόρφωση του δοκιμίου λόγω δυνάμεων τριβής στα σημεία επαφής. Η σκληρότητα των δίσκων (στην κλίμακα Rockwell) πρέπει να είναι μεγαλύτερη από HRC58 και η διάμετρός τους πρέπει να είναι μεταξύ D και D+2mm, όπου D η διάμετρος του δοκιμίου. Το πάχος των δίσκων πρέπει να είναι τουλάχιστον 15mm ή D/3 και οι παράλληλες επιφάνειές τους πρέπει να έχουν αντοχή μικρότερη από 0.005mm.
4. Σφαιρική κεφαλή έδρασης: η σφαιρική κεφαλή έδρασης θα πρέπει να βρίσκεται στο πάνω μέρος του δοκιμίου και ο άξονάς της πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένος με τον άξονα του δοκιμίου και το κέντρο της πλάκας φόρτισης.

Αν η μηχανή δοκιμής δεν διαθέτει σφαιρική κεφαλή έδρασης (η οποία συνήθως είναι ενσωματωμένη στην επάνω πλάκα φόρτισης), τότε ο ένας από τους δύο χαλύβδινους δίσκους πρέπει να έχει αυτή τη δυνατότητα. Η κεφαλή πρέπει να λιπανθεί με ελαφρό ορυκτέλαιο.

Διαδικασία εκτέλεσης

Το δοκίμιο τοποθετείται στο κέντρο των πλακών φόρτισης έτσι ώστε το σφάλμα κεντρώσεως να μην είναι μεγαλύτερο από 1/100 της ακμής του δοκιμίου. Η θλίψη ασκείται συνεχώς και αυξάνει με καθορισμένη ταχύτητα μέχρι της μεγίστης τιμής. Ξεκινάει η μηχανή θραύσης και παρακολουθείται η ένδειξη της μηχανής, μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή, με τον οποίο είναι συνδεδεμένη, ώσπου να επέλθει η αστοχία, οπότε και σταματάει η δοκιμή. Για να ληφθούν οι μετρήσεις περνάνε στα ζητούμενα του υπολογιστή οι διαστάσεις των τριών πλευρών του δοκιμίου (σε mm) που πρόκειται να θραυτεί όπως επίσης και το βάρος του (σε kg).

Έπειτα, σημειώνεται ο αριθμός του δοκιμίου, για να μπορεί έτσι να αναγνωριστεί αργότερα σε ποιο δοκίμιο απευθύνεται το φύλλο εργασίας, και οι ημερομηνίες παρασκευής και θραύσης. Εφόσον λοιπόν συμπληρωθούν όλα αυτά τα ζητούμενα, το δοκίμιο είναι έτοιμο για τη δοκιμή σε μονοαξονική θλίψη.

Πατώντας το κουμπί αποδοχής των δεδομένων που δόθηκαν, ξεκινάει η θραύση του δοκιμίου. Σε διάγραμμα χρόνου-φορτίου, το οποίο εμφανίζεται στην οθόνη του υπολογιστή, παρατηρείται η θραύση του δοκιμίου. Φαίνεται ότι όσο περνάει ο χρόνος αυξάνεται το φορτίο που ασκείται στο δοκίμιο. Στο μέγιστο της καμπύλης (κορυφή) είναι το σημείο στο οποίο αστοχεί το δοκίμιο.

Η αντοχή του δοκιμίου σε μονοαξονική θλίψη σ υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\sigma = \left(\frac{Fmax}{A}\right) * 10$$

όπου σ η θλιπτική αντοχή (MPa), $Fmax$ η μέγιστη εφαρμοζόμενη τάση (KN) και A η επιφάνεια του δοκιμίου (cm^2).

Η παραμόρφωση του δοκιμίου υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\varepsilon = \frac{dl}{lo}$$

όπου ε η ανηγμένη παραμόρφωση, dl η μεταβολή στο ύψος του δοκιμίου (σε cm) και lo το αρχικό ύψος του δοκιμίου (cm).

Από την κλίση της καμπύλης υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας Ε ως εξής:

- Εφαπτομενικό Μέτρο Ελαστικότητας. Υπολογίζεται από την κλίση της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης στο σημείο του 50% της μέγιστης τιμής της αντοχής.
- Μέσο Μέτρο Ελαστικότητας. Προκύπτει από τη μέση κλίση του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης.
- Τέμνον Μέτρο Ελαστικότητας. Ορίζεται από τη κλίση της ευθείας που ενώνει την συμβολή των αξόνων με κάποιο σημείο της καμπύλης, το οποίο δίνεται ως ποσοστό της μέγιστης τάσης που δέχθηκε το δοκίμιο.

Προσδιορισμός αντοχής δοκιμίων σε κάμψη

Πραγματοποιείται καμπτική φόρτιση πρισματικών δοκιμίων στην ίδια μηχανή φόρτισης όπως προηγουμένως αλλά με την προσαρμογή μίας ειδικής κεφαλής που ασκεί πίεση στα δύο άκρα του δοκιμίου. Τα αποτελέσματα της καμπτικής φόρτισης των δοκιμίων βρίσκονται σε συνάρτηση με την δύναμη που προκαλεί την κάμψη, τις διαστάσεις της ράβδου και τέλος με την απόσταση των σημείων στήριξης της ράβδου.

Σε όλη την διάρκεια του πειράματος, ένας ειδικός καταγραφέας συνδεδεμένος με ηλεκτρονικό υπολογιστή, κατέγραφε την δύναμη που ασκείται στο δοκίμιο από το άνω στέλεχος ανά μονάδα χρόνου.

Με τα στοιχεία αυτά που συλλέχτηκαν και με τη βοήθεια του προγράμματος Excel, κατασκευάζεται αναλυτικό δελτίο για κάθε δοκίμιο. Αρχικά, σημειώνονται οι διαστάσεις του συγκεκριμένου δοκιμίου και υπολογίζεται ο συντελεστής αδράνειας I_z (Lama &Vutukuri).

$$I_z = \frac{bh^3}{12}$$

όπου : *b* είναι το πλάτος και *h* το ύψος του δοκιμίου.

Στη συνέχεια, καταγράφεται ο χρόνος του πειράματος και υπολογίζεται η μετατόπιση του μαρμάρου, αφού είναι γνωστός ο ρυθμός καθόδου του στελέχους, 0,001 mm/sec.

Έπειτα, με τα δεδομένα της δύναμης που δίνονται, υπολογίζεται η τάση στο δοκίμιο από τον τύπο (Lama & Vutukuri):

$$\sigma_t = \frac{3}{2}\frac{P_f l_s}{bh^2}$$

όπου : *b* είναι το πλάτος, *h* το ύψος, *l* το μήκος του δοκιμίου και *P* η δύναμη που ασκείται.

Στο τέλος, κατασκευάζονται τα διαγράμματα μετατόπισης – δύναμης και μετατόπισης – τάσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι αρνητικές τιμές δυνάμεων, φανερώνουν ότι αυτές δεν εφαρμόζονται στο δοκίμιο. Μετά την θραύση του δοκιμίου, η δύναμη ελαττώνεται αισθητά. [Αγιουτάντης Ζ., 2002]

2.2.7. Υδατοαπορροφητικότητα

Η ικανότητα υδατοαπορρόφησης μελετήθηκε για τα δείγματα με τις επιδεικνυόμενες υψηλότερες αντοχές σε θλίψη με τη βοήθεια μίας αυτοσχέδιας πειραματικής διάταξης στο εσωτερικό της οποίας επιτεύχθηκαν συνθήκες κλειστού συστήματος αέρα-νερού θερμοδυναμικής ισορροπίας.

Συγκεκριμένα ένα κυβικό δοκίμιο (5x5x5cm) από κάθε δείγμα, μετά την ωρίμανσή – ξήρανσή του για 28 ημέρες, και αφού ζυγιστεί τοποθετείται πάνω σε διάτρητο πορσελάνινο δίσκο υάλινου ξηραντήρα του οποίου η βάση έχει πληρωθεί με νερό κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται η άμεση επαφή των δοκιμίων με το νερό. Μετά την τοποθέτηση των δοκιμίων ο ξηραντήρας σφραγίζεται με το σκέπασμά του ενώ η βαλβίδα εισροής-εκροής συνδέεται σε παροχή κενού ώστε να

αφαιρεθεί ο αέρας εντελώς από το εσωτερικό του ξηραντήρα. Τα δοκίμια ζυγίζονται κάθε 5 μέρες μέχρι επίτευξης κορεσμού (σταθερού βάρους) και λαμβανομένων υπόψη των σταθερών εργαστηριακών συνθηκών θερμοκρασίας και πίεσης το διάστημα των μετρήσεων.

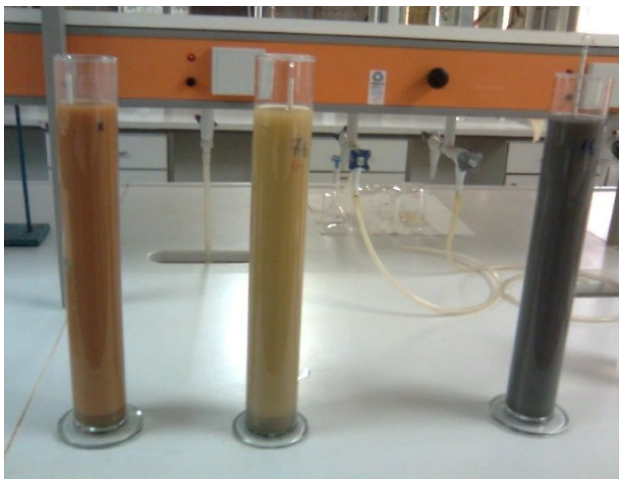
Κατασκευάζεται διάγραμμα με τις καμπύλες υδατοαπορρόφησης των δοκιμίων (μεταβολή βάρους δοκιμίου στη μονάδα του χρόνου).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Ακολουθούν τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών και αναλύσεων για την αξιολόγηση των δειγμάτων.

3.1. Υγρή κοκκομετρική ανάλυση με τη μέθοδο Bouyoucos

Η εφαρμογή της μεθόδου πραγματοποιήθηκε σε κοσκινισμένα δείγματα με μέγιστο μέγεθος κόκκου 2mm (εικ.38). Τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής διαβάθμισης των δειγμάτων σύμφωνα με το περιεχόμενό τους σε άμμο, ιλύ και άργιλο παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

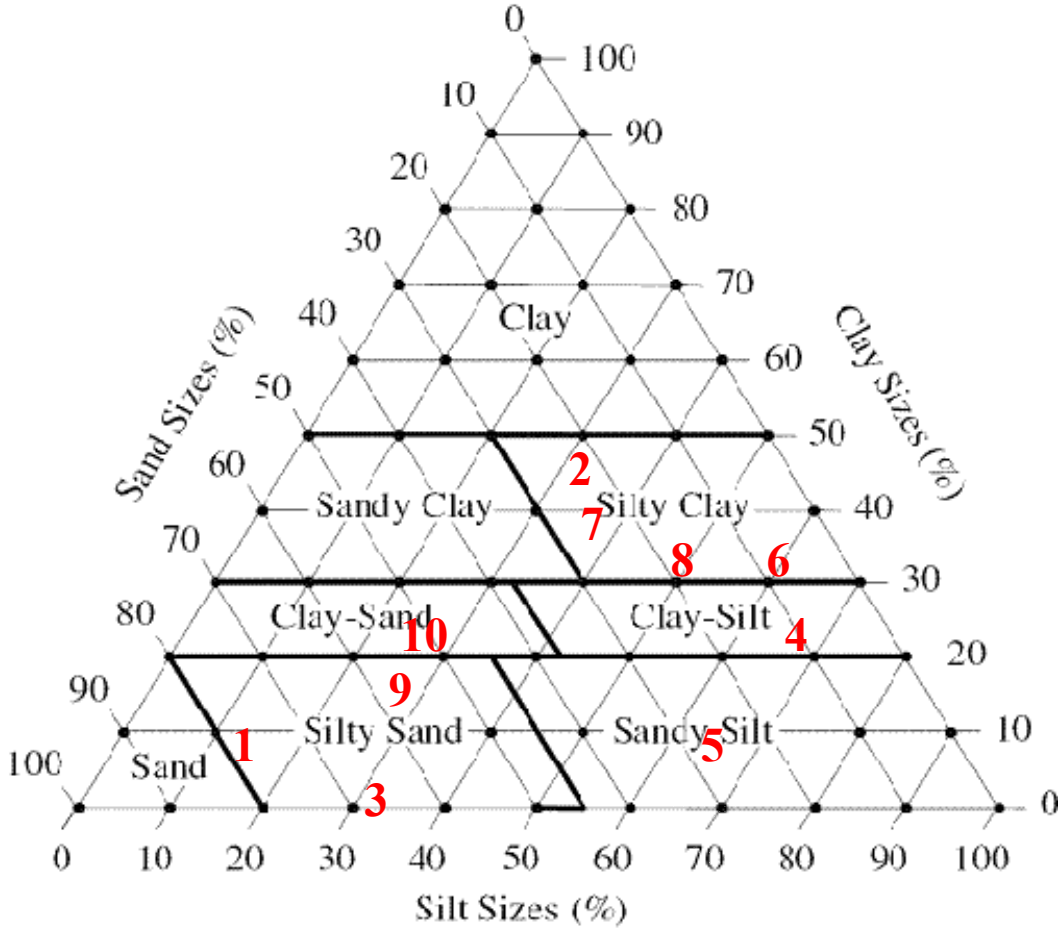


Εικ.38 Υγρή κοκκομετρική ανάλυση των εδαφικών δειγμάτων με τη μέθοδο Bouyoucos.

Πίνακας 1. Κοκκομετρική ταξινόμηση των δειγμάτων (No1-10) σύμφωνα με τα κύρια συστατικά τους.

Θέσεις δειγμ/ληψίας	**No**	**Δείγμα**	**Άμμος %**	**Ιλύς %**	**Άργιλος %**
ΑΓΙΑ	1	**AG**	79	8	13
ΑΛΙΚΙΑΝΟΣ	2	**AL1**	23	32	45
ΑΛΙΚΙΑΝΟΣ	3	**AL2**	63	32	5
ΠΑΤΕΛΑΡΙ	4	**PAT**	9	64	27
ΣΠΗΛΙΑ	5	**SPH1**	35	58	7
ΣΠΗΛΙΑ	6	**SPH2**	5	58	37
ΓΕΡΑΝΙ	7	**GER**	21	42	37
ΠΛΑΤΑΝΟΣ	8	**PL**	19	47	34
ΣΟΥΔΑ	9	**SOU**	57	26	17
ΚΑΜΠΑΝΟΣ	10	**KAM**	59	20	21

Σύμφωνα με το τριγωνικό σύστημα ταξινόμησης USDA [25] (Σχήμα 4), τα μελετώμενα δείγματα μπορούν να ταξινομηθούν σε ιλυώδεις αργίλους (silty clay) (No 2,6,7,8 δηλ. AL1, SPH2, GER, PL αντίστοιχα), αργιλούχους άμμους (clay sand) (No 10 - KAM), ιλυώδεις άμμους (silty sand) (No 1, 3, 9 δηλ. AG, AL2, SOU αντίστοιχα), αργιλούχες ιλείς (clay silt) (No 4 - PAT), και αμμώδεις ιλείς (sandy silt) (No 5 – SPH1).



Σχήμα 4. Κοκκομετρική ταξινόμηση των εδαφικών δειγμάτων Δυτ. Κρήτης (No1 – 10 κατ'αντιστοιχία με τον πίνακα 1) με τη βοήθεια του τριγωνικού διάγραμματος ταξινόμησης USDA.[25]

3.2 Ορυκτολογική ανάλυση περιθλασιμετρίας ακτίνων Χ (XRD)

Τα ορυκτολογικά συστατικά και η ημιποσοτική εκτίμησή τους από την ορυκτολογική ανάλυση των δειγμάτων παρουσιάζονται στον πίνακα 2.
Τα κυριότερα αργιλικά ορυκτά που ανιχνεύθηκαν είναι ο μοντμοριλλονίτης, ο ιλλίτης, ο σμεκτίτης.
Η παρουσία ορισμένων ορυκτών όπως πχ. του μοντμοριλλονίτη στην σύσταση των εδαφικών δειγμάτων έχει άμεση σχέση με την τεχνική συμπεριφορά των δομικών προϊόντων τους, συγκεκριμένα με φαινόμενα διόγκωσης ή συρρίκνωσης όπως φαίνεται στον πίνακα 3 (Bain, 2007).

Πίνακας 2. Ορυκτολογική ανάλυση των εδαφικών δειγμάτων Δυτ. Κρήτης

Ορυκτά	Δείγματα									
	AL1	**SPH1**	**GER**	**AL2**	**PAT**	**AG**	**SPH2**	**PL**	**KAM**	**SOU**
Ιλλίτης	34	27	11	31	46	32	49	40	43	35
Χαλαζίας	33	30	16	64	9	50	7	3	24	32
Αλβίτης	8	8								8
Μοσχοβίτης	25		9	3	9	5	13	2	11	1
Ασβεστίτης		20	64	2	20	2	5	35	2	2
Χαμοσίτης		2								
Αιματίτης						1				
Αλλοϋσίτης		5								
Χλωριώδες νάτριο		4					1	1	1	1
Μοντμοριλ-λονίτης		3								
Βιοτίτης					3	1				
Χλωρίτης		1			8	4	11	4	6	4
Δολομίτης					5	2	4	2	2	2
Γκαιτίτης						3	2	3	4	5
Σμεκτίτης-Χλωρίτης							4	6	4	5
Γύψος							4	4	3	5

***** <u>Χημικοί τύποι ορυκτών</u>:

ιλλίτης $(K,H_3O)(Al,Mg,Fe_2(Si,Al)4O_{10}[(OH_2,H_2O]$, χαλαζίας SiO_2, ορθόκλαστο $KAlSi_3O_8$, μοσχοβίτης $Al_2(AlSi_3)O_{10}(OH)_2$, ασβεστίτης $CaCO_3$, αιματίτης Fe_2O_3, χαμοσίτης $(Fe, Mg)_3Fe_3AlSi_3O_{10}(OH)_8$, αλλοϋσίτης $Al_2Si_2O_5(OH)_4$, χλωριώδες νάτριο $NaClO_2$, αλβίτης $NaAlSi_3O_8$, γκαιτίτης $(FeO(OH)$, Μοντμοριλλονίτης $(Na,Ca)_{0.33}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$, Βιοτίτης $K(Mg,Fe)_3AlSi_3O_{10}(F,OH)_2$, χλωρίτης $(Fe, Mg, Al)_6(Si, Al)_4O_{10}(OH)_8$,

δολομίτης $CaMg(CO_3)_2$, γύψος $CaSO_4 \cdot 2H_2O$

σμεκτίτης $[(1/2Ca,Na)_{0.7}(Al,Mg,Fe)_4(Si,Al)_8O_{20}(OH)_4 7nH_2O)]$

Πίνακας 3: Περίληψη των χαρακτηριστικών των κοινών εδαφολογικών αργίλων (Bain, 2007).

Δευτερεύον ορυκτό	**Τύπος**	**Ενδιάμεσα στρώματα / Σύνδεση**	**Κατιοντο-εναλλακτική ικανότητα CEC [cmol/kg]**	**Δυνατότητα διόγκωσης**	**Ειδική επιφάνεια [m2/g]**	**Ενδοστρωματικός χώρος [nm]**
Καολινίτης	1 : 1 (μη διογκούμενος)	Απουσία ενδιάμεσων στρωμάτων ισχυρή σύνδεση	3 - 15	σχεδόν καμία	5 - 20	0.72
Μοντμοριλ-λονίτης	2 : 1 (διογκούμενος)	Πολύ ασθενής σύνδεση, μεγάλη διόγκωση	80 - 150	υψηλή	700 - 800	0.98 - 1.8 +
Βερμικουλί-της	2 : 1 (διογκούμενος)	Ασθενής σύνδεση, μεγάλη διόγκωση	100 -150	υψηλή	500 - 700	1.0 - 1.5 +
ένυδρος μαρμαρυγίας	2 : 1 (μη διογκούμενος)	μερική απώλεια K, ισχυρή σύνδεση	10 - 40	χαμηλή	50 - 200	1.0
Χλωρίτης	2 : 1 : 1 (μη διογκούμενος)	Ενδιάμεση ως ισχυρή σύνδεση, μη διογκούμενος	10 - 40	καμία		1.4
Αλλοφανής	-	-	10 - 50	-		-

Η ορυκτολογική σύσταση των δειγμάτων δικαιολογεί τα φαινόμενα διόγκωσης – συρρίκνωσης – παραμόρφωσης καθώς και τη δημιουργία μικρορωγμών των παρασκευαζόμενων κυβικών δοκιμίων και ράβδων που παρατηρούνται κατά την ξήρανση των δοκιμίων μέσα στα καλούπια αλλά και έξω από αυτά.

3.3. Προσδιορισμός των ορίων Atterberg

Τα όρια Atterberg (liquid limit LL, plastic limit PL) όπως και ο δείκτης πλαστικότητας (PI= LL-PL) προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο Casagrande [ASTM D 4318-00] σε σύγκριση με τη μέθοδο διείσδυσης κώνου (Cone Penetration Test(ASTM D2487-00)) και παρατίθενται στον Πίνακα 4).

Πίνακας 4. Όρια Atterberg των δειγμάτων

Δείγμα	**Φαινόμενη Πυκνότητα (gr/cm^3)**	**Όριο υδαρότητας (LL) Casagrande**	**Όριο υδαρότητας (LL) Cone test**	**Όριο Πλαστικότητας (PL)**	**Δείκτης πλαστικότητας (PI=LL-PL)**
SOU	2.39	25.45	29.09	13.58	11.87
PAT	2.56	33.57	37.69	13.58	19.99
AL1	2.04	26.86	31.33	15.39	11.47
AG	2.28	22.63	26.76	18.13	4.5
SPH2	4.06	41.22	56.39	32.03	9.19
GER	2.39	44.75	45.73	26.04	18.71
AL2	2.67	19.95	28.45	18.18	1.77
PL	2.14	43.88	45.99	20.05	23.83
SPH1	3.41	31.13	32.75	19.7	11.43
KAM	6.28	31.45	34.89	24.8	6.65

Σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές IETcc (Πίνακας 5) η καταλληλότητα ενός εδάφους για rammed earth (εγκιβωτισμένο αργιλοσκυρόδεμα) εξαρτάται κυρίως από τη κοκκομετρική του διαβάθμιση και την πλαστικότητα η οποία σχετίζεται με τα όρια Atterberg.

Πίνακας 5. Προδιαγραφές για την επιλογή ενός εδάφους για εφαρμογή rammed earth σύμφωνα με το σύστημα IETcc (Jiménez Delgado et al., 2006).

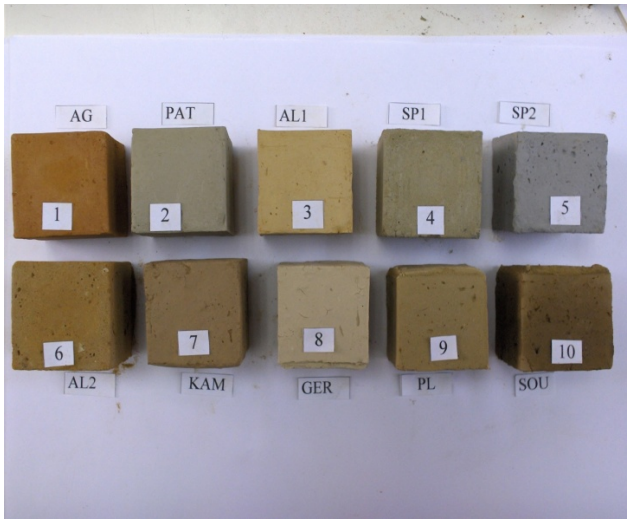
Είδη rammed-earth	**Διαβάθμιση εδάφους**[a]	**Πλαστικότητα**
rammed earth	άργιλος + ιλύς[b] 30–60%	–
rammed earth ενισχυμένο	Λεπτό χαλίκι: 10–20%	–
	άμμος: 10–40%	
	ιλύς: 20–40%	
	άργιλος: 10–40%	
	άργιλος + ιλύς[b] < 45%	
rammed-earth σταθεροποιημένο		LL < 40%
	άμμος > 33%	10 < LP < 25
	άργιλος+ ιλύς[b] < 30%	Ευνοϊκή
		12 < LP < 20
		IP = 6–22%

[a] Μεγέθη κόκκων: άργιλος $d < 0.002$ mm, ιλύς $0.002 < d < 0.5$ mm, άμμος $0.5 < d < 5$ mm, λεπτό χαλίκι $5 < d < 20$ mm.

Τα μελετώμενα εδαφικά δείγματα παρουσιάζουν κατάλληλη κοκκομετρική διαβάθμιση και ικανοποιητική πλαστικότητα (πίνακες 1, 4) με PI να κυμαίνεται μεταξύ 9-20, σύμφωνα με τις προδιαγραφές IETcc, εξαιτίας της παρουσίας επαρκών ποσών αργίλου εκτός από τα δείγματα AG και AL2.

3.4 Προσδιορισμός αντοχής δοκιμίων σε μονοαξονική θλίψη και κάμψη

Παρασκευάστηκαν δοκίμια σε ειδικά διαμορφωμένα καλούπια με σκοπό τη διεξαγωγή τυποποιημένων ελέγχων βάσει διεθνών κανονισμών για τον προσδιορισμό της τεχνικής τους συμπεριφοράς (π.χ. αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, κάμψη). Συγκεκριμένα για τις απαιτήσεις των δοκιμών αντοχής σε θλίψη παρασκευάστηκαν κυβικά δοκίμια διαστάσεων 5x5x5 cm (εικ.39) και για τη δοκιμή κάμψης ράβδοι διαστάσεων 4x4x16 cm. [Αγιουτάντης, 2002]



Εικ.39. Κυβικά δοκίμια που παρασκευάστηκαν από τα αργιλούχα δείγματα Δυτ. Κρήτης

Για την παραγωγή των δοκιμίων και ράβδων χρησιμοποιήθηκαν ξύλινες μήτρες (εικ.40) και απαιτήθηκε η ύγρανση της προϋπολογισμένης ποσότητας εκάστοτε δείγματος και η καλή ανάμιξη και ομογενοποίηση ώστε να δύναται η διαμόρφωσή του μέσα στη μήτρα.

Εικ.40: Ξύλινη μήτρα στην οποία τοποθετείται το υδαρές αργιλούχο μίγμα.

Με στόχο τη διερεύνηση της δυνατότητας βελτίωσης των ποιοτικών παραμέτρων των εδαφικών δειγμάτων σε δομικά προϊόντα (πχ. υδατοστεγανότητα, αντοχή, αποφυγή δημιουργίας ρωγματώσεων, βελτίωση θερμικής αγωγιμότητας) και στα πλαίσια περαιτέρω έρευνας που διεξαγόταν στο Εργαστήριο Πετρολογίας & Οικονομικής Γεωλογίας για τα υλικά αυτά, παρασκευάστηκαν δοκίμια με προσθήκη 5% σκόνης υδρασβέστου καθώς και δοκίμια με κομμένο άχυρο σε αναλογία έδαφος: άχυρο = 1:1 από κάθε δείγμα.

Τα δοκίμια αφέθηκαν να στεγνώσουν μερικές μέρες και κατόπιν αφαιρέθηκαν από τα καλούπια και παρέμειναν σε συνθήκες δωματίου στο εργαστήριο τουλάχιστον 28 μέρες προτού μετρηθεί η αντοχή τους σε θλίψη και κάμψη.
Όσα δείγματα εμφάνισαν ρωγμές ή όχι καλά σχηματισμένες τις ακμές τους επαναπαρασκευάστηκαν για λόγους μεγαλύτερης ακρίβειας των αποτελεσμάτων των δοκιμών αντοχής.

Από κάθε έδαφος μετρήθηκαν ως προς την αντοχή σε θλίψη 3 κυβικά δοκίμια ενώ ως προς την αντοχή σε κάμψη 2 ράβδοι.
Τα αποτελέσματα της δοκιμής αντοχής σε θλίψη των δοκιμίων των αργιλούχων δειγμάτων καθώς και των μιγμάτων τους με άχυρο ή με

υδράσβεστο παρουσιάζονται στον Πίνακα 6 ενώ στον πίνακα 7 ακολουθούν τα αποτελέσματα των δοκιμών κάμψης.
(Σημείωση: στον πίνακα 6 με την κατάληξη 's' στους κωδικούς των δειγμάτων υποδηλώνεται η προσθήκη άχυρου)

Επιπλέον μετρήθηκε η αντοχή σε θλίψη μίας πλίθας από πραγματική κατασκευή στο Πατελάρι (PATadobe) για λόγους σύγκρισης με τα αντίστοιχα δοκίμια από αργιλούχο υλικό της περιοχής αυτής.

Πίνακας 6. Αποτελέσματα αντοχής σε θλίψη των αργιλούχων δειγμάτων και των μιγμάτων τους με άχυρο ή υδράσβεστο.

Δείγμα	**σ(MPa)**	**Μέτρο ελαστικότητας E (Mpa)**	**σ(MPa) δείγματα με υδράσβεστο 5%**
AG	1.8	116	9.4
AGs	0.8	41	
AL1	2	170	2.1
AL1s	0.8	18	
AL2	0.4	48	0.1
PAT	1	77	4.9
PATs	0.5	18	
SPH1	0.5	41	8.9
SPH2	1.1	48	1.4
GER	2	120	0.1
GERs	0.5	13	
PL	2.6	105	0.9
SOU	3.7	232	0.1
KAM	1.1	71	0.04
PATadobe	1.2	81	

Τα δείγματα AL1, GER, PL, SOU παρουσιάζουν υψηλή φυσική αντοχή σε θλίψη από 2 έως περίπου 4 Mpa.
Τα ίδια δείγματα εμφανίζουν τις καλύτερες τιμές αντοχής σε κάμψη από 0.7 έως περίπου 1 MPa αν και οι τιμές αυτές είναι χαμηλές σε σύγκριση με εκείνες των συμβατικών δομικών υλικών.

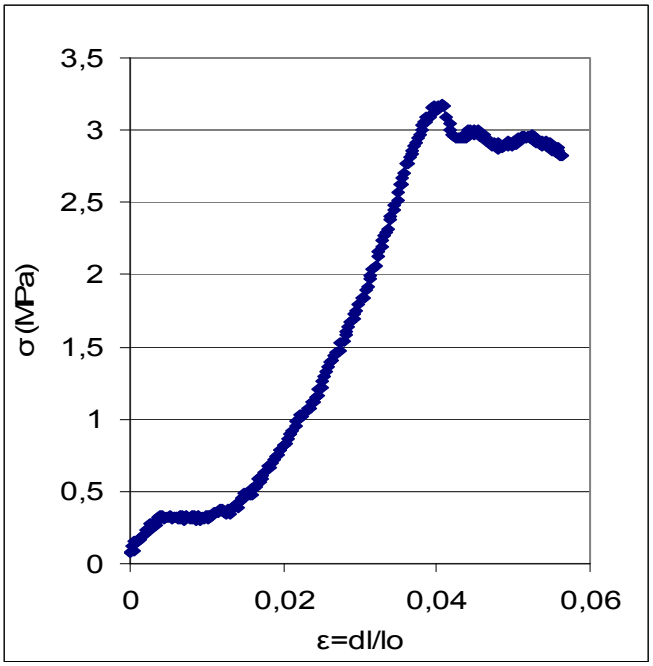
Πίνακας 7. Αποτελέσματα αντοχής σε κάμψη των δοκιμίων

Δείγμα	**σ (MPa)**
AG	0.7
AL1	0.7
AL2	0.1
GER	0.7
KAM	0.2
PAT	0.3
PL	0.9
SOU	1.0
SPH1	1.0
SPH2	14

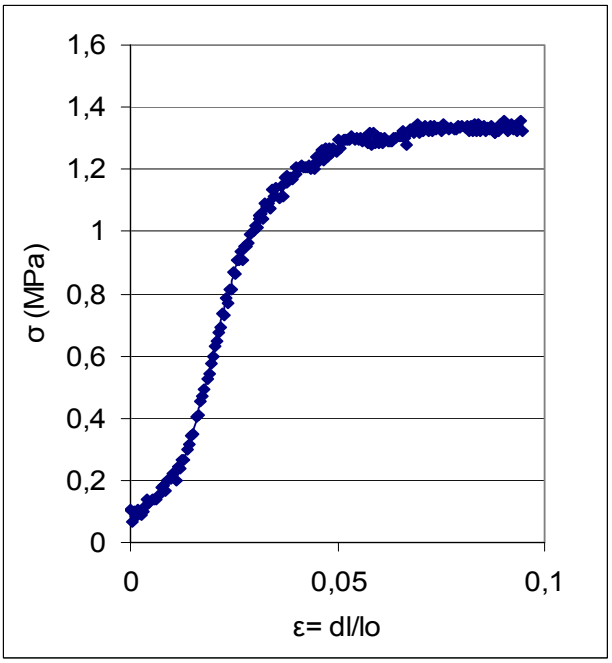
Τα δείγματα από Σπηλιά SPH1 και SPH2 ενώ δεν εμφανίζουν υψηλές αντοχές σε θλίψη έχουν καλές αντοχές σε κάμψη και ιδιαίτερα το SPH2 επιδεικνύει την υψηλότερη με σημαντική διαφορά αντοχή σε κάμψη 14 MPa, σε σύγκριση με τα υπόλοιπα δείγματα που η αντοχή τους κυμαίνεται από 0.2 – 1 MPa.
Αυτό πιθανά οφείλεται στο υψηλό περιεχόμενό του σε ιλύ και άργιλο και σε συγκεκριμένα ορυκτά που περιέχει, πχ. το μοσχοβίτη ο οποίος είναι ένα αρκετά ελαστικό – πλαστικό ορυκτό.

Η προσθήκη άχυρου σε όλα τα δείγματα προκαλεί γενικά επιδείνωση της μηχανικής συμπεριφοράς των δοκιμίων από πλευράς αντοχών ωστόσο

βελτιώνει την ελαστική τους ανταπόκριση μετά τη θραύση των όπως διαπιστώνεται από τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης των δοκιμίων (παραδείγματος χάριν για το δείγμα SOU, σχ. 5,6).



Σχήμα 5. Διάγραμμα τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης από τη δοκιμή αντοχής σε θλίψη κυβικού δοκιμίου του δείγματος SOU (Σούδα)



Σχήμα 6. Διάγραμμα τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης από τη δοκιμή αντοχής σε θλίψη κυβικού δοκιμίου του δείγματος SOU σε ανάμιξη με άχυρο (χώμα:άχυρο = 1:1)

Παρατηρείται ότι η προσθήκη υδρασβέστου στα αργιλούχα δείγματα επηρεάζει διαφορετικά τη μηχανική αντοχή σε θλίψη κάθε ενός από αυτά.

Το δείγμα AG με υδράσβεστο εμφανίζει την υψηλότερη αντοχή σε θλίψη 9.39 MPa.

Συγκεκριμένα η προσθήκη υδρασβέστου αυξάνει σημαντικά την αντοχή των αργιλούχων σχηματισμών AG, PAT, και SPH1, δεν επηρεάζει αλλά μόνο βελτιώνει αμυδρά την αντοχή των AL1, SPH2 ενώ μειώνει τις αντοχές των υπολοίπων δειγμάτων.

Ιδιαίτερα αρνητική είναι η επίδραση της υδρασβέστου στην αντοχή του δείγματος SOU το οποίο σκέτο ως έχει εμφανίζει τη μέγιστη τιμή σε σύγκριση με τα υπόλοιπα δείγματα.

Η μηχανική συμπεριφορά των δειγμάτων μετά την προστιθέμενη υδράσβεστο πιθανά συνδέεται με την κοκκομετρική τους διαβάθμιση και τα ποσοστά τους σε άμμο, ιλύ, άργιλο και κατά συνέπεια εξαρτάται από τα σχηματιζόμενα διάκενα τα οποία γεμίζει η υδράσβεστος κατά την ανάμιξη και μορφοποίηση των υλικών.

Πιθανά η τεχνική συμπεριφορά των δοκιμίων να ήταν διαφορετική αν η δοκιμή αντοχής σε θλίψη διεκπεραιώνονταν επιπλέον και σε διάστημα 3 μηνών μετά την παρασκευή τους ή 6 μηνών κοκ. ούτως ώστε η υδράσβεστος να έχει αποκτήσει το μέγιστο της αντοχής της.

Ο ρόλος της υδρασβέστου χρήζει περαιτέρω πειραμάτων και έρευνας για τον συσχετισμό της με τη φύση των συγκεκριμένων υλικών και την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.

Η μηχανική αντοχή ενός εδάφους εξαρτάται κυρίως από τη δημιουργία κενών και πόρων μετά τη μορφοποίησή του με τη βοήθεια καλουπιού, από τις δυνάμεις συνοχής των λεπτομερών συστατικών του, την αντοχή των αδρανών του και το περιεχόμενο σε υγρασία κατά τη διάρκεια της δοκιμής.
Η πυκνότητα του εδάφους είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την αντοχή του. Επομένως, όπως και για τον προσδιορισμό της

πυκνότητας είναι αδύνατο να βρεθεί μία ακριβής τιμή, ομοίως για τη μηχανική αντοχή ενός εδάφους είναι αδύνατο να γίνει πρόγνωση μίας τιμής αν δεν προηγηθεί η δοκιμή σε συγκεκριμένο τύπο δομικού προϊόντος ή εφαρμογής (Πίνακας 8).

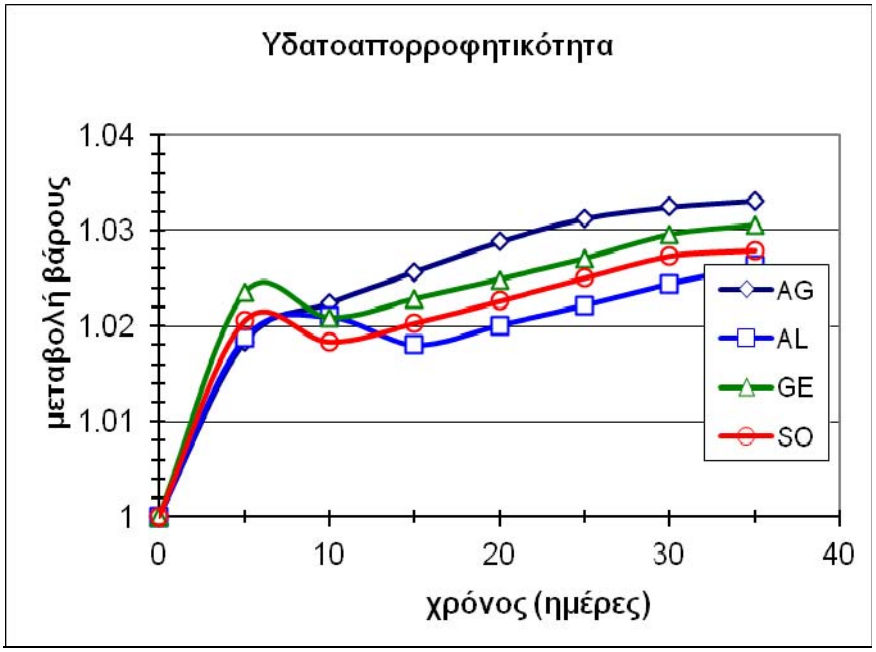
Πίνακας 8. Μηχανική αντοχή σε θλίψη εδαφών, κατά MOPT (1992)

Είδος σταθεροποίησης		**Rammed earth (εγκιβωτισμένο αργιλοσκυρόδεμα) (N/mm^2)**	**Ωμόπλινθος (N/mm^2)**
Μη σταθεροποιημένο	Χαμηλή αντοχή	0.6	0.75
	Ενδιάμεση αντοχή	1.2	1.5
	Υψηλή αντοχή	1.8	2.25

Σύμφωνα με τις τιμές αντοχών κατά MOPT (1992) για ένα μορφοποιημένο σε δοκίμιο φυσικό έδαφος, τα δείγματα AG, AL1, GER, PL, SOU μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ωμόπλινθων (adobe) και για την εφαρμογή rammed earth ενδιάμεσων και υψηλών μηχανικών αντοχών.

3.5 Υδατοαπορροφητικότητα

Η τάση των δοκιμίων των δειγμάτων AG, AL1, GER, SOU να απορροφούν νερό παρουσιάζεται στις καμπύλες απορρόφησης του σχήματος 7 όπου απεικονίζεται η μεταβολή βάρους τους σε διάστημα κάθε φορά 5 ημερών. Κατά τη διάρκεια των 5 πρώτων ημερών όλα τα δείγματα απορροφούν περίπου το ίδιο ποσό υγρασίας. Τις επόμενες 5-10 ημέρες όλα εμφανίζουν μία απώλεια βάρους και κατόπιν συνεχίζουν να απορροφούν υγρασία με ένα παρόμοιο ρυθμό μέχρι περίπου κορεσμού τους σε χρονικό διάστημα 35 ημερών.



Σχήμα 7. Καμπύλες υδατοαπορρόφησης των 4 αργιλούχων σχηματισμών AG, AL1, GER, SOU σε περιβάλλον σχετικής υγρασίας 100% όπως προκύπτουν από την ένωση των σημείων μεταβολής βάρους ανά 5 μέρες για κάθε δείγμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4° – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

4.1 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκαν ως προς τα βασικά ποιοτικά τους χαρακτηριστικά (εδαφολογικές ιδιότητες, ορυκτολογικός χαρακτήρας, μηχανικές ιδιότητες), με τη βοήθεια soil mechanics (μηχανικής εδαφών), 10 αργιλούχοι σχηματισμοί, πετρώματα από τη Δυτική Κρήτη και διερευνήθηκε η δυνατότητα χρήσης τους ως δομικά προϊόντα σε δομικές οικολογικές εφαρμογές βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής.

Τα κύρια ορυκτολογικά συστατικά των μελετώμενων εδαφών είναι χαλαζίας, ιλλίτης, μοσχοβίτης, χλωρίτης και ασβεστίτης, με ορισμένα σιδηρούχα ορυκτά, αστρίους και ίχνη γύψου.

Από τα μελετημένα εδάφη τα AL2, PAT, SPH2, GER, PL έχουν τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε αργιλικά ορυκτά από 27 – 45 % τα οποία είναι κυρίως αργιλοπυριτικά άλατα και λιγότερο διογκούμενοι άργιλοι (όπως πχ. ο μοντμοριλλονίτης στην περίπτωση του δείγματος SPH1).

Τα περισσότερα από τα δείγματα, εκτός από το δείγμα AG, AL2 και KAM, παρουσιάζουν μια ικανοποιητική κοκκομετρική διαβάθμιση και πλαστικότητα, με τιμές δείκτη πλαστικότητας PI μεταξύ 9-20, τα οποία είναι σύμφωνα με τις προδιαγραφές IETcc για δυνητικές χρήσεις τους.

Σύμφωνα με το αμερικάνικο σύστημα ταξινόμησης – ονοματολογίας αργίλων USDA τα δείγματα θα μπορούσαν να ταξινομηθούν σε ιλυώδεις αργίλους (δείγματα AL1, SPH2, GER, PL), αργιλούχοι άμμοι (δείγμα KAM), ιλυώδεις άμμοι (δείγματα AG, AL2), αργιλώδεις ιλείς (δείγμα PAT) και αμμώδης ιλείς (δείγμα SPH1).

Η αντοχή σε θλίψη μορφοποιημένων κυβικών δοκιμίων των δειγμάτων κυμάνθηκε από 0.4 - 3.7 MPa και ήταν διαφορετική για κάθε έδαφος εξαιτίας των διαφορετικών ποιοτικών τους χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων.

Οι σημαντικότερες εδαφολογικές ιδιότητες που επηρεάζουν την αντοχή σε θλίψη μορφοποιημένου δείγματος εδάφους είναι η ορυκτολογική σύνθεση, η κοκκομετρική διαβάθμιση και η πλαστικότητα.

Συγκεκριμένα το δείγμα από τη Σούδα Ν.Χανίων παρουσίασε την υψηλότερη τιμή αντοχής σε θλίψη πιθανά κυρίως εξαιτίας των κατάλληλων αναλογιών άμμου – ιλύος – αργίλου των βασικών συστατικών του.

Η περιεκτικότητα σε άμμο και η αναλογία ιλύς/άργιλος φαίνεται να είναι πολύ σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την τελική μηχανική συμπεριφορά των μορφοποιημένων δοκιμίων των εδαφικών πρώτων υλών. Σχετικά με την κοκκομετρία τους υπάρχουν 3 κατηγορίες εδαφών [ταξινόμηση Burroughs, (2001)]:

a) Ευνοϊκή κατηγορία: άργιλος/ιλύ 21-35 % ή άμμος 30-65 % ή αμμοχάλικο 3-5 %.
b) Δυσμενής κατηγορία: άργιλος/ιλύ < 21 ή > 45 % ή άμμος > 75 % ή αμμοχάλικο < 3%.
c) Ικανοποιητική κατηγορία: άργιλος / ιλύ 36-45 % ή άμμος 66-75 % ή αμμοχάλικο 3-12 %.

Τα δείγματα από την Αγιά και τον Αλικιανό (AL2) περιέχουν άμμο > 60% και παρουσιάζουν χαμηλό PI και χαμηλή αντοχή σε θλίψη.

Η χαμηλή περιεκτικότητα σε άργιλο <10% όπως προσδιορίστηκε στα δείγματα AL2 και SP1 δικαιολογεί τις χαμηλές τιμές αντοχής στους σε θλίψη.

Ο δείκτης πλαστικότητας και η μηχανική αντοχή σε θλίψη των εδαφών με χαμηλό έως ενδιάμεσο περιεχόμενο σε άμμο εξαρτώνται από μία επαρκή αναλογία ιλύς/άργιλος, μία βέλτιστη κοκκομετρική διαβάθμιση και ένα κατάλληλο ποσοστό αργίλου όπως φαίνεται στα δείγματα GER με 21% άμμο, άργιλο/ιλύ 37/42%, PI 18.7, θλιπτική αντοχή 2 MPa και PL με 19% άμμο, άργιλο/ιλύ 34/47%, PI 23.8 και θλιπτική αντοχή 2.55 Mpa.

Τα μίγματα εδάφους – άχυρου των δειγμάτων από Αλικιανό (AL1) και Γεράνι (GER) εμφανίζουν τις χαμηλότερες τιμές αντοχής σε θλίψη αλλά κατά τη διάρκεια της δοκιμής και τη στιγμή που φθάνουν στη μέγιστη τιμή αντοχής τους αμέσως πριν τη διάρρηξη συμπεριφέρονται με ελαστικό τρόπο και διατηρώντας τη συνοχή τους χωρίς να σπάσουν απότομα.

Γενικά η προσθήκη άχυρου, παρά το γεγονός ότι μειώνει την τιμή αντοχής των δοκιμίων, βελτιώνει την ελαστική συμπεριφορά τους και κατ’επέκταση δυνητικά και την αντισεισμικότητα μίας πραγματικής κατασκευής από τέτοια δομικά υλικά. Φυσικά στην περίπτωση μιας κατασκευής συμβάλουν και άλλοι παράμετροι (πχ. στατικοί) που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την συμπεριφορά της σε περίπτωση σεισμού.

Με βάση την ορυκτολογική τους ανάλυση τα δείγματα από Γεράνι και Πλάτανο είναι ασβεστιτικές μάργες (calcium carbonate mudstones, marls) που κυρίως συνίστανται από ασβεστίτη και διαφορετικά ποσά χαλαζία, 15% και 2.8% αντίστοιχα, τα οποία συνδυάζονται με διαφορετικά ποσά ιλλίτη.

Κατά συνέπεια η παρουσία φυλλοπυριτικών ορυκτών σε συνδυασμό με το χαλαζία είναι η αιτία για την παρόμοια τεχνική τους συμπεριφορά.
Παρόμοια εδαφολογικά χαρακτηριστικά παρουσιάζουν επίσης τα δείγματα Αλικιανός 1 με άμμο 23%, άργιλο/ιλύ 45/32%, PI. 11.47, θλιπτική αντοχή 2.01 Mpa και Σούδα με 57% άμμο, άργιλο/ιλύ 17-26%, PI 11.87 και θλιπτική αντοχή 3.69 Mpa.
Τα δείγματα Αλικιανός 1 και Σούδα εμφανίζουν παρόμοια φυσικά χαρακτηριστικά και παρόμοιο ορυκτολογικό περιεχόμενο σε χαλαζία και ιλλίτη.

Η τεχνική συμπεριφορά των δειγμάτων μεταβάλλεται με την προσθήκη υδρασβέστου όχι προς την κατεύθυνση της βελτίωσης αυτής αλλά ανάλογα με την κοκκομετρική τους διαβάθμιση και τα ποσοστά άμμου, ιλύος, αργίλου. Ωστόσο απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση και με δοκιμές σε βάθος χρόνου μετά την παρασκευή των δοκιμίων αλλά και συσχετίζοντας και τα υπόλοιπα ποιοτικά και φυσικά χαρακτηριστικά των αργιλούχων σχηματισμών.

Σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές IETcc (Πίνακας 5), τα εδαφικά υλικά Αλικιανός 1, Πατελάρι, Σπηλιά, Γεράνι, Πλάτανος εκτός των εδαφών από Αγιά και Αλικιανός 2, προτείνονται για εφαρμογές rammed earth.
Επίσης τα εδαφικά δείγματα από Πατελάρι και Σπηλιά με την προσθήκη ενός χαμηλού ποσοστού άμμου ή/και υδρασβέστου θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως φυσικά κονιάματα αξιοποιώντας και τους διαφορετικούς χρωματικούς τους τόνους.
Στον πίνακα 9 (Jiménez Delgado et al., 2006) συνοψίζονται οι δυνατότητες χρήσης των αργιλούχων σχηματισμών Δυτικής Κρήτης για δομικά προϊόντα και οικολογικές εφαρμογές δόμησης

Πίνακας 9. Τεχνικά χαρακτηριστικά και εκτίμηση δομικών εφαρμογών των εδαφικών υλικών Δυτ.Κρήτης με βάση διεθνείς προδιαγραφές (Jiménez Delgado and Cañas Guerrero 2006)

	Ταξινόμηση εδαφών (<2 mm)		**Ικανοποιητική πλαστικότητα**	**Αντοχή σ (MPa)**	**Κατηγορίες**	**Εφαρμογές**
Δείγμα	**Ιλύς + άργιλος (%)**	**Άμμος (%)**				
AG	21	79	Χαμηλή, IP=4.5, LL ≈25	1.8	Ευνοική	rammed earth, ωμόπλινοι, συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι
AL1	77	23	Μέτρια, IP=11.5, LL >25	2	Ευνοϊκή	ενισχυμένο rammed earth, συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι ή μπλογκς
AL2	37 άργιλος<10%	63	Ανεπαρκής IP=1.8, LL ≈ PL	0.4	Μη ευνοϊκή, περαιτέρω έρευνα [a]	σταθεροποιημένο rammed earth μετά από βελτίωση
PAT	91	9	υψηλή, IP=20 LL >25	1	Ικανοποιητική, περαιτέρω έρευνα [b]	Φυσικό επίχρυσμα. Rammed earth, ωμόπλινθοι, συμπιεσμένα μπλογκς μετά από βελτίωση
SPH1	65 clay <10%	35	Μέτρια, IP=11.4 LL >25	0.5	Μη ευνοϊκή, περεταίρω έρευνα [a]	Φυσικό επίχρισμα, σταθεροποιημένο rammed earth μετά από βελτίωση

SPH2	95	5	Χαμηλή, IP=9.2, LL >40	1.1	Ικανοποιητική, περαιτέρω έρευνα [b]	Φυσικό επίχρισμα. rammed earth, συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι μετά από βελτίωση
GER	79	21	Υψηλή, IP=18.7 LL >40	2	Ικανοποιητική, περαιτέρω έρευνα [b]	Φυσικό επίχρυσμα. Rammed earth, συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι, adobe μετά από βελτίωση
PL	81	19	Υψηλή, IP=23.8, LL >40	2.55	Ικανοποιητική, περαιτέρω έρευνα [b]	Φυσικό επίχρυσμα, mud rammed earth. Ωμόπλινθοι υψηλής αντοχής μετά από βελτίωση
SOU	43	57	Μέτρια, IP=11.9, LL >25	3.69	Ευνοϊκή	Ωμόπλινθοι υψηλής αντοχής, ενισχυμένο rammed earth, συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι
KAM	41	59	Χαμηλή, IP=6.7, LL >25	1.08	Ευνοϊκή	Ενισχυμένο και σταθεροποιημένο rammed earth,

						συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι

a. Χρήση προσθέτων για περισσότερη σταθερότητα και ενίσχυση εξαιτίας της ανεπαρκούς πλαστικότητας/ χαμηλής αντοχής.
b. Πολύ καλή, διερεύνηση βελτίωσης διαβάθμισης και αντοχής.

4.2. Συζήτηση – Προτάσεις

Πάνω στην προκείμενη πρωταρχική μελέτη αργιλούχων σχηματισμών Δυτ. Κρήτης ως προς την καταλληλότητά τους για δομικά υλικά ή εφαρογές οικολογικής δόμησης, θα πρέπει να προστεθούν και επιπλέον αναλύσεις με τη βοήθεια των οποίων να διερευνηθεί περαιτέρω ο χαρακτήρας και οι ιδιότητες των συγκεκριμένων υλικών ώστε να οριοθετηθούν οι καλύτερες δυνατές δομικές εφαρμογές. Για παράδειγμα θα πρέπει να μελετηθεί ο συντελεστής διόγκωσης και συρρίκνωσης, η θερμική αγωγιμότητα, η συμπεριφορά μορφοποιημένων δοκιμίων σε διαδοχικούς κύκλους θέρμανσης – ψύξης, η αντοχή σε διάτμηση ωμοπλίνθων, η υδατοπερατότητα κλπ.

Η χρήση τέτοιων υλικών σε μια εποχή κλιματικών αλλαγών αλλά και βιοποριστικών αναγκών προτείνεται ως μία λύση προστασίας του περιβάλλοντος αλλά και αειφορίας.

Στην Κρητική ύπαιθρο ήδη έχουν ξεκινήσει εφαρμογές δόμησης κατασκευών με τα υλικά αυτά, ποικίλης χρηστικότητας.
θα μπορούσαν επιπλέον να γίνουν τα εξής :

- Να εντοπιστούν κατασκευές με αργιλούχα δομικά υλικά και να καταγραφεί το είδος και η τυπολογία αυτών ώστε να αξιοποιηθούν οι πληροφορίες γύρω από την παλιά τεχνοτροπία δόμησης των ελληνικών κατοικιών.
- Να μελετηθούν και να αξιολογηθούν διάφορα αργιλούχα εδάφη από την Κρήτη ως προς τα ποιοτικά χαρακτηριστικά τους και μετά από εργαστηριακές δοκιμές ανάμιξής τους με άλλα παραδοσιακά

υλικά και έλεγχο της τεχνικής συμπεριφοράς των δομικών προϊόντων να προταθούν τα κατάλληλα μίγματα παραγωγής ωμοπλίνθων ή κονιαμάτων για την εφαρμογή τους σε σύγχρονες βιοκλιματικές κατασκευές.

- Να καθοριστεί μία μεθοδολογία ελέγχου και χειρισμού αυτών των υλικών προς την κατεύθυνση της τυποποίησης ώστε να είναι δυνατή η αξιοποίησή της.
- Να δοκιμαστούν τα προτεινόμενα δομικά αργιλούχα προϊόντα ως προς την ανθεκτικότητα και συμπεριφορά τους σε πραγματικές συνθήκες περιβάλλοντος μετέχοντας ως δομικά στοιχεία σε μία ανεγειρόμενη πειραματική κατασκευή.
- Να προωθηθεί η κατοχύρωση αργιλούχων δομικών υλικών μέσα από τη νομοθετική διαμόρφωση του ΕΑΚ δόμησης ούτως ώστε να προαχθεί ένας νέος πολεοδομικός σχεδιασμός περισσότερο φυσικός και ανθρώπινος, με σεβασμό προς το περιβάλλον.

Στα πλαίσια της ανάπτυξης και ανάπλασης της ελληνικής υπαίθρου η δυνατότητα χρησιμοποίησης των επιτόπιων διαθέσιμων υλικών είναι ιδιαίτερα σημαντική τόσο για τους λόγους διατήρησης της φυσικής ομορφιάς του τοπίου και του περιβάλλοντος όσο και για την εξεύρεση οικονομικότερων βιώσιμων λύσεων για την κάλυψη των αναγκών στέγασης που εμφανίζονται ιδιαίτερα σε περιοχές απομακρυσμένες ή φτωχές οικονομικά οι οποίες ενδεχομένως χρησιμοποιούν κάποια μεμονωμένα προγράμματα αγροτουρισμού και υποτυπώδη γεωργία ή κτηνοτροφία για τις βασικές βιοποριστικές τους ανάγκες ή για τη δόμηση αγροτικών περιοχών που έχουν πληγεί από κάποια φυσική καταστροφή.

Περαιτέρω, η εδραίωσή της αργίλου σα δομικό υλικό στην Ελλάδα θα επιτευχθεί σταδιακά σαν ένα φυσικό επακόλουθο της ευρύτερης ανά τον κόσμο εδραίωσής της μέσα στα πλαίσια της παγκόσμιας μεταβολής της αρχιτεκτονικής αντίληψης δόμησης.

Βιβλιογραφία

Αγιουτάντης Ζ., (2002), Στοιχεία Γεωμηχανικής - Μηχανική Πετρωμάτων, Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα.

ASTM D 4318-00 Standard test methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils

Bain, D. C. 2007. Soil clay minerals and their relevance to enviromental change. Macla 7.XXVI Reunion de la Sociedad Espanola de Mineralogia.

Burroughs, Van Stephan. 2001. Quantitative criteria for the selection and stabilisation of soils for rammed earth wall construction. PhD. University of New South Wales.

Creutzburg, N., Drooger, C.W., Meulenkamp, J.E. et al. 1977. General Geologic Map of Crete 1:200.000. Institute of Geological and Mining Research (IGME),Athens.

Delgado-Jiménez, M. Carmen and Cañas Guerrero, I. 2006. Earth building in Spain. Construction and Building Materials ,Volume 20, 9, P. 679-690

Delgado Jimenez M. Carmen *, Ignacio Can˜as Guerrero, The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review, Construction and Building Materials 21 (2007) 237–251, Science Direct, Departamento de Construccio´n y Vı´as Rurales, Escuela Te´cnica Superior de Ingenieros Agro´ nomos, Universidad Politecnica de Madrid, Madrid 28040, Spain

Doat P., Hays A., Houben H., Matuk S. & Vitoux F. (CRATerre France), Building with Earth

Κορωναίος Αιμ., Πουλάκος Γ., Τεχνικά Υλικά, Τόμος 1, σελ.82, ΕΜΠ, Αθήνα, 2006.

Κωστάκης Γ., (1988), Γενική Ορυκτολογία, Σημειώσεις Μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Markopoulos Th., Rotonto P., Chrysafaki G., Mousourakis A., 2008. Evaluation of mudstone formations from Crete and their suitability for rammed earth and adobe production, International Scientific Conference SGEM, Conference proceedings 1, 2008

Markopoulos Th., Rotondo P., Pantinakis A., Pantzekos P., Chrisafaki Z., Mousourakis A., Mediterra 2009. 'Measurement of mechanical strength, thermal conductivity and moisture of earth samples from Crete, Greece, containing clay and straw for architectural applications', 1a Conferenza sull' Architettura di terra Mediterraneo, Sardenia 13-16th March 2009, proceedings

Minke, G., *Earth: Construction Handbook.The Building Material Earth In Modern Architecture*, WIT Press, Southampton, 2000.

MOPT. Bases para el diseño y construcción con tapial. Madrid: Centro de Publicaciones Secretaria General Técnica Ministerio de Obras Publicas y Transportes; 1992.

Μπέη Γεωργία, Τοιχοποιία από πηλό: Πειραματική διερεύνηση μηχανικών και φυσικών χαρακτηριστικών δομικών μονάδων και τοίχων από συμπιεσμένες ωμοπλίνθους, διδακτορική διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη 2004

Norton, J., 1997, Building with Earth. A handbook. Second Edition, Intermediate Technology Publications, London, UK.

Papaioannou K., The Greek traditional house, University Press E.M.P., Athens, 2003.

Στειακάκης Ε., (2004), Εργαστηριακές ασκήσεις Τεχνικής γεωλογίας-Εδαφομηχανικής, Εργαστηριακές σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Filippidis D., *Greek traditional Architecture*, Ed. Melissa, Athens, 1991.

Χρηστάρας Β., (2005), Συνοπτική περιγραφή των συνηθέστερων εργαστηριακών δοκιμών Βραχομηχανικής-Εδαφομηχανικής, Εργαστηριακές σημειώσεις, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.

Ιστογραφία

[1]http://www.ecohouses.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=51:art-sustainable-arch&catid=39:kat-faq-manos&Itemid=67

[2] Ηλίας Μεσσήνας, «Το σπίτι-μηχανή και η οικολογική δόμηση», http://www.yvelia.com/amarchitects/publications/images/building_green/building_green907.pdf

[3] P. Doat, A. Hays, H. Houben, S. Matuk & F. Vitoux (CRATerre France), Building with earth, First English Edition 1991, The Mud Village Society, New Delhi, India, http://terre.grenoble.archi.fr/accueil.php.

[4] Βαρουτά – Φλώρου, Η άντληση εμπειρίας από τη φιλοσοφία δόμησης των ιστορικών κτηρίων. http://www.ecodomisi.gr/index.php?option=com_content&task=view&id=20&Itemid=46#_ftnref1

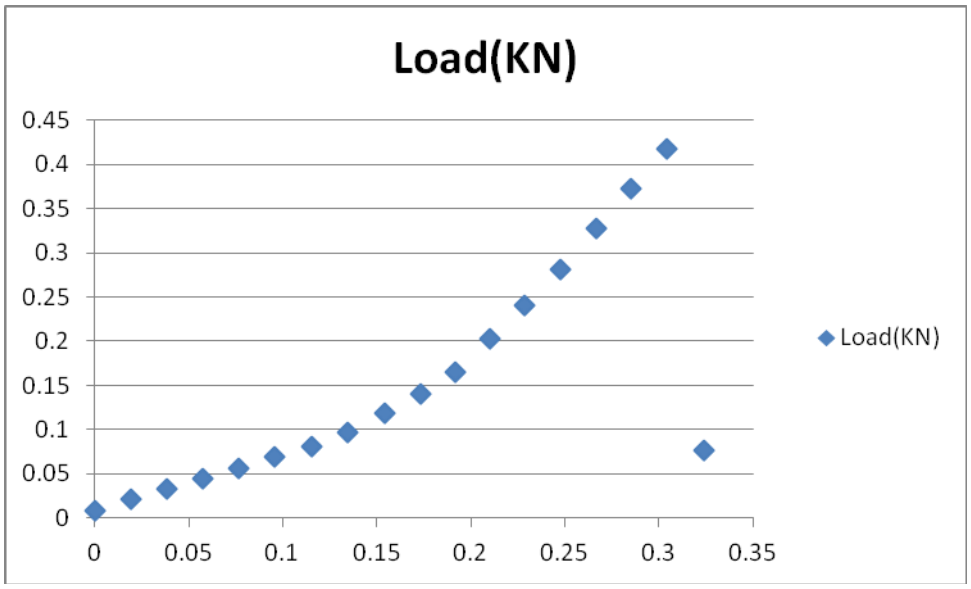
[5] C.Michael Hogan, *Knossos fieldnotes*, Modern Antiquarian (2007),http://www.themodernantiquarian.com/site/10854/knossos.html#fieldnotes

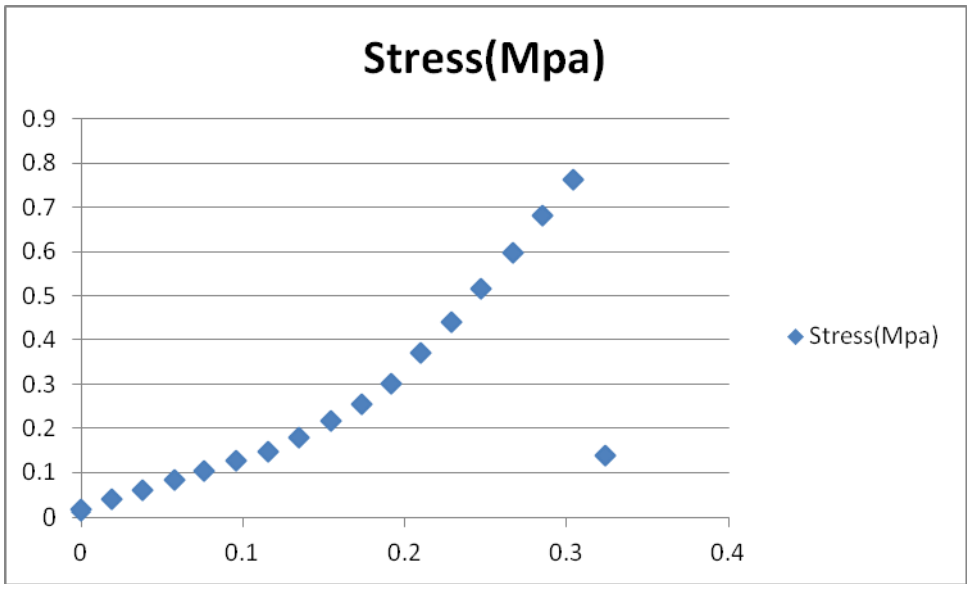
[6] http://pindos.blogspot.com/2008/02/blog-post_24.html, http://www.korestia.gr/index2.html
[7] http://en.wikipedia.org/wiki/Rammed_earth
[8] http://en.wikipedia.org/wiki/Mudbrick
[9] http://en.wikipedia.org/wiki/Adobe
[10]http://www.greenbuilder.com/sourcebook/EarthGuidelines.html#Rammed.
[11] http://www.greenhomebuilding.com/adobe.htm
[12] http://www.kenrockwell.com/nm/buildings/index.htm)
[13] http://www.greenhomebuilding.com/poured_earth.htm
[14]https://www.facebook.com/media/set/?set=a.102804516414730.6215.100000555454253&type=3&l=b777424920https://www.facebook.com/media/set/?set=a.102804516414730.6215.100000555454253&type=3&l=b77742492 0
[15]http://www.cob.gr/index.php?Itemid=120&id=45&option=com_content&view=article&lang=el
[16]http://www.cob.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=128%3Aiantoandlinda&catid=26%3Afpss&Itemid=184&lang=el
[17] http://en.wikipedia.org/wiki/Rammed_earth
[18]http://www.cob.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=41:rammed-earth&catid=27:texnikes&Itemid=134&lang=el
[19] http://en.wikipedia.org/wiki/Light_clay
[20] http://invenio.lib.auth.gr/record/10226/files/gri-2004-402.pdf?version=1
[21]http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/P_CEMENT/ts1.1.htm
[22]http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/P_KONIAMATA/ko1.htm#%CE%91%CE%A3%CE%92%CE%95%CE%A3%CE%A4%CE%9F%CE%A3
[23]http://www.ecohouses.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=50&Itemid=58
[24] http://www.cd3wd.com/cd3wd_40/cd3wd/Practact/KnO-100081_clay_as_a_binder.pdf
[25] http://en.wikipedia.org/wiki/Soil_texture

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

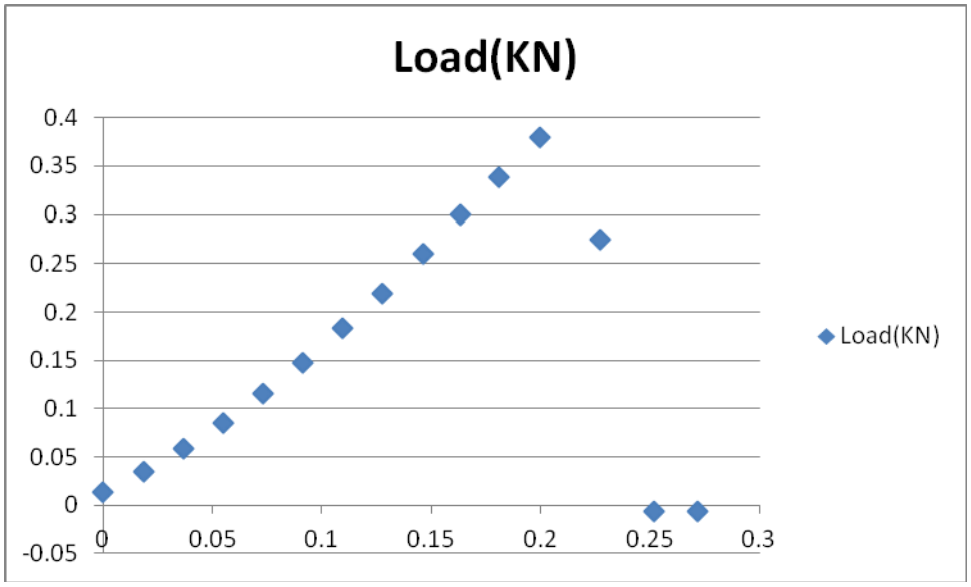
Διαγράμματα αντοχών σε κάμψη των δοκιμίων

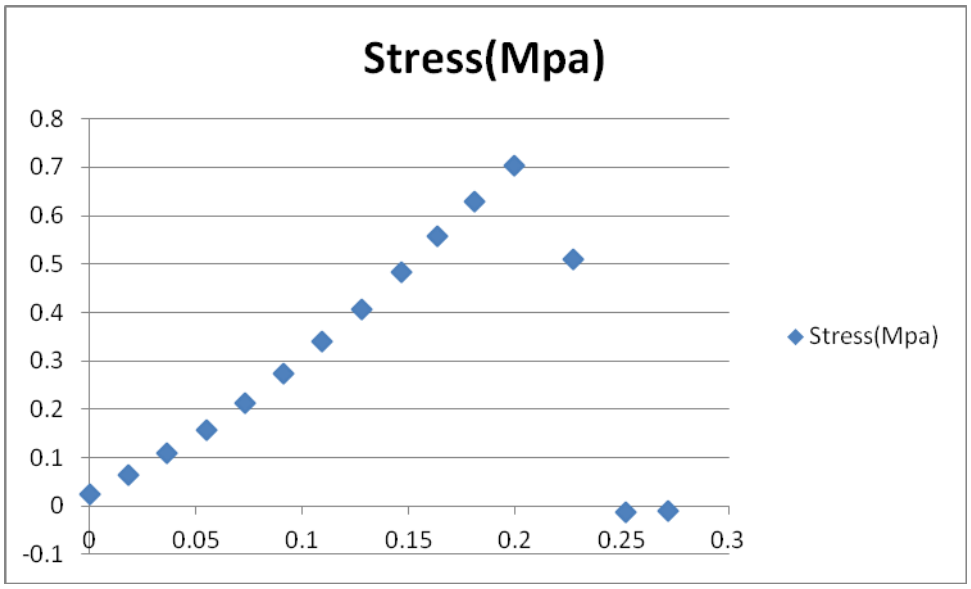
Δείγμα ag_001



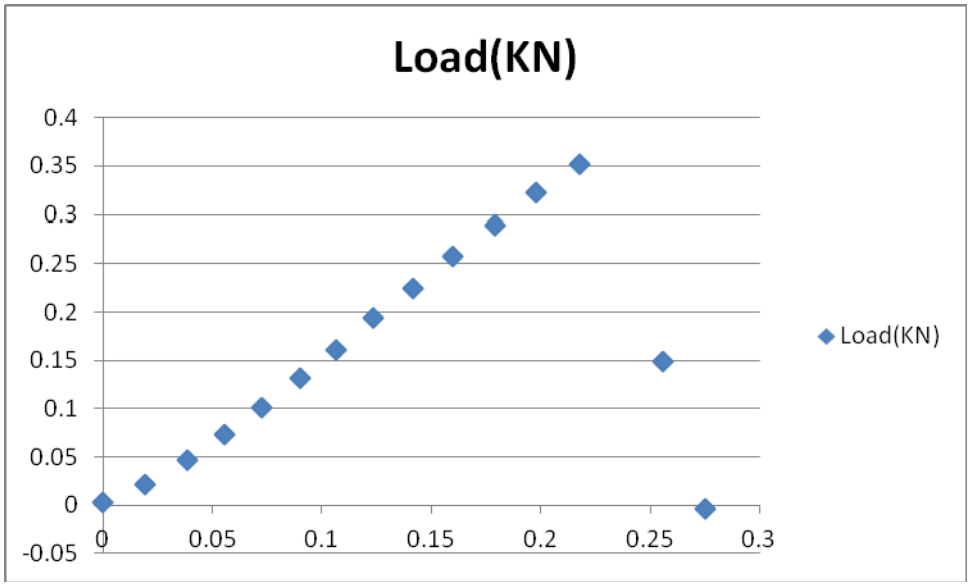


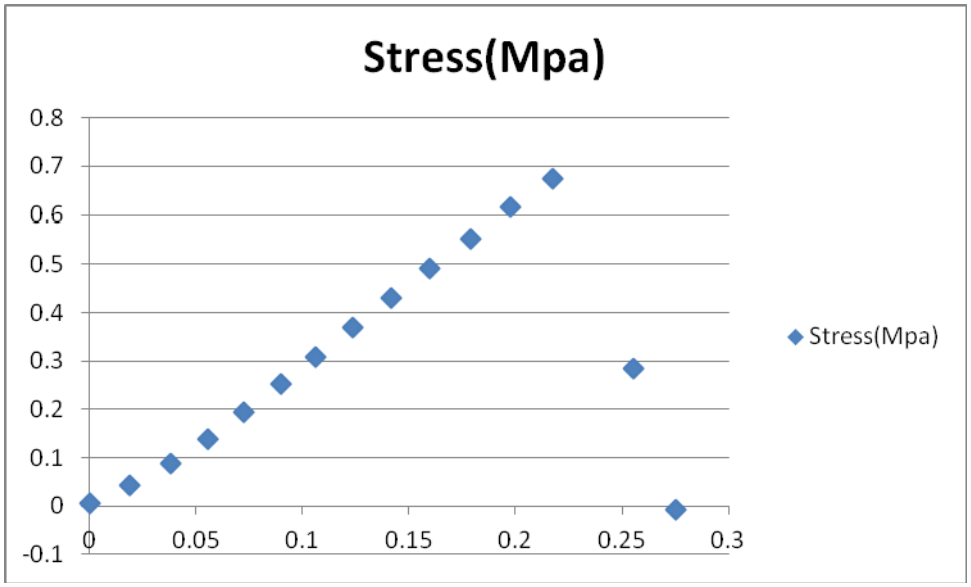
Δείγμα ag_002



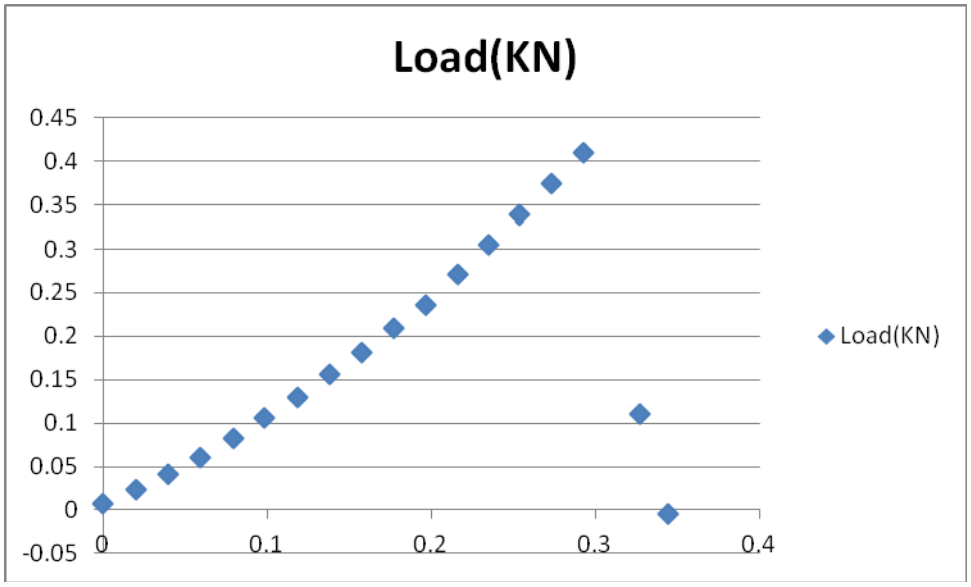


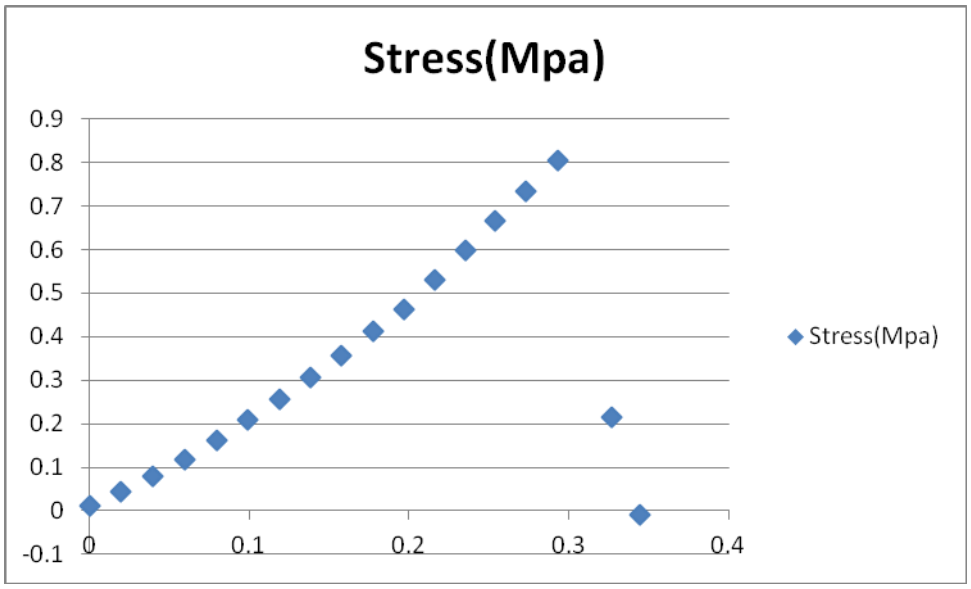
Δείγμα al1_001





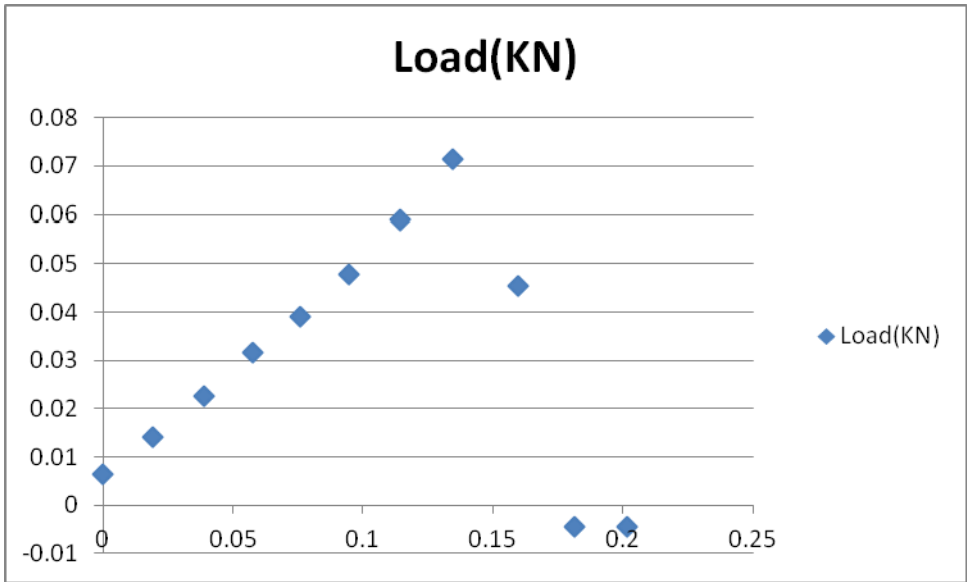
Δείγμα al1_0002

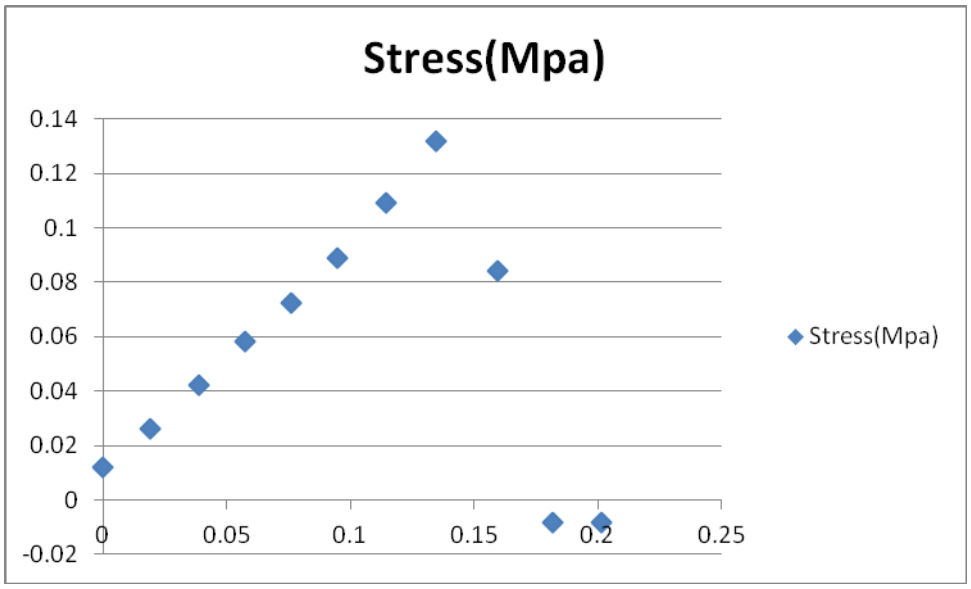




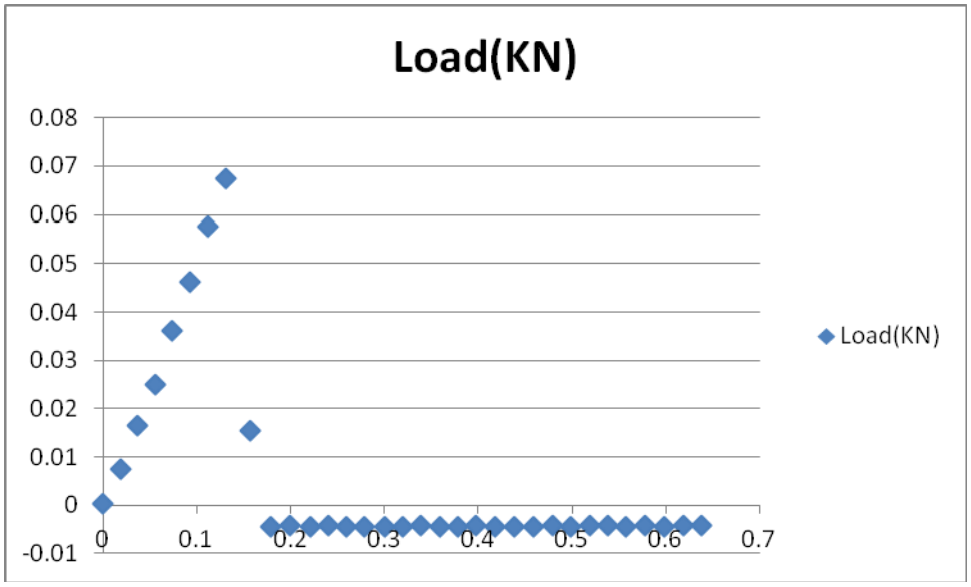
Δείγμα

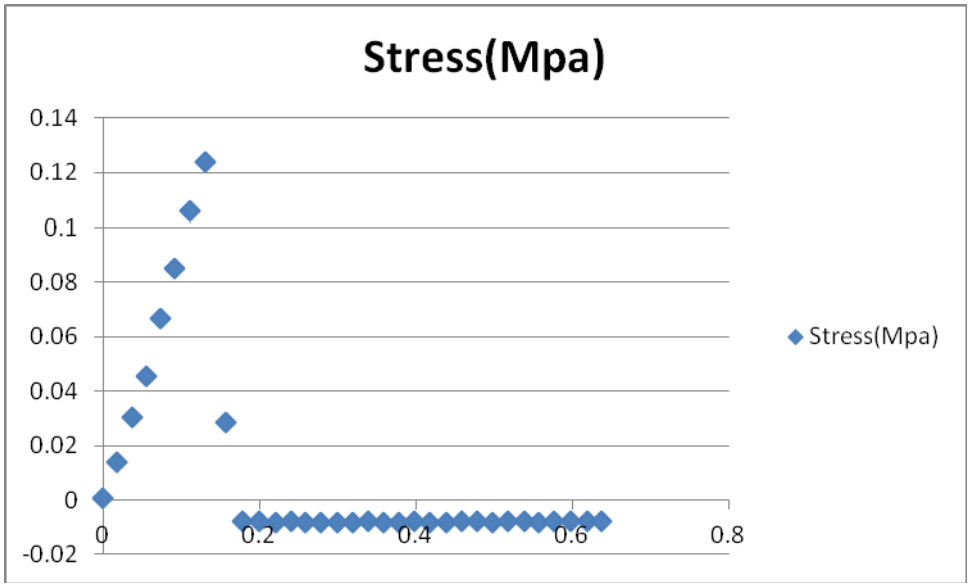
A12_0001



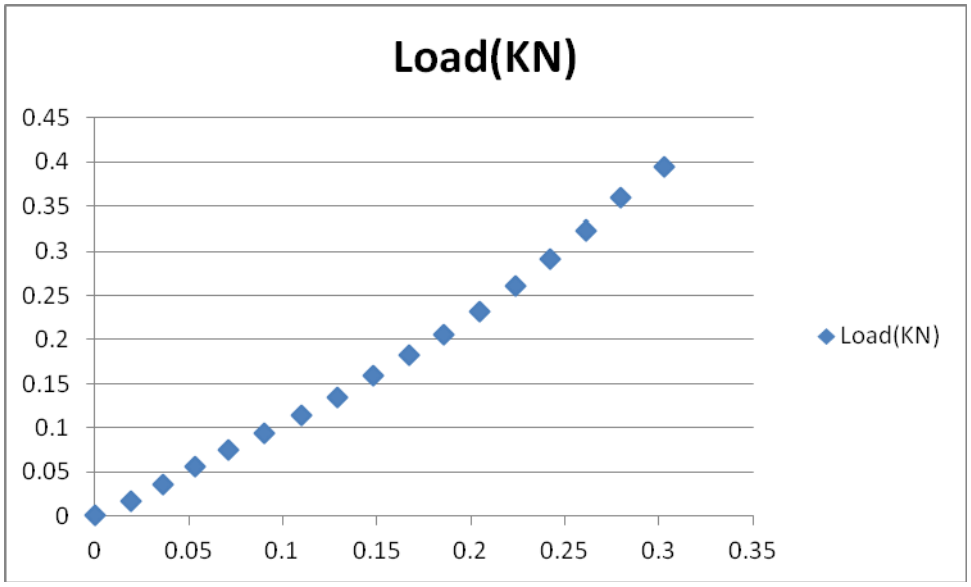


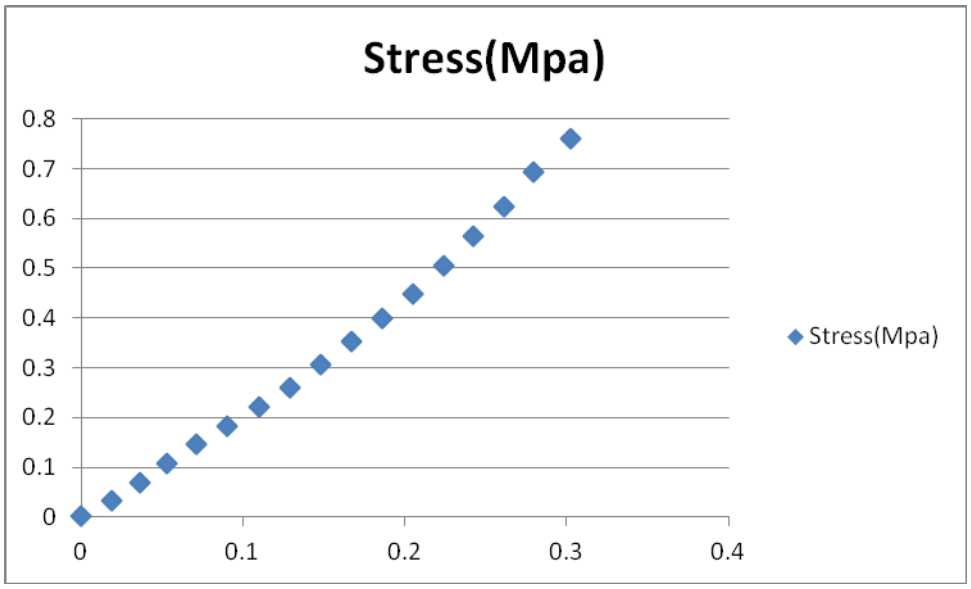
Δείγμα al2_0003



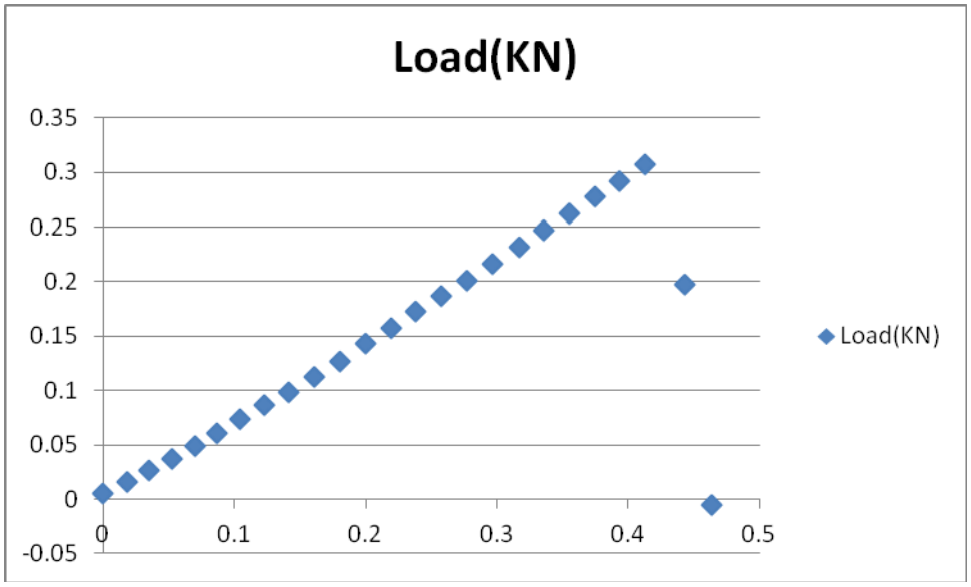


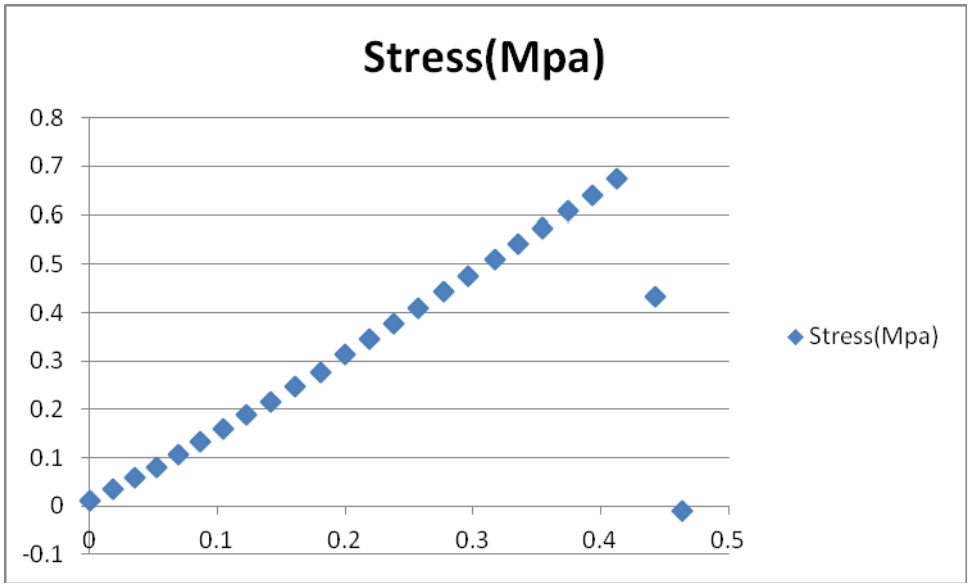
Δείγμα ger_0001



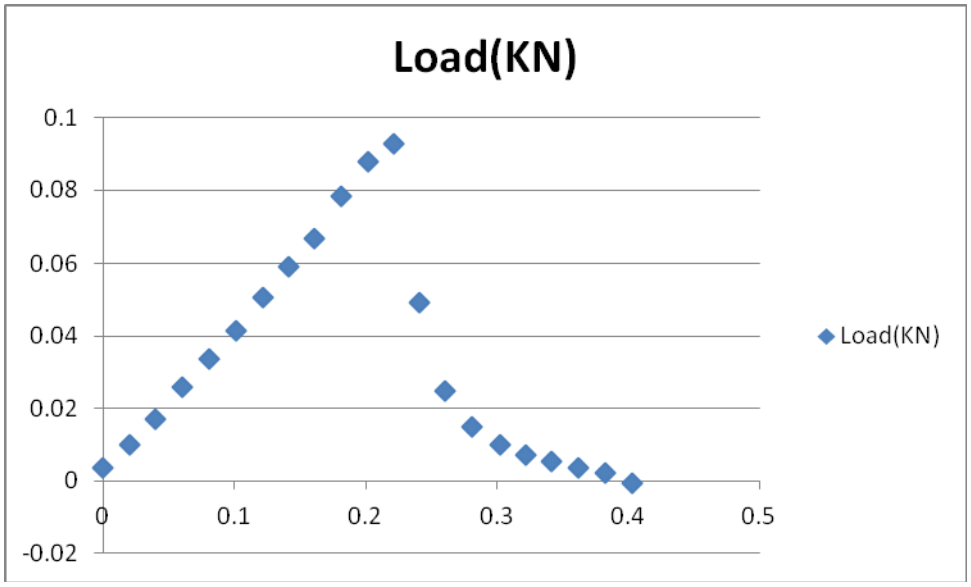


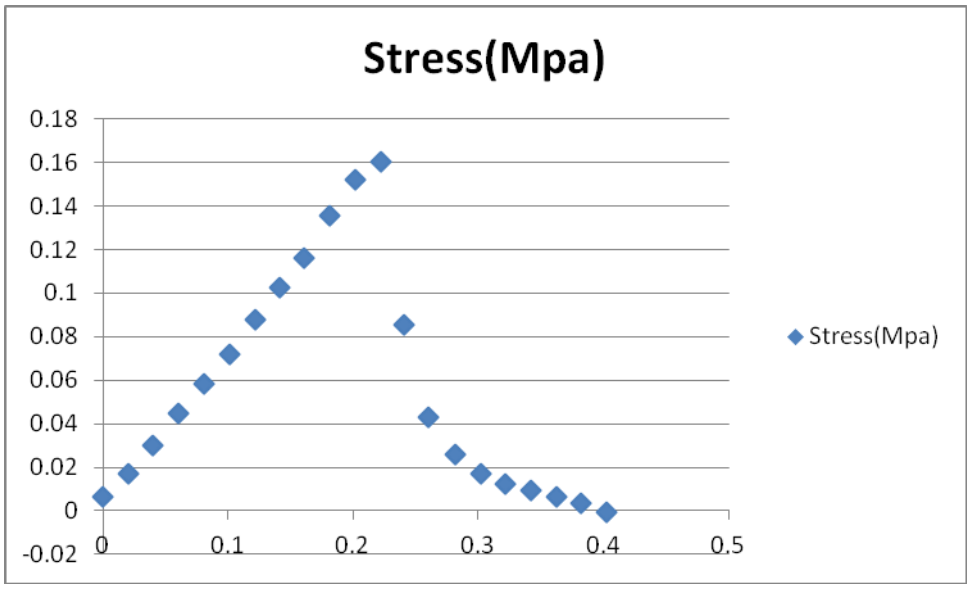
Δείγμα ger_0002



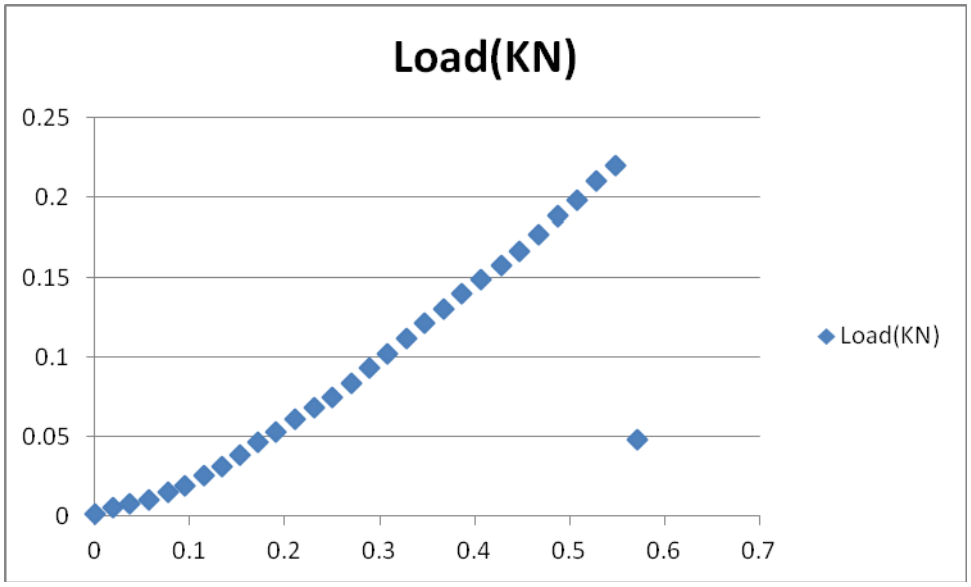


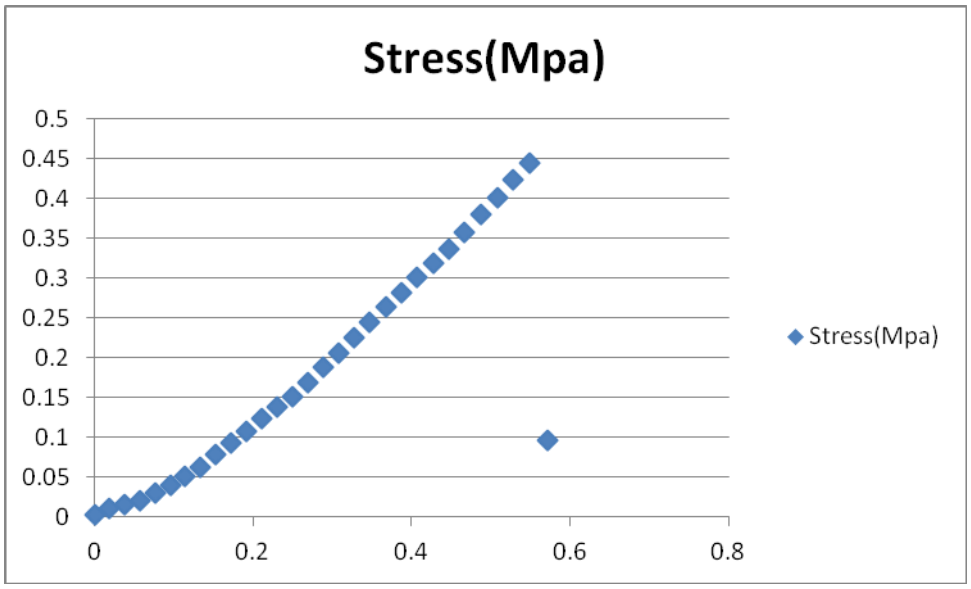
Δείγμα kam_0001



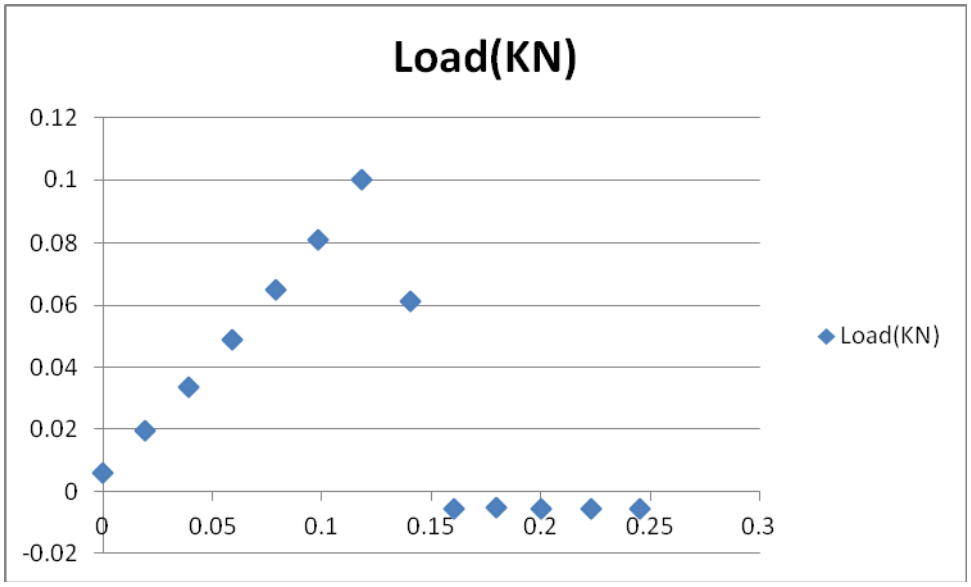


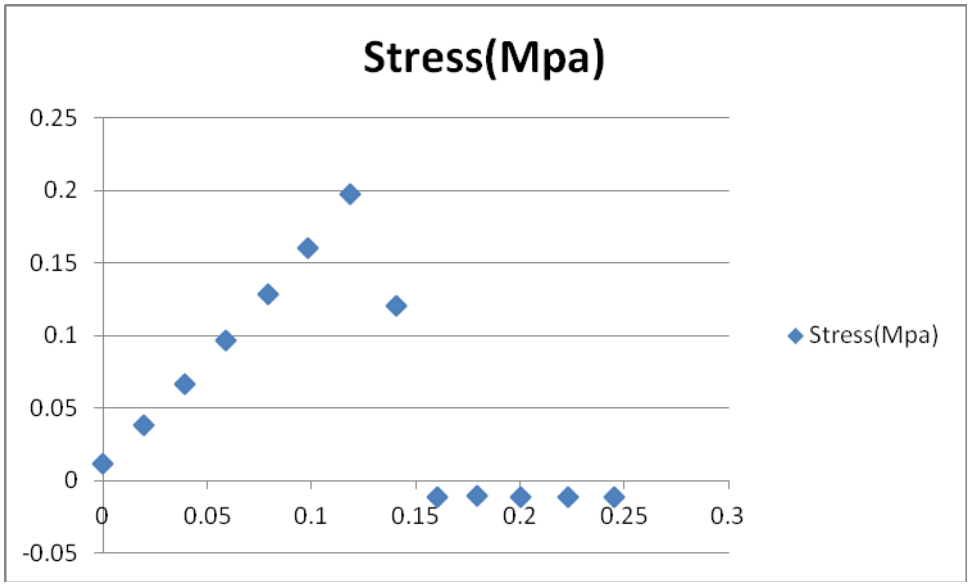
Δείγμα pat_0002



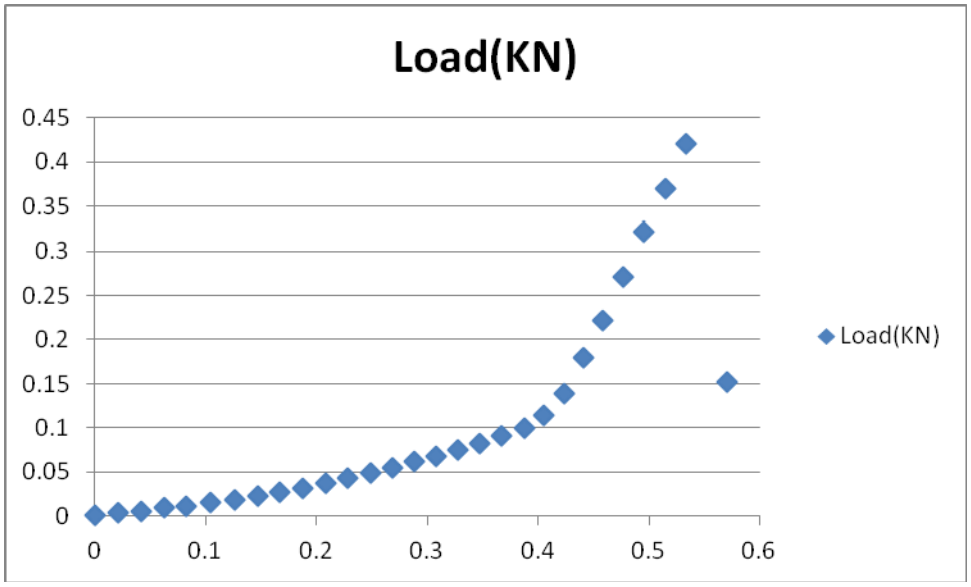


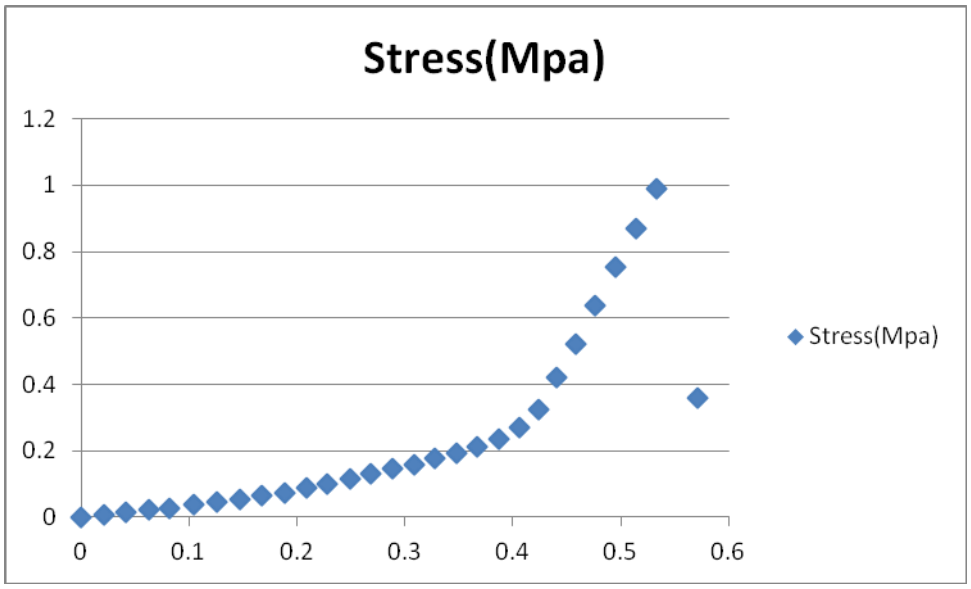
Δείγμα pat_0003



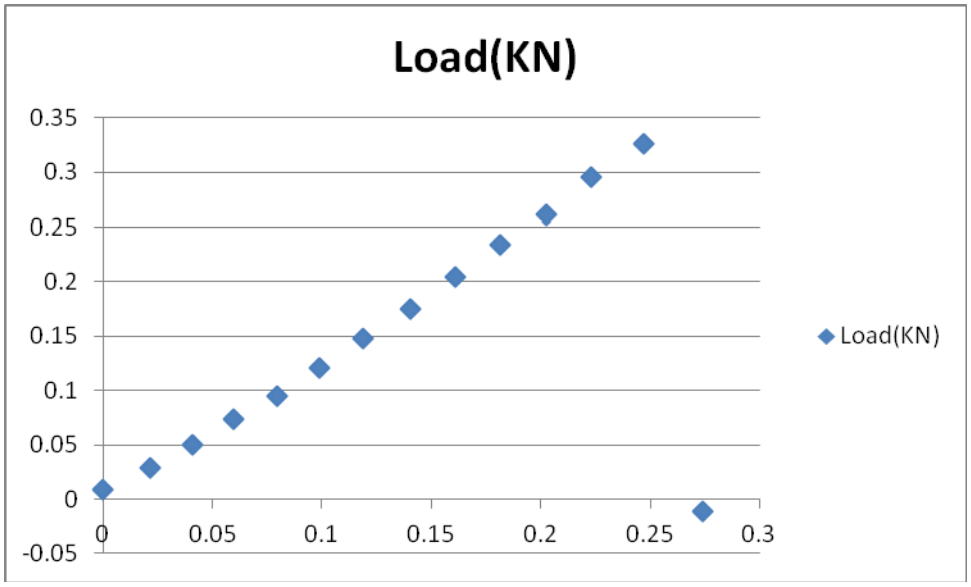


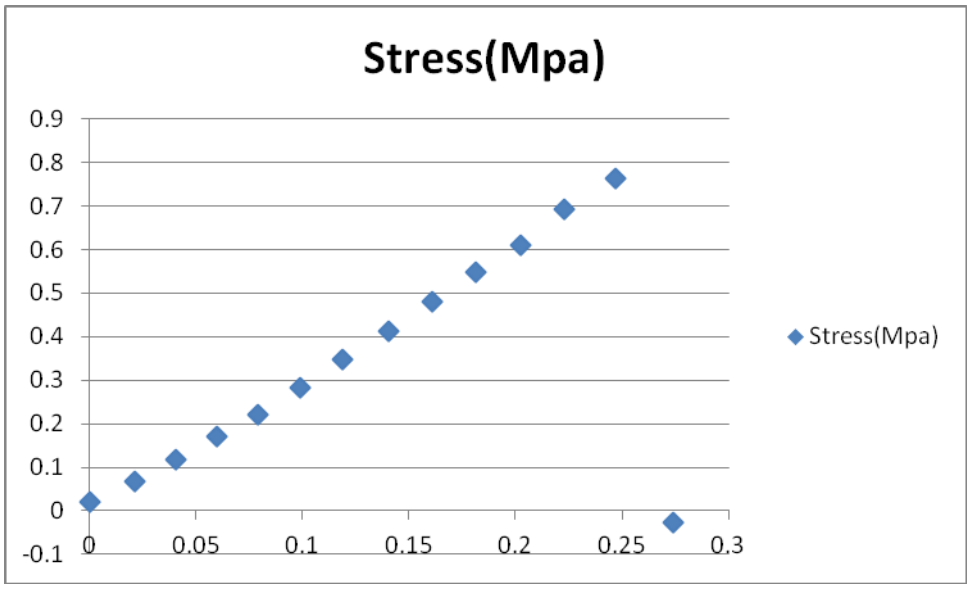
Δείγμα pat_0001



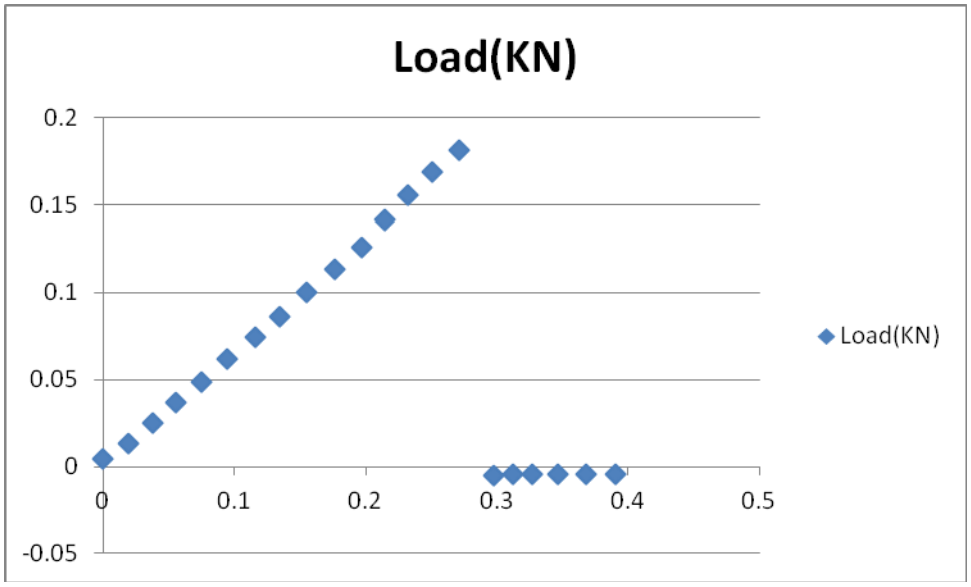


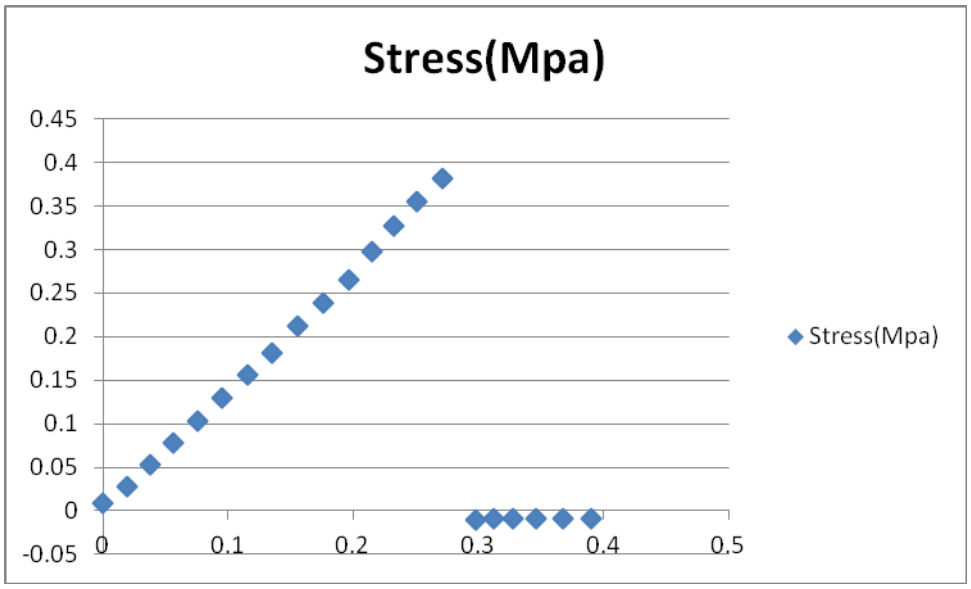
Δείγμα pl_0003



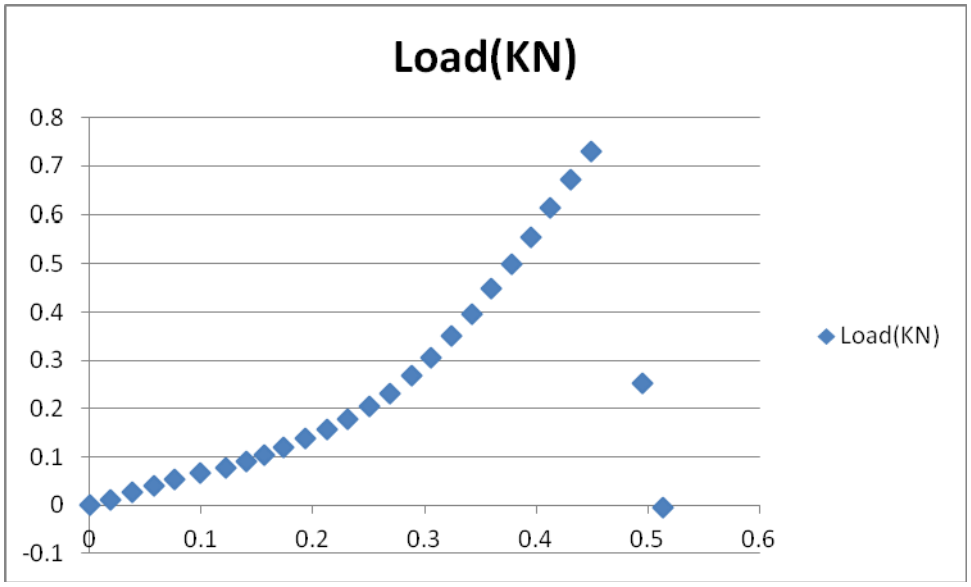


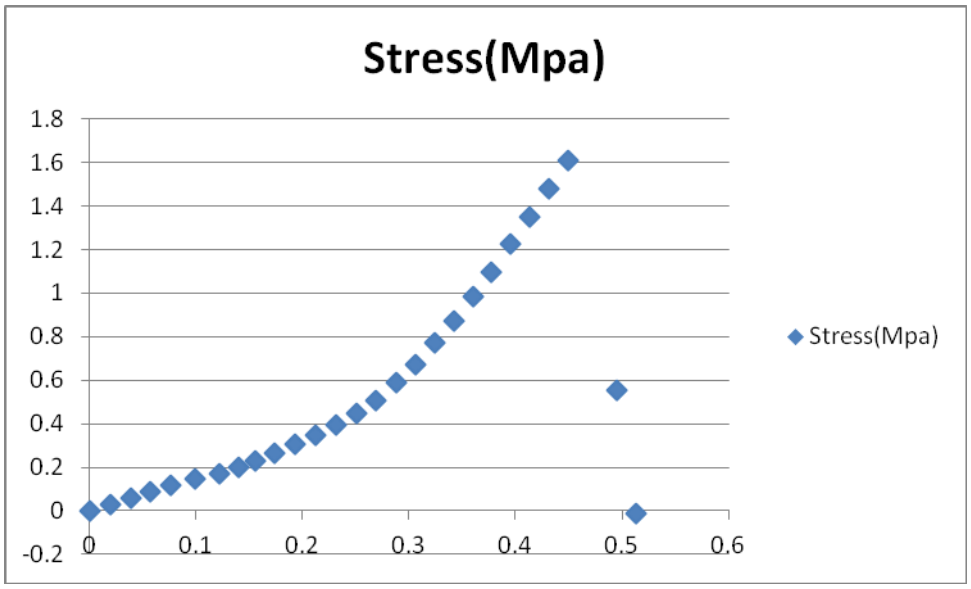
Δείγμα sou1_0003



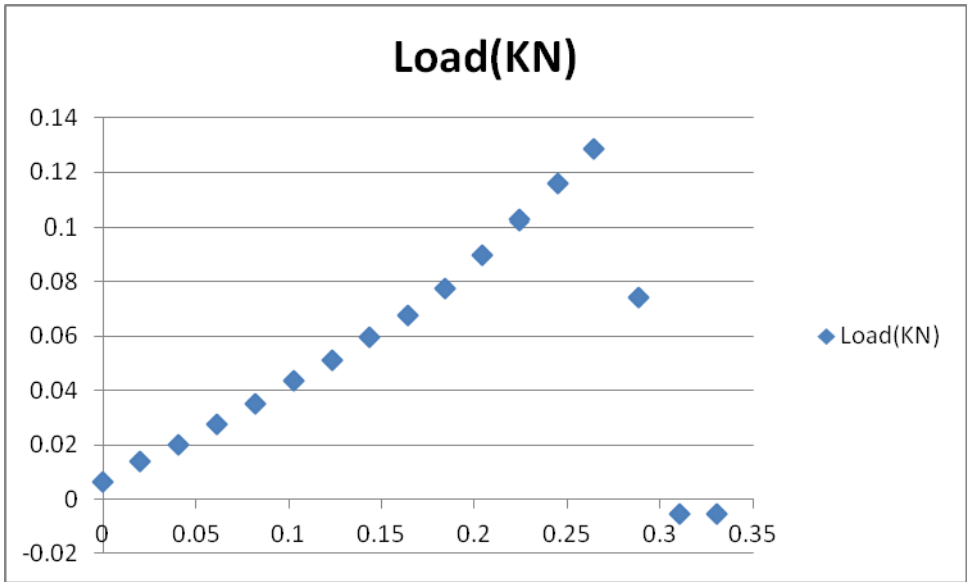


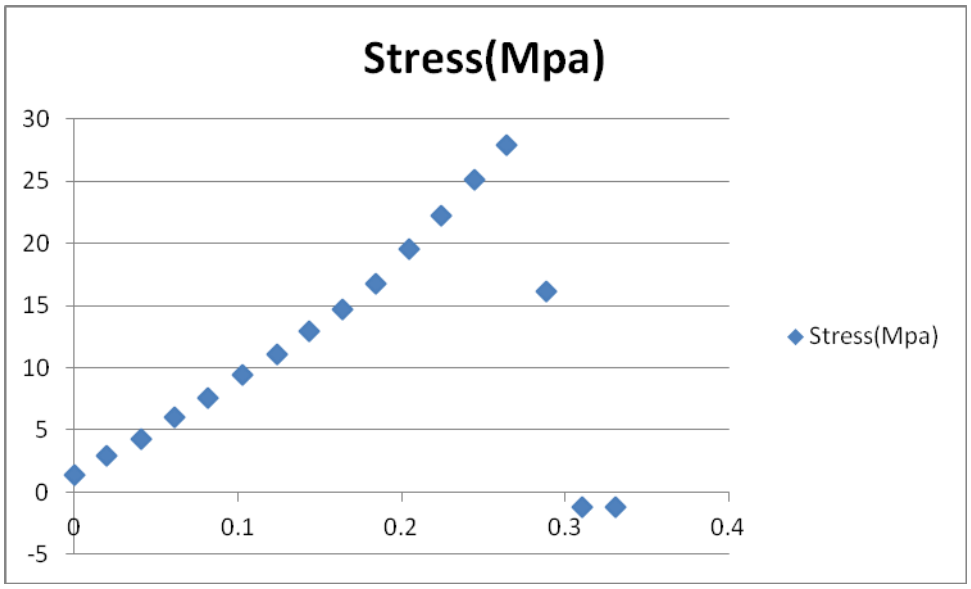
Δείγμα sou_0002



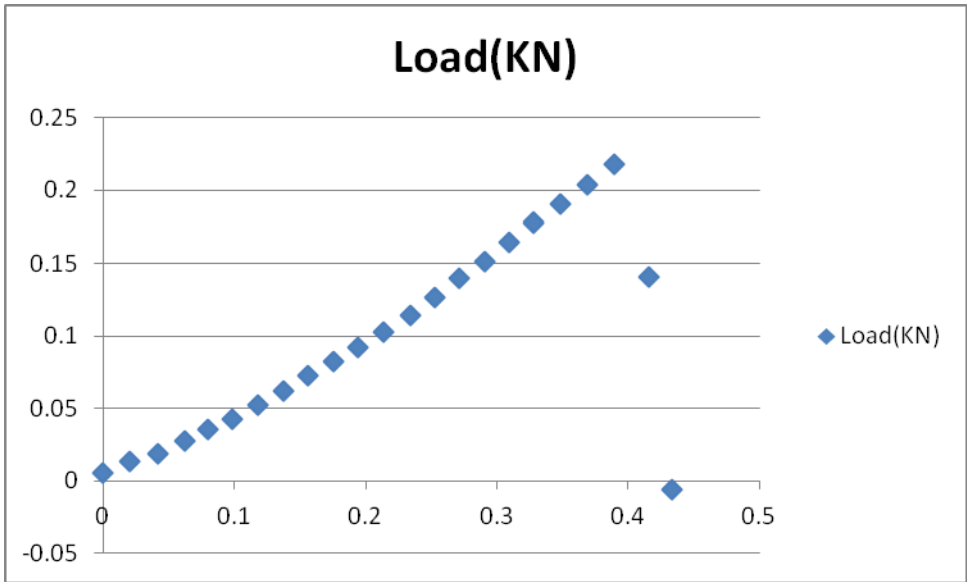


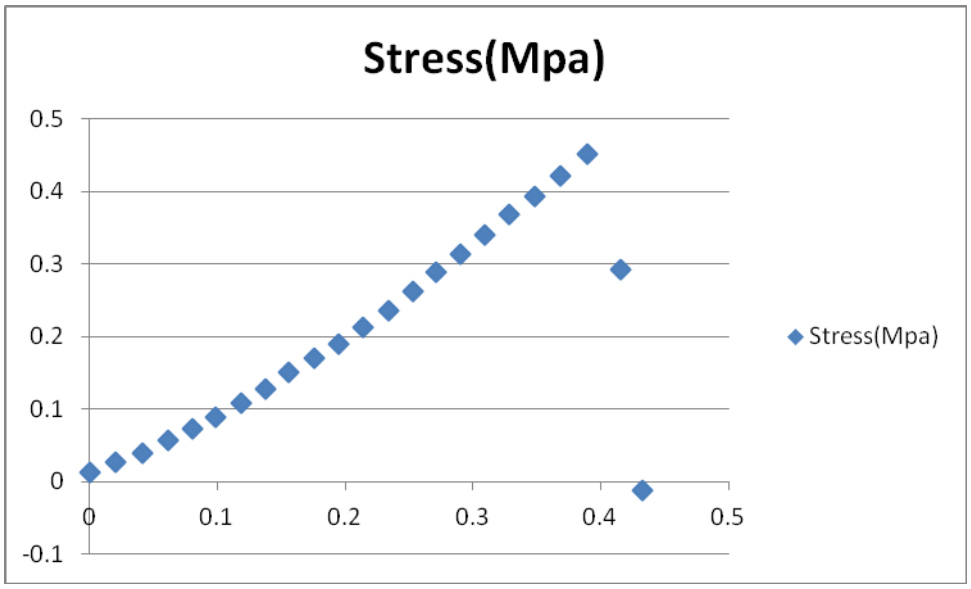
Δείγμα sp2_0001



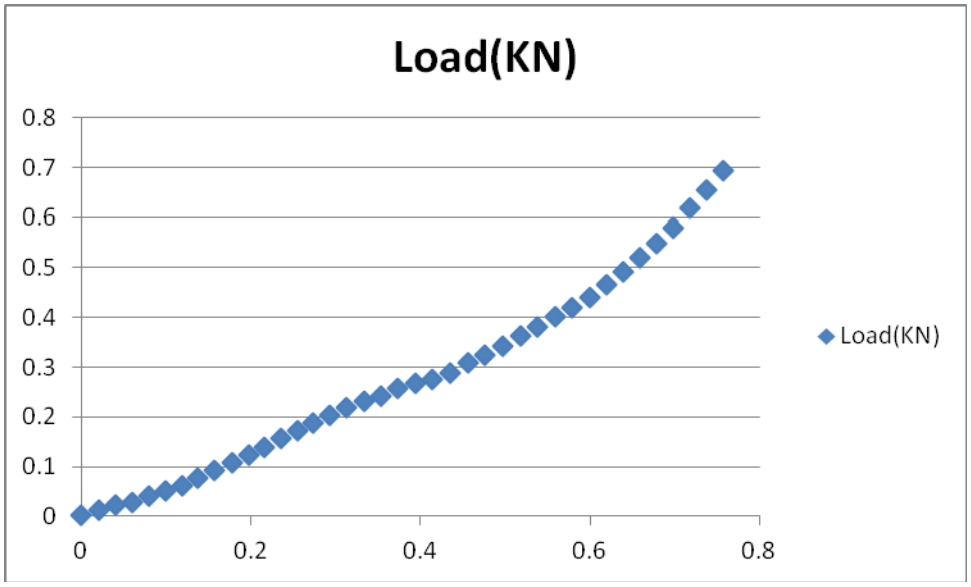


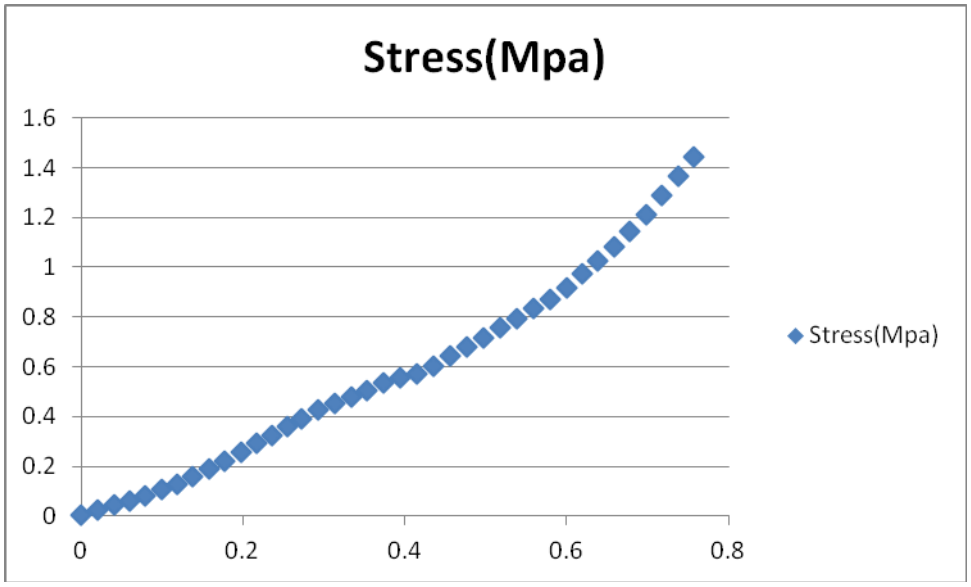
Δείγμα sp2_0002



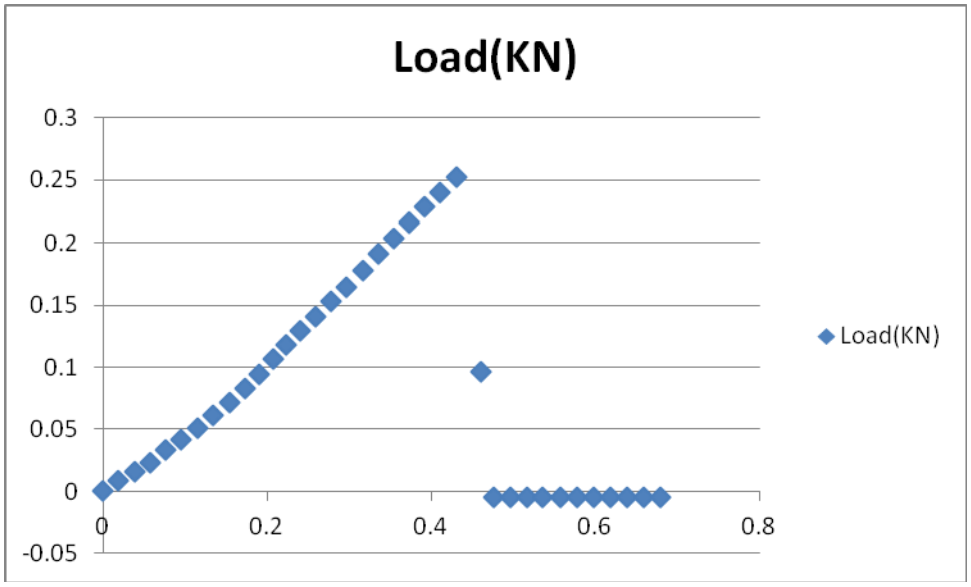


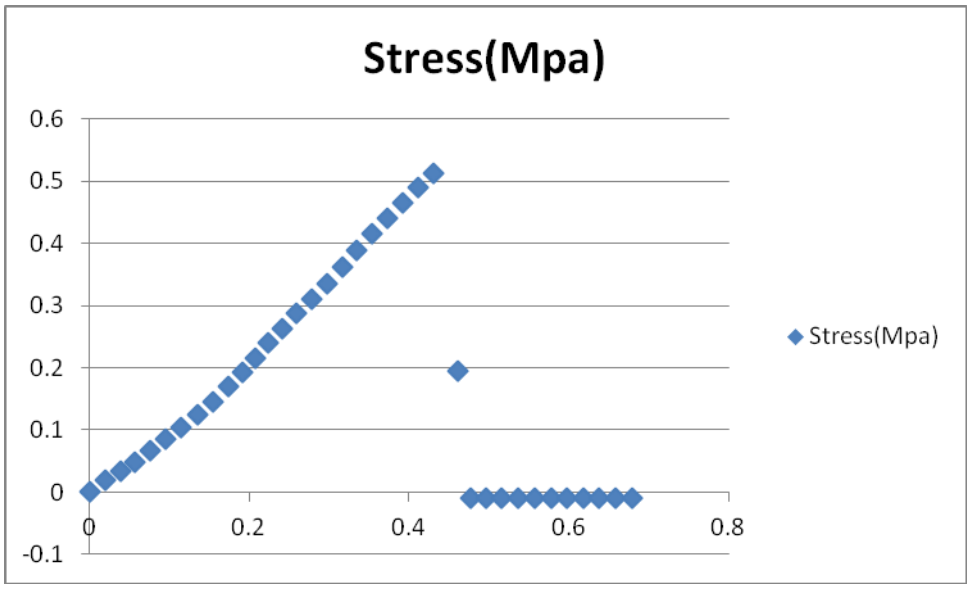
Δείγμα sph1_0001





Δείγμα sph1_0003


Load(KN)
0.3
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
0
-0.05
0
0.2
0.4
0.6
0.8
Load(KN)


Stress(Mpa)
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
-0.1
0
0.2
0.4
0.6
0.8
Stress(Mpa)