



Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Χημικών Μηχανικών
και Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος

ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΣΤΑΥΡΟΣ ΜΑΡΙΟΣ ΣΥΝΤΙΧΑΚΗΣ

ΧΑΝΙΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2025



Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Χημικών Μηχανικών
και Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος

ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΤΑΥΡΟΣ ΜΑΡΙΟΣ ΣΥΝΤΙΧΑΚΗΣ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΙΩΑΝΝΗΣ ΤΣΟΜΠΑΝΑΚΗΣ (επιβλέπων)

ΠΑΓΩΝΑ ΜΑΡΑΒΕΛΑΚΗ

ΔΙΟΝΥΣΙΑ ΚΟΛΟΚΟΤΣΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους καθηγητές μου, οι οποίοι με καθοδήγησαν και με στήριξαν κατά τη διάρκεια της έρευνας και της συγγραφής αυτής της εργασίας. Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα. Παγώνα-Νόνη Μαραβελάκη, και τον επιβλέποντα καθηγητή, κ. Ιωάννη Τσομπανάκη, για την πολύτιμη καθοδήγηση και τις χρήσιμες συμβουλές τους.

Θα ήθελα να εκφράσω την πιο βαθιά μου ευγνωμοσύνη προς τη μητέρα μου, κα. Γεωργία Τραβαγιάκη. Χωρίς τη δική της αδιάκοπη στήριξη και καθοδήγηση δεν θα είχα καταφέρει να εισαχθώ στη Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, ούτε να ακολουθήσω την πορεία των σπουδών μου. Η ανιδιοτελής της αφοσίωση και η προσωπική της θυσία, εγκαταλείποντας τη δική της επαγγελματική σταδιοδρομία, αποτέλεσαν το θεμέλιο πάνω στο οποίο στηρίχθηκαν οι δικές μου προσπάθειες. Για αυτούς τους λόγους, η παρούσα επιστημονική έρευνα είναι αφιερωμένη σε εκείνη.

Ελπίζω η εργασία αυτή να συμβάλει στην περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη οικολογικών κονιαμάτων, προωθώντας λύσεις φιλικές προς το περιβάλλον και τεχνολογικά καινοτόμες στον τομέα των δομικών υλικών.

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει την εργαστηριακή διερεύνηση οικολογικών κονιαμάτων με θερμομονωτικές και υγρομονωτικές ιδιότητες που προορίζονται για εφαρμογή σε μνημεία ή σε άλλες κτιριακές κατασκευές. Τα προτεινόμενα κονιάματα ενσωματώνουν ανακυκλώσιμα υλικά που είναι ακίνδυνα τόσο για το περιβάλλον όσο και για την ανθρώπινη υγεία. Οι συνθέσεις που μελετήθηκαν αποτελούνται από διογκωμένο περλίτη και φυσικό υδραυλικό ασβέστη (NHL 3.5), σε συνδυασμό με ποζολανικό υλικό για την κάλυψη των απαιτήσεων για αντοχή σε θλίψη και πλαστικότητα του κονιάματος.

Οικολογικές λύσεις, όπως η χρήση φιλικών προς το περιβάλλον κονιαμάτων, έχουν αναδειχθεί ως ζωτικής σημασίας για την προστασία του περιβάλλοντος και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής. Η υιοθέτηση αυτών των κονιαμάτων συμβάλλει στην προστασία του περιβάλλοντος και κατ' επέκταση στην ευημερία των κατοίκων του. Οι βιώσιμες πρώτες ύλες, όπως ο περλίτης και ο υδραυλικός ασβέστης, είναι πιο φιλικές προς το περιβάλλον και συμβάλλουν στη μείωση του αποτυπώματος διοξειδίου του άνθρακα. Οι οικολογικές λύσεις προσφέρουν συχνά ανώτερη θερμομόνωση και ανθεκτικότητα, μειώνοντας έτσι την ανάγκη για θέρμανση και ψύξη. Αυτό συμβάλλει στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Σε αντίθεση με ορισμένα συμβατικά κονιάματα που περιέχουν επιβλαβείς ουσίες που δυνητικά απελευθερώνονται κατά τη χρήση ή την απόρριψη, τα οικολογικά κονιάματα είναι ασφαλή και δεν αποτελούν απειλή για την ανθρώπινη υγεία. Αν και η αρχική επένδυση σε οικολογικά κονιάματα μπορεί να είναι οικονομικά υψηλότερη, η ανθεκτικότητά τους και οι μειωμένες απαιτήσεις συντήρησης έχουν τελικά ως αποτέλεσμα χαμηλότερο συνολικό κόστος με την πάροδο του χρόνου. Συνολικά, η χρήση οικολογικών κονιαμάτων συμβάλλει στην προστασία του περιβάλλοντος, στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και στη βελτίωση της οικονομικής απόδοσης.

Για την ανάπτυξη βελτιωμένων οικολογικών κονιαμάτων, μελετήθηκαν αρχικά υπάρχουσες συνθέσεις που περιέχουν τα επιλεγμένα υλικά για να κατανοηθούν οι δυνατότητες και την εξέλιξή τους τόσο σε ερευνητικό επίπεδο όσο και στην πράξη. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν συνθέσεις κονιαμάτων που αναπτύχθηκαν εργαστηριακά, τα οποία επιλέχθηκαν για τη συνθετική τους απλότητα, το μικρό τους κόστος και τη δυνατότητα εφαρμογής σε μεγάλη κλίμακα. Τα εργαστηριακά αποτελέσματα αυτών των μειγμάτων αποδείχθηκαν ελπιδοφόρα για μελλοντική ανάπτυξη και εφαρμογή στην πράξη, για την παραγωγή καινοτόμων οικολογικών υλικών που θα συμβάλουν στην ενεργειακή αναβάθμιση κτιριακών κατασκευών.

ABSTRACT

This thesis presents an experimental investigation that examines the feasibility of producing eco-friendly coatings with thermal and moisture insulation properties, which can be efficiently applied in monuments or other structures. The produced mortar mixtures include recyclable materials that are non-hazardous for both the environment and human health. The compositions studied consist of expanded perlite and natural hydraulic lime (NHL 3.5), combined with a pozzolanic material to fulfill the requirements regarding compressive strength and plasticity of the mortar.

Ecological solutions, such as the utilization of eco-friendly mortars, have emerged as a crucial issue for environmental protection and the improvement of quality of life of the population. The adoption of these mortars contributes to safeguarding the environment as well as the well-being of its inhabitants. Sustainable raw materials, such as perlite and hydraulic lime, are more environmentally friendly and help reduce the carbon dioxide footprint. Ecological alternatives often offer superior thermal insulation and durability, thereby reducing the need for heating and cooling. This contributes to decreased energy consumption. In contrast to some conventional mortars that contain harmful substances potentially released during use or disposal, ecological mortars are safe and pose no threat to human health. Although the initial investment in eco-mortars may be higher, their durability and reduced maintenance requirements ultimately result in lower life-cycle costs. Overall, the use of ecological mortars contributes to environmental protection, reduction of energy consumption and enhanced economic efficiency.

For the development of optimal ecological mortars, initially existing formulations containing the selected materials were studied, to understand their potential and evolution both in research level and in engineering practice. Subsequently, new mixtures were developed and tested in the laboratory, which were characterized by their compositional simplicity, low cost and applicability on a large scale. The results proved very promising for the future development and production of novel eco-materials that can be successfully applied in energy upgrading of buildings.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	ii
ABSTRACT	iii
Εισαγωγή	1
Κεφάλαιο 1 – Κονιαματικά υλικά	3
1.1 Κονιάματα στα κτίρια	4
1.2 Βασικά στοιχεία των κονιαμάτων	5
1.3 Οικολογικά κονιάματα	7
1.4 Αποτελέσματα οικολογικών κονιαμάτων	9
Κεφάλαιο 2 – Οικοδομική τεχνολογία	11
2.1 Δομικά υλικά κτιρίων	11
2.3 Κριτήρια επιλογής υλικών	12
2.3.1 Δομική αντοχή – ανθεκτικότητα στο χρόνο	13
2.3.2 Ενεργειακό αποτύπωμα	13
2.3.3 Θερμομόνωση	15
2.3.4 Ψύξη	16
2.3.5 Υγρασία – προστασία	17
2.4 Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης	17
Κεφάλαιο 3 – Οικολογικά κονιάματα	21
3.2 Ιστορικά στοιχεία οικολογικών κονιαμάτων	21
3.3 Υλικά σύνθεσης οικολογικών κονιαμάτων	24
3.3.1 Υδραυλική άσβεστος	24
3.3.2 Διογκωμένος περλίτης	26
3.3.3 Μετακαολίνη	30
Κεφάλαιο 4 – Οικολογικά κονιάματα και επιχρίσματα στην αποκατάσταση μνημείων	33

4.1 Χρήση κονιαμάτων σε μνημεία και ιστορικά κτίρια	33
Κεφάλαιο 5 – Πειραματική διαδικασία	39
5.1 Περιγραφή διαδικασίας	39
5.2 Επιλογή των υλικών	46
5.2.1 Αναλυτική περιγραφή σύνθεσης κονιαμάτων	46
Κεφάλαιο 6 – Πειράματα μονοαξονικής θλίψης	55
6.1 Θεωρητική περιγραφή	55
6.1.1 Μέγιστη Τάση	56
6.1.2 Παραμόρφωση μέγιστης τάσης	56
6.1.3 Σφάλμα παραμόρφωσης	57
6.1.4 Μέτρο ελαστικότητας	57
6.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων	57
6.2.1 Επεξεργασία αποτελεσμάτων	61
6.2.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων αντοχής	61
6.3 Συμπεράσματα	66
Κεφάλαιο 7– Πειράματα ζεστού δίσκου	69
7.1 Ρύθμιση παραμέτρων	69
7.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων	71
7.3 Επαλήθευση με βάση το πρότυπο BS-EN 1745:2012	73
Κεφάλαιο 8 – Συμπεράσματα & Προοπτικές	77
Βιβλιογραφία	79

Εισαγωγή

Ο βιώσιμος πολεοδομικός σχεδιασμός είναι μια πολύπλευρη προσέγγιση που εστιάζει στη δημιουργία πόλεων και κοινοτήτων που είναι φιλικές προς το περιβάλλον, κοινωνικά δίκαιες, οικονομικά βιώσιμες και ανθεκτικές μακροπρόθεσμα. Στοχεύει στην αντιμετώπιση διαφόρων προκλήσεων όπως η κλιματική αλλαγή, η εξάντληση των πόρων, η πληθυσμιακή αύξηση, η ανάπτυξη υποδομών και η κοινωνική ανισότητα. Ο βιοκλιματικός σχεδιασμός κτιρίων αναφέρεται στην ανάπτυξη και στον σχεδιασμό κτιρίων που αξιοποιούν τις φυσικές κλιματολογικές συνθήκες του περιβάλλοντος προκειμένου να επιτύχουν βέλτιστη θερμική άνεση και ενεργειακή απόδοση, με μικρότερο αντίκτυπο στο περιβάλλον. Στόχος του βιοκλιματικού σχεδιασμού είναι η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης ενός κτιρίου, η βελτίωση της θερμικής άνεσης των κατοίκων ή των χρηστών και η μείωση του αντίκτυπου στο περιβάλλον, οδηγώντας ένα πιο βιώσιμο και οικολογικό σχεδιασμό και χρήση των φυσικών πόρων. Η ενεργειακή απόδοση κτιρίων, αποτελεί μέρος του βιοκλιματικού σχεδιασμού, αφορά την ικανότητα ενός κτιρίου να χρησιμοποιεί τη διαθέσιμη ενέργεια με αποτελεσματικό τρόπο με σκοπό τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των λειτουργικών δαπανών. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω διαφόρων μεθόδων και τεχνολογιών που σχετίζονται με τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία του κτιρίου.

Η ολοκληρωμένη κατασκευή κτιρίων γίνεται με τη χρήση διαφόρων υλικών και δομικών συστημάτων. Αυτά τα υλικά μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με παράγοντες όπως ο τύπος του κτιρίου, ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός, οι περιβαλλοντικές συνθήκες και η τοπική διαθεσιμότητα. Μερικά κοινά υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή κτιρίων περιλαμβάνουν το σκυρόδεμα, τα τούβλα, τον χάλυβα, ξύλο, γυαλί, πέτρα, γύψο, τα πλαστικά, τα σύνθετα υλικά και τα μονωτικά υλικά. Η ανάπτυξη ανθεκτικών κονιαμάτων είναι μια σημαντική διαδικασία στον τομέα των υλικών και της μηχανικής. Η χρήση νέων υλικών με βελτιωμένες ιδιότητες όπως αντοχή στην καταπόνηση, ανθεκτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες ή ακραίες συνθήκες, μπορεί να βελτιώσει την απόδοση των κονιαμάτων. Τα οικολογικά κονιάματα και επιχρίσματα είναι υλικά που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές που δίνουν προτεραιότητα στη βιωσιμότητα και τη φιλικότητα προς το περιβάλλον. Είναι σχεδιασμένα για να μειώνουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συνήθως συνδέονται με τα συμβατικά δομικά υλικά. Αυτές οι φιλικές προς το περιβάλλον εναλλακτικές λύσεις περιέχουν συχνά φυσικά, ανανεώσιμα και μη τοξικά συστατικά, με στόχο την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα σε όλο τον κύκλο ζωής τους.

Όταν χρησιμοποιούνται οικολογικά κονιάματα, είναι απαραίτητο να γίνουν κατανοητές και να ληφθούν υπ' όψη οι ιδιότητες και οι τεχνικές εφαρμογής τους, καθώς μπορεί να διαφέρουν από τα

συμβατικά υλικά. Επιπλέον, η αποτελεσματικότητά τους μπορεί να εξαρτάται από τις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες και τις ειδικές απαιτήσεις του κτιρίου. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας εξετάσθηκε πειραματικά η ανάπτυξη νέων οικολογικών κονιαμάτων, στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν ως βασικά συστατικά υδραυλική άσβεστος ως συνδετικό υλικό, περλίτης ως ελαφρύ και πορώδες αδρανές, καθώς και μετακαολίνη ως ποζολανικό πρόσθετο. Ο στόχος της σύνθεσης αυτής ήταν η βελτίωση των θερμομονωτικών ιδιοτήτων σε συνδυασμό με ικανοποιητικά μηχανικά χαρακτηριστικά, ώστε να προκύψει ένα κατάλληλο οικολογικό κονίαμα με δυνατότητα εφαρμογής σε έργα αποκατάστασης και ενεργειακής αναβάθμισης κτιρίων.

Κεφάλαιο 1 – Κονιαματικά υλικά

Ο κατασκευαστικός κλάδος και ειδικά η κατασκευή κατοικιών, αποτελεί τον κύριο χρήστη της ενέργειας, αποτελώντας περίπου το 30-40% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας (UNEP, 2012). Όταν συνυπολογίζεται η ενέργεια που δαπανάται για την κατασκευή και την κατεδάφιση κτιρίων, η παγκόσμια ζήτηση που αποδίδεται σε αυτόν τον τομέα εκτιμάται ότι είναι περίπου το 50% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Το 2010, η πραγματική κατανάλωση ενέργειας του κτιριακού τομέα αντιπροσώπευε περίπου 23,7 petawatt¹ (PW) και σύμφωνα με το προβλεπόμενο σενάριο του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας, ο αριθμός αυτός μπορεί να αυξηθεί στα 38,4 PW έως το 2040. Αυτή η κλιμάκωση οφείλεται κυρίως στην αυξημένη ζήτηση από χώρες εκτός ΟΟΣΑ χωρών (IEA 2021). Η κινητήρια δύναμη που φέρνει επανάσταση και διαμορφώνει το μέλλον της αρχιτεκτονικής και την κατασκευή κτιρίων είναι η βιωσιμότητα. Δεδομένου ότι η κατασκευή του κτιρίου επηρεάζει σημαντικά το περιβάλλον, η οικοδόμηση ενός κτιρίου και τα υλικά δόμησης που θα χρησιμοποιηθούν διαδραματίζουν σοβαρό παράγοντα στην όλη προσπάθεια. Η βιώσιμη αρχιτεκτονική περιλαμβάνει την ανάμειξη σύγχρονων επιστημονικών προόδων, τεχνολογικών καινοτομιών και αισθητικών εννοιών με παλαιές παραδοσιακές αρχές που καλύπτουν τις ανθρώπινες ανάγκες, το τοπικό περιβάλλον και τις κλιματικές συνθήκες (Olgyay, et al, 2015; Lechner, 2014).

Ο κτιριακός τομέας στο σύνολο του επηρεάζει το περιβάλλον με πολλαπλούς τρόπους καταναλώνοντας πόρους και παράγοντας απόβλητα και ρύπανση, ενώ είναι υπεύθυνος για τη χρήση μεγάλου μέρους των παγκόσμιων πόρων και πρώτων υλών. Η κατασκευή δομικών στοιχείων και προϊόντων απαιτεί σχεδόν τρία δισεκατομμύρια τόνους πρώτων υλών ετησίως, που ισοδυναμεί με το 40-50% της παγκόσμιας ετήσιας χρήσης υλικών (Santamouris, 2016). Παράλληλα, οι κατασκευές ευθύνονται για την κατανάλωση 12% του παγκόσμιου πόσιμου νερού και σχεδόν 70% των παγκόσμιων προϊόντων ξυλείας. Επιπλέον, ευθύνεται για σχεδόν το 20-25% των ατμοσφαιρικών ρύπων, περίπου το 70% των αλογονανθράκων και σχεδόν το 25-33% των εκπομπών μαύρου άνθρακα, το 40% της ρύπανσης του πόσιμου νερού και τέλος το 50% των αποβλήτων της υγειονομικής ταφής (UNEP, 2012).

¹ Το Petawatt (PW) είναι μια παράγωγη μετρική μονάδα μέτρησης ισχύος. Είναι ίσο με ένα δισεκατομμύριο MWatt (10^{15} W) (Ανάκτηση 15.2.2024 από <https://www.aqua-calc.com/what-is/power/petawatt>).

1.1 Κονιάματα στα κτίρια

Το κονίαμα, ένα ευέλικτο σύνθετο υλικό, έχει παίξει καθοριστικό ρόλο στις κατασκευές για χιλιετίες. Συνδέει τούβλα, πέτρες και άλλα δομικά στοιχεία μεταξύ τους, λειτουργεί ως συνδετικό υλικό, σε υψηλά κτίρια μέχρι γραφικά λιθόστρωτα δρομάκια. Το κονίαμα αποτελείται συνήθως από ένα συνδετικό μέσο, την κονία, όπως ασβέστης ή τσιμέντο, αναμεμειγμένο με αδρανή, (συνηθέστερα άμμο) και νερό. Τα συγκεκριμένα συστατικά και οι αναλογίες τους καθορίζουν τις τελικές ιδιότητες του κονιάματος (Carlan, 2016).

Τα κονιάματα κατηγοριοποιούνται ανάλογα:

- Με βάση τον τρόπο πήξης και σκλήρυνσης:
 - Αερικά κονιάματα: Σκληραίνουν όταν έρθουν σε επαφή με τον αέρα. Παράδειγμα αποτελεί ο σοβάς από ασβέστη.
 - Υδραυλικά κονιάματα: Σκληραίνουν με την επίδραση του νερού. Ένα συνηθισμένο υδραυλικό κονίαμα είναι το τσιμεντοκονίαμα.
- Με το βάρος τους: σε ελαφριά ($<1500 \text{ kg/m}^3$) και σε βαριά ($>1500 \text{ kg/m}^3$).
- Από το είδος της κονίας ή των αδρανών σε:
 - Τσιμεντοκονιάματα με συνδετική ύλη το τσιμέντο.
 - Ασβεστοκονιάματα με συνδετική ύλη το μείγμα πολτού ασβέστη ή την κονιοποιημένη υδράσβεστο.
 - Τσιμεντοασβεστοκονιάματα ή μικτά κονιάματα με μίγμα τσιμέντου και άσβεστου ως συνδετική ύλη.
 - Ποζολανικά κονιάματα με συνδετική ύλη άσβεστο (με μερική υποκατάσταση με τσιμέντο) και ποζολάνη (φυσική ή τεχνητή).
 - Μαρμαροκονιάματα με κύριο αδρανές τη μαρμαρόσκονη αντί της άμμου και συνδετική ύλη ασβέστη ή τσιμέντο (με ενδεχόμενη μικρή προσθήκη γύψου)
 - Γυψοκονιάματα με κύριο συνδετικό υλικό τη γύψο.

- Με τη χρήση τους σε κονιάματα δόμησης, τοιχοποιίας, επιχρισμάτων, δαπέδων ή κονιάματα επένδυσης δαπέδων, επισκευαστικά κονιάματα και συγκολλητικά όπου υπάγονται οι διάφορες κόλλες, ενώ υπάρχουν και διάφορες υποκατηγορίες όπως θερμομονωτικά, ηχομονωτικά, πυράντοχα, κλπ.

Τα κονιάματα που χρησιμοποιούνται σε διάφορα κατασκευαστικά έργα, εξυπηρετούν πολλούς σκοπούς που εξαρτώνται από τις επιθυμητές ιδιότητές τους, οι οποίες καθορίζονται από τη σύνθεση, την ποσοστιαία αναλογία πρώτων υλών και τη μέθοδο παρασκευής. Εκτός από τις μηχανικές αντοχές, κρίσιμες ιδιότητες που καθορίζουν την ποιότητα του κονιάματος και την ευκολία εφαρμογής του είναι η εργασιμότητα, η πρόσφυση στα διάφορα υποστρώματα, η πυκνότητα, το πορώδες, η υδατοπορατότητα, κ.α. Αυτές οι ιδιότητες είναι αλληλεξαρτώμενες καθώς εξαρτώνται από την επιλογή των πρώτων υλών και τις συνθήκες παρασκευής κονιάματος.

1.2 Βασικά στοιχεία των κονιαμάτων

- **Κονία:** Είναι το συνδετικό υλικό, «η κόλλα», που συγκρατεί το κονίαμα. Ιστορικά, ο ασβέστης ήταν το κύριο συνδετικό υλικό, που προερχόταν από τη όπτηση του ασβεστόλιθου. Τα σύγχρονα κονιάματα βασίζονται συχνά στο τσιμέντο Portland², ένα υδραυλικό τσιμέντο που πήζει και σκληραίνει ακόμη και κάτω από το νερό. Άλλες κονίες περιλαμβάνουν ποζολάνες, υλικά με βάση την ηφαιστειακή τέφρα που αντιδρούν με τον ασβέστη για να ενισχύσουν την αντοχή και την ανθεκτικότητα.
- **Αδρανή:** Η άμμος, το πιο κοινό αδρανές, παρέχει όγκο και υφή στο κονίαμα. Το μέγεθος και η διαβάθμιση των σωματιδίων της άμμου επηρεάζουν την ευκολία παραγωγής, την αντοχή και τη διαπερατότητα του τελικού προϊόντος. Η άμμος μπορεί να είναι συλλεκτική, από παραποτάμιας περιοχής ή θραυστή από νταμάρι. Η θαλασσινή άμμος δεν ενδείκνυται για χρήση λόγω των αλάτων που περιέχει. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ανακυκλωμένα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εναλλακτικές λύσεις.
- **Νερό:** Αυτό ενεργοποιεί τις χημικές αντιδράσεις που προκαλούν την πήξη και τη σκλήρυνση της κονίας. Η περιεκτικότητα σε νερό επηρεάζει σημαντικά τον χρόνο πήξης και την τελική

² Στην πιο βασική του μορφή, το τσιμέντο Portland δημιουργείται μέσω μιας διαδικασίας που περιλαμβάνει θέρμανση ασβέστη, σίδηρο, πυρίτιο και αλουμίνα σε ένα συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασίας (1380-1420 °C) σε έναν περιστρεφόμενο κλίβανο, ακολουθούμενη από την άλεση του κλίνκερ που προκύπτει σε λεπτή σκόνη. Κατά τη διαδικασία θέρμανσης του κλιβάνου, οι πρώτες ύλες υφίστανται χημικούς μετασχηματισμούς, καθορίζοντας έτσι τη χημική σύσταση του τσιμέντου. Αυτή η σύνθεση επηρεάζεται από τις αναλογίες και τις ιδιότητες των αρχικών πηγών ασβέστη, σιδήρου, πυριτίου και αλουμίνας, καθώς και από τη θερμοκρασία. Επιπλέον, οι διαφορές στις πηγές πρώτων υλών και οι πρόσθετες διεργασίες, όπως η άλεση και η πιθανή ανάμειξη με ουσίες όπως γύψος, ασβεστόλιθος ή συμπληρωματικά υλικά τσιμέντου, συμβάλλουν στα διακριτά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος τσιμέντου (Ανάκτηση 16.2.2024 από <https://www.cement.org/cement-concrete/concrete-materials/cement-types>).

αντοχή του κονιάματος.

Η ανάμειξη με ρευστοποιητές δημιουργεί πλαστικότητα ιδιότητες. Το κεραμάλευρο μπορεί να θεωρηθεί μια τεχνητή ποζολάνη μόνο υπό προϋποθέσεις. Όταν έχει γίνει όπτηση σε μικρές θερμοκρασίες κάτω των 800 °C, για να μπορεί να αντιδρά με τον ασβέστη. Αλλιώς είναι αδρανές υλικό.



Εικόνα 1.1 Διάφορες κονίες (Γούλας, 2017).

Οι ιδιότητες του κονιάματος μπορούν να προσαρμοστούν για συγκεκριμένες εφαρμογές. Για παράδειγμα, τα κονιάματα τοιχοποιίας που χρησιμοποιούνται για τούβλα και λιθοδομή απαιτούν καλή εργασιμότητα και πλαστικότητα για εύκολη τοποθέτηση και επαρκή αντοχή για να αντέχουν σε ρωγμές. Τα επιχρίσματα που εφαρμόζονται σε εξωτερικούς τοίχους πρέπει να είναι ανθεκτικά στις καιρικές συνθήκες και να αντέχουν τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Τα πυρίμαχα κονιάματα ενσωματώνουν ειδικά αδρανή και πρόσθετα για να παρέχουν ανώτερη πυροπροστασία.

Πέρα από τα βασικά συστατικά, μπορούν να εισαχθούν διάφορα πρόσθετα για την τροποποίηση των ιδιοτήτων του κονιάματος. Τα αερακτικά βελτιώνουν την αντίσταση παγώματος-απόψυξης, ενώ οι χρωστικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αισθητικούς σκοπούς. Οι υπερευστοποιητές ενισχύουν την εργασιμότητα και τα στεγανωτικά πρόσθετα μειώνουν τη διαπερατότητα του νερού. Τα κονιάματα έχουν μικρή συνεισφορά στην αντισεισμικότητα των κτιρίων, και περισσότερο έμμεση συνεισφορά. Για παράδειγμα, σε ένα κτίριο από φέρουσα τοιχοποιία το επίχρισμα προστατεύει την τοιχοποιία από διάβρωση και συνεισφέρει στη διατήρηση της ανθεκτικότητας της. Δεν συνεισφέρει όμως σε μεγάλο βαθμό στη δυσκαμψία της, που σχετίζεται με τη σεισμική απόκριση της κατασκευής (Προβιδάκης, 2008).

Τα δομικά υλικά με βάση το κονίαμα προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα όπως:

- Ανθεκτικότητα: Όταν διαμορφωθεί και εφαρμοστεί σωστά, το κονίαμα μπορεί να αντέξει σε άσχημες καιρικές συνθήκες, συμπεριλαμβανομένων των ακραίων θερμοκρασιών, της βροχής και των κύκλων κατάψυξης-απόψυξης. Ιστορικές κατασκευές που χτίστηκαν πριν από αιώνες με ασβεστοκονίαμα αποτελούν μαρτυρίες για την ανθεκτικότητα αυτού του υλικού.
- Αντοχή: Το κονίαμα παρέχει ισχυρή σύνδεση μεταξύ δομικών στοιχείων, επιτρέποντας την κατασκευή φερόντων τοίχων και άλλων κατασκευών που μπορούν να υποστηρίξουν σημαντικό βάρος.
- Ευελιξία: Η δυνατότητα προσαρμογής της σύνθεσης του κονιάματος επιτρέπει τη χρήση του σε διάφορες εφαρμογές, από περίπλοκες αρχιτεκτονικές λεπτομέρειες έως έργα υποδομής μεγάλης κλίμακας.
- Αντοχή στη φωτιά: Ορισμένες συνθέσεις κονιάματος μπορούν να παρέχουν πυροπροστασία, επιβραδύνοντας την εξάπλωση της φλόγας και προστατεύοντας τα δομικά στοιχεία από ζημιές από φωτιά.
- Βιωσιμότητα: Πολλά συστατικά κονιάματος, όπως ο ασβέστης και τα ανακυκλωμένα υλικά, μπορεί να είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον σε σύγκριση με ορισμένα εναλλακτικά υλικά κατασκευής.

Παράγοντες που απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή στη σύνθεση των κονιαμάτων:

- Χρόνος πήξης: Το κονίαμα χρειάζεται χρόνο για να πήξει και να σκληρύνει, κάτι που μπορεί να επηρεάσει τα χρονοδιαγράμματα κατασκευής.
- Ρηγμάτωση: Η ακατάλληλη ανάμειξη, εφαρμογή ή θερμική διαστολή/συστολή μπορεί να οδηγήσει σε ρωγμές στους αρμούς κονιάματος.
- Υδατοπερατότητα: Ενώ ορισμένα κονιάματα είναι αδιάβροχα, μπορεί να μην είναι εντελώς αδιάβροχα, απαιτώντας πρόσθετα μέτρα στεγανοποίησης ανάλογα με την εφαρμογή.
- Περιορισμοί αντοχής: Αν και είναι ισχυρό, το κονίαμα γενικά δεν έχει το ίδιο επίπεδο αντοχής με το σκυρόδεμα, το οποίο είναι ένα σχετικό υλικό με υψηλότερη περιεκτικότητα σε τσιμέντο.

1.3 Οικολογικά κονιάματα

Τα οικολογικά κονιάματα δίνουν προτεραιότητα στα περιβαλλοντικά οφέλη καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους και επιλέγονται όλο και πιο πολύ στον κατασκευαστικό κλάδο ως μια βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση συγκριτικά με τα συμβατικά κονιάματα. Αυτά τα κονιάματα παρασκευάζονται χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό φυσικών υλικών,

συμπεριλαμβανομένων θρυμματισμένων κεραμικών προϊόντων και ποζολάνης, με αποτέλεσμα ένα ευέλικτο υλικό με διάφορες επιλογές μεγέθους κόκκου. Αυτή η ευελιξία επιτρέπει την εκτεταμένη χρήση τους σε νέες κατασκευές κτιρίων, έργα αποκατάστασης, εφαρμογές τοιχοποιίας και άλλου (Woolley, 2022).

Τα οικολογικά κονιάματα παρέχουν προστιθέμενη αξία λόγω πολλών βασικών πλεονεκτημάτων:

- Φυσική Σύνθεση: Αποτελούνται εξ ολοκλήρου από φυσικά υλικά, εξαλείφοντας την ανάγκη για επιβλαβή χημικά πρόσθετα και προάγοντας ένα πιο υγιεινό περιβάλλον κατασκευής (Farinha, et al, 2021).
- Εξαιρετική αντοχή και χαμηλή συντήρηση: Οι εκτεταμένες δοκιμές έχουν δείξει την ανώτερη ανθεκτικότητα των οικολογικών κονιαμάτων σε σύγκριση με τις παραδοσιακές επιλογές. Αυτό μεταφράζεται σε μειωμένο κόστος συντήρησης και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής για το κέλυφος του κτιρίου (Barbin, et al, 2018).
- Αισθητική εμφάνιση και μειωμένο κόστος φινιρίσματος: Τα οικολογικά κονιάματα διατίθενται σε μια σειρά φυσικών γήινων αποχρώσεων, εξαλείφοντας την ανάγκη για επιπλέον βαφή και συμβάλλοντας σε μια πιο αισθητική πρόσοψη.
- Βιώσιμη επιλογή: Χρησιμοποιώντας ανακυκλωμένα υλικά όπως θρυμματισμένα κεραμικά και φυσικές ποζολάνες, τα οικολογικά κονιάματα συμβάλλουν σε μια πιο βιώσιμη διαδικασία κατασκευής (Woolley, 2022).
- Βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση: Ορισμένα οικολογικά κονιάματα, ιδιαίτερα αυτά που ενσωματώνουν ελαφριά αδρανή όπως το ανακυκλωμένο πλαστικό, μπορούν να συμβάλουν στη βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση των κτιρίων λόγω των θερμομονωτικών τους ιδιοτήτων.

Ενώ τα οικολογικά κονιάματα προσφέρουν μια πολλά υποσχόμενη πορεία προς μια πιο βιώσιμη κατασκευαστική βιομηχανία, ορισμένες προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν είναι:

- Τυποποίηση και κανονισμοί: Οι οικοδομικοί κανονισμοί και τα πρότυπα μπορεί να μην προσαρμόζονται πάντα εύκολα στη χρήση καινοτόμων οικολογικών κονιαμάτων. Απαιτείται περισσότερη έρευνα και ανάπτυξη για τη θέσπιση σαφών κατευθυντήριων γραμμών και σημείων αναφοράς απόδοσης (Woolley, 2022).
- Διαθεσιμότητα και κόστος: Ανάλογα με την τοποθεσία, τα οικολογικά κονιάματα μπορεί να μην είναι τόσο άμεσα διαθέσιμα ή ανταγωνιστικά ως προς το κόστος όσο τα συμβατικά κονιάματα. Η αυξημένη παραγωγή και η ευρύτερη υιοθέτηση μπορούν να βοηθήσουν στην αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων.
- Βελτιστοποίηση απόδοσης: Ενώ ορισμένα οικολογικά κονιάματα παρουσιάζουν καλή απόδοση, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για τη βελτιστοποίηση των συνθέσεων για συγκεκριμένες εφαρμογές και τη διασφάλιση μακροπρόθεσμης αντοχής (Barbin, et al, 2018).

1.4 Αποτελέσματα οικολογικών κονιαμάτων

Ο κατασκευαστικός κλάδος αντιμετωπίζει μια αυξανόμενη πίεση να μειώσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του. Το συμβατικό κονίαμα, ο ακρογωνιαίος λίθος της τοιχοποιίας, βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στο τσιμέντο Portland, που συμβάλλει σημαντικά στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Ένας από τους πρωταρχικούς στόχους των οικολογικών κονιαμάτων είναι η μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της κατασκευής. Μελέτες έχουν δείξει θετικά αποτελέσματα ως προς αυτό:

- Μειωμένες εκπομπές CO₂: Έρευνα των Juhart et al. (2014) συνέκριναν τα οικολογικά κονιάματα με τα συμβατικά. Βρήκαν σημαντική μείωση στο δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) για τα σκευάσματα οικολογικού κονιάματος. Αυτό μεταφράζεται σε μικρότερο αποτύπωμα άνθρακα για κτίρια που κατασκευάζονται με αυτά.
- Διατήρηση πόρων: Οι Fernandes et al. (2023) ερεύνησαν οικολογικά κονιάματα που ενσωματώνουν ανακυκλωμένα υλικά όπως θρυμματισμένα απόβλητα κατεδάφισης. Τα ευρήματά τους καταδεικνύουν μείωση της εξάρτησης από την φυσική άμμο, προωθώντας τη διατήρηση των πόρων και την εκτροπή των απορριμμάτων από τους χώρους υγειονομικής ταφής.
- Συγκρίσιμη απόδοση: Μελέτες όπως αυτή των Barbin et al. (2018) έχουν δείξει ότι τα οικολογικά κονιάματα που παρασκευάζονται με πρόσθετα τσιμεντοειδή υλικά (supplementary cementitious materials - SCM) μπορούν να επιτύχουν συγκρίσιμη αντοχή με τα συμβατικά κονιάματα. Αυτό τα καθιστά κατάλληλα για διάφορες κατασκευαστικές εφαρμογές.
- Βελτιωμένη εργασιμότητα: Ορισμένα οικολογικά κονιάματα, ιδιαίτερα εκείνα με φυσικά συνδετικά όπως ο ασβέστης, μπορούν να παρουσιάσουν εξαιρετική εργασιμότητα. Αυτό μεταφράζεται σε ευκολότερη εφαρμογή και δυνητικά μειωμένο κόστος εργασίας.
- Δυνατότητα ανθεκτικότητας: Ορισμένες μελέτες δείχνουν ότι τα οικολογικά κονιάματα μπορούν να προσφέρουν καλή αντοχή. Οι Fernandes et al. (2023) διαπίστωσαν ότι τα οικολογικά κονιάματά τους παρουσίαζαν ικανοποιητική αντοχή, υποδηλώνοντας δυνατότητες για μακροπρόθεσμη απόδοση.

Κεφάλαιο 2 – Οικοδομική τεχνολογία

Η κατασκευή κτιρίων έχει υποστεί μια αξιοσημείωτη εξέλιξη, μεταβαίνοντας από στοιχειώδεις μεθόδους σε εξελιγμένες τεχνικές, που διαμορφώνονται από τις εξελίξεις στην τεχνολογία, τα υλικά και τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό. Αρχαίοι πολιτισμοί όπως οι Αιγύπτιοι και οι Έλληνες έθεσαν τις βάσεις με στοιχειώδη εργαλεία και υλικά όπως τούβλα από λάσπη και πέτρα, επιδεικνύοντας πρώιμα επιτεύγματα μηχανικής ανδρείας. Με την πάροδο του χρόνου, καινοτομίες όπως το σκυρόδεμα των Ρωμαίων, τα μεταλλικά πλαίσια κατά τη διάρκεια της Βιομηχανικής Επανάστασης και οι σύγχρονες βιώσιμες πρακτικές έχουν φέρει επανάσταση στον τομέα (Edward & Iano, 2013).

2.1 Δομικά υλικά κτιρίων

Στον τομέα της αρχιτεκτονικής και της κατασκευής, η επιλογή των δομικών υλικών έχει βαθιές επιπτώσεις για την ακεραιότητα, τη μακροζωία και τη βιωσιμότητα των κτιρίων. Τα κυριότερα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι:

Συμβατικά υλικά:

- Ξύλο: Το ξύλο ήταν ένα θεμελιώδες δομικό υλικό για χιλιετίες και επιλεγόταν για την ευελιξία του, τη διαθεσιμότητα και την αισθητική του γοητεία. Από αρχαίες κατασκευές με ξύλινο σκελετό έως σύγχρονα κατασκευασμένα προϊόντα ξύλου, όπως ξυλεία με πλαστικοποιημένη κόλλα και ξυλεία με σταυρωτά φύλλα (CLT), το ξύλο προσφέρει αντοχή, βιωσιμότητα και μια ζεστή αισθητική. Ωστόσο, οι ανησυχίες για την αποψίλωση των δασών και την ευαισθησία στην υγρασία και τη φωτιά έχουν ωθήσει τις εξελίξεις στην επεξεργασία του ξύλου και την ανάπτυξη εναλλακτικών υλικών (Kubba, 2017).
- Τούβλο και πέτρα: Τα τούβλα και οι πέτρες έχουν από καιρό προτιμηθεί για την ανθεκτικότητά τους, τις ιδιότητες θερμικής μάζας και τη διαχρονική αισθητική τους. Ενώ τα συμβατικά τούβλα από πηλό και η φυσική πέτρα παραμένουν δημοφιλείς επιλογές, οι εξελίξεις στις τεχνικές κατασκευής οδήγησαν στην παραγωγή κατασκευασμένων τούβλων και υλικών που μοιάζουν με πέτρα που προσφέρουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά απόδοσης και μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Επιπλέον, η χρήση ανακυκλωμένων υλικών στην παραγωγή τούβλων και πέτρας ευθυγραμμίζεται με τους στόχους βιωσιμότητας (Edward & Iano, 2013).

Σύγχρονα Υλικά:

- Σκυρόδεμα: Το σκυρόδεμα είναι ίσως το πιο διαδεδομένο οικοδομικό υλικό της σύγχρονης εποχής, που εκτιμάται για την αντοχή, την ευελιξία και το σχετικά χαμηλό κόστος του. Οι παραδοσιακές συνθέσεις σκυροδέματος αποτελούνται από τσιμέντο, αδρανή και νερό, αλλά πρόσφατες καινοτομίες έχουν εισαγάγει πρόσθετα υλικά όπως η τέφρα και σκωρία για τη βελτίωση της βιωσιμότητας και τη μείωση των εκπομπών άνθρακα. Επιπλέον, οι εξελίξεις στο οπλισμένο σκυρόδεμα, όπως η χρήση χάλυβα ή σύνθετων οπλισμών, έχουν επεκτείνει τις εφαρμογές του σε έργα πολυώροφων κατασκευών και υποδομών.

- Χάλυβας: Ο χάλυβας είναι γνωστός για την εξαιρετική του αναλογία αντοχής προς βάρος, καθιστώντας τον ιδανική επιλογή για κατασκευές μεγάλου ανοίγματος όπως ουρανοξύστες, γέφυρες και βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Ενώ η παραγωγή χάλυβα απαιτεί σημαντικές εισροές ενέργειας, η ανακυκλωσιμότητα και η μεγάλη διάρκεια ζωής συμβάλλουν στη αποδεδειγμένη βιωσιμότητά του. Οι πρόσφατες εξελίξεις σε κράματα χάλυβα υψηλής αντοχής και καινοτόμες τεχνικές κατασκευής, όπως η τρισδιάστατη εκτύπωση και η αρθρωτή κατασκευή, έχουν προωθήσει περαιτέρω την εξέχουσα θέση του χάλυβα στα σύγχρονα οικοδομικά έργα (Woolley, 2022).

Νέα υλικά:

- Μηχανικά σύνθετα: Τα κατασκευασμένα σύνθετα υλικά, αντιπροσωπεύουν ένα αναπτυσσόμενο είδος στα δομικά υλικά. Αυτά τα ελαφριά αλλά στιβαρά υλικά προσφέρουν υψηλή αντοχή, αντοχή στη διάβρωση και ευελιξία σχεδιασμού, καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές στην αεροδιαστημική, την αυτοκινητοβιομηχανία και την αντισεισμική πολιτική μηχανική. Στην κατασκευή, τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για δομική ενίσχυση, καταστρώματα γεφυρών και προσόψεις, υποσχόμενη βελτιωμένη απόδοση και ανθεκτικότητα (Ochsendorf & Hajime, 2018).
- Βιοαποικοδομήσιμα υλικά: Με αυξανόμενες περιβαλλοντικές ανησυχίες, οι ερευνητές διερευνούν βιοαποδομήσιμα υλικά που προέρχονται από ανανεώσιμες πηγές ως εναλλακτικές λύσεις στα συμβατικά δομικά υλικά. Τα βιοπλαστικά, το μπαμπού, οι μπάλες άχυρου και τα σύνθετα υλικά είναι μεταξύ των αναδυόμενων υλικών βιολογικής βάσης που κερδίζουν την προσοχή για το χαμηλό περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα και τις πιθανές εφαρμογές τους σε βιώσιμες κατασκευαστικές πρακτικές. Ενώ βρίσκονται ακόμη στα αρχικά στάδια ανάπτυξης, αυτά τα υλικά υπόσχονται τη μείωση των οικολογικών επιπτώσεων του δομημένου περιβάλλοντος (Kubba, 2017).

2.3 Κριτήρια επιλογής υλικών

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης επιλέχθηκε η ανάπτυξη κονιάματος με χρήση υδραυλικής άσβεστου ως βασικού συνδετικού υλικού, περλίτη ως ελαφρού και θερμομονωτικού αδρανούς, καθώς και μετακαολίνη ως ποζολανικού προσθέτου με βελτιωτικές ιδιότητες στη μηχανική και μακροχρόνια συμπεριφορά του υλικού. Η συγκεκριμένη σύνθεση προτάθηκε με στόχο τον συνδυασμό χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας με ικανοποιητική αντοχή και ανθεκτικότητα, ώστε να καλύπτει τις απαιτήσεις εφαρμογών ενεργειακής αναβάθμισης και αποκατάστασης. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται αναλυτικά τα κριτήρια επιλογής των υλικών, τόσο σε επίπεδο μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων, όσο και σε σχέση με τη διαθεσιμότητα και τη συμβατότητά τους με την υπό μελέτη εφαρμογή.

2.3.1 Δομική αντοχή – ανθεκτικότητα στο χρόνο

Αντοχή: Αναφέρεται στην ικανότητα ενός υλικού να αντιστέκεται σε παραμόρφωση ή θραύση υπό εφαρμοζόμενο φορτίο (Ashby, 2019). Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι δύναμης που λαμβάνονται υπ' όψη:

- Αντοχή σε θλίψη: Η ικανότητα να αντέχει τις δυνάμεις που πιέζουν προς τα μέσα, είναι ζωτικής σημασίας για θεμέλια, κολώνες και τοίχους. Το σκυρόδεμα υπερέρχει σε αυτόν τον τομέα.
- Αντοχή σε εφελκυσμό: Η ικανότητα αντίστασης στις δυνάμεις που απομακρύνουν το υλικό, απαραίτητη για δοκούς, και σπλισμό. Ο χάλυβας είναι το καταλληλότερο υλικό στην αντοχή σε εφελκυσμό.

Ανθεκτικότητα: Περιλαμβάνει την αντοχή ενός υλικού σε περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως ο καιρός, η διάβρωση και η βιολογική υποβάθμιση. Τα ανθεκτικά υλικά απαιτούν ελάχιστη συντήρηση και εξασφαλίζουν μακροχρόνια απόδοση. Η τοιχοποιία, για παράδειγμα, προσφέρει εξαιρετική αντοχή στις καιρικές συνθήκες (Edward & Iano, 2013).

Εργασιμότητα: Η ιδιότητα αυτή αναφέρεται στην ευκολία με την οποία ένα υλικό μπορεί να διαμορφωθεί, να κοπεί και να ενωθεί κατά την κατασκευή. Η ξυλεία είναι γνωστή για την καλή εργασιμότητα της, επιτρέποντας ευέλικτα σχεδιαστικά στοιχεία.

Βάρος: Το βάρος ενός υλικού μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής. Τα ελαφριά υλικά όπως το αλουμίνιο απλοποιούν την κατασκευή και μειώνουν τις απαιτήσεις θεμελίωσης.

Πυραντοχή: Αυτή η ιδιότητα καθορίζει την ικανότητα ενός υλικού να αντέχει στη φωτιά και να διατηρεί τη δομική ακεραιότητα. Το σκυρόδεμα προσφέρει εξαιρετική αντοχή στη φωτιά, ενώ η ξυλεία απαιτεί επεξεργασίες πυροπροστασίας.

2.3.2 Ενεργειακό αποτύπωμα

Η κατασκευή κτιρίων παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση του περιβάλλοντος και της οικονομίας. Ωστόσο, η διαδικασία κατασκευής κτιρίων συνοδεύεται από σημαντικό ενεργειακό αποτύπωμα, που περιλαμβάνει διάφορα στάδια από την εξόρυξη υλικού έως τη φάση λειτουργίας (Farinha, et al, 2021). Οι λειτουργίες των κτιρίων³ αντιπροσωπεύουν το 30% της παγκόσμιας τελικής κατανάλωσης ενέργειας και το 26% των παγκόσμιων εκπομπών που σχετίζονται με την ενέργεια (8% είναι άμεσες εκπομπές στα κτίρια και 18% έμμεσες εκπομπές από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας που χρησιμοποιείται στα κτίρια). Οι άμεσες εκπομπές από τον τομέα των κτιρίων μειώθηκαν το 2022 σε σύγκριση με το προηγούμενο έτος, παρά τις ακραίες θερμοκρασίες

³ International Energy Agency (IEA). Buildings - Energy System (Ανάκτηση 23.2.2024 από <https://www.iea.org/energy-system/buildings>).

που αυξάνουν τις εκπομπές που σχετίζονται με τη θέρμανση σε ορισμένες περιοχές. Το 2022, η χρήση ενέργειας στον κτιριακό τομέα αυξήθηκε κατά περίπου 1%.

Το ενεργειακό αποτύπωμα των κτιριακών κατασκευών:

- Εξόρυξη και κατασκευή υλικών: Τα δομικά υλικά όπως το σκυρόδεμα, ο χάλυβας και το γυαλί είναι αναπόσπαστα στοιχεία της κατασκευής αλλά απαιτούν σημαντική ενέργεια για εξόρυξη, επεξεργασία και μεταφορά. Για παράδειγμα, η παραγωγή τσιμέντου, βασικό συστατικό του σκυροδέματος, είναι ενεργοβόρα και εκπέμπει σημαντικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO_2). Ομοίως, η κατασκευή χάλυβα περιλαμβάνει υψηλές εισροές ενέργειας, κυρίως από ορυκτά καύσιμα (Ashby, 2023).
- Κατασκευή και εγκατάσταση: Η φάση κατασκευής περιλαμβάνει σημαντική κατανάλωση ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της λειτουργίας μηχανημάτων, της μεταφοράς υλικών και των επιτόπιων δραστηριοτήτων. Βαρέα μηχανήματα όπως εκσκαφείς, γερανοί και μπουλντόζες λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα, συμβάλλοντας στις εκπομπές άνθρακα. Επιπλέον, η ενέργεια καταναλώνεται κατά τη συναρμολόγηση και εγκατάσταση δομικών στοιχείων όπως συστήματα φωτισμού και μόνωσης (Kubba, 2017).
- Λειτουργική ενέργεια: Εκτός από την κατασκευή, τα κτίρια καταναλώνουν ενέργεια καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους για θέρμανση, ψύξη, φωτισμό και τροφοδοσία ηλεκτρικών συσκευών. Η επιλογή των δομικών υλικών και ο σχεδιασμός επηρεάζει σημαντικά τη ζήτηση ενέργειας κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης. Για παράδειγμα, κτίρια με κακή μόνωση απαιτούν περισσότερη ενέργεια για θέρμανση και ψύξη, οδηγώντας σε υψηλότερο λειτουργικό κόστος και περιβαλλοντικές επιπτώσεις (DeKay & Brown, 2017).

Το ενεργειακό αποτύπωμα που σχετίζεται με τις κτιριακές κατασκευές έχει πολλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως:

- Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου: Η καύση ορυκτών καυσίμων σε όλη τη διαδικασία κατασκευής και τη φάση λειτουργίας οδηγεί στην απελευθέρωση αερίων θερμοκηπίου όπως το CO_2 , συμβάλλοντας στην υπερθέρμανση του πλανήτη και στην κλιματική αλλαγή. Ο μετριασμός αυτών των εκπομπών είναι ζωτικής σημασίας για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των κτιριακών κατασκευών (Ashby, 2023).
- Εξάντληση πόρων: Η εξόρυξη πρώτων υλών για κατασκευές μπορεί να εξαντλήσει τους φυσικούς πόρους, συμπεριλαμβανομένων των ορυκτών, των δασών και του νερού. Η υπερεκμετάλλευση αυτών των πόρων μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή οικοτόπων, απώλεια βιοποικιλότητας και υποβάθμιση του οικοσυστήματος, επιδεινώνοντας τις περιβαλλοντικές ανησυχίες (Kibert, 2016).
- Ρύπανση του αέρα και των υδάτων: Οι βιομηχανικές διεργασίες που εμπλέκονται στην εξόρυξη και την κατασκευή υλικών μπορούν να προκαλέσουν ρύπανση του αέρα και των υδάτων, θέτοντας κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία και τα οικοσυστήματα. Για παράδειγμα, οι εργασίες εξόρυξης απελευθερώνουν σωματίδια και τοξικές χημικές ουσίες στον αέρα και τα υδάτινα σώματα, επηρεάζοντας τόσο τις τοπικές κοινότητες όσο και την ζωή σε άγριο φυσικό περιβάλλον (Kubba, 2017).

2.3.3 Θερμομόνωση

Η θερμομόνωση περιλαμβάνει τη χρήση υλικών για τη μείωση της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού ενός κτιρίου. Ελαχιστοποιώντας τη ροή θερμότητας, η μόνωση βοηθά στη διατήρηση μιας άνετης εσωτερικής θερμοκρασίας, ενώ μειώνει την ανάγκη για συστήματα θέρμανσης και ψύξης. Αυτό όχι μόνο βελτιώνει την άνεση των κατοίκων, αλλά και μειώνει την κατανάλωση ενέργειας και το κόστος κοινής χρήσης (DeKay & Brown, 2017).

Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για παθητική θέρμανση αποτελεί την καλύτερη επιλογή όταν συνδυάζεται με στρατηγικές μείωσης της απώλειας θερμότητας στη δομή του κτιρίου. Αυτό περιλαμβάνει την εφαρμογή θερμομόνωσης, τη διασφάλιση της στεγανότητας στα δομικά στοιχεία και την θωράκιση του κτιρίου από τους σκληρούς χειμερινούς ανέμους, κάτι που μπορεί να επιτευχθεί μέσω του κατάλληλου προσανατολισμού του κτιρίου (Παπαμανώλης, 2015). Η θερμομόνωση με κονιάματα περιλαμβάνει την εφαρμογή εξειδικευμένων μειγμάτων κονιάματος σε επιφάνειες κτιρίων για τη μείωση της μεταφοράς θερμότητας. Αυτά τα κονιάματα είναι κατασκευασμένα με ελαφριά αδρανή, μονωτικά υλικά και πρόσθετα για την ενίσχυση των θερμικών ιδιοτήτων. Σε αντίθεση με τα συμβατικά μονωτικά υλικά όπως το υαλοβάμβακα ή οι σανίδες αφρού, τα συστήματα με βάση το κονίαμα προσφέρουν μοναδικά πλεονεκτήματα όπως αντοχή στη φωτιά, διαπνοή και προσαρμοστικότητα σε διαφορετικά υποστρώματα (TEE, 2011).

Βασικές τεχνικές και εφαρμογές:

Συστήματα εξωτερικής μόνωσης και φινιρίσματος: Τα συστήματα EIFS (Exterior Insulation and Finish Systems) είναι μια ευρέως διαδεδομένη τεχνική και είναι συστήματα εξωτερικής θερμομόνωσης με επίχρισμα. Περιλαμβάνουν την εφαρμογή πολλαπλών στρώσεων, συμπεριλαμβανομένης της βασικής επίστρωσης, της μονωτικής σανίδας, του ενισχυτικού πλέγματος και της επίστρωσης φινιρίσματος. Η μονωτική πλάκα, συνήθως κατασκευασμένη από διογκωμένη πολυστερίνη (expanded polystyrene-EPS) ή ορυκτοβάμβακα, παρέχει θερμική αντίσταση, ενώ οι στρώσεις κονιάματος προσφέρουν προστασία και αισθητική όψη. Το EIFS όχι μόνο βελτιώνει την ενεργειακή απόδοση αλλά ενισχύει και την αισθητική εμφάνιση των κτιρίων.

Συστήματα μονωμένων επιχρισμάτων: Παρόμοια με το EIFS, τα συστήματα μονωμένων επιχρισμάτων χρησιμοποιούν κονιάματα σε συνδυασμό με μονωτικά υλικά. Αυτά τα συστήματα είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για τη μετασκευή υφιστάμενων κτιρίων, παρέχοντας μια απρόσκοπτη λύση για τη βελτίωση της θερμικής απόδοσης. Τα συστήματα μονωμένων επιχρισμάτων προσφέρουν ευελιξία στο σχεδιασμό και μπορούν να προσαρμοστούν ώστε να πληρούν συγκεκριμένες απαιτήσεις μόνωσης. Επιπλέον, συμβάλλουν στη δομική σταθερότητα του κτιρίου μειώνοντας τη θερμική καταπόνηση και αποτρέποντας την είσοδο υγρασίας (Hall, 2010).

Μονωτικά κονιάματα: Τα μονωτικά κονιάματα χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές δαπέδων για να παρέχουν θερμομόνωση από το έδαφος. Αυτά τα επιχρίσματα αποτελούνται από ελαφριά αδρανή όπως διογκωμένη άργιλος ή περλίτης αναμεμειγμένα με συνδετικά τσιμέντου. Με την ενσωμάτωση μονωτικών υλικών στο μείγμα κονιάματος, η θερμική αγωγιμότητα μειώνεται σημαντικά, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Τα μονωτικά κονιάματα είναι

ιδανικά για συστήματα ενδοδαπέδιας θέρμανσης, βελτιώνοντας την απόδοσή τους και μειώνοντας την απώλεια θερμότητας (Ashby, 2019).

2.3.4 Ψύξη

Η ψύξη των κτιρίων είναι μια σημαντική πρόκληση, ειδικά σε περιοχές με ζεστά κλίματα όπου ο κλιματισμός είναι σημαντικός καταναλωτής ενέργειας. Ωστόσο, οι συμβατικές μέθοδοι, όπως η χρήση κονιαμάτων στην κατασκευή κτιρίων, προσφέρουν βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις που όχι μόνο παρέχουν δομική ακεραιότητα αλλά συμβάλλουν και στην παθητική ψύξη (Lechner, 2014).

Σύνθεση για απόδοση ψύξης: Για να βελτιστοποιηθεί η ψυκτική επίδραση των κονιαμάτων, ορισμένα πρόσθετα μπορούν να εισαχθούν κατά τη διαδικασία ανάμειξης. Ένα τέτοιο πρόσθετο είναι τα μικροενθυλακωμένα υλικά αλλαγής φάσης (microencapsulated phase change materials - MPCM), τα οποία μπορούν να απορροφήσουν και να απελευθερώσουν θερμότητα κατά τη διάρκεια της μετάβασης φάσης. Όταν ενσωματώνονται σε κονιάματα, τα κονιάματα που έχουν εγχυθεί με MPCM παρουσιάζουν ενισχυμένη θερμική μάζα, επιτρέποντάς τους να απορροφούν την περίσσεια θερμότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας και να την απελευθερώνουν τη νύχτα, σταθεροποιώντας έτσι τις εσωτερικές θερμοκρασίες (Faraj & Radhi, 2015).

Η εφαρμογή κονιαμάτων που επιφέρουν δροσισμό μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με τη φάση κατασκευής. Κατά τη διαδικασία κατασκευής του κτιρίου, αυτά τα κονιάματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για φέροντες όσο και για μη φέροντες τοίχους. Επιπλέον, η μετασκευή υφιστάμενων κατασκευών με κονιάματα που επιφέρουν δροσισμό είναι επίσης εφικτή, προσφέροντας μια οικονομικά αποδοτική λύση για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης σε παλαιότερα κτίρια. Οι τεχνικές εφαρμογής κυμαίνονται από συμβατικές πρακτικές τοιχοποιίας έως εξειδικευμένες μεθόδους ομοιόμορφης ενσωμάτωσης προσθέτων (Kibert, 2016).

Η υιοθέτηση κονιαμάτων που επιφέρουν δροσισμό μπορεί να μειώσει σημαντικά την εξάρτηση από μηχανικά συστήματα ψύξης, οδηγώντας σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Ελαχιστοποιώντας τις διακυμάνσεις της εσωτερικής θερμοκρασίας, αυτά τα κονιάματα συμβάλλουν σε ένα πιο άνετο περιβάλλον διαβίωσης ή εργασίας, ενώ μειώνουν το συνολικό αποτύπωμα άνθρακα που σχετίζεται με τη λειτουργία του κτιρίου (DeKay & Brown, 2014).

Κατά τη διαδικασία κατασκευής, ο συνδυασμός χρήσης κονιαμάτων και τοιχοποιίας όχι μόνο επιβραδύνουν τη μεταφορά θερμότητας στους τοίχους αλλά χρησιμεύουν και ως δεξαμενές θερμότητας κατά τις ώρες της ημέρας. Σε περιοχές με ζεστό και ξηρό καιρό, οι θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι συνήθως υψηλές, οδηγώντας σε πιο δροσερές νύχτες. Η χρήση του νυχτερινού αερισμού μπορεί στη συνέχεια να δροσίσει την εσωτερική μάζα, η οποία στη συνέχεια θα απορροφήσει τη θερμότητα κατά τη διάρκεια της επόμενης ημέρας (Lechner, 2014).

2.3.5 Υγρασία – προστασία

Η διείσδυση υγρασίας στα κτίρια είναι ένα επίμονο και επιζήμιο ζήτημα, που προκαλεί δομική αποσύνθεση, ανάπτυξη μούχλας και κινδύνους για την υγεία. Για την καταπολέμηση αυτού του προβλήματος, χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι και υλικά, μεταξύ των οποίων τα κονιάματα παίζουν καθοριστικό ρόλο (Edward & Iano, 2013).

Τα κονιάματα χρησιμεύουν ως προστατευτικό στρώμα στους τοίχους κτιρίων, αποτρέποντας τη διείσδυση νερού στους εσωτερικούς χώρους (Ashby, 2023). Αρκετές ιδιότητες καθιστούν τα κονιάματα αποτελεσματικά στην αντίσταση στην υγρασία:

- **Ανθεκτικότητα στο νερό:** Τα σύγχρονα κονιάματα έχουν σχεδιαστεί για να απωθούν το νερό αποτελεσματικά, εμποδίζοντάς το να διαρρεύσει μέσα από την πρόσοψη του κτιρίου ή τα δομικά στοιχεία.
- **Ανθεκτικότητα:** Τα κονιάματα παρέχουν ένα ανθεκτικό φράγμα έναντι της υγρασίας, αντέχοντας την έκθεση σε καιρικά στοιχεία και περιβαλλοντικούς παράγοντες για παρατεταμένες περιόδους.
- **Πρόσφυση:** Τα κονιάματα προσκολλώνται καλά σε διαφορετικά υποστρώματα, εξασφαλίζοντας στεγανή στεγανοποίηση που εμποδίζει την εισχώρηση υγρασίας.
- **Δυνατότητα διαπνοής:** Ενώ τα κονιάματα εμποδίζουν την είσοδο υγρασίας στο κτίριο, επιτρέπουν επίσης τη διαφυγή ατμών, αποτρέποντας τη συσσώρευση συμπύκνωσης και προβλήματα που σχετίζονται με την υγρασία, όπως η ανάπτυξη μούχλας (Bisegna, et al (2016).

2.4 Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης

Καθώς οι παγκόσμιες ενεργειακές απαιτήσεις αυξάνονται, το δομημένο περιβάλλον αντιπροσωπεύει σημαντικό μέρος της κατανάλωσης ενέργειας. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA), τα κτίρια συμβάλλουν περίπου στο 36% της παγκόσμιας χρήσης ενέργειας και στο 39% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που σχετίζονται με την ενέργεια (IEA, 2021). Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων έχει καταστεί υψίστης σημασίας. Το κτιριακό κέλυφος παίζει καθοριστικό ρόλο από αυτή την άποψη, χρησιμεύοντας ως η πρώτη γραμμή άμυνας έναντι των εξωτερικών περιβαλλοντικών συνθηκών.

Η θερμική απόδοση αναφέρεται στην ικανότητα ενός κτιρίου να διατηρεί ιδανικές εσωτερικές θερμοκρασίες μέσω της διαχείρισης της μεταφοράς θερμότητας. Οι θερμικές ιδιότητες του κελύφους επηρεάζονται από τα υλικά που χρησιμοποιούνται, τα επίπεδα μόνωσης και τις στρατηγικές σχεδιασμού. Υλικά υψηλής θερμικής μάζας, όπως το σκυρόδεμα και το τούβλο, μπορούν να απορροφήσουν και να αποθηκεύσουν θερμότητα, βοηθώντας στη συγκράτηση των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας. Αντίθετα, υλικά με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, όπως τα μονωμένα πάνελ, μειώνουν τη μεταφορά θερμότητας, ελαχιστοποιώντας την απώλεια ενέργειας (Rohit et al., 2019).

Επιστρώσεις για ενεργειακή απόδοση:

Οι επιστρώσεις μπορούν να ενισχύσουν την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων μέσω διαφόρων μηχανισμών, συμπεριλαμβανομένων των ανακλαστικών και μονωτικών ιδιοτήτων. Οι κύριοι τύποι περιλαμβάνουν:

- Ανακλαστικές επικαλύψεις: Αυτές οι επικαλύψεις έχουν σχεδιαστεί για να αντανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία μακριά από την επιφάνεια του κτιρίου, μειώνοντας την απορρόφηση θερμότητας.
- Μονωτικές επιστρώσεις: Αυτές οι επικαλύψεις περιέχουν υλικά που παρέχουν θερμική αντίσταση, ενισχύοντας τις μονωτικές ιδιότητες του κελύφους του κτιρίου.
- Αδιάβροχα επιχρίσματα: Εφαρμόζονται για την προστασία των κτιρίων από την υγρασία, αποτρέποντας την απώλεια θερμότητας λόγω διείσδυσης αέρα. Οι αδιάβροχες επιστρώσεις μπορούν να βελτιώσουν τη συνολική αντοχή και απόδοση των δομικών υλικών.

Τα μονωτικά κονιάματα συνήθως ενσωματώνουν ελαφριά αδρανή, πολυμερή και πρόσθετα που ενισχύουν τη θερμική αντοχή και τις ιδιότητες πρόσφυσης. Τα κοινά υλικά περιλαμβάνουν:

- Διογκωμένη πολυστερίνη (Expanded polystyrene-EPS): Ελαφρύ και αποτελεσματικό στη μείωση της θερμικής αγωγιμότητας. Είναι γνωστή στην Ελλάδα και ως φελιζόλ.
- Περλίτης: Αργιλοπυριτικό ορυκτό ηφαιστειογενής προέλευσης, με τη μοναδική ιδιότητα να διογκώνεται όταν θερμαίνεται. Είναι χημικά αδρανές, έχει ουδέτερο pH και αποτελείται κυρίως από άμορφο ηφαιστιογενές γυαλί με υψηλή περιεκτικότητα σε νερό.
- Αεροπήκτωμα (Aerogels): είναι ένας τύπος σχετικά νέου υλικού, διαυγές με χαρακτηριστική μικρή θερμική αγωγιμότητα. Τόσο η ονομασία όσο και οι ιδιότητες αυτού του υλικού προκύπτουν από τον τρόπο παρασκευής του, συγκεκριμένα από το τρόπο ξήρανσής του.

Οφέλη από τη χρήση μονωτικών κονιαμάτων:

- Βελτιωμένη θερμική απόδοση: Τα μονωτικά κονιάματα μπορούν να μειώσουν τη θερμογέφυρωση, ένα κοινό πρόβλημα στα παραδοσιακά συστήματα τοιχοποιίας, οδηγώντας σε βελτιωμένη συνολική ενεργειακή απόδοση.
- Μειωμένο πάχος: Η χρήση προηγμένων υλικών επιτρέπει πιο λεπτές εφαρμογές, επιτυγχάνοντας παράλληλα υψηλές τιμές μόνωσης, ελαχιστοποιώντας έτσι τις επιπτώσεις στον ωφέλιμο χώρο.
- Βελτιωμένος έλεγχος υγρασίας: Πολλά μονωτικά κονιάματα διαθέτουν επίσης ιδιότητες ρύθμισης της υγρασίας, αποτρέποντας προβλήματα που σχετίζονται με την υγρασία και την ανάπτυξη μούχλας.

Τα μονωτικά κονιάματα μπορούν να εφαρμοστούν σε διάφορα πλαίσια, όπως:

- Συστήματα εξωτερικής μόνωσης και φινιρίσματος: Αυτά τα συστήματα ενσωματώνουν μονωτικά κονιάματα για τη βελτίωση της θερμικής απόδοσης του κελύφους του κτιρίου.
- Έργα ανακαίνισης: Τα μονωτικά κονιάματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μετασκευή υφιστάμενων κτιρίων, βελτιώνοντας την ενεργειακή τους απόδοση χωρίς εκτεταμένες δομικές αλλαγές.

Έρευνες έχουν δείξει ότι τα κτίρια που χρησιμοποιούν μονωτικά κονιάματα μπορούν να επιτύχουν σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Για παράδειγμα, ένα έργο στην Ευρώπη έδειξε μείωση κατά 40% στην κατανάλωση ενέργειας θέρμανσης όταν εφαρμόστηκαν μονωτικά κονιάματα σε εξωτερικούς τοίχους. Η μελέτη των Boulanger et al., (2022), εστιάζει στην εξοικονόμηση ενέργειας μέσω της χρήσης θερμομονωτικών κονιαμάτων στις ανακαινίσεις κτιρίων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα ειδικά κονιάματα μπορούν να προσφέρουν σημαντικές ενεργειακές εξοικονομήσεις, βελτιώνοντας τη συνολική ενεργειακή απόδοση των κτιρίων (Boulanger et al., 2022).

Μελέτη περίπτωσης σε περιοχή με κατοικίες, έδειξε την επίδραση των ανακλαστικών επιστρώσεων στην κατανάλωση ενέργειας. Τα σπίτια που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με ανακλαστικές επικαλύψεις εμφάνισαν μείωση 15% στο κόστος ψύξης σε σύγκριση με τα σπίτια χωρίς επεξεργασία (Sharma et al., 2016).

Η χρήση τροποποιημένων με πολυμερή κονιαμάτων σε ένα πολυώροφο κτίριο βελτίωσε τη θερμομόνωση και μείωσε την κατανάλωση ενέργειας κατά 25% σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους. Αυτό αποδόθηκε στη βελτιωμένη πρόσφυση και ευκαμψία των υλικών, τα οποία παρείχαν επίσης καλύτερη αντοχή στις καιρικές συνθήκες (Johnson et al., 2018).

Κεφάλαιο 3 – Οικολογικά κονιάματα

Οι παραδοσιακές οικοδομικές πρακτικές συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, στην αποψίλωση των δασών και στη ρύπανση σε όλο τον κύκλο ζωής των οικοδομικών υλικών, από την εξόρυξη, τη μεταφορά, την παραγωγή και την κατασκευή έως και την κατεδάφιση. Ωστόσο, μια αυξανόμενη τάση προς τη βιώσιμη κατασκευή προσφέρει μια πολλά υποσχόμενη λύση. Με την ενσωμάτωση φιλικών προς το περιβάλλον υλικών, οι αρχιτέκτονες και οι κατασκευαστές μπορούν αποδεδειγμένα να μειώσουν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των έργων τους (Munoz-Ruiperez et al., 2016). Μια τεχνολογική καινοτομία στην κατασκευή είναι ο σχεδιασμός ελαφρών κονιαμάτων για χρήση στην κατασκευή νέων δομικών υλικών, γεγονός που μπορεί να μειώσει σημαντικά τα φορτία των κατασκευών και το οποίο συμβάλλει στη μόνωση των κτιρίων (Briones-Llorente et al., 2020). Η ανάλυση του κύκλου ζωής δείχνει ότι οι παραδοσιακοί τύποι κονιαμάτων (όπως αυτά με εναέριο συνδετικό ασβέστη) είναι πιο βιώσιμοι σε σύγκριση με τα κονιάματα που βασίζονται στο τσιμέντο. Ένα οικολογικό κονίαμα μπορεί επίσης να σχεδιαστεί και να παραχθεί χρησιμοποιώντας βιομηχανικά υποπροϊόντα.

3.2 Ιστορικά στοιχεία οικολογικών κονιαμάτων

Η αναζήτηση βιώσιμων δομικών υλικών δεν είναι σύγχρονο φαινόμενο. Η χρήση οικολογικών κονιαμάτων χρονολογείται από τους αρχαίους πολιτισμούς, όπου οι κοινωνίες εκμεταλλεύονταν τους τοπικούς πόρους για να κατασκευάσουν βιώσιμες δομές που να είναι ταυτόχρονα ανθεκτικά και αρμονικά με το περιβάλλον. Ένα τέτοιο υλικό που ξεχωρίζει στα χρονικά της αρχιτεκτονικής ιστορίας είναι το ασβεστοπηλοκονίαμα κονίαμα. Από τις αρχαίες κατασκευές από τούβλα λάσπης μέχρι ασβεστοκονιάματα, ιστορικά στοιχεία αποκαλύπτουν μια πλούσια ταπετσαρία οικολογικών οικοδομικών πρακτικών. Τα πρώτα επιχρίσματα ήταν χωμάτινα, ήταν απλά μείγματα πηλού, άμμου και άχυρου, τα οποία δεν χρειάζονταν φούρνους και ξηραίνονταν στον ήλιο. Το μείγμα χυτευόταν σε τούβλα και χρησιμοποιήθηκαν ευρέως. Τα επιχρίσματα από πηλό εξακολουθούν να είναι τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα επιχρίσματα παγκοσμίως (Webb, 2012). Ίσως το πιο διαδεδομένο παράδειγμα οικολογικών κονιαμάτων είναι αυτά που κατασκευάζονται από χώμα. Τα χωμάτινα κονιάματα αποτελούνται από διάφορους συνδυασμούς χώματος, αργίλου και μερικές φορές οργανικών πρόσθετων όπως άχυρο ή τρίχες ζώων. Αυτά τα υλικά ήταν άμεσα διαθέσιμα και απαιτούσαν ελάχιστη επεξεργασία. Η προσθήκη οργανικών υλικών όπως άχυρο ή τρίχες ζώων σε χωμάτινα κονιάματα βελτίωσε την αντοχή και την ευκαμψία τους. Οι ίνες άχυρου λειτουργούσαν ως ενίσχυση, γεφυρώνοντας τις ρωγμές και εμποδίζοντάς τις να αυξηθούν.



Εικόνα 3.1. Προϊστορικά κονιάματα από πέτρα που βρέθηκαν στον οικισμό Shengavit (περίπου 3500-2200 π.Χ.) στην Αρμενία (Μουσείο Shengavit, Ερεβάν).

Μία από τις αρχαιότερες μορφές οικολογικού κονιάματος μπορεί να εντοπιστεί στην κατασκευή από τούβλα από λάσπη, η οποία άκμασε στην αρχαία Μεσοποταμία, την Αίγυπτο και την κοιλάδα του Ινδού. Τούβλα από λάσπη, που αποτελούνταν από πηλό, άμμο και οργανική ύλη, αναμίχθηκαν με νερό για να σχηματίσουν ένα συνεκτικό κονίαμα για την κατασκευή τοίχων, σπιτιών και ναών. Η απλότητα της κατασκευής από τούβλα από λάσπη επέτρεψε στους αρχαίους πολιτισμούς να αξιοποιήσουν τους τοπικούς πόρους με βιώσιμο τρόπο, ελαχιστοποιώντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις δημιουργώντας ταυτόχρονα ανθεκτικές κατασκευές. Αρχαιολογικοί χώροι, όπως η πόλη των Σουμερίων Ουρ και οι αιγυπτιακές πυραμίδες, επιδεικνύουν τη μακροζωία των κτιρίων από τούβλα από λάσπη, υπογραμμίζοντας την αποτελεσματικότητα αυτής της οικολογικής οικοδομικής τεχνικής.

Στην κλασική αρχαιότητα, η χρήση ασβεστοκονιαμάτων εμφανίστηκε ως εξέχουσα οικοδομική τεχνική σε όλη την περιοχή της Μεσογείου. Οι Ρωμαίοι, οι Έλληνες και άλλες αρχαίες κοινωνίες χρησιμοποιούσαν ασβεστοκονίαμα, προερχόμενο από ασβεστόλιθο, ως συνδετικό παράγοντα στην κατασκευή. Το ασβεστοκονίαμα προσέφερε πολλά πλεονεκτήματα, όπως βελτιωμένη ανθεκτικότητα, ευελιξία και αντοχή σε ζημιές από το νερό. Επιπλέον, η παραγωγή ασβεστοκονιάματος περιελάμβανε διαδικασίες χαμηλής ενέργειας, καθιστώντας την μια φιλική προς το περιβάλλον επιλογή σε σύγκριση με τα σύγχρονα κονιάματα με βάση το τσιμέντο. Οι αρχαίοι Έλληνες χρησιμοποιούσαν ασβεστοκονίαμα σε ανάγλυφο τοίχους για να προσομοιώσουν τη μνημειακή αρχιτεκτονική και οι Αιγύπτιοι χρησιμοποιούσαν γύψο για εικονικά ανάγλυφα, γλυπτική και άλλους τύπους αντικειμένων.

Ακολουθώντας την ελληνική παράδοση, οι ρωμαϊκές γυψομαρμάρινες κατασκευές χρησιμοποιούσαν λευκό ασβεστοκονίαμα, που ήταν ελαφρύ και δουλεύονταν εύκολα. Τα αρχιτεκτονικά θαύματα της αρχαίας Ρώμης, όπως το Κολοσσαίο και το Πάνθεον, αποτελούν διαρκή δείγματα κατασκευής ασβεστοκονιάματος, επιδεικνύοντας την οικολογική και δομική υπεροχή του (Moropoulou et al., 2005). Στη μεσαιωνική Ευρώπη, τα συμβατικά κονιάματα με βάση τον ασβέστη συνέχισαν να διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στη δημοτική αρχιτεκτονική. Από τα μεσαιωνικά κάστρα μέχρι τις εξοχικές κατοικίες, το ασβεστοκονίαμα παρέμεινε η προτιμώμενη επιλογή για τη συγκόλληση λίθων, τούβλων και άλλων οικοδομικών υλικών. Σε αντίθεση με τα σύγχρονα κονιάματα με βάση το τσιμέντο, το ασβεστοκονίαμα επέτρεπε στις κατασκευές να αναπνέουν, αποτρέποντας τη συσσώρευση υγρασίας και διατηρώντας την ακεραιότητα των ιστορικών κτιρίων. Η αναβίωση των παραδοσιακών κονιαμάτων με βάση τον ασβέστη στις προσπάθειες διατήρησης υπογραμμίζει την οικολογική τους αξία και την πολιτιστική τους σημασία, δίνοντας έμφαση σε μια ολιστική προσέγγιση στις βιώσιμες πρακτικές δόμησης.

Τα κονιάματα αποτελούν σημαντικό δομικό, προστατευτικό και αισθητικό στοιχείο των ιστορικών τοιχοποιιών, το οποίο σχετίζεται με τη μακροζωία τους (Papayianni 2006). Η δομή και οι ιδιότητές τους συνήθως διαφέρουν ανάλογα με τον λειτουργικό τους ρόλο (δομικά κονιάματα, επιχρίσματα-σοβά, δάπεδα), την τεχνολογία κάθε εποχής και τη διαθεσιμότητα πρώτων υλών (Papayianni et al., 2013).

Συνοπτικά, ο ρόλος των επικαλύψεων ήταν:

- Προστασία των κατασκευών αυξάνοντας την αντοχή τους στους περιβαλλοντικούς παράγοντες.
- Δημιουργία άνετου εσωτερικού χώρου αυξάνοντας τη μόνωση (θερμομόνωση, στεγανοποίηση).
- Μορφολογική και αρχιτεκτονική διακόσμηση προσόψεων (τοιχογραφία, ψηφιδωτά)

Από τη δεκαετία του 1990, οι ερευνητές του Εργαστηρίου Δομικών Υλικών του ΑΠΘ έχουν χρησιμοποιήσει μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία για την ανάλυση κονιάματος. Αυτή η μέθοδος, που εφαρμόζεται σε περισσότερα από 2.000 δείγματα από σχεδόν 300 ελληνικές ιστορικές κατασκευές και μνημεία, περιλαμβάνει μια σειρά δοκιμών για τον προσδιορισμό της μικροδομής, των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων και της χημικής σύνθεσης των κονιαμάτων. Αυτές οι αναλύσεις έχουν δώσει πολύτιμες γνώσεις σχετικά με τις αρχικές τεχνικές κατασκευής που χρησιμοποιήθηκαν και έχουν ενημερώσει άμεσα τον σχεδιασμό συμβατών επισκευαστικών κονιαμάτων για έργα αποκατάστασης (Papayianni et al., 2013).

3.3 Υλικά σύνθεσης οικολογικών κονιαμάτων

3.3.1 Υδραυλική ασβέστος

Για αιώνες, τα κονιάματα με βάση τον ασβέστη ήταν η καλύτερη επιλογή για τους κατασκευαστές, προσφέροντας αναπνευστικότητα, ευελιξία και συμβατότητα με τα συμβατικά υλικά τοιχοποιίας. Ωστόσο, με την εμφάνιση του τσιμέντου Πόρτλαντ τον 19ο αιώνα, μειώθηκε κατά πολύ η χρήση των ασβεστοκονιαμάτων. Τα τελευταία χρόνια, έχει αναζωπυρωθεί το ενδιαφέρον για τον υδραυλικό ασβέστη, έναν συγκεκριμένο τύπο ασβέστη που προσφέρει μοναδικά πλεονεκτήματα στις εφαρμογές κονιάματος. Ιστορικά διάφορα συνδετικά έχουν χρησιμοποιηθεί στις κατασκευές. Από άργιλο και ασφαλτο μέχρι σοβά με βάση το γύψο, κάθε υλικό έχει αφήσει το στίγμα του στην αρχιτεκτονική κληρονομιά. Ωστόσο, μια κατηγορία ξεχωρίζει, τα υδραυλικά συνδετικά. Αυτά τα συνδετικά έχουν μια μοναδική ιδιότητα καθώς σκληραίνουν όχι μόνο στον αέρα αλλά και κάτω από το νερό.

Στο πλαίσιο αυτό, βασικός παράγοντας αναδεικνύεται ο υδραυλικός ασβέστης (Elsen et al., 2012). Οι Φοίνικες χρησιμοποίησαν αυτά τα συνδετικά (10ος αιώνας π.Χ.), οι Έλληνες πρόσθεσαν τη γη της Σαντορίνης στο κονίαμα και αυτή η ηφαιστειακή σκόνη παρείχε υδραυλικές ιδιότητες και τα προκύπτοντα κονιάματα ήταν ανθεκτικά στο νερό. Ωστόσο, απέκτησαν μεγάλη γνώση για την παρασκευή και τις εφαρμογές αυτών των υδραυλικών κονιαμάτων και διέδωσαν τη χρήση τους. Η ένωση της ηφαιστειακής άμμου από το Pozzuoli άφησε, εκτός από τη γνωστή χαρακτηριστική ονομασία αυτών των υλικών και πολύ ανθεκτικά κονιάματα που χρησιμοποιήθηκαν ευρέως σε αρχαία μνημεία (Lanas et al., 2004).

Η μελέτη των αρχαίων υδραυλικών κονιαμάτων παρέχει πολύτιμες γνώσεις για τις ιστορικές τεχνικές κατασκευής. Καθώς η μέτρηση της υδραυλικότητας παραμένει μια πρόκληση. Οι ερευνητές έχουν ασχοληθεί με τον εντοπισμό και την ποσοτικοποίηση αυτής της ιδιότητας στα αρχαία κονιάματα, δίνοντας πολύτιμες γνώσεις για την ικανότητα αποκατάστασης και διατήρησης των δομών πολιτιστικής κληρονομιάς και ιδιαίτερα αρχαίων μνημείων. Ο υδραυλικός ασβέστης είναι ένας τύπος ασβέστη που παρουσιάζει υδραυλικότητα, την ικανότητα δηλαδή να πήζει και να σκληραίνει όταν εκτίθεται στο νερό. Σε αντίθεση με τον μη υδραυλικό ασβέστη, ο οποίος βασίζεται αποκλειστικά στην ενανθράκωση για σκλήρυνση (αντίδραση με CO_2), ο υδραυλικός ασβέστης αντιδρά με το νερό για να σχηματίσει σταθερές ενώσεις. Αυτή η ιδιότητα το καθιστά ιδανικό για χρήση σε υγρά ή βυθισμένα περιβάλλοντα (Ashby, 2023).

Οφέλη και Εφαρμογές:

Τα υδραυλικά ασβεστοκονιάματα προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών τσιμεντοκονιών Portland:

- Δυνατότητα αναπνοής: Σε αντίθεση με το τσιμέντο, το οποίο μπορεί να παγιδεύσει την υγρασία μέσα στους τοίχους, ο υδραυλικός ασβέστης επιτρέπει στους υδρατμούς να περάσουν, αποτρέποντας τη συσσώρευση υγρασίας και προάγοντας ένα πιο υγιές κτιριακό περιβάλλον. Αυτή η δυνατότητα αναπνοής είναι ιδιαίτερα σημαντική για ιστορικά κτίρια που κατασκευάστηκαν αρχικά με ασβεστοκονίαμα.

- **Ευκαμψία:** Τα υδραυλικά ασβεστοκονιάματα διαθέτουν ένα βαθμό ευκαμψίας, επιτρέποντάς τους να δέχονται ελαφρές κινήσεις στη δομή που προκαλούνται από θερμική διαστολή ή καθίζηση. Αυτή η ευελιξία βοηθά στην αποφυγή ρωγμών και διατηρεί την ακεραιότητα της τοιχοποιίας με την πάροδο του χρόνου (Lanas, et al, 2004)
- **Συμβατότητα:** Τα υδραυλικά ασβεστοκονιάματα είναι πιο συμβατά με συμβατικά οικοδομικά υλικά όπως τούβλο, πέτρα και στάχυ. Σε αντίθεση με το τσιμέντο, το οποίο μπορεί να είναι πολύ άκαμπτο και να προκαλέσει ζημιά σε αυτά τα πιο μαλακά υλικά, ο υδραυλικός ασβέστης επιτρέπει τη φυσική κίνηση και αποτρέπει το ξεφλούδισμα (ξεφλούδισμα ή ρωγμές) της τοιχοποιίας (Silva, et al, 2015)
- **Αισθητική:** Τα υδραυλικά ασβεστοκονιάματα συχνά αναπτύσσουν μια φυσική παλαίωση με την πάροδο του χρόνου. Αυτό συμπληρώνει την αισθητική των ιστορικών κτιρίων και επιτρέπει επισκευές που συνδυάζονται άψογα με το υπάρχον υλικό.

Τα υδραυλικά ασβεστοκονιάματα είναι ιδανικά για διάφορες εφαρμογές όπως:

- **Αποκατάσταση ιστορικών κτιρίων:** Τα υδραυλικά ασβεστοκονιάματα είναι η προτιμώμενη επιλογή για την επισκευή και την επανατοποθέτηση ιστορικών κατασκευών που κατασκευάστηκαν αρχικά με ασβεστοκονίαμα. Η συμβατότητά τους με τα υπάρχοντα υλικά εξασφαλίζει μια μακροχρόνια και αισθητική επισκευή (Lanas et al., 2004).
- **Τοιχοποιία εκτεθειμένη στην υγρασία:** Η ικανότητα του υδραυλικού ασβέστη να πήζει κάτω από το νερό και η καλή του αντοχή στο νερό το καθιστούν κατάλληλο για εφαρμογές όπως θεμέλια, υπόγεια και στηθαία (Silva et al., 2015).
- **Αναπνεύσιμα επιχρίσματα και επιχρίσματα:** Τα υδραυλικά ασβεστοκονιάματα δημιουργούν αναπνεύσιμα επιχρίσματα και επιχρίσματα που επιτρέπουν τη διαφυγή της υγρασίας από τον τοίχο, μειώνοντας τον κίνδυνο ανάπτυξης μούχλας.

Ο υδραυλικός ασβέστης κατηγοριοποιείται με βάση τη θλιπτική του αντοχή, που συμβολίζεται με NHL ακολουθούμενο από έναν αριθμό. Ακολουθεί μια ανάλυση των πιο κοινών τύπων:

- **NHL 2:** Αυτός ο ασβέστης χαμηλής αντοχής είναι ιδανικός για καταστάσεις που απαιτούν μέγιστη αναπνοή και ευελιξία, όπως επισκευές σε ιστορικά κτίρια με μαλακή πέτρα ή στάχυ.
- **NHL 3.5:** Ένας ευέλικτος ασβέστης μεσαίας αντοχής κατάλληλος για ένα ευρύτερο φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων μαθημάτων επανατοποθέτησης, πλινθοδομής και στεγανότητας στην υγρασία.
- **NHL 5:** Αυτός ο ασβέστης υψηλής αντοχής προσφέρει καλή αντοχή και αντοχή στο νερό, καθιστώντας τον κατάλληλο για δομικές εφαρμογές και εκτεθειμένη τοιχοποιία.

Η επιλογή του NHL εξαρτάται από τις συγκεκριμένες απαιτήσεις του έργου, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η απαιτούμενη αντοχή, η επιθυμητή δυνατότητα αναπνοής και η συμβατότητα με τα υπάρχοντα υλικά. Τουλάχιστον εκατόν ογδόντα διαφορετικά κονιάματα κατασκευασμένα με φυσικό υδραυλικό ασβέστη και διαφορετικά είδη αδρανών παρασκευάστηκαν για να χρησιμοποιηθούν σε εργασίες αποκατάστασης (Lanas, et al, 2004).

Εργασίες με Υδραυλικά Ασβεστοκονιάματα:

Οι εργασίες με υδραυλικά ασβεστοκονιάματα απαιτούν να δοθεί προσοχή σε μερικές ιδιότητες τους για την ολοκλήρωση της εργασίας.

- **Ανάμιξη:** Τα υδραυλικά ασβεστοκονιάματα απαιτούν συνήθως μεγαλύτερο χρόνο σβήσιμο (περίοδος ενυδάτωσης) σε σύγκριση με το τσιμέντο. Η τήρηση των συστάσεων του κατασκευαστή για τις αναλογίες ανάμιξης και τους χρόνους χαλάρωσης είναι ζωτικής σημασίας.
- **Ωρίμανση:** Τα υδραυλικά ασβεστοκονιάματα σκληρύνουν πιο αργά από τα τσιμεντοκονιάματα και απαιτούν προστασία από στοιχεία ξήρανσης όπως ο άνεμος και η βροχή κατά την αρχική περίοδο σκλήρυνσης.
- **Ανάπτυξη αντοχής:** Σε αντίθεση με το τσιμέντο, το οποίο αποκτά αντοχή γρήγορα, τα υδραυλικά ασβεστοκονιάματα αναπτύσσουν αντοχή σταδιακά με την πάροδο του χρόνου. Αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη στα χρονοδιαγράμματα του έργου.

3.3.2 Διογκωμένος περλίτης

Ο διογκωμένος περλίτης, είναι ένα ελαφρύ και ευέλικτο ηφαιστειακό πέτρωμα, που χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές σε διάφορες βιομηχανίες. Η δημιουργία του περλίτη ξεκινά με τη λιωμένη λάβα. Καθώς οι ηφαιστειακές εκρήξεις εκτοξεύουν πύρινα κομμάτια, η ταχεία ψύξη μπορεί να παγιδεύσει υδρατμούς μέσα στη λάβα. Αυτό το παγιδευμένο νερό δημιουργεί έναν υαλώδη ηφαιστειακό βράχο με μοναδική μαργαριταρένια λάμψη, εξ ου και η ονομασία "περλίτης" (από την ελληνική λέξη πέρλα - perla που σημαίνει μαργαριτάρι). Ωστόσο, στη φυσική του κατάσταση, ο περλίτης είναι ένα πυκνό και σχετικά βαρύ υλικό (Gurgenyan et al., 2021).

Ο περλίτης παρουσιάζει μια εξαιρετική συμπεριφορά⁴ όταν θερμαίνεται. Καθώς οι θερμοκρασίες φτάνουν τους 850-900 ° C. Οι παγιδευμένοι υδρατμοί μέσα στο βράχο διαστέλλονται γρήγορα, προκαλώντας τα σωματίδια του περλίτη να φουσκώνουν. Αυτή η διαδικασία μπορεί να αυξήσει τον όγκο του περλίτη κατά 4 έως 20 φορές, με αποτέλεσμα ένα ελαφρύ, λευκό και εξαιρετικά πορώδες υλικό γνωστό ως διογκωμένος περλίτης. Ο διογκωμένος περλίτης εμφανίζεται λαμπρός λευκός λόγω της ανακλαστικότητας των παγιδευμένων φυσαλίδων (Maxineasa et al., 2022)

⁴ <https://www.perlite.org/why-perlite-works> (Ανάκτηση 23.3.2024).



Εικόνα 3.2 Αριστερά: Φυσικός περλίτης. Δεξιά: Κατεργασμένος περλίτης.

Ο διογκωμένος περλίτης διαθέτει πολλές αξιοσημείωτες ιδιότητες:

Χαμηλή πυκνότητα: Ο μη διογκωμένος (ακατέργαστος) περλίτης έχει χύδην πυκνότητα περίπου 1100 kg/m^3 , ενώ ο τυπικός διογκωμένος περλίτης έχει χύδην πυκνότητα περίπου $30\text{-}150 \text{ kg/m}^3$. Η ελαφριά φύση του το καθιστά ιδανικό για διάφορες εφαρμογές, διαθέτοντας πολλές ιδιότητες που τον καθιστούν πολύτιμο βιομηχανικό υλικό:

- **Ελαφρύς:** Λόγω της διογκωμένης δομής του, ο διογκωμένος περλίτης είναι απίστευτα ελαφρύς. Το ξηρό φαινόμενο βάρος του ορυκτού περλίτη είναι περίπου 1-1,1 τονοί ανά κυβικό μέτρο. Το ξηρό φαινόμενο βάρος του διογκωμένου περλίτη είναι 60-500 κιλά ανά κυβικό μέτρο ανάλογα με την επιθυμητή χρήση. Αυτό το καθιστά ιδανικό για εφαρμογές όπου η μείωση βάρους είναι ζωτικής σημασίας (Gurgenyanyan, et al, 2021)
- **Μόνωση:** Οι παγιδευμένοι θύλακες αέρα μέσα στον διογκωμένο περλίτη δημιουργούν εξαιρετικές θερμομονωτικές ιδιότητες. Αντιστέκεται στη ροή θερμότητας, καθιστώντας το χρήσιμο για εφαρμογές όπως η κρυογονική αποθήκευση και η μόνωση κτιρίων.
- **Αντοχή στη φωτιά:** Ο διογκωμένος περλίτης είναι φυσικά ανθεκτικός στη φωτιά, καθώς δεν καίγεται ούτε συμβάλλει στην εξάπλωση της φλόγας.
- **Χημική αδράνεια:** Ο περλίτης είναι χημικά αδρανής, που σημαίνει ότι δεν αντιδρά εύκολα με άλλες χημικές ουσίες. Αυτό το καθιστά ένα ασφαλές και αξιόπιστο υλικό για διάφορες εφαρμογές (Lanzon & García-Ruiz, 2008).
- **Απορρόφηση:** Ο διογκωμένος περλίτης έχει υψηλή ικανότητα απορρόφησης, καθιστώντας τον χρήσιμο για εφαρμογές όπως το φιλτράρισμα και ως φορέας υγρών και χημικών.

Χημική Σύσταση: Η τυπική ανάλυση του διογκωμένου περλίτη περιλαμβάνει περίπου:

- 70–75% διοξείδιο του πυριτίου (CO_2)
- 12–15% οξείδιο του αργιλίου (Al_2O_3)
- 3–4% οξείδιο του νατρίου (Na_2O)
- 3–5% οξείδιο του καλίου (K_2O)
- 0,5–2% οξείδιο του σιδήρου (Fe_2O_3)
- 0,2–0,7% οξείδιο του μαγνησίου (MgO)
- 0,5–1,5% οξείδιο του ασβεστίου (CaO)
- 3–5% απώλεια κατά την ανάφλεξη

Τα παγκόσμια εκτιμώμενα αποθέματα περλίτη ανέρχονται σε 700 εκατομμύρια τόνους. Μόνο στην Αρμενία, οι επιβεβαιωμένοι πόροι περλίτη ανέρχονται σε 150 εκατομμύρια m^3 , με προβλεπόμενους πόρους που φτάνουν τα 3 δισεκατομμύρια m^3 . Λαμβάνοντας υπόψη τιμή πυκνότητας 1.1 τόνων / m^3 , τα επιβεβαιωμένα αποθέματα της Αρμενίας ισούνται με 165 εκατομμύρια τόνους. Άλλα αναφερόμενα αποθέματα περιλαμβάνουν την Ελλάδα (120 εκατομμύρια τόνους), την Τουρκία, τις ΗΠΑ και την Ουγγαρία (περίπου 49–57 εκατομμύρια τόνους).



Εικόνα 3.3. Παγκόσμια παραγωγή περλίτη



Εικόνα 3.4. Λατομείο περλίτη, στη Μήλο (Ελλάδα)

Εφαρμογές του διογκωμένου περλίτη

- Κατασκευές: Ο διογκωμένος περλίτης είναι βασικό συστατικό στο ελαφρύ σκυρόδεμα και στο σοβά, μειώνοντας το βάρος του κτιρίου και βελτιώνοντας τη μόνωση. Χρησιμοποιείται επίσης για πυροπροστασία και μόνωση σωλήνων (Lanzon & García-Ruiz, 2008).
- Γεωργικές εργασίες: Ο διογκωμένος περλίτης είναι μια δημοφιλής τροποποίηση του εδάφους, που προάγει την αποστράγγιση και τον αερισμό για υγιή ανάπτυξη των φυτών. Βοηθά στη διατήρηση της υγρασίας ενώ αποτρέπει την υπερχείλιση, καθιστώντας το ιδανικό για κηπουρική δοχείων και υδροπονία.
- Κρυογονική: Οι εξαιρετικές μονωτικές ιδιότητες του διογκωμένου περλίτη τον καθιστούν ιδανικό για κρυογονική αποθήκευση, βοηθώντας στη διατήρηση εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών για μεγάλα χρονικά διαστήματα.
- Διήθηση: Η υψηλή ικανότητα απορρόφησης του διογκωμένου περλίτη του επιτρέπει να χρησιμοποιείται ως μέσο φίλτρου σε διάφορες εφαρμογές, όπως ο καθαρισμός λαδιού και νερού.
- Κρυοκατάλυση: Οι συνδυασμένες ιδιότητες μόνωσης και απορρόφησης καθιστούν τον διογκωμένο περλίτη πολύτιμο σε ιατρικές διαδικασίες, όπως η κρυοκατάλυση, όπου βοηθά στην κατάψυξη και την καταστροφή του ανεπιθύμητου ιστού.

- Πρόσθετα: Η ελαφριά φύση και η αδράνεια του διογκωμένου περλίτη τον καθιστούν χρήσιμο πρόσθετο σε διάφορα προϊόντα, όπως χρώματα, επιστρώσεις και φαρμακευτικά προϊόντα (Maxineasa et al., 2022).

3.3.3 Μετακαολίνη

Ο μετακαολίνη, ένα λεπτό, αντιδραστικό ποζολανικό υλικό, προέρχεται από το αργιλικό ορυκτό καολινίτη και έχει αναδειχθεί ως πολύτιμη προσθήκη στον κατασκευαστικό κλάδο. Οι μοναδικές του ιδιότητες ενισχύουν την απόδοση του σκυροδέματος και άλλων τσιμεντοειδών υλικών, προσφέροντας οφέλη σε αντοχή, ανθεκτικότητα και βιωσιμότητα (Khatib et al., 2018). Η ιστορία του μετακαολίνη εκτείνεται από τα αρχαία χρόνια. Τα στοιχεία δείχνουν ότι οι αρχαίοι πολιτισμοί, όπως και οι Ρωμαίοι, μπορεί να χρησιμοποίησαν εν αγνοία τους τις ιδιότητές του. Η χρήση ηφαιστειακής τέφρας, που περιέχει ποζολάνες παρόμοιες με το μετακαολίνη, στην παραγωγή κονιάματος υποδηλώνει μια διαισθητική κατανόηση των πλεονεκτημάτων της. Ωστόσο, η σκόπιμη χρήση της ίδιας του μετακαολίνη πιθανότατα εμφανίστηκε πολύ αργότερα (Faraj & Radhi, 2015).



Εικόνα 3.5. Ο μετακαολίνη

Ο μετακαολίνη αντιπροσωπεύει την άνυδρη πυρωμένη μορφή καολινίτη, ένα αργιλώδες ορυκτό που βρίσκεται σε πετρώματα πλούσια σε καολινίτη - κοινώς γνωστό ως πορσελάνη ή καολίνη. Συμβατικά, ο καολίνης έχει χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή πορσελάνης. Το μέγεθος των σωματιδίων του μετακαολίνη είναι μικρότερο από αυτό των σωματιδίων τσιμέντου. Ο όρος μετακαολίνη πιστεύεται ότι προήλθε στις αρχές του 20ου αιώνα. Επιστημονικές μελέτες διερεύνησαν τη θερμική ενεργοποίηση της καολινίτη αργίλου, της κύριας πηγής υλικού για το μετακαολίνη. Ο καολινίτης, ένα φυσικώς αργιλοπυριτικό ορυκτό, υφίσταται μετασχηματισμό όταν θερμαίνεται σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες (συνήθως μεταξύ 400-700°C). Αυτή η διαδικασία, γνωστή ως πύρωση, διαταράσσει την κρυσταλλική δομή του καολινίτη, μετατρέποντάς τον σε ένα εξαιρετικά δραστικό άμορφο υλικό το μετακαολίνη (Wang et al., 2018).

Βασικά οφέλη που προσφέρει ο μετακαολίνη στα δομικά υλικά:

- Ποζολανική δράση: Η μετακαολίνη αντιδρά με το υδροξείδιο του ασβεστίου, ένα υποπροϊόν της ενυδάτωσης του τσιμέντου Πόρτλαντ, για να σχηματίσει πρόσθετες τσιμεντοειδείς ενώσεις. Αυτή η αντίδραση ενισχύει τη μικροδομή του σκυροδέματος, οδηγώντας σε αυξημένη αντοχή σε θλίψη και κάμψη.
- Ενισχυμένη ανθεκτικότητα: Βελτιώνει τη δομή των πόρων του σκυροδέματος, καθιστώντας το πιο πυκνό και λιγότερο διαπερατό. Αυτό μειώνει την είσοδο επιβλαβών ουσιών όπως τα χλωρίδια και τα θειικά άλατα, βελτιώνοντας τη μακροπρόθεσμη ανθεκτικότητα των κατασκευών από σκυρόδεμα.
- Εργασιμότητα: Η μετακαολίνη μπορεί να δράσει ως παράγοντας τροποποίησης του ιξώδους, βελτιώνοντας την εργασιμότητα των μειγμάτων σκυροδέματος. Αυτό επιτρέπει την ευκολότερη τοποθέτηση και ενοποίηση, ειδικά σε πολύπλοκες εφαρμογές.
- Βιώσιμα οφέλη: Η παραγωγή μετακαολίνης χρησιμοποιεί άμεσα διαθέσιμη άργιλο καολινίτη, προσφέροντας μια πιο βιώσιμη εναλλακτική λύση σε υλικά έντασης πόρων όπως το συμβατικό τσιμέντο Πόρτλαντ. Επιπλέον, ενισχύοντας την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, η μετακαολίνη μπορεί να συμβάλει σε μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των κατασκευών, μειώνοντας την ανάγκη για συχνές αντικαταστάσεις (Khatib, et al, 2018)

Τα πλεονεκτήματα του μετακαολίνη αξιοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών στον κατασκευαστικό κλάδο:

- Σκυρόδεμα υψηλής απόδοσης (HPC): Η μετακαολίνη είναι ένα βασικό συστατικό στις συνθέσεις HPC, όπου η ανώτερη αντοχή, η ανθεκτικότητα και η εργασιμότητα είναι ζωτικής σημασίας. Οι εφαρμογές περιλαμβάνουν πολυώροφα κτίρια, γέφυρες και έργα υποδομής που απαιτούν εξαιρετική απόδοση.
- Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (SCC): Η ικανότητα της μετακαολίνης να βελτιώνει την εργασιμότητα παίζει ζωτικό ρόλο στα μείγματα SCC. Αυτά τα μείγματα ρέουν εύκολα υπό το βάρος τους, εξαλείφοντας την ανάγκη για δόνηση κατά την τοποθέτηση, η οποία είναι ιδανική για συμφόρηση ενίσχυσης ή περίπλοκες γεωμετρίες (Khatib et al., 2018)
- Επισκευή και αποκατάσταση: Η υψηλή δραστηριότητα και η συμβατότητα της μετακαολίνης με το υπάρχον σκυρόδεμα τη καθιστούν πολύτιμη για επισκευαστικά κονιάματα και αρμόστοκους, καθώς πραγματοποιεί καλή συγκόλληση με το αρχικό υπόστρωμα και ενισχύει τη συνολική απόδοση του συστήματος επισκευής (Wang et al., 2018).
- Γεωπολυμερή: Η μετακαολίνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρόδρομο υλικό σε σκευάσματα γεωπολυμερών. Τα γεωπολυμερή είναι νέα τσιμεντοειδή υλικά που ενεργοποιούνται από αλκαλικά διαλύματα, προσφέροντας εξαιρετική αντοχή, αντοχή στη φωτιά και χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σύγκριση με το τσιμέντο Portland.

Κεφάλαιο 4 – Οικολογικά κονιάματα και επιχρίσματα στην αποκατάσταση μνημείων

Η διατήρηση των ιστορικών μνημείων και κτιρίων, ιδιαίτερα στην Ελλάδα, όπου η πολιτιστική κληρονομιά είναι ιδιαίτερα πλούσια, αποτελεί μια πρόκληση που απαιτεί την εφαρμογή εξειδικευμένων μεθοδολογιών και υλικών. Η αποκατάσταση των λιθόκτιστων κατασκευών προϋποθέτει την προσεκτική επιλογή υλικών με γνώμονα τη συμβατότητα, την αντοχή και τη διατήρηση της αρχικής αυθεντικότητας. Σε αυτό το πλαίσιο, τα οικολογικά κονιάματα και επιχρίσματα αναδεικνύονται ως βιώσιμη και αποτελεσματική λύση, καθώς συνδυάζουν τις απαιτούμενες τεχνικές ιδιότητες με περιβαλλοντικά οφέλη. Η έλλειψη πρόσβασης σε ορισμένους τύπους ιστορικών λίθων καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη συνθετικών ανακατασκευασμένων υλικών. Αυτά τα υλικά, όπως τα κονιάματα και τα ανακατασκευασμένα στοιχεία, πρέπει να πληρούν αυστηρές τεχνικές προδιαγραφές. Οι απαιτήσεις αυτές περιλαμβάνουν:

- Ομοιότητα σε υφή και χρώμα με τα πρωτότυπα δομικά στοιχεία.
- Υψηλή πρόσφυση στην υπάρχουσα λιθοδομή.
- Ανθεκτικότητα σε φαινόμενα γήρανσης και περιβαλλοντικές καταπονήσεις.
- Απουσία επιβλαβών χημικών παραγόντων.

Η επιτυχία ενός έργου αποκατάστασης βασίζεται σε μια ολοκληρωμένη προσέγγιση, η οποία περιλαμβάνει την εις βάθος μελέτη τόσο των αρχικών υλικών όσο και των μηχανισμών φθοράς τους. Μόνο μέσω της ανάπτυξης βελτιωμένων συνθέσεων, προσαρμοσμένων στις ειδικές ανάγκες κάθε μνημείου, μπορεί να διασφαλιστεί η μακροχρόνια διατήρηση της ιστορικής λιθοδομής και η προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς.

4.1 Χρήση κονιαμάτων σε μνημεία και ιστορικά κτίρια

Η αποτελεσματική αποκατάσταση μνημείων και ιστορικών κτιρίων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ανάπτυξη επισκευαστικών κονιαμάτων που είναι συμβατά με τα αρχικά δομικά υλικά. Αυτή η συμβατότητα δεν είναι μόνο χημική και μηχανική, αλλά και φυσική, ώστε να διασφαλίζεται η μακροχρόνια αντοχή και η ακεραιότητα της κατασκευής. Η αξία των ιστορικών κονιαμάτων αποτυπώνεται σε εμβληματικά παραδείγματα της Μεσογείου, όπως η Πέλλα, το Πάνθεον και η Αγία Σοφία, όπου η χρήση πλίνθου και κονιαμάτων σε διαφορετικές εποχές αναδεικνύει την τεχνογνωσία κάθε περιόδου. Μια θεμελιώδης συνεισφορά στην κατανόηση των ιστορικών κονιαμάτων προήλθε από τη μεθοδολογία ανάλυσης που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών του ΑΠΘ τη δεκαετία του 1990. Αυτή η μεθοδολογία περιλαμβάνει μια σειρά εργαστηριακών δοκιμών για τον προσδιορισμό:

- της μικροδομής,
- των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων,
- της χημικής σύστασης των κονιαμάτων.

Η ευρεία εφαρμογή της σε ελληνικά μνημεία, συμπεριλαμβανομένης της μελέτης ελληνιστικών ασβεστοκονιαμάτων, αποκάλυψε την υψηλή τεχνολογική τους ποιότητα. Τα ευρήματα αυτά ήταν καθοριστικής σημασίας, καθώς όχι μόνο αποσαφήνισαν τις ιστορικές τεχνικές κατασκευής, αλλά

επίσης παρείχαν τις απαραίτητες πληροφορίες για τον σχεδιασμό και την παραγωγή κατάλληλων επισκευαστικών κονιαμάτων, συμβάλλοντας έτσι στην επιτυχή διαμόρφωση και εφαρμογή πρακτικών αποκατάστασης.

Οι ελληνιστικές κατασκευές συνδύαζαν πέτρα με ακριβή κοπή και ελάχιστους αρμούς κονιάματος, ενώ τα συμπληρωματικά κτίρια χρησιμοποιούσαν πλίνθο και κονίαμα. Και οι δύο τύποι επιστρώθηκαν με υψηλής ποιότητας επιχρίσματα, τα οποία εξυπηρετούσαν τόσο προστατευτικούς όσο και αισθητικούς σκοπούς. Οι εργαστηριακές αναλύσεις των ασβεστοκονιαμάτων περιλάμβαναν μικροσκοπική εξέταση, κοκκομετρία, μέτρηση πορώδους και φαινομενικού ειδικού βάρους, δοκιμές θλίψης και χημική ανάλυση μέσω ατομικής απορρόφησης και HPLC για διαλυτά άλατα. Τα αποτελέσματα αποκάλυψαν πολυστρωματική δομή με δύο έως τρία συμπιεσμένα στρώματα, με προοδευτική μείωση πάχους προς την επιφάνεια, και σε ορισμένα δείγματα παρουσία λεπτού επιφανειακού στρώματος ασβέστη (1 mm) με κοκκινωπή ή λευκή απόχρωση, ενισχύοντας την ανθεκτικότητα και την αισθητική των επιχρισμάτων.

Η ανάλυση των ελληνιστικών ασβεστοκονιαμάτων αποκάλυψε ότι τα επιχρίσματα αποτελούνταν κυρίως από ένυδρο ασβέστη και φυσική ποζολάνη, με υψηλή περιεκτικότητα σε SiO_2 , Al_2O_3 και Fe_2O_3 , στοιχείο που καταδεικνύει την εκλεπτυσμένη τεχνογνωσία των αρχαίων τεχνιτών. Τα κονιάματα οργανώνονταν σε 2–3 συμπιεσμένα στρώματα συνολικού πάχους 1–3.5 cm, με το εξωτερικό στρώμα να παρουσιάζει μείωση του πάχους, του πορώδους και του μεγέθους των αδρανών, ενώ αυξάνεται η αναλογία συνδετικού προς συσσωματώματα, εξασφαλίζοντας ανθεκτική και υδατοαπωθητική επιφάνεια. Η χρήση του ένυδρου ασβέστη ποικίλει ανάλογα με τα διαθέσιμα τοπικά υλικά και τη λειτουργία του κτιρίου, συχνά σε συνδυασμό με ποζολάνη ή άργιλο. Η συστηματική χρήση της ποζολάνης έγινε πιο διαδεδομένη από τη ρωμαϊκή περίοδο και μετά, ενώ τα βασικά χαρακτηριστικά των ελληνιστικών κονιαμάτων παρέμειναν συνεπή σε διαχρονικό επίπεδο. Μελετώντας δείγματα έως τον 20^ο αιώνα, διαπιστώθηκε ότι ο ένυδρος ασβέστης παρέμεινε κύριος συνδετικός παράγοντας για περίπου 2500 χρόνια, με τα συστήματα ασβέστη και ποζολάνης να διασφαλίζουν την αντοχή στην υγρασία, υπογραμμίζοντας τη βαθιά γνώση των αρχαίων τεχνιτών για την τεχνολογία κονιάματος και την αξιοποίηση πρώτων υλών.

Από τον 19^ο έως τις αρχές του 20^{ού} αιώνα, η ποιότητα των κονιαμάτων διαφοροποιούνταν ανάλογα με τον τύπο του κτιρίου: οι ιδιωτικές κατοικίες χρησιμοποιούσαν ασβεστοκονιάματα ή πηλό, ενώ τα σημαντικά δημόσια κτίρια αξιοποιούσαν ανώτερης ποιότητας κονιάματα ασβέστη-ποζολάνης. Τα αδρανή ήταν φυσικά, κυρίως 0–8 mm. Για τη διαχείριση και τη στατιστική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ανάλυσης κονιαμάτων από διαφορετικές ιστορικές περιόδους, αναπτύχθηκε μια ψηφιακή βάση δεδομένων που περιλαμβάνει περίπου 1000 δείγματα από μνημεία και ιστορικά κτίρια σε όλη την Ελλάδα, χρονολογούμενα από την ελληνιστική περίοδο έως τις αρχές του 20^{ού} αιώνα, πριν την επικράτηση του τσιμέντου και του σκυροδέματος. Η συγκριτική μελέτη της τεχνολογίας των κονιαμάτων δείχνει περιορισμένη διαφοροποίηση στις πρώτες ύλες ανά τους αιώνες. Ο πηλός αποτέλεσε τον αρχικό συνδετικό, ενώ ο ασβέστης, η ποζολάνη και η σκόνη τούβλου εισήχθησαν κατά την ελληνιστική περίοδο και κυριάρχησαν στη ρωμαϊκή και βυζαντινή εποχή, σχηματίζοντας μικτά συστήματα σύνδεσης που χρησιμοποιήθηκαν έως τις αρχές του 20^{ού} αιώνα. Τα αδρανή κυμαίνονταν από 0–2.5 mm έως 0–31.5 mm, με τα 0–8 mm να είναι τα πιο συνηθισμένα. Η επιλογή των συνδετικών και των αδρανών εξαρτιόταν από τη διαθεσιμότητα των πρώτων υλών και τις κατασκευαστικές παραδόσεις, ενώ η ανάγκη για ανθεκτικά στην υγρασία κονιάματα ώθησε τους τεχνίτες σε πειραματισμό με μικτά συνδετικά, ποικιλία αδρανών και πρόσθετα εγκλείσματα.

Η μελέτη των Maravelaki-Kalaitzaki et al. (2003), εξετάζει τις ορυκτολογικές, φυσικοχημικές και μηχανικές ιδιότητες των κονιαμάτων μινωικής, ρωμαϊκής, ελληνιστικής, βυζαντινής και μεταγενέστερης περιόδου, που χρησιμοποιούνται σε κτίρια στην Κρήτη που είναι εκτεθειμένα σε θαλάσσιες και υγρές συνθήκες. Επιβεβαιώνει εάν συγκεκριμένα υλικά χρησιμοποιήθηκαν σκόπιμα, τις τεχνολογίες που εφαρμόστηκαν και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των κονιαμάτων σε θαλάσσιες συνθήκες. Επιπλέον, περιγράφει μια μέθοδο για τον προσδιορισμό της αναλογίας συνδετικού προς συσσωματώματα μέσω ενός συνδυασμού χημικών και ορυκτολογικών αναλύσεων. Κονιάματα από μνημεία της Κρήτης, που εκτείνονται από τη Μινωική εποχή έως σήμερα, έχουν εξεταστεί για την ορυκτολογική και χημική τους σύσταση, την κατανομή του μεγέθους των κόκκων, τις πρώτες ύλες και την αντοχή τους σε εφελκυσμό για να αξιολογηθεί η αντοχή τους σε θαλάσσιο και υγρό περιβάλλον (Maravelaki-Kalaitzaki et al., 2003)

Η τεχνολογία ασβέστη και οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται, παρά τις διαφορετικές ιστορικές περιόδους, έχουν ως αποτέλεσμα διαφορετικούς τύπους κονιαμάτων:

1. ασβέστης,
2. υδραυλικός ασβέστης,
3. ασβέστης με θρυμματισμένο τούβλο,
4. ασβέστης με ποζολανικό υλικό.

Αυτά τα κονιάματα περιέχουν συνδετικά που κυμαίνονται από 22% (ποζολανικά κονιάματα) έως 29% (ασβεστοκονιάματα). Τα ποζολανικά κονιάματα παρουσιάζουν τα υψηλότερα επίπεδα υδραυλικών ενώσεων, όπως τα ένυδρα πυριτικό ασβέστιο/αλουμίνιο, και αντοχή σε εφελκυσμό, ακολουθούμενα από ασβέστη με θρυμματισμένο τούβλο, υδραυλικό ασβέστη και ασβεστοκονιάματα. Τα υψηλά επίπεδα υδατοδιαλυτών αλάτων που βρίσκονται στα ασβεστοκονιάματα υποδηλώνουν υψηλότερο κίνδυνο αποσύνθεσης. Παρέχεται μια μέθοδος υπολογισμού που συνδυάζει ορυκτολογικές και χημικές αναλύσεις για τον προσδιορισμό της αναλογίας συνδετικού υλικού/αδρανούς.

Για τις ανάγκες της έρευνας, πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες κονιάματος σε ιστορικές κατασκευές, όπως μοναστήρια, εκκλησίες, οχυρώσεις, στέρνες και ανασκαφικούς χώρους, με στόχο τη μελέτη διαφόρων τεχνολογιών κονιάματος και περιβαλλοντικών συνθηκών. Συνολικά συλλέχθηκαν είκοσι οκτώ δείγματα, κυρίως από τα ανώτερα τμήματα των κτιρίων, για την αποφυγή επιδράσεων τριχοειδούς ανύψωσης. Η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε με σμίλη τόσο στους εξωτερικούς όσο και στους εσωτερικούς αρμούς, ώστε να εξεταστούν αλλοιωμένα και αναλλοίωτα τμήματα. Οι αναλύσεις επικεντρώθηκαν κυρίως στα εσωτερικά, αναλλοίωτα τμήματα των αρθρώσεων. Τα υδατοδιαλυτά ιόντα μετρήθηκαν σε βάθος έως 3 cm στο εξωτερικό και 5–10 cm στο εσωτερικό, για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιδράσεων.

Για την αντιμετώπιση της ετερογένειας των δειγμάτων, πραγματοποιήθηκε κλασματοποίηση και κοσκίνισμα σύμφωνα με τη σειρά ISO 565. Η διαδικασία αυτή επέτρεψε τον προσδιορισμό των διαφόρων ορυκτολογικών φάσεων και της αναλογίας συνδετικού προς αδρανή. Το πιο σημαντικό κλάσμα ήταν $< 63 \mu\text{m}$, που περιείχε κυρίως το συνδετικό υλικό, αν και περιείχε και λεπτόκοκκα αδρανή. Τα διαχωρισμένα κλάσματα υποβλήθηκαν σε ορυκτολογική και φυσικοχημική ανάλυση, ενώ δέκα δείγματα αξιολογήθηκαν και μηχανικά, ώστε να συσχετιστούν τα αποτελέσματα με τις άλλες μετρήσεις (Maravelaki-Kalaitzaki et al., 2003).

- Λεπτές τομές δειγμάτων κονιάματος αναλύθηκαν κάτω από ένα πολωτικό μικροσκόπιο (Zeiss) για να χαρακτηριστούν οι πετρογραφικές και ορυκτολογικές ιδιότητες των συστατικών του κονιάματος και να παρατηρηθούν οι διαφορετικές ορυκτές φάσεις στη μήτρα. Η ανάλυση περίθλασης ακτίνων Χ (XRD) (Siemens D-500) διεξήχθη σε δείγματα λεπτής σκόνης για τον εντοπισμό των κρυσταλλικών ορυκτών φάσεων που υπάρχουν στα κονιάματα. Θερμικές αναλύσεις θερμοβαρυμετρία (TG)/διαφορική θερμοβαρυμετρία (DTG). Το Mettler TG 50] χρησιμοποιήθηκε για τον ποσοτικό προσδιορισμό των συστατικών του κονιάματος εντός του συνολικού δείγματος, με πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε ένα εύρος θερμοκρασιών 30-1000°C με ρυθμό θέρμανσης 10°C/min σε ατμόσφαιρα αζώτου.
- Η ασβεστομετρία (ογκομετρική μέθοδος αερίου Dietrich–Frühling) χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση των επιπέδων CO₂ και τη σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα TG/DTG. Υπέρυθρη φασματοσκοπία [Φασματοσκοπία υπέρυθρου μετασχηματισμού Fourier (FT-IR); Το Biorad FTS 40] παρείχε ποιοτικές χημικές πληροφορίες για συγκεκριμένες ενώσεις στα κονιάματα, όπως υδροξείδια και ανθρακικά άλατα ασβεστίου και μαγνησίου, γύψος και άλατα (νιτρικά, θειικά, οξαλικά), καθώς και οργανικές ενώσεις. Η χημική ανάλυση των πρωταρχικών συστατικών πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας αλκαλική ροή ανθρακικού νατρίου-βόρακα, ακολουθούμενη από παραδοσιακή χημική ανάλυση των στοιχείων (Maravelaki-Kalaitzaki et al., 2003)
- Δεν υπάρχει τυποποιημένη χημική ανάλυση για το σκοπό αυτό, καθώς διάφορες μελέτες έχουν αναφέρει διαφορετικές συγκεντρώσεις οξέος ανάλογα με τη φύση των κονιαμάτων. Για κονιάματα με ανθρακική άμμο, προκύπτουν δυσκολίες στον διαχωρισμό και την αναγνώριση των υδραυλικών συστατικών του συνδετικού υλικού από το αδρανή. Κατά συνέπεια, διεξήχθησαν αρκετά πειράματα χρησιμοποιώντας οξέα διαφορετικών συγκεντρώσεων, με βάση μεθοδολογίες από άλλες μελέτες. Τα αδρανή αναλύθηκαν επίσης με τη χρήση της ογκομετρικής μεθόδου αερίου Dietrich–Frühling για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε ανθρακικά, αποκαλύπτοντας μικτά συσσωματώματα διαφόρων μεγεθών κόκκων που κυμαίνονται από ανθρακικό έως πυριτικό εντός και σε διάφορα δείγματα κονιάματος. Λόγω της ανθρακικής φύσης των συσσωματωμάτων, ο προτεινόμενος διαχωρισμός συνδετικού/συσσωματώματος με χρήση επεξεργασίας θερμού HCl αποκλείστηκε.

Τα αναλυθέντα κονιάματα κατατάσσονται, ανεξαρτήτως ιστορικής περιόδου, σε τρεις κύριες κατηγορίες βάσει θερμικής ανάλυσης:

1. τυπικός ασβέστης,
2. υδραυλικός ασβέστης,
3. ασβέστης με τεχνητά ή φυσικά ποζολανικά υλικά.

Η περιεκτικότητα σε συνδετικό κυμαίνεται από 22% στα ποζολανικά κονιάματα έως 29% στα ασβεστοκονιάματα, πιθανώς λόγω έκπλυσης του ασβεστίτη από τις καιρικές συνθήκες. Η αντοχή σε εφελκυσμό σχετίζεται με τα επίπεδα υδραυλικότητας των κονιαμάτων. Τα ασβεστοκονιάματα παρασκευάζονταν με θρυμματισμό τοπικών ασβεστολιθικών ιζηματογενών λίθων ή με χρήση θαλάσσιας άμμου, περιέχοντας λεπτό ανθρακούχο ασβέστη ως συνδετικό (περίπου 30%).

Χαρακτηρίζονται από χαμηλή περιεκτικότητα σε ολικά και διαλυτά οξείδια Si, Fe, Al και υψηλότερο CO₂ σε σύγκριση με τις άλλες ομάδες. Η περιορισμένη περιεκτικότητα σε CaO, που σχετίζεται με υδραυλικά πυριτικά, υποδηλώνει μικρή υδραυλική δράση. Υψηλές τιμές Ca²⁺, Cl⁻ και SO₄²⁻ στο υδατοδιαλυτό κλάσμα υποδεικνύουν αυξημένη ευαισθησία σε φθορά, σε συνδυασμό με χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό και περιορισμένη υδραυλικότητα. Τα υδραυλικά κονιάματα, όπως ο υδραυλικός ασβέστης, τα θρυμματισμένα ασβεστολιθικά ή τούβλα και τα κονιάματα με φυσική ποζολάνα, περιέχουν χονδροειδή αδρανή (ασβεστίτης, χαλαζίας, άστριος, φυλλοπυριτικά) με ασβέστη ως συνδετικό.

Οι υδραυλικές ενώσεις σχηματίζονται από αντιδράσεις Ca(OH)₂ με τεχνητή ή φυσική ποζολάνη (π.χ., ηφαιστειακή γη Σαντορίνης) και ενισχύουν την αντοχή σε αποσάθρωση και περιβαλλοντική καταπόνηση, όπως υποδεικνύεται από χαμηλές τιμές διαλυτών αλάτων και υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό. Η φυσικοχημική ανάλυση υπογραμμίζει ότι για την αποκατάσταση ιστορικών τοιχοποιιών είναι κρίσιμο να χρησιμοποιηθούν πρώτες ύλες και τεχνικές συμβατές με τις ιστορικές. Ο συνδυασμός χημικής ανάλυσης, αναλύσεων διαλυτού/αδιάλυτου κλάσματος και ορυκτολογικών δεδομένων επιτρέπει τον ακριβή προσδιορισμό της αναλογίας συνδετικού προς συνολικό κονίαμα, ιδιαίτερα στα υδραυλικά κονιάματα, ξεπερνώντας τους περιορισμούς που δημιουργεί η κατανομή μεγέθους κόκκων (Maravelaki-Kalaitzaki et al., 2003).

Κεφάλαιο 5 – Πειραματική διαδικασία

Στο πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας γίνεται η μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας και της αντοχής σε θλίψη, δοκιμών διαφόρων αναλογιών από υδραυλική άσβεστο, διογκωμένο περλίτη και μετακαολίνη. Σκοπός της πειραματικής διαδικασίας είναι να εξεταστούν τα αποτελέσματα και να συγκριθούν οι ιδιότητες τους με ήδη υπάρχοντα υλικά τα οποία αποτελούν κομμάτι της συντήρησης και ενεργειακής αναβάθμισης σε κτίρια, με απώτερο σκοπό, την χρήση αυτού του υλικού στη θέση μη οικολογικών και μη ανακυκλώσιμων υλικών, όπως είναι η εξηλασμένη πολυστερίνη. Επιπροσθέτως, γίνεται διερεύνηση του κάθε μείγματος με καλή αντοχή σε θλίψη και όσο το δυνατόν καλύτερη θερμική αγωγιμότητα. Για να συμβεί αυτό, κατά τη διάρκεια του πειράματος γίνεται η διαφοροποίηση των ποσοτήτων σε ογκομετρικές αναλογίες των υλικών στα μείγματα. Αυτό σημαίνει, ότι πράχτηκαν μείγματα διαφόρων αναλογιών περιεκτικότητας σε Περλίτη, Υδραυλική άσβεστο, Μετακαολίνη και νερό. Ο Μετακαολίνης προστέθηκε ώστε να βελτιώσει την αντοχή του μείγματος σε θλιπτικές τάσεις. Η επιλογή των αναλογιών έγινε με γνώμονα ήδη υπαρχόντων προτάσεων από μίγματα με παρόμοια υλικά με βάση το Περλίτη.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα εξής:

- Καθαρή, λευκή, υψηλής αντοχής, φυσική υδραυλική άσβεστος NHL 3.5.
- Διογκωμένος περλίτης διαμέτρου κόκκων $\leq 0.3 \text{ cm}$.
- Μετακαολίνης.

Η NHL 3.5 είναι μία φυσική υδραυλική άσβεστος (NHL) που παράγεται από όπτηση ασβεστόλιθου πλούσιου σε οξείδια του πυριτίου, αργιλίου και σιδήρου. Αυτά τα συστατικά μετατρέπονται κατά την όπτηση σε πυριτικά και αργιλικά άλατα του ασβεστίου, τα οποία με την ενυδάτωση σχηματίζουν ενώσεις ασβεστο-πυριτο-αργιλικές με υδραυλικές ιδιότητες, δηλαδή το υλικό μπορεί να σκληρύνει παρουσία νερού.

5.1 Περιγραφή διαδικασίας

Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε σε δύο φάσεις:

- Φάση Α: Σύνθεση κονιάματος.
- Φάση Β: Δοκιμή αντοχών σε μονοαξονική θλίψη & Πειραματικός υπολογισμός θερμικής αγωγιμότητας.

Φάση Α:

1. Σύνθεση κονιάματος αποτελούμενο από: νερό (W) , Υδραυλική άσβεστο NHL 3.5 , διογκωμένο περλίτη (P) και μετακαολίνη (M). Για περισσότερη ευκολία θα αναφέρεται το μείγμα ως (HLPΜ) σε αναλογίες (NHL:P:M):

Για παράδειγμα το δοκίμιο με κωδικό **HLP4M10** σημαίνει αναλογία 1:4:

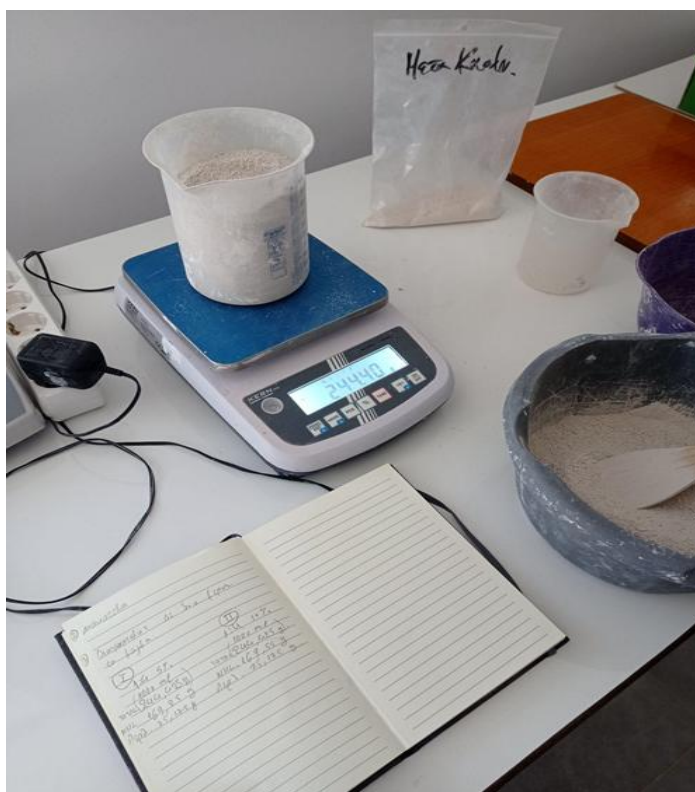
(1 για Υδραυλική άσβεστος: 4 για διογκωμένο περλίτη και 10% περιεκτικότητα κατά βάρος σε μετακαολίνη.)

Το HL δεν ακολουθείται από τον αριθμό 1, διότι είναι πάντα 1.

Παρασκευάστηκαν οι αναλογίες 1:4, 1:5 και 1:6 με περιεκτικότητα κατά βάρος σε μετακαολίνη 0%, 5% και 10%). Έπειτα έγινε δοκιμή εξάπλωσης (*flow table test*). Στις Εικόνες 5.1 έως 5.3 διακρίνονται τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή και τη δοσομέτρηση.



Εικόνα 5.1. Διαδικασία παρασκευής κονιάματος



Εικόνα 5.2. Μέτρηση της μάζας για τη μετακαολίνη



Εικόνα 5.3. Πάγκκος εργασίας

Μετά την παρασκευή των μειγμάτων έγινε η χύτευση σε καλούπια. Τα κύρια καλούπια ήταν τα εξής (Εικόνα 5.4):

1. Κυβικά: Τα οποία προορίζονταν για το τεστ μονοαξονικής αντοχής.
2. Ορθογωνικά: Τα οποία προορίζονταν για το τεστ θερμού δίσκου, για τον υπολογισμό των θερμικών ιδιοτήτων.

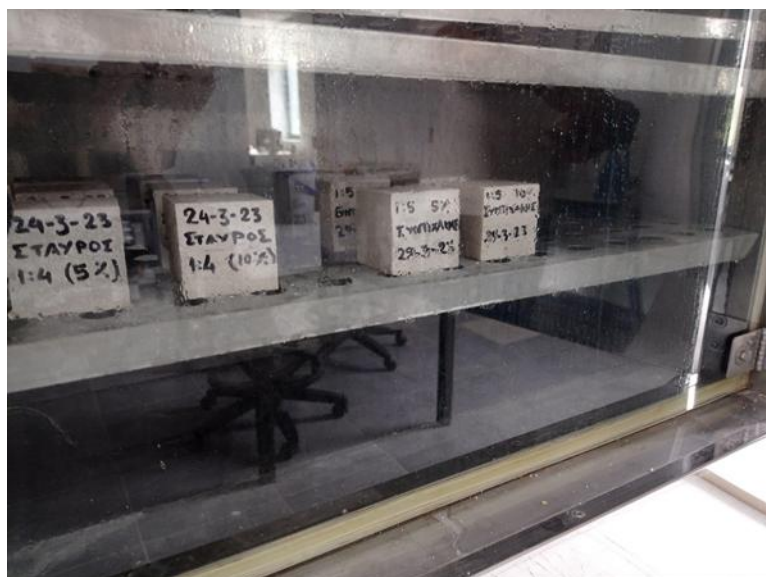


Εικόνα 5.4. Καλούπια που χρησιμοποιήθηκαν

Στις Εικόνες 5.5 και 5.6 παρουσιάζεται η ωρίμανση των κυβικών δοκιμών στα καλούπια, σε ειδικό θάλαμο σχετικής υγρασίας σε θερμοκρασία δωματίου για 28 ημέρες. Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι ογκομετρικές αναλογίες των μειγμάτων.



Εικόνα 5.5. Θάλαμος υγρασίας (εξωτερικά)



Εικόνα 5.6. Θάλαμος υγρασίας (εσωτερικά)

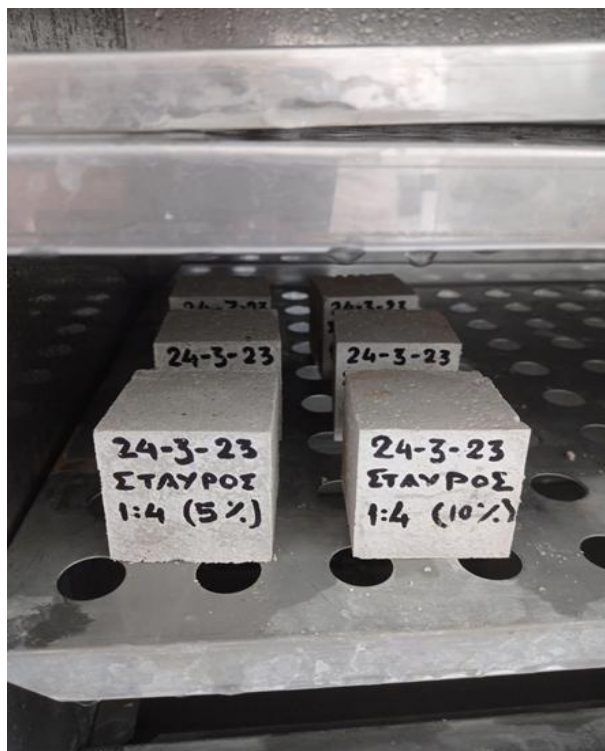
Πίνακας 5.1: Συνοπτική απεικόνιση των αναλογιών

	Αναλογίες			
Συνθέσεις	Υδραυλική άσβεστος (ΥΔ) (mL)	Περλίτης (Π) (mL)	Μετακαολίνης (Μ) (g)	H ₂ O (mL)
HLPΜ0: ΥΔ, Π, 0%Μ				
HLP4Μ0	1000	4000	0	1050
HLP5Μ0	1000	5000	0	1700
HLP6Μ0	780	4700	0	1450
HLPΜ5: ΥΔ, Π, 5%Μ				
HLP4Μ5	800	3200	32.30	1045
HLP5Μ5	600	3000	25.50	1000
HLP6Μ5	500	3000	19.95	1000
HLPΜ10: ΥΔ, Π, 10%Μ				
HLP4Μ10	600	2400	57,50	950
HLP5Μ10	500	2500	41,70	820
HLP6Μ10	500	3000	35,70	1050

Φάση Β:

Η φάση αυτή του πειράματος περιλαμβάνει τα δύο τεστ που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό δύο βασικών παραμέτρων αξιολόγησης και σύγκρισης της ποιότητας και της αποτελεσματικότητας των μειγμάτων για τον απαιτούμενο σκοπό. Τα δύο πειράματα είναι τα εξής:

1. Δοκιμή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, σε 15 κυβικά δοκίμια διαστάσεων 5x5x5 cm³.
2. Πειραματικός υπολογισμός θερμικής αγωγιμότητας, ορθογώνιων δοκιμίων διαστάσεων 3x9x9 cm³ σε αναλυτή θερμικών σταθερών ζεστού δίσκου (Hot Disk Thermal Constants Analyser).



Εικόνα 5.7. Κυβικά δοκίμια



Εικόνα 5.8. Ορθογωνικά δοκίμια



Εικόνα 5.9. Αναλυτής θερμικών σταθερών ζεστού δίσκου.



Εικόνα 5.10. Διαδικασία προετοιμασίας ανάλυσης θερμικών σταθερών.



Εικόνα 5.11. Διαδικασία ανάλυσης θερμικών σταθερών.

5.2 Επιλογή των υλικών

Για τη σύνθεση του κονιάματος χρησιμοποιήθηκε υδραυλική άσβεστος NHL 3.5, διογκωμένος περλίτης, και μετακαολίνης. Τα υλικά τοποθετήθηκαν στον εργαστηριακό πάγκο. Τα υλικά αυτά επιλέχθηκαν ως βάση ενός κονιάματος που θα περιέχει τα αδρανή, και τη ποζολάνη. Με το μικρό βάρος του περλίτη αναμένεται να επιτευχθεί ένα τελικό ελαφρύ μείγμα. Για την παρασκευή του κονιάματος είχαν προκαθοριστεί οι αναλογίες, ώστε στη συνέχεια να μπορούν να συγκριθούν οι διαφορές στις μηχανικές και θερμοαγωγιμες ιδιότητες τους.

5.2.1 Αναλυτική περιγραφή σύνθεσης κονιαμάτων

Στη συνέχεια, γίνεται αναλυτική περιγραφή της παρασκευής των μειγμάτων και καταγραφή των βημάτων πρόσθεσης των υλικών σε αντίστοιχους πίνακες για κάθε μείγμα.

Κονίαμα HLP6M0

Στο πρώτο μείγμα υδραυλικής άσβεστου και διογκωμένου περλίτη παρασκευάστηκε η αναλογία 1:6. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε 1mL υδραυλικής άσβεστου προσθέτουμε 6mL διογκωμένου Περλίτη. Στο ογκομετρικό δοχείο με μέγιστο μετρήσιμο όγκο 500mL τοποθετήθηκε περλίτης μέχρι να γεμίσει πλήρως από 4 φορές, και σε ένα ογκομετρικό δοχείο των 1000mL γέμισαν περίπου 3 φορές.

Επίσης χρειάστηκαν σταδιακά, άλλα 800mL, 600mL και 300mL περλίτη για να έχει το μείγμα την απαιτούμενη υφή, όψη και ρευστότητα. Για την υδραυλική άσβεστο NHL 3.5 προστέθηκαν περίπου 2.5 δοχεία των 500 mL και νερό περίπου ένα δοχείο των 500mL. Τα συνολικά mL περλίτη έφτασαν τα 4700 mL , η υδραυλική άσβεστος τα 780 mL και το νερό τα 1112 mL. Έτσι προκύπτει η αναλογία για 1 mL υδραυλικής άσβεστου προσθέτουμε 6 mL περλίτη και 1.42 mL νερό, (1:6:1.42).

Όταν το μείγμα ήταν έτοιμο να χυτευτεί στα καλούπια, προηγήθηκε ο έλεγχος της εργασιμότητας του στην τράπεζα εξάπλωσης (flow table). Γυρνώντας το μοχλό 5 φορές με μισογεμάτο το μεταλλικό δοχείο για να γεμίσουν τα κενά, έπειτα γέμισε το δοχείο αφαιρέθηκε, και ο μοχλός γύρισε 15 φορές. Η μέτρηση της διαμέτρου της εξάπλωσης καθορίζει και την εργασιμότητα του μείγματος. Η διάμετρος του υλικού μετρήθηκε στα 12 cm. Το μείγμα σε 12 ημέρες αφαιρέθηκε από τα καλούπια, τα οποία ήταν 3 κύβοι 40x40x40 mm³, 3 κωνικοί κύλινδροι, και τρία ορθογωνικού σχήματος διαστάσεων 30mm x 90mm x 90mm. (ΥxΠxΜ). Οι συνολικοί όγκοι σε (mL) των υλικών για την ογκομετρική αναλογία 1:6, με τις παρακάτω αντιστοιχίες σε (g) οι οποίες μετρήθηκαν στη ζυγαριά, φαίνονται αναλυτικά στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2. Κονίαμα HLP6M0.

Όγκος Περλίτη (mL)	Μάζα Περλίτη (g)	Υδραυλι κή άσβεστος NHL3.5 (mL)	Μάζα υδραυλικής άσβεστου NHL3.5 (g)	Νερό H ₂ O (mL)	Μάζα Νερού (g)
500	48,05	330	314.75		328
500	47,60	300	285.70	330	330
500	49,65	100	94.35	352	344.75
500	48,70	50	43.20	100	104.90
1000	97,50				
800	77,5				
600	58,45				
300	31,35				
Σύνολο: 4700	Σύνολο: 458.80	Σύνολο: 780	Σύνολο: 738.00	Σύνολο: 1112	Σύνολο: 1107.65

Τα υπόλοιπα κονιάματα παρασκευάστηκαν με την ίδια διαδικασία και μεθοδολογία.

Κονίαμα HLP4M0

Παρασκευάστηκε το δεύτερο κονίαμα Υδραυλικής άσβεστου - Διογκωμένου Περλίτη 1:4. Προστέθηκαν σε ένα ογκομετρικό δοχείο, για τη τελική ανάμειξη, αρχικά 500 mL NHL 3.5 με μάζα 435.60 g και άλλα 500 mL με μάζα 429.20 g. Έτσι, για την επίτευξη της αναλογίας, προστέθηκαν

συνολικά 4000mL διογκωμένου περλίτη και χρειάστηκαν 1050 mL νερού ώστε το μείγμα να έχει δέσει. Όταν το μείγμα ήταν έτοιμο να μπει στα καλούπια, προηγήθηκε ο έλεγχος της εργασιμότητας του στην τράπεζα εξάπλωσης (flow table). Η διάμετρος του υλικού μετρήθηκε 13.4 cm. Το μείγμα σε 5 ημέρες αφαιρέθηκε από τα καλούπια ώστε να ακολουθήσει η διαδικασία παρασκευής του επόμενου κονιάματος όπως φαίνεται παρακάτω. Τα καλούπια για την αναλογία 1:4, ήταν τα ίδια με του πρώτου μείγματος. Η τελική αναλογία ήταν 1:4:1.05. Παρακάτω οι αντιστοιχίες των ποσοτήτων από mL για κάθε προσθήκη με το ογκομετρικό δοχείο σε g φαίνονται στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3. Κονίαμα HLP4M0.

Όγκος Περλίτη (mL)	Μάζα Περλίτη (g)	Υδραυλική άσβεστος NHL3.5 (mL)	Μάζα υδραυλικής άσβεστου NHL3.5 (g)	Νερό H ₂ O (mL)
500	44.80	500	435,60	500
500	43.45	500	429,20	100
500	46.30			100
500	38.55			100
500	42.95			100
500	39.85			100
500	43.90			50
500	39,15			
Σύνολο: 4000	Σύνολο: 338.50	Σύνολο: 1000	Σύνολο: 864,80	Σύνολο: 1050

Κονίαμα HLP5M0

Για το τρίτο κονίαμα Υδραυλικής άσβεστου - Διογκωμένου Περλίτη 1:5, προστέθηκαν σε ένα ογκομετρικό δοχείο, 1000 mL NHL 3.5 με μάζα 842.35 g και περλίτη 5000 mL με συνολική μάζα 402.35 g. Χρειάστηκαν 1700 mL νερού ώστε το μείγμα να αναμειχθεί σωστά. Όταν το μείγμα ήταν έτοιμο πριν μπει στα καλούπια, πραγματοποιήθηκε έλεγχος της εργασιμότητας του, στην τράπεζα εξάπλωσης (flow table), η οποία μετρήθηκε 14 cm. Έπειτα προστέθηκε το υλικό στα καλούπια. Η τελική ογκομετρική αναλογία ήταν 1:5:1.7. Τα καλούπια αφαιρέθηκαν μετά από 7 ημέρες. Παρακάτω οι αντιστοιχίες των ποσοτήτων από mL σε gr φαίνονται στον Πίνακα 5.4. Τα μείγματα με αναλογίες 1:5 και 1:6 τοποθετήθηκαν στον αφυγραντήρα με θερμοκρασία 24 βαθμούς κελσίου και σχετική υγρασία RH 95% για 28 ημέρες.

Πίνακας 5.4. Κονίαμα HLP5M0.

Όγκος Περλίτη (mL)	Μάζα Περλίτη (g)	Υδραυλική άσβεστος NHL3.5 (mL)	Μάζα υδραυλικής άσβεστου NHL3.5 (g)	Νερό H ₂ O (mL)
1000	81.25	1000	842.35	500
1000	71.40			500
1000	75.05			500
1000	87.80			200
1000	86.85			
Σύνολο: 5000	Σύνολο: 402.35	Σύνολο: 1000	Σύνολο: 842.35	Σύνολο: 1700

Κονίαμα HLP4M5

Επίσης, παρασκευάστηκε το πρώτο μείγμα Υδραυλικής άσβεστου και Διογκωμένου περλίτη για την αναλογία 1:4, αυτή τη φορά με προσθήκη μετακαολίνη, σε περιεκτικότητα 5% κατά βάρος. Αρχικά, προστέθηκαν 800 mL NHL 3.5 και ζυγίστηκε 646.45 g. Η μετακαολίνη που θα προσθέσουμε αποτελεί το 5% της μάζας NHL 3.5, το οποίο υπολογίστηκε θεωρητικά στα 32.32 g. Έτσι, ζυγίστηκαν 32.30 g μετακαολίνη και προστέθηκαν στον κουβά ανάμειξης μαζί με τα 646.45 g NHL 3.5. Ο όγκος περλίτη που προσθέσαμε ήταν 3200 mL σύμφωνα με την αναλογία που επιλέξαμε να παρασκευάσουμε. Έπειτα, όταν το μείγμα ήταν έτοιμο και με προσθήκη νερού, ελέγχθηκε η εργασιμότητα στο flow table και μετρήθηκε διάμετρος 13cm. Τελικά, το μείγμα τοποθετήθηκε σε καλούπια. Στον Πίνακα 5.5 φαίνονται αναλυτικά οι ογκομετρικές προσθήκες - βήματα με τις αντίστοιχες μάζες που μετρήθηκαν στη ζυγαριά. Η αναλογία Υδραυλική άσβεστος - Περλίτης - Νερό με 5% κατά βάρος μετακαολίνη είναι: 1:4:1.3. Μετά από 7 ημέρες αφαιρέθηκαν τα καλούπια του μείγματος με αναλογία 1:4 με 5% μετακαολίνη και τα κυβικά δοκίμια τοποθετήθηκαν στον αφυγραντήρα με θερμοκρασία 24 βαθμούς κελσίου και σχετική υγρασία 95% για 28 ημέρες.

Πίνακας 5.5. Κονίαμα HLP4M5.

Όγκος Περλίτη (mL)	Μάζα Περλίτη (g)	Υδραυλική άσβεστος NHL3.5 (mL)	Μάζα υδραυλικής άσβεστου NHL3.5 (g)	Νερό H ₂ O (mL)	Όγκος Περλίτη (mL)
500	48.50	800	646.45	1000	-
500	41.80			45	-
500	39.30				
500	39.25				
1000	69.85				
200	18.15				
Σύνολο: 3200	Σύνολο: 256.85	Σύνολο: 800	Σύνολο: 646.45	Σύνολο: 1045	-

Κονίαμα HLP5M5

Έπειτα παρασκευάστηκε το μείγμα Υδραυλικής άσβεστου και Διογκωμένου περλίτη για την αναλογία 1:5, με προσθήκη μετακαολίνη, σε περιεκτικότητα 5% κατά βάρος. Αρχικά ζυγίσαμε 600 mL NHL 3.5 με ένδειξη 509.80 g. Έτσι, υπολογίστηκε ότι θα προστεθεί το 5% της ένδειξης αυτής που είναι 25.49 g σε μετακαολίνη. Στον Πίνακα 5.6 φαίνονται αναλυτικά οι όγκοι και οι μάζες, όλων των υλικών που προστέθηκαν. Όταν το μείγμα ήταν έτοιμο μετά την προσθήκη νερού, ελέγχθηκε η εργασιμότητα στο flow table και μετρήθηκε διάμετρος 13.5 cm. Τελικά, το μείγμα τοποθετήθηκε σε καλούπια. Η τελική αναλογία Υδραυλική άσβεστος-Διογκωμένος περλίτης - Νερό με 5% κατά βάρος μετακαολίνη είναι: 1:5:1.7

Πίνακας 5.6. Κονίαμα HLP5M5.

Όγκος Περλίτη (mL)	Μάζα Περλίτη (g)	Υδραυλική άσβεστος NHL3.5 (mL)	Μάζα υδραυλικής άσβεστου NHL3.5 (g)	Νερό H ₂ O (mL)	Όγκος Περλίτη (mL)
1000	85.35	600	509.80	1000	-
1000	83.20				-
1000	86.30 g				-
Σύνολο: 3000	Σύνολο: 254.85	Σύνολο: 600	Σύνολο: 509.80	Σύνολο: 1000	-

Μετά από 7 ημέρες αφαιρέθηκαν τα καλούπια του μείγματος με αναλογία 1:5 με 5% μετακαολίνη και τα κυβικά δοκίμια τοποθετήθηκαν στον αφυγραντήρα με θερμοκρασία 24 βαθμούς κελσίου και σχετική υγρασία 95% για 28 ημέρες.

Κονίαμα HLP6M5

Έπειτα, παρασκευάστηκε το μείγμα Υδραυλικής άσβεστος και Διογκωμένου περλίτη για την αναλογία 1:6, με προσθήκη μετακαολίνη, σε περιεκτικότητα 5% κατά βάρος. Αρχικά προστέθηκαν στη ζυγαριά 500 mL NHL 3.5 με ένδειξη 398.90. Έτσι, υπολογίστηκε ότι θα προστεθεί το 5% της ένδειξης αυτής που είναι 19.95 g σε μετακαολίνη. Στον Πίνακα 5.7 φαίνονται αναλυτικά οι όγκοι και οι μάζες, όλων των υλικών που προστέθηκαν. Όταν το μείγμα ήταν έτοιμο μετά από την προσθήκη νερού, ελέγχθηκε η εργασιμότητα στο flow table και μετρήθηκε διάμετρος 13.5 cm. Τελικά, το μείγμα τοποθετήθηκε σε τρία κυλινδρικά καλούπια με διάμετρο 50mm και ύψος 5 mm, τρεις κύβους 40x40 mm, τρεις κωνικούς κυλίνδρους, και δύο μεταλλικά τετράγωνα καλούπια 30mm x 90mm x 90mm. Η τελική αναλογία Υδραυλική άσβεστος - Περλίτης - Νερό με 5% κατά βάρος μετακαολίνη είναι: 1:6:2. Μετά από 7 ημέρες αφαιρέθηκαν τα καλούπια του μείγματος με αναλογία 1:6 με 5% μετακαολίνη και τα κυβικά δοκίμια τοποθετήθηκαν στον αφυγραντήρα με θερμοκρασία 24 βαθμούς κελσίου και σχετική υγρασία 95% για 28 ημέρες.

Πίνακας 5.7. Κονίαμα HLP6M5.

Όγκος Περλίτη (mL)	Μάζα Περλίτη (g)	Υδραυλική άσβεστος NHL3.5 (mL)	Μάζα υδραυλικής άσβεστος NHL3.5 (g)	Νερό H ₂ O (mL)	Όγκος Περλίτη (mL)
1000	82.40	500	398.90	1000	1000.85
1000	81.30				-
1000	75.20				
Σύνολο: 3000	Σύνολο: 170.90	Σύνολο: 500	Σύνολο: 398.90	Σύνολο: 1000	Σύνολο: 1000.85

Κονίαμα HLP4M10

Έπειτα, παρασκευάστηκε το μείγμα Υδραυλικής άσβεστος και Διογκωμένου περλίτη για την αναλογία 1:4, με τη προσθήκη μετακαολίνη, σε περιεκτικότητα 10% κατά βάρος. Αρχικά ζυγίσαμε 600 mL NHL 3.5 με ένδειξη 574.95 g. Έτσι, υπολογίστηκε ότι θα προστεθεί το 10% της ένδειξης αυτής που είναι 57.50 g σε μετακαολίνη. Στον Πίνακα 5.8 φαίνονται αναλυτικά οι όγκοι και οι μάζες, όλων των υλικών που προστέθηκαν. Όταν το μείγμα ήταν έτοιμο και με προσθήκη νερού, ελέγχθηκε η εργασιμότητα στο flow table και μετρήθηκε διάμετρος 13.4 cm.

Τελικά, το μείγμα τοποθετήθηκε σε καλούπια. Η τελική αναλογία του μείγματος προκύπτει: 1:4:1.6. Μετά από 7 ημέρες, αφαιρέθηκαν τα καλούπια του μείγματος με αναλογία 1:4 με 10% μετακαολίνη και τα κυβικά δοκίμια τοποθετήθηκαν στον αφυγραντήρα με θερμοκρασία 24 βαθμούς κελσίου και σχετική υγρασία 95% για 28 ημέρες.

Πίνακας 5.8. Κονίαμα HLP4M10.

Όγκος Περλίτη (mL)	Μάζα Περλίτη (g)	Υδραυλική άσβεστος NHL3.5 (mL)	Μάζα υδραυλικής άσβεστος NHL3.5 (g)	Νερό H ₂ O (mL)	Όγκος Περλίτη (mL)
1000	89.45	600	574.95	950	
1000	93.15				
400	31.90				
Σύνολο: 2400	Σύνολο: 214.5	Σύνολο: 600	Σύνολο: 574.95	Σύνολο: 950	-

Κονίαμα HLP5M10

Στη συνέχεια, παρασκευάστηκε το μείγμα για την αναλογία 1:5, με προσθήκη μετακαολίνης, σε περιεκτικότητα 10% κατά βάρος. Αρχικά ζυγίσαμε 500 mL NHL 3.5 με ένδειξη 417.20 g. Έτσι, υπολογίστηκε ότι θα προστεθεί το 10% της ένδειξης αυτής που είναι g σε μετακαολίνη. Στον Πίνακα 5.9 φαίνονται αναλυτικά οι όγκοι και οι μάζες, όλων των υλικών που προστέθηκαν. Όταν το μείγμα ήταν έτοιμο και με προσθήκη νερού, ελέγχθηκε η εργασιμότητα στο flow table και μετρήθηκε διάμετρος 12.5 cm. Τελικά, το μείγμα τοποθετήθηκε σε τρία κυλινδρικά καλούπια με διάμετρο 50mm και ύψος 5 mm, τρεις κύβους 40x40 mm, τρεις κωνικούς κυλίνδρους, και δύο μεταλλικά τετράγωνα καλούπια 30mm x 90mm x 90mm. Η τελική αναλογία υδράσβεστος - Περλίτης - Νερό με 10% κατά βάρος μετακαολίνη είναι: 1:5:1.6. Μετά από 7 ημέρες αφαιρέθηκαν τα καλούπια του μείγματος με αναλογία 1:5 με 10% μετακαολίνη και τα κυβικά δοκίμια τοποθετήθηκαν στον αφυγραντήρα με θερμοκρασία 24 βαθμούς κελσίου και σχετική υγρασία 95% για 28 ημέρες.

Πίνακας 5.9. Κονίαμα HLP5M10.

Όγκος Περλίτη (mL)	Μάζα Περλίτη (g)	Υδραυλική άσβεστος NHL3.5 (mL)	Μάζα υδραυλικής άσβεστου NHL3.5 (g)	Νερό H ₂ O (mL)	Όγκος Περλίτη (mL)
1000	71.05	500	417.20	820	
1000	82.75				
500	37.55				
Σύνολο: 2500	Σύνολο: 191.35	Σύνολο: 500	Σύνολο: 417.20	Σύνολο: 820	-

Κονίαμα HLP6M10

Για την αναλογία 1:6, με προσθήκη μετακαολίνη, σε περιεκτικότητα 10% κατά βάρος, ζυγίσαμε 500 mL NHL 3.5 με ένδειξη 356,85 g. Έτσι, υπολογίστηκε ότι θα προστεθεί το 10% της ένδειξης αυτής που είναι 35,70 g σε μετακαολίνη. Στον Πίνακα 5.10 φαίνονται αναλυτικά οι όγκοι και οι μάζες, όλων των υλικών που προστέθηκαν. Όταν το μείγμα ήταν έτοιμο και με προσθήκη νερού, ελέγχθηκε η εργασιμότητα στο flow table και μετρήθηκε διάμετρος 11.5 cm. Τελικά, το μείγμα τοποθετήθηκε σε καλούπια. Η τελική αναλογία Υδραυλική άσβεστος - Περλίτης - Νερό με 10% κατά βάρος μετακαολίνη είναι: 1:5:1.6

Πίνακας 5.10. Κονίαμα HLP6M10.

Όγκος Περλίτη (mL)	Μάζα Περλίτη (g)	Υδραυλική άσβεστος NHL3.5 (mL)	Μάζα υδραυλικής άσβεστου NHL3.5 (g)	Νερό H ₂ O (mL)	Όγκος Περλίτη (mL)
1000	80.70	500	356.85	1000	
1000	76.25			50	
1000	83.60				
Σύνολο: 3000	Σύνολο: 240.55	Σύνολο: 500	Σύνολο: 356.85	Σύνολο: 1050	-

Κεφάλαιο 6 – Πειράματα μονοαξονικής θλίψης

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναλυτική περιγραφή και παρουσίαση των αποτελεσμάτων του πειράματος της αντοχής στη μονοαξονική θλίψη των κυβικών δοκιμίων. Αρχικά, γίνεται η θεωρητική περιγραφή των μεγεθών που σχετίζονται με τον υπολογισμό της αντοχής σε θλίψη των δοκιμίων. Με βάση τα δεδομένα αυτά σε συνδυασμό με τη χρήση της θεωρίας που αναλύεται παρακάτω, μπορεί να υπολογιστεί τη μηχανική αντοχή των μειγμάτων έπειτα από την αφύγρανση στον θάλαμο για 28 ημέρες.

6.1 Θεωρητική περιγραφή

Μετά την ολοκλήρωση παρασκευής των δοκιμίων έγινε η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Για τις δοκιμές αντοχών χρησιμοποιήθηκε συσκευή του Εργαστηρίου Μηχανικής Πετρωμάτων της Σχολής ΜΗΧΟΠ του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της αντοχής αποτελείται από τα ακόλουθα τμήματα:

- Συσκευή δοκιμής : Η συσκευή μπορεί να επιβάλλει σταθερό ρυθμό φόρτισης στο δοκίμιο και συγχρόνως έχει τη δυνατότητα να καταγράψει το επιβαλλόμενο φορτίο.
- Σύστημα ελέγχου: Έχει την δυνατότητα σύνδεσης με ηλεκτρονικό υπολογιστή Η/Υ.
- Πλάκες φόρτισης : χρησιμεύουν για να μεταφέρουν το φορτίο στο δοκίμιο.
- Σύστημα μέτρησης φορτίου και αξονικής μετατόπισης.
- Σύστημα συνεχούς καταγραφής.

Υπολογισμός της αντοχής:

Προκειμένου να γίνει υπολογισμός των ανοιγμένων παραμορφώσεων και των εφαρμοζόμενων τάσεων πρέπει να ληφθούν υπόψη τα παρακάτω. Η παραμόρφωση (ε) η οποία υπολογίζεται βάσει της μηχανικής των υλικών ως:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (6.1)$$

όπου:

- ΔL = η μεταβολή στο ύψος του δοκιμίου σε mm σύμφωνα με τις ενδείξεις του μετρητή παραμόρφωσης,

- L_0 = αρχικό ύψος του δοκιμίου σε mm,
- η ορθή τάση (σ) στο δοκίμιο υπολογίζεται ως:

$$\sigma = \frac{P}{A'} \text{ kPa} \quad (6.2)$$

όπου:

- P = το στιγμιαίο φορτίο (kN) στο δείγμα που αντιστοιχεί σε μία τιμή του ΔL .
- A '= η μέση εγκάρσια επιφάνεια του δείγματος (m^2) που αντιστοιχεί στο φορτίο P

Από το διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης προκύπτει η τιμή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (MPa), ως η μέγιστη τιμή του διαγράμματος.

Υπολογισμός σφαλμάτων μέγιστης τάσης, παραμόρφωσης και μέτρου ελαστικότητας:

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων που αναφέρθηκαν, έγινε η χρήση των παρακάτω θεωρητικών τύπων.

6.1.1 Μέγιστη Τάση

Η μέγιστη τάση (ultimate stress) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A} \quad (6.3)$$

όπου:

- F_{max} : η μέγιστη δύναμη,
- A : η διατομή του δοκιμίου.

Το συνολικό σφάλμα της τάσης υπολογίστηκε ως ακολούθως:

$$\Delta\sigma_{max} = \sigma_{max} \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta F}{F}\right)^2 + \left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2} \quad (6.4)$$

Όπου:

- ΔF είναι το σφάλμα στη δύναμη (1% σφάλμα, ή $0.01 \times F_{max}$).
- ΔA είναι το σφάλμα στη διατομή (υποθέσαμε $\pm 1 \text{ mm}^2$).

6.1.2 Παραμόρφωση μέγιστης τάσης

Η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση υπολογίζεται ως εξής:

$$\varepsilon_{max} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (6.5)$$

όπου:

- ΔL είναι η αλλαγή μήκους.
- L_0 είναι το αρχικό μήκος.

6.1.3 Σφάλμα παραμόρφωσης

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon_{\sigma max} \cdot \frac{\Delta L}{L_0} \quad (6.6)$$

όπου ΔL είναι το σφάλμα στη μέτρηση του αρχικού μήκους (υποθέσαμε $\pm 0.1 \text{ mm}$).

6.1.4 Μέτρο ελαστικότητας

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (6.7)$$

ενώ το συνολικό σφάλμα στο E υπολογίστηκε από:

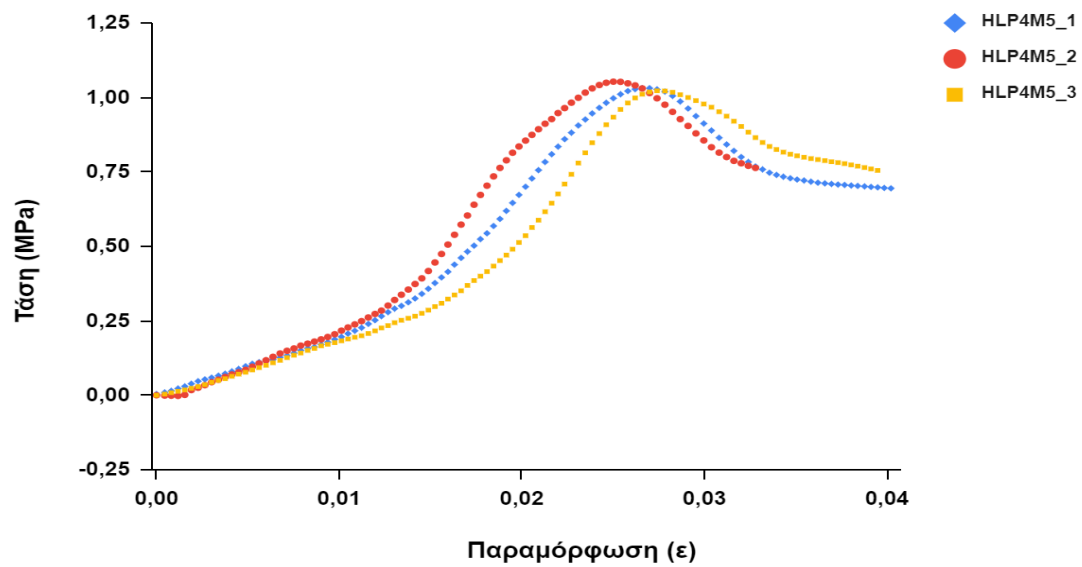
$$\Delta E = E \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta \sigma}{\sigma}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2} \quad (6.8)$$

όπου:

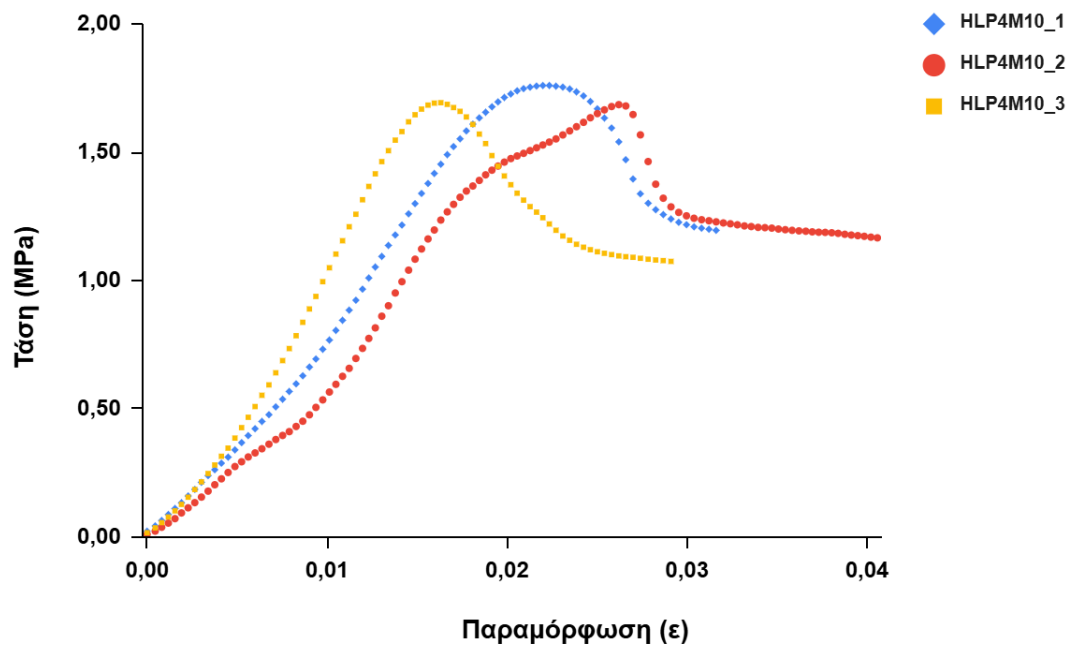
- $\Delta \sigma$ είναι το συνολικό σφάλμα της τάσης,
- $\Delta \varepsilon$ είναι το συνολικό σφάλμα της παραμόρφωσης.

6.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

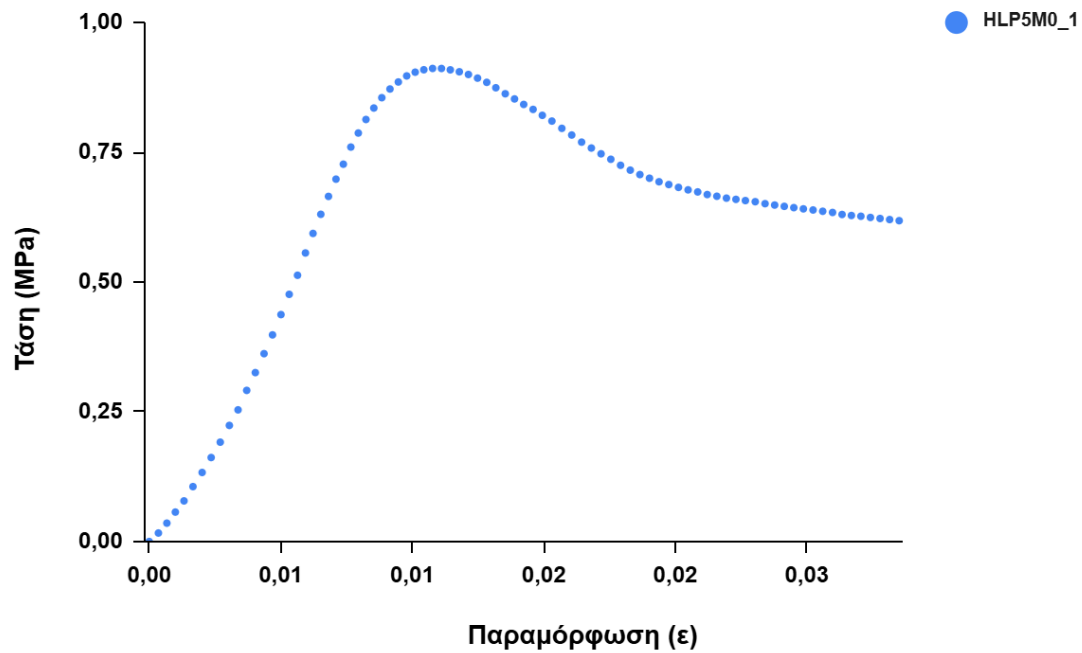
Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η γραφική απεικόνιση των πειραματικών τιμών που προέκυψαν από τις δοκιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη στα δοκίμια. Στις εικόνες παρουσιάζονται οι τύποι των δοκιμίων οι οποίοι ομαδοποιήθηκαν με βάση την αναλογία σε υδραυλική άσβεστο και περλίτη. Κατ' αυτόν τον τρόπο, γίνεται απευθείας σύγκριση των γραφικών παραστάσεων ανά ομάδα αναλογίας με σταθερή την περιεκτικότητα σε ποζολάνη. Τα πειράματα αντοχής δεν εφαρμόστηκαν σε όλα τα δοκίμια που παράχθηκαν, είτε λόγω αστοχίας των υλικών κατά τη διαδικασία, αλλά και λόγω απώλειας ορισμένων δεδομένων από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή.



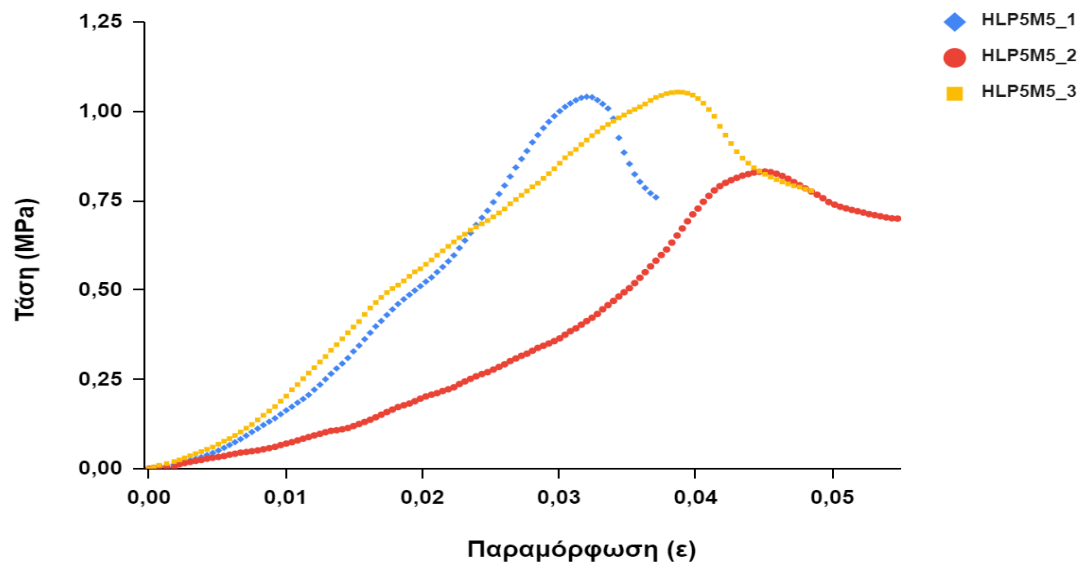
Διάγραμμα 6.1 Ομάδα HLP4M5



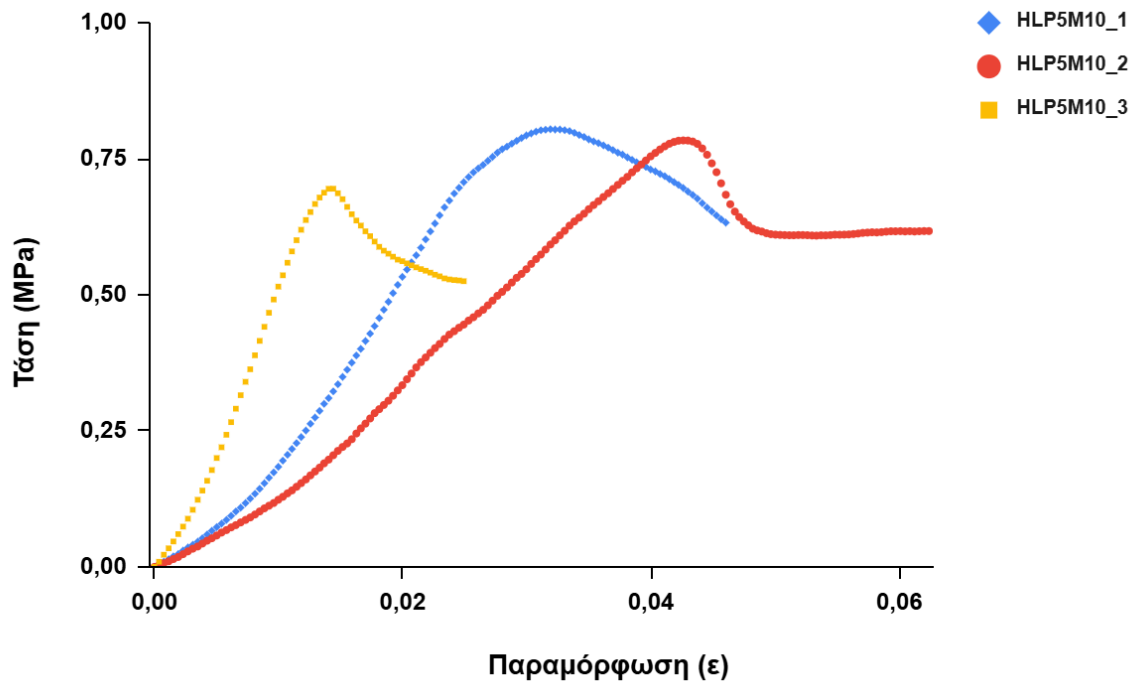
Διάγραμμα 6.2. Ομάδα HLP4M10



Διάγραμμα 6.3. Ομάδα HLP5M0



Διάγραμμα 6.4. Ομάδα HLP5M5



Διάγραμμα 6.5. Ομάδα HLP5M10

Η μηχανική συμπεριφορά των κονιαμάτων αξιολογήθηκε μέσω δοκιμών αντοχής, με τα δείγματα να ομαδοποιούνται σε τριάδες βάσει ίδιων αναλογιών σύνθεσης. Κοινό χαρακτηριστικό όλων των μειγμάτων αποτέλεσε η χρήση περλίτη και υδραυλικής άσβεστο. Τα κονιάματα με αναλογία άσβεστο προς περλίτη 1:4 παρουσίασαν καμπύλες τάσης–παραμόρφωσης με υψηλή ομοιομορφία, γεγονός που υποδηλώνει σταθερή μηχανική απόκριση. Το εύρημα αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς η συγκεκριμένη αναλογία οδηγεί σε σχετικά ισορροπημένη μικροδομή, με ικανοποιητική συνοχή και κατανομή των πόρων. Αντιθέτως, με την αύξηση της περιεκτικότητας σε περλίτη παρατηρήθηκαν σημαντικότερες αποκλίσεις μεταξύ των καμπυλών, που αποτελεί ένδειξη διαφοροποίησης στη μηχανική συμπεριφορά των δειγμάτων. Η εξέλιξη αυτή ερμηνεύεται από το γεγονός ότι ο περλίτης, όντας ελαφροβαρές πορώδες υλικό χωρίς ιδιαίτερη πλαστικότητα, μειώνει την ικανότητα του μείγματος να παραμορφώνεται ομοιόμορφα υπό φορτίο. Κατ' επέκταση, όσο αυξάνεται το ποσοστό περλίτη, τόσο περιορίζεται η πλαστικότητα και ενισχύεται η πιθανότητα ψαθυρής αστοχίας.

Επιπλέον, η προσθήκη μετακαολίνη συνδέθηκε με πιο απότομη καθοδική κλίση μετά το μέγιστο φορτίο, χαρακτηριστικό της ψαθυρής συμπεριφοράς. Η επίδραση αυτή μπορεί να αποδοθεί στη μείωση του ελεύθερου πορώδους και στη δημιουργία πυκνότερης, αλλά ταυτόχρονα λιγότερο παραμορφώσιμης μικροδομής. Η παρουσία μετακαολίνη βελτιώνει μεν την αντοχή, αλλά περιορίζει τη δυνατότητα παραμόρφωσης μετά τη διαρροή. Τέλος, σε ορισμένες συνθέσεις καταγράφηκαν μη ομαλές και ασταθείς καμπύλες, οι οποίες πιθανώς σχετίζονται με ανομοιογένειες στη δομή του υλικού, την κατανομή του περλίτη ή/και την αλληλεπίδραση του με την υδραυλική άσβεστο. Το αποτέλεσμα είναι μειωμένη προβλεψιμότητα της μηχανικής συμπεριφοράς, κάτι που θα πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω με μικροδομικές αναλύσεις, π.χ., μέσω ηλεκτρονικής μικροσκοπία σάρωσης

(Scanning Electron Microscopy-SEM) και ποροσκοπίας με διείσδυση υδραργύρου (Mercury Intrusion Porosimetry-MIP).

6.2.1 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Στο λογισμικό EXCEL έγινε ο υπολογισμός η επεξεργασία των τιμών που προέκυψαν από τα πειράματα και ακολούθησε ο σχεδιασμός των διαγραμμάτων που αντιστοιχούν στις τιμές αυτές. Θεωρήθηκαν τυπικές τιμές σφάλματος:

1. Ακρίβεια δύναμης: $\pm 1\%$ στη μέτρηση της δύναμης.
2. Ακρίβεια διατομής: $\pm 1 \text{ mm}^2$.
3. Ακρίβεια μήκους/παραμόρφωσης: $\pm 0.1 \text{ mm}$.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα για τα σφάλματα που υπολογίστηκαν για το δοκίμιο HLP4M5_1:

1. Σφάλμα Μέγιστης Τάσης (σ_{\max}): $\pm 0.01032 \text{ MPa}$
2. Σφάλμα Μέγιστης Παραμόρφωσης (ϵ_{\max}): ± 0.00812
3. Σφάλμα Μέτρου Ελαστικότητας (E): $\pm 0.36 \text{ Mpa}$

Παράδειγμα υπολογισμού των αποτελεσμάτων για το δοκίμιο HLP4M5_1:

Δεδομένα για τους υπολογισμούς:

- Διατομή: $A=25 \text{ cm}^2$
- Ύψος: $L_0=50 \text{ mm}$
- Πυκνότητα: $\rho=0.566 \text{ g/cm}^3$ (δεν επηρεάζει άμεσα τη μονοαξονική θλίψη, εκτός αν συνδέεται με άλλη μέτρηση)
- Μέγιστη Τάση: $\sigma_{\max}=1.03 \text{ MPa}$
- Μέτρο Ελαστικότητας: $E=35.29 \text{ MPa}$
- Μέγιστη Παραμόρφωση: $\epsilon_{\max}=4.058$

6.2.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων αντοχής

Οι τιμές των παραμέτρων μέγιστη τάση, μέγιστη παραμόρφωση και μέτρο ελαστικότητας προέκυψαν από την επεξεργασία των μετρήσεων που καταγράφηκαν στον υπολογιστή με τη χρήση EXCEL. Επίσης υπολογίστηκαν το τυπικό σφάλμα κάθε παραμέτρου. Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα προκύπτουν οι παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 6.1. HLP4M5_1

Δοκίμιο	Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδα	Σφάλμα
HLP4M5_1	Μέγιστη Τάση (σ_{\max})	1.031	MPa	± 0.0103 MPa
HLP4M5_1	Παραμόρφωση Μεγ.τάσης ($\epsilon_{\sigma_{\max}}$)	4.058	-	± 0.00812
HLP4M5_1	Μέτρο Ελαστικότητας (E)	35.290	MPa	± 0.36 MPa

Πίνακας 6.2. HLP4M5_2

Δοκίμιο	Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδα	Σφάλμα
HLP4M5_2	Μέγιστη Τάση (σ_{\max})	1.053	MPa	± 0.0103 MPa
HLP4M5_2	Παραμόρφωση Μεγ.τάσης ($\epsilon_{\sigma_{\max}}$)	3.076	-	± 0.00812
HLP4M5_2	Μέτρο Ελαστικότητας (E)	46.566	MPa	± 0.36 MPa

Πίνακας 6.3. HLP4M5_3

Δοκίμιο	Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδα	Σφάλμα
HLP4M5_3	Μέγιστη Τάση (σ_{\max})	1.022	MPa	± 0.0102 MPa
HLP4M5_3	Παραμόρφωση Μεγ.τάσης ($\epsilon_{\sigma_{\max}}$)	4.090	-	± 0.0082
HLP4M5_3	Μέτρο Ελαστικότητας (E)	33.150	MPa	± 0.34 MPa

Εφόσον τα δεδομένα αφορούν το ίδιο είδος μείγματος, συγκεντρώθηκαν τα αποτελέσματα σε έναν πίνακα για το δοκίμιο με το όνομα HLP4M5.

Πίνακας 6.4. HLP4M5

Ιδιότητα	HLP4M5_1	HLP4M5_2	HLP4M5_3	Μέση Τιμή	Μονάδα	Σφάλμα
Μέγιστη Τάση (σ_{\max})	1.031	1.053	1.022	1.04	MPa	± 0.0103 MPa
Παραμόρφωση Μεγ.τάσης ($\epsilon_{\sigma_{\max}}$)	4.058	3.076	4.090	3.74	-	± 0.00815
Μέτρο Ελαστικότητας (E)	35.290	46.557	33.150	38.33	MPa	± 0.35 MPa

Παρατηρήσεις:

- Η μέση τιμή υπολογίστηκε λαμβάνοντας τον αριθμητικό μέσο όρο των τιμών από τα δύο δοκίμια.
- Το σφάλμα παρέμεινε ίδιο για κάθε μέτρηση, δεδομένου ότι και τα δύο δοκίμια έχουν παρόμοια πειραματική ακρίβεια.

Μέγιστη Τάση:

- Τα τρία δοκίμια παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές σ_{\max} , με μικρές διακυμάνσεις.

Μέγιστη Παραμόρφωση:

- Το HLP4M5_2 έχει τη μικρότερη παραμόρφωση, ενώ το HLP4M5_3 τη μεγαλύτερη.

Μέτρο Ελαστικότητας:

- Το HLP4M5_2 παρουσιάζει το υψηλότερο E, ενώ το HLP4M5_3 το χαμηλότερο.

Για τα δοκίμια του μείγματος HLP5M5:

Πίνακας 6.5. HLP5M5_1

Δοκίμιο	Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδα	Σφάλμα
HLP5M5_1	Μέγιστη Τάση (σ_{\max}) (σ_{\max})	1.041	MPa	± 0.0104 MPa
HLP5M5_1	Παραμόρφωση Μεγ.τάσης ($\epsilon_{\sigma_{\max}}$)	3.565	-	± 0.00713
HLP5M5_1	Μέτρο Ελαστικότητας (E)	34.863	MPa	± 0.34 MPa

Πίνακας 6.6. HLP5M5_2

Δοκίμιο	Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδα	Σφάλμα
HLP5M5_2	Μέγιστη Τάση (σ_{\max}) (σ_{\max})	0.832	MPa	± 0.0083 MPa
HLP5M5_2	Παραμόρφωση Μεγ.τάσης ($\epsilon_{\sigma_{\max}}$)	4.385		± 0.0073
HLP5M5_2	Μέτρο Ελαστικότητας (E)	22.192	MPa	± 0.22 MPa

Πίνακας 6.7. HLP5M5_3

Δοκίμιο	Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδα	Σφάλμα
HLP5M5_3	Μέγιστη Τάση (σ_{\max}) (σ_{\max})	1.054	MPa	± 0.0105 MPa
HLP5M5_3	Παραμόρφωση Μεγ.τάσης ($\epsilon_{\sigma_{\max}}$)	4.277		± 0.0073
HLP5M5_3	Μέτρο Ελαστικότητας (E)	30.715	MPa	± 0.31 MPa

Τα δεδομένα αφορούν το ίδιο είδος μείγματος και συγκεντρώθηκαν τα αποτελέσματα σε έναν πίνακα για το δοκίμιο με το όνομα HLP5M5.

Πίνακας 6.8. HLP5M5

Ιδιότητα	HLP5M5_1	HLP5M5_2	HLP5M5_3	Μέση Τιμή	Μονάδα	Σφάλμα
Μέγιστη Τάση (σ_{\max})	1.041	0.832	1.054	0.975	MPa	± 0.0102 MPa
Παραμόρφωση Μεγ.τάσης ($\epsilon_{\sigma_{\max}}$)	3.565	4.385	4.277	4.076		± 0.0073
Μέτρο Ελαστικότητας (E)	34.863	22.192	30.715	29.591	MPa	± 0.29 MPa

Παρατηρήσεις:

- Η μέση τιμή υπολογίστηκε από τα δεδομένα των τριών δοκιμών.
- Το σφάλμα παραμένει για κάθε δοκίμιο, αλλά η μέση τιμή υπολογίστηκε από τα σφάλματα των μεμονωμένων τιμών.

Για τα δοκίμια του μείγματος HLP4M10:

Έγινε συνοπτική καταγραφή των αποτελεσμάτων στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.9. HLP4M10

Ιδιότητα	HLP4M10_1	HLP4M10_2	HLP4M10_3	Μέση Τιμή	Μονάδα	Σφάλμα
Μέγιστη Τάση (σ_{\max})	1.760	1.686	1.693	1.710	MPa	± 0.029 MPa
Παραμόρφωση Μεγ.τάσης ($\epsilon_{\sigma_{\max}}$)	2.980	3.926	2.743	3.216		± 0.0246
Μέτρο Ελαστικότητας (E)	95.70 8	81.254	124.54 7	100.83 7	MPa	± 1.66 MPa

Παρατηρήσεις:

1. Υπάρχει κάποια μεταβλητότητα στα αποτελέσματα των τριών δοκιμών, ειδικά στο μέτρο ελαστικότητας και την μέγιστη παραμόρφωση. Αυτό μπορεί να υποδεικνύει διαφοροποιήσεις στο υλικό ή τις συνθήκες δοκιμής.
2. Τα σφάλματα είναι γενικά μικρά, κάτι που υποδεικνύει ότι οι μετρήσεις έχουν καλή ακρίβεια και σταθερότητα. Ωστόσο, το σφάλμα για το μέτρο ελαστικότητας είναι μεγαλύτερο, κάτι που μπορεί να συνδέεται με τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις μεταξύ των τιμών.
3. Αν και υπάρχουν διακυμάνσεις, οι μέσες τιμές δείχνουν ότι τα δοκίμια ανήκουν στην ίδια κατηγορία και δεν υπάρχουν ακραίες διαφοροποιήσεις που να υποδεικνύουν ακραία αποτελέσματα.

Για τα δοκίμια του μείγματος HLP5M10:

Έγινε άμεση συνοπτική καταγραφή των αποτελεσμάτων στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.10. HLP5M10

Ιδιότητα	HLP5M10 _1	HLP5M10_2	HLP5M10_3	Μέση Τιμή	Μονάδα	Σφάλμα
Μέγιστη Τάση (σ _{max})	0.80 4	0.784	0.695	0.761	MPa	±0.04399 MPa
Παραμόρφωση Μεγ.τάσης (ε _{σmax})	4.22 0	4.111	2.356	3,561		±0.40532
Μέτρο Ελαστικότητας (E)	34.8 56	22.023	67.134	41.337	MPa	±3.93 MPa

6.3 Συμπεράσματα

- Οι μέσες τιμές για τη μέγιστη τάση θραύσης και το μέτρο ελαστικότητας είναι σχετικά κοντά στην τιμή των δοκιμών, ενώ η μέγιστη παραμόρφωση έχει μεγαλύτερη μεταβλητότητα, πράγμα που σημαίνει ότι το υλικό μπορεί να έχει διαφορετική συμπεριφορά κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης, ανάλογα με τις συνθήκες των δοκιμών.
- Το μεγαλύτερο σφάλμα παρατηρείται στην μέγιστη παραμόρφωση, υποδεικνύοντας πιθανώς μεγαλύτερη αβεβαιότητα στις μετρήσεις της παραμόρφωσης.
- Αντοχή και Στρώσεις: Από τα αποτελέσματα, το μείγμα HLP4M5 (5% μετακαολίνη) φαίνεται να έχει τη βέλτιστη αντοχή για εφαρμογές σε στρώσεις, καθώς συνδυάζει καλή αντοχή και ευκαμψία. Είναι κατάλληλο για περιοχές που θα υποβληθούν σε χαμηλά έως μέτρια φορτία.
- Συμπεριφορά υλικού: Τα μείγματα HLP5M10 με 10% μετακαολίνη παρουσιάζουν πιο αδύναμη μέγιστη τάση θραύσης, αλλά είναι πιο παραμορφώσιμα. Ωστόσο, λόγω της μεγαλύτερης ευθραυστότητας, η χρήση τους σε περιοχές με υψηλές μηχανικές απαιτήσεις μπορεί να μην είναι ιδανική.

- Χρήση σε στρώσεις: Για εφαρμογή του μείγματος ως στρώση (π.χ., σε δάπεδα, τοίχους, κλπ.), το HLP4M5 φαίνεται να είναι πιο κατάλληλο, λόγω της πιο ευέλικτης φύσης του και του ότι μπορεί να αντέξει καλύτερα τις παραμορφώσεις χωρίς να ρηγματωθεί ή να σπάσει.

Συνολική εκτίμηση:

- Τα μείγματα με 5% μετακαολίνη φαίνεται να είναι πιο ισχυρά και ευέλικτα, επομένως είναι πιο κατάλληλα για εφαρμογές ως στρώσεις.
- Τα μείγματα 10% μετακαολίνη είναι πιο ευαίσθητα σε θραύση και, αν και έχουν καλές παραμορφώσεις, ενδέχεται να μην είναι τόσο κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη αντοχή σε συγκρούσεις ή φορτία.

Κεφάλαιο 7– Πειράματα ζεστού δίσκου

Η θερμική αγωγιμότητα (λ) αποτελεί βασική παράμετρο για τον χαρακτηρισμό των θερμομονωτικών ιδιοτήτων υλικών. Η μέθοδος *Thermal Probe / Hot Disk* (TPS) είναι μια πειραματική τεχνική που επιτρέπει τη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας, θερμικής διάχυσης και ειδικής θερμότητας υλικών σε μορφή στερεών δειγμάτων ή κονιαμάτων. Η μέθοδος βασίζεται στη χρήση ενός λεπτού θερμικού δίσκου αισθητήρα που τροφοδοτείται με ηλεκτρική ισχύ, ενώ ταυτόχρονα μετράται η αύξηση της θερμοκρασίας του. Από την καμπύλη θερμοκρασιακής αύξησης υπολογίζονται οι θερμικές ιδιότητες του δείγματος. Στα ορθογώνια δοκίμια έγινε μέτρηση των θερμικών σταθερών, σε εργαστήριο του Πολυτεχνείου Κρήτης της Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, σε αναλυτή θερμικών σταθερών ζεστού δίσκου (*Hot Disk Thermal Constants Analyser*).

Για το πείραμα επιλέχθηκαν τα ορθογωνικά δοκίμια με τις αναλογίες που εμφάνισαν μεγαλύτερες μηχανικές αντοχές στο προηγούμενο πείραμα μονοαξονικής αντοχής στη θλίψη. Αυτό έγινε αποσκοπώντας να δημιουργηθεί ένα μείγμα ανθεκτικό στην εφαρμογή σε στρώματα προστασίας και ενεργειακής αναβάθμισης κτιρίων. Δύο ακόμη βασικοί λόγοι επιλογής περιορισμένου αριθμού δοκιμίων ήταν ο χρόνος που χρειάζεται το κάθε πείραμα να γίνει ξεχωριστά, και η δυσκολία καλής λείανσης των επιφανειών των δοκιμίων έτσι ώστε το πείραμα να γίνει σωστά, δηλαδή η διάχυση της θερμότητας να είναι ομοιόμορφη. Έντονες εσοχές και τραχύτητα των δοκιμίων θα προκαλούσε αλλοίωση των αποτελεσμάτων. Παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια με τη μικρότερη περιεκτικότητα υδραυλικής άσβεστου, κατά συνέπεια αυτά με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε περλίτη, είχαν εντονότερες τραχιές επιφάνειες όπως και ήταν αναμενόμενο. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την έλλειψη ποζολάνης καθιστούσε το δοκίμιο ευαίσθητο στη λείανση και επεξεργασία του, με αποτέλεσμα την αποκόλληση τμημάτων του.

Τα δοκίμια που επιλέχθηκαν για το πείραμα της ανάλυση θερμικών σταθερών ζεστού δίσκου ήταν τα ακόλουθα:

1. *HLP4M0*
2. *HLP4M5*
3. *HLP4M10*
4. *HLP5M5*
5. *HLP5M10*

7.1 Ρύθμιση παραμέτρων

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται οι βασικοί όροι με την περιγραφή τους που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το πείραμα.

Πίνακας 7.1. Επεξηγήσεις συμβόλων

Όρος/Σύμβολο	Περιγραφή	Μονάδα
λ	Θερμική αγωγιμότητα	$W/(m \cdot K)$
a	Θερμική διάχυση	m^2/s
ρ	Πυκνότητα δείγματος	kg/m^3
C_p	Ειδική θερμότητα	$J/(kg \cdot K)$
P	Ισχύς θέρμανσης στον αισθητήρα	W
ΔT	Θερμοκρασιακή διαφορά που προκαλείται	K
t	Χρόνος μέτρησης	s
r	Ακτίνα αισθητήρα / δίσκου	m
p	Βάθος ανίχνευσης θερμότητας	m
$\Delta T/\Delta t$	Ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας	K/s
σ_λ	Τυπική απόκλιση λ από επαναλαμβανόμενες μετρήσεις	$W/(m \cdot K)$

Θεωρητικό Πλαίσιο:

- Θερμική Διάχυση

Η θερμική διάχυση συνδέεται με τις θερμικές ιδιότητες του υλικού σύμφωνα με τον τύπο:

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (7.1)$$

όπου λ είναι η θερμική αγωγιμότητα, ρ η πυκνότητα και C_p η ειδική θερμότητα.

- Βάθος Ανίχνευσης Θερμότητας

Το βάθος ανίχνευσης (p) καθορίζει την περιοχή του δείγματος που επηρεάζεται από τη θερμική πηγή κατά τη διάρκεια της μέτρησης:

$$p = 2\sqrt{a \cdot t} \quad (7.2)$$

Το βάθος p πρέπει να είναι μικρότερο από το διαθέσιμο πάχος του δείγματος, ώστε να διασφαλίζεται η υπόθεση του «άπειρου μέσου» και να αποφεύγεται η επίδραση των ορίων του δείγματος.

- Ισχύς Θέρμανσης

Η θερμαντική ισχύς (P) επηρεάζει τη συνολική αύξηση θερμοκρασίας (ΔT) του αισθητήρα. Η αύξηση θερμοκρασίας είναι περίπου γραμμική ως προς την ισχύ:

$$\Delta T \propto P \quad (7.3)$$

- Μονωτικά υλικά απαιτούν πολύ μικρή ισχύ (της τάξης των mW).
- Αγωγοί θερμότητας μπορούν να δεχτούν μεγαλύτερη ισχύ χωρίς να προκαλέσουν βλάβη στον αισθητήρα.
- Το μέγεθος του αισθητήρα επηρεάζει επίσης την απαιτούμενη ισχύ: μικρός αισθητήρας → μικρότερη ισχύς.
- Ρύθμιση Παραμέτρων

Πριν από τη μέτρηση, πρέπει να καθοριστούν:

1. Ισχύς θέρμανσης p , ώστε η θερμοκρασιακή αύξηση ΔT να είναι στο επιθυμητό εύρος (~2–5 K).
2. Χρόνος μέτρησης t , ώστε το βάθος ανίχνευσης P να μην ξεπερνά το πάχος του δείγματος.
3. Επιβεβαίωση ξηρής κατάστασης δείγματος ή γνωστής υγρασίας για σωστή σύγκριση με τιμές αναφοράς.

Το υπολογιζόμενο βάθος ανίχνευσης πρέπει να είναι μικρότερο από το διαθέσιμο βάθος ανίχνευσης, αποφεύγοντας έτσι το κύμα θερμότητας να φτάσει στο όριο του δείγματος κατά τη διάρκεια του χρόνου μέτρησης, γιατί δεν θα ίσχυε η υπόθεση του άπειρου μέσου.

7.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Εκτός της θερμικής αγωγιμότητας, υπολογίστηκε και η ξηρή πυκνότητα των δοκιμών μετά την αφύγρανση:

$$\rho_{dry} = \frac{m_{dry}}{V} \quad (7.4)$$

- m_{dry} = μάζα δείγματος μετά από πλήρη ξήρανση (kg),
- V = γεωμετρικός όγκος δείγματος (m^3).

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται οι υπολογισμοί της θερμικής αγωγιμότητας και της ξηρής πυκνότητας των ομαδοποιημένων με βάση την αναλογία των υλικών των δοκιμών.

Πίνακας 7.2 Αποτελέσματα θερμικής αγωγιμότητας και πυκνότητας

A/A	Κωδικός Δείγματος	Θερμική Αγωγιμότητα (λ) [W/mK]	Πυκνότητα [kg/m ³]
1	HLP4M0	0,068	713
2	HLP4M5	0,052	566
3	HLP4M10	0,056	572
4	HLP5M5	0,050	526
5	HLP5M10	0,051	505

- Σχέση θερμικής αγωγιμότητας με πυκνότητα:
 - Παρατηρούμε ότι τα δείγματα με μεγαλύτερη πυκνότητα τείνουν να έχουν υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα. Για παράδειγμα:
 - Το HLP4M0 με την μεγαλύτερη πυκνότητα (713 kg/m³) έχει και τη μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα (0.068 W/mK).
 - Αντίθετα, το HLP5M10 με τη χαμηλότερη πυκνότητα (505 kg/m³) έχει και τη χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα (0.051 W/mK).
 - Αυτό είναι σύμφωνο με τον γενικό κανόνα, σύμφωνα με τον οποίο τα πιο πυκνά υλικά τείνουν να έχουν καλύτερη αγωγιμότητα θερμότητας, καθώς οι πιο πυκνές δομές συνήθως διευκολύνουν τη μετάδοση θερμότητας.
- Σύγκριση μεταξύ μειγμάτων:
 - Τα δείγματα HLP4M (με ποσοστά μετακαολίνη 5% και 10%) εμφανίζουν χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα σε σύγκριση με τα HLP5M. Αυτό μπορεί να υποδηλώνει ότι το HLP5M είναι πιο αποτελεσματικό ως θερμικό μονωτικό υλικό, καθώς έχει χαμηλότερη αγωγιμότητα.
- Επιπτώσεις της θερμικής αγωγιμότητας:
 - Η θερμική αγωγιμότητα είναι σημαντική για εφαρμογές που απαιτούν καλές ιδιότητες θερμικής μόνωσης (π.χ. σε κατασκευαστικά υλικά για μόνωση, δάπεδα, τοίχους).
 - Τα HLP4M5 και HLP5M5 με χαμηλότερη αγωγιμότητα και πυκνότητα θα ήταν πιο κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν μόνωση, καθώς αυτά τα υλικά διατηρούν τη θερμότητα πιο αποτελεσματικά λόγω της χαμηλότερης αγωγιμότητας.

Τα δείγματα HLP4M0 και HLP4M10 έχουν υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα, γεγονός που τα καθιστά λιγότερο κατάλληλα για εφαρμογές όπου απαιτείται θερμική μόνωση. Τα HLP5M5 και HLP5M10 έχουν χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα και πυκνότητα, καθιστώντας τα πιο αποτελεσματικά για εφαρμογές μόνωσης.

7.3 Επαλήθευση με βάση το πρότυπο BS-EN 1745:2012

Το πρότυπο BS-EN 1745:2012 (Masonry and masonry products — Methods for determining thermal properties) αποτελεί ένα σημαντικό ρυθμιστικό πλαίσιο τόσο στο Ηνωμένο Βασίλειο όσο και στην ευρύτερη Ευρωπαϊκή Ένωση, το οποίο έχει ως αντικείμενο τον καθορισμό των θερμικών ιδιοτήτων δομικών στοιχείων τοιχοποιίας. Ειδικότερα, η εν λόγω προδιαγραφή καθορίζει τις μεθοδολογίες για τον προσδιορισμό παραμέτρων όπως η ξηρή θερμική αγωγιμότητα (συμβολίζεται ως $\lambda_{10,dry}$) και η θερμική αντίσταση των δομικών μονάδων (τούβλα, δομικά μπλοκ) και των κονιαμάτων. Αυτές οι παράμετροι είναι κρίσιμες για τον υπολογισμό της συνολικής θερμικής απόδοσης των κτιριακών κατασκευών. Η έκδοση του 2012, η οποία αποτελεί την εφαρμογή του ευρωπαϊκού προτύπου EN 1745:2012, διαδέχθηκε την προηγούμενη έκδοση BS EN 1745:2002. Η έγκρισή του από την CEN (Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης) έλαβε χώρα στις 9 Μαρτίου 2012, με την επίσημη δημοσίευση να ακολουθεί τον Απρίλιο του ίδιου έτους. Η Βρετανική Τυποποίηση (British Standard) δημοσιεύτηκε λίγο αργότερα, στις 30 Απριλίου 2012.

Παρά την σημαντική συνεισφορά του, το πρότυπο BS-EN 1745:2012 έχει πλέον αντικατασταθεί από το BS EN 1745:2020, το οποίο αποτελεί την τρέχουσα και επίσημη προδιαγραφή. Η νεότερη αυτή έκδοση τέθηκε σε ισχύ στις 31 Ιουλίου 2020, ενσωματώνοντας τις πιο πρόσφατες τεχνικές γνώσεις και βελτιώσεις στον τομέα. Η τυποποίηση, όπως αυτή αποτυπώνεται στους πίνακες του προτύπου BS EN 1745, περιλαμβάνει μια πληθώρα εξειδικευμένων όρων που αφορούν τη θερμική συμπεριφορά των υλικών τοιχοποιίας, επιτρέποντας την ομοιόμορφη και αξιόπιστη αξιολόγησή τους σε διεθνές επίπεδο. Το πρότυπο BS-EN 1745:2012 παρέχει τυπικές τιμές θερμικών ιδιοτήτων για διάφορες κατηγορίες κονιαμάτων, οι οποίες προορίζονται για χρήση στον ενεργειακό σχεδιασμό κτιρίων. Αυτές οι τιμές δεν προέρχονται από μετρήσεις συγκεκριμένων μειγμάτων ή οδηγιών, αλλά αποτελούν τιμές αναφοράς που αντιπροσωπεύουν τις μέσες ιδιότητες των υλικών.

Τυποποίηση κονιαμάτων και παράμετροι:

Το πρότυπο κατηγοριοποιεί τα κονιάματα σε τρεις κύριες ομάδες:

- Γενικής χρήσης κονιάματα (General purpose mortars): Πρόκειται για τα συνήθη κονιάματα που χρησιμοποιούνται στην τοιχοποιία, τα οποία συνήθως αποτελούνται από ασβέστη, τσιμέντο και άμμο.
- Ελαφρά κονιάματα (Lightweight mortars): Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα κονιάματα στα οποία χρησιμοποιούνται ελαφροβαρή αδρανή, όπως ο περλίτης ή ο βερμικουλίτης, με σκοπό τη βελτίωση των θερμομονωτικών τους ιδιοτήτων.
- Ειδικά κονιάματα (Special mortars): Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει εξειδικευμένους τύπους, όπως τα κονιάματα λεπτού στρώματος (thin layer mortars).

Το Παράρτημα Α του προτύπου περιέχει πίνακες που καθορίζουν τις τυπικές τιμές για αυτές τις κατηγορίες. Συγκεκριμένα, ο Πίνακας A12, σελ. 34 (BS-EN 1745:2012), είναι αυτός που αναφέρεται στα ελαφρά κονιάματα, συμπεριλαμβανομένων αυτών που περιέχουν περλίτη. Οι βασικές παράμετροι που αναφέρονται στους πίνακες είναι:

- Ξηρή πυκνότητα (ρ): Η μάζα του υλικού ανά μονάδα όγκου, σε ξηρή κατάσταση.

- Θερμική αγωγιμότητα (λ): Ο ρυθμός με τον οποίο μεταφέρεται η θερμότητα μέσω του υλικού. Χαμηλή τιμή λ υποδηλώνει καλή θερμομόνωση.
- Συντελεστής αντίστασης σε υδρατμούς (μ): Δείκτης που εκφράζει την αντίσταση του υλικού στη διάχυση των υδρατμών.

Το πρότυπο BS-EN 1745:2012 δεν παρέχει θερμικές παραμέτρους για κάθε δυνατή συνταγή κονιάματος, καθώς οι συνδυασμοί υλικών και αναλογιών είναι πρακτικά απεριόριστοι. Αντιθέτως, υιοθετεί μια ταξινομική προσέγγιση, συσχετίζοντας τις θερμικές ιδιότητες με τη ξηρή πυκνότητα (ρ) του υλικού. Αυτή η μεθοδολογία επιτρέπει την κατάταξη ενός συγκεκριμένου κονιάματος σε μια ευρύτερη κατηγορία.

Πίνακας 7.3. Πρότυπο BS-EN 1745:2012

Density of the material (net dry density)	$\lambda_{10, dry, mat}$ [W/(m·K)]		Water vapour diffusion coefficient	Specific heat capacity c_p
[kg/m ³]	$P = 50 \% ^a$	$P = 90 \%$	μ	[J/(kg·K)]
200	0.074	0.081	5/20	1000
300	0.086	0.094	5/20	1000
400	0.10	0.11	5/20	1000
500	0.12	0.13	5/20	1000
600	0.14	0.15	5/20	1000
700	0.16	0.17	5/20	1000
800	0.18	0.20	5/20	1000
900	0.21	0.23	5/20	1000
1000	0.25	0.27	5/20	1000
1200	0.33	0.36	5/20	1000
1400	0.45	0.49	5/20	1000
1600	0.61	0.66	15/35	1000
1800	0.82	0.89	15/35	1000
2000	1.11	1.21	15/35	1000
$f_{\psi} = 4 \text{ (m}^3/\text{m}^3\text{)}$ ^a Calculations in support of the Energy Performance of Buildings Directive are related to buildings and not to individual products. U -values used in such calculations are based on the mean thermal resistance of masonry elements. Therefore, the recommended material λ value is the 50 % fractile.				

Συγκριτική αξιολόγηση ελαφρών κονιαμάτων με βάση το πρότυπο BS-EN 1745:2012:

Για να αξιολογηθούν οι ιδιότητες ενός κονιάματος που περιέχει υδραυλική άσβεστο και περλίτη, η διαδικασία είναι η εξής:

1. Προσδιορισμός της ξηρής πυκνότητας (ρ): Αρχικά, είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί η ξηρή πυκνότητα του συγκεκριμένου μείγματος κονιάματος.
2. Κατάταξη βάσει πυκνότητας: Με βάση την τιμή της πυκνότητας, το κονίαμα κατατάσσεται στην κατάλληλη κατηγορία του Πίνακα A12 του προτύπου. Για παράδειγμα, αν η πυκνότητα του κονιάματος κυμαίνεται μεταξύ 600 kg/m^3 και 800 kg/m^3 , τότε θα πρέπει να συγκριθεί με το αντίστοιχο εύρος τιμών του πίνακα.
3. Αντιπαραβολή με τις τυπικές τιμές: Μετά την κατάταξη, η πειραματικά μετρούμενη ή υπολογιζόμενη τιμή της ξηρής θερμικής αγωγιμότητας ($\lambda_{10, \text{dry}}$) του κονιάματος μπορεί να συγκριθεί με την τιμή αναφοράς που παρέχεται από το πρότυπο για την ίδια κατηγορία πυκνότητας. Όπως φαίνεται και στον πίνακα 5.23. Αποτελέσματα θερμικής αγωγιμότητας και της πυκνότητας.

Οι τιμές της ξηρής πυκνότητας μετά την αφύγρανση κυμαίνονται στο εύρος $500\text{-}700 \text{ kg/m}^3$. Ο παρακάτω πίνακας συγκρίνει τις μετρούμενες τιμές των δοκιμών με αυτές του προτύπου και συμπεριλαμβάνει και την τυπική απόκλιση.

Πίνακας 7.4. Πίνακας σύγκρισης.

Δείγμα	$\rho_{\text{dry}} (\text{kg/m}^3)$	$\lambda \text{ μετρήσεων} (\text{W/m}\cdot\text{K})$	$\lambda \text{ A.12} (\text{W/m}\cdot\text{K})$	% Απόκλιση
HLP4M0	713	0,068	0,160	-57,5 %
HLP4M5	566	0,052	0,140	-62,9 %
HLP4M10	572	0,056	0,140	-60,0 %
HLP5M5	526	0,050	0,120	-58,3 %
HLP5M10	505	0,051	0,120	-57,5 %

- Μέση τιμή λ (measured): $0,0554 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
- Τυπική απόκλιση λ : $\pm 0,0074 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
- Μέση % απόκλιση από A.12: $-59,2 \%$
- Τυπική απόκλιση %: $\pm 2,27 \%$

Το μετρούμενο κονίαμα εμφανίζει θερμική αγωγιμότητα $0,055 \pm 0,007 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, περίπου $59 \pm 2 \%$ χαμηλότερη από την τυπική τιμή του προτύπου BS-EN 1745:2012 (Annex A12) για αντίστοιχες πυκνότητες».

Τυπική απόκλιση:

Αρχικά, υπολογίσθηκε ο μέσος όρος:

$$\lambda = 0.0554 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

μετά υπολογίζονται οι αποκλίσεις από τον μέσο όρο.

Παράδειγμα:

$$(0.068-0.0554)^2=0.00016$$

Υπολογίζετε το άθροισμα όλων των τετραγώνων και το διαιρούμε με $n-1=4$ (γιατί έχουμε δείγμα, όχι πληθυσμό).

από την τετραγωνική ρίζα → τυπική απόκλιση

$$s^2 = \frac{\sum(\lambda_i - \bar{\lambda})^2}{n-1} \quad (7.5)$$

$$s = \pm 0,0074 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

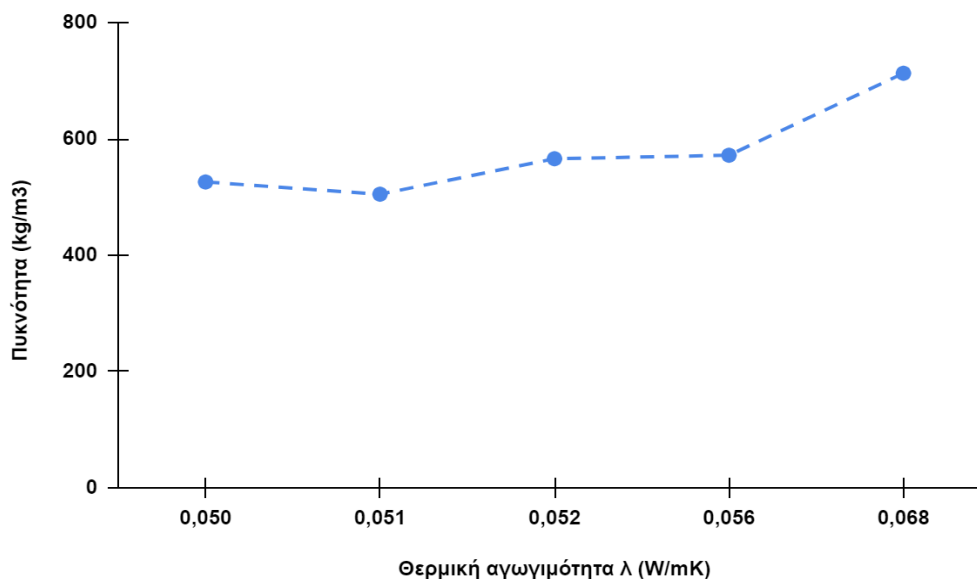
Μέση % Απόκλιση:

Υπολογίζετε για κάθε δείγμα η % απόκλιση από τον πίνακα Α.12 και ο μέσος όρος, έπειτα η τυπική απόκλιση με τον ίδιο τρόπο:

$$sd = 2.27\%$$

- Το αποτέλεσμα $\pm 0.007 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ σημαίνει ότι τα περισσότερα δείγματά βρίσκονται μέσα σε ένα εύρος ± 0.007 γύρω από τον μέσο όρο 0.055.
- Το αποτέλεσμα $-59 \pm 2 \%$ σημαίνει ότι η μέση μείωση σε σχέση με το Α.12 είναι περίπου 59%, με τυπική διασπορά $\pm 2\%$.

Επίσης έγινε η απεικόνιση των πειραματικών αποτελεσμάτων της *θερμικής αγωγιμότητας και της πυκνότητας*.



Διάγραμμα 7.1. Γραφική αναπαράσταση των πειραματικών τιμών της πυκνότητας ως προς τη θερμική αγωγιμότητα

Κεφάλαιο 8 – Συμπεράσματα & Προοπτικές

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρασκευάσθηκαν και εξετάσθηκαν οικολογικά κονιάματα, χρησιμοποιώντας ως βασικά συστατικά την υδραυλική άσβεστος ως συνδετικό υλικό, τον περλίτη ως ελαφρύ και πορώδες αδρανές και τον μετακαολίνη ως ποζολανικό πρόσθετο. Ο βασικός στόχος της εν λόγω σύνθεσης ήταν η βελτίωση των θερμομονωτικών ιδιοτήτων του μείγματος σε συνδυασμό με την επίτευξη επαρκών μηχανικών χαρακτηριστικών, έτσι ώστε να παραχθεί ένα κατάλληλο κονίαμα που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά στην πράξη σε έργα αποκατάστασης και ενεργειακής αναβάθμισης κτιρίων.

Η πειραματική διερεύνηση της θερμικής αγωγιμότητας του παρασκευασθέντος κονιάματος υδραυλικής άσβεστος με περλίτη, σε εύρος ξηρής πυκνότητας από 500 έως 700 kg/m³, έδειξε ότι οι μετρούμενες τιμές κυμαίνονται από 0.050 έως 0.068 W/(m·K), με μέση τιμή 0.055 W/(m·K). Αντιπαραβάλλοντας τα αποτελέσματα αυτά με τις τιμές αναφοράς που παρέχονται στον Πίνακα A12 του προτύπου EN 1745:2012 για αντίστοιχες πυκνότητες (500–700 kg/m³), διαπιστώνεται ότι οι τυποποιημένες τιμές κυμαίνονται στην περιοχή 0.12–0.16 W/(m·K). Η σύγκριση αυτή αποκαλύπτει μια σημαντική και συστηματική απόκλιση, καθώς οι πειραματικά μετρούμενες τιμές είναι κατά 55–65% χαμηλότερες από τις τυπικές τιμές του προτύπου.

Η σημαντική μείωση της θερμικής αγωγιμότητας αποδίδεται στη μορφολογία της μικροδομής του συγκεκριμένου κονιάματος. Η ενσωμάτωση του περλίτη ως ελαφροβαρούς, πορώδους αδρανούς έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της συνολικής πορώδους δομής του υλικού και, κατ' επέκταση, την αύξηση του εγκλωβισμένου αέρα. Δεδομένου ότι ο αέρας διαθέτει ιδιαίτερα χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, η παρουσία του βελτιώνει ουσιαστικά τις θερμομονωτικές ιδιότητες του κονιάματος. Τα ευρήματα αυτά καταδεικνύουν ότι το συγκεκριμένο μίγμα κονιάματος παρουσιάζει βελτιωμένες θερμομονωτικές επιδόσεις σε σύγκριση με τις γενικές τιμές που προβλέπονται από το πρότυπο EN 1745 για ελαφροβαρή κονιάματα. Ωστόσο, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι οι τιμές του προτύπου είναι συντηρητικού χαρακτήρα και προορίζονται για υπολογισμούς γενικής εφαρμογής.

Για την πλήρη αξιολόγηση και την επιβεβαίωση των παρόντων αποτελεσμάτων, απαιτείται περαιτέρω έρευνα με τη χρήση μεγαλύτερου αριθμού δειγμάτων, καθώς και με τη διερεύνηση της συμπεριφοράς του υλικού σε διαφορετικές συνθήκες υγρασίας. Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν, διαπιστώνεται ότι τα μείγματα με υψηλότερη περιεκτικότητα σε διογκωμένο περλίτη παρουσιάζουν σαφώς καλύτερη θερμομονωτική συμπεριφορά σε σχέση με εκείνα που περιέχουν μικρότερο ποσοστό. Παρότι η μείωση του περλίτη οδηγεί σε ελαφρά βελτίωση της θλιπτικής αντοχής, το όφελος αυτό δεν είναι αρκετά σημαντικό ώστε να αντισταθμίσει την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας. Τέλος, όπως ήταν αναμενόμενο, η προσθήκη μετακαολίνη λειτούργησε ποζολανικά, ενισχύοντας περαιτέρω την αντοχή του υλικού.

Η παρούσα πειραματική διαδικασία παρέχει μια πρώτη, αλλά σφαιρική εικόνα της συμπεριφοράς των υλικών αυτών ως κονιάματα· πάνω σε αυτήν τη βάση μπορούν να σχεδιαστούν περαιτέρω έρευνες με ενσωμάτωση επιπλέον οικολογικών συστατικών, με στόχο την ακόμη πιο πειστική προσέγγιση των μηχανικών και θερμομονωτικών ιδιοτήτων των συμβατικών κονιαμάτων και δομικών υλικών. Τα βασικά ευρήματα και πιθανές προεκτάσεις της μελέτης συνοψίζονται ως εξής:

1. Θερμομόνωση έναντι μηχανικής αντοχής
 - Η αυξημένη αναλογία διογκωμένου περλίτη μειώνει αισθητά τη θερμική αγωγιμότητα, προσδίδοντας στα μείγματα σημαντικά καλύτερη θερμομονωτική ικανότητα.
 - Αντίστροφα, η μείωση του περλίτη οδηγεί σε μικρή αύξηση της θλιπτικής αντοχής, όμως το όφελος αυτό δεν αντισταθμίζει τη χειροτέρευση των θερμικών ιδιοτήτων.
2. Ποζολανική δράση μετακαολίνη
 - Ο μετακαολίνης δρα ως ποζολανικό υλικό, ευνοώντας δευτερογενείς αντιδράσεις που «γεμίζουν» τους πόρους και, συνεπώς, βελτιώνουν τη συνολική αντοχή χωρίς να επηρεάζουν αρνητικά τη μάζα του κονιάματος.
3. Εμβάθυνση πειραματικής διαδικασίας
 - Η πειραματική διαδικασία παρέχει ένα πρώτο, αξιόπιστο “χάρτη” συμπεριφοράς για συνθέσεις κονιαμάτων με περλίτη και μετακαολίνη. Παρά τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα, η κλίμακα του πειράματος (εργαστηριακά δοκίμια) δεν αποτυπώνει πλήρως τις σύνθετες συνθήκες ενός δομικού στοιχείου σε πραγματικές συνθήκες εφαρμογής και αντοχής κάτω από την επίδραση πολυπαραμετρικών περιβαλλοντικών παραγόντων (π.χ., υγρασία, γήρανση, κύκλοι ψύξης-θέρμανσης).
4. Προτεινόμενες μελλοντικές προεκτάσεις
 - Εμπλουτισμός με άλλα οικολογικά υλικά: προσθήκη βιοϋλικών (ίνες λιναριού, κάνναβης) ή βιο-πολυμερών ώστε να συνδυαστεί περαιτέρω θερμική απόδοση με ελκτική αντοχή και ανθεκτικότητα σε ρηγματώσεις.
 - Βέλτιστη κοκκομετρία και υδατοστεγανότητα: διερεύνηση συνδυασμών περλίτη διαφορετικού μεγέθους κόκκου ή μερικής αντικατάστασης με ανακυκλωμένο γυαλί αφρού για καλύτερη συσκευασία των κόκκων και χαμηλότερη απορρόφηση υγρασίας.
 - Μακροχρόνιες δοκιμές: επιταχυνόμενη γήρανση και δοκιμές κύκλων ξήρανσης-διαβροχής για εκτίμηση διάρκειας ζωής και διατήρησης ιδιοτήτων.
 - Κλιμάκωση παραγωγής: αξιολόγηση βιομηχανικής σκοπιμότητας (κόστος πρώτων υλών, παράμετροι ανάμιξης, ταχύτητα ωρίμανσης) ώστε να εξελιχθεί η πειραματική εργαστηριακή διαδικασία σε εμπορικά αξιοποιήσιμο προϊόν.

Βιβλιογραφία

- Ashby, F. (2019). *Materials Selection in Mechanical Design*. U.K.: Butterworth-Heinemann.
- Ashby, F. (2023). *Materials and Sustainable Development*. U.K.: Butterworth-Heinemann.
- Barbin, E., Payne, J., & Roussel, N. (2018). Environmentally-friendly mortars: a way to improve bond between mortar and brick. *Materials and Structures* 36(264):702-708.
- Bisegna, F., et al (2016). Influence of Insulating Materials on Green Building Rating System Results. *Energies* 2016, 9, 712
- Boulanger, P., et al. (2022). Energy Savings through Insulating Mortars in Building Renovation. *Building and Environment*, 207, 108329.
- Briones-Llorente, R., Barbosa, R., Almeida, M., Montero García, A., & Rodríguez, S. (2020). Ecological Design of New Efficient Energy-Performance Construction Materials with Rigid Polyurethane Foam Waste. *Polymers*. 2020; 12(5):1048.
- Bugini, R., & Salvatori, A. (1991). Investigation of the characteristics and properties of «Cocciopesto» from the ancient Roman period. *Conservation of Stone and Other Materials 1 (1991)* 386-393.
- Caplan, B. (2016). *Buildings are for People: Human Ecological design*. U.K.: Green Frigate Books.
- DeKay, M., & Brown, G. (2014). *Sun, Wind, and Light. Architectural Design Strategies*. USA: John Wiley & Sons.
- DeKay, M., & Brown, Z. (2017). *Sun, Wind, and Light. Architectural Design Strategies*. USA: Wiley.
- Dettmering, T. (2019). Modernised Traditional Lime Plasters for Modern Historic Living of Built Heritage: Case Studies from Germany and Reflection for China. *Built Heritage* 3, 26–36 (2019).

- Edward, A., & Iano, J. (2013). *Fundamentals of Building Construction. Materials and Methods*. USA: John Wiley & Sons.
- Faraj, A., & Radhi, H. (2015). Potential of phase change materials in cooling load reduction in buildings: Critical review and research agenda. *Energy and Buildings*, 92, 183-198.
- Farinha, C., Brito, J., & Veiga, M. (2021). *Eco-efficient Rendering Mortars. Use of Recycled Materials*. U.K.: Elsevier Ltd
- Fernandes, S., Silva, P., de Brito, J., & Rocha, F. (2023). Statistical Design of Eco-Friendly Mortar Mixtures Containing Scheelite Tailings and Quartzite Sand: Evaluation of Resistance to Alkali-Aggregate Reaction. *Materials*, 16(15), 11544. (<https://www.mdpi.com/2571-9408/6/7/261>)
- Gherardi, F., & Maravelaki, P. (2022). *Conserving Stone Heritage. Traditional and Innovative Materials and Techniques*. Switzerland: Springer Nature.
- Glendinning, M. (2021). *Mass Housing. Modern Architecture and State Power, a Global History*. UK: Bloomsbury Visual Arts
- Hall, M. (2010). *Materials for Energy Efficiency and Thermal Comfort in Buildings*. U.K.: Woodhead Publishing
- Hunt, G. (2006). *Foundation rituals and the culture of building in ancient Greece*. Chapel Hill.
- IEA, (2021). IEA (2021), World Energy Outlook 2021, IEA, Paris
- IEA, (2021). *World Energy Outlook 2021*. International Energy Agency Institute of Physics Publishing. (https://www.researchgate.net/publication/272335388_Life_cycle_analysis_of_mortars_and_its_environmental_impact)
- Johnson, R., et al. (2018). Evaluation of polymer-modified mortars for energy efficiency in commercial buildings. *Journal of Building Performance*, 9(2), 67-74.

- Juhart, J., Gheorghe, D., Baldermann, C., & Maydl, P. (2014). Durable eco-crete in Austria: Materials and mix design methods. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 65, No. 1, p. 012012)*.
- Kibert, J. (2016). *Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery*. USA: John Wiley & Sons.
- Kubba, S. (2017). *Handbook of Green Building Design and Construction*. USA: Elsevier Inc.
- Lechner, N. (2014). *Heating, Cooling, Lighting. Sustainable Design Methods for Architects*. USA: Wiley.
- Maravelaki-Kalaitzakia, P., Bakolas, A., Moropoulou, A. (2003). Physico-chemical study of Cretan ancient mortars. *Cement and Concrete Research* 33 (2003) 651-661.
- Moropoulou, A., Bakolas, A., & Anagnostopoulou, S. (2005). Composite materials in ancient structures. *Cement and Concrete Composites* Volume 27, Issue 2, February 2005, Pages 295-300
- Munoz-Ruiperez, C., Rodríguez, A., Gutierrez-Gonzalez, S., & Calderon, V. (2016). Lightweight masonry mortars made with expanded clay and recycled aggregates. *Construction and Building Materials* Volume 118, 15 August 2016, Pages 139-145
- Ochsendorf, J., & Hajime, K. (2018). The revolution in structural engineering. *Nature Reviews Materials* 3, no. 6 (2018): 407-416.
- Olgyay, V., Lyndon, D., Reynolds, J., Yeang, K. (2015). *Design with Climate-Bioclimate Approach to Architectural Regionalism*. USA: Princeton University Press.
- Orlandos, A. (1958). The Building Materials of Ancient Greeks, According to Writers, Inscriptions and Monuments: Part A, Vol. 2. *Athens: Ancient Greek Architecture*.
- Pacht V. (2011). Study of the technological evolution of mortars. PhD Thesis submitted in the Dept. of Civil Engineering, *Aristotle University of Thessaloniki*.
- Pacht, V., Stefanidou, M., Konopisi, S., & Papayianni, I. (2014). Technological Evolution of Historic Structural Mortars. *Journal of Civil Engineering and Architecture* Volume 8, No. 7 (Serial No. 80), pp. 846-854

- Papayianni I., Pachta V., Stefanidou M. (2012). Analysis of mortars from the floor substratum of the Aiges Palace and proposals of restoration materials. *3rd Hellenic Conference of Restoration, ETEPAM, 1-3 November 2012*
- Papayianni, I. (2006). The longevity of old mortars. *Applied Physics A. Volume 83*, pages 685–688, (2006)
- Papayianni, I. (2022). Repair Mortars/Grouts for Reinstatement of Stone Units in Historic Structures. In: *Gherardi, F., Maravelaki, N. (Eds) Conserving Stone Heritage. Cultural Heritage Science. Springer, Cham.*
- Papayianni, I., & Stefanidou, M. (2003). Mortars for intervention in monuments and historical buildings. *Transactions on the Built Environment vol 66, 2003 WIT Press.*
- Papayianni, I., & Stefanidou, M. (2007) Durability aspects of Ancient Mortars of the archeological site of Olynthos. *Journal of Cultural Heritage Vol. 8, p.193-196.*
- Papayianni, I., Stefanidou, M., & Pachta, V. (2013). Analysis and characterization of Hellenistic plasters. *HMC 2013, 3rd Historic Mortars Conference At: Glasgow, Scotland.*
- Rohit, P., et al. (2019). Thermal performance of building materials and assemblies. *Building Materials Journal, 34(3), 213-229.*
- Sharma, A., et al. (2016). Energy savings through reflective coatings in residential buildings: A case study. *Energy and Buildings, 132, 73-81.*
- Webb, P. (2012). *The History of Plaster in Architecture: The Ancient and Classical Periods. The art of plastering is as old as civilization.* (Πρόσβαση από
- Wilson, B. (2020). *Metropolis - The Story of Humankind's Greatest Invention.* U.K.: The Random House Group Limited
- Woolley, T. (2022). *Natural Building Techniques. A Guide to Ecological Methods and Materials.* U.K. The Crowood Press.
- Παπαμανώλης, Ν. (2015). *Δομική Φυσική και Αρχές Περιβαλλοντικού Σχεδιασμού Κτιρίων.* Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών ακαδημαϊκών βιβλιοθηκών

- ΤΕΕ, (2011). *Θερμομονωτική επάρκεια κτηριακού κελύφους*. Αθήνα: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας.

ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

- Το Petawatt (PW) είναι μια παράγωγη μετρική μονάδα μέτρησης ισχύος. Είναι ίσο με ένα δισεκατομμύριο εκατομμύρια Watt (10^{15} W). (Ανάκτηση 15.2.2024 από <https://www.aqua-calc.com/what-is/power/petawatt>).
- Στην πιο βασική του μορφή, το τσιμέντο Portland δημιουργείται μέσω μιας διαδικασίας που περιλαμβάνει θέρμανση ασβέστη, σίδηρο, πυρίτιο και αλουμίνα σε ένα συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασίας (2.500 έως 2.800 βαθμούς Φαρενάιτ - 1380-1420 °C) σε έναν περιστρεφόμενο κλίβανο, ακολουθούμενη από την άλεση του κλίνκερ που προκύπτει σε λεπτή σκόνη. Κατά τη διαδικασία θέρμανσης του κλιβάνου, οι πρώτες ύλες υφίστανται χημικούς μετασχηματισμούς, καθορίζοντας έτσι τη χημική σύσταση του τσιμέντου. Αυτή η σύνθεση επηρεάζεται από τις αναλογίες και τις ιδιότητες των αρχικών πηγών ασβέστη, σιδήρου, πυριτίου και αλουμίνας, καθώς και από τη θερμοκρασία. Επιπλέον, οι διαφορές στις πηγές πρώτων υλών και οι πρόσθετες διεργασίες, όπως η άλεση και η πιθανή ανάμειξη με ουσίες όπως γύψος, ασβεστόλιθος ή συμπληρωματικά υλικά τσιμέντου, συμβάλλουν στα διακριτά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος τσιμέντου. (Ανάκτηση 16.2.2024 από <https://www.cement.org/cement-concrete/concrete-materials/cement-types>)
- International Energy Agency (IEA). Buildings - Energy System. (Ανάκτηση 23.2.2024 από <https://www.iea.org/energy-system/buildings>).
- <https://www.worldhistory.org/image/10775/limestone-sumerian-plaque-from-khafajah/> Limestone Sumerian Plaque from Khafajah. (Ανάκτηση 25.4.2024).
- Η Κάμειρος ή Κάμιρος είναι μαζί με την Λίνδο και την Ιαλυσό, οι τρεις αρχαίες πόλεις της Ρόδου, που το 408 π.Χ. ίδρυσαν όλες μαζί την πόλη της Ρόδου που είναι και η πρωτεύουσα του νησιού. (Ανάκτηση 2.5.2024 από <https://www.rodosapex.com/el/αρχαιολογικοί-χώροι-ρόδος/αρχαία-κάμειρος>).
- Στον 5ο ανατολικό τύμβο της Πέλλας βρέθηκε ο Μακεδονικός Τάφος Γ του νομού Πέλλας. Είναι ένας δίχωρος θολωτός μακεδονικός τάφος με ιωνική πρόσοψη που βλέπει ανατολικά και σχηματίζεται από τέσσερις ψηλούς κίονες. Έχει πλάτος 5,80 μ. και μήκος 7,70 μ. Υπολείμματα χρωματιστών κονιαμάτων σώζονταν στους τοίχους, είχαν παραστάσεις κιβωτίου και καθρέφτη. Σώζεται η πέτρινη βάση του νεκρικού κρεβατιού. Χρονολογείται γύρω στο 300 π.Χ. με βάση τα ελάχιστα ευρήματα που σώθηκαν καθώς ο τάφος είχε παραβιαστεί στην αρχαιότητα. (Ανάκτηση 5.5.2024 από <https://golden-greece.gr/en/archaeological/macedonia/pela/makedonikos-tafos-g>)

