# PLETHRO

ΑΣΗΜΑΚΗΣ Ν. ΙΓΓΛΕΖΑΚΗΣ Γ.

Նկուսներ Նուռիներ եղանակներ Նորդ Անդրեաս...

# "PLETHRO"

*ένα νέο δομικό σύστημα από χώμα…*

από τους φοιτητές:

Ασημάκης Νικόλαος AM: 2005060009

Ιγγλεζάκης Ιωάννης Γεώργιος AM: 2006060010

επιβλέπων καθηγητής:

Ουγγρίνης Κωστής-Αλκέτας

Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών

Πολυτεχνείο Κρήτης

Χανιά, 2013

*…εξέλιξη μιας ξεχασμένης πρακτικής*

Η ονομασία "Plethro" προέρχεται από την μετατροπή της λέξης "Πλίθρα" η οποία σημαίνει ωμόπλινθος- πλίνθος με φυσική διαδικασία ξήρανσης.

# Λίγα λόγια για το "Plethro"

Το πρωτότυπο Plethro αναπτύχτηκε από τελειόφοιτους του τμήματος Αρχιτεκτόνων μηχανικών του Πολυτεχνείου της Κρήτης στα πλαίσια του προγράμματος "Φυτώριο Ιδεών". Το πρόγραμμα αυτό, του Τομέα Καινοτομίας και Επιχειρηματικότητας του Πολυτεχνείου της Κρήτης, συγχρηματοδοτήθηκε από το Υπουργείου Παιδείας και Θρησκευμάτων και την Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω των ΕΣΠΑ 2007-2013.

Οι φοιτητές που ανέπτυξαν και ολοκλήρωσαν το νέο δομικό σύστημα είναι οι ακόλουθοι:

Ανδρεσάκης Γεώργιος
Ασημάκης Νικόλαος
Ιγγλεζάκης Ιωάννης Γεώργιος

Οι καθηγητές του Πολυτεχνείου της Κρήτης που επέβλεψαν και συμβούλευσαν την συγκεκριμένη έρευνα είναι οι ακόλουθοι:

Ουγγρίνης Κωστής-Αλκέτας, επ. καθ. του τμήματος Αρχιτεκτόνων Μηχ.
Προβιδάκης Κωνσταντίνος, καθ. του τμήματος Αρχιτεκτόνων Μηχ.
Ρήγος Ιάκωβος, επ. καθ. του τμήματος Αρχιτεκτόνων Μηχ.
Στειακάκης Εμμανουήλ, επ. καθ. του τμήματος Μηχ. Ορυκτών Πόρων

Σκοπός της συμμετοχής στο "Φυτώριο Ιδεών» ήταν η ανάπτυξη και πραγματοποίηση ενός νέου βιώσιμου δομικού συστήματος, που θα βασίζεται στην χρήση του χώματος ως δομικό υλικό και ταυτόχρονα θα μπορεί να καλύψει τις απαιτήσεις ενός σύγχρονου κτηρίου.

Στη συγκεκριμένη ερευνητική εργασία τίθονται οι βασικοί προβληματισμοί που προκάλεσαν την αναζήτηση ενός νέου δομικού συστήματος και το θεωρητικό υπόβαθρο που υποστηρίζει την εξέλιξη της. Επίσης παρουσιάζονται οι πειραματικές διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν για να ολοκληρώσουν την έρευνα σε πραγματική κλίμακα κατασκευής. Τέλος, γίνεται η ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και τον οικονομικών οφελών στην παραγωγή και κατασκευή του "Plethro" σε σχέση με μια συμβατική κατασκευή.

# Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε όλους τους ανθρώπους που βοήθησαν, συμμετείχαν και εργάστηκαν, για την ανάπτυξη και ολοκλήρωση της συγκεκριμένης ερευνητικής εργασίας.

Τον συνεργάτη μας και συμφοιτητή μας:

Ανδρεσάκη Γεώργιο, τελειόφοιτος του τμήματος Αρχιτεκτόνων Μηχανικών

Τους καθηγητές του Πολυτεχνείου της Κρήτης:

Ουγγρίνη Κωστή-Αλκέτα, επ. καθηγητής του τμήματος Αρχιτεκτόνων Μηχ.

Προβιδάκη Κωνσταντίνο, καθηγητής του τμήματος Αρχιτεκτόνων Μηχ.

Ρήγο Ιάκωβο, επ. καθηγητής του τμήματος Αρχιτεκτόνων Μηχ.

Στειακάκη Εμμανουήλ, επ. καθηγητής του τμήματος Μηχ. Ορυκτών Πόρων

Το προσωπικό των εργαστηρίων του Πολυτεχνείου της Κρήτης:

Βαβαδάκη Διονύση, εργαστήριο «Εφαρμοσμένης Γεωλογίας» του τμήματος Μηχ. Ορυκτών Πόρων .

Λαζαρόπουλο Θανάση, εργαστήριο «Εφαρμοσμένης Γεωλογίας» του τμήματος Μηχ. Ορυκτών Πόρων.

Λιαράκο Βαγγέλη, εργαστήριο «Εφαρμοσμένης Μηχανικής» του Γενικού τμήματος.

Καστανάκη Ελένη, εργαστήριο «Διαχείρισης Τοξικών και Επικίνδυνων Αποβλήτων» του τμήματος Μηχ. Περιβάλλοντος.

Παντελάκη Όλγα, εργαστήριο «Εμπλουτισμού» του τμήματος Μηχ. Ορυκτών Πόρων.

Στρατάκη Αντώνιο, εργαστήριο «Γενικής & Τεχνικής Ορυκτολογίας» του τμήματος Μηχ. Ορυκτών Πόρων.

Τους συμφοιτητές μας:

Μπαρμπαγαδάκη Ρωξάνη, φοιτήτρια του τμήματος Αρχιτεκτόνων Μηχ.

Παππά Γεώργιο, τελειόφοιτος του τμήματος Αρχιτεκτόνων Μηχ.

Ρούσσου Άλκηστη, τελειόφοιτη του τμήματος Αρχιτεκτόνων Μηχ.

# Περιεχόμενα

*Λίγα λόγια για το "Plethro"* ..... *3*

*Ευχαριστίες* ..... *5*

*Α. Εισαγωγή* ..... *11*

**Θέμα – πρόβλημα** ..... **13**

Πρόβλημα ..... 13

Λύση ..... 14

**Όραμα** ..... **14**

**Σκοπός** ..... **15**

**Στόχοι** ..... **15**

**Δομή της ερευνητικής** ..... **15**

*Β. Θεωρητικό Υπόβαθρο* ..... *17*

**1. Εισαγωγή** ..... **19**

**2. Η οικολογική αρχιτεκτονική και βιωσιμότητα** ..... **20**

Οικολογία ..... 21

Οικολογική αρχιτεκτονική ..... 21

Βιωσιμότητα (Sustainability) ..... 23

Η σχέση ανάμεσα στη βιώσιμη δόμηση και στην οικολογική δόμηση ..... 26

Συμπεράσματα ..... 27

**3. Βιομηχανία δόμησης** ..... **28**

Επάρκεια των αποθεμάτων ..... 29

Εμπεριεχόμενη ενέργεια ..... 31

Ανακύκλωση ..... 32

Η ποιότητα του αέρα των εσωτερικών χώρων ..... 34

Ανάλυσης κύκλου ζωής στον κτιριολογικό σχεδιασμό (Μυλωνάς n.d.) ..... 35

Συμπεράσματα - Προϋποθέσεις για μία οικολογική βιομηχανία δόμησης: ..... 36

**4. Δόμηση από ωμή γη** ..... **38**

Ιστορική αναφορά (Berge 2009) ..... 39

Βασικά χαρακτηριστικά ..... 40

Βασικές τεχνικές δόμησης με ωμή γη ..... 45

Δυνατότητες βιομηχανικής ανάπτυξης της δόμησης με ωμόπλινθους ..... 48

Συμπεράσματα ..... 49

**5. Συμπεράσματα και πρόταση για ένα βιώσιμο μοντέλο βιομηχανικής ανάπτυξης της δόμησης με ωμή γη ..... 50**
Ένα βιώσιμο μοντέλο βιομηχανικής ανάπτυξης της δόμησης με ωμή γη ..... 51

***Γ. Πειραματικό Μέρος Α' ..... 53***

**1. Εισαγωγή ..... 55**
Το χώμα ως πρώτη ύλη για την παραγωγή δομικών υλικών (Μπέη 2004) ..... 55

**2. Επιλογή των πρώτων υλών ..... 59**
α. Χώμα - loam ..... 60
β. Άμμος ..... 70

**3. Επιλογή της σύστασης ..... 71**
Γενικά ..... 72
α. Φυσικές ιδιότητες ..... 73
β. Μηχανικές ιδιότητες ..... 82

**4. Συμπεράσματα – επιλογή σύστασης ..... 85**

***Δ. Πειραματικό Μέρος Β' ..... 87***

**1. Εισαγωγή ..... 89**
«Auram» ..... 89
«Legodome 1» ..... 89
«Legodome 2» ..... 90
Λίγα λόγια για το «Plethro» ..... 91

**2. Σχεδιαστική ανάπτυξη του δομικού συστήματος «Plethro» ..... 91**
Οι βασικές αρχές σχεδίασης ..... 91
Το δομικό σύστημα ..... 92
Η δομική μονάδα ..... 93

**3. Κατασκευή πρωτοτύπων ..... 96**
Κατασκευή καλουπιών ..... 96
Παραγωγή πλίνθων ..... 96
Παρατηρήσεις ..... 97

**4. Προσομοιωτικός έλεγχος ..... 98**

**5. Συμπεράσματα ..... 99**

***Ε. Οικονομική μελέτη και περιβαλλοντικές επιπτώσεις ..... 101***

**1. Εισαγωγή ..... 103**

**2. Συγκριτική ανάλυση του «Plethro» με μία συμβατική κατασκευή ..... 103**

***Ζ. Συμπεράσματα και Προτάσεις ..... 109***

***Φωτογραφικό ημερολόγιο*** ..... ***115***
Πρώτη κοσκίνιση ..... 116
Επιτόπιες Δοκιμές ..... 117
Κοκκοκομετρική Ανάλυση ..... 118
Ανάλυση PH ..... 119
Εντοπισμός ορίων Atterberg ..... 120
Δοκιμή Proctor και έλεγχος Γραμμικής συρρίκνωσης ..... 121
Έλεγχος θλιπτικής αντοχής ..... 122
Έλεγχος διατμητικής αντοχής ..... 123
Κατασκευή καλουπιών της βασικής μονάδας του «Plethro» ..... 124
Παραγωγή των πρωτοτύπων της βασικής μονάδας του «Plethro» ..... 126
Ξεκαλούπωμα και φυσική ξήρανση ..... 128
Κατασκευή τοιχοσώματος του σύστηματος «Plethro» ..... 129
Τελική πράξη ..... 130

***Παράρτημα Α*** ..... ***133***
Κοκκομετρική ανάλυση του εδάφους ..... 134
Προσδιορισμός ορίων υδαρότητας και πλαστικότητας ..... 147
Δοκιμή διάτμησης εδαφών ..... 154
Δοκιμή συμπύκνωσης συνεκτικών εδαφών (Δοκιμή Proctor) ..... 160
Δοκιμή θλίψης ..... 169

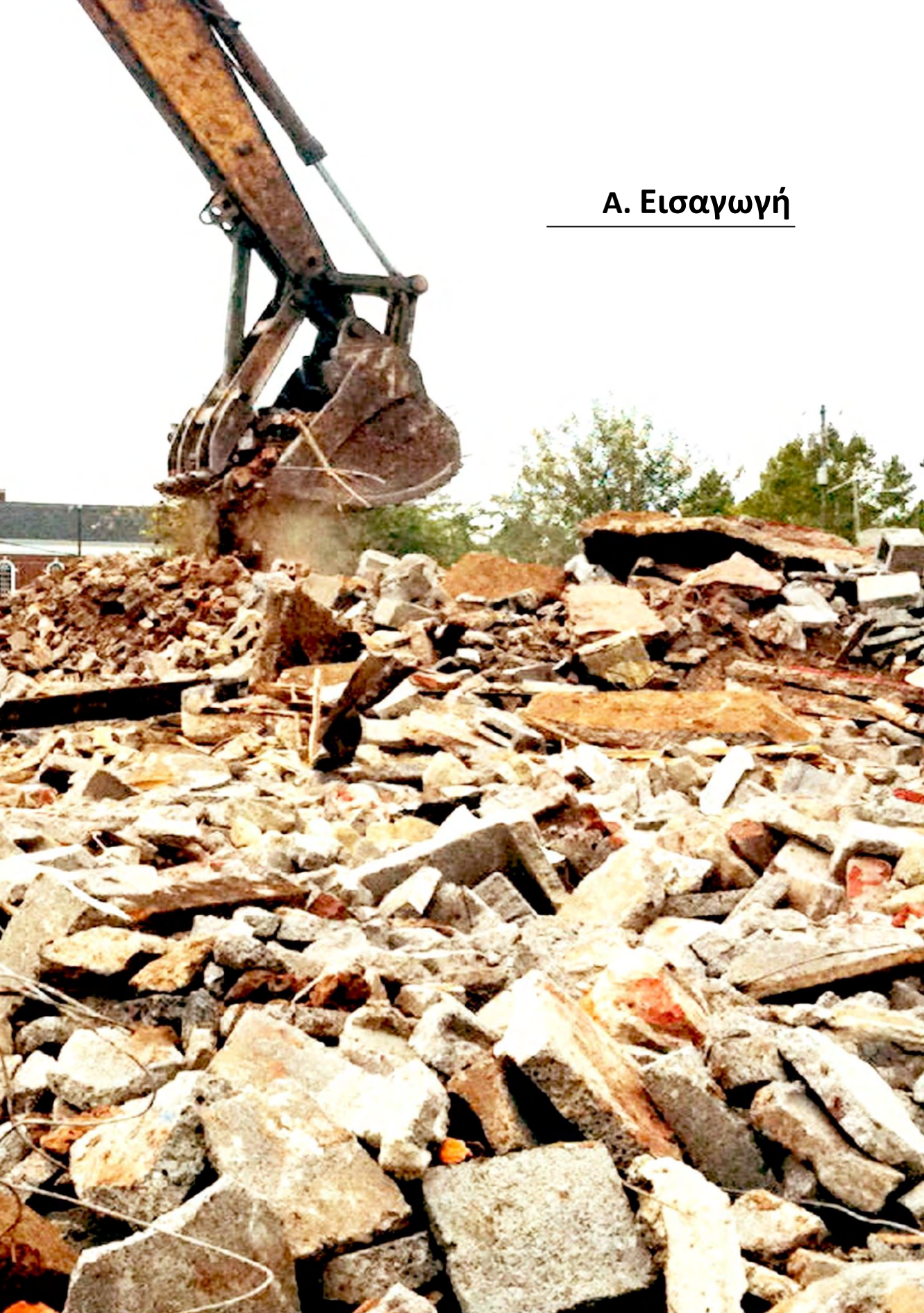
***Παράρτημα Β*** ..... ***177***
Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης ..... 178
Όρια Atterberg για τα δείγματα με 80% και 60% χώμα ..... 180
Δοκιμή Proctor για το δείγμα με χώμα100% ..... 183
Υπολογισμός γραμμικής συρρίκνωσης ..... 184
Υπολογισμός θλιπτικής αντοχής ..... 185
Δοκιμή άμεσης διάτμησης ..... 186

***Πίνακας Διαγραμμάτων*** ..... ***189***

***Πίνακας Εικόνων*** ..... ***190***

***Πίνακας πινάκων*** ..... ***191***

# Α. Εισαγωγή



## Θέμα – πρόβλημα

Οι αναζητήσεις μας σε διάφορα θέματα αρχιτεκτονικής κατά την διάρκεια των σπουδών πέρασαν και από το θέμα της φυσικής – οικολογικής – βιώσιμης - βιολογικής δόμησης. Όροι συγκεχυμένοι και ταυτόσημοι αρχικά, με μία ιδιαίτερη δύναμη στην σύγχρονη κοινωνία, που η οικολογία έχει πάρει διαστάσεις μόδας, να δίνουν ένα άρωμα ενός τεράστιου οράματος. Ένα όραμα που η κοινωνία προσπαθεί να υιοθετήσει αλλά μάλλον δεν δύναται να πιστέψει. Το ενδιαφέρον μας για αυτό το όραμα μας οδήγησε σταδιακά στην ενασχόληση και διερεύνηση της φυσικής δόμησης.

Η παρουσία των προθεμάτων eco- και bio- εμφανίζονται όλο και περισσότερο, η κοινωνία επιλέγει όλο και περισσότερο τα προϊόντα και τις υπηρεσίες με αυτά τα προθέματα. Ταυτόχρονα αυξάνουν και οι αντίλογοι, οι υποψίες και οι αμφισβητήσεις για την αποτελεσματικότητα (σχέση κόστους-απόδοσης) όλων αυτών των θεωριών και εφαρμογών τους. Η περιβαλλοντική συνείδηση στην πραγματικότητα δεν έχει γίνει τρόπος ζωής της σημερινής κοινωνίας, και αυτό κυρίως διότι δεν έχει γίνει γνώση σε προηγούμενο στάδιο.

**Πρόβλημα**

Σύμφωνα με το Worldwach Institute οι οικοδομικές κατασκευές απορροφούν το 40% αδρανών υλικών και άμμου και το 25% παρθένου ξύλου που εξορύσσονται και υλοτομούνται παγκόσμια κάθε χρόνο. Οι κατασκευές των κτηρίων απορροφούν 40% της παραγόμενης ενέργειας και 16% του υδάτινου αποθέματος που παράγεται ετησίως στον πλανήτη (Σαργέντης 2005). Στην Ευρωπαϊκή Ένωση για παράδειγμα, τα κτήρια ευθύνονται για το 40% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας και ο κατασκευαστικός τομέας στο σύνολό του ευθύνεται για το 40% των συνολικά παραγόμενων αποβλήτων (Γιαννακοπούλου n.d.), τα ποσοστά βέβαια διαφέρουν από χώρα σε χώρα. Στην Ελλάδα εκτιμάται ότι κάθε χρόνο παράγονται στα εργοτάξια περισσότεροι από 200 εκατ. τόνοι οικοδομικών αποβλήτων και μόνο περίπου το 25 % αυτών είναι ανακυκλώσιμα (Αδαμοπούλου 2013).

**Λύση**

Αρχικά επικεντρωθήκαμε στον σχεδιασμό ενός συστήματος χωρίς να μας απασχολεί αρχικά η παράμετρος του υλικού. Σκοπός ήταν η ευκολία κατασκευής, η αύξηση της ταχύτητας της και κυρίως η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης των δομικών υλικών. Έπειτα από την συλλογή εμπειρίας στην φυσική δόμηση επιλέχθηκε να προσαρμόσουμε τον σχεδιασμό βάσει των ιδιοτήτων του χώματος. Ο σχεδιασμός σε συνδυασμό με το υλικό θα καθιστούσε το νέο δομικό σύστημα πραγματικά βιώσιμο. Με αυτό το σκοπό οργανώσαμε την πορεία της έρευνας σε δυο παράλληλες διαδικασίες. Η μία θα αφορούσε την μελέτη της πρώτης ύλης και η δεύτερη την σχεδιαστική βελτίωση του συστήματος βάσει και των δεδομένων που προκύπτουν από την πρώτη.

## Όραμα

Το όραμα πάνω στο οποίο βασίζεται η παρούσα ερευνητική εργασία είναι η επίτευξη μίας ιδανικής και ισορροπημένης σχέσης του του ανθρώπινου είδους με τον πλανήτη που τον φιλοξενεί. Η σωστή χρήση των φυσικών πόρων που μας παρέχονται είναι μείζονος σημασίας για την εξέλιξη όχι μόνο των ανθρώπινων κοινωνιών αλλά και του συνόλου της ζωής πάνω στη Γη. Πλέον είναι ξεκάθαρο, ότι μια καλύτερη σχέση συμβίωσης του ανθρώπου με το υπόλοιπο οικοσύστημα του πλανήτη μας, είναι όχι μόνο αναγκαία αλλά και εφικτή.

Η δόμηση αποτελεί ένα πολύ σημαντικό τομέα της ανθρώπινης δραστηριότητας και οφείλεται για ένα μεγάλο ποσοστό των επιβαρύνσεων του φυσικού περιβάλλοντος. Η χρήση φυσικών υλικών όπως το χώμα στις κατασκευές, είναι εφικτή σε μεγάλο βαθμό, δεδομένου ότι πάνω από το 50% του παγκόσμιου πληθυσμού ζει σε αγροτικές περιοχές, και σε χαμηλού ύψους κτήρια. Οι ανάγκες τέτοιων κτηρίων μπορούν να καλυφτούν εξ ολοκλήρου με την χρήση τέτοιων υλικών. Η χρήση χαμηλής τεχνολογίας αλλά υψηλής μηχανικής υλικών στην δόμηση θα βελτιώσει την ποιότητα ζωής του ανθρώπου, και θα θέσει τις βάσεις για μία πιο ποιοτική σχέση με το περιβάλλον.

**Η βιομηχανία, η επιστήμη , η έρευνα και η οικονομία θα πρέπει να εστιάσουν στην χρήση και διάδοση της φυσικής δόμησης**.

## Σκοπός

Σκοπός της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός νέου βιώσιμου δομικού συστήματος, “Plethro”, που θα βασίζεται στην χρήση του χώματος ως δομικό υλικό, και ταυτόχρονα θα μπορεί να καλύψει τις απαιτήσεις ενός σύγχρονου κτηρίου. Το δομικό αυτό σύστημα θα αποτελείται από αποσυναρμολογούμενες δομικές μονάδες. Με αυτόν τον τρόπο θέλουμε να εξαλείψουμε σχεδόν τα μη ανακυκλώσιμα οικοδομικά απορρίμματα και ταυτόχρονα να αυξήσουμε το ποσοστό του δομικού υλικού που επαναχρησιμοποιείται άμεσα. Αποτέλεσμα της εφαρμογής αυτού του δομικού συστήματος θα είναι η τεράστια μείωση των οικοδομικών αποβλήτων και της ενέργειας που καταναλώνεται από τον κλάδο των κατασκευών.

## Στόχοι

- Η θεωρητική υποστήριξη της βιωσιμότητας της δόμησης με χώμα
- Η κατανόηση των δυνατοτήτων και των χαρακτηριστικών του χώματος σαν δομικό υλικό
- Η πειραματική έρευνα και εργαστηριακός έλεγχος της σύνθεσης και των μηχανικών ιδιοτήτων του χώματος
- Η Ανάπτυξη και δοκιμαστική παραγωγή μιας δομικής μονάδας
- Η Ανάπτυξη και εργαστηριακός έλεγχος του δομικού συστήματος “Plethro”

## Δομή της ερευνητικής

***Κεφάλαιο Β – Θεωρητικό υπόβαθρο***

Το κεφάλαιο αυτό αποσκοπεί αρχικά να αποσαφηνίσει όρους και θεωρίες, που υπάρχουν και αφορούν την σχέση δόμησης – φυσικού περιβάλλοντος και έπειτα να διερευνήσει τη δόμηση με χώμα και τις παραμέτρους διάδοσης της . Θα αναλυθούν θέματα που αφορούν την χρήση και διαχείριση ενέργειας και φυσικών πόρων, την σχέση φύσης – ανθρώπου, και θα προταθούν τρόποι για την επίτευξη της βιώσιμης ανάπτυξης της δόμησης με χώμα.

***Κεφάλαιο Γ – Πειραματικό Μέρος Α***

Στο πρώτο πειραματικό μέρος αναλύονται οι πειραματικές διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν για την αναζήτησης της σύνθεσης χώματος και

άμμου, η οποία χρησιμοποιήθηκε ως πρώτη ύλη για την κατασκευή των πλίνθων του νέου δομικού συστήματος που σχεδιάστηκε. Παρατίθενται περιγραφές, αποτελέσματα και συμπεράσματα των δοκιμών της ερευνητικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε.

***Κεφάλαιο Δ – Πειραματικό Μέρος Β***

Το μέρος αυτό επικεντρώνεται στο δομικό σύστημα "Plethro". Αναλύει και αιτιολογεί τον σχεδιασμό του και την λειτουργία του, με αναφορά στην διαδικασία ανάπτυξής του. Παραθέτονται φωτογραφίες από τη διαδικασία παραγωγής των πρωτότυπων δομικών μονάδων του συστήματος, και στην τελευταία ενότητα δίνονται τα αποτελέσματα από τον έλεγχο ψηφιακής προσομοίωσης της στατικής επάρκειας του νέου δομικού συστήματος.

***Κεφάλαιο Ε – Οικονομικά και περιβαλλοντικά συγκριτικά στοιχεία***

Στο πέμπτο κεφάλαιο συγκρίνονται ο συμβατικός τρόπος δόμησης και το δομικό σύστημα "Plethro". Η σύγκριση γίνεται με οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια.

***Κεφάλαιο Ζ – Συμπεράσματα και Προτάσεις***

Σε αυτό το κεφαλαίο γίνεται ανασκόπηση της ερευνητικής και αξιολογείται το ποσοστό επίτευξης των στόχων που είχαν τεθεί.

***Φωτογραφικό Ημερολόγιο – Φωτογραφική τεκμηρίωση των πειραμάτων***

Σε αυτό το μέρος παραθέτονται φωτογραφίες από την πειραματική διαδικασία με χρονολογική σειρά, εν είδει ημερολογίου.

***Παράρτημα Α – Θεωρητικό υπόβαθρο πειραμάτων***

Στο παράρτημα Α επισυνάπτονται οι τεχνικές περιγραφές των πρότυπων πειραματικών διαδικασιών.

***Παράρτημα Β – Τα δεδομένα των πειραμάτων***

Στο παράρτημα Β παραθέτονται οι πίνακες και τα διαγράμματα των δεδομένων των πειραμάτων.

# Β. Θεωρητικό Υπόβαθρο

# 1. Εισαγωγή

Στο πλανήτη στον οποίο ζούμε, η ποσότητα των φυσικών πόρων είναι περιορισμένη. Με τον σημερινό ρυθμό κατανάλωσης, το απόθεμα πολλών από αυτών έχει μειωθεί αισθητά και είναι βέβαιο ότι θα εξαντληθεί στο άμεσο μέλλον (Brown and Dekay 2001). Οι παραδοσιακές πηγές ενέργειας (πετρέλαιο, άνθρακας, φυσικό αέριο) είναι πεπερασμένες. Οι χρήση των πηγών αυτών αυξάνουν με ταχείς ρυθμούς τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, που οδηγεί στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Είμαστε σε μια κρίσιμη στιγμή κατά την οποία η κοινωνία πρέπει να κάνει μια συνειδητή επιλογή για να μεταβεί σε ένα πιο βιώσιμο τρόπο ζωής.

Ο σχεδιασμός, η κατασκευή και συντήρηση των κτιρίων έχουν τεράστιο αντίκτυπο στο περιβάλλον και τους φυσικούς πόρους του πλανήτη. Αυτήν την στιγμή υπάρχουν πολλά κτίρια στον κόσμο που είναι υπό κατασκευή και υπάρχουν πολλά ακόμα που αναμένουν να κατασκευαστούν στο μέλλον. Η πρόκληση είναι να τα κατασκευάσουμε έξυπνα, με ελάχιστη χρήση μη-ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ελάχιστη παραγωγή ρύπανσης, καθώς και ελάχιστο ενεργειακό κόστος. Άλλα σημαντικά ζητήματα για την οικοδόμηση περιλαμβάνουν την αύξηση της άνεσης, της υγείας και της ασφάλειας των ανθρώπων που ζουν και εργάζονται σε αυτές. (El Feky 2006)

Τα κτήρια καταναλώνουν πολλούς από τους φυσικούς πόρους και είναι υπεύθυνα για πολλά προβλήματα όπως (Woolley and Kimmins 2000):

- 40% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας
- 30% της κατανάλωσης πρώτων υλών
- 25% της κατανάλωσης ξυλείας
- 35% των εκπομπών $CO^2$ παγκοσμίως
- 40% των αστικών στερεών αποβλήτων που προορίζονται για τοπικούς χώρους υγειονομικής ταφής
- 50% των παραγωγής χλωροφθορανθράκων
- και προκαλούν αρνητικές επιπτώσεις στις λεκάνες απορροής, στους οικοτόπους και στην ποιότητα του αέρα

Τα μεγέθη που αναφέρονται παραπάνω είναι πραγματικά. Επηρεάζουν άμεσα τις συνθήκες διαβίωσης μας, αλλά και των επόμενων γενεών. Η οικολογία (ecology), η οικολογική δόμηση (green architecture) και η αειφόρος ανάπτυξη (sustainable development), είναι έννοιες που οραματίζονται μία καλύτερη σχέση με το περιβάλλον και προσπαθούν να θέσουν καλύτερες συνθήκες για το μέλλον.

Στην επόμενη ενότητα θα αναφερθούμε σε αυτές της περιβαλλοντολογικές απόψεις και θα προσπαθήσουμε να εντοπίσουμε την πορεία και ανάπτυξη τους. Είναι σημαντική η αναγνώριση των διαφορετικών κριτηρίων που θέτουν και το επίπεδο που επηρεάζουν το περιβάλλον, την οικονομία και την κοινωνία. Μετά από την ανάλυση των όρων αυτών θα κριθεί το ποσοστό που μπορούν να συμβάλλουν στην περιβαλλοντική ισορροπία όπως επίσης και το μέγεθος επιτευξιμότητας τους.

Έπειτα, θα εντοπίσουμε το σύνολο τον παραμέτρων που συντελούν την ενεργοβόρα και ρυπογώνα φύση του τομέα των κτηριακών κατασκευών. Θα αναλυθούν σε έναν κύκλο ζωή των δομικών υλικών και της δόμησης προβλήματα όπως τα αποθέματα των φυσικών πόρων και η αλόγιστη κατανάλωσή τους, η ενσωματωμένη ενέργεια των υλικών, οι εκπομπές $CO_2$ και η ποιότητα του αέρα των εσωτερικών χώρων. Η ανάλυση αυτή θα μας βοηθήσει να επιβεβαιώσουμε την αναγκαία στροφή προς τη φυσική δόμηση και σε τεχνικές δόμησης με μικρότερο ενσωματωμένο ενεργειακό κόστος.

Στην τελευταία ενότητα αυτού του κεφαλαίου, θα παρουσιαστεί η οικολογική δόμηση με χώμα. Θα γίνει ιστορική αναφορά και θα εντοπιστούν οι λόγοι που ένα τόσο ευρέως διαδεδομένο υλικό δεν ενδείκνυται για δόμηση στην αναπτυγμένες χώρες. Θα παρουσιαστούν οι διάφορες τεχνικές δόμησης αυτού του υλικού και θα συγκριθούν με βάση την ευκολία βιομηχανοποίησης τους. Τέλος θα εντοπιστούν τα θετικά χαρακτηριστικά της βιομηχανοποίησης της τεχνικής των ωμόπλινθων και θα συγκριθούν με τις αντίστοιχες τεχνικές δόμησης από οπτόπλινθους και τσιμεντόλιθους.

## 2. Η οικολογική αρχιτεκτονική και βιωσιμότητα

Η οικολογική δόμηση δεν είναι μία αυστηρά προκαθορισμένη αντίληψη. Είναι μία έννοια υπό συνεχή αλλαγή και επαναπροσδιορισμό. Στην ενεργειακή κρίση της δεκαετίας του 1970, η μηδενική κατανάλωση ενέργειας των κτιρίων ήταν η απάντηση. Όταν το πρόβλημα, αργότερα, διατυπώθηκε ως μία ριζοσπαστική κριτική στην αναπτυξιακή πολιτική της κοινωνίας, η απάντηση ήρθε από την βάση των κοινωνικών στρωμάτων με την μορφή των «eco-villages» και πειραματισμών με την τεχνολογία και την κοινωνική οργάνωση. Οι αρχές άρχισαν να ενδιαφέρονται για την αστική οικολογία, μόνο όταν άρχισαν να υπάρχουν επιχορηγήσεις από διάφορους φορείς είτε ιδιωτικούς, είτε δημόσιους. (El Feky 2006)

Από την δεκαετία του ΄50, υπήρχαν δημοσιεύματα που παρουσίαζαν θέματα και σχεδιαστικές προσεγγίσεις που στόχευαν στην περιβαλλοντική προτεραιότητα. Αρκετά συχνά διατυπωμένοι όροι, όπως «arcology», «οικολογική αρχιτεκτονική(green architecture)» και «βιώσιμη αρχιτεκτονική (sustainable architecture)» έγιναν γνωστοί ως τρόποι έκφρασης ενός περιβαλλοντικού κινήματος. Και όπως γίνεται συχνά με τις ιδέες που αγκαλιάζονται ευρέως από το κοινό, δόθηκαν και πολλές διαφορετικές ερμηνείες.

**Οικολογία**

Η οικολογία είναι η επιστημονική μελέτη των σχέσεων, της διανομής και της πληθώρας των οργανισμών ή ομάδων οργανισμών, σε ένα περιβάλλον. Μερικές φορές χρησιμοποιείται λανθασμένα ως συνώνυμο για το φυσικό περιβάλλον και τον «environmentalism[1]». Οι περισσότερες απόψεις δημιουργήθηκαν συσχετίζοντας την οικολογία με τους όρους: «eco-village[2]», «eco cities[3]» και «Arcology[4]». (El Feky 2006)

**Οικολογική αρχιτεκτονική**

Οι πρακτικές οικολογικής αρχιτεκτονικής μειώνουν την χρήση των πόρων και της ρύπανσης, ενώ αυξάνουν την απόδοση του κάθε πόρου που χρησιμοποιείται. Η οικολογική δόμηση προστατεύει την υγεία του τόπου, αποκαθιστά ή βελτιώνει τα υποβαθμισμένα τοπία σε συνεργασία με φυσικές διεργασίες, και συμβάλλει στην περιφερειακή διατήρηση των βιότοπων. Με αυτές τις παραμέτρους, οι οικολογικές κατασκευές τονώνουν μία σταθερή και διαφοροποιημένη τοπική οικονομία,

---

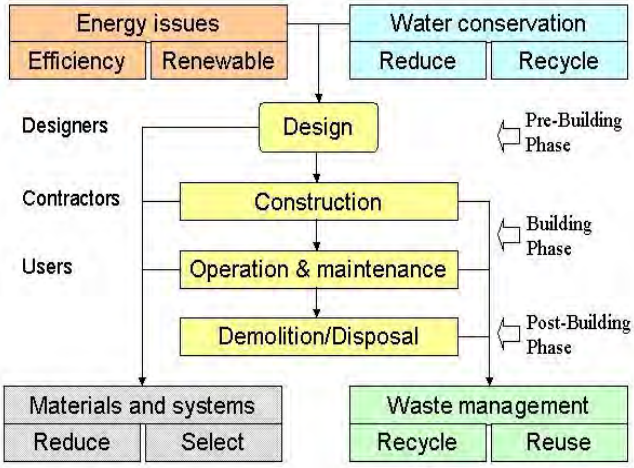
[1] Οι «Environmentalists» πίστευαν ότι η ζωή στις πόλεις ήταν ρυπογόνα και καταστροφική για το περιβάλλον, λόγω του μεγέθους των λυμάτων, των απορριμμάτων και των ανθυγιεινών συνθηκών που δημιουργούνται και επιβαρύνουν το περιβάλλον.

[2] Το μοντέλο «eco-village» είναι μία συνειδητή απάντηση στο σύνθετο πρόβλημα της μετατροπής των ανθρώπινων οικισμών, είτε πρόκειται για χωριά, κωμοπόλεις ή πόλεις, σε πλήρως χαρακτηρισμένες βιώσιμες κοινότητες, εναρμονισμένες και ακίνδυνα ενσωματωμένες στο φυσικό περιβάλλον (El Feky 2006).

[3] Η ιδέα των «eco-cities» είναι μία νέα προσέγγιση τις βιώσιμης ζωής.

[4] Η ιδέα «Arcology» προέρχεται από τον συνδυασμό των λέξεων «architecture» και «ecology» και διατύπωνε ένα σύνολο αρχιτεκτονικών αρχών σχεδιασμού για μεγάλου μεγέθους οικοτόπους (hyperstructures), εξαιρετικά υψηλής πυκνότητας ανθρώπινου δυναμικού. Αυτές οι μεγάλου βαθμού υποθετικές δομές, θα περιείχαν μια ποικιλία από κατοικίες, εμπορικές και γεωργικές εγκαταστάσεις, και θα ελαχιστοποιούσαν τις ατομικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.(Wikipedia)

βελτιώνουν την τοπική ποιότητα ζωής και δεν επιβαρύνουν την υγεία του ανθρώπου. (El Feky 2006).




**Διάγραμμα 1 Η διαδικασία της οικολογικής αρχιτεκτονικής (El Feky 2006)**

Η οικολογική δόμηση ορίζεται ως μία μέθοδος που [Portland's OSD]:

- εξοικονομεί ενέργεια, νερό και πόρους
- χρησιμοποιεί χαμηλού περιβαλλοντικού κόστους υλικά
- μειώνει τα απόβλητα
- ανακυκλώνει άλλα κτήρια
- δημιουργεί πιο υγιεινούς χώρους διαβίωσης

<u>Πορεία ωρίμανσης των οικολογικών κριτηρίων προς μία αειφόρος λύση</u>

Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν είναι δυνατή η εφαρμογή περιβαλλοντολογικής προτεραιότητας εκ του μηδενός στην δόμηση. Είναι όμως αναγκαίο να αρχίζουν να εφαρμόζονται σταδιακά και όπου είναι δυνατό, οικολογικές λύσεις. Υπάρχουν τρία κριτήρια για την εφαρμογή της περιβαλλοντολογικής προτεραιότητας (Σαργέντης 2005):

- **Η κοινωνική αντίληψη** που οραματίζεται ένα δομημένο περιβάλλον, με βέλτιστες ανέσεις απομονωμένο από το οικοσύστημα, σύμφωνα με τη σημερινή επικρατούσα άποψη.
- **Η οικονομική αντίληψη** που οραματίζεται μία εύκολη κατασκευή ελαχιστοποιώντας το κόστος που μπορεί να προκύψει από τις ανάγκες που έχουν διατυπωθεί από τις κοινωνικές αντιλήψεις.

- **Η οικολογική αντίληψη** που επιδιώκει τη διατήρηση της ευρυθμίας της Βιόσφαιρας. Η οικολογική αντίληψη μπορεί να έχει αρκετό κόστος και υπάρχει το ενδεχόμενο να μη συμφωνεί με τις κοινωνικές αντιλήψεις. Πολλές φορές η οικολογική αντίληψη μπορεί να οδηγεί σε «άβολη» και «δύσκολη» επίλυση ενός αντικειμένου.

Κατά κανόνα οι αντιλήψεις αυτές κατευθύνονται από διαφορετικό όραμα. Για το λόγο αυτόν πολλές φορές αλληλοσυγκρούονται. Όταν όμως υπάρχει η παιδεία και το οικολογικό ήθος, υπάρχει και η δυνατότητα να διερευνηθεί ένας κοινός τους τόπος. Η κοινή συνισταμένη των ανωτέρω είναι η βέλτιστη- αειφόρος λύση.

**Διάγραμμα 2 Πορεία ωρίμανσης των οικολογικών κριτηρίων (Σαργέντης 2005)**

**Βιωσιμότητα (Sustainability)**

Η ιδέα της βιωσιμότητας στην κατασκευή άρχισε να γίνεται γνωστή στις αρχές της δεκαετία του ΄70 παράλληλα με τα υπόλοιπα περιβαλλοντικά κινήματα. Ωστόσο, δεν υπήρξαν πολλές δράσεις προς αυτήν την λογική μέχρι και πρόσφατα (El Feky 2006).

Ο πιο ευρέως αποδεκτός ορισμός της βιωσιμότητας φαίνεται να είναι αυτός που διατυπώθηκε το 1987 από την Παγκόσμια Επιτροπή για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη:

**Η βιωσιμότητα**

«*ικανοποιεί τις ανάγκες του παρόντος χωρίς να θέτει σε κίνδυνο τις ανάγκες των μελλοντικών γενεών να καλύψουν της δικές τους ανάγκες*»

Η έννοια των **Βιώσιμων Κατασκευών (Sustainable Construction)** είναι διαφορετική για κάθε χώρα και σχετίζεται με τον βαθμό της οικονομικής ανάπτυξης. Οι περισσότερο ανεπτυγμένες χώρες στοχεύουν στην αναβάθμιση των υπαρχόντων κατασκευών με την ανάπτυξη και εφαρμογή νέων τεχνολογιών, ενώ οι λιγότερο ανεπτυγμένες ή αναπτυσσόμενες χώρες στοχεύουν περισσότερο στην οικονομική βιωσιμότητα και στην κοινωνική ισοκατανομή.

Η αντίληψη για την βιωσιμότητα των κατασκευών ακολούθησε μια πορεία εξέλιξης τα τελευταία χρόνια. Αρχικά η βιωσιμότητα των κατασκευών αφορούσε τεχνικά κυρίως θέματα, όπως το είδος των υλικών, την εξοικονόμηση ενέργειας και την μείωση των γενικότερων επιπτώσεων στο περιβάλλον. Σήμερα η βιωσιμότητα των κατασκευών επεκτείνεται σε νέα μη-τεχνικά θέματα που αφορούν τα κοινωνικά και πολιτιστικά προβλήματα που συνδέονται με τις κατασκευές. (Γιαννακοπούλου n.d.)

<u>Η εξέλιξη της ιδέας της βιωσιμότητας (Διάγραμμα 3)</u>

***Στο παραδοσιακό κατασκευαστικό μοντέλο*** *(*κόκκινο τρίγωνο) οι παράγοντες που παίζουν ρόλο στην κατασκευαστική διαδικασία είναι το οικονομικό κόστος, η ποιότητα της κατασκευής και ο χρόνος.

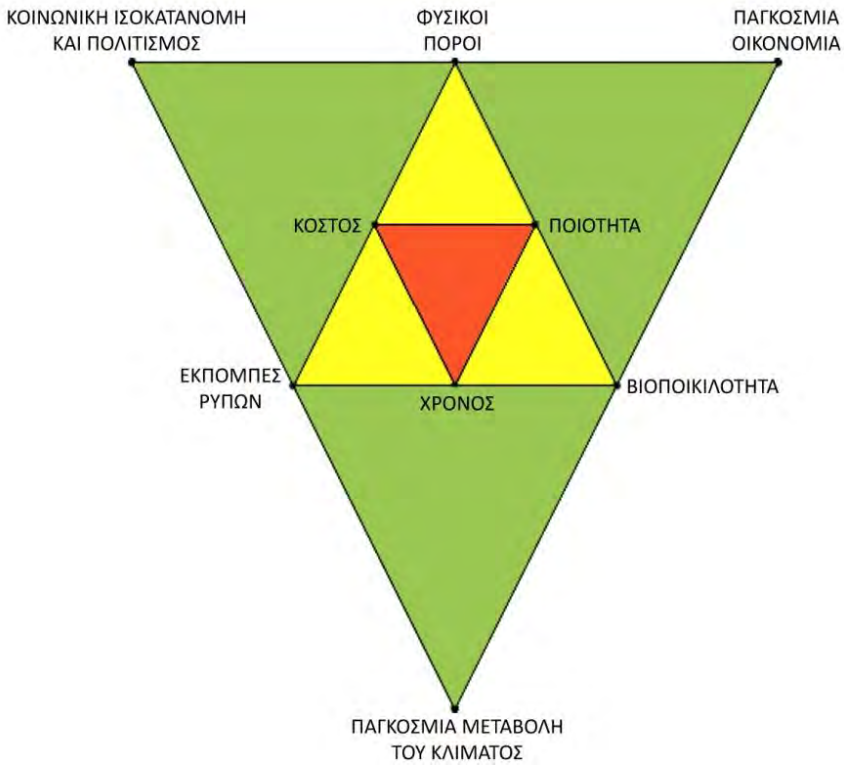
***Σε τοπική κλίμακα***, (κίτρινο τρίγωνο)*,* η βιωσιμότητα των κατασκευών εισάγει νέους επιπλέον παράγοντες και δημιουργεί ένα νέο μοντέλο (παράδειγμα) βάσει του οποίου πρέπει να κινηθεί ο κατασκευαστικός τομέας προκειμένου να βρίσκεται στα πλαίσια της βιώσιμης ανάπτυξης. Οι παράγοντες αυτοί αφορούν την χρήση των φυσικών πόρων, τις εκπομπές ρύπων στα στάδια της κατασκευής και της λειτουργίας και τις επιπτώσεις στα οικοσυστήματα (π.χ. μείωση της βιοποικιλότητας).

***Σε παγκόσμια κλίμακα,*** πράσινο τρίγωνο*,* εισάγονται και άλλοι παράγοντες που αφορούν το κοινωνικό σύνολο όπως η κοινωνική δικαιοσύνη και πολιτιστικά θέματα, το ευρύτερο οικονομικό περιβάλλον και η ποιότητα του περιβάλλοντος (π.χ. επιπτώσεις στη μεταβολή του κλίματος).

Ωστόσο, παρά τις υπάρχουσες διαφορές είναι δυνατόν να επισημανθούν κάποια γενικά στοιχεία που αφορούν τις βιώσιμες κατασκευές σε επίπεδο χώρας όπως:

- Η μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας
- Η ελάττωση της χρήσης των υλικών

- Η διαφύλαξη των φυσικών οικοσυστημάτων και της βιοποικιλότητας
- Η διατήρηση της ποιότητας του δομημένου περιβάλλοντος
- Η διατήρηση ή διαφύλαξη της ποιότητας του περιβάλλοντος των εσωτερικών χώρων.




**Διάγραμμα 3 Η εξέλιξη της ιδέας των βιώσιμων κατασκευών (Γιαννακοπούλου n.d.)**

Σε τοπικό επίπεδο, επισημαίνονται τα εξής πιο συγκεκριμένα θέματα και προβλήματα:

- Η ποιότητα των κατασκευών σε σχέση με την αξία της ιδιοκτησίας
- Η πρόβλεψη των αναγκών των χρηστών στο μέλλον, θέμα που σχετίζεται με την δυνατότητα των κατασκευαστών να προσαρμόζονται στα νέα δεδομένα της αγοράς ακινήτων
- Η δυνατότητα επέκτασης της χρήσης των ακινήτων
- Η χρήση τοπικών φυσικών πόρων π.χ. δομικών υλικών ή του ανθρώπινου δυναμικού

**Η σχέση ανάμεσα στη βιώσιμη δόμηση και στην οικολογική δόμηση**

**Η βιώσιμη δόμηση** – στην αριστερή πλευρά του κτιριακού φάσματος (Διάγραμμα 4) τοποθετείται η συμβατική δόμηση και στο δεξί άκρο η βιώσιμη δόμηση. Στην βιώσιμη δόμηση, κατά την διάρκεια της ζωής του κτιρίου, η χρήση των πόρων και η παραγωγή αποβλήτων είναι σε ισορροπία με τη φύση. Θα πρέπει επίσης να είναι οικονομικά βιώσιμη και κοινωνικά ισότιμη, πετυχαίνοντας έτσι τα «three E's» της βιωσιμότητας - «environment» περιβάλλον, «economy» οικονομία and «equity» ισότητα (El Feky 2006).

**Διάγραμμα 4 Το δομημένο φάσμα (El Feky 2006)**

**Η οικολογική δόμηση** – είναι το μονοπάτι από την συμβατική, στην βιώσιμη δόμηση (Διάγραμμα 4). Η πορεία αυτή εκπροσωπείται από τις "ανοικτού πράσινου" στρατηγικές ακριβώς στα δεξιά της συμβατικής δόμησης, "σκούρου πράσινου" στρατηγικές κοντά στην αειφόρο δόμηση στη δεξιά πλευρά του φάσματος και το "μεσαίου πράσινου" στρατηγικές μεταξύ των (El Feky 2006).

Συμπερασματικά, από προγενέστερες ερμηνείες ορισμών που εμπεριέχουν τις έννοιες περιβάλλον και δόμηση συμπεραίνουμε μία παρανόηση αυτών (πίνακας 1). Οικολογία , οικολογική αρχιτεκτονική και βιωσιμότητα είναι όροι που συχνά χρησιμοποιούνται λανθασμένα για να εκφράσουν το ίδιο πράγμα. Στην πραγματικότητα, θα μπορούσαν εύκολα να καθοριστούν και να κατηγοριοποιηθούν με βάση τον εκάστοτε κλάδο μελέτης (El Feky 2006).

- Η οικολογία είναι η πρώτη ορολογία της λίστας, ασχολείται με τον οικολογικό σχεδιασμό και περιλαμβάνει τα «eco-village», τις «eco cities» και την «Arcology», που αφορούν μόνο την προστασία του φυσικού περιβάλλοντος.
- Η οικολογική αρχιτεκτονική (Green architecture) είναι η δεύτερη ορολογία της λίστας και περιλαμβάνει την οικολογική δόμηση και την οικολογική κατασκευή, που αφορούν την προστασία του φυσικού περιβάλλοντος αλλά και την άνεση των ανθρώπων.
- Η βιωσιμότητα είναι η τρίτη ορολογία της λίστας, η οποία εκτός από την προστασία του φυσικού περιβάλλοντος και την άνεση του ανθρώπου, περιλαμβάνει και την οικονομική ανάπτυξη.

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Ecology**<br>• Eco-village<br>• Eco-city<br>• Arcology | Natural environment protection | | |
| **Green architecture**<br>• Green building<br>• Green construction | Natural environment protection | Human being comfort | |
| **Sustainability**<br>• Sustainable building<br>• Sustainable construction | Natural environment protection | Human being comfort | Economy |

**Πίνακας 1 Η σχέση των διαφορετικών ορολογιών (El Feky 2006)**

**Συμπεράσματα**

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι ο κοινός τόπος ανάμεσα στην Οικολογική αρχιτεκτονική και τη Βιωσιμότητα έχει να κάνει με θέματα που αφορούν την αναβάθμιση της ανθρώπινης άνεσης στο δομημένο περιβάλλον με το ελάχιστο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η διαφορά έγκειται στην διαφορετική οικονομική πολιτική που ακολουθούν.

Από την μία πλευρά, η οικολογική αρχιτεκτονική χρησιμοποιεί πληθώρα πρακτικών, που στηρίζονται σε τεχνολογίες υψηλής αποδοτικότητας. Επειδή όμως δεν υπάρχουν ιδεατά υλικά, η πρακτικές αυτές ενσωματώνουν μεγάλα ποσοστά ενέργειας κατά τη διάρκεια της παραγωγής τους, αυξάνοντας έτσι πολύ το κόστος της κατασκευής. Αυτό σημαίνει ότι είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός μεγάλου αρχικού κεφαλαίου, πράγμα που στις μέρες μας δεν είναι εφικτό και αποτελεί τροχοπέδη της ανάπτυξής της.

Η βιωσιμότητα, από την άλλη πλευρά, εντάσσει πιο ειδικευμένες διαδικασίες με σκοπό να πετύχει ισορροπία σε όλα τα σταδία ζωής ενός κτηρίου, σε οικονομική, περιβαλλοντική και κοινωνική διάσταση. Αυτό καθιστά δύσκολη την επίτευξη της, καθώς εμπλέκονται πολλοί παράγοντες και πολλά διαφορετικά συμφέροντα.

Τέλος, μια βιώσιμη κοινωνία δεν μπορεί να δημιουργηθεί χωρίς να υπάρχουν οι βάσεις για μία οικολογική βιομηχανία δόμησης χαμηλού κόστους. Στην επόμενη ενότητα θα παρουσιαστούν οι εισροές και εκροές στον κύκλο ζωής ενός κτηρίου. Από την συλλογή της πρώτης ύλης και την παραγωγή των δομικών υλικών, μέχρι την κατασκευή, χρήση και

απόρριψη ενός κτηρίου. Σκοπός είναι να διατυπωθούν οι προϋποθέσεις που επιτρέπουν την επίτευξη μιας τέτοιας βιομηχανίας.

## 3. Βιομηχανία δόμησης

Τα οικοδομικά υλικά σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής τους αποτελούν κρίσιμη παράμετρο για την υλοποίηση των περιβαλλοντικά φιλικών δομικών κατασκευών. Για τον προσδιορισμό της περιβαλλοντικής ποιότητας των υλικών είναι απαραίτητο να έχουμε στη διάθεσή μας πληροφορίες για τη διαθεσιμότητα και την επάρκεια των φυσικών πόρων από τους οποίους προέρχονται, την ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή και στα υπόλοιπα στάδια του κύκλου ζωής τους, τις ανάγκες συντήρησης, την περιεκτικότητά τους σε υλικά που προέρχονται από ανακύκλωση, καθώς και τη δυνατότητά τους για επαναχρησιμοποίηση ή ανακύκλωση. Το επιθυμητό είναι να υπάρχουν πλήρη στοιχεία για κάθε οικοδομικό υλικό, για όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του, ώστε να είναι δυνατή η αξιολόγηση και επιλογή των υλικών εκείνων που έχουν τη μικρότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση. (Τομπά 2005)

Για την παραγωγή του δομημένου περιβάλλοντος εντοπίζονται τρεις τομείς τεχνολογικής έρευνας και ανάπτυξης που μπορούν να ονομαστούν ως ‘οικοδομικές τεχνολογίες’ (Γεωργιάδου 1996):

- Οι τεχνολογίες οικοδομικών υλικών αναφέρονται στην προέλευση, στη σύσταση και στα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιούνται στη δόμηση. Οι περιβαλλοντικές ιδιότητες των οικοδομικών υλικών είναι αυτές που καθορίζουν την ποιότητα του δομημένου χώρου και θα έπρεπε να καθορίζουν και τις τεχνολογίες παραγωγής, όπως και τις τεχνολογίες δόμησης.

- Οι τεχνολογίες παραγωγής οικοδομικών υλικών αναφέρονται σε μεθόδους και συστήματα παραγωγής, οι οποίες είναι άρρηκτα δεμένες με τη χημική βιομηχανία και τη βιομηχανία συνολικά. Κατά συνέπεια, το ζήτημα της καθαρότητας των τεχνολογιών παραγωγής οικοδομικών υλικών δεν μπορεί να εξεταστεί χωριστά από την επιδίωξη ανάπτυξης καθαρών τεχνολογιών στο σύνολο της βιομηχανίας.

- Οι τεχνολογίες δόμησης των κτηρίων καθορίζονται από τα υλικά δόμησης, καθώς αποτελούν συγκεκριμένες κατασκευαστικές

μεθόδους και συστήματα κατασκευών, που διαφοροποιούνται από υλικό σε υλικό. Παρ' όλα αυτά, θα πρέπει με στόχο την εξασφάλιση της καθαρότητάς τους να υπόκεινται σε ορισμένες αρχές.

Η φιλικότητα των οικοδομικών τεχνολογιών προς το περιβάλλον εξαρτάται από τέσσερεις βασικούς παράγοντες (Γεωργιάδου 1996):

- από την ανανεωσιμότητα και επάρκεια των αποθεμάτων από τα οποία προέρχονται,
- από την ποσότητα ενέργειας που καταναλώνουν σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής τους,
- από τις ποσότητες των ανακυκλώσιμων απορριμμάτων που παράγονται,
- από το βαθμό των τοξικών και οικοτοξικών επιδράσεων που ασκούν στην εσωτερική ποιότητα του αέρα των κτηρίων, στην υγεία των χρηστών και στο περιβάλλον.

**Επάρκεια των αποθεμάτων**

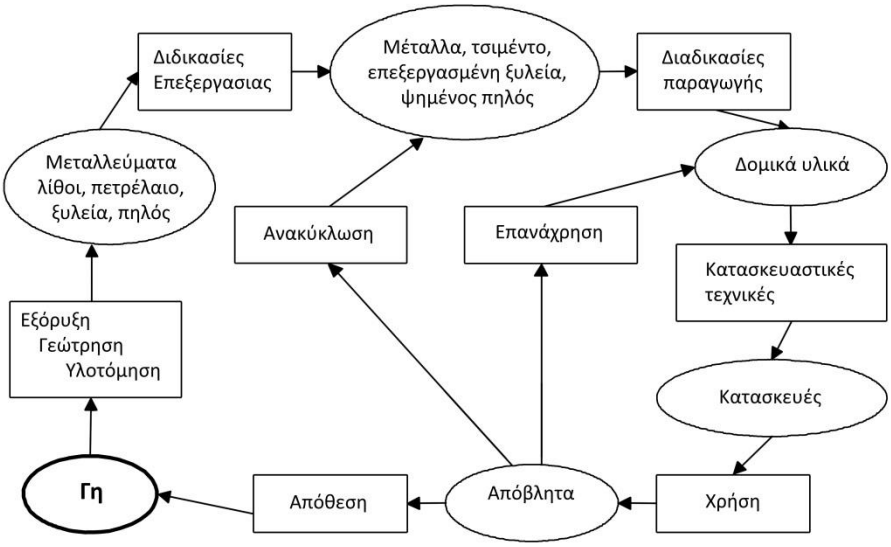
Τα αποθέματα της γης διακρίνονται σε 'ανανεώσιμα' και 'μη ανανεώσιμα'. Τα ανανεώσιμα αποθέματα είναι αυτά που μπορούν να ανανεώνονται διαρκώς. Ο κύκλος ζωής των υλικών παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 5 .

Η κατασκευαστική βιομηχανία είναι ο μεγαλύτερος καταναλωτής ακατέργαστων πρώτων υλών μετά τη βιομηχανία τροφίμων (Berge 2009). Μία σημαντική αρχή για τη διατήρηση των αποθεμάτων είναι :

- η μείωση της χρήσης των φυσικών πόρων, ιδιαίτερα των μη ανανεώσιμων,
- η μείωση των απωλειών υλικών κατά τη διάρκεια της παραγωγής, της κατασκευής και κατά τη διάρκεια ζωής των κτηρίων,
- η επανάχρηση των υλικών μετά από κατεδαφίσεις, και
- η ανακύκλωση των υλικών.

<u>Ανανεώσιμα φυσικά υλικά φυτικής προέλευσης</u>

Τα ανανεώσιμα φυσικά υλικά αναπαράγονται διαρκώς με φυσικούς μηχανισμούς εφόσον δεν διαταράσσεται το οικολογικό ισοζύγιο. Για την εκμετάλλευσή τους πρέπει να οργανώνεται η καλλιέργεια τους ώστε η ταχύτητα της συγκομιδής τους να μην υπερβαίνει την ταχύτητα βιολογικής παραγωγής τους, το οποίο σημαίνει ότι απαιτείται οργάνωση και έλεγχος της δασικής παραγωγής.




**Διάγραμμα 5 Διαγραμματική απεικόνιση του κύκλου των υλικών**

Φυσικοί πόροι εδάφους και υπεδάφους

Τα φυσικά μη-ανανεώσιμα υλικά πρέπει να χρησιμοποιούνται με μέτρο ώστε να συνεχίσουν να υφίστανται. Οι ποσότητες των φυσικών πόρων που υπάρχουν στη γη, παρόλο που για την ανθρώπινη κλίμακα φαίνονται μεγάλες ώστε να θεωρούνται ανεξάντλητες, είναι σαφώς περιορισμένες. Επιπλέον, ο παράγοντας που περιορίζει καθοριστικά τη δυνατότητα εκμετάλλευσης του συνόλου των φυσικών πόρων είναι το γεγονός ότι δεν είναι προσιτά όλα τα κοιτάσματά τους, αλλά μόνο μικρές ποσότητές τους, και μάλιστα αυτά που βρίσκονται στην ανώτερη ζώνη του γήινου φλοιού. Τα τμήματα αυτά ονομάζονται αποθέματα των φυσικών πόρων, τα οποία έχουν περιορισμένες ποσότητες του συνόλου των φυσικών πόρων. (Δημουδη 2006)

*Αποθέματα πετρωμάτων*

Όσον αφορά τα αποθέματα των πετρωμάτων δεν υπάρχει οξύ πρόβλημα εξάντλησης, παρά το γεγονός ότι για ορισμένα από αυτά παρατηρείται αξιοσημείωτη μείωση π.χ. για τα ασβεστολιθικά πετρώματα που αποτελούν το 80% της μάζας του σκυροδέματος. Υλικά που υπάρχουν σε αφθονία στην κλίμακα του τοπικού περιβάλλοντος μπορούν να

χρησιμοποιηθούν υπό τον όρο ότι η εξόρυξή τους δεν προκαλεί αισθητική υποβάθμιση[5] (Gauzin-Muller 2003).

*Αποθέματα μεταλλευμάτων*

Όσον αφορά τα αποθέματα μεταλλευμάτων, το πρόβλημα είναι οξύτερο. Για τουλάχιστον 18 από τα 80 μέταλλα υπάρχει ένα ενδεχομένως σημαντικό πρόβλημα αποθεμάτων ακόμη και αν ληφθούν υπόψη οι δυνατότητες ανακύκλωσής τους. Ορισμένα από αυτά πρέπει να χαρακτηριστούν ως προστατευόμενοι πόροι, επειδή τα αποθέματά τους εξαντλούνται με ταχύτατους ρυθμούς. (Δημουδη 2006)

Η ορθολογική διαχείριση και η εξοικονόμηση των αποθεμάτων των φυσικών πόρων που προέρχονται από τη γη, επιβάλλει τη λήψη μέτρων που πρέπει να βασίζονται στις ακόλουθες αρχές (Γεωργιάδου 1996):

- περιορισμός της χρήσης τους μόνο στους τομείς όπου είναι αναντικατάστατοι,
- αντικατάστασή τους όπου είναι δυνατόν από ανανεώσιμους φυσικούς πόρους,
- πλήρης αξιοποίηση των ιδιοτήτων τους, των ποσοτήτων τους (αξιοποίηση υπολειμμάτων κατεργασίας), επιμήκυνση του χρόνου χρήσης τους, ανακύκλωση και επανάχρηση.

**Εμπεριεχόμενη ενέργεια**

Ένα σημαντικό μέγεθος που χαρακτηρίζει τα υλικά είναι το ποσό της ενέργειας που καταναλώθηκε για την παραγωγή τους, από το στάδια της λήψης των πρώτων υλών από τη φύση, τη μεταφορά τους στο εργοστάσιο, τη βιομηχανική κατεργασία τους έως τη μεταφορά και τοποθέτησή τους στην κατασκευή. Το χαρακτηριστικό αυτό μέγεθος αναφέρεται ως '**εμπεριεχόμενη ενέργεια δομικών υλικών και στοιχείων'** και αποτελείται από την (Δημουδη 2006):

- **Κατανάλωση ενέργειας κατά την παραγωγή των δομικών υλικών**
  - Άμεση κατανάλωση ενέργειας για την εξόρυξη των πρώτων υλών και την παραγωγική διαδικασία, η οποία εξαρτάται από τους διαφορετικούς τύπους μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται σε αυτήν.
  - Δευτερογενής κατανάλωση ενέργειας κατά την παραγωγική διαδικασία, η οποία αναφέρεται στην κατανάλωση ενέργειας

[5] Οι εξορύξεις άμμου και η παραγωγή σκύρων για την οικοδομική δραστηριότητα το 1950 πλησίαζαν τα 17 εκατ. τόνους στη Γαλλία, και το 2000 ξεπέρασαν τα 400 εκατ. τόνους, προκαλώντας σημαντική αισθητική υποβάθμιση του φυσικού τοπίου (Gauzin-Muller 2003)

για τη λειτουργία της παραγωγικής μονάδας, π.χ. του συστήματος θέρμανσης, δροσισμού, φωτισμού, συντήρηση των μηχανημάτων.
  - Ενέργεια για τη μεταφορά των πρώτων υλών[6] και των επεξεργασμένων δομικών υλικών, η οποία εξαρτάται από την ύπαρξη των πρώτων υλών σε τοπική κλίμακα, τον τρόπο και την απόσταση μεταφοράς τους.

- **Ενέργεια κατά την κατασκευή, χρήση και κατεδάφιση των κτηρίων**
  - Ενέργεια για τη μεταφορά των δομικών προϊόντων από τον τόπο παραγωγής τους στον τόπο της κατασκευής. Η ενέργεια αυτή είναι σημαντικά μικρότερη για υλικά που παράγονται σε τοπική κλίμακα σε σχέση με υλικά που εισάγονται από μακρινές χώρες.
  - Ενέργεια κατά την κατασκευή, η οποία απαιτείται από τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται στα διάφορα στάδια της.
  - Ενέργεια για τη συντήρησή τους καθώς υπάρχει η φυσική φθορά των δομικών υλικών με το χρόνο.
  - Ενέργεια για την αποσύνδεση ή απομάκρυνση των υλικών κατά την κατεδάφιση, η οποία εκτιμάται ότι είναι περίπου το 10% της ενέργειας που εμπεριέχεται στα διαφορετικά δομικά υλικά.

Η εμπεριεχόμενη ενέργεια εκφράζεται σε kWh ή MJ, και συνοδεύεται από τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν την ποσότητα αερίων ρύπων $CO_2$ και $SO_2$ που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα.

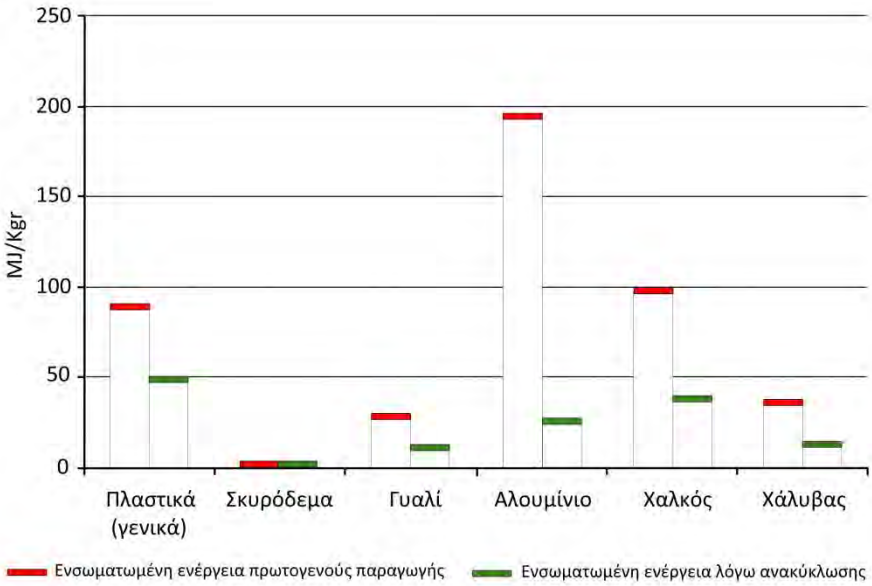
**Ανακύκλωση**

Η ανακύκλωση είναι μία απόπειρα να μιμηθεί ο άνθρωπος τους κύκλους της φύσης, οι οποίοι γενικά αποτελούν θετικά παραδείγματα αποτελεσματικής λειτουργίας και σταθερότητας. Πραγματικά οι φυσικοί κύκλοι δε χρειάζονται τροφοδότηση με πρώτες ύλες και δεν δημιουργούν απόβλητα. Είναι λοιπόν υπόδειγμα τέλειας ανακύκλωσης (Σαργέντης 2005).

Γενικά ισχύει η αρχή ότι τα υλικά που έχουν μικρή διαδικασία βιομηχανικής παραγωγής ανακυκλώνονται εύκολα. Δηλαδή σε υλικά που

[6] Για εγχώρια υλικά οι αποστάσεις μεταφοράς είναι σχετικά μικρές – της τάξης των 0 – 500 χιλ. Αυτά είναι συνήθως απλά υλικά, όπως το ξύλο, οι λίθοι ή οι πλίνθοι. Για τα υλικά υψηλής τεχνολογίας, όπως τα μέταλλα και τα πλαστικά οι αποστάσεις μπορεί να είναι πολύ μεγάλες - της τάξης των 4.000 – 5.000 χιλ. (Γεωργιάδου 1996)

έχει επέμβει σημαντικά ο ανθρώπινος παράγοντας τα με πολύπλοκες διαδικασίες (υψηλές θερμοκρασίες και σύνθετες χημικές αντιδράσεις) είναι δύσκολο να ανακυκλωθούν. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της ιδιότητας αυτής αποτελούν τα πλαστικά. Αναμφίβολα τα υλικά που βιοδιασπώνται είναι τα καλύτερα και γηράσκουν ομαλά, ακολουθώντας τη ροή και τους χρόνους της φύσης (Σαργέντης 2005).




**Διάγραμμα 6 Ενσωματωμένη ενέργεια λόγω ανακύκλωσης (Σαργέντης 2005)**

Σήμερα, πολλές φορές η κατασκευή γίνεται αποδέκτης υλικών «απορριμμάτων» και τα υλικά που εντάσσονται μέσα σε αυτή έχουν προκύψει από κάποια άλλη παραγωγική διαδικασία.

Όσον αφορά στις υπάρχουσες κατασκευές τα υλικά που μπορούν να ανακυκλωθούν είναι:

- Δομικά στοιχεία από λίθους χωρίς κονίαμα (ξερολιθιά)
- Ορισμένα μονωτικά (εφ' όσον δεν έχουν υποστεί γήρανση και είναι σε καλή κατάσταση)
- Ξυλεία φέροντος οργανισμού κ.λ.π.
- Προϊόντα γύψου (γυψοσανίδες κ.λ.π.)
- Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν δομικά στοιχεία όπως πόρτες παράθυρα, αλλά και είδη υγιεινής και έπιπλα .

Τούβλα, τσιμέντο και σκυρόδεμα είναι βέβαιο ότι δεν ανακυκλώνονται εύκολα ούτε μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν σε νέες κατασκευές. Είναι δυνατή όμως η επεξεργασία τους και η επαναχρησιμοποίηση[7] τους σαν υλικά διαμόρφωσης οριζόντιων επιφανειών και υλικών οδοποιίας.

**Η ποιότητα του αέρα των εσωτερικών χώρων**

Η χρήση συνθετικών δομικών προϊόντων στα κτήρια και ο ελλιπής αερισμός για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας, έχουν συντελέσει, κατά τις τελευταίες δύο δεκαετίες, σε προβλήματα υγείας των ενοίκων των κτηρίων. Το σύνολο των συμπτωμάτων υγείας που παρατηρούνται, είναι γνωστά ως «σύνδρομο άρρωστων κτηρίων» (sick building syndrome) και περιλαμβάνει ρινικά, αλλεργικά, αναπνευστικά και γενικότερα προβλήματα υγείας. (Δημουδη 2006)

Η ποιότητα του εσωτερικού αέρα επηρεάζεται από την ποιότητα του εξωτερικού αέρα και την εσωτερική παραγωγή ρύπων, οι οποίοι οφείλονται στα δομικά υλικά, τα έπιπλα, τα χρώματα και τις ανθρώπινες δραστηριότητες (π.χ. μαγείρεμα, καθαρισμός χώρου, κάπνισμα).

Τέτοιοι ρύποι είναι για παράδειγμα η φορμαλδεΰδη η οποία βρίσκεται στα συνθετικά υλικά των δαπέδων, μοκετών, καθώς και σε μονωτικά υλικά, σε έπιπλα με επικίνδυνες κόλλες, καθώς και στα τσιγάρα, το διοξείδιο άνθρακα που παράγεται κατά την καύση των ορυκτών καυσίμων (πετρελαίου), το μονοξείδιο του άνθρακα, τα οξείδια του αζώτου, ο αμίαντος που θεωρείται καρκινογόνος και βρίσκεται σε πολλά μονωτικά υλικά, τεχνητές ορυκτές ίνες οι οποίες περιέχονται κυρίως σε μονωτικά υλικά όπως ο πετροβάμβακας και ο υαλοβάμβακας ,τα αιωρούμενα στερεά σωματίδια. Εκτός από τους παραπάνω ρύπους που είναι χημικοί υπάρχουν και οι βιολογικοί ρύποι όπως οι μύκητες, ιοί, βακτηρίδια (ασθένεια των λεγεωνάριων) καθώς και οι φυσικοί όπως το ραδόνιο[8] που έχει καρκινογόνο δράση, βρίσκεται στο έδαφος και εισχωρεί στους

---

[7] Η επαναχρησιμοποίηση οικοδομικών υλικών έχει αποδειχθεί ότι μπορεί να μειώσει μέχρι και 95% την ενσωματωμένη ενέργεια των υλικών η οποία διαφορετικά θα χανόταν ως απόβλητο. Μερικά υλικά όμως, όπως τα τούβλα, είναι δύσκολο να επαναχρησιμοποιηθούν.

[8] Το ραδόνιο είναι ένα φυσικό ραδιενεργό αέριο, το οποίο εκλύεται από το ράδιο που υπάρχει στο έδαφος και τα πετρώματα της γης. Είναι άοσμο, χωρίς γεύση και άχρωμο και ανήκει στην ομάδα των ευγενών αερίων. Ως εκ τούτου είναι χημικά αδρανές. Λόγω των βιολογικών επιπτώσεων του, το ραδόνιο θεωρείται ισχυρός καρκινογόνος παράγων και κατατάσσεται στην κορυφή της αντίστοιχης οργάνωσης σύμφωνα με το Διεθνές Οργανισμό Υγείας (ΕΕΑΕ 2005).

εσωτερικούς χώρους μέσω των υπόγειων χώρων ή εκπέμπεται από διάφορα δομικά υλικά (Αδαμοπούλου 2013).

Για να εξασφαλιστεί καλής ποιότητας αέρας στους εσωτερικούς χώρους, θα πρέπει να γίνεται ανανέωση του αέρα ανάλογα με τη χρήση των χώρων. Η σωστή ανανέωση του αέρα μπορεί να γίνεται με τους παρακάτω τρόπους:

- Μέσω υποβοηθούμενης δημιουργίας ρεύματος αέρα με εγκαταστάσεις αερισμού ή ανεμιστήρων
- Μέσω της φυσικής ροής αέρα από τα ανοίγματα. Ενδείκνυται ο διαμπερής αερισμός

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι η χρήση πολυμερών μονωτικών και χρωμάτων έχουν μειώσει αισθητά την ικανότητα διαπνοής του κτηρίου. Η χρήση φυσικής προέλευσης προϊόντων (χώμα, φυσικά μονωτικά) και χρωμάτων που επιτρέπουν την διαπνοή του κελύφους βελτιώνουν την ποιότητα του αέρα στο εσωτερικό (Minke 2006).

**Ανάλυσης κύκλου ζωής στον κτιριολογικό σχεδιασμό (Μυλωνάς n.d.)**

Η Α.Κ.Ζ. στον κτιριοδομικό σχεδιασμό έχει ως στόχο να εισάγει και να μελετήσει τις περιβαλλοντικές παραμέτρους των διαφόρων φάσεων του κύκλου ζωής των κτηρίων και των στοιχείων που το συνθέτουν. Οι περιβαλλοντικοί παράμετροι προσδιορίζονται βάσει των εισροών υλικών και ενέργειας στο σύστημα-κτήριο και μελετώνται βάσει των εκροών σε ατμοσφαιρικούς ρύπους, στερεά και υγρά απόβλητα. Η δομή και το μοντέλο της ανάλυσης του κύκλου ζωής (Α.Κ.Ζ), προδιαγράφεται σήμερα από το διεθνή πρότυπο ISO 14041, σύμφωνα με το οποίο αναλύονται όλες οι φάσεις για τη σωστή εφαρμογή του.

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας της ανάλυσης του κύκλου ζωής προϋποθέτει την αναγνώριση των εισροών και εκροών για το υπό εξέταση σύστημα, δηλαδή το κτήριο. Οι εισροές για το κτήριο αφορούν σε δομικά υλικά και ενέργεια, ενώ οι εκροές σε εκπομπές στερεών, υγρών και αέριων ρύπων. Στον πίνακα που ακολουθεί προσδιορίζονται τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά που συνθέτουν τις εισροές – εκροές για τις φάσεις του κύκλου ζωής των κτηρίων.

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των εισροών – εκροών του συστήματος κτήριο, περιλαμβάνουν θετικές και αρνητικές επιπτώσεις στο φυσικό – ατμοσφαιρικό περιβάλλον και τον άνθρωπο, οι οποίες θα πρέπει να μελετηθούν με βάση τη σπουδαιότητα τους (Πίνακας 2).

| Φάσεις κύκλου ζωής | Εισροές | Εκροές |
|---|---|---|
| Παραγωγή δομικών υλικών | Πρώτες ύλες, ενέργεια, διεργασίες, άλλαυλικά, πρόσμεικτα, πόρους | Αέριες εκπομπές, στερεά απορρίμματα,υγρά απόβλητα, παραπροϊόντα |
| Μεταφορές δομικών υλικών | Καύσιμα - ενέργεια | Αέριες εκπομπές |
| Διαδικασία κατασκευής κτιρίων | Καύσιμα - ενέργεια, υλικά, διεργασίες, πόρους | Αέριες εκπομπές, στερεά απορρίμματα |
| Λειτουργία κτιρίου | Ενέργεια, υλικά, διεργασίες, πόρους | Αέριες εκπομπές, υγρά απορρίμματα |
| Αποδόμηση - κατεδαάφιση | Καύσιμα - ενέργεια, διεργασίες | Αέριες εκπομπές, στερεά απορρίμματα, υλικά |

**Πίνακας 2 Αναγνώριση εισροών – εκροών για τις φάσεις του κύκλου ζωής κτιρίων (Μυλωνάς n.d.)**

Οι δυνατότητες εφαρμογής και χρήσης των αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα της μερικής ή ολικής εφαρμογής της Α.Κ.Ζ. στον κτιριοδομικό σχεδιασμό μπορούν να αξιοποιηθούν βασικά ως στοιχεία περιορισμού των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνεπάγεται η κατασκευή ενός κτηρίου. Έχοντας τη δυνατότητα της μελέτης εναλλακτικών λύσεων – εφαρμογών, μπορεί ο μελετητής να επιλέξει αυτή τη λύση, η οποία συνδυάζει λύσεις χαμηλότερου κόστους και οικολογικής απόδοσης. Ειδικότερα οι δυνατότητες της εφαρμογής και χρήσης των αποτελεσμάτων εντοπίζονται στα παρακάτω (Μυλωνάς n.d.):

- Στον εντοπισμό υλικών με χαμηλότερες περιεκτικότητες σε εμπεριεχόμενη ενέργεια και αντίστοιχες ισοδύναμες εκπομπές αέριων ρύπων.
- Στον σχεδιασμό νέων δομικών υλικών εφόσον τα ήδη διαθέσιμα δεν ικανοποιούν τις ανάγκες και τους στόχους ένταξης περιβαλλοντικών κριτηρίων στον κτιριοδομικό σχεδιασμό.
- Στον σχεδιασμό κτηρίων με περιβαλλοντικά κριτήρια και ειδικότερα, στον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συμβαίνουν από τις αρχικές φάσεις του κτηρίου πριν ακόμη τη λειτουργία του.
- Στον χαρακτηρισμό και στη σήμανση των κτηρίων ως προς τα περιβαλλοντικά τους γνωρίσματα ακόμη και από τα αρχικά στάδια του σχεδιασμού τους.

**Συμπεράσματα - Προϋποθέσεις για μία οικολογική βιομηχανία δόμησης:**

Από όλα τα παραπάνω αντιλαμβανόμαστε ότι για να υπάρξει μία οικολογική βιομηχανία δόμησης θα πρέπει να κινηθούμε προς τις παρακάτω κατευθύνσεις:

- **Η τοποθεσία**

Οι βιομηχανίες πρέπει να αποκεντρωθούν σε μικρές βιοτεχνίες και ειδικότερα κοντά στα σημεία που υπάρχει η πρώτη ύλη. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται ο αριθμός των σημείων παραγωγής, ανακατανέμοντας την επιβάρυνση της φύσης σε περισσότερα μέρη επιτρέποντάς της να αντιδράσει (Berge 2009). Επίσης με αυτόν τον τρόπο μειώνονται οι μεγάλες αποστάσεις διανομής και οι ακόλουθες επιπτώσεις τους. Η χρήση κινητών μονάδων είναι και αυτή μία αρκετά αποδοτική λύση (Berge 2009).

- **Οι πρώτες ύλες**

Η χρήση των πρώτων υλών θα πρέπει να βασίζεται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή πλούσια αποθέματα, με προϊόντα που είναι εύκολα να ανακυκλωθούν και οικονομικά στην εύρεσή τους, στην επεξεργασία και στην κατασκευή τους (Berge 2009). Οι τοπικές πρώτες ύλες είναι μια ιδανική λύση για κάθε τόπο.

- **Η γραμμή παραγωγής**

Πρέπει να δοθεί προτεραιότητα σε τεχνικές παραγωγής που καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια και πιο βιώσιμα υλικά, με μικρές αποστάσεις μεταφοράς. Επίσης, θα πρέπει να αποφευχθούν οι ρυπογόνες βιομηχανικές διαδικασίες και να μειωθούν στο ελάχιστο αυτές που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα (Berge 2009).

- **Οι τεχνικές κατασκευής**

Είναι αναγκαία η επιλογή τεχνικών κατασκευής που καταναλώνουν μικρά ποσοστά ενέργειας και επιτρέπουν την ολική ή μερική επαναχρησιμοποίηση των υλικών.

Οι τεχνικές δόμησης με ωμή γη, όπως παρουσιάζονται και στην παρακάτω ενότητα, πληρούν τις περισσότερες από τις παραπάνω προϋποθέσεις καθώς:

- Οι πρώτες ύλες συλλέγονται από τον χώρο της οικοδομής ή από κοντινή απόσταση και δεν χρειάζονται μεγάλη επεξεργασία
- Η παραγωγή των δομικών υλικών γίνεται στον χώρο της οικοδομής με χειροκίνητες ή μηχανοκίνητες διαδικασίες χαμηλής ενέργειας
- Και το τελικό αποτέλεσμα είναι πλήρως ανακυκλώσιμο

Οι τεχνικές αυτές κατασκευής ενσωματώνουν μικρά ποσά ενέργειας στο κτήριο και ως αποτέλεσμα παράγουν λιγότερα ποσά $CO_2$ και $SO_2$. Σε αντίθεση αυτών, στις αναπτυγμένες περιοχές που η χειρονακτική

εργασία είναι πιο ακριβή το κόστος τους καταλήγει να φτάνει ή και να ισοσταθμίζει μερικές φορές με τις συμβατικές κατασκευές.

Η βιομηχανοποίηση αυτών των τεχνικών θα μπορούσε να εξαλείψει τα παραπάνω αρνητικά στοιχεία. Ένα από τα ζητούμενα της επόμενης ενότητας είναι να αναζητηθεί η δυνατότητα μίας τέτοιας προοπτικής.

## 4. Δόμηση από ωμή γη

Το χώμα είναι, ακόμα και σήμερα, το δεύτερο πιο διαδεδομένο οικοδομικό υλικό στον κόσμο μετά το Μπαμπού. Περισσότερο από το 30% του παγκόσμιου πληθυσμού ζεί σε σπίτια από χώμα. (Berge 2009)

Περίπου το 50% του πληθυσμού των αναπτυσσόμενων χωρών, συμπεριλαμβανομένων της πλειοψηφίας του αγροτικού πληθυσμού και τουλάχιστον το 20% του αστικού , ζουν σε χωμάτινες κατοικίες. Σε γενικές γραμμές, αυτού του τύπου η κατασκευές έχουν χρησιμοποιηθεί κυρίως από αγροτικούς πληθυσμούς χαμηλού εισοδήματος. (Blondet, Garcia and Brzen 2003)

Τα πιο σημαντικά περιβαλλοντικά επιχειρήματα για την δόμηση με χώμα είναι τα εξής (Berge 2009):

- **Βασίζεται σε έναν πόρο που αφθονεί** σχεδόν σε όλες τις χώρες. Σε πολλές περιπτώσεις το υλικό μπορεί να ανασκαφεί από το οικόπεδο.
- Απαιτεί μακράν **λιγότερη ενέργεια** από ότι χρειάζεται για κτήρια από σκυρόδεμα ή οπτόπλινθους
- εάν εφαρμοστεί σωστά, **έχει μεγάλη διάρκεια ζωής**.
- Βασίζεται σε λογικές και απλές μεθόδους δόμησης που επιτρέπουν τις **«Do It Yourself» κατασκευές.**
- **παρέχει καλό κλίμα εσωτερικού χώρου** λόγω των ιδιοτήτων ρύθμισης της θερμοκρασίας και της υγρασίας
- τα άψητα υλικά χώματος **μπορούν να επιστραφούν στην φύση ευκολότερα** από κάθε άλλο υλικό.

Αυτά είναι κάποια πολύ σημαντικά επιχειρήματα τα οποία ικανοποιούν πολλές από τις προϋποθέσεις της βιωσιμότητας στην κατασκευή. Ο πόρος αφθονεί στην φύση και θα μπορούσε να βρεθεί ακόμα και κατά την διάρκεια εκσκαφής για τα θεμέλια ενός κτιρίου στο ίδιο το οικόπεδο. Η δόμηση από χώμα θα μπορούσε να τονώσει την τοπική οικονομία, καθώς

μειώνει τις εισαγωγές των προϊόντων δόμησης και τις μεταφορικές επιβαρύνσεις. Επίσης ωφελεί και την τοπική κοινωνία μπορεί να εφαρμοστεί χωρίς να απαιτείται κάποια ιδιαίτερη τεχνογνωσία.Τέλος, μπορεί να κλείσει ένα κύκλο ζωής χωρίς πολλές επιβαρύνσεις στο περιβάλλον και να χρησιμοποιηθεί ξανά χωρίς μεγάλη επεξεργασία. Από όλα τα παραπάνω δημιουργείται ένα εύλογο ερώτημα:

***Ποιοι είναι οι λόγοι που το υλικό αυτό δεν χρησιμοποιείται ευρέως;***

Σε αυτήν την ενότητα θα προσπαθήσουμε να δώσουμε απάντηση στην παραπάνω ερώτηση και θα προτείνουμε ένα βιώσιμο πλάνο ανάπτυξης για να μπορέσει να επιτευχθεί η ευρύτερη χρήση αυτού του υλικού. Τα βήματα που θα ακολουθήσουμε είναι τα παρακάτω:

- Θα γίνει μία σύντομη **ιστορική αναφορά** και εντοπισμός του αρχιτεκτονικού έργου από χώμα ανά τον κόσμο.
- Θα εντοπιστούν τα **βασικά χαρακτηριστικά**
- Θα αναλύσουμε τις **βασικές τεχνικές δόμησης με ωμή γη**
- Θα εντοπιστούν οι **δυνατότητες βιομηχανικής ανάπτυξης**
- Και θα προταθεί ένα **βιώσιμο μοντέλο βιομηχανικής ανάπτυξης**

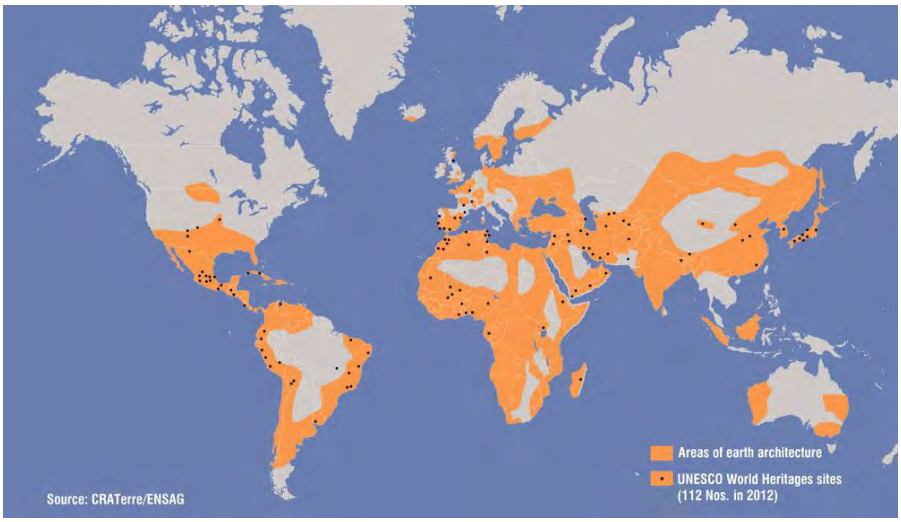
**Ιστορική αναφορά (Berge 2009)**

Η δόμηση με χώμα πιθανολογείται πως χρησιμοποιείται για πάνω από 10.000 χρόνια. Οι παλαιότερες πλιθιές που βρέθηκαν, αποξηραμένες στον ήλιο, προέρχονται από μια περιοχή που βρίσκεται στην άνω λεκάνη του Τίγρη, και χρονολογούνται από το 7500πχ. Σε τάφο στη Γκίζα της Αιγύπτου υπάρχουν ίχνη ωμόπλινθων ηλικίας 5000 ετών.

Λόγω της αφθονίας του, το χώμα έχει χρησιμοποιηθεί για το μεγαλύτερο μέρος της «αρχιτεκτονικής χωρίς αρχιτέκτονες». Υπάρχουν πολλά ιστορικά παραδείγματα πόλεων κατασκευασμένων αποκλειστικά από χώμα, από την Ιεριχώ ως το Timbuctoo, Το Σινικό Τείχος της Κίνας, είναι εν μέρει κατασκευασμένα από χώμα. Στο Περού και στην Χιλή, οι Ίνκας γνώριζαν αυτές τις τεχνικές δόμησης πολύ πριν από τους ευρωπαίους. Κατασκευές από χώμα μπορούν να βρεθούν στις περισσότερες πολιτισμικές περιόδους της παγκόσμιας ιστορίας.

Η δόμηση με χώμα, στην κεντρική Ευρώπη, ήκμασε από το τέλος του δέκατου όγδοου αιώνα και συνεχίστηκε μέχρι τα τέλη του δέκατου ένατου αιώνα. Μετά τον Πρώτο και Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο τα χωμάτινα σπίτια έγιναν δημοφιλή για άλλη μια φορά. Πόλεις και χωριά στη Ρωσία

που καταστράφηκαν από τις μάχες ξαναχτίστηκαν με Rammed Earth, και στη Γερμανία περίπου 100.000 χωμάτινα σπίτια έχουν διατηρηθεί ακόμα από αυτές τις περιόδους.




**Εικόνα 1 Χάρτης εντοπισμού αρχιτεκτονικού έργου από χώμα (CRATerre/ENSAG)**

**Βασικά χαρακτηριστικά**

Το χώμα που χρησιμοποιείται για δόμηση πρέπει να περιέχει όσο το δυνατόν λιγότερη οργανική ύλη. Κάτω από βάθος 60 εκ. δεν εμφανίζεται οργανική ύλη (Minke 2006). Ακόμα, θα πρέπει να έχει καλή συνοχή, καλή θλιπτική αντοχή και χαμηλή διάχυση της υγρασίας. Η πλέον κατάλληλη γη βρίσκεται σε παραθαλάσσιες περιοχές, όπου το μέγεθος του κόκκου είναι κατάλληλο και η αναλογία του αργίλου στη γη είναι εντός των ορίων των 10-50% (Berge 2009).

Βασικά φυσικά χαρακτηριστικά του χώματος ως δομικό υλικό

- *Επίδραση του νερού*

**Ο μόνος σοβαρός εχθρός των κατασκευών από γη είναι το νερό**. Απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός και κατασκευή ώστε να αποφευχθούν προβλήματα υγρασίας, όπως της ανερχόμενης υγρασίας από το έδαφος. Ακόμα και ένα μικρό λάθος κατασκευαστικής λεπτομέρειας μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα (Berge 2009).

Επιπρόσθετα, το νερό δεν θα διαπεράσει συνήθως ένα οριζόντιο στρώμα γης που υπερβαίνει τα 50 cm βάθος. Το χώμα που περιέχει μεγάλη

ποσότητα αργίλου είναι αδιάβροχο, ακόμα και σε λεπτότερα στρώματα. Ο βέλτιστος πηλός είναι ο μπεντονίτης, ο οποίος είναι αδιάβροχος σε μόλις 0.5 εκ. πάχος (Minke 2006).

- *Επίδραση με την ατμοσφαιρική υγρασία*

Οι κατασκευές από χώμα έχουν επίσης ενδιαφέρουσες κλιματολογικές πτυχές, ιδίως όσον αφορά την **εξισορρόπηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας**, του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος (Minke 2006).

- *Επίδραση με την θερμότητα*

Το χώμα από μόνο του **έχει χαμηλή θερμομονωτική ικανότητα**: καλύτερη από το μπετόν, και περίπου ίδια με τα τούβλα. Ωστόσο, η θερμική ικανότητα των απλών κατασκευών χώματος, είναι καλή. Με την προσθήκη οργανικών ινών ή διογκωμένου πηλού η θερμομόνωση μπορεί να βελτιωθεί. Επίσης, όπως και με τα περισσότερα υλικά, ένα αρκετά παχύ στρώμα μπορεί να καλύψει αυτήν την ανάγκη. Ένας ακόμα τρόπος για να επιτευχθεί καλύτερη θερμομόνωση είναι η προσθήκη κάποιας πορώδους ουσίας όπως διογκωμένος περλίτης, ελαφρόπετρα, ή ακόμα και πριονίδια, ροκανίδια, φελλό ή άχυρα (Berge 2009).

Λόγω της **μεγάλης θερμικής μάζας**[9]**,** η χρήση του χώματος σε εξωτερικούς τοίχους μπορεί να κρατάει το χώρο σε συνθήκες θερμικής άνεσης, τις ζεστές ώρες της ημέρας και τις ψυχρές ώρες της νύχτας (Αδαμοπούλου 2013).

[9] Η θερμική μάζα ή αλλιώς η θερμοχωρητικότητα του κτηρίου είναι η ικανότητά του να αποθηκεύει θερμότητα στο εσωτερικό του.

| Materials | Technical properties | |
|---|---|---|
| | Specific thermal conductivity (W/mK) | Specific thermal capacity (kJ/kgK) |
| *Non-metallic minerals* | | |
| Concrete | 1.75 | 0.92 |
| Portland cement plaster | 1.15 | 0.92 |
| Lime cement plaster | 1.05 | 0.94 |
| Lime plaster | 0.9 | 0.96 |
| *Brick* | | |
| Well fired, massive | 0.7 | 0.92 |
| Well fired, perforated | 0.6 | 0.92 |
| Light/medium fired, massive | 0.65 | 0.92 |
| *Earth, pisé and adobe* | | |
| Fibre content 10 kg/m$^3$ | 0.96 | 1.0 |
| Fibre content 40 kg/m$^3$ | 0.615 | 1.0 |
| Fibre content 70 kg/m$^3$ | 0.420 | 1.05 |

**Πίνακας 3 Θερμική αγωγιμότητα και θερμική χωρητικότητα χαρακτηριστικών υλικών δόμησης (Berge 2009)**

- *Ηχομονωτική συμπεριφορά*

Η χρήση χώματος ανάμεσα στα δοκάρια του πατώματος ή της στέγης **ηχομονώνει τον εσωτερικό χώρο** (Berge 2009).

- *Πυραντίσταση*

Ακόμη και με μεγάλες ποσότητες από φυτικές ίνες αναμεμειγμένες, **τα υλικά από χώμα είναι πυράντοχα** (Berge 2009).

- *Υγεία στο εσωτερικό κλίμα*

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω το χώμα εξισορροπεί την υγρασία του εξωτερικού και του εσωτερικού χώρου. Αυτή η ιδιότητα **επιτρέπει συνθήκες άνεσης** κρατώντας την υγρασία του χώρου σταθερή**.** Βέβαια είναι αναγκαίος ο συνεχής αερισμός του χώρου, όπως και σε όλα τα σπίτια, καθώς το χώμα επειδή αποτελείται από αδρανή στοιχεία, όπως το σκυρόδεμα, εκπέμπει ραδόνιο (Minke 2006).

Βασικά μηχανικά χαρακτηριστικά του χώματος ως δομικό υλικό

- *Αντισεισμική συμπεριφορά*

**Η συμπεριφορά σε σεισμό μπορεί να βελτιωθεί** κατά πολύ με την χρήση κάθετων και οριζόντιων οπλισμών. Συνήθως είναι ξύλινα στοιχεία ή μπαμπού τα οποία τοποθετούνται με την λογική που τοποθετούνται και οι ενισχύσεις στις συμβατικές φέρουσες τοιχοποιίες από οπτόπλινθους (Blondet, Garcia and Brzen 2003).

- *Περιορισμένο ύψος*

Το χώμα έχει κατασκευαστικούς περιορισμούς ως οικοδομικό υλικό δεδομένου ότι έχει **αρκετά χαμηλή αντοχή σε θλίψη**. Αυτό αντισταθμίζεται από την οικοδόμηση παχύτερων τοίχων. Η αύξηση της ποσότητας του υλικού που χρησιμοποιείται, δεν αυξάνει πολύ το κόστος αν η πηγή του χώματος είναι κοντά στο χώρο (Berge 2009). Οι τιμές θλιπτικής αντοχής του συμπαγούς ωμόπλινθου είναι αντίστοιχες με αυτές των συμβατικών οπτόπλινθων με οπές, και κυμαίνονται γύρω στα 1 με 5 MPa (Guillaud, και συν. 1995).

Βασικά χαρακτηριστικά της παραγωγής και κατασκευής

- *Ενσωματωμένη ενέργεια στην παραγωγή*

Κατά την διάρκεια παραγωγής κατασκευών με ωμή γη **δεν δαπανώνται μεγάλα ποσά ενέργειας**. Σε σύγκριση με έναν κοινό οπτόπλινθο, η ενσωματωμένη ενέργεια που καταναλώνεται για την κατασκευή ενός ωμόπλινθου ίδιου βάρους είναι 85% λιγότερη.

| *Products* | *Temperature required in production (°C)* | *Embodied energy (MJ/kg)* |
|---|---|---|
| Sand and gravel | – | 0.5 |
| Earth, compressed | – | 0.5 |
| Vitrified bricks | 1050–1300 | 3.5 |
| Well-fired bricks | 800–1050 | 3.0 |
| Medium-fired bricks | 500–800 | 2.5 |
| Low-fired bricks | 350–500 | 2.0 |

**Πίνακας 4 Ενσωματωμένη ενέργεια οπτόπλινθων και ωμόπλινθων (Berge 2009)**

- *Περιβαλλοντική επιβάρυνση κατά την παραγωγή*

Κατά την διάρκεια παραγωγής κατασκευών από ωμή γη **δεν υπάρχουν σημαντικές περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις**, καθώς δεν υπάρχει μεγάλη κατανάλωση ενέργειας, ούτε διαδικασίες καύσης και χημικές επεξεργασίες. Η **παραγωγή σκόνης** κατά την διάρκεια επεξεργασίας της πρώτης ύλης, μπορεί μερικές φορές να επιβαρύνει το αναπνευστικό σύστημα, αλλά δεν ρυπαίνει το περιβάλλον (Berge 2009). Η χρήση μάσκας είναι σημαντική σε κάθε περίπτωση.

| *Raw materials/basic materials* | *Polluting substances* |
|---|---|
| Sand and gravel | Dust (possibly containing quartz) |
| Earth for construction purposes | Dust |
| Fired clay products with low lime content | Carbon dioxide, sulphur dioxide, fluorine compounds, dust, possibly chromium |
| Fired clay products with 15–20% lime content | Carbon dioxide, possibly chromium, dust |

**Πίνακας 5 Περιβαλλοντική επιβάρυνση οπτόπλινθων και ωμόπλινθων (Berge 2009)**

- *Αυξημένο βάρος και μεταφορικά*

Σε περίπτωση που η παραγωγή των πλίνθων δεν γίνεται στο μέρος της κατασκευής του κτηρίου, το αυξημένο βάρος του χώματος και ειδικά των συμπιεσμένων συμπαγών πλίνθων **αυξάνει αρκετά το κόστος της μεταφοράς**. Οι κοντινές αποστάσεις πρώτης ύλης, χώρου παραγωγής και χώρου κατασκευής είναι το ιδανικό σενάριο. Ένας τρόπος να μειωθεί το βάρος των ωμόπλινθων, είναι η δημιουργία οπών ή η πρόσμιξη με άχυρο.

- *Μειωμένη σπατάλη της πρώτης ύλης*

Κατά την διάρκεια της παραγωγής και κατασκευής **τα κατεστραμμένα προϊόντα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν πρώτη ύλη** χωρίς πολύ μεγάλη επεξεργασία.

- *Ανακυκλωσιμότητα*

Όλα τα υλικά δόμησης από χώμα σε όλα τα στάδια, από την εξόρυξη της πρώτης ύλης μέχρι την απόρριψη θεωρούνται άκρως οικολογικά και **άμεσα ανακυκλώσιμα** (Berge 2009).

- *Κόστος επισκευής*

Το κόστος επισκευής ενός κτηρίου από χώμα δεν είναι καθώς η επισκευή γίνεται πάλι με χώμα (Berge 2009). Καθώς η φθορά του συγκεκριμένου υλικού είναι πιο ταχεία από τα άλλα υλικά της αγοράς, γίνεται αντιληπτό ότι **η συχνότητα επισκευής σε ένα κύκλο ζωής αυξάνεται**.

- *Αυξημένο εργατικό κόστος*

Η κατασκευή με χώμα απαιτεί πολύ υψηλής έντασης εργασία και είναι αρκετά χρονοβόρα, συγκρινόμενη με τις περισσότερες σύγχρονες κατασκευαστικές μεθόδους. Μέσα στα οικονομικά μοντέλα των ανεπτυγμένων χωρών, όπου η χειρονακτική εργασία είναι ακριβή, **η δόμηση με γη έχει γίνει οικονομικά ασύμφορη** (Berge 2009)**.**

| Method | Work hours/m² wall, net | Work hours/m², wall gross |
|---|---|---|
| Pisé by machine | 3.5 | 5.0 |
| Pisé by hand | 5.5 | 7.0 |
| Adobe by machine | 3.5 | 5.0 |
| Adobe by hand | 5.5 | 7.0 |

**Πίνακας 6 Χρόνος κατασκευής ενός $m^2$ τοίχου από χώμα**

**Βασικές τεχνικές δόμησης με ωμή γη**

Όλες οι τεχνικές κατασκευής με χώμα απαιτούν προστασία από την δυνατή ηλιακή ακτινοβολία κατά την διάρκεια του στεγνώματος και την έντονη βροχόπτωση κατά την διάρκεια της ζωής του (Berge 2009).

Η θεμελίωση ενός τέτοιου κτηρίου είναι από πέτρα ή από χώμα αναμεμειγμένο με τσιμέντο ή και κανονικό σκυρόδεμα. Η θεμελίωση πρέπει να φτάνει τουλάχιστον 40 εκατοστά πάνω από το έδαφος, ώστε να αποτρέπεται το πιτσίλισμα από την βροχή, και πρέπει να έχει τουλάχιστον το πάχος του τοίχου, συνήθως πάνω από 40 εκατοστά (Berge 2009).

Αν η θεμελίωση είναι εκτεθειμένη, οι τοίχοι από πέτρα ή μπετόν μπορούν να απορροφήσουν ένα μεγάλο μέρος της υγρασίας από το έδαφος μέσα από τριχοειδή δράση - ανερχόμενη υγρασία. Στα χωμάτινα κτήρια αυτό πρέπει πάση θυσία να αποφευχθεί, δεδομένου ότι οι χωμάτινες κατασκευές είναι πιο ευαίσθητες στην υγρασία ακόμα και από το ξύλο. Μια στρώση στεγάνωσης πρέπει να προβλεφθεί στη βάση του τοίχου. Αυτό γίνεται συχνά με άσφαλτο, ή ένα μικρό στρώμα ισχυρού σκυροδέματος που χρησιμεύει επίσης ως πρέκι, ενισχύοντας την κατασκευή σε οριζόντιο επίπεδο. (Berge 2009).

<u>Pise ή rammed earth (Τεχνική συμπιεσμένης γης)</u>

Το χώμα που είναι κατάλληλο για εμβολισμό κατά κύριο λόγο περιέχει άμμο, ψιλό χαλίκι και ένα ορισμένο ποσό της αργίλου το οποίο δρα ως συνδετικό . Ο εμβολισμός ενοποιεί και συνδέει τα συστατικά. Κατά τη διάρκεια του στεγνώματος, οι τοίχοι πρέπει να διατηρούνται υγροί και δεν θα πρέπει να στεγνώνουν γρήγορα. Μετά την κατασκευαστική διαδικασία, ο τοίχος μπορεί να αποκτήσει σκληρότητα αντίστοιχη με της κιμωλίας ή του ψαμμίτη.

Ο ξυλότυπος πρέπει να είναι εύκολος στο χειρισμό και στέρεος. Υπάρχουν πολλές πατέντες. Ο εμβολισμός μπορεί να γίνει είτε με το χέρι είτε με μηχανή. Η μηχανική συμπίεση είναι πολύ πιο αποτελεσματική και μπορεί

να επιτευχθεί με την χρήση ηλεκτρικών ή πνευματικών εμβόλων (Berge 2009).

Adobe (πλιθιές)

Το πλεονέκτημα της δόμησης με πλίνθους σε σύγκριση με την προηγούμενη τεχνική είναι ότι μπορεί να επιταχύνει τη περίοδο κατασκευής. Οι πλίνθοι μπορούν να παραχθούν οποιαδήποτε στιγμή και να αποθηκευτούν μέχρι να ξεκινήσει η διαδικασία της κατασκευής. Η κατασκευή θα πρέπει να γίνεται κατά την διάρκεια της άνοιξης ή του καλοκαιριού ώστε οι αρμοί να έχουν στεγνώσει πριν την εφαρμογή της εξωτερικής επίστρωσης.

Το χώμα που χρησιμοποιείται για ωμόπλινθους θα πρέπει να περιέχει υψηλότερα ποσοστά αργίλου, και κόκκους όχι μεγαλύτερους των 4mm. Συνήθως προστίθενται χονδροειδής φυτικές ίνες, όπως ψιλοκομμένο άχυρο, ώστε να αποφευχθούν οι ρηγματώσεις κατά την συρρίκνωση, και τόσο νερό ώστε το χώμα να είναι μόλις εύπλαστο για χρήση (Berge 2009).

Τα καλούπια που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι ξύλινα ή μεταλλικά. Η χρήση των μεταλλικών είναι πιο σωστή καθώς ξεκαλουπώνονται ευκολότερα. Τα σχήματα των πλίνθων είναι συνήθως ορθοκανονικά, σε διαστάσεις που δεν ξεπερνούν συνήθως τα 40x20x10 εκ. (Guillaud, και συν. 1995). Το γέμισμα γίνεται με την ρίψη μικρών σβόλων (στο μέγεθος της παλάμης) για να αφαιρείται ο αέρας (Minke 2006).

Η θλιπτική αντοχή τους φτάνει μέχρι τα 5 MPa, η θερμομονωτική του ικανότητα είναι γύρω στα 0.4 με 0.8 $W/m^3 C^o$ και η πυκνότητα τους 1200 με 1700 $Kg/m^3$. Η ανθεκτικότητά τους σε κρούσεις είναι είναι μικρή. Οι επιφάνειές τους είναι ανώμαλες λόγω της μεγάλης συρρίκνωσης ή της ύπαρξης άχυρου και το οπτικό αποτέλεσμα δεν είναι τέλειο (Guillaud, και συν. 1995).

Compressed earth blocks (Συμπιεσμένοι πλίνθοι)

Οι συμπιεσμένοι πλίνθοι πλεονεκτούν του Pise, για τους ίδιους λόγους που υπερτερούν και οι πλιθιές. Η μικρότερη συρρίκνωση και ευκολότερη παραγωγή είναι δύο στοιχεία που το χρήζουν πιο εύκολα επιλέξιμο. Η παραγωγή του γίνεται με χειροκίνητες ή μηχανοκίνητες πρέσες με πιο γρήγορο ρυθμό από τις άλλες τεχνικές.

Η περιεκτικότητα του μείγματος σε νερό είναι κάπου ενδιάμεσα του Pise και των πλιθιών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η συρρίκνωση μετά την ξήρανση να είναι σε επιθυμητά επίπεδα. Απόρροια αυτού είναι η εξωτερική τους επιφάνεια, να είναι πιο λεία απ' τις πλιθιές. Τα μεγέθη τους είναι συνήθως στα 30x15x9, καθώς η πυκνότητα τους είναι 1700 με 2200 kg/m$^3$ και έχουν αυξημένο βάρος σε σχέση με τις πλιθιές. Η αντοχή σε θλίψη είναι μικρότερη από της πλιθιές, λόγω της έλλειψης δόνησης, από 1 μέχρι 4 MPa. Η θερμομονωτική ικανότητα κυμαίνεται από 0,81 μέχρι 1,04 W/m$^3$ C$^o$ και η ανθεκτικότητα σε κρούση είναι σχετικά καλή (Guillaud, και συν. 1995).

| SYSTEMS USED | | | PRESS CATEGORIES | CHARACTERISTICS | |
|---|---|---|---|---|---|
| POWER SOURCE | ENERGY TRANSMISSION | COMPRESSIVE ACTION | | COMPRESSION PRESSURE | THEORETICAL SOURCE OUTPUT /8 H |
| manual | mechanical | static | manual presses | very low | 300 to 800 |
| | mechanical and hydraulic | static | | hyper | 300 to 400 |
| | mechanical | static | | low | 400 to 1 000 |
| motorized | mechanical | static | motorized presses | low to medium | 800 to 3 000 |
| | hydraulic | static | | low to medium | 800 to 2 000 |
| | mechanical | static | mobile production units | low to medium | 800 to 3 000 |
| | hydraulic | static | | low to medium | 800 to 3 000 |
| | mechanical | static | | low | 2 000 to 15 000 |
| | hydraulic and mechanical | static or dynamic | | low to hyper | 1 500 to 7 500 |
| | hydraulic | static | | low to mega | 3 000 to 50 000 |
| | hydraulic and mechanical | dynamic | fixed production units | | 1000 000 to 50 000 |

**Πίνακας 7 Βιομηχανική παραγωγικότητα πλίνθων (Guillaud, και συν. 1995)**

Η συμπιεσμένοι πλίνθοι είναι μία τεχνική που έχει αναπτυχθεί πρόσφατα και δεν είναι τόσο διαδεδομένη. Είναι η πιο τυποποιημένη τεχνική που υπάρχει μέχρι στιγμής καθώς η κατασκευή της εξαρτάται από μηχανή. Οι πλιθιές και η «συμπιεσμένη γη» είναι οι πιο διαδεδομένες τεχνικές δόμησης χώματος. Υπάρχουν και άλλες τεχνικές που έχουν επίσης ενδιαφέροντα στοιχεία. Οι πιο σημαντικές από αυτές είναι οι: «cob», «earth loaves», «earth strand technique» και «earth filled hoses» (Berge 2009).

Επεξεργασία των επιφανειών

Είναι σημαντικό οι εκτεθειμένες κατασκευές από χώμα να προστατεύονται από τις καιρικές συνθήκες. Οι εξωτερικοί και οι εσωτερικοί τοίχοι μπορούν να επικαλυφθούν με άσβεστο ή ασβεστοκονίαμα. Μπορούν επίσης να επικαλύπτονται με πηλόσοβάδες που έχουν μικρότερο περιβαλλοντικό κόστος αλλά θέλουν πιο συχνή συντήρηση. Οι εσωτερικοί τοίχοι μπορούν επίσης να επενδυθούν, ή να βαφτούν με χρώματα μεταλλικών ορυκτών ή καζεΐνης. Η επιφάνεια των τοίχων δεν πρέπει να επαλείφονται με χρώματα που εμποδίζουν την διαπνοή, καθώς αυτό θα μπορούσε γρήγορα να οδηγήσει σε συγκέντρωση υγρασίας στο εσωτερικό του τοίχου, επιτρέποντας έτσι πιθανή ζημιά από παγετό ή ανάπτυξη μικροοργανισμών (Berge 2009) (Minke 2006).

**Δυνατότητες βιομηχανικής ανάπτυξης της δόμησης με ωμόπλινθους**

Η τεχνολογία επεξεργασίας του χώματος βρίσκεται σε έντονη ανάπτυξη σε Ευρώπη και Ηνωμένες Πολιτείες. Οι διαδικασίες μπορούν να απλοποιηθούν και μερικώς να μηχανοποιηθούν όπως στους συμπιεσμένους πλίνθους. Η εμπορική παραγωγή ωμόπλινθων με οπές και συμπαγών ωμόπλινθων παρέχεται σε τιμές πολύ χαμηλότερες από εκείνες των τούβλων και των τσιμεντόλιθων, καθώς η ενέργεια που εξοικονομείται για την παραγωγή ενός τετραγωνικού τοίχου είναι κοντά στο 80% των δύο άλλων τεχνικών(. Υπάρχει πλέον μια μεγάλη ποικιλία προϊόντων χώματος και πηλού, όπως έτοιμα-προς-χρήση κονιάματα, πλακίδια δαπέδου και τοίχου, δομικά φύλλα και ακουστικά πάνελ (Berge 2009).

Δυσκολία προτυποποίησης

Ένα σημαντικό μειονέκτημα του χώματος, είναι ότι είναι δύσκολο να προτυποποιηθεί σαν υλικό δόμησης, καθώς η σύσταση του χώματος και οι δυνατότητες του από περιοχή σε περιοχή διαφέρουν. Οι περισσότερες μελέτες που έχουν γίνει στηρίζονται σε νόμους εδαφομηχανικής (όπως θα δούμε και στο επόμενο κεφάλαιο) η οποία δεν ασχολείται με τον κτιριοδομικό τομέα. Οι πιο ολοκληρωμένες μελέτες από άποψη ανάλυσης των διαφόρων ιδιοτήτων του χώματος έχουν γίνει από τον R.Niemeyer στο «BRL» (Biorenewable Research Laboratory) στη Ατλάντα των ΗΠΑ και τον G. Minke στο «Building Research Institute» του πανεπιστήμιου του Κάσελ της Γερμανίας.

Έλλειψη νομοθεσίας

Στην Ευρώπη δεν υπάρχει κάποιο νομοθετικό πλαίσιο που να κατοχυρώνει το χώμα σαν ικανό φέρον δομικό υλικό. Ως εκ τούτου ο Ευρωκώδικας 6 για της φέρουσες τοιχοποιίες δεν αναφέρει πουθενά προϋποθέσεις για τοιχοποιίες από ωμόπλινθους. Το γεγονός ότι δεν υπάρχει προτυποποίηση σημαίνει ότι δεν μπορεί να δοθεί πιστοποίηση από τις βιομηχανίες και αυτό είναι ένα σημαντικό τροχοπέδη στην ανάπτυξη αυτής της βιώσιμης δόμησης. Τα δεδομένα αυτά συμβάλλουν και στην δημιουργία προκαταλήψεων σε σχέση με τις δυνατότητες του χώματος σαν δομικό υλικό.

**Συμπεράσματα**

Κτήρια από χώμα, ηλικίας πολλών χιλιάδων ετών, υπάρχουν σχεδόν σε όλο τον κόσμο. Μερικά από αυτά αποδεικνύουν ότι το χώμα έχει αρκετά καλές αντοχές στον χρόνο. Επίσης υπάρχουν κτήρια στην Γερμανία από συμπιεσμένη γη έξι ορόφων που αποδεικνύουν τις δυνατότητες του χώματος (Berge 2009). Ακόμα, τεχνικές από ωμή γη έχουν εμφανιστεί και σε σεισμογενείς περιοχές, με βελτιωμένο σχεδιασμό (Blondet, Garcia and Brzen 2003).

Το μειονέκτημα και πλεονέκτημα ταυτόχρονα της διαπνοής των τοίχων από ωμή γη, που επιτρέπει στην υγρασία να κινείται από το εσωτερικό στο εξωτερικό και αντίστροφα, είναι κάτι που με σωστό σχεδιασμό και κατασκευαστικές λεπτομέρειες θα μπορούσε να προσφέρει μόνο θετικά αποτελέσματα. Αυτό, σε συνδυασμό με την μεγάλη θερμική μάζα της συμπιεσμένης γης, θα μπορούσαν να προσδώσουν στο κτήριο ένα άκρως βιοκλιματικό χαρακτήρα κυρίως σε περιοχές με θερμά κλίματα.

Ο χρόνος και το κόστος αυτών των κατασκευών θα μπορούσε να μειωθεί μέσω της βιομηχανοποίησης των δομικών υλικών. Βέβαια, η συγκέντρωση των βιομηχανιών αυξάνει πολύ τις αποστάσεις διανομής, και σε συνδυασμό με το αυξημένο βάρος του προϊόντος καθιστούν ασύμφορο το εγχείρημα. Η αποκέντρωση της βιομηχανίας σε μικρές βιοτεχνίες θα μπορούσε να φέρει τα εργοστάσια πιο κοντά στις πρώτες ύλες και να μειώσει τις αποστάσεις διανομής. Αυτή η κίνηση θα μπορούσε να αφυπνίσει ανενεργούς τοπικούς πόρους και μικρές υπάρχουσες βιοτεχνίες τονώνοντας την τοπική οικονομία.

Τέλος, η έλλειψη πιστοποίησης είναι το μεγαλύτερο πρόβλημα για την εμπορικότητα των κατασκευών με χώμα. Δεδομένου ότι υπάρχουν πανεπιστήμια που κάνουν έρευνες πάνω σε αυτό το υλικό δόμησης εδώ και χρόνια (BRL και BRI), θεωρείται ότι υπάρχει η τεχνογνωσία για να διατυπωθεί και να θεσμοθετηθεί ένας κανονισμός. Επίσης οι ίδιοι οι φορείς αυτοί θα μπορούσαν να λειτουργούν σαν πάροχοι πιστοποιήσεων για την προτυποποίηση του κάθε δείγματος, μειώνοντας έτσι αρκετά το κόστος μίας τέτοιας διαδικασίας.

Ένα βιώσιμο μοντέλο ανάπτυξης της δόμησης με χώμα θα διατυπωθεί στην επόμενη ενότητα σαν συμπέρασμα αυτού του κεφαλαίου.

## 5. Συμπεράσματα και πρόταση για ένα βιώσιμο μοντέλο βιομηχανικής ανάπτυξης της δόμησης με ωμή γη

Συμπερασματικά, στο Κεφάλαιο Β αναφερθήκαμε στα παρακάτω:

- Συνθήκες βιωσιμότητας μπορούν να επιτευχθούν όταν η κοινωνία, η οικονομία και το περιβάλλον είναι σε πρώτο πλάνο και ισορροπούν χωρίς η ανάπτυξη του ενός να επιβαρύνει το άλλο.
- Μια βιώσιμη βιομηχανία δόμησης θα πρέπει να εξασφαλίζει, εκτός από την δική της βιωσιμότητα (κόστος παραγωγής, χρόνος παραγωγής, ποιότητα προϊόντων) και την τοπική βιωσιμότητα χρησιμοποιώντας τοπικούς πόρους εύκολα ανακυκλώσιμους και επαναχρησιμοποιήσιμους.
- Για να θεωρηθεί ένα δομικό υλικό και ένα κτήριο βιώσιμο θα πρέπει ο κύκλος ζωής του να μην επιβαρύνει το περιβάλλον και την άνεση του ανθρώπου, όπως επίσης να είναι και οικονομικά εφικτό.
- Η χρήση προϊόντων από ωμή γη στην δόμηση μπορεί να μειώσει αισθητά την κατανάλωση ενέργειας στο κύκλο ζωής ενός κτηρίου.

Άρα, ένα βιώσιμο μοντέλο βιομηχανικής ανάπτυξης της δόμησης με ωμή γη δείχνει να είναι ιδανικό. Παρακάτω γίνεται μία προσπάθεια να διατυπωθεί μία πρόταση για ένα τέτοιο μοντέλο από την οπτική γωνία μίας αρχιτεκτονικής σκέψης.

**Ένα βιώσιμο μοντέλο βιομηχανικής ανάπτυξης της δόμησης με ωμή γη**

Το χώμα σαν πρώτη ύλη

Σαν πρώτη ύλη επιλέγεται το χώμα το οποίο αφθονεί στην φύση και για την εξόρυξη, τη συλλογή και την επεξεργασία του δεν χρειάζονται μεγάλα ποσά ενέργειας. Επίσης η τιμή του είναι χαμηλή στην αγορά καθώς προέρχεται ακόμα και από εκσκαφές θεμελίων.

Γραμμή παραγωγής

Η επεξεργασία του σαν πρώτη ύλη όπως και στους οπτόπλινθους, δεν είναι ενεργοβόρα. Επιπλέον, στις περισσότερες περιπτώσεις θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η ήδη υπάρχουσα γραμμή παραγωγής των οπτόπλινθων με ένα μικρό κόστος αναβάθμισης ή τροποποίησης. Υπό αυτή την έννοια μια βιοτεχνία τούβλων καλείται να κάνει μία χαμηλού κόστους και ρίσκου επένδυση που δύναται να την κάνει πολύ πιο ανταγωνιστική στην αγορά . Η αποφυγή του ψησίματος μειώνει κοντά στο 3/4 το κόστος παραγωγής. Επίσης η μεταφορά σε μικρές αποστάσεις θα μπορούσε να αυξήσει τον δείκτη βιωσιμότητας.

Η τοποθέτηση της βιομηχανίας και τα κέντρα πιστοποίησης

Η ανάπτυξη της βιώσιμης δόμησης με χώμα προϋποθέτει την αποκεντροποιημένη παραγωγή των δομικών υλικών. Με αυτόν τον τρόπο θα εκμεταλλευτούν και θα χρησιμοποιηθούν με τον βέλτιστο τρόπο οι πόροι, μειώνοντας την καταστροφή του φυσικού περιβάλλοντος και ταυτόχρονα μειώνοντας το κόστος λόγω των μεταφορικών. Αυτή η λογική θα ενισχύσει επίσης την τοπική οικονομία και θα αυξήσει την ανταγωνιστικότητα των μικρών βιομηχανιών.

Η διασπορά όμως των βιομηχανιών συνεπάγεται και διαφορετική ποιότητα χώματος για κάθε μία από αυτές. Για αυτό τον λόγο υπάρχει η ανάγκη δημιουργίας κέντρων πιστοποίησης αυτών των δομικών υλικών, ώστε να μπορεί να ελέγχεται η ποιότητα και να υπάρχει εμπιστοσύνη από την κοινωνία. Τα κέντρα πιστοποίησης θα μπορούσαν να είναι τα διάφορα εργαστήρια των τριτοβάθμιων εκπαιδευτικών ιδρυμάτων, που ειδικεύονται σε σχετικούς τομείς.

Η κατασκευή, η συντήρηση και απόρριψη του κτηρίου

Από την ανάλυση του κύκλου ζωής ενός δομικού υλικού από χώμα μπορούμε να διαπιστώσουμε τα πλεονεκτήματα μίας τέτοιας επιλογής. Είναι ένα προϊόν με ιδιαίτερα χαμηλό κόστος κατασκευής και χαμηλής τεχνολογίας επεξεργασία, κάτι που συνεπάγεται και χαμηλή τιμή στην αγορά. Η συντήρησή του αν και πιο συχνή είναι επίσης πολύ χαμηλού κόστους. Το σημαντικότερο όμως πλεονέκτημα ενός τέτοιου κτηρίου είναι το τελικό συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Μετά την κατεδάφισή του κάποιες δομικές μονάδες μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν, και ο μεγαλύτερος όγκος οικοδομικών αποβλήτων, όντας χώμα, να ανακυκλωθεί ή να επιστρέψει στην φύση.

# Γ. Πειραματικό Μέρος Α’

Δομικό υλικό

# 1. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί το σύνολο της ερευνητικής διαδικασίας που ακολουθήσαμε για να καταλήξουμε στην επιλογή της σύνθεσης πρώτης ύλης για την παραγωγή της δομικής μας μονάδας. Έπειτα από την παράθεση κάποιων βασικών πληροφοριών για το χώμα σαν υλικό, θα ακολουθήσει αρχικά η διερεύνηση του χώματος και της άμμου και στη συνέχεια θα γίνει σύγκριση κάποιων πιθανών συνθέσεών τους. Στα συμπεράσματα αυτού του μέρους θα αιτιολογηθεί η επιλογή της καταλληλότερης σύνθεσης. Σκοπός της διαδικασίας που παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο είναι η επαφή με το υλικό και την ερευνητική μέθοδο που ακολουθείται σε αυτές τις περιπτώσεις. Η εμπειρία αυτή θεωρήθηκε καθοριστική για την εξέλιξη της έρευνας.

Η συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του «φυτωρίου ιδεών»[10]

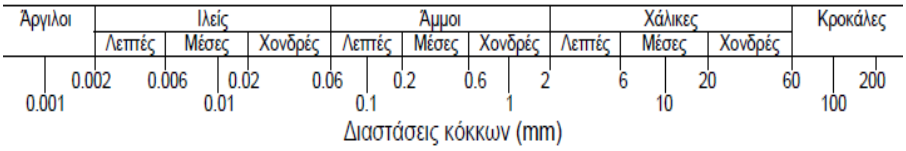
**Το χώμα ως πρώτη ύλη για την παραγωγή δομικών υλικών (Μπέη 2004)**

Σύνθεση χώματος

Το χώμα είναι ένα υλικό ποικίλης σύστασης που αφθονεί στη γη. Ανάλογα με την περιοχή από όπου έχει εκσκαφτεί, αποτελείται από διαφορετικά ποσοστά και είδη αργίλου, ιλύς, άμμου και αδρανών υλικών. Η άργιλος, η ιλύς, η άμμος και τα αδρανή υλικά αποτελούν τα υλικά πληρώσεως του χώματος. Ανάλογα με το ποιο τα τρία πρώτα συστατικά καθίσταται κυρίαρχο, αναφερόμαστε αντίστοιχα σε ένα αργιλώδες, ιλυώδες ή αμμώδες πηλό. Τα χαρακτηριστικά του, ως εκ τούτου, μπορεί να διαφέρουν από τοποθεσία σε τοποθεσία. Στο μείγμα προστίθενται άλατα, οξείδια και οργανικά υλικά. Ειδικότερα τα διαφορετικά συστατικά του πηλού κατατάσσονται ως εξής:

[10] Πρόγραμμα του τομέα καινοτομίας και επιχειρηματικότητας του πολυτεχνείου της Κρήτης, συγχρηματοδοτούμενο από τα ΕΣΠΑ 2007-2013 και το υπουργείο παιδείας και θρησκευμάτων. Στο συγκεκριμένο πρόγραμμα λάβαμε μέρος με το πρωτότυπο «LEGODOME», το οποίο θα αναπτυχθεί παρακάτω, σε συνεργασία με τους φοιτητές Ανδρεσάκη Γιώργο, Ασημάκη Νίκο και Ιγγλεζάκη Γιώργο και τους καθηγητές Ουγγρίνη Κ.,, Προβιδάκη Κ., Ρήγο Ι. και Στειακάκη Εμ., το έτος 2013.

a) Χονδρόκοκκα χημικώς αδρανή συστατικά, όπως οι χάλικες, τα σκύρα (4 έως 32mm) και η άμμος (80μm έως 4mm). Αυτά τα στοιχεία εξασφαλίζουν τη συνοχή του υλικού. Για να προσδώσουν αντοχή στο υλικό, πρέπει να υπάρξει ένα ελάχιστο όριο επαφής μεταξύ των αδρανών ώστε να ενεργοποιηθούν εσωτερικές δυνάμεις συνοχής.
b) Λεπτόκοκκα χημικώς αδρανή συστατικά τα οποία αποκαλούνται ιλύες. Πρόκειται για άμμο λεπτόκοκκη (2 έως 80μm), που απορροφά λίγο νερό. Οι ιλύες μειώνουν σε κάποιο ποσοστό την τριβή μεταξύ των αδρανών (κατά την συμπύκνωση) και αυξάνουν τη σταθερότητα των κόκκων γεμίζοντας τα κενά μεταξύ τους.
c) Λεπτόκοκκα χημικώς ενεργά συστατικά αργιλοπυριτικής βάσεως. Η άργιλος με την ορυκτολογική της έννοια. Η άργιλος δημιουργείται από την αποσάθρωση των αστρίων. Περιέχει λευκό καθαρό καολίνητη καθώς και άλευρο πετρωμάτων, οξείδια του σιδήρου και άλλες προσμίξεις που καθορίζουν το χρώμα της. Σε κορεσμένη πλαστική κατάσταση χρησιμοποιείται πολύπλευρα σαν στεγανωτικό μέσο. Σαν το τσιμέντο στο σκυρόδεμα, η άργιλος λειτουργεί σαν συνδετικό υλικό των μεγαλύτερων σωματιδίων στον πηλό.
d) Άλλα στοιχεία λεπτόκοκκα και δραστικά. Μερικά στοιχεία μπορούν να έχουν πολύ θετικές επιδράσεις στη συμπεριφορά των εδαφών και να ευνοούν κάποιες χημικές αντιδράσεις παρουσία υδραυλικών πρόσθετων. Άλλα στοιχεία μπορεί να επιδρούν αρνητικά στη συμπεριφορά των εδαφών όπως είναι τα θειικά οξέα, τα χλωρικά οξέα και τα οργανικά υλικά (Μπέη 2004).




**Πίνακας 8 Διαστάσεις κόκκων (Μπέη 2004)**

Χαρακτηριστικά χώματος

Τα αργιλικά εδάφη περιέχουν σημαντικό ποσοστό κόκκων αργίλου σε μεγέθη μικρότερα των 2mm. Αυτά τα υλικά επηρεάζουν τις φυσικές και τις

μηχανικές ιδιότητες των αργιλικών εδαφών. Η συνοχή είναι η κυριότερη από τις ιδιότητες που επηρεάζονται από τους μικρούς κόκκους της αργίλου. Οι ιδιότητες των αργιλικών εδαφών εξαρτώνται από την ορυκτολογική σύσταση των κόκκων αυτών, το σχήμα και το μέγεθός τους, την αντοχή των δομικών δεσμών τους, την υφή και την κατάσταση (πυκνότητα και ποσοστό υγρασίας) του εδάφους καθώς και από τις ιδιότητες που εξαρτώνται από την αλληλεπίδραση με το νερό.

Τα ορυκτά της αργίλου κατατάσσονται ως ορυκτά με σταθερή κρυσταλλική δομή, εύκαμπτη, ή ενδιάμεση κρυσταλλική δομή. Παραδείγματα αργιλικών εδαφών με σταθερή κρυσταλλική δομή είναι τα ορυκτά της ομάδας του καολινίτη, ενώ ο μοντμοριλονίτης και η μίκα είναι τυπικά παραδείγματα εύκαμπτης και ενδιάμεσης κρυσταλλικής δομής. Προσδίδουν «Αργιλικά» χαρακτηριστικά στο έδαφος, τα οποία αντικατοπτρίζονται στην υψηλή απορρόφηση και ικανότητα κατακράτησης νερού, στη χαμηλή διαπερατότητα, στην πλαστικότητα κ.α.. Η πιο σημαντική από αυτές τις ιδιότητες είναι η συνεκτικότητα, που εκδηλώνεται μέσω της εφελκυστικής τους αντοχής. Τα εδάφη έχουν την ικανότητα να αντιστέκονται σε εφελκυστικές δυνάμεις. Αυτή η αντίσταση οφείλεται στην παρουσία δομικών δεσμών μεταξύ των στερεών κόκκων. Η αντοχή και τα χαρακτηριστικά παραμόρφωσης των αργιλικών εδαφών εξαρτώνται από την ισχύ των δεσμών μεταξύ των μορίων, δηλαδή από την ισχύ των επαφών τους.

Η μεγάλη ποικιλία των εδαφών, καθώς και η επιρροή της περιεχόμενης υγρασίας στη συμπεριφορά τους καθορίζουν τους διάφορους τρόπους χρήσης του εδάφους σαν υλικό δόμησης.

Εν γένει, όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό αργίλου τόσο μεγαλύτερη είναι η πλαστικότητα, μικρότερη η διαπερατότητα, μεγαλύτερη η συμπιεστότητα, μεγαλύτερη η συνοχή και μικρότερη η γωνία τριβής.

Από τα παραπάνω φαίνεται, ότι ο πηλός (έδαφος) μπορεί να βελτιωθεί με τροποποίηση ορισμένων χαρακτηριστικών του και να χρησιμοποιηθεί στη δόμηση.

Η βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων του πηλού με διάφορα πρόσθετα είναι γνωστή τόσο στην εδαφομηχανική όσο και στην αρχιτεκτονική με πηλό ως «σταθεροποίηση».

Παρακάτω παρουσιάζονται απλές μέθοδοι τροποποίησης των χαρακτηριστικών αυτών:

1. Αλλαγή της κοκκομετρικής καμπύλης με προσθήκη άμμων και χάλικων ή με προσθήκη αργιλικού υλικού. Σε αυτήν την περίπτωση για την ανεύρεση ενός ομογενούς υλικού η λύση είναι ο διαχωρισμός των υλικών, πράγμα που δεν εφαρμόζεται σε συνθήκες εργοταξίου.
2. Βελτιστοποίηση των μηχανικών χαρακτηριστικών με την προσθήκη κλασσικών υδραυλικών κονιών, π.χ. τσιμέντο ή άσβεστος ή και λιγότερο κλασσικών όπως πουζολανικές κονίες, πρόσμικτα , υδρόφοβα.
3. Προσθήκη ινών, φυτικής ή ζωικής συνθετικής προέλευσης, όπως άχυρα από σιτάρι ή καλαμπόκι, τρίχες ζώων, τριφύλλι, ίνες πολυπροπυλαινίου, κ.α. Ο σκοπός είναι το έδαφος να αναπτύξει εφελκυστική αντοχή ώστε να παραλάβει τη συστολή και τις εξωτερικές ωθήσεις. Πριν από τη χρήση των ινών πρέπει να εξασφαλιστεί η καταλληλότητα των ινών έναντι διαβρωτικών παραγόντων και η δυνατότητα παραλαβής εφελκυστικών τάσεων σε ξηρό και υγρό περιβάλλον.
4. Πολλές παραδοσιακές κοινωνίες χρησιμοποιούν περιττώματα από αγελάδες και άλλα ζώα σαν σταθεροποιητές.

<u>Καταλληλότητα του χώματος για την παραγωγή ωμόπλινθων</u>

Η καταλληλότητα του εδάφους ορίζεται από την κοκκομετρική διαβάθμιση, την πλαστικότητα, την συμπιεστότητα και τη συνοχή του. Ο πηλός πρέπει να έχει αρκετά μεγάλο ποσοστό λεπτών κόκκων, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η απαραίτητη συνοχή για την παραγωγή των ωμόπλινθων. Το ποσοστό αυτό δεν πρέπει να ξεπερνά ένα ορισμένο όριο που μπορεί να βλάψει την αντοχή και την ανθεκτικότητα τους.

Οι πηλοί πρέπει να μην περιέχουν οργανικά υλικά και διαλυτά άλατα σε ποσοστά που μπορούν να αλλοιώσουν τις ιδιότητες των ωμόπλινθων. Για τις σταθεροποιημένες ωμόπλινθους το μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό

οργανικού υλικού κυμαίνεται μεταξύ 0,5% και 2%. Ενώ οι υποδείξεις αυτές είναι χρήσιμες για μία προκαταρκτική επιλογή του πηλού, έχει αποδειχθεί ότι οι πηλοί εκτός αυτών των ορίων είναι επίσης αποδεκτοί για την κατασκευή συμπιεσμένων ωμόπλινθων.

Η δική μας ερευνητική εργασία επικεντρώνεται στην κατανόηση των χαρακτηριστικών ενός τυχαίου δείγματος χώματος από την ευρύτερη περιοχή των Χανίων, και στην τροποποίηση και βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών του μόνο με προσθήκη ποταμίσιας άμμου. Δηλαδή μόνο βελτιώνοντας την κοκκομετρική διαβάθμιση του δείγματος.

Η προσθήκη υδραυλικών κονιών είναι συνήθως πιο αποτελεσματική, αλλά μειώνει σημαντικά την βιωσιμότητα του υλικού ενώ η προσθήκη ινών δυσκολεύει την βιομηχανική επεξεργασία της πρώτης ύλης. Για αυτούς τους λόγους καθώς και για λόγους οικονομίας χρόνου δεν επιλέχθηκε καμία από της παραπάνω μεθόδους βελτίωσης των χαρακτηριστικών του χώματος.

Παρακάτω περιγράφονται οι πειραματικές διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν μέχρι να επιλεγεί η τελική σύνθεση του μείγματος. Η πειραματική έρευνα αυτή συμπληρώνεται και τεκμηριώνεται με την βοήθεια των παρακάτω παραρτημάτων:

- **Παράρτημα Α**, στο οποίο περιγράφει εκτενέστερα τις πρότυπες διαδικασίες
- **Παράστημα Β**, στο οποίο τοποθετούνται όλα τα δεδομένα των πειραμάτων σε πίνακες και διαγράμματα.
- **Φωτογραφικό ημερολόγιο,** στο οποίο παρατίθενται φωτογραφίες των διαδικασιών, εν είδη ημερολογίου.

## 2. Επιλογή των πρώτων υλών

Για να προσδιοριστεί η καταλληλότητα του χώματος για μια συγκεκριμένη εφαρμογή, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τη σύνθεσή του. Η επόμενη ενότητα περιγράφει τυποποιημένες εργαστηριακές δοκιμές και απλές επιτόπιες δοκιμές, που χρησιμοποιούνται για να αναλυθεί η σύνθεση του μείγματος.

Επιλέχθηκαν δύο ευρέως απαντώμενα υλικά για την παραγωγή ωμόπλινθων. Οι πρώτες ύλες που εξετάστηκαν είναι :

1. Χώμα από εκσκαφή θεμελίων στις Μουρνιές Χανίων
2. Άμμος ποταμού από μάντρα οικοδομικών υλικών κοκκομετρίας 0-4mm

Οι δοκιμές θα παρουσιαστούν στη συνέχεια με την εξής δομή:

1. Χώμα
    a. Επιτόπιες δοκιμές
    b. Εργαστηριακές δοκιμές
        i. Κοκκομετρική ανάλυση
        ii. Καθορισμός Ph
        iii. Καθορισμός ορυκτολογικής σύστασης
2. Άμμος
    a. Εργαστηριακές δοκιμές
        i. Κοκκομετρική ανάλυση
        ii. Καθορισμός Ph

**α. Χώμα - loam**

Το χώμα είναι ένα προϊόν διάβρωσης των πετρωμάτων του φλοιού της γης. Η διάβρωση εμφανίζεται κυρίως μέσα από την μηχανική λείανση των πετρωμάτων μέσω της κίνησης των παγετώνων, του νερού και του αέρα, ή μέσω της θερμικής διαστολής και συστολής των πετρωμάτων, είτε με την διείσδυση του παγωμένου νερού στις ρωγμές του βράχου. Τα οργανικά οξέα που υπάρχουν στα φυτά και οι χημικές αντιδράσεις λόγω του νερού και του οξυγόνου, οδηγούν επίσης σε διάβρωση των πετρωμάτων. Η σύνθεση και οι ποικίλες ιδιότητες του χώματος εξαρτώνται από τις τοπικές συνθήκες. Το χαλικώδες ορεινό χώμα, για παράδειγμα, είναι πιο κατάλληλο για “rammed earth” (εφόσον είναι επαρκές σε άργιλο), ενώ το χώμα κοντά σε ποτάμι είναι συχνά πιο ιλυώδες και κατ’ επέκταση λιγότερο ανθεκτικό στις καιρικές συνθήκες και πιο ασθενές στη συμπίεση.

Το χώμα που χρησιμοποιήσαμε για την έρευνα αυτή κοσκινίστηκε εξ’ αρχής από αυτοσχέδιο κόσκινο διατομής 2mm όπως φαίνεται στην Εικόνα 2 .

**Εικόνα 2 Υπαίθριο κοσκίνισμα σε αυτοσχέδιο κόσκινο διατομής 2 mm**

Επιτόπιες δοκιμές

Οι παρακάτω δοκιμές δεν είναι πολύ ακριβείς, αλλά μπορούν να εκτελεστούν επί τόπου σχετικά γρήγορα, και συνήθως είναι αρκετά ακριβείς για να εκτιμηθεί η σύνθεση του πηλού και να εξακριβωθεί εάν το μείγμα είναι αποδεκτό για μια συγκεκριμένη εφαρμογή.

*Δοκιμές αισθήσεων*

- *ΟΨΗ:*

Δοκιμή κοπής: Επιλέγεται ένα υγρό δείγμα πηλού το οποίο διαμορφώνεται σε μία μπάλα και κόβεται με ένα μαχαίρι. Αν η επιφάνεια τομής είναι γυαλιστερή, τότε το μείγμα έχει υψηλή περιεκτικότητα σε άργιλο. Αν είναι θαμπό, δείχνει υψηλή περιεκτικότητα σε ιλύ (Minke 2006).

- *ΟΣΜΗ:*

Ο καθαρός πηλός είναι άοσμος, ωστόσο, αποκτά μια μυρωδιά μούχλας εάν περιέχει οργανική ύλη (Minke 2006).

- *ΑΦΗ:*

Επιλέγεται μια πρέζα εδάφους και τρίβεται με τα χέρια. Το αμμώδες έδαφος έχει δυσάρεστη αίσθηση, σε αντίθεση με το ιλυώδες έδαφος, το οποίο δίνει μια λιγότερο δυσάρεστη αίσθηση. Το αργιλώδες έδαφος, από την άλλη, δίνει μια κολλώδη, απαλή ή αλευρώδη αίσθηση (Minke 2006).

Δοκιμή πλυσίματος χεριών: Επιλέγεται ένα υγρό δείγμα χώματος και τρίβεται με τις παλάμες. Αν οι κόκκοι γίνονται αισθητοί με την αφή, τότε το έδαφος είναι αμμώδες ή χαλικώδες. Αν το δείγμα είναι κολλώδες, αλλά τα χέρια μπορούν να τριφτούν και να καθαριστούν όταν είναι ξηρό, αυτό

σημαίνει ιλυώδες έδαφος. Αν το δείγμα είναι κολλώδες, έτσι ώστε χρειάζεται νερό για να καθαριστούν τα χέρια, τότε συνεπάγεται αργιλώδες χώμα (Minke 2006).

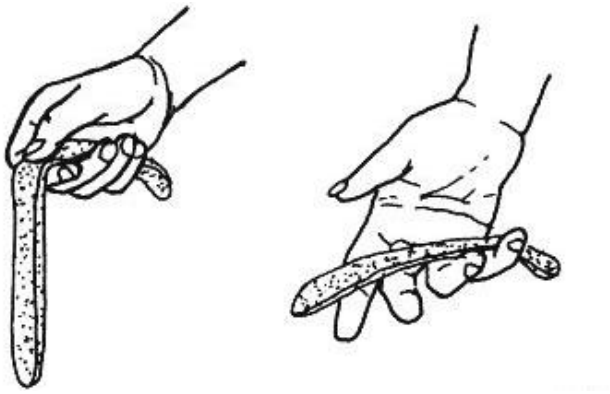
*Δοκιμές σβώλου (Ball dropping test)*

Το μίγμα προς δοκιμή πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο στεγνό, αλλά αρκετά υγρό για να διαμορφωθεί σε μπάλα διαμέτρου 4 εκατοστών. Όταν αυτή η μπάλα πέφτει από ύψος 1,5 μ πάνω σε μια επίπεδη επιφάνεια, ποικίλα αποτελέσματα μπορούν να προκύψουν, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3. Εάν η μπάλα ισιώσει μόνο ελαφρά και εμφανίσει λίγες ή καμία ρωγμές, όπως στο δείγμα στα αριστερά, έχει υψηλή δύναμη δεσμών, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε άργιλο. Συνήθως αυτό το μείγμα πρέπει να αραιώνεται με προσθήκη άμμου. Αν η δοκιμή μοιάζει με το δείγμα στα δεξιά, έχει πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε άργιλο. Τότε η δύναμη των δεσμών του είναι συνήθως ανεπαρκής, και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως οικοδομικό υλικό. Στην περίπτωση του τρίτου δείγματος από αριστερά, το μείγμα έχει σχετικά φτωχή δύναμη δεσμών, αλλά η σύνθεσή του επιτρέπει συνήθως να χρησιμοποιηθεί για ωμόπλινθους (adobes) και “rammed earth” (Minke 2006).

**Εικόνα 3 Η δοκιμή σβώλων σε χώματα με διαφορετική σύνθεση (Minke 2006)**

*Δοκιμή Κορδέλας (Ribbon test)*

Το δείγμα του πηλού πρέπει να είναι μόνο τόσο υγρό ώστε να πλαθεί σε ένα νήμα διαμέτρου 3 χιλιοστών χωρίς να σπάσει. Από αυτό το νήμα, διαμορφώνεται μια κορδέλα περίπου 6 χιλιοστών σε πάχος και 20 χιλιοστών σε πλάτος και την κρατάτε στην παλάμη. Η ταινία στη συνέχεια τοποθετείται κατά μήκος της παλάμης, έτσι ώστε να προεξέχει όσο το δυνατόν περισσότερο, μέχρι να σπάσει (Εικόνα 4) (Minke 2006).

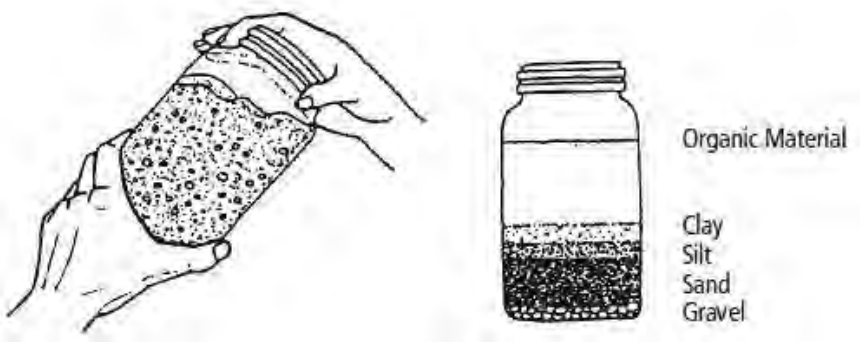


**Εικόνα 4 Η δοκιμή κορδέλας (Minke 2006)**

Αν το μήκος τις κορδέλας που κρέμεται, πριν αποκοπεί, είναι μεγαλύτερο από 20 εκατοστά, τότε έχει υψηλή δεσμευτική ισχύ, γεγονός που υποδηλώνει την περιεκτικότητα σε άργιλο που είναι πάρα πολύ υψηλή για οικοδομικούς σκοπούς. Εάν η κορδέλα σπάσει μετά από μόνο μερικά εκατοστά, το μείγμα έχει πολύ λίγο πηλό. Η δοκιμή αυτή είναι ανακριβής και είναι γνωστό ότι έχει περιθώρια λαθών άνω του 200%, εάν ο πηλός δεν είναι καλά ζυμωμένος ή διαφοροποιείται το πάχος και το πλάτος της κορδέλας. (Minke 2006)

*Δοκιμή ανάδευσης (Shake test)*

Το μείγμα αναδεύεται με πολύ νερό σε ένα γυάλινο βάζο. Τα μεγαλύτερα σωματίδια κατακάθονται στον πυθμένα, τα μικρότερα και ελαφρύτερα εναποτίθενται στην κορυφή. Αυτή η διαστρωμάτωση επιτρέπει να εκτιμηθεί η αναλογία των συστατικών. Είναι λανθασμένος ο ισχυρισμός ότι το ύψος του κάθε στρώματος αντιστοιχεί στην αναλογία του αργίλου, της ιλύος, της άμμου και του χαλικιού, όπως ισχυρίζονται πολλοί συγγραφείς (Εικόνα 5). Αρκετά πειράματα στο Building Research Laboratory (BRL) και στο University of Kassel, έδειξαν ότι το περιθώριο σφάλματος μπορεί να είναι μέχρι και 1750%. Στην πραγματικότητα, μπορεί κανείς να διακρίνει ξαφνικές αλλαγές στην διανομή μεγέθους κόκκων μόνο σε διαδοχικά στρώματα, και αυτές δεν μπορούν να συμπίπτουν με τα πραγματικά όρια μεταξύ αργίλου και ιλύος, και μεταξύ ιλύος και άμμου (Minke 2006).




**Εικόνα 5 Δοκιμή ανάδευσης (Minke 2006)**

*Αποτελέσματα – συμπεράσματα*

Από το σύνολο των παραπάνω δοκιμών , θα μπορούσαμε να καταλήξουμε με ασφάλεια στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για ένα χώμα κατάλληλο για δόμηση, δεδομένου ότι όλα τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν το σημαντικό ποσοστό ύπαρξης αργιλικών ορυκτών. Η οργανική ύλη είναι ελάχιστη και η διαβάθμιση των αδρανών ομαλή.

Έχοντας ελέγξει από τις επιτόπιες δοκιμές την καταλληλότητα του χώματος για χρήση ως δομικό υλικό, προχωρήσαμε στις εργαστηριακές δοκιμές για ακριβή αποτελέσματα.

*Δοκιμές αισθήσεων*

- Όψη: λεία γυαλιστερή επιφάνεια κοπής
- Οσμή : σχετικά καθαρή οσμή με ελαφριά αίσθηση μούχλας
- Αφή: κοκκώδης αίσθηση και λίγο κολλώδης. Ανάγκη ξεπλύματος χεριών για καθάρισμα.

Βάσει των παραπάνω αποτελεσμάτων μπορούμε να υποθέσουμε ότι το δείγμα μας , είναι αργιλώδες χώμα με κάποια μικρή ποσότητα οργανικής ύλης.

*Δοκιμές σβώλου (Ball dropping test)*

Από τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης δοκιμής επιβεβαιώνεται ότι υπάρχει ένα ίσως υψηλό ποσοστό αργίλου στο χώμα που μελετούμε.

*Δοκιμή Κορδέλας (Ribbon test)*

Η διαμορφωμένη κορδέλα έσπασε στα 7-8 εκατοστά. Αποτέλεσμα το οποίο μας απομακρύνει από την πιθανότητα της υψηλής περιεκτικότητας σε άργιλο.

*Δοκιμή ανάδευσης (Shake test)*

Βάσει των παρατηρήσεων που κάναμε προκύπτει ότι πρόκειται για αργιλώδες ή υλώδες χώμα με ελάχιστη ποσότητα χαλικιών και χονδρόκοκκης άμμου και πολύ μικρό ποσοστό οργανική ύλης.

Εργαστηριακές δοκιμές

Οι εργαστηριακές δοκιμές θα μας δώσουν μία λεπτομερή εικόνα για την ταυτότητα του χώματος και θα μας βοηθήσουν να εξάγουμε πιο ασφαλή συμπεράσματα. Οι δοκιμές που θα παρουσιαστούν είναι οι εξής:

1. Κοκκομετρική ανάλυση
2. Καθορισμός Ph
3. Ορυκτολογική σύσταση (XRD)

*1. Κοκκομετρική ανάλυση*[11]*(Παράρτημα Α)*

Η κοκκομετρική διαβάθμιση ενός εδαφικού δείγματος αποτελεί μέθοδο ταυτοποίησης και ταυτόχρονα ταξινόμησής του. Μετά από την κοκκομετρική ανάλυση του εδάφους παίρνουμε το διάγραμμα της κοκκομετρικής διαβάθμισης.

*Περιγραφή (Σακελλαρίου και Κοζάνης 2003)*

Το χώμα χαρακτηρίζεται από τα συστατικά του: άργιλο, ιλύ, άμμο και χαλίκι και η κοκκομετρική του διαβάθμιση απεικονίζεται σε διάγραμμα (Διάγραμμα 7). Οι διαστάσεις των κόκκων ποικίλουν, μεταξύ μεγάλων ορίων. Εδώ, ο κάθετος άξονας αντιπροσωπεύει το βάρος των διερχομένων σε ποσοστό, ενώ στον οριζόντιο άξονα παρίσταται το μέγεθος των κόκκων χρησιμοποιώντας μια λογαριθμική κλίμακα. Η καμπύλη χαράσσεται συσσωρευτικά, με κάθε μέγεθος κόκκου συμπεριλαμβανομένων όλων των λεπτών στοιχείων.

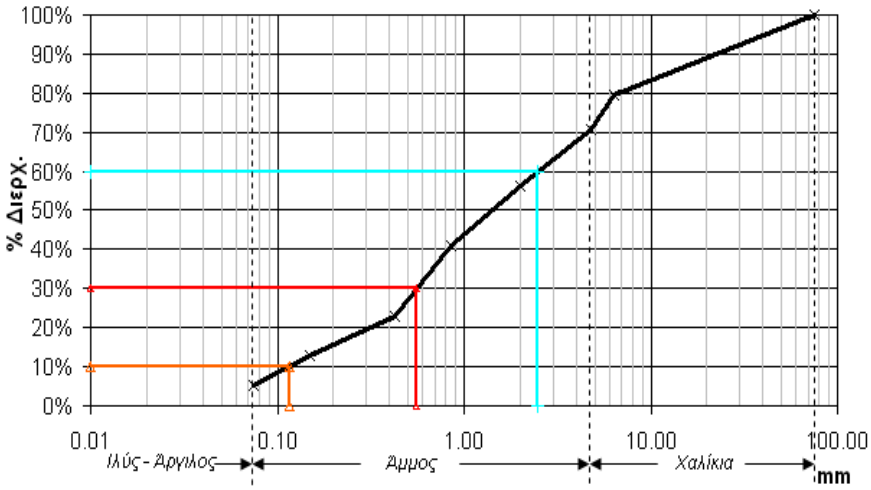
---

[11] Η κοκκομετρική ανάλυση του χώματος πραγματοποιήθηκε στο «Εργαστήριο Εμπλουτισμού του τομέα Εκμετάλλευσης Ορυκτών» του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου της Κρήτης.

Ένα καλά διαβαθμισμένο έδαφος, είναι σχετικά σταθερό, ανθίσταται στην φθορά και την διάβρωση, μπορεί να συμπυκνωθεί καλά και να αποκτήσει μεγάλη πυκνότητα με αποτέλεσμα να αναπτύσσει φέρουσα ικανότητα και μεγάλη αντοχή στη διάτμηση. Οι καλές ιδιότητες του υλικού προέρχονται από το γεγονός πως τα κενά μεταξύ των κόκκων συμπληρώνονται από κόκκους μικρότερης διαμέτρου. Στην συνέχεια τα κενά μεταξύ των κόκκων μικρότερης διαμέτρους συμπληρώνονται από κόκκους ακόμα μικρότερης διαμέτρου, κλπ.

Το ποσοστό των χονδρόκοκκων αδρανών (άμμος, χαλίκι και κροκάλες), διακρίνεται σχετικά εύκολα με το κοσκίνισμα. Ωστόσο, το ποσοστό των λεπτόκοκκων αδρανών μπορεί να διαπιστωθεί μόνο με καθίζηση γιατί τα αργιλικά ορυκτά προσκολλώνται πάνω στους μεγαλύτερους κόκκους. Για αυτό πριν γίνει η ξηρή κοσκίνιση γίνεται υγρή κοσκίνιση που επιτρέπει τον διαχωρισμό των κόκκων μεγέθους κάτω από τα 63 μm στους οποίους περιέχεται και η άργιλος. Μετά από αυτό, μελετώνται ξεχωριστά τα δύο μέρη.

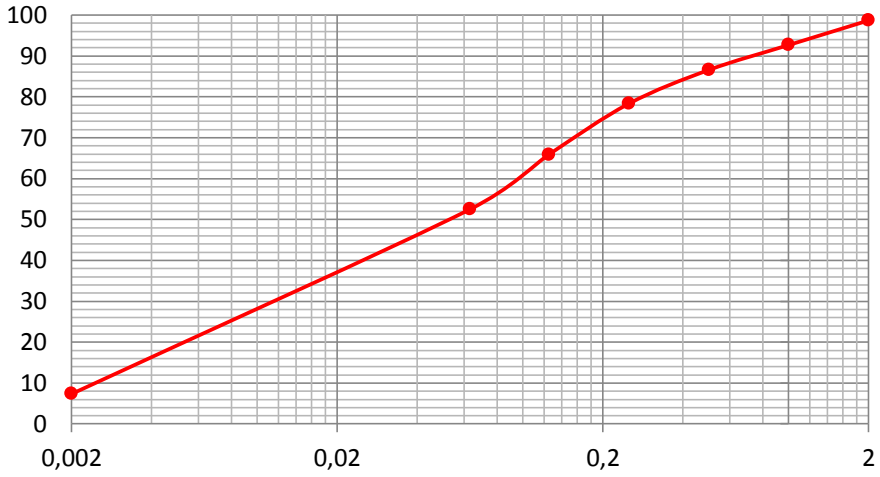
Σύμφωνα με την εδαφομηχανική η κοκκομετρική καμπύλη ενός καλά διαβαθμισμένου εδάφους έχει «σιγμοειδή» μορφή με γραμμικό το κύριο σκέλος, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 7.




**Διάγραμμα 7 Ένα καλά διαβαθμισμένο δείγμα χώματος (Σακελλαρίου και Κοζάνης 2003)**

*Αποτελέσματα*

Στο Διάγραμμα 8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων, ενώ οι πίνακες με τις μετρήσεις παρατίθενται στο (Παράρτημα Β).

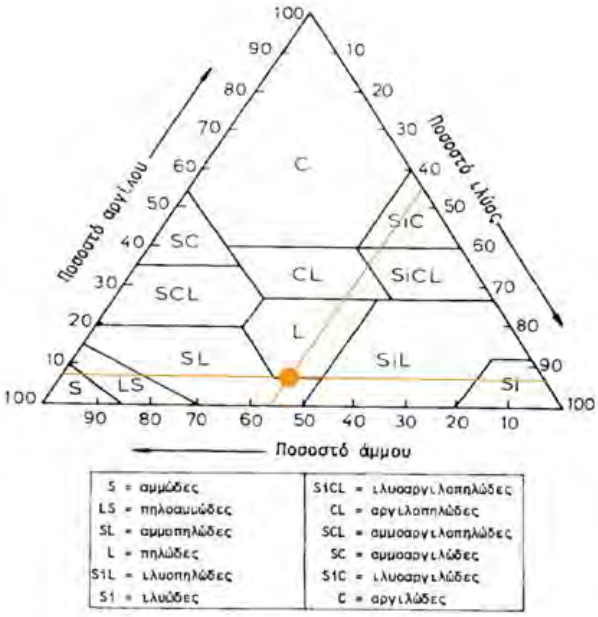



**Διάγραμμα 8 Κοκκομετρικής διαβάθμισης του χώματος που χρησιμοποιήσαμε**

Τα ποσοστά της κοκκομετρικής ανάλυσης οδηγούν σε μία πρώτη ταξινόμηση του πηλού και σε κάποια πρώτα συμπεράσματα. Με βάση το Διάγραμμα 7, το δείγμα μας είναι ένα καλά διαβαθμισμένο υλικό.

*Διάγραμμα ταξινόμησης*

Το υλικό βάσει της κοκκομετρίας του, ταξινομείται με την εδαφολογική του ονομασία ως «αμμοπηλώδες» ή «πηλώδες», όπως φαίνεται στην γραφική παράσταση με μορφή τριγώνου των τριών βασικών συστατικών των εδαφικών μειγμάτων του σχήματος (Διάγραμμα 9) (Σακελλαρίου και Κοζάνης 2003).




**Διάγραμμα 9 Ταξινόμηση του χώματος με βάση την διαβάθμιση της κοκκομετρίας (Σακελλαρίου και Κοζάνης 2003)**

*2. Καθορισμός PH - Έλεγχος παρουσίας οργανικού υλικού*[12]

Ο καθορισμός του PH θα μας οδηγήσει σε ασφαλή συμπεράσματα όσον αφορά τα ποσοστά οργανικής ύλης.

*περιγραφή*

Το αργιλώδες έδαφος είναι συνήθως βασικό, με τιμές PH μεταξύ 7 και 8,5. Σήμερα, λόγω της όξινης βροχής, η σκαμμένη γη από τις βιομηχανικές περιοχές μπορεί να είναι ελαφρώς όξινη ακριβώς κάτω από την επιφάνεια του χώματος. Η βασική κατάσταση του PH εμποδίζει συνήθως την ανάπτυξη μυκήτων (η ευνοϊκή τιμή του pH για τους μύκητες βρίσκεται συνήθως μεταξύ 6,5 και 4,5).

Επειδή τα οργανικά υλικά στα εδάφη (πηλούς) προέρχονται από μεγάλο αριθμό αποβλήτων ζώων και φυτών, είναι εξίσου μεγάλη και η ποικιλία

[12] Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο «Διαχείρισης Τοξικών και Επικίνδυνων Αποβλήτων» του τμήματος μηχανικών Περιβάλλοντος του πολυτεχνείου Κρήτης.

των οργανικών υλικών σε αυτά. Όλα αυτά οδηγούν σε ανεπιθύμητα αποτελέσματα στη μηχανική συμπεριφορά των εδαφών. Η παρουσία τους: α) μειώνει τη φέρουσα ικανότητα των εδαφών, β) αυξάνει τη συμπυκνωσιμότητα, γ) οδηγεί σε ολίσθηση και δ) συστολή που οφείλεται στις αλλαγές του ποσοστού υγρασίας. Η παρουσία οργανικών υλικών στα εδάφη συνοδεύεται συνήθως με όξινο PH (χαμηλό) (Minke 2006).

*Αποτελέσματα*

Η μέτρηση που έγινε στο εργαστήριο έδειξε ότι το pH του χώματός μας είναι **7,83**. Από εδώ συμπεραίνουμε ότι η ποσότητα οργανικής ύλης είναι μέσα στα επιτρεπόμενα όρια.

*3. Ορυκτολογική σύσταση*[13]

Η υπηρεσία περίθλασης ακτίνων Χ (XRD, X-Ray Diffraction) παρέχει πληροφορίες για την κρυσταλλική κατάσταση στερεών δειγμάτων, τις φάσεις που το απαρτίζουν, το κρυσταλλογραφικό τους σύστημα καθώς και τις διαστάσεις της μοναδιαίας κυψελίδας. Η ποιοτική εξακρίβωση των ορυκτών του πηλού θεωρείται σημαντική αλλά όχι αναγκαία. Βάσει της ορυκτολογικής σύστασης προσδιορίζονται καλύτερα οι φυσικές ιδιότητες του εδάφους, εξακριβώνοντας το αίτιο της μεταβολής του όγκου του πηλού που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα εργασία (Τεχνίτη 2012).

*περιγραφή*

Εν γένει το όριο ανιχνευσιμότητας μιας φάσης με τη μέθοδο της περίθλασης ακτίνων-Χ προσδιορίζεται στο 5% κ.β. Το δείγμα μπορεί να είναι είτε συμπαγές στερεό ή στερεό σε μορφή κόνεως. Στο εργαστήριο διατίθεται επίσης ηλεκτρονική βάση δεδομένων όλων των γνωστών φασμάτων περίθλασης και ανάλογο λογισμικό έτσι ώστε η διαδικασία ταυτοποίησης αγνώστων φάσεων να λαμβάνει χώρα αξιόπιστα και γρήγορα (Τεχνίτη 2012).

*αποτελέσματα*

Το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε για την περιθλασιμετρία ήταν μικρότερης κοκκομετρίας από 63μm και περιελάμβανε το αργιλικό κλάσμα μαζί με

[13] Η ορυκτολογική ανάλυση πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο «Γενική και Τεχνικής Ορυκτολογίας» του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου της Κρήτης

ένα ποσοστό ιλύος. Το περιθλασιόγραμμα έδειξε ότι ο *πηλός,* όσον αφορά τα ορυκτολογικά χαρακτηριστικά του αποτελείται από:

- 62% Χαλαζία
- 1-2% Αιματίτης (ορυκτό Σίδηρο)
- 6% Μοντμοριλονίτη (αργιλικό ορυκτό)
- 12% Καολινίτη (αργιλικό ορυκτό)
- 16% Μοσχοβίτης (αργιλικό ορυκτό)

*Συμπεράσματα*

Από τα παραπάνω αντιλαμβανόμαστε ότι η ύπαρξη των αργιλικών ορυκτών είναι σε μικρό ποσοστό. Αυτό βέβαια δεν σημαίνει άμεσα, ότι δεν θα έχουμε καλά αποτελέσματα σε μηχανικές αντοχές. Η ύπαρξη μοντμοριλονίτη σε ποσοστό 6% είναι σημαντική καθώς αυξάνει αρκετά την ειδική επιφάνεια[14] του χώματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η ειδική επιφάνεια του χώματος τόσο καλύτερη συνοχή του, όπως και η μηχανικές του αντοχές (Minke 2006). Βέβαια η ύπαρξη μοντμοριλονίτη στο χώμα δεν είναι πάντα θετική, καθώς τα χώματα με μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια έχουν και μεγάλες αυξομειώσεις όγκου όταν έρχονται σε επαφή με το νερό. Αυτό μπορεί να σημαίνει ότι είναι αναγκαία η προσθήκη άμμου για να αποφευχθεί αυτό το φαινόμενο.

**β. Άμμος**

Για την ταυτοποίηση της άμμου θα χρειαστούν μόνο δύο εργαστηριακές δοκιμές, η κοκκομετρική ανάλυση και ο καθορισμός του PH. Η πρώτη είναι πολύ σημαντική για να προχωρήσουμε στη σύνθεση χώματος και άμμου στην επόμενη ενότητα, ενώ η δεύτερη για την εξακρίβωση της απουσίας οργανικής ύλης.

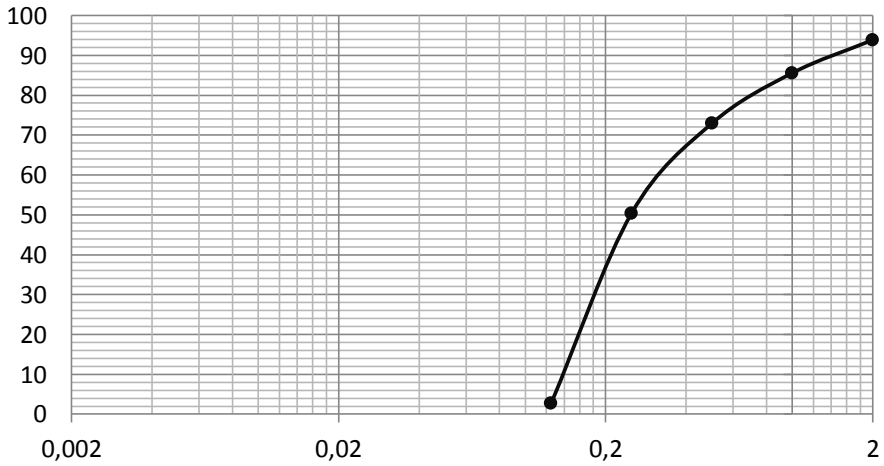
Η χρησιμοποιούμενη άμμος, όπως φαίνεται από το PH, δεν περιέχει οργανικά συστατικά και ακαθαρσίες που θα μπορούσαν να περιορίσουν τη θρόμβωση.

---

[14] Η ειδική επιφάνεια του εδάφους είναι το άθροισμα όλων των επιφανειών των σωματιδίων. Η παχιά άμμος έχει ειδική επιφάνεια περίπου 23 $cm^2$/ gr, η ιλύς περίπου 450 $cm^2$/ gr και η άργιλος από 10 $m^2$/gr (καολινίτης) μέχρι 1000 $m^2$/gr (μοντομιρολινίτης) (Minke 2006).

*1. Κοκκομετρική ανάλυση*

Στο σχήμα παρουσιάζεται η κοκκομετρική καμπύλη της άμμου.




**Διάγραμμα 10 Κοκκομετρική διαβάθμιση της άμμου που χρησιμοποιήσαμε**

*2. Καθορισμός PH*

Το PH της άμμου μετρήθηκε στο 9,21.

## 3. Επιλογή της σύστασης

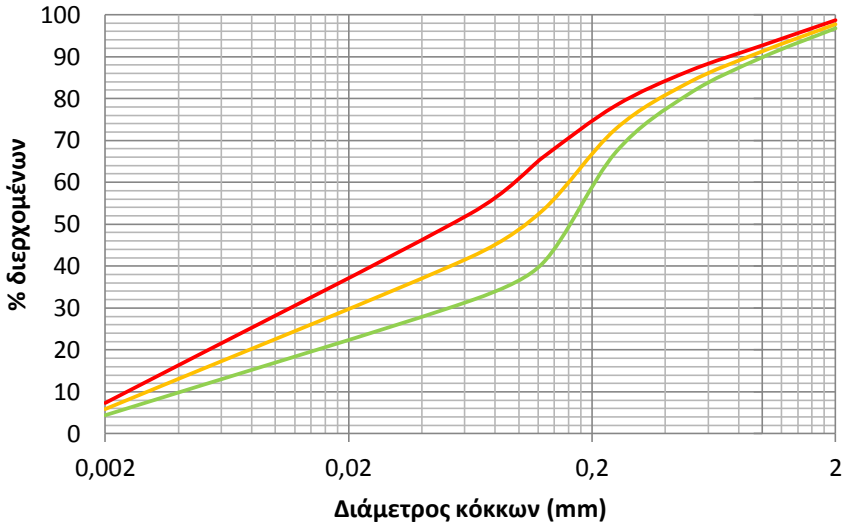
Σκοπός της διεξαγωγής αυτής της επιμέρους έρευνας είναι να βρεθεί η δυνατότητα βελτίωσης της πρώτης ύλης παραγωγής των ωμόπλινθων, μέσω τροποποίησης της κοκκομετρικής διαβάθμισης. Βάσει υπόθεσης θα ελέγξουμε εκτός από το καθαρό χώμα και άλλες δύο ακόμα συνθέσεις του χώματός με διαφορετικές προσμίξεις άμμου.

Οπότε εν τέλει θα συγκριθούν 3 διαφορετικές συστάσεις και θα επιλεγεί μία από αυτές. Σε ιδανικές συνθήκες θα μπορούσαμε να επιδιώξουμε ακόμα καλύτερη σύνθεση με επιπλέον δοκιμές βάσει των πρώτων αποτελεσμάτων.

Η Συγκριτική κοκκομετρική ανάλυση

Γνωρίζοντας τις κοκκομετρικές διαβαθμίσεις των πρώτων υλών μας, υπολογίστηκαν οι κοκκομετρικές καμπύλες άλλων δύο συνθέσεων πρώτης ύλης. Στο Διάγραμμα 11 απεικονίζονται οι τρεις καμπύλες των τριών παρακάτω συνθέσεων:

1) **100% χώμα**
2) **80% χώμα** με 20% άμμο
3) **60% χώμα** με 40% άμμο




**Διάγραμμα 11 Κοκκομετρική διαβάθμιση όλων των συνθέσεων που ερευνήθηκαν**

**Γενικά**

Οι παρακάτω πειραματικοί έλεγχοι αφορούν τα φυσικά και τα μηχανικά χαρακτηριστικά δοκιμίων της κάθε σύνθεσης. Στόχος είναι να βρεθεί η βέλτιστη από τις τρεις συνθέσεις για τη παραγωγή του «Plethro» (Κεφ. Δ.2) ως προς την αντοχή της και να επιλεγεί η σύνθεση που θα χρησιμοποιηθεί ως βάση για τους ελέγχους που θα ακολουθήσουν στην διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς του δομικού συστήματος.

Το σχεδιάγραμμα της ενότητας αυτής είναι το ακόλουθο:

a) Φυσικές ιδιότητες
   I. Καθορισμός ορίων Atterberg και ΟΜC
   II. Έλεγχος τυπικής σκληρότητας
   III. Προσδιορισμός γραμμικής συρρίκνωσης
   IV. Διάγραμμα ξήρανσης
   V. Εύρεση πυκνότητας
b) Μηχανικές ιδιότητες
   I. Έλεγχος θλιπτικής αντοχής
   II. Έλεγχος άμεσης διάτμησης
c) Συμπεράσματα – Σύγκριση

**α. Φυσικές ιδιότητες**

Σύμφωνα με τον Gernot Minke για να θεωρηθεί ολοκληρωμένη η μελέτη ως προς τα φυσικά χαρακτηριστικά του υλικού θα πρέπει να μελετηθεί βάσει τριών κατηγοριών.

- Επίδραση του νερού
- Επίδραση του ατμού
- Επίδραση της θερμότητας

Στην συγκεκριμένη εργασία η δοκιμές περιορίστηκαν στη μελέτη των κύριων επιδράσεων του νερού στο υλικό. Οι επιδράσεις αυτές επηρεάζουν άμεσα τις μηχανικές αντοχές του δομικού υλικού.

<u>Καθορισμός του ΟΜC και των ορίων Atterberg[15] (παράρτημα Α)</u>

Ο καθορισμός των ορίων Atterberg είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για την κατάταξη του εδάφους, αλλά κυρίως για τις πληροφορίες που μας δίνει για την σχέση του με την υγρασία. Ο καθορισμός του ΟΜC αποσκοπεί στον προσδιορισμό της βέλτιστης περιεκτικότητας σε νερό, με την οποία – με δεδομένο σταθερό έργο συμπύκνωσης – επιτυγχάνεται η καλύτερη συμπύκνωση των εδαφικών υλικών (Σακελλαρίου και Κοζάνης 2003). Ο ακριβής προσδιορισμός του ΟΜC δεν κρίθηκε αναγκαίος καθώς

[15] Ο καθορισμός του ΟΜC και των ορίων Atterberg για τις διαφορετικές συνθέσεις χώματος πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο «Εφαρμοσμένης Γεωλογίας» του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του πολυτεχνείου της Κρήτης.

αναφέρεται σε πρότυπα που δεν σχετίζονται με κτιριοδομικό τομέα. Μία πιο ακριβής μέθοδος προσδιορισμού ΟΜC του χώματος γίνεται μέσω της πρότυπης δοκιμής συμπύκνωσης Proctor (παράρτημα Α). Η συγκεκριμένη διαδικασία ακολουθήθηκε μόνο στη σύνθεση του καθαρού μείγματος για επαλήθευση του αποτελέσματος.

*Περιγραφή*

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής:

1. Καθορισμός των ορίων Atterberg και για τις τρεις συνθέσεις πρώτων υλών
2. Χρήση των αποτελεσμάτων για χαρακτηρισμό των πρώτων υλών βάσει πίνακα κατάταξης της εδαφομηχανικής[16]
3. Χρήση των ίδιων αποτελεσμάτων για τον κατά προσέγγιση προσδιορισμό της «ιδανικής περιεκτικότητας σε υγρασία» / ΟΜC

Η διαδικασίες περιγράφονται εκτενέστερα στο Παράρτημα Α, ενώ τα αποτελέσματα των δικών μας μετρήσεων καταγράφονται στο Παράρτημα Β.

*1. Όρια Atterberg*

Τα όρια Atterberg περιγράφουν την μετάπτωση του εδάφους από την υγρή στην πλαστική και στην συνέχεια στην ημιστερεή και στην στερεή κατάσταση, σύμφωνα με τα ποσοστά της περιεχόμενης υγρασίας. Δείχνουν ουσιαστικά την συμπεριφορά ενός εδάφους ανάλογα με την μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας και καταδεικνύουν αν κάποιο έδαφος είναι ευαίσθητο στις μεταβολές της υγρασίας. Πέραν της χρήσης τους ως δείκτες κατάταξης του εδαφικού υλικού, αποτέλεσαν και δείκτες για τον προσεγγιστικό προσδιορισμό του ΟΜC.

[16] Η εδαφομηχανική είναι ο κλάδος της εφαρμοσμένης μηχανικής όπου πραγματεύεται την συμπεριφορά και τις μηχανικές ιδιότητες του εδάφους (όπως η αντοχή του εδάφους, η συμπεριφορά του εδάφους σύμφωνα με την περιεχόμενη υγρασία), τις μεθόδους σχεδιασμού τεχνικών έργων που εδράζονται και αλληλεπιδρούν σε / με αυτό (όπως θεμελιώσεις κτιριακών έργων και γεφυρών, οδοστρώματα, σήραγγες) καθώς και των κατασκευών από έδαφος.

Η περιγραφή των ορίων Atterberg είναι η εξής (Σακελλαρίου και Κοζάνης 2003):

- **Όριο υδαρότητας (LL)**: Είναι η (%) τιμή της περιεχόμενης υγρασίας που χωρίζει την πλαστική από την υδαρή κατάσταση.
- **Όριο πλαστικότητας (PL)**: Είναι η (%) τιμή της περιεχόμενης υγρασίας που χωρίζει την πλαστική από ισχνή κατάσταση.
- **Όριο συρρίκνωσης (SL)**: Είναι η τιμή της περιεχόμενης υγρασίας κάτω από την οποία ο όγκος του εδαφικού δείγματος παραμένει σταθερός με συνεχιζόμενη ξήρανση.

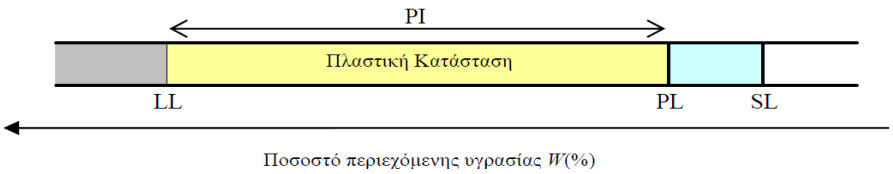
Μέσω των ορίων Atterberg προσδιορίζονται οι παρακάτω χαρακτηριστικές τιμές (δείκτες):

- **Δείκτης πλαστικότητας (PI)**: Είναι το εύρος της περιεχόμενης υγρασίας στο οποίο το έδαφος είναι πλαστικό. Ο δείκτης καθορίζεται από τον τύπο:

$$PI = LL - PL$$

- **Δείκτης υδαρότητας (LI):** Μας επιτρέπει να συγκρίνουμε την πλαστικότητα ενός εδάφους με την περιεχόμενη υγρασία. Εάν LI=100% το έδαφος είναι στο όριο υδαρότητας, ενώ αν LI=0% το έδαφος είναι στο όριο πλαστικότητας. Ο δείκτης:

$$LI = (LL- PL)/PI$$




**Διάγραμμα 12 Όρια Atterberg (Σακελλαρίου και Κοζάνης 2003)**

*Αποτελέσματα*

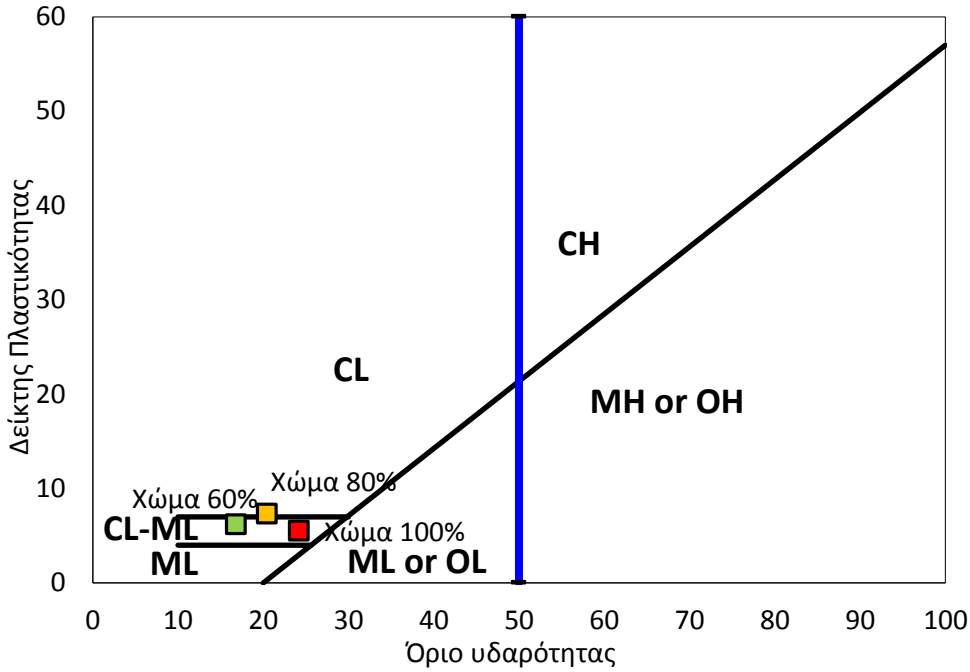
Τα αποτελέσματα της ερευνητικής διαδικασίας των ορίων Atterberg καταγράφονται στον Πίνακας 9

| | LL(%) | PL(%) | PI(%) |
|---|---|---|---|
| Χώμα 100% | 24.20 | 18.68 | 5.52 |
| Χώμα 80% | 20.40 | 13.06 | 7.34 |
| Χώμα 60% | 16.80 | 10.57 | 6.23 |

**Πίνακας 9 Τα όρια Atterberg των διαφορετικών συνθέσεων χώματος και άμμου**

*2. Προσδιορισμός της κατάταξης του χώματος βάσει των ορίων Atterberg και του Δείκτη πλαστικότητας (PI)*

Με βάση τα όρια Atterberg συμπληρώνεται ο Πίνακας 10.



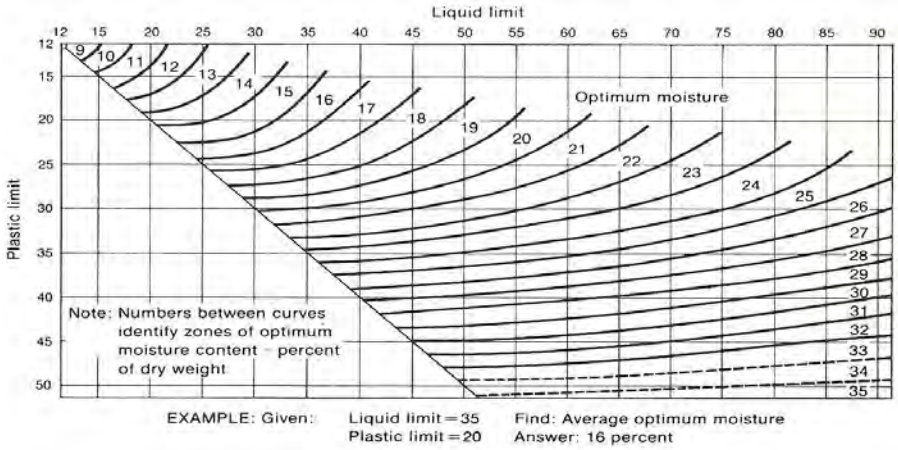

| Κύριο Γράμμα | Δευτερεύον Γράμμα |
|---|---|
| G : Χάλικες | W : Καλά διαβαθμισμένο |
| S : Αμμος | P : Πτωχά διαβαθμισμένο |
| M : Ιλύς | M : Με μη πλαστικά λεπτομερή |
| C : Αργιλος | C : Με πλαστικά λεπτομερή |
| O : Οργανικό έδαφος | L : Χαμηλής πλαστικότητας (LL<50) |
| Pt : Τύρφη | H : Υψηλής πλαστικότητας (LL>50) |

**Πίνακας 10 Κατάταξη του χώματος βάσει των ορίων Atterberg**

Από τον Πίνακας 10 Κατάταξη του χώματος βάσει των ορίων Atterberg οι συνθέσεις χαρακτηρίζονται ως εξής:

- Χώμα 100% είναι αργιλώδες ιλυώδες με χαμηλή πλαστικότητα
- Χώμα 80% είναι αργιλώδες με χαμηλή πλαστικότητα
- Χώμα 60% είναι αργιλώδες ιλυώδες με χαμηλή πλαστικότητα

*3. Εντοπισμός «ιδανικής περιεκτικότητας σε υγρασία» / OMC σε εξάρτηση με τα όρια Atterberg.*




**Πίνακας 11 Τρόπος εντοπισμού της «ιδανικής περιεκτικότητας σε υγρασία» ή OMC**

Από τον παραπάνω πίνακα καταλήγουμε στα παρακάτω αποτελέσματα

| | OMC(%) |
|---|---|
| Χώμα 100% | 13 |
| Χώμα 80% | 10 |
| Χώμα 60% | 9 |

**Πίνακας 12 Τα όρια Atterberg και το OMC των διαφορετικών συνθέσεων χώματος και άμμου**

*Συμπεράσματα*

Όπως βλέπουμε στον Πίνακας 12, τα OMC των διαφορετικών συστάσεων είναι κάτω από το όριο πλαστικότητας (Πίνακας 10). Η υγρασία αυτή είναι η ιδανική για «Rammed Earth» τεχνικές που το χώμα θέλουμε να συμπιεστεί με την λιγότερη δύναμη. Στις άλλες τεχνικές που το χώμα θέλουμε να είναι πιο εύπλαστο και εργάσιμο πρέπει να προστεθεί επιπλέον νερό. Η έξτρα υγρασία μπορεί να είναι μέχρι και 10% πάνω από το OMC (Minke 2006). Παρακάτω περιγράφεται ένας έλεγχος που προσδιορίζει την υγρασία που πρέπει να έχει το μείγμα μέσω της τυπικής σκληρότητας.

Έλεγχος τυπικής σκληρότητας[17]

Ο καθορισμός της τυπικής σκληρότητας θα καθορίσει την επιπλέον υγρασία που θα χρησιμοποιηθεί στο μείγμα και για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα των επόμενων δοκιμών. Το γερμανικό πρότυπο DIN 18952 περιγράφει τα ακόλουθα βήματα που απαιτούνται για να επιτευχθεί ο τυπικός δείκτης σκληρότητας.

*Περιγραφή*

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής για κάθε διαφορετική σύνθεση:

- Φτιάχνουμε ένα μείγμα περίπου 1200gr και προσθέτουμε την OMC υγρασία
- Φτιάχνουμε μία μπάλα 200gr και την πετάμε από τα 2m
- Μετράμε το δίσκο που δημιουργείτε από την επαφή με το έδαφος
- Αν η διάμετρος είναι 7 cm για αμμώδη και 5cm για αργιλώδη ή ιλυώδη χώματα, τότε η υγρασία αυτή είναι η ιδανική
- Αν δεν είναι τότε προσθέτουμε νερό και το ξανακάνουμε

*Αποτελέσματα*

| ΜΕΙΓΜΑ | ΠΟΣΟΣΤΟ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΤΥΠΙΚΗΣ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ |
|---|---|
| 100%ΧΩΜΑ | 18% |
| 80%ΧΩΜΑ | 15% |
| 60%ΧΩΜΑ | 14% |

**Πίνακας 13 Υγρασία ελέγχου τυπικής σκληρότητας**

Η υγρασία που προέκυψε από τον έλεγχο της τυπικής σκληρότητας είναι η υγρασία που χρησιμοποιήθηκε στα δείγματα μέχρι την κατασκευή των πλίνθων. Θεωρήθηκε αρκετά καλή σε εργασιμότητα .

[17] Ο έλεγχος της τυπικής σκληρότητας για τις διαφορετικές συνθέσεις χώματος πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο «Εφαρμοσμένης Γεωλογίας» του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του πολυτεχνείου της Κρήτης.

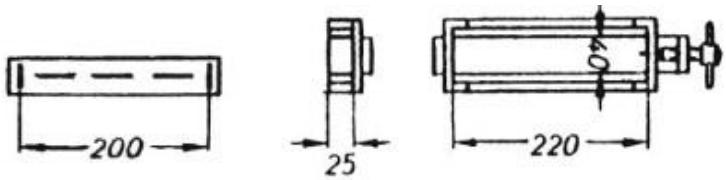
Έλεγχος γραμμικής συρρίκνωσης[18]

Γνωρίζοντας την γραμμική συρρίκνωση των μειγμάτων μπορούμε να υποθέσουμε τις μεταβολές των διαστάσεών των ωμόπλινθων κατά την ξήρανση. Αυτό μας βοηθάει να αντιληφθούμε ποια μείγματα θα έχουν μεγάλες παραμορφώσεις και ρηγματώσεις κατά την ξήρανση.

*Περιγραφή*

Για να εντοπιστεί η γραμμική συρρίκνωση ακολουθήσαμε την παρακάτω διαδικασία:

- Το υλικό πιέζεται και συμπιέζεται επανειλημμένα από ένα κομμάτι ξύλου περίπου 2 x 2 εκατοστών σε διατομή μέσα σε δοχείο μορφής όπως αυτό που υποδεικνύεται στην Εικόνα 6 και δημιουργούνται 3 δείγματα.
- Χαράζονται σημάδια κάθε 200 χιλιοστά τα οποία γίνονται με ένα μαχαίρι.
- Τα δείγματα ξηραίνονται για τρεις ημέρες σε ένα δωμάτιο. Στη συνέχεια θερμαίνονται στους 60°C σε φούρνο μέχρις ότου σταματήσουν να συρρικνώνονται.
- Ο μέσος όρος της συρρίκνωσης των τριών δειγμάτων σε σχέση με το μήκος των 200 χιλιοστών δίνει το βαθμό γραμμικής συρρίκνωσης σε ποσοστά. Εάν η συρρίκνωση ενός δείγματος διαφέρει περισσότερο από 2 χιλιοστά από τις άλλες, τότε το δείγμα πρέπει να ανακατασκευαστεί.




**Εικόνα 6 Καλούπι για τον έλεγχο της γραμμικής συρρίκνωσης**

*Αποτελέσματα*

| | 100% ΧΩΜΑ | 80% ΧΩΜΑ | 60% ΧΩΜΑ |
|---|---|---|---|
| Αρχική υγρασία | 18% | 15% | 14 % |
| Ποσοστό γραμμικής Συρρίκνωσης | 7.75 | 6.75 | 6.75 |

**Πίνακας 14 Ποσοστό γραμμικής συρρίκνωσης**

[18] Ο έλεγχος γραμμικής συρρίκνωσης πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο «Εφαρμοσμένης Γεωλογίας» του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του πολυτεχνείου της Κρήτης.

Το καθαρό δείγμα όπως ήταν λογικό καθώς περιείχε περισσότερο νερό και ποσοστά αργίλου, παρουσίασε την μεγαλύτερη συρρίκνωση. Από την προσθήκη 20% άμμου και μετά φαίνεται το αυτό φαινόμενο αυτό να σταθεροποιείται.

Διάγραμμα Ξήρανσης

Την περίοδο που χρειάζονται οι νωποί πηλοί για να φτάσουν **στην ισορροπία σε περιεκτικότητα υγρασίας (***equilibrium moisture content***)** την ονομάζουμε «περίοδο ξήρανσης» (Minke 2006).

Κατά την περίοδο αυτή εμφανίζεται:

- μείωση της περιεκτικότητας σε νερό
- αύξηση της συρρίκνωσης

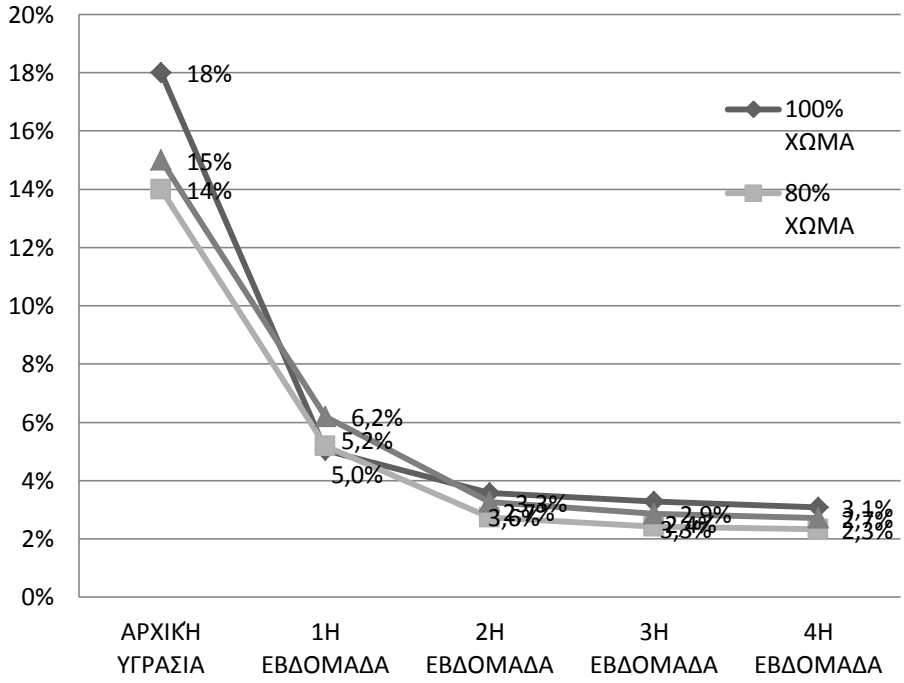
*Περιγραφή*

Οι μετρήσεις του διαγράμματος έγιναν στα κυβικά δοκίμια 15*15*15cm, που χρησιμοποιήθηκαν για τις δοκιμές της θλιπτικής αντοχής.

Η ξήρανση των δοκιμίων έγινε σε μη ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και αερισμού. Το σημείο που τοποθετήθηκαν παρ' όλα αυτά εξασφάλιζε την προστασία από το άμεσο ηλιακό φως. Η περίοδος ξήρανσης ήταν ο Ιούνιος και Ιούλιος του 2013. Η μετρήσεις έγιναν ανά μία εβδομάδα μέχρι την τέταρτη στην σειρά που δεν υπήρχε μεταβολή του βάρους.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα δοκίμια του μείγματος από 100% χώμα παράχθηκαν μία βδομάδα μετά από τα υπόλοιπα. Στην διάρκεια αυτή ανέβηκε έντονα η θερμοκρασία καθώς ήμασταν στα τέλη του Ιούνη. Επομένως οι συνθήκες δεν ήταν ίδιες για όλα τα δοκίμια.

*Αποτελέσματα*




**Διάγραμμα 13 Πτώση υγρασίας κατά την περίοδο ξήρανσης**

Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι η ταχύτητα ξήρανσης της πρώτης σύνθεσης με 100 % χώμα ήταν μεγαλύτερη από των άλλων δύο. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε διάφορες παραμέτρους, όπως το σημείο όπου τοποθετήθηκαν για να στεγνώσουν, ή τις διαφορετικές καιρικές συνθήκες στην κατά αντιστοιχία πρώτη εβδομάδα ξήρανσης.

<u>Πυκνότητα</u>

Η πυκνότητα του εδάφους καθορίζεται από την αναλογία της ξηρής μάζας προς τον όγκο (συμπεριλαμβανομένων των πόρων) (Minke 2006).

- Το **φρεσκοσκαμένο έδαφος** έχει πυκνότητα 1000-1500 KN/$m^3$.
- Το **συμπιεσμένο έδαφος,** όπως στα “**rammed earthworks”** ή στα **“soil blocks**”, έχει πυκνότητα που ποικίλλει από 1700 έως 2200 KN/$m^3$(ή και περισσότερο, αν περιέχει σημαντικές ποσότητες από χαλίκι ή μεγαλύτερα αδρανή).

*Περιγραφή*

Η πυκνότητα στη συγκεκριμένη έρευνα μετρήθηκε βάσει των δοκιμίων που δημιουργήθηκαν για τις δοκιμές της μηχανικής αντοχής. Η πυκνότητα αυτή θεωρείται η ίδια με την πυκνότητα των ωμόπλινθων που κατασκευάστηκαν σε επόμενο στάδιο, δεδομένου ότι χρησιμοποιήθηκε η ίδια τεχνική συμπίεσης.

Για την μέτρηση του όγκου χρησιμοποιήθηκαν οι τελικές διαστάσεις των δοκιμίων, που λόγω συρρίκνωσης ή μικρών παραμορφώσεων κατά την διαδικασία της ξήρανσης είχαν μικρές αποκλίσεις από αυτές των καλουπιών.

*Αποτελέσματα*

| ΔΕΙΓΜΑ | ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ |
|---|---|
| 100% ΧΩΜΑ | 2090 $KN/m^3$ |
| 80% ΧΩΜΑ | 2020 $KN/m^3$ |
| 60% ΧΩΜΑ | 2010 $KN/m^3$ |

**Πίνακας 15 Πυκνότητα των διαφορετικών συνθέσεων χώματος**

Γνωρίζοντας την πυκνότητα μπορείς να υπολογίσεις το βάρος του τούβλου, αρκεί να πολλαπλασιάσεις τον όγκο του με την πυκνότητα. Μετά τον υπολογισμό της πυκνότητας υπολογίσαμε ότι έχουμε να κάνουμε με ένα αρκετά βαρύ υλικό. Έτσι εντάχθηκε σαν δεδομένο στον σχεδιασμό του πρωτότυπου.

## β. Μηχανικές ιδιότητες

Έλεγχος θλιπτικής αντοχής[19] (παράρτημα Α)

Η θλιπτική αντοχή των ξηρών στοιχείων του κτηρίου από γη, όπως από μπλοκ γης και από συμπιεσμένης γης τοίχους, διαφέρουν σε γενικές γραμμές από 5 έως 50 kg/cm2 , δηλαδή 0,5 – 5MPa. Αυτό δεν εξαρτάται μόνο από την ποσότητα και τον τύπο της αργίλου, αλλά και από την κατανομή του μεγέθους των κόκκων της ιλύος, της άμμου και των μεγαλύτερων αδρανών, καθώς και από την συμπίεση και τη μέθοδο παρασκευής τους (Μπέη 2004).

[19] Οι δοκιμές θλίψης πραγματοποιήθηκαν στο «Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Μηχανικής» του Γενικού τμήματος του Πολυτεχνείου της Κρήτης.

*Περιγραφή*

Έξι κυβικά δοκίμια για κάθε σύνθεση, διαστάσεων 15X15X15cm, υποβλήθηκαν σε θλίψη μέχρι την θραύση τους. Σκοπός της δοκιμής θλίψης είναι να προσδιοριστεί το όριο θραύσης.

*Αποτελέσματα*

| ΔΕΙΓΜΑ | Μέση όρος αντοχής MPa | Max αντοχής MPa | Min αντοχής MPa |
|---|---|---|---|
| 100% ΧΩΜΑ | 3.1 | 3,5 | 2,8 |
| 80% ΧΩΜΑ | 2.8 | 3,1 | 2 |
| 60% ΧΩΜΑ | 3.0 | 3,3 | 2,6 |

**Πίνακας 16 Μέσος όρος και τα ακρότατα της δύναμης θραύσης**

Από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι ο μέσος όρος των δοκιμίων με 80% χώμα είναι ο πιο χαμηλός. Βέβαια στο συγκεκριμένο δείγμα παρατηρήθηκε μεγάλη διαφορά μέγιστης και ελάχιστης τιμής. Επίσης διαπιστώθηκε ότι οι δύο πιο χαμηλές τιμές του απείχαν κατά 0,5 MPa από τις επόμενες τιμές. Επειδή θεωρήθηκε ότι αυτή η διαφορά προέρχεται από σφάλμα στην κατασκευή, αποφασίστηκε αυτές οι τιμές να μην υπολογιστούν.

Στην συνέχεια, μετά από τον νέο υπολογισμό του μέσου όρου, ακολούθησε επόμενη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Σε αυτήν απορρίφτηκαν όλα τα δοκίμια που είχαν τιμές που διέφεραν περισσότερο του 10% από το μέσο όρο (Minke 2006). Στον Πίνακας 17 παρατίθενται τα τελικά αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής.

| ΔΕΙΓΜΑ | Επιτρεπόμενο όριο Max (MPa) +10% του Μ.Ο. | Επιτρεπόμενο όριο Min (MPa) -10% του Μ.Ο. | **Θλιπτική αντοχή σε MPa** |
|---|---|---|---|
| 100% ΧΩΜΑ | 3,43 | 2,8 | **3,1** |
| 80% ΧΩΜΑ | 3,075 | 2,51 | **2,7** |
| 60% ΧΩΜΑ | 3,26 | 2,67 | **2,9** |

**Πίνακας 17 Τιμές θλιπτικής αντοχής των διαφορετικών συνθέσεων**

Έλεγχος άμεσης διάτμησης[20] (παράρτημα Α)

Γενικά, αντοχή σε διάτμηση ονομάζεται η διατμητική τάση, η οποία μπορεί να προκαλέσει ολίσθηση δύο εσωτερικών επιφανειών του εδάφους (Στειακάκης 2010).

*περιγραφή*

Η δοκιμή που ακολουθήθηκε ονομάζεται **ταχεία στερεοποιημένου δοκιμίου**. Τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν, ήταν σχήματος κυλινδρικού, με διαστάσεις διαμέτρου 60mm και ύψος 23mm. Στη δοκιμή της άμεσης διάτμησης τα δοκίμια του εδάφους υπόκεινται σε θραύση σε ειδική μηχανή. Τα δοκίμια τοποθετούνται σε έναν υποδοχέα, ο οποίος υποδιαιρείται σε δύο ίσα μέρη καθ' ύψος. Η θραύση επιτυγχάνεται με την πλάγια μετατόπιση των δύο μελών του υποδοχέα προς το κέντρο. Η επίπεδη επιφάνεια στην οποία γίνεται η θραύση λέγεται και επιφάνεια διάτμησης. Τέλος, μετράται η μεταβολή της διατμητικής αντοχής του εδάφους με τη μεταβολή της όρθιας τάσης, που εφαρμόζεται κάθετα στην επιφάνεια διάτμησης.

Η διατμητική αντοχή του εδάφους, τη στιγμή της θραύσης του κατά ολίσθηση, δίδεται από τη σχέση του Coulomb:

$$\tau = c + \sigma \cdot \varepsilon\varphi\varphi$$

όπου

τ : η αντοχή του εδάφους σε διάτμηση
c : η συνοχή του εδάφους [21]
σ : η κάθετη τάση στο επίπεδο διάτμησης και
φ : η γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους[22]

Τα ζητούμενα της δοκιμής αυτής είναι να υπολογιστεί η γωνία εσωτερικής τριβής φ και ο δείκτη συνοχής c.

---

[20] Ο έλεγχος άμεσης διάτμησησς πραγματοποιήθηκε στο «Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας» του Πολυτεχνείου της Κρήτης.

[21] Οι ελκτικές δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ των επιφανειών των εδαφικών κόκκων, εξαρτώνται από τους δεσμούς που έχουν αναπτυχθεί μεταξύ των κόκκων (συγκόλληση) και μπορεί να λεχθεί ότι προσδίδουν στο έδαφος διατμητική αντοχή ανάλογης φύσης με αυτή των στερεών σωμάτων.

[22] Η τριβή που αναπτύσσεται στα σημεία επαφής των εδαφικών κόκκων και η αλληλο-εμπλοκή τους που οφείλεται στο σχήμα τους.

*Αποτελέσματα*

| | C (kPa) | φ ($^o$) |
|---|---|---|
| Χώμα 100% | 424,1 | 0 |
| Χώμα 80% | 164,5 | 0,1 |
| Χώμα 60% | 165,1 | 0,1 |

**Πίνακας 18 Αποτελέσματα άμεσης διάτμησης**

Από τις παραπάνω τιμές συμπεραίνουμε ότι η σύνθεση με 100% χώμα υπερέχει σε συνοχή από τα άλλα δύο, γεγονός που δικαιολογεί και την μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή του.

## 4. Συμπεράσματα – επιλογή σύστασης

Από τις παρατηρήσεις και τα αποτελέσματα όλων των παραπάνω δοκιμών, φυσικών και μηχανικών, οδηγηθήκαμε στο συμπέρασμα ότι το μείγμα με προσθήκη 20% άμμου είναι το καταλληλότερο για την παραγωγή των νέων δομικών μονάδων.

Χώμα 100%

Το αρχικό δείγμα χώματος, δηλαδή χωρίς προσθήκη άμμου, φαίνεται να έχει πλεονέκτημα στα περισσότερα χαρακτηριστικά από τις άλλες δύο συνθέσεις.

Εμφανίζει ιδιαίτερα υψηλή συνοχή και η αντοχή του σε θλίψη είναι η υψηλότερη όλων.

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα του μείγματος με μηδενική προσθήκη άμμου, είναι ο μεγάλος βαθμός συρρίκνωσης. Η ιδιότητα αυτή δεν μας επιτρέπει να το χρησιμοποιήσουμε για το συγκεκριμένο σχέδιο ωμόπλινθου. Αν η διαδικασία ξήρανσης γινόταν υπό ελεγχόμενες συνθήκες θα μπορούσε να προβλεφθεί με σχετική ακρίβεια η αλλαγή όγκου του δομικού υλικού και να υπολογιστεί από το στάδιο του σχεδιασμού. Σε αυτήν την περίπτωση θα μπορούσαμε επίσης να αποφύγουμε και την εμφάνιση ρωγμών στην επιφάνεια του υλικού.

Σε περίπτωση που χρησιμοποιούνταν μηχανική πρέσα για την παραγωγή των ωμόπλινθων θα μπορούσε επίσης να αποφευχθεί η εμφάνιση τέτοιων

στοιχείων. Αυτό θα συνέβαινε διότι θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε μικρότερο ποσοστό υγρασίας στην πρώτη ύλη.

Χώμα 80%

Η συγκεκριμένη σύνθεση πρώτης ύλης δεν ξεχώρισε σε κάποιο από τα αποτελέσματα, αλλά τα αποτελέσματά της ήταν ικανοποιητικά σε όλες τις δοκιμές. Συνδυάζει ανεκτό βαθμό συρρίκνωσης και χωρίς εμφάνιση πολλών και μεγάλων ρωγμών, με την πιο ικανοποιητική απόδοση στο να μην παραμορφώνονται οι διαστάσεις του δοκιμίου κατά το στάδιο του ξεκαλουπώματος.

Το σημαντικό μειονέκτημα του μείγματος αυτού είναι η χαμηλή αντοχή σε θλιπτική τάση.

Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι καθοριστικής σημασίας για την δοκιμαστική μοντελοποίηση του οικοδομικού συστήματος, που η αντοχή σε θλιπτική τάση δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική.

Χώμα 60%

Το υλικό αυτό φαίνεται να έχει αντίστοιχες ιδιότητες με την προηγούμενη σύνθεση στις περισσότερες δοκιμές. Εμφανίζει όμως ένα σημαντικό πλεονέκτημα στην θλιπτική αντοχή. Βέβαια η εργασιμότητα του δεν ήταν πολύ καλή και σε συνδυασμό με την εμφάνιση μικρών παραμορφώσεων κατά την φάση του ξεκαλουπώματος, οδηγηθήκαμε στην απόρριψη του.

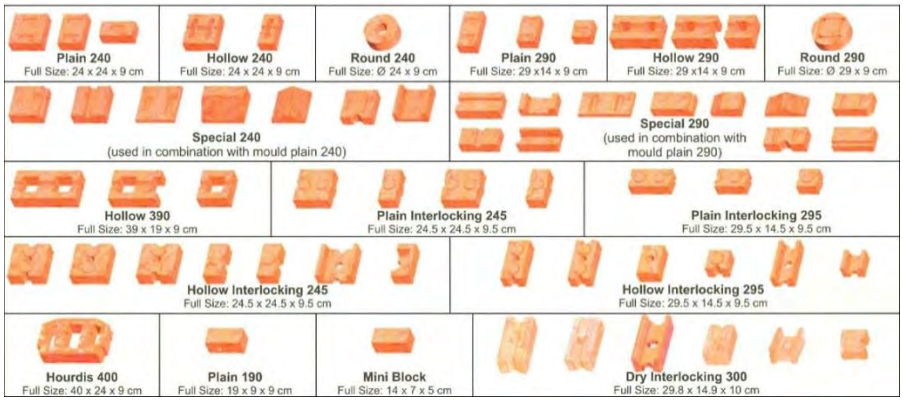
# Δ. Πειραματικό Μέρος Β’

Δομικό Σύστημα "Plethro"

# 1. Εισαγωγή

**«Auram»**

Το δεύτερο πειραματικό μέρος αναφέρεται στην ανάπτυξη ενός νέου φέροντος δομικού συστήματος από συμπιεσμένους πλίνθους. Έχουν γίνει αρκετές έρευνες πάνω σε τέτοια συστήματα. Η πιο ανεπτυγμένη έρευνα και εφαρμοσμένη, είναι αυτή του Auroville Earth Institute στην Ινδία (έδρα της UNESCO στην Ασία). Η συγκεκριμένη έρευνα λόγω της ανάγκης για φθηνή κατοίκηση στις περιοχές που δραστηριοποιείται έχει βρει εύφορο έδαφος και έχει αναπτύξει πάρα πολλά διαφορετικά μοντέλα δόμησης που λειτουργούν ως φέροντα στοιχεία. Το «Auram» μπορεί να δημιουργήσει τοίχους, δοκάρια και κολώνες με μικρή συμμετοχή τσιμέντου, στην σύσταση αλλά και στην σύνδεση των πλίνθων μεταξύ τους.

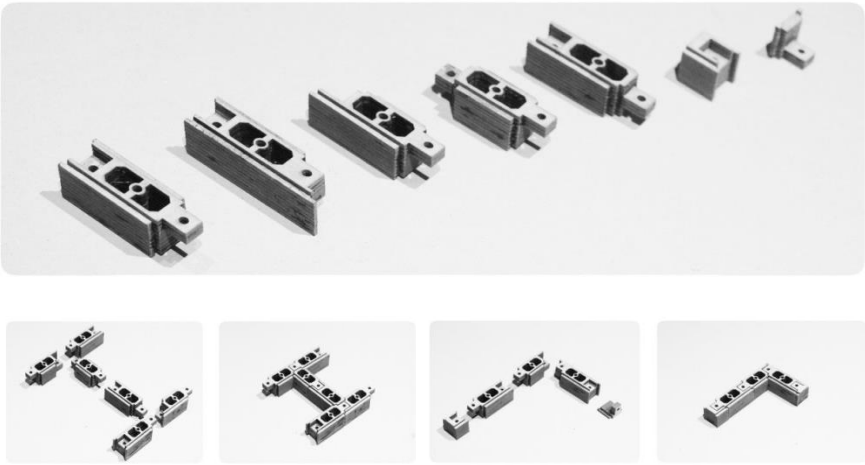



**Εικόνα 7 Οι συμπιεσμένη πλίνθοι «Auram» του Auroville Earth Institute (www.earth-auroville.com)**

**«Legodome 1»**

Η δική μας έρευνα και πειραματισμός άρχισε από το «Legodome1», το οποίο αναπτύχθηκε από τον Νίκο Ασημάκη (μέλος της ερευνητικής ομάδας στην συνέχεια) στο μάθημα «Ελαφριές κατασκευές» του επίκουρου καθηγητή Ιάκωβου Ρήγου, στο πολυτεχνείο της Κρήτης την περίοδο 2010-2011. Το «Legodome1» δεν ασχολήθηκε με την έρευνα του υλικού παρά μόνο με την σχεδίαση και την ανάπτυξη του δομικού συστήματος. Το καινοτόμο χαρακτηριστικό είναι η δυνατότητα που δίνεται στο σύστημα να αποσυναρμολογείται. Αποτελείται από 7 μονάδες

οι οποίες έχουν σχεδιασμένες εγκοπές για να δένουν μεταξύ τους. Το χτίσιμο των τοιχίων γίνεται αναγκαστικά σε σχήμα γωνίας σε κάτοψη, καθώς το πάχος του τοίχου που δημιουργούν είναι 20 cm το οποίο θεωρείται μικρό σε αντοχή για τις πλευρικές φορτίσεις. Το δέσιμο των μονάδων που σχηματίζουν ένα τοιχίο γίνεται χωρίς κονίαμα και επιτυγχάνεται μέσω προεντεταμένων μεταλλικών οπλισμών που σφίγγουν στην θεμελίωση και στα μεταλλικά διαζώματα.



**Εικόνα 8 Οι διαφορετικές μονάδες του «LEGODOME 1» και δυνατότητες**

**«Legodome 2»**

Το «Legodome 2» όπως και το «PLethro», είναι πρωτότυπα που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια του φυτωρίου ιδεών στο Πολυτεχνείο της Κρήτης. Στο «Legodome2» αποφασίσαμε να ερευνήσουμε τις δυνατότητες του χώματος σαν υλικό του δομικού μας συστήματος (προηγούμενο κεφάλαιο). Η χρήση του χώματος μας ανάγκασε να απλοποιήσουμε το σχήμα των μονάδων και να προσθέσουμε άξονα συμμετρίας. Αυτό έγινε κυρίως γιατί η περιπλοκότητα του θα μας προκαλούσε προβλήματα κατά την διάρκεια της παραγωγής (καλούπωμα, ξεκαλούπωμα και περίοδο ξήρανσης). Επίσης έγινε προσπάθεια να μειωθεί το πλήθος των διαφορετικών μονάδων σε τέσσερεις. Το αρνητικό της συγκεκριμένης πρότασης ήταν η δυσκολία εντοπισμού της διαφορετικότητας των μονάδων, καθώς έμοιαζαν μεταξύ τους, δεδομένο που θα αύξανε τον χρόνο κατασκευής.

**Εικόνα 9 Οι διαφορετικές μονάδες του «LEGODOME 2» και δυνατότητες**

**Λίγα λόγια για το «Plethro»**

Μέσω της χρηματοδότησης, μας δόθηκε η δυνατότητα να έρθουμε σε επαφή με τον κύριο Κωνσταντίνο Ηλιάδη της βιοτεχνίας Kappa Ceramica στο Κιλκίς. Η συγκεκριμένη βιομηχανία έχει παράξει στο παρελθόν ωμόπλινθους μέσω μερικής βιομηχανοποίησης. Εκεί είχαμε την ευκαιρία να εξετάσουμε τον χώρο και την γραμμή παραγωγής των οπτόπλινθων με της τεχνικής της εξέλασης. Μετά από ξενάγηση στο εργοστάσιο και συζήτηση με τον κ. Ηλιάδη συλλέξαμε κάποια πολύ σημαντικά δεδομένα.

Το πρώτο και πιο σημαντικό ήταν το μέγεθος της μήτρας που τοποθετείται μπροστά στην πρέσα εξέλασης, το οποίο έχει μέγιστο μέγεθος 400x400 χιλ. . Επίσης ο κ. Ηλιάδης μας υπέδειξε κάποια πολύ σημαντικά λάθη στην σχεδίαση του «Legodome 2», που θα ανέβαζαν πάρα πολύ το κόστος παραγωγής. Μας επισήμανε επίσης, ότι το βάρος ενός ωμόπλινθου είναι σχεδόν διπλάσιο από το βάρος ενός ψημένου, που είναι το κυριότερο μειονέκτημα αυτής της τεχνικής.

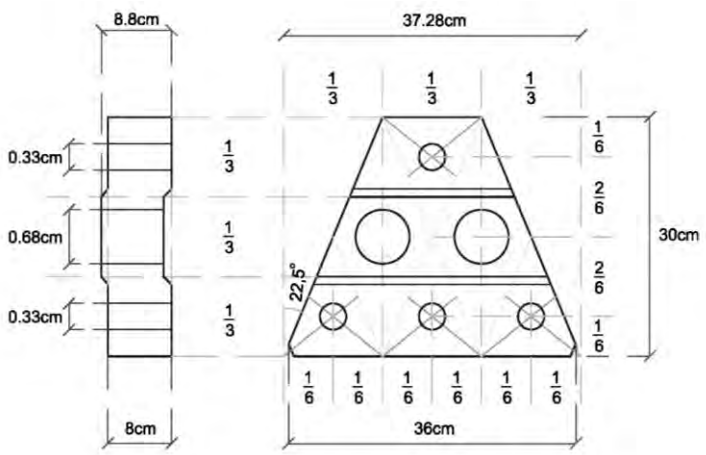
## 2. Σχεδιαστική ανάπτυξη του δομικού συστήματος «Plethro»

**Οι βασικές αρχές σχεδίασης**

Στο «Plethro» ακολουθήσαμε την λογική του «Legodome2» σε σχέση με τα λοξά τελειώματα, χωρίς όμως προεξοχές εμπλοκής[23]. Είχαμε σαν

[23] Εμπλοκές είναι τα σχεδιασμένα στοιχεία του τούβλου, που βοηθούν στο πιο δυνατό πλέξιμο μεταξύ τους.

δεδομένα το βάρος, που δεν θα έπρεπε να ξεπερνά τα 9,5 Kg[24], το 400x400χιλ. σαν μέγιστο καλούπι και 250mm ελάχιστο πάχος τοίχου (ευροκώδικας6). Επίσης ένα δεδομένο που προέκυψε κατά τη διάρκεια τον εργαστηριακών μετρήσεων ήταν ότι το σχήμα της μονάδας θα έπρεπε να είναι σχετικά ζυγισμένο κεντροβαρικά αλλά και συμμετρικά (σε κάτοψη). Αυτό γιατί παρατηρήσαμε από κάποια δοκίμια που φτιάξαμε για να ελέγξουμε την γραμμική συρρίκνωση, τα οποία ήταν μακρόστενα, ότι κατά την διάρκεια του στεγνώματος καμπύλωσαν στην μεγάλη τους πλευρά λόγω της συρρίκνωσης. Για αυτό προστέθηκε άξονας συμμετρίας και αναλογίες, με αποτέλεσμα η μονάδα να έχει σχήμα σε κάτοψη ισοσκελές τραπέζιο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 10. Η κλίση των 22,50$^{o}$ θα εξηγηθεί στην συνέχεια.




**Εικόνα 10 Η βασική μονάδα του συστήματος «PLETHRO»**

## Το δομικό σύστημα

<u>Η θεμελίωση</u>

Η θεμελίωση μπορεί να είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα ή από πέτρινο τοιχίο. Πάνω από την θεμελίωση τοποθετείται μεταλλική πλάκα που φέρει ένα νεύρο αντίστοιχο με αυτό που είναι σχεδιασμένο στο τούβλο. Επίσης πάνω στην πλάκα υπάρχουν μικρές οπές από τις οποίες περνούν οι αναμονές που είναι αγκυρωμένες ήδη στο θεμέλιο. Στην θεμελίωση υπάρχει ένας οριζόντιος αγωγός στην μέση του πάχους του θεμελίου, ο

[24] Το βάρος κρίθηκε ότι δεν θα έπρεπε να ξεπερνάει το βάρος της κοινής «τουβλέτας» του εμπορίου, με διαστάσεις 24x25x19cm, το οποίο είναι τα 9,5 Kg.

οποίος εισάγει αέρα από έξω και τον διοχετεύει στους κάθετους αγωγούς που δημιουργούνται στον τοίχο (θα εξηγηθεί παρακάτω).

Ο μεταλλικός οπλισμός

Ο μεταλλικός οπλισμός πάχους 12mm και μήκους 1m βιδώνεται στις αναμονές που υπάρχουν στην μεταλλική πλάκα της θεμελίωσης. Ο οπλισμός σφίγγεται στην επόμενη μεταλλική πλάκα η οποία τοποθετείται σχεδόν ανά ένα μετρό καθ’ ύψος. Η συγκεκριμένη πλάκα λειτουργεί και σαν οριζόντιο διάζωμα προσφέροντας και οριζόντια ενίσχυση στην κατασκευή.

Τα μεταλλικά οριζόντια διαζώματα

Τα κατ’ ελάχιστο τρία οριζόντια διαζώματα, από λαμαρίνα πάχους 2mm χωρίζουν την τοιχοποιία σε μικρότερες ζώνες προσφέροντας στο σύστημα καλύτερη αντισεισμική ικανότητα. Επίσης μειώνει τον χρόνο κατασκευής καθώς επιτρέπει την κατασκευή και ολοκλήρωση μιας ζώνης και μετά την ολοκλήρωση της επόμενης. Τέλος, επιτρέπει και την δημιουργία πιο άρτιων κατασκευαστικά ανοιγμάτων, που τοποθετούνται σχεδιαστικά ανάμεσα σε αυτά.

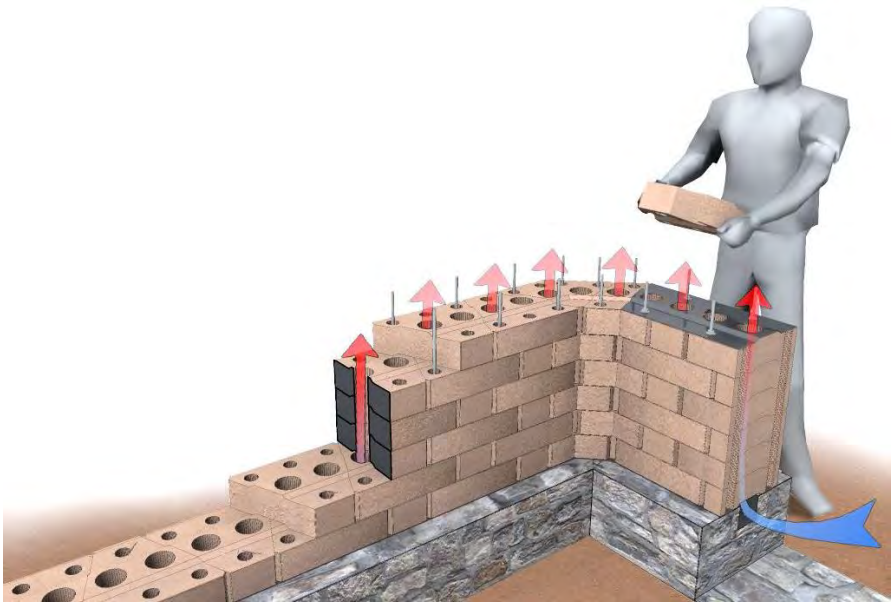
Η στέγη

Η στέγη μπορεί να είναι οτιδήποτε μπορεί να αντέξει το δομικό σύστημα , από ξύλινη κατασκευή με κεραμοσκεπή, μέχρι μεταλλική χωροδυκτιωματική με προκατασκευασμένες πλάκες.

**Η δομική μονάδα**

Ο άξονας συμμετρίας και η υποδιαίρεση σε τρίτα

Η βασική μονάδα έχει σχήμα ισοσκελούς τραπεζίου. Όμως εκτός από τον άξονα συμμετρίας, προστέθηκαν και άλλοι δύο άξονες που υποδιαίρεσαν την μονάδα σε τρίτα. Έτσι η μικρή πλευρά του τραπεζίου ισούται με το 1/3 της μεγάλης πλευράς. Αυτό, βοήθησε στην καλύτερη πλέξη των μονάδων μεταξύ τους. Όταν τοποθετείται το ένα τούβλο πάνω από το άλλο στραμμένο κατά $180^{o}$, υπάρχει επικάλυψη που δημιουργεί προεξοχές μεγέθους ενός τρίτου της μεγάλης πλευράς. Οι προεξοχές που δημιουργούνται έχουν σχήμα ισοσκελούς τριγώνου.



**Εικόνα 11 Δομικό σύστημα «PLETHRO»**

Στον άλλο άξονα υπάρχει και πάλι υποδιαίρεση σε 3/3. Τα δύο ακριανά είναι αυτά στα οποία πατάει το πάνω τούβλο και μεταφέρει τις θλιπτικές τάσεις. Στο μεσαίο 1/3 είναι σχεδιασμένη μια νεύρωση η οποία από κάτω σηκώνεται κατά 10 mm ενώ από πάνω κατά 8 mm. Αυτό έχει προστεθεί για να επιταχύνει το κτίσιμο αλλά επίσης για να δημιουργηθεί εμπλοκή με τα υπόλοιπα τούβλα. Η διαφορά των 2mm έχει γίνει σκόπιμα για να μην υπάρχει πρόβλημα εφαρμογής και να μην μεταφέρονται τάσεις από την μεσαία ζώνη (Εικόνα 10).

<u>Οι διαστάσεις</u>

Το τούβλο ορίστηκε να κατασκευάζει τοίχο πάχους 300 mm. Η κλίση των λοξών πλευρών του τραπεζίου είναι 22,5$^{o}$. Αυτό προκύπτει καθώς τρία τούβλα στην σειρά επιτρέπουν με αυτόν τον τρόπο να σχηματιστεί ορθή γωνία. Από αυτά τα δεδομένα, τον άξονα συμμετρίας και τη υποδιαίρεση σε τρίτα προέκυψε το τελικό σχήμα. Το ισοσκελές τραπέζιο που προέκυψε, έχει μικρή πλευρά 124,3 mm, μεγάλη πλευρά 372,8 mm, που είναι τριπλάσια από την μικρή, και ύψος τραπεζίου 300 mm . Το ύψος του τούβλου είναι 80 mm , και προέκυψε από το βάρος του τούβλου που θέλαμε να είναι λιγότερο από 9,5 kg καθώς η πυκνότητα αγγίζει τα 2000 Kg/m$^3$.

Οι μικρές οπές

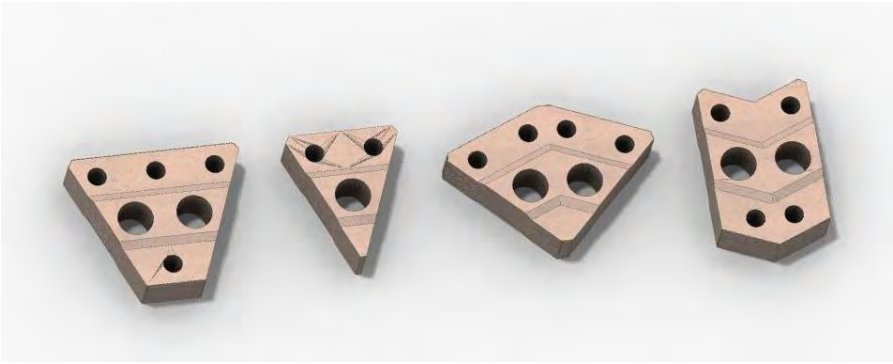
Οι μικρές οπές από τις οποίες περνάει ο μεταλλικός οπλισμός, βρίσκονται στο κέντρο βάρους του ισοσκελούς τριγώνου που δημιουργείται από την πλέξη των μονάδων. Υπάρχουν άλλες δυο ίδιες οπές που τοποθετούνται η μία στην μέση των δύο προηγούμενων και η άλλη αντιδιαμετρικά αυτής στην μικρή πλευρά του τραπεζίου. Αυτές οι οπές χρησιμεύουν είτε σαν δευτερεύον οπλισμός, είτε ως αγωγοί για τα ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις. Η διάμετρος τους είναι 33 mm και είναι μεγαλύτερες από τον οπλισμό ώστε να μην έρχεται σε επαφή το ένα υλικό με το άλλο, αλλά και για ευκολία στην κατασκευή.

Οι μεγάλες οπές

Στην μέση κάθε τούβλου τοποθετούνται δύο μεγάλες οπές κυλινδρικής διατομής διαμέτρου 86 mm. Οι οπές αυτές στην εφαρμογή έχουν σαν αποτέλεσμα να δημιουργούν αγωγούς, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, είτε για να περαστούν ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις, είτε ως αγωγοί φυσικού αερισμού με την λογική που λειτουργεί το διπλό κέλυφος.

Πλήθος μονάδων

Εκτός από την βασική μονάδα υπάρχουν άλλες τρεις μονάδες που συμπληρώνουν το δομικό σύστημα. Οι δύο από αυτές είναι σχεδιασμένες για να χρησιμεύουν σαν ‘κλειδιά’ στις γωνίες του τοίχου. Η τέταρτη μονάδα είναι τριγωνική και έχει το μισό βάρος από τις άλλες. Η χρήση της είναι να μπαίνει όπου χρειάζεται για να μην εντοπίζεται συνέχεια αρμού.



**Εικόνα 12 Οι τέσσερις διαφορετικές μονάδες που συμπληρώνουν το σύστημα «PLETHRO»**

## 3. Κατασκευή πρωτοτύπων

**Κατασκευή καλουπιών**

Τα καλούπια σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να διευκολύνουν την διαδικασία παραγωγής των ωμόπλινθων, η οποία βασίστηκε στην παραδοσιακή μέθοδο με χειρονακτική εργασία. Αποτελείται από 8 ξύλινα σύνθετα μέλη τα οποία σταθεροποιούνται μεταξύ τους με μεταλλικούς κοχλίες.

Το κάθε μέλος αποτελείται από συνδυασμό κομματιών ξύλου. Ο σχεδιασμός τους επιτρέπει την πλέξη μεταξύ τους για καλύτερη και ευκολότερη σταθεροποίηση, χωρίς να δυσκολεύει την απομάκρυνσή τους κατά το στάδιο του ξεκαλουπώματος.

Ως υλικό κατασκευής των καλουπιών επιλέχθηκε το κόντρα πλακέ σημύδα με βαφή βερνικιού πατώματος για αύξηση των αντοχών του ξύλου στην υγρασία. Ο λόγος που δεν επιλέχθηκε το μέταλλο ήταν για λόγους ευκολίας στην κατασκευή του καλουπιού και η έλλειψη του ειδικού εξοπλισμού. Για την επεξεργασία των φύλλων κόντρα πλακέ χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός του «εργαστηρίου Προπλασμάτων» του τμήματος Αρχιτεκτόνων Μηχανικών του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Για την διάνοιξη των οπών διαμορφώθηκαν γαλβανισμένες σωλήνες, οι οποίες ακονίστηκαν στην μία άκρη για να μπορούν να κόψουν το υγρό μείγμα.

**Παραγωγή πλίνθων**

Η παραγωγή των πρωτοτύπων έγινε σε ημιυπαίθριο χώρο χωρίς ηλιασμό και με φυσικό αερισμό.

Βάσει των αποτελεσμάτων του πρώτου πειραματικού μέρους, και έπειτα από την επιλογή της σύνθεσης χώματος – άμμου που χρησιμοποιήθηκε ως πρώτη ύλη, ακολούθησε η προετοιμασία των υλικών και των εργαλείων και ο υπολογισμός των ποσοτήτων βάσει της νέας διαδικασίας.

<u>Ανάδευση</u>

Το μείγμα συντιθόνταν με ακρίβεια στις αναλογίες χώματος, άμμου και νερού. Έπειτα, ακολούθησε μηχανική ανάδευση για περίπου 10 λεπτά σε πλαστικές λεκάνες, ανά 12 κιλά μείγματος που αντιστοιχούσαν σε ενάμιση

πλίνθο. Χρησιμοποιήθηκε ζυγαριά ακριβείας 1γρ για την σύνθεση του μείγματος, και ηλεκτρικός αναδευτήρας χειρός για την ανάδευσή του.

Γέμισμα καλουπιών

Το χώμα διαμορφωνόταν σε μπάλες στο μέγεθος της παλάμης οι οποίες πεταγόντουσαν με δύναμη, γεμίζοντας το καλούπι ξεκινώντας από τις γωνίες. Η ρίψη με δύναμη έχει σκοπό την απομάκρυνση του αέρα από το μείγμα και την αύξηση της πυκνότητας. Έπειτα από το γέμισμα, ακολούθησε η τελική διαμόρφωση της πλίνθου με την δημιουργία του νεύρου και την διάνοιξη των προβλεπόμενων οπών.

Ξεκαλούπωμα

Μετά το τέλος της διαδικασίας αυτής το καλούπι αφαιρούνταν τμηματικά και ο ωμόπλινθος τοποθετούνταν σε μία επίπεδη ξύλινη επιφάνεια , με μία μικρή επίστρωση άμμου. Η άμμος δημιουργεί κενό ανάμεσα στην χωμάτινη και την ξύλινη επιφάνεια επιτρέποντας την κίνηση του αέρα και αποφεύγοντας την επικόλληση των επιφανειών. Με αυτό τον τρόπο επιταχύνεται η ξήρανση και αποφεύγεται ως ένα βαθμό η δημιουργία ρωγμών και παραμορφώσεων κατά την συρρίκνωση των πλίνθων.

**Παρατηρήσεις**

Καλούπια

Κατασκευάστηκαν 3 καλούπια για να επιταχυνθεί η παραγωγή. Μετά την κατασκευή 30 πλίνθων τα καλούπια δεν ήταν σε καλή κατάσταση και τα δύο από αυτά είχαν σχεδόν καταστραφεί. Το κάθε ένα από αυτά παρήγαγε 10 πλίνθους. Η αποδοτικότητα αυτή κρίνεται ασύμφορη και προτείνεται η χρήση μεταλλικών καλουπιών.

Χρόνος παραγωγής

Για την παραγωγή των μονάδων ασχολήθηκαν τρία άτομα. Ο ρυθμός παραγωγής ήταν ένα τούβλο ανά μισή ώρα. Η διαδικασία θεωρήθηκε αρκετά χρονοβόρα και ασύμφορη σε εργατικό κόστος. Ο ρυθμός παραγωγής βέβαια μπορεί να αυξηθεί με την βελτιστοποίηση του καλουπιού ή πολύ περισσότερο με την χρήση χειροκίνητης ή ηλεκτροκίνητης πρέσας.

Διάρκεια ξήρανσης

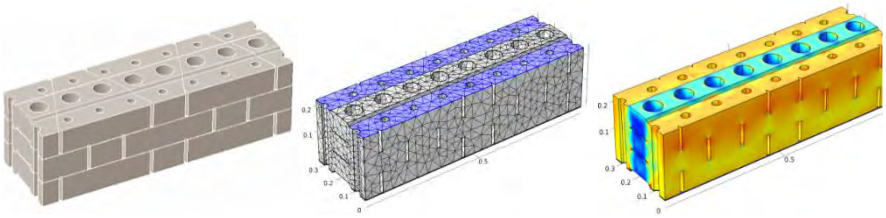
Η διάρκεια ξήρανσης ήταν 22-28 ημέρες το οποίο θεωρείται φυσιολογικό, αλλά επίσης σημαίνει ότι κάποιοι από τους πλίνθους στέγνωσαν πιο γρήγορα. Αυτό καθίσταται λογικό καθώς είχαν τοποθετηθεί σε υπαίθριο στεγασμένο χώρο και είναι πολύ πιθανό κάποια να είχαν διαφορετικές συνθήκες αερισμού ή να εκτίθεντο στον ήλιο τις απογευματινές ώρες.

Ρωγμές και απόρριψη

Στα τέσσερα από τα τριάντα δοκίμια δημιουργήθηκαν μεγάλες ρωγμές, με αποτέλεσμα να χαρακτηριστούν απαγορευτικά στη χρήση τους. Σε πέντε ακόμα, δημιουργήθηκαν μικρότερες ρωγμές, κυρίως στις μικρές οπές, που θεωρήθηκαν επισκευάσιμες. Στα τελευταία και στα υπόλοιπα 21 δοκίμια δεν δημιουργήθηκαν παραμορφώσεις στο σχήμα τους κατά την διάρκεια της συρρίκνωσης. Η συρρίκνωση που εντοπίστηκε ήταν γύρω στα 7 mm στους άξονες X και Y, ενώ στον άξονα Z γύρω στα 2 mm. Το ποσοστό των απορριπτέων είναι 13,3% το οποίο είναι υψηλό, αλλά θεωρείται λογικό καθώς η συνθήκες στεγνώματος δεν ήταν ελεγχόμενες, όπως θα μπορούσαν να είναι σε μία βιοτεχνία.

## 4. Προσομοιωτικός έλεγχος

Προκειμένου να μελετηθεί η μηχανική συμπεριφορά του τοιχοσώματος τόσο ως δομική μονάδα όσο και ως λειτουργικό τμήμα μιας τοιχοποιίας, χρησιμοποιήθηκε η μαθηματική προσομοίωσή του με την Μέθοδο των Πεπερασμένων στοιχείων. Η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόστηκε με τη χρήση του εμπορικού-ερευνητικού λογισμικού **COMSOL 4.2.a** που διαθέτει το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής του Πολυτεχνείου Κρήτης.



**Εικόνα 13 Ψηφιακή προσομοίωση με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων**

Πιο συγκεκριμένα, σε πρώτο στάδιο δημιουργήθηκαν οι κατάλληλες γεωμετρικές οντότητες στερεών για το τοιχόσωμα και την τοιχοποιία, με τη χρήση του γενικού σχεδιαστικού πακέτου AutoCAD. Στη συνέχεια τα εν λόγω γεωμετρικά στοιχεία εισήχθησαν στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων. Από εκεί και έπειτα α) δόθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού όπως αυτές προσδιορίστηκαν πειραματικά σε κυβικά δοκίμια του ίδιου (πυκνότητα, μέτρο ελαστικότητας, μέτρο διάτμησης, διατμητική και θλιπτική αντοχή), β) διαμορφώθηκε ένα κατάλληλο κριτήριο αστοχίας για την ελαστο-πλαστική προσομοίωση του μηχανισμού αστοχίας του υλικού (γραμμικό Mohr-Coulomb ή Drucker-Prage), γ) ορίστηκε ένα σενάριο φόρτισης του δομικού συστήματος το οποίο αντιπροσωπεύει τις εκτιμώμενες από τους σχεδιαστές πραγματικές συνθήκες καταπόνησης και τέλος δ) το μοντέλο επιλύθηκε αφού πρώτα έγινε η απαιτούμενη διακριτοποίηση του συστήματος με τετραεδρικά ισοπαραμετρικά πεπερασμένα στοιχεία.

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης αποδεικνύεται ότι το δομικό υλικό με θλιπτική αντοχή περίπου **3 (MPa)** και ειδικό βάρος **19.6 (kN/m³)** είναι σε θέση να παραλάβει ασφαλώς τα φορτία που δύναται να επαχθούν από το ίδιο βάρος μιας τοιχοποιίας ύψους περίπου **5 (m)** στη βάση αυτής.[25]

## 5. Συμπεράσματα

Η διαδικασία που ακολουθήσαμε για να δημιουργήσουμε τα πρωτότυπα ήταν αρκετά χρονοβόρα. Μπορεί οι συνθήκες να μην ήταν ιδανικές για να θεωρηθούν τα αποτελέσματα ακριβή, αλλά αλλά είναι δεδομένο πως σε ένα εργοτάξιο δεν υπάρχουν ελεγχόμενες συνθήκες. Τα αποτελέσματα θεωρούνται επιτυχημένα καθώς το συγκεκριμένο σχήμα μπορεί να επιτευχθεί και να μην παραμορφωθεί μετά την συρρίκνωση. Επίσης, διαπιστώθηκε πως το νεύρο θα δημιουργούσε πολλά προβλήματα στην παραγωγή, καθώς ήταν χρονοβόρα η διαδικασία του σχηματισμού του και προβληματική η τοποθέτηση του για να μην 'κρεμάσει' κατά την διάρκεια της ξήρανσης.

[25] Ο προσομοιωτικός έλεγχος πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής του Πολυτεχνείο της Κρήτης από τον Βαγγέλη Λιαράκο και η διαδικασία και τα αποτελέσματα που παραθέτονται συντάχθηκαν από τον ίδιο.

Ακόμη, μπορέσαμε να κατασκευάσουμε με αυτόν τον τρόπο και έναν τοίχο σε πραγματική κλίμακα για να υπολογίσουμε τον χρόνο που χρειάζεται για να κατασκευαστεί 1m$^2$ τοίχου και να εντοπιστούν τυχόν δυσκολίες κατά την διάρκεια κατασκευής. Αρχικά διαπιστώθηκε ότι το κτίσιμο με το «Plethro» είναι λιγότερο χρονοβόρο κατά 1/2 της συμβατικής κατασκευής με λάσπη και οπτόπλινθους, για παράδειγμα μέσα σε 7 λεπτά είχαμε κτίσει μισό τετραγωνικό τοίχου, ενώ η κατασκευή 1 m$^2$ συμβατικού διπλού τοίχου είναι 35 λεπτά[26]. Αυτό θεωρήθηκε σημαντικό πλεονέκτημα καθώς σημαίνει την μείωση στο μισό του χρόνου και επομένως και του κόστους της κατασκευής.

Τα αποτελέσματα όμως δείχνουν ότι θα μπορούσε να ερευνηθεί η βιομηχανοποιημένη παραγωγή του. Μετά από την παρουσίαση στον κ. Κωνσταντίνο Ηλιάδη από την βιοτεχνία «Kappa Ceramica», μας πρότεινε το μέγεθος του τούβλου να μικρύνει από 300 mm σε 250 mm για να μπορεί να επιτευχθεί η παραγωγή του μέσω της δικής του πρέσας αλλά και για να επιταχυνθεί η παραγωγική διαδικασία. Με αυτές τις αλλαγές θα μπορούσε να παραχθούν 400 κομμάτια την ώρα ή 10 m$^2$ τοίχου από το «Plethro». Η παραγωγικότητα σε οπτόπλινθους με οπές είναι 35 m$^2$ τοίχου ανά ώρα. Μπορεί η παραγωγικότητα να είναι κατά 3/4 πιο μικρή, αλλά το γεγονός ότι τα 3/4 του κόστους των οπτόπλινθων οφείλεται στην διαδικασία του ψησίματος, η οποία αποφεύγεται στους ωμόπλινθους. Υπολογίστηκε σε συνεργασία με τον κ. Ηλιάδη ότι το κόστος για την παραγωγή 1 m$^2$ τοίχου με το «Plethro» θα είναι κοντά στο μισό από τα συμβατικά τούβλα. Παρακάτω γίνεται μια προσπάθεια να υπολογιστεί το συνολικό κόστος σε σύγκρισή με ένα συμβατικό τοίχο.

Στο κεφάλαιο Ε γίνεται μία προσπάθεια να υπολογιστεί το ενεργειακό, περιβαλλοντικό και οικονομικό κόστος για την παραγωγή και κατασκευή ενός m$^2$ τοίχου από το σύστημα «Plethro» σε σύγκριση με μία συμβατική διπλή τοιχοποιία από οπτόπλινθους. Επίσης, θα γίνει και μία συγκριτική μελέτη ανάμεσα σε ένα συμβατικό σπίτι από οπλισμένο σκυρόδεμα και οπτόπλινθους και σε ένα σπίτι από το δομικό σύστημα «Plethro».

[26] Ένας χτίστης από τα Χανιά μας πληροφόρησε ότι με δύο άτομα σε 7 ώρες κατασκευάζει 12m$^2$ διπλό τοίχο.

# Ε. Οικονομική μελέτη και περιβαλλοντικές επιπτώσεις

## 1. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα συγκριθεί περιβαλλοντικά και οικονομικά, με αριθμητικά δεδομένα , το δομικό σύστημα «Plethro» με το συμβατικό σύστημα δόμησης. Παραθέτονται τα αποτελέσματα από την συγκριτική ανάλυση που έγινε σε κόστος, περιβαλλοντική ρύπανση και ενεργειακή κατανάλωση ανά τετραγωνικό μέτρο τοίχου και ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας κατασκευής. Σκοπός της συγκεκριμένης ανάλυσης, είναι η εξακρίβωση της υπόθεσής μας για τα οικονομικά και περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα του νέου δομικού συστήματος.

Η διαδικασία που ακολουθείται δεν είναι απολύτως έγκυρη, καθώς η τιμές ενσωματωμένης ενέργειας των υλικών ανάμεσα σε διαφορετικές πηγές ποικίλουν. Ωστόσο, η διαδικασία που ακολουθήθηκε, η οποία ελέγχθηκε στην συνέχεια και συγκρίθηκε με τιμές της αγοράς, μπορεί να θεωρηθεί ρεαλιστική. Τέλος, όπως είδαμε και στο κεφάλαιο Γ, η παρακάτω μελέτη είναι μέρος της ανάλυσης του κύκλου ζωής των κατασκευών, και πιο συγκεκριμένα των εισροών και των εκροών κατά την διάρκεια κατασκευής. Στην συγκεκριμένη ανάλυση βέβαια, εκλείπει το κόστος μεταφορών λόγω έλλειψης δεδομένων, αλλά και οι υπόλοιπες φάσεις ζωής του κτηρίου λόγω έλλειψης δυνατοτήτων υπολογισμού. Ωστόσο είναι δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων. Η Α.Κ.Ζ. θα έπρεπε να γίνεται για όλα τα προϊόντα της αγοράς.

## 2. Συγκριτική ανάλυση του «Plethro» με μία συμβατική κατασκευή

Στους και που ακολουθούν, καταγράφεται η κατανάλωση ενέργειας και νερού και οι εκπομπές $CO_2$ και $SO_2$ για την παραγωγή των υλικών που χρειάζονται για μέρος μιας συμβατικής κατασκευής. Στην συγκεκριμένη ανάλυση τοποθετούνται μόνο τα υλικά για τα θεμέλια, τον φέροντα οργανισμό, τα πατώματα και τις τοιχοποιίες, καθώς είναι το μεγαλύτερο μέρος της κατασκευής και το πιο ενεργοβόρο. Η στέγη θεωρήθηκε κοινή και στις δύο περιπτώσεις που αναλύονται παρακάτω.

Στον συγκεντρωτικό των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται τα περιβαλλοντικά οφέλη από την χρήση του δομικού συστήματος «Plethro». Η κατανάλωση ενέργειας σε Mj στην συμβατική κατασκευή είναι κατά 84% περισσότερη και οι εκπομπές του $CO_2$ σε Kg κατά 69% περισσότερες. Για κάθε $m^2$ κτηρίου που χτίζεται με το σύστημα «Plethro» εξοικονομούνται 5,3 tn νερού. Διαπιστώνουμε ότι τα αποτελέσματα δεν είναι καθόλου αμελητέα, καθώς η εξοικονόμηση ενέργειας είναι αρκετά μεγάλη, το οποίο μπορεί να σημαίνει ότι αυτή η τεχνική είναι και αρκετά πιο οικονομική.

Στον αναλύεται η κατανάλωση ενέργειας, οι εκπομπές $CO_2$ και το κόστος κατασκευής ενός $m^2$ τοίχου από το σύστημα «Plethro», σε σύγκριση με ένα $m^2$ συμβατικής διπλής τοιχοποιίας. Όπως φαίνεται σε αυτόν τον πίνακα, η υπόθεση μας ισχύει. Με αυτόν τον τρόπο κατασκευής τοιχοποιίας εξοικονομείται 6 € σε κάθε $m^2$ τοίχου αλλά και χρόνος, καθώς γίνεται στην μισή ώρα από ότι η συμβατική κατασκευή από οπτόπλινθους. Ακόμη, το νερό που χρησιμοποιείται δεν δεσμεύεται από το υλικό ούτε μολύνεται, απλά εξατμίζεται. Η χρήση του μετάλλου ειδικά στον οπλισμό θεωρείται αρκετά ενεργοβόρα και θα μπορούσε να ελεγχθεί η αραίωση της, η οποία δύναται να μειώσει κι αλλό την κατανάλωση ενέργειας αλλά και το κόστος.

Τα δεδομένα, για να συμπληρωθούν οι πίνακες κατανάλωσης, προήλθαν από συνδυασμό δεδομένων από την βιβλιογραφική έρευνα, όπως (Berge 2009), (Morel, et al. 2000), (Woolley και Kimmins 2000), (Σαργέντης 2005) και (Τομπά 2005).

| Κατανάλωση ενέργειας και νερού, και εκπομπές CO2 και SO2 κατά την παραγωγή των υλικών σε Kg που χρειάζονται για την κατασκευή του φέροντα οργανισμού, της τοιχοπιίας και του επιχρίσματος μίας Συμβατικής Κατοικίας 110 m2 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Υλικό** | | | **Kg** | **Mj** | **CO2 σε Kg** | **νερό σε L** | **SO2 σε Kg** |
| Φέροντας οργανισμός από οπλισμένο σκυρόδεμα | σκυρόδεμα | θεμέλια | 54229,80 | 81344,70 | 8134,47 | 150108,09 | 32,54 |
| | | κάτω πλάκα | 17953,63 | 26930,45 | 2693,04 | 49695,65 | 10,77 |
| | | κολώνες | 8379,00 | 12568,50 | 1256,85 | 23193,07 | 5,03 |
| | | δοκάρια | 75878,40 | 113817,60 | 11381,76 | 210031,41 | 45,53 |
| | | πάνω πλάκα | 17953,63 | 26930,45 | 2693,04 | 49695,65 | 10,77 |
| | μεταλλικός οπλισμός | | 30560,00 | 275040,00 | 30560,00 | - | 91,68 |
| Τοιχοποιία από οπτόπλινθους και τσιμεντοκονίαμα | εξωτερική τοιχοποιία (25cm) | | 39017,85 | 114002,58 | 8964,00 | 99467,17 | 39,02 |
| | εσωτερική τοιχοποιία (12cm) | | 2763,87 | 8075,50 | 634,98 | 7045,87 | 2,76 |
| Μόνωση | εξηλασμένη πολυστερίνη(3cm) | | 162,76 | 20344,50 | 869,84 | - | 3,01 |
| Επίχρισματα | εξωτερικοί σοβάδες | | 5881,15 | 5881,15 | 882,17 | 16279,02 | 0,14 |
| | εσωτερικοί σοβάδες | | 8268,97 | 8268,97 | 1240,35 | 22888,51 | 0,19 |
| | | | **Σύνολο** | **693204,39** | **69310,51** | **628404,44** | **241,45** |
| | | | **ανά m2 κατοικίας** | **6301,86** | **630,10** | **5712,77** | **2,19** |

**Πίνακας 19 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις μίας συμβατική κατασκευής 110 m2**

| Κατανάλωση ενέργειας και νερού, και εκπομπές CO2 και SO2 κατά την παραγωγή των υλικών σε Kg που χρειάζονται για την κατασκευή της φέρουσας τοιχοποιίας, των πατωμάτων και του επιχρίσματος μίας κατοικίας 110 m2 από το "PLEHTRO" | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Υλικό** | | **Kg** | **Mj** | **CO2 σε Kg** | **νερό σε L** | **SO2 σε Kg** |
| Θεμελίωση | οπλισμένο σκυρόδεμα | 8769,60 | 13154,40 | 1315,44 | 24274,25 | 5,26 |
| | μεταλλικός οπλισμός | 438,48 | 3946,32 | 438,48 | - | 1,32 |
| | πέτρα | 31233,60 | 15616,80 | 15616,80 | 312,34 | 0,00 |
| | τσιμεντοκονίαμα | 5494,80 | 9574,76 | 798,26 | 14681,89 | 4,40 |
| Πατώματα | πάτωμα από συμπιεσμένο χώμα | 14130,00 | 7065,00 | 282,60 | - | 1,41 |
| | ξύλινο πάτωμα ορόφου | | 10495,80 | 493,92 | - | - |
| Φέρουσα Τοιχοποιία | τούβλα PLETHRO (30cm) | 72576,00 | 36288,00 | 1451,52 | - | 7,26 |
| | μεταλλικός οπλισμός | 480,00 | 4320,00 | 480,00 | - | 1,44 |
| | μεταλλικά διαζώματα | 559,44 | 5034,96 | 559,44 | - | 1,68 |
| Επίχρισμα | πυλοκονιάμα | 10976,90 | 5488,45 | 219,54 | - | 1,10 |
| | | **Σύνολο** | **110984,49** | **21656,00** | **39268,48** | **23,86** |
| | | **ανά m2 κατοικίας** | **1008,95** | **196,87** | **356,99** | **0,22** |

**Πίνακας 20 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις μίας κατασκευής 110 m2 με το δομικό σύστημα «PLETHRO»**

| Συγκεντρωτικός πίνακας των παραπάνω αποτελεσμάτων | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Τύπος κατοικίας** | **Mj** | **CO2 σε Kg** | **νερό σε L** | **SO2 σε Kg** |
| **για 110 m2 συμβατικής κατοικίας** | 693204,39 | 69310,51 | 628404,44 | 241,45 |
| **για 110 m2 κατοικίας από"PLETHRO"** | 110984,49 | 21656,00 | 39268,48 | 23,86 |
| **ανά m2 συμβατικής κατοικίας** | **6301,86** | **630,10** | **5712,77** | **2,19** |
| **ανά m2 κατοικίας από "PLETHRO"** | **1008,95** | **196,87** | **356,99** | **0,22** |
| **Διφορά στα 110m2 κατοικίας** | 582219,90 | 47654,51 | 589135,96 | 217,59 |
| **Διαφορά ανά m2 κατοικίας** | **5292,91** | **433,22** | **5355,78** | **1,98** |
| **Ποσοστό κέρδους** | **84%** | **69%** | **94%** | **90%** |

**Πίνακας 21 Περιβαλλοντικά οφέλη με την χρήση του δομικού συστήματος «PLETHRO»**

| | Κατανάλωση ενέργειας και περιβαλλοντική επιβάρυνση για ένα m2 τοίχου | | | | | | | Κόστος και χρόνος κατασκευής | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Τα Μέλη | Διαστάσεις | Τεμάχια | Kg ανά m2 | Mj ανά m2 | CO2 σε Kg ανά m2 | Νερό σε L ανά m2 | Υλικά € ανά m2 | Εργασία € ανά m2 | Λεπτά ανά m2 |
| PLETHRO | Μεταλλικός οπλισμός | διάμετρος 0,012 x1m | 8 | 6,40 | 57,60 | 6,40 | - | 6,40 € | 2,00 € | 2 άτομα |
| | Μεταλλικά διαζώματα | 0.30x1x0,002m | 1 | 4,10 | 36,90 | 4,10 | - | 6,15 € | | |
| | Μονάδες | 0.30x0.35x0.08m | **48** | **451,20** | **225,60** | **9,02** | **-** | 6,00 € | | |
| | | | **Σύνολο** | **461,70** | **320,10** | **19,52** | **0,00** | **20,55 €** | | **18 λεπτά** |
| **Ποσοστό κέρδους με την χρήση του "PLETHRO"** | | | | **-47%** | **57%** | **69%** | **100%** | **21%** | | **50%** |
| ΟΠΓΟΠΛΙΝΘΟΙ | | | **Σύνολο** | **245,41** | **746,62** | **62,57** | **470,17** | **26,00 €** | | **36 λεπτά** |
| | Μονάδες | 0,12x0,19x0,08m | **100** | **175,00** | **623,00** | **47,25** | **330,75** | 12,00 € | 4,00 € | 2 άτομα |
| | Τσιμεντο-κονίαμα | 0,12x0,27x0,01 | 100 | 22,65 | 33,98 | 4,30 | 46,43 | 2,00 € | | |
| | Τσιμεντένιο διάζωμα | 0,27x1x0,08m | 1 | 45,36 | 68,04 | 8,62 | 92,99 | 8,00 € | | |
| | Μεταλλικός οπλισμός | διάμετρος 0,014 x1m | 2 | 2,40 | 21,60 | 2,40 | - | | | |

**Πίνακας 22 Περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη ανά m2 τοίχου με την χρήση του συστήματος «PLETHRO»**

# Ζ. Συμπεράσματα και Προτάσεις

Στο θεωρητικό υπόβαθρο, η έρευνα μας κινήθηκε προς την αναζήτηση ενός βιώσιμου μοντέλου δόμησης, ξεκινώντας από την ανάλυση των οικολογικών αντιλήψεων και τον προσδιορισμό της βιώσιμης ανάπτυξης. Στην συνέχεια, αναλύθηκαν οι παράγοντες της βιωσιμότητας μίας βιομηχανίας δόμησης, αρχικά σε επίπεδο βιοτεχνίας, στη συνέχεια σε τοπική κλίμακα και έπειτα σε παγκόσμια. Το επόμενο αντικείμενο που ερευνήσαμε, αφορούσε την οικολογία των υλικών δόμησης και το πώς αυτή προσδιορίζεται. Η ανάλυση σε κύκλο ζωής μιας κατασκευής μας βοήθησε πολύ, στο να εντοπίσουμε τις βασικές εισροές και εκροές που ανεβάζουν την εμπεριεχόμενη ενέργεια των υλικών και επιβαρύνουν το περιβάλλον.

Σαν φυσικό επακόλουθο αυτής της έρευνας καταλήξαμε στην φυσική δόμηση ως μία λύση που επιβαρύνει λιγότερο έως και καθόλου το περιβάλλον. Έγινε ανάλυση της τεχνικής δόμησης με ωμή γη και προσπαθήσαμε να εντοπίσουμε τον λόγο για τον οποίο ένα τόσο διαδεδομένο υλικό δεν χρησιμοποιείται ευρέως, ενώ έχει αρκετά πλεονεκτήματα και ως προς την τοπική βιωσιμότητα και ως προς το περιβάλλον. Τέλος, καταλήξαμε σε μια πρόταση για ένα βιώσιμο μοντέλο ανάπτυξης με ωμή γη, ενώ προτείνονται τρόποι επίλυσης των προβλημάτων και αποφυγής των μειονεκτημάτων που εντοπίστηκαν.

Ένα από τα μεγάλα μειονεκτήματα δόμησης με χώμα που παρατηρήσαμε ήταν η έλλειψη πιστοποίησης και προτυποποίησης της πρώτης ύλης αλλά και των τεχνικών. Έτσι, ο κύριος στόχος, ήταν η επίτευξη ενός βιώσιμου τρόπου δόμησης από ωμή γη μέσα από την ανάπτυξη, σχεδίαση και μηχανικό έλεγχο ενός νέου δομικού συστήματος, το οποίο ονομάστηκε «Plethro».

Πριν γίνει η σχεδίαση του συστήματος έπρεπε αρχικά να εντοπίσουμε τις ιδιότητες του υλικού που θα χρησιμοποιούσαμε. Έτσι αρχικά στο πειραματικό μέρος Α έγινε μια αναζήτηση των κυριότερων φυσικών ιδιοτήτων του χώματος που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την σχεδίαση μας. Η επίδραση με το νερό ήταν το πιο σημαντικό μέρος της έρευνας μας, καθώς διαπιστώσαμε ότι επηρεάζει άμεσα τις μηχανικές αντοχές αλλά και την συμπεριφορά των δοκιμίων κατά την διάρκεια της ξήρανσης. Το επόμενο βήμα, ήταν να εντοπίσουμε το δείγμα χώματος, που θα

χρησιμοποιούσαμε για την κατασκευή των πρωτοτύπων του δομικού συστήματος, να ελέγξουμε αρχικά την καταλληλότητα του σαν δομικό υλικό και ύστερα να εντοπίσουμε την καλύτερη σύνθεση χώματος, άμμου και νερού που θα μας έδινε τα πιο επιθυμητά αποτελέσματα.

Μετά την πειραματική διαδικασία, κληθήκαμε να αποφασίσουμε την καταλληλότερη σύνθεση. Τα κριτήρια που τέθηκαν, ήταν κυρίως η εργασιμότητα του υλικού και η παραμόρφωση των δοκιμίων μετά την ξήρανση. Ενώ το καθαρό χώμα είχε πολύ καλύτερες μηχανικές αντοχές, εμφάνισε μεγάλες παραμορφώσεις και ρωγμές κατά την διάρκεια ξήρανσης και απορρίφτηκε. Τελικά, η σύνθεση με ποσοστό χώματος 80% και άμμου 20% ήταν αυτή που επιλέχθηκε, καθώς πληρούσε τα δύο βασικά κριτήρια. Η συγκεκριμένη σύνθεση υστερούσε σε μηχανικές αντοχές και από την τρίτη σύνθεση με 60 % χώμα και 40% άμμο.

Η διαδικασία που ακολουθήσαμε στο πειραματικό μέρος Α, μας απέδειξε ότι η επιλογή της καλύτερης σύστασης του κάθε χώματος είναι πολυκριτηριακή. Αυτό, είναι το βασικότερο μειονέκτημα του χώματος και το μεγαλύτερο τροχοπέδη της ανάπτυξης και της πιστοποίησης του σαν δομικό υλικό. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος στο μοντέλο βιώσιμης ανάπτυξης για το χώμα, προτάθηκε η διαδικασία να μπορεί να πιστοποιείται στους εργαστηριακούς χώρους τις τριτοβάθμιας εκπαίδευσης. Υπάρχουν πειραματικοί έλεγχοι πιστοποιημένοι από τα γερμανικά πρότυπα DIN που θα μπορούσαν να απλοποιήσουν την διαδικασία πιστοποίησης κατά πολύ και να την καταστήσουν εφικτή και συμφέρουσα.

Στην συνέχεια, ενώ είχαμε καταλήξει στην τελική σύσταση προχωρήσαμε στο πειραματικό μέρος Β' που είχε σαν στόχο την δημιουργία ενός πρωτότυπου συστήματος δόμησης από ωμόπλινθους. Στο κεφάλαιο αυτό αναφερθήκαμε αρχικά, στο σύστημα δόμησης «Auram» του Auroville Earth Institute στην Ινδία, το οποίο παρουσιάζει αρκετές καινοτομίες σε σχέση με τις μονάδες που αποτελούν το δομικό σύστημα αλλά χρησιμοποιείται τσιμεντοκονίαμα για την σύνδεση μεταξύ τους. Ύστερα, αναφέρεται μια προηγούμενη μελέτη που είχε γίνει στο Πολυτεχνείο της Κρήτης, το «Legodome1». Το συγκεκριμένο σύστημα δόμησης εντάσσει καινοτόμα χαρακτηριστικά σε σχέση με την συνδεσιμότητα των επιμέρους

μονάδων, δίνοντας την δυνατότητα αποσυναρμολόγησης. Το μοντέλο που άρχισε να σχεδιάζεται, αποφασίστηκε να έχει χαρακτηριστικά και από τις δύο παραπάνω αναφορές.

Το αποτέλεσμα της σχεδιαστικής ανάπτυξης ήταν το δομικό σύστημα «Plethro», στο οποίο εντάχθηκαν και θέματα βιομηχανοποίησης του προϊόντος. Το γεγονός αυτό απλοποίησε αρκετά το σχήμα, δεδομένο που διευκόλυνε αρκετά την διαδικασία της παραγωγής των καλουπιών των πρωτοτύπων. Η διαδικασία παραγωγής των πλίνθων, έστω και με χειρονακτικές διαδικασίες, μας βοήθησε να εντοπίσουμε διάφορα προβλήματα που θα μπορούσαν δημιουργήσουν δυσκολία κατά την διάρκεια της βιομηχανικής παραγωγής τους, γεγονός που θα επιτρέψει και την μελλοντική τους ανάπτυξη.

Τέλος, το τελευταίο κεφάλαιο ήταν το συμπερασματικό όλων των παραπάνω κεφαλαίων. Έγινε προσπάθεια να συγκριθεί το δομικό σύστημα «Plethro» με το συμβατικό σύστημα δόμησης, οικονομικά και περιβαλλοντικά έτσι ώστε να επιβεβαιωθεί ο οικολογικός του χαρακτήρας αλλά και να διαπιστωθεί η βιομηχανική του βιωσιμότητα. Η σύγκριση, έγινε σε σχέση με την εμπεριεχόμενη ενέργεια των κύριων δομικών υλικών που χρησιμοποιούνται σε μία κατοικία. Αν και είναι ένα μικρό μέρος της ανάλυσης του κύκλου ζωής του κτηρίου, τα αποτελέσματα θεωρήθηκαν πολύ ελπιδοφόρα. Η κατανάλωση ενέργειας σε Mj για την κατασκευή μίας κατοικίας με τον συμβατικό τρόπο δόμησης, εκτιμήθηκε πως είναι κατά 84% περισσότερη και οι εκπομπές του $CO_2$ σε Kg κατά 69% περισσότερες από το νέο δομικό σύστημα. Ενώ για κάθε $m^2$ κτηρίου που χτίζεται με το σύστημα «Plethro» υπολογίσαμε ότι εξοικονομούνται 5,3 tn νερού.

Συμπερασματικά, η συγκεκριμένη ερευνητική εργασία θεωρούμε πως εκπλήρωσε τον σκοπό της. Το δομικό σύστημα που αναπτύχθηκε μπορεί να παρουσιάσει σε μια κατασκευή «ένα προς ένα» πολλά προβλήματα, αλλά αυτό δεν σημαίνει ότι απέτυχε. Θεωρούμε ότι μέσω της συγκεκριμένης εργασίας τέθηκαν οι βάσεις για περαιτέρω έρευνα από αρχιτεκτονικής πλευράς η οποία μπορεί να σχετίζεται με:

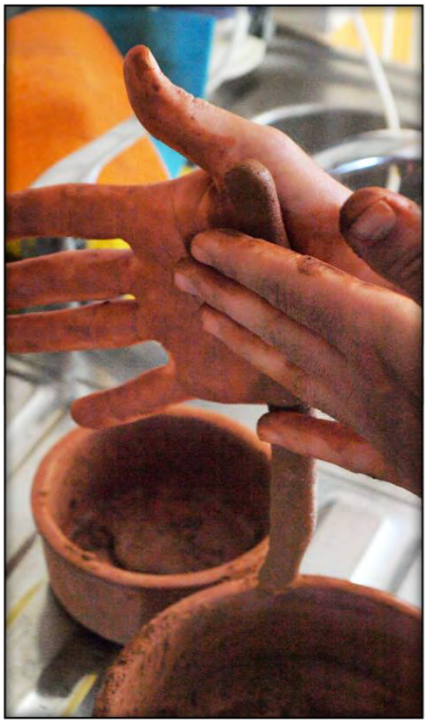
- την ανάπτυξη δομικών συστημάτων πιο φιλικών προς το περιβάλλον
- την βιομηχανική παραγωγή δομικών υλικών πιο φιλικών προς το περιβάλλον
- την διαδικασία πιστοποίησης και προτυποποίησης του χώματος σαν δομικό υλικό
- την ανάπτυξη μοντέλων βιώσιμης βιομηχανίας δόμησης
- την αξιολόγηση της οικολογικότητας των υλικών και των κατασκευών

Τέλος, το πιο σημαντικό στοιχείο που θέτει η συγκεκριμένη ερευνητική εργασία σαν κάτι εφικτό, πραγματοποιήσιμο και αναγκαίο, είναι πως **η βιομηχανία, η επιστήμη , η έρευνα και η οικονομία θα πρέπει να εστιάσουν στην χρήση και διάδοση της φυσικής δόμησης**. Ο κόσμος έχει ανάγκη για μία καλύτερη σχέση με το περιβάλλον και η φυσική δόμηση είναι μια λύση.

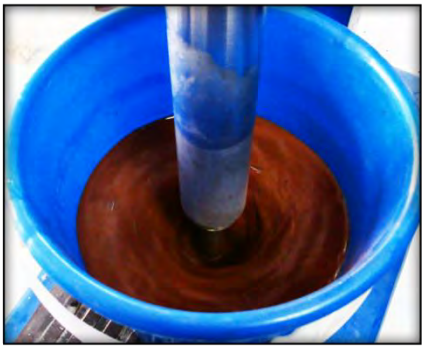
# Φωτογραφικό ημερολόγιο

## Πρώτη κοσκίνιση

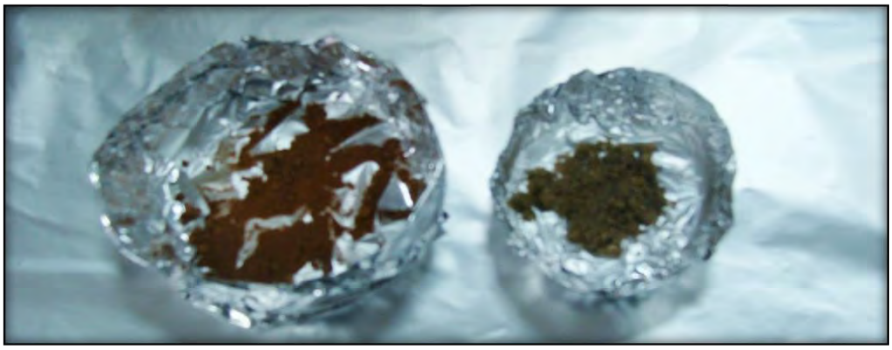
**Επιτόπιες Δοκιμές**

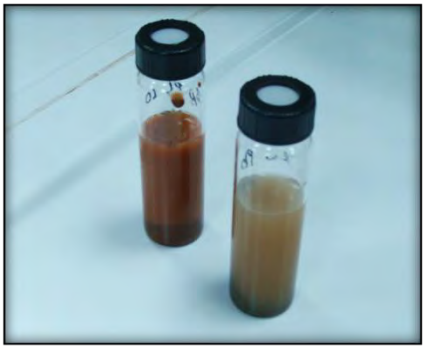


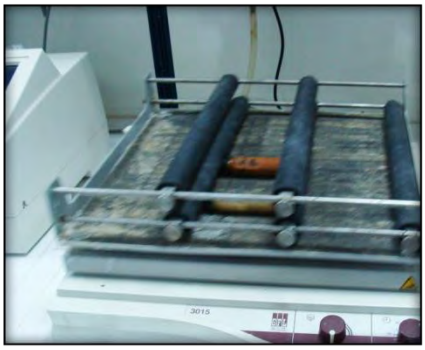
## Κοκκομετρική Ανάλυση



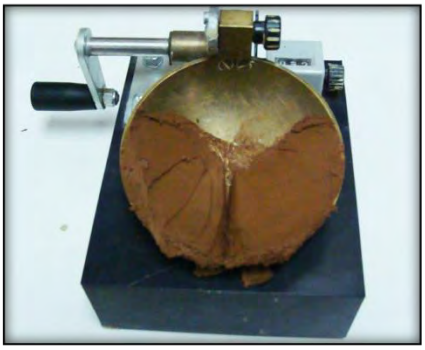
**Ανάλυση PH**



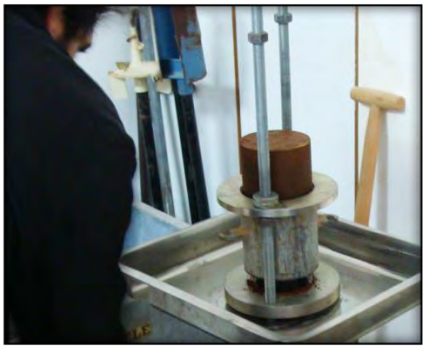


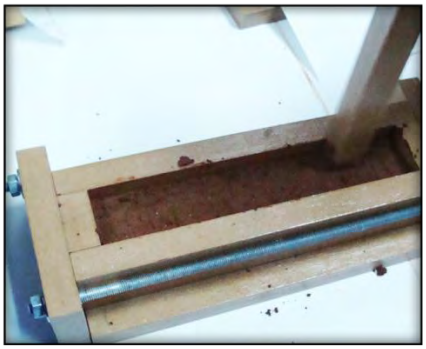


**Εντοπισμός ορίων Atterberg**

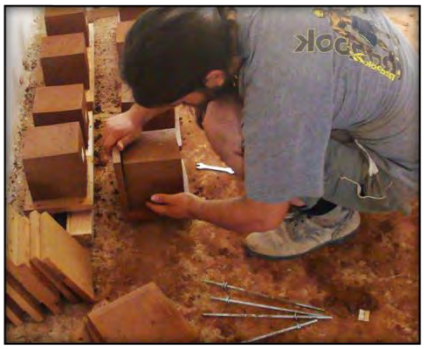


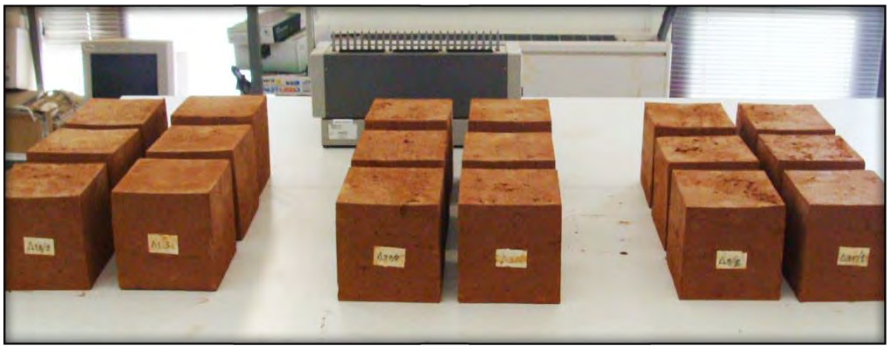
**Δοκιμή Proctor και έλεγχος Γραμμικής συρρίκνωσης**



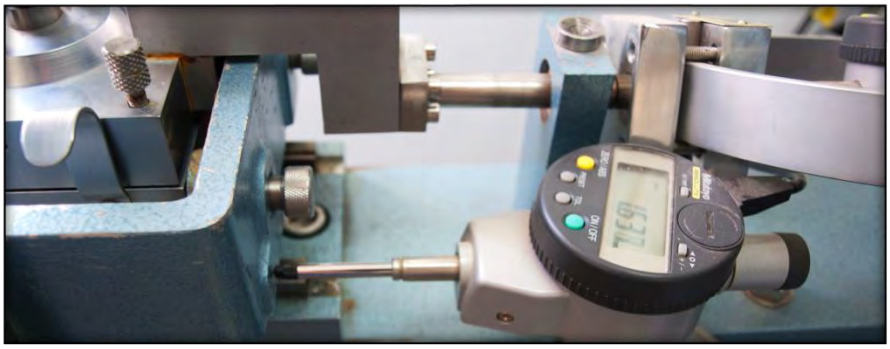


## Έλεγχος θλιπτικής αντοχής

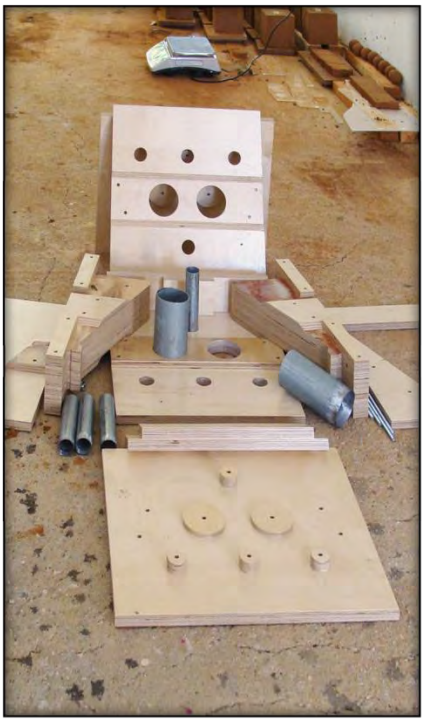


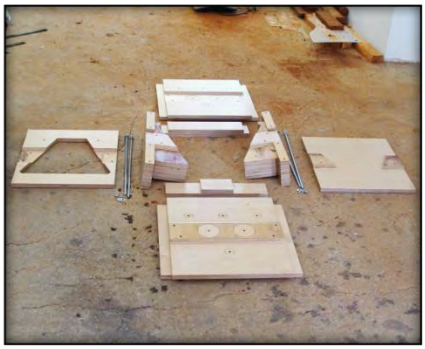


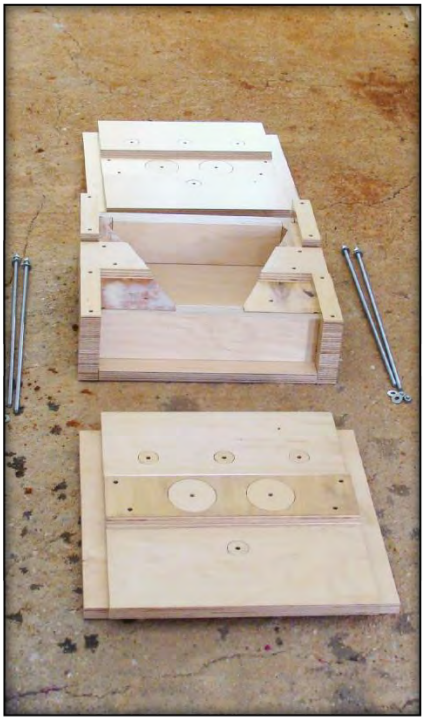
**Έλεγχος διατμητικής αντοχής**

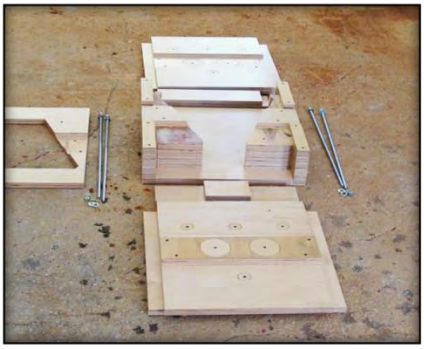


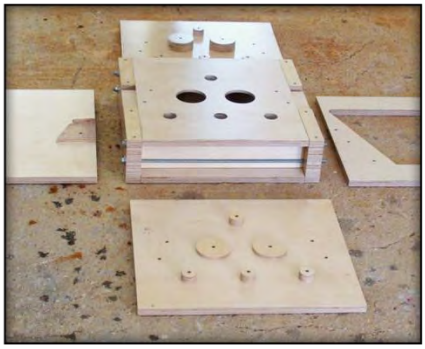
**Κατασκευή καλουπιών της βασικής μονάδας του «Plethro»**

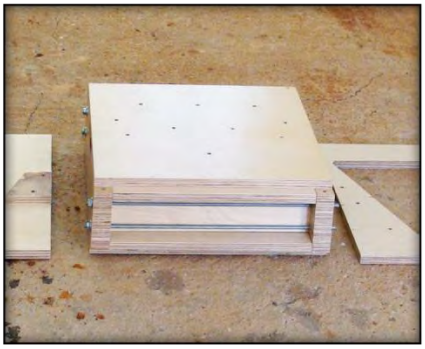


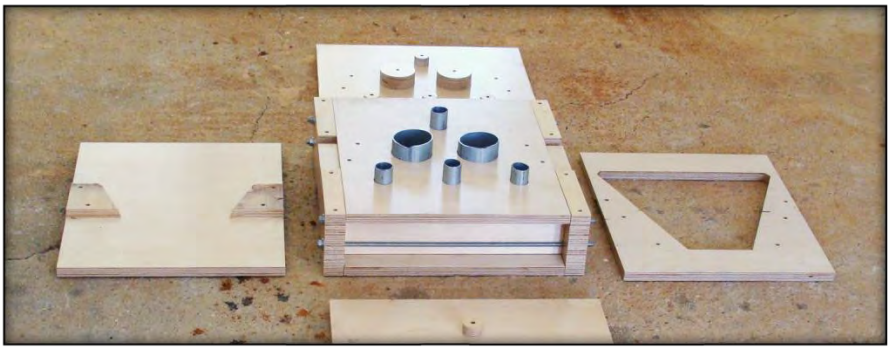






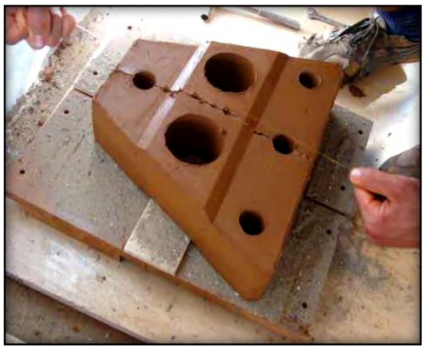


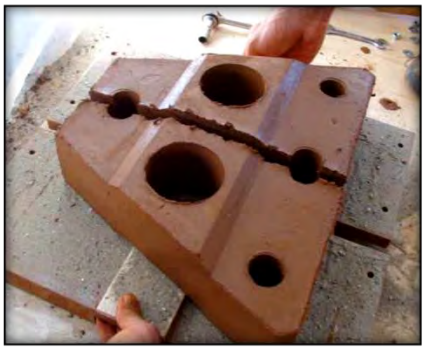




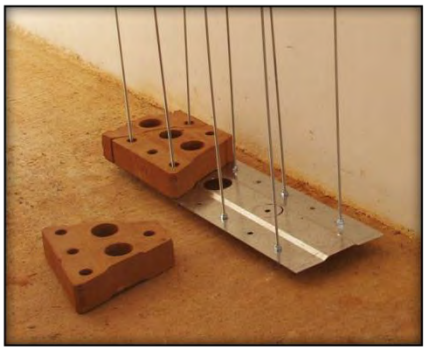
**Παραγωγή των πρωτοτύπων της βασικής μονάδας του «Plethro»**

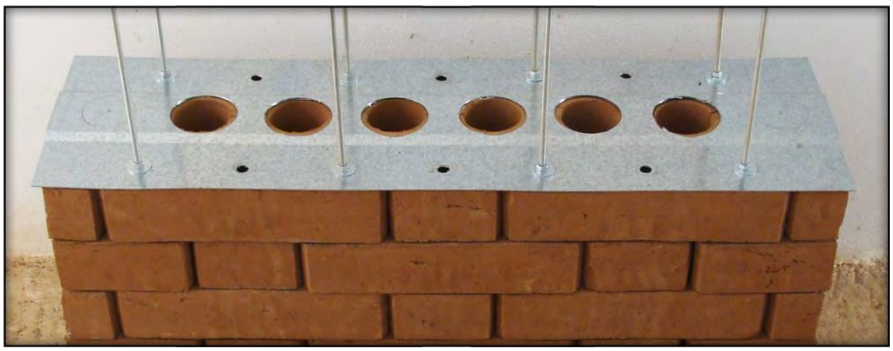
**Ξεκαλούπωμα και φυσική ξήρανση**



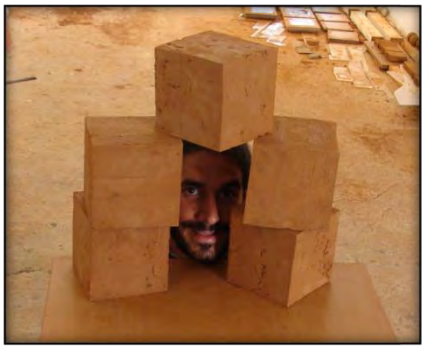


**Κατασκευή τοιχοσώματος του σύστηματος «Plethro»**





**Τελική πράξη**



# Παράρτημα Α

Θεωρητικό υπόβαθρο πειραμάτων

## 1. Κοκκομετρική ανάλυση του εδάφους

Γενικά

Η κοκκομετρική διαβάθμιση ενός εδαφικού δείγματος αποτελεί μέθοδο ταυτοποίησης και ταυτόχρονα ταξινόμησής του. Στο εργαστήριο γίνεται με:

α) την μηχανική μέθοδο (χρήση κοσκίνων) για εδάφη με κόκκους > 0,063 mm
β) την υδρομετρική μέθοδο (καθίζηση σε υγρό περιβάλλον) για εδάφη με κόκκους που διέρχονται από το κόσκινο Νο 230 (<0,063mm) και μέχρι διάμετρο περίπου 0,001mm.

Α. Μηχανική Μέθοδος (κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα)

Η μέθοδος αφορά στον προσδιορισμό της κατανομής του μεγέθους των κόκκων σε λεπτόκοκκα ή χονδρόκοκκα εδάφη με τη χρησιμοποίηση κοσκίνων τετραγωνικών ή κυκλικών οπών. Ξηρό δείγμα εδάφους (συνήθως μετά από πλύση) κοσκινίζεται μέσα από μια σειρά κοσκίνων και καταγράφεται το βάρος που συγκρατείται ή διέρχεται από κάθε κόσκινο.

*Εργαστηριακός εξοπλισμός*

α) Ζυγός ακριβείας 0,1 gr
β) Κόσκινα τετραγωνικών οπών σύμφωνα με τα Αμερικανικά πρότυπα ASTM D422
γ) Δονητής κοσκίνων
δ) Κλίβανος για την ξήρανση των δειγμάτων ικανός να διατηρήσει σταθερή θερμοκρασία 110$^{o}$C.

*Διαδικασία*

1. Λαμβάνεται ποσότητα (περίπου 500gr) αντιπροσωπευτικού δείγματος ξηρού εδάφους.
2. Το δείγμα πλένεται στο κόσκινο Νο 230, με προσοχή έτσι ώστε να αποφευχθεί οποιαδήποτε απώλεια υλικού και στη συνέχεια τοποθετείται στον κλίβανο για ξήρανση.
3. Μετά την ξήρανση, ζυγίζεται και διέρχεται από μία σειρά κοσκίνων που είναι διαβαθμισμένα από τα μεγαλύτερα προς τα μικρότερα μεγέθη. Για αμμώδη μέχρι λεπτόκοκκα εδάφη προτείνεται η παρακάτω σειρά κοσκίνων:

| Αριθμός κόσκινου (κατά ASTM) | Άνοιγμα οπής (mm) |
|---|---|
| 10 | 2 |
| 18 | 1 |
| 35 | 0,5 |
| 60 | 0,25 |
| 120 | 0,125 |
| 230 | 0,063 |

Τελευταίο τοποθετείται πάντα το κόσκινο Νο 230 (0,063 mm) και κάτω απ' αυτό ο συλλέκτης του κλάσματος που διέρχεται από το κόσκινο αυτό.

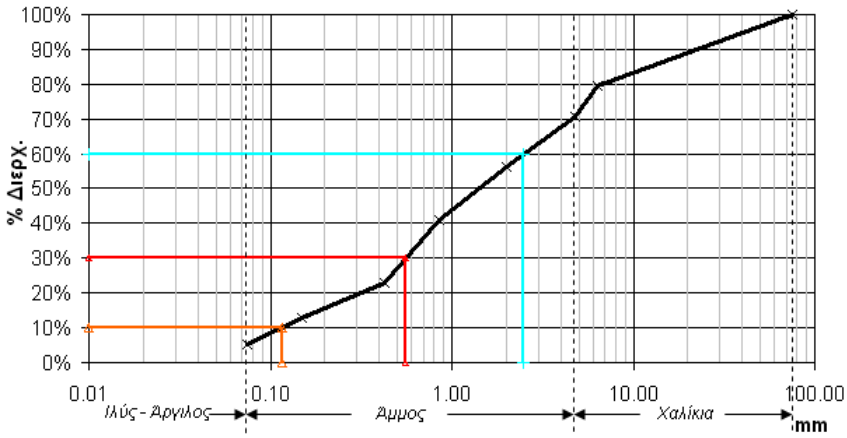
4. Η σειρά των κοσκίνων τοποθετείται πάνω στο μηχανικό δονητή και δονείται για 5 – 10 min.
5. Ζυγίζεται το κλάσμα που συγκρατείται σε κάθε κόσκινο και το άθροισμα των επιμέρους κλασμάτων συγκρίνεται με το αρχικό βάρος του δείγματος που κοσκινίστηκε προκειμένου να εξακριβωθεί εάν υπήρξε απώλεια υλικού κατά τη διάρκεια της κοσκίνισης.
   Για απώλειες μεγαλύτερες του 2% η δοκιμή επαναλαμβάνεται.
6. Υπολογίζεται το ποσοστό (%) που συγκρατείται σε κάθε κόσκινο διαιρώντας το βάρος που συγκρατείται στο κόσκινο με το αρχικό βάρος του δείγματος ($x$, $x_1$, …).
7. Υπολογίζεται το ποσοστό (%) που διήλθε από κάθε κόσκινο, αφαιρώντας από το διερχόμενο ποσοστό (%) του προηγούμενου κόσκινου, το ποσοστό που συγκρατήθηκε στο αναφερόμενο κόσκινο ($y=100 - x$ ,$y_1=100 - x_1$ …)
8. Τέλος σχεδιάζεται η κοκκομετρική καμπύλη σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα όπως περιγράφεται παρακάτω.

*Παρουσίαση αποτελεσμάτων - σχεδίαση κοκκομετρικής καμπύλης*

Τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης είναι δυνατόν να παρασταθούν με βάση

α) τα ολικά ποσοστά (%) διερχόμενων από το κόσκινο
β) τα ολικά ποσοστά (%) συγκρατούμενων σε κάθε κόσκινο
γ) τα ποσοστά (%) που συγκρατούνται μεταξύ των διαδοχικών κοσκίνων

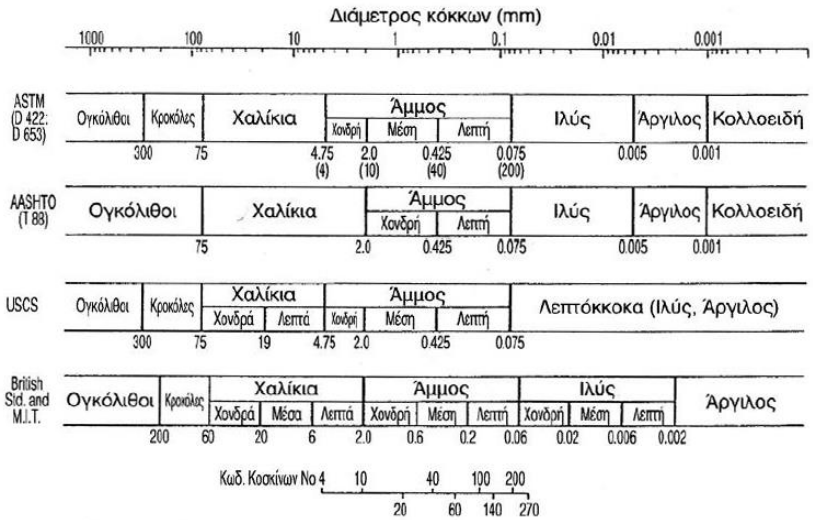
Τα προαναφερόμενα ποσοστά πρέπει να στρογγυλοποιούνται στον πλησιέστερο ακέραιο αριθμό εκτός από το ποσοστό που διέρχεται από το κόσκινο Νο 230 το οποίο πρέπει να δίδεται με ακρίβεια 0,1gr.




**Σχήμα 1.1 Διάγραμμα κοκκομετρικής ανάλυσης σύμφωνα με τα Αμερικάνικα πρότυπα (ASTM D422)**

Η κοκκομετρική καμπύλη (Σχήμα 1.1) σχεδιάζεται σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα όπου τα ολικά (αθροιστικά) ποσοστά % διερχομένων ή συγκρατούμενων απεικονίζονται στον (γραμμικό) άξονα των τεταγμένων και το μέγεθος των εδαφικών κόκκων (δεδομένου ότι ποικίλουν ευρύτατα) στο λογαριθμικό άξονα των τετμημένων.

Από την κοκκομετρική καμπύλη προκύπτει το ποσοστό κάθε κλάσματος (λίθοι, χάλικες, άμμος, ιλύς, άργιλος) που περιέχεται στο δείγμα. Το εύρος της διακύμανσης του μεγέθους κάθε κλάσματος για διάφορα συστήματα ταξινόμησης δίδονται στο **Error! Reference source not found.**.




**Σχήμα 1.2 Κοκκομετρία και διάφορα συστήματα ταξινόμησης**

Καμπύλη με ισχυρή κλίση υποδεικνύει ομοιόμορφο έδαφος με κόκκους περίπου του ίδιου μεγέθους. Όταν η καμπύλη έχει ήπια κλίση αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ευρεία σειρά μεγέθους κόκκων και το έδαφος είναι καλά διαβαθμισμένο.

Σε περίπτωση που η καμπύλη εμφανίζει τμήματα διαφορετικής καμπυλότητας τότε το έδαφος είναι μίγμα δύο ή περισσότερων ομοιόμορφων υλικών.

Ποσοτική έκφραση της διαβάθμισης των εδαφών αποδίδει το ενεργό μέγεθος και ο συντελεστής ομοιομορφίας.

Το ενεργό μέγεθος των κόκκων ($d_{10}$), ορίζεται σαν η μέγιστη διάμετρος των μικρότερων 10% κατά βάρος εδαφικών κόκκων και το μέγεθός της συνδέεται με τη διαπερατότητα του εδάφους.

Ο λόγος της μέγιστης διαμέτρου των μικρότερων 60% κατά βάρος εδαφικών κόκκων ($d_{60}$) προς το ενεργό μέγεθος ($d_{10}$) καλείται συντελεστής ομοιομορφίας (τύπος Hazen, $C_U=d_{60}/d_{10}$). Οι παραπάνω όροι είναι αυθαίρετοι και εκφράζουν χαρακτηριστικά διαβάθμισης του γεωϋλικού.
Μικρή τιμή του ενεργού μεγέθους ($d_{10}$) υποδεικνύει ότι το έδαφος περιέχει σημαντικό ποσοστό λεπτών κόκκων. Μεγάλη τιμή του συντελεστή ομοιομορφίας υποδεικνύει ότι τα μεγέθη των κόκκων είναι καλά κατανεμημένα από το μικρότερο προς το μεγαλύτερο μέγεθος και υποδεικνύει το μέγιστο μέγεθος των κόκκων.

Εδάφη που έχουν τιμές $C_U$ μικρότερες του 4 ή 5 ($C_U$<4 ή 5) καλούνται ομοιόμορφα ενώ τα εδάφη με τιμές $C_U$ μεγαλύτερες του 10 ($C_U$>10) χαρακτηρίζονται ως καλά διαβαθμισμένα.

*Σχέση κοκκομετρικής καμπύλης και αντοχής εδαφών*

Στα χονδρόκοκκα μη συνεκτικά εδάφη (π.χ. χάλικες, άμμος) η αντοχή σε διάτμηση οφείλεται κατά κύριο λόγο στην τριβή μεταξύ των κόκκων. Ως εκ τούτου, όσο λιγότερα είναι τα κενά μεταξύ των κόκκων, τόσο μεγαλύτερες είναι οι δυνάμεις τριβής και κατά συνέπεια η διατμητική αντοχή που επιδεικνύουν.

Ένα καλά διαβαθμισμένο γεωϋλικό είναι σχετικά σταθερό ενώ με κατάλληλη συμπύκνωση μπορεί να αυξηθεί η πυκνότητά του και να

αυξηθεί ακόμα περισσότερο η αντοχή του σε διάτμηση και κατά συνέπεια η φέρουσα ικανότητά του.

Αντίθετα, στα λεπτόκοκκα εδάφη (π.χ. άργιλοι, ιλείς), η κοκκομετρία έχει δευτερεύουσα σημασία στην αντοχή επειδή εξαρτάται κυρίως από την συνοχή που προκύπτει εξαιτίας των μοριακών δυνάμεων έλξης μεταξύ των επιφανειών των κόκκων και του νερού.

Β. Υδρομετρική μέθοδος (καθίζηση σε υγρό περιβάλλον)

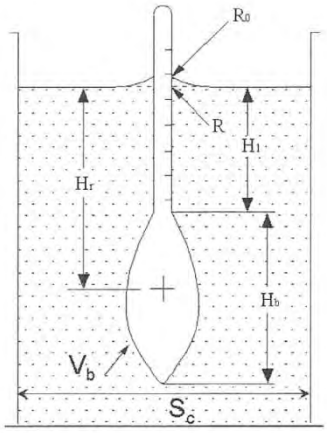
Χρησιμοποιείται μικρή ποσότητα ξηρού δείγματος, η οποία τοποθετείται σε ογκομετρικό κύλινδρο ο οποίος πληρούται με απιονισμένο νερό μέχρι τα 1000 ml. Στο διάλυμα που προκύπτει μετά από ανάδευση, η καθίζηση των εδαφικών κόκκων είναι πιθανό να διαρκέσει πολλές ώρες ή και ημέρες.

Κατά την διάρκεια της καθίζησης καταγράφεται, ανά τακτά χρονικά διαστήματα, η μάζα των εδαφικών κόκκων που βρίσκονται «εν αιωρήσει» (δεν έχουν ακόμη κατακαθίσει). Για τις μετρήσεις αυτές χρησιμοποιείται το αραιόμετρο. (πυκνόμετρο ή υδρόμετρο), (Σχήμα 1.3)

Το αραιόμετρο με την τοποθέτησή του στο διάλυμα επιπλέει. Με την πάροδο του χρόνου και την καθίζηση των εδαφικών κόκκων, το διάλυμα αραιώνει (μειώνεται η πυκνότητά του) και το αραιόμετρο βυθίζεται όλο και περισσότερο μέσα στο διάλυμα. Με την κατάλληλη βαθμονόμηση, δίδεται η δυνατότητα καταγραφής της πυκνότητας του διαλύματος, ή αλλιώς της μάζας των αιωρούμενων εδαφικών κόκκων.

Ως κόκκοι «εν αιωρήσει» θεωρούνται αυτοί που βρίσκονται μεταξύ του κέντρου βάρους του αραιομέτρου και της ελεύθερης επιφάνειας του διαλύματος (Σχήμα 1.3)

Συνεπώς, η περιοχή κάτω από το κέντρο βάρους της συσκευής αφορά ένα διάλυμα με εδαφικούς κόκκους που θεωρούμε ότι έχουν ήδη «κατακαθίσει».




**Σχήμα 1.3 Σχηματική παράσταση αραιομέτρου μέσα σε διάλυμα εδαφικών κόκκων**

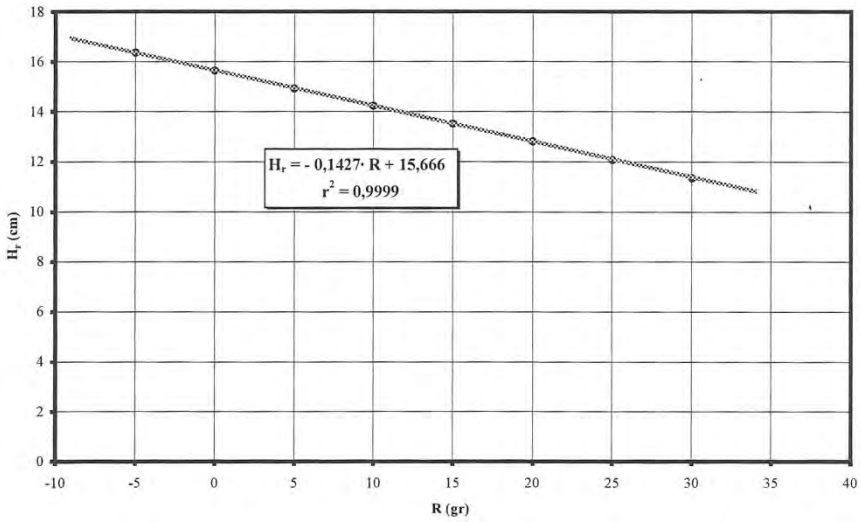
Το αραιόμετρο Eijelkamp που χρησιμοποιείται για την διεξαγωγή των μετρήσεων ικανοποιεί τις προδιαγραφές ASTM 152H και βαθμονομήθηκε στους 14$^{o}$C, με την χρησιμοποίηση εδαφικών κόκκων πυκνότητας 2,65 g/cm$^{3}$.

Μετρώντας την απόσταση H1 για κάθε ένδειξη του αραιομέτρου (R), προέκυψαν τιμές Hr (σε cm), που παρουσιάζεται στον Πίνακας 1.1.1 Βαθμονόμηση του αραιομέτρου Eijelkamp 152H. Στη συνέχεια παραστάθηκε γραφικά η σχέση των R και Hr (βλέπε Σχήμα 1.4). Από την ευθεία που προέκυψε συμπεραίνεται ότι, για το συγκεκριμένο αραιόμετρο, η απόσταση Hr προκύπτει από τη σχέση:

$$\mathbf{Hr = -0,1427 \cdot R + 15,666} \qquad (1.1)$$

**Πίνακας 1.1.1 Βαθμονόμηση του αραιομέτρου Eijelkamp 152H**

| R (g) | $H_1$ (cm) | Hr (cm) |
|---|---|---|
| 30,0 | 5,300 | 11,370 |
| 25,0 | 6,025 | 12,095 |
| 20,0 | 6,755 | 12,825 |
| 15,0 | 7,475 | 13,545 |
| 10,0 | 8,175 | 14,245 |
| 5,0 | 8,865 | 14,935 |
| 0,0 | 9,585 | 15,655 |
| -5,0 | 10,315 | 16,385 |




**Σχήμα 1.4 Σχέση R και Hr για το αραιόμετρο Eijelkamp 152H**

*Διεξαγωγή μετρήσεων*

Τοποθετούνται περίπου 40 g ξηρού εδαφικού δείγματος σε δοχείο των 250 ml, στο οποίο προστίθενται 125 ml νατριούχου εξαμεταφωσφορικού διαλύματος (Calgon) 5% κ.β. Το Calgon λειτουργεί ως παράγοντας διασποράς (αντικροκιδωτικό), προκειμένου να αποφευχθεί η συσσωμάτωση των εδαφικών κόκκων.

Το μείγμα ανακατεύεται καλά και αφήνεται τουλάχιστον 16 ώρες για εμποτισμό. Στη συνέχεια, μεταφέρεται σε κατάλληλο αναμείκτη και αναμιγνύεται για 1 λεπτό περίπου προκειμένου να αποχωρισθούν πιθανά συσσωματώματα.

Τέλος, το μείγμα μεταφέρεται σε ογκομετρικό κύλινδρο, ο οποίος πληρούται με απιονισμένο νερό μέχρι τα 1000 ml. Αφού σφραγιστεί το στόμιο του κυλίνδρου με πώμα, ο κύλινδρος αναταράσσεται και αμέσως τοποθετείται σε υδατόλουτρο θερμοκρασίας 20$^{o}$C.

Μόλις το δείγμα αποκτήσει ομοιογενή και ίδια θερμοκρασία με αυτή του υδατόλουτρου ο κύλινδρος απομακρύνεται, αναταράσσεται και επανατοποθετείται στη θέση του.

Με την έναρξη της καθίζησης των εδαφικών κόκκων τοποθετείται το αραιόμετρο έτσι ώστε να επιπλέει στο «εν ηρεμία» διάλυμα. *Το*

*αραιόμετρο θα πρέπει να τοποθετηθεί στο διάλυμα τουλάχιστον 20 sec πριν την πρώτη μέτρηση* και καταγράφονται οι ενδείξεις του στο $1^o$, $2^o$, και $4^o$ λεπτό από την έναρξη της καθίζησης.

Η παρακάτω διαδικασία (απομάκρυνση του κυλίνδρου, ανάμιξη διαλύματος, επανατοποθέτηση του κυλίνδρου, μετρήσεις με αραιόμετρο) επαναλαμβάνεται, προκειμένου να ελεγχθεί η αξιοπιστία των μετρήσεων. Εάν η δεύτερη σειρά των μετρήσεων διαφέρει από τις πρώτες λιγότερο από 1g, τότε οι μετρήσεις θεωρούνται αξιόπιστες. Σε αυτήν την περίπτωση συνεχίζεται κανονικά η λήψη μετρήσεων ανά τακτά χρονικά διαστήματα μέχρι την ολοκλήρωση της δοκιμής.

Ταυτόχρονα με τις ενδείξεις του αραιόμετρου καταγράφεται και η θερμοκρασία (T) του διαλύματος.

*Επεξεργασία μετρήσεων*

**Το ποσοστό $w_d$ (%) των εδαφικών κόκκων** που βρίσκονται (σε δεδομένη χρονική στιγμή) εν αιωρήσει στο διάλυμα, υπολογίζεται από την σχέση:

$$\mathbf{W_d} = \frac{\mathbf{R \cdot 100}}{\mathbf{W_d}} \qquad (\%) \qquad (1.2)$$

όπου $\mathbf{w_d}$ η μάζα (g) του ξηρού δείγματος που βρίσκεται στο διάλυμα.

Για το συγκεκριμένο αραιόμετρο που χρησιμοποιείται στο Εργαστήριο, η παραπάνω σχέση ισχύει για πυκνότητα εδαφικών κόκκων ($\rho_s$) ίση με 2,65 $g/cm^3$ (τιμή βαθμονόμησης του αραιόμετρου). Σε περίπτωση που αυτή είναι διαφορετική, χρησιμοποιείται συντελεστής διόρθωσης (a), ο οποίος δίνεται από τους κατασκευαστές του αραιομέτρου στον

Πίνακας 1.2 Συντελεστές διόρθωσης πυκνότητας για το αραιόμετρο Eijelkamp 152H.Με βάση τον συντελεστή αυτόν, η προαναφερόμενη σχέση τροποποιείται στην παρακάτω:

$$\mathbf{W_d} = \frac{\mathbf{R \cdot a \cdot 100}}{\mathbf{W_d}} \qquad (\%) \qquad (1.3)$$

**Πίνακας 1.2 Συντελεστές διόρθωσης πυκνότητας για το αραιόμετρο Eijelkamp 152H.**

| $\rho_s$ (g/cm$^3$) | a |
|---|---|
| 2,85 | 0,96 |
| 2,80 | 0,97 |
| 2,75 | 0,98 |
| 2,70 | 0,99 |
| 2,65 | 1,00 |
| 2,60 | 1,01 |
| 2,55 | 1,02 |
| 2,50 | 1,03 |

**Το μέγεθος των εδαφικών κόκκων που βρίσκονται εν αιωρήσει,** προσδιορίζεται με βάση την ταχύτητα καθίζησης των κόκκων όπως ορίζεται από το Νόμο του Stokes:

$$\mathbf{u} = \frac{\mathbf{d^2 \cdot (\rho_s + \rho_F)}}{\mathbf{1800 \cdot \eta}} \qquad \text{(cm/sec)} \qquad (1.4)$$

όπου:

d η διάμετρος των εδαφικών κόκκων (mm).

$\rho_s$ η πυκνότητα των εδαφικών κόκκων (g/cm$^3$)

$\rho_F$ η πυκνότητα του υγρού (διαλύτης) μέσα στο οποίο λαμβάνει χώρα η καθίζηση
Επειδή πρόκειται για απιονισμένο νερό η πυκνότητά του θεωρείται ίση με 1 g/cm$^3$

η το ιξώδες του ρευστού (g·sec/cm$^2$)*, το οποίο προσδιορίζεται συναρτήσει της θερμοκρασίας από την σχέση:

$$\boldsymbol{\eta} = \frac{\mathbf{1{,}81 \cdot 10^{-5}}}{\mathbf{1 + 0{,}034 \cdot T + 0{,}0002 \cdot T}} \qquad \text{(g·sec/cm}^2\text{)} \qquad (1.5)$$

Θεωρώντας επίσης γραμμική ταχύτητα καθίζησης, ισχύει:

$$\mathbf{u} = \frac{\mathbf{Hr}}{\mathbf{t}} \qquad \text{(cm/sec)} \qquad (1.6)$$

όπου t ο χρόνος (sec) από την έναρξη της καθίζησης

Από τις σχέσεις (1.5) και (1.7) προκύπτει:

$$\mathbf{d} = \sqrt{\frac{\mathbf{1800 \cdot \eta}}{\boldsymbol{\rho_s} - \boldsymbol{\rho_F}} \cdot \frac{\mathbf{Hr}}{\mathbf{t}}} \qquad \text{(cm)} \qquad (1.7)$$

*Διορθώσεις μετρήσεων*

Στις αρχικές ενδείξεις ($R_0$ βλέπε Σχ ήμα 1.3) του αραιομέτρου θα πρέπει να γίνουν τρεις διορθώσεις:

- "διόρθωση μηνίσκου", $C_M$ (g)
- "διόρθωση θερμοκρασίας", $C_T$ (g), και
- "διόρθωση παράγοντα διασποράς", $C_D$ (g)

*Διόρθωση Μηνίσκου*

Όταν το αραιόμετρο βυθίζεται μέσα σε ογκομετρικό κύλινδρο που περιέχει το διάλυμα των εδαφικών κόκκων, δημιουργείται μηνίσκος και η ανάγνωση της μέτρησης θα πρέπει κανονικά να γίνει στη βάση του μηνίσκου. Κάτι τέτοιο όμως είναι δύσκολο, καθώς τα διαλύματα που εξετάζονται είναι συνήθως αδιαφανή. Έτσι, η ανάγνωση της ένδειξης ($R_0$) γίνεται στο πάνω μέρος του μηνίσκου (ένδειξη μικρότερη από την πραγματική).

Η διόρθωση μηνίσκου ($C_M$) εξαρτάται από τον ογκομετρικό κύλινδρο που χρησιμοποιείται και μπορεί να προκύψει εφόσον το αραιόμετρο εισαχθεί μέσα στον κύλινδρο με 1000ml απιονισμένου νερού (διαφανές υγρό) και καταγραφεί η ένδειξη της θέσης που βρίσκεται η επάνω και κάτω πλευρά

του μηνίσκου. Για τη συγκεκριμένη διάταξη που χρησιμοποιείται στο εργαστήριο, η διόρθωση προκύπτει από τη σχέση

$$\mathbf{C_M = +0,5} \qquad \text{(g)} \qquad (1.8)$$

*Διόρθωση θερμοκρασίας και διόρθωση παράγοντα διασποράς*

Τα αραιόμετρα βαθμονομούνται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία. Οποιαδήποτε απόκλιση από αυτήν την θερμοκρασία διαφοροποιεί την πυκνότητα του διαλύματος των εδαφικών κόκκων και προκαλεί σφάλμα στις μετρήσεις.

Επίσης, στο διάλυμα προστίθεται κατάλληλη χημική ένωση (παράγοντας διασποράς) που αναπτύσσει αντικροκιδωτική δράση, εμποδίζει δηλαδή τους εδαφικούς κόκκους να συσσωματωθούν. Η προσθήκη του αντικροκιδωτικού αυξάνει την πυκνότητα του διαλύματος και οι ενδείξεις του υδρομέτρου δεν ανταποκρίνονται, όπως θα έπρεπε, στο διάλυμα "απιονισμένο νερό – δείγμα εδάφους).

Για τον υπολογισμό των δύο προαναφερθέντων σφαλμάτων θα πρέπει να πληρωθούν δύο όμοιοι ογκομετρικοί κύλινδροι ως τα 1000 ml, ο πρώτος με απιονισμένο νερό και ο δεύτερος με απιονισμένο νερό και τον παράγοντα διασποράς, στην αναλογία που χρησιμοποιείται στη δοκιμή 125 ml διαλύματος Calgon 5% κ.β. Οι κύλινδροι τοποθετούνται στο υδατόλουτρο προκειμένου να αποκτήσουν ίδια θερμοκρασίας.

Στην συνέχεια, καταγράφονται οι ενδείξεις (R) για διαφορετικές θερμοκρασίες (T) και στα δύο υγρά (βλέπε πίνακα 1.3). Σημειώνεται ότι στις ενδείξεις του αραιόμετρου θα πρέπει να γίνεται διόρθωση μηνίσκου.

**Πίνακας 1.3 Ενδείξεις R για διαφορετικές θερμοκρασιες T και στα δύο άκρα**

| T ($^{O}$C) | R (g) | |
|---|---|---|
| | (α) | (β) |
| 16,6 | -1,0 | 7,0 |
| 17,4 | -1,2 | 6,8 |
| 18,5 | -1,3 | 6,6 |
| 19,8 | -1,5 | 6,5 |
| 20,7 | -2,0 | 6,0 |

| | | |
|---|---|---|
| 22,7 | -3,0 | 5,0 |

Η γραφική παράσταση των παραπάνω μετρήσεων δίδει δύο πρακτικά παράλληλες ευθείες (Σχήμα 1.5), με τις κάτωθι εξισώσεις:

$$\mathbf{R = -0,31 \cdot T + 4,35} \quad (1.9)$$

για το απιονισμένο νερό, και

$$\mathbf{R = -0,31 \cdot T + 12,27} \quad (1.10)$$

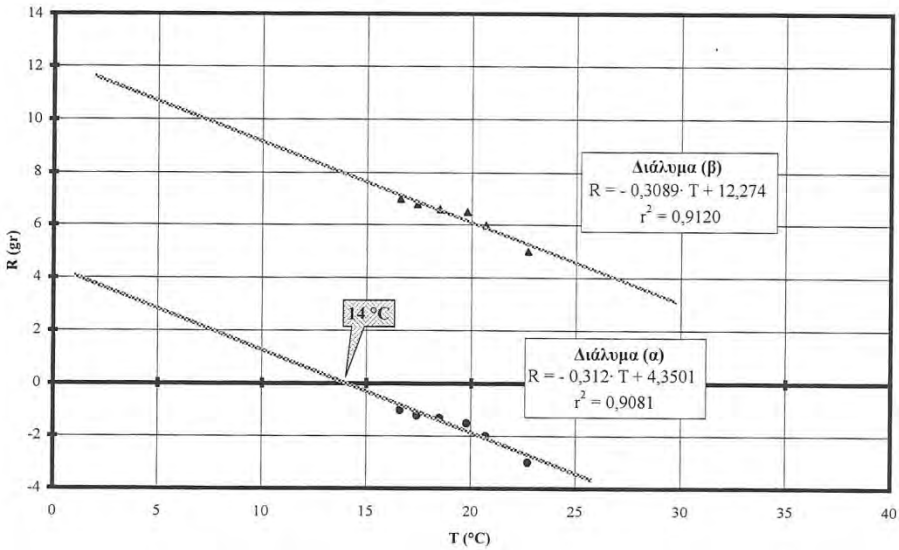
για το διάλυμα απιονισμένου νερού και παράγοντα διασποράς

Από το Σχήμα 1.5 επιβεβαιώνεται ότι η θερμοκρασία στην οποία δεν υπεισέρχονται σφάλματα λειτουργίας του αραιομέτρου (θερμοκρασία βαθμονόμησης) είναι οι 14$^{o}$C (R=0 για απιονισμένο νερό).

Το σφάλμα των μετρήσεων που οφείλεται στη διαφορά θερμοκρασίας από την βέλτιστη των 14$^{o}$C εκφράζεται από την εξίσωση της ευθείας για το απιονισμένο νερό, δηλαδή, είναι ίσο με ± (-0,31·T+4,35). Το πρόσημο του σφάλματος εξαρτάται από το α η θερμοκρασία εφαρμογής είναι μεγαλύτερη (+) ή μικρότερη (-) των 14$^{o}$C.

Το αντίστροφο θα ισχύει για την διόρθωση θερμοκρασίας ($C_T$). Θα πρέπει να έχει θετικό πρόσημο για θερμοκρασίες μικρότερες των 14$^{o}$C και αρνητικό για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 14$^{o}$C. Στο εργαστήριο, όπου συνήθως επιλέγονται θερμοκρασίες γύρω στους 20$^{o}$C , η διόρθωση θα πρέπει να προσδιορισθεί από τη σχέση:

$$\mathbf{C_T = +0,31 \cdot T - 4,35} \quad \textbf{(g)} \quad (1.11)$$




**Σχήμα 1.5 Σχέση T και R για απιονισμένο νερό (α) και διάλυμα απιονισμένου νερού και παράγοντα διασποράς (β).**

Όσον αφορά την προσθήκη του αντικροκιδωτικού, αυτή προκαλεί παράλληλη μετατόπιση της ευθείας. Το σφάλμα σε αυτή την περίπτωση θα είναι ίσο με τη διαφορά (-0,31·T + 12,27) – (- 0,31·T + 4,35)=+ 7,92. Άρα, η διόρθωση του παράγοντα διασποράς (CD) θα είναι:

$$\mathbf{CD} = -\mathbf{7,92} \qquad \text{(g)} \qquad (1.12)$$

Με βάση τις παραπάνω διορθώσεις, η πραγματική ένδειξη του υδρομέτρου (R σε g) δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R_0} + \mathbf{C_M} + \mathbf{C_T} + \mathbf{C_D} \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{R} = \boldsymbol{R_0} + \mathbf{0,31} \cdot \boldsymbol{T} - \mathbf{11,77} \quad (1.13)$$

## 2. Προσδιορισμός ορίων υδαρότητας και πλαστικότητας

Όρια Atterberg

*Γενικά*

Ένα από τα χαρακτηριστικά διάκρισης των συνεκτικών εδαφών είναι ότι μπορούν να υποστούν πλαστική παραμόρφωση χωρίς θραύση. Φυσικά, η πλασιμότητα που επιδεικνύουν εξαρτάται μεταξύ άλλων από την περιεκτικότητα τους σε νερό.

Στην περίπτωση που ένα αργιλικό (συνεκτικό) εδαφικό υλικό αναμειχθεί ομοιόμορφα με επαρκή ποσότητα νερού, θα συμπεριφερθεί σαν υγρό, γεγονός που σημαίνει ότι δεν θα έχει διατμητική αντοχή και θα παραμορφώνεται ελεύθερα (*υδαρής κατάσταση*). Εάν η ποσότητα του νερού μειωθεί, ο όγκος θα ελαττωθεί και το έδαφος θα αρχίσει - μετά από ένα συγκεκριμένο ποσοστό υγρασίας - να παρουσιάζει διατμητική αντοχή (*πλαστική κατάσταση*). *Βλέπε* **Error! Reference source not found.**.

*Η περιεκτικότητα σε νερό στην οποία το έδαφος αρχίζει να εμφανίζει διατμητική αντοχή καλείται* ***όριο υδαρότητας LL*** *(liquid limit)* και εκφράζει το όριο μεταξύ της υδαρούς και της πλαστικής κατάστασης του εδάφους.
Επειδή είναι αδύνατο να προσδιορισθεί εργαστηριακά το σημείο στο οποίο το έδαφος αρχίζει να παρουσιάζει διατμητική αντοχή, το όριο υδαρότητας θεωρείται σαν η περιεκτικότητα σε νερό στην οποία το έδαφος παρουσιάζει μια συγκεκριμένη αντοχή σε διάτμηση. Αυτή η αυθαίρετη, οριακή τιμή της διατμητικής αντοχής, χαρακτηρίζει το έδαφος το οποίο εάν τοποθετηθεί στο κύπελλο της συσκευής Casagrande και διαιρεθεί με ένα συγκεκριμένων διαστάσεων εργαλείο αυλάκωσης, απαιτεί 25 κτυπήματα (πτώσεις του κυπέλλου της συσκευής) για να εκδηλωθεί ροή του εδάφους και να ενωθεί η αυλάκωση στη βάση της σε μήκος 12.7 mm.

Στο εργαστήριο επαναλαμβάνονται διάφορες δοκιμές σε δείγματα από το ίδιο έδαφος αλλά με διαφορετική περιεκτικότητα σε νερό και με βάση τα αποτελέσματα, προσδιορίζεται ο αριθμός των κτυπημάτων που απαιτούνται για να ενωθεί η αυλάκωση στη βάση της σε μήκος 12.7 mm.
Από το ημιλογαριθμικό διάγραμμα της περιεχόμενης υγρασίας (τεταγμένη, σε γραμμική κλίμακα) προς τον αντίστοιχο αριθμό κτυπημάτων (τετμημένη, σε λογαριθμική κλίμακα) προκύπτει μία γραμμική σχέση που προσδιορίζει την "*καμπύλη ροής*". Το ποσοστό της

υγρασίας που αντιστοιχεί στην τετμημένη των 25 κτυπημάτων και την καμπύλη ροής προσδιορίζει το όριο υδαρότητας.
Στην περίπτωση που η υγρασία του εδάφους μειώνεται σταδιακά κατά τις διάφορες εργαστηριακές δοκιμές και κάτω από το όριο υδαρότητας, τότε ο όγκος και η πλασιμότητα του μειώνονται αντίστοιχα. Σε κάποιο ποσοστό υγρασίας, το έδαφος θα σταματήσει να επιδεικνύει πλαστική συμπεριφορά και θα προκληθεί θραύση. Αυτή η περιεκτικότητα σε νερό καλείται **όριο πλαστικότητας PL** και εκφράζει το όριο μεταξύ της πλαστικής και ημιστερεής κατάστασης.

Το όριο πλαστικότητας προσδιορίζεται αυθαίρετα στο Εργαστήριο σαν το ελάχιστο ποσοστό σε νερό στο οποίο ένα έδαφος μπορεί να πλασθεί, σχηματίζοντας ραβδίσκους με διάμετρο 3mm χωρίς να θρυμματισθεί.

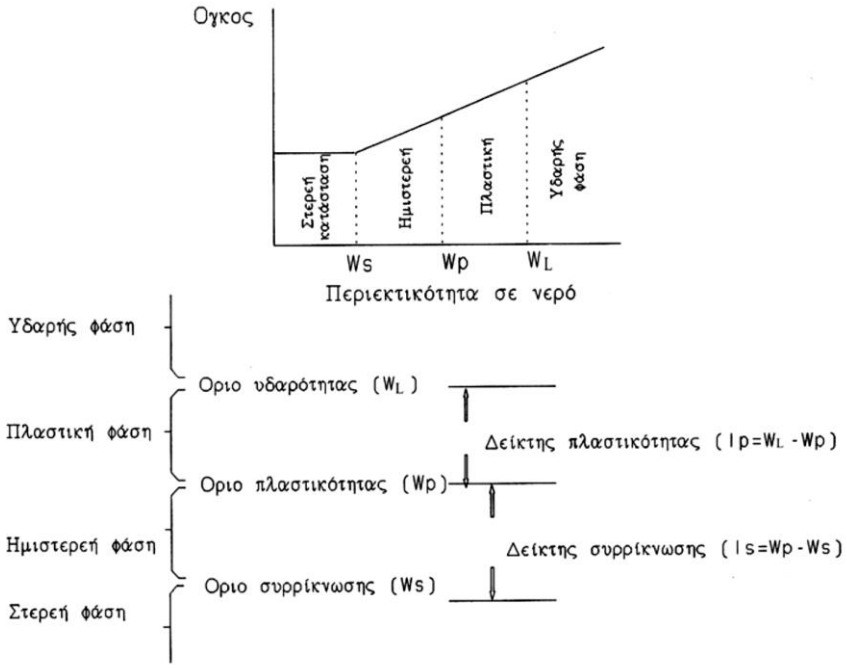
Οι δοκιμές για τον προσδιορισμό των ορίων υδαρότητας και πλαστικότητας (όρια Atterberg) πραγματοποιούνται σε εδαφικό υλικό που διέρχεται από το κόσκινο Νο 40 (425 μm) και δεν είναι εντελώς ξηρό. Ας σημειωθεί ότι για τα περισσότερα εδάφη η φυσική ξήρανση δεν επηρεάζει σημαντικά τις τιμές των ορίων Atterberg που προκύπτουν, ενώ η ξήρανση σε φούρνο επιφέρει αλλαγές στα χαρακτηριστικά της δομής (συνοχή) των περισσοτέρων εδαφών, ιδιαίτερα εκείνων που έχουν σε μεγάλο ποσοστό κόκκους μικρού μεγέθους και επηρεάζει τα αποτελέσματα.

Αμμώδη εδάφη επιδεικνύουν όρια υδαρότητας της τάξης του 20% και δείκτη πλαστικότητας από 0 μέχρι 5. Ιλείς και άργιλοι είναι δυνατόν να εμφανίσουν όρια υδαρότητας 80 - 100% ενώ άργιλοι με υψηλή περιεκτικότητα σε οργανικά υλικά μπορεί να παρουσιάσουν ακόμα υψηλότερες τιμές.
Τα όρια υδαρότητας και πλαστικότητας μολονότι δεν παρέχουν τιμές οι οποίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν απ' ευθείας σε υπολογισμούς, εν τούτοις είναι πολύ χρήσιμες. Μερικές εφαρμογές τους αναφέρονται παρακάτω:

α) Η επί τόπου κατάσταση ενός εδάφους μπορεί να εκτιμηθεί με το λόγο "ύδατος- ορίου πλαστικότητας" που είναι το πηλίκο της διαφοράς μεταξύ του περιεχομένου φυσικού ύδατος και του ορίου πλαστικότητας, προς τον δείκτη πλαστικότητας.
Υψηλή τιμή αυτού του λόγου, υποδηλώνει ότι το περιεχόμενο φυσικό νερό είναι πολύ σε σχέση με το όριο υδαρότητας, και προδικάζει μια πολύ χαμηλή αντοχή αναζυμωθέντος εδάφους.

β) Συχνά μπορούμε να διαμορφώσουμε ημιεμπειρικές σχέσεις μεταξύ μιας ιδιότητας (συμπιεστότητας, διαπερατότητας, συνοχής) του εδάφους και των ορίων ή των δεικτών. Από αυτές τις σχέσεις, είναι δυνατόν στη συνέχεια να γίνουν προβλέψεις των ιδιοτήτων άλλου δείγματος του ίδιου εδάφους αν είναι γνωστές οι τιμές των ορίων Atterberg.

γ) Τέλος τα όρια Atterberg αποτελούν άριστη βάση για την ταυτοποίηση και ταξινόμηση των λεπτόκοκκων εδαφών.




**Σχήμα 2.1 Σχέσεις φυσικής κατάστασης και όγκου με βάση τα όρια Atterberg**

<u>*Προσδιορισμός ορίου υδαρότητας*</u>

*Απαιτούμενος εξοπλισμός*

- Συσκευή Casagrande - Ζυγός με ακρίβεια μέχρι 0.01g
- Εργαλείο χάραξης - Ξηραντήριο
- Σπάτουλα ή μικρό μαχαίρι - Κόσκινο 425 μm και συλλέκτης δείγματος
- Ύαλοι ωρολογίου ή Τρυβλία Petri
- Πορσελάνινη κάψα και γουδοχέρι

*Διαδικασία*

1. Λαμβάνουμε δείγμα βάρους 100 g από το γεωϋλικό που έχει αναμειχθεί καλά και διέρχεται από κόσκινο ανοίγματος 425 μm (No 40).
2. Τοποθετούμε το υλικό στην κάψα, προσθέτουμε μικρή ποσότητα νερού (15 - 20 ml) και αναμειγνύουμε καλά με τη σπάτουλα μέχρις ότου δημιουργηθεί μία ομοιόμορφη (χωρίς συσσωματώματα) παχύρρευστη μάζα (πάστα).
3. Τοποθετούμε την πάστα στο κύπελλο της συσκευής Casagrande έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα στρώμα με ομαλή επιφάνεια.. Το μέγιστο πάχος του πρέπει να είναι περίπου 1 cm. Το επιπλέον έδαφος απομακρύνεται.
4. Χωρίζουμε το εδαφικό δείγμα σε δύο ίσα μέρη σύροντας το εργαλείο αυλάκωσης κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του κυπέλλου.
   Χρησιμοποιούμε τη σπάτουλα για την απομάκρυνση τμήματος της πάστας που τυχόν προεξέχει του κυπέλλου αποφεύγοντας τη διατάραξη του εδαφικού δείγματος καθ' οιονδήποτε τρόπο.
5. Περιστρέφουμε τον χειροκίνητο στρόφαλο της συσκευής με ρυθμό 2 περιστροφών/sec και μετράμε τους κτύπους (πτώσεις του κυπέλλου) που απαιτούνται έως ότου οι δύο πλευρές του δείγματος ενωθούν στη βάση της χαραγής και σε μήκος 12.7 mm.
6. Εάν ο αριθμός των περιστροφών-κτυπημάτων που απαιτούνται είναι μεταξύ 5 και 40, λαμβάνουμε με τη σπάτουλα 35- 40 g από το δείγμα, από την περιοχή της επαφής (της κλειστής πλέον αύλακας) και το τοποθετούμε σε γυάλινο υποδοχέα πραγματοποιώντας τις απαραίτητες ζυγίσεις για την εκτίμηση της υγρασίας και στη συνέχεια το τοποθετούμε στο ξηραντήριο (σε θερμοκρασία 110ο C).
7. Μεταβάλουμε την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό, είτε προσθέτοντας νερό στο ίδιο ή σε άλλο δείγμα το οποίο παρασκευάζομε ανάλογα.
8. Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία μέχρις ότου προσδιορισθεί ένας αριθμός τουλάχιστον τεσσάρων (4) τιμών περιεκτικότητας σε νερό για τις οποίες ο αριθμός των πτώσεων του κυπέλλου που απαιτούνται για να κλείσει η αύλακα είναι μεταξύ 5 και 40.

9. Μετά από 24 ώρες βγάζουμε τους υποδοχείς από το ξηραντήριο και καταγράφουμε το ξηρό βάρος. Η απώλεια του βάρους αναφέρεται σαν βάρος ύδατος (υγρασία).

*Αξιολόγηση*

1. Καταγράφουμε όλα τα δεδομένα στο επισυναπτόμενο φύλλο εργασίας.
2. Υπολογίζουμε την περιεκτικότητα σε υγρασία όλων των δειγμάτων που ελήφθησαν.
3. Επιλέγουμε μια κατάλληλη κλίμακα όσον αφορά την περιεκτικότητα σε νερό και σχεδιάζουμε το διάγραμμα του ορίου υδαρότητας.
4. Προσδιορίζουμε το όριο υδαρότητας.

*Προσδιορισμός ορίου πλαστικότητας*

*Απαιτούμενος εξοπλισμός*

- Ζυγός ακριβείας μέχρι 0.01 g
- Σπάτουλα-Σπαθίδα ή μικρό μαχαίρι
- Πορσελάνινη κάψα και γουδοχέρι
- Ξηραντήριο
- Επιφάνεια για κυλίνδριση των δειγμάτων
- Γυάλινοι υποδοχείς (Ύαλοι ωρολογίου ή Τρυβλία Petri)

*Διαδικασία*

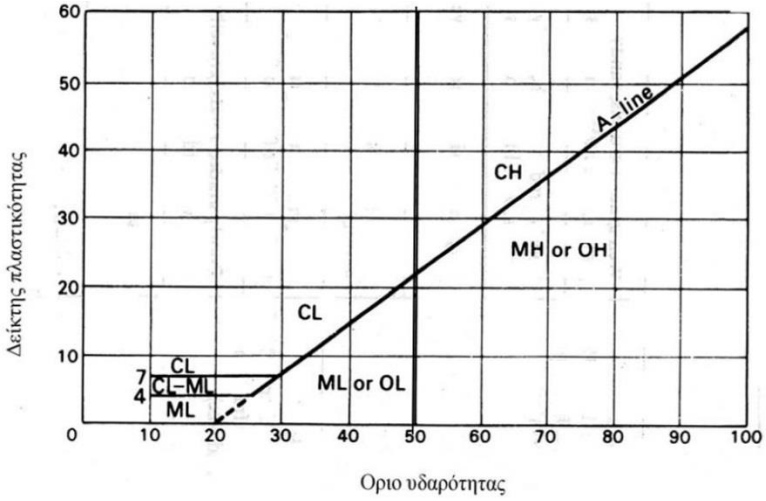
1. Λαμβάνουμε περίπου 20 g εδαφικού υλικού που έχει αναμειχθεί καλά και διέρχεται από κόσκινο 425μm (No 40). Τοποθετούμε το δείγμα μέσα στην κάψα και προσθέτουμε νερό ενώ το αναμειγνύομε με την σπάτουλα, ώστε να αποκτήσει πλαστιμότητα (να μορφώνεται εύκολα σε βώλο).
2. Χωρίζουμε την εδαφική μάζα σε τρία μέρη και για κάθε ένα ακολουθούμε την παρακάτω διαδικασία:
   Συμπιέζουμε και μορφώνομε το δείγμα της δοκιμής σε μάζα ελλειψοειδούς σχήματος. Η μάζα κυλινδρώνεται μεταξύ των δακτύλων και μιας γυάλινης πλάκας, η άλλης ομαλής επιφάνειας, με την απαιτούμενη πίεση ώστε να σχηματισθεί ραβδίσκος ομοιόμορφης διαμέτρου 3 mm σε όλο το μήκος του.
   Εάν το έδαφος είναι πολύ ξηρό και δεν είναι δυνατή η διαμόρφωση ραβδίσκου διαμέτρου 3 mm, αναπλάθουμε το

δείγμα προσθέτοντας περισσότερο νερό και επαναλαμβάνουμε την διαδικασία.
Εάν το έδαφος διαμορφώνει ραβδίσκο με διάμετρο μικρότερη των 3 mm, το αναπλάθουμε σε βώλο και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία κυλίνδρωσης σε ομαλή επιφάνεια που καλύπτεται με τραχείας υφής χαρτί. (Το χαρτί θα απορροφήσει αργά- αργά, κάποια ποσότητα νερού από το έδαφος).
Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία, θα προσεγγίσουμε τελικά μια περιεκτικότητα σε νερό κατά την οποία ο ραβδίσκος κυλινδρούμενος προκειμένου να μειωθεί η διάμετρος του κάτω από 3mm, θρυμματίζεται.

3. Τοποθετούμε τα θρύμματα σε ένα υποδοχέα Petri, καταγράφομε το υγρό βάρος και τοποθετούμε τον υποδοχέα στο ξηραντήριο σε θερμοκρασία 110ο C.
4. Μετά από 24 ώρες βγάζουμε τους υποδοχείς από το ξηραντήριο και καταγράφουμε το ξηρό βάρος. Η απώλεια του βάρους αναφέρεται σαν το βάρος του ύδατος.

*Αξιολόγηση*

1. Καταγράφομε όλα τα δεδομένα στο επισυναπτόμενο φύλλο εργασίας.
2. Προσδιορίζουμε την περιεκτικότητα σε νερό για κάθε ένα από τα τρία δείγματα.
3. Υπολογίζουμε το μέσο όρο των αποτελεσμάτων ο οποίος προσδιορίζει το όριο πλαστικότητας.
4. Σχολιάζουμε τα αποτελέσματα με βάση το Ενιαίο σύστημα ταξινόμησης USCS (βλέπε Σχήμα 2.2).




**Σχήμα 2.2 Διάγραμμα πλαστικότητας (ASTM D2487)**

## *Ταξινόμηση του εδάφους*

**Πίνακας 2.1 Ενιαίο σύστημα ταξινόμησης εδαφών (Unified Soil Classification System – ASTM-2487)**

| Βασικός διαχωρισμός | | περιγραφή | Σύμ-βολα | *Εργαστηριακά κριτήρια κατάταξης* | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Λεπτομέ-ρειες (<0.075 mm) % | Κοκκομετρική διαβάθμιση | πλαστικότητα | παρατηρήσεις |
| Χονδρόκοκκα εδάφη Περισσότερο από 50% παραμένει στο κόσκινο No 200 | Χάλικες (πλέον του 50% με κοκκομετρία μεγαλύτερη των χαλίκων) | Καλά διαβαθμισμένοι χάλικες ή αμμοχάλικα με λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα | GW | 0-5 | Cu >4* 1<Cc<3 ** | | Διπλοί συμβολισμοί εάν τα λεπτομερή είναι 5-12% |
| | | Πτωχά διαβαθμισμένοι χάλικες ή αμμοχάλικα με λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα | GP | 0-5 | Δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις GW | | |
| | | Ιλυώδεις χάλικες. Μίγμα χαλίκων, άμμου, ιλύος. | GM | >12 | | Κάτω από τη γραμμή A, ή PI <4 | Διπλοί συμβολισμοί εάν είναι πάνω από την γραμμή A και 4 < P <7 |
| | | Αργιλώδεις χάλικες. Μίγμα χαλίκων, άμμου, αργίλου | GC | >12 | | Πάνω από τη γραμμή A και PI > 7 | |
| | Αμμοι (πλέον του 50% με κοκκομετρία μεγαλύτερη της άμμου) | Καλά διαβαθμισμένοι άμμοι ή αμμοχάλικα με λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα | SW | 0-5 | Cu >6 1<Cc<3 | | |
| | | Πτωχά διαβαθμισμένοι άμμοι ή αμμοχάλικα με λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα | SP | 0-5 | Δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις SW | | |
| | | Ιλυώδεις άμμοι | SM | >12 | | Κάτω από τη γραμμή A, ή PI <4 | |
| | | Αργιλώδεις άμμοι | SC | >12 | | Πάνω από τη γραμμή A και PI > 7 | |
| Λεπτόκοκκα εδάφη Λιγότερο από 50% παραμένει στο κόσκινο No 200 | Ιλείς και άργιλοι (LL<50) | Ανόργανοι ιλείς, ιλυώδεις ή αργιλώδεις λεπτόκοκκοι άμμοι χαμηλής πλαστικότητας. | ML | Χρησιμοποίησε το διάγραμμα πλαστικότητας | | | |
| | | Ανόργανοι άργιλοι, ιλυώδεις άργιλοι, αμμώδεις άργιλοι χαμηλής πλαστικότητας | CL | Χρησιμοποίησε το διάγραμμα πλαστικότητας | | | |
| | | Οργανικές ιλείς και οργανικές ιλυώδεις άργιλοι χαμηλής πλαστικότητας | OL | Χρησιμοποίησε το διάγραμμα πλαστικότητας | | | |
| | Ιλείς και άργιλοι (LL>50) | Ανόργανοι, ιλείς υψηλής πλαστικότητας | MH | Χρησιμοποίησε το διάγραμμα πλαστικότητας | | | |
| | | Ανόργανοι άργιλοι υψηλής πλαστικότητας | CH | Χρησιμοποίησε το διάγραμμα πλαστικότητας | | | |
| | | Οργανικές άργιλοι υψηλής πλαστικότητας | OH | Χρησιμοποίησε το διάγραμμα πλαστικότητας | | | |
| Πολύ οργανικά εδάφη | | Τυρφώδη και άλλα πολύ οργανικά εδάφη | Pt | | | | |

Για την ταξινόμηση του εδάφους χρησιμοποιείται κυρίως το Ενιαίο Σύστημα Ταξινόμησης (USCS). Περιλαμβάνει τα εργαστηριακά κριτήρια ταξινόμησης που παρουσιάζονται στον **Error! Reference source not found.** και το παρελκόμενο διάγραμμα πλαστικότητας στο Σχήμα 2.2

.

Κάθε έδαφος χαρακτηρίζεται με ένα συμβολισμό αποτελούμενο από ένα κύριο και ένα δευτερεύον γράμμα. Τα γράμματα και η σημασία τους έχουν όπως παρακάτω:

| **Κύριο γράμμα** | | **Δευτερεύον γράμμα** | |
|---|---|---|---|
| G | Χάλικες | W | Καλά διαβαθμισμένο |
| S | Άμμος | P | Πτωχά διαβαθμισμένο |
| M | Ιλύς | M | Με μη πλαστικά λεπτομερή |
| C | Άργιλος | C | Με πλαστικά λεπτομερή |
| O | Οργανικό έδαφος | L | Χαμηλής πλαστικότητας (LL<50) |
| Pt | Τύρφη | H | Υψηλής πλαστικότητας (LL>50) |

## 3. Δοκιμή διάτμησης εδαφών

Γενικά

Η παραμόρφωση μιας εδαφικής μάζας οφείλεται στη σχετική ολίσθηση των σωματιδίων που την αποτελούν. Κατά συνέπεια η αντίσταση του εδάφους σε διατμητική παραμόρφωση εξαρτάται από τη διατμητική αντίσταση που αναπτύσσεται στα σημεία επαφής των εδαφικών κόκκων. Η μικρότερη δύναμη που απαιτείται για τη σχετική μετακίνηση τους εκφράζει τη διατμητική αντοχή του εδάφους.

Η διατμητική αντοχή οφείλεται:

α) Στις ελκτικές δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ των επιφανειών των εδαφικών κόκκων. Οι δυνάμεις αυτές εξαρτώνται από τους δεσμούς που έχουν αναπτυχθεί μεταξύ των κόκκων (συγκόλληση) και μπορεί να λεχθεί ότι προσδίδουν στο έδαφος διατμητική αντοχή ανάλογης φύσης με αυτή των στερεών σωμάτων. Το αίτιο αυτό εκδήλωσης διατμητικής αντοχής ονομάζεται "**συνοχή**" του εδάφους.

β) Στην τριβή που αναπτύσσεται στα σημεία επαφής των εδαφικών κόκκων και στην αλληλο-εμπλοκή τους που οφείλεται στο σχήμα τους. Είναι προφανές ότι αυτό το εσωτερικό αίτιο, η "**εσωτερική τριβή**" όπως ονομάζεται οδηγεί σε διατμητική αντοχή που είναι συνάρτηση του κάθετου φορτίου στην επιφάνεια ολίσθησης.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η διατμητική αντοχή του εδάφους ισούται με το άθροισμα της διατμητικής αντοχής που οφείλεται στη συνοχή και αυτής που οφείλεται στην εσωτερική τριβή.

Η διατμητική αντοχή του εδάφους, τη στιγμή της θραύσης του κατά ολίσθηση, δίδεται από τη σχέση του Coulomb

$$\boldsymbol{\tau = c + \sigma \cdot \varepsilon\varphi\varphi}$$

όπου

τ : η αντοχή του εδάφους σε διάτμηση

c : η συνοχή του εδάφους

σ : η κάθετη τάση στο επίπεδο διάτμησης και

φ : η γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους.

Στην περίπτωση που αναπτύσσεται πίεση πόρων και θεωρούμε ενεργές τάσεις η διατμητική αντοχή του εδάφους δίδεται από τη σχέση **Coulomb - Terzaghi**:

$$\boldsymbol{\tau = c' + \sigma' \cdot \varepsilon\varphi\varphi'}$$

*ή*

$$\boldsymbol{\tau = c' + (\sigma - u) \cdot \varepsilon\varphi\varphi'}$$

όπου
σ' : η ενεργή κάθετη τάση που ασκείται στο επίπεδο διάτμησης
u : η πίεση του νερού των πόρων και
c' και φ' : οι παράμετροι του εδάφους που αναφέρονται στις ενεργές τάσεις.

γωνία εσωτερικής τριβής φ και η συνοχή c προσδιορίζονται εργαστηριακά με διάφορες συσκευές οι οποίες προκαλούν στο εδαφικό δοκίμιο μία από τις παρακάτω μορφές διάτμησης:

- απ' ευθείας διάτμηση
- διάτμηση με τριαξονική φόρτιση

Η πλέον χρησιμοποιούμενη δοκιμή είναι αυτή της άμεσης διάτμησης κατά την οποία ασκείται στο έδαφος μια σταθερή κατακόρυφη τάση και συγχρόνως υποβάλλεται σε διάτμηση κατά μία προδιαγεγραμμένη επίπεδη επιφάνεια (κάθετη στην εφαρμοζόμενη κατακόρυφη τάση). Κατά την δοκιμή μετράται η απαιτούμενη για την διάτμηση δύναμη.
Η διάτμηση μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με αύξηση της διατμητικής δύναμης κατά σταθερές βαθμίδες και σε ίσα χρονικά διαστήματα (συσκευές ελεγχόμενων τάσεων), είτε με μετακίνηση του κινητού τμήματος της συσκευής με σταθερή ταχύτητα (συσκευές ελεγχόμενης παραμόρφωσης).
Η δεύτερη μέθοδος είναι η συνηθέστερη και σύμφωνα με αυτήν λειτουργεί η μηχανή του Εργαστηρίου.
Η κίνηση του κατώτερου τμήματος του κυτίου διάτμησης (μέσα στο οποίο τοποθετείται το εδαφικό δοκίμιο) γίνεται με ηλεκτροκίνητο τρόπο και με δεδομένο ρυθμό. Το ανώτερο τμήμα του κυτίου φέρεται από οριζόντιο στέλεχος στο οποίο είναι προσαρμοσμένος ένας δυναμομετρικός δακτύλιος για την μέτρηση της διατμητικής δύναμης που αναπτύσσεται κατά την δοκιμή.

Για την επεξεργασία των μετρήσεων σχεδιάζονται:

i) οι καμπύλες, της διατμητικής δύναμης συναρτήσει της οριζόντιας μετατόπισης προκειμένου να προσδιορισθεί η τιμή της οριακής διατμητικής δύναμης και

ii) το διάγραμμα της διατμητικής αντοχής σε σχέση με την κατακόρυφη τάση για τις διάφορες δοκιμές που πραγματοποιούνται. Η κλίση της ευθείας που προκύπτει από το διάγραμμα αυτό, προσδιορίζει τη γωνία εσωτερικής τριβής (φ) ενώ η τομή της ευθείας με τον άξονα των τεταγμένων προσδιορίζει τη συνοχή (c) του εδάφους.

Άμεση διάτμηση μπορεί να εφαρμοσθεί σε συνεκτικά και μη συνεκτικά εδάφη με τρεις διαφορετικούς τύπους δοκιμής :

**α) Ταχεία δοκιμή μη στερεοποιημένου δοκιμίου**
**β) Ταχεία δοκιμή στερεοποιημένου δοκιμίου**
**γ) Βραδεία δοκιμή στερεοποιημένου δοκιμίου**

*Η άσκηση αφορά στον προσδιορισμό των παραμέτρων της αντοχής του εδάφους με ταχεία δοκιμή άμεσης διάτμησης μη στερεοποιημένου δοκιμίου.*

Ταχεία δοκιμή μη συνεκτικού εδάφους – μη στερεοποιημένου δοκιμίου

*Απαιτούμενος εξοπλισμός*

| Κύριες συσκευές | Γενικός Εξοπλισμός |
|---|---|
| Μηχανή απ' ευθείας διάτμησης | Ζυγός ακριβείας 0.1 g<br>Ξηραντήριο<br>Παχύμετρο<br>Κανόνας<br>Χρονόμετρο |

*Διαδικασία*

1. Ζυγίζουμε ένα δίσκο με ξηρό (ή γνωστής περιεκτικότητας σε υγρασία), μη συνεκτικό έδαφος του οποίου οι εδαφοτεχνικές παράμετροι πρόκειται να προσδιορισθούν. Η ποσότητα του

διαθέσιμου δείγματος θα πρέπει να είναι αρκετή για τρεις δοκιμές με δείγμα ίδιας πυκνότητας.

2. Συναρμολογούμε τα τμήματα του υποδοχέα και μετράμε τις διαστάσεις του (βάθος, πλάτος/μήκος ή διάμετρος κ.λ.π.) ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός της εγκάρσιας διατομής Α και της πυκνότητας του εδαφικού δοκιμίου. Τοποθετούμε τον υποδοχέα στη συσκευή διάτμησης.

3. Τοποθετούμε τον πωρόλιθο βάσης και το έδαφος υπό μορφή στρώσεων μέχρι 5 mm από την κορυφή του υποδοχέα.
   Επιπεδώνομε την επιφάνεια του εδάφους και τοποθετούμε τον πωρόλιθο της κορυφής και το εξάρτημα φόρτισης (μεταλλική πλάκα).
   Σημειώνομε το εξάρτημα φόρτισης περιμετρικά, σε σχέση με τον υποδοχέα του δοκιμίου προκειμένου να καταγραφούν ενδείξεις αναφοράς του αρχικού πάχους του δοκιμίου.

4. Ζυγίζομε εκ νέου το δίσκο με το εδαφικό δείγμα. Η διαφορά του βάρους αυτού και του προηγούμενα ζυγισθέντος παρέχει το βάρος του χρησιμοποιούμενου δείγματος.

5. Μετράμε το βάρος του ζυγού φόρτισης και τον προσαρμόζουμε επί της μεταλλικής πλάκας φόρτισης (ή εξισορροπούμε το σύστημα επιβολής του κατακόρυφου φορτίου, εάν υπάρχει διάταξη που το επιτρέπει, στη θέση που μόλις εφάπτεται της μεταλλικής πλάκας).
6. Εφαρμόζουμε βάρος W στο άγκιστρο του ζυγού φόρτισης ώστε να επιβληθεί στο δοκίμιο κατακόρυφο φορτίο Pv και να ασκηθεί η επιδιωκόμενη κατακόρυφη τάση σn.
   Ας σημειωθεί ότι για την εκτίμηση του επιβαλλόμενου φορτίου Pv θα πρέπει εκτός του βάρους W να ληφθεί υπόψη το βάρος του εξαρτήματος φόρτισης (μεταλλική πλάκα) και το βάρος του ζυγού φόρτισης όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση:

   **Pv = W + βάρος εξαρτήματος φόρτισης + βάρος ζυγού φόρτισης**

7. Προσαρμόζουμε τα μηκυνσιόμετρα για τη μέτρηση των διατμητικών και κατακόρυφων μετατοπίσεων.

Για τη μέτρηση της κατακόρυφης παραμόρφωσης (δηλ. της μεταβολής του πάχους του δοκιμίου) θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μηκυνσιόμετρα με ακρίβεια 0.002 mm ενώ για τη μέτρηση των διατμητικών παραμορφώσεων, μηκυνσιόμετρα με ακρίβεια 0.01 mm.

8. Αφαιρούμε τους κατακόρυφους κοχλίες που συγκρατούν τα δύο τμήματα του υποδοχέα και ανυψώνομε το ανώτερο πλαίσιο στρέφοντας ανάλογα τους κοχλίες απομάκρυνσης.
   Συσφίγγουμε επίσης τους κατάλληλους κοχλίες ώστε να επιτευχθεί καλή συναρμογή μεταξύ του ανώτερου πλαισίου του υποδοχέα με το οριζόντιο στέλεχος που επιβάλλει τη διατμητική δύναμη.

9. Επιλέγουμε την ταχύτητα της οριζόντιας μετατόπισης. (Χρησιμοποιούμε ένα ρυθμό μετατόπισης μεταξύ 0.5 mm/min και 2 mm/min). Καταγράφουμε τις αρχικές ενδείξεις των μηκυνσιομέτρων (διατμητικής δύναμης, διατμητικών και κατακόρυφων παραμορφώσεων) και αρχίζομε τη διάτμηση η οποία συνεχίζεται μέχρις ότου η διατμητική δύναμη αποκτήσει σταθερή τιμή για αυξανόμενη διατμητική παραμόρφωση ή μέχρις ότου η διατμητική παραμόρφωση φτάσει το 10 % της αρχικής διαμέτρου του δοκιμίου.
   Ας σημειωθεί ότι σε μια δοκιμή ελεγχόμενης παραμόρφωσης καταγράφουμε τις ενδείξεις όλων των μηκυνσιομέτρων, ανά διαστήματα που καθορίζονται από την οριζόντια μετατόπιση. Αρχικά ανά 5 και στη συνέχεια (ανάλογα με τις μεταβολές των ενδείξεων) ανά 10 ή 20 υποδιαιρέσεις του μηκυνσιομέτρου οριζόντιας μετατόπισης.

10. Μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής, απομακρύνομε το εδαφικό δοκίμιο από τον υποδοχέα και επαναλαμβάνουμε τα βήματα από 1 - 9 σε δύο επιπλέον δοκίμια χρησιμοποιώντας διαφορετικά κατακόρυφα φορτία Pv. (Προτείνεται ο διπλασιασμός κάθε φορά του επιβαλλόμενου βάρους W, δηλ. 4, 8 και 16 kg ή 5, 10, 20 kg κλπ).
    Ας σημειωθεί ότι θα πρέπει να ελέγχεται η πυκνότητα του δοκιμίου που χρησιμοποιείται κάθε φορά με βάση τα σημάδια αναφοράς του βήματος 3.

*Υπολογισμοί – παρουσίαση των αποτελεσμάτων*

Τα αποτελέσματα κάθε μιας δοκιμής απευθείας διάτμησης θα πρέπει να παρουσιασθούν σε περιληπτικό πίνακα (βλέπε επισυναπτόμενο φύλλο εργασίας) και να σχεδιασθούν τα παρακάτω διαγράμματα:

1. Διάγραμμα της οριζόντιας διατμητικής δύναμης Ph συναρτήσει της οριζόντιας (διατμητικής) μετατόπισης δh προκειμένου να εκτιμηθεί η οριακή διατμητική δύναμη και η αντίστοιχη οριακή τάση.

   *Η διατμητική δύναμη και κατ' επέκταση η διατμητική τάση υπολογίζεται σύμφωνα με το παρακάτω σχέση :*

   ***τ = διατμητική τάση*** *= (τρέχουσα - αρχική ένδειξη του δυναμομετρικού δακτυλίου) Χ τον συντελεστή μετατροπής του δακτυλίου δια* της επιφάνειας του δοκιμίου.

   Εναλλακτικά, μπορεί να σχεδιασθεί το διάγραμμα των ενδείξεων του μηκυνσιομέτρου του δακτυλίου φόρτισης συναρτήσει των ενδείξεων του μηκυνσιομέτρου της οριζόντιας μετατόπισης προκειμένου να προσδιορισθεί η οριακή διατμητική δύναμη και κατ' επέκταση η διατμητική τάση.

2. Διάγραμμα της διατμητικής τάσης (τ) συναρτήσει της κατακόρυφης τάσης σn για τις διάφορες δοκιμές (**χρησιμοποιώντας την ίδια κλίμακα στους δύο άξονες για άμεση μέτρηση της κλίσης με μοιρογνωμόνιο**) για άμεση μέτρηση της κλίσης με μοιρογνωμόνιο. Η κλίση της βέλτιστης ευθείας που προκύπτει από το διάγραμμα, προσδιορίζει τη γωνία εσωτερικής τριβής (φ), ενώ η τομή της ευθείας με τον άξονα των τεταγμένων προσδιορίζει τη συνοχή (c) του εδάφους.

## 4. Δοκιμή συμπύκνωσης συνεκτικών εδαφών (Δοκιμή Proctor)

Γενικά

Σαν συμπύκνωση του εδάφους περιγράφεται η μείωση του όγκου του, η οποία προκαλείται τεχνητά με την πρόσκαιρη ή τη στιγμιαία εφαρμογή κάποιου φορτίου (π.χ. δονήσεις, κρούσεις, κυλινδρώσεις).

Η μέγιστη συμπύκνωση επιτυγχάνεται με προσθήκη συγκεκριμένης υγρασίας που ευνοεί τη μείωση της συνοχής και των τριβών μεταξύ των εδαφικών κόκκων. Έτσι, προκύπτει γρήγορη αναδιάταξη τους σε πυκνότερη δομή και το έδαφος αποκτά τη μέγιστη ξηρή πυκνότητα.

Η "βέλτιστη υγρασία", δηλαδή η ποσότητα νερού που πρέπει να προστεθεί προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη συμπύκνωση, προσδιορίζεται εργαστηριακά με τη δοκιμή Proctor (πρότυπη ή τροποποιημένη).

Περιγραφή της δοκιμής

Το έδαφος συμπυκνώνεται με την ελεύθερη πτώση ενός εμβόλου σε κυλινδρική μεταλλική μήτρα, όπου το δείγμα τοποθετείται σε στρώσεις.

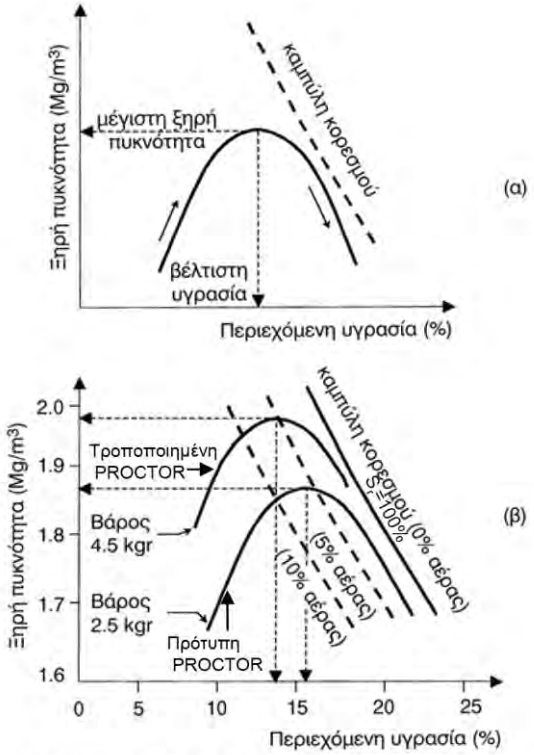
Για το δοκίμιο που προκύπτει, υπολογίζεται η υγρή πυκνότητα, η περιεκτικότητα σε υγρασία και η ξηρή πυκνότητα (ή το ξηρό μοναδιαίο βάρος). Η συμπύκνωση επαναλαμβάνεται αρκετές φορές, χρησιμοποιώντας κάθε φορά διαφορετική υγρασία. Από τη γραφική παράσταση της ξηρής πυκνότητας (ή του ξηρού μοναδιαίου βάρους) των συμπυκνωμένων δειγμάτων συναρτήσει της υγρασίας (με την οποία συμπυκνώθηκε το καθένα), υπολογίζεται η “βέλτιστη υγρασία” ΟΜC του εδάφους και η “μέγιστη ξηρή πυκνότητα” (Σχήμα 4.1).

Το διάγραμμα υποδεικνύει ότι η διαδικασία της συμπύκνωσης γίνεται αποδοτικότερη με την αύξηση της υγρασίας, μέχρις μιας ορισμένης τιμής (ΟΜC), ενώ στη συνέχεια η απόδοση αυτή μειώνεται. Η υπερβολική υγρασία προκαλεί πιέσεις πόρων στιγμιαία υψηλές με την πρόσκρουση του εμβόλου, οι οποίες οδηγούν σε πολύ μειωμένη διατμητική αντοχή και το έμβολο αναζυμώνει το έδαφος αντί να αυξάνει περαιτέρω την πυκνότητα του.

Οι πιο συνηθισμένες δοκιμές συμπύκνωσης είναι ή πρότυπη δοκιμή Proctor (Standard Proctor Test) και ή τροποποιημένη δοκιμή Proctor (Modified Proctor).

Η πρότυπη δοκιμή Proctor χαρακτηρίζεται από ήπια ενέργεια συμπύκνωσης που ανταποκρίνεται σε στατικό ή σε μικρό δονητικό οδοστρωτήρα. Η τροποποιημένη δοκιμή προσδίδει περισσότερη ενέργεια

συμπύκνωσης που ανταποκρίνεται στην ενέργεια των δονητικών οδοστρωτήρων.




*α) Καμπύλη υγρασίας – ξηρής πυκνότητας εδάφους για συγκεκριμένη ενέργεια συμπύκνωσης, β) επίδραση της ενέργειας συμπύκνωσης στην καμπύλη υγρασίας – ξηρής πυκνότητας ενός συγκεκριμένου εδάφους.*

**Σχήμα 4.1Προσδιορισμός της βέλτιστης υγρασίας συμπύκωσης**

Η διαδικασία κάθε δοκιμής (πρότυπης και τροποποιημένης) για εδαφικό υλικό, πού διέρχεται από κόσκινο N° 4 (4,76 mm) και τα χαρακτηριστικά των απαραίτητων συσκευών, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

**Πίνακας 4.1 Δοκιμή Proctor**

| Τύπος δοκιμής | Διαστάσεις μήτρας | | | Διαστάσεις εμβόλου | | Αριθ. Στρώ-σεων | Αριθμός κτύπων ανά στρώση | Ύψος πτώσης εμβόλου cm | Ενέργεια συμπύ-κνωσης kJ/m$^3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Διάμετρος mm | Ύψος mm | Όγκος cm$^3$ | Διάμετρος mm | Βάρος kg | | | | |
| Πρότυπη Proctor | 101,6 | 116,43 | 945 | 50,8 | 2,50 | 3 | 25 | 30,50 | 596 |
| Τροπο-ποιημένη Proctor | 101,6 | 116,43 | 945 | 50,8 | 4,54 | 5 | 25 | 45,70 | 2682 |

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η περιεκτικότητα του εδάφους σε αδρομερή κλάσματα (χαλίκια) επηρεάζει το αποτέλεσμα της συμπύκνωσης. Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα σε αδρομερή κλάσματα, τόσο περισσότερο μειώνεται η βέλτιστη υγρασία συμπύκνωσης (OMC).
Για το λόγο αυτό, κάθε μια από τις δοκιμές (πρότυπη ή τροποποιημένη), περιλαμβάνει τέσσερις διαφορετικές τεχνικές (μεθόδους) ανάλογα με την κοκκομετρία του εδάφους και χρησιμοποιείται, ανάλογα με την μέθοδο, διαφορετικής διαμέτρου μήτρα.
Τα βασικά χαρακτηριστικά και τα όρια εφαρμογής κάθε δοκιμής και μεθόδου, αντίστοιχα, παρουσιάζονται συνοπτικά στους Πίνακας 4.2 και 4.3.

**Πίνακας 4.2 Πρότυπη δοκιμή PROCTOR**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Μέθοδος | Α | Β | Γ | Δ |
| Διάμετρος μήτρας (mm) | 101,6 | 152,4 | 101,6 | 152,4 |
| Στρώσεις | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Κτύποι | 25 | 56 | 25 | 56 |
| Βάρος δείγματος (kg) | 3,0 | 7,0 | 5,5 | 11,5 |
| **Μέγιστη διάμετρος κόκκου (mm)** | <4,75 | <4,75 | <19,0 | <19,0 |
| | | | | |
| Ποσοστό υλικού που συγκρατείται στο κόσκινο της μέγιστης διαμέτρου | <7% απορρίπτεται | <7% απορρίπτεται | <10% απορρίπτεται | <10% απορρίπτεται |
| | | | >10% αντικα-τάσταση | >10% αντικα-τάσταση |
| Εφαρμοσιμότητα μεθόδου | Εάν το συγκρα-τούμενο στο κόσκινο >7% Μέθοδος Γ | Εάν το συγκρα-τούμενο στο κόσκινο >7% Μέθοδος Δ | Εάν το συγκρατούμενο στο κόσκινο >30% Οι μέθοδοι δεν έχουν εφαρμογή | |

Σε περίπτωση που περισσότερο από 10% του υλικού συγκρατείται στο κόσκινο (19,0mm), τότε το συγκρατούμενο υλικό αντικαθίσταται με την ακόλουθη διαδικασία:

i. κοσκινίζεται επαρκής ποσότητα από το αντιπροσωπευτικό έδαφος με τα κόσκινα 50mm και 19,0mm και απορρίπτεται το χονδρόκοκκο υλικό που συγκρατείται στο κόσκινο 50mm.
ii. Ζυγίζεται το υλικό το διερχόμενο από το κόσκινο 50mm και συγκρατείται στο κόσκινο 19,0mm και αυτό αντικαθίσταται με ένα ίσου βάρους υλικό διερχόμενο από το κόσκινο 19,0mm και συγκρατούμενο στο κόσκινο Νο 4.
Το προς αντικατάσταση υλικό λαμβάνεται από το εναπομείναν μέρος του δείγματος.

**Πίνακας 4.3 Τροποποιημένη δοκιμή PROCTOR**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Μέθοδος | Α | Β | Γ | Δ |
| Διάμετρος μήτρας (mm) | 101,6 | 152,4 | 101,6 | 152,4 |
| Στρώσεις | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Κτύποι | 25 | 56 | 25 | 56 |
| Βάρος δείγματος (kg) | 3,0 | 7,0 | 5,5 | 11,5 |
| **Μέγιστη διάμετρος κόκκου (mm)** | <4,75 | <4,75 | <19,0 | <19,0 |
| | | | | |
| Ποσοστό υλικού που συγκρατείται στο κόσκινο της μέγιστης διαμέτρου | <7% απορρίπτεται | <7% απορρίπτεται | <10% απορρίπτεται | <10% απορρίπτεται |
| | | | >10% αντικα-τάσταση | >10% αντικα-τάσταση |
| Εφαρμοσιμότητα μεθόδου | Εάν το συγκρα-τούμενο στο κόσκινο >7% Μέθοδος Γ | Εάν το συγκρα-τούμενο στο κόσκινο >7% Μέθοδος Δ | Εάν το συγκρατούμενο στο κόσκινο >30% Οι μέθοδοι δεν έχουν εφαρμογή | |

Ας σημειωθεί ότι η χρησιμοποιούμενη μέθοδος καθορίζεται από τις προδιαγραφές του έργου. Αν δεν καθορίζεται μέθοδος, τότε εφαρμόζεται η μέθοδος Α.

Η εδαφική μάζα κατά τη διαδικασία της συμπύκνωσης είναι αρχικά ένα σύστημα αποτελούμενο από έδαφος, υγρασία και αέρα. Κατά τη διάρκεια των πρώτων σταδίων της δοκιμής, υπάρχει αξιόλογη ποσότητα αέρα, αλλά η διαδικασία της συμπύκνωσης σταδιακά οδηγεί σε διαφοροποίηση της κατάστασης, με περισσότερο εδαφικό υλικό και υγρασία να είναι

παρόντα, ενώ η ποσότητα του περιεχόμενου αέρα μειώνεται. Το ποσοστό του περιεχόμενου αέρα των πόρων (air content ή air voids) A, ορίζεται σαν ο λόγος του όγκου του αέρα Va προς τον συνολικό όγκο του εδαφικού δείγματος V, δηλαδή

$$A = \frac{V_a}{V}$$

Αλλά και στην κατάσταση που διαμορφώνεται μετά την συμπύκνωση κάτω από την βέλτιστη υγρασία OMC, υπάρχει σημαντικός αέρας. Αυξανόμενης όμως της υγρασίας (στην υγρή πλευρά της καμπύλης), το αποτέλεσμα είναι η αντικατάσταση όλο και περισσότερου αέρα από νερό. Εάν η διαδικασία ήταν απολύτως αποδοτική, θα ήταν δυνατό να εκλείψει όλος ο αέρας των πόρων και να προκύψει ένα σύστημα δύο φάσεων (μια **κατάσταση μηδενικού αέρα κενών**). Δεδομένου όμως ότι δεν είναι ποτέ δυνατό να απομακρυνθεί όλος ο αέρας των πόρων, γεγονός που θα οδηγούσε σε συνθήκη πλήρους κορεσμού S = 100 %, οποιαδήποτε καμπύλη συμπύκνωσης θα βρίσκεται κάτω από την καμπύλη μηδενικού αέρα κενών (καμπύλη κορεσμού), Σχήμα 4.1.

Για οποιαδήποτε δεδομένη περιεκτικότητα υγρασίας w, το ξηρό μοναδιαίο βάρος $\gamma_{zav}$ *σε συνθήκες μηδενικού αέρα κενών*, υπολογίζεται από τη σχέση

$$\gamma_{zav} = \frac{G_S + \gamma_w}{1 + wG_s}$$

Και ο γεωμετρικός τόπος των σημείων παράγει την καμπύλη ή γραμμή κορεσμού (ελαφρώς κοίλη ανοδική καμπύλη).

Στη γενικότερη περίπτωση που το δείγμα περιέχει και ένα ποσοστό αέρα στους πόρους, τότε το ξηρό μοναδιαίο βάρος προσδιορίζεται από την εξίσωση

$$\gamma_d = \frac{G_S(1 - A)}{1 + wG_s}$$

ενώ το A μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση *A=n (1-Sr)*.

Στο **Error! Reference source not found.** έχει σχεδιαστεί η γραμμή κορεσμού, η καμπύλη που προκύπτει από την πρότυπη αλλά και την τροποποιημένη δοκιμή.

Όπως φαίνεται η καμπύλη που προκύπτει από την τροποποιημένη δοκιμή, είναι μετατοπισμένη προς τα επάνω και αριστερά και για το ίδιο εδαφικό υλικό δείχνει μεγαλύτερη ξηρή πυκνότητα και μικρότερη βέλτιστη υγρασία. Πλησιάζει επίσης περισσότερο προς τη γραμμή κορεσμού. Όλα αυτά είναι συνέπεια της μεγαλύτερης ενέργειας συμπύκνωσης.

*Απαραίτητος εξοπλισμός*

- Μήτρα συμπύκνωσης που συνοδεύεται από τη βάση της και ένα δακτύλιο. Οι μήτρες είναι μεταλλικές, κυλινδρικού σχήματος και έχουν χωρητικότητα και διαστάσεις που δίνονται στον Πίνακα 4.1. Στο επάνω μέρος τους προσαρμόζεται ο πρόσθετος δακτύλιος. Η μήτρα και ο πρόσθετος δακτύλιος είναι έτσι κατασκευασμένοι, ώστε να μπορούν να συνδέονται σταθερά με την ανεξάρτητη πλάκα της βάσης.
- Έμβολο συμπύκνωσης ή Αυτόματη συσκευή συμπύκνωσης η οποία ανυψώνει το πρότυπο βάρος σε προκαθορισμένο ύψος από την στάθμη του εδαφικού δοκιμίου και το αφήνει να πέφτει ελεύθερα. Ρυθμίζεται ο αριθμός των κτύπων και το ύψος πτώσης. Η βάση της συσκευής που συγκρατεί τη μήτρα περιστρέφεται, έτσι ώστε οι κτύποι να κατανέμονται ισομερώς σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου.
- Εξολκέας δείγματος. Κατάλληλη συσκευή για την εξαγωγή από τη μήτρα των συμπυκνωθέντων δοκιμίων.
- Ζυγός ικανότητας τουλάχιστον 10 kg και ακρίβειας έως 5 g και ζυγός ικανότητας τουλάχιστον 1 kg και ακρίβειας έως 0,1 g.
- Ξηραντήριο για την ξήρανση υγρών εδαφικών δειγμάτων, ικανό για τη διατήρηση της θερμοκρασίας σε 110 ± 5°C.
- Χαλύβδινος κανόνας μήκους περίπου 300 mm, που έχει τη μια πλευρά του, λοξά κομμένη.
- Κόσκινα διαμέτρου 19 mm και 4,75 mm (No 4).
- Εργαλεία ανάμειξης, ή κατάλληλη συσκευή για την καλή ανάμιξη του εδαφικού δείγματος με τη προστιθέμενη υγρασία.

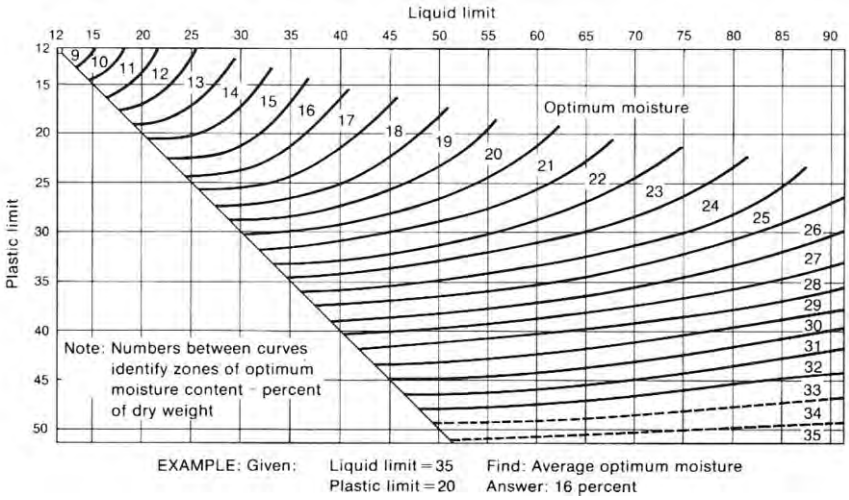
*Διαδικασία*

Στη συγκεκριμένη εργαστηριακή άσκηση θα πραγματοποιηθεί η πρότυπη δοκιμή Proctor (*Μέθοδος Α*) για εδαφικό δείγμα που διέρχεται από το κόσκινο Νο 4 (διάμετρος οπής 4,75 mm). Θα χρησιμοποιηθεί η μήτρα με διάμετρο 101,6 mm, ύψος 116,43 mm και έμβολο διαμέτρου 50,8 mm και βάρους 2,5 kg. Το έδαφος θα συμπυκνωθεί σε 3 στρώσεις με 25 κτύπους ανά στρώση και το ύψος πτώσης του εμβόλου θα είναι 30,50 cm.

*Μέθοδος Α*

1. Εάν το δείγμα του εδάφους είναι υγρό, ξηραίνεται στον αέρα ή σε συσκευή ξήρανσης με θερμοκρασία που δεν υπερβαίνει τους 60$^{o}$C. Στη συνέχεια, τα συσσωματώματα του εδάφους θραύονται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται η ελάττωση του φυσικού μεγέθους των κόκκων του.
2. Κοσκινίζεται επαρκής ποσότητα αντιπροσωπευτικού δείγματος με το κόσκινο Νο. 4 (4,75 mm). Το χονδρόκοκκο υλικό που συγκρατείται απορρίπτεται. Αν το ποσοστό του συγκρατούμενου εδάφους είναι περισσότερο από το 7% του συνολικού δείγματος, συνιστάται η χρησιμοποίηση της Μεθόδου Γ (Βλέπε Πίνακας 4.2).
3. Από το έδαφος που προκύπτει, λαμβάνεται αντιπροσωπευτικό δείγμα, βάρους περίπου 3 kg ή και περισσότερο, το οποίο αναμιγνύεται καλά με επαρκή ποσότητα νερού, έτσι ώστε να αποκτήσει υγρασία κατά 4 περίπου ποσοστιαίες μονάδες κάτω από την εκτιμώμενη βέλτιστη υγρασία (OMC).

   Ο καθορισμός της κατά προσέγγιση υγρασίας αφετηρίας (OMC - 4 %), θα γίνει με βάση το Σχήμα 4.2. Το διάγραμμα αυτό υποδεικνύει τη βέλτιστη υγρασία OMC ±2 % εάν οι τιμές του ορίου υδαρότητας και πλαστικότητας του εδάφους είναι γνωστές.




**Σχήμα 4.2 Διάγραμμα για τον κατά προσέγγιση προσδιορισμό της βέλτιστης περιεκτικότητας σε υγρασία (OMC) ενός εδάφους χρησιμοποιώντας την πρότυπη δοκιμή συμπύκνωσης**

4. Το έδαφος συμπυκνώνεται μέσα στη επιλεγμένη μήτρα σε τρεις (3) ίσες στρώσεις για την παρασκευή συμπυκνωμένου υλικού συνολικού πάχους 127 mm. Κάθε στρώση συμπυκνώνεται με 25 ομοιόμορφα κατανεμημένες πτώσεις του εμβόλου.
5. Μετά τη συμπύκνωση, απομακρύνεται ο δακτύλιος από τη μήτρα, αφαιρείται προσεκτικά το συμπυκνωμένο έδαφος μέχρι τα χείλη της μήτρας, με την ακμή του χαλύβδινου κανόνα και η μήτρα μαζί με το εδαφικό υλικό, ζυγίζεται. Το υγρό μοναδιαίο βάρος του εδάφους υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\gamma_b = \frac{\beta\acute{\alpha}\rho o\varsigma\ \mu\acute{\eta}\tau\rho\alpha\varsigma\ \mu\varepsilon\ \varepsilon\delta\alpha\varphi\iota\kappa\acute{o}\ \upsilon\lambda\iota\kappa\acute{o} - \beta\acute{\alpha}\rho o\varsigma\ \mu\acute{\eta}\tau\rho\alpha\varsigma}{\acute{o}\gamma\kappa o\varsigma\ \mu\acute{\eta}\tau\rho\alpha\varsigma}$$

6. Εξάγεται το δοκίμιο από τη μήτρα και διαιρείται ως προς ένα επίπεδο που διέρχεται από τον άξονα του. Λαμβάνεται αντιπροσωπευτικό δείγμα του υλικού από μια από τις δύο επιφάνειες της τομής. Ζυγίζεται και ξηραίνεται σε θερμοκρασία 110 ± 5 °C μέχρι σταθερού βάρους για τον προσδιορισμό της περιεχόμενης υγρασίας. Το βάρος του υγρού δείγματος που λαμβάνεται δεν πρέπει να είναι μικρότερο από 100 g.

7. Το υπόλοιπο εδαφικό υλικό θραύεται μέχρι που να διέρχεται από το κόσκινο Νο 4. Προστίθεται νερό σε επαρκή ποσότητα ώστε η υγρασία του εδάφους να αυξηθεί κατά μία ή δύο ποσοστιαίες μονάδες σε σχέση με την προηγούμενη υγρασία του και η διαδικασία της συμπύκνωσης επαναλαμβάνεται.
8. Στη συνέχεια, προσθέτοντας ποσοστά υγρασίας διαδοχικά αυξανόμενα κατά 2%, προκύπτουν τα σημεία που θα καθορίσουν την καμπύλη ξηρού μοναδιαίου βάρους (ή ξηρής πυκνότητας) σε σχέση με την υγρασία (**Error! Reference source not found.**). Το τελευταίο σημείο πρέπει να είναι περίπου 4 έως 5 % στην υγρή πλευρά (δεξιά της αιχμής) της καμπύλης.

*Υπολογισμοί*

1. Για κάθε δοκιμή συμπύκνωσης προσδιορίζονται το υγρό μοναδιαίο βάρος $\gamma_\upsilon$ και η αντίστοιχη υγρασία w του δείγματος. Στη συνέχεια εκτιμάται το αντίστοιχο ξηρό μοναδιαίο βάρος $\gamma_d$ με βάση τη σχέση:
$$\gamma_d = \frac{\gamma_b}{1+w}$$
2. Τα ζεύγη των παραπάνω τιμών αποτυπώνονται σε διάγραμμα με τις υγρασίες ως τετμημένες και τις ξηρές πυκνότητες ως τεταγμένες (**Error! Reference source not found.**). Ορίζονται έτσι σημεία τα οποία όταν συνδεθούν διαδοχικά, δημιουργούν μία καμπύλη κωδωνοειδούς μορφής. Η υγρασία η οποία αντιστοιχεί στο ανώτατο σημείο της καμπύλης ορίζεται ως η “βέλτιστη υγρασία” του εδάφους για τη συμπύκνωση, ενώ η αντίστοιχη πυκνότητα ονομάζεται "μέγιστη ξηρή πυκνότητα".
3. Στο διάγραμμα της ξηρής πυκνότητας συναρτήσει της περιεκτικότητας σε υγρασία, σχεδιάστε και την καμπύλη μηδενικού αέρα κενών (καμπύλη κορεσμού).
4. Με βάση την τιμή του ειδικού βάρους των κόκκων Gs, υπολογίστε το λόγο κενών του εδάφους για κάθε σημείο δοκιμής. Σχεδιάστε ξανά την καμπύλη συμπύκνωσης, χρησιμοποιώντας το λόγο κενών e στον άξονα των τεταγμένων (στην δεξιά πλευρά) του διαγράμματος ως προς την περιεχόμενη υγρασία και σχολιάστε ποια καμπύλη αποδίδει το καλύτερο αποτέλεσμα.

## 5. Δοκιμή θλίψης

Γενικά

Ένα κυβικό δοκίμιο χώματος διαστάσεων 15X15X15 (cmXcmXcm), θα υποβληθεί σε θλίψη μέχρι τη θραύση του. Σκοπός της δοκιμής θλίψης είναι να κατασκευαστεί το διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων του χώματος σε θλίψη και από το διάγραμμα αυτό να προσδιοριστούν οι μηχανικές ιδιότητές του όπως το μέτρο ελαστικότητας Ε , το όριο διαρροής και θραύσης.

Θεωρητικό υπόβαθρο

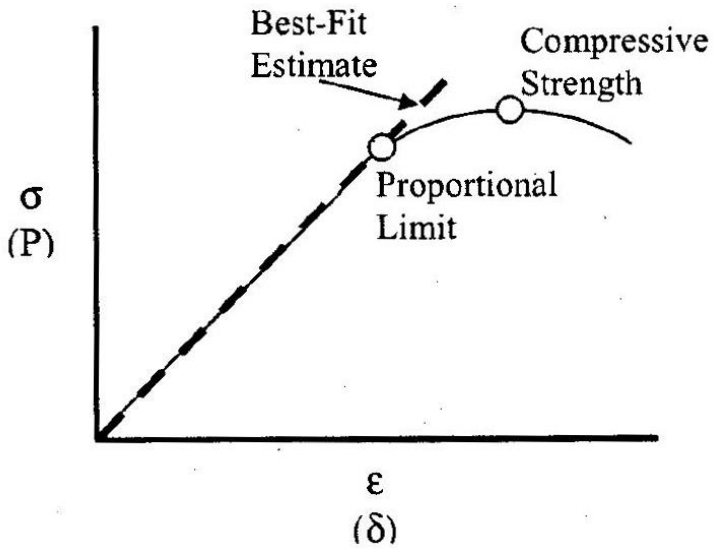
*Θλιπτική καταπόνηση*

Στην απλή θλίψη τα φορτία που επιβάλλονται στα σώματα είναι αντίθετης φοράς από αυτή του εφελκυσμού και προκαλούν σ' αυτά βράχυνση της διάστασής τους κατά την οποία ενεργούν και αντίστοιχα αύξηση της εγκάρσιας διάστασής τους. Στην καθημερινή τακτική πολλά είναι τα παραδείγματα όπου τμήματα κατασκευών ή μέλη μηχανών υπόκεινται σε θλιπτικά φορτία. Για τη μελέτη της αντοχής των υλικών σε θλιπτικές καταπονήσεις, με τη δοκιμή θλίψης, κατασκευάζουμε (όπως και στον εφελκυσμό) το διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων χρησιμοποιώντας τυποποιημένα (σύμφωνα με τους κανονισμούς) κυλινδρικά ή κυβικά δοκίμια. Η δοκιμή αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία για τα ψαθυρά υλικά (π.χ. τα οικοδομικά υλικά όπως χώμα, σκυρόδεμα, πέτρες, μάρμαρα , ξύλο κλπ.) τα οποία καταπονούνται συνηθέστερα απ ' ότι τα όλκιμα υλικά (π.χ. χάλυβας, αλουμίνιο κ.α.), σε θλιπτικά φορτία, γιατί προσφέρεται για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων τους επειδή τα υλικά αυτά παρουσιάζουν μικρές παραμορφώσεις στον εφελκυσμό.

Οι θλιπτικές τάσεις $\sigma_c$ προκαλούν μια βράχυνση δ των δοκιμίων στην οποία αντιστοιχεί μια θλιπτική παραμόρφωση $\varepsilon_c$, η οποία μετρά την ένταση της παραμόρφωσης ( ανά μονάδα μήκους ). Συνεπώς $\varepsilon_c = \delta/v = \Delta h/h_0 = (h - h_0)/h_0$ όπου δ = Δh = h · $h_0$ το αρχικό ύψος του δοκιμίου και h το ύψος του δοκιμίου κατά τη φόρτιση για την οποία θα υπολογιστούν οι αντίστοιχες θλιπτικές τάσεις. Η σχέση εντούτοις ανάμεσα στα δύο αυτά μεγέθη για την περιοχή των ελαστικών παραμορφώσεων, είναι ακριβώς η ίδια όπως και στην περίπτωση που θα εφαρμόζονταν στο υλικό εφελκυστικές τάσεις, δηλαδή ισχύει:

$$\sigma_c/\varepsilon_c = E$$

Η καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων διέρχεται έτσι από την αρχή των συντεταγμένων του διαγράμματος σ-ε ως ευθεία γραμμή (Σχήμα 5.1). Το θλιπτικό όριο ελαστικότητας βρίσκεται, ως απόλυτη τιμή, πολύ κοντά στο αντίστοιχο εφελκυστικό όριο. Αντίθετα το θλιπτικό όριο διαρροής, ως απόλυτο μέγεθος, λαμβάνει (κυρίως στα υλικά που μας ενδιαφέρουν εδώ, δηλαδή τα ψαθυρά υλικά) μια σημαντικά ψηλότερη τιμή σε σχέση με το αντίστοιχο εφελκυστικό όριο διαρροής. Για παράδειγμα το όριο διαρροής σε θλίψη είναι δέκα φορές μεγαλύτερο από το αντίστοιχο σε εφελκυσμό.
Η θραύση των ψαθυρών υλικών σε θλίψη λαμβάνει χώρα κατά τη διεύθυνση της μέγιστης διατμητικής τάσης, επειδή ακριβώς τα ψαθυρά υλικά παρουσιάζουν μειωμένη αντοχή σε διατμητικές τάσεις σε σύγκριση με τις ορθές θλιπτικές τάσεις (οι οποίες τείνουν περισσότερο να κλείσουν παρά να επεκτείνουν τις περιοχές ανωμαλιών και τις μικρορωγμές στο εσωτερικό του υλικού απ' όπου και ξεκινά η θραύση). Στα ψαθυρά υλικά επέρχεται αστοχία (δημιουργία ρωγμής και θραύση) αμέσως μετά την είσοδο του υλικού στη διαρροή έτσι ώστε να καθίσταται αδύνατη η διάκριση ανάμεσα στο όριο διαρροής και στο όριο θραύσης, οποία και θεωρούμε ότι ταυτίζονται.




**Σχήμα 5.1 Τυπικό διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων σκυροδέματος**

*Μηχανές δοκιμών θλίψης, δοκίμια*

Για τις δοκιμές θλίψης χρησιμοποιούμε διάφορους τύπους πρέσας, όπως η αυτόματη σερβο-υδραυλική μηχανή, του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Μηχανικής. Η ικανότητα φορτίου της μηχανής αυτής είναι 2000 kN και

αποτελείται από δύο κύριες μονάδες. Η μία μονάδα είναι η μονάδα ελέγχου του σερβομηχανισμού όπου γίνεται και ο πλήρης έλεγχός της μέσω Η/Υ και η εισαγωγή των δεδομένων των δοκιμίων και στη συνέχεια γίνεται on-line απεικόνιση του πειράματος της θλίψης ενώ στο τέλος του πειράματος γίνεται επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Η δεύτερη μονάδα αποτελεί τη μονάδα εφαρμογής του φορτίου όπου υπάρχει ο υδραυλικός μηχανισμός που μετακινεί δύο παράλληλες μεταξύ των πλάκες που είναι κατασκευασμένες από ειδικό χάλυβα μεγάλης αντοχής και στην επιφάνεια των οποίων τοποθετούνται τα δοκίμια και στη συνέχεια θλίβονται. Οι πλάκες ανάμεσα στις οποίες συνθλίβεται το δοκίμιο πρέπει να είναι επίπεδες, καλά λειασμένες και να έχουν κατασκευαστεί από σκληρότερο υλικό σε σχέση με το υλικό των δοκιμαζόμενων δοκιμίων, ώστε να αποκλείεται η πλαστική παραμόρφωση τους. Επίσης πρέπει να εξασφαλίζεται η παραλληλότητα των πλακών αυτών φόρτισης .

Η τοποθέτηση των δοκιμίων πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται απολύτως αξονική φόρτιση. Όμως στην δοκιμή θλίψης είναι πρακτικά αδύνατο να διασφαλιστεί η απόλυτη μονοαξονική καταπόνηση του δοκιμίου εφόσον οι δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται στις επιφάνειες του δοκιμίου που εφάπτονται με τις πλάκες φόρτισης δημιουργούν στην πραγματικότητα μια τριαξονική εντατική κατάσταση. Αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος είναι να επηρεάζουν σημαντικά η μορφή και οι διαστάσεις του δοκιμίου (δηλαδή στην πραγματικότητα όχι μόνο ο λόγος ύψους/εγκάρσιας διατομής, αλλά και οι απόλυτες τιμές των διαστάσεων) τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης. Έχει λοιπόν παρατηρηθεί ότι η αντοχή σε θλίψη ενός κυλινδρικού δοκιμίου είναι ψηλότερη από την αντοχή σε θλίψη ενός κυβικού ή πρισματικού δοκιμίου. Παράλληλα, η αντοχή μειώνεται καθώς αυξάνει το ύψος του δοκιμίου. Είναι, λοιπόν, εξαιρετικά κρίσιμο να ακολουθούνται οι προδιαγραφές κατά την εκτέλεση των δοκιμών θλίψης ώστε να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα διαφορετικών δοκιμών.

Για τον υπολογισμό των πραγματικών τάσεων και των παραμορφώσεων σε δοκιμές θλίψης πρέπει να λάβουμε υπόψη και τη μεταβολή της εγκάρσιας διατομής του δοκιμίου Α με την αύξηση των παραμορφώσεων, ιδιαίτερα στην περίπτωση των σημαντικά παραμορφούμενων (όλκιμων) υλικών. Για το σκοπό αυτό ξεκινάμε από την παραδοχή ότι ο όγκος του δοκιμίου διατηρείται σταθερός παρά τη διαδικασία παραμόρφωσης (αρχή ισόογκης μεταβολής). Ισχύει δηλαδή $A_0 \cdot h_0 = A \cdot h$ όπου $A$ το εμβαδόν της διατομής και $h$ το ύψος του δοκιμίου (ο δείκτης $_0$ υποδηλώνει τις αρχικές τιμές των μεγεθών). Έχουμε τότε για το φορτίο (το οποίο μετράμε κατά τη διάρκεια του πειράματος):

$$P = \sigma_c \cdot A = \sigma_c \cdot A_0 \cdot h_0/h$$

Επειδή όμως $(h - h_0) = -e$ και συνεπώς $h_0/h = 1/(1-e)$ έχουμε:

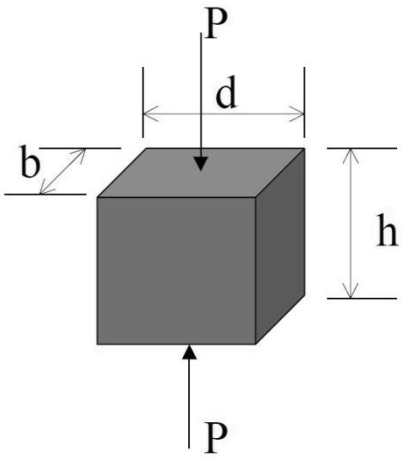
$$P = \sigma_c \cdot A_0/(1-e)\ \sigma_c = P(1-e)/A_0$$

Μετρώντας λοιπό την τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου P και την αντίστοιχη
βράχυνση $\delta = \Delta h = h - h_0$ του δοκιμίου υπολογίζουμε την πραγματική τάση $\sigma_c = P/A$ (Σχήμα 5.2).

**<u>Στο συγκεκριμένο όμως πείραμα θλίψης δεν θα χρησιμοποιήσουμε τις πραγματικές τάσεις και παραμορφώσεις</u>** αλλά τις τάσεις υπολογισμού που
προκύπτουν από την $\sigma_c = P/A_0$ δηλαδή στον παρανομαστή θα θεωρούμε το αρχικό εμβαδόν της διατομής του δοκιμίου.

Από το βάρος του δοκιμίου του σκυροδέματος B και τα γεωμετρικά του στοιχεία προσδιορίζεται η φαινομενική πυκνότητα του ελεγχόμενου σκυροδέματος ως:

$$\rho = B(gr)/A \cdot h(cm^3)$$




**Σχήμα 5.2 Δοκίμιο**

*<u>Δοκιμή θλίψης</u>*

Για το δοκίμιο αυτό με τη δοκιμή θλίψης παράγεται το διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων (Σχήμα 5.1) οπότε και προσδιορίζονται τα ακόλουθα μεγέθη:

1. Η αντοχή σε θλίψη $\sigma_c$ (compressive strength) εκφράζεται σε μονάδες τάσης. Ως αντοχή σε θλίψη ορίζεται το πηλίκο του μέγιστου φορτίου $P_m$. το οποίο δέχεται το δοκίμιο μήκους $h_0$ όταν θλίβεται προς την αρχική εγκάρσια διατομή $A_0$. ($\sigma=P_m/A_0$). (Σχήμα 5.1).
2. Όριο αναλογίας $\sigma_A$ (proportional limit) είναι η μέγιστη τάση για την οποία το υλικό μετά την αφαίρεση του φορτίου δεν παρουσιάζει παραμένουσα παραμόρφωση και για την οποία ισχύει ο νόμος της αναλογίας τάσεων - παραμορφώσεων του Hooke.
3. Μέτρο ελαστικότητας E (modulus of elasticity) είναι ο λόγος της τάσης προς την παραμόρφωση πριν από το όριο αναλογίας. Επίσης, ως μέτρο ελαστικότητας ορίζεται ο συντελεστής αναλογίας που συνδέει την τάση με την παραμόρφωση στο νόμο του Hooke, $\sigma = E\varepsilon$ και εκφράζεται σε μονάδες τάσης.

Σημειώνεται ότι το διάγραμμα φόρτισης - βράχυνσης (P-δ), (**όπου η βράχυνση δ=Δh**)ή τάσεων - παραμορφώσεων (σ - ε) αντίστοιχα μπορεί να μην περιλαμβάνει ένα αρχικά ευθύγραμμο τμήμα. Στην περίπτωση αυτή για τον προσδιορισμό του *Μέτρου Ελαστικότητας E*, χρειάζεται να προσεγγίσουμε την καμπύλη με μία ευθεία γραμμή εφαπτομενική στην καμπύλη (Σχήμα 5.1, Best-Fit Estimate). Έτσι μπορεί να προκύψει ότι η γραμμή αυτή τέμνει τον οριζόντια άξονα στα αριστερά της καμπύλης. Σ' αυτή την περίπτωση το σημείο αρχής μπορεί να επιλεγεί ως το σημείου όπου η εφαπτομενική γραμμή τέμνει τον οριζόντιο άξονα.
Για τον υπολογισμό της διαφοράς μήκους του δοκιμίου (βράχυνση) χρησιμοποιείται ένας αισθητήρας μετατόπισης (displacement transducer) το οποίο είναι όργανο για τη μέτρηση της γραφικής παραμόρφωσης – βράχυνσης που υφίσταται το υλικό κατά τη δοκιμή θλίψης. Το όργανο αυτό που αποτελείται από μια μεταλλική ράβδο προσαρμόζεται σταθερά κατά την διεύθυνση του μήκους του επάνω στην πρέσα ενώ ακουμπάει η άκρη του στη κινητή επιφάνεια βάση της πλάκας που εδράζεται το δοκίμιο και συνδέεται μέσω καλωδίου με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή.
Η καταγραφή της βράχυνσης του δοκιμίου μέσω του αισθητήρα μετατόπισης γίνεται με ηλεκτρονικό τρόπο μέσω κατάλληλου συστήματος data logging και ενίσχυσης του σήματος τύπου SPIDER 8 της HBM. Μετά την ενίσχυση του σήματος γίνεται on-line καταγραφή της βράχυνσης του δοκιμίου σε συνάρτηση του χρόνου σε Η/Υ του Εργαστηρίου.
Αρχικά μετρούνται τα γεωμετρικά στοιχεία του δοκιμίου καθώς και το βάρος του. Στη συνέχεια το δοκίμιο θα τοποθετηθεί στην πρέσα έτσι ώστε ο άξονάς του να συμπίπτει με τον άξονα φόρτισης της μηχανής, η

λειτουργία της οποίας ρυθμίζεται από αντίστοιχο πρόγραμμα Η/Υ και στο οποίο πρόγραμμα πλοήγησης της μηχανής δίνονται οι κατάλληλες ρυθμίσεις φόρτισης (ένταση και ταχύτητα φόρτισης κλπ).

*Αποτελέσματα πειράματος*

Για το κυβικό δοκίμιο του σκυροδέματος γίνεται και έλεγχος της αντοχής του μέχρι την αστοχία και την καταστροφή μέσω της δοκιμής θλίψης.
Από την δοκιμή θλίψης συλλέγονται τα δεδομένα για τη σχεδίαση του διαγράμματος τάσεων - παραμορφώσεων.
Έτσι:

1. Μετρούνται οι διαστάσεις του δοκιμίου.
2. Ζυγίζεται το δοκίμιο ώστε να υπολογισθεί το φαινόμενο βάρος του.
3. Τοποθετείται ο αισθητήρας μετατόπισης σύμφωνα με τις προδιαγραφές.
4. Τοποθετείται το δοκίμιο στην κάτω πλάκα της μηχανής.
5. Ξεκινάει κατάλληλα η μηχανή.
6. Διαδοχικά καταγράφεται σε Η/Υ η μεταβολή του φορτίου θλίψης και η βράχυνση δ.
7. Μετά το τέλος του πειράματος και αφού σταματήσει η μηχανή με κατάλληλο χειρισμό του Η/Υ που ελέγχει το πείραμα αποθηκεύονται στον σκληρό δίσκο σε αρχείο μορφής EXCEL. Στην πρώτη στήλη καταγράφεται η δύναμη θλίψης που εξασκείται σε Ν, στη δεύτερη στήλη καταγράφεται η βράχυνση δ σε mm (πολλαπλασιασμένη επί 100).
8. Υπολογίζουμε την τιμή της τάσης σ συναρτήσει της παραμόρφωσης ε, λαμβάνοντας βεβαίως υπόψη ότι η τάση σ = P/A και παραμόρφωση ε=δ/L

# Παράρτημα Β

Τα δεδομένα των πειραμάτων

## Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης

| ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ | | | |
|---|---|---|---|
| **Δείγμα** | **Χώμα 100%** | | |
| Ημερομηνία | 15/3/2013 | | |
| Βάρος Δείγματος (g) | 384,72 | | |
| **Διάμετρος κοσκίνου (mm)** | **Συγκρατούμενο δείγμα (g)** | **Συγκρατούμενο ποσοστό (%)** | **Διερχόμενο ποσοστό (%)** |
| 2 | 5,00 | 1,30 | 97,94 |
| 1 | 23,00 | 5,98 | 91,97 |
| 0,5 | 23,30 | 6,06 | 85,91 |
| 0,25 | 31,50 | 8,19 | 77,72 |
| 0,125 | 47,50 | 12,35 | 65,37 |
| 0,063 | 51,20 | 13,31 | 52,07 |
| 0,009 | 89,15 | 23,17 | 28,89 |
| 0,002 | 83,12 | 21,61 | 7,29 |
| 0,00001 | 28,04 | 7,29 | 0,00 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | 381,81 | 99,24 | |

**Πίνακας 4 Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης χώματος 100%**

| ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ | | | |
|---|---|---|---|
| **Δείγμα** | **Άμμος** | | |
| Ημερομηνία | 15/3/2013 | | |
| Βάρος Δείγματος (g) | 239,30 | | |
| **Διάμετρος κοσκίνου (mm)** | **Συγκρατούμενο δείγμα (g)** | **Συγκρατούμενο ποσοστό (%)** | **Διερχόμενο ποσοστό (%)** |
| 2 | 14,70 | 6,14 | 93,73 |
| 1 | 19,80 | 8,27 | 85,46 |
| 0,5 | 30,20 | 12,62 | 72,84 |
| 0,25 | 53,90 | 22,52 | 50,31 |
| 0,125 | 113,90 | 47,60 | 2,72 |
| 0,063 | 5,20 | 2,17 | 0,54 |
| 0,009 | 1,30 | 0,54 | 0,00 |
| 0,002 | | 0,00 | 0,00 |
| 0,00001 | | 0,00 | 0,00 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | 239,00 | 99,87 | |

**Πίνακας 5 Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης Άμμου**

| ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Δείγμα** | **Χώμα 80%** | **Άμμος 20%** | | | |
| Βάρος Δείγματος (g) | 307,78 | 47,86 | | | |
| Συνολικό Βάρος (g) | 355,64 | | | | |
| | Χώμα 80% | Άμμος 20% | Συνολικό Δείγμα | | |
| **Διάμετρος κοσκίνου (mm)** | **Συγκρατούμενο δείγμα (g)** | **Συγκρατούμενο δείγμα (g)** | **Συγκρατούμενο δείγμα (g)** | **Συγκρατούμενο ποσοστό (%)** | **Διερχόμενο ποσοστό (%)** |
| 2 | 4,00 | 2,94 | 6,94 | 1,95 | 97,38 |
| 1 | 18,40 | 3,96 | 22,36 | 6,29 | 91,09 |
| 0,5 | 18,64 | 6,04 | 24,68 | 6,94 | 84,15 |
| 0,25 | 25,20 | 10,78 | 35,98 | 10,12 | 74,03 |
| 0,125 | 38,00 | 22,78 | 60,78 | 17,09 | 56,94 |
| 0,063 | 40,96 | 1,04 | 42,00 | 11,81 | 45,13 |
| 0,009 | 71,32 | 0,26 | 71,58 | 20,13 | 25,01 |
| 0,002 | 66,50 | 0,00 | 66,50 | 18,70 | 6,31 |
| 0,00001 | 22,43 | 0,00 | 22,43 | 6,31 | 0,00 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | 305,45 | 47,80 | 353,25 | 99,33 | |

**Πίνακας 6 Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης χώματος 80%**

| ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Δείγμα** | **Χώμα 60%** | **Άμμος 40%** | | | |
| Βάρος Δείγματος (g) | 230,83 | 95,72 | | | |
| Συνολικό Βάρος (g) | 326,55 | | | | |
| | Χώμα 60% | Άμμου 40% | Συνολικό Δείγμα | | |
| **Διάμετρος κοσκίνου (mm)** | **Συγκρατούμενο δείγμα (g)** | **Συγκρατούμενο δείγμα (g)** | **Συγκρατούμενο δείγμα (g)** | **Συγκρατούμενο ποσοστό (%)** | **Διερχόμενο ποσοστό (%)** |
| 2 | 3,00 | 5,88 | 8,88 | 2,72 | 96,71 |
| 1 | 13,80 | 7,92 | 21,72 | 6,65 | 90,06 |
| 0,5 | 13,98 | 12,08 | 26,06 | 7,98 | 82,08 |
| 0,25 | 18,90 | 21,56 | 40,46 | 12,39 | 69,69 |
| 0,125 | 28,50 | 45,56 | 74,06 | 22,68 | 47,01 |
| 0,063 | 30,72 | 2,08 | 32,80 | 10,04 | 36,96 |
| 0,009 | 53,49 | 0,52 | 54,01 | 16,54 | 20,42 |
| 0,002 | 49,87 | 0,00 | 49,87 | 15,27 | 5,15 |
| 0,00001 | 16,82 | 0,00 | 16,82 | 5,15 | 0,00 |
| ΑΘΡΟΙΣΜΑ | 229,09 | 95,60 | 324,69 | 99,43 | |

**Πίνακας 7 Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης χώματος 60%**

## Όρια Atterberg για τα δείγματα με 80% και 60% χώμα

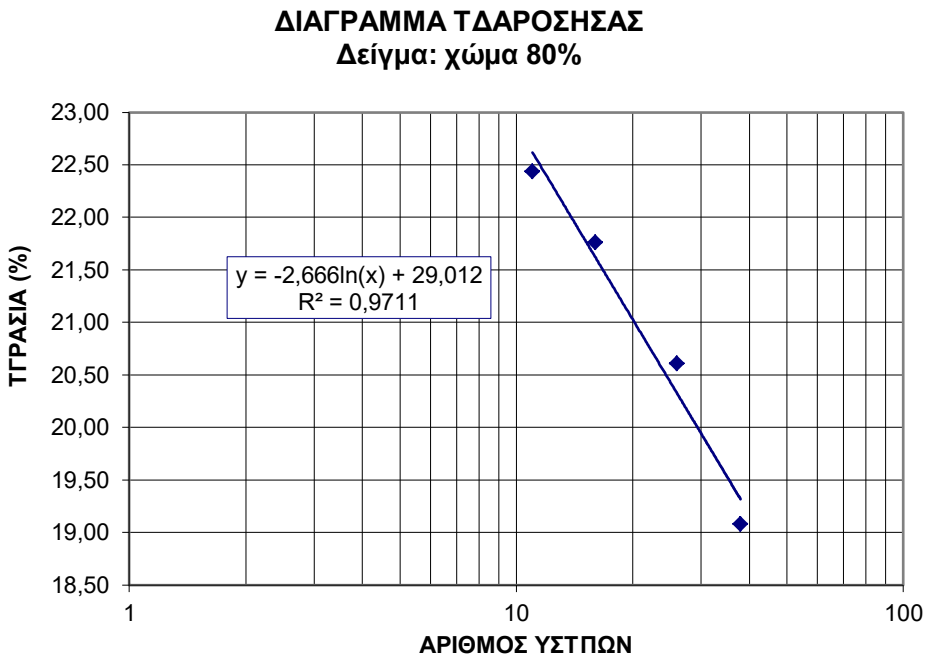
Πίνακες και διαγράμματα υδαρότητας

**ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΟΥ ΥΔΑΡΟΤΗΤΑΣ (Casagrande test)**

**Δείγμα: Χώμα 80%**

| Αριθμός δοκιμίου | Αριθμός Χτύπων | Βάρος υποδοχέα (g) | Βάρος υποδοχέα με υγρό δείγμα (g) | Βάρος υποδοχέα με ξηρό δείγμα (g) | Βάρος υγρού δείγματος (g) | Βάρος ξηρού δείγματος (g) | Απώλεια υγρασίας (g) | Ποσοστό υγρασίας επί ξηρού δείγματος (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 38 | 42,22 | 46,09 | 45,47 | 3,87 | 3,25 | 0,62 | 19,08 |
| 2 | 26 | 43,1 | 48,66 | 47,71 | 5,56 | 4,61 | 0,95 | 20,61 |
| 3 | 16 | 41,67 | 50,12 | 48,61 | 8,45 | 6,94 | 1,51 | 21,76 |
| 4 | 11 | 42,52 | 52,67 | 50,81 | 10,15 | 8,29 | 1,86 | 22,44 |

**Πίνακας 8 Προσδιορισμός ορίου υδαρότητας για το Χώμα 80% (Casagrande test)**

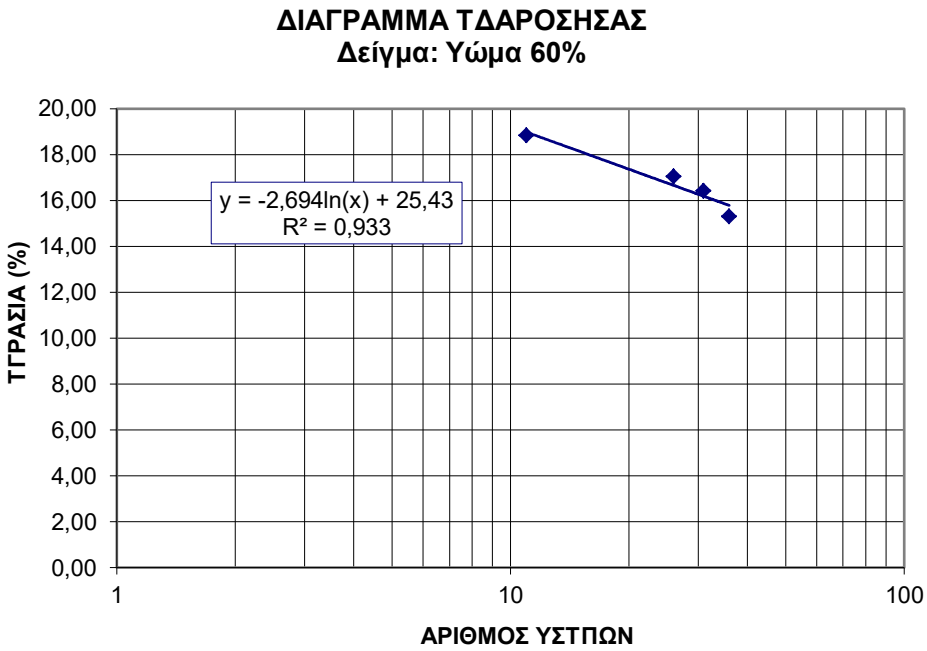



**Διάγραμμα 14 Προσδιορισμός εξίσωση υδαρότητας για το Χώμα 80%**

**ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΟΥ ΥΔΑΡΟΤΗΤΑΣ (Casagrande test)**
**Δείγμα: Χώμα 60%**

| Αριθμός δοκιμίου | Αριθμός Χτύπων | Βάρος υποδοχέα (g) | Βάρος υποδοχέα με υγρό δείγμα (g) | Βάρος υποδοχέα με ξηρό δείγμα (g) | Βάρος υγρού δείγματος (g) | Βάρος ξηρού δείγματος (g) | Απώλεια υγρασίας (g) | Ποσοστό υγρασίας επί ξηρού δείγματος (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 36 | 44,32 | 50,65 | 49,81 | 6,33 | 5,49 | 0,84 | 15,30 |
| 2 | 31 | 44,06 | 50,66 | 49,73 | 6,6 | 5,67 | 0,93 | 16,40 |
| 3 | 26 | 40,21 | 52,92 | 51,07 | 12,71 | 10,86 | 1,85 | 17,03 |
| 4 | 11 | 40,27 | 50,68 | 49,03 | 10,41 | 8,76 | 1,65 | 18,84 |

**Πίνακας 9 Προσδιορισμός ορίου υδαρότητας για το Χώμα 60% (Casagrande test)**




**Διάγραμμα 15 Προσδιορισμός εξίσωσης υδαρότητας για το Χωμα 60%**

## Πίνακες πλαστικότητας

**ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΟΥ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ**

**Δείγμα: Χώμα 80%**

| Αριθμός δοκιμίου | Βάρος υποδοχέα (g) | Βάρος υποδοχέα με υγρό δείγμα (g) | Βάρος υποδοχέα με ξηρό δείγμα (g) | Βάρος υγρού δείγματος (g) | Βάρος ξηρού δείγματος (g) | Απώλεια υγρασίας (g) | Ποσοστό υγρασίας επί ξηρού δείγματος (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 41,56 | 42,55 | 42,47 | 0,99 | 0,91 | 0,08 | 8,79 |
| 2 | 42,59 | 43,80 | 43,73 | 1,21 | 1,14 | 0,07 | 6,14 |
| 3 | 40,21 | 41,42 | 41,34 | 1,21 | 1,13 | 0,08 | 7,08 |

**Πίνακας 10 Προσδιορισμός ορίου πλαστικότητας για το Χώμα 80%**

**ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΟΥ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ**

Δείγμα: Χώμα 60%

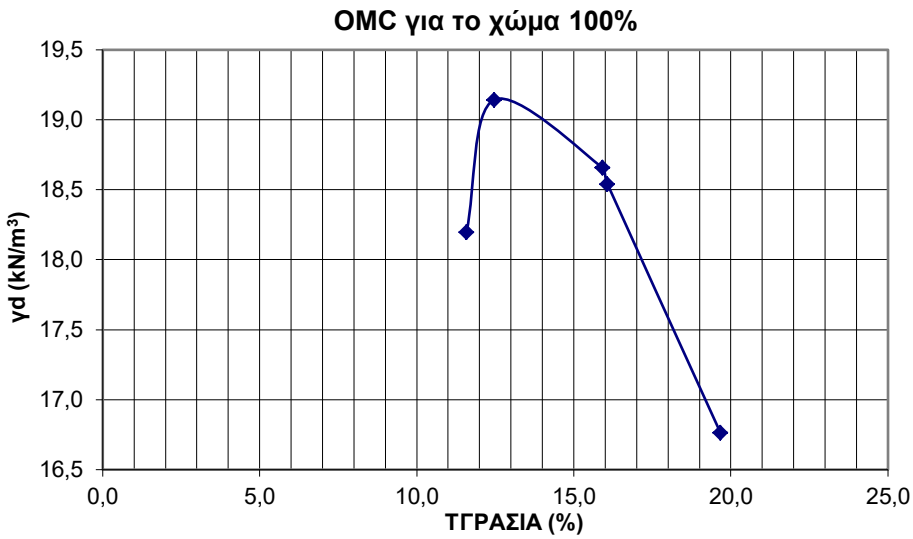
| Αριθμός δοκιμίου | Βάρος υποδοχέα (g) | Βάρος υποδοχέα με υγρό δείγμα (g) | Βάρος υποδοχέα με ξηρό δείγμα (g) | Βάρος υγρού δείγματος (g) | Βάρος ξηρού δείγματος (g) | Απώλεια υγρασίας (g) | Ποσοστό υγρασίας επί ξηρού δείγματος (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 41,34 | 42,73 | 42,59 | 1,39 | 1,25 | 0,14 | 11,20 |
| 2 | 47,39 | 48,47 | 48,37 | 1,08 | 0,98 | 0,1 | 10,20 |
| 3 | 46,83 | 47,90 | 47,8 | 1,07 | 0,97 | 0,1 | 10,31 |

**Πίνακας 11 Προσδιορισμός ορίου πλαστικότητας για το Χώμα 60%**

## Δοκιμή Proctor για το δείγμα με χώμα100%

| | Δείγμα: | Χώμα 100% | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Μέθοδος: | PROCTOR | | | | |
| | Δοκιμή: | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Δοκίμιο | Βάρος μήτρας (g) | 1731,0 | 1929,0 | 1927,0 | 1928 | 1732,0 |
| | Μήκος μήτρας (cm) | 11,7 | 11,7 | 11,7 | 11,65 | 11,7 |
| | Διάμετρος μήτρας (cm) | 10,1 | 10,0 | 10,0 | 10,01 | 10,1 |
| | Όγκος μήτρας ($cm^3$) | 940,8 | 916,8 | 916,8 | 916,82 | 940,8 |
| | Βάρος μήτρας & υλικού (g) | 3678 | 3941 | 3948 | 3939 | 3656 |
| Τρίμματα | Βάρος υποδοχέα | 42,8 | 41,5 | 42,5 | 42,8 | 42,5 |
| | Βάρος υγρού δείγματος & υποδοχέα (g) | 67,0 | 54,7 | 57,1 | 56,23 | 55,4 |
| | Βάρος υγρού δείγματος (g) | 24,2 | 13,2 | 14,6 | 13,43 | 12,9 |
| | Βάρος ξηρού δείγματος & υποδοχέα (g) | 64,5 | 53,2 | 55,1 | 54,37 | 53,3 |
| | Βάρος ξηρού δείγματος (g) | 21,7 | 11,7 | 12,6 | 11,57 | 10,8 |
| | $\gamma_\upsilon$ ($g/cm^3$) | 20,3 | 21,5 | 21,6 | 21,5 | 20,1 |
| Αποτελέσματα | Υγρασία w (%) | 11,6 | 12,5 | 15,9 | 16,1 | 19,7 |
| | $\gamma_d$ (g/cm3) | 18,2 | 19,1 | 18,7 | 18,54 | 16,8 |
| | Σχόλια | 10,0 | 12,0 | 16,0 | 14 | 18,0 |
| | Βέλτιστη υγρασία | OMC = 12.8% | | | | |

**Πίνακας 12 Υπολογισμός του OMC μέσω της δοκιμής Poctor του δείγματος Χώμα 100%**




**Διάγραμμα 16 Καμπύλη της δοκιμής Proctor για τον υπολογισμό του OMC του δείγματος με Χώμα 100%**

## Υπολογισμός γραμμικής συρρίκνωσης

| Πίνακας τιμών για τον Υπολογισμό Γραμμικής Συρρίκνωσης | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Χώμα 100%** | | | **Χώμα 80%** | | | **Χώμα 60%** | | |
| | Δείγμα 1 | Δείγμα 2 | Δείγμα 3 | Δείγμα 1 | Δείγμα 2 | Δείγμα 3 | Δείγμα 1 | Δείγμα 2 | Δείγμα 3 |
| Βάρος Μύτρας (gr) | 550,70 | 550,70 | 550,70 | 550,70 | 550,70 | 550,70 | 550,70 | 550,70 | 550,70 |
| Υγρό δείγμα + Β.Μ. (gr) | 1024,1 | 1019,7 | 1021,5 | 1028,7 | 1029,4 | 1027,0 | 1029,6 | 1027,7 | 1029,4 |
| Υγρό δείγμα (gr) | 473,40 | 469,00 | 470,89 | 478,02 | 478,72 | 476,35 | 478,91 | 477,04 | 478,74 |
| Ξηρό δείγμα (gr) | 408,48 | 404,17 | 405,14 | 420,94 | 419,30 | 420,11 | 418,89 | 419,22 | 417,23 |
| Διαφορά (ΥΔ-ΞΔ) (gr) | 64,92 | 64,83 | 65,75 | 57,08 | 59,42 | 56,24 | 60,02 | 57,82 | 61,51 |
| Υγρασία δείγματο (gr) | 15,89 | 16,04 | 16,23 | 13,56 | 14,17 | 13,39 | 14,33 | 13,79 | 14,74 |
| | | | | | | | | | |
| Αρχική διαστάση(mm) | 20,00 | | | 20,00 | | | 20,00 | | |
| Μέτρηση 1 (mm) | 19,55 | 19,45 | 19,40 | 19,60 | 19,65 | 19,65 | 19,65 | 19,70 | 19,60 |
| Μέτρηση 2 (mm) | 18,55 | 18,45 | 18,40 | 18,60 | 18,70 | 18,70 | 18,70 | 18,75 | 18,65 |
| Μέτρηση 3 (mm) | 18,55 | 18,45 | 18,35 | 18,60 | 18,70 | 18,65 | 18,60 | 18,70 | 18,65 |
| Μέσος Όρος (mm) | 18,45 | | | 18,65 | | | 18,65 | | |
| **Ποσοστο Συρρίκνωσης** | **7,75%** | | | **6,75%** | | | **6,75%** | | |

**Πίνακας 13 Υπολογισμός γραμμικής συρρίκνωσης**

## Υπολογισμός θλιπτικής αντοχής

| Υπολογισμός θλιπτικής αντοχής | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Διαστάσεις δοκιμίων | | | | Δύναμη | Πίεση | | | | |
| Τύπος δοκιμίων | Κωδ. | X (mm) | Ψ (mm) | Z (mm) | (mm2) | F (m/kN) | B (MPa) | Μέση αντοχή | Μεση ατνοχή -10% | Μεση ατνοχή +10% | Θλιπτική αντοχή |
| 80% ΧΩΜΑ | 1,1 | 0,150 | 0,147 | 0,143 | 22050 | 46,6 | 2,1 | 2,8 | 2,52 | 3,08 | **2,7** |
| | 1,2 | 0,147 | 0,146 | 0,142 | 21462 | 63,8 | 3,0 | | | | |
| | 1,3 | 0,148 | 0,148 | 0,145 | 21904 | 43,5 | 2,0 | | | | |
| | 1,4 | 0,146 | 0,147 | 0,147 | 21462 | 66,4 | 3,1 | | | | |
| | 1,5 | 0,148 | 0,148 | 0,142 | 21904 | 57,1 | 2,6 | | | | |
| | 1,6 | 0,147 | 0,149 | 0,141 | 21903 | 55,0 | 2,5 | | | | |
| 60% ΧΩΜΑ | 2,2 | 0,145 | 0,146 | 0,143 | 21170 | 70,1 | 3,3 | 3,0 | 2,67 | 3,27 | **2,9** |
| | 2,3 | 0,146 | 0,147 | 0,144 | 21462 | 69,4 | 3,2 | | | | |
| | 2,5 | 0,145 | 0,147 | 0,144 | 21315 | 56,9 | 2,7 | | | | |
| | 2,6 | 0,146 | 0,148 | 0,143 | 21608 | 58,6 | 2,7 | | | | |
| | 2,7 | 0,147 | 0,147 | 0,143 | 21609 | 70,4 | 3,3 | | | | |
| | 2,9 | 0,145 | 0,146 | 0,143 | 21170 | 55,9 | 2,6 | | | | |
| 100% ΧΩΜΑ | 3,2 | 0,145 | 0,146 | 0,139 | 21170 | 64,7 | 3,1 | 3,1 | 2,81 | 3,43 | **3,1** |
| | 3,3 | 0,143 | 0,146 | 0,140 | 20878 | 62,1 | 3,0 | | | | |
| | 3,4 | 0,144 | 0,145 | 0,143 | 20880 | 69,3 | 3,3 | | | | |
| | 3,7 | 0,147 | 0,147 | 0,142 | 21609 | 66,2 | 3,1 | | | | |
| | 3,8 | 0,144 | 0,145 | 0,142 | 20880 | 59,1 | 2,8 | | | | |
| | 3,9 | 0,146 | 0,145 | 0,138 | 21170 | 73,6 | 3,5 | | | | |

Απόρριψη λόγω αστοχείας

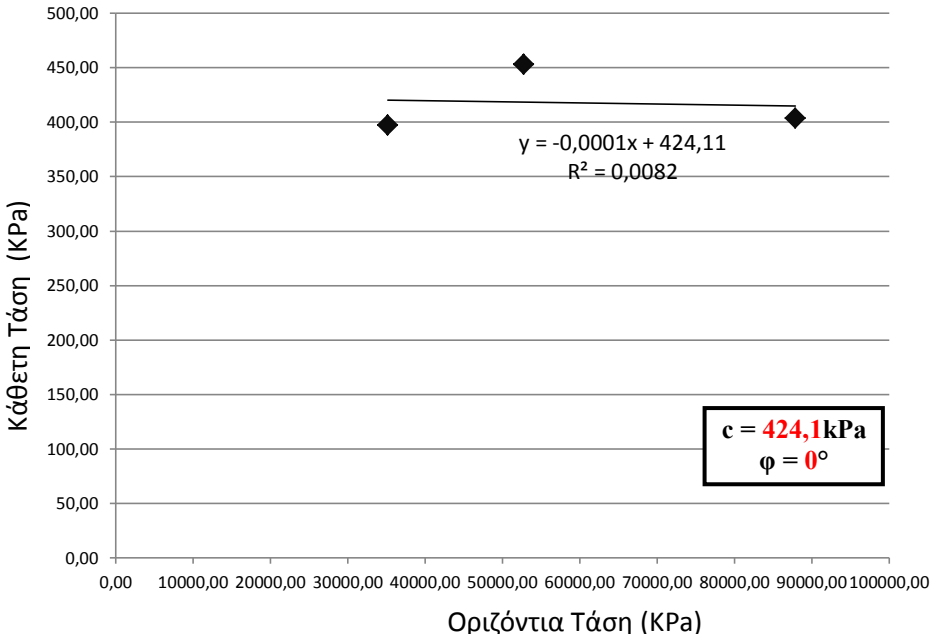
Απόρριψη λόγω διαφοράς από την μέση αντοχή μεγαλύτερης από 10%

**Πίνακας 14 Υπολογισμός θλιπτικής αντοχής**

## Δοκιμή άμεσης διάτμησης

| Δοκιμή άμεσης διάτμησης στο δοκίμιο Χώμα 100% | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Μέση διάμετρος (mm) | Μέσο ύψος (mm) | Εμβαδόν ($mm^2$) | Βάρος (gr) | Κάθετο Φορτίο (kg) | συνολικό κάθετο φορτίο (+418.8gr +4602gr) | Οριζόντιο φορτίο (N) | Κάθετο φορτίο (N) | Οριζόντια Τάση (KN/m2 ή KPa) | Κάθετη τάση (KN/m2 ή KPa) |
| GB1 | 59,65 | 23,40 | 2793,13 | 127,60 | 5,00 | 10020,80 | 1110,00 | 98304,05 | 35194,99 | 397,40 |
| GB2 | 59,65 | 23,45 | 2793,13 | 127,80 | 10,00 | 15020,80 | 1266,00 | 147354,05 | 52755,96 | 453,26 |
| GB3 | 59,65 | 23,30 | 2793,13 | 126,80 | 20,00 | 25020,80 | 1127,00 | 245454,05 | 87877,90 | 403,49 |

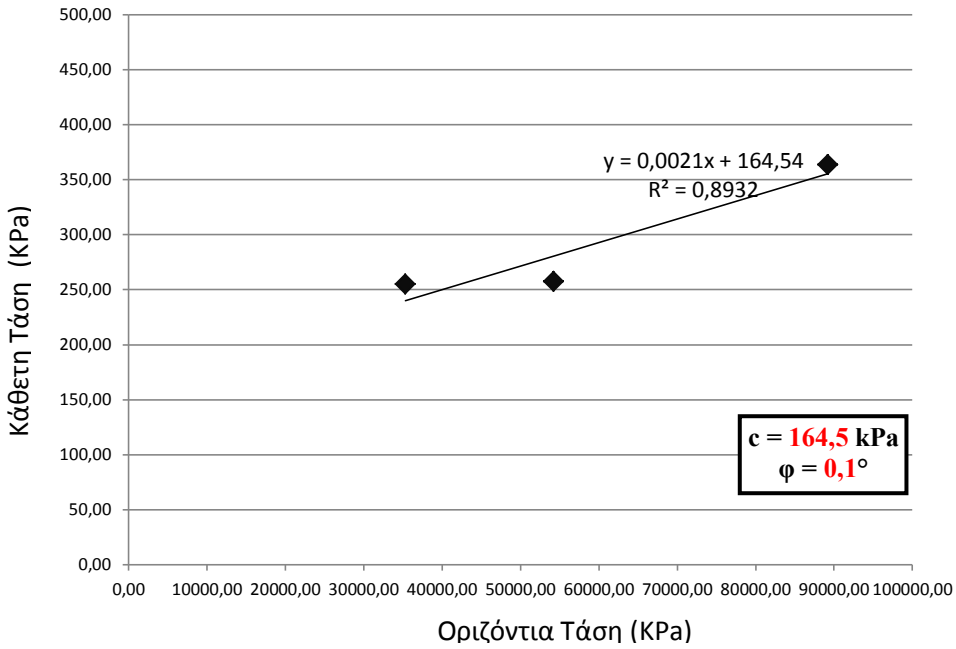
**Πίνακας 15 Άμεση διάτμηση στο δοκίμιο Χώμα 100%**




**Διάγραμμα 17 Εξίσωση Coulomb για το Χώμα 100%**

| Δοκιμή άμεσης διάτμησης στο δοκίμιο Χώμα 80% | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Μέση διάμετρος (mm) | Μέσο ύψος (mm) | Εμβαδόν ($mm^2$) | Βάρος (gr) | Κάθετο Φορτίο (kg) | συνολικό κάθετο φορτίο (+418.8gr +4602gr) | Οριζόντιο φορτίο (N) | Κάθετο φορτίο (N) | Οριζόντια Τάση (KN/m2 ή KPa) | Κάθετη τάση (KN/m2 ή KPa) |
| GA1b | 59,10 | 24,15 | 2741,86 | 131,60 | 5,00 | 10020,80 | 952,00 | 98304,05 | 35853,11 | 347,21 |
| GA1a | 59,55 | 23,51 | 2783,77 | 130,10 | 5,00 | 10020,80 | 710,00 | 98304,05 | 35313,29 | 255,05 |
| GA2 | 58,85 | 23,30 | 2718,71 | 124,30 | 10,00 | 15020,80 | 700,00 | 147354,05 | 54200,02 | 257,48 |
| GA3 | 59,20 | 24,20 | 2751,14 | 131,20 | 20,00 | 25020,80 | 1000,00 | 245454,05 | 89218,95 | 363,49 |

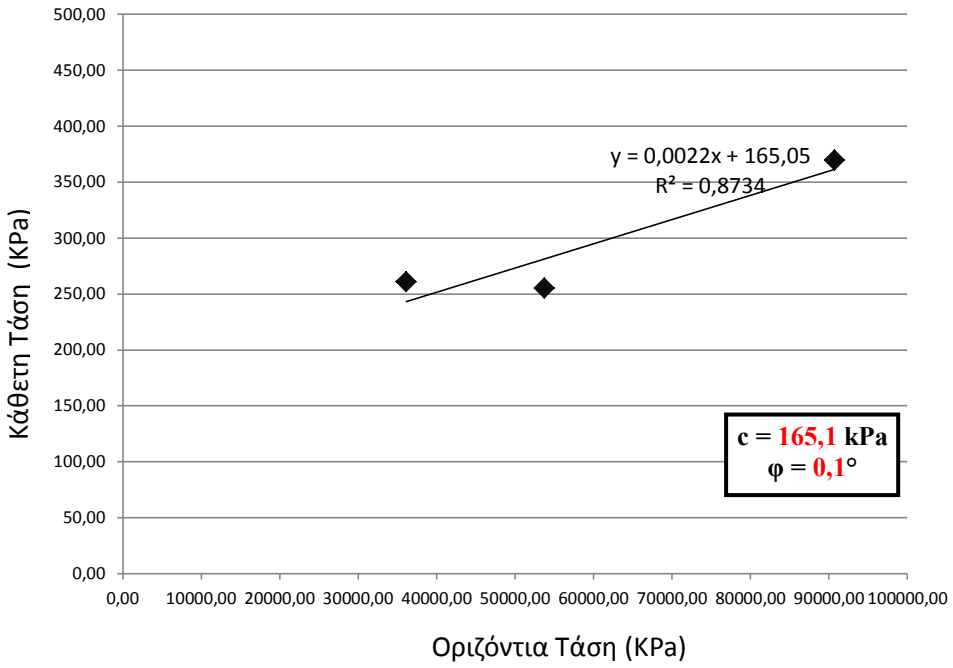
**Πίνακας 16 Άμεση διάτμηση στο δοκίμιο Χώμα 80%**




**Διάγραμμα 18 Εξίσωση Coulomb για το Χώμα 80%**

| Δοκιμή άμεσης διάτμησης στο δοκίμιο Χώμα 60% | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Μέση διάμετρος (mm) | Μέσο ύψος (mm) | Εμβαδόν (mm2) | Βάρος (gr) | Κάθετο Φορτίο (kg) | συνολικό κάθετο φορτίο (+418.8gr +4602gr) | Οριζόντιο φορτίο (N) | Κάθετο φορτίο (N) | Οριζόντια Τάση (KN/m2 ή KPa) | Κάθετη τάση (KN/m2 ή KPa) |
| GC1b | 59,40 | 22,70 | 2769,76 | 118,80 | 5,00 | 10020,80 | 952,00 | 98304,05 | 35491,87 | 343,71 |
| GC1a | 58,90 | 24,70 | 2723,33 | 131,20 | 5,00 | 10020,80 | 710,00 | 98304,05 | 36097,00 | 260,71 |
| GC2 | 59,10 | 23,90 | 2741,86 | 126,70 | 10,00 | 15020,80 | 700,00 | 147354,05 | 53742,45 | 255,30 |
| GC3 | 58,70 | 22,70 | 2704,87 | 117,20 | 20,00 | 25020,80 | 1000,00 | 245454,05 | 90745,34 | 369,70 |

**Πίνακας 17 Άμεση διάτμηση στο δοκίμιο Χώμα 60%**




**Διάγραμμα 19 Εξίσωση Coulomb για το Χώμα 60%**

# Πίνακας Διαγραμμάτων

**Διάγραμμα 1:** *Η διαδικασία της οικολογικής αρχιτεκτονικής (El Feky 2006)* ____ *22*

**Διάγραμμα 2:** *Πορεία ωρίμανσης των οικολογικών κριτηρίων (Σαργέντης 2005)* *23*

**Διάγραμμα 3:** *Η εξέλιξη της ιδέας των βιώσιμων κατασκευών (Γιαννακοπούλου n.d.)* _____ *25*

**Διάγραμμα 4:** *Το δομημένο φάσμα (El Feky 2006)* _____ *26*

**Διάγραμμα 5:** *Διαγραμματική απεικόνιση του κύκλου των υλικών* _____ *30*

**Διάγραμμα 6:** *Ενσωματωμένη ενέργεια λόγω ανακύκλωσης (Σαργέντης 2005)* _ *33*

**Διάγραμμα 7:** *Ένα καλά διαβαθμισμένο δείγμα χώματος (Σακελλαρίου και Κοζάνης 2003)* _____ *66*

**Διάγραμμα 8:** *Κοκκομετρικής διαβάθμισης του χώματος που χρησιμοποιήσαμε* *67*

**Διάγραμμα 9:** *Ταξινόμηση του χώματος με βάση την διαβάθμιση της κοκκομετρίας (Σακελλαρίου και Κοζάνης 2003)* _____ *68*

**Διάγραμμα 10:** *Κοκκομετρική διαβάθμιση της άμμου που χρησιμοποιήσαμε* ___ *71*

**Διάγραμμα 11:** *Κοκκομετρική διαβάθμιση όλων των συνθέσεων που ερευνήθηκαν* _____ *72*

**Διάγραμμα 12:** *Όρια Atterberg (Σακελλαρίου και Κοζάνης 2003)* _____ *75*

**Διάγραμμα 13:** *Πτώση υγρασίας κατά την περίοδο ξήρανσης* _____ *81*

**Διάγραμμα 14:** *Προσδιορισμός εξίσωση υδαρότητας για το Χώμα 80%* _____ *180*

**Διάγραμμα 15:** *Προσδιορισμός εξίσωσης υδαρότητας για το Χωμα 60%* _____ *181*

**Διάγραμμα 16:** *Καμπύλη της δοκιμής Proctor για τον υπολογισμό του ΟΜC του δείγματος με Χώμα 100%* _____ *183*

**Διάγραμμα 17:** *Εξίσωση Coulomb για το Χώμα 100%* _____ *186*

**Διάγραμμα 18:** *Εξίσωση Coulomb για το Χώμα 80%* _____ *187*

**Διάγραμμα 19:** *Εξίσωση Coulomb για το Χώμα 60%* _____ *188*

# Πίνακας Εικόνων

**Εικόνα 1:** *Χάρτης εντοπισμού αρχιτεκτονικού έργου από χώμα (CRATerre/ENSAG)* _____ *40*

**Εικόνα 2:** *Υπαίθριο κοσκίνισμα σε αυτοσχέδιο κόσκινο διατομής 2 mm* _____ *61*

**Εικόνα 3:** *Η δοκιμή σβώλων σε χώματα με διαφορετική σύνθεση (Minke 2006)* *62*

**Εικόνα 4:** *Η δοκιμή κορδέλας (Minke 2006)* _____ *63*

**Εικόνα 5:** *Δοκιμή ανάδευσης (Minke 2006)* _____ *64*

**Εικόνα 6:** *Καλούπι για τον έλεγχο της γραμμικής συρρίκνωσης* _____ *79*

**Εικόνα 7:** *Οι συμπιεσμένη πλίνθοι «Auram» του Auroville Earth Institute (www.earth-auroville.com)* _____ *89*

**Εικόνα 8:** *Οι διαφορετικές μονάδες του «LEGODOME 1» και δυνατότητες* _____ *90*

**Εικόνα 9:** *Οι διαφορετικές μονάδες του «LEGODOME 2» και δυνατότητες* _____ *91*

**Εικόνα 10:** *Η βασική μονάδα του συστήματος «PLETHRO»* _____ *92*

**Εικόνα 11:** *Δομικό σύστημα «PLETHRO»* _____ *94*

**Εικόνα 12:** *Οι τέσσερις διαφορετικές μονάδες που συμπληρώνουν το σύστημα «PLETHRO»* _____ *95*

**Εικόνα 13:** *Ψηφιακή προσομοίωση με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων* __ *98*

# Πίνακας πινάκων

**Πίνακας 1:** *Η σχέση των διαφορετικών ορολογιών (El Feky 2006)* _____ *27*

**Πίνακας 2:** *Αναγνώριση εισροών – εκροών για τις φάσεις του κύκλου ζωής κτιρίων (Μυλωνάς n.d.)* _____ *36*

***Πίνακας 3:*** *Θερμική αγωγιμότητα και θερμική χωρητικότητα χαρακτηριστικών υλικών δόμησης (Berge 2009)* _____ *42*

**Πίνακας 4:** *Ενσωματωμένη ενέργεια οπτόπλινθων και ωμόπλινθων (Berge 2009)* _____ *43*

**Πίνακας 5:** *Περιβαλλοντική επιβάρυνση οπτόπλινθων και ωμόπλινθων (Berge 2009)* _____ *44*

**Πίνακας 6:** *Χρόνος κατασκευής ενός $m^2$ τοίχου από χώμα* _____ *45*

**Πίνακας 7:** *Βιομηχανική παραγωγικότητα πλίνθων (Guillaud, και συν. 1995)* ___ *47*

**Πίνακας 8:** *Διαστάσεις κόκκων (Μπέη 2004)* _____ *56*

**Πίνακας 9:** *Τα όρια Atterberg των διαφορετικών συνθέσεων χώματος και άμμου* _____ *75*

**Πίνακας 10:** *Κατάταξη του χώματος βάσει των ορίων Atterberg* _____ *76*

**Πίνακας 11:** *Τρόπος εντοπισμού της «ιδανικής περιεκτικότητας σε υγρασία» ή ΟΜC* _____ *77*

**Πίνακας 12:** *Τα όρια Atterberg και το ΟΜC των διαφορετικών συνθέσεων χώματος και άμμου* _____ *77*

**Πίνακας 13:** *Υγρασία ελέγχου τυπικής σκληρότητας* _____ *78*

**Πίνακας 14:** *Ποσοστό γραμμικής συρρίκνωσης* _____ *79*

**Πίνακας 15:** *Πυκνότητα των διαφορετικών συνθέσεων χώματος* _____ *82*

**Πίνακας 16:** *Μέσος όρος και τα ακρότατα της δύναμης θραύσης* _____ *83*

**Πίνακας 17:** *Τιμές θλιπτικής αντοχής των διαφορετικών συνθέσεων* _____ *83*

**Πίνακας 18:** *Αποτελέσματα άμεσης διάτμησης* _____ *85*

**Πίνακας 19:** *Περιβαλλοντικές επιπτώσεις μίας συμβατική κατασκευής 110 $m^2$* *105*

**Πίνακας 20:** *Περιβαλλοντικές επιπτώσεις μίας κατασκευής 110 $m^2$ με το δομικό σύστημα «PLETHRO»* _____ *107*

**Πίνακας 21:** *Περιβαλλοντικά οφέλη με την χρήση του δομικού συστήματος «PLETHRO»* _____ *107*

**Πίνακας 22:** *Περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη ανά $m^2$ τοίχου με την χρήση του συστήματος «PLETHRO»* _____ *108*

**Πίνακας 23:** *Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης χώματος 100%* _____ *178*

**Πίνακας 24:** *Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης Άμμου* _____ *178*

**Πίνακας 25:** *Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης χώματος 80%* _____ *179*

**Πίνακας 26:** *Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης χώματος 60%* _____ *179*

**Πίνακας 27:** *Προσδιορισμός ορίου υδαρότητας για το Χώμα 80% (Casagrande test)* _____ *180*

**Πίνακας 28:** *Προσδιορισμός ορίου υδαρότητας για το Χώμα 60% (Casagrande test)* _____ *181*

**Πίνακας 29:** *Προσδιορισμός ορίου πλαστικότητας για το Χώμα 80%* _____ *182*

**Πίνακας 30:** *Προσδιορισμός ορίου πλαστικότητας για το Χώμα 60%* _____ *182*

**Πίνακας 31:** *Υπολογισμός του ΟΜC μέσω της δοκιμής Poctor του δείγματος Χώμα 100%* _____ *183*

**Πίνακας 32:** *Υπολογισμός γραμμικής συρρίκνωσης* _____ *184*

**Πίνακας 33:** *Υπολογισμός θλιπτικής αντοχής* _____ *185*

**Πίνακας 34:** *Άμεση διάτμηση στο δοκίμιο Χώμα 100%* _____ *186*

**Πίνακας 35:** *Άμεση διάτμηση στο δοκίμιο Χώμα 80%* _____ *187*

**Πίνακας 36:** *Άμεση διάτμηση στο δοκίμιο Χώμα 60%* _____ *188*

# Βιβλιογραφία


1. Adalberth, K. *Energy use during the Life Cycle of Building: a method.* Pergamon, 1996.

2. Berge, Bjorn. *The ecology of building materials.* Translated by Chris Butters and Filip Henley. Italy: Architectural press, 2009.

3. Blondet, Marcial, Gladys Villa Garcia, and Svetlana Brzen. *Earthquake-resistant construction of adobe buildings: A tutorial.* Oakland: EERI/IAEE World Housing Encyclopedia, 2003.

4. Bribian, Ignacio Zabalza, Antonio Valero Capilla, και Alfonso Aranda Uson. *Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential.* Elsevier, 2010.

5. Brown, G Z, and M Dekay. *Sun, wind, and light: architectural design strategies.* New Yourk: John Wiley and Sons, 2001.

6. El Feky, Usama Mohamed Ahmed. *Toward applicable green architecture, an approach to colonize the desert in Egypt.* Eindhoven: Universiteitsdrukkerij, Technische Universiteit Eindhoven, 2006.

7. Gauzin-Muller, D. *Οικολογική Αρχιτεκτονική.* Θεσ/νίκη: Κτίριο, 2003.

8. Guillaud, Hubert, Thierry Joffroy, Pascal Odul, και CRATerre-EAG. *Compressed earth blocks: manual of design and construction.* Eschborn: Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien - GATE, 1995.

9. Minke, Gernot. *Building with earth: Design and technology of a sustainable architecture.* Basel: Birkhäuser, 2006.

10. Morel, J., A. Mesbah, M. Oggero, and P. Walker. *Building houses with local materials:means to drastically reduce the environmental impact of construction.* Pergamon, 2000.

11. Smith, M, J Whitelegg, and N Williams. *Greening the built environment.* London: Earthscan Publications Ltd, 1998.

12. SUSCON. *Εκτίμηση των Περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την κατασκευαστική δραστηριότητα σε Ελλάδα και Κύπρο.* Πρόγραμμα Life - Περιβαλλον, 2006.

13. Woolley, T, και S Kimmins. *Green building handbook: a guide to building products and their impact on the environment.* London: E& FN Spon, 2000.

14. Zami, Mohammand Sharif, and Angela Lee. *Contemporary earth construction in urban housing - stabilised or unstabilised?* Salford: School of the Built Environment, University of Salford, n.d.

15. Αδαμοπούλου, Ελένη. *Επίδραση του συνδυασμού τιμών των κυριότερων παραμέτρων του κτιριακού κελύφους στις συνθήκες θερμικής άνεσης κατά τους χειμερινούς μήνες.* Αθήνα: ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, 2013.

16. Γεωργιάδου, Ε. *Καθαρές τεχνολογίες δόμησης.* Θεσ/νίκη: Γεν. Διευθ. για την Ενέργεια, 1996.

17. Γιαννακοπούλου, Τρισεύγενη. *Εισαγωγή στις βιώσιμες κατασκευές.* Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, n.d.

18. Δημουδη, Αργυρώ. *Οικολομικά Δομικά Υλικά.* Ξάνθη: Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Δημοκρίτειο Πανεπηστήμιο Θράκης, 2006.

19. ΔΙΠΕ-ΥΠΕΧΩΔΕ. *Οικολογική Δόμηση.* Αθήνα: Ελληνικά Γράμματα, 2000.

20. ΕΕΑΕ. *Ραδόνιο.* Αθήνα: Εννηνική επιτροπή ατομική ενέργειας, Υπουργείο Ανάπτυξης, 2005.

21. Μπέη, Γεωργία. *Τοιχοποιία από πηλό: Πειραματική διερεύνηση μηχανικών και φυσικών χαρακτηριστικών δομικών μονάδων.* Διδακτορική διατριβή, Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2004.

22. Μυλωνάς, Σ. *Δυνατότητες αξιοποίησης της ανάλυσης κύκλου ζωής δομικών στοιχείων σκυροδέματος στον κτιριοδομικό σχεδιασμό.* Θεσσαλονίκης: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, n.d.

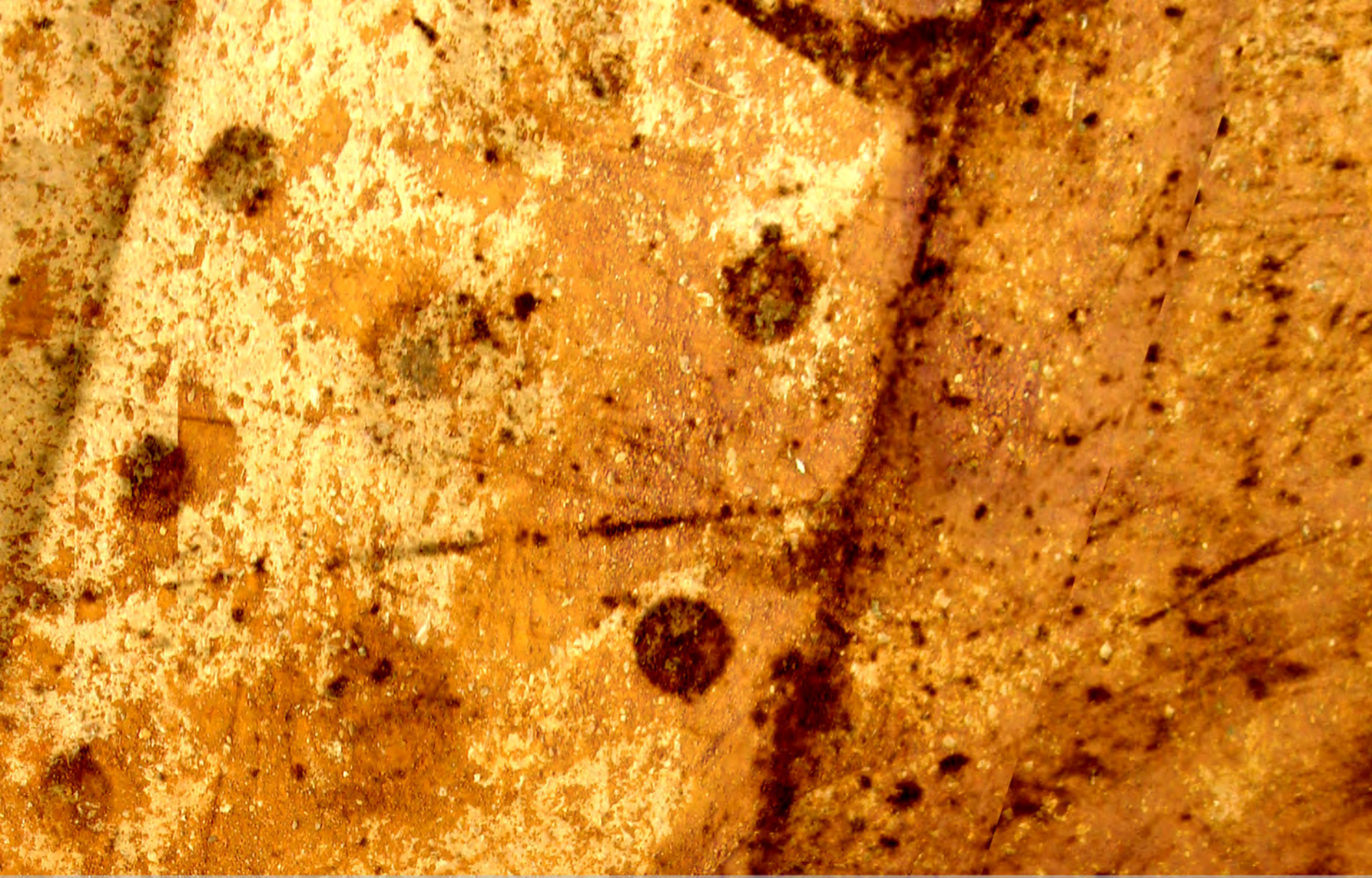
23. Σακελλαρίου, Μ, και Σ Κοζάνης. *Εγραστήριακες δομικές εδαφομηχναικής.* Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, 2003.

24. Σαργέντης, Φοίβος Γ. *Δομικά υλικά και οικολογία.* Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2005.

25. Στειακάκης, Εμμανουήλ. *Εργαστηριακές ασκήσεις τεχνικής γεωλογίας - Εεδαφομηχανικής.* Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, 2010.

26. Τεχνίτη, Σταυρούλα. *Μελέτη χαρακτηρισμού και αξιοποίησης αγροβιομηχανικώναποβλήτων σε δομικά υλικά.* Διπλωματική εργασία, Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, 2012.

27. Τομπά, Χρ. *Δομικά Υλικά Φιλικά προς το Περιβάλλον.* Διπλωματική Εργασία, Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, 2005.



ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΉ ΕΡΓΑΣΙΑ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΧΑΝΙΑ, 2013