



**Πανεπιστήμιο
Κύπρου**

**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**Παραγωγή και χαρακτηρισμός συμπιεσμένων
ωμοπλίνθων**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΥ ΡΑΦΑΗΛ

2020



**Πανεπιστήμιο
Κύπρου**

**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**Παραγωγή και χαρακτηρισμός συμπιεσμένων
ωμοπλίνθων**

ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΥ ΡΑΦΑΗΛ

**Διατριβή η οποία υποβλήθηκε προς απόκτηση μεταπτυχιακού
τίτλου σπουδών στο Πανεπιστήμιο Κύπρου**

2020

ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΥ ΡΑΦΑΗΛ

ΣΕΛΙΔΑ ΕΓΚΥΡΟΤΗΤΑΣ

Μεταπτυχιακός Φοιτητής: Παναγιώτου Ραφαήλ

Τίτλος Διατριβής: Παραγωγή και χαρακτηρισμός συμπιεσμένων ωμοπλίνθων

*Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή εκπονήθηκε στο πλαίσιο των σπουδών για απόκτηση μεταπτυχιακού τίτλου στο **Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος** και εγκρίθηκε στις 23 Δεκεμβρίου 2020 από τα μέλη της **Εξεταστικής Επιτροπής**.*

Εξεταστική Επιτροπή:

Ερευνητικός Σύμβουλος: Ιωάννης Ιωάννου

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και
Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Κύπρου

Μέλος Επιτροπής: Μιχάλης Πέτρου

Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών
Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Κύπρου

Μέλος Επιτροπής: Μάριος Κυριακίδης

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικής, Πανεπιστήμιο
Λευκωσίας

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΦΟΙΤΗΤΗ

Η παρούσα διατριβή υποβάλλεται προς συμπλήρωση των απαιτήσεων για απονομή μεταπτυχιακού τίτλου του Πανεπιστημίου Κύπρου. Είναι προϊόν πρωτότυπης εργασίας αποκλειστικά δικής μου, εκτός των περιπτώσεων που ρητώς αναφέρονται μέσω βιβλιογραφικών αναφορών, σημειώσεων ή και άλλων δηλώσεων.

Παναγιώτου Ραφαήλ

.....

Περίληψη

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τη μελέτη συμπιεσμένων ωμοπλίνθων που παράγονται στην Κύπρο με τοπικές πρώτες ύλες. Για τους σκοπούς της μελέτης, μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο Δομικών Υλικών του Πανεπιστημίου Κύπρου πρώτες ύλες (εδάφη) από τις περιοχές Αλάμπρας, Δελίκηπου, Ποταμιάς (λατομείο Λατούρου) και Τσερίου. Οι εν λόγω πρώτες ύλες εξετάστηκαν ενδελεχώς, πριν την χρησιμοποίησή τους για την παραγωγή συμπιεσμένων ωμόπλινθων, με απώτερο σκοπό τον χαρακτηρισμό τους και τη συσχέτιση των ιδιοτήτων τους με τα παραγόμενα τελικά προϊόντα. Συγκεκριμένα, έγινε κοκκομετρική ανάλυση, από την οποία εξήχθη η κοκκομετρική καμπύλη των εδαφών. Στη συνέχεια, έγινε προσδιορισμός των ορίων συνεκτικότητας και της συμπεστότητας. Ο χαρακτηρισμός ολοκληρώθηκε με τον προσδιορισμό της ορυκτολογικής σύστασης των εδαφών και τη συσχέτιση αυτής με την περιοχή προέλευσης της κάθε εδαφικής πρώτης ύλης. Τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής ανάλυσης κατέδειξαν επίσης την παρουσία ενεργών αργιλικών ορυκτών σε κάποια από τα εδάφη που εξετάστηκαν. Τα ενεργά αργιλικά ορυκτά αντιδρούν στην παρουσία νερού και άρα η παρουσία τους μπορεί, δυνητικά, να οδηγήσει σε ογκομετρικές μεταβολές του τελικού προϊόντος.

Η μελέτη της δομής των συμπιεσμένων ωμόπλινθων που παρήχθησαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής έγινε με εξέταση υπό διάφορες κλίμακες. Αρχικά, τα δοκίμια εξετάστηκαν μακροσκοπικά. Στη συνέχεια, έγινε παρατήρηση σε στερεομικρόσκοπιο, όπου παρατηρήθηκαν τα επιφανειακά χαρακτηριστικά των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων σε μεγαλύτερη μεγέθυνση. Τέλος, η παρατήρηση συνεχίστηκε σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, όπου παρατηρήθηκε η μικροδομή των υλικών. Από τις πιο πάνω παρατηρήσεις, διαφάνηκε ότι οι ΣΩ με χώμα από τις περιοχές Αλάμπρας και Τσερίου είχαν την πυκνότερη δομή, ενώ οι ΣΩ με χώμα από το λατομείο Λατούρου την πιο χαλαρή δομή.

Οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι που παρήχθησαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής υποβλήθηκαν, επίσης, σε μια σειρά από δοκιμές με σκοπό τον προσδιορισμό των φυσικών, θερμομονωτικών και μηχανικών χαρακτηριστικών τους. Οι φυσικο-μηχανικές ιδιότητες που προσδιορίστηκαν ήταν η πυκνότητα, η θλιπτική και η καμπτική αντοχή. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι, όλοι οι ωμόπλινθοι που εξετάστηκαν είχαν αρκετά καλές ιδιότητες, σύμφωνα και με τους διεθνείς κανονισμούς. Αύξηση της πυκνότητας σε κάθε περίπτωση οδηγούσε σε αύξηση της θλιπτικής αντοχής. Τα κυριότερα θερμομονωτικά χαρακτηριστικά που προσδιορίστηκαν ήταν ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας και η ογκομετρική/ειδική θερμοχωρητικότητα. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ήταν αρκετά υψηλός, ώστε οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι που εξετάστηκαν να μπορούν να ικανοποιήσουν τις τρέχουσες απαιτήσεις των σχετικών τοπικών κανονισμών. Ωστόσο, η τιμή της θερμοχωρητικότητάς τους ήταν ιδιαίτερα υψηλή.

Τέλος, οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι υποβλήθηκαν σε δοκιμές προσδιορισμού της ανθεκτικότητάς τους στο χρόνο, με έμφαση στην καταστρεπτική δράση του νερού. Οι δοκιμές που έγιναν ήταν ο προσδιορισμός του συντελεστή τριχοειδούς απορροφητικότητας, οι εναλλασσόμενοι

κύκλοι ύγρανσης/ξήρανσης, η δοκιμή ψεκασμού υπό πίεση και η δοκιμή της σταγόνας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι μη-σταθεροποιημένοι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι δύσκολα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για δόμηση όταν είναι εκτεθειμένοι στις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Η πειραματική διερεύνηση που έγινε στην παρούσα εργασία συνεισφέρει στην υπάρχουσα γνώση και βοηθά στην κατανόηση της συμπεριφοράς μη-σταθεροποιημένων συμπιεσμένων ωμοπλίνθων που παράγονται με τοπικές πρώτες ύλες. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν αναμένεται να βοηθήσουν στην προσπάθεια που γίνεται για εισαγωγή των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων στη σύγχρονη οικοδομική βιομηχανία της Κύπρου.

Abstract

This thesis deals with the study of compressed earth blocks (CEBs) produced in Cyprus with local raw materials. For the purposes of this study, raw materials (soil) from Alambra, Delikipos, Potamia (Latouros quarry) and Tseri were delivered to the Laboratory of Building Materials of the University of Cyprus. The aforementioned raw materials were thoroughly examined, before being used to produce CEBs, in order to characterize them and correlate their properties with the properties of the final products. Particle-size analysis, Atterberg limits determination and Proctor tests were conducted. Mineralogical analyses were also carried and the results were correlated to the geological origin of each soil. The results of the mineralogical analyses further provided useful information regarding the participation of active clay minerals in each soil; the latter are susceptible to variations in water content and may thus lead to volumetric changes of the end-product.

In order to study the (micro)structure of the CEBs produced in the framework of this study, macroscopic and stereomicroscopic observations took place. Furthermore, scanning electron microscopy observations were carried out. The study of CEBs (micro)structure showed that CEBs produced with soil from the areas of Alambra and Tseri had the denser structure, while CEBs produced with soil from Latouros quarry (Potamia) had a less packed structure.

The CEBs produced in the framework of this study were also examined in order to determine their physico-mechanical and thermal properties. The physico-mechanical properties determined were density, compressive and bending strength. The results suggested that all CEBs examined had high compressive and bending strength, in line with international normative document recommendations, and that increases in the density of CEBs led to increases in their compressive strength. The main thermal properties determined were thermal conductivity and volumetric/specific thermal capacity. The results showed that all CEBs examined had high thermal conductivity and thus could not satisfy current regulations. Nevertheless, their thermal capacity was also high.

Finally, the CEBs produced were subjected to durability tests in order to assess their behaviour against the presence of water. Capillary absorption, wetting/drying cycles, spray erosion and drip tests were conducted. The results suggested that non stabilized CEBs can not be used in the construction of buildings, when the latter are subjected to environmental conditions.

The experimental investigation carried out in the present thesis contributes to existing knowledge and helps in understanding the behaviour of non stabilized compressed earth blocks produced with local raw materials. The conclusions emerging from this study are anticipated to help towards the introduction of compressed earth blocks in the contemporary construction industry of Cyprus.

Ευχαριστίες

Ως ελάχιστο δείγμα ευγνωμοσύνης για τη βοήθεια και τη συνεχή στήριξη, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους αυτούς που συνείσφεραν, ο καθένας με το δικό του τρόπο, για να ολοκληρώσω την παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή.

Συγκεκριμένα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή και επιβλέποντα της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, Δρ. Ιωάννου Ιωάννη, ο οποίος με βοήθησε να μελετήσω ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου για την αμέριστη και απρόσκοπτη στήριξη του καθ' όλη τη διάρκεια της μελέτης, όπου παρά τις όποιες δυσκολίες συναντήθηκαν, παρείχε ηθική υποστήριξη, ούτως ώστε να έλθει εις πέρας η εργασία.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω θερμές ευχαριστίες στον Επίκουρο Καθηγητή, Δρ. Κυριακίδη Μάριο, και στους μεταδιδακτορικούς ερευνητές, Δρ. Έλλαμπα Ρογήρο και Δρ. Ρηγόπουλο Ιωάννη, οι οποίοι με βοήθησαν ουσιαστικά στη διεκπεραίωση της παρούσας διατριβής, παρέχοντας μου σημαντικές συμβουλές και καθοδήγηση, καθώς και για το ενδιαφέρον που επέδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια της μεταπτυχιακής μου διατριβής.

Ακολούθως, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Λειτουργό και τον Τεχνικό των εργαστηρίων του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Κύπρου, Δρ. Πέτρου Λούκα και κ. Μιχαήλ Μιχάλη, αντίστοιχα, για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχαν. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον παραγωγό συμπιεσμένων ωμοπλίνθων, κ. Ταπακούδη Μιχάλη, με τη βοήθεια του οποίου παρήχθησαν οι υπό μελέτη συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την αγαπημένη μου Οδύσσεια για την υπομονή και τη στήριξή της καθ' όλη τη διάρκεια της μελέτης μου.

Λευκωσία, 2020

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	iii
Abstract	v
Ευχαριστίες	vi
Περιεχόμενα	vii
Κατάλογος Γραφημάτων / Εικόνων	x
Κατάλογος Πινάκων.....	xiv
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Σκοπός εργασίας	1
1.2 Δομή εργασίας.....	2
2. Γήινη αρχιτεκτονική.....	3
2.1 Ιστορική αναδρομή.....	3
2.2 Τεχνικές δόμησης.....	5
2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.....	7
3. Συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι.....	11
3.1 Παραγωγή συμπιεσμένων ωμόπλινθων.....	11
3.1.1 Εξοπλισμός.....	11
3.1.1.1 Σπαστήρες	11
3.1.1.2 Κόσκινα	12
3.1.1.3 Αναδευτήρες.....	13
3.1.1.4 Πρέσες.....	15
3.1.2 Διαδικασία παραγωγής.....	17
3.2 Χαρακτηριστικά συμπιεσμένων ωμόπλινθων.....	19
3.2.1 Πρώτη ύλη	19
3.2.2 Μηχανικές και θερμομονωτικές ιδιότητες.....	22
3.2.3 Ανθεκτικότητα.....	26
3.3 Κανονισμοί.....	30
4. Υλικά και μεθοδολογία	39
4.1 Επιλογή και χαρακτηρισμός πρώτης ύλης.....	39
4.1.1 Μελέτη κοκκομετρικής διαβάθμισης	40
4.1.2 Προσδιορισμός ορίων συνεκτικότητας και γραμμικής συρρίκνωσης.....	41
4.1.3 Συμπιεστότητα.....	41
4.1.4 Ορυκτολογική ανάλυση.....	41
4.2 Παραγωγή και αποθήκευση συμπιεσμένων ωμοπλίνθων.....	42
4.3 Ιδιότητες συμπιεσμένων ωμοπλίνθων	43
4.3.1 Μακροσκοπική και μικροσκοπική εξέταση δοκιμίων	43
4.3.2 Φυσικο-μηχανικές ιδιότητες.....	44
4.3.2.1 Φυσικές ιδιότητες	45
4.3.2.2 Μηχανικές ιδιότητες.....	45

4.3.3	Ανθεκτικότητα.....	47
4.3.3.1	Δοκιμή ψεκασμού υπό πίεση (spray erosion).....	48
4.3.3.2	Δοκιμή σταγόνας (drip test).....	50
4.3.3.3	Κύκλοι ύγρανης/ξήρασης	52
4.3.3.4	Δοκιμή τριχοειδούς απορροφητικότητας.....	53
5.	Χαρακτηριστικά εδαφικών πρώτων υλών και ιδιότητες συμπιεσμένων ωμοπλίνθων	54
5.1	Χαρακτηριστικά εδαφικών πρώτων υλών.....	54
5.1.1	Κοκκομετρική διαβάθμιση.....	54
5.1.2	Όρια συνεκτικότητας και γραμμικής συρρίκνωσης.....	56
5.1.3	Συμπιεστότητα.....	57
5.1.4	Ορυκτολογική ανάλυση.....	58
5.1.5	Σύνοψη.....	61
5.2	Μακροσκοπική και μικροσκοπική εξέταση συμπιεσμένων ωμοπλίνθων.....	63
5.2.1	Μακροσκοπική εξέταση	63
5.2.2	Στερεομικροσκοπική εξέταση.....	66
5.2.3	Παρατήρηση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM).....	69
5.2.4	Σύνοψη.....	72
5.3	Φυσικομηχανικές ιδιότητες	74
5.3.1	Φυσικές ιδιότητες.....	74
5.3.1.1	Πυκνότητα.....	74
5.3.1.2	Θερμικά χαρακτηριστικά	75
5.3.2	Μηχανικά χαρακτηριστικά.....	76
5.3.2.1	Θλιπτική αντοχή.....	76
5.3.2.2	Καμπτική αντοχή.....	83
5.3.2.3	Σύνοψη και συσχετισμοί	86
6.	Ανθεκτικότητα.....	89
6.1	Αποτελέσματα και συζήτηση.....	89
6.1.1	Δοκιμής σταγόνας (Drip test).....	89
6.1.2	Δοκιμή ψεκασμού υπό πίεση (Spray erosion test)	91
6.1.3	Κύκλοι ύγρανσης/ξήρασης	96
6.1.4	Τριχοειδής απορροφητικότητα.....	99
6.1.5	Σύνοψη και συσχετισμοί.....	101
7.	Συμπεράσματα και εισηγήσεις για μελλοντική έρευνα.....	105
7.1	Χαρακτηρισμός πρώτης ύλης.....	105
7.2	Θερμομονωτικές και φυσικές ιδιότητες συμπιεσμένων ωμοπλίνθων.....	106
7.3	Μηχανικά χαρακτηριστικά συμπιεσμένων ωμοπλίνθων.....	107
7.4	Ανθεκτικότητα στο χρόνο.....	107
7.5	Γενικά	108
7.6	Εισηγήσεις για μελλοντική έρευνα.....	109
	Βιβλιογραφία.....	112

Δημοσιεύσεις.....	120
Παραρτήματα.....	121
Παράρτημα Α: Πίνακας 2.1 του NZS 4298 (1998).....	122
Παράρτημα Β: Θλιπτική αντοχή συμπιεσμένων ωμοπλίνθων.....	124
Παράρτημα Γ: Καμπτική αντοχή συμπιεσμένων ωμοπλίνθων.....	127
Παράρτημα Δ: Αποτελέσματα δοκιμής σταγόνας (drip test).....	128
Παράρτημα Ε: Αποτελέσματα δοκιμής ψεκασμού υπό πίεση (Spray erosion test).....	129

Κατάλογος Γραφημάτων / Εικόνων

Εικόνα 1:Χάρτες στους οποίους φαίνεται η διασπορά της γήινης αρχιτεκτονικής ανά το παγκόσμιο, όπως και οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές ανά περιοχή. Αριστερά παρατηρείται η διασπορά στην Αμερικανική ήπειρο και δεξιά στον υπόλοιπο κόσμο (Houben and Guillaud, 1994).	3
Εικόνα 2: Θόλοι από το ναό του Ραμσή Β΄ στη Gourna της Αιγύπτου (Minke, 2006).	4
Εικόνα 3: Κατηγορίες τεχνικών γήινης δόμησης (Houben and Guillaud, 1994, τροποποιημένο από τον συγγραφέα).	5
Εικόνα 4: Κατασκευή από συμπιεσμένη γη στην περιοχή Weilburg της Γερμανίας (έτος δόμησης 1828).	6
Εικόνα 5: α) Θραύση εδαφικού υλικού με ειδικό σφυρί (Houben and Guillaud,1994) β) Χειροκίνητος σπαστήρας με οδοντωτό τροχό (Schroeder, 2016) γ) Διαγραμματική απεικόνιση σπαστήρα τύπου toothed belt (Houben and Guillaud, 1994) δ) Διαγραμματική απεικόνιση σπαστήρα τύπου squirrel cage (Houben and Guillaud, 1994).	12
Εικόνα 6: α) Χειροκίνητο κόσκινο (Schroeder, 2016) β) Σκίτσο όπου παρατηρείται το κοσκίνισμα σε σταθερό κόσκινο γ) Σκίτσο όπου παρατηρείται η λειτουργία του δονητικού κόσκινου δ) Σκίτσο με χειροκίνητο περιστροφικό κόσκινο (Houben and Guillaud, 1994).	13
Εικόνα 7: α) Παραδοσιακός τρόπος ανάδευσης με απλά εργαλεία (Schroeder, 2016) β) Ανάδευση με χειροκίνητο σκαπτικό (Minke , 2006) γ) Ανάδευση με αναδευτήρα κονιαμάτων (Schroeder, 2016) δ) Αναδευτήρας σκυροδέματος (Minke , 2006).	14
Εικόνα 8: Σκίτσο στο οποίο απεικονίζεται μια χειρωνακτική πρέσα ελαφριού τύπου (Rigassi, 1995).	15
Εικόνα 9: Χειρωνακτική πρέσα βαρέου τύπου, Auram 3000 (earth-auroville).	15
Εικόνα 10: Κινητή μονάδα παραγωγής συμπιεσμένων ωμοπλίνθων (Minke, 2006).	16
Εικόνα 11: Στάδια παραγωγής συμπιεσμένων ωμοπλίνθων (Houben and Guillaud, 1994).	17
Εικόνα 12: Παραγωγή με χειρωνακτικό τρόπο στην Παραγουάη. Η ανάμιξη της πρώτης ύλης και η απόθεση των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων γίνεται δίπλα από την πρέσα (Minke, 2006).	18
Εικόνα 13: Σκίτσο στο οποίο παρατηρείται μια τυπική διάταξη σταθερής μονάδας παραγωγής συμπιεσμένων ωμοπλίνθων (Rigassi, 1995).	18
Εικόνα 14: Σχηματική απεικόνιση της τροποποιημένης διάταξης ψεκασμού(Ogunye and Boussabaine, 2002).	27
Εικόνα 15: Σχηματική απεικόνιση της δοκιμής της τριχοειδούς απορροφητικότητας με την χρήση σφουγγαριού (Hall and Djerbib, 2004).	28
Εικόνα 16: Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης για την παραγωγή ΣΩ (CraTerre – EAG, 1998)...	34
Εικόνα 17: Πεδίο στο οποίο πρέπει να εμπίπτουν τα όρια συνεκτικότητας για την παραγωγή ΣΩ (CraTerre – EAG, 1998).	35
Εικόνα 18: Φωτογραφίες των εδαφικών πρώτων υλών. α) Αλάμπρα, β) Δελίκηπος, γ) Ποταμιά και δ) Τσέρι.	40
Εικόνα 19: Παραγωγή συμπιεσμένων ωμοπλίνθων με πρέσα τύπου Impact 2001A της ΑΕCT.	42
Εικόνα 20: Σκίτσο στο οποίο παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο έγιναν οι μετρήσεις των διαστάσεων των δοκιμίων.	45
Εικόνα 21: Πειραματικές διατάξεις για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας (α) σε ολόκληρα δοκίμια, (ΣΩ) 300 mm x 150 mm x 100 mm (μήκος x πλάτος x ύψος), (β) σε κύβους ακμής 100 mm, και (γ) σε λεπτά πρίσματα 50 mm x 50 mm x 100 mm (μήκος x πλάτος x ύψος).	46
Εικόνα 22: Πειραματική διάταξη για τον προσδιορισμό της καμπτικής αντοχής σε ολόκληρα δοκίμια (ΣΩ) 300 mm x 150 mm x 100 mm (μήκος x πλάτος x ύψος).	47
Εικόνα 23: Λεπτομέρειες ακροφύσιου (αριστερά) και διάταξη ψεκασμού υπό πίεση (δεξιά) (NZS 4298, 1998).	48
Εικόνα 24: Διάταξη ψεκασμού υπό πίεση που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο Κύπρου.	49
Εικόνα 25: Εξωτερική όψη και διάταξη των τρυπών στο ακροφύσιο.	50
Εικόνα 26: Διάταξη δοκιμής σταγόνας (NZS 4298, 1998).	51
Εικόνα 27: Διάταξη δοκιμής σταγόνας που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο Κύπρου.	52
Εικόνα 28: Διάταξη δοκιμής τριχοειδούς απορροφητικότητας.	53

Εικόνα 29: Διάγραμμα στο οποίο παρατηρούνται οι κοκκομετρικές καμπύλες των 4 εδαφών. Με διάστικτη γραμμή οριοθετείται η περιοχή με τις προτεινόμενες διαβαθμίσεις για παραγωγή ΣΩ από την CraTerre – EAG (1998).....	55
Εικόνα 30: Διάγραμμα πλαστικότητας για την ταξινόμηση των εδαφών. Με κόκκινη διάστικτη γραμμή είναι τα αποδεκτά όρια που θέτει η CraTerre – EAG (1998) για εδάφη που προορίζονται για την παραγωγή ΣΩ	57
Εικόνα 31: Διάγραμμα στο οποίο παρατηρούνται οι τιμές βέλτιστης υγρασίας και μέγιστης ξηρής πυκνότητας των 4 κυπριακών εδαφών. Με κόκκινη διάστικτη γραμμή είναι τα όρια που θέτουν οι Houben and Guillaud (1994) για εδάφη που προορίζονται για την παραγωγή ΣΩ.....	58
Εικόνα 32: Ακτινοδιαγράμματα των 4 κυπριακών εδαφών. α) χρώμα Αλάμπρας, β) χρώμα Δελίκηπου, γ) χρώμα Λατούρου, δ) χρώμα Τσερίου.	60
Εικόνα 33: Μακροσκοπικές εικόνες από τους συμπιεσμένους ωμόπλινθους με χρώμα από την περιοχή της Αλάμπρας. α) Ωμόπλινθος με σπασμένες ακμές, τραχεία άνω επιφάνεια και λεία πλαϊνή (300 mm x 150 mm x 100 mm), β) Χονδρόκοκκο αδρανές, το οποίο έχει μέτρια συνοχή με το συνδετικό υλικό γύρω του, γ) Χαρακτηριστική εικόνα αχύρου μέσα σε συμπιεσμένο ωμόπλινθο, δ) Ρωγμές που διατάσσονται κάθετα στη διεύθυνση της συμπίεσης.....	64
Εικόνα 34: Μακροσκοπικές εικόνες από τους συμπιεσμένους ωμόπλινθους με χρώμα από την περιοχή του Δελίκηπου. α) Διάσπαρτες τριχοειδείς ρωγμές στην κάτω επιφάνεια του δοκιμίου και παρουσία φυτικών υλικών, β) Ρωγμές που διατάσσονται κάθετα στη διεύθυνση της συμπίεσης, γ) Δοκίμιο με σπασμένες ακμές και ρωγμές στην άνω επιφάνεια, δ) Χαρακτηριστική εικόνα με άχυρα διάσπαρτα μέσα στο υλικό.	64
Εικόνα 35: Μακροσκοπικές εικόνες από τους συμπιεσμένους ωμόπλινθους με χρώμα από το λατομείο Λατούρου. α) Δοκίμιο με έντονα σπασμένες ακμές (300 mm x 150 mm x 100 mm), β) Δοκίμιο με σημαντική απώλεια υλικού (300 mm x 150 mm x 100 mm), γ) Δοκίμιο με μεγάλη ρωγμή κάθετα στη διεύθυνση της συμπίεσης, δ) δοκίμιο με σπασμένες ακμές και ρωγμή που είναι προσανατολισμένη κάθετα στη διεύθυνση της συμπίεσης.	65
Εικόνα 36: Μακροσκοπικές εικόνες από τους συμπιεσμένους ωμόπλινθους με χρώμα από την περιοχή του Τσερίου. α) Κάτω επιφάνεια συμπιεσμένου ωμόπλινθου στην οποία παρατηρείται καλή συνοχή του υλικού, β) Λεία πλαϊνή επιφάνεια, με ρωγμή κάθετα στη διεύθυνση της συμπίεσης, γ) Επανθίσεις από άλατα ή οργανικό υλικό στην άνω επιφάνεια (300 mm x 150 mm x 100 mm), δ) Μεγάλες ρωγμές, κάθετες στη διεύθυνση της συμπίεσης.	65
Εικόνα 37: Εικόνες από το στερεομικροσκόπιο για τους συμπιεσμένους ωμόπλινθους με χρώμα από την περιοχή της Αλάμπρας. α) Επιφανειακή μικροτραχύτητα με μικρές ρωγμές και παρουσία χονδρόκοκκου υλικού, β) Πυκνή δομή και καλή συνοχή συνδετικού-χονδρόκοκκων, γ) Επιφανειακή ρωγμή και δ) Μικρές ρωγμές και πόροι στην επιφάνεια των ΣΩ.....	67
Εικόνα 38: Εικόνες από το στερεομικροσκόπιο για τους συμπιεσμένους ωμόπλινθους με χρώμα από την περιοχή του Δελίκηπου. α) Επιφανειακή τραχύτητα του υλικού, όπου τα αδρανή φαίνονται να προεξέχουν, β) Ρωγμές στη διεπιφάνεια αδρανών – συνδετικού υλικού, με εμφανή τη συμμετοχή χονδρόκοκκων, γ) Επιφανειακοί πόροι στην άνω επιφάνεια του δοκιμίου και δ) Κακή συνοχή μεταξύ του χονδρόκοκκου αδρανούς και του συνδετικού υλικού.....	67
Εικόνα 39: Εικόνες από το στερεομικροσκόπιο για τους συμπιεσμένους ωμόπλινθους με χρώμα από το λατομείο Λατούρου. α) Επιφανειακή τοπογραφία, όπου παρατηρείται μικρή τραχύτητα, β) Πυκνή δομή του υλικού, γ) Εκτεταμένη ρωγμή κάθετα στη διεύθυνση συμπίεσης και δ) Πολλοί μικροί πόροι ανάμεσα στους κόκκους.	68
Εικόνα 40: Εικόνες από το στερεομικροσκόπιο για τους συμπιεσμένους ωμόπλινθους με χρώμα από την περιοχή του Τσερίου. α) Πυκνή δομή του υλικού, β) Μέτρια επιφανειακή τραχύτητα και απουσία χονδρόκοκκου υλικού, γ) Επιφανειακοί πόροι και δ) Επιφάνεια με αυξημένη συγκέντρωση πόρων.....	69
Εικόνα 41: Φωτογραφίες SEM για τους συμπιεσμένους ωμοπλίνθους με χρώμα από την περιοχή της Αλάμπρας. α) Ανομοιογενής μικροδομή, β) Κερματισμένη μικροδομή με αρκετούς πόρους και παρουσία πλακοειδών κρυστάλλων ασβεστίτη, γ) Προσανατολισμένες ρωγμές και δ) Κακή συνοχή κόκκου άμμου με το συνδετικό υλικό.....	70
Εικόνα 42: Φωτογραφίες SEM για τους συμπιεσμένους ωμόπλινθους με χρώμα από την περιοχή του Δελίκηπου. α) Ρωγμή στη διεπιφάνεια φυλλόμορφων – κοκκώδους υλικού, β) Ρωγμή, γ) Μέτρια συνοχή στη δεξιά πλευρά της διεπιφάνειας χονδρόκοκκου κλάσματος και συνδετικού υλικού και δ) Περιοχή με φυλλόμορφα ορυκτά, όπου παρατηρείται ένας μεγάλος πόρος.	70

Εικόνα 43: Φωτογραφίες SEM από τους συμπιεσμένους ωμοπλίνθους με χρώμα από το λατομείο Λατούρου. (α,β) Ρωγμή σε διαφορετικές μεγεθύνσεις, γ) Πόροι και δ) Μέτρια προς καλή συνοχή κόκκου με το συνδετικό.....	71
Εικόνα 44: Φωτογραφίες SEM από τους συμπιεσμένους ωμοπλίνθους με χρώμα από την περιοχή του Τσερίου. α) Συνεκτική μικροδομή, β) Πόροι ανάμεσα σε συσσωματώματα φυλλόμορφων, γ) Ρωγμή στη διεπιφάνεια κόκκου και συνδετικού υλικού και δ) Απολίθωμα το οποίο πληρώθηκε με εδαφικό υλικό.....	72
Εικόνα 45: Διαγράμματα θλιπτικών τάσεων-παραμορφώσεων σε ολόκληρα τούβλα συμπιεσμένων ωμοπλίνθων. α) ΣΩ με χρώμα Αλάμπρας, β) ΣΩ με χρώμα Δελίκηπου, γ) ΣΩ με χρώμα από το λατομείο Λατούρου και δ) ΣΩ με χρώμα Τσερίου.....	77
Εικόνα 46: Χαρακτηριστικές φωτογραφίες μορφών αστοχίας σε ολόκληρα τούβλα συμπιεσμένων ωμοπλίνθων. α) ΣΩ με χρώμα Αλάμπρας, β) ΣΩ με χρώμα Δελίκηπου, γ) ΣΩ με χρώμα από το λατομείο Λατούρου και δ) ΣΩ με χρώμα Τσερίου.....	78
Εικόνα 47: Διαγράμματα θλιπτικών τάσεων-παραμορφώσεων σε κυβικά δοκίμια ακμής 100 mm συμπιεσμένων ωμοπλίνθων. α) ΣΩ με χρώμα Αλάμπρας, β) ΣΩ με χρώμα Δελίκηπου, γ) ΣΩ με χρώμα από το λατομείο Λατούρου και δ) ΣΩ με χρώμα Τσερίου.....	78
Εικόνα 48: Χαρακτηριστικές φωτογραφίες μορφών αστοχίας σε κυβικά δοκίμια ακμής 100 mm συμπιεσμένων ωμοπλίνθων. α) ΣΩ με χρώμα Αλάμπρας, β) ΣΩ με χρώμα Δελίκηπου, γ) ΣΩ με χρώμα από το λατομείο Λατούρου και δ) ΣΩ με χρώμα Τσερίου.....	79
Εικόνα 49: Διαγράμματα θλιπτικών τάσεων-παραμορφώσεων σε πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 50 mm x 50 mm x 100 mm συμπιεσμένων ωμοπλίνθων. α) ΣΩ με χρώμα Αλάμπρας, β) ΣΩ με χρώμα Δελίκηπου, γ) ΣΩ με χρώμα από το λατομείο Λατούρου και δ) ΣΩ με χρώμα Τσερίου.....	80
Εικόνα 50: Χαρακτηριστικές φωτογραφίες μορφών αστοχίας σε πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 50 mm x 50 mm x 100 mm συμπιεσμένων ωμοπλίνθων. α) ΣΩ με χρώμα Αλάμπρας, β) ΣΩ με χρώμα Δελίκηπου, γ) ΣΩ με χρώμα από το λατομείο Λατούρου και δ) ΣΩ με χρώμα Τσερίου.....	80
Εικόνα 51: Επίδραση του μεγέθους του δοκμίου στη θλιπτική αντοχή.....	83
Εικόνα 52: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισεων στο μέσο της κάτω επιφάνειας συμπιεσμένων ωμοπλίνθων υπό δοκιμή κάμψης 3 σημείων. α) ΣΩ με χρώμα Αλάμπρας, β) ΣΩ με χρώμα Δελίκηπου, γ) ΣΩ με χρώμα από το λατομείο Λατούρου και δ) ΣΩ με χρώμα Τσερίου.....	84
Εικόνα 53: Χαρακτηριστικές φωτογραφίες μορφών αστοχίας συμπιεσμένων ωμοπλίνθων στη δοκιμή κάμψης 3 σημείων. α) ΣΩ με χρώμα Αλάμπρας, β) ΣΩ με χρώμα Δελίκηπου, γ) ΣΩ με χρώμα από το λατομείο Λατούρου και δ) ΣΩ με χρώμα Τσερίου.....	85
Εικόνα 54: Φωτογραφίες από αστοχία δοκμίων ΣΩ με χρώμα από το λατομείο Λατούρου κοντά στο στήριγμα στη δοκιμή κάμψης 3 σημείων α) Συνένωση ρωγμής αστοχίας με τις ρωγμές λόγω συμπίεσης, όπου με κίτρινα βέλη σημειώνονται οι κάθετες στη διεύθυνση της συμπίεσης ρωγμές και με λευκό η ρωγμή που δημιουργήθηκε κατά την αστοχία του δοκμίου και β) ρωγμή στην κάτω επιφάνεια.....	85
Εικόνα 55: Διάγραμμα συσχέτισης πυκνότητας – συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ΣΩ.....	87
Εικόνα 56: Διάγραμμα συσχέτισης θλιπτικής αντοχής, καμπτικής αντοχής και πυκνότητας ΣΩ.....	88
Εικόνα 57: Αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες δοκμίων συμπιεσμένων ωμοπλίνθων που υποβλήθηκαν στη δοκιμή της σταγόνας. α) ΣΩ με χρώμα από την περιοχή Αλάμπρας, β) ΣΩ με χρώμα από την περιοχή Δελίκηπου, γ) ΣΩ με χρώμα από το λατομείο Λατούρου και δ) ΣΩ με χρώμα από την περιοχή Τσερίου.....	90
Εικόνα 58: Αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες από δοκίμια συμπιεσμένων ωμοπλίνθων που υποβλήθηκαν στη δοκιμή ψεκασμού υπό πίεση. α) ΣΩ με χρώμα από την περιοχή Αλάμπρας, β) ΣΩ με χρώμα από την περιοχή Δελίκηπου, γ) ΣΩ με χρώμα από το λατομείο Λατούρου το οποίο διατρήθηκε πλήρως στα 8 λεπτά, δ) ΣΩ με χρώμα από το λατομείο Λατούρου το οποίο διατρήθηκε πλήρως στα 10 λεπτά, ε) ΣΩ με χρώμα από την περιοχή Τσερίου το οποίο διατρήθηκε πλήρως στα 14 λεπτά και στ) ΣΩ με χρώμα από την περιοχή Τσερίου το οποίο διατρήθηκε πλήρως στα 35 λεπτά.....	92
Εικόνα 59: Δοκίμια διαφόρων τύπων συμπιεσμένων ωμοπλίνθων που υποβλήθηκαν σε δοκιμή ψεκασμού υπό πίεση. α) Δοκίμιο με χρώμα από την περιοχή Δελίκηπου, όπου παρατηρείται ασθενές σημείο στο οποίο γίνεται μέτρηση, β), γ) και δ) Δοκίμια με χρώμα από τις περιοχές Δελίκηπου, Τσερίου και Αλάμπρας, αντίστοιχα, που παρουσιάζουν περίπου το ίδιο βάθος διάβρωσης, ωστόσο έχουν σημαντικές διαφορές στη γενική συμπεριφορά.....	95
Εικόνα 60: Φωτογραφία ΣΩ με χρώμα από την περιοχή Τσερίου στο οποίο παρατηρούνται εκτεταμένες crazing-type ρωγμές.....	95

Εικόνα 61: α) ΣΩ με χρώμα από την περιοχή Αλάμπρας, στο οποίο η μεγαλύτερη διάβρωση εντοπίζεται στη διεύθυνση μιας προυπάρχουσας ρωγμής, β) ΣΩ με χρώμα από την περιοχή Δελίκηπου, στο οποίο παρατηρούνται αστεροειδείς ρωγμές και διάβρωση στη διεπιφάνεια χονδρόκοκκων και συνδετικού υλικού, γ) ΣΩ με χρώμα από το λατομείο Λατούρου, στο οποίο παρατηρούνται αστεροειδείς ρωγμές και δ) ΣΩ με χρώμα από το λατομείο Λατούρου, στο οποίο παρατηρείται σημαντική απώλεια υλικού στη βάση.....	97
Εικόνα 62: Αντιπροσωπευτικές καμπύλες $i=f(t/2)$ με την χρήση νερού για τους 4 τύπους των υπό εξέταση συμπιεσμένων ωμοπλίνθων.	99
Εικόνα 63: Αντιπροσωπευτικές καμπύλες $i=f(t/2)$ με την χρήση ακετόνης για τους 4 τύπους των υπό εξέταση συμπιεσμένων ωμοπλίνθων.	100
Εικόνα 64: Διαγράμματα συσχέτισης μηχανικών χαρακτηριστικών και ανθεκτικότητας. α) Συντελεστής τριχοειδούς απορροφητικότητας vs. θλιπτική αντοχή, β) Συντελεστής τριχοειδούς απορροφητικότητας vs. καμπτική αντοχή, γ) Βάθος διάβρωσης (δοκιμή σταγόνας) vs. θλιπτική αντοχή, δ) Βάθος διάβρωσης (δοκιμή σταγόνας) vs. καμπτική αντοχή, ε) Ρυθμός διάβρωσης (δοκιμή ψεκασμού υπό πίεση) vs. θλιπτική αντοχή και στ) Ρυθμός διάβρωσης (δοκιμή ψεκασμού υπό πίεση) vs. καμπτική αντοχή.	103

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Κοκκομετρική διαβάθμιση εδαφών που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή ΣΩ....	20
Πίνακας 2: Τιμές ορίων συνεκτικότητας εδαφικού υλικού που προορίζεται για την παραγωγή ΣΩ.	21
Πίνακας 3: Αποτελέσματα δοκιμής Proctor εδαφικού υλικού που προορίζεται για την παραγωγή ΣΩ.	22
Πίνακας 4: Συντελεστές διόρθωσης τιμών θλιπτικής αντοχής.	23
Πίνακας 5: Συντελεστές διόρθωσης τιμών θλιπτικής αντοχής κατά EN 772-1 (2015).	23
Πίνακας 6: Διαθέσιμοι κανονισμοί για την παραγωγή ΣΩ.	30
Πίνακας 7: Όρια διαστάσεων ΣΩ που θέτουν οι διάφοροι κανονισμοί (Cid – Falceto et al., 2012).	31
Πίνακας 8: Ελάχιστες απαιτήσεις θλιπτικών αντοχών σε ξηρά και κορεσμένα δοκίμια ΣΩ (Cid – Falceto et al., 2012).	32
Πίνακας 9: Διαχωρισμός των εδαφικών υλικών βάσει της συνοχής τους (Volhard and Röhlen, 2007).	36
Πίνακας 10: Ακολουθία κοσκίνων.	40
Πίνακας 11: Χαρακτηρισμός δοκιμίων στη δοκιμή ψεκασμού υπό πίεση, βάσει βάθους διείδυσης και διείδυσης της υγρασίας (NZS 4298, 1998).	50
Πίνακας 12: Χαρακτηρισμός δοκιμίων στη δοκιμή της σταγόνας, βάσει βάθους τρύπας και διείδυσης υγρασίας (NZS 4298, 1998).	51
Πίνακας 13: Χρόνοι εμβάπτισης δοκιμίων στους κύκλους ύγρανσης/ξήρανσης (NZS 4298, 1998).	53
Πίνακας 14: Κατανομή κοκκομετρικών μεγεθών των 4 εδαφών που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.	55
Πίνακας 15: Όρια συνεκτικότητας και γραμμική συρρίκνωση των 4 εδαφών που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.	56
Πίνακας 16: Ενεργότητα των 4 εδαφών που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.	57
Πίνακας 17: Αποτελέσματα μέγιστης ξηρής πυκνότητας και βέλτιστης υγρασίας για τα 4 εδάφη που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.	58
Πίνακας 18: Πυκνότητες συμπίεσμένων ωμοπλίνθων.	75
Πίνακας 19: Θερμικά χαρακτηριστικά συμπίεσμένων ωμοπλίνθων.	76
Πίνακας 20: Μέτρο ελαστικότητας συμπίεσμένων ωμοπλίνθων.	81
Πίνακας 21: Θλιπτική αντοχή συμπίεσμένων ωμοπλίνθων.	82
Πίνακας 22: Καμπτική αντοχή συμπίεσμένων ωμοπλίνθων.	86
Πίνακας 23: Αποτελέσματα δοκιμής σταγόνας συμπίεσμένων ωμοπλίνθων.	90
Πίνακας 24: Αποτελέσματα δοκιμής ψεκασμού υπό πίεση συμπίεσμένων ωμοπλίνθων.	91
Πίνακας 25: Αποτελέσματα από την υποβολή των δοκιμίων σε κύκλους ύγρανσης/ξήρανσης.	96
Πίνακας 26: Εικόνες από την επίδραση των κύκλων ύγρανσης/ξήρανσης στα δοκίμια των υπό εξέταση συμπίεσμένων ωμοπλίνθων.	98
Πίνακας 27: Συντελεστής τριχοειδούς απορροφητικότητας για τους υπό εξέταση συμπίεσμένους ωμοπλίνθους.	101

1. Εισαγωγή

Η γήινη δόμηση είναι ίσως η αρχαιότερη μορφή δόμησης. Ακόμη και σήμερα, περίπου το 30% του παγκόσμιου πληθυσμού κατοικεί σε κατασκευές από γήινα υλικά (Houben and Guillaud, 1994; Minke, 2006). Με το πέρασ του χρόνου, τα γήινα δομικά υλικά παραγκωνίστηκαν, λόγω της εισαγωγής βιομηχανοποιημένων υλικών, όπως το σκυρόδεμα και οι οπτόπλινθοι. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια αναθέρμανση του ενδιαφέροντος για τα γήινα υλικά, λόγω της ανάγκης για αειφόρο ανάπτυξη και πράσινη δόμηση.

Οι τεχνικές δόμησης οι οποίες εφαρμόζονται στη γήινη αρχιτεκτονική είναι αρκετές, με τις πλέον γνωστές να είναι οι παραδοσιακοί ωμόπλινθοι, η συμπίεσμένη γη και οι συμπίεσμένοι ωμόπλινθοι. Οι συμπίεσμένοι ωμόπλινθοι αποτελούν μια σχετικά καινούρια τεχνική δόμησης, η οποία τα τελευταία χρόνια παρουσιάζει αυξημένο ενδιαφέρον ανάμεσα στην ερευνητική κοινότητα (Ruiz et al., 2018; Sitton et al., 2018). Αποτελούνται κυρίως από εδαφικό υλικό, το οποίο αναμιγνύεται με μικρή ποσότητα νερού, και ίσως κάποιο σταθεροποιητή, και συμπιέζεται με την χρήση κάποιας πρέσας, χωρίς να υποβάλλεται σε όπτηση. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των συμπίεσμένων ωμοπλίνθων είναι η χαμηλή εμπεριεχόμενη ενέργεια, η ικανότητα ρύθμισης του εσωτερικού κλίματος, και η πλήρης ανακυκλωσιμότητα των τελικών προϊόντων, ενώ τα κύρια μειονεκτήματά τους είναι η ευαισθησία στην επαφή τους με το νερό και η έλλειψη διεθνών κανονιστικών εγγράφων που να διέπουν τη δόμηση με αυτά τα υλικά (Houben and Guillaud, 1994; Minke, 2013).

Στην Κύπρο, η παραγωγή των συμπίεσμένων ωμοπλίνθων γίνεται από ένα τοπικό παραγωγό, ο οποίος παράγει μη-σταθεροποιημένους συμπίεσμένους ωμόπλινθους. Ωστόσο, η ευαισθησία των τελικών προϊόντων στην επαφή τους με το νερό, σε συνδυασμό με την απουσία διεθνών ή τοπικών κανονιστικών εγγράφων ή/και σχετικών πληροφοριών σε ότι αφορά τα χαρακτηριστικά τους, αυξάνει την δυσπιστία των μελετητών, με αποτέλεσμα να μην προτείνουν τα υλικά αυτά στους τελικούς χρήστες. Έτσι, οι τοπικοί συμπίεσμένοι ωμόπλινθοι αδυνατούν να ενταχθούν στη σύγχρονη οικοδομική βιομηχανία.

1.1 Σκοπός εργασίας

Οι συμπίεσμένοι ωμόπλινθοι είναι καινούριο υλικό στην οικοδομική βιομηχανία της Κύπρου, χωρίς ουσιαστική συμμετοχή στην αγορά των δομικών υλικών που χρησιμοποιούνται στο νησί. Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο την εργαστηριακή μελέτη των συμπίεσμένων ωμοπλίνθων που παράγονται στην Κύπρο, με έμφαση στη μελέτη της ανθεκτικότητάς τους στο χρόνο.

Οι κυριότεροι στόχοι της παρούσας εργασίας είναι:

- Ανάλυση και χαρακτηρισμός των εδαφών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή συμπίεσμένων ωμοπλίνθων στην Κύπρο.

- Διερεύνηση των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των παραγόμενων συμπιεσμένων ωμοπλίνθων στην Κύπρο.
- Διερεύνηση της ανθεκτικότητάς τους στο χρόνο, με έμφαση στην καταστρεπτική επίδραση του νερού.

Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την παρούσα εργασία έχουν ως στόχο την ενίσχυση της υφιστάμενης γνώσης για τους συμπιεσμένους ωμόπλινθους, και αναμένεται να αποτελέσουν τη βάση για μελλοντική έρευνα στο πεδίο αυτό.

1.2 Δομή εργασίας

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια προσπάθεια για καταγραφή της ιστορίας και της γεωγραφικής εξάπλωσης της γήινης αρχιτεκτονικής, περιγράφονται οι διάφορες τεχνικές γήινης δόμησης, και παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρήσης του εδάφους ως δομικό υλικό.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται ο βασικός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την παραγωγή συμπιεσμένων ωμόπλινθων και η διαδικασία που ακολουθείται, γίνεται ανασκόπηση της βιβλιογραφίας σχετικά με τις ιδιότητες της πρώτης ύλης και του τελικού προϊόντος και, τέλος, γίνεται σύγκριση των κανονιστικών εγγράφων που διέπουν τη δόμηση με συμπιεσμένους ωμόπλινθους.

Στο κεφάλαιο 4 αναλύεται ο τρόπος παραγωγής και η πειραματική προσέγγιση που ακολουθήθηκε για τη μελέτη των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων της Κύπρου. Αρχικά, περιγράφεται η πρώτη ύλη που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των υλικών και ο τρόπος με τον οποίο έγινε ο χαρακτηρισμός της. Ακολούθως, γίνεται αναφορά στον τρόπο παραγωγής των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων και στην αποθήκευσή τους. Τέλος, περιγράφονται οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για τον προσδιορισμό των φυσικό-μηχανικών ιδιοτήτων και της ανθεκτικότητας των τελικών προϊόντων.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων που παράγονται στην Κύπρο. Αρχικά, παρουσιάζεται η μελέτη και ο χαρακτηρισμός των εδαφικών πρώτων υλών, στη συνέχεια γίνεται η μακροσκοπική και μικροσκοπική εξέταση των δειγμάτων των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων και τέλος, εξετάζονται οι διάφορες φυσικομηχανικές ιδιότητες τους.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η μελέτη της ανθεκτικότητας των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων. Αρχικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές, και στη συνέχεια αυτά συγκρίνονται μεταξύ τους για την εκτίμηση της ανθεκτικότητας των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων.

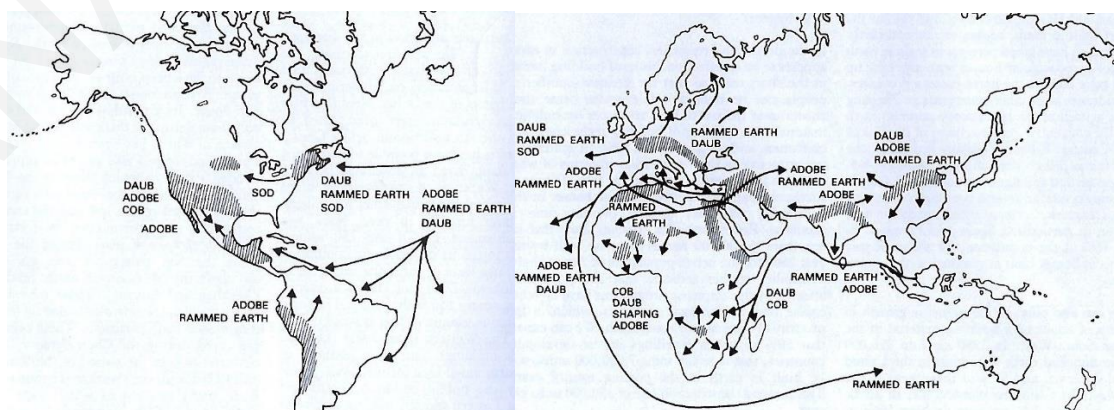
Στο κεφάλαιο 7 γίνεται παράθεση των συμπερασμάτων που προέκυψαν από τη μελέτη των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων που παράγονται στην Κύπρο και εισηγήσεις για μελλοντική έρευνα στο πεδίο των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων.

2. Γήινη αρχιτεκτονική

Η γήινη δόμηση αποτελεί μια από τις αρχαιότερες μορφές κατασκευής καταλυμάτων από τους ανθρώπους. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια προσπάθεια για καταγραφή της ιστορίας και της γεωγραφικής εξάπλωσης της γήινης αρχιτεκτονικής, περιγράφονται οι διάφορες τεχνικές γήινης δόμησης, και παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρήσης του εδάφους ως δομικό υλικό.

2.1 Ιστορική αναδρομή

Η ακριβής χρονολογία εκκίνησης χρήσης της γης ως οικοδομικό υλικό δεν είναι καταγεγραμμένη, αφού γενικώς η καταγραφή της ιστορίας που σχετίζεται με αυτό το είδος δόμησης είναι σχετικά ελλιπής (Houben and Guillaud, 1994). Σύμφωνα με τον Minke (2006), η χρήση γήινων υλικών, συγκεκριμένα ωμόπλινθων, έγινε για πρώτη φορά πέραν των 9000 χρόνων πριν. Οι Costa et al. (2018), υποστηρίζουν ότι η δόμηση με γήινα υλικά ξεκίνησε το 10000 π.Χ. στη Μεσοποταμία και ακολούθως έγινε διασπορά της σε ολόκληρο τον πλανήτη (Εικ. 1). Τα πρώτα ευρήματα χρονολογούνται στο όριο της Παλαιολιθικής και Νεολιθικής εποχής, όπου στην περιοχή της τότε «εύφορης ημισελήνου», τα δομικά στοιχεία αποτελούνταν από ξύλο και εδαφικό υλικό, που χρησίμευε, είτε ως υλικό πλήρωσης, είτε ως επίχρισμα (Bicakci, 2003). Καθώς οι κοινωνίες προόδευαν, οι τεχνικές εξελίσσονταν και νέες μορφές γήινων δομικών υλικών έκαναν την εμφάνισή τους. Η εξέλιξη αυτή έφερε στο φως μια νέα τεχνική, κατά την οποία μικρές μπάλες υγρού εδάφους στοιβάζονταν και πιέζονταν για να φτιάξουν δομικά στοιχεία (Sauvage, 2009, De Chazelles, 2010). Παράλληλα, ξεκίνησε η χειρωνακτική παραγωγή τούβλων με εδαφικό υλικό, τα οποία ξηραίνονταν στον ήλιο (παραδοσιακοί ωμόπλινθοι). Στην περιοχή του σημερινού Καζακστάν, υπάρχουν κτίσματα από ωμόπλινθους που χρονολογούνται μεταξύ 8000 – 6000 π.Χ. (Minke, 2006). Στην Αφρική, με την εγκαθίδρυση της δυναστείας των Αιγυπτίων (2900 π.Χ.), παρατηρείται σημαντικός αριθμός οικοδομημάτων, σπιτιών, χώρων λατρείας ή αργότερα τάφων (Εικ. 2), χτισμένων με γήινα υλικά (Houben and Guillaud, 1994).



Εικόνα 1: Χάρτες στους οποίους φαίνεται η διασπορά της γήινης αρχιτεκτονικής ανά το παγκόσμιο, όπως και οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές ανά περιοχή. Αριστερά παρατηρείται η διασπορά στην Αμερικανική ήπειρο και δεξιά στον υπόλοιπο κόσμο (Houben and Guillaud, 1994).

Σύμφωνα με τους Costa et al. (2018) και τους Houben and Guillaud (1994), στην Ευρώπη η πρώτη χρήση γήινων δομικών υλικών παρατηρείται στην Ελλάδα, και συγκεκριμένα στον οικισμό του Σέσκλου, γύρω στο 5000 π.Χ., όπου βρέθηκαν κτίσματα με ωμόπλινθους πάνω σε βάση από πέτρα. Η χρήση γήινων υλικών ακολούθως εξαπλώθηκε περαιτέρω στην Ευρώπη, αφού και άλλοι πολιτισμοί του Ελλαδικού χώρου χρησιμοποίησαν τη γη, όπως επίσης και πολιτισμοί των παραδουνάβιων περιοχών, που συνδύασαν το χώμα με το ξύλο. Ο Minke (2006) αναφέρει ότι έγινε ευρεία χρήση του εδάφους ως υλικό πλήρωσης σε ξύλινα πλαίσια στην Ευρωπαϊκή ήπειρο από τον 13^ο – 17^ο μ.Χ. αιώνα.

Η χρήση των γήινων δομικών υλικών στην Κύπρο ξεκίνησε τη νεολιθική εποχή (Φιλοκύπρου, 1999). Η βασικότερη τεχνική που χρησιμοποιήθηκε ήταν οι ωμόπλινθοι (Ilambas et al., 2011), ενώ υπήρξε σε πολύ περιορισμένη έκταση η χρήση μιας τεχνικής παραπλήσιας με τη συμπίεσμένη γη (Philokyrou, 2015). Η χρήση ωμοπλίνθων στην Κύπρο γινόταν κατά κόρον στις πεδινές περιοχές, όπου υπήρχε σε αφθονία το εδαφικό υλικό (Ilambas et al., 2011). Η εκτεταμένη χρήση τους συνέχισε μέχρι και τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, οπότε η εισαγωγή βιομηχανοποιημένων υλικών, εκτόπισε τη γήινη δόμηση (Costi et al., 2017, Ilambas et al., 2011).



Εικόνα 2: Θόλοι από το ναό του Ραμσή Β' στη Gourna της Αιγύπτου (Minke, 2006).

Η παρουσία κατασκευών με γήινα υλικά είναι εμφανής σε όλα σχεδόν τα σημεία του πλανήτη. Οι Houben and Guillaud (1994) κάνουν αναφορά σε μια καταμέτρηση που έγινε στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής το 1980, όπου παρατηρήθηκε ότι 176,000 σπίτια είναι χτισμένα με γήινα υλικά, με τον κύριο όγκο τους να συναντάται στον Νότο. Από αυτή τη μελέτη, φαίνεται ότι, αν και η γήινη αρχιτεκτονική με το πέρασ του χρόνου εγκαταλείπεται, υπάρχει ακόμη σημαντικό απόθεμα κτηρίων τα οποία έχουν ως κύριο δομικό υλικό το έδαφος.

Η εξάπλωση της γήινης αρχιτεκτονικής σε ολόκληρο τον πλανήτη οφείλεται στην ευκολία και απλότητα που την χαρακτηρίζουν (Costa et al, 2018). Πέραν όμως από τη γεωγραφική της εξάπλωση, η γήινη αρχιτεκτονική διατηρήθηκε για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα στο προσκήνιο

ως ένας σημαντικός τύπος δόμησης. Βέβαια, δεν μπορεί να γίνεται λόγος για ένα συγκεκριμένο τρόπο δόμησης, αφού η γήινη αρχιτεκτονική περιλαμβάνει αρκετές διαφορετικές τεχνικές με πρώτη ύλη το έδαφος, οι οποίες με το πέρασ του χρόνου εξελίχθηκαν για να έχουν καλύτερο αποτέλεσμα.

2.2 Τεχνικές δόμησης

Η γήινη αρχιτεκτονική περιλαμβάνει αρκετούς διαφορετικούς τρόπους δόμησης. Με το πέρασ του χρόνου και την εμπειρία που συλλέχθηκε, οι διάφορες τεχνικές βελτιώνονταν, δίνοντας έτσι καλύτερο αποτέλεσμα, τόσο ως προς την άνεση του χώρου, τη στατική επάρκεια, την ανθεκτικότητα, αλλά και την αισθητική του κτηρίου. Στην ανάπτυξη και χρήση μιας τεχνικής, κύριο ρόλο διαδραμάτιζε η παρουσία των υλικών που χρειάζονταν στην περιοχή, όπως το έδαφος, οι φυσικές ίνες και το ξύλο.



Εικόνα 3: Κατηγορίες τεχνικών γήινης δόμησης (Houben and Guillaud, 1994, τροποποιημένο από τον συγγραφέα).

Σύμφωνα με τους Houben and Guillaud (1994), οι τεχνικές γήινης δόμησης χωρίζονται σε 12 κύριες κατηγορίες (Εικ. 3). Ο διαχωρισμός τους σε αυτές τις κατηγορίες γίνεται κυρίως με βάση τον τρόπο κατασκευής. Σε αυτές τις κατηγορίες γίνεται και επιμέρους διαχωρισμός σε διαφορετικές υπο-κατηγορίες, ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των δομικών στοιχείων. Δεν χρησιμοποιούνται όμως όλες οι τεχνικές γήινης δόμησης στον ίδιο βαθμό, καθώς κάποιες αναφέρονται σε μεμονωμένες χρήσεις. Οι πλέον γνωστές τεχνικές αφορούν την χρήση ωμόπλινθων (adobes) και συμπίεσμνης γης (rammed earth), ενώ γνωστές είναι επίσης οι τεχνικές straw – clay, wattle and daub και cob, όπως επίσης η απευθείας μορφοποίηση του υλικού (direct shaping), και η χρήση συμπίεσμένων ωμόπλινθων.

Οι ωμόπλινθοι είναι πλίνθοι από εδαφικό υλικό, οι οποίοι ξηραίνονται υπό σκιά. Το εδαφικό υλικό που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ωμόπλινθων είναι λεπτόκοκκο και συνήθως

αναμιγνύεται με φυσικές ίνες, κυρίως άχυρο. Στο μείγμα προστίθεται νερό και αφήνεται σε ηρεμία για κάποιο χρονικό διάστημα μέχρι να αποκτήσει ομοιογένεια. Η παραγόμενη λάσπη τοποθετείται σε καλούπια. Ακολούθως, το καλούπι αφαιρείται και αφήνεται ο ωμόπλινθος να ξηραθεί. Όταν η ξήρανση στις εμφανείς πλευρές είναι ικανοποιητική, τότε ο πλίνθος περιστρέφεται, ούτως ώστε να ξηραθεί και η μη εκτεθειμένη στον ήλιο πλευρά. Στη συνέχεια, το υλικό τοποθετείται σε παλέτες για να μπορεί να μεταφερθεί στον χώρο χρήσης. Παραδοσιακά, όλες οι διαδικασίες γίνονταν χειρωνακτικά, ωστόσο τα τελευταία χρόνια έχουν διεισδύσει στην παραγωγή και μηχανικά μέσα, τα οποία επισπεύδουν τη διαδικασία.

Η τεχνική της συμπίεσμνης γης, όπως μαρτυρά και το όνομα της, αφορά την χρήση εδαφικού υλικού το οποίο συμπιέζεται με ειδικούς κόπανους. Το μείγμα είναι ύφυργο, δηλαδή χρησιμοποιείται μικρή ποσότητα νερού κατά την ανάμιξη, και έτσι τα δομικά στοιχεία δεν χρειάζονται ξήρανση πριν την τοποθέτηση. Το εδαφικό υλικό τοποθετείται μέσα σε καλούπια και συμπιέζεται με τους κόπανους σε διαδοχικές στρώσεις. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί το δομικό στοιχείο. Το αποτέλεσμα που προκύπτει από αυτή την τεχνική είναι μονολιθικές τοιχοποιίες. Σημαντική χρήση της συμπίεσμνης γης παρατηρείται στη Γαλλία και τη Γερμανία από το 15^ο – 19^ο μ.Χ. αιώνα, οπότε συναντάται και η ψηλότερη κατασκευή στην Ευρώπη, χτισμένη με αυτό τον τρόπο (Εικ. 4).



Εικόνα 4: Κατασκευή από συμπίεσμνη γη στην περιοχή Weilburg της Γερμανίας (έτος δόμησης 1828).

Η τεχνική straw – clay ουσιαστικά αφορά την ανάμιξη αχύρου και εδάφους με νερό. Το έδαφος που χρησιμοποιείται σε αυτήν την περίπτωση είναι αργιλώδες και αναμιγνύεται με νερό για να φτιάξει ένα παχύρευστο χυλό, του οποίου ο ρόλος είναι να προσδώσει συνοχή στο άχυρο. Με αυτόν τον τρόπο φτιάχνονται χαμηλού ειδικού βάρους στοιχεία, που χρησιμοποιούνται ως μονωτικά. Εναλλακτικά, μπορούν επίσης να κατασκευαστούν και πλίνθοι με το ίδιο μείγμα.

Η τεχνική wattle and daub αποτελεί μια σύνθετη τεχνική στην οποία χρησιμοποιούνται τόσο κάθετα, όσο και οριζόντια ξύλινα στοιχεία, τα οποία γεμίζουν με εδαφικό υλικό. Τα φέροντα στοιχεία της κατασκευής ουσιαστικά αποτελούνται από ξύλο, και το διάκενο γεμίζει με πλέγμα από κλαδιά ή καλάμια. Το πλέγμα ακολούθως επιχρίεται με λάσπη από αργιλώδες χώμα και κάποιου είδους φυσική ίνα. Με την προσθήκη της φυσικής ίνας, περιορίζεται η συρρίκνωση της λάσπης. Οι Houben and Guillaud (1994) αναφέρουν την εξάπλωση της τεχνικής wattle and daub στην Αμερική το 700 – 1100 μ.Χ..

Η απευθείας μορφοποίηση του υλικού αναφέρεται στην τεχνική χρήσης του χώματος σε πλάσιμη μορφή και το πλάσιμο του, ούτως ώστε να του δοθεί το επιθυμητό σχήμα. Είναι από τις

παλαιότερες τεχνικές γήινης δόμησης, απαντάται σε πάρα πολλές χώρες και δεν χρειάζεται οποιοσδήποτε εξοπλισμός για την κατασκευή της, αφού η εργασία γίνεται αποκλειστικά χειρωνακτικά.

Η τεχνική cob είναι παρόμοια με την τεχνική της συμπιεσμένης γης. Τοποθετούνται σε καλούπια μικρές μπάλες από μείγμα νερού και εδαφικού υλικού, οι οποίες ακολούθως πιέζονται με τη δύναμη των χεριών ή των ποδιών. Έτσι δημιουργείται ένα μονολιθικό στοιχείο τοιχοποιίας.

Οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι αποτελούν την “εξέλιξη” των παραδοσιακών ωμοπλίνθων. Το μείγμα ωστόσο που χρησιμοποιείται είναι ύφυγρο και συνήθως χωρίς την παρουσία φυσικών ινών. Το έδαφος τοποθετείται σε καλούπι, το οποίο συμπιέζεται με την χρήση μοχλού ή μηχανικού εμβόλου, ανάλογα με το διαθέσιμο εξοπλισμό, φτιάχνοντας έτσι πλίνθους με μεγαλύτερο ειδικό βάρος. Η καινοτομία σε σχέση με τους παραδοσιακούς ωμόπλινθους είναι οι βελτιωμένες αντοχές των τελικών προϊόντων.

Ακόμη και από τις πιο πάνω τεχνικές, που θεωρούνται ως οι πλέον γνωστές, μόνο οι ωμόπλινθοι, οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι και η συμπιεσμένη γη αποτελούν αντικείμενο μελέτης τον 21^ο αιώνα. Η μελέτη εστιάζει κυρίως στη βελτιστοποίηση της παραγωγής του υλικού και τη βελτίωση των χαρακτηριστικών του, για να μπορεί να είναι αποδεκτό για δόμηση, καθώς επίσης και στον καταρτισμό κανονιστικών εγγράφων, τα οποία θα βοηθήσουν στην επανένταξη της γήινης δόμησης στη σύγχρονη αρχιτεκτονική.

2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Η χρήση του εδάφους ως δομικό υλικό, όπως προαναφέρθηκε, ξεκίνησε πριν από περίπου 10,000 χρόνια. Ωστόσο, με την έλευση νέων βιομηχανοποιημένων δομικών υλικών με καλύτερες ιδιότητες, όπως το σκυρόδεμα, το έδαφος παραγκωνίστηκε μέχρι τα τέλη του 20^{ου} αιώνα, οπότε και ανάκτησε πάλι κάποιο ενδιαφέρον στο πλαίσιο της αειφόρου δόμησης (Minke G., 2006).

Η βασικότερη αδυναμία των εδαφικών υλικών είναι η χαμηλή αντίστασή τους στην επίδραση του νερού (Minke, 2006). Όταν το έδαφος έρθει σε επαφή με το νερό, τότε αυτό αποσυντίθεται, χαλαρώνει η δομή του, με καταστροφικά αποτελέσματα. Σημαντική, επίσης, είναι η παρουσία αργίλων στο έδαφος, οι οποίες διογκώνονται με την προσρόφηση νερού, οδηγώντας τα εδαφικά υλικά σε αστοχία. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, τα σύγχρονα κτήρια με γήινα υλικά έχουν προεξοχές στις οροφές και επιχρίονται με κατάλληλα επιχρίσματα για προστασία από τη βροχή. Επίσης, τοποθετείται υδαταπωθητική μεμβράνη στα θεμέλια για προστασία από την ανερχόμενη υγρασία.

Όσο πρόβλημα δημιουργεί το νερό στο κτήριο κατά τη διάρκεια της ζωής του, άλλο τόσο σημαντικό είναι κατά την παραγωγή των διαφόρων μορφών γήινων δομικών υλικών. Το νερό κατά την παραγωγή χρησιμοποιείται για να προσδώσει στο μείγμα εργασιμότητα και να ενεργοποιήσει τις δυνάμεις συνοχής του εδάφους (Minke, 2006). Στην πορεία όμως, εξατμίζεται λόγω της ξήρανσης, οπότε είναι αναπόφευκτη η συρρίκνωση του υλικού και η δημιουργία ρωγμών. Με αυτό

τον τρόπο, μειώνεται η ανθεκτικότητα του υλικού στο χρόνο, αφού καθίσταται περισσότερο ευάλωτο στις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Ως φυσικό υλικό, το έδαφος δεν μπορεί παρά να διαφέρει από περιοχή σε περιοχή. Οι ιδιότητες του ποικίλουν, ανάλογα με την γεωλογία της εκάστοτε περιοχής και τις συνθήκες που επικρατούν ή που επικρατούσαν στο γεωλογικό χρόνο. Η ανομοιομορφία που παρατηρείται κάνει επιβεβλημένη τη μελέτη του κάθε εδαφικού υλικού, προτού αυτό χρησιμοποιηθεί, ούτως ώστε να διαφανεί εάν είναι κατάλληλο για χρήση. Τα εδάφη με τα μεγαλύτερα προβλήματα είναι τα αργιλικά που παρουσιάζουν φαινόμενα διογκώσεων και συρρικνώσεων, ανάλογα με την παρουσία του νερού.

Πέραν όμως από τις εγγενείς αδυναμίες που παρουσιάζουν τα γήινα υλικά, ίσως ο κυριότερος λόγος που εγκαταλείφθηκαν και δυσκολεύονται να επανενταχθούν στη σύγχρονη αρχιτεκτονική, είναι η έλλειψη κανονιστικών εγγράφων. Τα έγγραφα αυτά ουσιαστικά δίνουν τις κατευθυντήριες γραμμές, γύρω από τις οποίες ο μελετητής, ο εργολάβος ή ο χρήστης κινούνται για να έχουν μια ασφαλή κατασκευή. Η διατύπωσή τους γίνεται μέσα από συστηματική μελέτη ενός υλικού, τόσο εργαστηριακά όσο και στο πεδίο, καθορίζοντας τις βασικές πτυχές της επιλογής πρώτων υλών, της παραγωγής του υλικού, της κατασκευής και της συντήρησής του. Με την παρουσία κανονιστικών εγγράφων, εξασφαλίζεται σε μεγάλο βαθμό η αξιοπιστία του υλικού και του τελικού αποτελέσματος. Για αυτό, τα έγγραφα αυτά αποτελούν σημαντικό εργαλείο για τους μελετητές.

Συνήθως, υπάρχουν διεθνή πρότυπα που διέπουν κάθε υλικό, αλλά και τοπικά έγγραφα τα οποία ρυθμίζουν κάποιες ιδιαιτερότητες των υλικών, ανάλογα με την περιοχή μελέτης. Τέτοια έγγραφα υπάρχουν για υλικά όπως το σκυρόδεμα και το ξύλο, αλλά όχι για τα γήινα υλικά. Αυτό βέβαια ισχύει για το διεθνές επίπεδο, καθώς κάποιες χώρες, μεμονωμένα, έχουν προχωρήσει στην εκπόνηση κανονιστικών εγγράφων για τα γήινα υλικά που αφορούν κυρίως την επικράτειά τους. Η απουσία των κανονιστικών εγγράφων έχει ως επακόλουθο τη μείωση της αξιοπιστίας των γήινων υλικών και τον παραγκωνισμό τους.

Πέραν όμως από το τεχνικό κομμάτι, υπάρχουν και άλλοι λόγοι παραγκωνισμού των γήινων υλικών. Τα υλικά αυτά δεν τυγχάνουν, πλέον, κοινωνικής αποδοχής, αφού έχουν συνδεθεί με τις κατώτερες κοινωνικές τάξεις και, συχνά, με φτωχό αισθητικό αποτέλεσμα (Rigassi, 1995). Παρόλο που δεν μπορεί να θεωρηθεί ως μειονέκτημα των γήινων υλικών η κοινωνική αποδοχή τους, ωστόσο αποτελεί σημαντικό αποτρεπτικό παράγοντα στην χρήση τους.

Προς το τέλος του 20^{ου} αιώνα, τα γήινα υλικά άρχισαν να ανακτούν ένα μέρος της παλιάς τους αίγλης. Αυτό οφείλεται κυρίως στην αναζήτηση δομικών υλικών που να είναι φιλικότερα προς το περιβάλλον. Έτσι, ξεκίνησε μια εποχή στην οποία όλο και περισσότεροι ερευνητές ασχολούνται με τη μελέτη γήινων υλικών. Η γνώση που υπήρχε γύρω από αυτά τα υλικά μέχρι πρόσφατα ήταν κυρίως εμπειρική, και αποτέλεσε τη βάση πάνω στην οποία ξεκίνησε η μελέτη τους από τους επιστήμονες. Μέσα από αυτή την προσπάθεια, φάνηκε ότι υπάρχουν σημαντικά πλεονεκτήματα των γήινων υλικών, έναντι των υπόλοιπων ευρέως χρησιμοποιούμενων δομικών υλικών, τα οποία

μπορούν να βοηθήσουν την ανθρωπότητα στην προσπάθειά της να πορευθεί σε μια περιβαλλοντικά ορθή και αειφόρο ανάπτυξη.

Σύμφωνα με τον Minke (2006), τα κυριότερα πλεονεκτήματα των γήινων υλικών πηγάζουν μέσα από τη βελτίωση του εσωτερικού κλίματος των κτηρίων, και του μειωμένου περιβαλλοντικού αντικτύπου τους. Ο μειωμένος περιβαλλοντικός αντίκτυπος αυτών των υλικών οφείλεται στη μείωση των αναγκών για μεταφορά των πρώτων υλών, αφού το χώμα που αφαιρείται για τη θεμελίωση του κτηρίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρασκευή τους. Οπότε, μειώνεται σημαντικά η κατανάλωση ενέργειας και οι εκπομπές ρύπων. Σε σύγκριση με τους οπτόπλινθους ή τα τσιμεντότουβλα, παρατηρούνται 46% μειωμένες εκπομπές άνθρακα στους σταθεροποιημένους συμπίεσμένους ωμόπλινθους (Dahmen et al., 2018). Οι Fernandes et al. (2019), σε μια cradle-to-gate μελέτη κύκλου ζωής, αναφέρουν ότι για επιφάνεια 1 m² συμπίεσμένης γης ή συμπίεσμένων ωμοπλίνθων αντιστοιχεί ½ m² τσιμεντότουβλων ή οπτόπλινθων, συμπεράσμα το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι το 80% της ενέργειας που χρειάζονται τα υλικά αυτά αντιστοιχεί στα μεταφορικά. Η μείωση των μεταφορικών δεν επιφέρει μόνο περιβαλλοντικά οφέλη, αλλά και οικονομικά. Τα γήινα υλικά, λόγω της μικρότερης ανάγκης τους σε μεταφορικά, είναι συχνά πιο οικονομικά (Minke, 2006) από τα υπόλοιπα υλικά. Αυτό μεταφράζεται και σε μειωμένο κόστος της κατασκευής συνολικά. Επίσης, με την χρήση εδάφους από το εργοτάξιο, αποφεύγεται και η αγορά εδαφικού υλικού από κάποιο λατομείο ή/και η μεταφορά και απόρριψη του υλικού εκσκαφής σε κάποια χωματερή. Οπότε, το κόστος και πάλι περιορίζεται σημαντικά.

Σημαντικό πλεονέκτημα των γήινων δομικών υλικών είναι η βελτίωση του εσωτερικού κλίματος του κτηρίου. Τα υλικά αυτά έχουν την ιδιότητα να απορροφούν και να αποδεσμεύουν υγρασία με μεγαλύτερη ευκολία, σε σχέση με τα συμβατικά δομικά υλικά. Η ιδιότητα τους αυτή τα κάνει ικανά να δρουν ως σταθεροποιητές της υγρασίας στον χώρο, με αποτέλεσμα καλύτερες συνθήκες διαβίωσης. Όσον αφορά τη θερμότητα, τα γήινα υλικά έχουν μεγάλη ειδική θερμοχωρητικότητα, οπότε έχουν την τάση να συγκρατούν, στη μάζα τους, μεγάλα ποσοστά θερμότητας, και να τα αποδεσμεύουν μετά από σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτό βοηθά στην καλύτερη διαχείριση της θερμοκρασίας του χώρου, ειδικά σε περιοχές με μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές (Minke, 2006). Επίσης, τα γήινα υλικά έχουν την ικανότητα να απορροφούν κάποιους ρυπαντές, όπως τα φωσφορικά από το νερό, με αποτέλεσμα να βελτιώνουν την υγιεινή του χώρου. Έτσι, τα κτήρια που είναι κατασκευασμένα από γήινα υλικά παρουσιάζουν καλύτερες συνθήκες χώρου, με αποτέλεσμα να δρουν θετικά στην υγεία των κατοίκων.

Σημαντικό επίσης πλεονέκτημα των γήινων υλικών, έναντι άλλων υλικών, είναι η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης ή πλήρους ανακύκλωσης τους με το τέλος της διάρκειας ζωής ενός έργου. Επιπλέον, με αυτά τα υλικά παρέχεται στον χρήστη η δυνατότητα αυτοδομήσης. Παραδοσιακά, η δόμηση με τέτοιου τύπου υλικά γινόταν από μαστόρους οι οποίοι βασίζονταν σε εμπειρικές παρατηρήσεις και όχι σε επιστημονικά δεδομένα. Αυτό από μόνο του δείχνει ότι δεν χρειάζεται ιδιαίτερη γνώση για να μπορέσει κάποιος να κατασκευάσει π.χ. μια κατοικία με γήινα υλικά. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τα λίγα και φτηνά εργαλεία που χρειάζονται, δείχνει ότι

η αυτοδόμηση είναι κάτι το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί σε αυτήν την περίπτωση, φτάνει να υπάρχει κάποιος έμπειρος μελετητής, ο οποίος θα επιβλέπει το έργο (Minke, 2006).

ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΥ ΡΑΦΑΗΛ

3. Συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι

Οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι, γνωστοί στην διεθνή βιβλιογραφία ως compressed earth blocks ή CEBs, είναι τούβλα τα οποία κατασκευάζονται με χώμα, νερό, ίσως κάποιο σταθεροποιητή και εφαρμογή πίεσης, χωρίς να υποβάλλονται σε οποιαδήποτε διαδικασία όπτησης. Είναι μια σχετικά καινούρια μορφή γήινου δομικού υλικού (Sitton et al, 2018). Το κύριο πλεονέκτημα των συμπιεσμένων ωμόπλινθων, όπως και των υπολοίπων γήινων υλικών, είναι ότι το βασικό τους συστατικό είναι το χώμα, που βρίσκεται σε αφθονία παντού. Έτσι, οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι μπορούν να χαρακτηριστούν ως ένα υλικό «πράσινης δόμησης» με περιβαλλοντικά φιλική διάσταση (El Fgaier et al, 2016).

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται, αρχικά, ο βασικός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την παραγωγή συμπιεσμένων ωμόπλινθων και η διαδικασία που ακολουθείται. Στη συνέχεια, γίνεται ανασκόπηση της βιβλιογραφίας σχετικά με τις ιδιότητες της πρώτης ύλης και του τελικού προϊόντος. Τέλος, γίνεται σύγκριση των κανονιστικών εγγράφων που διέπουν τη δόμηση με συμπιεσμένους ωμόπλινθους.

3.1 Παραγωγή συμπιεσμένων ωμόπλινθων

3.1.1 Εξοπλισμός

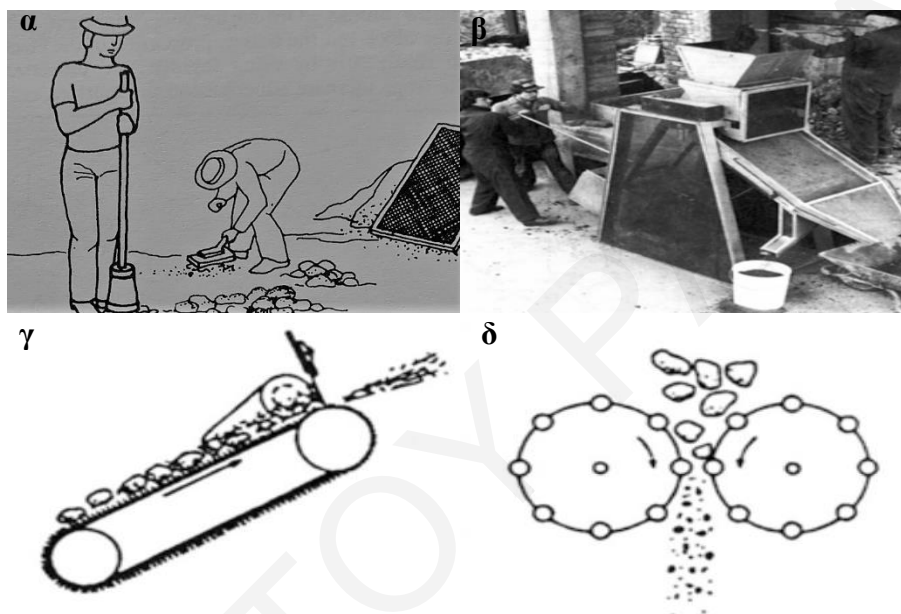
3.1.1.1 Σπαστήρες

Πολλές φορές, το εδαφικό υλικό που αποτελεί την πρώτη ύλη για την παραγωγή συμπιεσμένων ωμόπλινθων περιέχει μεγαλύτερους κόκκους από τη μέγιστη επιθυμητή διάμετρο. Για τη μείωση του μεγέθους των κόκκων του εδαφικού υλικού, συνήθως προηγείται θραύση, πριν την ανάμιξή του. Υπάρχουν αρκετοί τρόποι θραύσης της πρώτης ύλης, τόσο χειρωνακτικοί, όσο και με την χρήση μηχανικών μέσων. Γενικά αυτοί διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: το άλεσμα (grinding), το οποίο συνήθως ακολουθείται από κοσκίνισμα, και την κονιοποίηση (pulverization), όπου συνήθως δεν χρειάζεται κοσκίνισμα (Houben and Guillaud, 1994).

Η διαδικασία θραύσης του εδαφικού υλικού παραδοσιακά γινόταν χειρωνακτικά. Οι εργάτες χτυπούσαν το εδαφικό υλικό με ειδικά σφυριά για να μειώσουν το μέγεθος των κόκκων (Εικ. 5α). Η συγκεκριμένη μέθοδος ήταν αργή και προϋπόθετε κοσκίνισμα στη συνέχεια, αφού οι εδαφικοί κόκκοι έσπαζαν σε διάφορα μεγέθη, χωρίς κάποια βεβαιότητα για το μέγιστο μέγεθος. Στις χειρωνακτικές μεθόδους εντάσσονται και οι περιστροφικοί μύλοι. Μια τρίτη μορφή χειρωνακτικής θραύσης εδαφικού υλικού είναι ο σπαστήρας με οδοντωτό τροχό (Εικ. 5β). Στο σπαστήρα αυτό γίνεται μια επαναλαμβανόμενη, ημικυκλική κίνηση ενός οδοντωτού τροχού που βρίσκεται σε επαφή με ένα σταθερό λείο στέλεχος, όπου μέσα από το κενό μεταξύ τους περνά το έδαφος και θραύεται. Κατά την έξοδο του υλικού από το σπαστήρα, αυτό περνά μέσα από ένα κόσκινο προκειμένου να διαχωριστούν τα λεπτόκοκκα από τα χονδρόκοκκα. Οι χειρωνακτικές μέθοδοι είναι γενικά

αντιπαραγωγικές και χρειάζεται, σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις, να ακολουθεί κοσκίνισμα του θρυμματισμένου υλικού.

Πλέον, χρησιμοποιούνται μηχανικοί σπαστήρες, οι οποίοι εγγυόνται μεγαλύτερη παραγωγικότητα και καλύτερο τελικό προϊόν. Υπάρχουν αρκετοί τύποι μηχανικών σπαστήρων, οι οποίοι βασίζονται, είτε στο χτύπημα του υλικού με σφυριά, είτε στην περιστροφή ή το πέρασμά του από στενά ανοίγματα τύπου toothed belt (Εικ. 5γ) ή squirrel cage (Εικ. 5δ). Σε σύγκριση με τους χειρωνακτικούς σπαστήρες, η παραγωγικότητα των μηχανικών σπαστήρων μπορεί να αυξηθεί μέχρι και 4 φορές (Houben and Guillaud, 1994), ενώ συνήθως το τελικό προϊόν δεν χρειάζεται κοσκίνισμα.



Εικόνα 5: α) Θραύση εδαφικού υλικού με ειδικό σφυρί (Houben and Guillaud, 1994) β) Χειροκίνητος σπαστήρας με οδοντωτό τροχό (Schroeder, 2016) γ) Διαγραμματική απεικόνιση σπαστήρα τύπου toothed belt (Houben and Guillaud, 1994) δ) Διαγραμματική απεικόνιση σπαστήρα τύπου squirrel cage (Houben and Guillaud, 1994).

3.1.1.2 Κόσκινα

Απαραίτητη προϋπόθεση για την παραγωγή του επιθυμητού τελικού προϊόντος στους συμπιεσμένους ωμόπλινθους είναι η αποφυγή των πολύ μεγάλων κόκκων εδαφικού υλικού (Houben and Guillaud, 1994; CraTerre-EAG, 1998). Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, χρησιμοποιούνται κόσκινα, το μέγεθος των οποίων δεν είναι συγκεκριμένο, αλλά εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την πρέσα (Houben and Guillaud, 1994), αφού οι πρέσες που εφαρμόζουν χαμηλότερη πίεση τείνουν να είναι πιο ευαίσθητες ως προς το μέγιστο μέγεθος κόκκου, από αυτές που εφαρμόζουν μεγαλύτερη πίεση. Σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να αποφευχθεί το στάδιο του κοσκίνισματος, αφού το μέγεθος των κόκκων μειώνεται αισθητά, όταν προηγηθεί θραύση (Houben and Guillaud, 1994).

Τα είδη κοσκίνων είναι αρκετά και χωρίζονται σε κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο που εκτελείται η διαδικασία κοσκίνισματος. Παλαιότερα, το κοσκίνισμα γινόταν καθαρά χειρωνακτικά (Εικ. 6α). Τα κόσκινα που χρησιμοποιούνται συνήθως σήμερα σε μικρές εγκαταστάσεις είναι τα σταθερά, που βασίζονται στη βαρύτητα για τον διαχωρισμό των κόκκων (Εικ. 6β). Τα κόσκινα αυτά

είναι εύκολα στη χρήση, χαμηλού κόστους, ωστόσο δεν είναι παραγωγικά (Houben and Guillaud, 1994). Μια άλλη λύση είναι τα δονητικά (Εικ. 6γ) ή περιστροφικά (Εικ. 6δ) κόσκινα, που συνήθως έχουν υψηλότερη παραγωγικότητα (Rigassi, 1995). Τα κόσκινα αυτά δίνουν επίσης τη δυνατότητα διαχωρισμού του εδάφους σε επιμέρους κλάσματα για περαιτέρω επεξεργασία.



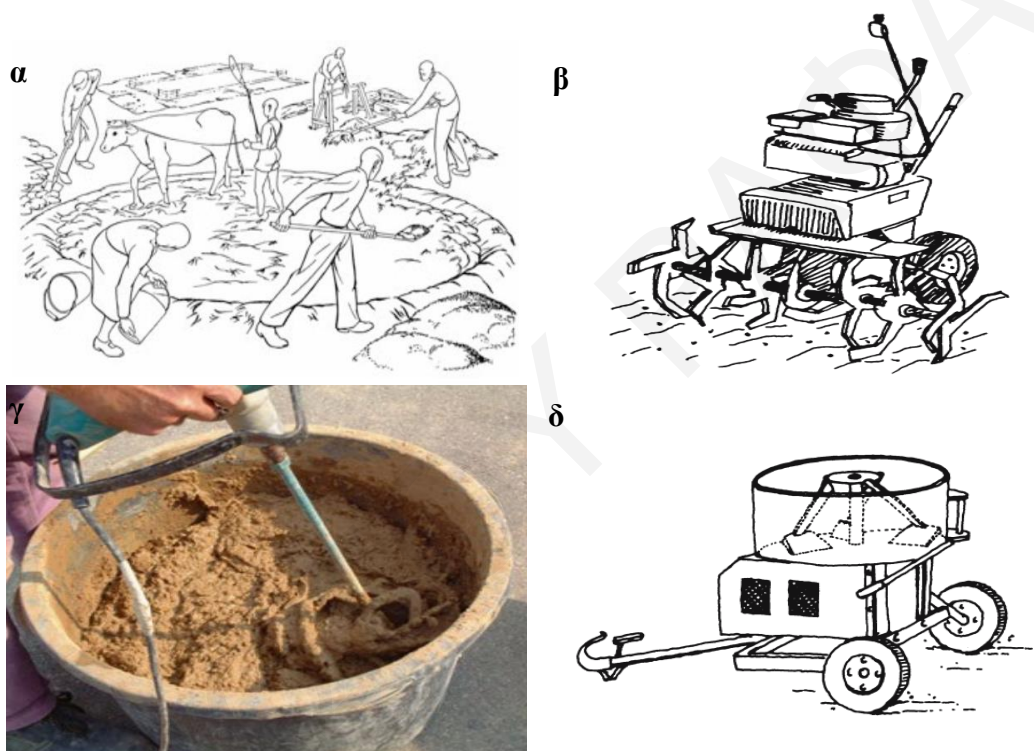
Εικόνα 6: α) Χειροκίνητο κόσκινο (Schroeder, 2016) β) Σκίτσο όπου παρατηρείται το κοσκίνισμα σε σταθερό κόσκινο γ) Σκίτσο όπου παρατηρείται η λειτουργία του δονητικού κόσκινου δ) Σκίτσο με χειροκίνητο περιστροφικό κόσκινο (Houben and Guillaud, 1994).

3.1.1.3 Αναδευτήρες

Η ανάμιξη του εδάφους αποτελεί σημαντική παράμετρο στην παραγωγή συμπιεσμένων ωμόπλινθων (Houben and Guillaud, 1994). Όσο καλύτερα γίνει η ανάμιξη του εδαφικού υλικού, τόσο πιο ομοιογενές θα είναι το μείγμα, προσδίδοντας έτσι ομοιογένεια στο τελικό προϊόν. Σύμφωνα με τον Minke (2006), ένα συγκεκριμένο έδαφος, αν αναδευτεί για 10 λεπτά (και όχι για 1 λεπτό, όπως είναι η κοινή πρακτική), μπορεί να δώσει μέχρι 57% αυξημένη συνοχή. Επίσης, η επιλογή του κατάλληλου αναδευτήρα είναι σημαντική για να επιτευχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα, όπως επίσης και η προσθήκη του νερού, η οποία πρέπει να γίνεται αργά, με ψεκάσμο, ούτως ώστε να εξασφαλίζεται ομοιογενής κατανομή της υγρασίας στο μείγμα (Houben and Guillaud, 1994).

Η πρώτη μέθοδος ανάμιξης που χρησιμοποιήθηκε ήταν χειρωνακτική, με την χρήση απλών εργαλείων, όπως το φτυάρι (Εικ. 7α). Με αυτή τη μέθοδο, έπρεπε να γίνουν, τουλάχιστον, τέσσερις πλήρεις αναδεύσεις του εδάφους για να θεωρηθεί ομοιογενές το μείγμα (Houben and Guillaud, 1994). Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται και σήμερα, συνήθως σε μικρά έργα, αφού η παραγωγικότητα της είναι αρκετά μειωμένη.

Μια παρόμοιας φιλοσοφίας μέθοδος είναι και η ανάμιξη με χειροκίνητο σκαπτικό (Εικ. 7β). Το έδαφος αναμιγνύεται με τη περιστροφή των λεπίδων του σκαπτικού, ωστόσο στη συγκεκριμένη διαδικασία πιθανώς να γίνεται ταυτόχρονα και θραύση των εδαφικών κόκκων (Houben and Guillaud, 1994). Η παραγωγικότητα στη συγκεκριμένη περίπτωση αυξάνει κάπως, σε σχέση με την καθόλα χειρωνακτική μέθοδο, όμως χρειάζεται μεγαλύτερος χώρος για να γίνει η διαδικασία της ανάμιξης. Για μικρές ποσότητες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και αναδευτήρας χειρός, παρόμοιος με αυτούς που χρησιμοποιούνται για την ανάμιξη κονιαμάτων (Schroeder, 2016, Εικ. 7γ). Αυτοί οι αναδευτήρες μπορούν να αναμείξουν μικρές ποσότητες υλικού, ωστόσο η αύξηση της υγρασίας στο μείγμα μπορεί να δυσκολέψει την ανάμιξη (Houben and Guillaud, 1994).

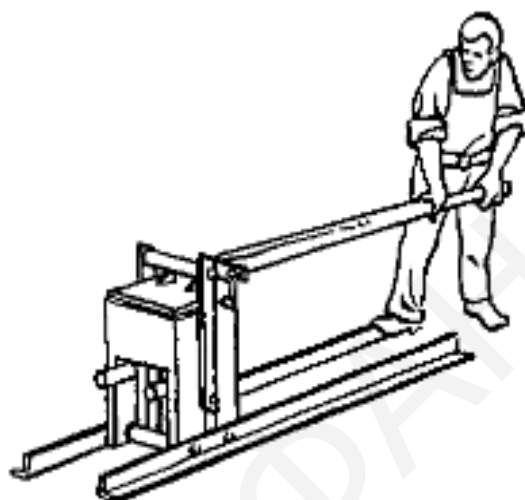


Εικόνα 7: α) Παραδοσιακός τρόπος ανάδευσης με απλά εργαλεία (Schroeder, 2016) β) Ανάδευση με χειροκίνητο σκαπτικό (Minke, 2006) γ) Ανάδευση με αναδευτήρα κονιαμάτων (Schroeder, 2016) δ) Αναδευτήρας σκυροδέματος (Minke, 2006).

Σε μεγαλύτερης κλίμακας έργα, όπου η παραγωγικότητα είναι σημαντική, η ανάμιξη γίνεται με μηχανικούς αναδευτήρες. Ο πλέον χρησιμοποιούμενος τύπος είναι οι οριζόντιοι αναδευτήρες (Εικ. 7δ), που χρησιμοποιούνται και στην εργαστηριακή παραγωγή σκυροδέματος (Minke, 2006, Schroeder, 2016, Houben and Guillaud, 1994). Αυτοί αυξάνουν σημαντικά την παραγωγικότητα και μπορούν να αναδεύσουν αρκετή ποσότητα υλικού, χωρίς προβλήματα με την ομοιογένειά του μίγματος. Ένας άλλος τύπος αναδευτήρα που χρησιμοποιείται σπάνια είναι ο γραμμικός, ο οποίος ωστόσο κοστίζει και είναι αρκετά βαρύς. Αν και, όπως προαναφέρθηκε, η ανάμιξη για 10 λεπτά αυξάνει σημαντικά τις αντοχές του τελικού προϊόντος, εντούτοις στο εργοτάξιο αυτό δεν εφαρμόζεται πάντα, και η ανάμιξη με μηχανικούς αναδευτήρες για 3-4 λεπτά κρίνεται ικανοποιητική (Houben and Guillaud, 1994).

3.1.1.4 Πρέσες

Για την παραγωγή συμπιεσμένων ωμόπλινθων χρειάζεται η εφαρμογή πίεσης, ούτως ώστε να καταστεί δυνατή η επαρκής συμπίεση του εδάφους. Για το σκοπό αυτό, αναπτύχθηκαν μηχανικά μέσα (πρέσες), καθώς η επιβολή πίεσης χειρωνακτικά από τον άνθρωπο δεν ήταν αρκετή. Η δημιουργία τέτοιων διατάξεων ξεκίνησε, πιθανώς, από τον 18^ο αιώνα (Rigassi, 1995). Η μεγάλη αλλαγή, όμως, έγινε τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, οπότε αναπτύχθηκε στην



Εικόνα 8: Σκίτσο στο οποίο απεικονίζεται μια χειρωνακτική πρέσα ελαφριού τύπου (Rigassi, 1995).

Κολομβία η πρώτη μηχανική πρέσα, γνωστή και ως CINVA-RAM (Rigassi, 1995). Η πρέσα αυτή ήταν καθαρά χειρωνακτική και ζύγιζε μόλις 50–150 kg (Εικ. 8). Το υλικό τοποθετείτο σε ένα μικρό μεταλλικό πλαίσιο, επιπεδωνόταν, και ακολούθως αυτό έκλεινε με ένα καπάκι το οποίο ήταν ενωμένο με ένα μοχλό. Ο χειριστής, μέσω του μοχλού, επέβαλλε πίεση και έτσι φτιαχόταν το τούβλο. Πολλές φορές, χρειαζόταν αρκετή πίεση, και πέραν του ενός ατόμου για να φτιαχτεί το τούβλο. Ακολούθως, το πλαίσιο ασφαλιζόταν, και με την επαναφορά στην αρχική θέση του μοχλού γινόταν εξόλκευση του τούβλου. Η διαδικασία επαναλαμβανόταν για την παραγωγή της απαιτούμενης ποσότητας τούβλων. Μαζί με την προετοιμασία του εδάφους, η παραγωγή Συμπιεσμένων ωμοπλίνθων με αυτή την πρέσα μπορούσε να φτάσει τα 300-600 τούβλα ημερησίως.

Η ανάγκη για μεγαλύτερη παραγωγή συμπιεσμένων ωμόπλινθων οδήγησε τους ενδιαφερόμενους να κατασκευάσουν και άλλες πρέσες, οι οποίες θα τους προσέφεραν μεγαλύτερη παραγωγικότητα. Η «επόμενη γενιά» χειρωνακτικών πρεσών ήταν οι επονομαζόμενες και

ως «βαρέου τύπου» (Εικόνα 9). Η φιλοσοφία στην οποία στηρίχθηκαν αυτές οι πρέσες ήταν η ίδια με τη CINVA-RAM, ωστόσο άλλαξε το μέγεθος της διάταξης. Το βάρος για τις πρέσες «βαρέου τύπου» ξεκινά από 150 kg και φτάνει μέχρι τα 250 kg (Rigassi, 1995). Η τροφοδοσία της μηχανής γίνεται από ειδική θήκη στην οποία μπαίνει το χώμα, και



Εικόνα 9: Χειρωνακτική πρέσα βαρέου τύπου, Auram 3000 (earth-auroville).

απλά αυτή μετακινείται πάνω από το πλαίσιο το οποίο γεμίζει με υλικό. Με την επαναφορά της θήκης, αφαιρείται και το υλικό που περισσεύει. Έτσι, η διαδικασία επιταχύνεται σημαντικά, με

αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγικότητας. Με την χρήση αυτής της πρέσας, μπορούν να παραχθούν από 700 μέχρι και 1500 τούβλα ημερησίως.

Οι πρέσες με κινητήρα αποτελούν τον πρώτο τύπο πρέσας όπου έχουμε εφαρμογή μηχανοκίνητου μέρους στην παραγωγή συμπιεσμένων ωμόπλινθων. Πλέον, η παραγωγή των τούβλων γίνεται με την άσκηση πίεσης από μηχανοκίνητα μέρη, και όχι με την χρήση της ανθρώπινης δύναμης. Με την εισαγωγή τέτοιου τύπου μηχανημάτων στην παραγωγική διαδικασία, αυξάνεται δραματικά η παραγωγικότητα, ωστόσο είναι εμφανή και τα πρώτα σημάδια επιβάρυνσης του περιβάλλοντος, έστω και σε περιορισμένη έκταση σχετικά με άλλες ανταγωνιστικές μορφές τούβλων. Οι πρέσες αυτές έχουν αυξημένο βάρος που ξεκινά από 700 kg και φτάνει μέχρι τους δύο τόνους, αλλά και παραγωγικότητα που κυμαίνεται ανάμεσα σε 1000-5000 τούβλα ημερησίως (Rigassi, 1995). Αυτός ο τύπος πρέσας αποτελεί και το παράδειγμα για ανάπτυξη των νεότερων μηχανημάτων που αποτελούν τις κινητές πρέσες και τα σταθερά συστήματα για παραγωγή συμπιεσμένων ωμόπλινθων.

Σημαντικό πλεονέκτημα των συστημάτων με κινητήρα είναι η παραγωγή συμπιεσμένων ωμοπλίνθων με χαμηλά ποσοστά υγρασίας, γεγονός που επιτρέπει την χρήση των υλικών αμέσως μετά την παραγωγή (Minke, 2006). Όλες όμως οι πρέσες αυτού του τύπου χρειάζονται πρώτη ύλη εφάμιλλης σύστασης, σε επαρκείς ποσότητες, καθότι σε διαφορετική περίπτωση δεν παράγεται προϊόν ίδιας ποιότητας και υπάρχει αντίκτυπος στην απόδοση και τη φθορά της μηχανής. Ως αποτέλεσμα, οι πρέσες με κινητήρα παρουσιάζουν προβλήματα και η συντήρησή τους κρίνεται αντιοικονομική (Minke, 2006).

Στην περίπτωση της κινητής μονάδας (Εικ. 10), υπάρχει το πλεονέκτημα της δυνατότητας μεταφοράς στον χώρο κατασκευής, οπότε παρατηρείται εξοικονόμηση κόστους και ρύπων από τη μεταφορά των ωμόπλινθων από τον χώρο παραγωγής στο εργοτάξιο. Επίσης, εάν κριθεί κατάλληλο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη χώμα από τον χώρο της κατασκευής, εξοικονομώντας και

πάλι χρόνο και χρήμα, και αποφεύγοντας περαιτέρω επιβάρυνση του περιβάλλοντος. Σημειώνεται ότι οι μονάδες αυτές μπορούν ευκολά να μεταφερθούν με οποιοδήποτε όχημα φέρει ελκυστήρα, αφού το βάρος τους κυμαίνεται από 1.5–6 τόνους (Rigassi, 1995). Όσον αφορά την παραγωγικότητα τους, ανάλογα με



Εικόνα 10: Κινητή μονάδα παραγωγής συμπιεσμένων ωμόπλινθων (Minke, 2006).

το προσωπικό, ξεκινά από 1500 και φτάνει τις 4000 τούβλα ημερησίως.

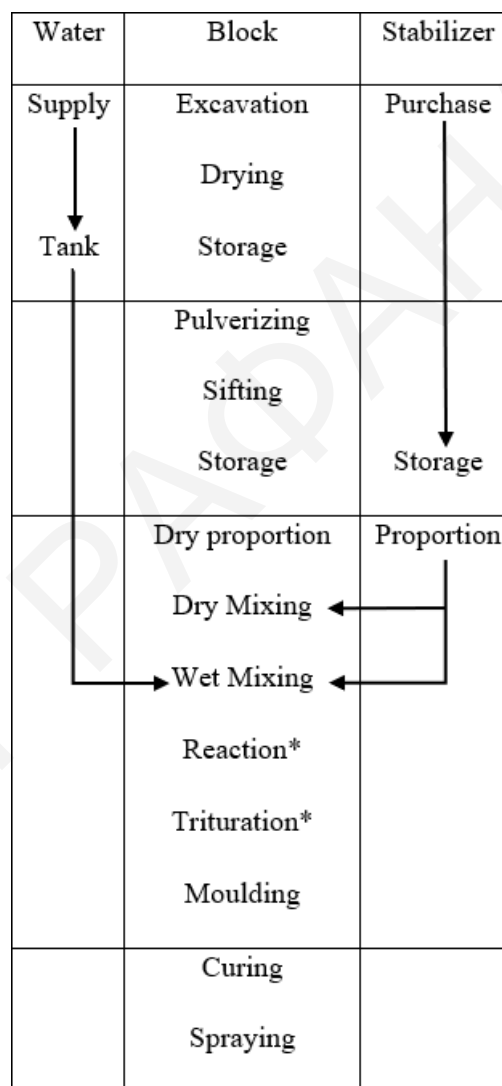
3.1.2 Διαδικασία παραγωγής

Η πληθώρα επιλογών σε εξοπλισμό για την παραγωγή συμπιεσμένων ωμοπλίνθων προσφέρει και την επιλογή διαφόρων γραμμών παραγωγής, ανάλογα με τις απαιτήσεις του παραγωγού. Ο κυριότερος παράγοντας επιλογής ενός συγκεκριμένου τρόπου παραγωγής είναι η κλίμακα δραστηριοποίησης, δηλαδή εάν αποτελεί μικρή ή μεγάλη βιομηχανία (Rigassi, 1995). Οι χώροι απόθεσης της πρώτης ύλης, η γραμμή παραγωγής και οι χώροι αποθήκευσης του τελικού προϊόντος καθορίζονται ανάλογα με την πιο πάνω παράμετρο.

Στη γραμμή παραγωγής δεν εντάσσεται μόνο ο εξοπλισμός που αναφέρεται στην προηγούμενη ενότητα. Συμπληρωματικά, μπορεί να χρησιμοποιηθούν και άλλα μηχανικά μέσα, όπως οι εκσκαφείς για μεταφορά και φόρτωμα του εδαφικού υλικού, και οι ιμάντες μεταφοράς για πλήρως αυτοματοποιημένη λειτουργία. Από την άλλη, δεν κρίνεται απαραίτητη η χρήση όλων των τύπων του εξοπλισμού, καθώς συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι μπορούν να παραχθούν και χειρωνακτικά. Η παραγωγικότητα μειώνεται σημαντικά, ωστόσο η παραγωγή με χειρωνακτικά μέσα είναι φιλικότερη προς το περιβάλλον, σε σχέση με τη βιομηχανοποιημένη παραγωγή.

Γενικά, στην παραγωγή των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων διακρίνονται τέσσερα στάδια (Houben and Guillaud, 1994, Εικ. 11):

1. Εκσκαφή και μεταφορά/αποθήκευση της πρώτης ύλης στον χώρο παραγωγής. Εάν είναι αναγκαία η προσθήκη σταθεροποιητή για την παραγωγή ωμόπλινθων, τότε μεταφέρεται και αυτός στον χώρο παραγωγής.
2. Προετοιμασία της πρώτης ύλης, δηλαδή κονιοποίηση και κοσκίνισμα.
3. Παραγωγή των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων, δηλαδή ανάμιξη της πρώτης ύλης, του νερού και του σταθεροποιητή και συμπίεση του τελικού προϊόντος.



Εικόνα 11: Στάδια παραγωγής συμπιεσμένων ωμοπλίνθων (Houben and Guillaud, 1994).

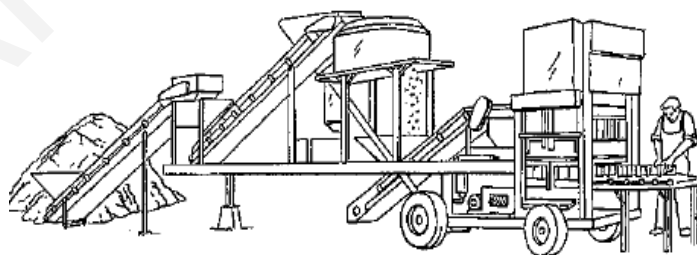
4. Αποθήκευση του τελικού προϊόντος σε σκιερό μέρος, όπου λαμβάνει χώρα η συντήρησή του.

Η πιο απλή γραμμή παραγωγής συμπιεσμένων ωμοπλίνθων αποτελείται από μια χειρωνακτική πρέσα (Rigassi, 1995). Στη διάταξη αυτή, η ανάμιξη του υλικού γίνεται με φτυάρια και η μεταφορά με αμαξίδια μεταφοράς από εργάτες. Το υλικό τοποθετείται στην πρέσα, η οποία λειτουργεί με μοχλό και άσκηση δύναμης από τον χειριστή (Εικόνα 12). Η παραγωγικότητα και η έκταση που χρειάζεται η διάταξη για να λειτουργήσει είναι περιορισμένη, σε σχέση με άλλες διατάξεις (Houben and Guillaud, 1994).



Εικόνα 12: Παραγωγή με χειρωνακτικό τρόπο στην Παραγουάη. Η ανάμιξη της πρώτης ύλης και η απόθεση των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων γίνεται δίπλα από την πρέσα (Minke, 2006).

Στις ημι-αυτόματες γραμμές παραγωγής μπορούν να συμμετέχουν χειρωνακτικές ή μηχανικές πρέσες, αναδευτήρες, σπαστήρες και κόσκινα. Ο συνδυασμός του πιο πάνω εξοπλισμού για τη δημιουργία της επιθυμητής γραμμής παραγωγής καθορίζει το πόσο εκβιομηχανοποιημένη είναι η παραγωγή, δηλαδή την αναλογία χειρωνακτικών – μηχανικών μέσων (Rigassi, 1995), οπότε και το κατά πόσο είναι φιλική προς το περιβάλλον. Είναι εύκολα αντιληπτό ότι όσο αυξάνει η συμμετοχή των μηχανικών μέσων στη γραμμή παραγωγής, τόσο αυξάνει η παραγωγικότητα και μειώνεται η φιλικότητα προς το περιβάλλον. Οι ημι-αυτόματες γραμμές παραγωγής είναι αρκετά διαδεδομένες διατάξεις, αφού συνδυάζουν την αυξημένη παραγωγικότητα, το σχετικά ανεκτό κόστος, και διατηρούν σε ικανοποιητικά επίπεδα τη φιλικότητα του υλικού προς το περιβάλλον (Houben and Guillaud, 1994). Η πλέον βιομηχανοποιημένη γραμμή παραγωγής συμπιεσμένων ωμοπλίνθων αποτελείται από σταθερές μονάδες (Εικ. 13). Τέτοια συστήματα παρατηρούνται σε περιοχές όπου η παραγωγή είναι μεγάλη και υπάρχουν άφθονες ποσότητες πρώτης ύλης. Η σταθερή μονάδα παραγωγής συμπιεσμένων ωμοπλίνθων προϋποθέτει την ύπαρξη μάντων μεταφοράς της



Εικόνα 13: Σκίτσο στο οποίο παρατηρείται μια τυπική διάταξη σταθερής μονάδας παραγωγής συμπιεσμένων ωμοπλίνθων (Rigassi, 1995).

πρώτης ύλης (αυτοματοποιημένη παραγωγή) ή εκσκαφών για τροφοδοσία των μηχανημάτων. Είναι μια ολοκληρωμένη μονάδα στην οποία γίνεται η ανάδευση του εδαφικού υλικού με το νερό, μεταφορά του στην πρέσα και παραγωγή των ωμοπλίνθων. Η παραγωγικότητα αυξάνει σημαντικά, εφόσον μπορούν να παραχθούν από

δύο έως και δέκα χιλιάδες τούβλα ημερησίως, ωστόσο με ανάλογο τρόπο αυξάνει και το κόστος (Rigassi, 1995, Houben and Guillaud, 1994), ενώ σημαντική αύξηση παρατηρείται και στο βάρος της μονάδας, φτάνοντας μέχρι και τους 30 τόνους (Rigassi, 1995). Ωστόσο, σε τέτοιες μονάδες παρουσιάζεται και ο μεγαλύτερος περιβαλλοντικός αντίκτυπος, λόγω της εκπομπής ρύπων. Σημαντικό είναι επίσης να επισημανθεί και το γεγονός ότι σε τέτοιου τύπου βιομηχανίες χρειάζεται και αρκετά μεγαλύτερη έκταση για την παραγωγή (Rigassi, 1995).

3.2 Χαρακτηριστικά συμπίεσμένων ωμοπλίνθων

Η μελέτη των συμπίεσμένων ωμοπλίνθων τα τελευταία χρόνια παρουσιάζει αυξημένο ενδιαφέρον (Beckett et al., 2020). Όλο και περισσότεροι ερευνητές ασχολούνται με το συγκεκριμένο υλικό, αφού αποτελεί, σε σχέση με άλλα δομικά υλικά, μια φιλικότερη προς το περιβάλλον λύση, η οποία εμπίπτει στα πλαίσια της αειφόρου ανάπτυξης (Chan and Low, 2010). Γίνεται, μάλιστα, μια προσπάθεια για να βελτιωθούν τα χαρακτηριστικά των συμπίεσμένων ωμοπλίνθων (Obonyo et al, 2010), ούτως ώστε τα υλικά αυτά να εισχωρήσουν στην αγορά σε μεγαλύτερο ποσοστό.

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται μια ανασκόπηση των δεδομένων που παρατηρούνται στη βιβλιογραφία και αναφέρονται στους συμπίεσμένους ωμοπλίνθους. Αρχικά, γίνεται αναφορά στις ιδιότητες της πρώτης ύλης. Ακολούθως, παρατίθενται πληροφορίες που αφορούν τα φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά των συμπίεσμένων ωμοπλίνθων, και τέλος γίνεται αναφορά στην ανθεκτικότητά τους.

3.2.1 Πρώτη ύλη

Ο χαρακτηρισμός της πρώτης ύλης αποτελεί το πρώτο στάδιο στη μελέτη και παραγωγή των συμπίεσμένων ωμοπλίνθων. Στη βιβλιογραφία εντοπίζονται αρκετά άρθρα (Fgaier et al., 2016; Maskell et al., 2013; Maskell et al, 2014; Saidi et al., 2018; Walker, 2004; Danso and Adu, 2019; Barrera et al., 2020; Narayanaswamy et al., 2020; Sore et al., 2018; Islam et al., 2020; Arsene et al., 2020), στα οποία είναι εμφανής η μεγάλη διασπορά των προτεινόμενων τιμών των διαφόρων ιδιοτήτων των εδαφικών υλικών που θεωρούνται κατάλληλα για την παραγωγή συμπίεσμένων ωμοπλίνθων, γεγονός που δικαιολογεί και τα ευρεία όρια που τίθενται από τους διάφορους κανονισμούς (π.χ. CraTerre – EAG, 1998; Houben and Guillaud, 1994) (βλ. επίσης ενότητα 3,3).

Η σημαντικότερη ιδιότητα του εδαφικού υλικού, στην οποία δίνεται έμφαση από πολλούς ερευνητές, είναι η κοκκομετρική διαβάθμιση, αφού αυτή φαίνεται να επηρεάζει έντονα τη συμπεριφορά των συμπίεσμένων ωμοπλίνθων (Delgado and Guerrero, 2007). Στον Πίνακα 1, καταγράφονται οι κοκκομετρικές διαβαθμίσεις εδαφών που χρησιμοποιήθηκαν στη βιβλιογραφία για την παραγωγή συμπίεσμένων ωμοπλίνθων. Βάσει των κανονιστικών εγγράφων, τα όρια που τίθενται είναι αρκετά χαλαρά, με αποτέλεσμα να κρίνονται κατάλληλα πολλά εδάφη, για την παραγωγή ΣΩ (Delgado and Guerrero, 2007). Για αυτό, πρέπει να διερευνώνται και άλλες ιδιότητες

του εδαφικού υλικού, προκειμένου να υπάρξει καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του εδάφους.

Πίνακας 1: Κοκκομετρική διαβάθμιση εδαφών που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή ΣΩ.

Συγγραφείς	Αργίλος (%)	Ιλύς (%)	Άμμος (%)	Χαλίκια (%)
<i>CraTerre – EAG (1998)</i>	<0.002 mm 8-30	0.002 mm-0.06 mm 10-25	0.06 mm-2 mm 25-80	2 mm-20 mm 0-40
<i>Fgaier et al. (2016)</i>	<0.002 mm 6 4 4	0.002 mm-0.063 mm 89 81 92	0.063 mm-2 mm 5 15 4	>2 mm 0 0 0
<i>Saidi et al. (2018)</i>		<0.074 mm 57	0.074 mm-4.75 mm 42	>4.75 mm 1
<i>Walker (2004)</i>	<0.002 mm 11 24 28 11 20 21	0.002 mm-0.063 mm 11 14 16 4 4 7	0.063 mm-2 mm 78 62 56 77 63 58	> 2mm 0 0 0 8 13 14
<i>Adam and Jones (1995)</i>	<0.002 mm 6 37 12	0.002 mm-0.063 mm 37 21 20	0.063 mm-2 mm 43 36 64	>2 mm 14 6 4
<i>Barrera et al. (2020)</i>	<0.002 mm 26	0.002 mm-0.063 mm 8	0.063 mm-40 mm 66	
<i>Narayanaswamy et al. (2020)</i>	<0.002 mm 25	0.002 mm-0.063 mm 17	0.063 mm-2 mm 55	>2 mm 3
<i>Sore et al. (2018)</i>	<0.002 mm 5	0.002 mm-0.080 mm 10	0.080 mm-2 mm 49	>2 mm 36
<i>Islam et al. (2020)</i>	<0.002 mm 12	0.002 mm-0.075 mm 17	0.075 mm-4.75 mm 71	>4.75 mm 0
<i>Arsene et al. (2020)</i>	<0.002 mm 23 52 26 32 37	0.002 mm-0.063 mm 38 46 21 59 36	0.063 mm-2 mm 35 2 53 9 27	>2 mm 4 0 0 0 0

Η σημαντικότητα της μελέτης της υφής σε ένα έδαφος, οφείλεται στο γεγονός ότι τα επιμέρους κλάσματα έχουν διαφορετική συμπεριφορά. Το αργιλικό κλάσμα αποτελεί ίσως το σημαντικότερο μέρος ενός εδάφους, καθώς είναι αυτό που θα δώσει τη συνοχή στο τελικό προϊόν. Το ποσοστό του αργιλικού κλάσματος, ωστόσο, δεν μπορεί να δώσει ακριβή πληροφόρηση για τη συμπεριφορά του συνδετικού υλικού. Στην εδαφομηχανική, για περαιτέρω διερεύνηση της πιθανής

ύπαρξης ενεργών αργιλικών ορυκτών, γίνεται η δοκιμή του Μπλε του Μεθυλενίου. Οι Morel and Pkla (2002) βρήκαν σε εδάφη με 17.5% και 6% άργιλο, τιμές Μπλε του Μεθυλενίου 1.4 g/100 g και 2.2 g/100 g, αντίστοιχα. Στη δεύτερη περίπτωση, αν και παρατηρείται χαμηλό ποσοστό αργιλικού κλάσματος στο υπό διερεύνηση εδαφικό υλικό, εντούτοις αυτό φαίνεται να είναι πιο ενεργό, ενώ στην πρώτη που το αργιλικό κλάσμα είναι περισσότερο, δεν υπάρχουν αρκετά ενεργά αργιλικά ορυκτά. Η μελέτη για την ύπαρξη ενεργών αργιλικών ορυκτών πλέον γίνεται, στις πλείστες περιπτώσεις, με την χρήση της περιθλασιμετρίας ακτινών X (Nshimiyimana et al., 2019; Fgaier et al., 2016; Muñoz, 2020).

Τα όρια συνεκτικότητας ή Atterberg αποτελούν μια εξίσου σημαντική ιδιότητα του εδαφικού υλικού. Στη βιβλιογραφία εντοπίζονται αρκετές μελέτες (Fgaier et al., 2016; Saidi et al., 2018; Maskell et al., 2014; Morel and Pkla, 2002; Saidi et al., 2018; Islam et al., 2020), στις οποίες διερευνώνται τα όρια αυτά για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του εδάφους. Σύμφωνα με τους Houben and Guillaud (1994), οι αποδεκτές τιμές για το όριο υδαρότητας εδαφικού υλικού που προορίζεται για την παραγωγή ΣΩ, είναι από 25% μέχρι 50%, και για το δείκτη πλαστικότητας από 2% μέχρι 31%, χωρίς όμως να είναι απόλυτες οι τιμές αυτές, αφού η τελική καταλληλότητα του εδαφικού υλικού κρίνεται από τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Στον Πίνακα 2 καταγράφονται οι τιμές των ορίων συνεκτικότητας από κάποιες μελέτες που συναντώνται στη βιβλιογραφία. Όπως προκύπτει από την καταγραφή αυτή, οι τιμές του ορίου υδαρότητας είναι πολλές φορές χαμηλότερες (Fgaier et al., 2016; Saidi et al., 2018; Maskell et al., 2014), ή ψηλότερες (Fgaier et al., 2016), από αυτές που προτείνονται από συγκεκριμένους κανονισμούς, π.χ. CraTerre – EAG (1998) (βλ. επίσης ενότητα 3.3). Οι τιμές του δείκτη πλαστικότητας είναι, συνήθως, εντός ορίων, αν και υπάρχουν και μεμονωμένες περιπτώσεις που ξεφεύγουν κατά πολύ (Fgaier et al., 2016).

Πίνακας 2: Τιμές ορίων συνεκτικότητας εδαφικού υλικού που προορίζεται για την παραγωγή ΣΩ.

Συγγραφείς	Όριο Υδαρότητας (%)	Όριο Πλαστικότητας (%)	Δείκτης Πλαστικότητας (%)
<i>CraTerre - EAG</i>	25-50	-	3-29
<i>Morel and Pkla (2002)</i>	30	-	9
	60	-	31
<i>Fgaier et al. (2016)</i>	24	21	3
	60	29	31
	100	28	72
<i>Saidi et al. (2018)</i>	22	-	6
<i>Danso and Adu (2019)</i>	49	27	22
<i>Islam et al. (2020)</i>	31	29	2

Η διερεύνηση της συμπεστότητας του εδαφικού υλικού αποτελεί την κύρια ένδειξη για την καταλληλότητά του ως προς την παραγωγή ή όχι συμπιεσμένων ωμοπλίνθων με πυκνή δομή. Η διερεύνηση γίνεται με τη δοκιμή Proctor, από την οποία προσδιορίζεται η μέγιστη ξηρή πυκνότητα και η βέλτιστη υγρασία για την επίτευξή της. Η βέλτιστη πυκνότητα που προδιαγράφουν οι διάφοροι κανονισμοί πρέπει να είναι μεταξύ 1700 και 2200 kg/m³ (CraTerre – EAG, 1998; Houben and Guillaud, 1994). Επίσης, εφόσον οι συμπιεσμένοι ωμοπλίνθοι παράγονται από ύφυγρο μείγμα, η βέλτιστη υγρασία δεν πρέπει να υπερβαίνει το 15% (Houben and Guillaud, 1994). Οι τιμές που παρατηρούνται στη βιβλιογραφία είναι γενικά εντός των αποδεκτών ορίων (Πίν. 3).

Πίνακας 3: Αποτελέσματα δοκιμής Proctor εδαφικού υλικού που προορίζεται για την παραγωγή ΣΩ.

Συγγραφείς	Βέλτιστο ποσοστό υγρασίας (%)	Μέγιστη Ξηρή Πυκνότητα (kg/m ³)
Danso and Adu (2019)	23.0	1900
Bahar et al. (2004)	11.0	1795
Subramaniaprasad et al. (2014)	14.0	1840
Bogas et al. (2019)	11.7	2665

3.2.2 Μηχανικές και θερμομονωτικές ιδιότητες

Αναμφίβολα, η καλύτερα μελετημένη πτυχή των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων είναι τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά. Σύμφωνα με τους Rodríguez-Mariscal et al. (2018), οι μηχανικές ιδιότητες των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων μεταβάλλονται ανάλογα με τη διεύθυνση φόρτισης, λόγω της συμπίεσης και της διάταξης σε στρώσεις των πεπλατυσμένων αργίλων, οπότεν το υλικό δεν συμπεριφέρεται ισότροπα. Επίσης, οι μηχανικές ιδιότητες των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων είναι ανάλογες με την αύξηση της πίεσης που ασκείται κατά την παραγωγή τους (González-López et al., 2018; Morel et al., 2007; Taallah et al., 2014), και την προσθήκη κάποιου σταθεροποιητή (Ammari et al., 2017; Morel et al., 2007; Izemmouren et al., 2015; Mahdad et al., 2018). Από την άλλη, μείωση των αντοχών παρατηρείται όταν αυξηθεί η υγρασία των δειγμάτων (Morel et al., 2007; Fgaier et al., 2016) και όταν υπάρχει περίσσεια αργίλου, ακόμα και σε σταθεροποιημένα δοκίμια, αφού η άργιλος αυξάνει τη συρρίκνωση, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται περισσότερες ρωγμές (Walker and Stace, 1997).

Η παράμετρος που επηρεάζει στο μέγιστο βαθμό τον ακριβή προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων είναι ο λόγος ύψους/πλάτους των δοκιμίων. Όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος αυτός, τόσο μικρότερες είναι οι δυνάμεις περίσφιξης που αναπτύσσονται ανάμεσα στο δείγμα και την πλάκα φόρτισης της πρέσας, και έτσι η τελική αντοχή είναι περισσότερο αντιπροσωπευτική (Rengifo-López et al., 2019; Walker, 2004). Στα δοκίμια που προκύπτουν μετά από ξηρή κοπή, λόγω της διαμόρφωσης μικρού πλάτους, πιθανώς να παρουσιαστούν, ανεπαίσθητες στο μάτι, αστοχίες, που να επηρεάσουν το αποτέλεσμα της δοκιμής

(Ruiz et al., 2018). Για τη διερεύνηση της επίδρασης του μεγέθους, οι Ruiz et al. (2018), έκαναν δοκιμές σε κύβους ακμής 40 mm και 70 mm, και σε ολόκληρα τούβλα, όπου παρατήρησαν αύξηση της αντοχής όσο ο λόγος ύψους/πλάτους μίκραινε, και όσο η επιφάνεια που ήταν σε επαφή με την πλάκα φόρτισης μεγάλωνε.

Πίνακας 4: Συντελεστές διόρθωσης τιμών θλιπτικής αντοχής.

Λόγος Ύψους/Πλάτους	0	0.4	0.7	1	2	3	≥5
NZS 4298 (1998)	0	0.5	-	0.7	0.8	-	1
Krefeld (1938)	0	0.5	0.6	0.7	-	0.85	1
Heathcote and Jankulovski (1992)	0	0.25	0.4	0.58	-	0.9	1

Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα που δημιουργεί το μέγεθος του δοκιμίου, και να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα δοκιμών σε διάφορα μεγέθη δειγμάτων, συνήθως υιοθετούνται κάποιοι συντελεστές διόρθωσης. Οι συντελεστές αυτοί, είτε βασίζονται σε άλλα υλικά που έχουν παρόμοια συμπεριφορά στην τοιχοποιία, όπως οι οπτόπλινθοι (Walker, 2004), είτε έχουν προκύψει μετά από μελέτες σε συμπίεσμένους ωμόπλινθους. Στον Πίνακα 4 παρατηρούνται οι προτεινόμενοι, από 3 διαφορετικά έγγραφα, συντελεστές, όπου στις δύο πρώτες περιπτώσεις χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή για τις ενδιάμεσες τιμές, ενώ στην τρίτη όχι. Οι Morel et al. (2007), προσπαθώντας να συσχετίσουν τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής από τη δοκιμή σε ολόκληρα τούβλα, και τη δοκιμή που προτείνει η RILEM και κάποιοι άλλοι κανονισμοί (XP P13-901, 2001; NBR 8492, 2012), δηλαδή σύμπλοκα δοκίμια από μισούς ωμόπλινθους, με ή χωρίς συνδετικό κονίαμα, παρατήρησαν μια διαφορά της τάξης του 300%. Έτσι, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι συντελεστές που υιοθετήθηκαν από άλλα υλικά (Krefeld, 1938), πιθανώς δεν είναι κατάλληλοι για χρήση στους συμπίεσμένους ωμόπλινθους. Οπότεν, η περαιτέρω μελέτη και εξαγωγή συντελεστών, αποκλειστικά για τους συμπίεσμένους ωμόπλινθους, είναι επιβεβλημένη.

Πίνακας 5: Συντελεστές διόρθωσης τιμών θλιπτικής αντοχής κατά EN 772-1 (2015).

		Πλάτος, mm				
		50	100	150	200	≥250
Ύψος, mm	40	0.8	0.7	-	-	-
	50	0.85	0.75	0.70	-	-
	65	0.95	0.85	0.75	0.70	0.65
	100	1.15	1.00	0.90	0.80	0.75
	150	1.30	1.20	1.10	1.00	0.95
	200	1.45	1.35	1.25	1.15	1.10
	≥250	1.55	1.45	1.35	1.25	1.15

Οι πιο πάνω συντελεστές διόρθωσης λαμβάνουν υπόψη αποκλειστικά το λόγο ύψους/πλάτους των δοκιμίων. Στο πρότυπο EN 772-1 (2015), ο υπολογισμός του συντελεστή είναι πιο σύνθετος, και λαμβάνει υπόψη, πέραν του λόγου ύψους/πλάτους, τις διαστάσεις των πλευρών του δοκιμίου, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5. Για τον υπολογισμό ενδιάμεσων τιμών χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή.

Η τραχύτητα της επιφάνειας των $\Sigma\Omega$, και το γεγονός πως, πολλές φορές, δεν είναι παράλληλες οι άνω και κάτω επιφάνειες των δοκιμίων, λόγω ατελούς συμπίεσης, είναι ακόμη ένας παράγοντας που επηρεάζει τις μετρούμενες αντοχές τους, ένεκα της ανάπτυξης δυνάμεων τριβής ανάμεσα στο δοκίμιο και την πλάκα φόρτισης, με αποτέλεσμα την αύξηση της θλιπτικής αντοχής (Ruiz et al., 2018; Morel et al., 2007; Walker, 2004). Οι Ruiz et al. (2018), σε μια εκτενή μελέτη μηχανικών ιδιοτήτων σε σταθεροποιημένους συμπίεσμένους ωμόπλινθους με 6% τσιμέντο, έδειξαν ότι η επίδραση της τραχύτητας της επιφάνειας του δοκιμίου είναι σημαντική. Συγκεκριμένα, σε δοκίμια (ολόκληρα τούβλα) χωρίς κάποιο επιπρόσθετο υλικό στην επιφάνεια φόρτισής τους, παρατηρήθηκε αντοχή 27.3 MPa, ενώ σε δοκίμια που εφαρμόστηκε καουτσούκ στην επιφάνεια φόρτισής τους, η αντοχή ήταν 9.7 MPa. Η σωστή επιλογή του υλικού, με το οποίο θα καλυφθεί η επιφάνεια φόρτισης του δοκιμίου, επίσης επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα. Στην ίδια μελέτη, δοκίμια ολόκληρων τούβλων καλύφθηκαν με plywood, που όπως φάνηκε επηρέασε το τελικό αποτέλεσμα, με την θλιπτική αντοχή να υπολογίζεται στα 27 MPa, τιμή πολύ υψηλή για τέτοια υλικά (Ruiz et al., 2018).

Στην προσπάθειά τους πολλοί ερευνητές να βελτιώσουν την θλιπτική αντοχή των συμπίεσμένων ωμόπλινθων, χωρίς όμως να αυξήσουν δραματικά τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο του υλικού, χρησιμοποιούν φυσικά πρόσθετα για σκοπούς σταθεροποίησης του τελικού προϊόντος. Ο πιο διαδεδομένος φυσικός τρόπος σταθεροποίησης είναι η ανάμιξη άμμου με το έδαφος. Αυτή η πρακτική μπορεί να βελτιώσει κατά πολύ τις ιδιότητες των λεπτόκοκκων εδαφών, αφού επιδρά θετικά στην κοκκομετρική διαβάθμιση, δημιουργώντας πυκνότερη δομή (Guettala et al., 2002; Muntohar, 2011). Από την άλλη, παρόλο που η χρήση φυσικών ινών δεν συνηθίζεται στους συμπίεσμένους ωμόπλινθους, σε αντίθεση με τους παραδοσιακούς ωμόπλινθους, εντούτοις αρκετοί ερευνητές συμπεριλαμβάνουν αυτά τα φυσικά πρόσθετα στα μείγματά τους. Από τα αποτελέσματα που εντοπίζονται στη βιβλιογραφία, φαίνεται ότι με μικρή συμμετοχή ινών, 1–6% κ.μ. του εδάφους, η θλιπτική αντοχή των συμπίεσμένων ωμόπλινθων, είτε παραμένει η ίδια, είτε μειώνεται ελάχιστα, ωστόσο η προσθήκη τους αυξάνει την εφελκυστική αντοχή (Sharma et al., 2015). Σημειώνεται ότι διαφορετικά είδη ινών (π.χ. άχυρο, ίνες φοίνικα, bagasse) συμπεριφέρονται με διαφορετικό τρόπο όταν προστεθούν σε κάποιο εδαφικό υλικό, οπότεν χρειάζεται να γίνονται δοκιμές πριν την χρήση τους, τόσο για την επίδρασή τους, όσο και για το βέλτιστο ποσοστό τους στο μείγμα (Sharma et al., 2015).

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται στη βιβλιογραφία και προσθήκη φυσικών ποζολανικών υλικών ή παραπροϊόντων άλλων βιομηχανιών για τη βελτίωση των αντοχών των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων. Ποζολανικά υλικά, όπως η ιπτάμενη τέφρα και η σκωρία υψικαμίνων, χρησιμοποιούνται με επιτυχία στη βιομηχανία του σκυροδέματος (Chousidis et al., 2015; Li, 2003; Oner and Akyuz, 2007). Στην παραγωγή συμπιεσμένων ωμοπλίνθων, όμως, αυτή η πρακτική δεν είναι συνήθης. Σε εδάφη με χαμηλά ποσοστά λεπτόκοκκων, για σταθεροποίηση συνήθως γίνεται ισόποση ανάμειξη ασβέστη και τσιμέντου, δηλαδή 5% ασβέστη και 5% τσιμέντο κατά μάζα του εδάφους. Αυτό οδηγεί σε σημαντική αύξηση του περιβαλλοντικού αντικτύπου του τελικού προϊόντος (Malkanthi et al., 2020). Σε τέτοια εδάφη, όπου το συνδετικό υλικό είναι ασθενές ή απουσιάζει, έχουν προστεθεί λεπτόκοκκα ποζολανικά υλικά, πλούσια σε πυρίτιο και αργίλιο, βελτιώνοντας αισθητά την θλιπτική αντοχή του τελικού προϊόντος (Silva et al., 2015; Izemmouren et al., 2015). Οι Riaz et al. (2019), προχώρησαν σε αντικατάσταση, μέχρι και 25% της αργίλου, με σκόνη που προέκυψε ως παραπροϊόν από τη κεραμοποιία, παρατηρώντας ελάχιστη μείωση στην θλιπτική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας των δοκιμίων που εξέτασαν. Προσπαθώντας να βελτιώσουν, πέραν από τις αντοχές, και την ανθεκτικότητα στην επίδραση του νερού των ΣΩ, οι Eires et al. (2017) ανάμειξαν με το έδαφος ασβέστη και χρησιμοποιημένο μαγειρικό λάδι. Αυτό οδήγησε σε αύξηση περίπου 260% της θλιπτικής αντοχής του τελικού προϊόντος, και ταυτόχρονα σε μείωση του συντελεστή τριχοειδούς απορροφητικότητας από 3.95 kg/m²h^{1/2} σε 0.07 kg/m²h^{1/2}. Ο συντελεστής διάβρωσης μέσω της δοκιμής ψεκασμού υπό πίεση (βλ. ενότητα 3.2.3) επίσης μειώθηκε από 32.14 mm/h σε 0.08 mm/h.

Αν και οι πλείστοι κανονισμοί βασίζονται στην θλιπτική αντοχή για την εκτίμηση των υπόλοιπων μηχανικών χαρακτηριστικών των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων, στη βιβλιογραφία παρατηρούνται αρκετές δημοσιεύσεις όπου αυτές οι ιδιότητες προσδιορίζονται πειραματικά. Η εφελκυστική αντοχή των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων, για παράδειγμα, συνήθως προσδιορίζεται έμμεσα με τη δοκιμή κάμψης. Αυτό οδηγεί σε υπερεκτίμηση της συγκεκριμένης ιδιότητας, ωστόσο εξακολουθεί να αποτελεί μια πολύ καλή ένδειξη και συνήθη πρακτική (Ruiz et al., 2018). Η καμπτική αντοχή των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων φτάνει περίπου μέχρι τα 2 MPa (Ruiz et al., 2018; Bogas et al., 2019; Sitton et al., 2018; Silva et al., 2015; Yogananth et al., 2019; Reddy et al., 2007), ενώ η εφελκυστική αντοχή τους, προσδιοριζόμενη με το Brazilian test, φτάνει μέχρι περίπου το 1.5 MPa (Sturm et al., 2014; Ruiz et al., 2018; Miccoli et al., 2012).

Το μέτρο ελαστικότητας των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων προσδιορίζεται από την κλίση του γραμμικού τμήματος της καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων, που προκύπτει από τη δοκιμή της θλιπτικής αντοχής ($E = \frac{\sigma}{\delta L/L_0}$). Στους συμπιεσμένους ωμοπλίνθους, παρατηρείται γενικά χαμηλό μέτρο ελαστικότητας, σε σχέση με άλλα δομικά υλικά όπως το σκυρόδεμα, το οποίο δεν ξεπερνά συνήθως τα 2 GPa (Miccoli et al., 2015; Sturm et al., 2014; Muller et al., 2016; Miccoli et al., 2012).

Οι Ruiz et al. (2018) μέτρησαν πειραματικά μέτρο ελαστικότητας 5.64 GPa σε σταθεροποιημένους συμπιεσμένους ωμόπλινθους με τσιμέντο, 6% κ.μ. του εδάφους.

Ο σχεδιασμός των κτηρίων, πλέον, απαιτεί και μελέτη των θερμικών χαρακτηριστικών των δομικών υλικών. Ανά το παγκόσμιο, η θερμομονωτική ικανότητα ενός υλικού κρίνεται από την τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, λ . Στα γήινα δομικά υλικά, η τιμή του λ είναι αρκετά υψηλή για να θεωρούνται θερμομονωτικά. Στη βιβλιογραφία, παρατηρούνται τιμές συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για τους συμπιεσμένους ωμόπλινθους 0.5-1.5 W/mK (Saidi et al., 2018; Moussa et al., 2019; Giroudon et al., 2019; Bradley and Gohneit, 2018; Fgaier et al., 2015; Giada et al., 2019; Miloudi et al., 2019; Tatane et al., 2018). Η μείωση της πυκνότητας των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων επιφέρει μείωση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, αλλά και μείωση των αντοχών τους (Mansour et al., 2016; Saidi et al., 2018; Giroudon et al., 2019). Με την προσθήκη υλικών, όπως οι ίνες και το πριονίδι, μειώνεται η πυκνότητα, οπότεν παρατηρείται μείωση του λ μέχρι και στο 0.15 W/mK (Adam and Jones, 1995; Giroudon et al., 2019; Tatane et al., 2018), τιμή που πλησιάζει αυτή των θερμομονωτικών υλικών, που έχουν $\lambda < 0.1$ W/mK.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των γήινων δομικών υλικών, όσον αφορά τη θερμική απόδοση, είναι η μεγάλη θερμική τους μάζα (Giada et al., 2019; Fernandes et al., 2019). Οι διάφοροι κανονισμοί θερμομόνωσης, όμως, δεν λαμβάνουν υπόψιν αυτή την ιδιότητα (Giada et al., 2019). Σύμφωνα με τους Fgaier et al. (2015), με άλλα παρόμοια υλικά, όπως οι οπτόπλινθοι, για να επιτευχθεί η ίδια θερμική αδράνεια, όπως με μια κλασσική τοιχοποιία από συμπιεσμένους ωμόπλινθους πάχους 30 cm, πρέπει η τοιχοποιία να έχει πάχος 40 cm, με τα όποια προβλήματα μπορεί να δημιουργήσει σε θέμα χώρου η αύξηση αυτή. Ως μέτρο της θερμικής μάζας, εκφράζεται η ειδική θερμοχωρητικότητα, που στους συμπιεσμένους ωμόπλινθους κυμαίνεται από 800-1100 J/kgK (Moussa et al., 2019; Bradley and Gohneit, 2018; Giada et al., 2019; Miloudi et al., 2019).

3.2.3 Ανθεκτικότητα

Στο σχεδιασμό κατασκευών με συμπιεσμένους ωμόπλινθους, πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στα προβλήματα που αντιμετωπίζουν αυτά τα υλικά σε σχέση με την ανθεκτικότητά τους. Ο κύριος παράγοντας φθοράς των συμπιεσμένων ωμόπλινθων είναι το νερό (Kerali, 2005). Αυτό μπορεί να προέρχεται από τη βροχόπτωση, την ανερχόμενη υγρασία, από κάποια διαρροή ή από κακοτεχνίες κατά την κατασκευή (Heathcote, 2002). Η διερεύνηση της ανθεκτικότητας των συμπιεσμένων ωμόπλινθων μπορεί να γίνει με διάφορες δοκιμές, όπως τα wire brush, spray, drip, permeability and slake tests, καθώς επίσης και μέσω της συσχέτισης θλιπτικής αντοχής ξηρών και κορεσμένων δοκιμίων (Heathcote, 2002, Beckett et al., 2020). Αρκετοί ερευνητές διεξάγουν επίσης μετρήσεις απορροφητικότητας, κυρίως σε σταθεροποιημένα δοκίμια, και συνδέουν τα αποτελέσματα με την ανθεκτικότητα των ωμοπλίνθων (Guettala et al., 2002, Muntohar, 2011, Saidi et al., 2018).

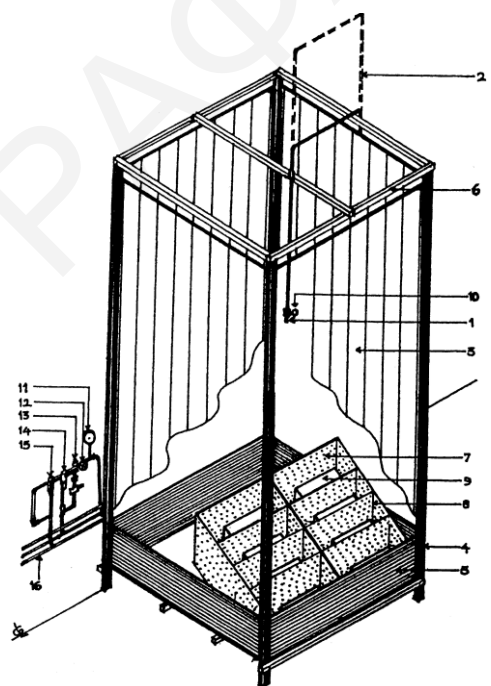
Η πλέον αντιπροσωπευτική δοκιμή για την επίδραση της βροχόπτωσης στους συμπίεσμένους ωμόπλινθους, σε βάθος χρόνου, είναι η δοκιμή ψεκασμού υπό πίεση. Στη βιβλιογραφία, παρατηρούνται αποτελέσματα από αυτή τη δοκιμή, όπως προδιαγράφεται στο NZS 4298 (1998), με τα μη-σταθεροποιημένα δοκίμια, γενικώς, να αποτυγχάνουν, ενώ τα σταθεροποιημένα να βρίσκονται εντός των αποδεκτών ορίων. Τα μη-σταθεροποιημένα δοκίμια παρουσιάζουν ρυθμούς διάβρωσης που κυμαίνονται από 9-38 mm/min (Walker, 2004; Mahdad and Benidir, 2018; Eires et al., 2017), ενώ τα σταθεροποιημένα μέχρι 2 mm/min (Walker, 2004; Mahdad and Benidir, 2018; Eires et al., 2017; Danso and Adu, 2019; Danso et al., 2015). Ωστόσο, επειδή η δοκιμή γίνεται στο πάνω ή το κάτω μέρος των δοκιμίων, ενώ στην πράξη τα τούβλα στη τοιχοποιία έχουν εκτεθειμένες τις πλαϊνές όψεις τους, μπορεί να μην υπάρχει άμεση συσχέτιση των αποτελεσμάτων, λόγω της επιφανειακής υφής και των επιπέδων συμπίεσης (Heathcote, 2002).

Οι Ogunye and Boussabaine (2002) επίσης θεωρούν ότι η πρότυπη δοκιμή ψεκασμού δεν αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα, και προτείνουν μια τροποποιημένη μορφή της (Εικ. 1). Στη δική τους δοκιμή, φτιάχνουν ένα θάλαμο, στον οποίο τα δοκίμια βρίσκονται σε κλίση 15°-45°, ως προς τη διεύθυνση πτώσης του νερού (και όχι σε γωνία 90°, όπως προδιαγράφει η πρότυπη δοκιμή). Γίνεται χρήση ενός ακροφύσιου τύπου full cone και το νερό πέφτει κατακόρυφα από ύψος 2 m.

Ο Heathcote (2002) επίσης προσπάθησε να φέρει πιο κοντά στις πραγματικές συνθήκες τη δοκιμή ψεκασμού υπό πίεση, με κύρια μετατροπή την αλλαγή του ακροφύσιου, αφού η βροχή είναι τυρβώδης και όχι με γραμμική ροή, όπως το ακροφύσιο που προδιαγράφεται στο NZS 4298 (1998).

Ο Kerali (2005) επισημαίνει ότι, στο πεδίο, οι κατασκευές δεν υφίστανται μόνο την επίδραση της βροχόπτωσης, αλλά και την επιφανειακή ροή του νερού, όπως επίσης και το πιτσίλισμα από τις άκρες των ανοιγμάτων και στα κατώτερα σημεία από την αναπήδηση των σταγόνων της βροχής, όταν αυτές πέφτουν στο έδαφος. Οπότε, πρέπει να γίνει μια συνδυαστική μελέτη της επίδρασης διαφόρων παραγόντων στην ανθεκτικότητα των συμπίεσμένων ωμόπλινθων, και ίσως να μελετηθούν επιμέρους τα διάφορα σημεία μιας κατασκευής (Beckett et al., 2020).

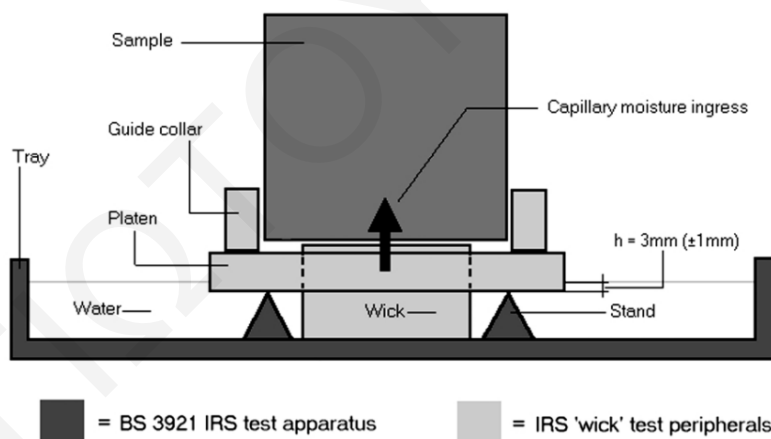
Η δοκιμή που προσομοιάζει το πιτσίλισμα των σταγόνων της βροχής είναι η δοκιμή της σταγόνας, που προδιαγράφεται στο Παράρτημα Ε του NZS 4298 (1998). Όπως και στη δοκιμή



Εικόνα 14: Σχηματική απεικόνιση της τροποποιημένης διάταξης ψεκασμού (Ogunye and Boussabaine, 2002).

ψεκασμού, η ίδια τάση παρατηρείται και στα αποτελέσματα της δοκιμής της σταγόνας, αφού τα μη σταθεροποιημένα δοκίμια συνήθως απορρίπτονται, παρουσιάζοντας βάθος τρύπας >15 mm, ενώ τα σταθεροποιημένα δοκίμια εμπίπτουν εντός των αποδεκτών ορίων, με βάθη τρύπας που κυμαίνονται μεταξύ 4-8 mm (Giroudon et al., 2019). Στην περίπτωση της δοκιμής σταγόνας, ωστόσο, παρατηρούνται και περιπτώσεις όπου μη σταθεροποιημένα δοκίμια κρίνονται ως αποδεκτά, αφού παρουσιάζουν βάθη τρύπας <15 mm (Danso, 2015).

Η εκτίμηση της αντοχής σε απότριψη, επίσης αποτελεί μια καλή ένδειξη για την καταλληλότητα ενός σταθεροποιητικού πρόσθετου και την αντίσταση του τελικού προϊόντος στην τριβή. Τα wire brush tests συσχετίζουν την απώλεια μάζας από το συμπιεσμένο ωμόπλινθο, με το εμβαδόν της περιοχής όπου γίνεται η απότριψη, για να εξάγουν ένα συντελεστή, C_a . Όσο μεγαλύτερος είναι αυτός ο συντελεστής, τόσο πιο καλή είναι η αντίσταση του συμπιεσμένου ωμόπλινθου σε απότριψη. Γενικά, με την σταθεροποίηση του υλικού, ο συντελεστής απότριψης αυξάνει (Izemmouren et al., 2015). Οι Giroudon et al. (2019) προσπάθησαν, με την προσθήκη ιών λεβάντας σε ποσοστό 6% κ.μ. του συνόλου του εδάφους και των ιών, να αυξήσουν την εφελκυστική αντοχή των δοκιμίων τους, κάτι που συνέισφερε και στην αύξηση του C_a από 3 cm²/g σε 13 cm²/g.



Εικόνα 15: Σχηματική απεικόνιση της δοκιμής της τριχοειδούς απορροφητικότητας με την χρήση σφουγγαριού (Hall and Djerbib, 2004).

Για τη μελέτη της δυνατότητας των συμπιεσμένων ωμόπλινθων να απορροφούν νερό, γίνονται δοκιμές απορροφητικότητας. Υπάρχουν δύο τύποι δοκιμών: η ολική απορρόφηση και η τριχοειδής απορροφητικότητα. Γενικά, παρατηρείται μια μείωση στην απορρόφηση νερού, όσο αυξάνει η περιεκτικότητα σε σταθεροποιητή (Hall and Djerbib, 2006; Saidi et al., 2018; Oti et al., 2009; Izemmouren et al., 2015). Ταυτόχρονα, παρατηρείται μείωση των δυνάμεων μύζησης όταν το συνδετικό υλικό στα δείγματα είναι <10% κ.μ. (Hall and Djerbib, 2004). Όμως, όπως προαναφέρθηκε, τόσο μικρή ποσότητα συνδετικού πιθανώς να δημιουργήσει προβλήματα πυκνότητας και αντοχών. Η ολική απορρόφηση σταθεροποιημένων συμπιεσμένων ωμοπλίνθων κυμαίνεται από 2 – 16 % κ.μ. (Guettala et al., 2002, Muntohar, 2011). Στην τριχοειδή

απορροφητικότητα, παρατηρούνται ιδιαίτερα υψηλές τιμές, σε σχέση με άλλα υλικά. Χαρακτηριστικά, σε σχέση με το σκυρόδεμα, η διαφορά είναι τουλάχιστον μια τάξη μεγέθους (Fabbri et al., 2019). Ο συντελεστής τριχοειδούς απορροφητικότητας των συμπίεσμένων ωμόπλινθων κυμαίνεται από 200-1000 g/m²sec^{1/2} (Fabbri et al., 2019; Subramaniaprasad et al., 2014). Η απευθείας επαφή με το νερό επιφέρει αλλαγές στη δομή των μη-σταθεροποιημένων συμπίεσμένων ωμόπλινθων (Subramaniaprasad et al., 2014), και έτσι στη δοκιμή της τριχοειδούς απορροφητικότητας προτείνεται να παρεμβάλλεται ένα απορροφητικό υλικό, πχ σφουγγάρι, μεταξύ του νερού και του δοκιμίου (Εικ. 15) (Hall and Djerbib, 2004).

Από τα μεγαλύτερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι κατασκευές από συμπίεσμένους ωμόπλινθους είναι οι εναλλασσόμενοι κύκλοι ύγρανσης/ξήρανσης. Για το σκοπό, αυτό γίνονται δοκιμές κύκλων ύγρανσης/ξήρανσης, κυρίως σε σταθεροποιημένα δοκίμια, που μπορούν να έρθουν σε απευθείας επαφή με το νερό. Ο Walker (2004) παρατήρησε απώλεια μάζας 2.3% μετά από 12 κύκλους που έκανε σύμφωνα με το ASTM D559.

Το αυξημένο ενδιαφέρον για χρήση συμπίεσμένων ωμόπλινθων, που παρατηρείται σε χώρες που βρίσκονται βορειότερα στον χάρτη, κάνει επιβεβλημένη την υποβολή των υλικών αυτών σε κύκλους ψύξης/απόψυξης (Mak et al., 2016). Η δοκιμή αυτή, παλαιότερα, θεωρούταν αχρείαστη, αφού οι ωμόπλινθοι χρησιμοποιούνταν σε περιοχές με ήπιους χειμώνες, οπότε δεν υπήρχαν προβλήματα παγετού. Σε σταθεροποιημένα δοκίμια, δεν παρατηρούνται ιδιαίτερα προβλήματα, αφού η απώλεια υλικού είναι πολύ μικρή, μέχρι 2.5% περίπου (Guettala et al., 2006; Oti et al., 2009; Mak et al., 2016). Ακόμα και σε χαμηλά ποσοστά σταθεροποιητή, π.χ. 5% κ.μ. τσιμέντο, με την χρήση κάποιου υδαταπωθητικού στο μείγμα, μπορεί να μειωθεί αρκετά η απώλεια υλικού (Mak et al., 2016).

Τέλος, η ανθεκτικότητα των συμπίεσμένων ωμόπλινθων στο φαινόμενο της κρυστάλλωσης αλάτων είναι εξίσου σημαντική. Το νερό που εισχωρεί σε ένα εδαφικό δομικό υλικό μπορεί να συμπαρασύρει μαζί του άλατα. Τα άλατα αυτά μπορεί να προέρχονται από το υπέδαφος, τον υδροφόρο ορίζοντα, ή τα σταθεροποιητικά πρόσθετα, όπως είναι το τσιμέντο (Hall and Djerbib, 2006; Bezerra and Azevedo, 2019; Chaibeddra and Kharchi, 2019). Όταν το νερό εξατμιστεί, τότε τα άλατα κρυσταλλώνονται, με αποτέλεσμα, όταν γεμίσουν τους πόρους, να ασκούν τάσεις στα τοιχώματά τους (Bezerra and Azevedo, 2019), η οποία όταν υπερνικήσει την εφελκυστική αντοχή του υλικού οδηγεί σε ρωγμάτωση. Οι Chaibeddra and Kharchi (2019), μελετώντας το φαινόμενο της κρυστάλλωσης αλάτων σε σταθεροποιημένους συμπίεσμένους ωμόπλινθους, διαπίστωσαν ότι τα χονδρόκοκκα εδάφη έχουν καλύτερη συμπεριφορά από τα λεπτόκοκκα, λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους πόρων του τελικού προϊόντος. Στη μελέτη τους οι ίδιοι ερευνητές, επίσης, αναφέρουν ότι είναι καλό να γίνεται έλεγχος της αντοχής των ΣΩ που εκτίθενται σε κρυστάλλωση αλάτων, πέραν από την καταγραφή της απώλειας υλικού, αφού σε πολλές περιπτώσεις η κρυστάλλωση αλάτων δεν επιφέρει απώλεια μάζας, αλλά προκαλεί σημαντική μείωση στις αντοχές. Αυτό οφείλεται κυρίως

στο γεγονός πως η πλήρωση των πόρων με κρυστάλλους άλατος έχει αντίκτυπο στη μετρούμενη μάζα. Πέραν από τα πιο πάνω, σημαντικό ρόλο στην επίδραση της κρυστάλλωσης αλάτων στους ΣΩ διαδραματίζει η ορυκτολογική σύσταση του εδάφους και το άλας που κρυσταλλώνεται (Ioannou and Plambas, 2019). Χαρακτηριστικά, σημειώνεται ότι αν στο έδαφος υπάρχουν μικρές ποσότητες γύψου, πιθανώς, μετά τη διάλυση και κρυστάλλωση τους, να δημιουργήσουν βελονοειδείς κρυστάλλους εττριγκίτη που επηρεάζουν τη μικροδομή των υλικών, με αποτέλεσμα τη μείωση των αντοχών των ΣΩ (Ioannou and Plambas, 2019; Chaibeddra and Kharchi, 2019).

3.3 Κανονισμοί

Οι κανονισμοί είναι κείμενα στα οποία καθορίζονται οι βασικές πτυχές δόμησης με ένα συγκεκριμένο δομικό υλικό. Στην περίπτωση της γήινης δόμησης, δεν υπάρχουν τέτοιου είδους έγγραφα, τουλάχιστον σε διεθνές επίπεδο (Fgaier et al., 2016). Κάποιες χώρες ή/και οργανισμοί, σε τοπικό επίπεδο, έχουν προχωρήσει στην έκδοση κανονιστικών εγγράφων για να διασφαλίσουν την απαιτούμενη ποιότητα στη γήινη δόμηση. Τέτοιες χώρες είναι η Νέα Ζηλανδία, η Γαλλία, η Γερμανία και η Βραζιλία. Μερικές από αυτές έφτιαξαν ολοκληρωμένα έγγραφα που

Πίνακας 6: Διαθέσιμοι κανονισμοί για την παραγωγή ΣΩ.

Κανονιστικό έγγραφο	Χώρα	Περιγραφή
IS 1725	Ινδία	Το πρότυπο καλύπτει τις απαιτήσεις και τις δοκιμές που πρέπει να γίνουν σε εδαφικά τούβλα πριν αυτά χρησιμοποιηθούν για δόμηση.
NBR 8492	Βραζιλία	Το πρότυπο καθορίζει τη μεθοδολογία προσδιορισμού των διαστάσεων, της θλιπτικής αντοχής και της απορροφητικότητας για τούβλα εδάφους-τσιμέντου που προορίζονται για μη-φέρουσα τοιχοποιία.
ARS 670-683	Αφρική	Τα πρότυπα αυτά θέτουν προδιαγραφές για συνήθη ΣΩ.
NT 21.33	Τυνησία	Το πρότυπο καθορίζει τα γενικά χαρακτηριστικά των ΣΩ και τις δοκιμές που πρέπει να γίνουν πριν αυτά χρησιμοποιηθούν για δόμηση.
NZS 4297, 4298, 4299	Νέα Ζηλανδία	Τα πρότυπα αυτά θέτουν προδιαγραφές για τα γήινα δομικά υλικά και τη διαδικασία παραγωγής τους, και δίνουν τις κατευθυντήριες γραμμές για το σχεδιασμό ενός κτηρίου, τόσο στατικά, όσο και με βάση την ανθεκτικότητα.
KS 02-1070	Κένυα	Το πρότυπο καθορίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις για σταθεροποιημένους ΣΩ.
XP P13-901	Γαλλία	Το πρότυπο καθορίζει τα γενικά χαρακτηριστικά των ΣΩ, τις δοκιμές που πρέπει να γίνουν πριν αυτά χρησιμοποιηθούν για δόμηση, και τη σήμανση που πρέπει να έχουν ανάλογα με τις ιδιότητες τους.
NTC 5324	Κολομβία	Το πρότυπο καθορίζει τα γενικά χαρακτηριστικά των ΣΩ, τις δοκιμές που πρέπει να γίνουν πριν αυτά χρησιμοποιηθούν για δόμηση, και τη σήμανση που πρέπει να έχουν ανάλογα με τις ιδιότητες τους.
UNE 41410	Ισπανία	Το πρότυπο καθορίζει τα γενικά χαρακτηριστικά των ΣΩ, τις δοκιμές που πρέπει να γίνουν πριν αυτά χρησιμοποιηθούν για δόμηση, και τη σήμανση που πρέπει να έχουν ανάλογα με τις ιδιότητες τους. Απευθύνεται σε φέρουσες και μη τοιχοποιίες.
ASTM E2393M-10	ΗΠΑ	Το πρότυπο δίνει κατευθυντήριες γραμμές για τη γήινη δόμηση, παραθέτοντας τεχνικές προδιαγραφές. Αναφέρεται σε φέρουσες και μη τοιχοποιίες.
NMAC 14.7.4	Νέο Μεξικό, ΗΠΑ	Το πρότυπο καθορίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις για κατασκευές με γήινα υλικά στο Νέο Μεξικό.
SLS 1382	Σρι Λάνκα	Το πρότυπο θέτει τις προδιαγραφές για σταθεροποιημένους ΣΩ. Καλύπτει στερεούς, κοίλους, αλληλοσυνδεδεμένους και επίπεδους ΣΩ.
CraTerre EAG	Γαλλία	Τα πρότυπα καθορίζουν το διαχωρισμό, την ονοματολογία, τους εργαστηριακούς ελέγχους και τη διαδικασία παραγωγής των ΣΩ.
DIN 18945-47.	Γερμανία	Τα πρότυπα αφορούν μη σταθεροποιημένους ΣΩ.

καλύπτουν όλες τις βασικές πτυχές της γήινης δόμησης, ενώ άλλες έφτιαξαν επιμέρους οδηγούς για συγκεκριμένα ζητήματα που αφορούν την εκάστοτε περιοχή. Στον Πίνακα 6 καταγράφονται όλα οι διαθέσιμοι κανονισμοί που αφορούν την παραγωγή και χρήση συμπιεσμένων ωμόπλινθων.

Όλα τα υπάρχοντα έγγραφα υπογραμμίζουν την ιδιαίτερη έμφαση που πρέπει να δίνεται στην επίδραση του νερού στη γήινη αρχιτεκτονική, συμπεριλαμβανομένης της δόμησης με ΣΩ. Για το σκοπό αυτό στους κανονισμούς προδιαγράφεται η χρήση υδαταπωθητικής μεμβράνης στα θεμέλια για την παρεμπόδιση της ανερχόμενης υγρασίας (CraTerre – EAG, 1998, NZS 4298, 1998, Volhard and Röhlen, 2007). Στο NZS 4299 (1998), συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι η τοποθέτηση της υδαταπωθητικής μεμβράνης πρέπει να γίνεται στο άνω μέρος του θεμελίου, ακριβώς κάτω από την τοιχοποιία. Για να διασφαλιστεί η ανθεκτικότητα των θεμελίων στον χρόνο, αυτά πρέπει να είναι κατασκευασμένα είτε από κάποιο υλικό ανθεκτικό στην επίδραση του νερού, όπως η πέτρα, είτε από κάποιο υλικό με χαμηλή απορροφητικότητα, όπως το σκυρόδεμα (NZS 4298, 1998, CraTerre – EAG, 1998). Για την προστασία της τοιχοποιίας από τη βροχόπτωση, προδιαγράφεται η κατασκευή ικανοποιητικών προβόλων για κάλυψη αρκετά μεγάλου τμήματός της. Ωστόσο, οι πολύ μεγάλοι αδιαφανείς πρόβολοι μπορούν να επιφέρουν αρνητικά αποτελέσματα στη θερμική απόδοση ενός κτηρίου, οπότεν πρέπει να γίνεται μια εξισορρόπηση των δύο παραμέτρων για το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα (NZS 4299, 1998). Ο τελευταίος τρόπος για προστασία από την υγρασία είναι τα επιχρίσματα. Τα εξωτερικά επιχρίσματα πρέπει να είναι ανθεκτικά στις καιρικές συνθήκες (Volhard and Röhlen, 2007), να μην επιτρέπουν τη διείσδυση της υγρασίας και να δημιουργούν ικανοποιητικό δεσμό (πρόσφυση) με την τοιχοποιία.

Πίνακας 7: Όρια διαστάσεων ΣΩ που θέτουν οι διάφοροι κανονισμοί (Cid – Falceto et al., 2012).

Κανονιστικό Έγγραφο	Μήκος (cm)	Πλάτος (cm)	Ύψος (cm)
IS 1725	19-29	9-19	4-9
NBR 8492	20-23	10-11.5	5
ARS 674	29.5	14	9-9.5
NT21.33	29	14.5	9
NZS	29.5-30	14.5-15	9-10
KS 02-1070	20-40	7-20	5-15
XP P13-901	22-29,5	14-22	9,5
NTC 5324	22-29,5	14-22	9,5
SLS 1382	22-29	11-22	7-13

Ο τρόπος δόμησης καθορίζεται πολλές φορές από τους διαθέσιμους συμπιεσμένους ωμόπλινθους. Οι διάφοροι διαθέσιμοι κανονισμοί, ωστόσο, συνήθως προδιαγράφουν καθορισμένες διαστάσεις που πρέπει να τηρούν οι ωμόπλινθοι. Στο Sudan, για παράδειγμα, οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι που παράγονται έχουν διαστάσεις 290 mm x 140 mm x 100 mm (Adam and Agib, 2001), ενώ στη Βραζιλία προδιαγράφεται η χρήση ωμοπλίνθων μήκους 200 – 230 mm, πλάτους 100 – 115 mm και ύψους 50 mm (NBR, 1986). Από τα πιο πάνω, προκύπτει ότι δεν υπάρχουν συγκεκριμένα,

καθολικά αποδεκτά, όρια όσον αφορά το μέγεθος των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων. Οπότε, η κάθε χώρα προσαρμόζει τις διαστάσεις των ΣΩ ανάλογα με τις ανάγκες της και τη διαθεσιμότητα των υλικών. Σε μια ανασκόπηση αρκετών κανονιστικών εγγράφων, οι Cid – Falceto et al. (2012) κατέγραψαν τα όρια μεγεθών που θέτουν τα διάφορα έγγραφα (Πίν. 7). Από αυτή την καταγραφή, επιβεβαιώνεται ότι το μέγεθος των ΣΩ διαφοροποιείται, ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε χώρας.

Μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους κατά το σχεδιασμό μίας ωμοπλινθοδομής με συμπιεσμένους ωμόπλινθους είναι η θλιπτική αντοχή των λιθοσωμάτων. Η θλιπτική αντοχή μπορεί να προσδιοριστεί σε ξηρά και κορεσμένα δοκίμια. Σύμφωνα με τα έγγραφα της CraTerre – EAG (1998), η θλιπτική αντοχή ξηρών δοκιμίων στις 28 μέρες ωρίμανσης πρέπει να είναι τουλάχιστον 2 MPa για μη σταθεροποιημένους συμπιεσμένους ωμόπλινθους, 2-4 MPa για σταθεροποιημένους συμπιεσμένους ωμόπλινθους και > 4 MPa για επιμελώς σταθεροποιημένα δοκίμια. Η δε θλιπτική αντοχή κορεσμένων δοκιμίων στις 28 μέρες πρέπει να είναι τουλάχιστον 0.1 – 0.5 MPa για μη σταθεροποιημένους συμπιεσμένους ωμόπλινθους, > 1 MPa για σταθεροποιημένα δοκίμια και > 2 MPa για επιμελώς σταθεροποιημένα δοκίμια. Στα υπόλοιπα έγγραφα δεν γίνεται διαχωρισμός για σταθεροποιημένα ή όχι δοκίμια, αλλά εφαρμόζεται μια κοινή συνθήκη. Η ελάχιστη θλιπτική αντοχή ξηρών δοκιμίων που προδιαγράφεται είναι τα 1.25 MPa, και κορεσμένων δοκιμίων το 1 MPa (Cid – Falceto et al., 2012). Οι απαιτήσεις των διαφόρων κανονιστικών εγγράφων ως προς τη θλιπτική αντοχή ξηρών/κορεσμένων δοκιμίων φαίνονται αναλυτικά στον Πίνακα 8.

Πίνακας 8: Ελάχιστες απαιτήσεις θλιπτικών αντοχών σε ξηρά και κορεσμένα δοκίμια ΣΩ (Cid – Falceto et al., 2012).

Κανονιστικό έγγραφο	Θλιπτική αντοχή ξηρών δοκιμίων (MPa)	Θλιπτική αντοχή κορεσμένων δοκιμίων (MPa)	Διαστάσεις
IS 1725	2	-	Ολόκληρα τούβλα
NBR 8492	2	-	Rilem test (σύμπλοκα)
ARS 674	2	1	29.5 cm x 14 cm x 9-9.5 cm
NT 21.33	2	1	nd
NZS	1.3	-	Ύψος/Πλάτος = 1 (αν όχι, γίνεται κανονικοποίηση βάσει της σημείωσης 4, σελ. 25 και του Appendix A του NZS 4298)
KS 02 – 1070	2.5	1.5	nd
XP P 13 - 901	2	-	Rilem test (σύμπλοκα)
NTC 5324	2	1	Rilem test (σύμπλοκα)
UNE 41410	1.3	-	Κανονικοποίηση αποτελεσμάτων
SLS 1382	2.75	1.25	nd
ASTM E2392M	2	-	nd
NMAC 14.7.4	ca. 2	-	Height/width ≥2

Στα έγγραφα της CraTerre – EAG (1998), τα όρια που τίθενται για την καμπτική αντοχή σε μη σταθεροποιημένα δοκίμια είναι 0.5 – 1 MPa, ενώ για το μέτρο ελαστικότητας είναι στα 700 – 7000 MPa για επιμελώς σταθεροποιημένα δοκίμια.

Υπό το πρίσμα της αιφόρου ανάπτυξης και της πράσινης δόμησης, είναι σημαντικό να εξεταστεί και η θερμική απόδοση των συμπιεσμένων ωμόπλινθων. Κατά κύριο λόγο, τα όρια που τίθενται στους διάφορους κανονισμούς αναφέρονται στο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, λ , χωρίς να λαμβάνονται υπόψιν οι άλλες θερμικές ιδιότητες του υλικού, όπως η θερμική μάζα. Τα όρια που τίθενται στα έγγραφα της CraTerre – EAG (1998), για παράδειγμα, είναι 0.81 – 1.04 W/mK . Στο NZS 4297 (1998), ωστόσο, υπάρχει μια διαφορετική προσέγγιση στην εκτίμηση της θερμικής απόδοσης μιας τοιχοποιίας από συμπιεσμένους ωμόπλινθους. Συγκεκριμένα, δεν λαμβάνονται υπόψιν τα χαρακτηριστικά του υλικού, αλλά το πάχος της τοιχοποιίας, μέσα από το οποίο εξάγεται η θερμική αντίσταση, R , η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$R = (2.04 * b) + 0.12 \quad [\text{Εξ. 1}]$$

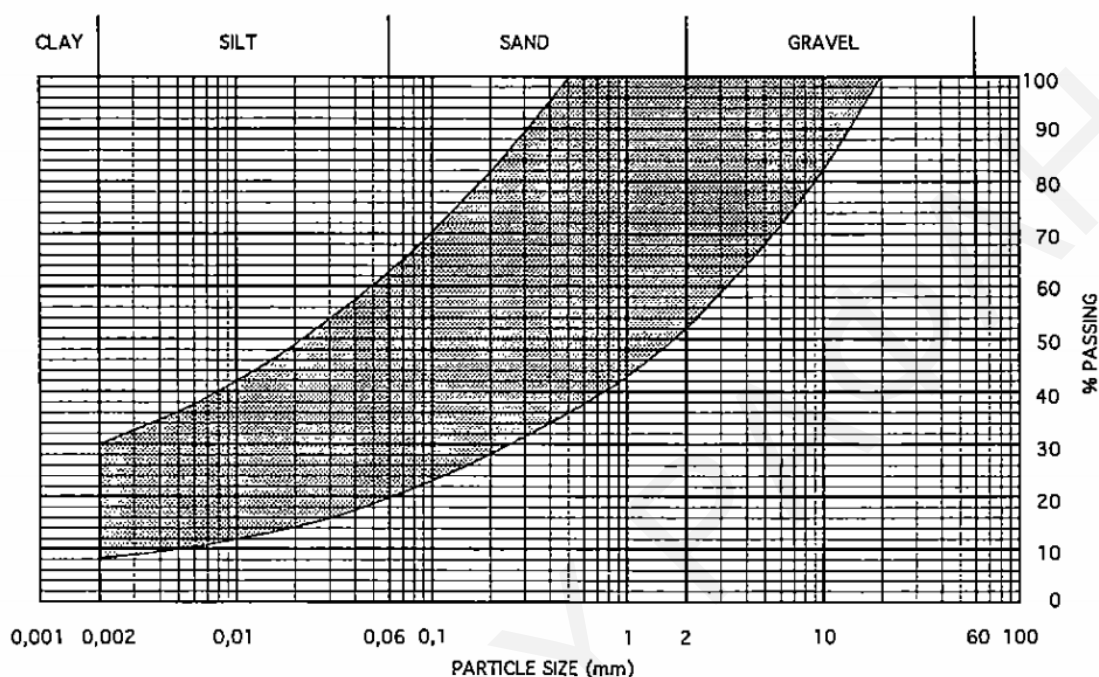
όπου b είναι το πάχος της τοιχοποιίας. Η θερμική αντίσταση έχει μονάδες m^2C/W . Σύμφωνα με το NZS 4297 (1998), πάχος τοιχοποιίας 280 mm είναι ικανό να ικανοποιήσει τις τοπικές απαιτήσεις θερμομόνωσης.

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά, όπως και οι θερμικές ιδιότητες των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων, είναι άμεσα συνυφασμένες με τη πυκνότητά τους. Τα μεν μηχανικά χαρακτηριστικά έχουν την τάση να βελτιώνονται με αύξηση της πυκνότητας, ενώ οι θερμικές ιδιότητες γενικώς είναι καλύτερες με χαμηλότερη πυκνότητα. Συνδυάζοντας αυτά τα δεδομένα, οι διάφοροι κανονισμοί θέτουν κάποια όρια, ούτως ώστε οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι να παρουσιάζουν ταυτόχρονα καλή μηχανική και θερμική συμπεριφορά. Για αυτό το λόγο, πολλές φορές δεν επιδιώκεται η υψηλότερη πιθανή πυκνότητα, αλλά κάποια μεσαία τιμή που να συνδυάζει τόσο καλή μηχανική συμπεριφορά, όσο και θερμική. Η CraTerre – EAG θέτει ως όρια τα 1700 – 2200 kg/m^3 , με την προτεινόμενη τιμή πυκνότητας να είναι τα 2000 kg/m^3 . Στις κατευθυντήριες γραμμές που έχει εκδώσει το German Association for Building with Earth (2007), η πυκνότητα των συμπιεσμένων ωμόπλινθων που προορίζονται για δόμηση φέρουσας τοιχοποιίας πρέπει να κυμαίνεται από 600–2200 kg/m^3 , με τα λιθοσώματα που έχουν πυκνότητα < 1200 kg/m^3 να θεωρούνται ελαφροβαρή.

Οι περισσότεροι κανονισμοί και οι οδηγίες που εκδόθηκαν για τη δόμηση με συμπιεσμένους ωμόπλινθους θέτουν περιορισμούς σε ότι αφορά την πρώτη ύλη που θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή τους. Σε κάποια από αυτά, μάλιστα, θεωρείται ίσως ο κυριότερος παράγοντας που πρέπει να διερευνηθεί για την καταλληλότητα του τελικού προϊόντος. Αναμφίβολα, η πρώτη ύλη είναι μια σημαντική παράμετρος στην παραγωγή $\Sigma\Omega$ και για αυτό, σχεδόν όλα τα έγγραφα προδιαγράφουν δοκιμές χαρακτηρισμού του εδάφους, όπως η κοκκομετρική διαβάθμιση και τα όρια συνεκτικότητας.

Στα έγγραφα της CraTerre – EAG (1998), γίνεται η εκτενέστερη μελέτη και τίθενται αρκετά όρια, τα οποία αναφέρονται στο εδαφικό υλικό. Μέσα από τη μελέτη των εγγράφων αυτών,

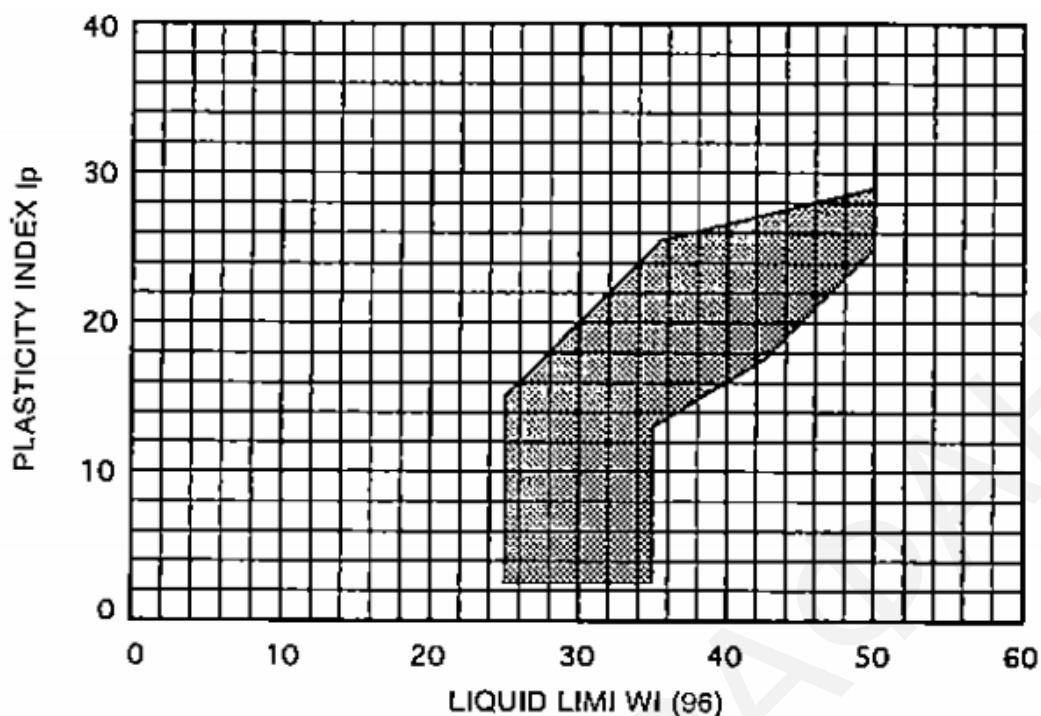
διαφαίνεται ότι θεωρούνται μείζονος σημασίας οι ιδιότητες του εδάφους για την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Γενικά, όσον αφορά καθαρά τη σύσταση του εδαφικού υλικού, δεν πρέπει να γίνεται χρήση εδαφών με οργανικά ή άλατα, για λόγους διογκώσεων και κρυστάλλωσης.



Εικόνα 16: Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης για την παραγωγή ΣΩ (CraTerre – EAG, 1998).

Η μεγαλύτερη προσοχή δίδεται στην κοκκομετρική διαβάθμιση του εδάφους. Οι αναλογίες των επιμέρους κοκκομετρικών μεγεθών πρέπει να τηρούν κάποια όρια, ούτως ώστε να μπορεί να δημιουργηθεί μια πυκνή δομή στο υλικό μετά τη συμπίεση. Τα όρια αυτά είναι 0 – 40% χαλίκια (2 – 20 mm), 25 – 80% άμμος (0.06 – 2 mm), 10 – 25% ιλύς (0.002 – 0.06 mm) και 8 – 30% άργιλος (<math>< 0.002 \text{ mm}</math>). Ωστόσο, τα όρια αυτά δεν είναι απόλυτα και μπορούν να αξιολογηθούν βάσει των ιδιοτήτων των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων, αφού, όπως αναφέρεται στα έγγραφα, εδάφη με άργιλο μέχρι και 70% μπορούν να οδηγήσουν σε τελικό προϊόν με αποδεκτές ιδιότητες. Η προτεινόμενη κοκκομετρική διαβάθμιση για την παραγωγή ΣΩ (Εικ. 16) εξαρτάται και από τη χρησιμοποιούμενη πρέσα. Αν η πρέσα είναι ευαίσθητη, δηλαδή η πίεση που ασκεί είναι μικρή, τότε το μέγιστο μέγεθος κόκκου δεν πρέπει να ξεπερνά τα 5 mm, ενώ αν είναι λιγότερο ευαίσθητη, τότε το μέγιστο μέγεθος κόκκου μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 20 mm.

Η CraTerre – EAG (1998) θέτει κατευθυντήριες γραμμές και στα όρια συνεκτικότητας. Τα όρια αυτά φαίνονται στην Εικόνα 17, ωστόσο ούτε σε αυτήν την περίπτωση θεωρούνται ως απόλυτα, αλλά κρίνονται βάσει του τελικού προϊόντος. Θεωρείται όμως ότι, αν το έδαφος εμπίπτει εντός των προτεινόμενων ορίων, τότε θα δώσει τελικό προϊόν με ικανοποιητικές ιδιότητες.



Εικόνα 17: Πεδίο στο οποίο πρέπει να εμπίπτουν τα όρια συνεκτικότητας για την παραγωγή ΣΩ (CraTerre – EAG, 1998).

Στις κατευθυντήριες γραμμές που έχει εκδώσει το German Association for Building with Earth (2007), γίνεται αρκετή συζήτηση για την πρώτη ύλη, ωστόσο δεν τίθενται συγκεκριμένα όρια για τις επιμέρους ιδιότητες. Αυτό που προτείνεται είναι κυρίως κάποιες δοκιμές, οι οποίες αναμένεται ότι θα βοηθήσουν στην αξιολόγηση του υλικού. Πολλές από αυτές τις δοκιμές είναι εμπειρικές, όπως το ball drop test και το ball forming test. Σε αυτές τις δοκιμές, γίνεται μια προσπάθεια εκτίμησης της σύστασης του υλικού, της κοκκομετρίας ή της συνοχής του, με βάση εμπειρικές παρατηρήσεις, όπως το χρώμα, ο τρόπος που σπάζει όταν πέσει από κάποιο ύψος μια μπάλα υλικού, ή της αίσθησης που αφήνει στο χέρι. Πέραν από αυτές τις δοκιμές, γίνεται και αναφορά σε κάποιες εργαστηριακές δοκιμές. Αρχικά, προτείνεται η διερεύνηση της συνοχής του εδαφικού υλικού, δηλαδή η αντίσταση του σε εφελκυσμό. Για να είναι αποδεκτό ένα υλικό πρέπει να έχει συνοχή μεγαλύτερη από 50 g/cm² (Πίν. 9). Ακολούθως, προδιαγράφεται η μελέτη της κοκκομετρικής διαβάθμισης με συγκεκριμένη ακολουθία κοσκίνων, που είναι 2 mm, 1 mm, 0.25 mm, 0.06 mm, οπότε δεν γίνεται διαχωρισμός της αργίλου από την ιλύ. Τέλος, στα όρια συνεκτικότητας υπάρχει μια κατηγοριοποίηση του υλικού, όπου όσον αφορά το όριο υδαρότητας, εάν αυτό είναι < 35% θεωρείται μικρό, από 35 – 50% μεσαίο, και > 50% υψηλό, χωρίς όμως να τίθενται συγκεκριμένα όρια καταλληλότητας. Στο συγκεκριμένο έγγραφο θεωρείται ότι ο δείκτης πλαστικότητας μπορεί να διαχωρίσει τα εδάφη ανάλογα με το συνδετικό τους υλικό. Εάν ο δείκτης πλαστικότητας είναι > 7% (ή 0.73% όταν το όριο υδαρότητας είναι μικρότερο του 20%), τότε το συνδετικό είναι αργιλικό, ενώ όταν ο δείκτης πλαστικότητας είναι < 4% (ή 0.73% όταν το όριο υδαρότητας είναι μικρότερο του 20%), τότε το συνδετικό είναι ιλύς.

Πίνακας 9: Διαχωρισμός των εδαφικών υλικών βάσει της συνοχής τους (Volhard and Röhlen, 2007).

<i>Designation</i>	<i>Binding Strength (g/cm²)</i>
<i>Very thin</i>	50 – 80
<i>Thin</i>	80 – 110
<i>Almost fat</i>	110 – 200
<i>Fat</i>	200 – 280
<i>Very fat</i>	280 – 360
<i>Clay</i>	>360

Τα New Zealand Standards δεν δίνουν ιδιαίτερη έμφαση στην πρώτη ύλη για την παραγωγή συμπιεσμένων ωμόπλινθων. Γίνεται απλά μια αναφορά σε κάποια εδαφικά υλικά, συγκεκριμένα στο NZS 4298 (1998), που δεν συστήνεται να χρησιμοποιούνται. Αυτά είναι:

- Εδάφη που περιέχουν οργανικό υλικό
- Εδάφη που περιέχουν διαλυτά άλατα,
- Εδάφη με μεγάλα αδρανή που επηρεάζουν τις αντοχές η την ομοιογένεια των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων,
- Εδάφη που, μετά από ξήρανση, παρουσιάζουν λεπτές ρωγμές και
- Εδάφη που αποτυγχάνουν στη δοκιμή κύκλων ύγρανσης/ξήρανσης που προδιαγράφεται στο παράρτημα Γ του NZS 4298 (1998).

Πέραν από αυτούς τους περιορισμούς, δεν τίθεται κάποιο άλλο όριο για τα εδαφικά υλικά που θα χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή συμπιεσμένων ωμόπλινθων. Στο ίδιο πλαίσιο, περίπου, κινείται και ένας οδηγός καλών πρακτικών που εκδόθηκε στην Αμερική από τον Bowen (2017), όπου απλά αναφέρεται ότι οι εργάτες χρησιμοποιούν 40-70% άμμο, 15-60% άργιλο και 8-12% νερό για να φτιάξουν συμπιεσμένους ωμόπλινθους.

Τα New Zealand Standards δίδουν ιδιαίτερη έμφαση και στην ανθεκτικότητα στο χρόνο. Βάσει του NZS 4297 (1998), για να είναι ανθεκτικό σε διάρκεια ένα κτήριο από συμπιεσμένους ωμόπλινθους, πρέπει να έχει διάρκεια ζωής ≥ 50 χρόνια. Οι απαραίτητες προϋποθέσεις για αυτό είναι να μην μειωθεί το πάχος της τοιχοποιίας $> 5\%$ ή 30 mm, να γίνεται βασική συντήρηση και να μην χρησιμοποιηθούν αδιαπέρατα επιχρίσματα, όπως τα τσιμεντοκονιάματα. Πέραν από τα πιο πάνω, γίνεται ιδιαίτερη αναφορά και στο σχεδιασμό της κατασκευής με βάση την ανθεκτικότητα, αλλά και σε εργαστηριακές δοκιμές που βοηθούν στην εκτίμηση της ανθεκτικότητας των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων. Οι δοκιμές αυτές έχουν ως στόχο την εκτίμηση της επίδρασης του νερού στα λιθοσώματα και της καταλληλότητάς τους για δόμηση. Στις δοκιμές ανθεκτικότητας εντάσσονται οι κύκλοι ύγρανσης/ξήρανσης (Παράρτημα C, NZS 4298:1998), η δοκιμή ψεκασμού υπό πίεση (Παράρτημα D, NZS 4298:1998) και η δοκιμή σταγόνας (Παράρτημα E, NZS

4298:1998), τα οποία περιγράφονται εκτενώς στο κεφάλαιο 4. Όλες οι πιο πάνω δοκιμές γίνονται πριν την χρήση των ΣΩ και, αν χρειάζεται, κατά τη διάρκεια της κατασκευής, για να διασφαλιστεί η ποιότητα των συμπίεσμένων ωμοπλίνθων που χρησιμοποιούνται. Ο αριθμός και ο τύπος των δοκιμών που πρέπει να διεξαχθούν για την εξακρίβωση της ποιότητας των συμπίεσμένων ωμοπλίνθων περιγράφεται στον Πίνακα 2.1 του NZS 4298 (1998) (Παράρτημα Α), όπου τίθενται και τα επιθυμητά όρια για κάποιες από αυτές τις δοκιμές.

Η σύνδεση των πειραματικών ελέγχων με το σχεδιασμό ενός κτηρίου γίνεται μέσα από το Appendix A του NZS 4297 (1998), όπου προδιαγράφεται η μεθοδολογία για το σχεδιασμό τοιχοποιίας με βάση την ανθεκτικότητα στον χρόνο. Με τη μέθοδο αυτή, γίνεται σύνδεση των καιρικών συνθηκών με την ανθεκτικότητα των συμπίεσμένων ωμοπλίνθων. Αυτό επιτυγχάνεται με τον υπολογισμό ενός δείκτη διάβρωσης, LEI, της τοιχοποιίας από το γινόμενο τεσσάρων επιμέρους παραγόντων, όπως φαίνεται στην εξίσωση 2, όπου ο κάθε παράγοντας σχετίζεται με μια διαφορετική πτυχή της επίδρασης των περιβαλλοντικών συνθηκών στην τοιχοποιία. Πέραν από τον υπολογισμό του δείκτη LEI για την τοιχοποιία, υπάρχει αντιστοίχιση των αποτελεσμάτων των δοκιμών στα τούβλα με κάποια τιμή του LEI, ούτως ώστε να μπορεί να συγκριθεί η ανθεκτικότητα του τούβλου με την επιθυμητή ανθεκτικότητα της τοιχοποιίας.

$$LEI = k_1 * k_2 * k_3 * k_4 \quad [Εξ. 2]$$

Όπου: $k_1 = \frac{500}{\sqrt[3]{p * V_z}}$

p: ετήσια βροχόπτωση [mm]

V_z : ταχύτητα ανέμου [m/s]

k_2 = παράγοντας προσανατολισμού τοιχοποιίας

$$k_3 = 1 + \frac{2b}{h}$$

b: μήκος προεξοχής προβόλου [mm]

h: ύψος τοιχοποιίας [mm]

k_4 = παράγοντας τοποθεσίας (1 για τη Νέα Ζηλανδία, εκτός από την περιοχή Northland που είναι 0.93).

Για να είναι κατάλληλος ένας τύπος συμπίεσμένων ωμοπλίνθων για δόμηση στην υπό μελέτη τοιχοποιία πρέπει να τηρείται η συνθήκη $LEI_{samples} \leq LEI_{wall}$.

Αν και, όπως προαναφέρθηκε, δεν υπάρχει κοινή πορεία και τρόπος αξιολόγησης των γήινων υλικών, υπολογίζεται ότι, ανά το παγκόσμιο, περίπου το 30% του πληθυσμού εξακολουθεί να ζει σε γήινες κατασκευές, οι οποίες βρίσκονται κυρίως στην Αφρική, τη Μέση Ανατολή και την Κεντρική Αμερική (Bogas et al., 2019). Η περαιτέρω δόμηση με γήινα υλικά, ωστόσο, παρεμποδίζεται λόγω της απουσίας κανονιστικών εγγράφων. Η εισαγωγή των γήινων υλικών στη

σύγχρονη αρχιτεκτονική μπορεί να συνεισφέρει στην πορεία προς την αειφορία, λόγω της χαμηλής εμπεριεχόμενης ενέργειάς τους (Bogas et al., 2019). Οπότεν, καθίσταται επιτακτική η ανάγκη για δημιουργία διεθνών κανονιστικών εγγράφων που θα διέπουν τη γήινη δόμηση.

ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΥ ΡΑΦΑΗΛ

4. Υλικά και μεθοδολογία

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται ο τρόπος παραγωγής και η πειραματική προσέγγιση που ακολουθήθηκε για τη μελέτη των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων της Κύπρου. Αρχικά, περιγράφεται η πρώτη ύλη που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των υλικών και ο τρόπος με τον οποίο έγινε ο χαρακτηρισμός της. Ακολούθως, γίνεται αναφορά στον τρόπο παραγωγής των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων και στην αποθήκευσή τους. Τέλος, περιγράφονται οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για τον προσδιορισμό των φυσικό-μηχανικών ιδιοτήτων και της ανθεκτικότητας των τελικών προϊόντων.

4.1 Επιλογή και χαρακτηρισμός πρώτης ύλης

Το έδαφος αποτελεί τη βασική πρώτη ύλη για την παρασκευή συμπιεσμένων ωμοπλίνθων. Τα εδαφικά υλικά δεν αποτελούν σε καμία περίπτωση, είτε από άποψη ορυκτολογίας είτε χημικής σύστασης, καθορισμένα προϊόντα. Άρα, παρατηρούνται ουσιαστικές διαφορές ανάμεσα σε διάφορα εδάφη, ανάλογα με τη γεωλογία της περιοχής στην οποία συναντώνται και τις επικρατούσες συνθήκες. Με βάση τα πιο πάνω, κρίνεται επιβεβλημένη η μελέτη των επιμέρους χαρακτηριστικών των εδαφών, με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς τους και την επιλογή των καταλληλότερων για την παραγωγή συμπιεσμένων ωμοπλίνθων.

Στην παρούσα εργασία, εξετάστηκαν διάφορες ιδιότητες των εδαφικών υλικών, συμπεριλαμβανομένων της κοκκομετρικής διαβάθμισης, των ορίων συνεκτικότητας και της γραμμικής συρρίκνωσης, της ορυκτολογικής σύστασης και της συμπιεστότητας. Απώτερος σκοπός των πιο πάνω ήταν ο χαρακτηρισμός των ιδιοτήτων των διαφόρων εδαφών που επιλέχθηκαν και η σύνδεση αυτών με τις ιδιότητες των παραγόμενων συμπιεσμένων ωμοπλίνθων.

Τα εδάφη που χρησιμοποιήθηκαν στην παραγωγή συμπιεσμένων ωμοπλίνθων προσκομίστηκαν στο εργαστήριο από το μοναδικό τοπικό παραγωγό (εδάφη Αλάμπρας και Δελίκηπου) και από υφιστάμενα λατομεία (στο Τσέρι και στην Ποταμιά). Το έδαφος από το Τσέρι προήλθε από περιοχή όπου, κατά βάση, υπάρχουν ποταμο-χειμάρειες αποθέσεις. Το έδαφος από την Αλάμπρα προήλθε από περιοχή όπου επικρατούν ανθρακικής σύστασης πετρώματα, ενώ αυτό από το Δελίκηπο από περιοχή η οποία βρίσκεται εντός του οφιολιθικού συμπλέγματος του Τροόδους. Το έδαφος από το λατομείο (Λατούρου) στην Ποταμιά αποτελεί παραπροϊόν της παραγωγής άμμου, ασβεστιτικής σύστασης (Fournari and Ioannou, 2019).

Μακροσκοπικά, τα τέσσερα εδάφη παρουσιάζουν αρκετές διαφορές (Εικ. 18). Αυτό από τη περιοχή του Τσερίου είναι λεπτόκοκκο, με σβόλους ποικίλης διαμέτρου, παρουσία οργανικών υπολειμμάτων, όπως μίσχοι και ρίζες φυτών, και έχει γκρίζο χρώμα. Τα εδάφη από τις περιοχές της Αλάμπρας και του Δελίκηπου περιέχουν κάποια χαλίκια, μίσχους και ρίζες φυτών, και έχουν λευκό και καστανοκόκκινο χρώμα, αντίστοιχα. Το έδαφος από το λατομείο Λατούρου είναι λεπτόκοκκο, με αρκετούς σβόλους, έχει φαιοκίτρινο χρώμα και δεν παρατηρούνται οργανικά υπολείμματα σε αυτό.



Εικόνα 18: Φωτογραφίες των εδαφικών πρώτων υλών. α) Αλάμπρα, β) Δελίκηπος, γ) Ποταμιά και δ) Τσέρι.

4.1.1 Μελέτη κοκκομετρικής διαβάθμισης

Η μελέτη της κοκκομετρικής διαβάθμισης αποσκοπεί στο ποσοτικό προσδιορισμό των επιμέρους κοκκομετρικών μεγεθών και στη δημιουργία της κοκκομετρικής καμπύλης, η οποία μπορεί να δώσει χρήσιμα συμπεράσματα αναφορικά με το έδαφος. Η ποιοτική μελέτη της κοκκομετρικής καμπύλης, δηλαδή η θέση, η κλίση και η μορφή της, δίδει πληροφορίες σχετικά με την ομοιομορφία του εδάφους και τα επικρατούντα μεγέθη, ενώ μέσα από τη ποσοτική διερεύνηση της καμπύλης εξάγονται κάποιες παράμετροι, όπως η μέση διάμετρος, που βοηθούν περαιτέρω στον χαρακτηρισμό του εδάφους.

Το πρότυπο βάσει του οποίου έγινε η μελέτη της κοκκομετρικής διαβάθμισης ήταν το ASTM D422, όπου γίνεται προσδιορισμός με κοσκίνισμα και υδρομέτρηση των μεγεθών που είναι μεγαλύτερα και μικρότερα των 0.075 mm, αντίστοιχα. Τα κόσκινα που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 10. Ο προσδιορισμός του κοκκομετρικού μεγέθους < 0.075 mm βασίζεται στο νόμο του Stokes, στον οποίο εμπεριέχεται και το ειδικό βάρος των κόκκων του εδάφους. Για το σκοπό αυτό, έγινε χρήση του προτύπου ASTM D854, όπου προσδιορίζεται το ειδικό βάρος των κόκκων του εδάφους στους 20° C.

Πίνακας 10: Ακολουθία κοσκίνων

Ακολουθία Κοσκίνων			
$\geq 2 \text{ mm}$		$0.075 \text{ mm} - 2 \text{ mm}$	
8.00	mm	1.18	mm
6.30	mm	0.600	mm
4.75	mm	0.425	mm
4.00	mm	0.250	mm
3.35	mm	0.125	mm
2.36	mm	0.075	mm
2.00	mm		

4.1.2 Προσδιορισμός ορίων συνεκτικότητας και γραμμικής συρρίκνωσης

Στα όρια συνεκτικότητας, ή όρια Atterberg, περιλαμβάνονται το όριο υδαρότητας, το όριο πλαστικότητας και το όριο συρρίκνωσης. Επίσης, σημαντικός είναι ο προσδιορισμός του δείκτη πλαστικότητας, που εκφράζει την περιοχή περιεχόμενης υγρασίας όπου το υλικό συμπεριφέρεται ως πλάστιμο. Επιπρόσθετα, η μέτρηση της γραμμικής συρρίκνωσης είναι ένας βασικός δείκτης για την αναμενόμενη συρρίκνωση που θα έχουν οι παραγόμενοι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι.

Στην παρούσα μελέτη, τα όρια συνεκτικότητας και η γραμμική συρρίκνωση προσδιορίστηκαν με την χρήση του προτύπου BS 1377-2. Ο προσδιορισμός του ορίου υδαρότητας έγινε με τη μέθοδο του πενετρόμετρου κώνου, όπου ως όριο υδαρότητας ορίζεται το ποσοστό υγρασίας για διείσδυση 20 mm. Για το όριο πλαστικότητας, 20 gr υγρού εδάφους διαμορφώθηκαν σε 8 ίσα κομμάτια, τα οποία τοποθετήθηκαν σε λεία γυάλινη επιφάνεια, όπου με την παλάμη μορφώθηκαν σε κύλινδρο διαμέτρου 3 mm, σε σχήμα μακαρόνι. Το όριο πλαστικότητας ορίστηκε ως ο μέσος όρος των τιμών υγρασίας στις οποίες τα επιμήκη στοιχεία του εδαφικού υλικού θρυμματίστηκαν σε 3 ή περισσότερα μέρη.

Για τον υπολογισμό της γραμμικής συρρίκνωσης, χρησιμοποιήθηκε πρότυπη μήτρα, στην οποία τοποθετήθηκε υγρό έδαφος, με υγρασία περίπου όσο το όριο υδαρότητάς του. Το έδαφος αφέθηκε να ξηραθεί πλήρως και μέσα από την εξίσωση 3 υπολογίστηκε η γραμμική συρρίκνωση.

$$\text{Γραμμική συρρίκνωση (\%)} = \left(1 - \frac{L_D}{L_0}\right) * 100 \quad [\text{Εξ. 3}]$$

Όπου L_D το τελικό μήκος του δοκιμίου και L_0 το αρχικό μήκος του δοκιμίου.

4.1.3 Συμπιεστότητα

Η διερεύνηση της συμπιεστότητας ενός εδάφους γίνεται για τον προσδιορισμό της μέγιστης ξηρής πυκνότητας και της βέλτιστης υγρασίας για να επιτευχθεί αυτή η πυκνότητα. Η δοκιμή που χρησιμοποιήθηκε για το προσδιορισμό αυτών των παραμέτρων ήταν η Proctor, η οποία έγινε βάσει του προτύπου BS 1377-4. Το αποτέλεσμα της δοκιμής ήταν μια καμπύλη, στην οποία καταγράφηκε η μεταβολή της ξηρής πυκνότητας με την αύξηση της υγρασίας.

4.1.4 Ορυκτολογική ανάλυση

Η ορυκτολογική ανάλυση σε ένα έδαφος προσδιορίζει, με αρκετά μεγάλη ακρίβεια, τις ορυκτές φάσεις που συμμετέχουν σε αυτό. Οι ιδιότητες των ορυκτών που απαρτίζουν κάθε έδαφος διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά του, με τα αργιλικά ορυκτά να συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, αφού κάποια εξ αυτών (π.χ. μοντμοριλλονίτης) υπόκεινται σε ογκομετρικές μεταβολές υπό την παρουσία υγρασίας. Η μέθοδος που συνήθως χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της ορυκτολογικής σύστασης στα εδάφη είναι η περιθλασιμετρία ακτινών X (X-Ray Diffractometry - XRD). Στην παρούσα εργασία, στα 4 υπό διερεύνηση εδάφη έγινε ορυκτολογική

ανάλυση με την πιο πάνω μέθοδο, σε κονιοποιημένο δείγμα. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με ταχύτητα σάρωσης 1°/λεπτό και εύρος 2θ από 2° μέχρι 70°.

4.2 Παραγωγή και αποθήκευση συμπιεσμένων ωμοπλίνθων

Η παραγωγή των συμπιεσμένων ωμοπλινθων στην Κύπρο γίνεται από ένα παραγωγό. Η διαδικασία συμβαδίζει με τα πλαίσια της πράσινης δόμησης, για αυτό δεν χρησιμοποιούνται χημικοί σταθεροποιητές, που αυξάνουν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων.

Η διαδικασία παραγωγής είναι σχετικά απλή:

- Απόθεση του εδαφικού υλικού σε στοίβες.
- Μεταφορά του εδάφους και κοσκίνισμα του σε κόσκινο 10 mm.
- Ανάμιξη του εδάφους με την χρήση planetary mixer και προσθήκη νερού, περίπου 10% κ.ο.
- Γέμισμα της πρέσας με χώμα. Στην πρέσα υπάρχει κόσκινο 30 mm, για να μην περνούν σβόλοι που τυχόν δημιουργήθηκαν κατά την ανάμιξη.
- Συμπίεση με υδραυλική πίεση, περίπου 2200 psi, και εξαγωγή των τούβλων σε μεταλλική ράγα.
- Απόθεση των τούβλων σε παλέτες και αποθήκευσή τους.

Η μέγιστη παραγωγή που μπορεί να δώσει η πιο πάνω διαδικασία, ανά 8 ώρες, είναι 2000 συμπιεσμένους ωμοπλινθους, διαστάσεων 300 mm x 150 mm x 100 mm. Το ύψος των δοκιμίων μπορεί να τροποποιηθεί, με κατώτερο όριο τα 50 mm. Η πρέσα που χρησιμοποιείται είναι τύπου Impact 2001A της Advanced Earthen Construction Technologies (Εικ. 19). Αποτελεί ένα κινητό σύστημα παραγωγής, με δυνατότητα παραγωγής ακόμη και στο ίδιο το εργοτάξιο.



Εικόνα 19: Παραγωγή συμπιεσμένων ωμοπλίνθων με πρέσα τύπου Impact 2001A της AECT.

Για την εργαστηριακή μελέτη των ιδιοτήτων των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων, παρήχθησαν 50 δείγματα από κάθε εδαφικό υλικό. Οι συμπιεσμένοι ωμοπλινθοι με χώμα από τις περιοχές

Αλάμπρας και Δελίκηπου παρήχθησαν και μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο από τον ίδιο τον παραγωγό, ενώ οι άλλες δύο παρτίδες, με χόμα Τσερίου και Λατούρου, παρήχθησαν επί τόπου στο εργαστήριο. Με την παραγωγή των ΣΩ στα εργαστήρια του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Κύπρου, επιβεβαιώθηκε η δυνατότητα της πρέσας για εύκολη και γρήγορη παραγωγή, ακόμα και στο σημείο όπου θα κατασκευαστεί ένα κτήριο.

Οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι στοιβάχθηκαν σε παλέτες και αποθηκεύτηκαν στο εργαστήριο. Σημειώνεται ότι ο χώρος του εργαστηρίου είναι σκιερός, οπότε αποφεύγεται η γρήγορη και έντονη εξάτμιση του νερού, λόγω της απευθείας έκθεσης των ΣΩ στον ήλιο. Τα δοκίμια αφήθηκαν στο εργαστήριο για περίπου 3 μήνες, και ακολούθως υποβλήθηκαν σε εργαστηριακούς ελέγχους.

4.3 Ιδιότητες συμπιεσμένων ωμοπλίνθων

Ο πειραματικός έλεγχος των συμπιεσμένων ωμόπλινθων έγινε ούτως ώστε να καθοριστούν οι φυσικό-μηχανικές ιδιότητες και η ανθεκτικότητά τους. Στις φυσικό-μηχανικές ιδιότητες που εξετάστηκαν εντάσσονται η πυκνότητα, τα θερμικά χαρακτηριστικά, η θλιπτική και η καμπτική αντοχή. Για τη διερεύνηση της ανθεκτικότητας των συμπιεσμένων ωμόπλινθων έγιναν δοκιμές τριχοειδούς απορροφητικότητας, κύκλων ύγρανσης/ξήρανσης, ψεκασμού υπό πίεση και η δοκιμή της σταγόνας. Με σκοπό την παρατήρηση της δομής των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων, έγινε οπτικός έλεγχος των δοκιμίων, τόσο μακροσκοπικά όσο και μικροσκοπικά.

4.3.1 Μακροσκοπική και μικροσκοπική εξέταση δοκιμίων

Η μακροσκοπική και μικροσκοπική εξέταση έχει ως σκοπό τη μελέτη της δομής ενός υλικού. Ανάλογα με την κλίμακα της εξέτασης, η μελέτη αυτή διαφέρει, αφού τα χαρακτηριστικά που μπορούν να παρατηρηθούν σε κάθε κλίμακα δεν είναι τα ίδια. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός αυτό, συνήθως γίνεται παρατήρηση σε περισσότερες από μια κλίμακες, με χρήση διαφορετικών τεχνικών, ούτως ώστε να υπάρχει ολοκληρωμένη εικόνα της δομής του υπό εξέταση υλικού.

Στην παρούσα εργασία, λόγω της μελέτης δοκιμίων συμπιεσμένων ωμοπλίνθων, επιλέχθηκαν 3 τρόποι εξέτασης της δομής. Αρχικά, έγινε μακροσκοπική εξέταση ολόκληρων τούβλων, με διαστάσεις 300 mm x 150 mm x 100 mm. Ακολούθως, έγινε μικροσκοπική εξέταση κύβων ακμής 50 mm σε στερεομικροσκόπιο, και τέλος μελέτη της μικροδομής αντιπροσωπευτικών δειγμάτων σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Η επιλογή των μεθόδων αυτών έγινε λόγω της πληροφορίας που έπρεπε να ληφθεί, των διαστάσεων των υλικών, αλλά και των περιορισμών που έχει το υλικό, αφού δύσκολα μπορεί να λειανθεί και να στιλβωθεί για παρατήρηση σε πολωτικό μικροσκόπιο, λόγω της εύθρυπτης φύσης του.

Συγκεκριμένα, η μακροσκοπική εξέταση είχε ως σκοπό την αναγνώριση χαρακτηριστικών που είναι ορατά με γυμνό μάτι. Η εξέταση έγινε σε 8 δοκίμια από κάθε παρτίδα συμπιεσμένων ωμόπλινθων, ούτως ώστε να υπάρχει ολοκληρωμένη εικόνα για τα επικρατούντα χαρακτηριστικά και να μπορεί να γίνει σύγκριση ανάμεσα στις διαφορετικές παρτίδες. Η επιλογή των δοκιμίων έγινε

από διαφορετικά σημεία κάθε παλέτας, με σκοπό το κάθε υπό εξέταση δείγμα να είναι τυχαίο και αντιπροσωπευτικό.

Η στερεομικροσκοπική εξέταση έγινε με σκοπό τη λεπτομερέστερη παρατήρηση της επιφάνειας των δοκιμίων. Σε αυτή την κλίμακα συνήθως παρατηρούνται μεγάλοι πόροι, η επιφανειακή μικροτοπογραφία των δοκιμίων, ρωγμές και η συνοχή των αδρανών με το συνδετικό υλικό. Η παρατήρηση έγινε στο στερεομικροσκόπιο LEICA EZ4 10x, το οποίο έχει δυνατότητα μεγέθυνσης μέχρι και 35x, σε 6 δοκίμια από κάθε είδος συμπιεσμένων ωμοπλίνθων. Η επιλογή των δοκιμίων έγινε από διαφορετικά τούβλα, ούτως ώστε να υπάρχει ολοκληρωμένη πληροφορία για όλη την παρτίδα, ενώ επίσης μελετήθηκε και η πιθανότητα διαφοροποίησης των χαρακτηριστικών των τούβλων, ανάλογα με την επιφάνεια παρατήρησης.

Η παρατήρηση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning Electron Microscope - SEM) πραγματοποιήθηκε με σκοπό τη μελέτη της μικροδομής των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων. Αντιπροσωπευτικά δείγματα, μεγέθους 1 cm, λήφθηκαν από τους συμπιεσμένους ωμοπλίνθους, ξηράθηκαν και τοποθετήθηκαν πάνω σε ειδικές μεταλλικές βάσεις. Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε επικάλυψη των δοκιμίων με 100 nm χρυσού, ούτως ώστε να καταστούν αγωγίμα. Με σκοπό την παρατήρηση της επιφανειακής μικροτοπογραφίας, της μικροδομής και της παρουσίας ασυνεχειών ή πόρων, λήφθηκαν εικόνες εκπομπής δευτερογενών ηλεκτρονίων (Secondary Electron Images - SEI). Το μικροσκόπιο στο οποίο έγινε η παρατήρηση είναι τύπου JEOL – JSM-6610LV, με δυνατότητα μεγέθυνσης μέχρι 300000x. Ωστόσο, λόγω της επιφανειακής μικροτοπογραφίας των εξεταζόμενων δοκιμίων, κατέστη δυνατή η λήψη ευκρινών εικόνων σε μεγεθύνσεις μέχρι και 3000x.

Οι 3 κλίμακες παρατήρησης που περιγράφονται πιο πάνω χρησιμοποιήθηκαν με σκοπό την εξαγωγή ολιστικών συμπερασμάτων για τη δομή των υπό εξέταση συμπιεσμένων ωμοπλίνθων. Με βάση τα αποτελέσματα, έγινε προσπάθεια να ερμηνευθούν οι διάφορες ιδιότητες των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων, είτε μηχανικές είτε φυσικές, ή ακόμα και η ανθεκτικότητά τους.

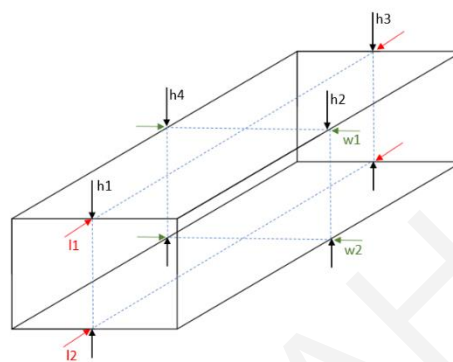
4.3.2 Φυσικο-μηχανικές ιδιότητες

Η έλλειψη κανονιστικών εγγράφων, σε τοπικό και διεθνές επίπεδο, δυσχεραίνει τον εργαστηριακό έλεγχο των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων. Οι πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται και οι μεθοδολογίες που υιοθετούνται βασίζονται κυρίως σε άλλα υλικά, όπως είναι η πέτρα και οι οπτόπλινθοι, και έτσι στη βιβλιογραφία παρατηρούνται διαφορετικές μέθοδοι για προσδιορισμό των ιδιοτήτων των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων.

Στη παρούσα εργασία προσδιορίζονται οι φυσικο-μηχανικές ιδιότητες των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων με βάση διατάξεις και μεθοδολογίες που παρατηρούνται στη βιβλιογραφία και μπορούν να εφαρμοστούν στους υπό μελέτη συμπιεσμένους ωμοπλίνθους. Οι φυσικές ιδιότητες που προσδιορίζονται είναι η πυκνότητα και τα θερμικά χαρακτηριστικά, ενώ στις μηχανικές ιδιότητες προσδιορίζεται η θλιπτική και η καμπτική αντοχή.

4.3.2.1 Φυσικές ιδιότητες

Οι μη-σταθεροποιημένοι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι δεν μπορούν να εμβαπτιστούν στο νερό για να γίνει ακριβής προσδιορισμός του όγκου τους, αφού είναι ευαίσθητοι στην επαφή τους με το νερό. Λόγω αυτού του περιορισμού, η πυκνότητα προσδιορίζεται με ζύγισμα του ωμόπλινθου και υπολογισμό του όγκου του, μέσω της μέτρησης των διαστάσεών του. Η πυκνότητα που προκύπτει μέσα από αυτή τη διαδικασία ονομάζεται φαινόμενη. Οι διαστάσεις των συμπιεσμένων ωμόπλινθων μετρήθηκαν βάσει του EN 772-16, όπως φαίνεται στην Εικόνα 20, και η πυκνότητα υπολογίστηκε βάσει του EN 772-13, όπως φαίνεται στην εξίσωση 4:



Εικόνα 20: Σκίτσο στο οποίο παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο έγιναν οι μετρήσεις των διαστάσεων των δοκιμίων.

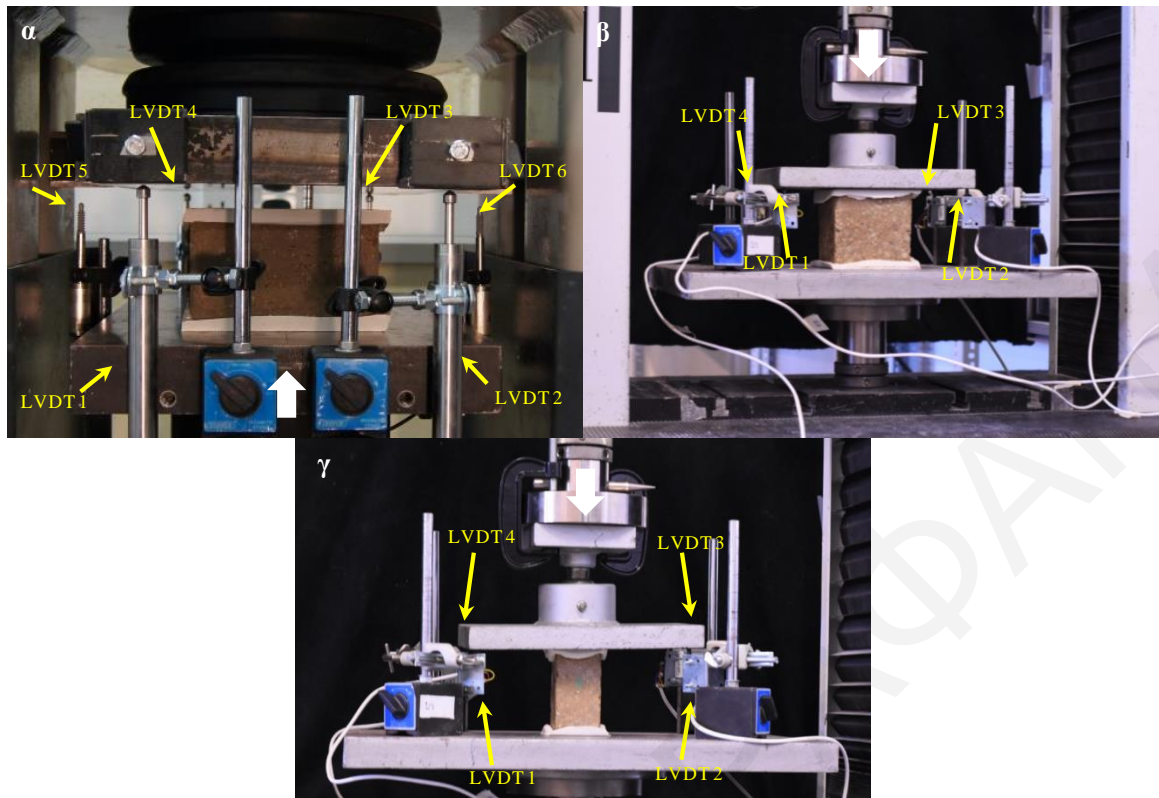
$$\rho_g \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{m_d}{v_g} \times 10^6 \quad [Εξ. 4]$$

Όπου ρ_g η φαινόμενη πυκνότητα, m_d η ξηρή μάζα του δοκιμίου σε kg και V_g ο όγκος του δοκιμίου σε cm^3 , όπως υπολογίζεται από τις διαστάσεις του δοκιμίου.

Η θερμική συμπεριφορά των δομικών υλικών αποτελεί μια πολύ σημαντική παράμετρο στο σχεδιασμό των κατασκευών. Το χαρακτηριστικό το οποίο λαμβάνεται συνήθως υπόψιν είναι η θερμική αγωγιμότητα, λ , ωστόσο στα γήινα δομικά υλικά προσδιορίζεται και η ειδική θερμοχωρητικότητα, C_p . Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων αυτών, στην παρούσα μελέτη υιοθετήθηκε μια δυναμική μέτρηση με την χρήση ενός αναλυτή θερμικής μεταφοράς της ISOMET. Οι μετρήσεις έγιναν σε 8 ολόκληρα τούβλα, διαστάσεων 300 mm x 150 mm x 100 mm, και στις 3 διαθέσιμες διευθύνσεις για κάθε είδος συμπιεσμένου ωμόπλινθου, ώστε να μελετηθεί τυχόν ανομοιογένεια στη θερμική συμπεριφορά του υλικού, ανάλογα με τον προσανατολισμό.

4.3.2.2 Μηχανικές ιδιότητες

Ο προσδιορισμός της θλιπτικής αντοχής των συμπιεσμένων ωμόπλινθων έγινε με την χρήση του προτύπου ASTM C67 – 03a. Η δοκιμή εκτελέστηκε σε ολόκληρα τούβλα ($\Sigma\Omega$), διαστάσεων 300 mm x 150 mm x 100 mm (μήκος x πλάτος x ύψος), καθώς επίσης και σε κύβους ακμής 100 mm και λεπτά πρίσματα, διαστάσεων 50 mm x 50 mm x 100 mm (μήκος x πλάτος x ύψος), για τη διερεύνηση της επίδρασης του λόγου ύψους/πλάτους στη θλιπτική αντοχή του δοκιμίου. Στις επιφάνειες που θα έρχονταν σε επαφή με την πλάκα φόρτισης, εφαρμόστηκε στρώμα γύψου πάχους < 3 mm για να επιτευχθεί λεία επιφάνεια επαφής, και κατ' επέκταση ομοιόμορφη κατανομή των θλιπτικών τάσεων, χωρίς αυτό να επιδρά σημαντικά στον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας.

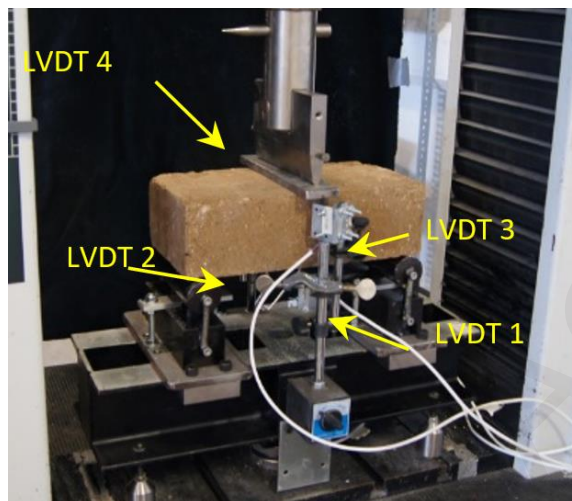


Εικόνα 21: Πειραματικές διατάξεις για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας (α) σε ολόκληρα δοκίμια, (ΣΩ) 300 mm x 150 mm x 100 mm (μήκος x πλάτος x ύψος), (β) σε κύβους ακμής 100 mm, και (γ) σε λεπτά πρίσματα 50 mm x 50 mm x 100 mm (μήκος x πλάτος x ύψος).

Η πειραματική διάταξη για τη μέτρηση της θλιπτικής αντοχής (και του μέτρου ελαστικότητας) των ΣΩ φαίνεται στην Εικόνα 21α. Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκε μηχανή με δυνατότητα επιβολής φορτίου μέχρι 5000 kN (Controls Advantest 9). Η επιβολή του φορτίου έγινε με διαδικασία ελέγχου μετακινήσεων (displacement-controlled procedure), με ρυθμό 1 mm/min. Ο συγκεκριμένος ρυθμός επιλέχθηκε έτσι ώστε – βάσει προτύπου – το δοκίμιο να φτάσει την θλιπτική του αντοχή με σταδιακή επιβολή φορτίου και σε χρόνο περισσότερο του ενός αλλά λιγότερο των δυο λεπτών από την έναρξη επιβολής του φορτίου. Όπως φαίνεται και στη διάταξη (Εικ. 21α), τοποθετήθηκαν συμμετρικά στις γωνίες της πλάκας φόρτισης 4 LVDTs (LVDT 1-4) με δυνατότητα παραμόρφωσης +10 mm, καθιστώντας δυνατή τη μέτρηση των σχετικών μετακινήσεων των πλακών επιβολής φορτίου και κατ' επέκταση της αξονικής παραμόρφωσης του δοκιμίου. Με τη μέτρηση των παραμορφώσεων, έγινε εφικτή η μέτρηση του μέτρου ελαστικότητας των δοκιμίων. Επίσης, 2 LVDTs (LVDT 5-6) με δυνατότητα παραμόρφωσης +10 mm τοποθετήθηκαν εκατέρωθεν, στον κεντρικό άξονα του δοκιμίου (Εικ. 21α), για τον έλεγχο της επιβολής του προαναφερθέντα ρυθμού φόρτισης.

Οι πειραματικές διατάξεις για τη μέτρηση της θλιπτικής αντοχής (και του μέτρου ελαστικότητας) των κύβων και των λεπτών πρισμάτων φαίνονται στις Εικόνες 21β και 21γ, αντίστοιχα. Τόσο οι δοκιμές των κύβων, όσο και των λεπτών πρισμάτων, έγιναν σε μηχανή με δυνατότητα επιβολής φορτίου μέχρι 300 kN (Lloyd LR300K) για μεγαλύτερη ακρίβεια στον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας. Οι δοκιμές έγιναν και πάλι με

διαδικασία ελέγχου μετακινήσεων (displacement-controlled procedure), με ρυθμό 1 mm/min και 0.5 mm/min, αντίστοιχα. Η επιλογή του ρυθμού φόρτισης έγινε με βάση το σκεπτικό που αναφέρθηκε πιο πάνω. Και σε αυτή την περίπτωση, 4 LVDTs (LVDT 1–4) με δυνατότητα παραμόρφωσης +10 mm τοποθετήθηκαν συμμετρικά στις 4 γωνίες της πλάκας φόρτισης για τον προσδιορισμό της αξονικής παραμόρφωσης του δοκιμίου.



Εικόνα 22: Πειραματική διάταξη για τον προσδιορισμό της καμπτικής αντοχής σε ολόκληρα δοκίμια (ΣΩ) 300 mm x 150 mm x 100 mm (μήκος x πλάτος x ύψος).

Ο προσδιορισμός της καμπτικής αντοχής των συμπιεσμένων ωμόπλινθων έγινε με την χρήση του προτύπου ASTM C67–03a. Η πειραματική διάταξη φαίνεται στην Εικόνα 22. Χρησιμοποιήθηκαν ολόκληρα δοκίμια ΣΩ, διαστάσεων 300 mm x 150 mm x 100 mm (μήκος x πλάτος x ύψος), τα οποία τοποθετήθηκαν πάνω σε ειδική πρότυπη βάση για την εκτέλεση της δοκιμής κάμψης 3 σημείων. Τα δυο στηρίγματα της κάτω επιφάνειας βρίσκονταν σε απόσταση 260 mm και η φόρτιση εφαρμόστηκε στο κέντρο της άνω επιφάνειας, μέσω μιας μεταλλικής πλάκας πάχους 6.4 mm, πλάτους 38.1 mm και μήκους μεγαλύτερου του πλάτους του δοκιμίου. Για τη μέτρηση των μετακινήσεων της κάτω και της άνω επιφάνειας, τοποθετήθηκαν 4 LVDTs με δυνατότητα παραμόρφωσης +10 mm, ήτοι 2 LVDTs (LVDT 1 & 2) στην κάτω και 2 LVDTs (LVDT 3 & 4) στην άνω επιφάνεια. Η επιβολή του φορτίου έγινε με διαδικασία ελέγχου μετακινήσεων (displacement-controlled procedure), με ρυθμό 0.2 mm/min.

4.3.3 Ανθεκτικότητα

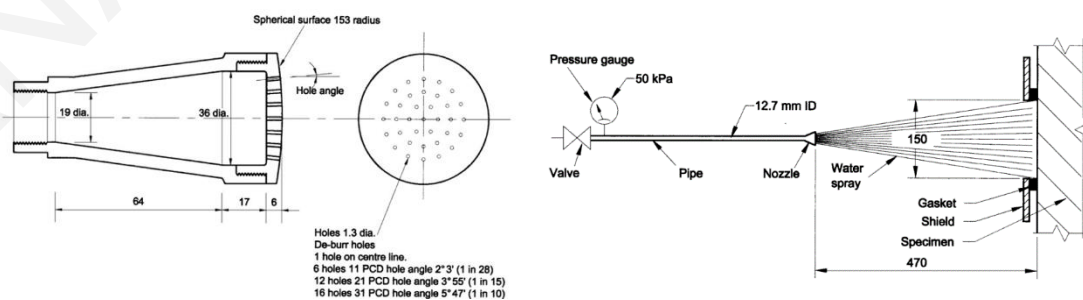
Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξανόμενο ενδιαφέρον για μελέτη της ανθεκτικότητας των δομικών υλικών. Το γεγονός αυτό οφείλεται, κατά κύριο λόγο, στην περιβαλλοντικά αποδεκτή ανάπτυξη που επιζητείται στον κατασκευαστικό τομέα, και όχι μόνο. Η τάση αυτή εφαρμόζεται και στα γήινα δομικά υλικά, που αν και εκ φύσεως θεωρούνται φιλικά προς το περιβάλλον, πρέπει να μελετηθούν και να βελτιωθούν ούτως ώστε να μπορούν να ανταπεξέλθουν στις καιρικές συνθήκες για ικανοποιητικό χρονικό διάστημα.

Ο κυριότερος παράγοντας φθοράς των γήινων δομικών υλικών είναι το νερό, είτε πρόκειται για ανερχόμενη υγρασία, είτε για βροχόπτωση (Beckett et al., 2020). Αναπόφευκτα, λοιπόν, η επίδραση του νερού στους συμπίεσμένους ωμόπλινθους πρέπει να μελετάται προτού αυτοί ενταχθούν στη δόμηση. Αρκετοί κανονισμοί (NZS 4298, 1998, IS 1725, 1982, UNE 41410, 2008, ASTM E2392M-10, 2010) προτείνουν διατάξεις και δοκιμές για έλεγχο της επίδρασης του νερού: π.χ. δοκιμές σταγόνας και ψεκασμού υπό πίεση, δοκιμές απορροφητικότητας, τριχοειδούς απορροφητικότητας και κύκλων ύγρανσης/ξήρανσης. Η πλέον ολοκληρωμένη μελέτη για την ανθεκτικότητα των συμπίεσμένων ωμόπλινθων εντοπίζεται στους κανονισμούς της Νέας Ζηλανδίας, NZS 4297-4299 (1998), όπου πέραν από τον πειραματικό έλεγχο των δοκιμίων, γίνεται και σύνδεση με τον σχεδιασμό του κτηρίου.

Στην παρούσα μελέτη, οι εργαστηριακές δοκιμές που έγιναν για τη μελέτη της ανθεκτικότητας ήταν οι δοκιμές σταγόνας και ψεκασμού υπό πίεση, η υποβολή σε κύκλους ύγρανσης/ξήρανσης, καθώς και η δοκιμή τριχοειδούς απορροφητικότητας. Με τις δοκιμές αυτές καλύπτεται σχεδόν ολοκληρωτικά το φάσμα της επίδρασης του νερού στους συμπίεσμένους ωμόπλινθους, εφόσον μελετάται η επίδραση της βροχόπτωσης, της ανερχόμενης υγρασίας, των κύκλων διαβροχής και ξήρανσης, αλλά και γενικότερα της επαφής του υλικού με το νερό.

4.3.3.1 Δοκιμή ψεκασμού υπό πίεση (spray erosion)

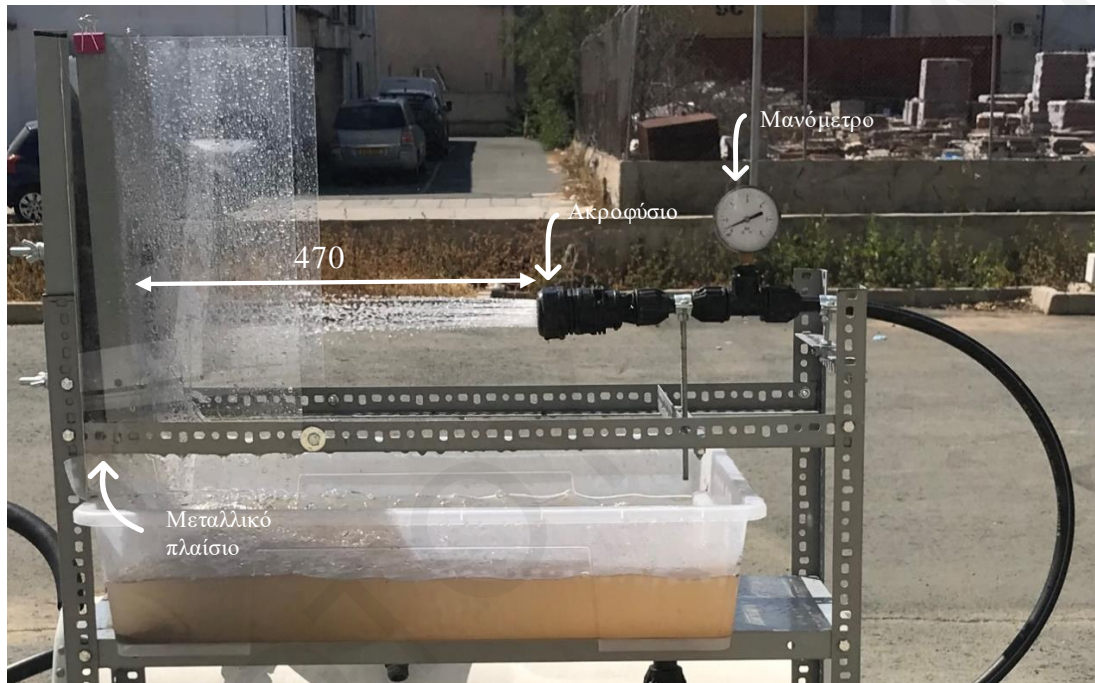
Η δοκιμή ψεκασμού υπό πίεση έχει ως στόχο να προσομοιώσει τις συνθήκες που δημιουργούνται από την προσπίπτουσα βροχόπτωση, στην παρουσία ανέμου (wind-driven rain), που αποτελεί σημαντικό παράγοντα φθοράς των ωμοπλινθοδομών. Η διάταξη που περιγράφεται στο Παράρτημα Δ του NZS 4298 (1998) προϋποθέτει συγκεκριμένο ακροφύσιο, το οποίο θα ψεκάζει με πίεση 50 kPa, από απόσταση 470 mm, το δοκίμιο (Εικ. 23). Η διάρκεια της δοκιμής είναι 60 λεπτά και διακόπτεται κάθε 15 λεπτά για να γίνει μέτρηση του βάθους διείδυσης και παρατήρηση της περιοχής όπου κτυπά το νερό. Η μέτρηση γίνεται με ράβδο διαμέτρου 10 mm και ο χαρακτηρισμός του δοκιμίου γίνεται σύμφωνα με τον Πίνακα 11. Επίσης, γίνεται και μέτρηση της διείδυσης της υγρασίας, αν το δοκίμιο έχει πάχος μεγαλύτερο των 120 mm.



Εικόνα 23: Λεπτομέρειες ακροφύσιου (αριστερά) και διάταξη ψεκασμού υπό πίεση (δεξιά) (NZS 4298, 1998).

Η ανάπτυξη της διάταξης στο εργαστήριο Δομικών Υλικών του Πανεπιστημίου Κύπρου (Εικ. 24) έγινε με κύριο γνώμονα τη διατήρηση των βασικών παραμέτρων που περιγράφονται στο

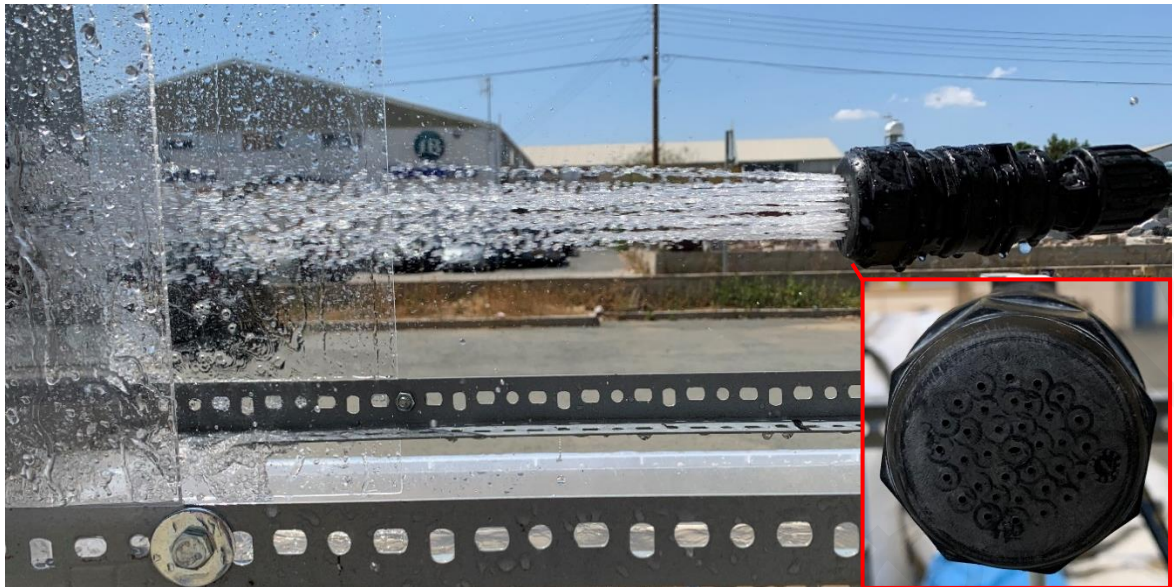
Παράρτημα Δ του NZS 4298 (1998). Στη διάταξη διατηρήθηκε η απόσταση ανάμεσα στο δοκίμιο και το ακροφύσιο στα 470 mm, με δυνατότητα αύξησης ή μείωσης της απόστασης αυτής. Η βάση στερέωσης του ακροφύσιου έχει τη δυνατότητα μετακίνησης αριστερά ή δεξιά, και μεταβολής του ύψους, ούτως ώστε να μπορεί να κεντραριστεί στο δοκίμιο σε περιπτώσεις μετακινήσεων. Η πίεση της διάταξης διατηρείται στα 50 kPa (0.5 bar) κατά τη δοκιμή, ωστόσο ελέγχεται από βάνα, η οποία επιτρέπει τη μεταβολή της από 0–250 kPa (0–2.5 bar). Η διάμετρος της τρύπας στο μεταλλικό πλαίσιο, όπου τοποθετείται το δοκίμιο, είναι 150 mm. Εσωτερικά, τοποθετήθηκε λάστιχο πάχους 2 mm, το οποίο βοηθά στη βελτίωση της επαφής των συμπιεσμένων ωμόπλινθων στο μεταλλικό πλαίσιο.



Εικόνα 24: Διάταξη ψεκασμού υπό πίεση που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο Κύπρου.

Ο σχεδιασμός του ακροφύσιου βασίστηκε στο NZS 4298 (1998), όπου προδιαγράφονται οι εσωτερικές και εξωτερικές διαστάσεις του, και ο αριθμός και η διάμετρος των τρυπών στο άκρο του. Στην Εικόνα 25 παρατηρείται το ακροφύσιο εξωτερικά κατά τη διάρκεια της δοκιμής, με ροή νερού υπό πίεση 50 kPa, όπως επίσης και η διάταξη των τρυπών. Το ακροφύσιο του NZS 4298 (1998) θεωρητικά δίνει παροχή 27.9 l/min, οπότε για τον έλεγχο του ακροφύσιου που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο Κύπρου έγιναν μετρήσεις παροχής για να αξιολογηθεί κατά πόσον αντικατοπτρίζει το ακροφύσιο που προδιαγράφεται στο κανονιστικό έγγραφο. Συνολικά έγιναν 6 μετρήσεις, στις οποίες η μέση μετρούμενη παροχή ήταν 28.35 l/min, με ελάχιστη διακύμανση, γεγονός που επιβεβαιώνει την αξιοπιστία της διάταξης.

Κατά τη θεωρητική μελέτη της διάταξης, διαπιστώθηκε ότι χρειάζεται αρκετός όγκος νερού (περίπου 1500 λίτρα/δοκίμιο), οπότε κρίθηκε αναγκαία η ανακύκλωση του νερού για να αποφευχθεί η κατασπατάλησή του. Έτσι, τοποθετήθηκαν τρία φίλτρα για καθαρισμό του νερού σε διάφορα σημεία, δοχείο αποθήκευσης 200 λίτρων και αντλία για παροχή του νερού στη διάταξη από το δοχείο αποθήκευσης.



Εικόνα 25: Εξωτερική όψη και διάταξη των τρυπών στο ακροφύσιο.

Η διάρκεια της δοκιμής ήταν 60 λεπτά, όπως και στο NZS 4298 (1998). Η δοκιμή διακοπτόταν κάθε 15 λεπτά για να γίνει μέτρηση του βάθους διείσδυσης και παρατήρηση της περιοχής όπου κτυπά το νερό. Η μέτρηση γινόταν με ράβδο διαμέτρου 10 mm, ενώ ο χαρακτηρισμός του δοκιμίου γινόταν σύμφωνα με τον Πίνακα 11.

Πίνακας 11: Χαρακτηρισμός δοκιμίων στη δοκιμή ψεκασμού υπό πίεση, βάσει βάθους διείσδυσης και διείσδυσης της υγρασίας (NZS 4298, 1998).

Ιδιότητα	Κριτήρια	LEI*
Βάθος διάβρωσης, D (mm/hr)	$0 \leq D \leq 20$	1
	$20 \leq D \leq 50$	2
	$50 \leq D \leq 90$	3
	$90 \leq D \leq 120$	4
	$D \geq 120$	5 (Αποτυχία)
Βάθος διείσδυσης υγρασίας (άμεση θραύση τούβλου με το πέρας της δοκιμής) αν το δείγμα έχει πάχος >120 mm	≤ 120 mm ≥ 120 mm (μετρούμενο από την επιφάνεια του τούβλου)	Επιτυχία Αποτυχία

* Δείκτης διάβρωσης (βλ. ενότητα 3.3)

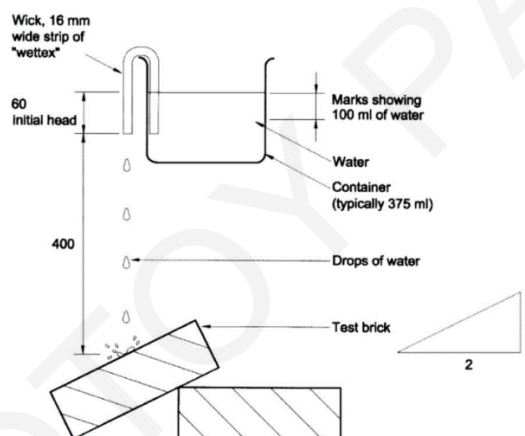
4.3.3.2 Δοκιμή σταγόνας (drip test)

Η δοκιμή της σταγόνας (drip test) περιγράφεται στο Παράρτημα Ε του NZS 4298 (1998). Σε αυτή τη δοκιμή, 100 ml νερού αφήνονται να πέσουν από ύψος 40 cm σε ένα δοκίμιο συμπιεσμένου ωμόπλινθου σε διάστημα 20 – 60 λεπτών (Εικ. 26). Στο τέλος της δοκιμής, γίνεται μέτρηση του βάθους της τρύπας που δημιουργείται με ειδική ράβδο διαμέτρου 3.15 mm, και εάν το δοκίμιο έχει πάχος μεγαλύτερο των 120 mm, τότε σπάει και γίνεται μέτρηση της μέγιστης διείσδυσης της υγρασίας. Ακολούθως, το δοκίμιο χαρακτηρίζεται βάσει του Πίνακα 12.

Ιδιότητα	Κριτήρια	LEI*
Βάθος τρύπας (mm)	$5 \leq D \leq 10$ $10 \leq D \leq 15$ $D \geq 15$	3 4 5 (Αποτυχία)
Βάθος διείσδυσης υγρασίας (άμεση θραύση τούβλου με το πέρασ της δοκιμής) αν το δείγμα έχει πάχος >120 mm	≤ 120 mm ≥ 120 mm (μετρούμενο από την επιφάνεια του τούβλου)	Επιτυχία Αποτυχία

*Δείκτης διάβρωσης (βλ. κεφάλαιο 3.3)

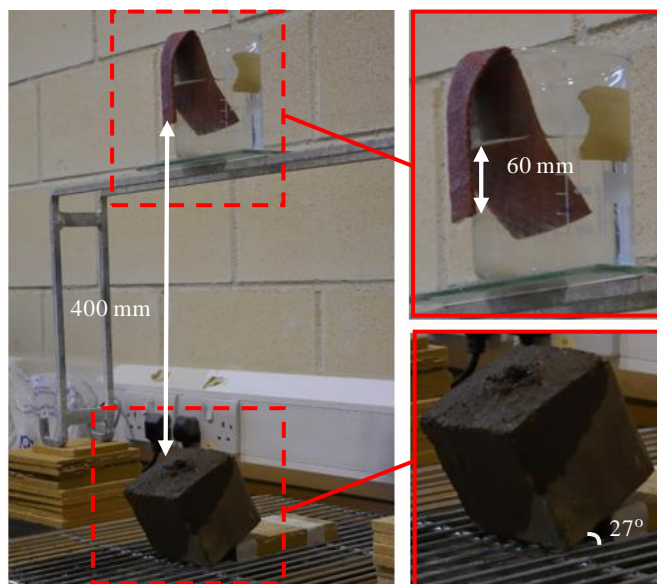
Στη διάταξη της δοκιμής σταγόνας που περιγράφεται στο Παράρτημα Ε του NZS 4298 (1998) υπάρχουν προδιαγεγραμμένες οι αποστάσεις μεταξύ του δοκιμίου και της άκρης του πανιού, τα χαρακτηριστικά του πανιού και η κλίση του δοκιμίου (Εικ. 26). Η διάταξη είναι αρκετά απλή, ωστόσο περισσότερο προσομοιάζει την πτώση νερού από κάποιο άνοιγμα ή από προβόλους πάνω στους ωμόπλινθους, παρά τη βροχόπτωση.



Εικόνα 26: Διάταξη δοκιμής σταγόνας (NZS 4298, 1998).

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε η διάταξη που περιγράφεται πιο πάνω, τηρώντας όλες τις απαιτήσεις, όπως φαίνονται στην Εικόνα 26. Παράλληλα, κατασκευάστηκε ειδική ράβδος για μέτρηση του βάθους της τρύπας, βάσει των περιγραφών του Παραρτήματος Ε του NZS 4298 (1998). Αρχικά, προηγήθηκε υπολογισμός της ταχύτητας που αναπτύσσουν οι σταγόνες του νερού κατά την επαφή τους με το δοκίμιο (2.8 m/s). Σύμφωνα με τον Morris (1994), οι σταγόνες έχουν διάμετρο 6 mm, οπότε η παραγόμενη κινητική ενέργεια ανά σταγόνα είναι 0.443 mJ. Η δοκιμή προδιαγράφει την πτώση 100 ml νερού στο δοκίμιο, κάτι που αντιστοιχεί σε 885 σταγόνες, οπότε η συνολική κινητική ενέργεια ανέρχεται σε 0.392 J. Σύμφωνα με τον Heathcote (2002), η επιφάνεια κρούσης των σταγόνων είναι 25 x 25 mm, οπότε η κινητική ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας είναι 0.627 kJ/m². Με βάση τα πιο πάνω, αναπτύχθηκε η διάταξη που φαίνεται στην Εικόνα 27. Στη διάταξη αυτή, το ύψος μεταξύ του δοκιμίου και της ακμής του πανιού είναι 400 mm, η κλίση που είναι τοποθετημένο το δοκίμιο 27° και η απόσταση της ακμής από την ανώτερη επιφάνεια του νερού (πριν την έναρξη της δοκιμής) είναι 60 mm. Η διάταξη μπορεί εύκολα να μεταβληθεί, ούτως ώστε να τηρούνται οι προϋποθέσεις της δοκιμής για διαφορετικά μεγέθη δοκιμίων, αφού όπως φαίνεται στην

Εικόνα 26 σε δοκιμαστικές μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν κύβοι ακμής 100 mm, ενώ στις δοκιμές των διαφόρων συμπιεσμένων ωμοπλίνθων πρίσματα διαστάσεων 100 mm x 100 mm x 50 mm (μήκος x πλάτος x ύψος).



Εικόνα 27: Διάταξη δοκιμής σταγόνας που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο Κύπρου.

4.3.3.3 Κύκλοι ύγρανης/ξήρανσης

Ακόμη και αν οι συμπιεσμένοι ωμοπλίνθοι κριθούν κατάλληλοι μετά τις πιο πάνω δοκιμές, πρέπει να είναι ικανοί να περάσουν επιτυχώς τη δοκιμή κύκλων ύγρανσης/ξήρανσης που προδιαγράφεται στο Παράρτημα Γ του NZS 4298 (1998), για να μπορούν να ενταχθούν στη δόμηση. Η δοκιμή αυτή έχει ως στόχο την απόρριψη εδαφών που πιθανώς να επιτύχουν στις δοκιμές ανθεκτικότητας και να έχουν ικανοποιητικά μηχανικά χαρακτηριστικά, αλλά λόγω των αργιλικών υλικών, κακού μείγματος ή λανθασμένων πρακτικών κατά την παραγωγή, να αστοχήσουν στην πράξη, λόγω της υποβολής τους σε κύκλους ύγρανσης/ξήρανσης. Τα δοκίμια υποβάλλονται σε 6 κύκλους ύγρανσης/ξήρανσης, όπου ανάλογα με το δείκτη διάβρωσης διαφοροποιείται ο χρόνος εμβάπτισης στο νερό (Πίνακας 13). Εάν το δοκίμιο δεν εμφανίσει, στους 6 κύκλους, crazing-type ρωγμές, αστεροειδείς ρωγμές, διόγκωση, σκασίματα (τουλάχιστον σε 5 σημεία), απώλεια στρώσεων, διείσδυση του νερού σε βάθος >70% του πλάτους του δοκιμίου, απώλεια τμημάτων μεγέθους >50 mm ή εξανθήματα, τότε θεωρείται αποδεκτό.

Για τη δοκιμή αυτή, στην παρούσα μελέτη διαμορφώθηκαν κυβικά δοκίμια, ακμής 70 mm, τα οποία υποβλήθηκαν σε 6 κύκλους ύγρανσης/ξήρανσης. Κάθε κύκλος ύγρανσης/ξήρανσης αποτελείται από τοποθέτηση του δοκιμίου σε δοχείο με νερό, με το βάθος εμβάπτισης να είναι περίπου 10 mm, και ακολούθως τοποθέτησή του σε φούρνο σε θερμοκρασία 65° C. Το δοκίμιο αξιολογείται οπτικά σε κάθε κύκλο, τόσο κατά την ύγρανση, όσο και μετά την ξήρανση. Ανάλογα με την εικόνα που παρουσίαζε το δοκίμιο, και μετά από συνεκτίμηση των παραγόντων που θέτει το Παράρτημα Γ του NZS 4298 (1998), αυτό απορριπτόταν ή υποβαλλόταν στον επόμενο κύκλο. Κάθε

δοκίμιο που επιτύγχανε στους 6 κύκλους, θεωρούνταν κατάλληλο για ένταξη στη δόμηση, εφόσον ικανοποιούσε ταυτόχρονα τις απαιτήσεις των μηχανικών χαρακτηριστικών και της ανθεκτικότητας.

Πίνακας 13: Χρόνοι εμφάπτισης δοκιμών στους κύκλους ύγρυνσης/ξήρανσης (NZS 4298, 1998).

Χρόνος εμφάπτισης (min)	LEI*
4	1
2	2
1	3
0.5	4

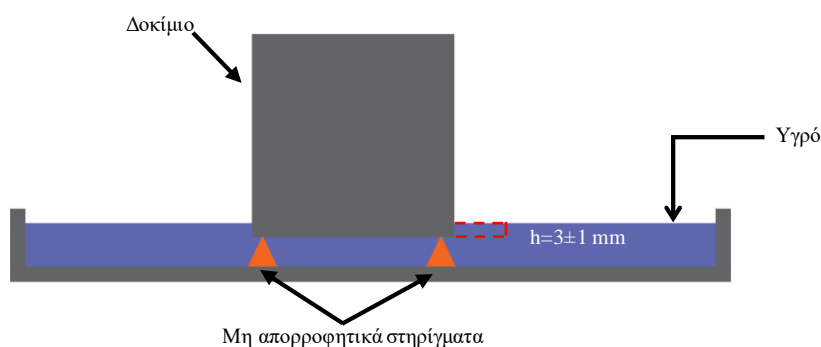
*Δείκτης διάβρωσης (βλ. κεφάλαιο 3.3)

4.3.3.4 Δοκιμή τριχοειδούς απορροφητικότητας

Η εκτίμηση του συντελεστή τριχοειδούς απορροφητικότητας έγινε σύμφωνα με το πρότυπο EN 1925 (1999), το οποίο αναφέρεται σε φυσικούς λίθους. Εξετάστηκαν 6 κυβικά δοκίμια, ακμής 70 mm, για κάθε τύπο συμπιεσμένου ωμόπλινθου, τα οποία τοποθετήθηκαν, αρχικά, σε φούρνο σε θερμοκρασία 65° C για να ξηραθούν. Ακολούθως, τα δοκίμια ζυγίστηκαν, υπολογίστηκε το εμβαδόν της βάσης τους, και τοποθετήθηκαν σε δοχείο με υγρό, με την κάτω επιφάνεια του συμπιεσμένου ωμόπλινθου να είναι σε επαφή με το υγρό (Εικ. 28). Αρχικά, έγινε προσπάθεια προσδιορισμού του συντελεστή με την χρήση νερού, ωστόσο αυτό δεν κατέστη δυνατό, αφού παρατηρήθηκε απώλεια υλικού από τα δοκίμια. Έτσι, στη συνέχεια, έγινε χρήση ακετόνης, ενός οργανικού διαλύτη που δεν δημιουργεί προβλήματα στη δομή των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα, το δοκίμιο ζυγιζόταν και τοποθετείτο πίσω στο δοχείο, μέχρι το τέλος της δοκιμής. Κατά τη διενέργεια της δοκιμής, μετριόταν η θερμοκρασία του υγρού, αφού η δοκιμή είναι ευαίσθητη σε αυξομειώσεις αυτής της περιβαλλοντικής παραμέτρου. Για κάθε δοκίμιο, λήφθηκαν τουλάχιστον 7 μετρήσεις και ο συντελεστής τριχοειδούς απορροφητικότητας υπολογίστηκε από την εξίσωση 5:

$$C_1 \text{ (gr/m}^2 \text{ sec}^{1/2}\text{)} = \frac{m_i - m_d}{A \times \sqrt{t_i}} \quad [\text{Εξ. 5}]$$

όπου C_1 ο συντελεστής τριχοειδούς απορροφητικότητας, m_i η μάζα του δοκιμίου κατά το ζύγισμα, m_d η αρχική ξηρή μάζα του δοκιμίου, A το εμβαδόν της βάσης του δοκιμίου και t_i ο χρόνος στον οποίο έγινε το ζύγισμα.



Εικόνα 28: Διάταξη δοκιμής τριχοειδούς απορροφητικότητας.

5. Χαρακτηριστικά εδαφικών πρώτων υλών και ιδιότητες συμπιεσμένων ωμόπλινθων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των εδαφικών πρώτων υλών που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή συμπιεσμένων ωμόπλινθων. Επίσης, γίνεται αναφορά στα αποτελέσματα της μελέτης των φυσικο-μηχανικών ιδιοτήτων των συμπιεσμένων ωμόπλινθων που παρήχθησαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Οι ιδιότητες που συζητούνται είναι η πυκνότητα, τα θερμομονωτικά χαρακτηριστικά, η θλιπτική και η καμπτική αντοχή. Από το κεφάλαιο αυτό, εξαιρείται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων και η συζήτηση που αφορά την ανθεκτικότητα των εργαστηριακών συμπιεσμένων ωμόπλινθων, η οποία αποτελεί το θέμα του επόμενου κεφαλαίου.

5.1 Χαρακτηριστικά εδαφικών πρώτων υλών

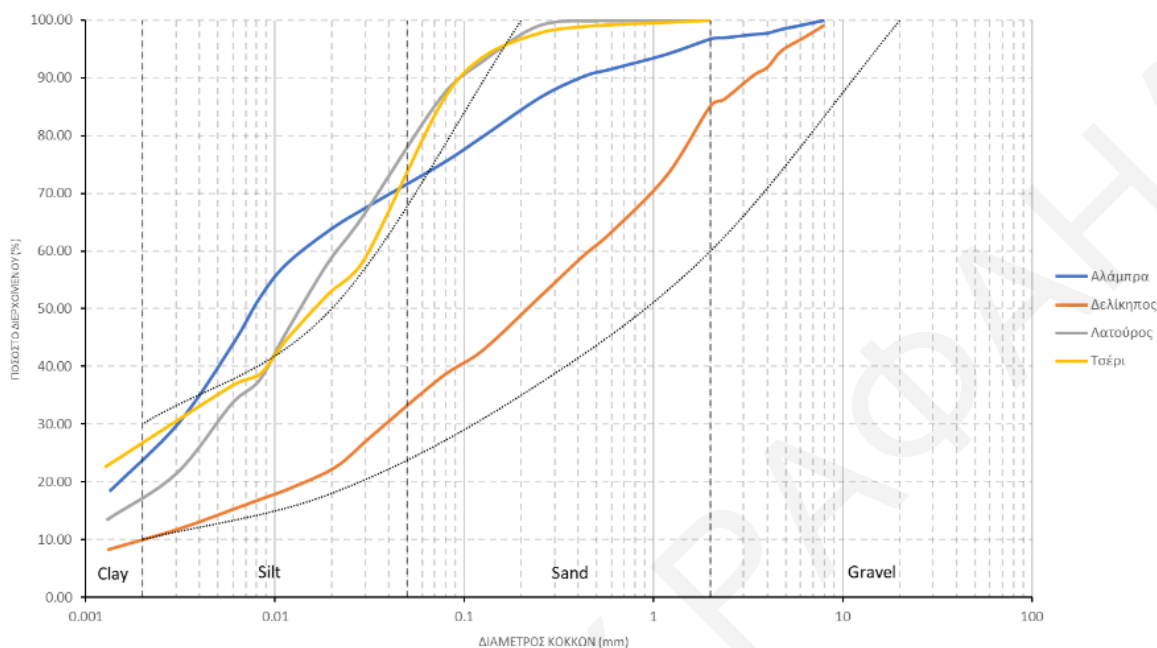
Στην ενότητα αυτή γίνεται παράθεση των αποτελεσμάτων της μελέτης των εδαφικών πρώτων υλών. Αρχικά παρατίθενται η κοκκομετρική διαβάθμιση των εδαφών, τα όρια συνεκτικότητας, τα αποτελέσματα της συμπιεστότητας και η ορυκτολογική τους ανάλυση. Τέλος, γίνεται μια ανασκόπηση των πιο πάνω, ούτως ώστε να εξαχθούν κάποια πρώτα συμπεράσματα ως προς την καταλληλότητα των τοπικών πρώτων υλών για την παραγωγή συμπιεσμένων ωμόπλινθων.

5.1.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση

Το ειδικό βάρος των κόκκων ενός εδάφους επηρεάζεται από την σύστασή του (Roy and Bhalla, 2017; Κούκης και Σαμπατακάκης, 2002). Η τιμή που λαμβάνει αυτή η συγκεκριμένη ιδιότητα μπορεί να δώσει πληροφορίες σχετικά με την ορυκτολογική σύσταση του εδάφους, την παρουσία οργανικού υλικού και την κρυσταλλικότητά του (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2002). Τα εδάφη από το Τσέρι και την Αλάμπρα παρουσιάζουν ίδιο ειδικό βάρος (2.56), ενώ τα χώματα από την Ποταμιά (λατομείο Λατούρου) και το Δελίκηπο έχουν υψηλότερο ειδικό βάρος (2.66 και 2.68, αντίστοιχα). Το χώμα από το Δελίκηπο προέρχεται γεωλογικά από περιοχή του οφιολιθικού συμπλέγματος του Τροόδους, και άρα είναι λογικό να παρουσιάζει την υψηλότερη τιμή, ενώ τα εδάφη της Αλάμπρας και του Τσερίου παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές, αφού πρόκειται για προϊόντα αποσάθρωσης και μεταφοράς προϋπαρχόντων πετρωμάτων. Το χώμα από την Ποταμιά αποτελεί παραπροϊόν της παραγωγής θραυστής άμμου, και άρα δεν πρόκειται για αποσθρωμένο υλικό, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει σχετική υψηλή τιμή ειδικού βάρους.

Από τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής διαβάθμισης φανερώνονται μεγάλες διαφορές ανάμεσα στα 4 εδαφικά υλικά που εξετάστηκαν (Εικ. 29). Το χώμα από την περιοχή του Δελίκηπου είναι ένα καλά διαβαθμισμένο έδαφος, στο οποίο περιέχονται όλες οι κοκκομετρικές κλάσεις. Το χώμα από την περιοχή της Αλάμπρας παρουσιάζει καλή διαβάθμιση στα χονδρόκοκκα, αλλά στα λεπτόκοκκα παρατηρείται μεγάλη κλίση στην καμπύλη, που φανερώνει μια ομοιομορφία στα

μεγέθη. Τα χώματα από το Τσέρι και την Ποταμιά (λατομείο Λατούρου) παρουσιάζουν πανομοιότυπη κοκκομετρική διαβάθμιση, αφού είναι φτωχά διαβαθμισμένα με απουσία των χαλικιών.



Εικόνα 29: Διάγραμμα στο οποίο παρατηρούνται οι κοκκομετρικές καμπύλες των 4 εδαφών. Με διάστικτη γραμμή οριοθετείται η περιοχή με τις προτεινόμενες διαβαθμίσεις για παραγωγή ΣΩ από την CraTerre – EAG (1998).

Στην Εικόνα 29 παρατηρούνται επίσης τα όρια που τίθενται από την CraTerre -EAG (1998), για τα εδαφικά υλικά που προορίζονται για χρήση στην παραγωγή συμπιεσμένων ωμοπλίνθων. Το μόνο έδαφος το οποίο είναι εντός των αποδεκτών ορίων είναι αυτό από το Δελίκηπο, με το χώμα από την Αλάμπρα να τίθεται εκτός στην περιοχή της ιλύος. Τα χώματα από τα λατομεία Λατούρου και Τσερίου είναι γενικά εκτός, αφού δεν έχουν καθόλου χονδρόκοκκα, ενώ παρουσιάζουν και ψηλά ποσοστά ιλύος. Στον Πίνακα 14 συνοψίζεται η κατανομή των κοκκομετρικών μεγεθών και τα προτεινόμενα όρια από την CraTerre – EAG (1998).

Πίνακας 14: Κατανομή κοκκομετρικών μεγεθών των 4 εδαφών που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

	Αλάμπρα	Δελίκηπος	Λατούρος	Τσέρι	CraTerre -EAG
Χαλίκια	3%	15%	-	-	0-40%
Άμμος	26%	53%	24%	29%	25-80%
Ιλύς	48%	22%	59%	46%	10-25%
Άργιλος	23%	10%	17%	25%	8-30%

Βάσει των πιο πάνω, έγινε ταξινόμηση των εδαφών χρησιμοποιώντας το πρότυπο ASTM D2487-00. Τα εδάφη από την περιοχή του Τσερίου και της Ποταμιάς ταξινομούνται ως ισχνές

αργίλοι, το χώμα από την Αλάμπρα ως ισχνή άργιλος με άμμο, και το χώμα από την περιοχή του Δελίκηπου ως ιλυώδης άμμος με χαλίκια.

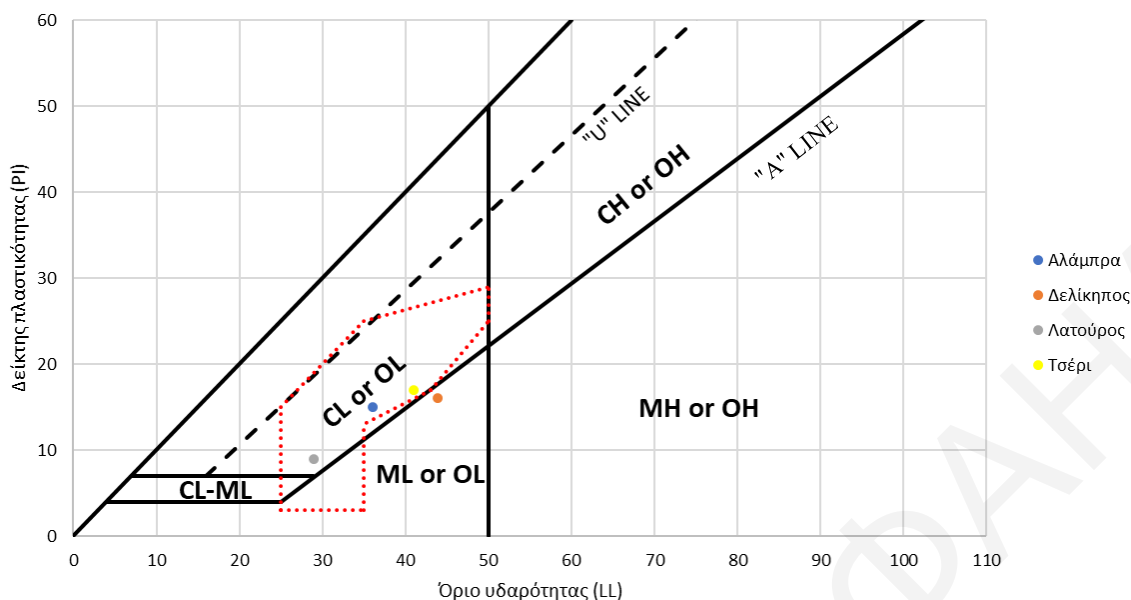
5.1.2 Όρια συνεκτικότητας και γραμμικής συρρίκνωσης

Οι τιμές των ορίων Atterberg και της γραμμικής συρρίκνωσης συνοψίζονται στον Πίνακα 15. Η χαμηλότερη τιμή στο όριο υδαρότητας παρατηρείται στο χώμα από το λατομείο Λατούρου, ενώ η ψηλότερη στο χώμα του Δελίκηπου. Η ίδια τάση παρατηρείται και στο δείκτη πλαστικότητας, αν και η ψηλότερη τιμή εδώ καταγράφεται για το έδαφος από το Τσέρι. Ο Skempton (1953) παρατήρησε ότι ο δείκτης πλαστικότητας αυξάνει, όσο αυξάνει το αργιλικό κλάσμα. Αυτό συμβαδίζει με τις παρατηρήσεις στα υπό εξέταση εδάφη, με μοναδική εξαίρεση το χώμα Δελίκηπου, που έχει το χαμηλότερο ποσοστό αργιλικού κλάσματος, και τον υψηλότερο δείκτη πλαστικότητας. Σημειώνεται ότι η διογκωσιμότητα των εδαφών εξαρτάται άμεσα από την πλαστικότητα τους, αφού όσο αυτή αυξάνει, τόσο μεγαλώνει και η δυνατότητα διόγκωσης ενός εδάφους (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2002). Γενικά, τα 4 εδάφη που μελετήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής χαρακτηρίζονται ως μέτριας πλαστικότητας (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2002). Στη γραμμική συρρίκνωση, την καλύτερη συμπεριφορά επιδεικνύει το χώμα του Λατούρου, που παρουσιάζει και την χαμηλότερη τιμή δείκτη πλαστικότητας, ενώ την υψηλότερη συρρίκνωση την έχει το χώμα του Δελίκηπου.

Πίνακας 15: Όρια συνεκτικότητας και γραμμική συρρίκνωση των 4 εδαφών που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

	Όριο Υδαρότητας (%)	Όριο Πλαστικότητας (%)	Δείκτης Πλαστικότητας (%)	Γραμμική συρρίκνωση (%)
Αλάμπρα	36	21	15	8
Δελίκηπος	44	28	16	9
Λατούρος	29	20	9	4
Τσέρι	41	24	17	7

Στο διάγραμμα πλαστικότητας (Εικ. 30) ταξινομούνται τα διάφορα εδάφη ανάλογα με τα όρια συνεκτικότητάς τους. Σε αντίθεση με την προηγούμενη ταξινόμηση που έγινε σύμφωνα με τα αποτελέσματα του δείκτη πλαστικότητας των υπό εξέταση εδαφών, εδώ όλα τα εδάφη, πλην του Δελίκηπου, ταξινομούνται ως CL, δηλαδή ως άργιλοι χαμηλής πλαστικότητας, ενώ το χώμα του Δελίκηπου βρίσκεται κάτω από την 'A' LINE, οπότεν ταξινομείται ως ML, δηλαδή ιλύς χαμηλής πλαστικότητας. Στο διάγραμμα παρατηρείται με κόκκινη διάστικτη γραμμή η περιοχή με τις αποδεκτές τιμές ορίων συνεκτικότητας για εδάφη που προορίζονται για την παραγωγή συμπιεσμένων ωμόπλινθων, όπως αυτή καθορίζεται από την CraTerre – EAG (1998). Το χώμα του Δελίκηπου βρίσκεται εκτός της περιοχής αυτής, ενώ τα υπόλοιπα 3 εδάφη ικανοποιούν τις συγκεκριμένες απαιτήσεις.



Εικόνα 30: Διάγραμμα πλαστικότητας για την ταξινόμηση των εδαφών. Με κόκκινη διάστικτη γραμμή είναι τα αποδεκτά όρια που θέτει η CraTerre – EAG (1998) για εδάφη που προορίζονται για την παραγωγή ΣΩ.

Η συνεκτικότητα των εδαφών επηρεάζεται έντονα από το αργιλικό κλάσμα. Για την συσχέτιση αυτών των δύο, ο Skempton (1953) εισήγαγε την έννοια της ενεργότητας, A . Η ενεργότητα των εδαφών είναι ο λόγος του δείκτη πλαστικότητας προς το ποσοστό του αργιλικού κλάσματος. Εδάφη με υψηλή ενεργότητα συνήθως έχουν υψηλή ικανότητα προσρόφησης νερού και ανταλλαγής κατιόντων (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2002). Σύμφωνα με τον Skempton (1953), εδάφη με $A \leq 0.75$ θεωρούνται ανενεργά, με $A \geq 1.25$ ενεργά, και ενδιάμεσα των δύο τιμών κανονικά. Στα υπό εξέταση εδάφη, αυτό από την περιοχή του Δελίκηπου κρίνεται ως ενεργό, ενώ τα υπόλοιπα 3 κρίνονται ως ανενεργά (Πίν. 16). Η υψηλή τιμή ενεργότητας του εδάφους Δελίκηπου δηλώνει την παρουσία ενεργών αργιλικών ορυκτών, γεγονός που δικαιολογεί και την υψηλότερη συρρίκνωση, σε σχέση με τα υπόλοιπα εδάφη που εξετάστηκαν στην παρούσα διατριβή (βλ. Πίνακα 15).

Πίνακας 16: Ενεργότητα των 4 εδαφών που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

Εδαφος	Ενεργότητα (A)	Χαρακτηρισμός
Αλάμπρα	0.65	Ανενεργό
Δελίκηπος	1.65	Ενεργό
Λατούρος	0.54	Ανενεργό
Τσέρι	0.69	Ανενεργό

5.1.3 Συμπιεστότητα

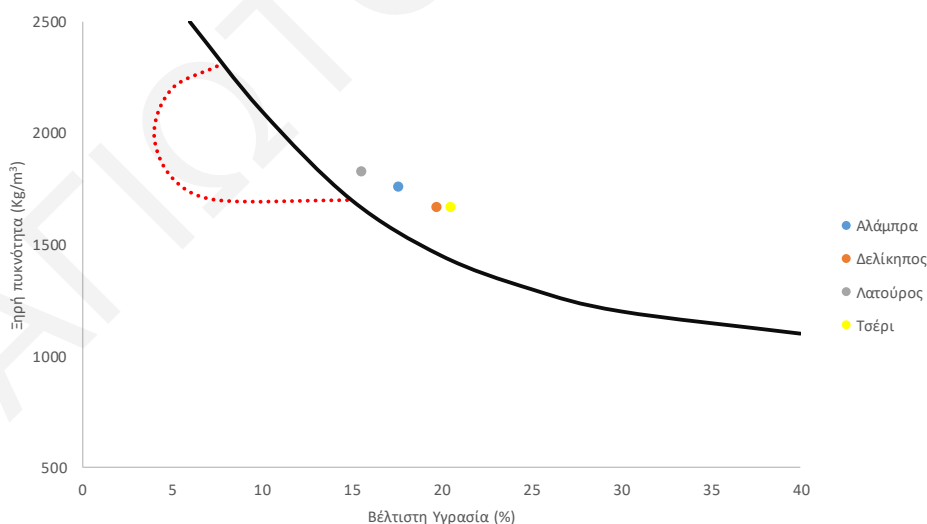
Για τα 4 υπό μελέτη κυπριακά εδάφη, τα αποτελέσματα από τη δοκιμή Proctor φαίνονται στον Πίνακα 17. Την υψηλότερη τιμή μέγιστης ξηρής πυκνότητας, 1.83 gr/cm^3 , λαμβάνει το χώμα από το λατομείο Λατούρου για ποσοστό βέλτιστης υγρασίας 15.5%, που είναι και το χαμηλότερο.

Πανομοιότυπες τιμές παραθέτουν και οι Reddy and Prasanna (2010), όπου για ποσοστό βέλτιστης υγρασίας 15.52%, καταγράφουν μέγιστη ξηρή πυκνότητα εδάφους 1814 kg/m³. Το χώμα από την περιοχή Αλάμπρας έχει ικανοποιητική ξηρή πυκνότητα, 1.76 gr/cm³, αλλά η βέλτιστη υγρασία του θεωρείται σχετικά υψηλή (>17.5%). Τα εδάφη από τις περιοχές Τσερίου και Δελίκηπου λαμβάνουν χαμηλές τιμές μέγιστης πυκνότητας, 1.67 gr/cm³, σε αρκετά υψηλά ποσοστά βέλτιστης υγρασίας, 20.5% και 19.7% αντίστοιχα.

Πίνακας 17: Αποτελέσματα μέγιστης ξηρής πυκνότητας και βέλτιστης υγρασίας για τα 4 εδάφη που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

Εδαφος	Μέγιστη ξηρή πυκνότητα (gr/cm ³)	Βέλτιστη υγρασία (%)
Αλάμπρα	1.76	17.6
Δελίκηπος	1.67	19.7
Λατούρος	1.83	15.5
Τσέρι	1.67	20.5

Οι Houben and Guillaud (1994) θέτουν κάποια όρια για τα εδάφη που προορίζονται για χρήση στην παραγωγή συμπιεσμένων ωμοπλίνθων, όσον αφορά την υγρασία και την ξηρή πυκνότητα. Τα όρια αυτά καταγράφονται στην Εικόνα 31 με κόκκινη διάστικτη γραμμή, όπου φαίνεται ότι κανένα από τα εδάφη που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής δεν βρίσκεται στην περιοχή με τις αποδεκτές τιμές. Πιο κοντά στο όριο βρίσκονται τα χώματα του Λατούρου και της Αλάμπρας, ενώ τα χώματα Τσερίου και Δελίκηπου βρίσκονται αρκετά εκτός. Τα όρια, ωστόσο, ούτε σε αυτό το κριτήριο είναι αυστηρά.



Εικόνα 31: Διάγραμμα στο οποίο παρατηρούνται οι τιμές βέλτιστης υγρασίας και μέγιστης ξηρής πυκνότητας των 4 κυπριακών εδαφών. Με κόκκινη διάστικτη γραμμή είναι τα όρια που θέτουν οι Houben and Guillaud (1994) για εδάφη που προορίζονται για την παραγωγή ΣΩ.

5.1.4 Ορυκτολογική ανάλυση

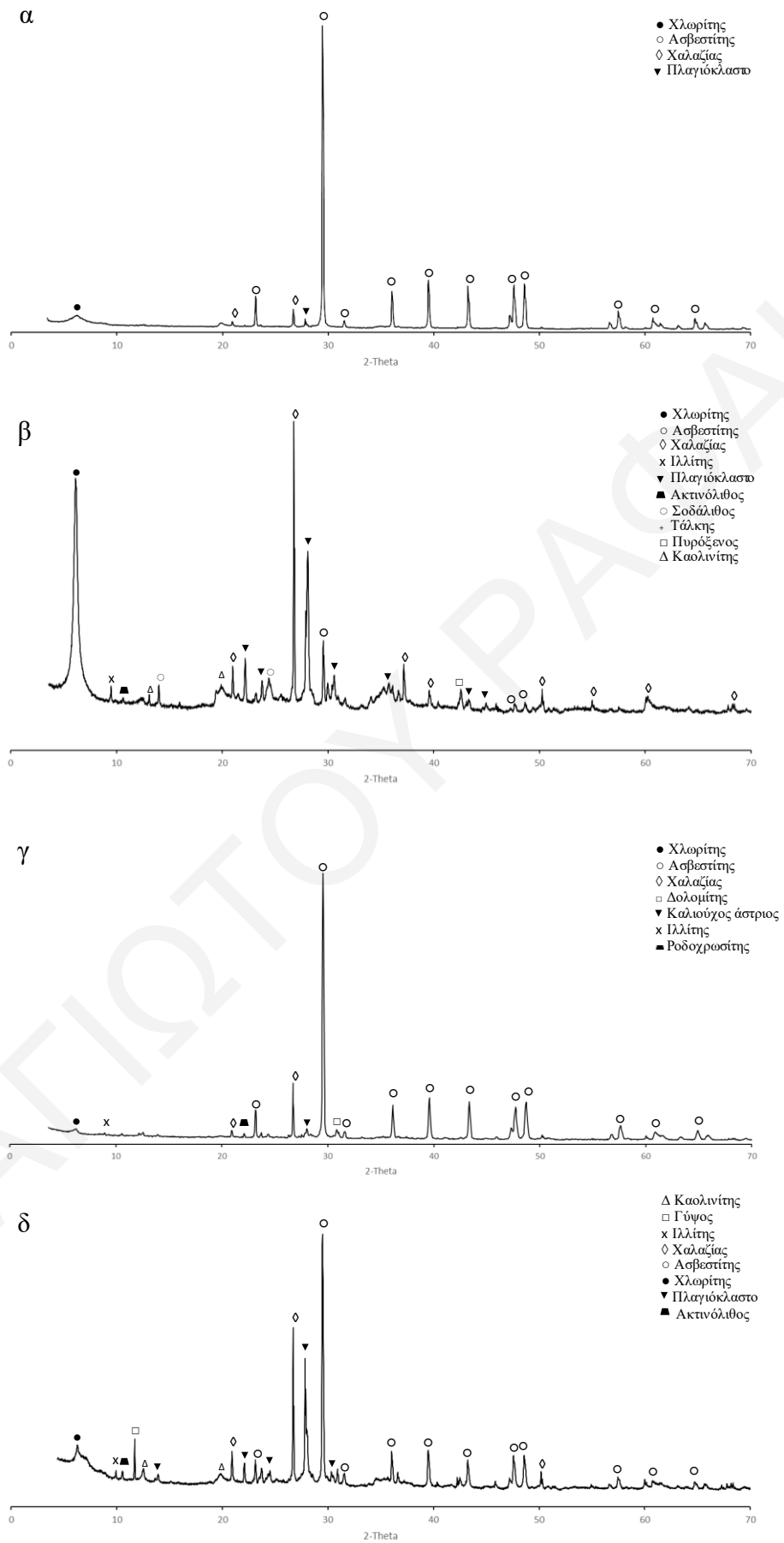
Στα 4 υπό μελέτη εδάφη εντοπίζονται αρκετά μεγάλες διαφορές στην ορυκτολογική τους σύσταση, κάτι που ήταν αναμενόμενο λόγω της διαφορετικής περιοχής προέλευσής τους. Τα

αποτελέσματα από την ορυκτολογική ανάλυση με τη μέθοδο περιθλασιμετρίας ακτινών X (XRD) συμβαδίζουν πλήρως με το γεωλογικό πλαίσιο της περιοχής από όπου προήλθαν τα συγκεκριμένα εδάφη.

Αναλυτικότερα, στο έδαφος από την περιοχή της Αλάμπρας είναι εμφανής η υπεροχή του ασβεστιτικού υλικού, όπως υποδεικνύεται από τις σχετικές εντάσεις των ανακλάσεων (Εικ. 32α). Ο ασβεστίτης παρατηρείται σε μεγάλη αναλογία στο συγκεκριμένο ακτινοδιάγραμμα, ενώ σε αυτό συμμετέχουν επίσης τα ορυκτά χαλαζίας, πλαγιόκλαστο και χλωρίτης. Η αναλογία ασβεστιτικών και πυριτικών ορυκτών, που προκύπτουν από τα ακτινοδιαγράμματα, είναι γύρω στο 7:1. Οι σχετικές εντάσεις στο ακτινοδιάγραμμα δείχνουν σχετικά μικρή συμμετοχή ορυκτών που πιθανώς να προκαλέσουν ογκομετρικές μεταβολές, ωστόσο τα αποτελέσματα της γραμμικής συρρίκνωσης (βλ. Πίνακα 15) υποδεικνύουν ότι υπάρχουν τέτοια ενεργά ορυκτά στο υπό εξέταση δείγμα. Η ασβεστιτική σύσταση του συγκεκριμένου εδάφους συμβαδίζει πλήρως με τα ασβεστιτικά πετρώματα που παρατηρούνται στην ευρύτερη περιοχή από όπου λήφθηκε το εν λόγω δείγμα (Κωνσταντίνου και Παναγίδης, 2013).

Το έδαφος από την περιοχή του Δελίκηπου έχει μια αρκετά πολύπλοκη ορυκτολογική σύσταση (Εικ. 32β), χαρακτηριστικό εδαφών που προέρχονται από το οφιολιθικό σύμπλεγμα του Τροόδους (Ren et al., 2015). Παρατηρείται σε μεγάλο ποσοστό χλωρίτης, χαλαζίας και πλαγιόκλαστο. Μικρότερη συμμετοχή παρατηρείται σε πυρόξενους, τάλκη, και ασβεστίτη. Επίσης, στο σχετικό ακτινοδιάγραμμα παρουσιάζεται το σπάνιο ορυκτό σοδάλιθος, το οποίο μπορεί να προήλθε από υδροθερμική εξαλλοίωση κάποιων δευτερογενών ορυκτών (Druppel and Wirth, 2018). Σε ίχνη υπάρχουν ακτινόλιθος, ιλλίτης και καολινίτης. Σε αυτό το έδαφος υπερτερούν τα πυριτικά ορυκτά, με την αναλογία τους προς τα αντίστοιχα ανθρακικά να είναι περίπου 8:1. Η υψηλή συμμετοχή, που φτάνει μέχρι περίπου το 25%, χλωρίτη και αργιλικών ορυκτών (καολινίτη, ιλλίτη, μοντμοριλλονίτη), πιθανώς να δημιουργήσει προβλήματα διογκώσεων στο συγκεκριμένο έδαφος, γεγονός που επιβεβαιώνεται από την υψηλή τιμή γραμμικής συρρίκνωσης που καταγράφει (βλ. Πίνακα 15).

Το έδαφος από το λατομείο Λατούρου είναι κατά κύριο λόγο ανθρακικής σύστασης (Εικ. 32γ), με επικρατέστερο ορυκτό τον ασβεστίτη. Σε μικρά ποσοστά συμμετέχουν σε αυτό το έδαφος τα ορυκτά χαλαζίας, δολομίτης και καλιούχοι άστριοι. Υπάρχουν επίσης ίχνη χλωρίτη, αργιλικών και ροδοχρωσίτη, ενός μαγγανιούχου ανθρακικού ορυκτού. Ο ροδοχρωσίτης πιθανώς προέκυψε από αντικατάσταση του Ca^{2+} στο πλέγμα του ασβεστίτη από Mn^{2+} , που βρισκόταν στο νερό κάποιου ποταμού που πήγαζε από κάποιο σημείο του οφιολιθικού συμπλέγματος του Τροόδους. Γενικά, στην Κύπρο παρατηρούνται αρκετές περιοχές με υψηλές σχετικά συγκεντρώσεις Mn σε ιζήματα, γεγονός που επιβεβαιώνει τη μεταφορά ποσοτήτων Mn, κυρίως μέσα από ποτάμια συστήματα (Robertson et al., 2019, Cohen et al., 2012). Οι αναλογίες ανθρακικών και πυριτικών ορυκτών που προκύπτουν από το σχετικό ακτινοδιάγραμμα, είναι 7:1, όπως και στην περίπτωση του εδάφους της Αλάμπρας.



Εικόνα 32: Ακτινοδιαγράμματα των 4 κυπριακών εδαφών. α) χώμα Αλάμπρας, β) χώμα Δελίκηπου, γ) χώμα Λατούρου, δ) χώμα Τσερίου.

Το χρώμα από την περιοχή του Τσερίου αποτελεί ένα συνονθύλευμα πυριτικών και ανθρακικών ορυκτών (Εικ. 32δ). Στην ορυκτολογική του σύσταση συναντώνται, σε υψηλές περιεκτικότητες, ασβεστίτης, πλαγιόκλαστα, χαλαζίας και χλωρίτης, ενώ σε μικρότερη περιεκτικότητα παρατηρούνται καολινίτης, γύψος και ακτινόλιθος. Σε αυτό το χρώμα, υπερτερούν τα πυριτικά ορυκτά, αφού η περιεκτικότητά τους είναι περίπου διπλάσια από αυτή των ανθρακικών. Η ορυκτολογική σύσταση του εν λόγω δείγματος οφείλεται στο γεγονός ότι προέρχεται από μια λεκάνη απόθεσης, η οποία περικλείεται από ανθρακικά και οφιολιθικά πετρώματα, που αποσαθρώθηκαν και αποτέθηκαν εντός αυτής.

5.1.5 Σύνοψη

Οι ιδιότητες των 4 εδαφικών υλικών που επιλέχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής για την παραγωγή συμπίεσμένων ωμοπλίνθων διαφέρουν αρκετά, αν και τα εδάφη αυτά προέρχονται από σχετικά κοντινές περιοχές. Αυτό οφείλεται στην ευμετάβλητη και πολυποίκιλη γεωλογία της Κύπρου, όπου σε πολύ μικρές αποστάσεις παρατηρείται εναλλαγή διαφορετικών γεωλογικών οντοτήτων. Τα δύο εδάφη από τις περιοχές της Αλάμπρας και της Ποταμιάς, αποτελούν σχεδόν αποκλειστικά ανθρακικής σύστασης υλικά, το έδαφος από την περιοχή του Δελίκηπου είναι πυριτικής σύστασης, και το έδαφος από την περιοχή του Τσερίου ένα συνονθύλευμα πυριτικών και ανθρακικών ορυκτών.

Στη μελέτη της κοκκομετρικής διαβάθμισης των πιο πάνω εδαφών, οι αποδεκτές τιμές που ορίζονται από την CraTerre – EAG (1998) ικανοποιούνται μόνο από το χρώμα του Δελίκηπου. Τα υπόλοιπα 3 εδάφη βρίσκονται εκτός των αποδεκτών τιμών, είτε λόγω έλλειψης χονδρόκοκκων, είτε λόγω περίσσειας λεπτόκοκκων (ιλύος). Η διαβάθμιση των 3 αυτών εδαφών δεν είναι καλή, με αποτέλεσμα να αναμένεται μια λιγότερο πυκνή δομή από την επιθυμητή στους συμπίεσμένους ωμόπλινθους.

Τα αποτελέσματα από τα όρια συνεκτικότητας συμβαδίζουν με τις τιμές που παρατηρούνται στη βιβλιογραφία για εδάφη που χρησιμοποιήθηκαν στην παραγωγή συμπίεσμένων ωμοπλίνθων (Ενότητα 3.2), ωστόσο φαίνεται να έρχονται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα από την κοκκομετρική διαβάθμιση. Τα 3 εδάφη, πλην του Δελίκηπου, που είχαν μη ικανοποιητική κοκκομετρική διαβάθμιση, ικανοποιούν τις απαιτήσεις που θέτει η CraTerre -EAG (1998) για τα όρια συνεκτικότητας, με το έδαφος από το Δελίκηπο να είναι οριακά εκτός των προτεινόμενων απαιτήσεων. Ο δείκτης πλαστικότητας καταδεικνύει μέσης διογκωσιμότητας εδάφη, εκτός από το χρώμα από το λατομείο Λατούρου που είναι χαμηλής διογκωσιμότητας (Seed et al., 1962). Ωστόσο, η ενεργότητα του Δελίκηπου είναι αρκετά υψηλή, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι αναμένεται να παρατηρηθούν ογκομετρικές μεταβολές σε πιθανή επαφή του με νερό. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα της γραμμικής συρρίκνωσης που παρουσιάζονται σε αυτό

το κεφάλαιο. Τα άλλα 3 εδάφη κρίνονται ως ανενεργά, με αποτέλεσμα να μην αναμένεται ότι θα παρουσιάσουν ανάλογα προβλήματα σε πιθανή επαφή τους με νερό.

Τα αποτελέσματα από τη διερεύνηση της συμπεστότητας δεν ικανοποιούν τις απαιτήσεις που θέτουν οι Houben and Guillaud (1994). Όλα τα εδάφη που μελετήθηκαν παρουσιάζουν υψηλή βέλτιστη υγρασία, ενώ μόνο τα χώματα Λατούρου και Αλάμπρας έχουν ικανοποιητική ξηρή πυκνότητα. Το χώμα Λατούρου, για την ακρίβεια, παρουσιάζει την υψηλότερη ξηρή πυκνότητα, γεγονός που πιθανώς οφείλεται στην κοκκομετρική του διαβάθμιση, αφού αποτελείται εξ ολοκλήρου από λεπτόκοκκα που μπορούν εύκολα να αναδιαταχθούν και να συμπεστούν, δημιουργώντας λιγότερους πόρους. Το χώμα από την περιοχή του Δελίκηπου, αν και παρουσιάζει την καλύτερη κοκκομετρική διαβάθμιση, έχει, μαζί με το χώμα από το Τσέρι, τη χαμηλότερη ξηρή πυκνότητα, πιθανώς λόγω του υψηλού ποσοστού χονδρόκοκκων και της χαμηλής περιεκτικότητας σε αργιλικό υλικό. Το έδαφος από την περιοχή της Αλάμπρας είναι κοκκομετρικά κοντά στα αποδεκτά όρια, οπότε παρουσιάζει και ικανοποιητικά πυκνή δομή. Παρόμοιες περιπτώσεις εδαφών παρατηρούνται και στη βιβλιογραφία, όπου οι Danso and Adu (2019) παραθέτουν ως βέλτιστη υγρασία σε έδαφος 23%, ενώ οι Bahar et al. (2004), αν και καταγράφουν ικανοποιητική βέλτιστη υγρασία, 11%, η πυκνότητα που επιτυγχάνουν είναι αρκετά κοντά στο χαμηλότερο όριο, 1795 kg/m³.

Τα όρια, ωστόσο, που τίθενται πιο πάνω, δεν αποτελούν πανάκεια. Όπως καθορίζεται και από τους κανονισμούς, οι αποδεκτές περιοχές τιμών που ορίζονται αναφέρονται σε ευέλικτα όρια και όχι απόλυτα. Η καταλληλότητα ενός εδάφους πρέπει να κρίνεται από τις ιδιότητες του παραγόμενου συμπεσμένου ωμόπλινθου.

Οι πλείστες από τις προαναφερθείσες ιδιότητες εδαφικών πρώτων υλών συνδέονται άμεσα με την ορυκτολογική σύσταση του κάθε εδάφους. Παρακάτω συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ορυκτολογική ανάλυση των 4 υπό μελέτη εδαφών:

- Το έδαφος από την περιοχή του Δελίκηπου έχει πολύ υψηλά ποσοστά χλωρίτη και αργιλικών ορυκτών (καολινίτη, ιλλίτη, μοντμοριλλονίτη), που φτάνουν μέχρι 25%, γεγονός που δικαιολογεί τις υψηλές τιμές ορίου υδαρότητας, δείκτη πλαστικότητας, γραμμικής συρρίκνωσης και ενεργότητας. Γενικώς, το έδαφος αυτό δείχνει να είναι αρκετά προσφιλές στο νερό, λόγω της ικανότητας πολλών από τα συμμετέχοντα ορυκτά να προσροφούν νερό.
- Το έδαφος από την περιοχή του Τσερίου παρουσιάζει, επίσης, υψηλά ποσοστά χλωρίτη και αργιλικών ορυκτών, οπότε δικαιολογούνται και σε αυτή την περίπτωση οι υψηλές τιμές ορίου υδαρότητας, δείκτη πλαστικότητας και γραμμικής συρρίκνωσης. Επιπλέον, το έδαφος αυτό δεν χαρακτηρίζεται ως ενεργό, αφού έχει υψηλό ποσοστό αργιλικού κλάσματος. Η χαμηλή τιμή μέγιστης ξηρής πυκνότητας που καταγράφεται για το έδαφος από την περιοχή

του Τσερίου πιθανώς να οφείλεται και στην κακή συνοχή που αναπτύσσουν τα πυριτικά και ανθρακικά ορυκτά μεταξύ τους.

- Το έδαφος από τη περιοχή της Αλάμπρας έχει χαμηλότερα ποσοστά χλωρίτη και αργιλικών ορυκτών, οπότεν δεν είναι ιδιαίτερα προσφιλές στο νερό. Παρόλα αυτά, παρουσιάζει υψηλή γραμμική συρρίκνωση και δείκτη πλαστικότητας, που πιθανότατα οφείλονται στην παρουσία χλωρίτη.
- Το δείγμα από το λατομείο Λατούρου έχει πολύ χαμηλά ποσοστά αργιλικών, και για αυτό παρουσιάζει τις χαμηλότερες τιμές σε όλες τις ιδιότητες που σχετίζονται με την προσρόφηση νερού.

5.2 Μακροσκοπική και μικροσκοπική εξέταση συμπίεσμένων ωμοπλίνθων

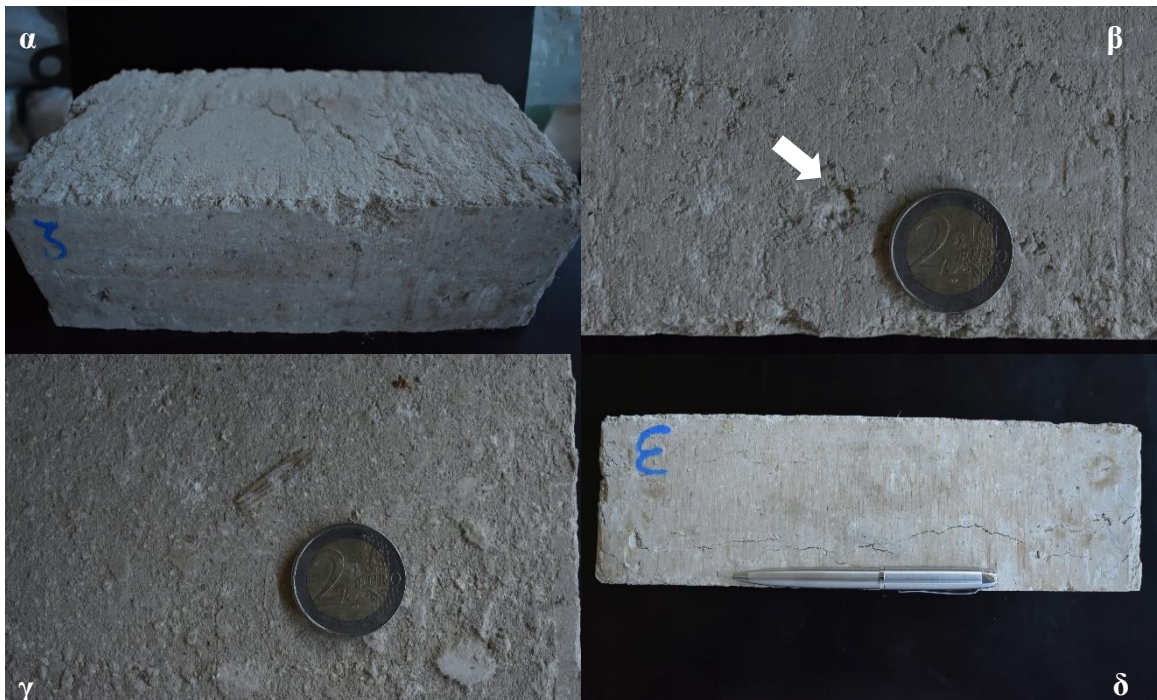
Στην ενότητα αυτή, εξετάζονται οι υπό μελέτη συμπίεσμένοι ωμόπλινθοι, τόσο μακροσκοπικά όσο και μικροσκοπικά, με σκοπό την κατανόηση της δομής τους. Αρχικά παρατίθενται τα αποτελέσματα από τη μακροσκοπική τους εξέταση, στη συνέχεια από τη μελέτη στο στερεομικροσκόπιο, και τέλος από την παρατήρηση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Η σύνθεση των επιμέρους παρατηρήσεων αναμένεται να βοηθήσει στην κατανόηση της δομής και μετέπειτα της συμπεριφοράς των συμπίεσμένων ωμοπλίνθων.

5.2.1 Μακροσκοπική εξέταση

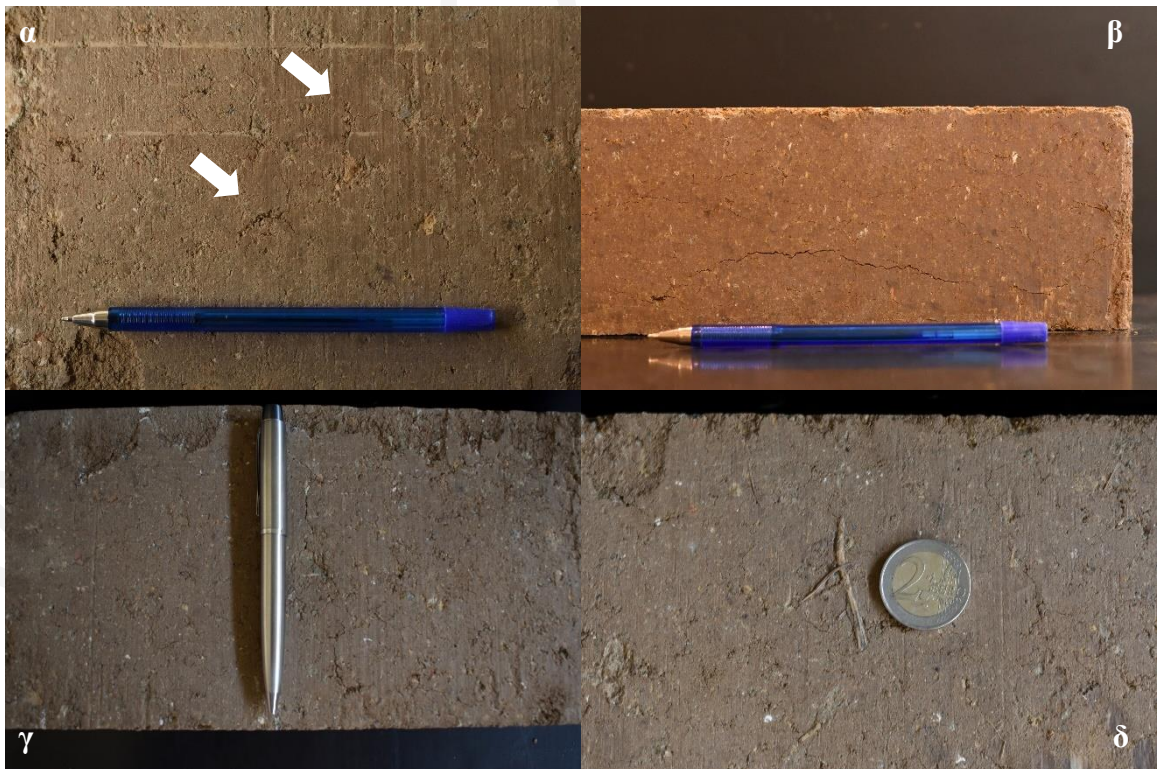
Οι συμπίεσμένοι ωμόπλινθοι με χόμα από την περιοχή της Αλάμπρας παρουσιάζουν γενικά μια συμπαγή μορφή. Οι άνω και κάτω επιφάνειές τους είναι τραχείες, ενώ οι πλαϊνές είναι λείες λόγω της συμπίεσης και επαφής με τα τοιχώματα της μήτρας (Εικ. 33α). Οι ακμές των δοκιμίων είναι γενικά σπασμένες, χαρακτηριστικό το οποίο υποδεικνύει ασθενή συνοχή του υλικού στα άκρα (Εικ. 32α). Οι κόκκοι του χονδρόκοκκου κλάσματος παρατηρούνται διάσπαρτοι μέσα στο υλικό, ενώ γύρω από αυτούς το συνδετικό υλικό δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα καλή συνοχή (Εικ. 33β). Επίσης, σε πολλά σημεία είναι εμφανής η παρουσία αχύρου (Εικ. 33γ). Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό όλων των δοκιμίων με χόμα από την περιοχή της Αλάμπρας είναι η παρουσία ρωγμών, οι οποίες αναπτύσσονται με προτιμητέο προσανατολισμό κάθετα στη διεύθυνση της συμπίεσης (Εικ. 33δ).

Οι συμπίεσμένοι ωμόπλινθοι με χόμα από την περιοχή του Δελίκηπου παρουσιάζονται ιδιαίτερα συμπαγείς, αλλά με συστηματικά μικρότερο ύψος από τους υπόλοιπους. Η συνοχή των χονδρόκοκκων με το συνδετικό υλικό κρίνεται ως ικανοποιητική, με την υφή να είναι ομοιογενής σε όλα τα δοκίμια που εξετάστηκαν. Σε όλες τις επιφάνειές παρατηρούνται τριχοειδείς ρωγμές (Εικ. 34α), με τις πλέον χαρακτηριστικές να διατάσσονται κάθετα ως προς τη διεύθυνση της συμπίεσης (Εικ. 34β). Οι άνω και κάτω επιφάνειες είναι τραχείες, ενώ οι πλαϊνές είναι λείες. Οι ακμές των δοκιμίων είναι και πάλι σπασμένες (Εικ. 34γ), ωστόσο αυτό παρατηρείται σε μικρότερο βαθμό

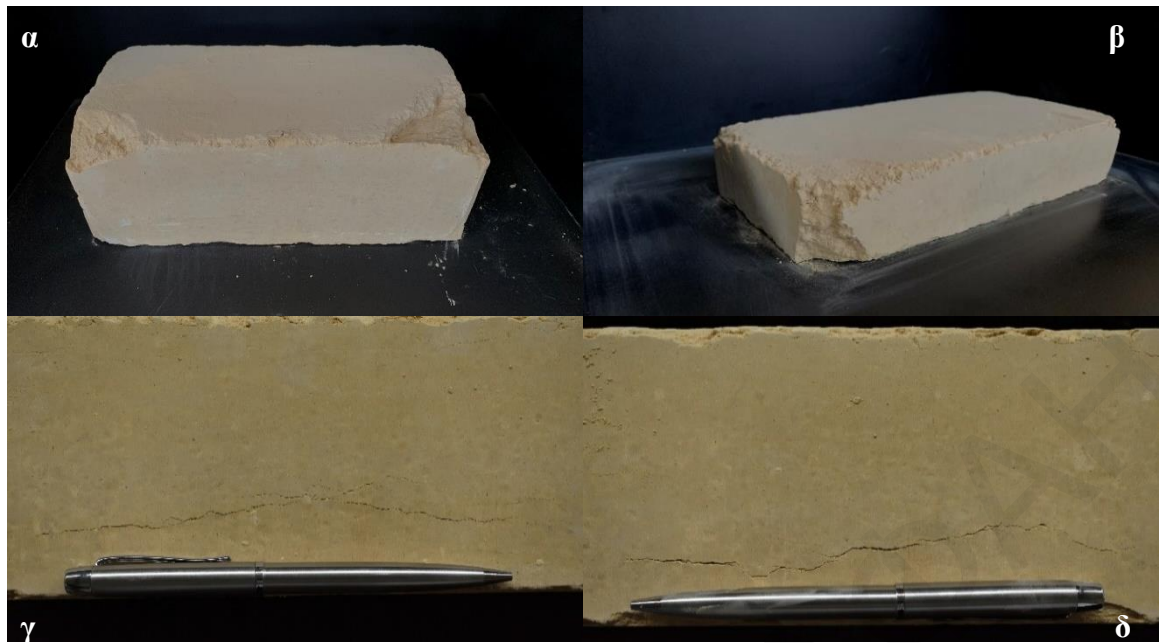
συγκριτικά με τα δοκίμια της Αλάμπρας. Ακόμη, μέσα στο υλικό εντοπίζονται διάσπαρτα άχυρα (Εικ. 34δ).



Εικόνα 33: Μακροσκοπικές εικόνες από τους συμπιεσμένους ωμόπλινθους με χρώμα από την περιοχή της Αλάμπρας. α) Ωμόπλινθος με σπασμένες ακμές, τραχεία άνω επιφάνεια και λεία πλαϊνή (300 mm x 150 mm x 100 mm), β) Χονδρόκοκκο αδρανές, το οποίο έχει μέτρια συνοχή με το συνδετικό υλικό γύρω του, γ) Χαρακτηριστική εικόνα αχύρου μέσα σε συμπιεσμένο ωμόπλινθο, δ) Ρωγμές που διατάσσονται κάθετα στη διεύθυνση της συμπίεσης.



Εικόνα 34: Μακροσκοπικές εικόνες από τους συμπιεσμένους ωμόπλινθους με χρώμα από την περιοχή του Δελίκηπου. α) Διάσπαρτες τριχοειδείς ρωγμές στην κάτω επιφάνεια του δοκιμίου και παρουσία φυτικών υλικών, β) Ρωγμές που διατάσσονται κάθετα στη διεύθυνση της συμπίεσης, γ) Δοκίμιο με σπασμένες ακμές και ρωγμές στην άνω επιφάνεια, δ) Χαρακτηριστική εικόνα με άχυρα διάσπαρτα μέσα στο υλικό.



Εικόνα 35: Μακροσκοπικές εικόνες από τους συμπιεσμένους ωμόπλινθους με χώμα από το λατομείο Λατούρου. α) Δοκίμια με έντονα σπασμένες ακμές (300 mm x 150 mm x 100 mm), β) Δοκίμιο με σημαντική απώλεια υλικού (300 mm x 150 mm x 100 mm), γ) Δοκίμιο με μεγάλη ρωγμή κάθετα στη διεύθυνση της συμπίεσης, δ) δοκίμιο με σπασμένες ακμές και ρωγμή που είναι προσανατολισμένη κάθετα στη διεύθυνση της συμπίεσης.



Εικόνα 36: Μακροσκοπικές εικόνες από τους συμπιεσμένους ωμόπλινθους με χώμα από την περιοχή του Τσερίου. α) Κάτω επιφάνεια συμπιεσμένου ωμόπλινθου στην οποία παρατηρείται καλή συνοχή του υλικού, β) Λεία πλαϊνή επιφάνεια, με ρωγμή κάθετα στη διεύθυνση της συμπίεσης, γ) Επανθίσεις από άλατα ή οργανικό υλικό στην άνω επιφάνεια (300 mm x 150 mm x 100 mm), δ) Μεγάλες ρωγμές, κάθετες στη διεύθυνση της συμπίεσης.

Οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι με χώμα από την Ποταμιά (λατομείο Λατούρου) είναι γενικά εύθρυπτοι με σπασμένες ακμές (Εικ. 35α), οι οποίες τείνουν να στρογγυλεύουν. Η απώλεια υλικού σε αυτές τις θέσεις κρίνεται ως σημαντική, με αποτέλεσμα να μεταβάλλονται σημαντικά οι διαστάσεις των δοκιμίων (Εικ. 35β). Όταν οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι μετακινηθούν, παρατηρείται περαιτέρω απώλεια υλικού από τις ακμές, γεγονός που καθιστά τα δοκίμια δύσκολα στη διαχείριση. Το λεπτόκοκκο υλικό επικρατεί σε όλα τα δοκίμια που εξετάστηκαν και δεν παρατηρούνται κόκκοι

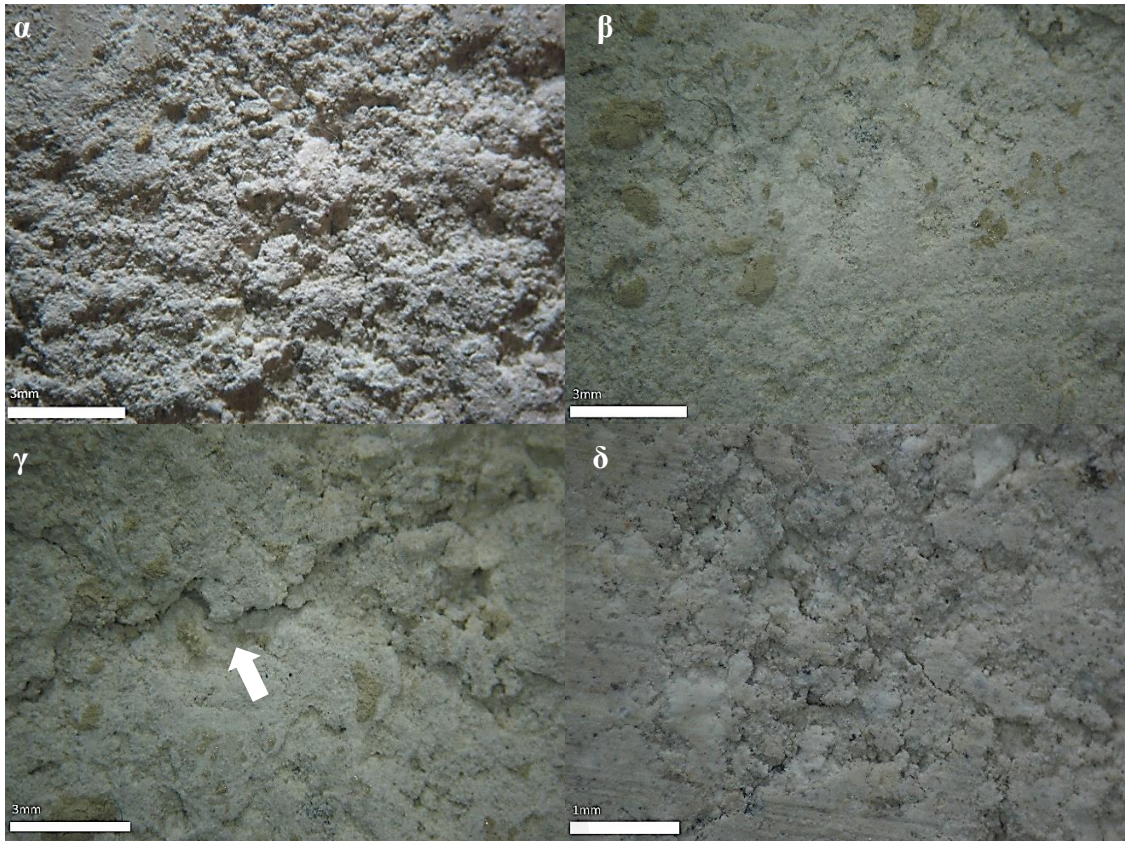
αδρανών. Παρότι δεν παρατηρείται σημαντικός αριθμός ρωγμών, ορισμένες που εμφανίζονται κάθετα στον άξονα συμπίεσης είναι ιδιαίτερα εμφανείς (Εικ. 35γ, δ). Όλες οι επιφάνειες των δοκιμίων είναι λείες, λόγω του λεπτόκοκκου χαρακτήρα της πρώτης ύλης.

Οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι με χρώμα από την περιοχή του Τσερίου είναι συμπαγείς, με ιδιαίτερα καλή συνοχή (Εικ. 36α). Όλες οι επιφάνειές τους είναι λείες και δεν συναντάται χονδρόκοκκο υλικό στα δοκίμια που εξετάστηκαν (Εικ. 36β). Σε κάποια σημεία, παρατηρούνται συσσωματώματα από λεπτόκοκκο υλικό, ενώ σε πολλά δοκίμια παρατηρείται μια χαρακτηριστική λευκή επίστρωση στην επιφάνειά τους που πιθανώς οφείλεται σε άλατα ή οργανικό υλικό (Εικ. 36γ). Όπως και στα προηγούμενα δοκίμια, έτσι και εδώ παρατηρούνται ρωγμές που διατάσσονται κάθετα στη διεύθυνση της συμπίεσης (Εικ. 36δ).

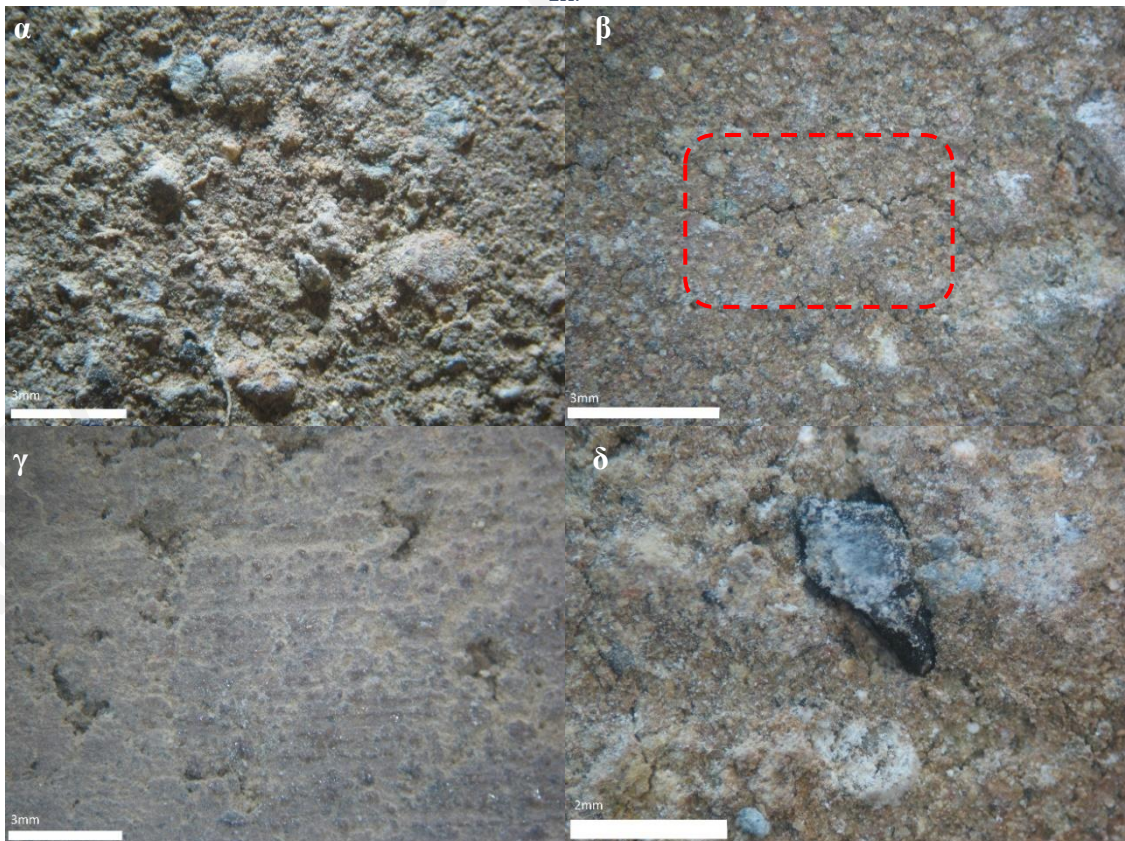
5.2.2 Στερεομικροσκοπική εξέταση

Το επιφανειακό ανάγλυφο των δοκιμίων με χρώμα από την περιοχή της Αλάμπρας παρουσιάζει αυξημένη μικροτραχύτητα (Εικ. 37α), η οποία πολλές φορές συνοδεύεται από χονδρόκοκκα αδρανή. Στην Εικόνα 37β παρατηρείται η συνεκτική δομή του υλικού, η καλή συνοχή των αδρανών με το συνδετικό υλικό και το λευκό χρώμα που είναι χαρακτηριστικό για τα ανθρακικής σύστασης υλικά. Σε κάποια σημεία, παρατηρούνται επιφανειακές ρωγμές, μικρού ή μεγάλου σχετικά μεγέθους, οι οποίες δύναται να αποτελέσουν σημεία αδυναμίας και κατ' επέκταση αστοχίας σε φόρτιση (Εικ. 37γ). Η παρατήρηση του υλικού στη μέγιστη δυνατή μεγέθυνση στο στερεομικροσκόπιο υπέδειξε την παρουσία αρκετών μικρών πόρων, οι οποίοι δεν είναι ορατοί με γυμνό μάτι (Εικ. 37δ).

Οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι με χρώμα από την περιοχή του Δελίκηπου χαρακτηρίζονται από μια σχετικά περίπλοκη επιφανειακή δομή. Παρατηρούνται περιοχές με πυκνή δομή και περιοχές με φωχότερη συνοχή, στις οποίες εμφανίζονται ρωγμές και πόροι. Παρατηρείται επίσης αυξημένη επιφανειακή τραχύτητα, η οποία πολλές φορές προκύπτει από τα χονδρόκοκκα που προεξέχουν (Εικ. 38α). Σε πολλά σημεία παρατηρούνται άχυρα, ενώ δεν λείπουν και οι ρωγμές, κυρίως στη διεπιφάνεια του χονδρόκοκκου κλάσματος με το συνδετικό υλικό (Εικ. 38β). Όπως παρατηρήθηκε και κατά τη μακροσκοπική εξέταση των δοκιμίων, οι πλέον εκτεταμένες μικρορωγμές προσανατολίζονται κάθετα στη διεύθυνση συμπίεσης. Χαρακτηριστικό των δειγμάτων είναι και η παρουσία σχετικά μεγάλων επιφανειακών πόρων (Εικ. 38γ), όπως επίσης και η ασθενής συνοχή σε πάρα πολλά σημεία επαφής των χονδρόκοκκων με το συνδετικό υλικό (Εικ. 38δ).

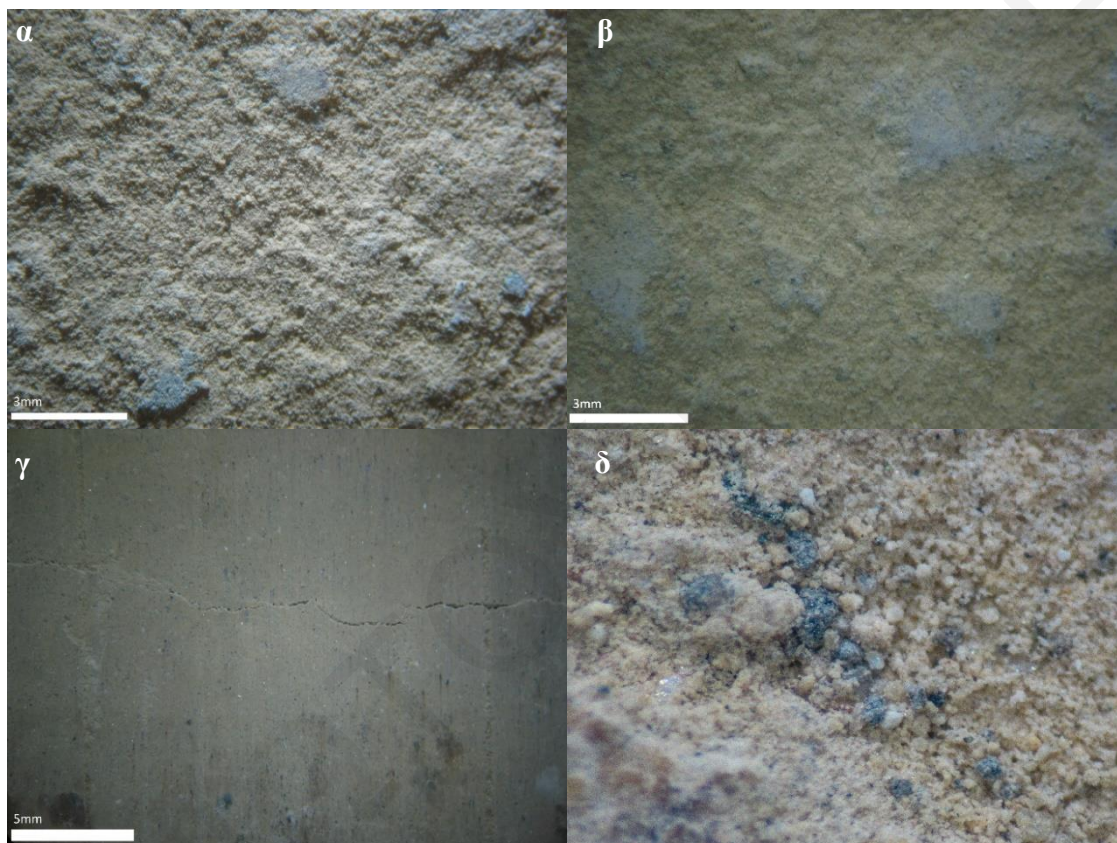


Εικόνα 37: Εικόνες από το στερεομικροσκόπιο για τους συμπιεσμένους ωμόπλινθους με χώμα από την περιοχή της Αλάμπρας. α) Επιφανειακή μικροτραχύτητα με μικρές ρωγμές και παρουσία χονδρόκοκκου υλικό, β) Πυκνή δομή και καλή συνοχή συνδετικού-χονδρόκοκκων, γ) Επιφανειακή ρωγμή και δ) Μικρές ρωγμές και πόροι στην επιφάνεια των ΣΩ.



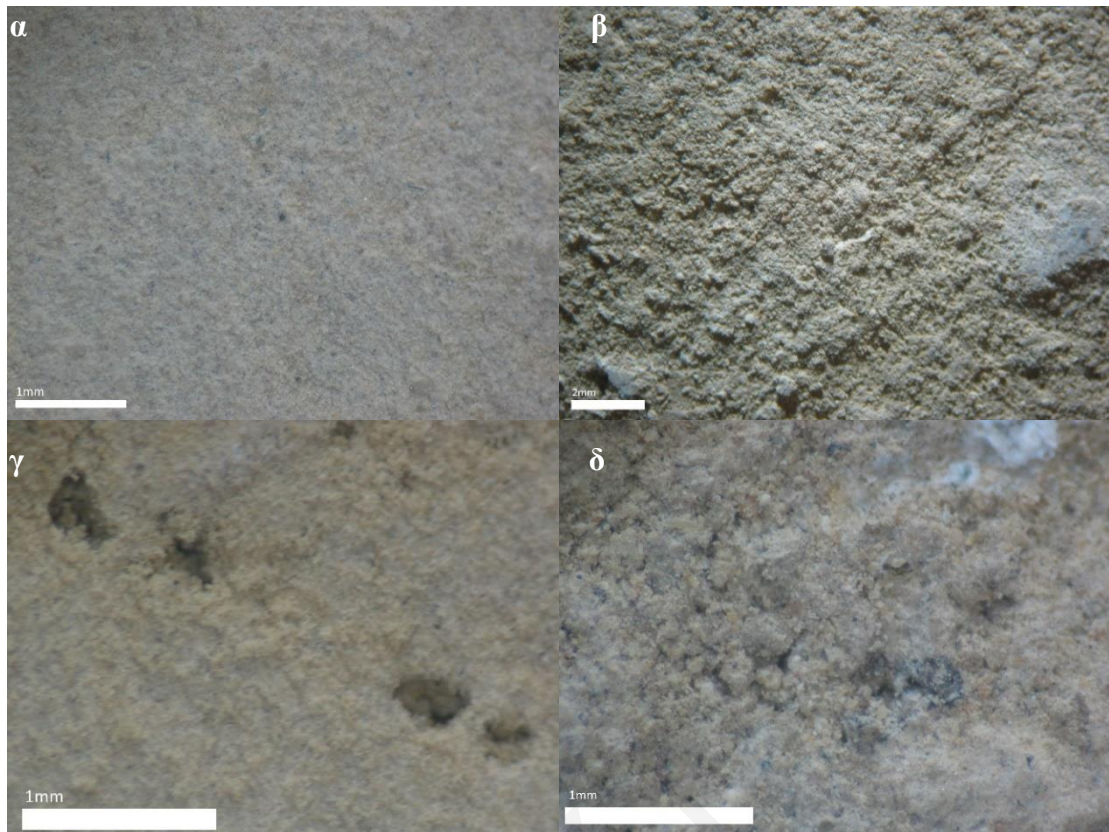
Εικόνα 38: Εικόνες από το στερεομικροσκόπιο για τους συμπιεσμένους ωμόπλινθους με χώμα από την περιοχή του Δελίκηπου. α) Επιφανειακή τραχύτητα του υλικού, όπου τα αδρανή φαίνονται να προεξέχουν, β) Ρωγμές στη διεπιφάνεια αδρανών – συνδετικού υλικού, με εμφανή τη συμμετοχή χονδρόκοκκων, γ) Επιφανειακοί πόροι στην άνω επιφάνεια του δοκιμίου και δ) Κακή συνοχή μεταξύ του χονδρόκοκκου αδρανού και του συνδετικού υλικού.

Οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι με χρώμα από την περιοχή Ποταμιάς (λατομείο Λατούρου) παρήχθησαν με λεπτόκοκκο υλικό, και έτσι η τραχύτητα στις επιφάνειές τους δεν είναι ιδιαίτερα αυξημένη (Εικ. 39α). Ο λεπτόκοκκος χαρακτήρας του εδαφικού υλικού που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή αυτών των ωμόπλινθων δημιουργεί επίσης μια αρκετά πυκνή δομή επιφανειακά (Εικ. 39β). Ωστόσο, παρατηρούνται εκτεταμένες ρωγμές, οι οποίες είναι προσανατολισμένες κάθετα ως προς τη διεύθυνση της συμπίεσης (Εικ. 39γ). Επίσης, κατά τη λεπτομερή παρατήρηση του υλικού, παρατηρήθηκαν αρκετοί μικροί πόροι σε ολόκληρη την έκταση των δοκιμίων (Εικ. 39δ).



Εικόνα 39: Εικόνες από το στερεομικροσκόπιο για τους συμπιεσμένους ωμόπλινθους με χρώμα από το λατομείο Λατούρου. α) Επιφανειακή τοπογραφία, όπου παρατηρείται μικρή τραχύτητα, β) Πυκνή δομή του υλικού, γ) Εκτεταμένη ρωγή κάθετα στη διεύθυνση συμπίεσης και δ) Πολλοί μικροί πόροι ανάμεσα στους κόκκους.

Οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι με χρώμα από την περιοχή του Τσερίου χαρακτηρίζονται από μια ομοιογενή και πυκνή δομή, στην οποία δεν παρατηρείται χονδρόκοκκο κλάσμα (Εικ. 40α). Η επιφάνειά τους είναι σχετικά ομαλή, με μέτρια τραχύτητα (Εικ. 40β), ενώ παρατηρούνται σε αρκετά σημεία άχυρα και πόροι (Εικ. 40γ). Κατά τόπους, οι πόροι παρουσιάζουν αυξημένη συγκέντρωση, ωστόσο η διάμετός τους είναι σχετικά μικρή (Εικ. 40δ). Σε συμφωνία με τη μακροσκοπική εξέταση (βλ. παρ. 5.2.1), στις πλαϊνές επιφάνειες των δοκιμίων παρατηρούνται οριζόντιες ρωγμές, οι οποίες διατάσσονται κάθετα στη διεύθυνση συμπίεσης. Σε αρκετές περιοχές παρατηρούνται επίσης συσσωματώματα κόκκων, στη διεπιφάνεια των οποίων με το συνδετικό υλικό κάποιες φορές εντοπίζονται ρωγμές. Στην επιφάνεια των δοκιμίων, κυρίως πλευρικά, παρατηρούνται περιοχές με λευκότερο χρώμα, υποδεικνύοντας την παρουσία αλάτων ή οργανικού υλικού.

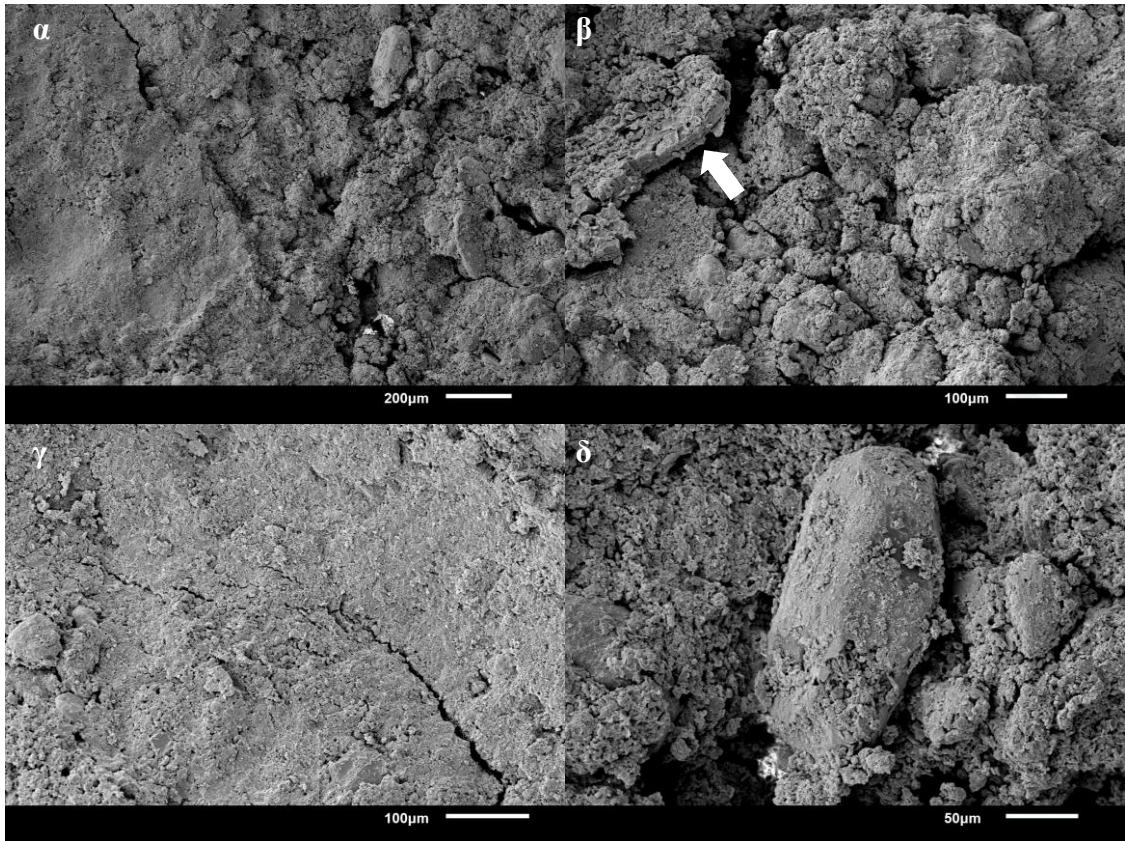


Εικόνα 40: Εικόνες από το στερεομικροσκόπιο για τους συμπιεσμένους ωμόπλινθους με χώμα από την περιοχή του Τσερίου. α) Πυκνή δομή του υλικού, β) Μέτρια επιφανειακή τραχύτητα και απουσία χονδρόκοκκου υλικού, γ) Επιφανειακοί πόροι και δ) Επιφάνεια με αυξημένη συγκέντρωση πόρων.

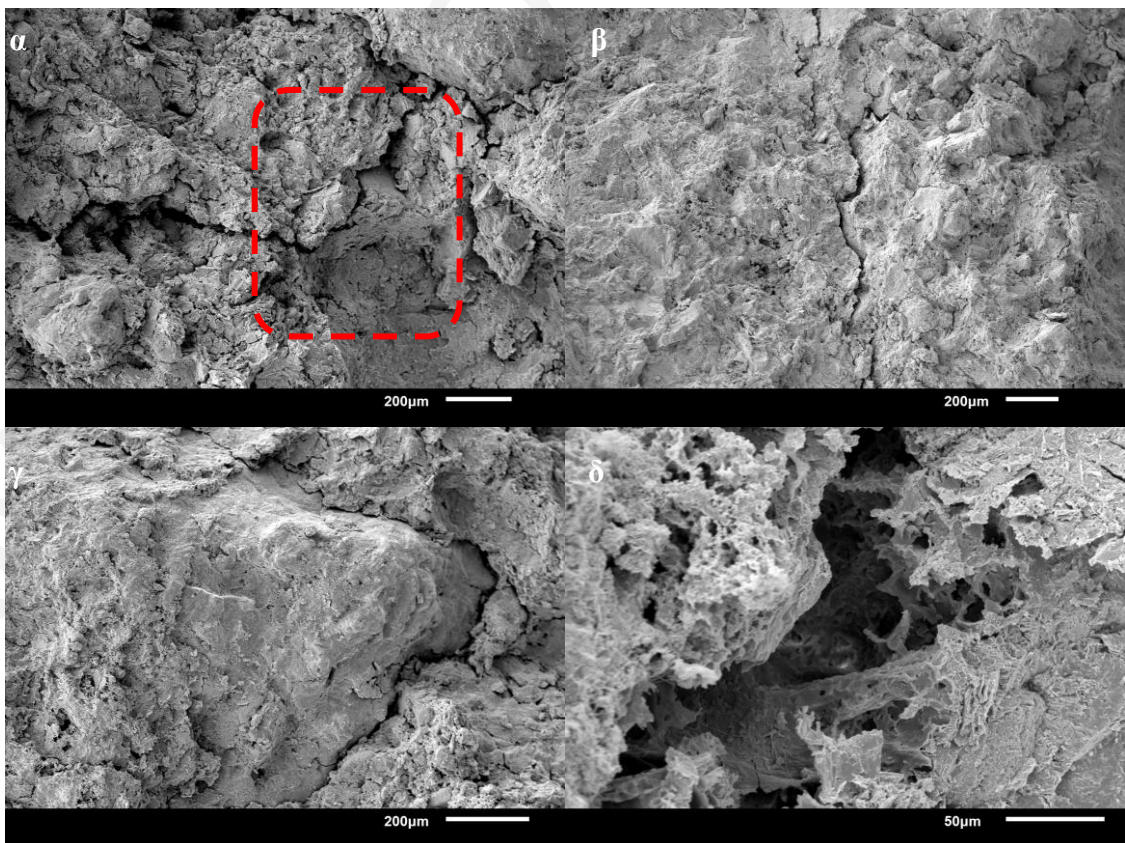
5.2.3 Παρατήρηση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM)

Οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι με χώμα από την περιοχή της Αλάμπρας δεν έχουν ομοιογενή μικροδομή. Παρατηρούνται σημεία στα οποία η μικροδομή είναι πυκνή και περιοχές όπου είναι πιο χαλαρή (Εικ.41α). Επίσης, παρατηρούνται μικροί και μεγάλοι πόροι, κυρίως στη διεπιφάνεια χονδρόκοκκων και συνδετικού υλικού, με αποτέλεσμα η μικροδομή του υλικού να είναι κερματισμένη (Εικ. 41β). Σε κάποιες περιοχές παρατηρούνται πλακοειδή ορυκτά, πιθανώς ασβεστιτικής σύστασης, ωστόσο η συγκέντρωσή τους στο δείγμα είναι μικρή (Εικ. 41β). Επίσης, σε αρκετά σημεία του δείγματος εντοπίζονται ρωγμές, οι οποίες πολλές φορές διατάσσονται με συγκεκριμένο προσανατολισμό (Εικ. 41α,γ). Τέλος, η συνοχή των κόκκων με το συνδετικό υλικό σε αρκετά σημεία μπορεί να χαρακτηριστεί ως μέτρια προς κακή, με αποτέλεσμα να παρατηρείται αυξημένο πορώδες (Εικ. 41δ).

Οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι με χώμα από την περιοχή του Δελίκηπου έχουν ανομοιογενή μικροδομή και το υλικό φαίνεται πιο χονδρόκοκκο, σε σχέση με αυτό από την περιοχή της Αλάμπρας (Εικ. 42α). Παρατηρούνται αρκετές ρωγμές στο δείγμα, σχετικά μεγάλου μήκους και σε διάφορους προσανατολισμούς (Εικ. 42α,β). Ακόμη, η συνοχή των χονδρόκοκκων με το συνδετικό υλικό δεν είναι ιδιαίτερα καλή, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται ασυνέχειες στη διεπιφάνειά τους (Εικ. 42γ). Επιπλέον, παρατηρούνται περιοχές με αυξημένες συγκεντρώσεις φυλλόμορφων ορυκτών, όπου εντοπίζεται αύξηση, τόσο στον αριθμό όσο και στο μέγεθος των πόρων και των ρωγμών (Εικ. 42δ).

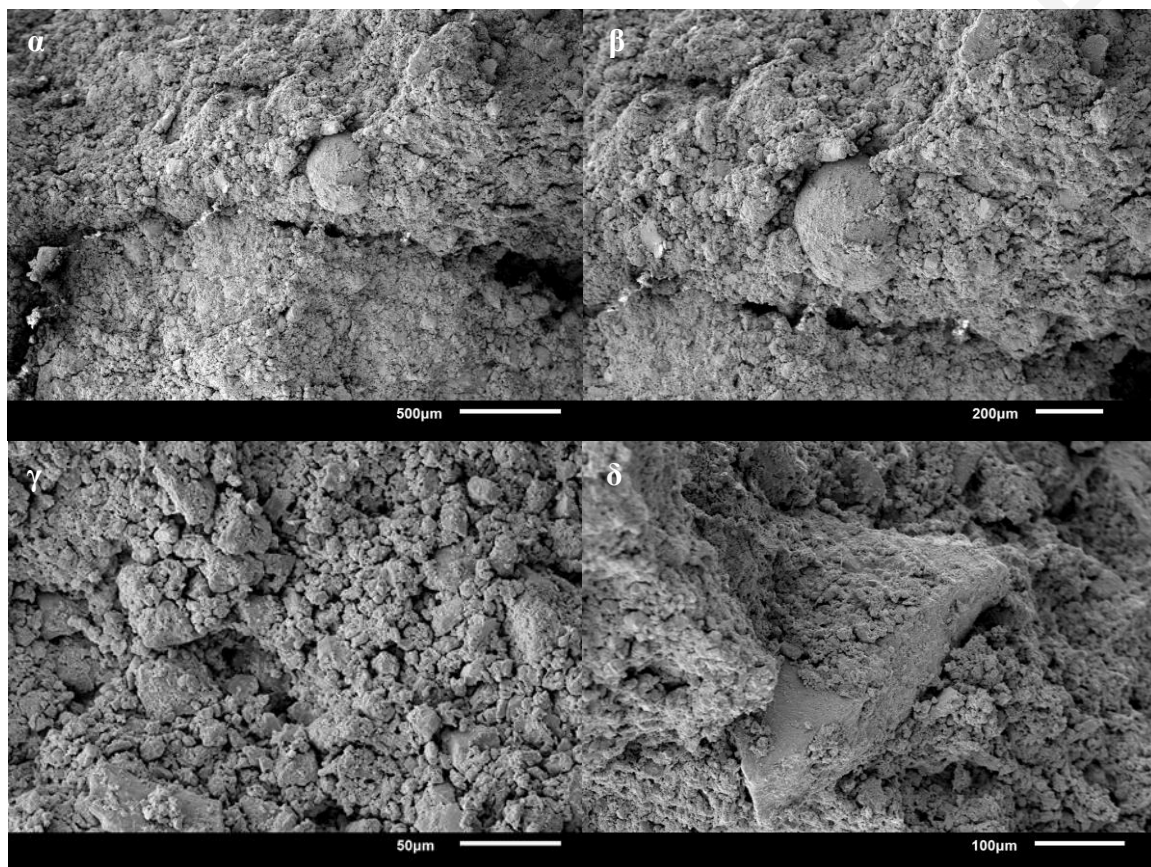


Εικόνα 41: Φωτογραφίες SEM για τους συμπιεσμένους ωμοπλίνθους με χώμα από την περιοχή της Αλάμπρας. α) Ανομοιογενής μικροδομή, β) Κερματισμένη μικροδομή με αρκετούς πόρους και παρουσία πλακοειδών κρυστάλλων ασβεσίτη, γ) Προσανατολισμένες ρωγμές και δ) Κακή συνοχή κόκκου άμμου με το συνδετικό υλικό.



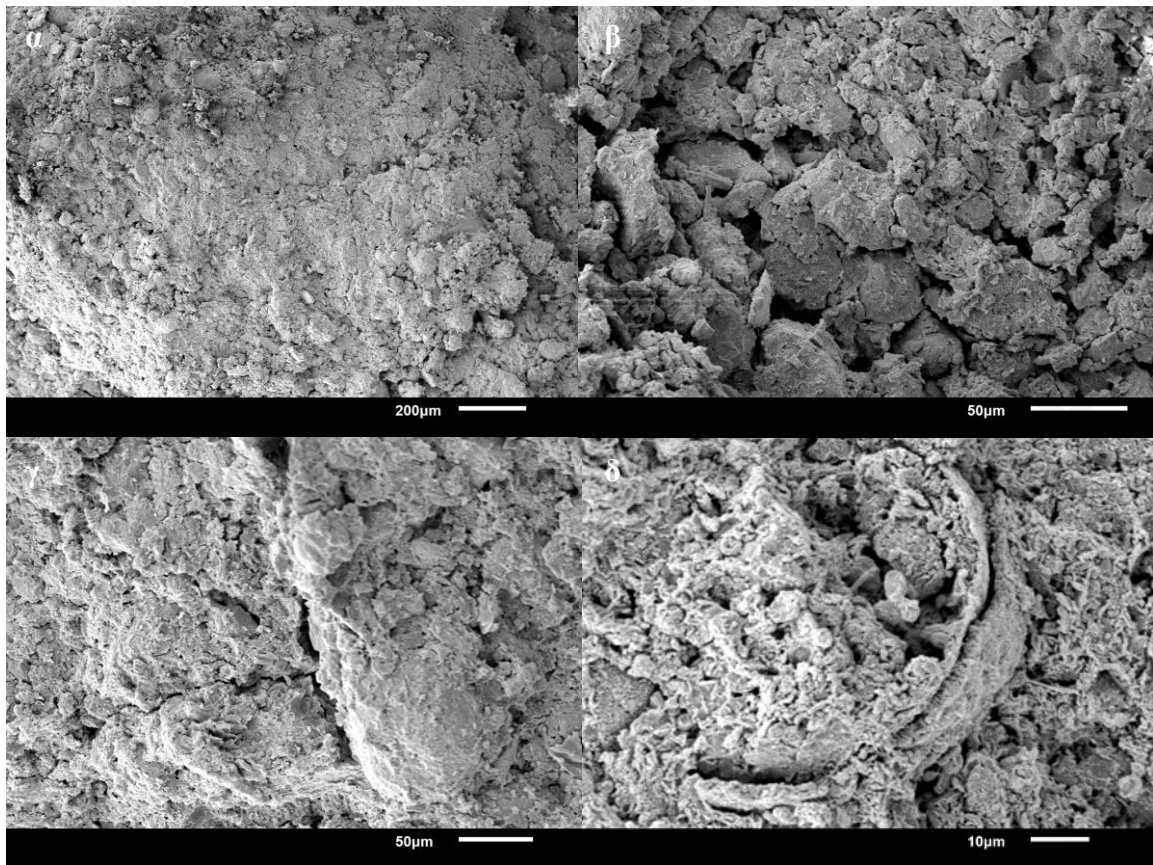
Εικόνα 42: Φωτογραφίες SEM για τους συμπιεσμένους ωμοπλίνθους με χώμα από την περιοχή του Δελίκη που. α) Ρωγμή στη διεπιφάνεια φυλλόμορφων – κοκκώδους υλικού, β) Ρωγμή, γ) Μέτρια συνοχή στη δεξιά πλευρά της διεπιφάνειας χονδρόκοκκου κλάσματος και συνδετικού υλικού και δ) Περιοχή με φυλλόμορφα ορυκτά, όπου παρατηρείται ένας μεγάλος πόρος.

Οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι με χόμα από την περιοχή Ποταμιάς (λατομείο Λατούρου) έχουν πανομοιότυπη μικροδομή σε όλη την έκταση του δείγματος. Αρχικά, στο δείγμα παρατηρούνται μεγάλου μήκους ρωγμές, οι οποίες προσανατολίζονται σε μια διεύθυνση (Εικ. 43α,β). Το δείγμα είναι λεπτόκοκκο και διακρίνονται αρκετά μεγάλες συγκεντρώσεις πλακοειδών κρυστάλλων, ανάμεσα στους οποίους παρατηρούνται πάρα πολλοί μικροί πόροι (Εικ. 43γ). Πέραν από τους μικρούς πόρους, σε κάποια σημεία παρατηρούνται και μεγαλύτεροι πόροι. Παρότι οι ακμές των συγκεκριμένων συμπιεσμένων ωμόπλινθων παρουσιάζουν ασθενή συνοχή (βλ. Εικ. 43α, β), η συνοχή των κόκκων με το συνδετικό υλικό είναι γενικά μέτρια προς καλή (Εικ. 43δ).



Εικόνα 43: Φωτογραφίες SEM από τους συμπιεσμένους ωμόπλινθους με χόμα από το λατομείο Λατούρου. (α,β) Ρωγμή σε διαφορετικές μεγεθύνσεις, γ) Πόροι και δ) Μέτρια προς καλή συνοχή κόκκου με το συνδετικό.

Οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι με χόμα από την περιοχή του Τσερίου έχουν ομοιογενή μικροδομή. Το υλικό, σε μικρή μεγέθυνση, φαίνεται να έχει μια αρκετά συνεκτική και πυκνή μικροδομή (Εικ. 44α), ενώ σε μεγαλύτερη μεγέθυνση παρατηρούνται αρκετοί πόροι (Εικ. 44β). Στην Εικόνα 44β παρατηρούνται επίσης αρκετά συσσωματώματα φυλλόμορφων ορυκτών. Η συγκέντρωση των φυλλόμορφων ορυκτών στο συγκεκριμένο δείγμα είναι σημαντική, ενώ σε κάποια σημεία παρατηρούνται και κόκκοι πυριτικής σύστασης. Οι πόροι συνήθως έχουν μικρή διάμετρο, αν και παρατηρούνται και περιοχές όπου η διάμετρός τους είναι αυξημένη. Επίσης, παρατηρούνται κάποιες ρωγμές κατά μήκος της διεπιφάνειας ορισμένων κόκκων με το συνδετικό υλικό (Εικ. 44γ). Ακόμη, σε κάποια σημεία του δείγματος εντοπίζονται απολιθώματα, τα οποία έχουν πληρωθεί με εδαφικό υλικό (Εικ. 44δ).



Εικόνα 44: Φωτογραφίες SEM από τους συμπιεσμένους ωμοπλίνθους με χώμα από την περιοχή του Τσερίου. α) Συνεκτική μικροδομή, β) Πόροι ανάμεσα σε συσσωματώματα φυλλόμορφων, γ) Ρωγμή στη διεπιφάνεια κόκκου και συνδετικού υλικού και δ) Απολίθωμα το οποίο πληρώθηκε με εδαφικό υλικό.

5.2.4 Σύνοψη

Η παρατήρηση των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων, μακροσκοπικά και μικροσκοπικά, παρέχει σημαντικές πληροφορίες, οι οποίες αναμένεται ότι θα βοηθήσουν στην κατανόηση της φυσικομηχανικής συμπεριφοράς τους. Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι η σύνθεση των ευρημάτων από τις 3 κλίμακες παρατήρησης, και η σύγκριση των 4 τύπων συμπιεσμένων ωμοπλίνθων που εξετάστηκαν.

Οι συμπιεσμένοι ωμοπλίνθοι με χώμα από την περιοχή Αλάμπρας παρουσιάζουν μια συμπαγή μορφή. Παρόλο που η δομή τους είναι πυκνή, εντοπίζονται κάποιες ρωγμές, με τις πλέον εμφανείς να είναι προσανατολισμένες κάθετα στον άξονα συμπίεσης. Η συνοχή των κόκκων με το συνδετικό υλικό είναι μέτρια, ενώ δεν παρατηρείται ιδιαίτερη παρουσία φυλλόμορφων ορυκτών στο υλικό.

Από την άλλη, οι συμπιεσμένοι ωμοπλίνθοι με χώμα από την περιοχή Δελίκηπου παρουσιάζουν μια κερματισμένη μικροδομή, στην οποία συναντώνται αρκετές ρωγμές και πόροι. Το υλικό είναι γενικά χονδρόκοκκο και η συνοχή των κόκκων με το συνδετικό υλικό είναι μέτρια. Οι πόροι είναι πολύ μεγαλύτεροι και εντοπίζονται σε μεγαλύτερη συχνότητα, συγκριτικά με τους ωμοπλίνθους της Αλάμπρας. Επίσης, στα δείγματα με χώμα από την περιοχή Δελίκηπου

παρατηρούνται σε μεγάλο ποσοστό φυλλόμορφα ορυκτά, τα οποία τείνουν να συγκεντρώνονται σε κάποιες περιοχές, με αποτέλεσμα να παρατηρείται ανομοιογένεια στη δομή του υλικού.

Στην περίπτωση των συμπίεσμένων ωμοπλίνθων με χώμα από το λατομείο Λατούρου, τα δοκίμια δεν παρουσιάζουν ικανοποιητική συνοχή στις ακμές τους, με αποτέλεσμα να παρατηρείται σημαντική απώλεια υλικού. Οι ρωγμές που εντοπίζονται κάθετα στη διεύθυνση της συμπίεσης είναι εκτεταμένες, γεγονός που ίσως οδηγήσει σε πρόωρη αστοχία του υλικού σε φόρτιση. Η λεπτόκοκκη υφή του συγκεκριμένου εδαφικού υλικού οδηγεί στην παρατήρηση μιας πυκνής σχετικά δομής στο στερεομικροσκόπιο. Ωστόσο, κατά την παρατήρηση σε μεγαλύτερη μεγέθυνση διακρίνονται πάρα πολλοί μικροί πόροι. Ακόμη, στις περιοχές όπου υπάρχουν κάποιοι κόκκοι άμμου, δεν υπάρχει ιδιαίτερα καλή συνοχή, με αποτέλεσμα το υλικό να παρουσιάζει μια χαλαρή δομή.

Τέλος, οι συμπίεσμένοι ωμόπλινθοι με χώμα από την περιοχή Τσερίου έχουν αρκετά πυκνή και συνεκτική δομή. Τα τούβλα που παράγονται είναι συμπαγή, με λεπτόκοκκη υφή. Ωστόσο, και σε αυτά τα δοκίμια παρατηρούνται ρωγμές κάθετες στη διεύθυνση της συμπίεσης. Σε αρκετά σημεία παρατηρούνται επίσης συσσωματώματα λεπτόκοκκου υλικού, τα οποία, όταν παρατηρηθούν σε μεγαλύτερη μεγέθυνση, διακρίνεται πως είναι φυλλόμορφα ορυκτά. Οι πόροι που παρατηρούνται στο υλικό είναι πολύ μικροί και διακρίνονται κατά κύριο λόγο μόνο στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.

Ανάμεσα στους 4 τύπους συμπίεσμένων ωμοπλίνθων που εξετάστηκαν, η πιο χαλαρή δομή παρατηρείται στους ΣΩ με χώμα από το λατομείο Λατούρου. Το εν λόγω υλικό παρουσιάζει μειωμένη συνοχή, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τις χαμηλές τιμές ορίων συνεκτικότητας της αντίστοιχης εδαφικής πρώτης ύλης (βλ. παρ. 5.1.2). Ακολούθως, σημαντικά προβλήματα παρατηρούνται στους ΣΩ με χώμα από την περιοχή Δελίκηπου, όπου υπάρχουν αρκετές ρωγμές, πόροι και γενικά μέτρια συνοχή των κόκκων. Τα προβλήματα αυτά συναντώνται κυρίως σε περιοχές με αυξημένη συγκέντρωση φυλλόμορφων ορυκτών, τα οποία υπόκεινται σε ογκομετρικές μεταβολές όταν αυξομειώνεται η υγρασία στο υλικό. Η αυξημένη συγκέντρωση φυλλόμορφων ορυκτών επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής ανάλυσης του εδαφικού υλικού από τον Δελίκηπο (Ενότητα 5.1.4). Ανάμεσα στους συμπίεσμένους ωμόπλινθους με χώμα από τις περιοχές Τσερίου και Αλάμπρας, δύσκολα μπορεί να γίνει διαχωρισμός. Οι μεν ΣΩ με χώμα από την περιοχή της Αλάμπρας έχουν πιο χονδρόκοκκη υφή από αυτούς που παρασκευάστηκαν με χώμα από την περιοχή του Τσερίου, αλλά γενικά και οι δύο ομάδες παρουσιάζουν αρκετά πυκνή δομή. Όπως σε όλους τους ΣΩ που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, έτσι και σε αυτά που παρασκευάστηκαν με χώμα από τις περιοχές Τσερίου και Αλάμπρας εντοπίζονται ρωγμές που διατάσσονται κάθετα στη διεύθυνση της συμπίεσης. Οι ρωγμές αυτές δημιουργούνται λόγω των περιορισμών που παρουσιάζει η πρέσα του τοπικού παραγωγού σε ότι αφορά στον έλεγχο της επιβαλλόμενης πίεσης, σε συνδυασμό με την εμπειρική προσθήκη συγκεκριμένης ποσότητας νερού, ανεξαρτήτως της βέλτιστης υγρασίας που προσδιορίζεται προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη ξηρή

πυκνότητα του κάθε εδαφικού υλικού. Η σημαντικότερη διαφορά που παρουσιάζουν οι ωμόπλινθοι που παρασκευάστηκαν με χώμα από τις περιοχές Τσερίου και Αλάμπρας είναι στο πορώδες. Τα μεν δείγματα με χώμα Αλάμπρας έχουν μεγαλύτερους πόρους και παρουσιάζουν κάποιες ρωγμές, ενώ οι ΣΩ με χώμα Τσερίου έχουν πολύ μικρότερους, αλλά πιο πυκνούς, πόρους, και λιγότερες ρωγμές.

5.3 Φυσικομηχανικές ιδιότητες

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων. Αρχικά, δίνονται τα αποτελέσματα από τις φυσικές ιδιότητες, όπου προσδιορίζονται η πυκνότητα και τα θερμικά χαρακτηριστικά. Ακολούθως, γίνεται παράθεση των αποτελεσμάτων των μηχανικών ιδιοτήτων, όπου προσδιορίζεται η θλιπτική και η καμπτική αντοχή. Τέλος, γίνεται μια προσπάθεια για σύνδεση των επιμέρους ιδιοτήτων και εξαγωγή συσχετισμών μεταξύ τους.

5.3.1 Φυσικές ιδιότητες

5.3.1.1 Πυκνότητα

Η πυκνότητα των δοκιμίων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο σε αρκετές ιδιότητες. Στη βιβλιογραφία παρατηρείται ότι η αύξηση της πυκνότητας μπορεί να επιφέρει αύξηση των μηχανικών αντοχών (Guettala et al., 2004; Muntohar, 2011). Από την άλλη, αύξηση της πυκνότητας επηρεάζει αρνητικά τα θερμικά χαρακτηριστικά των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων (Mansour et al., 2016; Saidi et al., 2018; Giroudon et al., 2019). Έτσι, αρκετοί ερευνητές, αλλά και οι πλείστοι κανονισμοί, έχουν ως στόχο τη βέλτιστη πυκνότητα, που θα επιφέρει ικανοποιητικές αντοχές και καλά θερμικά χαρακτηριστικά (CRATerre-EAG, 1998; Houben and Guillaud, 1994; Tatane et al., 2018).

Στους 4 υπό μελέτη τύπους συμπιεσμένων ωμόπλινθων, οι πυκνότητες που επιτυγχάνονται θεωρούνται ικανοποιητικές (Πίνακας 18), βάσει των κριτηρίων που θέτουν διάφοροι κανονισμοί (π.χ. CraTerre – EAG, 1998; DIN 18945-47, 2007). Οι υψηλότερες τιμές λαμβάνονται για τους ΣΩ με χώμα Αλάμπρας και ακολουθούν οι ΣΩ με χώμα Δελίκηπου και Τσερίου. Οι χαμηλότερες τιμές προκύπτουν για τους ΣΩ με χώμα από το λατομείο Λατούρου. Τα αποτελέσματα, που παρουσιάζονται στον Πίνακα 18, συμβαδίζουν με αντίστοιχες τιμές που παρατηρούνται στη βιβλιογραφία (Miccoli et al., 2015; Walker and Stace, 1997; Walker, 2004). Όμως, οι πυκνότητες που προκύπτουν από τα δοκίμια ΣΩ δεν συμβαδίζουν με αυτές που προσδιορίζονται από τη δοκιμή Proctor, στο αντίστοιχο έδαφος, γεγονός που παρατηρείται και σε άλλες μελέτες (Walker, 2004). Ωστόσο, υπογραμμίζεται πως, κατά την παραγωγή των συμπιεσμένων ωμόπλινθων, δεν έγινε προσθήκη της απαιτούμενης υγρασίας για να φτάσει το έδαφος στην προσδιοριζόμενη, από τη δοκιμή Proctor, βέλτιστη υγρασία, και κατ' επέκταση σε ίσως υψηλότερη πυκνότητα. Αντίθετα, η προσθήκη της υγρασίας έγινε με βάση την εμπειρική πρακτική που ακολουθεί ο τοπικός παραγωγός,

σύμφωνα με την οποία προστίθεται σε όλα τα εδάφη περίπου 10% κ.ο. νερό. Η μοναδική περίπτωση στην οποία παρατηρείται χαμηλότερη πυκνότητα στα δοκίμια από αυτή που προσδιορίστηκε από τη δοκιμή Proctor, είναι στα δείγματα που παρασκευάστηκαν με χώμα από το λατομείο Λατούρου. Αυτό οφείλεται στη χαλαρή δομή που παρουσιάζουν τα συγκεκριμένα δοκίμια μετά τη συμπίεσή τους (βλ. Ενότητα 5.2).

Πίνακας 18: Πυκνότητες συμπιεσμένων ωμοπλίνθων.

Τύπος συμπιεσμένου ωμόπλινθου	Πυκνότητα, kg/m ³	
	Proctor	Δοκίμια
Αλάμπρα	1760	1877
Δελίκηπος	1670	1832
Λατούρος	1830	1774
Τσέρι	1670	1794

5.3.1.2 Θερμικά χαρακτηριστικά

Τα θερμικά χαρακτηριστικά των δομικών υλικών λαμβάνονται όλο και περισσότερο υπόψη κατά το σχεδιασμό μιας κατασκευής. Η μελέτη, συνήθως, επικεντρώνεται στο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, λ , ωστόσο, στην παρούσα μελέτη γίνεται επίσης προσδιορισμός της θερμοχωρητικότητας των $\Sigma\Omega$ και της θερμικής διάχυσης, α . Η θερμοχωρητικότητα που προσδιορίζεται από τον αναλυτή θερμικής μεταφοράς της ISOMET που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές είναι ογκομετρική, C_{vol} , δηλαδή πρόκειται για την ενέργεια που χρειάζεται για να ανέβει η θερμοκρασία μιας μονάδας όγκου υλικού κατά ένα βαθμό κελσίου. Για τη μετατροπή της σε ειδική θερμοχωρητικότητα χρησιμοποιείται η εξίσωση 6:

$$C = \frac{C_{vol}}{d} \quad [Εξ. 6]$$

Όπου C η ειδική θερμοχωρητικότητα σε kJ/kgK, C_{vol} η ογκομετρική θερμοχωρητικότητα σε J/m³K και d η πυκνότητα του συμπιεσμένου ωμόπλινθου σε kg/m³.

Τα αποτελέσματα της μελέτης των θερμικών χαρακτηριστικών συνοψίζονται στον Πίνακα 19. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας των 4 υπό μελέτη τύπων συμπιεσμένων ωμοπλίνθων κυμαίνεται μεταξύ 0.63 – 0.85 W/mK, που είναι ιδιαίτερα υψηλός για τις απαιτήσεις των σύγχρονων κατασκευών. Τα αποτελέσματα αυτά, ωστόσο, συμβαδίζουν με εκείνα που παρατηρούνται στη βιβλιογραφία (Saidi et al., 2018; Moussa et al., 2019; Giroudon et al., 2019; Bradley and Gohneit, 2018; Fgaier et al., 2015; Giada et al., 2019; Miloudi et al., 2019; Tatane et al., 2018). Αναφορικά με την ειδική θερμοχωρητικότητα των υλικών, C , που αποτελεί και το σημαντικότερο πλεονέκτημα των γήινων υλικών, αυτή κυμαίνεται μεταξύ 773 – 811 J/kgK, τιμές οι οποίες βρίσκονται στο κατώτερο όριο των τιμών που παρατηρούνται στη βιβλιογραφία (Moussa et al., 2019; Bradley and

Gohneit, 2018; Giada et al., 2019; Miloudi et al., 2019). Η θερμική διάχυση δεν είναι μια ιδιότητα η οποία συναντάται συχνά στη βιβλιογραφία, ωστόσο είναι σημαντική, καθώς εκφράζει την ικανότητα του υλικού να διαχέει θερμικές επιδράσεις. Οπότεν, χαμηλές τιμές του συντελεστή θερμικής διάχυσης αποτελούν ένδειξη ότι υπάρχει καθυστέρηση στις θερμοκρασιακές μεταβολές. Οι τιμές οι οποίες λήφθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας συμβαδίζουν με αυτές που παρατηρούνται στη βιβλιογραφία (Sore et al., 2018; Nshimiyimana et al., 2020) και υποδεικνύουν ότι οι συγκεκριμένοι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι μπορούν να συγκρατήσουν τη μετάδοση θερμότητας για αρκετά μεγάλο διάστημα, συγκρινόμενοι με άλλα συνήθη δομικά υλικά (πχ. οπτόπλινθους). Οπότεν, δύναται να διατηρήσουν τις συνθήκες άνεσης στο χώρο, έστω και αν έχουν υψηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

Πίνακας 19: Θερμικά χαρακτηριστικά συμπιεσμένων ωμοπλίνθων.

Τύπος συμπιεσμένου ωμόπλινθου	λ , W/mK	$\Sigma\Delta$ (%)	C_{vol} , kJ/m ³ K	$\Sigma\Delta$ (%)	C , J/kgK	α , m ² /s	$\Sigma\Delta$ (%)
Αλάμπρα	0.85	0.90	1528	0.70	792	5.57 x 10 ⁻⁷	0.99
Δελίκηπος	0.71	3.99	1515	0.48	773	4.65 x 10 ⁻⁷	3.75
Λατούρος	0.63	3.20	1459	0.90	811	4.31 x 10 ⁻⁷	2.17
Τσέρι	0.70	3.20	1491	2.19	793	4.7 x 10 ⁻⁷	1.03

5.3.2 Μηχανικά χαρακτηριστικά

5.3.2.1 Θλιπτική αντοχή

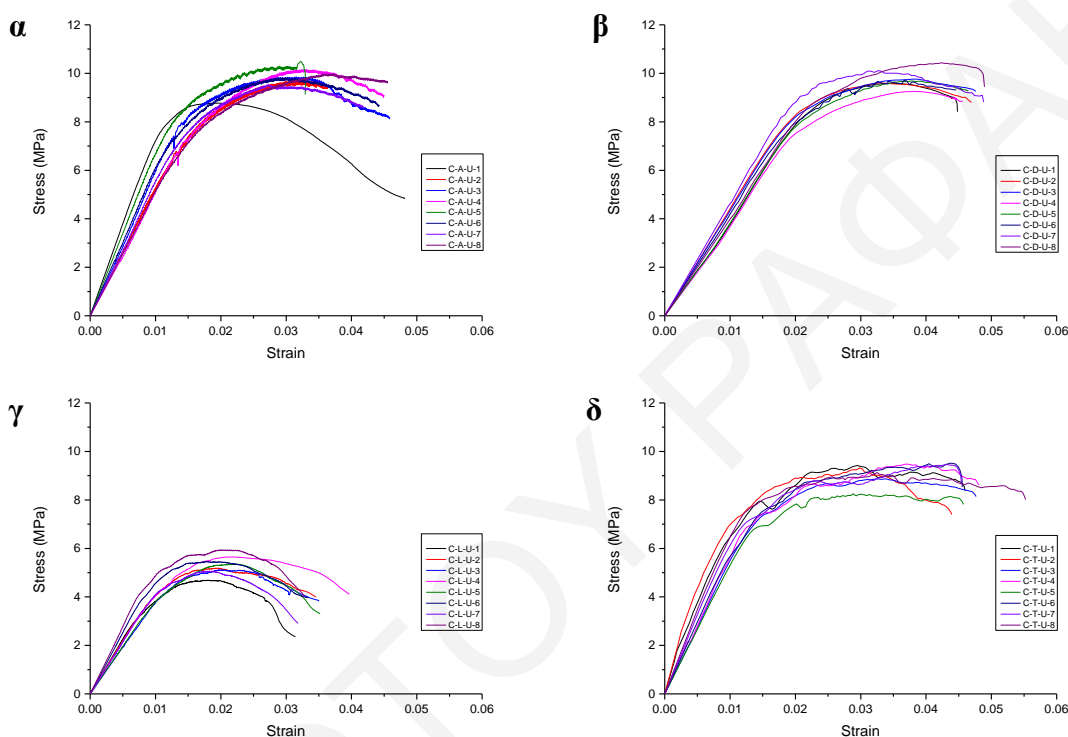
Η θλιπτική αντοχή, f_c , των δοκιμίων προσδιορίζεται από την εξίσωση 7:

$$f_c = \frac{P}{A} \quad [\text{Εξ. 7}]$$

όπου P το μέγιστο θλιπτικό φορτίο και A η επιφάνεια θλίψης του δοκιμίου. Σημειώνεται πως η τοποθέτηση τεσσάρων LVDTs στη διάταξη για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής (βλ. ενότητα 4.3.3.2), έδωσε τη δυνατότητα καταγραφής της ανηγμένης παραμόρφωσης των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων, και άρα του υπολογισμού του μέτρου ελαστικότητας από την κλίση του ελαστικού τμήματος των καμπυλών τάσεων-παραμορφώσεων.

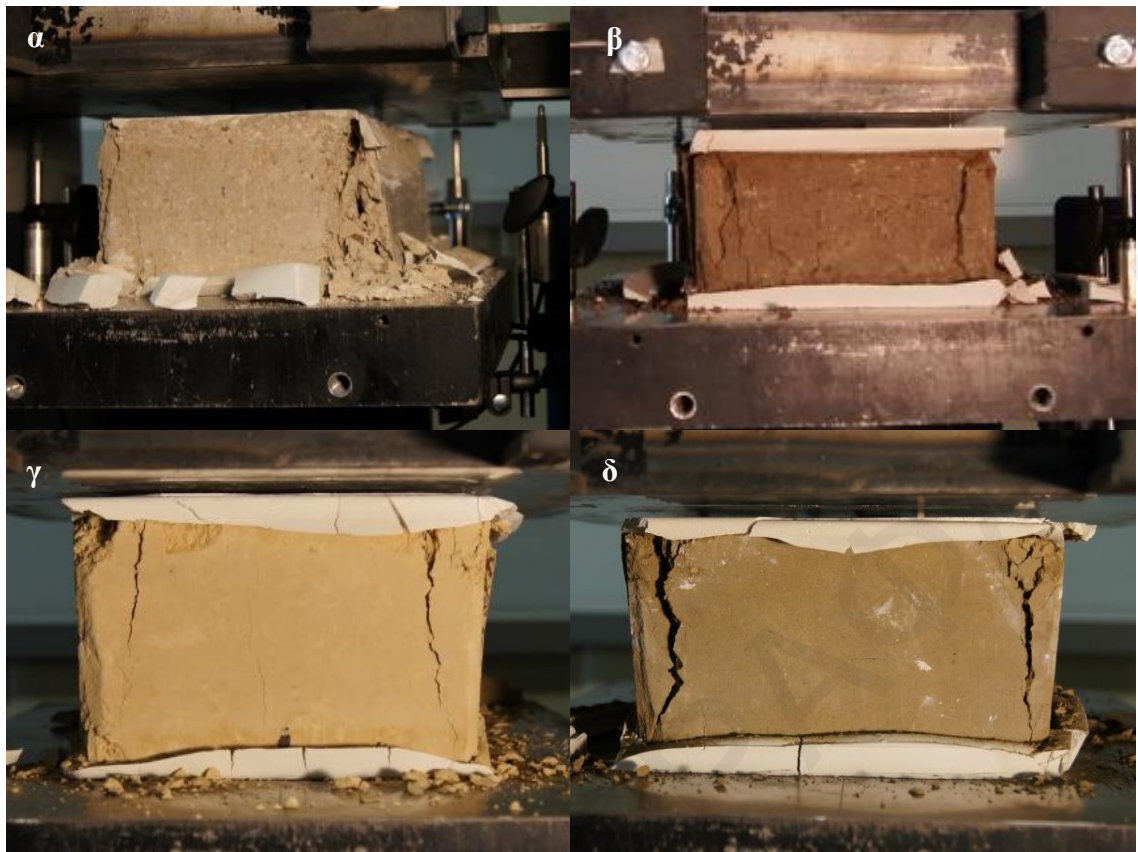
Στην Εικόνα 45 παρουσιάζονται τα διαγράμματα θλιπτικών τάσεων-παραμορφώσεων των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων, κατά τη δοκιμή σε ολόκληρα τούβλα, μετά από σχετική διόρθωση των γραφημάτων. Οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι με χρώμα Αλάμπρας, Δελίκηπου και Τσερίου (οι οποίοι αναφέρονται ως C-A-U, C-D-U και C-T-U, αντίστοιχα) φαίνεται να αναπτύσσουν τις υψηλότερες αντοχές, εν αντιθέσει με τους $\Sigma\Omega$ με χρώμα από το λατομείο Λατούρου (που αναφέρονται ως C-L-U) που φτάνουν σε πολύ χαμηλότερες τιμές. Η συμπεριφορά όλων των υλικών είναι πανομοιότυπη. Αρχικά παρατηρείται ελαστική συμπεριφορά, ενώ μετά την αστοχία τα δοκίμια φαίνεται να συνεχίζουν να μπορούν να παραλάβουν παραμορφώσεις, διατηρώντας περισσότερο από το 50% της

μέγιστης φέρουσας ικανότητάς τους. Οι ΣΩ Δελίκηπου και Τσερίου, μάλιστα, φαίνονται ικανά να παραλάβουν μεγαλύτερες παραμορφώσεις από τα υπόλοιπα δοκίμια που εξετάστηκαν, χωρίς να μειώνεται το φορτίο που εφαρμόζεται. Η δυνατότητα αυτή πιθανώς οφείλεται στην ορυκτολογική τους σύσταση, αφού περιέχουν υψηλά ποσοστά χλωρίτη και άλλων αργιλικών ορυκτών, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να παραμορφώνονται χωρίς θραύση. Επίσης, η περαιτέρω συμπίεση και το κλείσιμο του πορώδους κατά τη διάρκεια της δοκιμής, αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην ανάπτυξη τέτοιων παραμορφώσεων σε όλους τους τύπους συμπιεσμένων ωμοπλίνθων.

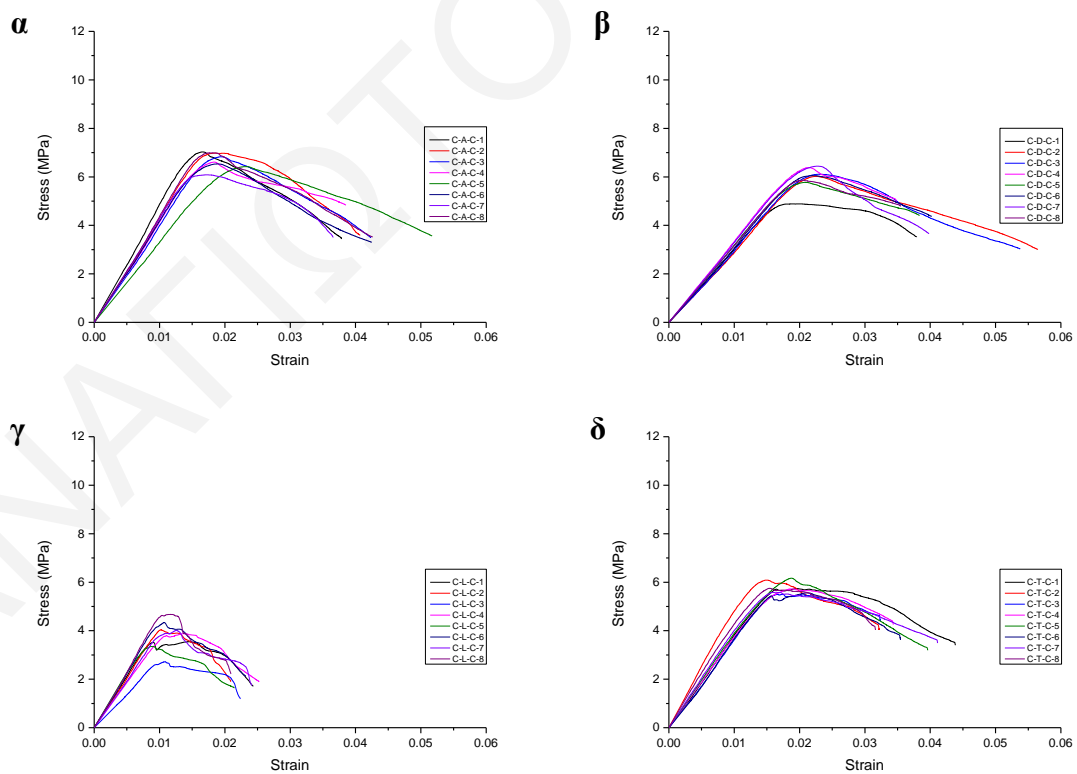


Εικόνα 45: Διαγράμματα θλιπτικών τάσεων-παραμορφώσεων σε ολόκληρα τούβλα συμπιεσμένων ωμοπλίνθων. α) ΣΩ με χρώμα Αλάμπρας, β) ΣΩ με χρώμα Δελίκηπου, γ) ΣΩ με χρώμα από το λατομείο Λατούρου και δ) ΣΩ με χρώμα Τσερίου.

Στην Εικόνα 46 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές φωτογραφίες της αστοχίας σε ολόκληρα τούβλα. Η μορφή αστοχίας που παρατηρείται και στους 4 τύπους συμπιεσμένων ωμοπλίνθων που εξετάστηκαν περιγράφεται με κάθετες ρωγμές στα άκρα των δοκιμίων, οι οποίες οδηγούν στην χαρακτηριστική αστοχία υπό τη μορφή κλεψύδρας. Αυτή η μορφή αστοχίας οφείλεται στις δυνάμεις περίσφιξης που αναπτύσσονται ανάμεσα στην πλάκα φόρτισης και το δοκίμιο, όπου ο πυρήνας του δοκιμίου παραμένει σχεδόν άθικτος και αστοχούν οι πλευρικές επιφάνειες.



Εικόνα 46: Χαρακτηριστικές φωτογραφίες μορφών αστοχίας σε ολόκληρα τούβλα συμπιεσμένων ωμοπλίνθων. α) ΣΩ με χρώμα Αλάμπρας, β) ΣΩ με χρώμα Δελίκητου, γ) ΣΩ με χρώμα από το λατομείο Λατούρου και δ) ΣΩ με χρώμα Τσερίου.



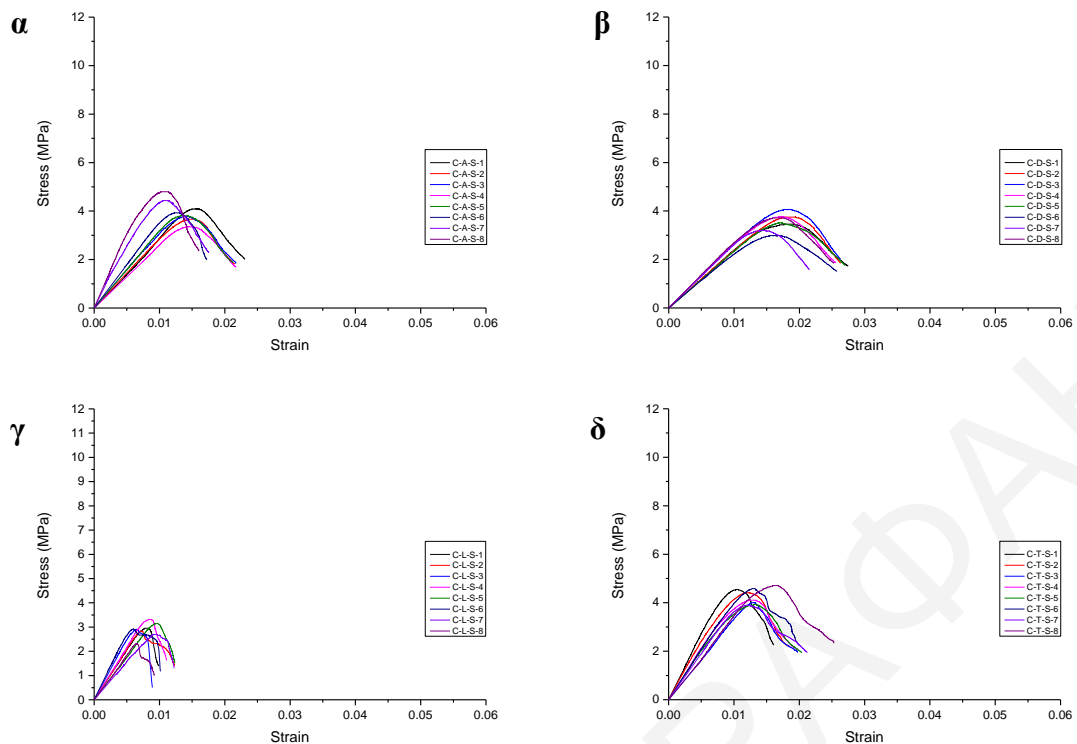
Εικόνα 47: Διαγράμματα θλιπτικών τάσεων-παραμορφώσεων σε κυβικά δοκίμια ακμής 100 mm συμπιεσμένων ωμοπλίνθων. α) ΣΩ με χρώμα Αλάμπρας, β) ΣΩ με χρώμα Δελίκητου, γ) ΣΩ με χρώμα από το λατομείο Λατούρου και δ) ΣΩ με χρώμα Τσερίου.

Στην Εικόνα 47 παρουσιάζονται τα διαγράμματα θλιπτικών τάσεων-παραμορφώσεων των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων κατά τη δοκιμή σε κυβικά δοκίμια, ακμής 100 mm, μετά από σχετική διόρθωση των γραφημάτων. Οι αντοχές που αναπτύσσουν οι ΣΩ με χώμα Αλάμπρας, Δελίκηπου και Τσερίου εξακολουθούν να είναι οι υψηλότερες, ωστόσο είναι πολύ χαμηλότερες σε σχέση με τα ολόκληρα τούβλα. Και σε αυτή την περίπτωση η συμπεριφορά όλων των υλικών είναι πανομοιότυπη, αφού αρχικά παρατηρείται ελαστική συμπεριφορά μέχρι το μέγιστο φορτίο. Μετά την αστοχία, τα δοκίμια συνεχίζουν να παραλαμβάνουν παραμορφώσεις, χωρίς το φορτίο τους να μειώνεται κάτω από το 50% του μέγιστου. Οι ΣΩ με χώμα από το λατομείο Λατούρου παρουσιάζουν τις χαμηλότερες αντοχές και παραλαμβάνουν τις μικρότερες παραμορφώσεις, συγκριτικά με τους άλλους 3 τύπους ΣΩ. Τις μεγαλύτερες παραμορφώσεις φαίνεται να τις παραλαμβάνουν οι ΣΩ με χώμα Δελίκηπου.

Στην Εικόνα 48 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές φωτογραφίες της αστοχίας των κυβικών δοκιμίων ακμής 100 mm. Όπως και στα ολόκληρα τούβλα, έτσι και στα κυβικά δοκίμια, η αστοχία που παρατηρείται χαρακτηρίζεται από κάθετες ρωγμές στα άκρα των δοκιμίων, οι οποίες οδηγούν στην χαρακτηριστική αστοχία υπό τη μορφή κλεψύδρας. Και πάλι ο πυρήνας του δοκιμίου φαίνεται να παραμένει άθικτος, τη στιγμή που το δοκίμιο αστοχεί πλευρικά.



Εικόνα 48: Χαρακτηριστικές φωτογραφίες μορφών αστοχίας σε κυβικά δοκίμια ακμής 100 mm συμπιεσμένων ωμοπλίνθων. α) ΣΩ με χώμα Αλάμπρας, β) ΣΩ με χώμα Δελίκηπου, γ) ΣΩ με χώμα από το λατομείο Λατούρου και δ) ΣΩ με χώμα Τσερίου.



Εικόνα 49: Διαγράμματα θλιπτικών τάσεων-παραμορφώσεων σε πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 50 mm x 50 mm x 100 mm συμπίεσμένων ωμοπλίνθων. α) ΣΩ με χρώμα Αλάμπρας, β) ΣΩ με χρώμα Δελίκηπου, γ) ΣΩ με χρώμα από το λατομείο Λατούρου και δ) ΣΩ με χρώμα Τσερίου.

Η ίδια τάση παρατηρείται και στα διαγράμματα θλιπτικών τάσεων-παραμορφώσεων των πρισματικών δοκιμίων (Εικ. 49). Όλοι οι τύποι συμπίεσμένων ωμοπλίνθων συμπεριφέρονται ελαστικά μέχρι το μέγιστο φορτίο. Τις υψηλότερες αντοχές παρουσιάζουν, και πάλι, οι ΣΩ με χρώμα Αλάμπρας, Δελίκηπου και Τσερίου, ωστόσο αυτές είναι αρκετά χαμηλότερες από τις αντίστοιχες που παρατηρούνται στα κυβικά δοκίμια και στα ολόκληρα τούβλα. Επίσης, σε όλα τα δοκίμια παρατηρούνται μικρότερες παραμορφώσεις, σε σχέση με τα δοκίμια μικρότερου λόγου ύψους/πλάτους. Μεταξύ των 4 τύπων ΣΩ που εξετάστηκαν, τις χαμηλότερες παραμορφώσεις παραλαμβάνουν οι ΣΩ με χρώμα από το λατομείο Λατούρου.



Εικόνα 50: Χαρακτηριστικές φωτογραφίες μορφών αστοχίας σε πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 50 mm x 50 mm x 100 mm συμπίεσμένων ωμοπλίνθων. α) ΣΩ με χρώμα Αλάμπρας, β) ΣΩ με χρώμα Δελίκηπου, γ) ΣΩ με χρώμα από το λατομείο Λατούρου και δ) ΣΩ με χρώμα Τσερίου.

Στην Εικόνα 50 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές φωτογραφίες, όπου παρατηρείται η αστοχία των πρισματικών δοκιμίων συμπιεσμένων ωμοπλίνθων. Οι δυνάμεις περίσφιγξης που αναπτύσσονται ανάμεσα σε αυτά τα δοκίμια και την πλάκα φόρτισης είναι μειωμένες, σε σχέση με τα ολόκληρα τούβλα και τα κυβικά δοκίμια, λόγω της αύξησης του λόγου ύψους/πλάτους. Έτσι, η αστοχία που παρατηρείται σε αυτή την περίπτωση χαρακτηρίζεται από διαγώνιες ρωγμές σχεδόν σε όλο το πλάτος των δοκιμίων.

Οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας συνοψίζονται στον Πίνακα 20. Οι ΣΩ με χρώμα Τσερίου και Αλάμπρας παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές, γεγονός που δικαιολογείται από την πυκνή δομή και την ορυκτολογία τους (βλ. ενότητες 5.2 και 5.1.4, αντίστοιχα). Από την άλλη, οι ΣΩ με χρώμα Δελίκηπου, αν και παρουσιάζουν αρκετά υψηλή θλιπτική αντοχή, εντούτοις το μέτρο ελαστικότητας τους είναι το χαμηλότερο, πιθανώς λόγω της χαλαρής δομής του υλικού και της μεγάλης συμμετοχής ορυκτών όπως ο γλωφίτης, ο τάλκης και ο ιλλίτης (βλ. ενότητα 5.1.4). Εν αντιθέσει με τους ΣΩ με χρώμα Δελίκηπου, οι ΣΩ με χρώμα από το λατομείο Λατούρου παρουσιάζουν υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας, παρά την χαμηλή θλιπτική αντοχή.

Πίνακας 20: Μέτρο ελαστικότητας συμπιεσμένων ωμοπλίνθων.

Τύπος συμπιεσμένου ωμοπλίνθου	Αριθμός δοκιμίων	Διαστάσεις (Μ x Π x Υ), mm	Μέτρο Ελαστικότητας, MPa (ΣΔ)
Αλάμπρας	8	300 x 150 x 100	587 (15%)
	8	100 x 100 x 100	406 (9%)
	8	50 x 50 x 100	373 (35%)
Δελίκηπος	8	300 x 150 x 100	408 (9%)
	8	100 x 100 x 100	307 (5%)
	8	50 x 50 x 100	251 (7%)
Λατούρος	8	300 x 150 x 100	449 (12%)
	8	100 x 100 x 100	397 (14%)
	8	50 x 50 x 100	418 (18%)
Τσέρι	8	300 x 150 x 100	694 (23%)
	8	100 x 100 x 100	397 (14%)
	8	50 x 50 x 100	417 (17%)

Τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα Β και συνοψίζονται στον Πίνακα 21. Η θλιπτική αντοχή σε ολόκληρα τούβλα (300 mm x 150 mm x 100 mm) λαμβάνει την υψηλότερη τιμή στους ΣΩ με χρώμα Αλάμπρας (9.79 MPa) και Δελίκηπου (9.77 MPa). Λίγο πιο χαμηλή είναι η θλιπτική αντοχή στους ΣΩ με χρώμα Τσερίου (9.18 MPa), ενώ οι ΣΩ με χρώμα Λατούρου παρουσιάζουν πολύ χαμηλότερη θλιπτική αντοχή (5.31 MPa). Η ίδια τάση παρατηρείται και στα κυβικά δοκίμια (ακμής 100 mm). Στα πρίσματα (50 mm x 50 mm x 100 mm), η υψηλότερη αντοχή παρατηρείται στους ΣΩ με χρώμα Τσερίου (4.27 MPa), ενώ την πιο χαμηλή αντοχή παρουσιάζουν και πάλι οι ΣΩ με χρώμα Λατούρου (2.88 MPa). Σημειώνεται ότι οι

ΣΩ με χόμα Δελίκηπου και Τσερίου αναπτύσσουν υψηλές αντοχές, αν και έχουν υψηλή περιεχόμενη υγρασία, εν αντιθέσει με τους ΣΩ με χόμα από το λατομείο Λατούρου, τα οποία παρουσιάζουν τις χαμηλότερες αντοχές, παρόλο που έχουν και τη μικρότερη υγρασία.

Πίνακας 21: Θλιπτική αντοχή συμπιεσμένων ωμόπλινθων.

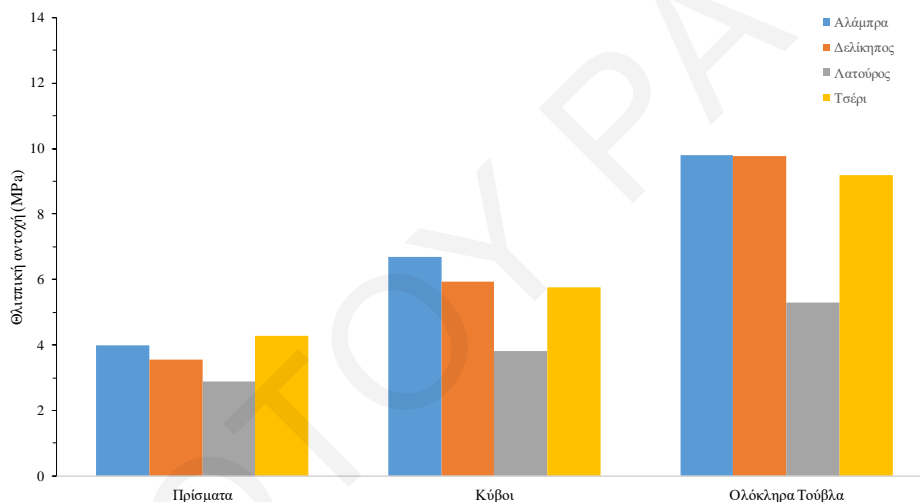
Τύπος συμπιεσμένου ωμόπλινθου	Αριθμός δοκιμίων	Διαστάσεις (Μ x Π x Υ), mm	Πυκνότητα, kg/m ³ (ΣΔ) *	Θλιπτική Αντοχή, MPa (ΣΔ)	Υγρασία, % (ΣΔ)
Αλάμπρα	8	300 x 150 x 100	1889 (1%)	9.79 (5%)	2.97 (3%)
	8	100 x 100 x 100	1887 (1%)	6.69 (5%)	2.76 (1%)
	8	50 x 50 x 100	1856 (2%)	3.99 (11%)	2.76 (2%)
Δελίκηπος	8	300 x 150 x 100	1765 (1%)	9.77 (3%)	7.25 (1%)
	8	100 x 100 x 100	1863 (2%)	5.94 (8%)	6.87 (2%)
	8	50 x 50 x 100	1828 (1%)	3.56 (9%)	6.71 (1%)
Λατούρος	8	300 x 150 x 100	1770 (1%)	5.31 (7%)	1.46 (1%)
	8	100 x 100 x 100	1775 (1%)	3.82 (15%)	1.42 (2%)
	8	50 x 50 x 100	1776 (1%)	2.88 (10%)	1.34 (1%)
Τσέρι	8	300 x 150 x 100	1811 (1%)	9.18 (4%)	4.88 (2%)
	8	100 x 100 x 100	1777 (1%)	5.76 (4%)	4.95 (2%)
	8	50 x 50 x 100	1759 (1%)	4.27 (7%)	4.68 (1%)

* Μέσος όρος πυκνότητας δοκιμίων που εξετάστηκαν.

Οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι με χόμα Αλάμπρας και Τσερίου παρουσιάζουν αρκετά πυκνή δομή (βλ. ενότητα 5.2, Εικόνες 41 και 44), γεγονός που οδηγεί σε ανάπτυξη υψηλής θλιπτικής αντοχής. Οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι με χόμα Δελίκηπου παρουσιάζουν εφάμιλλη, με τους δύο προαναφερθέντες τύπους, θλιπτική αντοχή, χωρίς όμως η δομή τους να είναι πανομοιότυπη. Η ανάπτυξη των αντοχών αυτών των ΣΩ μπορεί να οφείλεται στην ορυκτολογική τους σύσταση, όπου κατά βάσιν απαρτίζονται από πυριτικά ορυκτά, τα οποία έχουν αυξημένη σκληρότητα. Η χαμηλή, σχετικά, θλιπτική αντοχή των συμπιεσμένων ωμόπλινθων με χόμα από το λατομείο Λατούρου ήταν αναμενόμενη, καθώς οι συγκεκριμένοι ΣΩ παρουσιάζουν χαλαρή δομή, με αρκετές ρωγμές και κακή συνοχή μεταξύ των κόκκων του υλικού (βλ. Ενότητα 5.2, Εικόνα 43).

Οι τιμές θλιπτικής αντοχής που καταγράφονται είναι γενικά αρκετά υψηλές, ακόμη και για τους ΣΩ με χόμα από το λατομείο Λατούρου, συγκρινόμενες με τις απαιτήσεις των κανονιστικών εγγράφων (Κεφάλαιο 3, Πίνακας 8). Επίσης, οι τιμές που προέκυψαν από τον εργαστηριακό έλεγχο συμβαδίζουν πλήρως με αυτές που παρατηρούνται στη βιβλιογραφία (Ruiz et al., 2018; Bogas et al., 2019; Sitton et al., 2018; Danso and Adu, 2019; Sturm et al., 2014; Ammari et al., 2017; Walker, 1999; Egenti et al., 2014; Jayasinghe and Mallawaarachchi, 2009; Ma et al., 2019). Οι πλείστοι από τους πιο πάνω ερευνητές, όμως, εργάζονται σε σταθεροποιημένους συμπιεσμένους ωμόπλινθους, γεγονός που δείχνει ότι και οι μη-σταθεροποιημένοι ΣΩ μπορούν να αναπτύξουν ικανοποιητικές αντοχές.

Η σύγκριση μεταξύ των διαφόρων μεγεθών (Εικ. 51) επιβεβαιώνει ότι με μείωση του λόγου ύψους/πλάτους, παρατηρείται αύξηση της θλιπτικής αντοχής σε ίδιο τύπο συμπιεσμένου ωμόπλινθου. Αυτό οφείλεται κυρίως στις τάσεις περίσφιξης που αναπτύσσονται ανάμεσα στο δοκίμιο και την πλάκα φόρτισης (Ruiz et al., 2018). Αυτές οι τάσεις επεκτείνονται σε όλο το ύψος του δοκιμίου, προκαλώντας πλευρικές επιφανειακές αστοχίες, διατηρώντας παράλληλα τον πυρήνα του δοκιμίου αρχικά σχεδόν ανέπαφο. Στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 51 παρατηρείται μάλιστα παρόμοια τάση και στους 4 τύπους ΣΩ, όσον αφορά τον τρόπο μεταβολής της θλιπτικής αντοχής με το μέγεθος του δοκιμίου. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3, είναι σημαντικό να παραχθούν συντελεστές διόρθωσης για τα διαφορετικά μεγέθη δοκιμίων, αφού αυτοί που υιοθετήθηκαν στη βιβλιογραφία (Morel et al., 2007) κρίνονται ανεπαρκείς, ούτως ώστε να καταστεί δυνατός ο υπολογισμός της ανεμπόδιστης θλιπτικής αντοχής και η σύγκριση των αποτελεσμάτων διαφόρων μελετών.



Εικόνα 51: Επίδραση του μεγέθους του δοκιμίου στη θλιπτική αντοχή.

5.3.2.2 Καμπτική αντοχή

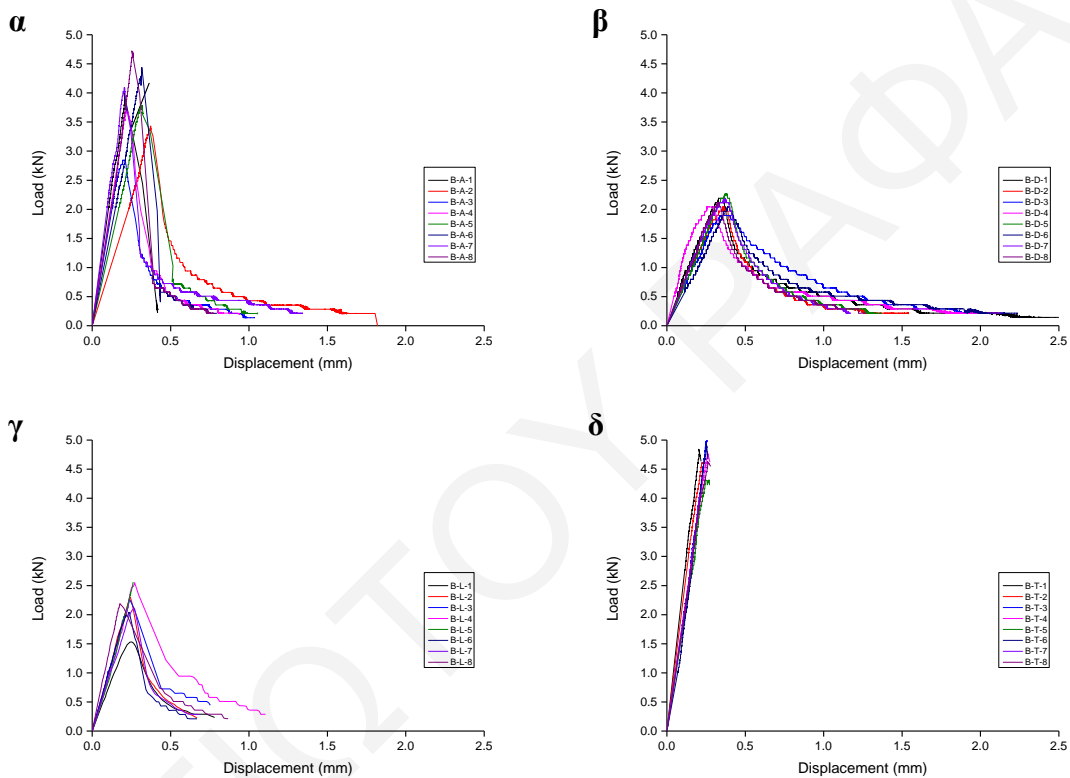
Η καμπτική αντοχή των υπό εξέταση συμπιεσμένων ωμόπλινθων προσδιορίστηκε με τη δοκιμή κάμψης 3 σημείων, σε ολόκληρα δοκίμια. Ο υπολογισμός της καμπτικής αντοχής, f_{flex} , έγινε με την χρήση της εξίσωσης 8:

$$f_{flex} = \frac{3P_{max}S}{2WH^2} \quad [Εξ. 8]$$

όπου, P_{max} το μέγιστο φορτίο κατά την αστοχία, S η απόσταση μεταξύ των στηριγμάτων, W το πλάτος του δοκιμίου και H το ύψος του.

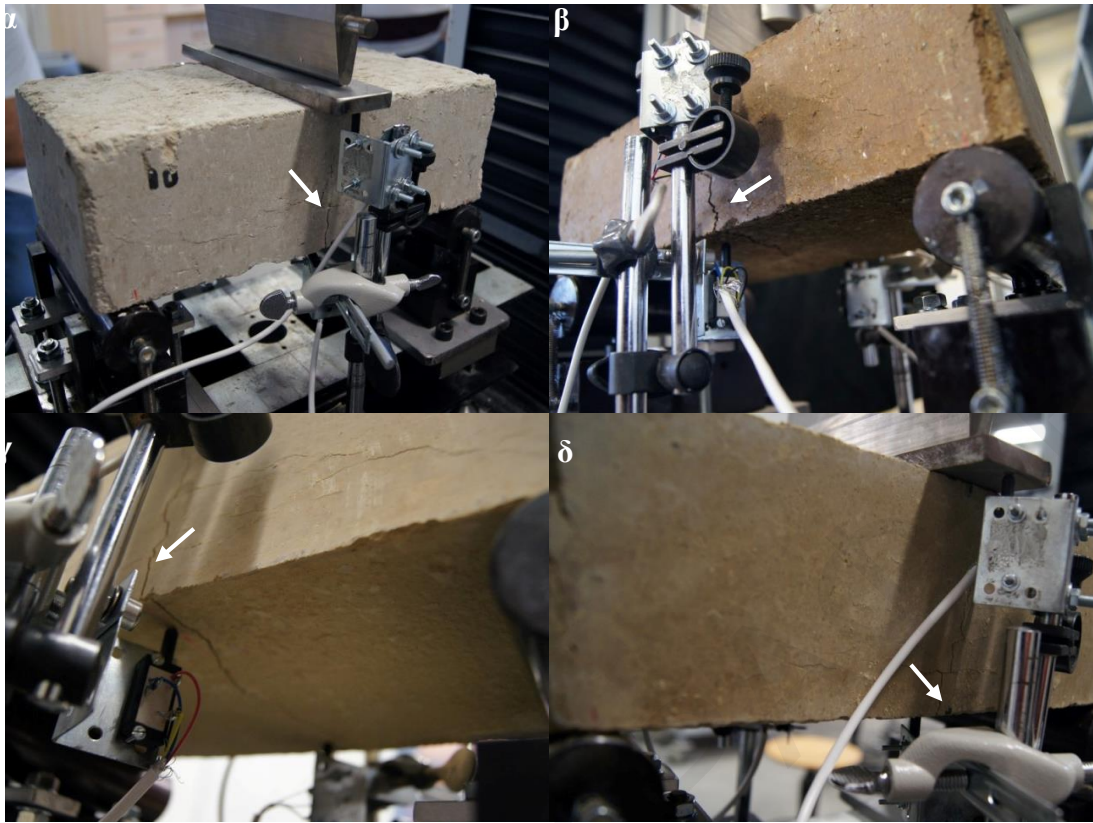
Η συμπεριφορά των υλικών κατά τη δοκιμή διέφερε ανάλογα με τον τύπο συμπιεσμένου ωμόπλινθου που εξετάστηκε. Στην Εικόνα 52 παρουσιάζεται η μετατόπιση στο μέσο της κάτω επιφάνειας των δοκιμίων συναρτήσει του φορτίου που εφαρμόστηκε, μετά από διόρθωση των γραφημάτων. Όλα τα δοκίμια παρουσίασαν γραμμική συμπεριφορά μέχρι το μέγιστο φορτίο. Το

υψηλότερο φορτίο δέχθηκαν οι συμπίεσμένοι ωμόπλινθοι με χρώμα Τσερίου, έπειτα αυτοί με χρώμα Αλάμπρας, ενώ περίπου το ίδιο μέγιστο φορτίο παρουσίασαν οι ΣΩ με χρώμα Δελίκηπου και Λατούρου. Οι συμπίεσμένοι ωμόπλινθοι με χρώμα Τσερίου παρουσίασαν έντονα ψαθυρή αστοχία, γεγονός που κατάστησε αδύνατη την όποια καταγραφή μετατοπίσεων μετά την αστοχία, σε αντίθεση με εκείνους με χρώμα Δελίκηπου που λόγω της λιγότερο έντονης ψαθυρής αστοχίας, η καταγραφή μετατοπίσεων και μετά την αστοχία ήταν εφικτή. Στα δοκίμια με χρώμα Αλάμπρας και Λατούρου, παρατηρήθηκε επίσης απότομη πτώση του φορτίου μετά τη θραύση. Ωστόσο, η καταγραφή μετατοπίσεων και μετά την αστοχία ήταν εφικτή.



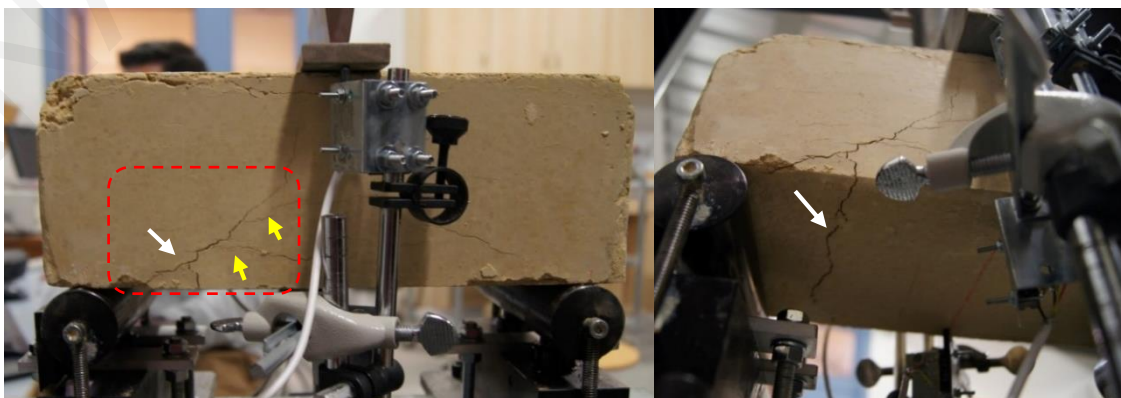
Εικόνα 52: Διάγραμμα φορτίου-μετατοπίσεων στο μέσο της κάτω επιφάνειας συμπίεσμένων ωμόπλινθων υπό δοκιμή κάμψης 3 σημείων. α) ΣΩ με χρώμα Αλάμπρας, β) ΣΩ με χρώμα Δελίκηπου, γ) ΣΩ με χρώμα από το λατομείο Λατούρου και δ) ΣΩ με χρώμα Τσερίου.

Στην Εικόνα 53 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές φωτογραφίες μορφών αστοχίας των δοκιμίων συμπίεσμένων ωμόπλινθων στη δοκιμή κάμψης 3 σημείων. Η αστοχία που παρατηρείται ήταν η αναμενόμενη, με ρωγμές ακριβώς ή κοντά στο κέντρο της κάτω επιφάνειας, που οφείλονται στη μέγιστη καμπτική ροπή που συγκεντρώνεται στο μέσο του δοκιμίου. Οι ρωγμές στην κάτω επιφάνεια είναι σχεδόν κάθετες στις πλευρές του δοκιμίου και διατρέχουν ολόκληρο το πλάτος του.



Εικόνα 53: Χαρακτηριστικές φωτογραφίες μορφών αστοχίας συμπιεσμένων ωμοπλίνθων στη δοκιμή κάμψης 3 σημείων. α) ΣΩ με χώμα Αλάμπρας, β) ΣΩ με χώμα Δελίκηπου, γ) ΣΩ με χώμα από το λατομείο Λατούρου και δ) ΣΩ με χώμα Τσερίου.

Ωστόσο, στην περίπτωση των ΣΩ με χώμα από το λατομείο Λατούρου παρουσιάστηκε, σε κάποια δοκίμια, μια μη αναμενόμενη μορφή αστοχίας κοντά στα στηρίγματα (Εικ. 54), γεγονός που δημιούργησε κάποια ερωτηματικά, αφού η καμπτική ροπή στη δοκιμή εμφανίζεται στο κέντρο. Στα συγκεκριμένα δοκίμια, παρατηρείται ότι οι ρωγμές κάθετα στη φορά της συμπίεσης, που εντοπίστηκαν κατά τη μακροσκοπική εξέταση (βλ. Ενότητα 5.2.1), είναι εκτεταμένες και επηρεάζουν το αποτέλεσμα της δοκιμής και κατ' επέκταση την αστοχία των δοκιμίων (Εικ. 54α). Μάλιστα, μετά την εκδήλωση της αστοχίας, οι ρωγμές που δημιουργούνται λόγω της φόρτισης τείνουν να συνενώνονται με τις κάθετες ως προς τη διεύθυνση της συμπίεσης ρωγμές, με αποτέλεσμα τη διατμητική αστοχία του δοκιμίου.



Εικόνα 54: Φωτογραφίες από αστοχία δοκιμίων ΣΩ με χώμα από το λατομείο Λατούρου κοντά στο στηρίγμα στη δοκιμή κάμψης 3 σημείων α) Συνένωση ρωγμής αστοχίας με τις ρωγμές λόγω συμπίεσης, όπου με κίτρινα βέλη σημειώνονται οι κάθετες στη διεύθυνση της συμπίεσης ρωγμές και με λευκό η ρωγμή που δημιουργήθηκε κατά την αστοχία του δοκιμίου και β) ρωγμή στην κάτω επιφάνεια.

Τα αποτελέσματα της καμπτικής αντοχής παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα Γ και συνοψίζονται στον Πίνακα 22. Το μέτρο καμπτικής δυσκαμψίας, k_{flex} , υπολογίστηκε από την κλίση του γραμμικού τμήματος του διαγράμματος φορτίου-μετατοπίσεων. Η υψηλότερη καμπτική αντοχή παρατηρήθηκε στους συμπιεσμένους ωμόπλινθους με χρώμα Τσερίου, με τις αμέσως χαμηλότερες στους ΣΩ με χρώμα Αλάμπρας και Δελίκηπου. Οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι αυτοί παρουσίασαν και τις υψηλότερες τιμές θλιπτικής αντοχής (Πίνακας 21). Οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι με χρώμα Λατούρου παρουσίασαν αρκετά χαμηλότερη καμπτική αντοχή.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές καμπτικής αντοχής συμβαδίζουν πλήρως με τις παρατηρήσεις από τη μελέτη της δομής των ΣΩ (βλ. Ενότητα 5.2). Οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι με χρώμα Αλάμπρας και Τσερίου παρουσίασαν την πιο πυκνή δομή, με τους ΣΩ με χρώμα Τσερίου να αποτελούνται από αρκετά πυριτικά ορυκτά, που πιθανώς οδηγούν το τελικό προϊόν σε ψαθυρή θραύση. Από την άλλη, οι ΣΩ με χρώμα Δελίκηπου περιέχουν σε υψηλά ποσοστά χλωρίτη, ορυκτό που κατακρατά υγρασία και προσδίδει ολκιμότητα στο τελικό προϊόν, με αποτέλεσμα να μπορεί να δεχτεί μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Οι προσδιορισθείσες τιμές συμβαδίζουν με τις τιμές που παρατηρούνται στη βιβλιογραφία (Ruiz et al., 2018; Bogas et al., 2019; Sitton et al., 2018; Silva et al., 2015; Yogananth et al., 2019; Reddy et al., 2007) και κυμαίνονται εντός των αποδεκτών ορίων που θέτει η CRATerre – EAG (1998).

Οι προαναφερθείσες παρατηρήσεις ισχύουν και στα αποτελέσματα του μέτρου καμπτικής δυσκαμψίας, k_{flex} . Οι υψηλότερες τιμές παρατηρούνται στους ΣΩ με χρώμα Αλάμπρας και Τσερίου, ενώ η χαμηλότερη τιμή παρατηρείται στους ΣΩ με χρώμα Δελίκηπου.

Πίνακας 22: Καμπτική αντοχή συμπιεσμένων ωμόπλινθων.

Τύπος συμπιεσμένου ωμόπλινθου	Αριθμός δοκιμίων	Πυκνότητα, kg/m^3 (ΣΔ) *	f_{flex} , MPa (ΣΔ)	k_{flex} , kN/mm (ΣΔ)	Υγρασία, % (ΣΔ)
Αλάμπρα	8	1877 (1%)	0.93 (13%)	15.52 (24%)	2.94 (6%)
Δελίκηπος	8	1871 (1%)	0.72 (5%)	6.95 (25%)	7.02 (2%)
Λατούρος	8	1776 (1%)	0.50 (18%)	9.34 (16%)	1.52 (2%)
Τσέρι	8	1831 (1%)	1.21 (8%)	18.90 (15%)	5.41 (4%)

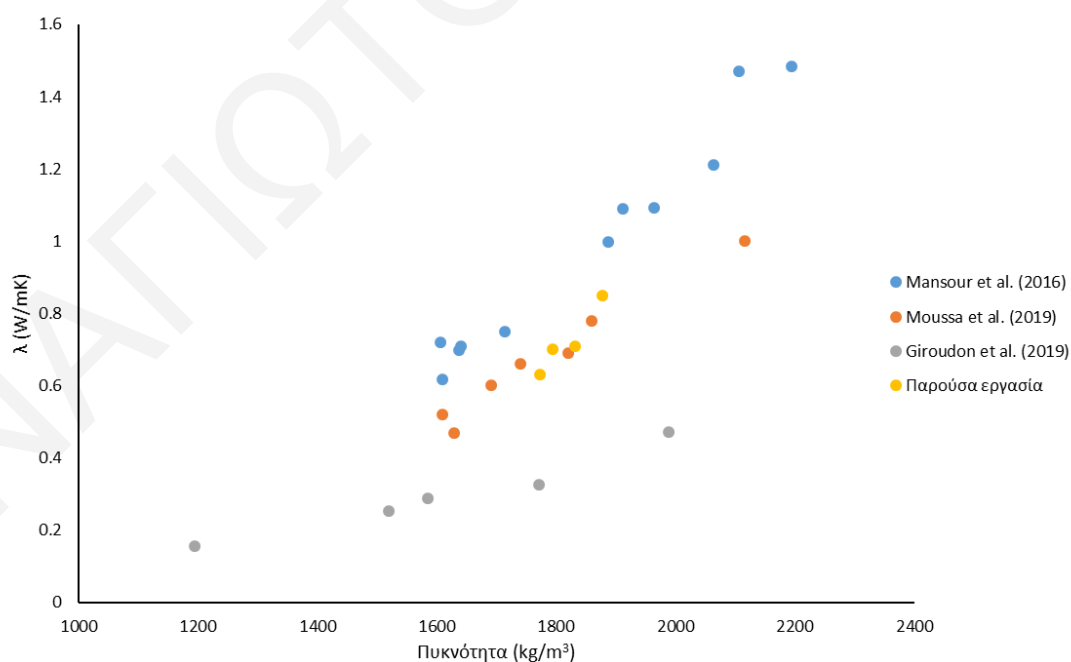
* Μέσος όρος πυκνότητας δοκιμίων που εξετάστηκαν.

5.3.2.3 Σύνοψη και συσχετισμοί

Οι ιδιότητες των 4 τύπων συμπιεσμένων ωμοπλίνθων που παρήχθησαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής κρίνονται ως ικανοποιητικές και εντός των αποδεκτών ορίων από τους διάφορους κανονισμούς (CRATerre – EAG, 1998; DIN 18945-47, 2007; NZS 4297-99, 1998; NMAC 14.7.4, 2016; UNE 41410, 2008). Συγκεκριμένα, η πυκνότητα των τελικών προϊόντων

λαμβάνει ικανοποιητικές τιμές, ωστόσο δεν συμβαδίζει με την πυκνότητα που προσδιορίζεται στη δοκιμή Proctor. Οπότε, με τη δοκιμή Proctor δεν προσδιορίζεται σε καμία περίπτωση η πυκνότητα του τελικού προϊόντος. Η συγκεκριμένη δοκιμή χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της βέλτιστης υγρασίας που θα οδηγήσει στη μέγιστη ξηρή πυκνότητα (Houben and Guillaud, 1994; Minke, 2006). Σημειώνεται ότι ο τοπικός παραγωγός δεν λαμβάνει υπόψιν αυτή την τιμή της υγρασίας, καθώς η προσθήκη νερού κατά την παραγωγή των ΣΩ γίνεται εμπειρικά. Σε αυτό συντείνει και η αδυναμία ελέγχου της επιβαλλόμενης πίεσης μέσω της ίδιας της πρέσας, με αποτέλεσμα, σε σχετικά υψηλά ποσοστά υγρασίας, να αδυνατεί να παράξει τούβλα καλής ποιότητας.

Τα θερμικά χαρακτηριστικά των συμπιεσμένων ωμόπλινθων που εξετάστηκαν επιβεβαιώνουν τις υψηλές τιμές συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που παρουσιάζουν αυτά τα υλικά, θέτοντάς τα εκτός των υπαρχόντων κανονισμών θερμικής απόδοσης κτηρίων. Ωστόσο, το γεγονός ότι τα συγκεκριμένα υλικά έχουν υψηλές τιμές ειδικής θερμοχωρητικότητας δεν μπορεί να παραγκωνιστεί, αφού αυτό σημαίνει ότι μπορούν να αποθηκεύσουν μεγάλα ποσοστά θερμότητας στη μάζα τους, συνδράμοντας θετικά στη θερμική άνεση ενός χώρου. Από τα αποτελέσματα που καταγράφηκαν, παρατηρείται μια αρκετά καλή συσχέτιση μεταξύ των τιμών του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και της πυκνότητας των ΣΩ, όπου με αύξηση της πυκνότητας αυξάνεται και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (Εικ. 55). Η συσχέτιση αυτών των δύο παραμέτρων παρατηρείται και από άλλους ερευνητές στη βιβλιογραφία (Saidi et al., 2018; Mansour et al., 2016; Moussa et al., 2019; Giroudon et al., 2019).

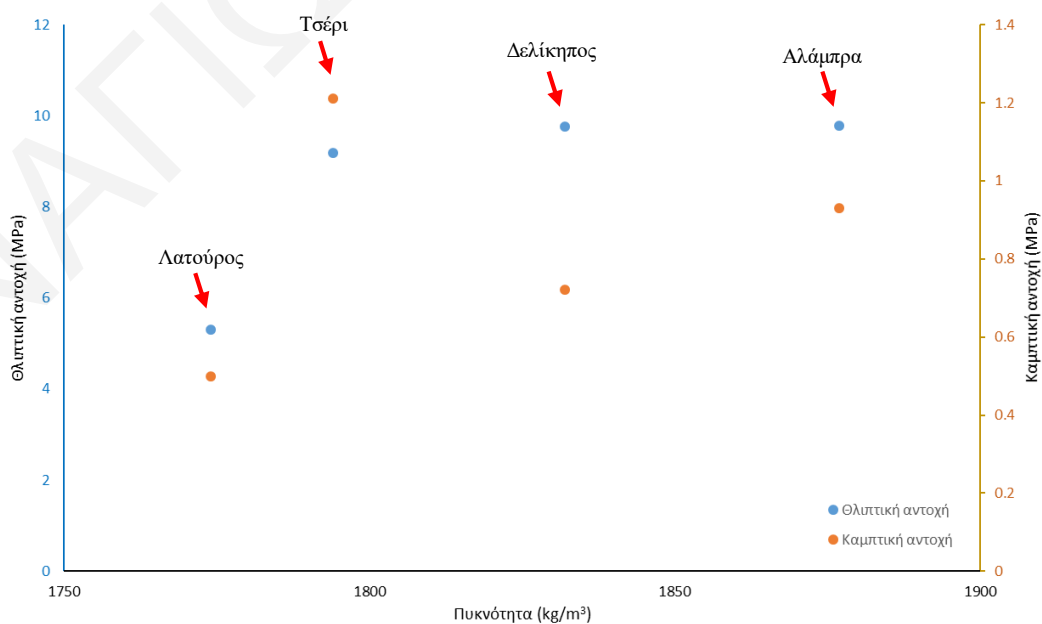


Εικόνα 55: Διάγραμμα συσχέτισης πυκνότητας – συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ΣΩ.

Οι τιμές θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων είναι αρκετά υψηλές, συγκρινόμενες με τις απαιτήσεις των διάφορων κανονιστικών εγγράφων (Κεφάλαιο 3, Πίνακας 5), και συμβαδίζουν πλήρως με τις τιμές που παρατηρούνται στη βιβλιογραφία (Ruiz et al., 2018; Bogas et al., 2019;

Sitton et al., 2018; Danso and Adu, 2019; Sturm et al., 2014; Ammari et al., 2017; Walker, 1999; Egenti et al., 2014; Jayasinghe and Mallawaarachchi, 2009; Ma et al., 2019). Τα αποτελέσματα δείχνουν επίσης την επίδραση του σχήματος/μεγέθους του δοκιμίου στη τιμή της θλιπτικής αντοχής, αφού παρατηρούνται συστηματικά υψηλότερες τιμές σε δοκίμια μικρότερου λόγου ύψους/πλάτους. Οπότεν, στην απουσία πρότυπου δοκιμίου ελέγχου της θλιπτικής αντοχής των ΣΩ, κρίνεται επιβεβλημένη η χρήση συντελεστών διόρθωσης, για να μπορούν να συγκριθούν τα αποτελέσματα διαφόρων μεγεθών δοκιμίων, μεταξύ τους.

Στην Εικόνα 56 παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ θλιπτικής αντοχής, καμπτικής αντοχής και πυκνότητας. Γενικά, παρατηρείται μια αύξηση των αντοχών με αύξηση της πυκνότητας, όπως αναμενόταν, με εξαίρεση την καμπτική αντοχή των ΣΩ με χόμα από την περιοχή του Τσερίου. Στο NZS 4297 (1998) αναφέρεται ότι σε περίπτωση που γίνουν δοκιμές για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής μόνο, τότε η καμπτική αντοχή μπορεί να υπολογιστεί θεωρητικά ως το 1/10 της θλιπτικής αντοχής, για δοκίμια με θλιπτική αντοχή <6 MPa. Σε περίπτωση που τα δοκίμια έχουν θλιπτική αντοχή >6 MPa, τότε επιβάλλεται ο πειραματικός έλεγχος για προσδιορισμό της καμπτικής αντοχής. Τα αποτελέσματα από τις δοκιμές επιβεβαιώνουν τα πιο πάνω, αφού για τους ΣΩ με χόμα από το λατομείο Λατούρος, που είναι τα μόνα με θλιπτική αντοχή <6 MPa, η καμπτική αντοχή είναι περίπου ίση με το 1/10 της θλιπτικής. Στους υπόλοιπους ΣΩ, οι οποίοι έχουν θλιπτική αντοχή >6 MPa, δεν ισχύει η πιο πάνω συνθήκη, οπότεν επιβεβαιώνεται η πρόταση για πειραματικό έλεγχο. Οι τιμές της καμπτικής αντοχής που παρατηρούνται είναι $\leq 1/10$ της θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων, με εξαίρεση τους ΣΩ με χόμα από την περιοχή του Τσερίου. Οι ΣΩ αυτοί παρουσιάζουν αυξημένη καμπτική αντοχή και ψαθυρή αστοχία που πιθανώς οφείλεται στην πυκνή τους δομή και την υψηλή συμμετοχή πυριτικών ορυκτών στη σύστασή τους.



Εικόνα 56: Διάγραμμα συσχέτισης θλιπτικής αντοχής, καμπτικής αντοχής και πυκνότητας ΣΩ.

6. Ανθεκτικότητα

Η μελέτη των μηχανικών χαρακτηριστικών αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι για την εκτίμηση της καταλληλότητας των συμπιεσμένων ωμόπλινθων για δόμηση, αφού αυτοί πρέπει να είναι ικανοί να φέρουν τα φορτία που θα επιδρούν στην κατασκευή. Εντούτοις, οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι, κατά τη διάρκεια της ζωής μιας κατασκευής, υφίστανται την καταστρεπτική επίδραση διαφόρων περιβαλλοντικών συνθηκών, με αποτέλεσμα πιθανή μείωση των αντοχών τους, απώλεια σημαντικής ποσότητας υλικού ή/και αποδιοργάνωση της δομής τους. Οπότε, θεωρείται σημαντική και η μελέτη της ανθεκτικότητας των τελικών προϊόντων, η οποία καταδεικνύει την αντίσταση του υλικού στις περιβαλλοντικές επιδράσεις.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μελέτη της ανθεκτικότητας των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων. Παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις διάφορες δοκιμές που έγιναν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, και γίνεται εκτίμηση της ανθεκτικότητας των τοπικών συμπιεσμένων ωμοπλίνθων.

6.1 Αποτελέσματα και συζήτηση

Στην ενότητα αυτή παρατίθενται τα αποτελέσματα των δοκιμών ανθεκτικότητας που έγιναν στους υπό εξέταση συμπιεσμένους ωμόπλινθους. Αρχικά, παρατίθενται τα αποτελέσματα από τις δοκιμές σταγόνας και ψεκασμού υπό πίεση. Ακολούθως, γίνεται αναφορά στα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη δοκιμή κύκλων ύγρανσης/ξήρανσης. Τέλος, παρατίθενται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα από τη δοκιμή προσδιορισμού του συντελεστή τριχοειδούς απορροφητικότητας.

6.1.1 Δοκιμής σταγόνας (Drip test)

Τα αποτελέσματα από τη δοκιμή σταγόνας παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα Δ και συνοψίζονται στον Πίνακα 23. Η χαμηλότερη διείσδυση (< 10 mm) παρατηρείται στους ΣΩ με χρώμα από τις περιοχές Τσερίου και Αλάμπρας. Οι ΣΩ με χρώμα από το λατομείο Λατούρου και την περιοχή Δελίκηπου παρουσιάζουν υψηλή διείσδυση (> 10 mm). Όσον αφορά τις τιμές του δείκτη LEI, οι ΣΩ με χρώμα από τις περιοχές Τσερίου και Αλάμπρας λαμβάνουν τιμή 3, ενώ αυτά με χρώμα από την περιοχή Δελίκηπου και το λατομείο Λατούρου 4 (Πίνακας 12, Ενότητα 4.3.3). Τα αποτελέσματα της δοκιμής σταγόνας προσεγγίζουν αυτά που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία. Συνήθως, τα σταθεροποιημένα δοκίμια είναι αυτά που επιτυγχάνουν στη δοκιμή (Giroudon et al., 2019), δηλαδή παρουσιάζουν διείσδυση <15 mm. Ωστόσο, στη βιβλιογραφία παρατηρήθηκαν και μη σταθεροποιημένα δοκίμια, τα οποία έχουν βάθος τρύπας στο τέλος της δοκιμής <15 mm (Danso, 2015), όπως και στην παρούσα εργασία.

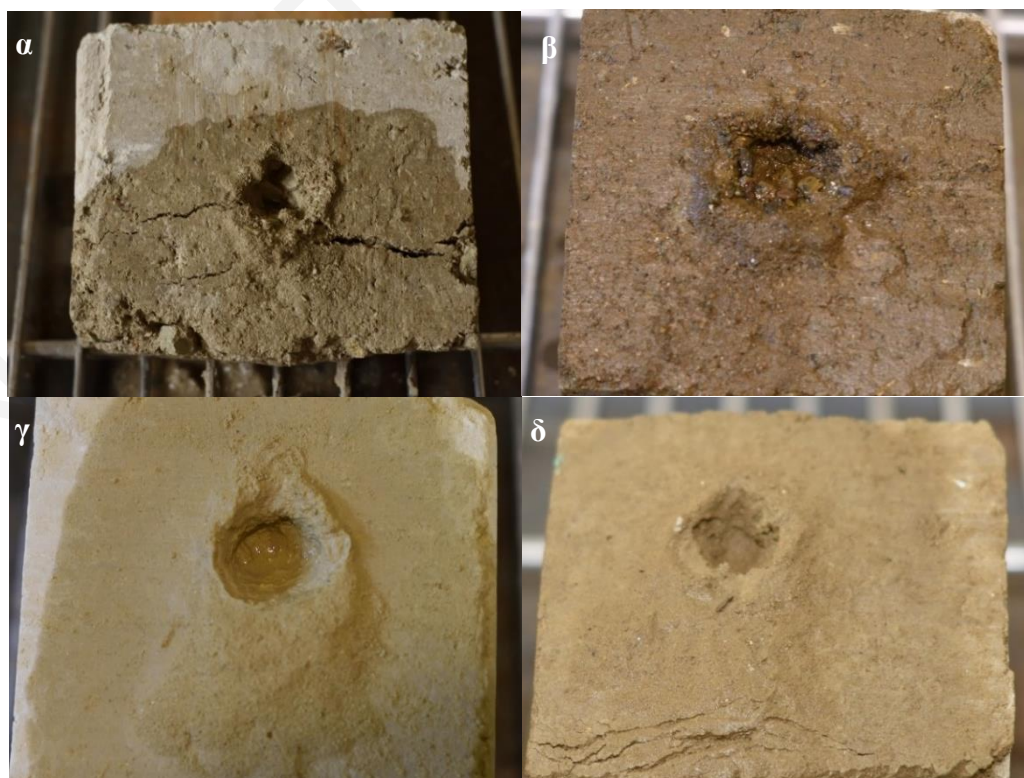
Τα αποτελέσματα που καταγράφονται είναι επίσης σε πλήρη συμφωνία με τις παρατηρήσεις που έγιναν κατά τον έλεγχο της δομής των υλικών, όπου οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι με χρώμα από τις περιοχές Αλάμπρας και Τσερίου παρουσίασαν την πυκνότερη δομή. Αντίθετα, οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι με χρώμα από την περιοχή Δελίκηπου και το λατομείο Λατούρου παρουσίασαν χαλαρή

δομή, η οποία οδήγησε και σε μεγαλύτερες τιμές διείσδυσης. Σημειώνεται ότι η υψηλή τιμή διείσδυσης στους συμπιεσμένους ωμοπλίνθους με χώμα από την περιοχή Δελίκηπου, πολλές φορές οφείλεται στην αποκόλληση χονδρόκοκκων από το υλικό, όπως συμβαίνει (σε μικρότερο όμως βαθμό) και στους ΣΩ με χώμα από την περιοχή Αλάμπρας.

Πίνακας 23: Αποτελέσματα δοκιμής σταγόνας συμπιεσμένων ωμοπλίνθων.

Τύπος συμπιεσμένου ωμοπλίνθου	Βάθος τρύπας, mm (ΣΔ)	LEI
Αλάμπρα	8.63 (10%)	3
Δελίκηπος	11.69 (13%)	4
Λατούρος	13.90 (5%)	4
Τσέρι	8.51 (9%)	3

Είναι αξιοσημείωτο ότι, η επίδραση του νερού στα δοκίμια κατά τη δοκιμή σταγόνας δεν περιοριζόταν στο βάθος της τρύπας που δημιουργείτο λόγω των σταγόνων. Αντίθετα, το νερό έρεε προς τα κάτω, λόγω της κλίσης που είχαν τα δοκίμια, με αποτέλεσμα να δημιουργεί πρόσθετα προβλήματα στο υλικό. Σε όλους τους τύπους συμπιεσμένων ωμοπλίνθων που εξετάστηκαν, παρατηρήθηκαν, με τη πάροδο του χρόνου, ρωγμές κάθετες στη ροή του νερού (Εικ. 57). Οι ρωγμές αυτές, σε κάποια δοκίμια, συνέπιπταν με τις κάθετες στη διεύθυνση της συμπίεσης ρωγμές που παρατηρήθηκαν και στον μακροσκοπικό έλεγχο των δοκιμίων. Οι εν λόγω ρωγμές δημιουργούνται αφενός λόγω της χαλάρωσης της δομής των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων, αφού αυτοί έρθουν σε επαφή με το νερό, και αφετέρου λόγω της αύξησης του βάρους στη βάση του δοκιμίου, συνέπεια της προσρόφησης του νερού.



Εικόνα 57: Αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες δοκιμίων συμπιεσμένων ωμοπλίνθων που υποβλήθηκαν στη δοκιμή της σταγόνας. α) ΣΩ με χώμα από την περιοχή Αλάμπρας, β) ΣΩ με χώμα από την περιοχή Δελίκηπου, γ) ΣΩ με χώμα από το λατομείο Λατούρου και δ) ΣΩ με χώμα από την περιοχή Τσερίου.

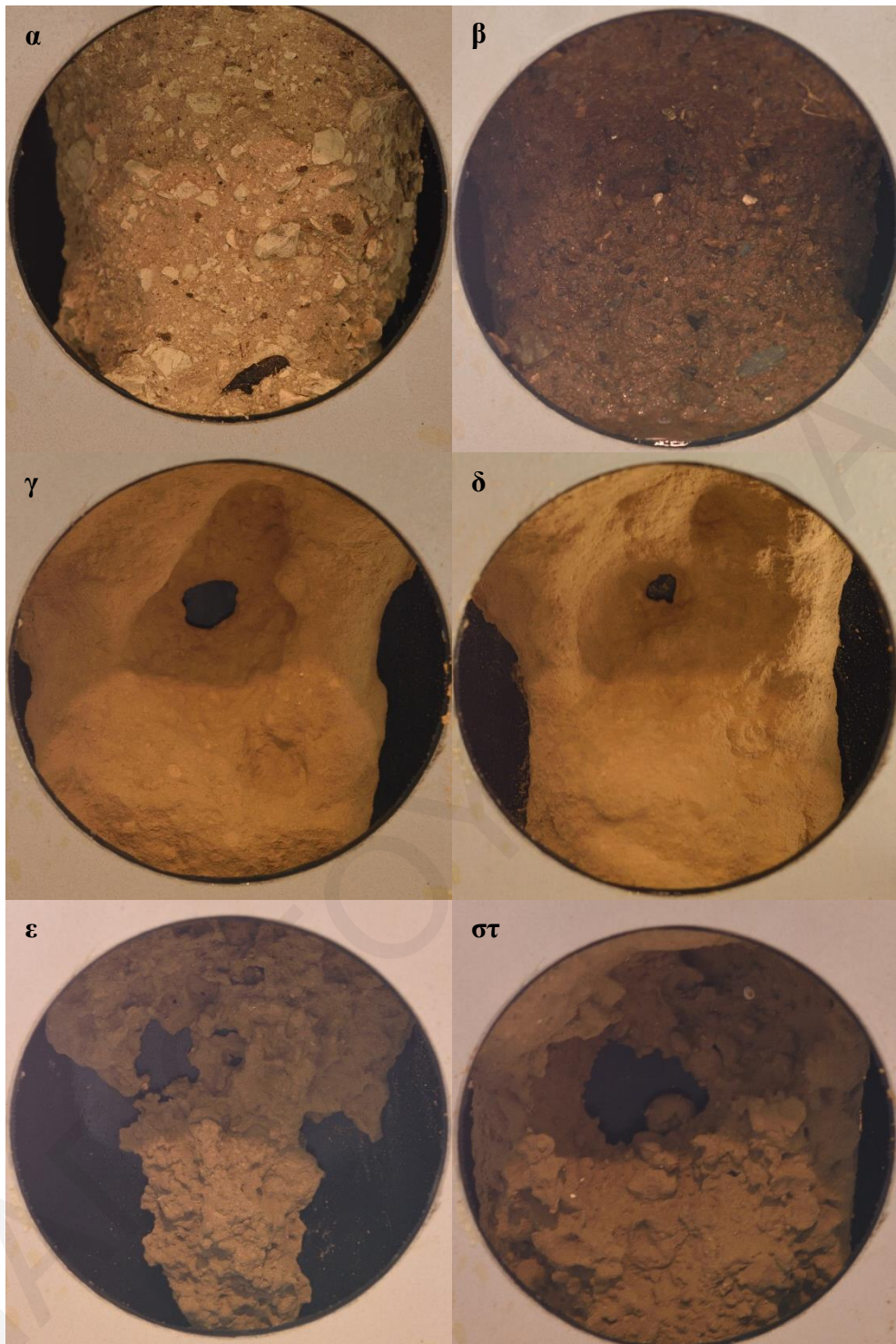
6.1.2 Δοκιμή ψεκασμού υπό πίεση (Spray erosion test)

Τα αποτελέσματα από τη δοκιμή ψεκασμού υπό πίεση παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα Ε και συνοψίζονται στον Πίνακα 24. Η χαμηλότερη τιμή βάθους διάτρησης καταγράφεται για τους ΣΩ με χώμα από την περιοχή Αλάμπρας (ca. 50 mm) (Εικ. 58α), ενώ αρκετά καλή συμπεριφορά έχουν και οι ΣΩ με χώμα από την περιοχή Δελίκηπου, τα οποία παρουσιάζουν βάθος διάτρησης ca 75 mm (Εικ. 58β), σε αντίθεση με τη δοκιμή της σταγόνας, όπου οι συγκεκριμένοι ΣΩ είχαν τη δεύτερη χειρότερη συμπεριφορά. Σημειώνεται ότι, δύο δοκίμια από τους ΣΩ με χώμα από την περιοχή Δελίκηπου είχαν διατρηθεί πλήρως, στα 52 και 56 λεπτά, αντίστοιχα, της δοκιμής. Επίσης, στους ΣΩ με χώμα από την περιοχή Αλάμπρας υπήρχαν δύο δοκίμια με σημαντικά καλύτερη συμπεριφορά από τα υπόλοιπα (βάθος διάτρησης ca. 25 mm). Οι ΣΩ με χώμα από την περιοχή Τσερίου και το λατομείο Λατούρου ουσιαστικά απέτυχαν στη δοκιμή ψεκασμού, αφού οι μεν ΣΩ με χώμα από το λατομείο Λατούρου υπέστησαν πλήρη διάτρηση μετά από 8-10 λεπτά (Εικ. 58γ, δ), οι δε ΣΩ με χώμα από την περιοχή Τσερίου διαχωρίστηκαν σε δύο ομάδες, με την πρώτη να έχει υποστεί πλήρη διάτρηση σε περίπου 12 λεπτά και τη δεύτερη σε περίπου 35 λεπτά (Εικ. 58ε, στ). Η διπολική συμπεριφορά των εν λόγω ΣΩ οφείλεται στην ανομοιογένεια των δοκιμίων, αφού σε αυτά εντοπίζονται δυο διακριτές ομάδες πυκνότητας, οι οποίες συμπίπτουν με τη διάβρωση που καταγράφηκε.

Πίνακας 24: Αποτελέσματα δοκιμής ψεκασμού υπό πίεση συμπίεσμένων ωμοπλίνθων.

Τύπος συμπίεσμένου ωμόπλινθου	Βάθος διάτρησης, mm (ΣΔ)	Ρυθμός διάβρωσης, mm/min (ΣΔ)	LEI
Αλάμπρα	50.07 (35%)	0.83 (35%)	3
Δελίκηπος	74.75 (24%)	1.31 (30%)	3
Λατούρος	100 (0%)	11.25 (11%)	5
Τσέρι	100 (0%)	5.65 (52%)	5

Οι πιο πάνω παρατηρήσεις συμβαδίζουν εν μέρει με τη βιβλιογραφία. Οι ΣΩ με χώμα από την περιοχή Τσερίου και το λατομείο Λατούρου παρουσιάζουν αρκετά υψηλές τιμές ρυθμού διάβρωσης, όπως επισημαίνεται από αρκετούς ερευνητές για μη σταθεροποιημένα δοκίμια (Walker, 2004; Mahdad and Benidir, 2018; Eires et al., 2017). Από την άλλη, οι ΣΩ με χώμα από τις περιοχές Αλάμπρας και Δελίκηπου παρουσιάζουν τιμές ρυθμού διάβρωσης < 2 mm/min, οι οποίες προσεγγίζουν τις τιμές για σταθεροποιημένα δοκίμια (Walker, 2004; Mahdad and Benidir, 2018; Eires et al., 2017; Danso and Adu, 2019; Danso et al., 2015). Αυτό δείχνει τη δυνατότητα, ακόμα και των μη σταθεροποιημένων δοκιμίων, να ανθίστανται στις περιβαλλοντικές επιδράσεις.



Εικόνα 58: Αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες από δοκίμια συμπιεσμένων ωμοπλίνθων που υποβλήθηκαν στη δοκιμή ψεκάσμου υπό πίεση. α) ΣΩ με χώμα από την περιοχή Αλάμπρας, β) ΣΩ με χώμα από την περιοχή Δελίκηπου, γ) ΣΩ με χώμα από το λατομείο Λατούρου το οποίο διατρήθηκε πλήρως στα 8 λεπτά, δ) ΣΩ με χώμα από το λατομείο Λατούρου το οποίο διατρήθηκε πλήρως στα 10 λεπτά, ε) ΣΩ με χώμα από την περιοχή Τσερίου το οποίο διατρήθηκε πλήρως στα 14 λεπτά και στ) ΣΩ με χώμα από την περιοχή Τσερίου το οποίο διατρήθηκε πλήρως στα 35 λεπτά.

Τα αποτελέσματα για τους ΣΩ με χώμα από την περιοχή Αλάμπρας και το λατομείο Λατούρου ήταν αναμενόμενα, με βάση την παρατήρηση της δομής των τελικών προϊόντων (βλέπε Ενότητα 5.2). Ωστόσο, τα αποτελέσματα για τους ΣΩ με χώμα από τις περιοχές Τσερίου και Δελίκηπου έρχονται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα της δοκιμής σταγόνας. Στους ΣΩ με χώμα από την περιοχή Τσερίου, συγκεκριμένα, αναμενόταν καλύτερη συμπεριφορά, λόγω της πυκνής

δομής που παρουσιάζουν. Ωστόσο, ίσως σε αυτά το δοκίμια να επίδρασε αρνητικά η απουσία χονδρόκοκκων, τα οποία θα προσέδιδαν καλύτερη σταθερότητα στο τελικό προϊόν και θα μπορούσαν να αντισταθούν στην επίδραση του νερού. Από την άλλη, οι ΣΩ με χώμα από την περιοχή Δελίκηπου παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά από την αναμενόμενη, πιθανώς λόγω της παρουσίας αυξημένου ποσοστού χονδρόκοκκων, το οποίο βοήθησε στην αντίσταση της επίδρασης του νερού. Σημειώνεται ότι τα χονδρόκοκκα προσδίδουν σταθερότητα στο τελικό προϊόν και αυξάνουν την αντίσταση του στη επίδραση του νερού (Guetala et al., 2002). Άρα, η παρουσία τους στην εδαφική πρώτη ύλη κρίνεται επιβεβλημένη για την παραγωγή συμπιεσμένων ωμοπλίνθων.

Οι τιμές του ρυθμού διάβρωσης μπορούν να δώσουν πληροφορίες για την καταλληλότητα των τελικών προϊόντων για δόμηση. Ο Frencham (1982) θεωρεί ότι τα υλικά με ρυθμό διάβρωσης ≤ 0.5 mm/min είναι πέραν πάσης αμφιβολίας κατάλληλα για δόμηση, αυτά με ρυθμό διάβρωσης 0.5-1.5 mm/min χρειάζονται περαιτέρω αξιολόγηση, ενώ αυτά με ρυθμό διάβρωσης ≥ 1.5 mm/min κρίνονται ως ακατάλληλα ή χρήζουν σταθεροποίησης. Με βάση τον πιο πάνω ισχυρισμό, οι ΣΩ με χώμα από τις περιοχές Αλάμπρας και Δελίκηπου χρήζουν περαιτέρω αξιολόγησης πριν χρησιμοποιηθούν για κατασκευαστικούς σκοπούς, ενώ αυτά με χώμα από την περιοχή Τσερίου και το λατομείο Λατούρου είναι είτε ακατάλληλα ή χρειάζονται σταθεροποίηση.

Η άποψη του Frencham (1982) δεν συμπίπτει με τις απαιτήσεις διαφόρων εγγράφων που προδιαγράφουν τη δοκιμή ψεκασμού υπό πίεση. Στο Bulletin 5 (Middleton, 1987), η μέγιστη αποδεκτή διάβρωση είναι τα 60 mm/hr (1 mm/min), ενώ στο NZS 4298 (1998) τα δοκίμια αποτυγχάνουν όταν η διάβρωση ξεπεράσει τα 120 mm/hr (βλ. ενότητα 4.3.3.1, Πίνακας 11), δηλαδή 2 mm/min.

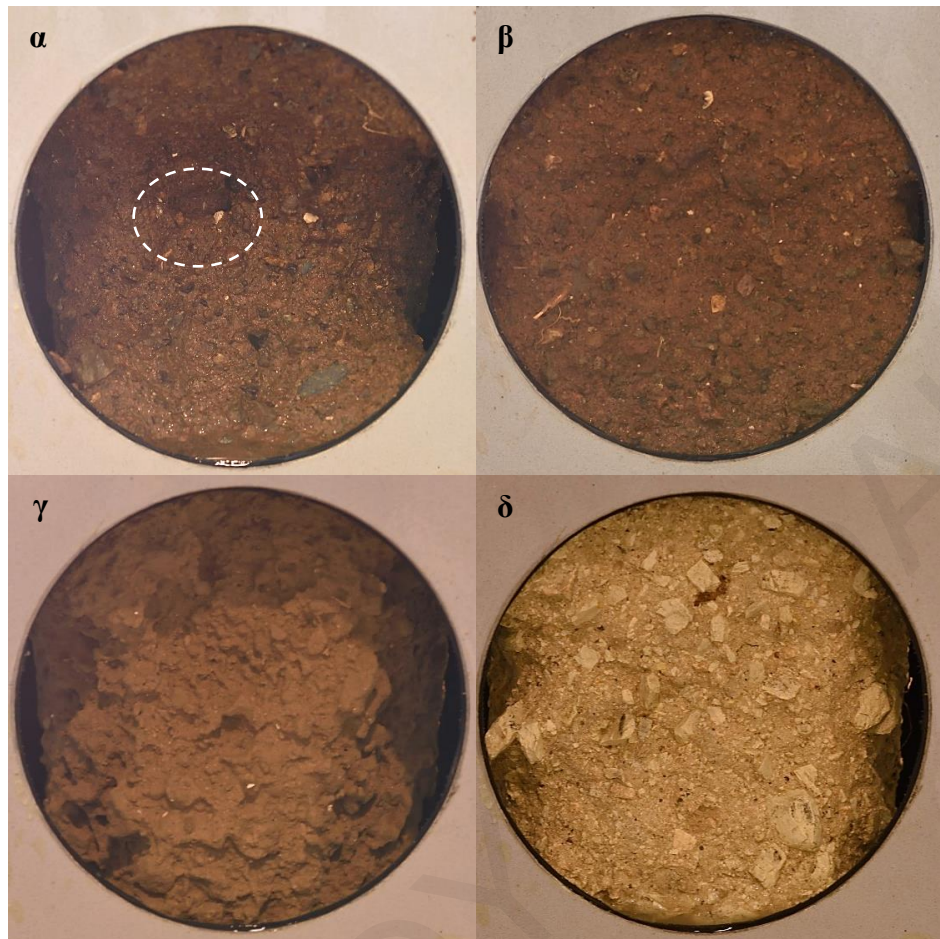
Τα όρια που τίθενται στους διάφορους κανονισμούς και κάποια άλλα έγγραφα δεν μπορούν να είναι αυθαίρετα και πρέπει να συνδέονται με την πραγματική διάβρωση. Για το σκοπό αυτό, θεωρήθηκε σωστό όπως γίνει θεωρητική μελέτη των παραμέτρων της διάταξης του ψεκασμού υπό πίεση και σύνδεσή τους με κλιματολογικά δεδομένα. Αρχικά, υπολογίστηκε η κινητική ενέργεια (Heathcote, 2002) που αναπτύσσεται στη διάταξη που περιγράφεται στο Παράρτημα Δ του NZS 4298 (1998) και στο Bulletin 5 (Middleton, 1987) (4650 kJ/m^2), λαμβάνοντας υπόψη την πίεση του νερού (50 kPa ή 0.5 bar), το ακροφύσιο που αποτελείται από 35 τρύπες διαμέτρου 1.3 mm, και την επιφάνεια κρούσης του νερού στο δοκίμιο που περιορίζεται σε κύκλο διαμέτρου 150 mm. Ακολούθως, υπολογίστηκε η κινητική ενέργεια που οφείλεται στη βροχόπτωση. Σύμφωνα με τους Morgan et al. (1984), η κινητική ενέργεια λόγω βροχόπτωσης είναι ίση με το γινόμενο του ετήσιου ύψους βροχής σε mm και του συντελεστή K σε $\text{J/m}^2/\text{mm}$. Ο συντελεστής K εξαρτάται από το κλίμα της περιοχής (κατά Korpen) και για τις περιοχές Νέας Ζηλανδίας και Αυστραλίας (στις οποίες αναφέρεται η διάταξη) αντιστοιχεί σε $21 \text{ J/m}^2/\text{mm}$. Λαμβάνοντας ως ετήσιο ύψος βροχόπτωσης τα 1200 mm (Heathcote, 2002), τότε η κινητική ενέργεια λόγω βροχόπτωσης ισούται με 25.2 kJ/m^2 ετησίως, κάτι που αντιστοιχεί σε 1260 kJ/m^2 στα 50 χρόνια, που είναι η επιθυμητή διάρκεια ζωής μιας κατασκευής (NZS 4297, 1998). Η μέγιστη τιμή διάβρωσης της τοιχοποιίας μετά από 50 χρόνια ζωής της κατασκευής, που μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή από τα New Zealand Standards (1998),

είναι 30 mm. Για να επέλθει αυτή η διάβρωση, θα πρέπει να ασκηθεί κινητική ενέργεια 1260 kJ/m^2 . Οπότε, η κινητική ενέργεια που πρέπει να ασκηθεί στο δοκίμιο κατά τη δοκιμή, για να διαβρωθεί κατά 120 mm/hr (ανώτατο όριο για αποδοχή), είναι 5040 kJ/m^2 , που είναι λίγο ψηλότερη από την κινητική ενέργεια που παράγει το ακροφύσιο της διάταξης που περιγράφεται στο Παράρτημα Δ του NZS 4298 (1998).

Στο Bulletin 5 (Middleton, 1987), η υψηλότερη αποδεκτή τιμή διάβρωσης του υλικού κατά τη δοκιμή ψεκασμού υπό πίεση είναι 60 mm/hr (Heathcote, 2002). Για να επέλθει η διάβρωση αυτή, ασκούνται στο δοκίμιο 4650 kJ/m^2 κινητικής ενέργειας (κινητική ενέργεια που παράγεται από τη διάταξη). Οπότε, βάσει του κριτηρίου αυτού, η μέγιστη διάβρωση του δοκιμίου στην πραγματικότητα δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 16.26 mm για να θεωρείται αποδεκτό, αφού η κινητική ενέργεια που παράγεται στην πραγματικότητα είναι κατά πολύ μικρότερη (1260 kJ/m^2). Η τιμή αυτή αντιστοιχεί περίπου στο 5% του πάχους μια τοιχοποιίας με συμπιεσμένους ωμόπλινθους (300 mm). Έτσι, επιτυγχάνεται συσχέτιση ανάμεσα στις παραμέτρους της διάταξης και στα κλιματολογικά δεδομένα, που επιτρέπει τη σύνδεση των πειραματικών αποτελεσμάτων με το σχεδιασμό ενός κτηρίου σε πραγματικές συνθήκες.

Οι πιο πάνω παρατηρήσεις βοηθούν στην κατανόηση των αποτελεσμάτων και την αποδοχή ή απόρριψη των συμπιεσμένων ωμόπλινθων που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Ως αποδεκτά, βάσει των κριτηρίων που θέτουν τα New Zealand Standards (NZS 4298, 1998), κρίνονται τα δοκίμια με χόμα από τις περιοχές Αλάμπρας και Δελίκηπου, ενώ απορρίπτονται τα δοκίμια με χόμα από τις περιοχές Τσερίου και Λατούρου. Σημειώνεται ότι το κριτήριο που τίθεται από το Bulletin 5 (Middleton, 1987) θεωρείται αρκετά αυστηρό (Heathcote, 2002). Εντούτοις, οι ΣΩ με χόμα από την περιοχή Αλάμπρας κρίνονται ως αποδεκτά, ακόμη και με βάση αυτό το κριτήριο, ενώ οι υπόλοιποι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι που εξετάστηκαν δεν ικανοποιούν το συγκεκριμένο κριτήριο.

Η μέτρηση του βάθους διάβρωσης γίνεται με βάση το βαθύτερο σημείο στο οποίο μπορεί να μπει η ειδική ράβδος διαμέτρου 10 mm . Ωστόσο, πολλές φορές η μετρούμενη τιμή δεν αντιπροσωπεύει την πραγματική συμπεριφορά του υλικού, αφού γίνεται μέτρηση σε ασθενή σημεία τα οποία ξεχωρίζουν από το υπόλοιπο υλικό (Εικ. 59α). Επίσης, πολλές φορές δημιουργούνται διαφορετικά μοτίβα διάβρωσης, τα οποία διαφέρουν από υλικό σε υλικό, έστω και αν η μέγιστη τιμή διάβρωσης είναι ίδια (Εικ. 59β, 3γ και 3δ). Έτσι, ενώ καταγράφεται ίδια τιμή διάβρωσης, τα δοκίμια παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές στην απώλεια υλικού. Οπότε, η αξιολόγηση των δοκιμών και με άλλες μεθόδους, όπως η απώλεια μάζας, θα βοηθούσε στη δημιουργία μιας πιο ολοκληρωμένης εικόνας για τα υπό εξέταση υλικά.



Εικόνα 59: Δοκίμια διαφόρων τύπων συμπιεσμένων ωμοπλίνθων που υποβλήθηκαν σε δοκιμή ψεκασμού υπό πίεση. α) Δοκίμιο με χώμα από την περιοχή Δελίκηπου, όπου παρατηρείται ασθενές σημείο στο οποίο γίνεται μέτρηση, β), γ) και δ) Δοκίμια με χώμα από τις περιοχές Δελίκηπου, Τσερίου και Αλάμπρας, αντίστοιχα, που παρουσιάζουν περίπου το ίδιο βάθος διάβρωσης, ωστόσο έχουν σημαντικές διαφορές στη γενική συμπεριφορά.

Επίσης, μετά το πέρας της δοκιμής και την ξήρανση των δοκιμίων, κάποια εμφάνισαν προβλήματα, όπως η δημιουργία ρωγμών. Χαρακτηριστικά, στα δοκίμια συμπιεσμένων ωμοπλίνθων με χώμα από την περιοχή Τσερίου εμφανίστηκαν εκτεταμένες crazing-type ρωγμές (Εικ. 60). Τέτοιες παρατηρήσεις δεν εντάσσονται στην αξιολόγηση των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων που υποβάλλονται στο συγκεκριμένο εργαστηριακό έλεγχο, ωστόσο αποτελούν σημαντικά ευρήματα για την αξιολόγηση της γενικότερης συμπεριφοράς των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων κατά τη διάρκεια της ζωής τους.



Εικόνα 60: Φωτογραφία ΣΩ με χώμα από την περιοχή Τσερίου στο οποίο παρατηρούνται εκτεταμένες crazing-type ρωγμές.

6.1.3 Κύκλοι ύγρανσης/ξήρανσης

Η υποβολή σε κύκλους ύγρανσης/ξήρανσης μπορεί να εκτιμήσει τη συμπεριφορά ενός υλικού σε εναλλασσόμενες συνθήκες υγρασίας. Ο κύριος σκοπός της δοκιμής που προτείνεται στο NZS 4298 είναι η απόρριψη εδαφών ή υλικών, τα οποία παρά την αποδοχή τους όσον αφορά τα μηχανικά χαρακτηριστικά και την ανθεκτικότητα, αστοχούν στους εναλλασσόμενους κύκλους ύγρανσης/ξήρανσης, λόγω της παρουσίας ενεργών αργιλικών ορυκτών ή κακοτεχνιών κατά την παραγωγή. Σημειώνεται ότι η αποδοχή ή απόρριψη ενός εδάφους ή υλικού είναι υποκειμενική, αφού η εκτίμηση του κάθε ερευνητή για το πότε τηρείται μια συνθήκη απόρριψης, μπορεί να διαφέρει.

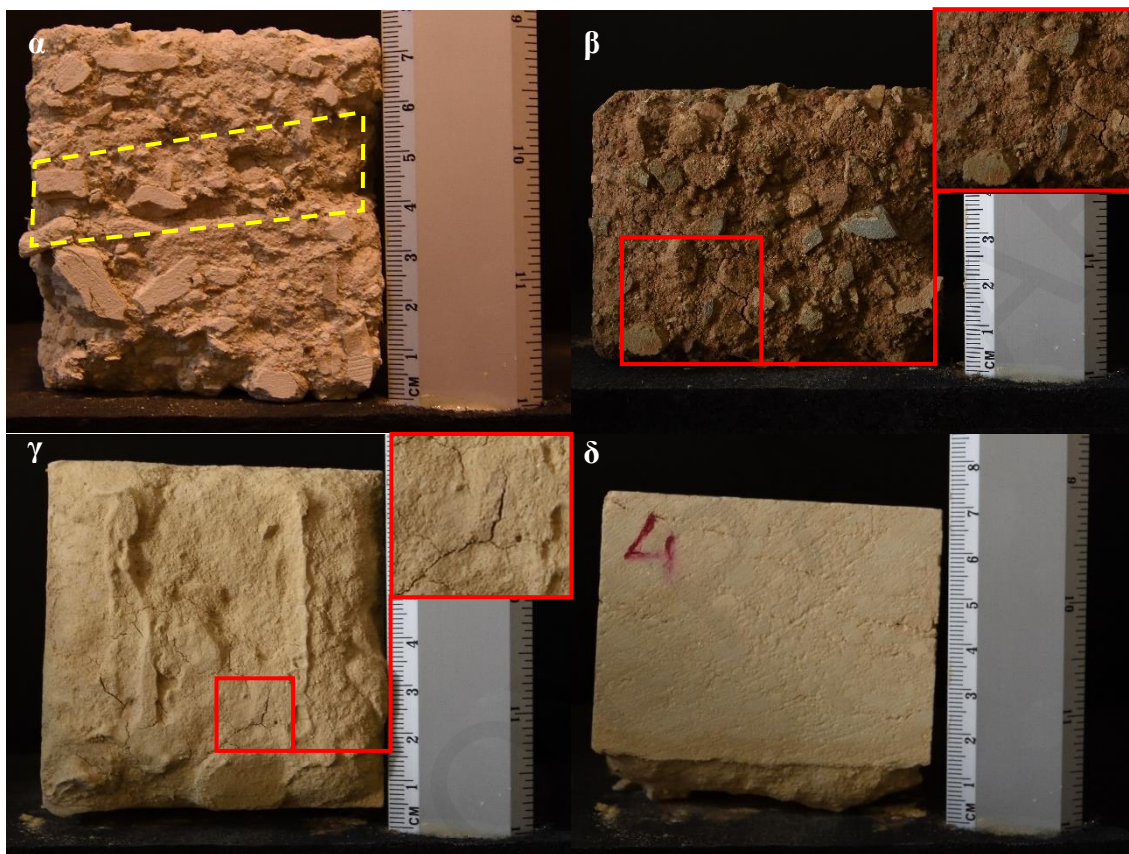
Πίνακας 25: Αποτελέσματα από την υποβολή των δοκιμών σε κύκλους ύγρανσης/ξήρανσης.

Τύπος συμπίεσμένου ωμοπλίνθου	Μορφή αστοχίας			
	Αλάμπρα	Δελίκηπος	Λατούρος	Τσέρι
Crazing-type ρωγμές		*	*	1°
Αστεροειδείς ρωγμές		*	*	
Διόγκωση		2°		
Σκασίματα	4°	*		
Απώλεια στρώσεων			1°	
Διείσδυση νερού > 70% του πλάτους του δοκιμίου				
Απώλεια τμημάτων > 50 mm				
Εξανθήματα				
Αποδοχή	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι

* Η αστοχία παρουσιάστηκε σε κάποια δοκίμια.

Τα υπό μελέτη δοκίμια συμπίεσμένων ωμοπλίνθων κρίνονται ως μη αποδεκτά με βάση τα αποτελέσματα δοκιμών ύγρανσης/ξήρανσης, πλην ελαχίστων εξαιρέσεων (Πίν. 25). Συγκεκριμένα, τα δοκίμια με χώμα από την περιοχή Αλάμπρας αστόχησαν στο 4° κύκλο ύγρανσης/ξήρανσης, αφού εμφάνισαν σκασίματα σε τουλάχιστον 5 σημεία, με εξαίρεση 3 δοκίμια τα οποία πέρασαν τον 6° κύκλο και θεωρούνται αποδεκτά. Γενικά, οι αστοχίες κατά τους κύκλους ύγρανσης/ξήρανσης παρουσιάστηκαν σε ασθενή σημεία, όπως η επαφή χονδρόκοκκων και συνδετικού υλικού, ή κατά μήκος επιφανειακών μικρορωγμών (Εικ. 61α). Τα δοκίμια με χώμα από την περιοχή Δελίκηπου αστόχησαν στον 2° κύκλο ύγρανσης/ξήρανσης, λόγω τοπικών διογκώσεων, συνέπεια του υψηλού ποσοστού αργιλικών ορυκτών και χλωρίτη στην εδαφική πρώτη ύλη (βλέπε Ενότητα 5.1.4). Σε κάποια δοκίμια παρατηρήθηκαν, επίσης, αστεροειδείς ρωγμές, crazing-type ρωγμές και σκασίματα (Εικ. 61β). Τα δοκίμια με χώμα από το λατομείο Λατούρου αστόχησαν στο 1° κύκλο ύγρανσης/ξήρανσης, αφού παρουσίασαν απώλεια στρώσεων υλικού και σε κάποιες περιπτώσεις αστεροειδείς και crazing-type ρωγμές (Εικ. 61γ, δ). Σημειώνεται ότι τα συγκεκριμένα δοκίμια παρουσιάζουν κακή συνοχή μεταξύ των στρώσεων του λεπτόκοκκου υλικού (βλέπε Ενότητα 5.2).

Στα δοκίμια με χώμα από την περιοχή Τσερίου παρατηρήθηκαν εκτεταμένες crazing-type ρωγμές από τον 1^ο κύκλο ύγρυνσης/ξήρανσης, κάτι που οφείλεται στην απουσία χονδρόκοκκων, τα οποία θα βοηθούσαν στη μείωση των ογκομετρικών μεταβολών. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρατηρήθηκε και μετά το πέρας της δοκιμής ψεκασμού υπό πίεση στα συγκεκριμένα δοκίμια.





Εικόνα 61: α) ΣΩ με χώμα από την περιοχή Αλάμπρας, στο οποίο η μεγαλύτερη διάβρωση εντοπίζεται στη διεύθυνση μιας προϋπάρχουσας ρωγμής, β) ΣΩ με χώμα από την περιοχή Δελίκηπου, στο οποίο παρατηρούνται αστεροειδείς ρωγμές και διάβρωση στη διεπιφάνεια χονδρόκοκκων και συνδετικού υλικού, γ) ΣΩ με χώμα από το λατομείο Λατούρου, στο οποίο παρατηρούνται αστεροειδείς ρωγμές και δ) ΣΩ με χώμα από το λατομείο Λατούρου, στο οποίο παρατηρείται σημαντική απώλεια υλικού στη βάση.

Στον Πίνακα 26 συνοψίζεται η επίδραση των κύκλων ύγρυνσης/ξήρανσης στα δοκίμια που εξετάστηκαν. Οι περιπτώσεις οι οποίες παρουσιάζονται αφορούν τις πλέον αντιπροσωπευτικές για το κάθε είδος συμπιεσμένου ωμόπλινθου. Τα δοκίμια με χώμα από την περιοχή Αλάμπρας, αν και γενικώς κρίνονται ως μη αποδεκτά, εντούτοις περίπου τα μισά πέρασαν τους 6 κύκλους. Οπότε, κρίθηκε ως καταλληλότερη η παράθεση εικόνων από αυτά τα δοκίμια που δείχνουν τη δυναμική του συγκεκριμένου εδαφικού υλικού.

Στα δοκίμια με χώμα από την περιοχή Αλάμπρας παρατηρήθηκε απώλεια υλικού στη διεπιφάνεια μεταξύ των χονδρόκοκκων και του συνδετικού υλικού, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται σκασίματα στην επιφάνεια που ερχόταν σε επαφή με το νερό με το πέρας των κύκλων. Η ίδια πορεία παρατηρήθηκε και στα δοκίμια που κρίθηκε ότι απέτυχαν, ωστόσο σε αυτά παρουσιάζονταν μεγαλύτερης διαμέτρου χονδρόκοκκα με ανάλογη απώλεια υλικού στη διεπιφάνεια, όπως και κάποιες επιφανειακές ρωγμές, που αποτελούσαν τα ασθενή σημεία για εκκίνηση των αστοχιών. Στα δοκίμια με χώμα από την περιοχή Δελίκηπου παρατηρήθηκε κάποια απώλεια υλικού, στις διεπιφάνειες χονδρόκοκκων και συνδετικού υλικού, ωστόσο η κύρια αστοχία

ήταν οι τοπικές διογκώσεις στα πλάγια, οι οποίες δεν είναι εμφανείς στον Πίνακα 26. Τα δοκίμια με χρώμα από το λατομείο Λατούρου παρουσίασαν απώλεια στρώσεων υλικού, τόσο στα πλάγια όσο και στην επιφάνεια που ερχόταν σε επαφή με το νερό. Στα σημεία όπου το υλικό δεν ήταν σε επαφή με στήριγμα, επίσης παρατηρήθηκε απώλεια υλικού. Στην περίπτωση των δοκιμίων με χρώμα από την περιοχή Τσερίου είναι εμφανείς οι εκτεταμένες crazing-type ρωγμές, οι οποίες δημιουργήθηκαν με την εκκίνηση της ξήρανσης, αρχικά ως αστεροειδείς ρωγμές, οι οποίες με το πέρας της ξήρανσης συνενώθηκαν και κατέληξαν με το μοτίβο που παρατηρείται στην αντίστοιχη εικόνα.

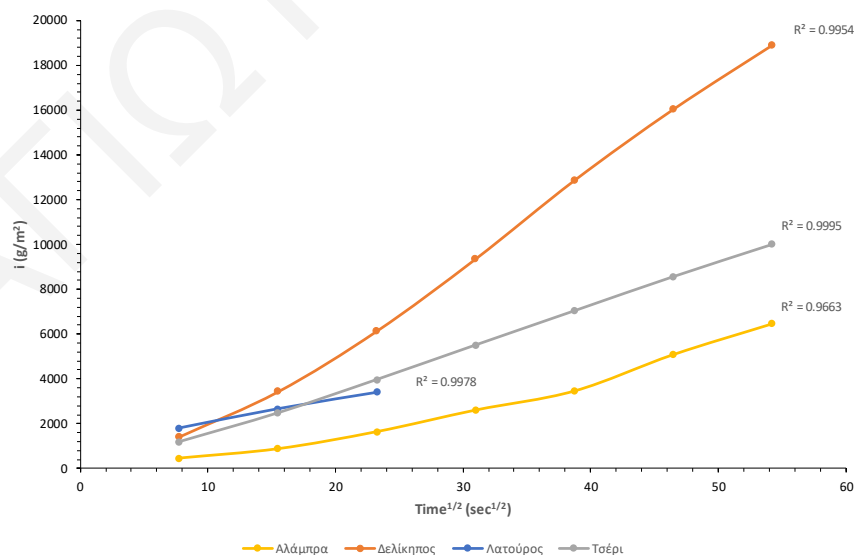
Πίνακας 26: Εικόνες από την επίδραση των κύκλων ύγρυνσης/ξήρανσης στα δοκίμια των υπό εξέταση συμπίεσμένων ωμοπλίνθων.

Κύκλος	Αλάμπρα	Δελίκηπος	Λατούρος	Τσέρι
Δείγμα αναφοράς				
1 ^{ος}				
2 ^{ος}				
3 ^{ος}				
4 ^{ος}				
5 ^{ος}				
6 ^{ος}				

Συνοψίζοντας, την καλύτερη συμπεριφορά στην εν λόγω δοκιμή είχαν τα δοκίμια με χώμα από την περιοχή Αλάμπρας. Τα υπόλοιπα δοκίμια αστόχησαν πολύ νωρίς, και έτσι δύσκολα θα μπορούσαν να βελτιωθούν ικανοποιητικά για να χρησιμοποιηθούν για δόμηση. Το σημαντικότερο πρόβλημα παρατηρήθηκε στα δοκίμια με χώμα από την περιοχή Δελίκηπου, όπου εντοπίστηκαν διογκώσεις, λόγω του υψηλού ποσοστού ενεργών αργιλικών ορυκτών και χλωρίτη στην εδαφική πρώτη ύλη (βλέπε Ενότητα 5.1.4). Τα δοκίμια με χώμα από την περιοχή Τσερίου, πιθανώς με την προσθήκη κάποιων σταθεροποιητικών πρόσθετων, όπως η άμμος, θα μπορούσαν να απορροφήσουν τις όποιες ογκομετρικές μεταβολές και να βελτιωθούν με σκοπό την αποδοχή τους για δόμηση.

6.1.4 Τριχοειδής απορροφητικότητα

Η δοκιμή τριχοειδούς απορροφητικότητας αποτελεί προσομοίωση της ανερχόμενης υγρασίας σε κτήρια. Στην παρούσα εργασία, η δοκιμή έγινε σύμφωνα με το πρότυπο EN 1925 (1999), το οποίο αφορά φυσικό λίθο, με απώτερο σκοπό τον προσδιορισμό του συντελεστή τριχοειδούς απορροφητικότητας. Αρχικά, η δοκιμή έγινε με την χρήση νερού, ως υγρό προς απορρόφηση, με την παρεμβολή σφουγγαριού μεταξύ του νερού και του δοκιμίου, με σκοπό την αποφυγή της άμεσης επαφής των δύο (Hall and Djerbib, 2004). Τα αποτελέσματα της δοκιμής έδειξαν ότι υπήρχε αλληλεπίδραση μεταξύ του νερού και του δοκιμίου, γεγονός που επιβεβαιώνεται από τη μη γραμμικότητα των αποτελεσμάτων (Εικ. 62). Αρχικά, η κλίση της καμπύλης φαίνεται να είναι μικρότερη από ότι στη συνέχεια σχεδόν σε όλα τα δοκίμια. Αυτό πιθανώς οφείλεται στην επίδραση του νερού στην αργιλώδη δομή των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων ή στην παρουσία ενός επιφανειακού στρώματος χαμηλότερης απορροφητικότητας.



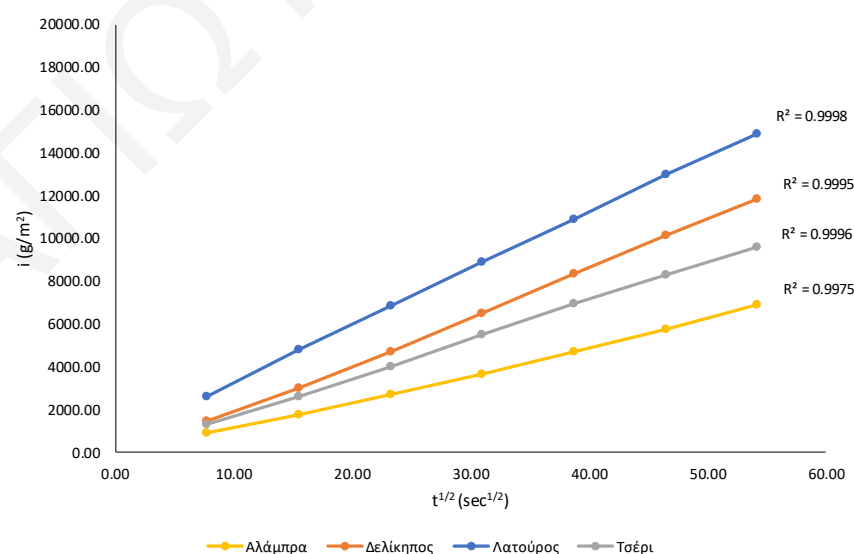
Εικόνα 62: Αντιπροσωπευτικές καμπύλες $i=f(t^{1/2})$ με την χρήση νερού για τους 4 τύπους των υπό εξέταση συμπιεσμένων ωμοπλίνθων.

Εντούτοις, πέραν από τις πιο πάνω παρατηρήσεις, τα αποτελέσματα έχουν συντελεστές $R^2 \geq 0.97$, γεγονός που με βάση το EN 1925 (1999) επιτρέπει την εξαγωγή συντελεστή τριχοειδούς απορροφητικότητας. Η συνθήκη αυτή τηρείται για όλους τους τύπους συμπιεσμένων ωμοπλίνθων,

πλην αυτών με χόμα από το λατομείο Λατούρου, όπου όλα τα δοκίμια αστόχησαν στην 3^η μέτρηση, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ικανοποιητικός αριθμός σημείων για εξαγωγή συντελεστή (τουλάχιστον 4-5 βάσει του EN 1925). Η αστοχία των δοκιμών με χόμα από το λατομείο Λατούρου σε δύο μέρη πρόκυπτε όταν το μέτωπο της υγρασίας έφτανε στις ρωγμές που σχηματίστηκαν κάθετα στη διεύθυνση της συμπίεσης (Κεφάλαιο 5.2). Τα γενικά συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από την Εικόνα 62 είναι πως οι ΣΩ με χόμα από την περιοχή Αλάμπρας έχουν το χαμηλότερο συντελεστή τριχοειδούς απορροφητικότητας, ακολουθούμενα από αυτά με χόμα από την περιοχή Τσερίου. Ο υψηλότερος συντελεστής τριχοειδούς απορροφητικότητας παρατηρείται στους ΣΩ με χόμα από την περιοχή Δελίκηπου.

Οι ΣΩ με χόμα από τις περιοχές Αλάμπρας και Τσερίου παρουσιάζουν την πυκνότερη δομή (βλέπε Ενότητα 5.2.), γεγονός που οδηγεί σε χαμηλή απορροφητικότητα, εν αντιθέσει με τους ΣΩ με χόμα από την περιοχή Δελίκηπου, τα οποία παρουσιάζουν σχετικά χαλαρή δομή, οπότε και την υψηλότερη απορροφητικότητα. Κατά τη δοκιμή τριχοειδούς απορροφητικότητας παρουσιάστηκαν επίσης προβλήματα διόγκωσης στα δοκίμια με χόμα από την περιοχή Δελίκηπου, γεγονός που επιβεβαιώνει την επίδραση του νερού. Αυτό είναι σε πλήρη συμφωνία με την ενεργότητα των εδαφών που χρησιμοποιήθηκαν, αφού το έδαφος από την περιοχή του Δελίκηπου ήταν το μόνο που χαρακτηρίστηκε ως ενεργό (βλέπε Ενότητα 5.1).

Τα πιο πάνω δεδομένα οδήγησαν στην προσπάθεια για εκτίμηση του συντελεστή τριχοειδούς απορροφητικότητας με ακετόνη, ενός οργανικού διαλύτη που δεν επιδρά με οποιοδήποτε τρόπο με τα δοκίμια. Στην προσπάθεια αυτή δεν χρειάστηκε η παρεμβολή σφουγγαριού, όπως με το νερό, οπότε το δοκίμιο τοποθετήθηκε απευθείας σε μη απορροφητικά στηρίγματα.



Εικόνα 63: Αντιπροσωπευτικές καμπύλες $i=f(t^{1/2})$ με την χρήση ακετόνης για τους 4 τύπους των υπό εξέταση συμπίεσμένων ωμοπλίνθων.

Στην Εικόνα 63 παρατίθεται το γράφημα $i=f(t^{1/2})$ με την χρήση ακετόνης ως υγρού προς απορρόφηση. Η γραμμικότητα των αποτελεσμάτων σε αυτή την περίπτωση είναι εμφανής, με συντελεστή $R^2 \approx 1$, οπότε η συμπεριφορά των υλικών φαίνεται ότι δεν επηρεάζεται από την

ακετόνη. Εν τούτοις, στα δοκίμια με χρώμα από τις περιοχές Αλάμπρας και Τσερίου παρατηρείται μια μικρή καμπύλωση στο αρχικό τμήμα των αποτελεσμάτων, οπότε είναι πιθανή η ύπαρξη ενός επιφανειακού στρώματος χαμηλότερης απορροφητικότητας.

Στον Πίνακα 27 συνοψίζονται οι τιμές του συντελεστή τριχοειδούς απορροφητικότητας. Η χαμηλότερη τιμή παρατηρείται για τους συμπιεσμένους ωμόπλινθους με χρώμα από την περιοχή Αλάμπρας. Λίγο υψηλότερη είναι η τιμή για τους ΣΩ με χρώμα από την περιοχή Τσερίου, ενώ αρκετά υψηλότερες είναι οι τιμές για τους ΣΩ με χρώμα από την περιοχή Δελίκηπου και το λατομείο Λατούρου. Οι παρατηρήσεις που έγιναν στο Κεφάλαιο 5.2 για τη δομή των υλικών δικαιολογούν πλήρως τις τιμές που παρατηρούνται. Τα υλικά με την πιο πυκνή δομή, δηλαδή οι ΣΩ με χρώμα από τις περιοχές Αλάμπρας και Τσερίου, έχουν χαμηλότερη απορροφητικότητα από αυτά με την πιο χαλαρή δομή. Ωστόσο, η δομή των ΣΩ με χρώμα από την περιοχή Τσερίου είναι πυκνότερη από αυτή των ΣΩ με χρώμα από την περιοχή Αλάμπρας, γεγονός που θα οδηγούσε στο συμπέρασμα ότι θα έπρεπε να είχαν και χαμηλότερη απορροφητικότητα. Εντούτοις, οι πολλοί μικροί πόροι που παρατηρούνται στους ΣΩ με χρώμα από την περιοχή Τσερίου (βλέπε Εικ. 44, Ενότητα 5.2.3) ανεβάζουν αρκετά την απορροφητικότητα των εν λόγω δοκιμίων.

Πίνακας 27: Συντελεστής τριχοειδούς απορροφητικότητας για τους υπό εξέταση συμπιεσμένους ωμόπλινθους.

Τύπος συμπιεσμένου ωμόπλινθου	Συντελεστής τριχοειδούς απορροφητικότητας $g/m^2 sec^{1/2}$ (ΣΔ)
Αλάμπρας	144 (14%)
Δελίκηπος	230 (7%)
Λατούρος	263 (9%)
Τσέρι	182 (11%)

Τα αποτελέσματα που καταγράφονται συμβαδίζουν με αυτά που παρατηρούνται στη βιβλιογραφία. Οι τιμές του συντελεστή τριχοειδούς απορροφητικότητας βρίσκονται στα κατώτερα όρια τιμών που παρατηρούνται στη βιβλιογραφία (Fabbri et al., 2019; Subramaniaprasad et al., 2014), γεγονός που έρχεται σε πλήρη συμφωνία με τα προηγούμενα αποτελέσματα των δοκιμών ανθεκτικότητας, όπου γενικώς τα υπό εξέταση υλικά παρουσιάζουν πολύ καλή συμπεριφορά σε σχέση με υλικά ίδιου τύπου τα οποία συναντώνται σε άλλες μελέτες.

6.1.5 Σύνοψη και συσχετισμοί

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάστηκε η ανθεκτικότητα των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων με διάφορες μεθόδους. Για τη μελέτη της επίδρασης που θα έχει η βροχόπτωση έγιναν οι δοκιμές σταγόνες και ψεκασμού υπό πίεση (NZS 4298, 1998), για την επίδραση των εναλλασσόμενων κύκλων ύγρανσης/ξήρανσης στο υλικό έγινε η ομώνυμη δοκιμή που περιγράφεται στο NZS 4298 (1998), και για τη μελέτη της ανερχόμενης υγρασίας η δοκιμή τριχοειδούς απορροφητικότητας (EN 1925, 1999). Οι δοκιμές που έγιναν δίδουν έμφαση στην επίδραση του νερού, που αποτελεί τον πλέον σημαντικό παράγοντα φθοράς αυτών των υλικών.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών ανθεκτικότητας δείχνουν μια εμφανή υπεροχή των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων με χώμα από την περιοχή Αλάμπρας. Οι συγκεκριμένοι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι παρουσιάζουν την πιο χαμηλή διείσδυση στις δοκιμές ψεκασμού υπό πίεση και σταγόνas (εφάμιλλη με τους ΣΩ με χώμα από την περιοχή Τσερίου), όπως και το χαμηλότερο συντελεστή τριχοειδούς απορροφητικότητας. Επίσης, έχουν την καλύτερη συμπεριφορά στη δοκιμή ύγρανσης/ξήρανσης.

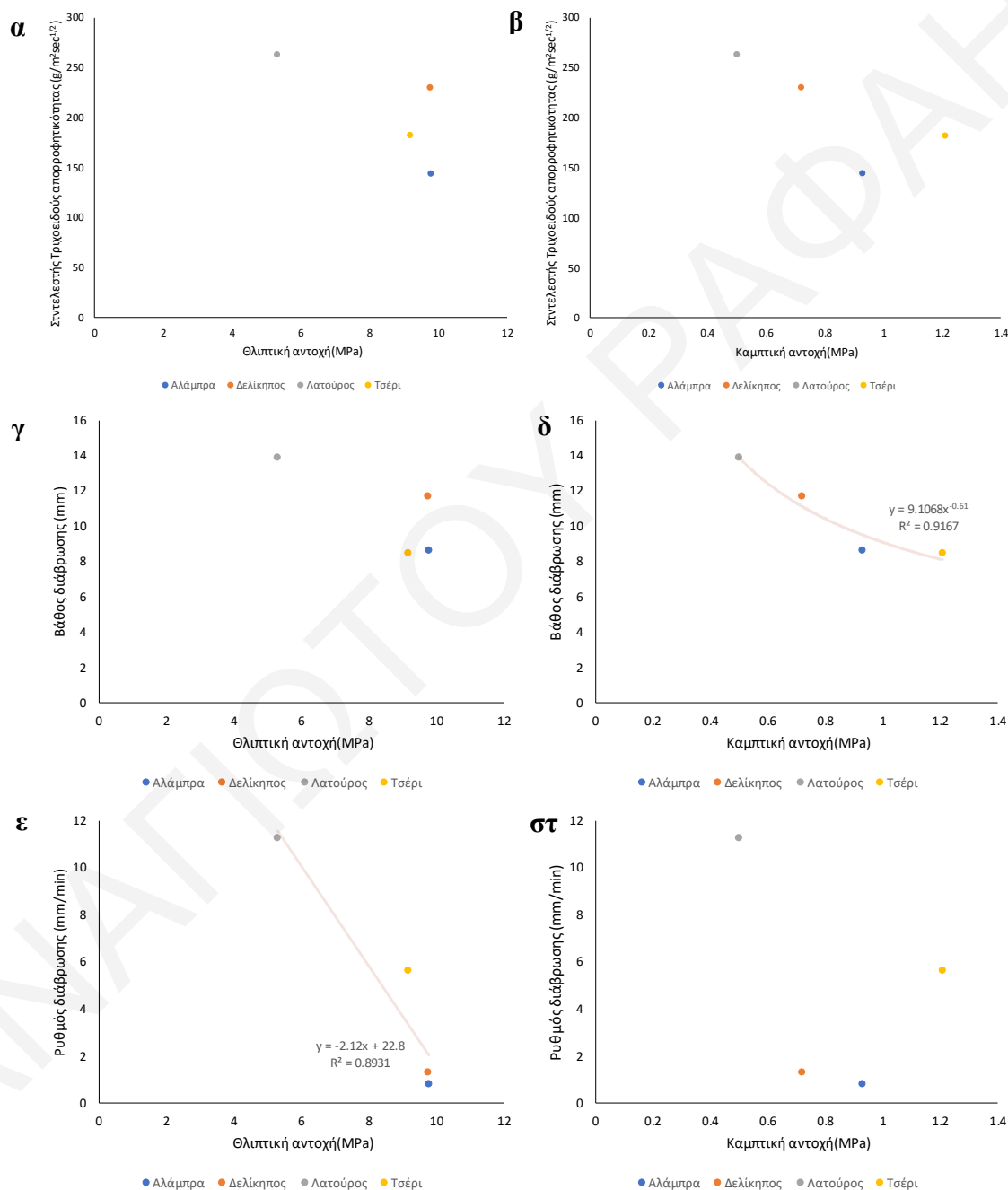
Οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι με χώμα Δελίκηπου, αν και παρουσιάζουν αρκετά καλές μηχανικές αντοχές, εντούτοις όσον αφορά την ανθεκτικότητά τους φαίνεται ότι έχουν σημαντικά προβλήματα. Παρουσιάζουν σχετικά υψηλή τιμή διείσδυσης στη δοκιμή σταγόνas, υψηλή τιμή συντελεστή τριχοειδούς απορροφητικότητας, και αποτυγχάνουν στους εναλλασσόμενους κύκλους ύγρανσης/ξήρανσης. Στη δοκιμή ψεκασμού υπό πίεση παρουσιάζουν αρκετά καλή συμπεριφορά, σχετικά με τους υπόλοιπους υπό εξέταση ΣΩ, ωστόσο και σε αυτή την περίπτωση η τιμή που λαμβάνουν κρίνεται υψηλή. Το στοιχείο, όμως, το οποίο καθιστά τους συγκεκριμένους ΣΩ ως μη αποδεκτούς είναι η διογκωσιμότητά τους. Η υψηλή περιεκτικότητα της εδαφικής πρώτης ύλης σε διογκούμενα ορυκτά (Κεφάλαιο 5.1.4) συμβάλλει ουσιαστικά στη δυνατότητα του υλικού να διογκώνεται/συρρικνώνεται, ανάλογα με την περιεχόμενη υγρασία.

Οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι με χώμα από το λατομείο Λατούρου παρουσιάζουν αρκετά κακή συμπεριφορά στις δοκιμές ανθεκτικότητας. Έχουν τις υψηλότερες τιμές διείσδυσης δοκιμές ψεκασμού υπό πίεση και σταγόνas, τον υψηλότερο συντελεστή τριχοειδούς απορροφητικότητας, και αποτυγχάνουν από τον 1^ο κύκλο στη δοκιμή ύγρανσης/ξήρανσης. Τα αποτελέσματα αυτά ήταν αναμενόμενα, αφού το τελικό προϊόν χαρακτηρίζεται από χαλαρή δομή και κακή συνοχή ανάμεσα στους κόκκους και το συνδετικό υλικό.

Οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι με χώμα από την περιοχή Τσερίου έχουν μια διαφορούμενη συμπεριφορά. Από τη μια, παρουσιάζουν μικρή διείσδυση στη δοκιμή σταγόνas και χαμηλό, σχετικά, συντελεστή τριχοειδούς απορροφητικότητας, ενώ από την άλλη αποτυγχάνουν στις δοκιμές κύκλων ύγρανσης/ξήρανσης και ψεκασμού υπό πίεση. Η αρκετά πυκνή δομή τους συνεισφέρει στις χαμηλές τιμές στις δύο πρώτες δοκιμές, ωστόσο η απουσία χονδρόκοκκων, που θα δημιουργούσαν πιο σταθερή δομή στο τελικό προϊόν, οδηγεί τα δοκίμια σε αστοχία στις δύο τελευταίες δοκιμές. Είναι χαρακτηριστικό ότι στα εν λόγω δοκίμια σχηματίζονται εκτεταμένες crazing-type ρωγμές, που συνδέονται με τις ογκομετρικές μεταβολές του υλικού, αφού δεν υπάρχει καθόλου χονδρόκοκκο στην εδαφική πρώτη ύλη.

Όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 3.3, ο χαρακτηρισμός των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων και η σύνδεσή τους με το σχεδιασμό που αφορά την ανθεκτικότητα βασίζεται στο LEI. Ο δείκτης αυτός προσδιορίζεται από τις δοκιμές ψεκασμού υπό πίεση και σταγόνas, και με βάση τον Πίνακα 2.1 του NZS 4298 (1998) απαιτείται η μια από τις δύο προαναφερθείσες δοκιμές για τον χαρακτηρισμό των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων. Τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής, ωστόσο, καταδεικνύουν τη σημασία και των δύο δοκιμών ανθεκτικότητας, αφού κάποιιοι από τους συμπιεσμένους ωμόπλινθους που εξετάστηκαν παρουσιάζουν διαφορετικούς συντελεστές στην κάθε δοκιμή (βλ. Πίνακες 23 και

24). Συγκεκριμένα, οι ΣΩ με χρώμα από την περιοχή Τσερίου λαμβάνουν τιμή LEI=3 στη δοκιμή σταγόνας, ενώ στη δοκιμή ψεκασμού υπό πίεση λαμβάνουν τιμή LEI=5. Από την άλλη, οι ΣΩ με χρώμα Δελίκηπου έχουν σημαντικά καλύτερη συμπεριφορά στη δοκιμή ψεκασμού υπό πίεση, όπου λαμβάνουν τιμή LEI=3, ενώ στη δοκιμή σταγόνας παρουσιάζουν τη δεύτερη υψηλότερη τιμή με LEI=4. Τα αποτελέσματα για τους άλλους τύπους συμπιεσμένων ωμοπλίνθων που εξετάστηκαν συμπίπτουν στις δύο δοκιμές. Αυτό δείχνει ότι δεν μπορεί η μια δοκιμή να αναιρέσει την άλλη, και πως τα αποτελέσματα που δίδουν δεν είναι κατ' ανάγκη ταυτόσημα για ίδια υλικά.



Εικόνα 64: Διαγράμματα συσχέτισης μηχανικών χαρακτηριστικών και ανθεκτικότητας. α) Συντελεστής τριχοειδούς απορροφητικότητας vs. θλιπτική αντοχή, β) Συντελεστής τριχοειδούς απορροφητικότητας vs. καμπτική αντοχή, γ) Βάθος διάβρωσης (δοκιμή σταγόνας) vs. θλιπτική αντοχή, δ) Βάθος διάβρωσης (δοκιμή σταγόνας) vs. καμπτική αντοχή, ε) Ρυθμός διάβρωσης (δοκιμή ψεκασμού υπό πίεση) vs. θλιπτική αντοχή και στ) Ρυθμός διάβρωσης (δοκιμή ψεκασμού υπό πίεση) vs. καμπτική αντοχή.

Σημειώνεται ότι, παλαιότερα, η ανθεκτικότητα των υλικών δεν αποτελούσε αντικείμενο μελέτης, και η όποια μελέτη ΣΩ περιοριζόταν στα μηχανικά χαρακτηριστικά των τελικών προϊόντων. Τα τελευταία χρόνια, ωστόσο, το σκηνικό έχει αλλάξει, αφού διαπιστώθηκε ότι ένα υλικό με ικανοποιητικά μηχανικά χαρακτηριστικά δεν παρουσιάζει, πάντα, ικανοποιητική ανθεκτικότητα. Στην Εικόνα 64 παρατηρούνται τα διαγράμματα συσχέτισης της θλιπτικής και καμπτικής αντοχής με τα αποτελέσματα των δοκιμών ανθεκτικότητας. Γενικά, η ανθεκτικότητα των ΣΩ που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής φαίνεται να βελτιώνεται ανάλογα με τις αντοχές τους. Τα αποτελέσματα από τη δοκιμή ψεκασμού υπό πίεση φαίνεται να συσχετίζονται καλύτερα με την θλιπτική αντοχή των δοκιμίων, ενώ αυτά της δοκιμής της σταγόνας με την καμπτική αντοχή. Ο συντελεστής τριχοειδούς απορροφητικότητας δεν παρουσιάζει ισχυρή συσχέτιση με κάποια από τις αντοχές, αν και υπάρχουν ενδείξεις καλύτερης συσχέτισης με την καμπτική αντοχή. Σημειώνεται ότι τα δεδομένα που καταγράφονται δεν είναι επαρκή για να εξαχθούν συμπεράσματα με βεβαιότητα, οπότε η αύξηση του πλήθους των δεδομένων θα βοηθούσε σε ασφαλέστερη συσχέτιση.

Όταν συγκριθούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των τελικών προϊόντων με τα συμπεράσματα από τη δοκιμή κύκλων ύγρανσης/ξήρανσης, τότε παρατηρείται εμφανώς η απουσία κάποιας συσχέτισης μεταξύ μηχανικών χαρακτηριστικών και ανθεκτικότητας. Οι ΣΩ με χώμα από την περιοχή Τσερίου, τα οποία παρουσιάζουν υψηλή θλιπτική και καμπτική αντοχή, αστοχούν από το 1^ο κύκλο ύγρανσης/ξήρανσης, όπως επίσης και οι ΣΩ με χώμα από την περιοχή Δελίκηπου, που αστοχούν στο 2^ο κύκλο ύγρανσης/ξήρανσης, αν και έχουν την υψηλότερη θλιπτική αντοχή (μαζί με τους ΣΩ με χώμα από την περιοχή Αλάμπρας).

Τα αποτελέσματα από τη μελέτη της ανθεκτικότητας των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων παρουσιάζουν αρκετά θετικά σημεία. Ειδικά για τους ΣΩ με χώμα από την περιοχή Αλάμπρας, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το υλικό έχει αρκετές δυνατότητες για να ενταχθεί στη δόμηση, ακόμα και χωρίς την οποιαδήποτε μορφή σταθεροποίησης. Οι υπόλοιποι τύποι συμπιεσμένων ωμόπλινθων δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς να σταθεροποιηθούν, με την πιο δύσκολη περίπτωση να εντοπίζεται στους συμπιεσμένους ωμόπλινθους με χώμα από την περιοχή Δελίκηπου, οι οποίοι παρουσιάζουν προβλήματα διογκώσεων. Η προσθήκη χονδρόκοκκων, κυρίως άμμου, στο έδαφος Τσερίου, πιθανώς να βελτιώνει τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος, αφού τα περισσότερα προβλήματα που παρουσιάζει το εν λόγω υλικό σχετίζονται με την καθόλα λεπτόκοκκη υφή του.

7. Συμπεράσματα και εισηγήσεις για μελλοντική έρευνα

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται παράθεση των συμπερασμάτων που προέκυψαν από τη μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας και των συμπεσμένων ωμόπλινθων που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Επίσης, γίνονται εισηγήσεις για μελλοντική έρευνα στο πεδίο των συμπεσμένων ωμοπλίνθων.

Η γήινη δόμηση αποτελεί μια από τις αρχαιότερες μορφές δόμησης, η οποία πρωτοεμφανίστηκε τουλάχιστον 10000 χρόνια πριν. Η χρήση γήινων υλικών δόμησης γινόταν συνεχόμενα μέχρι τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, οπότε και άρχισαν να παραγκωνίζονται από άλλα βιομηχανοποιημένα υλικά. Αν και τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια αναθέρμανση του ενδιαφέροντος για γήινη δόμηση, εντούτοις το ενδιαφέρον αυτό, σε τοπικό επίπεδο, περιορίζεται κυρίως στο ερευνητικό κομμάτι, και όχι τόσο στην εισαγωγή γήινων υλικών στην οικοδομική βιομηχανία.

Το κυριότερο μειονέκτημα των γήινων υλικών δόμησης γενικά, και ειδικότερα των συμπεσμένων ωμόπλινθων, που αποτέλεσαν και το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διατριβής, όπως αυτό πηγάζει μέσα από τη βιβλιογραφία, είναι η έλλειψη κανονιστικών εγγράφων που θα διέπουν την χρήση τους. Η απουσία τέτοιων εγγράφων, τόσο σε διεθνές, όσο και σε τοπικό επίπεδο, αυξάνει τη διστακτικότητα των μελετητών απέναντι στο υλικό, με αποτέλεσμα να μην το προτείνουν στους τελικούς χρήστες, ή/και να το απορρίπτουν ως αναξιόπιστο. Ακόμη και ανάμεσα στην ίδια την ερευνητική κοινότητα επικρατεί μια σύγχυση αναφορικά με τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για αξιολόγηση των συμπεσμένων ωμόπλινθων. Οι μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιούνται, για παράδειγμα, για τον καθορισμό των μηχανικών ή φυσικών χαρακτηριστικών αυτών των υλικών, πολλές φορές στηρίζονται σε άλλα υλικά, και εκ του αποτελέσματος κρίνονται ως ακατάλληλες.

Στην Κύπρο, οι συμπεσμένοι ωμόπλινθοι εμφανίστηκαν σχετικά πρόσφατα και δεν χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα. Σε έργα συντήρησης/αποκατάστασης υφιστάμενων κτηρίων, χρησιμοποιούνται μόνο παραδοσιακοί ωμόπλινθοι, προκειμένου να διατηρηθεί ο ιστορικός χαρακτήρας των κατασκευών.

Η παρούσα εργασία προσδοκεί στην εκπλήρωση μέρους του κενού που παρατηρείται στο αντικείμενο των συμπεσμένων ωμοπλίνθων στην Κύπρο. Μέσα από αυτή επιχειρείται μια ολιστική προσέγγιση στους μη-σταθεροποιημένους συμπεσμένους ωμόπλινθους που συμπεριλαμβάνει το χαρακτηρισμό της πρώτης ύλης, τη μελέτη των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των τελικών προϊόντων, όπως και της ανθεκτικότητάς τους στο χρόνο, με έμφαση στην επίδραση του νερού.

7.1 Χαρακτηρισμός πρώτης ύλης

Η πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται για την παραγωγή συμπεσμένων ωμοπλίνθων είναι το έδαφος. Ο χαρακτηρισμός του εδάφους ουσιαστικά έχει ως στόχο τη κατανόηση των χαρακτηριστικών του, και πως αυτά θα επιδράσουν στο παραγόμενο τελικό προϊόν. Στην παρούσα

εργασία έγιναν δοκιμές προσδιορισμού των ορίων Atterberg, της κοκκομετρικής διαβάθμισης, της συμπιεστότητας και της ορυκτολογίας 4 διαφορετικών τοπικών εδαφών. Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι:

- Η μελέτη των εδαφικών υλικών δεν μπορεί να περιοριστεί μόνο σε μια εργαστηριακή δοκιμή για καθορισμό της καταλληλότητάς τους. Η αξιολόγηση των εδαφών πρέπει να γίνεται συνδυαστικά, μέσα από τα αποτελέσματα διαφόρων δοκιμών, προκειμένου να εξαχθούν σωστά συμπεράσματα για τη συμπεριφορά τους.
- Η ορυκτολογία των εδαφικών πρώτων υλών αποτελεί μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους και άρα πρέπει να διερευνάται. Η παρουσία ενεργών αργιλικών ορυκτών έχει καταστρεπτικές συνέπειες όταν το υλικό υποβάλλεται σε εναλλασσόμενους κύκλους ύγρανσης/ξήρανσης.
- Τα 4 τοπικά εδάφη, τα οποία αξιολογήθηκαν για την παραγωγή συμπιεσμένων ωμοπλίνθων, παρουσιάζουν αρκετές διαφορές. Ως το πλέον κατάλληλο κρίνεται το έδαφος από την περιοχή της Αλάμπρας, αφού τηρεί επαρκώς σχεδόν όλες τις απαιτήσεις που θέτει η CraTerre-EAG (1998) και, επίσης, παρουσιάζει αρκετά καλή ορυκτολογική σύσταση. Το έδαφος από την περιοχή του Δελίκηπου παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα διογκώσεων, λόγω της υψηλής του περιεκτικότητας σε ενεργά αργιλικά ορυκτά, ενώ τα εδάφη από τις περιοχές Τσερίου και το λατομείο Λατούρου στερούνται των χονδρόκοκκων, που θα προσέδιδαν σταθερότητα στο τελικό προϊόν.

7.2 Θερμομονωτικές και φυσικές ιδιότητες συμπιεσμένων ωμοπλίνθων

Τα γήινα δομικά υλικά, γενικά, δεν ικανοποιούν τους ισχύοντες κανονισμούς θερμικής συμπεριφοράς των κατασκευών. Οι κανονισμοί, κατά κύριο λόγο, εστιάζουν στη τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, λ , χωρίς να λαμβάνουν υπόψιν τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά που καθορίζουν τη συνολική θερμική συμπεριφορά ενός δομικού υλικού. Στην παρούσα εργασία έγιναν μετρήσεις του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, της ογκομετρικής/ειδικής θερμοχωρητικότητας και της θερμικής διάχυσης. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι:

- Οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι παρουσιάζουν σχετικά υψηλές τιμές συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, που δεν ικανοποιούν σε καμία περίπτωση τις απαιτήσεις των υφιστάμενων κανονισμών. Ωστόσο, παρατηρούνται παράλληλα και αρκετά υψηλές τιμές ειδικής θερμοχωρητικότητας, οι οποίες βοηθούν στην καλύτερη θερμική συμπεριφορά του υλικού στην πράξη.
- Σε καμία περίπτωση οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι, όπως και τα υπόλοιπα γήινα δομικά υλικά, δεν πρέπει να αξιολογούνται μόνο στη βάση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητάς τους.
- Υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ της πυκνότητας των τελικών προϊόντων και των θερμικών τους χαρακτηριστικών. Γενικά, με αύξηση της πυκνότητας αυξάνεται ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας των υλικών.

7.3 Μηχανικά χαρακτηριστικά συμπιεσμένων ωμοπλίνθων

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων αποτελούν το κυριότερο παράγοντα αξιολόγησης των υλικών αυτών ως προς την ικανότητά τους να παραλάβουν τα φορτία που θα δεχθεί μια κατασκευή στη διάρκεια ζωής της. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά εξετάζονται συνήθως σε διάφορα μεγέθη/είδη δοκιμίων, είτε μεμονωμένων ωμοπλίνθων ή συμπλόκων ή τοιχίων. Ακόμη, μπορούν να γίνουν και δοκιμές σε υπό κλίμακα κατασκευές. Στην παρούσα εργασία, τα μηχανικά χαρακτηριστικά που εξετάστηκαν περιορίστηκαν σε δοκίμια συμπιεσμένων ωμοπλίνθων, διαφόρων διαστάσεων. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι:

- Αύξηση των αντοχών με αύξηση της πυκνότητας των δοκιμίων. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε κυρίως στην θλιπτική αντοχή, ενώ στην καμπτική αντοχή η υψηλότερη τιμή καταγράφηκε για τους συμπιεσμένους ωμοπλίνθους με χρώμα από την περιοχή Τσερίου, κάτι που δεν συμβαδίζει με την τάση των υπόλοιπων δεδομένων. Οι ΣΩ αυτοί παρουσιάζουν αυξημένη καμπτική αντοχή και ψαθυρή αστοχία, που πιθανώς οφείλεται στην πυκνή τους δομή και στην υψηλή συμμετοχή πυριτικών ορυκτών στη σύστασή τους.
- Οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι που εξετάστηκαν παρουσίασαν αρκετά υψηλές τιμές θλιπτικής αντοχής, που ικανοποιούν τις συνθήκες όλων των κανονιστικών εγγράφων που μελετήθηκαν (Κεφάλαιο 3, Πίνακας 5). Οι υψηλότερες τιμές θλιπτικής αντοχής καταγράφηκαν στους ΣΩ με χρώμα από τις περιοχές Αλάμπρας και Δελίκηπου, ενώ η χαμηλότερη τιμή σε αυτά με χρώμα από το λατομείο Λατούρου.
- Η μελέτη δοκιμίων διαφόρων διαστάσεων φανέρωσε την επίδραση του μεγέθους στην θλιπτική αντοχή. Οι δυνάμεις περισφιγξης που αναπτύσσονται ανάμεσα σε δοκίμια μικρότερου λόγου ύψους/πλάτους και μεγαλύτερης επιφάνειας επαφής με την πλάκα φόρτισης αυξάνουν τη μετρούμενη θλιπτική αντοχή.
- Από πλευράς μηχανικών χαρακτηριστικών, οι βέλτιστες ιδιότητες καταγράφηκαν για τους ΣΩ με χρώμα από την περιοχή Τσερίου. Τα χειρότερα μηχανικά χαρακτηριστικά παρατηρήθηκαν στους ΣΩ με χρώμα από το λατομείο Λατούρου.

7.4 Ανθεκτικότητα στο χρόνο

Η μελέτη της ανθεκτικότητας των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων αποτελεί σημαντικότερο παράμετρο στο σχεδιασμό μιας κατασκευής. Η διατήρηση σε βάθος χρόνου των αρχικών χαρακτηριστικών των δομικών υλικών θεωρείται σημαντική, ούτως ώστε το υλικό να θεωρείται περιβαλλοντικά φιλικό. Στο NZS 4297 (1998) τίθεται ως κατώτατο όριο για να θεωρείται μια κατασκευή ανθεκτική τα 50 χρόνια διάρκειας ζωής. Ο κυριότερος παράγοντας φθοράς των ωμοπλινθοδομών είναι η επαφή τους με το νερό, στην οποία επικεντρώθηκε και η παρούσα εργασία. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι:

- Οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι που εξετάστηκαν μπορούν να ενταχθούν στη δόμηση, ωστόσο πρέπει να προστατεύονται κατάλληλα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι συμπιεσμένοι

ωμόπλινθοι με χώμα από την περιοχή Αλάμπρας παρουσίασαν την καλύτερη συμπεριφορά, ενώ οι ΣΩ με χώμα από το λατομείο Λατούρου παρουσίασαν τις χειρότερες ιδιότητες σε όλες τις δοκιμές που εκπονήθηκαν. Οι ΣΩ με χώμα από την περιοχή Δελίκηπου παρουσίασαν ιδιαίτερα προβλήματα διογκώσεων.

- Στη δοκιμή ψεκασμού υπό πίεση επιτεύχθηκαν καλύτερα αποτελέσματα με αύξηση της πυκνότητας και της θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων. Κάτι τέτοιο δεν παρατηρήθηκε στη δοκιμή σταγόνας, η οποία φαίνεται να συσχετίζεται καλύτερα με την καμπτική αντοχή των δοκιμίων.
- Η ανάπτυξη των διατάξεων για τη δοκιμή ψεκασμού υπό πίεση και σταγόνας κρίνεται επιτυχής. Οι εν λόγω διατάξεις οδήγησαν σε αποτελέσματα τα οποία βοήθησαν στην αξιολόγηση των υλικών από πλευράς ανθεκτικότητας. Η ικανότητα περαιτέρω προσαρμογής τους μπορεί να βοηθήσει στην τροποποίηση των δοκιμών, με σκοπό τη βελτίωση της συσχέτισής τους με τις πραγματικές συνθήκες.
- Οι καλές ιδιότητες που παρατηρήθηκαν στις δοκιμές ψεκασμού υπό πίεση, σταγόνας και τριχοειδούς απορροφητικότητας δεν αποτελούν, από μόνες τους, δείκτη καταλληλότητας των υπό εξέταση υλικών. Αυτό φάνηκε στους εναλλασσόμενους κύκλους ύγρανσης/ξήρανσης, όπου τα δοκίμια με χώμα από τις περιοχές Δελίκηπου και Τσερίου, τα οποία παρουσίασαν αρκετά καλές ιδιότητες σε κάποιες μεμονωμένες δοκιμές, απέτυχαν λόγω ακαταλληλότητας της πρώτης ύλης ή κακής παραγωγής.
- Επίσης, παρατηρήθηκαν μεγάλες μεταβολές στις ιδιότητες διαφορετικών δοκιμών του ίδιου τύπου συμπίεσμένου ωμόπλινθου. Το φαινόμενο αυτό δείχνει ανομοιογένεια στο υλικό, που πιθανώς οφείλονται στην υιοθέτηση λανθασμένων πρακτικών κατά την παραγωγή.
- Η ανθεκτικότητα των τελικών προϊόντων, και κατ' επέκταση η καταλληλότητα τους για χρήση στη δόμηση, φαίνεται να μην συσχετίζεται έντονα με τα μηχανικά χαρακτηριστικά. Οι ΣΩ με χώμα από την περιοχή Τσερίου, για παράδειγμα, παρουσίασαν αρκετά καλές μηχανικές ιδιότητες, ωστόσο από πλευράς ανθεκτικότητας παρουσίασαν σημαντικά προβλήματα.

7.5 Γενικά

Η συνολική αξιολόγηση των συμπίεσμένων ωμοπλίνθων είναι αυτή που τελικά θα καθορίσει την καταλληλότητα του υλικού για δόμηση. Από τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις επιμέρους ενότητες της παρούσας εργασίας, φαίνεται ότι οι συμπίεσμένοι ωμόπλινθοι που παράγονται στην Κύπρο μπορούν να ενταχθούν στη δόμηση. Η δόμηση, όμως, με αυτά τα υλικά είναι ιδιότυπη, και χρειάζεται έμπειρους μελετητές, καθώς επίσης και περαιτέρω μελέτη των τελικών προϊόντων.

Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών ελέγχων κατέδειξαν ότι το πλέον κατάλληλο από τα υπό εξέταση υλικά είναι οι συμπίεσμένοι ωμόπλινθοι με χώμα από την περιοχή Αλάμπρας. Οι συγκεκριμένοι ΣΩ παρουσίασαν τις καλύτερες ιδιότητες από πλευράς ανθεκτικότητας, ενώ είχαν

και αρκετά καλά μηχανικά χαρακτηριστικά. Οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι με χρώμα από την περιοχή Τσερίου, αν και παρουσίασαν τα καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά, εντούτοις υστέρησαν από πλευράς ανθεκτικότητας. Οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι με χρώμα από την περιοχή Δελίκηπου παρουσίασαν αρκετά καλά μηχανικά χαρακτηριστικά, αλλά από πλευράς ανθεκτικότητας παρουσίασαν και αυτά προβλήματα. Μάλιστα, οι εν λόγω ωμόπλινθοι θα μπορούσαν να απορριφθούν από το στάδιο της μελέτης της πρώτης ύλης, αφού εντοπίστηκε αρκετά μεγάλη συμμετοχή ενεργών αργιλικών ορυκτών σε αυτή, που καθιστά τους ΣΩ ευάλωτους στους εναλλασσόμενους κύκλους ύγρανσης/ξήρανσης. Οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι με χρώμα από το λατομείο Λατούρου δεν παρουσίασαν ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες, ούτε ιδιαίτερη αντίσταση στη διάβρωση, εξ' ου και θεωρήθηκαν ακατάλληλοι.

Η αξιολόγηση των υλικών με βάση τα θερμομονωτικά χαρακτηριστικά δεν λήφθηκε υπόψη, καθώς όλοι οι τύποι συμπιεσμένων ωμόπλινθων που εξετάστηκαν απέχουν αρκετά από τα επιθυμητά, από τους κανονισμούς, όρια.

7.6 Εισηγήσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα εργασία αποτελεί μια πρώτη προσπάθεια για αξιολόγηση των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων που παράγονται στην Κύπρο. Η μελέτη των μη-σταθεροποιημένων τοπικών συμπιεσμένων ωμοπλίνθων, αλλά και της σχετικής βιβλιογραφίας, φανέρωσαν αρκετά κενά τα οποία χρήζουν μελλοντικής έρευνας.

- Ο χρόνος ανάμιξης της εδαφικής πρώτης ύλης με το νερό πρέπει να ελεγχθεί, αφού επιφέρει σημαντικές διαφοροποιήσεις στις ιδιότητες των τελικών προϊόντων. Όπως επισημαίνει ο Minke (2006), η αύξηση του χρόνου ανάμιξης από 1 min σε 10 min, επιφέρει αύξηση της συνοχής κατά 57%.
- Η σταθεροποίηση των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων έχει ως στόχο τη βελτίωση των ιδιοτήτων των τελικών προϊόντων. Η παραγωγή μειγμάτων, στα οποία θα προστίθενται ίνες, τσιμέντο, ασβέστης ή άλλα σταθεροποιητικά υλικά, με σκοπό τη βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών και της ανθεκτικότητας των τελικών προϊόντων, πρέπει να εξεταστεί. Επίσης, πρέπει να εξεταστεί και η πιθανή επίδραση της διαφοροποίησης της κοκκομετρικής διαβάθμισης της εδαφικής πρώτης ύλης, με ανάμιξη δύο ή/και περισσότερων εδαφών.
- Η εκτίμηση της ανθεκτικότητας με βάση τη διατήρηση των αντοχών των τελικών προϊόντων σε συνθήκες κορεσμού ή ημι-κορεσμού αποτελεί μια αρκετά καλή μέθοδο αξιολόγησης ΣΩ η οποία δεν απαιτεί ιδιαίτερο εξοπλισμό. Ο προσδιορισμός, λοιπόν, της θλιπτικής αντοχής κορεσμένων ή/και ημι-κορεσμένων δοκιμίων θα βοηθήσει στην εκτίμηση της θλιπτικής αντοχής των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων, όταν η τοιχοποιία θα βρίσκεται σε κορεσμό (ή πλησίον αυτού).
- Ο προσδιορισμός της θλιπτικής αντοχής των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων στην παρούσα φάση γίνεται με την εφαρμογή προτύπων που αναφέρονται σε άλλα δομικά υλικά. Ο προσδιορισμός της θλιπτικής αντοχής με σύμπλοκα δοκίμια, δηλαδή ΣΩ κομμένους στη

μέση και ενωμένους, με ή χωρίς συνδετικό κονίαμα, πρέπει να εξεταστεί. Αυτό αυξάνει το λόγο ύψους/πλάτους με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αξιοπιστία του τελικού αποτελέσματος. Η δοκιμή αυτή προτείνεται ήδη σε κάποιους κανονισμούς και από την RILEM.

- Όπως φάνηκε, η επίδραση του μεγέθους των δοκιμίων είναι σημαντική στη μετρούμενη θλιπτική αντοχή. Οι συντελεστές κανονικοποίησης που υιοθετήθηκαν, και που αφορούν άλλα δομικά υλικά, φαίνεται ότι είναι ακατάλληλοι για χρήση στους συμπιεσμένους ωμόπλινθους. Η εξαγωγή συντελεστών που θα αναφέρονται ειδικά στους συμπιεσμένους ωμόπλινθους είναι επιβεβλημένη, προκειμένου να γίνεται σύγκριση ανάμεσα σε αποτελέσματα που προκύπτουν από διάφορα μεγέθη.
- Οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι, λόγω ακριβώς της διαδικασίας συμπίεσης, παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά, ανάλογα με τη διεύθυνση στην οποία εξετάζονται. Η θλιπτική αντοχή των δοκιμίων πρέπει να εκτιμηθεί ανάλογα με τη διεύθυνση φόρτισής τους.
- Η απορροφητικότητα σε τέτοιου είδους υλικά, κυρίως σε μη-σταθεροποιημένα δοκίμια, καθίσταται δύσκολο να εκτιμηθεί με την χρήση νερού. Οπότε, πρέπει να εξεταστεί η διενέργεια της δοκιμής με οργανικούς διαλύτες, όπως η ακετόνη, για τον καθορισμό του συντελεστή τριχοειδούς απορροφητικότητας. Στη παρούσα εργασία έγινε μια ανάλογη προσπάθεια, η οποία φαίνεται ότι είχε αρκετά καλά αποτελέσματα.
- Στη δοκιμή ψεκασμού υπό πίεση, η υπό εξέταση επιφάνεια είναι συνήθως η άνω επιφάνεια του συμπιεσμένου ωμόπλινθου. Ωστόσο, στην πραγματικότητα η επιφάνεια που είναι εκτεθειμένη στη βροχή είναι κάποια πλευρική. Οπότε, πρέπει να εξεταστεί το ενδεχόμενο έκθεσης της πλευρικής επιφάνειας των δοκιμίων στη ροή νερού, με ανάλογες μετατροπές στην υφιστάμενη διάταξη.
- Στις δοκιμές ψεκασμού υπό πίεση και σταγόνας, το τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται από τη μέγιστη διείσδυση στο δείγμα. Ωστόσο, παρατηρούνται σημαντικές διαφορές στη συνολική διάβρωση του υλικού κατά τη δοκιμή, έστω και αν η μέγιστη διείσδυση είναι η ίδια. Το ενδεχόμενο να γίνεται περαιτέρω αξιολόγηση, με βάση την απώλεια μάζας, θα πρέπει να εξεταστεί, ούτως ώστε να υπάρχει πιο αξιόπιστη εικόνα για τη συμπεριφορά των δοκιμίων.
- Η υφιστάμενη δοκιμή ψεκασμού υπό πίεση βασίζεται στα κλιματολογικά δεδομένα της Νέας Ζηλανδίας. Άρα, πρέπει να προσαρμοστεί στα κλιματολογικά δεδομένα της Κύπρου, ούτως ώστε η αξιολόγηση των υλικών να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.
- Η καταστρεπτική δράση του νερού στους συμπιεσμένους ωμόπλινθους αποτελεί τον κυριότερο παράγοντα φθοράς τους. Για το περιορισμό του φαινομένου αυτού πρέπει να εξεταστεί η προσθήκη στο μείγμα, ή/και η εφαρμογή στην εξωτερική επιφάνεια των τελικών προϊόντων, υδαταπωθητικών προϊόντων, που θα περιορίσουν τη διείσδυση του νερού στα δοκίμια.
- Πρέπει να μελετηθούν και άλλοι καταστρεπτικοί παράγοντες, οι οποίοι επιδρούν στους συμπιεσμένους ωμόπλινθους, όπως η κρυστάλλωση αλάτων. Επίσης, σε περίπτωση που οι

συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι θα χρησιμοποιηθούν σε ορεινές περιοχές, είναι καλό να μελετηθεί και η αντίστασή τους σε κύκλους ψύξης/απόψυξης.

- Οι σύγχρονοι κανονισμοί θερμικής συμπεριφοράς των κτηρίων απορρίπτουν τα γήινα δομικά υλικά, λόγω του υψηλού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητάς τους. Ωστόσο, τα γήινα δομικά υλικά παρουσιάζουν στην πράξη αρκετά καλή θερμική συμπεριφορά, λόγω της υψηλής ειδικής θερμοχωρητικότητάς τους. Θα πρέπει, άρα, να εξεταστεί το ενδεχόμενο αξιολόγησης και της συγκεκριμένης παραμέτρου από τους κανονισμούς. Για το σκοπό αυτό, χρειάζεται εκτενής έλεγχος της θερμικής συμπεριφοράς των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων, σε ξηρές και υγρές συνθήκες, προκειμένου να ενισχυθεί το επιχείρημα αυτό.

Το κυριότερο μειονέκτημα των συμπιεσμένων ωμοπλίνθων αυτή τη στιγμή παραμένει η απουσία κανονιστικών εγγράφων. Τέτοια έγγραφα πρέπει να παρέχουν τις κατευθυντήριες γραμμές για δόμηση με αυτά τα υλικά, με σκοπό οι συμπιεσμένοι ωμόπλινθοι να ενταχθούν στη σύγχρονη κατασκευαστική βιομηχανία. Η υλοποίηση των πιο πάνω εισηγήσεων θα βοηθούσε στον καταρτισμό κανονιστικών εγγράφων, τουλάχιστον σε τοπικό επίπεδο, τα οποία θα προσέφεραν μεγαλύτερη άνεση στους μελετητές για να εντάξουν τους συμπιεσμένους ωμόπλινθους στις επιλογές τους για δομικά υλικά.

Βιβλιογραφία

1. Adam, E. A. and Jones, P. J., 1995. Thermophysical Properties of Stabilised Soil Building Blocks, *Building and Environment*, 30:2, 245-253.
2. Ammari, A., Bouassria, K., Cherraj, M., Bouabid, H., D'ouazzane, S. C., 2017. Combined effect of mineralogy and granular texture on the technico-economic optimum of the adobe and compressed earth blocks, *Case studies in Construction Materials*, 7, 240-248.
3. ARS 674, 1996. Compressed earth blocks. Technical specifications for ordinary compressed earth blocks, African Regional Standards.
4. ARS 675, 1996. Compressed earth blocks. Technical specifications for facing compressed earth blocks, African Regional Standards.
5. ARS 676, 1996. Compressed earth blocks. Technical specifications for ordinary earth mortars, African Regional Standards.
6. ARS 677, 1996. Compressed earth blocks. Technical specifications for facing earth mortars, African Regional Standards.
7. ARS 678, 1996. Compressed earth blocks. Technical specifications for ordinary compressed earth block masonry, African Regional Standards.
8. ARS 679, 1996. Compressed earth blocks. Technical specifications for facing compressed earth block masonry, African Regional Standards.
9. Arsene, M. I. L., Frederic, C., Nathalie, F., 2020. Improvement of lifetime of compressed earth blocks by adding limestone, sandstone and porphyry aggregates, *Journal of Building Engineering*, 29, 101155.
10. ASTM E2392, 2010. Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems, American Standards of Testing Materials, USA.
11. Aubert, J. E., Fabbri, A., Morel, J. C., Maillard, P., 2013. An earth block with a compressive strength higher than 45 MPa!, *Construction and Building Materials*, 47, 366-369.
12. Beckett, C. T. S., Jaquin, P. A., Morel, J. C., 2020. Weathering the Storm: A framework to assess the resistance of earthen structures to water damage, *Construction and Building Materials*, 242, 118098.
13. Bezerra, W. V. D. C. and Azeredo, G. A., 2019. External sulphate attack on compressed earth blocks, *Construction and Building Materials*, 200, 255-264.
14. Bicakci, E., 2003. Observations on the early pre-pottery Neolithic architecture in the near east: 1. New building materials and construction techniques, *From Village to Cities*, 385-413.
15. Bogas, J. A., Silva, M., Gomes, M. G., 2019. Unstabilized and stabilized compressed earth blocks with partial incorporation of recycled aggregates. *International Journal of Architectural Heritage*, 13:4, 569-584.

16. Bowen, T., 2017. A Best Practices Manual for Using Compressed Earth Blocks in Sustainable Home Construction in Indian Country, U.S. Department of Housing and Urban Development Office of Policy, Development and Research.
17. Chaibeddra, S. and Kharchi, F., 2019. Performance of Compressed Stabilized Earth Blocks in sulphated medium, *Journal of Building Engineering*, 25, 100814.
18. Chan, C. M., Low, L. P., 2010. Development of a Strength Prediction Model for “Green” Compressed Stabilised Earth bricks, *Journal of Sustainable Development*, 3, 140-150.
19. Chousidis, N., Rakanta, E., Ioannou, I., Batis, G., 2015. Mechanical properties and durability performance of reinforced concrete containing fly ash, *Construction and Building Materials*, 101, 810-817.
20. Cid-Falceto, J., Mazarron, F. R., Canas, I., 2012. Assessment of compressed earth blocks made in Spain: International durability tests, *Construction and Building Materials*, 37, 738-745.
21. Costa, C., Cerqueira, A., Rocha, F., Velosa, A., 2018. The sustainability of adobe construction: past to future, *International Journal of Architectural Heritage*, 13:5, 639-647.
22. Costi de Castrillo, M., Philokyrou, M., Ioannou, I., 2017. Comparison of adobes from pre-history to-date, *Journal of Archaeological Science: Reports*, 12, 437-448.
23. CraTerre - EAG Standards, 1998. Compressed Earth Blocks Standards, CDI and CraTerre EAG publications, Belgium.
24. Dahmen, J., Kim, J., Ouellet-Plamondon, C. M., 2018. Life cycle assessment of emergent masonry blocks, *Journal of Cleaner Production*, 171, 1622-1637.
25. Danso, H., 2016. Influence of Compacting Rate on the Properties of Compressed Earth Blocks, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 8780368.
26. Danso, H. and Adu, S., 2019. Characterization of Compressed Earth Blocks Stabilized with Clay Pozzolana, *Journal of Civil & Environmental Engineering*, 9, 331.
27. Danso, H., Martinson D. B., Ali, M., Williams, J. B., 2015. Physical, mechanical and durability properties of soil building blocks reinforced with natural fibres, *Construction and Building Materials*, 101, 797-809.
28. Deboucha, S. and Hashim, R., 2011. A review on bricks and stabilized compressed earth blocks, *Scientific Research and Essays*, 6:3, 499-506.
29. Delgado, M. C. J. and Guerrero, I. C., 2007. The selection of soils for unstabilised earth building A normative review, *Construction and Building Materials*, 21, 237-251.
30. De Chazelles, C. A., 2010. Terre modelee et terre moulee; deux conceptions de la construction en terre, *Edifice & Artifice; Histoires Constructives*, 411-419.
31. DIN 18945-47, 2008. Rules governing building with earth, Dachverband Lehm, Germany.
32. Druppel, K. and Wirth, R., 2018. Metasomatic Replacement of Albite in Nature and Experiments, *Minerals*, 8:5, 214.

33. Egenti, C., Khabit, J. M., Oloke, D., 2014. Conceptualisation and pilot study of shelled compressed earth block for sustainable housing in Nigeria, *International Journal of Sustainable Built Environment*, 3, 72-86.
34. Eires, R., Camoes, A., Jalali, S., 2017. Enhancing water resistance of earthen buildings with quicklime and oil, *Journal of cleaner Production*, 142, 3281-3292.
35. Fabbri, A., Soudani, L., McGregor, F., Morel, J. C., 2019. Analysis of the water absorption test to assess the intrinsic permeability of earthen materials, *Construction and Building Materials*, 199, 154-162.
36. Fernandes, J., Peixoto, M., Mateus, R., Gervasio, H., 2019. Life cycle analysis of environmental impacts of earthen materials in the Portuguese context: Rammed earth and compressed earth blocks, *Journal of Cleaner Production*, 241, 118286.
37. Fgaier, F. E., Lafhaj, Z., Antczak, E., Chapiseau, C., 2015. Dynamic thermal performance of three types of unfired earth bricks, *Applied Thermal Engineering*, 93, 377-383.
38. Fgaier, F. E., Lafhaj, Z., Chapiseau, C., Antczak, E., 2016. Effect of sorption capacity on thermo-mechanical properties of unfired clay bricks, *Journal of Building Engineering*, 6, 86-92.
39. Fournari, R. and Ioannou, I., 2019. Correlations between the Properties of Crushed Fine Aggregates, *Minerals*, 9, 86.
40. Giada, G., Caponetto, R., Nocera, F., 2019. Hygrothermal Properties of Raw Earth Materials: A Literature Review, *Sustainability*, 11, 5342.
41. Giroudon, M., Laborel-Preneron, A., Aubert, J. E., Magniont, C., 2019. Comparison of barley and lavender straws as bioaggregates in earth bricks, *Construction and Building Materials*, 202, 254-265.
42. Gonzalez-Lopez, J. R., Juarez-Alvarado, C. A., Ayub-Francis, B., Mendoza-Rangel, J. M., 2018. Compaction effect on the compressive strength of stabilized earth blocks, *Construction and Building Materials*, 163, 179-188.
43. Guettala, A., Houari, H., Mezghiche, B., Chebili, R., 2002. Durability of lime stabilized earth blocks, *Courrier du Savoir*, 2, 61-66.
44. Hall, M. and Djerbib, Y., 2004. Moisture ingress in rammed earth: Part 1-the effect of soil particle-size distribution on the rate of capillary suction, *Construction and Building Materials*, 18, 269-280.
45. Hall, M. and Djerbib, Y., 2004. Moisture ingress in rammed earth: Part 2 - The effect of soil particle-size distribution on the absorption of static pressure-driven water, *Construction and Building Materials*, 20, 374-383.
46. Hamard, E., 2017. Rediscovering of vernacular adaptative construction strategies for sustainable modern building: application to cob and rammed earth, *Construction durable*, University de Lyon.

47. Heathcote, K., 2002. An investigation into the erodibility of earth wall units, University of Technology, Sydney.
48. Heathcote, K. and Jankulovski, E., 1993. Relationship between moisture content and strength of soilcrete blocks, *Building Research & Information*, 21:2, 103-108.
49. Houben, H. and Guillaud H., 1994. *Earth Construction. A comprehensive guide*, United Kingdom, Practical Action Publishing.
50. Illambas, R., Ioannou, I., Costi de Castrillo, M., 2011. Earthen Architecture in Cyprus, *Terra Europae Earthen Architecture in the European Union*, 96-99.
51. Ioannou, I. and Illambas, R., 2019. Earth Masonry, Long-term Performance and Durability of Masonry Structures, p.89-118.
52. IS 1725, 1982. Specification for soil based blocks used in general building construction, Indian Standards Institution, India.
53. Islam, M. S., Elahi, T. E., Shahriar, A. R., Mumtaz, N., 2020. Effectiveness of fly ash and cement for compressed stabilized earth block construction, *Construction and Building Materials*, 255, 119392.
54. Izemouren, O., Guettala, A., Guettala, S., 2015. Mechanical Properties and Durability of Lime and Natural Pozzolana Stabilized Steam-Cured Compressed Earth Block Bricks, *Geotechnical and Geological Engineering*, 33, 1321-1333.
55. Jayasinghe, C. and Mallawaarachchi, R. S., 2009. Flexural strength of compressed stabilized earth masonry materials, *Materials and Design*, 30, 3859-3868.
56. Kerali, A. G., 2005. In-service deterioration of compressed earth blocks, *Geotechnical and Geological Engineering*, 23, 461-468.
57. Li, G., 2004. Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂, *Cement and Concrete Research*, 34, 1043-1049.
58. Li, J., Tang, C., Wang, D., Pei, X., Shi, B., 2014. Effect of discrete fibre reinforcement on soil tensile strength, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6, 133-137.
59. Lima, S. A., Varum, H., Sales, A., Neto, V. F., 2012. Analysis of the mechanical properties of compressed earth block masonry using sugarcane bagasse ash, *Construction and Building Materials*, 35, 829-837.
60. Lopez, E. I. R., Kumar, N., Matta, F., Barbato, M., 2019. Experimental characterization and numerical simulation of compressive behavior of compressed and stabilized earth block specimens, Earth, USA.
61. Mahdad, M. and Benidir, A., 2018. Hydro-mechanical properties and durability of earth blocks: influence of different stabilisers and compaction levels, *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 9:2, 44-60.
62. Mak, K., MacDougall, C., Fam, A., 2016. Freeze-Thaw Performance of On-Site Manufactured Compressed Earth Blocks: Effect of Water Repellent and Other Additives, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28:7, 04016034-1.

63. Malkanthi, S. N., Balthazaar, N., Perera, A. A. D. A. J., 2020. Lime stabilization for compressed earth blocks with reduced clay and silt, *Case studies in Construction Materials*, 12, e00326.
64. Mansour, M. B., Jelidi, A., Cherif, A. S., Jabrallah, S. B., 2016. Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB), *Construction and Building Materials*, 104, 44-51.
65. Maskell, D., Heath, A., Walker, P., 2013. Laboratory scale testing of extruded earth masonry units, *Materials and Design*, 45, 359-364.
66. Maskell, D., Heath, A., Walker, P., 2014. Inorganic stabilisation methods for extruded earth masonry units, *Construction and Building Materials*, 71, 602-609.
67. Mesbah, A., Morel, J. C., Walker, P., Ghavami, Kh., 2004. Development of a direct Tensile Test for Compacted Earth Blocks Reinforced with Natural Fibers, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16:1, 95-98.
68. Miccoli, L., Garofano, A., Fontana, P., Muller, U., 2015. Experimental testing and finite element modelling of earth block masonry, *Engineering Structures*, 104, 80-94.
69. Miccoli, L., Muller, U., Fontana, P., 2014. Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob, *Construction and Building Materials*, 61, 327-339.
70. Millogo, Y., Morel, J. C., Aubert, J. E., Ghavami, K., 2014. Experimental analysis of Pressed Adobe Blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers, *Construction and Building Materials*, 52, 71-78.
71. Miloudi, Y., Fezzioui, N., Benidir, A., Labbaci, B., Oumeziane, Y. A., Bennaceur, S., 2019. Modelling of temperature effects on sorption behaviour of compressed and cement stabilized earth blocks, *Magazine of Concrete Research*, 0, 1-11.
72. Minke, G., 2006. *Building with Earth. Design and Technology of a Sustainable Architecture*, Basel, Birkhäuser.
73. Mohammed, A. and Bahobail, M. A., 2014. The mud additives and their effect on thermal conductivity of adobe bricks, *Journal of Engineering Sciences*, 40:1, 21-34.
74. Morel, J. C., Pkla, A., 2002. A model to measure compressive strength of compressed earth blocks with the "3 points bending test", *Construction and Building Materials*, 16, 303-310.
75. Morel, J. C., Pkla, A., Walker, P., 2007. Compressive strength testing of compressed earth blocks, *Construction and Building Materials*, 21, 303-309.
76. Moussa, H. S., Nshimiyimana, P., Hema, C., Zoungrana, O., Messan, A., Courard, L., 2019. Comparative Study of Thermal Comfort Induced from Masonry Made of Stabilized Compressed Earth Block vs Conventional Cementitious Material, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 7, 385-403.
77. Muntohar, A. S., 2011. Engineering characteristics of the compressed-stabilized earth brick, *Construction and Building Materials*, 25, 4215-4220.

78. Nagaraj, H. B., Sravan, M. V., Arun, T. G., Jagadish, K. S., 2014. Role of lime with cement in long-term strength of Compressed Stabilized Earth Blocks, *International Journal of Sustainable Built Environment*, 3, 54-61.
79. NBR 8492, 2012. Tijolo de soil-cimento-Analise dimensional, determinacao da resistencia a compressao e da absorcao de agua – Metodo de ensaio, ABNT, Brazil.
80. NMac 14.7.4, 2016. New Mexico Earthen Building Materials. Construction Industries Division of the Regulation and Licensing Department, New Mexico State.
81. Nshimiyimana, P., Messan, A., Courard, L., 2020. Physico-mechanical and Hygro-thermal Properties of Compressed Earth Blocks Stabilized with Industrial and Agro By-Products Binders, *Materials*, 13, 3769.
82. NZS 4297, 1998. Engineering design of Earth Buildings, New Zealand Standards, New Zealand.
83. NZS 4298, 1998. Materials and Workmanship for Earth Buildings, New Zealand Standards, New Zealand.
84. NZS 4299, 1998. Earth Building not requiring specific design, New Zealand Standards, New Zealand.
85. Obonyo, E., Exelbirt, J., Baskaran, M., 2010. Durability of Compressed Earth Bricks: Assessing Erosion Resistance Using the Modified Spray Testing, *Sustainability*, 2, 3639-3649.
86. Ogunye, F. O. and Boussabaine, H., 2002. Development of a rainfall test rig as an aid in soil block weathering assessment, *Construction and Building Materials*, 16, 173-180.
87. Ola, S. A. and Mbata, A., 1990. Durability of soil-cement for building purposes – Rain erosion resistance test, *Construction and Building Materials*, 4:4, 182-187.
88. Oner, A. and Akyuz, S., 2007. An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete, *Cement & Concrete Composites*, 29, 505-514.
89. Oti, J. E., Kinuthia, J.M., Bai, J., 2009. Engineering properties of unfired clay masonry bricks, *Engineering Geology*, 107, 130-139.
90. Philokyrou, M., 2016. The earliest use of adobes in Cyprus: Issues of provenance and use, *Terra*, Lyon.
91. Reddy, B. V. V. and Jagadish, K. S., 1987. Spray Erosion Studies on Pressed Soil Blocks, *Building and Environment*, 22:2, 135-140.
92. Reddy, B. V. V., Kumar, P. P., 2011. Cement stabilised rammed earth. Part A: compaction characteristics and physical properties of compacted cement stabilised soils, *Materials and Structures*, 44, 681-693.
93. Reddy, B. V. V., Lal, R., Rao, k. S. N., 2007. Enhancing Bond Strength and Characteristics of Soil-Cement Block Masonry, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19:2, 164-172.
94. Reddy, B. V. V., Lal, R., Rao, K. S. N., 2007. Optimum Soil Grading for the Soil-Cement Blocks, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19:2, 139-148.

95. Riaz, M. H., Khitab, A., Ahmed, S., 2019. Evaluation of Sustainable Clay Bricks, *Journal of Building Engineering*, 24, 100725.
96. Rodriguez-Mariscal, J. D., Solis, M., Cifuentes, H., 2018. Methodological issues for the mechanical characterization of unfired earth bricks, *Construction and Building Materials*, 175, 804-814.
97. Roy, S. and Bhalla, S. K., 2017. Role of Geotechnical Properties of Soil on Civil Engineering Structures, *Resources and Environment*, 7(4), 103-109.
98. Ruiz, G., Zhang, X., Edris, W. F., Canas, I., Garijo, L., 2018. A comprehensive study of mechanical properties of compressed earth blocks, *Construction and Building Materials*, 176, 866-572.
99. Saidi, M., Cherif, A. S., Zeghamati, B., Sediki, E., 2018. Stabilization effects on the thermal conductivity and sorption behavior of earth bricks, *Construction and Building Materials*, 167, 566-577.
100. Sauvage, M., 2009. Les debuts de l' architecture de terre au proche-orient, *Mediterra, Cagliari*, 189-198.
101. Schroeder. H., 2016. *Sustainable Building with Earth*, Switzerland, Springer.
102. Seed, H. B., Woodward, R. I., Lundgren, R., 1962. Prediction of swelling potential for compacted clays, *Journal of Soil Mechanics*, 88, 53-87.
103. Sharma, V., Vinayak, H. K., Marwaha, B. M., 2015. Enhancing compressive strength of soil using natural fibers, *Construction and Building Materials*, 93, 943-949.
104. Silva, R. A., Soares, E., Oliveira, D. V., Miranda, T., Cristelo, N. M., Leitao, D., 2015. Mechanical characterisation of dry-stack masonry made of CEBs stabilised with alkaline activation, *Construction and Building Materials*, 75, 349-358.
105. Sitton, J. D., Zeinali, Y., Heidarian, W. H., Story, B. A., 2018. Effect of mix design on compressed earth block strength, *Construction and Building Materials*, 158, 124-131.
106. Skempton, A. W., 1953. The colloidal "Activity" of clays, *Proceedings of the 3rd International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1, 57-60.
107. Sturm, T., Ramos, L. F., Lourenco, P. B., 2015. Characterization of dry-stack interlocking compressed earth blocks, *Materials and Structures*, 48, 3058-3074.
108. Subramaniaprasad, C. K., Abraham, B. M., Nambiar, E. K. K., 2014. Sorption characteristics of stabilised soil blocks embedded with waste plastic fibres, *Construction and Building Materials*, 63, 25-32.
109. Taallah, B., Guattala, A., Guettala, S., Kriker, A., 2014. Mechanical properties and hygroscopicity behavior of compressed earth block filled by date palm fibers, *Construction and Building Materials*, 59, 161-168.
110. Tatane, M., 2018. Thermal, Mechanical and Physical behavior of Compressed Earth Blocks Loads by Natural Wastes, *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9:6, 1353-1368.

111. UNE 41410, 2008. Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques, AENOR, Spain.
112. Walker, P., 2004. Strength and erosion Characteristics of Earth Blocks and Earth Block Masonry, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16:5, 497-506.
113. Walker, P. and Stace, T., 1997. Properties of some cement stabilised compressed earth blocks and mortars, *Materials and Structures*, 30, 545-551.
114. XP P 13-901, 2001. Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons, AFNOR, France.
115. Yogananth, Y., Thanushan, K., Sangeeth, P., Coonghe, J. E., Sathiparan, N., 2019. Comparison of strength and durability properties between earth-cement blocks and cement-sand blocks, *Innovative Infrastructure Solutions*, 4, 50.
116. Zhang, L., Jelle, B. P., Wang, Y., Gustavsen, A., 2018. Hygrothermal properties of compressed earthen bricks, *Construction and Building Materials*, 162, 576-583.
117. Κούκης, Γ. και Σαμπατακάκης, Ν., 2002. Τεχνική Γεωλογία, Αθήνα, Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
118. Κωνσταντίνου, Γ. και Παναγίδης, Ι., 2013. Κύπρος και Γεωλογία, Επιστήμη-Περιβάλλον-Πολιτισμός, Λευκωσία, Πολιτιστικό Ίδρυμα Τραπέζης Κύπρου.
119. Φιλοκύπρου, Μ., 1999. Δομικά υλικά και κατασκευές στην κυπριακή αρχιτεκτονική: από τη νεολιθική περίοδο μέχρι την ύστερη χαλκοκρατία. Πανεπιστήμιο Κύπρου, Φιλοσοφική Σχολή, Κύπρος.

Δημοσιεύσεις

1. Kyriakides, M., Panagiotou, R., Illampas, R., Tapakoudis, M., and Ioannou, I. Physico-mechanical characterization of non-stabilized Compressed Earth Blocks, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020.
2. Kyriakides, M.A., Panagiotou, R., Illampas, R., Tapakoudis, M., and Ioannou, I. Experimental investigation of non-stabilized compressed earth blocks, LEHM 2020, Online, 30/10-1/11 2020.
3. Panagiotou, R., Kyriakides, M.A., Illampas, R. and Ioannou, I. Durability performance of non stabilized Compressed Earth Blocks with optimized granular composition, International Conference on Moisture in Buildings 2021, Online, 28-29 June 2021. (Abstract submitted)

ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΥ ΡΑΦΑΗΛ

Παράρτημα Α: Πίνακας 2.1 του NZS 4298 (1998)

Πίνακας στον οποίο παρατηρούνται η συχνότητα των δοκιμών και τα επιθυμητά αποτελέσματα που προδιαγράφει το NZS 4298 (1998).

Ιδιότητα	Παράρτημα	Συμπεριεσμένοι ορόπλανθοι	Ωμόπλανθοι	Συμπεριεσμένη γη	Ρευστή γη	Εδαφικό κονίαμα (Σημείωση 8)	Συχνότητα		Επιθυμητό αποτέλεσμα (Σημείωση 5)
							Πριν την κατασκευή	Κατά την κατασκευή (Σημείωση 6)	
Θλαστική ή καμπατική αντοχή	A5, A4, J1 ή J2						Δείγμα 5 ή περισσότερο δοκιμών	Δείγμα 5 δοκιμών για κάθε 500 τούβλα ή μέρος αυτών (Σημειώσεις 2, 3 και 7)	$f_c > 1.3 \text{ MPa}$ (Θλαστική αντοχή) (Σημείωση 4) $f_{ct} > 0.25 \text{ MPa}$ (Καμπατική αντοχή) (Σημείωση 5 αποτελεσμάτων)
Κύκλοι θήρασης/ ξήρασης	C						3	Δείγμα 5 δοκιμών για κάθε 2500 τούβλα ή μέρος αυτών (Σημειώσεις 2 και 3)	$f_c > 1.3 \text{ MPa}$ (Θλαστική αντοχή) (Σημείωση 4) $f_{ct} > 0.25 \text{ MPa}$ (Καμπατική αντοχή) (Σημείωση 5 αποτελεσμάτων)
Ανθεκτικότητα	D ή E						1 spray (Παράρτημα D) ή 2 drip (Παράρτημα E)	Δεν απαιτείται αλλά βλέπε σημείωση 2	Επιτυχία
Συρρικνωση	F						1 αν εξετάζονται πολλά μείγματα ή 2 αν εξετάζεται ένα μείγμα	Δεν απαιτείται αλλά βλέπε σημείωση 2	Να τηρούνται οι απαιτήσεις των NZS 4297 και NZS 4298
Επί τόπου δοκιμή ρήγης υδαρούς δοκιμίου	G						1 για κάθε δοκιμή ή παρτίδα	1 για κάθε παρτίδα	$\leq 0.05\%$ για τη συμπεριεσμένη γη $\leq 1.0\%$ για τσιμεντοκονίαμα $\leq 3.0\%$ για κονίαμα χωρίς τσιμέντο στην υδαρή γη
Δοκιμή ρήγης ολόκληρων τούβλων	H					Σημείωση 9	2	Δείγμα 5 δοκιμών για κάθε 500 τούβλα ή μέρος αυτών (Σημειώσεις 2 και 3)	Επιτυχία
Δοκιμή στρωμάτωσης	N	✓			✓		2	Δείγμα 5 δοκιμών για κάθε 2500 τούβλα ή μέρος αυτών (Σημειώσεις 2 και 3)	Επιτυχία
		✓					Δείγμα 3 δοκιμών για κάθε 2500 τούβλα ή μέρος αυτών	Δείγμα 3 δοκιμών για κάθε 2500 τούβλα ή μέρος αυτών	Να μην παρατηρηθεί στρωμάτωση σε περισσότερο από 2 τούβλα

Σημειώσεις:

- (1) Μία από τις 4 προτεινόμενες δοκιμές πρέπει να γίνεται εκτός και αν τηρείται η Σημείωση 3.
- (2) Γίνονται επιπλέον δοκιμές όταν υπάρχουν ενδείξεις για αλλαγή του εδάφους.
- (3) Αν το δείγμα επιτύχει στη δοκιμή ρύψης ολόκληρων τούβλων (Παράρτημα Η) κατά την κατασκευή, τότε δεν επιβάλλεται να γίνουν δοκιμές θλιπτικής και καμπτικής αντοχής.
- (4) Το επιθυμητό αποτέλεσμα αντοχών (ελάχιστο 5 αποτελεσμάτων) αναφέρεται σε δοκίμια λόγου ύψους/πλάτους=1.0. Για δοκίμια με διαφορετικό λόγο ύψους/πλάτους γίνεται κανονικοποίηση με τις τιμές k_a που δίνονται στο Παράρτημα Α (*0.7/ k_a).
- (5) Για παράδοξα αποτελέσματα βλέπε Β3.3.
- (6) Σε περίπτωση που χρησιμοποιείται η εδαφική πρώτη ύλη για πολλές κατασκευές ή δεν διαφοροποιείται τότε η συχνότητα ελέγχου αλλάζει. Γίνεται έλεγχος όταν αλλάζουν οι ιδιότητες του εδάφους ή όταν αλλάζει η πηγή του. Για τους ωμόπλινθους ο έλεγχος γίνεται κάθε 5000 τούβλα, για τους συμπιεσμένους ωμόπλινθους κάθε 2500 τούβλα ενώ για τη συμπιεσμένη γη ή τη ρευστή γη κάθε 200 m³.
- (7) Για τη συμπιεσμένη γη ή τη ρευστή γη λαμβάνεται ένα δείγμα 5 δοκιμίων για κάθε 50 m³ τοιχοποιίας.
- (8) Για εδαφικό κονίαμα με ίδιας σύστασης πρώτη ύλη, όπως αυτή των τούβλων, εκτελείται μόνο δοκιμή συρρίκνωσης. Σε διαφορετική περίπτωση γίνονται όλες οι δοκιμές.
- (9) Αυτή η δοκιμή μπορεί να γίνει σε δοκίμιο κονιάματος που έχει τις ίδιες διαστάσεις με ένα ολόκληρο τούβλο.

Παράρτημα Β: Θλιπτική αντοχή συμπιεσμένων ωμοπλίνθων

Θλιπτική αντοχή ολόκληρων δοκιμίων (300 mm x 150 mm x 100 mm) συμπιεσμένων ωμοπλίνθων.

Δοκίμιο	Θλιπτική αντοχή (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)
C-A-U-1	8.77	761
C-A-U-2	9.70	529
C-A-U-3	9.85	573
C-A-U-4	10.16	493
C-A-U-5	10.48	681
C-A-U-6	9.82	608
C-A-U-7	9.55	539
C-A-U-8	9.98	509
M.O.	9.79	587
ΣΔ	5%	15%
C-D-U-1	9.60	374
C-D-U-2	9.61	439
C-D-U-3	9.76	435
C-D-U-4	9.26	361
C-D-U-5	9.69	374
C-D-U-6	9.72	416
C-D-U-7	10.11	465
C-D-U-8	10.44	398
M.O.	9.77	408
ΣΔ	3%	9%
C-L-U-1	4.69	452
C-L-U-2	5.19	440
C-L-U-3	5.12	387
C-L-U-4	5.64	432
C-L-U-5	5.37	394
C-L-U-6	5.46	506
C-L-U-7	5.07	428
C-L-U-8	5.94	553
M.O.	5.31	449
ΣΔ	7%	12%
C-T-U-1	9.42	916
C-T-U-2	9.32	1003
C-T-U-3	8.87	546
C-T-U-4	9.48	613
C-T-U-5	8.25	534
C-T-U-6	9.51	592
C-T-U-7	9.46	655
C-T-U-8	9.13	693
M.O.	9.18	694
ΣΔ	4%	23%

Θλιπτική αντοχή κυβικών δοκιμίων (100 mm x 100 mm x 100 mm) συμπίεσμένων ωμοπλίνθων.

Δοκίμιο	Θλιπτική αντοχή (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)
C-A-C-1	7.03	474
C-A-C-2	6.98	412
C-A-C-3	6.83	385
C-A-C-4	6.61	404
C-A-C-5	6.42	328
C-A-C-6	6.54	405
C-A-C-7	6.08	423
C-A-C-8	6.99	422
M.O.	6.69	406
ΣΔ	5%	9%
C-D-C-1	4.88	294
C-D-C-2	6.02	285
C-D-C-3	6.11	285
C-D-C-4	6.39	332
C-D-C-5	5.77	316
C-D-C-6	6.05	303
C-D-C-7	6.44	325
C-D-C-8	5.86	316
M.O.	5.94	307
ΣΔ	8%	5%
C-L-C-1	3.55	416
C-L-C-2	4.04	405
C-L-C-3	2.72	270
C-L-C-4	3.87	371
C-L-C-5	3.35	454
C-L-C-6	4.34	434
C-L-C-7	4.02	382
C-L-C-8	4.68	443
M.O.	3.82	397
ΣΔ	15%	14%
C-T-C-1	5.74	365
C-T-C-2	6.08	500
C-T-C-3	5.50	339
C-T-C-4	5.72	377
C-T-C-5	6.17	392
C-T-C-6	5.56	332
C-T-C-7	5.59	408
C-T-C-8	5.75	459
M.O.	5.76	397
ΣΔ	4%	14%

Θλιπτική αντοχή πρισματικών δοκιμών (50 mm x 50 mm x 100 mm) συμπιεσμένων ωμοπλίνθων.

Δοκίμιο	Θλιπτική αντοχή (MPa)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)
C-A-S-1	4.11	273
C-A-S-2	3.67	289
C-A-S-3	3.78	317
C-A-S-4	3.35	257
C-A-S-5	3.82	315
C-A-S-6	3.93	356
C-A-S-7	4.43	550
C-A-S-8	4.80	627
M.O.	3.99	373
ΣΔ	11%	35%
C-D-S-1	3.46	235
C-D-S-2	3.75	238
C-D-S-3	4.06	268
C-D-S-4	3.77	269
C-D-S-5	3.51	232
C-D-S-6	2.98	228
C-D-S-7	3.20	262
C-D-S-8	3.72	273
M.O.	3.56	251
ΣΔ	9%	7%
C-L-S-1	2.95	411
C-L-S-2	2.83	422
C-L-S-3	2.90	504
C-L-S-4	3.32	428
C-L-S-5	3.14	353
C-L-S-6	2.92	557
C-L-S-7	2.69	314
C-L-S-8	2.32	357
M.O.	2.88	418
ΣΔ	10%	18%
C-T-S-1	4.55	540
C-T-S-2	4.41	500
C-T-S-3	4.01	327
C-T-S-4	4.10	424
C-T-S-5	3.93	414
C-T-S-6	4.58	418
C-T-S-7	3.89	381
C-T-S-8	4.71	329
M.O.	4.27	417
ΣΔ	7%	17%

Παράρτημα Γ: Καμπτική αντοχή συμπιεσμένων ωμοπλίνθων

Καμπτική αντοχή των δοκίμων (300 mm x 150 mm x 100 mm) των υπό εξέταση συμπιεσμένων ωμοπλίνθων.

Δοκίμιο	Καμπτική δυσκαμψία (kN/mm)	Μέγιστο φορτίο (kN)	Καμπτική αντοχή (MPa)
B-A-U-9	19	4.02	1.02
B-A-U-10	9	3.43	0.96
B-A-U-11	16	2.85	0.68
B-A-U-12	17	3.68	0.83
B-A-U-13	12	3.79	1.01
B-A-U-14	14	4.44	0.99
B-A-U-15	21	4.09	0.93
B-A-U-16	17	4.72	1.06
M.O.	15.5	3.88	0.93
ΣΔ	24%	14%	13%
B-D-U-9	8	2.19	0.72
B-D-U-10	6	2.05	0.69
B-D-U-11	6	1.89	0.65
B-D-U-12	11	2.05	0.71
B-D-U-13	6	2.26	0.77
B-D-U-14	5	2.05	0.70
B-D-U-15	7	2.19	0.77
B-D-U-16	7	2.12	0.74
M.O.	6.95	2.10	0.72
ΣΔ	25%	5%	5%
B-L-U-9	5	1.53	0.34
B-L-U-10	7	2.34	0.55
B-L-U-11	4	2.27	0.50
B-L-U-12	3	2.56	0.59
B-L-U-13	3	2.56	0.61
B-L-U-14	2	2.05	0.45
B-L-U-15	5	2.12	0.47
B-L-U-16	3	2.19	0.52
M.O.	3.8	2.20	0.50
ΣΔ	16%	14%	18%
B-T-U-9	24	5.15	1.30
B-T-U-10	22	4.61	1.17
B-T-U-11	19	5.12	1.30
B-T-U-12	19	5.04	1.27
B-T-U-13	17	4.31	1.09
B-T-U-14	14	5.15	1.30
B-T-U-15	18	4.19	1.06
B-T-U-16	18	4.73	1.20
M.O.	18.9	4.79	1.21
ΣΔ	15%	8%	8%

Παράρτημα Δ: Αποτελέσματα δοκιμής σταγόνας (drip test)

Αποτελέσματα δοκιμής σταγόνας των υπό εξέταση συμπιεσμένων ωμοπλίνθων.

Δοκίμιο	Βάθος τρύπας (mm)	LEI
<i>Αλάμπρα</i>		
A-D-1	7.55	3
A-D-2	9.21	3
A-D-3	7.33	3
A-D-4	9.39	3
A-D-5	9.12	3
A-D-6	9.2	3
M.O.	8.63	3
ΣΔ	10%	
<i>Δελίκηπος</i>		
D-D-1	11.1	4
D-D-2	10.3	4
D-D-3	12.31	4
D-D-4	14.73	4
D-D-5	10.61	4
D-D-6	11.06	4
M.O.	11.69	4
ΣΔ	13%	
<i>Λατούρος</i>		
L-D-1	13.8	4
L-D-2	12.35	4
L-D-3	14.18	4
L-D-4	13.9	4
L-D-5	14.43	4
L-D-6	14.75	4
M.O.	13.90	4
ΣΔ	5%	
<i>Τσέρι</i>		
T-D-1	8.9	3
T-D-2	9.1	3
T-D-3	8.13	3
T-D-4	7.1	3
T-D-5	8.32	3
T-D-6	9.5	3
M.O.	8.51	3
ΣΔ	9%	

Παράρτημα Ε: Αποτελέσματα δοκιμής ψεκασμού υπό πίεση (Spray erosion test)

Αποτελέσματα δοκιμής ψεκασμού υπό πίεση για τους συμπιεσμένους ωμόπλινθους Αλάμπρας.

<i>Δοκίμιο</i>	<i>Χρόνος (min)</i>	<i>Διείσδυση (mm)</i>	<i>Ρυθμός διείσδυσης (mm/min)</i>	<i>LEI</i>
A-S-1	15	9.26	0.62	
	30	20.69	0.69	
	45	23.1	0.51	
	60	26.4	0.44	2
A-S-2	15	9.23	0.62	
	30	15.01	0.50	
	45	21.26	0.47	
	60	25.88	0.43	2
A-S-3	15	21.36	1.42	
	30	31.3	1.04	
	45	50.08	1.11	
	60	57.9	0.97	3
A-S-4	15	16.4	1.09	
	30	26.41	0.88	
	45	42.8	0.95	
	60	67.11	1.12	3
A-S-5	15	15.73	1.05	
	30	32.19	1.07	
	45	49.87	1.11	
	60	65.73	1.10	3
A-S-6	15	21.46	1.43	
	30	31.49	1.05	
	45	49.72	1.10	
	60	57.4	0.96	3

Αποτελέσματα ψεκασμού υπό πίεση για τους συμπιεσμένους ωμόπλινθους Δελίκηπου.

<i>Δοκίμιο</i>	<i>Χρόνος (min)</i>	<i>Διείσδυση (mm)</i>	<i>Ρυθμός διείσδυσης (mm/min)</i>	<i>LEI</i>
<i>D-S-1</i>	15	25.77	1.72	
	30	51.51	1.72	
	45	69.89	1.55	
	56	100	1.79	4
<i>D-S-2</i>	15	18.68	1.25	
	30	34.38	1.15	
	45	46.68	1.04	
	60	65.45	1.09	3
<i>D-S-3</i>	15	22.31	1.49	
	30	40.95	1.37	
	45	52.41	1.16	
	60	64.93	1.08	3
<i>D-S-4</i>	15	14.9	0.99	
	30	29.68	0.99	
	45	38.79	0.86	
	60	56.65	0.94	3
<i>D-S-5</i>	15	15.98	1.07	
	30	40.75	1.36	
	45	49.85	1.11	
	60	61.46	1.02	3
<i>D-S-6</i>	15	23.2	1.55	
	30	53.18	1.77	
	45	74.25	1.65	
	52	100	1.92	4

Αποτελέσματα ψεκασμού υπό πίεση για τους συμπιεσμένους ωμόπλινθους Λατούρου.

<i>Δοκίμιο</i>	<i>Χρόνος (min)</i>	<i>Διείσδυση (mm)</i>	<i>Ρυθμός διείσδυσης (mm/min)</i>	<i>LEI</i>
<i>L-S-1</i>	8	100	12.50	5
<i>L-S-2</i>	8	100	12.50	5
<i>L-S-3</i>	10	100	10.00	5
<i>L-S-4</i>	8	100	12.50	5
<i>L-S-5</i>	10	100	10.00	5
<i>L-S-6</i>	10	100	10.00	5

Αποτελέσματα ψεκασμού υπό πίεση για τους συμπιεσμένους ωμόπλινθους Τσερίου.

<i>Δοκίμιο</i>	<i>Χρόνος (min)</i>	<i>Διείσδυση (mm)</i>	<i>Ρυθμός διείσδυσης (mm/min)</i>	<i>LEI</i>
<i>T-S-1</i>	14	100	7.14	5
<i>T-S-2</i>	12	100	8.33	5
<i>T-S-3</i>	10	100	10.00	5
<i>T-S-4</i>	15	39.1	2.61	
	30	78.64	2.62	
	35	100	2.86	5
<i>T-S-5</i>	15	31	2.07	
	30	75.58	2.52	
	34	100	2.94	5
<i>T-S-6</i>	15	40.65	2.71	
	30	69.4	2.31	
	38	100	2.63	5