



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

*«Χαρακτηρισμός των δομικών υλικών της Μονής Καισαριανής.  
Πρόταση για συμβατά υλικά και επεμβάσεις συντήρησης»*



Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Α. Μοροπούλου, καθηγήτρια Χημικών  
Μηχανικών ΕΜΠ

ΛΟΥΙΖΑ ΣΙΟΥΤΑ  
Πολιτικών Δομικών Έργων  
Φεβρουάριος 2016

### **Επιτροπή Επίβλεψης και Υποστήριξης**

Καθ. Α. Μοροπούλου, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ (επιβλέπουσα)

Επικ. Καθ. Α. Μπακόλας, Σχ ΧΜ ΕΜΠ

Αν. Καθ. Π. Αστερής, Σχ. Α.Σ.Π.Α.Ι.Τ.Ε. Π.Μ Τ.Ε

Π. Μούνδουλας, Δρ. ΕΔΙΠ Σχ. ΧΜ ΕΜΠ

Μ. Αποστολοπούλου, MSc ΧΜ, ΥΔ Σχ. ΧΜ ΕΜΠ

Ε. Αγγελακοπούλου, Δρ. ΧΜ, ΥΣΜΑ

### **Επιτροπή Εξέτασης**

Καθ. Α. Μοροπούλου, Σχ. Χ.Μ Ε.Μ.Π (επιβλέπουσα)

Καθ. Κ. Σπυράκος, Σχ. Π.Μ Ε.Μ.Π

Αν. Καθ. Π. Αστερής, Σχ. Α.Σ.Π.Α.Ι.Τ.Ε. Π.Μ Τ.Ε

Επικ. Καθ. Χ. Μουζάκης Σχ. Π.Μ Ε.Μ.Π

Επικ. Καθ. Α. Μπακόλας, Σχ. Χ.Μ Ε.Μ.Π

## Πρόλογος

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Προστασία Μνημείων», με κατεύθυνση «Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης», της σχολής Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π. Σκοπός της εργασίας είναι ο χαρακτηρισμός των δομικών υλικών της Μονής Καισαριανής καθώς και πρόταση για συμβατά υλικά και επεμβάσεις συντήρησης. Η υλοποίηση της εργασίας έγινε με αφορμή την δειγματοληψία ιστορικών κονιαμάτων από το καθολικό της Μονής Καισαριανής που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Προγράμματος SEISMO ΘΑΛΗΣ - ΕΜΠ Αντισεισμική Προστασία Μνημείων και Ιστορικών Κατασκευών. Η μελέτη και ο χαρακτηρισμός των ιστορικών κονιαμάτων πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Την Καθηγήτρια Ε.Μ.Π και Διευθύντρια Σπουδών της Β' Κατεύθυνσης του Δ.Π.Μ.Σ. κα. Α. Μοροπούλου για την ανάθεση και συμβολή της στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας καθώς και την ηθική υποστήριξή της στη διεξαγωγή των σπουδών μου.

Τον Δρ. Π. Μούνδουλα ΕΔΙΠ, την Δρ. Ε. Αγγελακοπούλου ΥΣΜΑ και τον Αν. Καθηγητή Π. Αστερή για την καθοδήγηση και την επιστημονική υποστήριξη σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον Επικ. Καθηγητή Α. Μπακόλα και την Υπ. Διδάκτορα Μαίρη Αποστολοπούλου για την καθοδήγηση και επιστημονική υποστήριξη, τις ουσιαστικές συμβουλές και κυρίως τον χρόνο που αφιέρωσαν καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη και ο χαρακτηρισμός των δομικών υλικών της Μονής Καισαριανής και πρόταση για συμβατά υλικά και επεμβάσεις.

Το Καθολικό της Μονής Καισαριανής σώζεται έως σήμερα σε άριστη κατάσταση. Είναι ένα ξεχωριστό, για την καλλιτεχνική του ποιότητα, μεσοβυζαντινό αθηναϊκό μνημείο. Αρχικά, ανοικοδομήθηκε σύμφωνα με τον συνήθη τύπο του σύνθετου τετρακίονιου σταυροειδούς εγγεγραμμένου τρουλαίου ναού, χωρίς νάρθηκα, στα τέλη του 11ου με αρχές του 12ου αιώνα.

Τα δείγματα που προήλθαν από το Καθολικό ήταν κατά κύριο λόγο ιστορικά κονιάματα. Τα κονιάματα ελήφθησαν εσωτερικά και εξωτερικά του κυρίως Ναού, από διάφορες όψεις και βάθη της τοιχοποιίας. Παράλληλα, ελήφθησαν και δύο δείγματα κεραμικών πλίνθων και συγκεκριμένα αποφλοιωμένο τμήμα κεραμικού από οπτόπλινθο του πλινθοπερίκλειστου της Ανατολικής όψης, καθώς και κεραμικό τεμάχιο από την ίδια περιοχή.

Οι εργαστηριακές τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για τον χαρακτηρισμό και τη μελέτη των δομικών υλικών του Καθολικού, είναι η μικροσκοπία οπτικών ινών (FOM), η κοκκομετρική διαβάθμιση και ο προσδιορισμός αναλογίας κονιάς/αδρανών, ο ποιοτικός και ποσοτικός προσδιορισμός των συστατικών των κονιαμάτων με διαφορική θερμική και θερμοβαρυμετρική ανάλυση (DTA-TG), ο προσδιορισμός των ορυκτολογικών φάσεων με περίθλαση ακτίνων Χ (XRD), ο προσδιορισμός των παραμέτρων μικροδομής με ποροσιμετρία υδραργύρου (MIP), η ανίχνευση ολικών διαλυτών αλάτων με αγωγιμετρία και ο υπολογισμός του συντελεστή υδατοαπορρόφησης μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης.

Από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών μετρήσεων προκύπτει πως τα κονιάματα του Καθολικού της Μονής Καισαριανής είναι ασβεστίτικα με ασβεστίτικα ή μίξη ασβεστίτικών και αργιλοπυριτικών αδρανών, υψηλές τιμές πορώδους και την προσθήκη άχυρου ή φυτικών ινών κατά περιπτώσεις. Οι κεραμικοί πλίνθοι παρουσιάζουν τα τυπικά χαρακτηριστικά μικροδομής των οπτόπλινθων της βυζαντινής περιόδου.

Τέλος, με βάση τα αποτελέσματα της μελέτης και του χαρακτηρισμού των ιστορικών κονιαμάτων, προτείνεται κονίαμα αρμολόγησης συμβατό με τα αυθεντικά υλικά του Ναού που παρουσιάζει επιθυμητές αντοχές για επεμβάσεις συντήρησης και αποκατάστασης του Καθολικού.

## **Abstract**

The aim of this thesis is the characterization and study of the original structural materials of Kaisariani Monastery, as well as proposals for compatible restoration materials and interventions.

The Catholicon of Kaisariani Monastery survives until today in excellent condition. It is a typical Mid - Byzantine Athenian church, unique for its artistic quality. Initially, it was built according to the usual type of a complex cross-in -square domed church without a narthex, in the late 11th and early 12th century.

The samples taken from the Catholicon were mainly historic mortars. The mortars were obtained internally and externally of the main temple, from different sides and depths of the walls. Also, two brick samples were obtained, the first one as a concrete peeled portion of brick from the eastern side of the cloisonné and the second one is a piece of brick from the same area.

The lab techniques applied in order to characterize and study the structural materials of the Catholicon were Fiber Optic Microscopy (FOM), Grain Size Distribution Analysis, Differential Thermal and Thermo-Gravimetric Analysis (DTA-TG), X-ray diffraction (XRD), Mercury Intrusion Porosimetry (MIP), Total Soluble Salts Measurements, as well as Water Absorption by Capillarity test in order to estimate the capillarity absorption coefficient.

Based on the results deriving from the above techniques, it is concluded that the mortars of Catholicon of Kaisariani Monastery are lime mortars mixed with calcite and aluminosilicate aggregates, with high porosity values and occasionally the addition of straw or fiber admixtures. The microstructural characteristics of the examined bricks are typical for handmade bricks of the byzantine period.

Finally, based on the results of the study and characterization of historic mortars, a repair joint mortar is recommended, fulfilling compatibility criteria in relation to the original materials of the structure, as well as serviceability criteria regarding the contribution of the restoration mortar to the mechanical strength of the historical masonry.

# Περιεχόμενα

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b>	<b>I</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>III</b>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b>	<b>IV</b>
<b>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ</b>	<b>VI</b>
<b>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ</b>	<b>VII</b>
<b>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ</b>	<b>VII</b>
<b>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ</b>	<b>VIII</b>
<b>1. ΓΕΝΙΚΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Λίθοι</b>	<b>2</b>
1.1.1 ΛΙΘΟΔΟΜΕΣ	2
1.1.2 ΦΥΣΙΚΟΙ ΔΟΜΙΚΟΙ ΛΙΘΟΙ	3
1.1.3 ΓΕΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΛΙΘΩΝ	6
1.1.4 ΦΘΟΡΑ ΛΙΘΩΝ	8
<b>1.2 ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ</b>	<b>10</b>
<b>ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ</b>	<b>10</b>
<b>ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ</b>	<b>13</b>
1.2.2 ΚΟΝΙΕΣ	15
1.2.3 ΑΔΡΑΝΗ	24
1.2.4 ΠΡΟΣΘΕΤΑ	28
1.2.1 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ	33
ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΣΥΝΔΕΤΙΚΗΣ ΥΛΗΣ/ΑΔΡΑΝΗ 1:3.	33
1.2.5 ΦΘΟΡΑ ΤΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ	34
1.2.6 ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	35
<b>1.3 ΚΕΡΑΜΟΙ</b>	<b>41</b>
1.3.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ	42
1.3.2 ΦΘΟΡΑ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ	44
<b>2. ΕΙΔΙΚΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ</b>	<b>45</b>
<b>2.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ</b>	<b>46</b>
<b>2.2 ΜΟΝΗ ΚΑΙΣΑΡΙΑΝΗΣ</b>	<b>48</b>
2.2.1 ΤΑ ΑΡΧΑΙΑ ΛΑΤΟΜΕΙΑ ΤΟΥ ΥΜΗΤΤΟΥ	48
2.2.2 Ο ΥΜΗΤΤΟΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΡΧΑΙΟΤΗΤΑ ΣΤΟ ΒΥΖΑΝΤΙΟ	49
<b>2.3 Η ΜΟΝΗ ΚΑΙΣΑΡΙΑΝΗΣ</b>	<b>50</b>

2.3.1 Η ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΜΟΝΗΣ ΚΑΙΣΑΡΙΑΝΗΣ	53
2.3.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΑΣΤΗΡΙΑΚΟΥ ΣΥΓΚΡΟΤΗΜΑΤΟΣ	53
<b>2.4 Η ΤΟΙΧΟΔΟΜΗ ΤΟΥ ΝΑΟΥ</b>	<b>60</b>
2.4.1ΤΑ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΤΟΥ ΚΑΘΟΛΙΚΟΥ	61
<b>2.5 ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ</b>	<b>62</b>
<b>3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ</b>	<b>66</b>
<hr/>	
3.1. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	67
3.2 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ	72
3.3 ΘΕΣΕΙΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ	74
3.4 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ	78
<b>4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ</b>	<b>80</b>
<hr/>	
4 .1 ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ	81
4.2 ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ	89
4.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΝΩΣΕΩΝ - ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ (XRD)	94
4.4 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ DTA-TG	101
4.5 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ – ΠΟΡΟΣΙΜΕΤΡΙΑ ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΥ (MIP)	110
4.6 ΥΔΑΤΟΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΠΛΙΝΘΟΥ	114
4.7 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΛΙΚΩΝ ΔΙΑΛΥΤΩΝ ΑΛΑΤΩΝ (SST%) & ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΟΙΟΤΙΚΗΣ ΧΗΜΙΚΗΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ (SPOTTESTS)	116
4.8 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΝΤΟΧΩΝ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ	119
<b>5. ΠΡΟΤΑΣΗ ΓΙΑ ΣΥΜΒΑΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ</b>	<b>121</b>
<hr/>	
<b>6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ</b>	<b>130</b>
<hr/>	
6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	131
6.2. ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	132
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>133</b>
<hr/>	

## Ευρετήριο Πινάκων

---

<i>Πίνακας 1: Βασικές φυσικές ιδιότητες υγιών φυσικών λίθων</i>	7
<i>Πίνακας 2: Βασικές μηχανικές ιδιότητες υγιών φυσικών λίθων</i>	7
<i>Πίνακας 3: Ιστορία Κονιαμάτων ανά περίοδο και περιοχή</i>	11
<i>Πίνακας 4: Πρόσθετα οργανικής φύσης</i>	31
<i>Πίνακας 5: Όρια αποδοχής με βάση τα χαρακτηριστικά μικροδομής</i>	38
<i>Πίνακας 6: Όρια αποδοχής με βάση τις θερμικές μεθόδους ανάλυσης</i>	39
<i>Πίνακας 7: Χρονικό ανάπτυξης των κεραμικών υλικών</i>	42
<i>Πίνακας 8: Κωδικοποίηση δειγμάτων</i>	72
<i>Πίνακας 9: Θέσεις δειγματοληψίας</i>	74
<i>Πίνακας 10: Φωτογραφική τεκμηρίωση δειγμάτων</i>	78
<i>Πίνακας 11: Αναλογία κονιάς/αδρανών για τα δείγματα MK1, MK4, MK7</i>	89
<i>Πίνακας 12: Ορυκτολογική σύσταση δειγμάτων</i>	94
<i>Πίνακας 13: Αποτελέσματα θερμοβαρμετρικής ανάλυσης στο ολικό κονίαμα</i>	102
<i>Πίνακας 14: Αποτελέσματα θερμοβαρμετρικής ανάλυσης στο κλάσμα της κονιάς</i>	102
<i>Πίνακας 15: Αποτελέσματα ποροσιμετρίας υδραργύρου</i>	110
<i>Πίνακας 16: Στοιχεία διεξαγωγής της υδατοαπορρόφησης</i>	114
<i>Πίνακας 17: Αποτελέσματα ολικών διαλυτών αλάτων και δοκιμών ποιοτικής χημικής ανίχνευσης</i>	117
<i>Πίνακας 18: Σύνθεση προτεινόμενων κονιαμάτων % κατά βάρος</i>	123
<i>Πίνακας 19: Ποσοστά απώλειας βάρους (%) για τα κονιάματα υδραάσβεστου-μετακαολίνη στην εξέλιξη του χρόνου</i>	123
<i>Πίνακας 20: Χαρακτηριστικά μικροδομής του προτεινόμενου κονιάματος στην εξέλιξη του χρόνου, μέσω πορομετρίας υδραργύρου</i>	125
<i>Πίνακας 21: Αποτελέσματα δοκιμών σε κάμψη και σε θλίψη για τα προτεινόμενα κονιάματα</i>	125



## Ευρετήριο Σχημάτων

---

<b>Σχήμα 1:</b> Διάγραμμα ροής για την δημιουργία των καμπυλών θραυστότητας	41
<b>Σχήμα2:</b> Διάγραμμα ροής διαγνωστικής μελέτης	47
<b>Σχήμα 3:</b> Κάτοψη του ναού που περιλαμβάνει τις τρεις οικοδομικές φάσεις	64
<b>Σχήμα 4:</b> Συσχέτιση εφελκυστικής αντοχής και πορώδους (%)	120
<b>Σχήμα 5:</b> Καμπύλες θραυστότητας - Πιθανότητα εμφάνισης μικρής βλάβης	127
<b>Σχήμα 6:</b> Καμπύλες θραυστότητας - Πιθανότητα εμφάνισης μεσαίας βλάβης	128
<b>Σχήμα 7:</b> Καμπύλες θραυστότητας - Πιθανότητα εμφάνισης σημαντικής βλάβης	129

## Ευρετήριο Εικόνων

---

<b>Εικόνα 1:</b> Σκαρίφημα του Ρώσου μοναχού Μπάρσκι το 1745	50
<b>Εικόνα 2:</b> Φωτογραφία 1888-1890. Μονή Καισαριανής, Καθολικό. Άποψη από ανατολικά. Δημιουργοί: R. Weir-Schultz, S. Barnsley. Αρχείο ByzantineResearchFund, Βρετανική Σχολή Αθηνών.	52
<b>Εικόνα 3:</b> Ο Λουτρώνας	54
<b>Εικόνα4:</b> Η Τράπεζα	56
<b>Εικόνα5:</b> Τα κελιά και ο Πύργος των Μπενιζέλων	57
<b>Εικόνα 6:</b> αριστερά, η είσοδος του ναού –δεξιά, παρεκκλήσι Αγ. Αντωνίου	60
<b>Εικόνα 7:</b> Κογχυλιάτης λίθος	61
<b>Εικόνα 8:</b> Κογχυλιάτης λίθος FOM μεγέθυνση×50	61
<b>Εικόνα 9:</b> Σχιστόλιθος	62
<b>Εικόνα 10:</b> Σχιστόλιθος FOM μεγέθυνση×50	62
<b>Εικόνα 11:</b> FOM μεγέθυνση ×50 δείγμα MK1	81
<b>Εικόνα 12:</b> FOM μεγέθυνση×50 δείγμα MK2	82
<b>Εικόνα 13:</b> FOM μεγέθυνση ×50 δείγμα MK2b	83
<b>Εικόνα 14:</b> FOM μεγέθυνση ×50 δείγμα MK3a	83

<b>Εικόνα 15:</b> FOM μεγέθυνση ×50 δείγμα MK3b	84
<b>Εικόνα 16:</b> FOM μεγέθυνση×50 δείγμα MK4	85
<b>Εικόνα 17:</b> FOM μεγέθυνση×50 δείγμα MK5a	86
<b>Εικόνα 18:</b> FOM μεγέθυνση×50 δείγμα MK5b	86
<b>Εικόνα 19:</b> FOM μεγέθυνση×50 δείγμα MK6	87
<b>Εικόνα 20:</b> FOM μεγέθυνση×50 δείγμα MK7	88
<b>Εικόνα 21:</b> FOM μεγέθυνση×50 δείγμα MK8	88

## **Ευρετήριο Διαγραμμάτων**

---

<b>Διάγραμμα 1:</b> Ημιλογαριθμική κλίμακα κατανομής αδρανών για το δείγμα MK1	90
<b>Διάγραμμα2:</b> Ιστόγραμμα κατανομής αδρανών για το δείγμα MK1	90
<b>Διάγραμμα 3:</b> Ημιλογαριθμική κλίμακα κατανομής αδρανών για το δείγμα MK4	91
<b>Διάγραμμα4:</b> Ιστόγραμμα κατανομής αδρανών για το δείγμα MK4	91
<b>Διάγραμμα 5:</b> Ημιλογαριθμική κλίμακα κατανομής αδρανών για το δείγμα MK7	92
<b>Διάγραμμα6:</b> Ιστόγραμμα κατανομής αδρανών για το δείγμα MK7	92
<b>Διάγραμμα 7:</b> Συγκριτική ημιλογαριθμική κλίμακα κατανομής αδρανών για τα τρία δείγματα	93
<b>Διάγραμμα 8:</b> XRD για το δείγμα MK1	95
<b>Διάγραμμα 9:</b> XRD για το δείγμα MK2	95
<b>Διάγραμμα 10:</b> XRD για το δείγμα MK2b	96
<b>Διάγραμμα 11:</b> XRD για το δείγμα MK4	96
<b>Διάγραμμα 12:</b> XRD για το δείγμα MK4p	97
<b>Διάγραμμα 13:</b> XRD για το δείγμα MK5a	97
<b>Διάγραμμα 14:</b> XRD για το δείγμα MK5b	98
<b>Διάγραμμα 15:</b> XRD για το δείγμα MK6	98

<b>Διάγραμμα 16:</b> XRD για το δείγμα MK7	99
<b>Διάγραμμα 17:</b> XRD για το δείγμα MK8	99
<b>Διάγραμμα 18:</b> Διάγραμμα Θερμικής Ανάλυσης DTA – TG για το δείγμα MK1	103
<b>Διάγραμμα 19:</b> Διάγραμμα Θερμικής Ανάλυσης DTA – TG της κονιάς του δείγματος MK1	103
<b>Διάγραμμα 20:</b> Διάγραμμα Θερμικής Ανάλυσης DTA – TG για το δείγμα MK2	104
<b>Διάγραμμα 21:</b> Διάγραμμα Θερμικής Ανάλυσης DTA – TG για το δείγμα MK2b	104
<b>Διάγραμμα 22:</b> Διάγραμμα Θερμικής Ανάλυσης DTA – TG για το δείγμα MK4	105
<b>Διάγραμμα 23:</b> Διάγραμμα Θερμικής Ανάλυσης DTA – TG της κονιάς του δείγματος MK4	105
<b>Διάγραμμα 24:</b> Διάγραμμα Θερμικής Ανάλυσης DTA – TG για το δείγμα MK5a	106
<b>Διάγραμμα 25:</b> Διάγραμμα Θερμικής Ανάλυσης DTA – TG για το δείγμα MK5b	106
<b>Διάγραμμα 26:</b> Διάγραμμα Θερμικής Ανάλυσης DTA – TG για το δείγμα MK6	107
<b>Διάγραμμα 27:</b> Διάγραμμα Θερμικής Ανάλυσης DTA – TG για το δείγμα MK7	107
<b>Διάγραμμα 28:</b> Διάγραμμα Θερμικής Ανάλυσης DTA – TG της κονιάς του δείγματος MK7	108
<b>Διάγραμμα 29:</b> Διάγραμμα Θερμικής Ανάλυσης DTA – TG για το δείγμα MK8	108
<b>Διάγραμμα 30:</b> Ιστόγραμμα MIP για το δείγμα MK3a κεραμικό	110
<b>Διάγραμμα 31:</b> Ιστόγραμμα MIP για το δείγμα MK3b κεραμικό	111
<b>Διάγραμμα 32:</b> Ιστόγραμμα MIP για το δείγμα MK6 κονίαμα	112
<b>Διάγραμμα 33:</b> Ιστόγραμμα MIP για το δείγμα MK7 κονίαμα	112
<b>Διάγραμμα 34:</b> Ιστόγραμμα MIP για το δείγμα MK8 κονίαμα	113
<b>Διάγραμμα 35:</b> Διάγραμμα Υδατοαπορρόφησης κεραμικού πλίνθου MK3b	114
<b>Διάγραμμα 36:</b> Διάγραμμα για τον υπολογισμό του συντελεστή υδατοαπορρόφησης κεραμικού πλίνθου MK3b	115

# **1. ΓΕΝΙΚΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ**

## **1.1 Λίθοι**

---

### **1.1.1 Λιθοδομές**

Οι λιθοδομές είναι το πιο παλιό είδος τοιχοποιίας. Στην Ελληνική παραδοσιακή αρχιτεκτονική η δόμηση με φυσικούς λίθους είναι η συνηθέστερη. Στις μέρες μας όμως δεν είναι συνηθισμένο το κτίσιμο κτιρίων εξ ολοκλήρου από πέτρα λόγω του υψηλού κόστους υλικών και εργασίας. Τα πιο γνωστά είδη λιθοδομών είναι [1]:

- Ξηρολιθοδομές

Ξηρολιθοδομές ή ξερολιθιές ή ξερολίθια, είναι οι λιθοδομές που κτίζονται χωρίς κονίαμα και με σχετικά μικρή - επιτόπια επεξεργασία της πέτρας. Είναι η παλαιότερη μέθοδος λιθοδομής. Σήμερα τείνει να εγκαταλειφθεί ή χρησιμοποιείται μόνο σε κατασκευές με μικρή σημασία, (μικρά βοηθητικά κτίσματα, χαμηλοί τοίχοι αντιστήριξης, ή χαμηλές διαχωριστικές μάντρες).

- Αργολιθοδομές

Αργολιθοδομές λέγονται οι τοιχοποιίες που γίνονται με αργούς λίθους (έχουν υποστεί πολύ μικρή ή και καθόλου επεξεργασία) και κονίαμα. Χρησιμοποιούνται σε τοίχους υπογείων, αντιστήριξης, αλλά και σε ανωδομές κτιρίων. Το ελάχιστο πάχος μιας αργολιθοδομής είναι 45 έως 50 cm.

- Ημιλαξευτές Λιθοδομές

Ημιλαξευτές είναι οι λιθοδομές οι οποίες κατασκευάζονται με μισολαξευμένες πέτρες (έχουν υποστεί επεξεργασία μόνο στην ορατή τους επιφάνεια) και κονίαμα. Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που μας ενδιαφέρει η εμφάνιση της τοιχοποιίας όπως κατοικίες, μνημειακά κτίρια και γενικά για τοίχους υπογείων και ισογείων. Η λιθοδομή κτίζεται από την μια και σπανιότερα από τις δύο πλευρές με μισολαξευμένες πέτρες, ενώ ο υπόλοιπος όγκος της οικοδομής κτίζεται με αργούς λίθους.

### ο Λαξευτές Λιθοδομές

Η λαξευτή τοιχοποιία αποτελείται από καλά λαξευμένους λίθους, με αυτού του είδους τις λιθοδομές έχουν κτιστεί πολύ σημαντικά μνημεία, όπως η Ακρόπολη της Αθήνας. Η κάθε πέτρα έχει υποστεί τέτοια επεξεργασία που έχει αποκτήσει πλήρως το σχήμα που χρειάζεται για την κατασκευή της λιθοδομής.

Με λαξευτές τοιχοποιίες κατασκευάζονται τοίχοι σε οικοδομικά έργα, βάθρα σε γέφυρες, αψίδες, θόλοι, τοίχοι αντιστήριξης κ.τ.λ. Στην αρχαιότητα η δόμηση γινόταν με ή χωρίς κονίαμα. Στις περιπτώσεις που δεν γινόταν χρήση κονιαμάτων, η αντοχή της τοιχοποιίας βασιζόταν στην απόλυτη έδραση και στην εμπλοκή των λίθων. Για να ενισχυθεί όμως η κατασκευή χρησιμοποιούσαν μεταλλικούς συνδετήρες. Η συμβολή των κονιαμάτων στην αντοχή της τοιχοποιίας είναι ανάλογη του πάχους των αρμών. Στην βυζαντινή περίοδο η χρήση κονιαμάτων συνέβαλλε καθοριστικά στις αντοχές των τοιχοποιιών.

### 1.1.2 Φυσικοί Δομικοί Λίθοι

Η μελέτη των δομικών λίθων στοχεύει στην απόκτηση γνώσης σχετικά με τη φύση των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην αρχαιότητα για δομικούς, διακοσμητικούς και αισθητικούς λόγους. Είναι πολλές φορές ενδιαφέρων ο συσχετισμός τους με υλικά που τους αντικατέστησαν στους νεώτερους χρόνους. Η συστηματική μελέτη των υλικών δόμησης μιας περιοχής αποκαλύπτει την τεχνολογική και οικοδομική εξέλιξη, την εγγύτητα των λατομικών χώρων με τον τόπο προορισμού τους, τα δίκτυα του εμπορίου (χερσαία ή θαλάσσια), την οικονομική κατάσταση της πολιτικής αρχής ή ιδιωτικής πρωτοβουλίας που χρηματοδότησε ένα έργο [2].

Η επιλογή σωστών υλικών για τη συντήρηση και αποκατάσταση μνημείων είναι αναγκαία, καθώς προϋποθέτει καλή γνώση των μηχανισμών, των παραγόντων, του βαθμού και της ταχύτητας διάβρωσης, αφού τα μνημεία μετά την αποκάλυψή τους εκτίθενται σε διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες και δέχονται επίδραση από τη θάλασσα και τις ακραίες θερμοκρασίες [3].

Στην Ελλάδα αφθονούν οι φυσικοί δομικοί λίθοι τόσο υπό τη μορφή λευκών, τεφρών, ή ποικιλόχρωμων μαρμάρων και συμπαγών ασβεστόλιθων όσο και υπό τη

μορφή πωρόλιθων, κροκαλοπαγών, ηφαιστειακής λάβας, γύψου και άλλων [4]. Τα είδη των λίθων που χρησιμοποιήθηκαν από την αρχαιότητα έως πρόσφατα ως δομικά υλικά, εργαλεία ή σκεύη διαιρούνται πετρολογικά στις ακόλουθες κατηγορίες: α) Ιζηματογενή: εδώ ανήκουν οι ασβεστόλιθοι, οι πωρόλιθοι, οι τραβερτίνες, οι ψαμμίτες, οι γύψοι, τα κροκαλοπαγή. β) Μεταμορφωμένα: στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα μάρμαρα, οι σχιστόλιθοι, οι γνεύσιοι, οι σερπεντινίτες (ή οφίτες). γ) Πυριγενή: εδώ συγκαταλέγονται γρανίτες, τόφφοι, λάβες, η κίσσηρη (ή ελαφρόπετρα η οποία αποτελεί εξαιρετικό λειαντικό μέσο, καθώς και θερμομονωτικό υλικό) [5].

Τα μάρμαρα και οι ασβεστόλιθοι, χημικά είναι συγγενή πετρώματα, έχουν όμως διαφορά στα τεχνικά και φυσικοχημικά χαρακτηριστικά (πορώδες, περατότητα, αντοχή στην κάμψη, τη θλίψη και τον εφελκυσμό[6]. Τα μάρμαρα, ως μεταμορφωμένα πετρώματα, είναι συμπαγή, λεπτόκοκκα έως χονδρόκοκκα, ενώ οι ασβεστόλιθοι μπορεί να είναι βιογενούς, κλαστικής ή χημικής προέλευσης, δεν έχουν ευδιάκριτους μακροσκοπικά κρυστάλλους και έχουν κυμαινόμενο πορώδες, πρωτογενές ή δευτερογενές. Το χρώμα των μαρμάρων-ασβεστολίθων είναι ποικίλο, από μαύρο, τεφρό, λευκό, ερυθρωπό, υποπράσινο και υποκίτρινο και η χρήση κάθε τύπου δομικού υλικού αυτού του τύπου καθοριζόταν πολλές φορές από την αλλαγή των αισθητικών προτιμήσεων, την ευκολότερη πρόσβαση στα ορυχεία, την αφθονία και την οικονομική αξία του υλικού. Έτσι, μερικά μάρμαρα-ασβεστόλιθοι χρησιμοποιήθηκαν μόνο σε τοπική κλίμακα (Ελευσινιακός λίθος), ενώ άλλα έχουν εντοπισθεί σε αρκετά μακρινές αποστάσεις (μάρμαρα Πεντέλης & Πάρου)[2]. Οι σερπεντινίτες και τα συγγενή τους πετρώματα παρουσιάζουν –υπό προϋποθέσεις- εξαιρετικές τεχνικές ιδιότητες και στιλβώνονται καλά. Ο στεατίτης λίθος υπάγεται σε μια υποκατηγορία, πλούσια σε τάλκη.

Αντιθέτως, τα κλασικά κροκαλοπαγή και λατυποπαγή πετρώματα στιλβώνονται δυσκολότατα εξαιτίας της μεγάλης διαφοράς συστάσεως ιστού και σκληρότητας ανάμεσα στα θραύσματα (κροκαλών και λατυπών) και στην ενδιάμεση συγκολλητική μάζα [7]. Κλασικό παράδειγμα είναι ο αρουραίος λίθος της Αττικής (λατομεία περιοχής Δαφνίου Χαϊδαρίου και Καισαριανής) [8], ο οποίος έχει μικρή έως μέτρια συνεκτικότητα, διαβρώνεται εύκολα όταν εκτίθεται στην επιφάνεια και

έχει χρησιμοποιηθεί ως θεμέλιο σε διάφορα μνημεία στην Αθήνα, την Ελευσίνα και αλλού.

Οι πωρόλιθοι είναι ένας γενικός όρος που αφορά κυρίως πορώδεις ασβεστόλιθους που λόγω των πόρων έχουν μικρότερο ειδικό βάρος από αντίστοιχα συμπαγή ασβεστολιθικά πετρώματα. Μερικές φορές είναι δύσκολη η διάκριση, μακροσκοπικά από τους λεγόμενους ασβεστοψαμμίτες. Στην πρώτη περίπτωση οι πόροι είναι τυχαία κατανεμημένοι και διαφορετικών μεγεθών, ενώ στους ασβεστοψαμμίτες, οι πόροι αναπτύσσονται μεταξύ συνήθως ισομεγεθών κόκκων και έτσι το πέτρωμα είναι πιο ομογενές.

Οι γρανίτες εξαιτίας της σκληρότητάς τους έχουν υψηλό κόστος εξορύξεως και επεξεργασίας, είναι όμως ανθεκτικοί στις καιρικές επιδράσεις και έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Χρησιμοποιήθηκαν σε ρωμαϊκά κτήρια και βυζαντινούς ναούς [9] αλλά η προέλευσή τους ήταν από περιοχές εκτός Ελλάδος, π.χ. Αίγυπτος, Ιταλία, Ισπανία [10].

Η μακροσκοπική διάκριση των κοινών λίθων γίνεται με τα ακόλουθα κριτήρια: Οι ασβεστόλιθοι /δολομίτες- και μερικά μάρμαρα είναι λεπτόκοκκα πετρώματα και χαράσσονται εύκολα με αιχμηρά εργαλεία σιδήρου. Οι λίθοι αυτοί διαφοροποιούνται μεταξύ τους ανάλογα με το πορώδες, την κρυσταλλικότητα και τη λάμψη. Τα δολομιτικά μάρμαρα είναι περισσότερο εύθραυστα, γι' αυτό σπιλβώνονται δυσκολότερα και φθείρονται γρηγορότερα. Μια κατηγορία μαρμάρων είναι τα χονδροκρυσταλλικά στα οποία είναι δυνατή η παρατήρηση σχετικά μεγάλων κρυστάλλων.

Οι σχιστόλιθοι και τα μάρμαρα διακρίνονται ανάλογα με τη σχιστότητα και την ποικιλία των ορυκτών. Όταν τα αργιλο-πυριτικά ορυκτά αφθονούν (συνήθως χλωρίτης), το μάρμαρο παίρνει χρώμα πράσινο, τεφροπράσινο έως σταχτί. Συχνά τα ορυκτά αυτά συγκεντρώνονται σε παράλληλες ζώνες δημιουργώντας χρωματιστές ταινίες εναλλασσόμενες με λευκές. Τότε το μάρμαρο αυτό ονομάζεται σιπολλίνης (εκ του ιταλικού cipollino = κρεμμυδάκι)[9]. Οι ψαμμίτες και τα κροκαλοπαγή πετρώματα διακρίνονται μακροσκοπικά ανάλογα με την κοκκομετρία και τη σύσταση. Οι πυριτόλιθοι και οι οψιανοί ανάλογα με το χρώμα και τον



κογχώδηθραυσμό. Τέλος, οι ανδρείτες και οι ρυόλιθοι (λάβες) ανάλογα με το χρώμα τους και την υφή τους [11].

Η εκμετάλλευση των αρχαίων λατομείων γινόταν με τους ακόλουθους τρόπους: α) επιφανειακά κλιμακωτά, ώστε η τομή του πετρώματος να προχωρεί κλιμακηδόν προς τα έσω, και β) με υπόγειες στοές που προχωρούσαν σε μεγάλο μήκος και υποστηρίζονταν κατά αποστάσεις από πεσσούς προς αποφυγήν της κατάπτωσης της οροφής ή από ελαφρώς χαμηλωμένους θόλους[12]. Γνωστά αρχαία υπαίθρια λατομεία στην Αττική είναι εκείνα του λευκού μαρμάρου της Πεντέλης, του υπόλευκου ταινιωτού μαρμάρου Υμηττού, του κυανόφαιου ασβεστόλιθου της Ελευσίνας, του αρουραίου λίθου του Χαϊδαρίου-Αιγάλεω και Καισαριανής, καθώς και του ακτίτη λίθου-κογχυλιάτη λίθου- πωρόλιθου του Πειραιά και της βόρειας Αίγινας. Διάσπαρτα μεγάλα, μικρά ή τοπικής σημασία λατομεία διαφόρων φάσεων εκμετάλλευσης είναι διεσπαρμένα σε όλη της Αττική. Για παράδειγμα ο μέλας δομικός λίθος των Δελφών εξορύχτηκε από τα παρακείμενα λατομεία του Προφήτη Ηλία[8], μια και ο επιχώριος λίθος, αν και έχει την ίδια σύσταση, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί, λόγω του κατακερματισμού των στρωμάτων, εξαιτίας τεκτονικών αιτιών. Τους δομικούς λίθους στην αρχαία Ολυμπία συνιστούν ο κογχυλιάτης λίθος, ο μαύρος ασβεστόλιθος και ο πωρόλιθος.

Ο επιστημονικός χαρακτηρισμός των υλικών, καθώς και η δυνατότητα έρευνας για την προέλευσή τους, επιτυγχάνεται σήμερα με εργαστηριακές αναλύσεις και δοκιμές, όπως: Μικρο-παλαιοντολογική- στρωματογραφική – πετρογραφική αναγνώριση (Light Microscopy) ορυκτολογικός προσδιορισμός (X-Ray Diffraction), χημική ανάλυση (AAS-XRF-ICP), μέτρηση τεχνικών χαρακτηριστικών όπως το πορώδες, η περατότητα, η κοκκομετρία, η υπέρυθη ακτινοβολία (IR), η θερμοφωταύγεια (Cathodo-luminescence), το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM), τη διαφορική θερμική ανάλυση (DTA), το στερεοσκόπιο (BM)[13].

### **1.1.3 Γενικές Ιδιότητες Λίθων**

Οι φυσικοί δομικοί λίθοι σε γενικές γραμμές παρουσιάζουν μεγάλη πυκνότητα, μικρό πορώδες και υδατοαπορρόφηση, μεγάλο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και μικρή διαπίδυση υδρατμών. Επίσης, έχουν μεγάλες μηχανικές αντοχές και

παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή στον παγετό, στην υψηλή θερμοκρασία και στα διαβρωτικά αέρια, καθώς και υψηλές τιμές σκληρότητας και δυναμικών ελαστικών σταθερών[5]. Οι περισσότεροι, εκτός από τους πορώδεις, είναι δυνατόν να κοπούν, να λαξευτούν και να λειανθούν εύκολα. Η πυκνότητα και το πορώδες των φυσικών λίθων επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητές τους. Ειδικότερα, η αντοχή σε θλίψη αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητάς τους, ενώ μειώνεται με την αύξηση του πορώδους τους [14].

**Πίνακας 1: Βασικές φυσικές ιδιότητες υγιών φυσικών λίθων [15]**

Φυσικός Λίθος	Φαινόμενη πυκνότητα, $\rho$ $\times 10^3 \text{Kg/m}^3$	Πορώδες, η %, κ.ό.	ΥδατοαπορρόφησηWv, $\text{Kg/m}^3$
Γρανίτης	2,60 – 2,82	0,4 – 1,5	4 – 14
Διορίτης	2,50 – 3,03	0,5 – 1,2	5 – 12
Πορφυρίτης	2,50 – 2,80	0,4 – 1,8	4 – 18
Ηφαιστειακός τόφφος	1,80 – 2,11	20,0 – 30,0	120 – 300
Αργιλικός Σχιστόλιθος	1,60 – 2,90	1,0 – 3,5	8 – 24
Δολομίτης	2,40 – 2,87	0,3 – 4,0	3 – 8
Μάρμαρο	2,64 – 3,02	0,2 – 3,0	1 – 6
Τραβερτίνης	2,40 – 2,54	4,0 – 13,0	36 – 112
Σερπεντίτης	2,61 – 2,80	0,3 – 2,1	3 – 12

**Πίνακας 2: Βασικές μηχανικές ιδιότητες υγιών φυσικών λίθων [15]**

Φυσικός Λίθος	Αντοχή σε θλίψη, $\sigma_D, \text{MPa}$	Αντοχή σε εφελκυσμό $\sigma_Z, \text{MPa}$	Μέτρο ελαστικότηταςE, MPa	Αντοχή σε τριβή από φθορά $\sigma_T$ , $\times 10^4 \text{m}^3/\text{m}^2$ στροφ.
Γρανίτης	16 – 434	3 – 40	10 – 77	10 – 16
Διορίτης	64 – 333	5 – 50	29 – 107	10 – 16

Πορφυρίτης	173 – 250	12 – 13	65 – 76	10 – 16
Ηφαιστειακός τόφφος	6 – 300	1 – 40	2 – 55	$\frac{3}{4}$
Αργιλικός Σχιστόλιθος	34 – 503	07 – 23	2 – 90	18 – 70
Δολομίτης	45 – 410	3 – 13	23 – 90	20 – 90
Μάρμαρο	38 – 280	2 – 29	24 – 103	30 – 70
Τραβερτίνης	18 – 68	4 – 10	4 – 45	$\frac{3}{4}$
Σερπεντίτης	70 – 250	16 – 19	45 – 65	14 – 36

#### 1.1.4 Φθορά λίθων

Οι λίθοι που χρησιμοποιούνται στην οικοδομική ποικίλουν ως προς την γεωλογική προέλευση, την σύσταση, τις φυσικές ιδιότητες, και την μηχανική αντοχή. Τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος, ο τρόπος επεξεργασίας και χρήσης του και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του (είδος πετρώματος, ορυκτολογική σύσταση, ιστός, υφή) καθορίζουν την ανθεκτικότητα των δομικών λίθων. Οι παράγοντες που συντελούν στη φθορά των δομικών λίθων των κτιρίων μπορούν να διακριθούν σε φυσικούς, χημικούς βιολογικούς κλιματολογικούς παράγοντες και γεωλογικούς. Πιο αναλυτικά [16]:

- Η μεταβολή της θερμοκρασίας η οποία προκαλεί την χαλάρωση της σύνδεσης των υλικών και την δημιουργία ρηγματώσεων.
- Το νερό ελέγχει την ενυδάτωση, μεταφορά, κρυστάλλωση και ανακρυστάλλωση των αλάτων τα οποία μπορεί να προκαλέσουν την δημιουργία στεγανών στρωμάτων στην επιφάνεια με δυσμενή αποτελέσματα [17].
- Η συνεχής έκθεση των δομικών λίθων στον άνεμο και στην αμμοβολή φθείρει τις επιφάνειές τους και σε συνδυασμό με την ύπαρξης αλάτων σχηματίζονται σκληρές κρούστες που μπορεί να προκαλέσουν αποκόλληση λίθων.
- Η δράσης του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) και του διοξειδίου του θείου (SO<sub>2</sub>) της ατμόσφαιρας προκαλούν χημικές φθορές των δομικών λίθων και

ιδιαίτερα αυτών με ασβεστολιθική σύσταση (γυψοποίηση του ασβεστόλιθου).

- Οι μικροοργανισμοί, τα φυτά και τα ζώα είναι δυνατόν να προκαλέσουν εκτεταμένες ζημιές είτε με την έκκριση ποσοτήτων οργανικών οξέων είτε με την κατακράτηση νερού είτε με τις μηχανικές τάσεις που δύναται να ασκήσουν.
- Οι βλάβες που προέρχονται είτε από σεισμούς, είτε από καθιζήσεις ή δονήσεις του εδάφους μπορεί να είναι καταστρεπτικές για την ευστάθειας του ιστορικού κτιρίου, καθώς μπορεί να προκαλέσουν βλάβες στους δομικούς λίθους [18].
- Η οξειδωση μεταλλικών συνδέσμων – στηρίξεων, προκαλεί τη διόγκωση των μετάλλων και την ανάπτυξη τάσεων μεταξύ των μετάλλων και των δομικών λίθων με αποτέλεσμα τη δημιουργία ρωγμών[15].
- Η αντικατάσταση των κονιάματα στήριξης ή πάκτωσης των στηριγμάτων, με κονιάματα ασύμβατα σε σχέση με τους δομικούς λίθους της τοιχοποιίας[19].
- Η χρήση ασύμβατων κονιαμάτων όπως τα τσιμεντιτικά σε ιστορικές τοιχοποιίες μπορεί να δημιουργήσει σημαντικές βλάβες στους λίθους λόγω της ιδιότητας του τσιμέντου να μεταφέρει άλατα σε γειτονικά υλικά, του συντελεστή θερμικής διαστολής αλλά και των μεγάλων μηχανικών αντοχών που παρουσιάζει

## **1.2 Κονιάματα**

---

### **Ιστορία των Κονιαμάτων**

Η ιστορία των κονιαμάτων συνδέεται άρρηκτα με την ανακάλυψη και τη χρήση του πηλού και στη συνέχεια της ασβέστου από τον άνθρωπο. Τα δύο αυτά υλικά αποτέλεσαν τα πρώτα συνδετικά υλικά για την παρασκευή κονιαμάτων. Τα πρώτα κονιάματα που χρησιμοποιήθηκαν σε κατασκευές τοποθετούνται στην Αίγυπτο. Αποτελούνταν κυρίως από άσβεστο και γύψο και χρησιμοποιούνταν ως επιχρίσματα στις πυραμίδες ήδη από την τέταρτη χιλιετία π.Χ. Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι η τεχνολογία των κονιαμάτων ήταν γνωστή και σε αρχαίους απομονωμένους πολιτισμούς (Ινκας, Μάγια, Κινέζοι, Μογγόλοι Ινδιάνοι)[20,21].

Η "επανάσταση" στη χρήση και παρασκευή των κονιαμάτων πραγματοποιείται κυρίως στη Ρωμαϊκή Αυτοκρατορία. Οι Ρωμαίοι ανέπτυξαν την χρήση των κονιαμάτων σε όλες τις εκφάνσεις του κατασκευαστικού τομέα. Εκτός από εσωτερικά και εξωτερικά επιχρίσματα τα κονιάματα χρησιμοποιούνται στη κατασκευή δρόμων, ως στεγανωτικά, ως κονιάματα αρμών κ.ά. με διαφορετικές τεχνολογίες ανάμιξης και χρήση πολλών και διαφορετικών υλικών. Ο πρώτος που προσπάθησε να κατηγοριοποιήσει τις διάφορες χρήσεις και τους τρόπους παρασκευής των κονιαμάτων είναι ο Vitruvius στο έργο του 'La Architectura' [22]. Οι Ρωμαίοι χρησιμοποίησαν ευρέως τα ποζολανικά κονιάματα, τα οποία μπορούν να θεωρηθούν ως πρώιμη μορφή σκυροδέματος, ενώ παράλληλα διέδωσαν την τεχνολογία αυτή σε ολόκληρη την Αυτοκρατορία.

Την βυζαντινή και παλαιοχριστιανική περίοδο αναπτύχθηκε περαιτέρω η χρήση ποζολανικών υλικών όπως το κεραμάλευρο. Νέα ίχνη ποζολανικών κονιαμάτων απαντώνται στην περίοδο του Μεσαίωνα στην Δυτική Ευρώπη καθώς και στην Αναγέννηση με την μεταφορά της τεχνογνωσίας από το Βυζάντιο. Το δεύτερο ήμισυ του 18<sup>ου</sup> αιώνα αναφέρεται έντονη δραστηριότητα στην Ευρώπη για την ανακάλυψη ενός ανόργανου συνδετικού υλικού που θα μπορούσε να πήξει και να σκληρυνθεί με το νερό [23].

Το 1758 ο Smeaton διατύπωσε ότι οι άσβεστοι που περιείχαν μεγάλες ποσότητες (20-25%) αργιλικών υλικών, είχαν την ιδιότητα να σκληρύνονται κάτω από το νερό,

χαρακτηριστικό που δεν είχε παρατηρηθεί με τις καθαρότερες ασβέστους. Παρατηρήθηκε μάλιστα ότι το φαινόμενο αυτό ήταν πιο έντονο όταν χρησιμοποιείται μια ποζολάνη από την περιοχή Ρυζολί κοντά στην Ρώμη [24].

Το 1824 ο J. Aspdin παρατήρησε ότι ήταν δυνατό να παρασκευαστεί τσιμέντο με καλύτερες ιδιότητες από τις υδραυλικές ασβέστους, εάν το μίγμα ασβέστου και αργίλου θερμαινόταν μέχρι επίτηξης. Το προϊόν της επίτηξης πήρε το όνομα Portlandcement. Το νέο επαναστατικό προϊόν πολύ γρήγορα αποτέλεσε το κύριο συστατικό της οικοδομικής βιομηχανίας, βοηθούμενο από την γρήγορη ανάπτυξη ομοιόμορφων προτύπων ποιότητας και παρασκευής [24]. Ωστόσο η χρήση του τσιμέντου ως υλικό επεμβάσεων σε μνημεία έχει προκαλέσει ανυπολόγιστες ζημιές.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ιστορικές κατασκευές με ασβεστιτικά και ποζολανικά κονιάματα έχουν δείξει αξιοσημείωτη μακροβιότητα και ανθεκτικότητα. Οι κατασκευές αυτές παραμένουν ως επί το πλείστον δομικός άρτιες, παρά τη φθορά από το χρόνο, καθώς και τις έντονα διαβρωτικές συνθήκες του σημερινού κυρίως αστικού περιβάλλοντος.

**Πίνακας 3: Ιστορία Κονιαμάτων ανά περίοδο και περιοχή [25]**

Χρονική Περίοδος	Περιοχή	Υλικά, τεχνικές, χρήση
9000-8000 π.Χ. Νεολιθική Περίοδος	Ιεριχώ, Μεσοποταμία	Ασβεστιτικό κονίαμα. Προσωπίδα: Προσεκτικόγυάλισμα ασβεστιτικού κονιάματος.
7000 π.Χ.	Ιεριχώ, Μεσοποταμία	Τοίχος από ωμούς πλίνθους με γυαλισμένο δάπεδο επιχρίσματος υδρασβέστου /γύψου
7000 π.Χ.	Ιστορική περιοχή Yiftah EI	Δάπεδο ασβεστιτικού επιχρίσματος
5600 π.Χ. Εποχή του λίθου, Λίθινη εποχή	Ποταμός Δούναβης, LepenskiVir, Γιουγκοσλαβία	Πατώματα σε καλύβες ψαράδων: σκυρόδεμα από κόκκινο ασβέστη, άμμο, χαλίκι και νερό
2500 π.Χ.	Μεγάλη Πυραμίδα στη Γκίζα, Αίγυπτος	Ασβεστιτικά και γύψινα κονιάματα και επιχρίσματα
1700 π.Χ. Μινωική Περίοδος	Παλάτι Κνωσού, Κρήτη	Επιχρίσματα διπλής στρώσης από καθαρό ασβέστη σε τοιχογραφίες
1550 π.Χ.	Φαιστός, Μάλια, Κρήτη, Ελλάδα	Υψηλής ποιότητας γυαλισμένα και ζωγραφισμένα επιχρίσματα (τοιχογραφίες)
1500 π.Χ.	Βασιλική, Κρήτη, Ελλάδα	Επίστρωση για τοιχοποιία: δύο στρώματα επιχρίσματος για την

		κάλυψη ξηραμένων στον ήλιο πλίνθων
1000 π.Χ. Βασιλιάς Σολομώντας	Ιερουσαλήμ, Ισραήλ	Δεξαμενές πόσιμου νερού: υδραυλικά κονιάματα από ασβέστη και θρυμματισμένα κεραμικά σκεύη
500 π.Χ.	Κάμειρος, Ρόδος, Ελλάδα	Μεγάλη υπόγεια δεξαμενή νερού: λίθοι συνδεδεμένοι με ποζολανικό κονίαμα υδρασβέστου και ηφαιστειογενής τέφρας πιθανώς από τη Σαντορίνη ή τη Νίσυρο
500 π.Χ.	Μυκήνες, Ελλάδα	Ναοί: διακοσμητικά στοιχεία από μαρμαρόσκονη (stuccos)
500 π.Χ.	Μέγαρα, Ελλάδα	Στέρνα: μονό στρώμα ασβεστιτικού επιχρίσματος
450 π.Χ.	Ναός στο Elis, Ελλάδα	Γυαλισμένος ασβεστιτικός στόκος αναμειγμένος με γάλα και κρόκο (ζαφορά) [saffron]
Κλασική Περίοδος	Λαύριο, Ελλάδα	Εκατοντάδες στέρνες μεταλλουργικών εγκαταστάσεων Λαυρίου: λίθινη τοιχοποιία με καλυμμένη από 2 ή 3 στρώματα ασβεστιτικών κονιαμάτων με προσμίξεις βαρέων μετάλλων
300 π.Χ.	Έργα του Απίου Κλαύδιου Caecus, Ιταλία	Υδραγωγείο και δρόμος του Απίου: ασβεστιτικό σκυρόδεμα, κατασκευασμένο με ανάμειξη ασβέστη, ποζολανικής άμμου, νερού
117 π.Χ.	Ναός του Κάστορα, Ιταλία	Θεμέλια από σκυρόδεμα με ασβέστη
75 π.Χ.	Πομπηία, Ιταλία	Θέατρο κατασκευασμένο με σκυρόδεμα από ασβέστη και ποζολάνη
27 π.Χ.	Ρώμη, Ιταλία	Πάνθεον: ελαφρύ σκυρόδεμα από ηφαιστειακά αδρανή
98 π.Χ.- 117 μ.Χ.	Κολωνία, Γερμανία	Σιντριβάνια του Gaius: ποζολανικό σκυρόδεμα από τέφρα και ασβέστη
80 μ.Χ.	Ρώμη, Ιταλία	Κολοσσαίο: ελαφροβαρές σκυρόδεμα σε μερικά από τα τόξα του
122-130 μ.Χ.	Βρετανία	Τείχη Αδριανού: μία από τις πιο

		ογκώδεις Ρωμαϊκές κατασκευές που έγινε χρήση σκυροδέματος με ασβέστη
150 μ.Χ.	Nimes, Γαλλία	Υδραγωγείο (PontduGuard): ο πυρήνας μερικών τοίχων και το κανάλι, κατά μήκος του οποίου μεταφερόταν το νερό, είναι κατασκευασμένα από ασβεστιτικό κονίαμα
3ος - 5ος αιώνας	Θεσσαλονίκη, Ελλάδα	Εκκλησίες της τελευταίας ρωμαϊκής περιόδου, της πρώιμης χριστιανικής και της Βυζαντινής περιόδου: ασβεστιτικά κονιάματα στα οποία έχει προστεθεί θραυσμένα κεραμικά από ψημένο πηλό
700 μ.Χ.	St. Albans, Βρετανία	Εξοχική κατοικία κοντά στο St. Albans: ασβεστιτικό κονίαμα
700 μ.Χ.	Northampton, Βρετανία	Ανακαλύφθηκαν τρία σαξονικά σκεύη ανάδευσης ασβεστιτικών κονιαμάτων
1220-1265 μ.Χ.	Wheelchair, Βρετανία	Καθεδρικός ναός του Salisbury: το ψηλότερο τόξο στη Βρετανία που στέκεται ακόμη όρθιο στα αρχικά του θεμέλια σκυροδέματος με ασβέστη
1753 μ.Χ.	Δουβλίνο, Ιρλανδία	Θεμέλια της γέφυρας Essex, στον ποταμό Liffey στο Δουβλίνο
1756 μ.Χ.	Βρετανία	Φάρος του Eddystone: κονίαμα υδραυλικού ασβέστη με ιταλική ποζολάνη

### **Κονιάματα**

Ο όρος κονίαμα, στις ιστορικές πηγές [21], αναφέρεται ως το μίγμα ή το πολτώδες παρασκεύασμα κονιάς, με νερό και κόκκους άμμου κίσηρης ή μαρμάρου. Ετυμολογικά, προέρχεται από το αρχαίο κόνις, που σημαίνει σκόνη [26]. Ο αγγλικός όρος mortar, το γαλλικό mortier και το γερμανικό mortel προέρχονται από το



λατινικό *mortarium* [27] που ενώ αρχικά σήμαινε το λάκκο μέσα στον οποίο κατασκευαζόταν το κονίαμα, κατέληξε να δηλώνει το περιεχόμενο.

Σήμερα ο όρος κονίαμα αφορά το μείγμα μιας ή περισσότερων κονιών με άμμο (διαμέτρου συνήθως μέχρι 4mm), πρόσθετα και νερό. Θεωρείται σύνθετο δομικό υλικό και για να μελετηθεί στο σύνολο του, είναι αναγκαίο να μελετηθούν ξεχωριστά όλα τα στοιχεία που το αποτελούν.

Τα κονιάματα ανάλογα με τη χρήση τους, κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες[23]:

- κονιάματα αρμών ή φέροντων δομικών στοιχείων, για τη σύνδεση των φερόντων δομικών στοιχείων των τοιχοποιιών και την πλήρωση των δημιουργούμενων κενών.
- κονιάματα υποστρωμάτων, σε δάπεδα, μωσαϊκά, ψηφιδωτά και τοιχογραφίες.
- επιχρίσματα, για την επένδυση των στοιχείων στις κατασκευές, με σκοπό την προφύλαξη, τη μόνωση και την αισθητική των τοιχοποιιών.

Το κονίαμα παίζει διπλό ρόλο, αρχικά παρέχει μια ομοιόμορφη επιφάνεια στρώσης για τις μονάδες. Γι αυτόν τον λόγο, θα πρέπει να έχει τη μορφή ενός πολτού και να κατέχει μια ικανοποιητική εργασιμότητα έτσι ώστε να απλώνεται εύκολα και να ρέει σε όλες τις σχισμές των μονάδων, δηλαδή η ρεολογική του συμπεριφορά να τέτοια ώστε να διορθώνει οποιεσδήποτε ανωμαλίες στην επιφάνεια. Δεύτερον να παίζει συνδετικό ρόλο κρατώντας τις μονάδες μαζί, και να τις συνδέει σε μία μονολιθική μάζα. Αυτό επιτυγχάνεται μόνο όταν το κονίαμα κατέχει μια ικανοποιητική αντοχή και διασφαλίζει ακριβή σταθερότητα ώστε να αντισταθεί στις φθοροποιές περιβαλλοντικές συνθήκες.

Το νερό των κονιαμάτων πρέπει να είναι καθαρό και ελεύθερο επιβλαβών προσμίξεων όπως τα οξέα, μερικά άλατα (π.χ. θειικά και χλωριούχα) και τα σάκχαρα. Το θαλασσινό νερό καλό είναι να αποφεύγεται, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις επιχρισμάτων, όπου τα άλατα μπορεί να διαλυθούν στο νερό της βροχής και να σχηματίσουν εξανθήματα [28].

Τα κυριότερα είδη κονιαμάτων που χρησιμοποιούνται σήμερα στις σύγχρονες κατασκευές είναι τα εξής:

- Ασβεστοκονιάματα, με συνδετική ύλη τον πολτό της ασβέστου ή την κονιοποιημένη υδράσβεστο (σκόνη υδρασβέστου).
- Τσιμεντοκονιάματα, με συνδετική ύλη το τσιμέντο.
- Τσιμεντοασβεστοκονιάματα, μικτά κονιάματα, με συνδετική ύλη τσιμέντο και άσβεστο (πολτό ή σκόνη υδρασβέστου).
- Ποζολανικά κονιάματα, με συνδετική ύλη άσβεστο και ποζολάνη (θηραϊκή γη, ιπτάμενη τέφρα κ.α.) ως πρόσμικτο υλικό. Στα ποζολανικά κονιάματα είναι δυνατό ένα μέρος της ασβέστου να αντικατασταθεί με τσιμέντο.
- Μαρμαροκονιάματα, με κύριο αδρανές τη μαρμαρόσκηνη και συνδετική ύλη την άσβεστο ή το τσιμέντο ή τέλος και με μικρή πρόσμιξη γύψου.
- Γυψοκονιάματα, με κύριο συνδετικό υλικό το γύψο.
- Διάφορα ειδικά κονιάματα ποικίλων συνθέσεων με διάφορα αδρανή ή πρόσμικτα υλικά. Τα κονιάματα αυτά εξυπηρετούν ειδικούς σκοπούς, όπως είναι λόγου χάριν η αύξηση της μονωτικής ικανότητας ή της πυροπροστασίας του τοιχώματος με τη χρήση ελαφρών αδρανών (αμίαντος, περλίτης κλπ.), ή με την κατασκευή οροφοκονιαμάτων πάνω σε ξύλινες πήχεις (γιαγλί κλπ.).

Η μέτρηση της αντοχής των κονιαμάτων γίνεται αφενός βάσει πειραμάτων κάμψης τριών σημείων σε πρισματικά δοκίμια, αφετέρου βάσει πειραμάτων θλίψης στα τεμάχια που προκύπτουν από τη θραύση των παραπάνω δοκιμίων. Τα δοκίμια, διαστάσεων 40 × 40 × 160 mm, φορτίζονται στο μέσον του ανοίγματος (που είναι 100 mm) με συγκεντρωμένο φορτίο, η μέγιστη τιμή του οποίου χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της εφελκυστικής αντοχής από κάμψη (η τιμή καταγράφεται τη στιγμή της θραύσης των πρισμάτων στο μέσον). Χρησιμοποιούνται τρία δοκίμια για τη μέτρηση της εφελκυστικής αντοχής από κάμψη και άρα έξη για τη μέτρηση της θλιπτικής αντοχής [29].

### **1.2.2 Κονίες**

Κονίες είναι τα υλικά τα οποία όταν αναμειχθούν και υποστούν κατεργασία υπό ορισμένες αναλογίες με ένα ρευστό μέσο (συνήθως νερό) μεταβάλλονται σε εύπλαστο πολτό με συγκολλητικές ιδιότητες. Ο πολτός αυτός αποτελεί μετά την

πήξη και σκλήρυνση το συνδετικό υλικό των κονιαμάτων (π.χ. τσιμεντοκονιάματα, ασβεστοκονίαμα).

Με τον όρο πήξη εννοούμε το φαινόμενο (που οφείλεται σε ξήρανση ή σε φυσικούς, χημικούς ή φυσικοχημικούς παράγοντες) κατά τη διάρκεια του οποίου ο πολτός μετατρέπεται από εύπλαστη μάζα σε υλικά με κάποια στερεότητα και μηχανική αντοχή. Κατά την αρχική πήξη ο πολτός έχει χάσει το μεγαλύτερο μέρος της πλαστικότητάς του και το μεγαλύτερο μέρος από τις συγκολλητικές του ιδιότητες, ενώ κατά την τελική πήξη ο πολτός αρχίζει να εμφανίζει μηχανική αντοχή. Με τον όρο σκλήρυνση εννοούμε το φαινόμενο που ακολουθεί χρονικά την πήξη και κατά τη διάρκεια του οποίου ο πολτός μεταβάλλεται σε στερεό σώμα αποκτώντας την (σχεδόν) τελική του αντοχή.

Οι κονίες κατατάσσονται σε[1]:

α) **Αερικές** (άργιλος, πηλός, υδράσβεστος, μαγνησιακή άσβεστος, δολομιτική άσβεστος, μαγνησιακή κονία, γύψος), οι οποίες πήζουν και σκληρύνονται στον ατμοσφαιρικό αέρα και συντηρούνται μόνο στο περιβάλλον αυτού, ενώ διαλύονται στο νερό ή ακόμα και σε υγρό περιβάλλον.

β) **Υδραυλικές** (υδραυλική άσβεστος, ρωμαϊκή κονία, ποζολανικές κονίες, τσιμέντα), οι οποίες για την σκλήρυνσή τους χρειάζονται νερό και έτσι συντηρούνται σε νερό ή σε περιοδικά υγραινόμενο περιβάλλον (αδιάλυτες στο νερό). Η υδραυλικότητα τους οφείλεται σε συστατικά όπως τα οξείδια του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ), του αργιλίου ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) και του σιδήρου ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Η σκλήρυνση των υδραυλικών κονιών είναι φυσικοχημική διεργασία κατά την οποία τα ένυδρα των διαφόρων φάσεων παρουσιάζουν κατά μεγάλο μέρος κολλοειδή μορφή που μετατρέπεται με την πάροδο του χρόνου σε μικροκρυσταλλική, σε αντίθεση με τις αερικές κονίες, στις οποίες η σκλήρυνση παρουσιάζεται ευθύς εξ αρχής σε κρυσταλλική μορφή.

Τέλος, ανάλογα με την προέλευσή τους οι κονίες διακρίνονται σε φυσικές, οι οποίες χρησιμοποιούνται αυτούσιες όπως συναντώνται στη φύση (π.χ. πηλός, υδραυλική άσβεστος κονίες) και σε τεχνητές, οι οποίες παρασκευάζονται βιομηχανικά (π.χ. άσβεστος, γύψος, τσιμέντο).

### 1.2.2.1 Αερικές Κονίες

#### **Άργιλος, Πηλός**

Άργιλος ή πηλός είναι ένας γενικός όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει ένυδρα αργιλιούχα φυλλοπυριτικά ορυκτά που περιέχουν διάφορες ποσότητες μετάλλων, μεταλλικών οξειδίων και οργανικών ενώσεων. Η άργιλος, που αποτελεί το κύριο συστατικό όλων των πρώτων υλών για την παρασκευή προϊόντων όπτησης και όλων των πυρίμαχων επιχρισμάτων, είναι μείγμα διαφόρων ορυκτών σε μορφή πλακοειδών κόκκων με μέγιστη διάμετρο 2μm. Τα ορυκτά αυτά είναι κυρίως ένυδρες πυριτικές ενώσεις του αργιλίου αναμειγμένες με οξείδια του σιδήρου και άλλες προσμίξεις που καθορίζουν το χρώμα και προέρχονται από την αποσάθρωση πυριτικών πετρωμάτων, όπως για παράδειγμα ο καολίνης [30] (που προέρχεται από τους άστριους και σε καθαρή μορφή έχει τον χημικό τύπο  $2\text{SiO}_2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , ο μοντμοριλλονίτης, ο ιλλίτης και ο αλλοϋσίτης).

Το μείγμα αργίλου και λεπτής άμμου ονομάζεται πηλός, και όταν αναμειχθεί με κατάλληλη ποσότητα νερού σχηματίζει πολτό μεγάλης πλαστικότητας. Η πήξη και σκλήρυνση του πολτού οφείλεται στην εξάτμιση του νερού και χαρακτηρίζεται από συστολή που είναι ανάλογη της περιεκτικότητας σε άργιλο. Ο διαποτισμός του πηλού με νερό επαναφέρει το υλικό στην αρχική κατάσταση πλαστικότητας. Το υλικό αυτό επίσης αποτελεί την πρώτη ύλη για την κατασκευή πλίνθων και προϊόντων κεραμευτικής.

#### **Άσβεστος**

Άσβεστος (ή κεκαυμένη άσβεστος ή καυστική άσβεστος) ονομάζεται το οξείδιο του ασβεστίου,  $\text{CaO}$  λευκού χρώματος, το οποίο προέρχεται από τη διάσπαση του ανθρακικού ασβεστίου,  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$  στους  $900^\circ\text{C}$  περίπου, με απαιτήσεις θερμότητας της τάξης των 880 Wh/KgCaO. Το  $\text{CaCO}_3$  είναι το κύριο συστατικό των ασβεστόλιθων, οι οποίοι περιέχουν και ξένες προσμίξεις, όπως π.χ.  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Η όπτηση του ασβεστόλιθου γίνεται στις ασβεστοκαμίνους. Η απώλεια του  $\text{CO}_2$  στην παραπάνω αντίδραση έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός μεγάλου δικτύου τριχοειδών πόρων, το οποίο δημιουργεί πορώδες μέχρι και 55% και καθιστά τη μάζα σπογγώδη [31].

Η ασβέστος έχει μεγάλη χημική συγγένεια με το νερό και λόγω του μεγάλου πορώδους μπορεί να προσλαμβάνει νερό με έκλυση μεγάλης ποσότητας θερμότητας 320 Wh/KgCaO κατά την αντίδραση:  $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$ . Το προϊόν της αντίδρασης ονομάζεται υδράσβεστος. Η αντίδραση της ενυδάτωσης ονομάζεται σβέση και η ταχύτητα της σβέσης προσδιορίζει τη δραστηριότητα της ασβέστου. Η θερμοκρασία πύρωσης είναι καθοριστική για την τελική δομή της ασβέστου και κατά συνέπεια για την ταχύτητα της σβέσης. Για θερμοκρασίες πύρωσης 800-900°C, 900-1050°C και μεγαλύτερες των 1050 °C το πορώδες της ασβέστου είναι 45-55%, 35-45% και μικρότερο του 35% αντίστοιχα [32], ενώ η παραγόμενη ασβέστος χαρακτηρίζεται ταχείας, ημιταχείας και βραδείας σβέσης αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι με την αύξηση της ταχύτητας σβέσης μειώνονται οι διαστάσεις των ένυδρων τεμαχιδίων της υδρασβέστου και άρα βελτιώνεται η ποιότητά της, δηλαδή αυξάνεται η πλαστικότητα, που επιτρέπει την εύκολη και σωστή κατεργασία των ασβεστοκονιαμάτων.

Η σβέση της ασβέστου μπορεί να είναι υγρή ή ξηρή, οπότε η υδράσβεστος που προκύπτει είναι πολτός (ασβεστοπολτός) που περιέχει συνήθως 35-40% κ.β. στερεή ύλη ή ξηρή σκόνη με μικρά υπολείμματα υγρασίας (μικρότερο του 1% κ.β.), αντίστοιχα. Στην υγρή σβέση ο λόγος νερού/ασβέστου είναι περίπου 3:1 κ.β. και εξαρτάται κυρίως από τη δραστηριότητα και το ποσοστό των ξένων προσμίξεων. Το μίγμα αναδεύεται για 15 περίπου λεπτά και κατόπιν προστίθεται νερό σε αναλογία 20%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  και 80% νερό (κ.β.) για να δημιουργηθεί γάλα ασβέστου, το οποίο αποθηκεύεται σε λάκκους[32]. Στη φάση αυτή, που λέγεται φύραση του πολτού υδρασβέστου και διαρκεί 15-20 μέρες, συνεχίζεται η σβέση και βελτιώνεται η λεπτότητα η οποία προσδίδει στον ασβεστοπολτό πλαστικότητα. Θεωρείται ότι η φύραση έχει πρακτικώς συμπληρωθεί όταν εμφανιστούν στην επιφάνεια του ασβεστοπολτού ρωγμές πλάτους περίπου 1cm. Το στάδιο της φύρασης απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, γιατί τυχόν μη σβησμένοι κόκκοι (ιδιαίτερα ασβέστου βραδείας σβέσης) μετατρέπονται σε  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  μετά την παρασκευή των επιχρισμάτων και λόγω της διόγκωσης που επακολουθεί προκαλούν ζημιές στα κονιάματα. Για την ξηρή σβέση η θεωρητικά απαιτούμενη ποσότητα του προστιθέμενου νερού είναι ίση με 32% του βάρους της ασβέστου. Λόγω όμως της αύξησης της θερμοκρασίας σε

υψηλά επίπεδα σημαντική ποσότητα νερού εξατμίζεται, με αποτέλεσμα το νερό που χρειάζεται τελικά να ανέρχεται στο διπλάσιο περίπου της θεωρητικής ποσότητας.

Ο ασβεστοπολτός αποτελείται από λεπτότατα σωματίδια που δεν υπερβαίνουν τα 2μm. Κατά την ξήρανση τους, τα σωματίδια αυτά παρουσιάζουν δυνάμεις συνάφειας και αναπτύσσουν σημαντική αντοχή. Η σκλήρυνση της υδρασβέστου επιτυγχάνεται με ενανθράκωση του  $\text{Ca(OH)}_2$  κατά την αντίδραση:  $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ . Εξαιτίας της μικρής περιεκτικότητας του ατμοσφαιρικού αέρα σε  $\text{CO}_2$  (περίπου 0,03% κ.ό.) η παραπάνω αντίδραση προχωρά πολύ αργά, με αποτέλεσμα να διαρκεί αρκετούς μήνες. Οι κρύσταλλοι που σχηματίζονται κατά την ενανθράκωση του  $\text{Ca(OH)}_2$  διαλύονται στο νερό (δηλαδή στην υγρασία) και κρυσταλλώνονται εκ νέου. Οι νέοι αυτοί κρύσταλλοι εμπλέκονται και συσσωματώνονται μεταξύ τους, δίνοντας στα κονιάματα της ασβέστου μεγαλύτερη αντοχή[31].

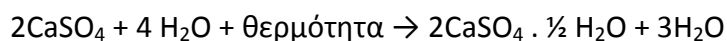
Σημαντικά πλεονεκτήματα της αερικής κονιάς ασβέστου αποτελούν η υψηλή πλαστικότητα, η υψηλή πρόσφυση και η μεγάλη ογκοσταθερότητα. Γι αυτό και βρίσκει αρκετές εφαρμογές σήμερα σε ασβεστοκονιάματα (υδράσβεστος και άμμος), ασβεστοτσιμεντοκονιάματα (τσιμέντο, υδράσβεστος και άμμος), γυψασβεστοκονιάματα (υδράσβεστος, γύψος και άμμος), θηροκονιάματα (υδράσβεστος, θηραϊκή γη και άμμος) και γαλακτώματα υδροχρωματισμών (υδράσβεστος, νερό και ενδεχομένως κόλλα). Εκτός από την παρασκευή υδρασβέστου η κεκαυμένη άσβεστος χρησιμοποιείται για την παρασκευή ασβεστοπυριτικών πλίνθων ( $\text{CaO}$  και πυριτική άμμος) και αεριοσκυροδεμάτων ( $\text{CaO}$  τσιμέντο, λεπτοαλεσμένη πυριτική άμμος και αερακτικό πρόσθετο, όπως π.χ. η σκόνη αλουμινίου).

### **Γύψος**

Η γύψος ή αλαβαστρίτης λίθος ή αλάβαστρο, είναι ορυκτό του ασβεστίου με χημικό τύπο  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (διένυδρο θειικό ασβέστιο). Η γύψος όταν ψηθεί και ανακατευτεί με το νερό γίνεται σκληρή και συμπαγής. Χρησιμοποιήθηκε από τους αρχαίους χρόνους στην οικοδομική, στην κατασκευή εκμαγείων, στα υφάσματα, στην κατεργασία του οίνου και στη ζωγραφική.

Η ορυκτή γύψος ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ανήκει στα θειικά ορυκτά και είναι άχρωμη, λευκή, τεφρή ή έχει διάφορες αποχρώσεις του κίτρινου, κόκκινου, καστανού. Οι κρύσταλλοί της είναι πλακώδεις ή/και πρισματικοί. Φέρει συσσωματώματα σχισμογενή, κοκκώδη, ινώδη, γεηρά, στηλοειδή, δενδριτικά, ροδακοειδή[30]. Η συμπαγής λεπτοκοκκώδης ποικιλία της ονομάζεται αλάβαστρο και χρησιμοποιείται ως υλικό κατασκευής διακοσμητικών αντικειμένων και μικροκοσμημάτων. Απαντάται σε ιζηματογενή πετρώματα μαζί με άλλους εβαπορίτες όπως ο αλίτης, ο ανυδρίτης, ο συλβίνης κ.ά. Η σκληρότητά της είναι 2Mohs και ο σχισμός της κατά την θραύση θεωρείται καλός έως τέλειος. Το ειδικό βάρος της είναι περίπου  $2,5 \text{ g/cm}^3$ .

Αυτό που γνωρίζουμε σήμερα ως γυψοκονίαμα με τις ευρύτερες χρήσεις του στην ορθοπεδική, την οδοντοτεχνία, στις βιομηχανίες φαρμάκων, στα υλικά οικοδομών, τη γεωργία, τη διακόσμηση κτλ., παράγεται μετά από θερμική επεξεργασία και καθαρισμό της ορυκτής γύψου ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), η οποία αφυδατώνεται μερικώς για να παραγάγει μια ημιένυδρη ουσία ( $\text{CaSO}_4 + \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ ). Η χημική αντίδραση που δημιουργεί το γυψοκονίαμα είναι:



Όπως και η άσβεστος, η γύψος ανήκει στις παλαιότερες κονίες και έχει χρησιμοποιηθεί ευρύτατα από την αρχαιότητα (ο αρχαίος φιλόσοφος Θεόφραστος, 327-287 π.Χ. αφιερώνει ένα ολόκληρο κεφάλαιο και στην πραγματεία του “περί λίθων”). Όλα τα είδη γύψου παρασκευάζονται με όπτηση σε διάφορες θερμοκρασίες πετρώματος γύψου (φυσική γύψος), που βρίσκεται στη φύση στη μορφή ένυδρου θειικού ασβεστίου ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) με διάφορες προσμίξεις ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  κ.τ.λ.). Πριν από μία δεκαετία περίπου η παγκόσμια ποσότητα εξόρυξης γύψου ανερχόταν περίπου σε 70 εκτ. τόνοιετησίως[33], ενώ οι σημερινές ποσότητες είναι ακόμα μεγαλύτερες. Τα καλύτερα κοιτάσματα γύψου βρίσκονται στην περιοχή του Παρισιού, ενώ στη χώρα μας πλούσια κοιτάσματα βρίσκονται στη δυτική Ελλάδα, στην Κρήτη και στα Δωδεκάνησα.

Το προϊόν της όπτησης της φυσικής γύψου σε  $125-180^\circ\text{C}$  ονομάζεται πλαστική γύψος ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ ). Έχει πυκνότητα  $2.6-2.7 \text{ tons/m}^3$  και διατίθεται σε μορφή

λευκής σκόνης. Όταν αναμειχθεί με ποσότητα νερού 60-80% του βάρους της σχηματίζει πλαστικό και εργάσιμο πολτό που πήζει και σκληρύνεται (λόγω κρυστάλλωσης του σχηματιζόμενου  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) σε διάστημα μερικών λεπτών (10-30 λεπτά), με ταυτόχρονη αύξηση της θερμοκρασίας και του όγκου του κατά 1% περίπου του αρχικού όγκου. Ανάλογα με τον λόγο νερού/γύψου, το τελικό προϊόν έχει θλιπτική αντοχή της τάξης των 5-15 MPa και εφελκυστική αντοχή 2-7 MPa, λόγω δε της διαλυτότητάς του στο νερό χρησιμοποιείται μόνο σε εφαρμογές εσωτερικών χώρων. Τέτοιες εφαρμογές είναι για παράδειγμα, τα ασβεστοκονιάματα όπου η παρουσία γύψου επιταχύνει την πήξη, οι διακοσμητικοί λίθοι και οι γυψοσανίδες, που η χρήση τους είναι ιδιαίτερα αυξανόμενη τα τελευταία χρόνια στην κατασκευή ψευδοροφών, διαχωριστικών τοίχων, επιχρισμάτων τοίχων κ.τ.λ[1]. Σπανιότερα χρησιμοποιείται και η κονία ανυδρίτη ή τραχεία γύψος ( $\text{CaSO}_4$ ), που παρασκευάζεται με λεπτή άλεση ανυδρίτη (φυσική άνυδρη γύψος) ή από την όπτηση φυσικής γύψου γύρω στους  $1.000^\circ\text{C}$ . Έχει πυκνότητα  $2.800\text{-}2.900 \text{ Kg/m}^3$  και διατίθεται σε μορφή σκόνης με χρώμα κίτρινο έως κόκκινο. Με 40-50%κ.β. νερό παρέχει πολτό που πήζει βαθμιαία μετά από αρκετές ημέρες χωρίς να προκαλείται αύξηση της θερμοκρασίας και μεταβολή του όγκου. Το τελικό προϊόν έχει περίπου διπλάσιες αντοχές από την πλαστική γύψο και έχει χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή υποστρωμάτων δαπέδων ή δαπέδων χωρίς αρμούς [34].

Πέραν της προφανούς χρήσης του γυψοκονιάματος στην οικοδομική και την κατασκευή των ομώνυμων αγγείων τα οποία βέβαια κατασκευάζονταν και από γυαλί, άργιλο ή μέταλλο, φαίνεται πως χρησιμοποιείτο επίσης στην αρχαιότητα και ως φάρμακο για τους στομαχικούς πόνους, ανακατεμένος με κηρωτή. Τα παλαιότερα ίχνη γυψοκονιάματος είναι 9.000 έτη παλαιά, και βρέθηκαν στην Ανατολία και τη Συρία. Επίσης είναι γνωστό ότι 5.000 έτη πριν, οι Αιγύπτιοι έκαιγαν τη γύψο με φωτιά στο εξωτερικό περιβάλλον και ύστερα την έτριβαν σε σκόνη, την οποία στη συνέχεια ενυδάτωναν και την χρησιμοποιούσαν για τη συγκόλληση τμημάτων των μνημείων. Επίσης, χρησιμοποιούσαν τη γύψο για να κατασκευάζουν εκμαγεία, χρησιμοποιώντας ως πρότυπο το ίδιο το ανθρώπινο σώμα. Στην αρχαία Ελλάδα εκτός από την κατασκευή αγαλματιδίων η ορυκτή γύψος



στη διάφανη μορφή της (σεληνίτης) χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή εκμαγείων σε αντίγραφα ελληνικών αγαλμάτων.

### ***Μαγνησιακή Άσβεστος, (Δολομιτική Άσβεστος)***

Παρασκευάζονται με πύρωση μαγνησιακών και δολομιτικών ασβεστολίθων. Η ύπαρξη MgO στις ασβέστους αυτές επιφέρει μείωση της δραστικότητάς τους και αλλοίωση του χρώματός τους από άσπρο σε γκρι. Τα αντίστοιχα κονιάματα είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά στην προσβολή από καιρικές συνθήκες ενώ τα δολομιτικά κονιάματα είναι λιγότερο κατάλληλα για επιχρίσματα λόγω της αρκετά αργής πήξης και σκλήρυνσης τους[1]. Τα κονιάματα αυτά έχουν αργή ενανθράκωση αλλά και καλές τελικές αντοχές.

### ***Μαγνησιακή κονία Sorel***

Ονομάζεται και κονία Sorel, και παρασκευάζεται με πύρωση του μαγνησίτη (μεγάλα αποθέματα του οποίου συναντώνται στην Εύβοια) σε θερμοκρασία 700-800°C, σύμφωνα με την αντίδραση:  $MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2$ . Το MgO κονιοποιείται και αναμιγνύεται με υδατικό διάλυμα  $MgCl_2$  και το μίγμα μετατρέπεται σε σκληρή μάζα η οποία επιδέχεται λείανση. Περίσσεια  $MgCl_2$  προκαλεί υγροσκοπικότητα, ενώ προσθήκη μικρότερης από την απαιτούμενη ποσότητα  $MgCl_2$  μετατρέπει τη μάζα σε πορώδη.

Τα κονιάματα με βάση την μαγνησιακή κονία περιέχουν συνήθως οργανικές ή ανόργανες ύλες (π.χ. πριονίδι, τεμαχίδια φελλού, κισσηρόσκονη) και παρουσιάζουν μεγάλη σταθερότητα όγκου. Το κονίαμα με πριονίδι και κονία Sorel έχει τύχει εφαρμογής στην παρασκευή πλακών επιστρώσεων και επενδύσεων και στην κατασκευή δαπέδων χωρίς αρμούς. Δομικά προϊόντα από τέτοια κονιάματα είναι γνωστά και ως “ξυλόλιθοι”[1].

Τα κονιάματα Sorel χρησιμοποιήθηκαν κατά το παρελθόν σε πολλά έργα αποκατάστασης ιστορικών μνημείων. Οι αποκαταστάσεις αυτές κρίθηκαν ασύμβατες σε σχέση με τα δομικά υλικά των μνημείων και η προσπάθεια αφαίρεσης των Sorel συνεχίζεται σε πολλές περιπτώσεις έως σήμερα.

### 1.2.2.2 Υδραυλικές Κονίες

#### **Φυσική Υδραυλική Άσβεστος**

Η υδραυλική άσβεστος παρασκευάζεται από την όπτηση αργιλούχων ασβεστολίθων σε καμίνια συνεχούς λειτουργίας και σε θερμοκρασία 1.000-1.200<sup>0</sup>C. Το προϊόν σβήνεται (ξηρά σβέση) και διατίθεται στην αγορά σε μορφή σκόνης τεφρού χρώματος. Λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας σε ελεύθερη άσβεστο, η υδραυλική άσβεστος σπάνια χρησιμοποιείται αυτούσια για υδραυλικά κονιάματα, αλλά συνήθως αναμειγνύεται με ποζολάνες (το ελεύθερο SiO<sub>2</sub> των οποίων δεσμεύει την ελεύθερη άσβεστο). Είναι γενικά προϊόν με λιγότερες χρήσεις (εκτός Ελλάδας) και σήμερα έχει εκτοπιστεί από το τσιμέντο [23].

#### **Τσιμέντα**

Τσιμέντα ονομάζονται οι υδραυλικές κονίες που αποτελούνται κυρίως από ενώσεις οξειδίου του ασβεστίου, οξειδίου του πυριτίου, οξειδίου του αργίλου και οξειδίου του ασβεστίου[24]. Μαζί με το νερό τα τσιμέντα (ενυδάτωση τσιμέντου), έχουν την ιδιότητα να πήζουν και να σκληραίνουν αποκτώντας συνδετικές ικανότητες και ανθεκτικότητα στο χρόνο. Η ανάμιξη του τσιμέντου με άμμο και νερό δημιουργεί την κονία του τσιμέντου.

Ως τσιμέντο Portland ορίζεται το προϊόν μετά από έψηση σε θερμοκρασία κλινκεροποίησης (1.380-1.420<sup>0</sup>C) ενός κατάλληλα αλεσμένου και πλήρως ομογενοποιημένου μίγματος που αποτελείται περίπου από 75% ασβεστολιθικά υλικά και 25% αργιλοπυριτικά υλικά και συνάλεση του προκείμενου προϊόντος που καλείται κλίνκερ με την κατάλληλη ποσότητα γύψου. Ο υδραυλικός χαρακτήρας του τσιμέντου Portland αποδίδεται κυρίως στα προϊόντα ενυδάτωσης του πυριτικού διασβεστίου (C<sub>2</sub>S) και του πυριτικού τριασβεστίου (C<sub>3</sub>S), που είναι τα κύρια συστατικά του κλίνκερ και αποτελούν τα 2/3 της μάζας του και δευτερευόντως στα προϊόντα ενυδάτωσης των δύο άλλων συστατικών του που είναι το αργιλικό τριασβέστιο (C<sub>3</sub>A) και το σιδηραργιλικό τετρασβέστιο (C<sub>4</sub>AF). Εκτός από την χημική σύσταση, για να γίνει αποδεκτό ένα τσιμέντο Portland πρέπει να συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις για τον χρόνο πήξης, την σταθερότητα όγκου και κυρίως τις αντοχές (που είναι συνάρτηση της λεπτότητας του), που θέτουν τα

διάφορα πρότυπα. Στις απαιτήσεις αυτές μπορούν να προστεθούν και άλλες όπως η θερμότητα ενυδάτωσης κ.τ.λ.[24].

### ***Κατηγορίες Τσιμέντων Portland***

Ανάλογα με τη σύνθεση τους, το βαθμό άλεσης και τα πρόσθετα υλικά, τα τσιμέντα κατατάσσονται σε διάφορους τύπους και κατηγορίες αντοχών. Σύμφωνα με τον ελληνικό κανονισμό τσιμέντων (EN 196-1) τα τσιμέντα χωρίζονται στους εξής τύπους: Από άποψη σύνθεσης σε [35]:

- **Τύπος I** (Τσιμέντο Portland) Χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που προέρχονται από την άλεση του κλίνκερ με προσθήκη γύψου 2-3% και filler<3% κ.β.
- **Τύπος II** (Τσιμέντο Portland με ποζολάνες) Χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που περιέχουν ποζολάνες. Το αδιάλυτο υπόλειμμα ανέρχεται σε ποσοστό 20% κ.β.
- **Τύπος III** (Ποζολανικά τσιμέντα Portland) Περιέχουν ποζολάνη σε ποσοστό μεγαλύτερο από εκείνα του τύπου II. Το αδιάλυτο υπόλειμμα ανέρχεται σε ποσοστό 20-40%. Παρουσιάζουν χαμηλότερη θερμότητα ενυδάτωσης, και ενδείκνυνται σε ογκώδη έργα(πχ. υπερχειλιστές ΔΕΗ, φράγματα κλπ)
- **Τύπος IV** (SR) (Τσιμέντο Portland ανθεκτικό στα θειικά άλατα ) Δεν περιέχουν ποζολάνες αλλά το αργλικό τριασβέστιο ( $C_3A$ ) πρέπει να είναι μικρότερο του 3,5% και η περιεκτικότητα σε τριοξείδιο του θείου ( $SO_3$ ) να μην υπερβαίνει το 2,5%. Χρησιμοποιείται στην παρασκευή σκυροδέματος για κατασκευές που βρίσκονται σε πολύ διαβρωτικό περιβάλλον (πχ. Μονάδες βιολογικού καθαρισμού, σωλήνες αποχέτευσης).

### **1.2.3 Αδρανή**

Ως αδρανή ορίζονται τα βοηθητικά δομικά υλικά που προέρχονται από φυσικούς λίθους με μηχανικό τεμαχισμό ή ως προϊόντα ή παραπροϊόντα βιομηχανικής δραστηριότητας. Τα αδρανή υλικά σπάνια μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτούσια (π.χ. έργα σιδηροδρομικών γραμμών).

Τα αδρανή δεν παρουσιάζουν χημικές συνδετικές ιδιότητες μεταξύ τους, παρά μόνο φυσική συνοχή λόγω της γεωμετρικής ταξινόμησης των κόκκων τους και του βάρους τους. Έτσι, τα αδρανή πρέπει να αναμιχθούν με ένα πολτό συγκολλητικής ύλης, όπως το τσιμέντο, ο ασβέστης, η ασφαλτος κ.α., για να προκύψουν σύνθετα δομικά

υλικά που θα χρησιμοποιηθούν σε κατασκευές. Κατά τη διάρκεια της πήξης και σκλήρυνσης των μιγμάτων αυτών, τα λίθινα προϊόντα δεν συμμετέχουν ενεργά και για αυτό καλούνται αδρανή υλικά. Επιπλέον, επειδή τα αδρανή υλικά προέρχονται κυρίως από τεμαχισμό φυσικών λίθων, διατηρούνται σε αυτά οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του μητρικού υλικού.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των αδρανών που επηρεάζουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος είναι η αντοχή (αντοχή του μητρικού πετρώματος) η καθαρότητα (η ύπαρξη δηλαδή ή όχι πρόσμικτων ουσιών), η πρόσφυση με την κονία, η χημική συμπεριφορά τους, και η κοκκομετρική τους διαβάθμιση(σχήμα και μέγεθος κόκκων)[35].

Τα αδρανή υλικά ανάλογα με την προέλευσή τους μπορούν να διαιρεθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες [35]:

- **Φυσικής προέλευσης:**

Έχουν ληφθεί από το φυσικό περιβάλλον και έχουν υποστεί μηχανική επεξεργασία θραύσης, πλύσιμο και διαλογή (π.χ. θραυστά πετρώματα, αλλουβιακοί σχηματισμοί, ποταμίσιες, λιμναίες ή θαλάσσιες αποθέσεις, αποθέσεις άμμων ή χαλικιών, λάβα, λατομικά προϊόντα)

- **Τεχνητά ή Βιομηχανικά:**

Έχουν προκύψει ως προϊόντα ή παραπροϊόντα βιομηχανικής δραστηριότητας από χημική ή θερμική επεξεργασία πρώτων υλών ορυκτής ή άλλης προέλευσης (π.χ. τέφρες, σκωρίες, υπολείμματα καύσεων, άργιλοι, βερμικουλίτης, περλίτης υλικά στίλβωσης).

Τα αδρανή που χρησιμοποιούνται στα κονιάματα είναι κοκκώδη φυσικά, τεχνητά ή ανακυκλωμένα υλικά, τα οποία με την προσθήκη ενός ή περισσότερων συνδετικών υλικών (κονιών), νερού και ενδεχομένως ειδικών προσθέτων σχηματίζουν κονίαμα. Το συνηθέστερο αδρανές που χρησιμοποιείται στα κονιάματα είναι η άμμος.

Στην αρχαιότητα έχουν χρησιμοποιηθεί και θραύσματα κεραμικού ή κίσηρης(ελαφρόπετρα) ως αδρανή στην παρασκευή κονιαμάτων. Γινόταν χρήση των παραπάνω αδρανών όταν το κονίαμα έπρεπε να είναι ελαφρύ και με

μεγαλύτερη ελαστικότητα απ'ότι συμβατικό κονίαμα με άμμο. Ταυτόχρονα, εξαιτίας της παρουσίας αργιλοπυριτικών ενώσεων στη μάζα τους, σε επαφή με την υδράσβεστο, ήταν δυνατός ο σχηματισμός ενυδατωμένων αργιλοπυριτικών προϊόντων του ασβεστίου στη διεπιφάνεια συνδετικής ύλης - αδρανούς, προκαλώντας, λόγω δημιουργίας χημικού δεσμού, αύξηση της πρόσφυσης των αδρανών στη συνδετική κονία με ταυτόχρονη αύξηση της μηχανικής αντοχής του κονιάματος[36].

Τα αδρανή υλικά θα πρέπει να ικανοποιούν ορισμένες απαιτήσεις για να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν στα κονιάματα. Επιπλέον, τα αδρανή δεν πρέπει να περιλαμβάνουν επιβλαβείς προσμίξεις που θα επηρεάζουν την σταθερότητα, αντοχή και λοιπές ιδιότητες των κονιαμάτων. Επίσης η υγρασία τους είναι καθοριστικός παράγοντας. Η υγρασία δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 3%. Θα πρέπει πάντα να υπολογίζεται πριν τον καθορισμό των αναλογιών ενός κονιάματος.

Το πιο διαδεδομένο αδρανές είναι η άμμος. Από τη χημική σύσταση της εξαρτάται αν είναι παθητικό ή ενεργό αδρανές, σε σχέση με το περιβάλλον που εφαρμόζεται. Στις περισσότερες περιπτώσεις η άμμος προέρχεται από ένα κοντινό ποτάμι, από ξηρές κλίνες, ή ακόμα από θαλάσσια ακτή. Μπορεί να έχει πλυθεί, σβηστεί, ή να έχει περάσει από κοσκίνηση. Πιο συχνά χρησιμοποιείται άμμος πυριτικής ή ασβεστολιθικής φύσης. Η κοκκομετρική της διαβάθμιση συνήθως έχει ένα εύρος μεγέθους κόκκων, έτσι μπορεί να είναι από πολύ λεπτή μέχρι αρκετά τραχύς, ομογενής και κανονική, ή μεταβαλλόμενου μεγέθους, καμιά φορά εισάγονται και μεγαλύτερα χαλίκια. Ο τύπος του αδρανούς και η κοκκομετρική του διαβάθμιση είναι ένα χαρακτηριστικό στοιχείο για το είδος και τη χρήση του κονιάματος. [37]

Η φυσική – συλλεκτή άμμος αποτελείται από κόκκους γωνιώδης και στρογγυλεμένους και αυτό εξαρτάται από τον τρόπο συλλογής (παραλίες θαλασσών, κοίτες ποταμών). Ανάλογα με τη σύσταση της (δηλαδή ανάλογα με το συστατικό που περιέχει σε μεγαλύτερο ποσοστό) διακρίνεται σε χαλαζιακή,

ασβεστολιθική, αργιλική κ.α. Η χαλαζιακή άμμος, που προέρχεται από θαλάσσιες περιοχές είναι η πιο κατάλληλη για την παρασκευή δομικών υλικών, καθώς είναι σκληρή, γωνιώδης, ανθεκτική στους καιρικούς παράγοντες και καθαρή, χωρίς ξένες προσμίξεις. Η ποταμίσια άμμος περιέχει υψηλό ποσοστό άμορφων προσμίξεων οξειδίου του πυριτίου. Για μη απαιτητική χρήση σε κοινά ασβεστοκονιάματα δεν χρειάζεται πλύσιμο, αν χρησιμοποιηθεί όμως σε σκυρόδεμα απαιτείται πλύση.

Η θραυστή άμμος διακρίνεται ανάλογα με τον τρόπο παρασκευής σε α) άμμο θραυστήρα, β) άμμο τριβείου και γ) ειδική άμμο τριβείου. Η παραγωγή της θραυστής άμμου γίνεται με τροφοδότηση του θραυστικού συγκροτήματος με καθαρό λατομικό υλικό, απαλλαγμένο από σβόλους αργίλου και κάθε ξένη πρόσμιξη, ώστε το τελικό προϊόν να παρουσιάζει σταθερότητα ποιοτικών χαρακτηριστικών και να είναι απαλλαγμένο από, υψηλό ποσοστό ασβεστολιθικής παιπάλης, αργιλικές προσμίξεις, γωνιώδης κόκκους και υπερμεγέθεις κόκκους.

Επιπλέον, κατόπιν έρευνας, είναι κοινά αποδεκτό πλέον ότι εάν πρόκειται για ασβεστοκονίαμα προτιμάται η χρήση ασβεστολιθικής άμμου, λόγω της καλύτερης πρόσφυσης της άσβεστου με το αδρανέςυλικό, εξαιτίας της χημικής συγγένειας. Έτσι, πολύ καλά μηχανικά αποτελέσματα έχουν παρουσιάσει στη διάρκεια του χρόνου τα επιφανειακά επιχρίσματα ασβέστη – σκόνηςμαρμάρου, ενώ αντίθετα, κονίαμα ασβέστη - χαλαζιακής άμμου έχει παρουσιάσει μέτρια μηχανική συμπεριφορά. Στην περίπτωση που η συνδετική μας ύλη είναι υδραυλική, η οποία περιέχει ποσότητα  $\text{SiO}_2$ , τότε, επίσης λόγω χημικής συγγένειας η χαλαζιακή άμμοσεκτιμάται να έχει καλύτερη συμπεριφορά.

Όταν παρασκευάζεται ένα κονίαμα οι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι:

- Το μέγεθος των κόκκων των αδρανών και η διαβάθμισή τους
- Ο λόγος βάρους κονίας/αδρανών

Αυτές οι δύο τιμές παρέχουν πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά και την τεχνολογία παραγωγής των παραδοσιακών κονιαμάτων.

Είναι γνωστό ότι ένας ακριβής λόγος άσβεστου/αδρανών και μια καλή διαφοροποίηση του μεγέθους των κόκκων επιτρέπουν να αποφευχθούν φαινόμενα συστολής και να ληφθούν πιο ανθεκτικά κονιάματα. Μετά την παραγωγή της κονίας, ορισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά μετριούνται ώστε να εκπληρώσει το κονίαμα τις παραπάνω λειτουργίες, μερικά από αυτά είναι η εργασιμότητα και η αντοχή του κονιάματος όταν βρίσκεται στη μορφή πολτού.

Η προσθήκη των αδρανών στα κονιάματα συνιστάται για οικονομικούς και τεχνικούς λόγους. Τα κονιάματα που παράγονται χωρίς προσθήκη αδρανών, συστέλλονται κατά την πήξη και την σκλήρυνση, με αποτέλεσμα την δημιουργία επιφανειακών ρωγματώσεων. Από οικονομική άποψη τα αδρανή υλικά είναι πιο φθηνά από τις κονίες.

#### **1.2.4 Πρόσθετα**

Τα πρόσθετα που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση των διάφορων χαρακτηριστικών των κονιαμάτων χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Ποζολάνες
- Οργανικά Πρόσθετα

##### **1.2.4.1 Ποζολάνες**

Ο επίσημος ορισμός της ποζολάνας δίνεται από τους κανονισμούς ASTM C618 ως “πυριτικό ή αργιλοπυριτικό υλικό, το οποίο από μόνο του δεν παρουσιάζει υδραυλικές ιδιότητες αλλά σε λεπτοαλεσμένη μορφή και με την παρουσία υγρασίας, αντιδρά με το  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  σε συνήθη θερμοκρασία και δημιουργεί ενώσεις που έχουν συνδετικές ιδιότητες”. Η δραστηριότητα των ποζολάνων οφείλεται στο περιεχόμενο άμορφο πυρίτιο και αργίλιο που περιέχουν.

Η πρακτική της τροποποίησης των ασβεστιτικών κονιαμάτων με την προσθήκη ενεργών πυριτικών και αργλικών υλικών ήταν γνωστή κατά την κλασική περίοδο, σε κατασκευές που έρχονταν σε επαφή με το νερό, όπως δεξαμενές, αγωγοί, κρήνες και λιμενικά έργα, καθώς και ελληνικά και ρωμαϊκά λουτρά. Για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις ο Βιτρούβιος αφιερώνει ένα ολόκληρο ειδικό κεφάλαιο στο πολύτομο έργο του. Οι ποζολάνες χρησιμοποιούνταν εκτενώς στη Μεσόγειο από την

αρχαιότητα. Η ηφαιστειακή γη της Σαντορίνης, γνωστή ως Θηραϊκή γη, χρησιμοποιούνταν ήδη από τον 7<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ. Κονιάματα με ποζολάνες χρησιμοποιήθηκαν και στην κατασκευή κατά τους κλασσικούς χρόνους[38]. Σε κατοικίες συναντάμε δάπεδα από αργιλόχωμα με ή χωρίς την προσθήκη αμμοχάλικου. Χρησιμοποιήθηκε επίσης ως υλικό συνδετικό των ψηφίδων στα πολύχρωμα μωσαϊκά δαπέδων, στα οποία το κονίαμα αποτελούνταν από ασβέστη, κεραμάλευρο και, συχνότατα, άμμο. Αυτή η χρήση των κονιαμάτων είχε κάνει την εμφάνιση της ήδη στα Μυκηναϊκά χρόνια, αλλά η εφαρμογή τους επεκτείνεται κατά τον 5<sup>ο</sup> και τον 4<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ.

Οι Ετρούσκοι γνώριζαν τις ιδιότητες παρόμοιων γαιών που τις χρησιμοποιούσαν για υποβρύχιες κατασκευές. Μια ακόμη πηγή[39] αναφέρει ότι για την κατασκευή του λιμανιού του Ηρώδη στην Καισαρεία χρησιμοποιήθηκαν ποζολανικά υλικά. Τα ευρήματα υποβρυχίων κατασκευών, που διατηρήθηκαν έως τις μέρες μας, είναι η απόδειξη της πραγματικά υψηλής κατασκευαστικής τεχνικής τους. Από πηγές[40] γίνεται αντιληπτό ότι οι αρχαίοι Έλληνες τεχνίτες ήταν εξοικειωμένοι με την τεχνολογία παρασκευής των ποζολανικών κονιαμάτων, τα οποία ονομάστηκαν επίσης και 'φυσικά τσιμέντα', αφού κατά τη μελέτη μιας αρχαϊκής δεξαμενής στην αρχαία πόλη Κάμειρο της Ρόδου, διαπιστώθηκε το γεγονός ότι η δεξαμενή αυτή, μετά από τριεξχλιετίες διατηρείται σε άριστη κατάσταση. Πρόκειται για υδραυλικό κονίαμα με Θηραϊκή γη, άσβεστο και αδρανή πυριτικά και ασβεστιτικά.

### **Φυσικές ποζολάνες**

Τα υλικά αυτά σχηματίζονται από συνδυασμό ορυκτών. Αποτελούνται κυρίως από πυρίτιο, αργίλιο και από μικρότερες και ποικίλες ποσότητες άλλων ορυκτών που περιέχουν Ca, Mg, Fe, K και Na, τα οποία εκτινάσσονται από ηφαίστεια με τη μορφή λεπτόκοκκων, υαλωδών υλικών [41]. Ανάλογα με τη φύση των ορυκτολογικών συστατικών τους διακρίνονται σε: ηφαιστειακές υάλους, ζεόλιθους, ή μερικά ζεολιθοποιημένες υάλους και δραστικές μορφές ένυδρων πυριτικών. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα πυροκλαστικά υλικά, δηλαδή τα φυσικά αποθέματα ηφαιστειακών πηγών, με μεγάλη περιεκτικότητα σε πυριτικά πετρώματα, όπως είναι η Θηραϊκή γη.



Γνωστές πηγές περιλαμβάνουν την rozzolana από το Pozzuoli στην Ιταλία, την ηφαιστειακή ποζολάνη από τη νοτιοανατολική Γαλλία (trass), τη Μηλαϊκή γη, όπως επίσης και την ελαφρόπετρα. Άλλα υαλώδη ηφαιστειακά υλικά όπως ο βασάλτης, μπορεί να έχουν ήπιες ποζολανικές ιδιότητες σε πολύ λεπτοαλεσμένη μορφή. Οι φυσικές αυτές ποζολάνες, χρησιμοποιήθηκαν ευρέως σε μηχανικές εργασίες κατά τον 19<sup>ο</sup> αιώνα σε συνδυασμό με τον υδραυλικό ασβέστη. Αναγνωρίστηκαν ως υλικά κατάλληλα για παραθαλάσσιες και άλλες εργασίες σε δύσκολα και υγρά περιβάλλοντα, αλλά και για κατασκευαστικές εργασίες γενικότερα[23].

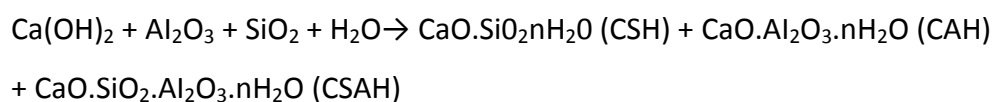
### **Τεχνητές Ποζολάνες**

Σαν τεχνητές ποζολάνες ορίζονται τα διάφορα αργιλοπυριτικά υλικά που λαμβάνονται μετά από συγκεκριμένη θερμική κατεργασία. Οι τεχνητές ποζολάνες που χρησιμοποιήθηκαν στην αρχαιότητα αφορούσαν σε λεπτά θραύσματα από κεραμικά (κεραμίδια, οπτόπλινθους, αγγεία κλπ.). Η δραστηριότητα αυτών των ποζολανών εξαρτάται από την αρχική σύνθεση της αργίλου (πηλού) που χρησιμοποιείται κατά την έψηση, από τη θερμοκρασία έψησης, καθώς και από το τελικό μέγεθος των κόκκων. Δεδομένου ότι κάθε άργιλος έχει διαφορετική βέλτιστη θερμοκρασία έψησης, η έψηση της αργίλου στη σωστή θερμοκρασία μπορεί ακόμη και να διπλασιάσει την αντοχή της σε σχέση με τη φυσική (άψητη) άργιλο. Επιπλέον, το μέγεθος των θραυσμάτων που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι όσο το δυνατό μικρότερο, ώστε να αυξηθεί η ειδική επιφάνεια της ποζολάνης άρα και η δραστηριότητα της.

Γενικά, οι ποζολάνες είναι πιο ενεργές όταν το μέγεθος των σωματιδίων τους είναι μικρότερο από 75μm, ενώ εάν το μέγεθος των σωματιδίων τους είναι μεγαλύτερο από 300μm συνήθως δρουν ως αδρανή[42].

Οι σημερινές τεχνητές ποζολάνες που χρησιμοποιούνται είναι οι ιπτάμενες τέφρες (PFA: Pulverized Fuel Ash), σκωρίες υψικαμίνων (blast furnace slag), η πυριτική παιπάλη (silica fume) και ο μετακαολίνης που προκύπτει από έψηση του καολίνης[23]. Επιπλέον αν επιχειρήσουμε μια σύγκριση με τις τεχνητές αργίλους της αρχαιότητας, παρατηρούμε ότι εξαιτίας της διαφορετικής τεχνολογίας παραγωγής τους παραγότανε ανώτερης ποιότητας άργιλοι. Με την προσθήκη ποζολάνας στο

υδροξείδιο του ασβεστίου, παρουσία νερού σχηματίζονται ένυδρες ενώσεις του Ca, Si και του Al (CSH, CAH), τα οποία είναι υπεύθυνα για την γρήγορη σκλήρυνση του κονιάματος καθώς και για την ανάπτυξη υψηλών αντοχών. Η προστιθέμενη ποζολάνα πρέπει να είναι εξαιρετικά ενεργή, δηλαδή να περιέχει υψηλή συγκέντρωση άμορφων ενώσεων του πυριτίου και αργιλίου, έτσι ώστε να είναι σε θέση να αντιδράσει με το Ca(OH)<sub>2</sub> σε συνήθεις χαμηλές θερμοκρασίες. Η αντίδραση που συνοδεύει τα παραπάνω είναι:



Προσθήκη ποζολάνας μπορεί να γίνει και σε κονία υδραυλικής άσβεστου που περιέχει μικρή ποσότητα ενεργού πυριτίου προκειμένου να βελτιώσουμε τις ποζολανικές της ιδιότητες.

#### 1.2.4.2. Οργανικά Πρόσθετα

Κατά το παρελθόν έχει γίνει χρήση οργανικών ενώσεων στα κονιάματα προκειμένου να επιτευχθεί βελτίωση κάποιων χαρακτηριστικών τους όπως η εργασιμότητα, η αύξηση των μηχανικών αντοχών, η ανθεκτικότητα στον πάγο κ.τ.λ. Τα κύρια πρόσθετα οργανικής φύσεως που έχουν χρησιμοποιηθεί στα κονιάματα παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα [43].

**Πίνακας 4: Πρόσθετα οργανικής φύσης**

Πρόσθετο	Επίδραση στο κονίαμα	Υλικό Οργανικής Προέλευσης
<b>Αερακτικό</b>	Βελτίωση ανθεκτικότητας	βύνη, μπύρα, δέρμα ζώων
<b>Σταθεροποιητής</b>	Σταθεροποίηση γαλακτωμάτων	κρόκος αυγού, λίπη, κερι
<b>Filler</b>	Βελτίωση σκληρότητας	κόλλα, αραβική μαστίχα, τάλκης, ζάχαρη, χυμός φρούτων, γλουτένη, ρύζι
<b>Ανθεκτικό στην πήξη</b>	Αντίσταση στη φθορά από	ζάχαρη

<b>νερού</b>	πάγο	
<b>Πρόσθετο Διαστολής</b>	Προκαλεί διαστολή κατά την πήξη	ζωικές και φυτικές κόλλες
<b>Μετατροπέας</b>	Μεταβάλλει υπάρχοντα διαλύματα	ασπράδι αυγού, αίμα, αλευρόκολλα, κερατίνη, κολλαγόνο, καζεΐνη, βόραξ, φυτικές ρητίνες
<b>Αναστολέας μεταβολής όγκου</b>	Δρα ανασταλτικά στη συστολή (μεταβολή όγκου)	κερί μέλισσας
<b>Πλαστικοποιητής</b>	Παρέχει πλαστικότητα, μειώνει τον εύθρυπτο, αυξάνει την εργασιμότητα	ζάχαρη, γάλα, ασπράδι αυγών, λάδι λιναρόσπορου, λίπος χοίρου, γάλα σύκου, ζωική κόλλα
<b>Επιβραδυντής</b>	Επιβραδύνει την ταχύτητα πήξης	ζάχαρη, γάλα, ασπράδι αυγών, σακχαρίνη, βόραξ
<b>Σταθεροποιητής</b>	Αυξάνει την σκληρότητα και την ακαμψία	ζάχαρη, φυτικές και ζωικές κόλλες, μελάσα
<b>Πρόσθετο που βελτιώνει τις αντοχές</b>	Αυξάνει την αντοχή του διαλύματος	κερατίνη, καζεΐνη, τανίνη, κόλλα, λάδι λιναρόσπορου, τρίχες, άχυρο, ρύζι, ζύμη σικάλεως, ίνες βαμβακιού, ζωικές κόλλες, χυμός σύκου με κρόκο αυγού, ζάχαρη, ασπράδι αυγού
<b>Πηκτικό γαλακτώματος</b>	Πήζει το γαλάκτωμα	αίμα, ξυνισμένο γάλα, καζεΐνη, τυρί, κολλαγόνο, ζελατίνη

### 1.2.1 Κατάταξη ιστορικών κονιαμάτων

Η ταξινόμηση των ιστορικών κονιαμάτων σε κατηγορίες, ανάλογα με τη φύση της συνδετικής ύλης και των αδρανών υλικών γίνεται ως εξής[44,45,46,47]:

**Συμβατικά ασβεστικά κονιάματα:** παρασκευάζονται με υδράσβεστο και αδρανή ασβεστικής ή αργιλλοπυριτικής φύσης, ή μίγμα και των δύο σε διάφορες αναλογίες, με συνήθη αναλογία υδρασβέστου/αδρανή 1:3 κατά βάρος.

**Κονιάματα με θραυσμένο κεραμικό:** παρασκευάζονται με υδράσβεστο ως συνδετική ύλη και με θραυσμένο κεραμικό ως αδρανές σε διάφορες κοκκοδιαβαθμίσεις, ανάλογα με την εφαρμογή τους. Τα κονιάματα αυτά παρουσιάζουν υδραυλικά χαρακτηριστικά από τις αντιδράσεις ποζολανικής φύσης, που πραγματοποιούνται στη διεπιφάνεια συνδετικής ύλης/κεραμικού. Η αναλογία συνδετικής ύλης/αδρανή κατ' όγκο κυμαίνεται από 1:2 - 1:4 ανάλογα με την ειδική εφαρμογή τους. Χαρακτηριστική ιδιότητα των κονιαμάτων αυτών, είναι η αυξημένη ελαστικότητά τους και η ικανότητα αντοχής τους σε τάσεις.

**Κονιάματα υψηλής επί τόπου σβέσης της ασβέστου:** παρασκευάζονται με ανάμιξη επί τόπου του CaO με τα αδρανή και τα ενεργά αδρανή και προσθήκη νερού. Οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την επί τόπου έσβεση της ασβέστου βοηθούν στην αντίδραση των ποζολανικών προσθέτων με την παραγόμενη υδράσβεστο. Τα κονιάματα αυτά παρουσιάζουν σημαντικές υδραυλικές ιδιότητες και μηχανικές αντοχές μεγαλύτερες από τα κονιάματα με θραυσμένο κεραμικό. Από τις μεθόδους ανάλυσης έχει εκτιμηθεί για τα κονιάματα αυτά μια μέση αναλογία συνδετικής ύλης/αδρανή 1:3.

**Υδραυλικά κονιάματα:** παρασκευάζονται από υδραυλική άσβεστο και ενεργά αδρανή (ποζολάνη), με μέση τιμή αναλογίας συνδετικής ύλης/αδρανή 1:3. Τα κονιάματα αυτά παρουσιάζουν αξιόλογες μηχανικές αντοχές, λόγω της ανάπτυξης ενώσεων με υδραυλικό χαρακτήρα αναπτύσσοντας ταυτόχρονα συμβατές μικροδομές με τα ιστορικά δομικά στοιχεία των τοιχοποιιών, καθώς επίσης και αξιόλογη μακροβιότητα.

**Κονιάματα με γύψο:** Τα κονιάματα αυτά είναι παρασκευασμένα από γύψο, ως συνδετική ύλη, αναμεμιγμένη με διάφορα αδρανή, και σε αναλογία συνδετικής

ύλης/αδρανή 1:2 - 1:3. Τα κονιάματα αυτά παρουσιάζουν συνήθως χαμηλές μηχανικές αντοχές, που βελτιώνονται με πρόσθετα οργανικής και ανόργανης φύσης, ανάλογα με την εφαρμογή τους.

**Κονιάματα διπλής εσωτερικής τοιχοποιίας:** παρασκευάζονται από υδράσβεστο, αδρανή και ενεργά αδρανή σε διάφορες αναλογίες, ή από υδράσβεστο και ενεργά αδρανή με παράλληλη προσθήκη νερού κατά τη διάρκεια της εφαρμογής τους. Η υψηλή θερμοκρασία, που αναπτύσσεται ευνοεί την αλληλεπίδραση συνδετικού υλικού ενεργών αδρανών, με συνέπεια το σχηματισμό αργιλοπυριτικών υδραυλικών φάσεων. Παρουσιάζουν σημαντικές μηχανικές αντοχές.

### 1.2.5 Φθορά των κονιαμάτων

Οι αιτίες φθοράς των παλιών κονιαμάτων είναι ποικίλες και συχνά αλληλοεξαρτώμενες. Συνήθως προέρχονται από κακοτεχνίες, υγρασία, διαλυτά άλατα, παγετό, υπέρβαση του ορίου αντοχής θλίψης, φωτιά, βιολογικές επιδράσεις καθώς και τη χρήση ασύμβατων υλικών συντήρησης και αποκατάστασης[48]. Οι παραπάνω αιτίες έχουν ως αποτέλεσμα την διάλυση της συνδετικής ύλης, γεγονός που προκαλεί αύξηση του πορώδους και κατά συνέπεια την πτώση της μηχανικής αντοχής. Συνέπεια αυτών είναι ο μετασχηματισμός τεμαχιδίων του υλικού σε νέες υδατοδιαλυτές χημικές ενώσεις, την δημιουργία εξανθημάτων ή την καταστροφή του ιστού του κονιάματος από βλαβερά συστατικά.

Οι σημαντικότερες αιτίες οι οποίες επιφέρουν την αλλοίωση ή καταστροφή των κονιαμάτων είναι[49]:

- Η πτώση της μηχανικής αντοχής του κονιάματος λόγω γήρανσης του υλικού.
- Η ενανθράκωση τσιμεντιτικών κονιαμάτων προκαλεί αύξηση στο πορώδες του κονιάματος με αποτέλεσμα την αύξηση του ερπυσμού και της ταχύτητας ανάπτυξής του[50].
- Το περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας αποτελεί σημαντική παράμετρος της ανθεκτικότητας του κονιάματος επειδή οι περισσότεροι μηχανισμοί φθοράς για να πραγματοποιηθούν χρειάζονται νερό.
- Ο συνδυασμός μικρού πορώδους, υγρασίας και παρουσίας διαλυτών αλάτων έχει ως αποτέλεσμα την δυσχέρεια της ελεύθερης εξάτμισης του

- νερού, την απόθεση και κρυστάλλωση των αλάτων στα τοιχώματα των πόρων των λίθων δομής και την δημιουργία κρυσταλλικών πιέσεων[51].
- Η συνεχής ροή του νερού προκαλεί επίσης σημαντική φθορά των υλικών [17].
  - Οι ακραίες μεταβολές των τιμών της θερμοκρασίας προκαλούν διαδοχικούς κύκλους ψύξης – απόψυξης του υλικού με αποτέλεσμα την απώλεια βάρους λόγω απότριψης και μείωσης της μηχανικής αντοχής.
  - Επιπλέον, η πτώση της θερμοκρασίας οδηγεί σε πήξη του νερού που βρίσκεται στους τριχοειδείς πόρους, με αποτέλεσμα την αύξηση του όγκου του. Αυτή η αύξηση του όγκου του νερού προκαλεί την άσκηση ισχυρών υδραυλικών πιέσεων στα τοιχώματα των πόρων και την πιθανή τοπική θραύση του ιστού του κονιάματος[17].
  - Οι βιολογικές επιδράσεις από προέρχονται από την δράση των φυτών προκαλούν φθορά στα παλιά κονιάματα. Οι ρίζες των φυτών διεισδύουν στις μικρορωγμές του κονιάματος και ασκούν πιέσεις με αποτέλεσμα την αύξηση της υπάρχουσας ρηγμάτωσης. Επιπλέον, η σήψη τους δίνει χουμικό οξύ το οποίο προκαλεί διάβρωση.
  - Οι κύκλοι ύγρυνσης – ξήρανσης μαζί με την παρουσία διαλυτών αλάτων προκαλούν μηχανικές τάσεις με αποτέλεσμα την απολέπιση του υλικού.
  - Οι ασύμβατες επεμβάσεις συντήρησης όπου μπορεί να γίνει χρήση υλικών με διαφορετικές φυσικές, χημικές και μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με αυτές των αρχικών υλικών, επιταχύνοντας τις διαδικασίες φθοράς[52].

### **1.2.6 Κονιάματα Αποκατάστασης**

Τα κονιάματα αποκατάστασης αποτελούν ουσιώδες κεφάλαιο στον τομέα της αποκατάστασης ιστορικών μνημείων. Η επιλογή των κατάλληλων συνθέσεων απαιτεί εκτεταμένη μελέτη τόσο της τεχνολογίας των εκάστοτε αυθεντικών κονιαμάτων και εν γένει δομικών υλικών, όσο και των χρησιμοποιούμενων πρώτων υλών. Τα αυθεντικά κονιάματα που απαντώνται σε ιστορικές τοιχοποιίες αποτελούν μέρος ενός συνόλου αυθεντικών δομικών υλικών που αποτυπώνουν την παραδοσιακή οικοδομική τεχνική, όπως αυτή εξελίχθηκε στον χρόνο και

διαφοροποιήθηκε ανάλογα με την εξέλιξη των κονιών, των διατιθέμενων πρώτων υλών, τις τεχνικές παρασκευής, τον τρόπο εφαρμογής και την εμπειρία.

### **1.2.6.1 Αντίστροφη Μηχανική Προσέγγιση**

Η αντίστροφη μηχανική προσέγγιση, αφορά στην ολοκληρωμένη προσέγγιση των αυθεντικών υλικών. Με χρήση νέων τεχνικών είναι δυνατή η ανάλυση των ιστορικών κονιαμάτων και η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και την τεχνολογία παραγωγής τους. Η μεθοδολογία της αντίστροφης μηχανικής ξεκινά από την αναγνώριση των ιστορικών κονιαμάτων μέχρι και τη φάση της εφαρμογής των λαμβανόμενων αποτελεσμάτων σε πιλοτική κλίμακα

Συνοπτικά τα βήματα της μεθοδολογίας της αντίστροφης μηχανικής προσέγγισης παρατίθενται στη συνέχεια[53].

#### **1<sup>η</sup> Φάση:** Χαρακτηρισμός Ιστορικών Κονιαμάτων

Προσδιορισμός και αποτίμηση των ορυκτολογικών, χημικών, φυσικοχημικών χαρακτηριστικών των παραδοσιακών κονιαμάτων και της συμπεριφοράς τους σχετικά με την περιβαλλοντική δράση και τις μηχανικές καταπονήσεις. Επιλογή των πρώτων υλών παραγωγής για τη σύνθεση των νέων υλικών.

#### **2<sup>η</sup> Φάση:** Παρασκευή Κονιαμάτων Αποκατάστασης.

Σύνθεση κονιαμάτων αποκατάστασης, αποτελούμενων από μίγματα διαφόρων αναλογιών, ποσοστών και κλασμάτων κοκκοδιαβάθμισης συνδετικής ύλης, αδρανών, πρόσθετων, υπό διάφορες συνθήκες και με ποικίλους τρόπους.

#### **3<sup>η</sup> Φάση:** Αποτίμηση των Χαρακτηριστικών των Κονιαμάτων Αποκατάστασης.

Αξιολόγηση των νέων υλικών αποκατάστασης και των τεχνικών θεμελιωδών χαρακτηριστικών τους σε σχέση με τα παραδοσιακά σε εργαστηριακή κλίμακα. Εργαστηριακή προσομοίωση για τη μελέτη της φυσικοχημικής και φυσικομηχανικής αντίστασης των κονιαμάτων στη φθορά, σε συνθήκες επιταχυνόμενης γήρανσης. Δοκιμαστική εφαρμογή σε εργαστηριακή κλίμακα και σε πιλοτική τοιχοποιία, και αξιολόγηση της συμπεριφοράς με επιτόπου μη καταστρεπτικές δοκιμές.

**4<sup>η</sup> Φάση:** Αριστοποίηση Παρασκευής Κονιαμάτων Αποκατάστασης.

Επιλογή, σχεδιασμός και αριστοποίηση της τεχνολογίας παραγωγής - προτυποποίηση προϊόντος, με βάση τα δεδομένα που λαμβάνονται από την προηγούμενη φάση.

**5<sup>η</sup> Φάση:** Αποτίμηση Κονιαμάτων Αποκατάστασης.

Παραγωγή του προτυποποιημένου προϊόντος, σε ευρεία κλίμακα, και εφαρμογή του σε πιλοτική κλίμακα, σε αντιπροσωπευτικά ιστορικά μνημεία.

#### **1.2.6.2. Μεθοδολογία για την Παρασκευή και επιλογή κονιαμάτων αποκατάστασης [54]**

- Χαρακτηρισμός του ιστορικού κονιάματος – επιλογή πρώτων υλών – αναλογίες κονιάματος.

Προσδιορισμός των φυσικών, φυσικοχημικών και μηχανικών χαρακτηριστικών του παραδοσιακού κονιάματος, επιλογή νέων πρώτων υλών, καθώς και προσδιορισμός των αναλογιών του κονιάματος αποκατάστασης.

- Ετοιμασία του κονιάματος

Τα κονιάματα αποκατάστασης παράγονται σύμφωνα με τα αρχικά, περιλαμβάνουν μίγμα διαφορετικών αδρανών/κονίας/πρόσθετων υλικών. Τα αδρανή που χρησιμοποιούνται έχουν διαφορετικό μέγεθος, ανάλογο με τη χρήση του κονιάματος.

- Αξιολόγηση των κονιαμάτων αποκατάστασης

Βελτιστοποίηση των τεχνικών χαρακτηριστικών των παστών με βάση τη σωστή αναλογία σε νερό, την εργασιμότητα (ρεολογικά test), την πυκνότητα του συγκρατούμενου νερού, την περιεκτικότητα σε αέρα και τη μεταβολή όγκου

Τα κονιάματα αποκατάστασης αξιολογούνται επίσης κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης τους, της εξέλιξης των χημικών φάσεων, τα χαρακτηριστικά μικροδομής τους, και κατά την απόκτηση μηχανικών αντοχών.

- Βελτιστοποίηση

Η βελτιστοποίηση των κονιαμάτων αποκατάστασης γίνεται με βάση τα στοιχεία που προαναφέρονται καθώς και την σωστή επιλογή της διαδικασίας παραγωγής.

- Πιλοτική εφαρμογή



Η πιλοτική εφαρμογή γίνεται για την αξιολόγηση των κονιαμάτων αποκατάστασης στην κλίμακα της τοιχοποιίας.

### 1.2.6.3. Όρια αποδοχής για τα κονιάματα αποκατάστασης

Η μελέτη των φυσικο-χημικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των δειγμάτων ιστορικών κονιαμάτων από μνημεία διαφόρων ιστορικών περιόδων και διαφόρων περιοχών από τη λεκάνη της Μεσογείου μας δίνει τα όρια αποδοχής των κονιαμάτων αποκατάστασης με βάση[55]:

- Την κατανομή του μεγέθους των κόκκων των αδρανών.
- Τα ποσοστά ανάμιξης συνδετικής ύλης/αδρανών
- Τον έλεγχο των χαρακτηριστικών μικροδομής
- Έλεγχο υδραυλικότητας και ποιοτικό προσδιορισμό
- Κοκκοδιαβάθμιση των ιστορικών κονιαμάτων
- Προσδιορισμό των μηχανικών αντοχών

**Πίνακας 5: Όρια αποδοχής με βάση τα χαρακτηριστικά μικροδομής[55]**

Είδος κονιαμάτων	Ολικός ειδικός όγκος (mm <sup>3</sup> /g)	Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	Μέση ακτίνα πόρων (μm)	Ειδική επιφάνεια (m <sup>2</sup> /g)	Ολικό πορώδες (%)
Ασβεστιτικά	170-320	1,5-1,8	0,8-3,3	1,3-3,3	30-45
Θραυσ. Κεραμικό	170-290	1,5-1,9	0,1-0,8	3,5-15	32-43
Υψηλής έσβεσης	110-180	1,7-1,9	0,3-0,8	2,5-4,7	20-30
Υδραυλικά	90-230	1,7-2,1	0,1-3,5	2,5-13,5	18-40
Ασβέστη-Ποζολάνα	160-265	1,6-1,9	0,1-1,5	3-14	30-42
Διπλής τοιχοποιίας	117-220	1,8-2,1	0,2-20,6	1,2-4,7	25-39

**Πίνακας 6: Όρια αποδοχής με βάση τις θερμικές μεθόδους ανάλυσης[55]**

Είδος κονιαμάτων	Υγροσκοπικό Νερό (%)	Υδραυλικό Νερό (%)	Περιεχόμενο CO <sub>2</sub> (%)	Λόγος CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	Εφελκυστική Αντοχή (MPa)
Ασβεστιτικά	<1	2-4	>30	>8,5	<0,35
Θραυσ. Κεραμικό	1,5-4,5	2,3-5,3	<20	3,2-6,5	0,5-1,2
Υψηλής έσβεσης	0,7-1,5	2-4,6	>25	6-15	0,85-1,5
Υδραυλικά	1-2,5	4-7,2	<25	1,8-6,1	-
Ασβέστη-Ποζολάνα	2-4	3,3-5,4	<22	1,3-5,1	-
Διπλής τοιχοποιίας	-	5,6-5,9	<30	3,36-5,13	-

#### **1.2.6.4 Καμπύλες θραυστότητας για τον έλεγχο της επιτελεστικότητας των κονιαμάτων αποκατάστασης**

Η ανάγκη για επαρκή και αξιόπιστη πρόβλεψη των συνεπειών μετά από έναν ενδεχόμενο σεισμό αφορά κυρίως στην βελτιστοποίηση της διαχείρισης του σεισμικού κινδύνου και στην διασφάλιση της αντισεισμικής θωράκισης. Βασικό εργαλείο για την πιθανοτική εκτίμηση των συνεπειών ενός σεισμού αποτελεί η εκτίμηση της τρωτότητας η οποία σχετίζεται ευθέως με την έκταση των βλαβών που αναμένεται να υποστεί ένα δόμημα κατά την διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος[56].

Οικονομικοί, κοινωνικοί και αρχιτεκτονικοί λόγοι επιβάλλουν την ανάγκη μιας σαφούς εικόνας για το μέγεθος της αξιοπιστίας της κατασκευής, με απώτερο σκοπό την λήψη των αποφάσεων. Συγχρόνως, ο τυχαίος χαρακτήρας των στοιχείων που καθορίζουν την συμπεριφορά της κατασκευής στα επιβαλλόμενα φορτία και η έλλειψη βεβαιότητας για το μέγεθος των αναμενόμενων φορτίων λόγω του τυχαίου τους χαρακτήρα, οδηγεί σε έναν σχεδιασμό που βασίζεται σε μια πιθανοτική προσέγγιση. Έτσι, εισάγεται η έννοια των καμπυλών θραυστότητας, που συσχετίζουν σε όρους πιθανοτήτων την εκτιμώμενη βλάβη της κατασκευής με την σεισμική ένταση.

Ακόμα και οι επεμβάσεις του παρελθόντος, σε πολλές περιπτώσεις αλλάζουν την αρχική στατική λειτουργία και προκαλούν μη επιθυμητές συμπεριφορές και

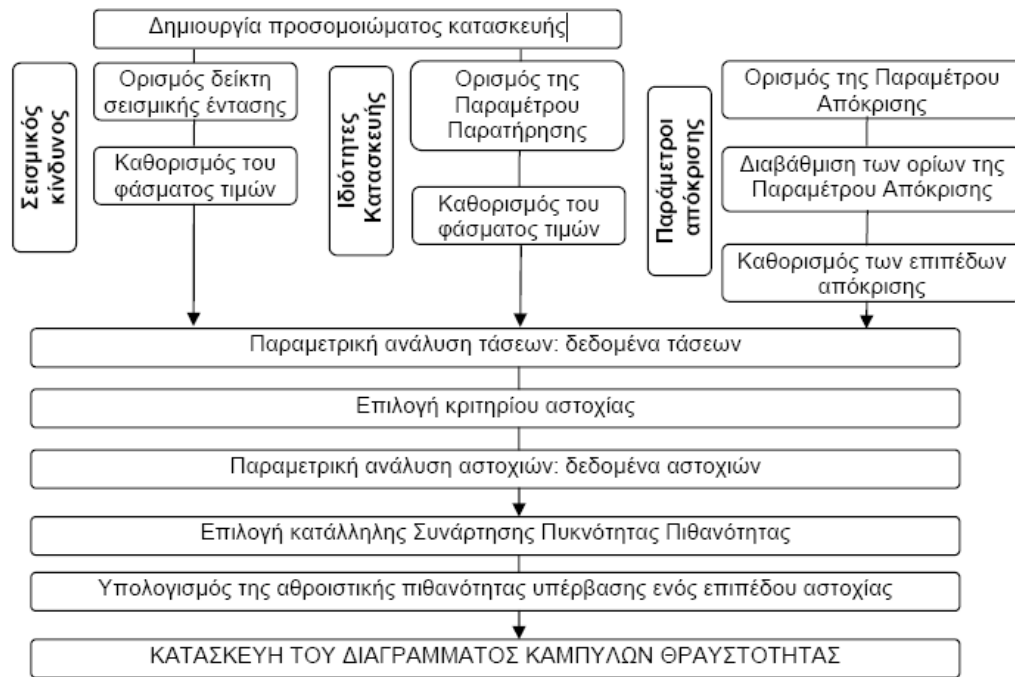
αστοχίες στην κατασκευή [57]. Επίσης, οι δράσεις του παρελθόντος (π.χ. παλαιότεροι σεισμοί) και οι αστοχίες που έχουν προκαλέσει (φαινόμενα ερπυσμού, υποβάθμιση των δομικών υλικών κλπ), αποτελούν σημαντικούς παράγοντες αβεβαιότητας.

### ***Μεθοδολογία κατασκευής καμπυλών θραυστότητας***

Για την ανάπτυξη των καμπυλών θραυστότητας ακολουθείται μια σαφής μεθοδολογία και τα αντίστοιχα εφαρμοσμένα στάδιά της. Η κατασκευή των καμπυλών θραυστότητας περιλαμβάνει τρία σύνολα πληροφοριών εισαγωγής:

- τα σχετικά με την ένταση του σεισμικού γεγονότος
- αυτά που περιγράφουν τις κρίσιμες ιδιότητες για την ικανότητα της κατασκευής
- εκείνα που καθορίζουν τον προσδιορισμό της ποσότητας της συμπεριφοράς της κατασκευής.

Όπως φαίνεται από το ακόλουθο σχήμα, υπάρχουν τρία κύρια στάδια, που οδηγούν στο διάγραμμα των καμπυλών θραυστότητας. Στο πρώτο στάδιο, δημιουργείται το προσομοίωμα και επιλέγεται το δεδομένο εισόδου, κατά τη διάρκεια του δεύτερου σταδίου πραγματοποιούνται οι αναλύσεις τάσεων και αστοχίας και η διαδικασία ολοκληρώνεται στο τρίτο στάδιο με την εξαγωγή των καμπύλων θραυστότητας μέσω της στατιστικής επεξεργασίας και την προσαρμογή της κατάλληλης συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας επί των παρατηρήσεων.



**Σχήμα 1:** Διάγραμμα ροής για την δημιουργία των καμπυλών θραυστότητας[55]

### 1.3 Κέραμοι

Τα κεραμικά είναι μη μεταλλικά ανόργανα στερεά με κρυσταλλική ή άμορφη δομή. Είναι συνήθως σκληρά, ψαθυρά, με υψηλό σημείο τήξης, χαμηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα, καλή θερμική σταθερότητα και υψηλές θλιπτικές αντοχές. Στη δόμηση, κεραμικά ονομάζονται τα υλικά τα οποία προέρχονται από την όπτηση του πηλού (κονιάματα αργίλου με λεπτή άμμο), στον οποίο έχει προηγουμένως δοθεί η κατάλληλη μορφή. Οι αναλογίες του μίγματος της αργίλου με άμμο, η διάμετρος των κόκκων των υλικών αυτών καθώς και η θερμοκρασία όπτησης καθορίζουν το είδος και τις ιδιότητες του προϊόντος της τεχνικής που είναι γνωστή ως κεραμευτική. Η τεχνική αυτή έχει ιστορία χιλιάδων χρόνων. Τα κλασικά κεραμικά παρασκευάζονται από φυσικές πρώτες ύλες, συνήθως αργίλους, ασβέστη, άμμο κ.τ.λ. Οι ωμόπλινθοι και οπτόπλινθοι (τούβλα) χρησιμοποιούνται από τους αρχαίους χρόνους. Η τεχνική τους άνθησε στον Ασυροβαβυλωνιακό και Αιγυπτιακό πολιτισμό και στην αρχαία Ελλάδα αναπτύχθηκε κυρίως για την κατασκευή οικιακών σκευών, δοχείων αποθήκευσης τροφίμων, διακοσμητικών στοιχείων, καλλιτεχνικών αντικειμένων, κεραμιδιών και οπτόπλινθων.

Η πρώτη κόνια που χρησιμοποιήθηκε ήταν η πηλοκονία που είναι διαδεδομένη στη φύση και αναμιγνυόμενη με νερό και άμμο παρέχει πηλοκονίαμα. Όταν το κονίαμα μορφοποιηθεί και ξηρανθεί στην ατμόσφαιρα, παράγονται ωμόπλινθοι. Αντίστοιχα, όταν το μορφοποιημένο πηλοκονίαμα ψηθεί σε φούρνο παράγονται οπτόπλινθοι και άλλα κεραμικά υλικά όπως κέραμοι, πυρίμαχα τούβλα κ.τ.λ.

**Πίνακας 7:Χρονικό ανάπτυξης των κεραμικών υλικών[35]**

Έτος	Υλικά, Μέθοδοι, Προϊόντα
20.000 π.Χ	Τα πρώτα ψημένα κεραμικά
20.000-4.000 π.Χ	Βάζα – κεραμίδια από άργιλο
4.000-2.000 π.Χ	Πρώτα ψημένα κεραμίδια Σωλήνες νερού
1.500 π.Χ	Φακοί από γυαλί Φόρμες χύτευσης χαλκού
1.400 π.Χ	Ελληνικά κανάτια
750 π.Χ	Κεραμίδια
10 μ.Χ	Γυάλινα τζάμια παραθύρων
1.280	Παραγωγή γυαλιού
16 <sup>ος</sup>	Οικιακά σκεύη, κινέζικη πορσελάνη
1680	Γυαλί για καθρέπτες
1708	Ευρωπαϊκή πορσελάνη

### **1.3.1 Διαδικασία παρασκευής ιστορικών κεραμικών**

Η διαδικασία παρασκευής ενός κλασικού, ιστορικού κεραμικού περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια[58]:

- Επιλογή του πηλού ανάλογα με τη χρήση του κεραμικού.
- Διαδικασία καθαρισμού και καθίζησης του πηλού, ανάλογα με την ποιότητα του αντικειμένου που πρόκειται να κατασκευαστεί.
- Ανάμιξη του πηλού με άμμο ή τριμμένο ασβεστόλιθο ανάλογα με τις επιθυμητές ιδιότητες του αντικειμένου.
- Διαμόρφωση του αντικειμένου με τα χέρια, τον κεραμευτικό τροχό ή καλούπια.

- ο Τοποθέτηση σε φούρνο με την κατάλληλη ατμόσφαιρα και θερμοκρασία, ανάλογα με τις επιθυμητές ιδιότητες του αντικειμένου.

Για την παρασκευή πηλοκονιάματος, χρησιμοποιούνται διάφοροι πηλοί ή άργιλοι που λαμβάνονται από επιφανειακές κυρίως θέσεις. Το δραστικό συστατικό του πηλού είναι η πηλοκονία, που αποτελείται κυρίως από ένυδρο πυριτικό αργίλιο και άλλες ενώσεις όπως οξείδια του σιδήρου, του μαγνησίου και του ασβεστίου. Το δεύτερο συστατικό του πηλοκονιάματος είναι η άμμος, κυρίως χαλαζιακής προέλευσης. Η αναλογία πηλοκονιάματος και άμμου καθορίζει την εργασιμότητα και πλαστικότητα του πηλού. Το τρίτο συστατικό που απαιτείται είναι το νερό για να κάνει το πηλοκονίαμα εύπλαστο.

Η μορφοποίηση των ιστορικών κεραμικών γίνεται χειρονακτικά με πίεση και με υγρή μέθοδο, δηλαδή ο πηλός περιέχει αρκετή ποσότητα νερού ώστε να παρουσιάζεται εύπλαστος. Το επόμενο στάδιο είναι αυτό της ξήρανσης. Τα προϊόντα τοποθετούνται σε σκεπασμένους χώρους που επιτρέπουν την κυκλοφορία του αέρα, ενώ όταν αυτά ξηρανθούν ικανοποιητικά μπορούν στη συνέχεια να εκτεθούν στον ήλιο για περαιτέρω ξήρανση. Η μη απευθείας έκθεση στον ήλιο κατά το στάδιο της ξήρανσης έχει ως σκοπό να αποφευχθούν μεγάλες ταχύτητες ξήρανσης που μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία.

Τα προϊόντα που έχουν μορφοποιηθεί με υγρή μέθοδο απαιτούν μεγαλύτερη διάρκεια ξήρανσης λόγω της περιεχόμενης υγρασίας. Παράλληλα, έχει παρατηρηθεί ότι προϊόντα αυτής της κατηγορίας παρουσιάζουν συχνά προβλήματα παραμόρφωσης και ρηγματώσεων κατά τη διαδικασία ξήρανσης.

Το στάδιο της όπτησης σημαντικότερο στην κατασκευή των κεραμικών, έχει ως σκοπό την σταθεροποίηση του σχήματος και την απόκτηση συγκεκριμένων φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων όπως στεγανότητα, επιφανειακή σκληρότητα και μηχανική αντοχή. Οι θερμοκρασίες που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι 900-1110°C ενώ στο παρελθόν ήταν χαμηλότερες. Τέλος, η ψύξη των κεραμικών γίνεται αργά (με διάρκεια αρκετών ημερών) ώστε να αποφεύγονται οι μικρορηγματώσεις.

Το χρώμα των κεραμικών προϊόντων εξαρτάται από τη χημική σύσταση της πρώτης ύλης καθώς και τη θερμοκρασία όπτησης. Υψηλό ποσοστό οξειδίων του σιδήρου

επιφέρει κόκκινο χρώμα, υψηλό ποσοστό ασβεστίου κίτρινο και υψηλό ποσοστό οξειδίου του αργιλίου πρασινωπό.

### **1.3.2 Φθορά Κεραμικών**

Οι παράγοντες που προκαλούν φθορά στα κεραμικά είναι ενδογενείς και εξωγενείς. Ως ενδογενείς παράγοντες θεωρούνται οι ατέλειες που σχηματίζονται κατά το στάδιο της όπτησης, η περιεκτικότητα προσμίξεων ανθρακικού ασβεστίου και η διαφορά στο συντελεστή θερμικής διαστολής μεταξύ υαλώματος και σώματος.

Ως εξωγενείς παράγοντες θεωρούνται οι μηχανικές καταπονήσεις από υπερκείμενες πιέσεις, η τριχοειδής αναρρίχηση του νερού με παρουσία διαλυτών αλάτων, ο παγετός, βιολογικοί παράγοντες (μύκητες, φύκη, βακτήρια, λειχήνες), προηγούμενες επεμβάσεις συντήρησης ή στερέωσης και η χρήση μεταλλικών συνδέσμων.

Τα κεραμικά έχουν καλή αντοχή σε ουδέτερο και όξινο περιβάλλον, είναι ευπαθή στη κρυστάλλωση αλάτων και συνήθως κινδυνεύουν πιο πολύ από τους φυσικούς μηχανισμούς διάβρωσης (παγετό, εκτριβή) παρά από τους αέριους ρυπαντές.

## **2. ΕΙΔΙΚΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ**



## 2.1 Μεθοδολογία Διαγνωστικής Μελέτης

Η μεθοδολογία διαγνωστικής μελέτης αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό εργαλείο στην προσέγγιση μελέτης διάγνωσης και αποκατάστασης ενός μνημείου [59].

### I. Ιστορική Τεκμηρίωση

Η μελέτη ιστορικών αρχείων, η σύγκριση παλιών με νέων φωτογραφικών τεκμηρίων και το ιστορικό παλαιότερων επεμβάσεων είναι βασικά στοιχεία που συμπληρώνουν και εξηγούν την σημερινή κατάσταση ενός μνημείου. Η τήρηση αρχείου σε κάθε επέμβαση βοηθά καθοριστικά τον επόμενο μελετητή ή συντηρητή.

### II. Μελέτη των χαρακτηριστικών των δομικών υλικών και έρευνα για την προέλευσή τους

Προϋποθέτει την λήψη δειγμάτων τόσο από τα ιστορικά υλικά όσο και από υλικά μεταγενέστερων επεμβάσεων. Η εξέταση των δειγμάτων μέσω εργαστηριακών μεθόδων οδηγεί στην γνώση τόσο των χαρακτηριστικών ενός υλικού όσο και στην προέλευσή του.

### III. Επί τόπου παρατηρήσεις και μετρήσεις

Αρχικά γίνεται τεκμηρίωση της κατάστασης ενός μνημείου μέσω λεπτομερών στοιχείων που συλλέγονται, για τη σοβαρότητα της φθοράς. Στη συνέχεια, γίνονται μακροσκοπικές παρατηρήσεις μέσω των οποίων επιχειρείται η καταγραφή διαφόρων μορφών φθοράς και η συσχέτιση τους με άλλους παράγοντες όπως η θέση, το μικροκλίμα κ.τ.λ. Επιπλέον γίνονται επιτόπου μετρήσεις στο μνημείο και στο άμεσο περιβάλλον του για τον έλεγχο υγρασίας, την παρουσία ρύπων στην ατμόσφαιρα, την ύπαρξη υπόγειων υδάτων κ.τ.λ.

### IV. Εργαστηριακή μελέτη των δειγμάτων που προέρχονται από τα δομικά υλικά ενός μνημείου

Προϋποθέτει συστηματική δειγματοληψία και εργαστηριακή μελέτη που να οδηγεί σε συμπεράσματα όπως το είδος, ο βαθμός και τα αίτια διάβρωσης ενός υλικού.

### V. Αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στα δομικά υλικά και τις επιφάνειες

Γίνεται προσπάθεια συσχέτισης των παραγόντων που επηρεάζουν το μικροκλίμα με τις πραγματικές επιφάνειες του μνημείου.

### VI. Διατύπωση υποθέσεων για τα αίτια και τον μηχανισμό του φαινομένου φθοράς

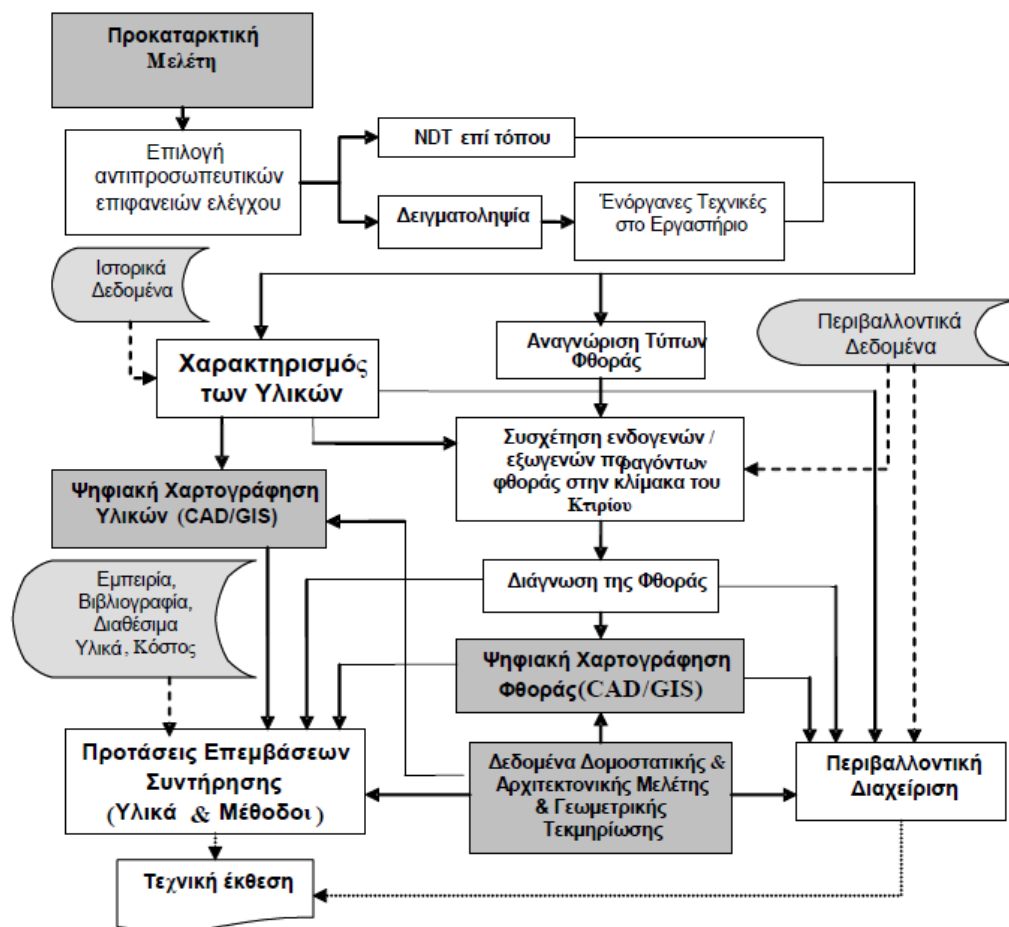
Γίνεται συσχέτιση των εργαστηριακών αποτελεσμάτων με τις περιβαλλοντικές παραμέτρους και το μικροκλίμα του μνημείου.

### VII. Παραμετρική ανάλυση

Προσομοίωση στο εργαστήριο των συνθηκών που βρίσκονται τα υλικά μέσω του θαλάμου επιταχυνόμενης γήρανσης

### VIII. Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την έρευνα της διάγνωσης ελέγχονται και επιβεβαιώνονται από τα αποτελέσματα της έρευνας για την προστασία.



Σχήμα2: Διάγραμμα ροής διαγνωστικής μελέτης

## ***2.2 Μονή Καισαριανής***

---

### **2.2.1 Τα αρχαία λατομεία του Υμηττού**

Ο Υμηττός ανήκει από γεωλογική άποψη στην αττικοκυκλαδική ζώνη και τα πετρώματά του που είναι μεταμορφωμένα παλαιά ιζημάτα χαρακτηρίζονται για την κρυσταλλικότητά τους. Περιέχουν ασβεστόλιθους, μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους (αθηναϊκό σχιστόλιθο και σχιστόλιθο Καισαριανής) και μεγάλες μάζες μαρμάρου (κατώτερο και ανώτερο μάρμαρο). Το Μάρμαρο του Υμηττού έχει συμπαγή μακροκρυσταλλικό ιστό. Κατά θέσεις το πέτρωμα αποτελείται από μάζα τόσο λεπτοκοκκώδη που η όλη εμφάνισή του δίδει την εντύπωση συτφρού ασβεστόλιθου.

Σύμφωνα με κάποιους ερευνητές, στον Υμηττό ξεκίνησαν να λειτουργούν λατομεία μαρμάρου πολύ πριν ξεκινήσουν αντίστοιχες δραστηριότητες στη Πεντέλη. Το κυανότεφρο μάρμαρο του Υμηττού, γνωστό ως 'υμήττιο μάρμαρο' ήταν κατώτερο ποιοτικά από το Πεντελικό αλλά είχε μεγάλη ζήτηση. Τα λατομεία σταμάτησαν να λειτουργούν για ένα διάστημα κατά τον 6ο π.Χ. αιώνα όταν και ξεκίνησε η εκμετάλλευση της Πεντέλης, αλλά συνέχισαν τις εργασίες στους κλασσικούς χρόνους. Είναι αξιοσημείωτο επίσης πως μέρος της κρηπίδας του Παρθενώνα, κτίστηκε με πέτρα που κόπηκε στα λατομεία του Υμηττού. Μετέπειτα στα Ρωμαϊκά χρόνια, τα μάρμαρα του Υμηττού γνώρισαν μεγάλη δόξα καθώς πολλά μνημεία στη Ρώμη κατασκευάστηκαν από αυτά. Οι Ρωμαίοι που το ονόμαζαν *marmorim ettium*, συνέχισαν εντατικά την εξόρυξη και το μετέφεραν στη Ρώμη με την μορφή μεγάλων ογκόλιθων. Την εποχή εκείνη η εξόρυξη γινόταν κυρίως στη ΒΑ πλαγιά και στους πρόποδες του Υμηττού. Σήμερα ελάχιστα ίχνη των αρχαίων λατομείων διατηρούνται, γιατί εξαλείφθηκαν από τη εντατική εκμετάλλευση των νεώτερων χρόνων.

Τα αρχαία λατομεία βρίσκονται διάσπαρτα απλωμένα στην περιοχή από το δάσος της Καισαριανής μέχρι και την Ηλιούπολη, αλλά και γύρω από τον Προφήτη Ηλία του Κορωπίου.

### 2.2.2 Ο Υμηττός από την Αρχαιότητα στο Βυζάντιο

Η περιοχή κατοικούνταν από τη νεολιθική εποχή, ενώ το ίδιο το όνομα του βουνού είναι προελληνικής προέλευσης όπως αποδεικνύει η κατάληξη -ηττός. Η περιοχή έχει μια πολύ μεγάλη ιστορία ως κέντρο λατρείας. Στην αρχαϊκή και κλασική εποχή, οι πρόποδες του Υμηττού φιλοξενούσαν ιερά του Δία (Υμήττιος Ζεός, Όμβριος Ζεός), του Απόλλωνα (Απόλλων Προόψιος) και της Αφροδίτης.

Στον 4ο αιώνα π.Χ. ξεκινά να εξορύσσεται το χαρακτηριστικό κυανότεφρο Υμήττιο μάρμαρο. Η περιοχή συνέχισε να καλλιεργείται και να αναπτύσσεται η κτηνοτροφία και η μελισσοκομία. Κάποια υπολείμματα υδροθεραπευτηρίων μαρτυρούν πως το νερό από τις πηγές του βουνού θεωρούνταν ιαματικό.

Το πρώτο χριστιανικό κέντρο δεν βρισκόταν στη θέση της Μονής Καισαριανής, αλλά, στο νοτιοδυτικό ύψωμα του μοναστηριού, στη θέση του “Κοιμητηρίου των Πατέρων”. Σήμερα, στη θέση αυτή σώζονται τα λείψανα της παλαιοχριστιανικής βασιλικής του 5ου-6ου αιώνα, όπου και κτίσθηκε τον 10ο αιώνα άλλος ναός. Νότια και σε επαφή με το ναό αυτό κτίσθηκε στα χρόνια της Φραγκοκρατίας η καθολική εκκλησία του Αγίου Μάρκου, απ’ όπου και η ονομασία Φραγκομονάστηρο[60]. Ο ιστάμενος σημερινός ναός στα δυτικά των ναϊκών αυτών καταλοίπων είναι ο νεώτερος (17ος αι.) ναός των Ταξιαρχών.

Στους βυζαντινούς χρόνους εμφανίστηκαν αρκετές μονές και παρεκκλήσια, όπως η Μονή των Εισοδίων της Θεοτόκου (γνωστότερη ως «Μονή Καισαριανής»), η Μονή των Ταξιαρχών (ή «Μονή Αστερίου»), η Μονή του Αγίου Ιωάννη του Θεολόγου, και του Αγίου Γεωργίου Κουταλέα ή Κουταλάκ.ά

Οι ναοί οικοδομήθηκαν με βάση διάσπαρτα ερείπια αρχαίων ναών και ίσως στη θέση παλιότερων «φροντιστηρίων», δηλαδή φιλοσοφικών σχολών (για τις οποίες κάνει λόγο ο Μιχαήλ Χωνιάτης το 13ο αιώνα), απόδειξη μιας σταθερής ανθρώπινης παρουσίας από την αρχαιότητα ως το Βυζάντιο. Η Μονή Καισαριανής, που σύμφωνα με τις αρχαιολογικές έρευνες, οικοδομήθηκε τον 11ο αιώνα μ.Χ. παρέμεινε ορόσημο για την περιοχή[61].

## 2.3 Η Μονή Καισαριανής

Η Μονή Καισαριανής βρίσκεται στο μέσο της δυτικής πλευράς του Υμηττού και είναι η σημαντικότερη από τις πέντε Μονές που βρίσκονται στο όρος του Υμηττού. Η Μονή είναι κτισμένη σε θέση όπου αφθονεί η βλάστηση και ανάμεσα σε πηγές. Στα βόρεια της Μονής βρίσκεται η γνωστή από την αρχαιότητα πηγή, αναφερόμενη στις πηγές ως Κύλλου Πέρα, Κουλλούπερα, Κουκλούπερα ή, Καλλία Πέρα. Παραφθορά της λέξης αυτής είναι η σημερινή ονομασία Καλοπούλα. Στα ανατολικά της Μονής βρίσκεται η πηγή της Κριοκεφαλής ή Κοτομπασιένω διακόσια μέτρα νοτιοανατολικά βρίσκεται το αγίασμα του ναού της Αναλήψεως[62].

Η ίδρυση της Μονής Καισαριανής ανάγεται στο δεύτερο μισό του 11ου αιώνα, σύμφωνα με την χρονολόγηση του καθολικού της Μονής που είναι το παλαιότερο τμήμα του μοναστηριακού συγκροτήματος. Ωστόσο, ο καθηγητής Μπούρας αφήνει ανοιχτό το ενδεχόμενο για αναχρονολόγηση που ανάγει το μνημείο στον 12ο αιώνα[61,63].



Εικόνα 1: Σκαρίφημα του Ρώσου μοναχού Μπάρσκι το 1745

Το μοναστηριακό συγκρότημα της Καισαριανής αναπτύσσεται μέσα σε έναν τετράπλευρο υψηλό περίβολο και ανεγέρθηκε σε τρεις οικοδομικές φάσεις. Γύρω από την εσωτερική αυλή του υψώνονται τα κτίσματα της μονής: το καθολικό, η

τράπεζα με το μαγειρείο, ο λουτρώνας, διώροφα κτήρια με κελλιά και ο πύργος των Μπενιζέλων. Από τον αρχικό σχεδιασμό του συγκροτήματος, υπάρχουν δύο εισοδοί, η κύρια είσοδος στην ανατολική πλευρά όπου υπάρχει η πηγή του Κριού ή Κοτς Μπασί[62,64], ονομασία που οφείλεται στην αρχαϊκή υδροχόη, που αποδίδει κεφάλι κριού, και μια μεγαλύτερη από την δυτική πλευρά.

Η εύφορη γη που απλωνόταν γύρω ανήκε στο μοναστηριακό συγκρότημα. Μεγάλες εκτάσεις με ελαιώνες, αμπέλια και μελίτσια εξασφάλιζαν εισοδήματα στη Μονή. Σε επιστολή του το 1209 ο ορθόδοξος Μητροπολίτης Αθηνών Μιχαήλ Χιωνάτης, αναφέρει ότι " η παραγωγή από τις κυψέλες δόθηκε στην Ηγούμενο της Μονής Καισαριανής " Ωστόσο, τέσσερα χρόνια αργότερα ο ίδιος καταγγέλλει ότι δεν έλαβε κανένα εισόδημα από το μοναστήρι. Ο ηγούμενος έδωσε, ως δικαιολογία ότι οι κυψέλες είχαν καταστραφεί. Οι μοναχοί ήταν επίσης γνωστή για την παρασκευή φαρμάκων από διάφορα βότανα[65].

Η Μονή αναφέρεται από τον Πάπα Ιννοκέντιο ΙΙΙ μετά την Τέταρτη Σταυροφορία, αλλά φαίνεται να είχε παραμείνει στην Ελληνική Ορθόδοξη Εκκλησία, σε αντίθεση με άλλες εκκλησίες και μοναστήρια που ανελήφθησαν από τον Λατινικό Ρωμαιοκαθολικό κλήρο[66]. Όταν το 1458 οι Οθωμανοί κατέλαβαν την Αττική, ο Σουλτάνος Μωάμεθ Β πήγε στο μοναστήρι και σύμφωνα με τον JacobSpon (1675), Γάλλο γιατρό από τη Λυών, του δόθηκε το κλειδί της πόλης. Το 1678, ο Πατριάρχης Διονύσιος ΙV ορίζει τη Μονή ως Σταυροπηγιακή[67], δηλαδή, ελεύθερη και ανεξάρτητη του Μητροπολίτη, υπαγόταν στο Οικουμενικό Πατριαρχείο και είχε εξασφαλίσει φορολογική απαλλαγή ακόμη και στις περιόδους της ξένης, φραγκικής και οθωμανικής, κυριαρχίας. Η Μονή είχε πλούσια βιβλιοθήκη και λόγιους ηγουμένους. Η μόνη υποχρέωσή της ήταν να τελεί νεκρικές ιεροτελεστίες. Αργότερα, το 1792, ο Πατριάρχης Νεόφυτος VII αφαιρεί τα προνόμια της Μονής και την θέτει εκ νέου στη δικαιοδοσία του Μητροπολίτη Αθηνών[64].



*Εικόνα 2: Φωτογραφία 1888-1890. Μονή Καισαριανής, Καθολικό. Άποψη από ανατολικά. Δημιουργοί: R. Weir-Schultz, S. Barnsley. Αρχείο Byzantine Research Fund, Βρετανική Σχολή Αθηνών.*

Η Βιβλιοθήκη της Μονής Καισαριανής ήταν ιδιαιτέρως γνωστή και πιθανολογείται ότι εκεί φυλάσσονταν έγγραφα από την αρχαιότητα. Σύμφωνα με τους δημογέροντες (το συμβούλιο των γερόντων της εποχής), «τα χειρόγραφα πωλήθηκαν στην Άγγλους ως μεμβράνες, ενώ τα υπόλοιπα έγγραφα χρησιμοποιήθηκαν στην Τραπεζαρία της Μονής». Κατά τη διάρκεια της Οθωμανικής πολιορκίας της Αθήνας, τα εναπομείναντα χειρόγραφα μεταφέρθηκαν στην Ακρόπολη και χρησιμοποιήθηκαν ως υλικά ανάφλεξης. Μέχρι σήμερα παραμένει άγνωστο το σημείο που στεγαζόταν η Βιβλιοθήκη[67].

Κατά τη διάρκεια της ακμής της, η Μονή Καισαριανής είχε φιλοξενήσει πολλές σημαντικές πνευματικές προσωπικότητες της εποχής, όπως τον Γεώργιο Γεμιστό Πλήθων το 1566, τον Θεοφάνη Καβαλλάρη[62] όπου και δίδασκε στη Μονή από το 1722 μέχρι το 1728 μαθήματα γραμματικής και επιστημών, τον λόγιο Ιωάννη Δοριάνο το 1675 και τον Ηγούμενο Ιεζεκιήλ Στεφανάκη, ο οποίος ήταν γνώστης της ελληνικής λογοτεχνίας και της ιστορίας, και πιο συγκεκριμένα, της πλατωνικής

φιλοσοφίας.

Κατά τη διάρκεια της μακράς Οθωμανικής περιόδου η όψη του μοναστηριακού συγκροτήματος αλλάζει και σχεδόν παίρνει τη μορφή που έχει σήμερα. Από το 1824 και μετά, το μοναστήρι υποβάλλεται σταδιακά σε άθλια μεταχείριση. Το 1836 με διάταγμα της Αντιβασιλείας του Όθωνα διαλύεται η μικρή μοναστηριακή κοινότητα που είχε απομείνει. Μετατρέπεται σε θερινή κατοικία επιφανών αθηναϊκών οικογενειών ακολούθων του Όθωνα. Στα χρόνια που ακολούθησαν, η παρακμή συνεχίζεται σταδιακά. Ένα τμήμα της Μονής καταλήγει να χρησιμοποιείται ως στάβλος που φυλάσσονται αγελάδες, πουλερικά και άλογα. Με βασιλικό διάταγμα το 1921 η Μονή Καισαριανής ανακηρύσσεται μνημείο και σταδιακά ακολουθούν οι διαδικασίες συντήρησής της.

### **2.3.1 Η ονομασία της Μονής Καισαριανής**

Αναφορικά με την προέλευση της ονομασίας της Μονής υπάρχουν διαφορετικές εκδοχές, χωρίς ωστόσο να έχει τεκμηριωθεί επιστημονικά καμία από αυτές.

Κατά μια ερμηνεία, το όνομα αυτό προέρχεται από τον ιδρυτή της, κάποιον ηγούμενο Καισάριο, ή από την εικόνα της Θεοτόκου, που μεταφέρθηκε από την Καισάρεια. Κατά άλλη ερμηνεία, η ονομασία αποδόθηκε από τους Καίσαρες αδελφούς του βυζαντινού αυτοκράτορα που η αυτοκράτειρα Ειρήνη η Αθηναία εξόρισε στην Αθήνα. Μια ακόμη εκδοχή είναι ότι η ονομασία της Μονής προήλθε από κάποιον Καίσαρα που ανακαίνισε την εκκλησία κατά τη Βυζαντινή περίοδο.

Μνεία της ονομασίας της παραδίδεται στα 1209 σε επιστολή του αυτοεξόριστου στην Κέα Μιχαήλ Χωνιάτη προς τον καθηγούμενο της Μονής. Ακόμα, σε έγγραφο του πάπα Ιννοκεντίου Γ΄ αναφέρεται ως Santa Syriani. Ακόμη σε κάποια έγγραφα της περιόδου εκείνης αναφέρεται και ως Κυριανή[64].

### **2.3.2. Περιγραφή του μοναστηριακού συγκροτήματος**

#### ***Ο Λουτρώνας***

Τα παλαιότερα βυζαντινά μοναστήρια διέθεταν και λουτρά τα οποία μας δίνουν μια ιδέα για το πώς ήταν τα δημόσια λουτρά των βυζαντινών πόλεων[68]. Τα παραδείγματα που έχουν διασωθεί είναι η Μονή του Δερβενοσάλεσι και η Μονή Καισαριανής. Μας διδάσκουν ότι τα κτίσματα του είδους αυτού είχαν μια τριπλή



διαίρεση και ήταν κατά κανόνα θολωτά. Στον έναν χώρο υπήρχε δεξαμενή που γέμιζε με ψυχρό νερό. Ο μεσαίος χώρος, στεγαζόμενος με σφαιρικό τρούλλο, ήταν το θερμό νερό και ο τρίτος το χλιαρό νερό. Οι δύο τελευταίοι χώροι κάτω από το δάπεδό τους με στυλίσκους σε αποστάσεις σχημάτιζαν τα λεγόμενα υπόκαυστα κατά την αρχαία ρωμαϊκή παράδοση για την δίοδο θερμού αέρα και την έντονη θέρμανση του λουτρού.



*Εικόνα 3: Ο Λουτρώνας*

Το λουτρό της Μονής Καισαριανής (Εικόνα 3) βρίσκεται το νότιο τμήμα εντός του περιβόλου και ανάγεται στα τέλη του 11ου-αρχές 12ου αιώνα. Το αρχικό κτίσμα ήταν τρίκογχο με ημισφαιρικό τρούλλο και υποστηριζόταν από προστατευτικά τρίγωνα τα οποία δεν έχουν διασωθεί. Οι τοίχους του λουτρού ήταν κτισμένοι με πλινθοπερίκλειστο σύστημα. Επιπλέον στους τοίχους αποκαλύφθηκε σύστημα αεραγωγών και πεσσίσκοι υποκαύστου. Στους μεταβυζαντινούς χρόνους ενσωματώθηκε σε ένα κτιριακό σύμπλεγμα διαφόρων κατασκευαστικών φάσεων

και τμήμα του λειτούργησε ως ελαιοτριβείο.

Ο σεισμός του 1981 προκάλεσε μεγάλες φθορές στο λουτρό[69]. Έντεκα χρόνια αργότερα το Υπουργείο Πολιτισμού έδωσε την άδεια στην Φιλοδοσική Ένωση Αθηνών (ΜΚΟ) να διαχειριστεί την αποκατάσταση του λουτρού υπό την επίβλεψη της Πρώτης Βυζαντινής και Μεταβυζαντινής Εφορίας.

### ***Τα κελλιά και ο Πύργος των Μπενιζέλων***

Τα μεταβυζαντινά κελλιά (εικόνα 5), χώροι διαμονής των μοναχών, αναπτύσσονται στη νότια πλευρά του περιβόλου. Σήμερα διαμορφώνεται μία κύρια διώροφη πτέρυγα που διαχωρίζεται από τριώροφο κτίσμα, γνωστό ως Πύργος των Μπενιζέλων. Οι οικογένεια Μνελιζέλου είχε καταφύγει στη Μονή, ώστε να προστατευτεί από επιδημία που έπληττε τότε την Αθήνα. Από παλαιότερη ανασκαφική έρευνα διαπιστώθηκε ότι τα σημερινά κελλιά έχουν θεμελιωθεί πάνω στα ερείπια βυζαντινών κελλιών[64].

### ***Η Τράπεζα***

Η τράπεζα (εικόνα 4) και η κουζίνα της Μονής βρίσκονται σε ανεξάρτητο κτίριο στη δυτική πλευρά του περιβόλου, απέναντι από τον νάρθηκα. Το κτίριο χρονολογείται πιθανότατα ανάμεσα στον 16ο ή 17ο αιώνα, την περίοδο δηλαδή της Τουρκοκρατίας.

Το κτίσμα της τράπεζας έχει μακρύ ορθογώνιο σχήμα και στην μία άκρη υπάρχει μια θολωτή αίθουσα. Το κτίσμα χωρίζεται σε δύο χώρους. Στη νότια πλευρά της τράπεζας βρίσκεται η κουζίνα που στεγάζεται με θόλο και καμινάδα. Αμέσως μετά σαν προέκταση της κουζίνας βρίσκεται η αίθουσα της εστίας[67]. Ο χώρος περιλαμβάνει μοναστηριακούς πάγκους ενώ ο τοίχος απέναντι από τον νάρθηκα έχει ισομετρικά ανοίγματα που βλέπουν προς την αυλή. Ο σεισμός του 1981 προκάλεσε πολλαπλές φθορές στην τράπεζα όπως και στον λουτρόνα, οι οποίες πλέον έχουν αποκατασταθεί και καθιστούν την τράπεζα επισκέψιμη.

### ***Το παρεκκλήσιο του Αγίου Αντωνίου***

Το καμαροσκεπές παρεκκλήσιο που βρίσκεται προσκολλημένο στα νότια του ναού είναι αφιερωμένο στον Άγιο Αντώνιο και αποτελεί προσθήκη του 17ου αιώνα, την περίοδο δηλαδή της Τουρκοκρατίας. Το επίπεδο δώροφο κωδωνοστάσιο που βρίσκεται ακριβώς πάνω από το παρεκκλήσιο προστέθηκε πολύ αργότερα τον 19ο αιώνα.

Η παλαιότερη σωζόμενη τοιχογραφία με τη μορφή της Θεοτόκου Δεομένης, 14ος αιώνας, βρίσκεται εξωτερικά του καθολικού και είναι ορατή μόνο από το εσωτερικό του παρεκκλησίου. Η τοιχογραφία απεικονίζει την Παναγία Πλατυτέρα να στρέφεται προς τα αριστερά και να προσεύχεται[70].



*Εικόνα4: Η Τράπεζα*



*Εικόνα5: Τα κελιά και ο Πύργος των Μπενιζέλων*

### **Ο Νάρθηκας**

Ο νάρθηκας που στεγάζεται με μια θολωτή οροφή με τρούλλο, είναι μεταγενέστερη προσθήκη, χτίστηκε το 1602, δηλαδή την Οθωμανική περίοδο. Βρίσκεται στη δυτική πλευρά της Εκκλησίας από όπου είναι και η μία εκ των δύο εισόδων. Η είσοδος στον νάρθηκα κοσμείται με μαρμάρινες παραστάδες και υπέρθυρο που επιστέφεται με τοξωτό ανακουφιστικό άνοιγμα (φεγγίτη). Κατά τη διάρκεια του 17ου αιώνα, οι τοιχογραφίες έγιναν όλο και πιο δημοφιλείς στο ύψος και την τεχνική. Αυτή η τάση φαίνεται καθαρά στις τοιχογραφίες του νάρθηκα, είναι εμφανής η βούληση του ζωγράφου να αποστασιοποιηθεί από την κρητική σχολή.

Οι τοιχογραφίες που συναντάμε στο εσωτερικό του νάρθηκα είναι του 1682 ζωγραφισμένες από τον πελοποννήσιο αγιογράφο Ιωάννη Ύπατο[70], σύμφωνα με την επιγραφή στο δυτικό τείχος (20 Αυγούστου 1628). Η εικονογράφηση έγινε χάρη στη χορηγία της επιφανούς αθηναϊκής οικογένειας των Μπενιζέλων, από την οποία προερχόταν και η αγία Φιλοθέη. Ο Μπενιζέλος σύμφωνα με την κτητορική

επιγραφή, είχε καταφύγει στο μοναστήρι μαζί με τις αδελφές και τη συνοδεία του, ώστε να προστατευτούν από επιδημία που έπληττε τότε την Αθήνα.

### **Το Καθολικό**

Το καθολικό, αφιερωμένο στα Εισόδεια της Θεοτόκου, ανάγεται στο 1.100 μ.Χ. Ο ναός είναι ημισύνθετος τετρακίονιος σταυροειδούς εγγεγραμμένου τύπου με τρούλλο. Έχει το βασικό δηλαδή το σχήμα σταυρού, πιστό στην ελληνική παράδοση, σύμφωνα με την Μ. Σωτηρίου, ή είναι ημικυκλικός τετραμερούς σύμφωνα με τον Αναστάσιο Ορλάνδο[66].

Ο αρχιτεκτονικός αυτός τύπος θεωρείται ότι εισήχθη στη ναοδομία πιθανώς αρχικά στην Κωνσταντινούπολη κατά τον 9ο αιώνα κατά τη διάρκεια της βασιλείας του Βασιλείου Α' (867- 886 μ.Χ.) και γρήγορα εξαπλώθηκε σε όλη τη Βυζαντινή Αυτοκρατορία. Θεωρείται ότι είναι ο περισσότερο αντιπροσωπευτικός βυζαντινός ρυθμός. Το κύριο χαρακτηριστικό αυτού του ρυθμού είναι ο σχηματισμός ενός σταυρού ταυτοχρόνως εσωτερικά και εξωτερικά του κυρίως Ι. Ναού, σε μορφή σχεδόν τετράγωνη, με έναν ή πέντε τρούλους. Στον εγγεγραμμένο σταυροειδή ναό ο κυρίως ναός χωρίζεται σε εννέα τμήματα μέσω τεσσάρων κίωνων. Το κεντρικό τμήμα στεγάζεται από τον κεντρικό τρούλο ο οποίος και στηρίζεται στους τέσσερις κίονες. Τα εσωτερικά πέντε τμήματα σχηματίζουν το σχήμα του σταυρού. Τα τέσσερα τμήματα που είναι σε άμεση επαφή με το κεντρικό τμήμα καλύπτονται από ημι-κυλινδρικούς θόλους, ενώ τα υπόλοιπα γωνιακά τμήματα καλύπτονται από ημιθόλια. Η χωρική αυτή ιεραρχία από το κεντρικό τμήμα στα τέσσερα πλευρικά τμήματα μέχρι τα τέσσερα γωνιακά τμήματα ακολουθείται με μειούμενο ύψος ώστε το κεντρικό τμήμα με τον τρούλο να είναι ψηλότερο. Το καθολικό διαθέτει έναν κεντρικό τρούλο που μοιάζει με τον αρχιτεκτονικό ρυθμό του τρούλου «αθηναϊκού τύπου» ο οποίος συναντάται σε πολλές βυζαντινές εκκλησίες της Αττικής όπως η Καπνικαρέα και οι Άγιοι Θεόδωροι στο κέντρο της Αθήνας. Σύμφωνα με αυτό τον τύπο ο τρούλος αποτελείται από οκτώ πλευρές και διακοσμείται στις γωνίες με όρθιους μαρμαρίνους κιονίσκους. Οι οκτώ πλευρές απολήγουν σε ημικύκλια τα οποία τονίζονται με μαρμάρινο κυματοειδές γείσο. Σε κάθε πλευρά του τρούλου υπάρχει ένα παράθυρο το οποίο είναι κατά κανόνα μονόλοβο (μονό). Στην περίπτωση του κεντρικού τρούλου του καθολικού της Ιεράς Μονής Καισαριανής ο

τρούλος είναι οκτάγωνος χωρίς όμως κιονίσκους και για το λόγο αυτό έχει ευθύγραμμο και οριζόντιο γείσο στην οροφή του σε αντίθεση με το κυματοειδές γείσο των τρούλων «αθηναϊκού τύπου». Οι τέσσερις κεντρικοί κίονες του ναού είναι κατασκευασμένοι από μάρμαρο, ενώ η κατασκευή πεσσών από τούβλα ήταν επίσης συνηθισμένη πρακτική. Εντός του ναού δεν υπάρχει πλούσιος κεραμοπλαστικός διάκοσμος [71].

Στο δυτικό μέρος του κυρίως ναού βρίσκεται το ιερό βήμα, το οποίο διαχωρίζεται από τον κεντρικό ναό από μαρμάρινο τέμπλο. Το ιερό βήμα αποτελείται από τρία ανοίγματα κάθε ένα εκ των οποίων καταλήγει σε αψίδα η οποία στέφεται από κόγχη (μισό τρούλο). Η κεντρική αψίδα είναι μεγαλύτερη από τη βόρεια και τη νότια.

Η κάτοψη του ναού είναι σχεδόν τετράγωνη με πλευρά σχεδόν 8,5m. Το ύψος μέχρι τη βάση του κεντρικού τρούλου εσωτερικά είναι περίπου 7,4m και το εσωτερικό ύψος του τρούλου είναι περίπου 4,2m.

Η τοιχοδομία του ακολουθεί το ισοδομικό πλινθοπερίκλειστο σύστημα. Οι τέσσερις κίονες στο εσωτερικό του ναού προέρχονται από αρχαίο ναό, ενώ το τέμπλο έχει συντεθεί με αρχιτεκτονικά στοιχεία από παλαιοχριστιανική βασιλική ( 5ος-6ος αι.), θεμέλια της οποίας έχουν βρεθεί νοτιοδυτικά της Μονής.

Οι τοιχογραφίες του κυρίως ναού φιλοτεχνήθηκαν στις αρχές του 18ου αιώνα με βάση παλαιότερα εικονογραφικά πρότυπα όπως την κρητική ζωγραφική και τη ζωγραφική του Άγιου Όρους. Στον τρούλλο απεικονίζεται ο Χριστός Παντοκράτορας. Στη διμερή ροζέτα διακρίνεται η ετοιμασία του θρόνου της Παναγίας, ο Ιωάννης ο Πρόδρομος, οι Άγγελοι και μια σύνθετη τοιχογραφία με τους τέσσερις Ευαγγελιστές [70].

Η είσοδος στον ναό γίνεται είτε από τον νάρθηκα που προστέθηκε την περίοδο της Τουρκοκρατίας, είτε από μια είσοδο με μαρμάρινο κατώφλι και ρωμαϊκό επιστύλιο, στην βόρεια πλευρά.



*Εικόνα 6:αριστερά, η είσοδος του ναού –δεξιά, παρεκκλήσι Αγ. Αντωνίου*

#### **2.4 Η Τοιχοδομή του Ναού**

Η εξωτερική τοιχοποιία του Καθολικού της Καισαριανής ακολουθεί το χαρακτηριστικό για τον ελλαδικό χώρο πλινθοπερίκλειστο σύστημα δόμησης. Στα άνω μέρη των τοίχων, στην ανατολική πλευρά πάνω από το ύψος της ποδιάς των παραθύρων καθώς και στον τρούλλο ακολουθείται ιδανική πλινθοπερίκλειστη τοιχοποιία. Στα υπόλοιπα ύψη των τοίχων η μορφή απλουστεύεται όπως συνήθως παρατηρείται σε ναούς της ίδιας περιόδου. Έτσι, στα χαμηλότερα ύψη παρατηρείται ατελής πλινθοπερίκλειστη τοιχοποιία ή τοιχοποιία με πολλούς πλίνθους τοποθετημένους οριζόντια και σε διαφορετικά μήκη. Το πάχος των τοίχων του ναού είναι 0,80m στην βόρεια όψη, στην νότια είναι 0,90m και 0,55m στην ανατολική και δυτική όψη αντίστοιχα. Στη βυζαντινή αρχιτεκτονική και ιδιαίτερα στον ελλαδικό χώρο, οι εσωτερικοί τοίχοι των κτιρίων ήταν κατασκευασμένοι από αργολιθοδομή[72].

### 2.4.1 Τα δομικά υλικά του Καθολικού

Επί τόπου μακροσκοπικές και μικροσκοπικές παρατηρήσεις που έχουν γίνει κατά το παρελθόν, υποδεικνύουν πως οι εξωτερικοί τοίχοι αποτελούνται από πωρόλιθους, ασβεστόλιθους, σχιστόλιθους και κογχυλιάτες λίθους, καθώς και κεραμικά είτε σε οριζόντιες ζώνες, στην περίπτωση του πλινθοπερίλειστου συστήματος δόμησης, είτε σε τυχαία θέση, στην περίπτωση των τοιχοποιιών μεαργολιθοδομή. Για το εσωτερικό της τοιχοποιίας δεν υπάρχει κάποια καταγεγραμμένη μαρτυρία. Σε ορισμένα σημεία όπου το επίχρισμα του εσωτερικού έχει αποκολληθεί, παρατηρούνται τμήματα κογχυλιάτη λίθου [72].

Ο ασβεστόλιθος είναι ιζηματογενές πέτρωμα, του οποίου το βασικό συστατικό είναι ο ασβεστίτης. Συνηθισμένα συστατικά τους σε πολύ μικρές αναλογίες είναι επίσης ο δολομίτης, χαλαζίας ή χαλκηδόνιος, άστριοι, αργιλικά ορυκτά, σιδηρίτης και σιδηροπυρίτης. Οι ασβεστόλιθοι σχηματίζονται από οργανικές ή ανόργανες διεργασίες και μπορεί να είναι χημικοί ή βιογενείς, κλαστικοί, κρυσταλλικοί ή ανακρυσταλλωμένοι [73]. Αρκετοί είναι σε υψηλόβαθμό απολιθωματοφόροι.

Οι κογχυλιάτες λίθοι, είναι ασβεστόλιθοι αποτελούμενοι ως επί το πλείστον από ανθρακικό ασβέστιο υπό τη μορφή ορυκτού ασβεστίτη ή αραγωνίτη και μια πληθώρα απολιθωμάτων, τα οποία μπορεί να ποικίλουν σε μέγεθος. Τα απολιθώματα που περιέχονται μπορεί να είναι κρινοειδή, γαστερόποδα, βραχιόποδα ή οποιοδήποτε όστρακο με σκληρό κέλυφος [74]. Οι κογχυλιάτες χρησιμοποιήθηκαν στη δόμηση αρκετών βυζαντινών μνημείων της Αττικής. Οι κογχυλιάτες που χρησιμοποιήθηκαν στην Μονή Καισαριανής παρουσιάζουν σχήμα οστράκων, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 7: Κογχυλιάτης λίθος



Εικόνα 8: Κογχυλιάτης λίθος FOMx50



Ο σχιστόλιθος είναι πέτρωμα που έχει την ιδιότητα να σχίζεται εύκολα σε παράλληλα επίπεδα. Οι σχιστόλιθοι ανήκουν στην κατηγορία των ιζηματογενών και των κρυσταλλοσχιστωδών πετρωμάτων. Προκύπτουν από ιζηματογενή πετρώματα, κυρίως αργιλικά, και από πυριγενή, κυρίως περιδοτίτες. Διακρίνονται σε αργιλικούς σχιστόλιθους, φυλλίτες και μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους, αμφιβολιτικούς σχιστόλιθους, χλωριτικούς και ταλκικούς [74]. Εξαιτίας της μεγάλης ποικιλίας τους είναι δύσκολη η συστηματική τους κατάταξη, όπως και η διάκρισή τους επειδή υπάρχουν και ενδιάμεσοι τύποι. Μια χαρακτηριστική εικόνα σχιστόλιθου της Μονής Καισαριανής, , όπως ελήφθη με μικροσκόπιο οπτικών ινών, είναι η ακόλουθη:



Εικόνα 9: Σχιστόλιθος



Εικόνα 10: Σχιστόλιθος FOM×50

Τα κονιάματα του καθολικού αναλύονται και χαρακτηρίζονται στο πειραματικό μέρος. Παλιότερες επί τόπου μικροσκοπικές παρατηρήσεις έδειξαν κονιάματα υπόλευκου χρώματος αναμειγμένα με σκουρόχρωμα αδρανή διαφορετικών διαμέτρων, επιπλέον παρατηρήθηκαν συσσωματώματα ασβέστη στη μάζα των κονιαμάτων.

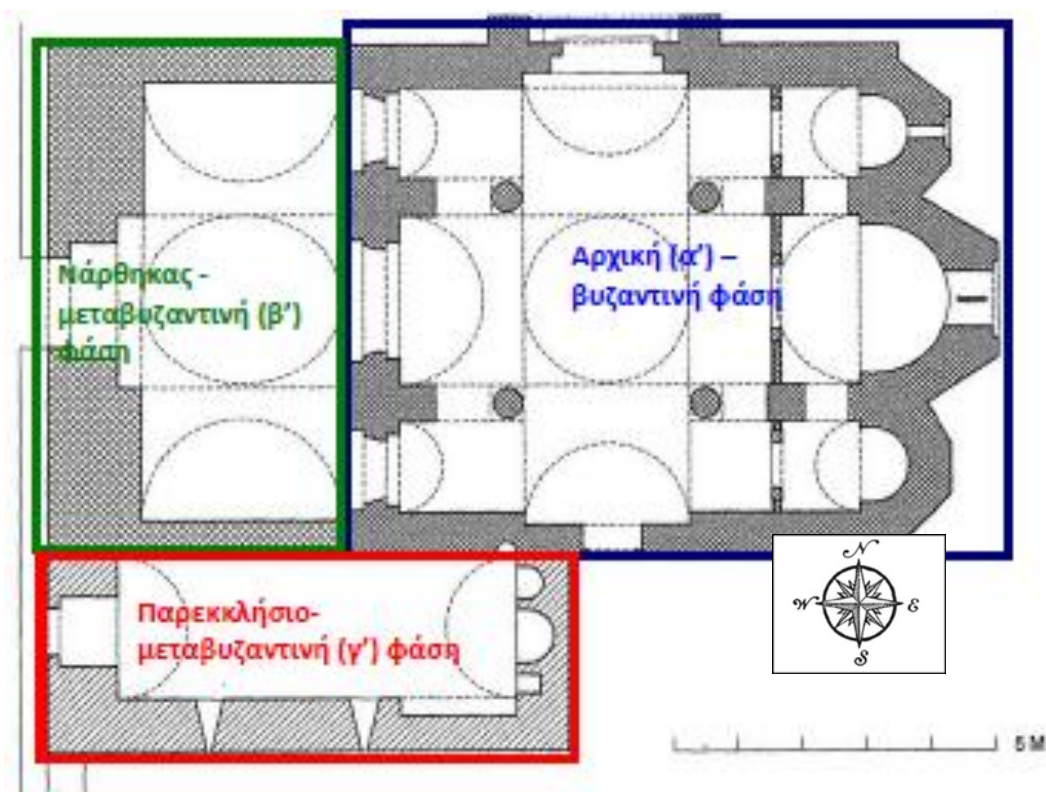
## **2.5 Ιστορικό Επεμβάσεων**

Το καθολικό ήταν σε χρήση καθ' όλη την διάρκεια της Τουρκοκρατίας, οπότε αναπόφευκτα υπέστη διάφορες επεμβάσεις. Κατά τις πρώτες δεκαετίες του 18ου αι., όταν δεν είχε ακόμα αρχίσει η μεγάλη κατάπτωση της μονής, πρέπει να πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη, συνολική αποκατάσταση στο εσωτερικό του καθολικού. Στο πλαίσιο αυτής της αποκατάστασης, έγινε στο εσωτερικό νέα τοιχογράφηση, η οποία, με βάση τεχνοτροπικά δεδομένα, χρονολογείται στις πρώτες δεκαετίες του 18ου αι. Το μεσοβυζαντινό μαρμάρινο τέμπλο

απομακρύνθηκε, ενδεχομένως, κατά την περίοδο αυτή, εάν δεν είχε καταστραφεί ωρύτερα. Επίσης, πριν το 1745 προστέθηκε η σωζόμενη σήμερα Αγία Τράπεζα, από χρωματιστό μάρμαρο, σε σχήμα που προδίδει δυτικοευρωπαϊκή προέλευση.

Η Εφορία Βυζαντινών Αρχαιοτήτων με την επίβλεψη του Α. Ορλάνδου, πραγματοποίησαν μια σειρά από επισκευαστικές εργασίες. Η παλαιότερη από αυτές φαίνεται να έγινε σύμφωνα με σχετικό έγγραφο του 1917. Οι εργασίες αφορούσαν ανασκαφή και επισκευές[75]. Το 1919 πραγματοποιήθηκαν εργασίες στερέωσης των τοιχογραφιών του Καθολικού. Το 1928 επισκευάστηκε η στέγη του Καθολικού όπως επίσης έγιναν και εργασίες στο παρεκκλήσιο. Από το 1930 έως το 1938 η Υπηρεσία Αναστήλωσης υπό τον Α. Ορλάνδο πραγματοποίησε εργασίες στερέωσης στη Μονή και επισκευές στις στέγες του Νάρθηκα και του παρεκκλησίου. Εκτεταμένες εργασίες έγιναν το 1949-1950 όπως η κατεδάφιση του καμαροσκέπαστου κτιρίου στη βόρεια πλευρά του περιβόλου[76], η ανασκαφή του οστεοφυλακίου, η αποχωμάτωση της εξωτερικής πλευράς του Ιερού Βήματος και ανασκαφικές εργασίες που αποκάλυψαν τμήμα θεμελίων από οικοδόμημα παλαιότερο του ναού που δεν ανήκει στο μοναστηριακό συγκρότημα[77]. Η Φιλοδασική Ένωση Αθηνών, το 1950 ανέλαβε τα έξοδα της συντήρησης των κελλιών, της Τράπεζας, του Λουτρώνα και αντικατάσταση των σπασμένων κεραμιδιών της στέγης του Καθολικού. Επίσης ανασυγκροτήθηκε το μαρμάρινο τέμπλο με τα υπάρχοντα γλυπτά που βρίσκονταν στον περίβολο. Την ίδια περίοδο, στο εσωτερικό του ναού έγιναν συμπληρώσεις με ασβεστοκονιάματα. Το 1965 έγιναν εργασίες στερέωσης των τοιχογραφιών του Νάρθηκα καθώς και αντικατάσταση των φθαρμένων επιχρισμάτων. Κατά τον σεισμό του 1981 ο Λουτρώνας και η Τράπεζα παθαίνουν σημαντικές φθορές, η Φιλοδασική Ένωση Αττικής[78] με την επίβλεψη της Υπηρεσίας Μεταβυζαντινών Μνημείων αναλαμβάνουν τις εργασίες. Το 1985 η 1<sup>η</sup> Εφορία Βυζαντινών Αρχαιοτήτων πραγματοποιεί εργασίες ανακεράμωσης στη στέγη του Καθολικού και στον Αγίου Αντώνιο. Στο παρεκκλήσιο έγιναν εκ νέου εργασίες ανακεράμωσης όπως και συντήρησης των τοιχογραφιών το 1997 και το 2003 αντίστοιχα. Επιπλέον, το 2005 γίνεται αρμολόγηση της νότιας και ανατολικής όψης του Αγίου Αντωνίου ενώ από

το 2009-2011 πραγματοποιήθηκαν εργασίες αρμολόγησης στο εσωτερικό του παρεκκλησίου[79].



Σχήμα 3: Κάτοψη του ναού που περιλαμβάνει τις τρεις οικοδομικές φάσεις

Ο Ναός έχει υποστεί πολλές επεμβάσεις συντήρησης οι οποίες δεν είναι είτε καταγεγραμμένες είτε πλήρως τεκμηριωμένες. Κατά την εξέταση του Ναού με χρήση μη καταστρεπτικών τεχνικών [80] παρατηρήθηκαν ορισμένες μη καταγεγραμμένες επεμβάσεις.

Στις παρειές των παραθύρων της ανατολικής όψης του Καθολικού είναι εμφανής η παρουσία οπτόπλινθων αποκατάστασης, έντονου κόκκινου χρωματισμού, καθώς και κονιαμάτων αποκατάστασης έντονου μπλε χρωματισμού, προερχόμενα από νεότερη επέμβαση αποκατάστασης, μη καταγεγραμμένη. Οι εικόνες μικροσκοπίας οπτικών ινών έδειξαν ότι οι συγκεκριμένοι οπτόπλινθοι όπως και τα γειτονικά τους κονιάματα εμφανίζουν εξαιρετική κατάσταση διατήρησης.

Στον βόρειο τοίχο του νάρθηκα παρατηρούνται πολλά και διαφορετικά μεταξύ τους κονιάματα συμπλήρωσης, τα οποία σύμφωνα με τα αποτελέσματα των σαρώσεων που πραγματοποιήθηκαν με γεωραντάρ, αλλά και με τα αποτελέσματα της θερμογραφίας υπερύθρου δεν είναι όλα συμβατά με τα αυθεντικά υλικά της

τοιχοποιίας και προκαλούν προβλήματα παραμένουσας υγρασίας στο βάθος της τοιχοποιίας.

Στον τρούλο του νάρθηκα, ο οποίος είναι κατασκευασμένος από αργολιθοδομή και ανήκει σε μεταγενέστερη οικοδομική φάση (17ος αι.), σε σχέση με το καθολικό, παρατηρείται μέσω της θερμογραφίας υπερύθρου θερμοκρασιακό εύρος παραπλήσιο με αυτό της δυτικής κεραίας του καθολικού, η οποία ανήκει στην αρχική οικοδομική φάση και είναι κατασκευασμένη με το σύστημα της ατελούς πλινθοπερίκλειστης τοιχοποιίας. Η ομοιότητα αυτή είναι ένδειξη εξαιρετικής συμβατότητας των υλικών. Παράλληλα στην δυτική όψη είναι εμφανής η χρήση επιχρισμάτων διαφορετικών στρώσεων που προφανώς ανάγονται σε διαφορετικές περιόδους.

Στο παρεκκλήσιο του Αγίου Αντωνίου η ανατολική τοιχοποιία πρέπει να είναι ανακατασκευασμένη, καθώς φαίνεται πως αρχικά εκτεινόταν κατά 2,6 m προς τα ανατολικά. Παράλληλα η ύπαρξη σπαραγμάτων τοιχογραφίας σε θέσεις που δεν μπορούν να αντιστοιχούν, είναι ένδειξη πως τα δομικά υλικά της τοιχοποιίας είναι δεύτερης χρήσης και προέρχονται από άλλη θέση. Επιπλέον η κατακόρυφη εσοχή στη νότια όψη του παρεκκλησίου, ίσως υποδηλώνει κάποια παλαιότερη οικοδομική φάση, κατά την οποία το παρεκκλήσιο έφθανε ως το σημείο αυτό, ενώ ίσως αργότερα προεκτάθηκε προς τα δυτικά. Η εσοχή αυτή βρίσκεται ακριβώς πάνω στην προέκταση του δυτικού τοίχου του καθολικού, ο οποίος σήμερα αποτελεί τον ενδιάμεσο με το νάρθηκα τοίχο.

### **3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

### **3.1. Σχεδιασμός πειραματικής διαδικασίας**

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε χαρακτηρισμός των ιστορικών δομικών υλικών του Καθολικού της Μονής Καισαριανής. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν κονιάματα δόμησης προερχόμενα από την ανατολική, τη βόρεια και τη νότια όψη του Καθολικού, καθώς και κονιάματα δόμησης που ελήφθησαν από το εσωτερικό του ναού και συγκεκριμένα από την δυτική όψη, στη συμβολή με τον Νάρθηκα, καθώς και από το εσωτερικό του βόρειου τοίχου του κυρίως Ναού. Παράλληλα, εξετάστηκαν και δυο δείγματα δομικών οπτοπλίνθων.

Μετά τον χαρακτηρισμό των δομικών υλικών, τέθηκαν προδιαγραφές για σύνθεση κονιάματος αποκατάστασης, ώστε να πληροί κριτήρια συμβατότητας και επιτελεστικότητας.

Τα ιστορικά δομικά υλικά μελετήθηκαν με:

- Μικροσκοπία οπτικών ινών (FOM)
- Κοκκομετρική διαβάθμιση
- Περίθλαση ακτίνων Χ (XRD)
- Θερμικές μέθοδοι ανάλυσης (DTA-TG)
- Ποροσιμετρία υδραργύρου
- Υδατοαπορρόφηση
- Προσδιορισμός ολικών διαλυτών αλάτων (SST%) και δοκιμές ποιοτικής χημικής ανίχνευσης (SPOT TESTS)

Αναλυτικότερα σχετικά με τις μεθόδους ανάλυσης των ιστορικών κονιαμάτων:

- **Μικροσκοπία οπτικών ινών (FOM)**

Πρόκειται για ένα φορητό μικροσκόπιο με το οποίο μπορεί να εξετάσει επιτόπου ολόκληρη επιφάνεια ενός συνόλου χωρίς να απαιτείται προκατεργασία ή αλλοίωση των υλικών. Το μικροσκόπιο οπτικών ινών χρησιμοποιεί ως πηγή λευκό φως (λάμπα αλογόνου). Συνίσταται στη μετάδοση των σημάτων με φως (οπτικές ίνες), αντί ηλεκτρικού ρεύματος (μεταλλικοί αγωγοί). Χρησιμοποιείται για την εξέταση των επιφανειών από την άποψη της υφής, της μορφολογίας και της μικροδομής των υλικών, την αναγνώριση του τύπου φθοράς, την εκτίμηση των αποτελεσμάτων μεθόδων συντήρησης, καθαρισμού στερέωσης και προστασίας, την επί τόπου

παρατήρηση κονιαμάτων, την παρατήρηση διεπιφανειακών φαινομένων[81]. Στην προκειμένη περίπτωση έγινε χρήση του PICO SCOPEMAN-MORITEX.

#### ο **Κοκκομετρική διαβάθμιση**

Η κοκκομετρική διαβάθμιση είναι η μέθοδος διαχωρισμού της κονίας από τα αδρανή αλλά και ταξινόμησης των αδρανών με βάση το μέγεθος των κόκκων. Το πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε είναι το Normal 27/88 [82] και τα κόσκινα επιλέχθηκαν κατά ISO 565 με διάμετρο σπών 0,063, 0,125, 0,25, 0,5, 1, 2, 4, 8 και 16mm. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται τόσο ως αναλυτικό εργαλείο, δηλαδή για την ανάλυση του μεγέθους και της κατανομής μεγέθους των κόκκων, όσο και σαν παρασκευαστική τεχνική για τον διαχωρισμό κονίας σε κλάσματα με βάση το μέγεθος των κόκκων. Βάσει της δοκιμής της κοκκοδιαβάθμισης εξάγονται συμπεράσματα για την αναλογία συνδετικής ύλης/αδρανή, ενώ παράλληλα προσδιορίζονται ποσοστιαία τα διάφορα μεγέθη κόκκων που χαρακτηρίζουν τα αδρανή υλικά. Το αποτέλεσμα της δοκιμής δίνει μια εικόνα της κοκκομετρικής σύνθεσης του υλικού, παριστάνεται δε με την αντίστοιχη κοκκομετρική καμπύλη. Παράλληλα, επιτυγχάνεται ο φυσικός διαχωρισμός του δείγματος.

#### ο **Περίθλαση ακτίνων Χ (XRD)**

Η περίθλαση ακτίνων Χ εφαρμόστηκε με το όργανο *Advance D8 Diffractometer* της εταιρείας *Bruker Corporation*, σύμφωνα με τα πρότυπα Normal 34/91 [83] και Normal 27/88 [82]. Για τα κρυσταλλικά υλικά, η περίθλαση ακτινοβολίας αποτελεί μία από τις πλέον ικανές μεθόδους αφενός ως προς τον χαρακτηρισμό της κρυσταλλικής δομής και αφετέρου ως προς τη ταυτοποίηση των ενώσεων που παρουσιάζονται στα υπό εξέταση δείγματα. Η μέθοδος χρησιμοποιεί τις ακτίνες Χ επιτυγχάνοντας με ακρίβεια τον προσδιορισμό των ορυκτών. Οι αποστάσεις μεταξύ των δικτυωτών επιπέδων των κρυστάλλων ενός ορυκτού, το είδος των ατόμων και η κατανομή τους στα δικτυωτά επίπεδα είναι χαρακτηριστικά για κάθε ορυκτό. Το μήκος κύματος των ακτίνων Χ είναι μεταξύ της υπεριώδους ακτινοβολίας και των ακτίνων γάμμα στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και το μέγεθός τους είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τις ενδοατομικές αποστάσεις στους κρυστάλλους.

Όταν δέσμη ακτίνων X προσπίπτει πάνω σε ένα κρύσταλλο παρατηρείται το φαινόμενο περίθλασης τους, η οποία εξαρτάται από το μήκος κύματος των ακτίνων X, τον προσανατολισμό και τη δομή των κρυστάλλων. Η δέσμη των ακτίνων X αλληλεπιδρά με την ηλεκτρονιακή πυκνότητα των ατόμων ή των ιόντων του κρυσταλλικού πλέγματος, δημιουργώντας έναν ηλεκτρονικό χάρτη του εξεταζόμενου κρυστάλλου.

Η χρήση της μεθόδου σε δομικά υλικά αποκαλύπτει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την κρυσταλλική δομή, το μέγεθος των κρυστάλλων, μικροσκοπικές καταπονήσεις και αποδίδει ημιποσοτική ανάλυση των ορυκτολογικών φάσεων [84].

#### ο **Θερμικές μέθοδοι ανάλυσης (DTA-TG)**

Η μέθοδος DTA έχει μεγάλη αποτελεσματικότητα στο χαρακτηρισμό των κονιαμάτων. Μπορεί να μας αποκαλύψει την ταυτότητα πολλών συστατικών του κονιάματος και μας δίνει τη δυνατότητα να παρακολουθήσουμε αντιδράσεις που σχετίζονται με την ελεγχόμενη θέρμανση του κονιάματος. Σε συνδυασμό με την TG παίρνουμε και μετρήσεις απώλειας βάρους. Οι πληροφορίες που μας δίνουν οι θερμικές μέθοδοι είναι ποιοτικές και ποσοτικές όσον αφορά τον προσδιορισμό των συστατικών ενός κονιάματος, προσδιορίζουν την υδραυλική ή αερική φάση ενός κονιάματος και γενικά δίνουν σημαντικές πληροφορίες για την φύση των αδρανών και της κονιάς.

Οι θερμικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των θερμικών μεταβολών που υφίστανται τα κονιάματα θερμαινόμενα σε μια θερμοκρασιακή κλίμακα 25-1000°C και με ρυθμό 10°C/min. Επιτρέπουν συνεχή καταγραφή δεδομένων υπό μορφή θερμικών φασμάτων. Το θερμογράφημα χαρακτηρίζει ένα απλό ή σύνθετο σύστημα υλικών βάσει μεταβολών των θερμοδυναμικών, φυσικών ή μηχανικών ιδιοτήτων τους, των μεταβολών της δομής τους και της κινητικής των χημικών/φυσικοχημικών δράσεων που λαμβάνουν χώρα συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Οι DTA και TG εξυπηρετούν ποιοτικές και ποσοτικές απαιτήσεις χαρακτηρισμού των υλικών αντίστοιχα, την αποτίμηση της συμβατότητας διαφόρων υλικών σε ένα σύστημα, καθώς και τη συμπεριφορά των σύνθετων υλικών σε συνθήκες του



λειτουργικού τους περιβάλλοντος[86]. Για την διεξαγωγή των θερμικών αναλύσεων χρησιμοποιήθηκε το όργανο *Mettler Toledo 651e* και το *Netzsch Simultaneous Thermal Analysis – STA 403 EP*.

#### ο Ποροσιμετρία υδραργύρου

Για την εφαρμογή της Ποροσιμετρίας Υδραργύρου χρησιμοποιήθηκε το όργανο *Pascal 400 Thermo-Electronics-Corporation*, η μέθοδος εφαρμόστηκε σύμφωνα με τα πρότυπα *Normal 4/80* [87] και *Normal 27/88* [82]. Η Πορομετρία Υδραργύρου μας παρέχει πληροφορίες για τη μικροδομή, το πορώδες, τη μέση ακτίνα πόρων και την πυκνότητα. Η μελέτη της δομής των πορώδων υλικών αποτελεί ένα θεμελιώδες βήμα στον καθορισμό των σχέσεων ανάμεσα στις δομικές παραμέτρους του υλικού και τις ιδιότητές του, ενώ ταυτόχρονα θέτει τις βάσεις σε οποιαδήποτε προσπάθεια βελτίωσης αυτών των ιδιοτήτων, ελέγχου της συμβατότητας διαφορετικών υλικών, καθώς και σχεδιασμού και αριστοποίησης της παραγωγής νέων υλικών. Αποτελεί επίσης θεμελιώδες εργαλείο εξέτασης της επίδρασης του περιβάλλοντος στα υλικά (επιδεκτικότητα των υλικών στη φθορά), καθώς και αποτίμησης των επεμβάσεων (υλικά και μέθοδοι) συντήρησης και προστασίας τους [88].

#### ο Υδατοαπορρόφηση

Ο προσδιορισμός του συντελεστή υδατοαπορρόφησης εφαρμόστηκε σύμφωνα με το πρότυπο *Normal 11/85* [89]. Το κεραμικό δείγμα MK3b ξηράνθηκε για 24h στους 100°C και ζυγίστηκε. Έχοντας τοποθετήσει φύλλο διηθητικού χαρτιού ως βάση το δείγμα τοποθετήθηκε σε κλίνη (η κλίνη είχε πληρωθεί με νερό 2mm). Σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα το δοκίμιο απομακρυνόταν και ζυγιζόταν. Η μέτρηση συνεχίστηκε μέχρι το ύψος και το βάρος του νερού να σταθεροποιηθεί. Τα δεδομένα βάρους χρόνου καταγράφηκαν σε διάγραμμα και από το σχετικά ευθύ τμήμα της καμπύλης υπολογίστηκε ο συντελεστής υδατοαπορρόφησης. Ο έλεγχος της υδατοαπορρόφησης αποτελεί θεμελιώδες εργαλείο εξέτασης της επίδρασης του περιβάλλοντος στα υλικά (επιδεκτικότητα στη φθορά) καθώς και αποτίμησης των επεμβάσεων συντήρησης και προστασίας τους[90].

- Προσδιορισμός ολικών διαλυτών αλάτων (SST%) και δοκιμές ποιοτικής χημικής ανίχνευσης (SPOT TESTS)

Ο προσδιορισμός των ολικών διαλυτών αλάτων εφαρμόστηκε από το ιταλικό πρότυπο *Normal 13/83* [91] , κατά το οποίο λαμβάνει χώρα ζύγιση  $100 \pm 5$ mg ξηρού δείγματος σε σκόνη, το οποίο διαλύεται σε 100ml απιονισμένου νερού. Εικοσιτέσσερις ώρες μετά την παρασκευή των διαλυμάτων μετρείται η αγωγιμότητά τους, η οποία εκφράζεται σε  $\mu$ Siemens. Συμπληρωματικά, πραγματοποιούνται δοκιμές ποιοτικής χημικής ανίχνευσης χλωριούχων ( $\text{Cl}^-$ ) και θειικών αλάτων ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), και νιτρικών αλάτων ( $\text{NO}_3^{2-}$ ), δεδομένης της καθοριστικής συμβολής τους στη φθορά των υλικών. Η ποσοτική παρουσία των θειικών ιόντων όπως και των χλωριόντων καθορίζει την ένταση του θολώματος. Η ανίχνευση νιτρικών αλάτων γίνεται αντιδραστήριο διφαινυλαμίνης. Η ποσοτική παρουσία νιτρικών εμφανίζεται με χαρακτηριστική ένταση κυανής χροιάς[92].

### 3.2 Δειγματοληψία

Η δειγματοληψία στο Καθολικό της Μονής Καισαριανής πραγματοποιήθηκε από την ερευνητική ομάδα του Ε.Μ.Π., υπό τον Επ. Καθηγητή Α. Μπακόλα στις 29 Οκτωβρίου 2015 με τη ταυτόχρονη παρουσία της Εφόρου Βυζαντινών Αρχαιοτήτων Ε. Βολτυράκη.

Στον **Πίνακα 8** παρουσιάζεται η κωδικοποίηση των δειγμάτων που εξετάστηκαν, η θέση δειγματοληψίας τους καθώς και τα χαρακτηριστικά τους. Ακολουθεί ο **Πίνακας 9** με τις θέσεις δειγματοληψίας. Στο Παράρτημα 1 παρατίθεται η κάτοψη της Μονής Καισαριανής όπου είναι σημειωμένες οι θέσεις δειγματοληψίας.

**Πίνακας 8: Κωδικοποίηση δειγμάτων**

Δείγμα	Θέση	Περιγραφή
MK1	Κόγχη Ιερού, δεξιά πλευρά 2 <sup>η</sup> δοκοθήκη	Κονίαμα υπόλευκου χρώματος με λίγα άχυρα, τα αδρανή δεν διακρίνονται.  Απόσταση από το έδαφος 1,4 m
MK2	Ανατολική όψη, κόγχη Ιερού αριστερή πλευρά, δοκοθήκη	Κονίαμα με συσσωματώματα ασβέστη και άχυρα, διακρίνονται αδρανή σκούρου χρώματος.  Απόσταση από το έδαφος 1,4 m
MK2b	Ανατολική όψη, κόγχη Ιερού αριστερή πλευρά, δοκοθήκη	Κονίαμα από αρμό πλινθοπερίκλειστου, λευκού χρώματος, με λίγα άχυρα και εύθρυπτο.  Απόσταση από το έδαφος 1,4 m
MK3a	Ανατολική όψη Ναού, κόγχη Ιερού, αριστερή πλευρά	Αποσαθρωμένη φλούδα κεραμικού με βιοδιάβρωση.  Απόσταση από το έδαφος περίπου 0,40 m
MK3b	Ανατολική όψη Ναού, κόγχη Ιερού, αριστερή πλευρά, δοκοθήκη	Μεγάλο κομμάτι κεραμικού πλίνθου. Υπολείμματα λευκού κονιάματος με άχυρα, προσκολλημένο στις επιφάνειες του κεραμικού.

		Απόσταση από το έδαφος περίπου 0,40 m
MK4	Βόρεια όψη Ναού, αριστερά της εισόδου- τοίχος κυρίως Ναού, 2 <sup>η</sup> δοκοθήκη αριστερά της παραστάδας	Κονίαμα λευκού χρώματος με άχυρα. Διακρίνονται σκουρόχρωμα αδρανή.  Απόσταση από το έδαφος 3,1 m
MK5	βόρεια όψη δεξιά της πόρτας, δοκοθήκη	Κονίαμα αρμού από πλινθοπερίκλειστο. Η εξωτερική πλευρά του δείγματος φέρει ροζ χρώμα πάχους περίπου 1mm (MK5a). Το υπόλοιπο τμήμα (MK5b).είναι υπόλευκου χρώματος και διακρίνονται αδρανή σκούρου χρώματος.  Απόσταση από το έδαφος 3,5 m και 2,8m από το πεζούλι
MK6	Εσωτερικό βόρεια όψη αριστερά της πόρτας, δοκοθήκη	Κονίαμα υπόλευκου χρώματος. Διακρίνονται αδρανή σκούρου και ανοιχτού γκρι χρώματος.  Απόσταση από το έδαφος 3 m
MK7	Εσωτερική πλευρά Καθολικού, δυτικός τοίχος Ιερού – συμβολή με Νάρθηκα αριστερή δοκοθήκη	Κονίαμα υπόλευκου χρώματος. Διακρίνονται αδρανή διαφόρων μεγεθών σκούρου γρι χρώματος και λευκά συσσωματώματα κονίας.  Απόσταση από το έδαφος 2,1 m
MK8	Νότια όψη Ναού, νοτιοανατολική γωνία κάτω δεξιά, 1 <sup>η</sup> δοκοθήκη	Κονίαμα υπόλευκου χρώματος με σκούρα αδρανή.  Απόσταση από το έδαφος 3,6 m

### 3.3 Θέσεις Δειγματοληψίας

Πίνακας 9: θέσεις δειγματοληψίας

Δείγμα MK1



Δείγματα MK2 και MK2b



Δείγματα ΜΚ3α και ΜΚ3β



Δείγμα ΜΚ4



Δείγμα MK5



Δείγμα MK6



Δείγμα MK7



Δείγμα MK8





### 3.4 Φωτογραφική Τεκμηρίωση Δειγμάτων

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζεται η φωτογραφική απεικόνιση των δειγμάτων , που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών.

**Πίνακας 10:φωτογραφική τεκμηρίωση δειγμάτων**

**ΜΚ1**



**ΜΚ2**



**ΜΚ2b**



**ΜΚ3a**



**MK3b**



**MK4**



**MK5**



**MK6**



**MK7**



**MK8**

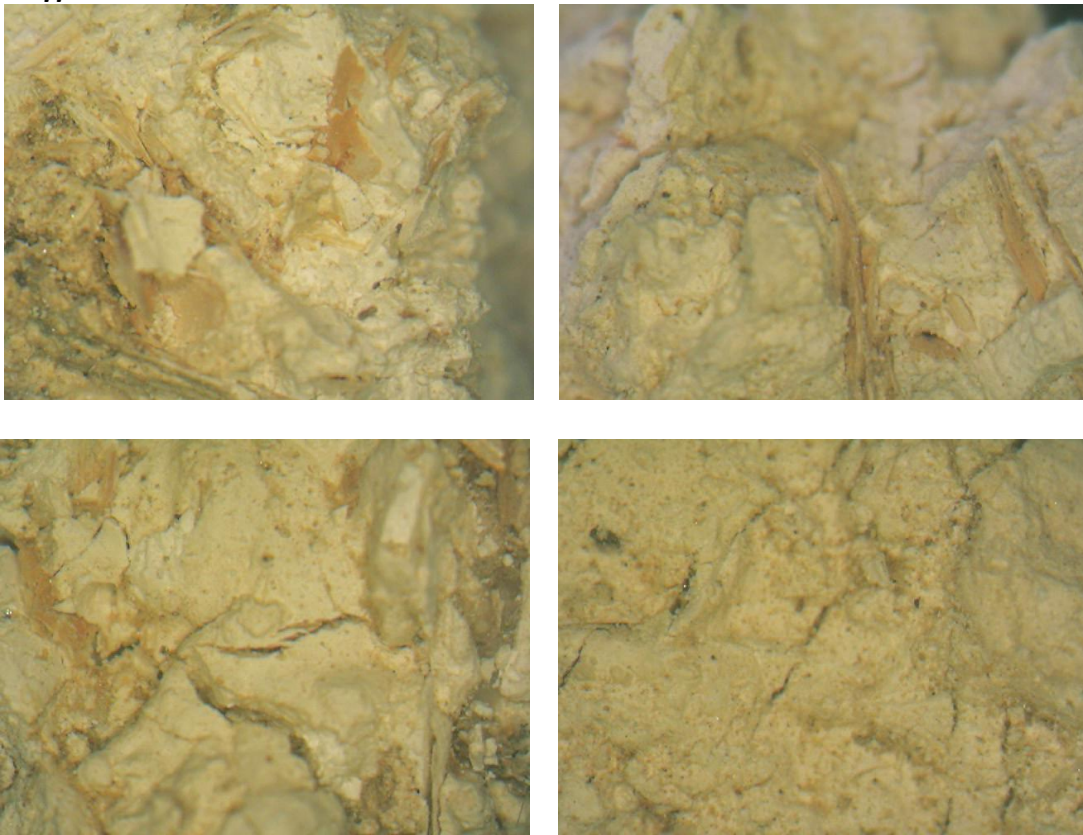


## **4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ** **ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ**

#### **4.1 Μικροσκοπία Οπτικών Ινών**

Από την εξέταση των δειγμάτων σε μεγεθύνσεις  $\times 50$  λαμβάνουν χώρα οι ακόλουθες παρατηρήσεις επί των μορφολογικών χαρακτηριστικών των δειγμάτων.

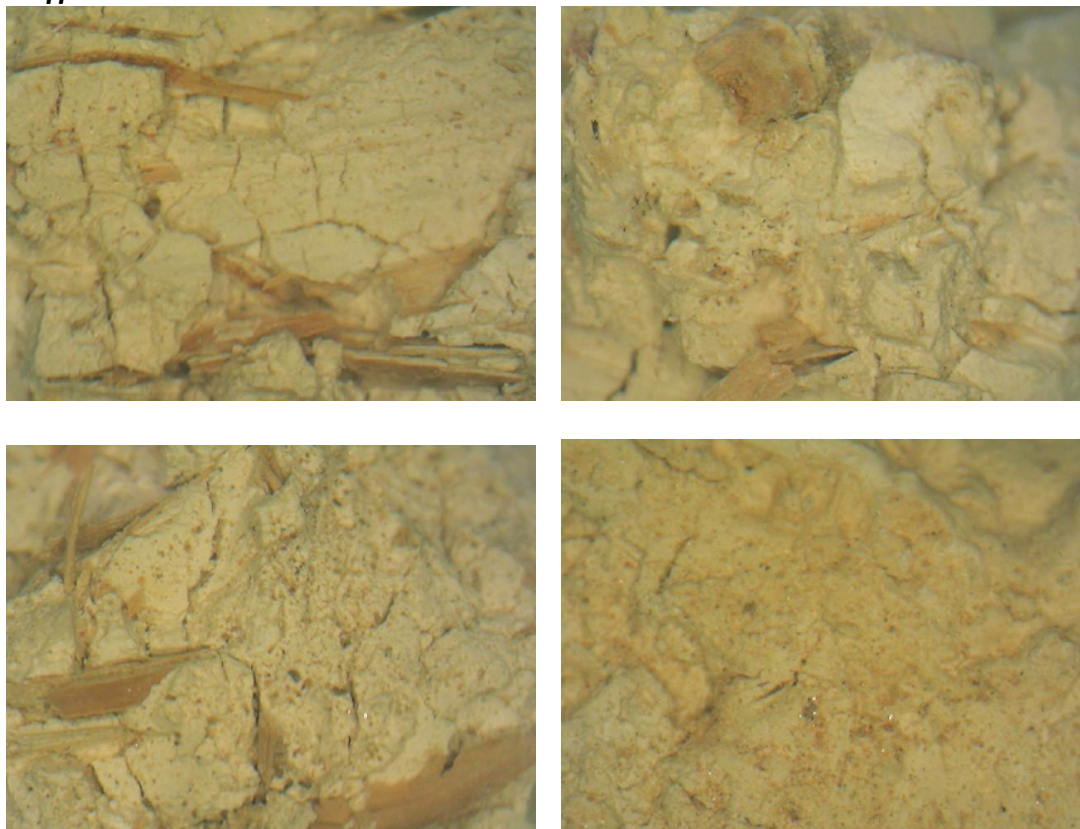
##### **Δείγμα MK1**



**Εικόνα 11: FOM μεγέθυνση  $\times 50$  δείγμα MK1**

Πρόκειται για κονίαμα υπόλευκου χρώματος, πιθανόν ασβεστιτικής φύσης. Το κονίαμα είναι εύθρυπτο και παρατηρούνται συσσωματώματα ασβέστη. Οι ρηγματώσεις είναι έντονες. Τα άχυρα στη μάζα του δείγματος είναι εμφανή, ενώ δεν διακρίνονται αδρανή.

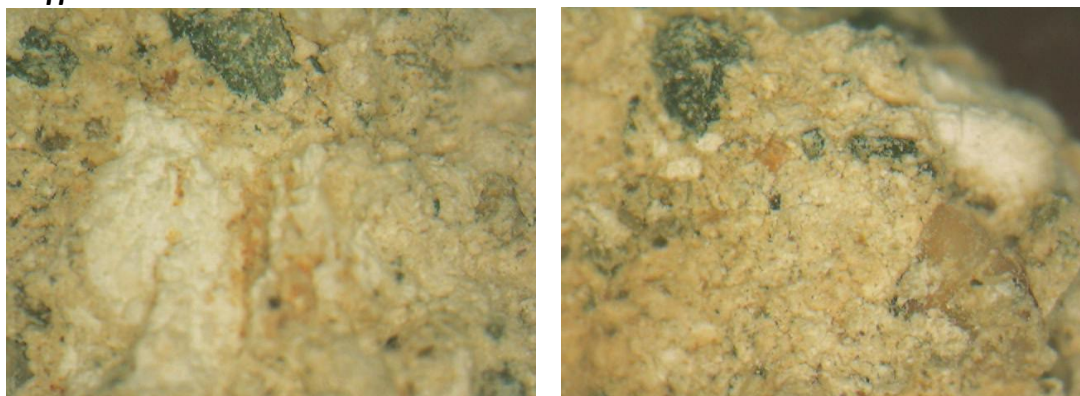
### **Δείγμα MK2**

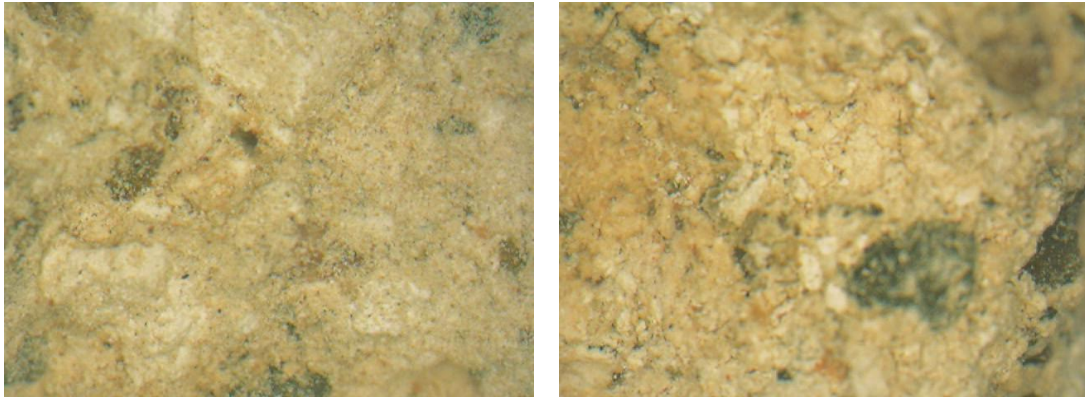


**Εικόνα 12: FOM μεγέθυνση×50 δείγμα MK2**

Πρόκειται για κονίαμα δομής υπόλευκου χρώματος, πιθανόν ασβεστιτικής φύσης, το οποίο ελήφθη από την ανατολική όψη. Το κονίαμα είναι εύθρυπτο, με ρηγματώσεις. Διακρίνονται μεγάλα συσσωματώματα ασβέστη. Η ποσότητα άχυρου στη μάζα του δείγματος είναι μεγάλη. Παρατηρούνται αδρανή σκούρου χρώματος.

### **Δείγμα MK2b**

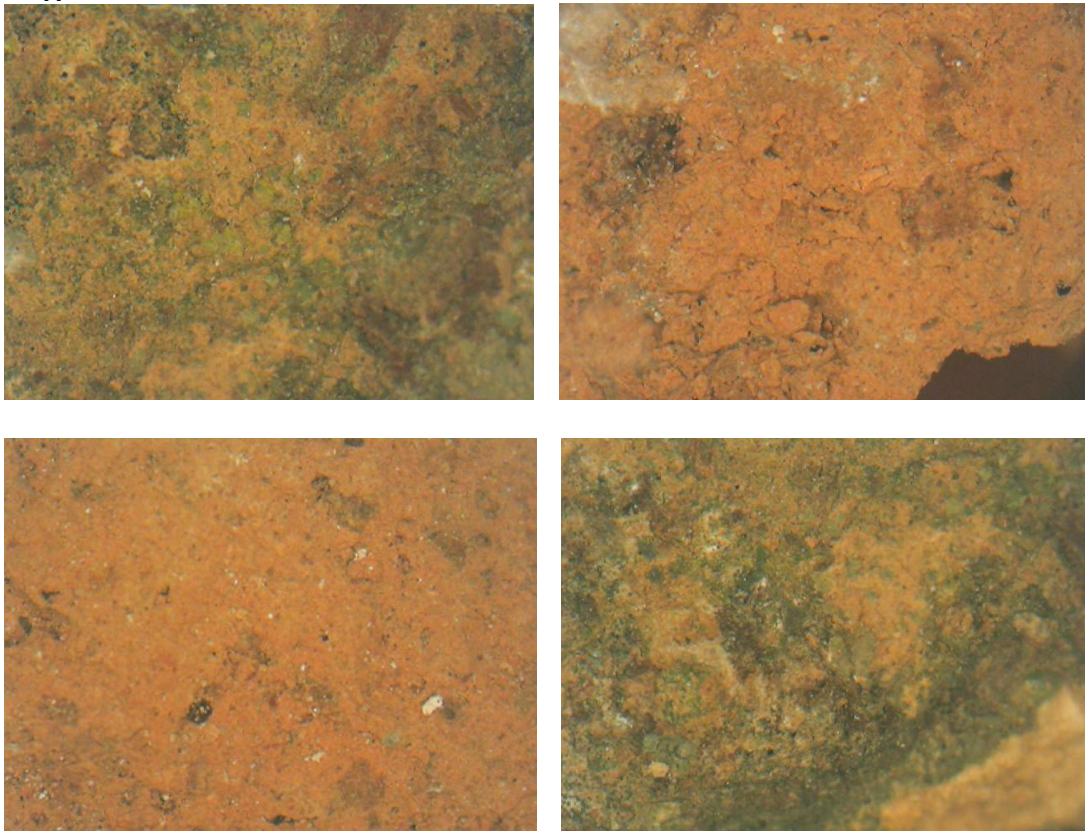




**Εικόνα 13: FOM μεγέθυνση x50 δείγμα MK2b**

Πρόκειται για κονίαμα λευκού χρώματος, το οποίο ελήφθη από την ανατολική όψη στην ίδια θέση με το δείγμα MK2 και συγκεκριμένα από τον αρμό τουπλινθοπερίκλειστου (τελικό αρμολόγημα). Το κονίαμα είναι αρκετά συνεκτικό, διακρίνονται συσσωματώματα ασβέστη. Παρατηρούνται αδρανή διαφόρων διαμέτρων και σκούρου χρώματος.

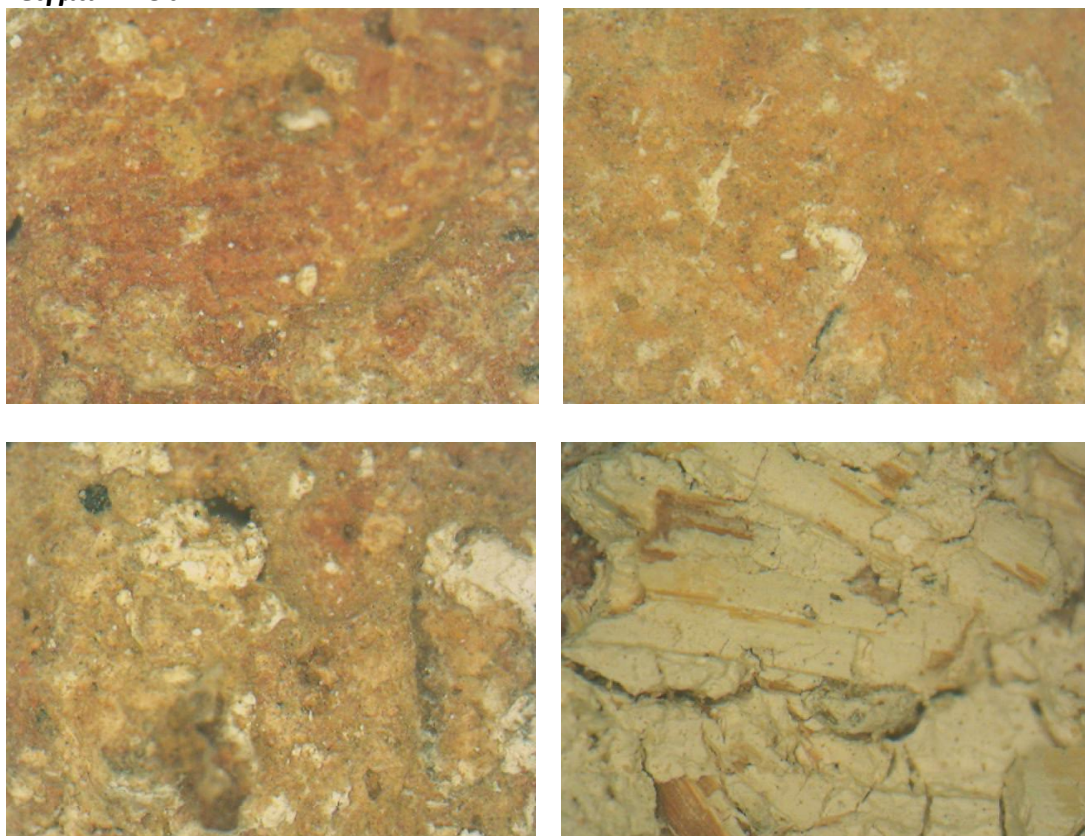
**Δείγμα MK3a**



**Εικόνα 14: FOM μεγέθυνση x50 δείγμα MK3a**

Πρόκειται για αποφλοιωμένο τμήμα κεραμικού πλίνθου. Το δείγμα είναι αρκετά διαβρωμένο, παρουσιάζει έντονα στοιχεία βιοδιάβρωσης, πράσινου χρώματος. Διακρίνονται ρηγματώσεις σε ορισμένα σημεία, καθώς επίσης και αδρανή σκούρου και λευκού χρώματος.

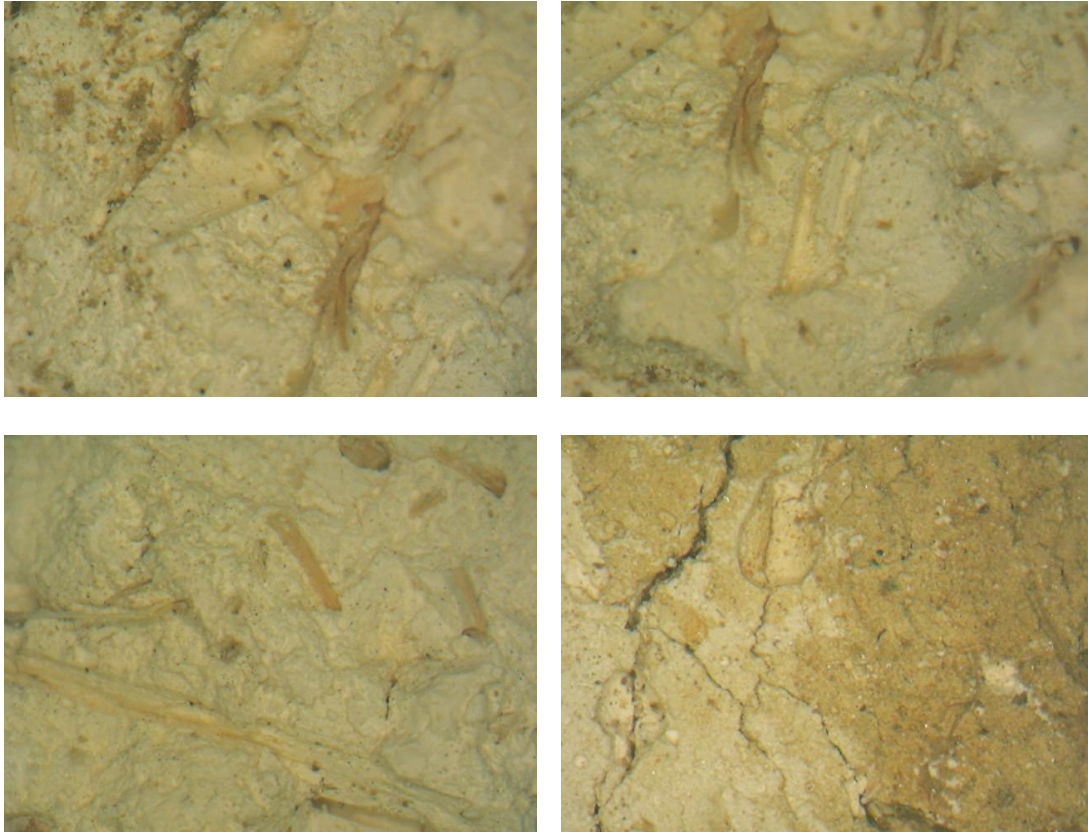
**Δείγμα MK3b**



**Εικόνα 15: FOM μεγέθυνση x50 δείγμα MK3b**

Πρόκειται για κεραμικό πλίνθο από την ανατολική τοιχοποιία του Καθολικού, ο οποίος ήταν αποκολλημένος, αλλά παλαιότερα ήταν μέρος του πλινθοπερίκλειστου δομικού συστήματος της τοιχοποιίας. Ο πλίνθος περιβάλλεται στο μεγαλύτερο μέρος του από κονίαμα, στο οποίο είναι έντονη η παρουσία άχυρου. Το κονίαμα διακρίνεται σε όλες τις εικόνες. Επίσης παρατηρούνται ορισμένα αδρανή σκούρου χρώματος στη μάζα του πλίνθου.

**Δείγμα MK4**



**Εικόνα 16: FOM μεγέθυνση×50 δείγμα MK4**

Πρόκειται για κονίαμα δομής λευκού χρώματος, το οποίο ελήφθη από τη βόρεια όψη του Καθολικού. Το κονίαμα είναι αρκετά συνεκτικό, διακρίνονται συσσωματώματα ασβέστη. Επίσης παρατηρούνται άχυρα και ορισμένες ρηγματώσεις. Τα αδρανή δεν διακρίνονται.



Το δείγμα MK5 είναι κονίαμα αρμού, παραδοσιακού βυζαντινού τύπου και ελήφθη από τη βόρεια τοιχοποιία του Καθολικού. Στην εξωτερική πλευρά παρουσίαζε μία λεπτή στρώση ροζ απόχρωσης πάχους περίπου 1mm. Το δείγμα χωρίστηκε σε δύο τμήματα, το MK5a που είναι το ροζ τμήμα (εξωτερικό) και το MK5b (εσωτερικό).

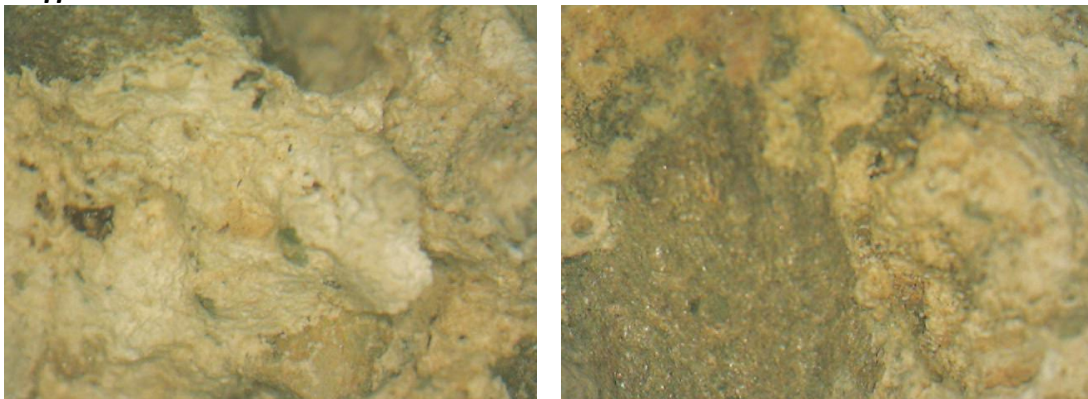
#### **Δείγμα MK5a**



**Εικόνα 17: FOM μεγέθυνση×50 δείγμα MK5a**

Πρόκειται για κονίαμα ροζ χρώματος πάχους 1mm. Το χρώμα ίσως οφείλεται στη χρήση κεραμάλευρου, όπως ήταν σύνηθες σε κονιάματα αυτής της περιόδου. Στην εικόνα παρατηρείται βιοδιάβρωση καθώς και μικρές αλλοιώσεις στην χρωματισμένη επιφάνειά του.

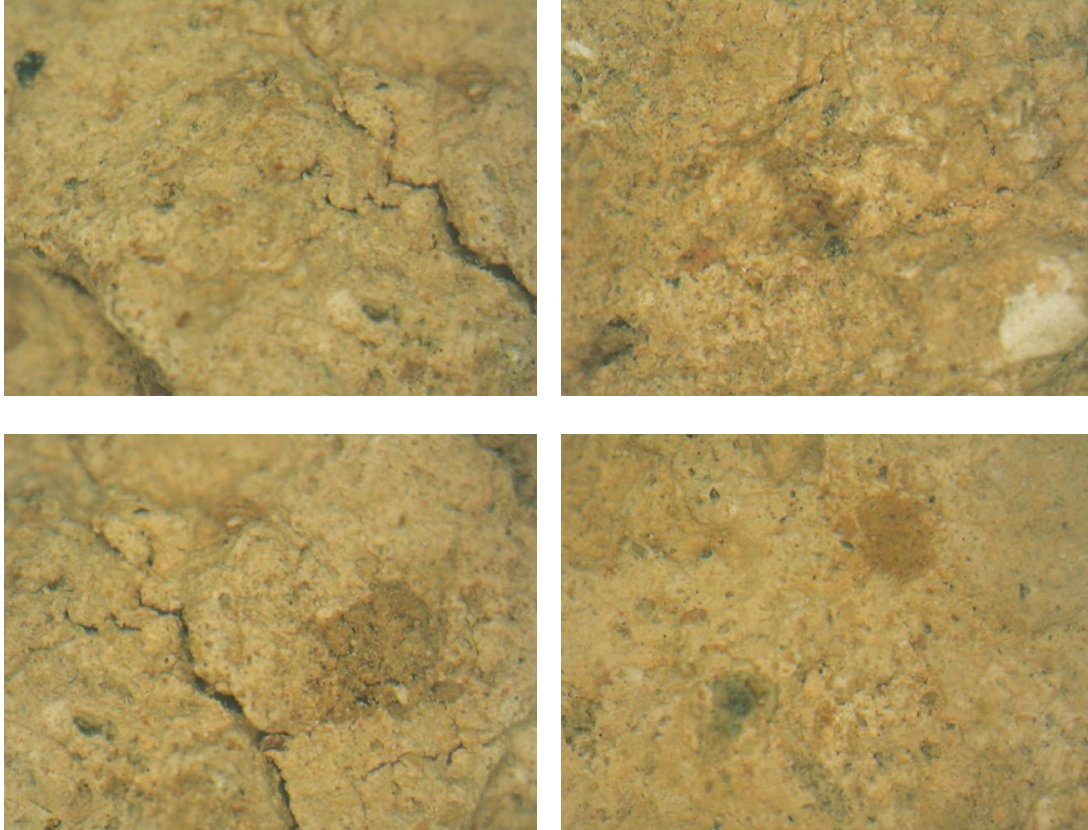
#### **Δείγμα MK5b**



**Εικόνα 18: FOM μεγέθυνση×50 δείγμα MK5b**

Πρόκειται για κονίαμα υπόλευκου χρώματος. Το κονίαμα είναι αρκετά συνεκτικό, διακρίνονται συσσωματώματα ασβέστη. Παρατηρούνται αδρανή διαφόρων διαμέτρων και σκούρου χρώματος.

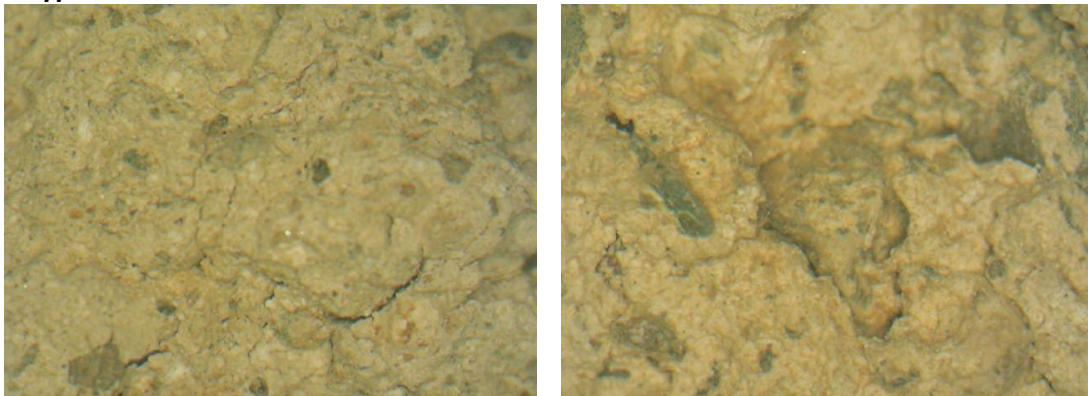
### **Δείγμα MK6**

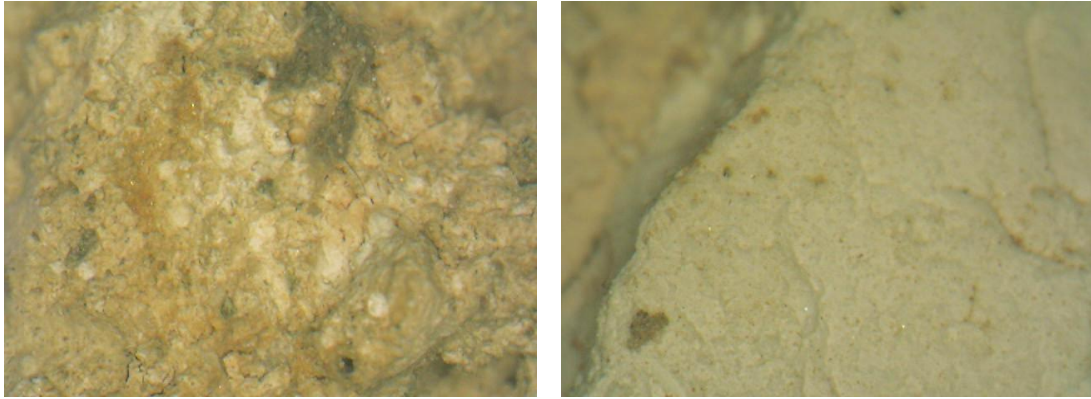


**Εικόνα 19: FOM μεγέθυνση×50 δείγμα MK6**

Πρόκειται για κονίαμαδομής υπόλευκου χρώματος, το οποίο ελήφθη από τη βόρεια όψη του Καθολικού, από το εσωτερικό του Ναού. Παρατηρούνται βαθιές ρηγματώσεις, κρατήρες και διακρίνονται συσσωματώματα ασβέστη. Το κονίαμα δεν παρουσιάζει συνεκτικότητα και είναι σε κακή κατάσταση διατήρησης. Τα αδρανή είναι διαφόρων διαμέτρων και σκούρου χρώματος.

### **Δείγμα MK7**

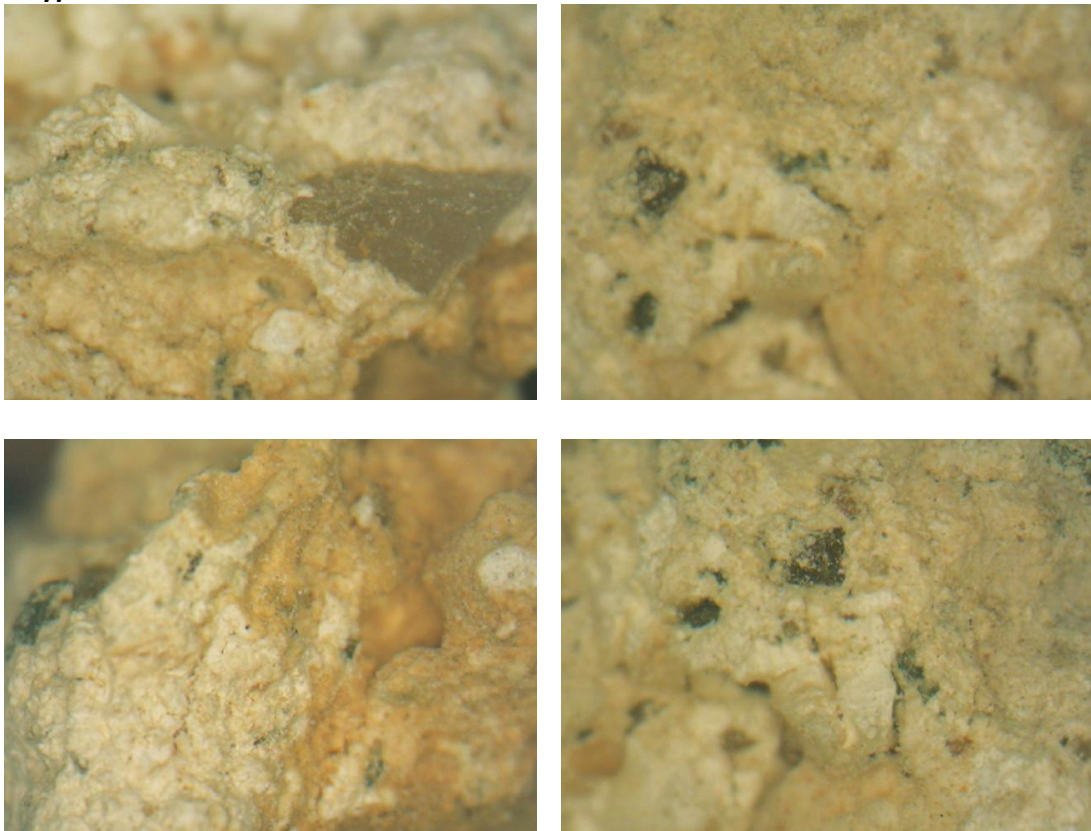




**Εικόνα 20: FOM μεγέθυνση×50 δείγμα MK7**

Πρόκειται για κονίαμα δομής υπόλευκου χρώματος, το οποίο ελήφθη από τη δυτική τοιχοποιία του Καθολικού, στη συμβολή με τον Νάρθηκα. Το κονίαμα είναι αρκετά συνεκτικό, με ελάχιστες ρηγματώσεις ενώ διακρίνονται συσσωματώματα ασβέστη. Παρατηρούνται αδρανή διαφόρων διαμέτρων και σκούρου χρώματος.

**Δείγμα MK8**



**Εικόνα 21: FOM μεγέθυνση×50 δείγμα MK8**

Πρόκειται για κονίαμα δομής λευκού χρώματος, το οποίο ελήφθη από τη Νότια Όψη. Το κονίαμα είναι αρκετά συνεκτικό και διακρίνονται πολλά συσσωματώματα ασβέστη. Παρατηρούνται αδρανή διαφόρων διαμέτρων και σκούρου χρώματος.

#### **4.2 Κοκκομετρική διαβάθμιση**

Οι κοκκομετρικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν σε μια σειρά εργαστηριακών κοσκίνων με διάμετρο οπών 8mm, 4mm, 2mm, 1mm, 0,5mm, 0,25mm, 0,125mm, 0,063mm. Οι αρχικές μάζες των δειγμάτων MK1 , MK4 , MK7 που εξετάστηκαν ήταν 30,67g, 31,13g και 33,04g αντίστοιχα.

Αναλυτικότερα για τα δείγματα:

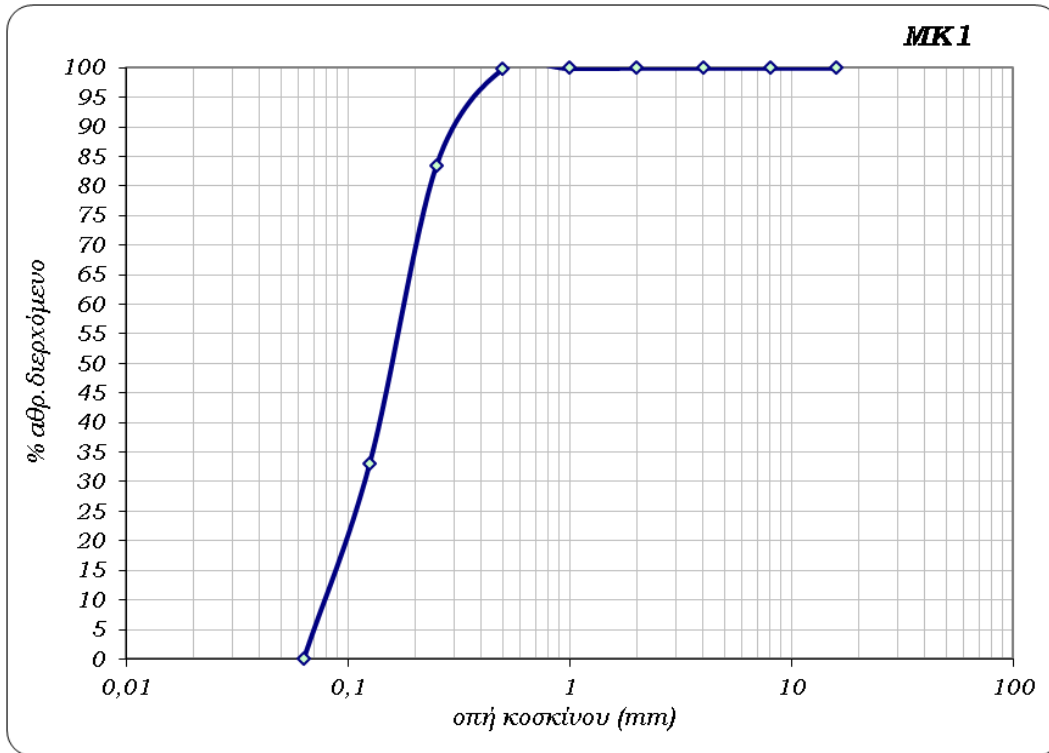
- **Δείγμα MK1**, κονίαμα δομής, ελήφθη από την εξωτερική ανατολική τοιχοποιία του Ιερού
- **Δείγμα MK4**, κονίαμα δομής, ελήφθη από την εξωτερική βόρεια τοιχοποιία του Καθολικού
- **Δείγμα MK7**, κονίαμα δομής, ελήφθη από την εσωτερική, δυτική τοιχοποιία του Καθολικού στη συμβολή με τον μεταγενέστερο Νάρθηκα

Το κονίαμα του κάθε δείγματος διαχωρίστηκε χειρονακτικά μέσω ελαφριάς τριβής, ταυτόχρονα γινόταν μικροσκοπικός έλεγχος ώστε να διαπιστωθεί ότι η κονία είχε απομακρυνθεί από τα αδρανή. Στη συνέχεια ακολουθούσε το κοσκίνισμα των κονιαμάτων και η αφαίρεση των οργανικών πρόσθετων (άχυρα) με ειδικό εργαλείο από κάθε κλάσμα. Η παραπάνω διαδικασία επαναλήφθηκε για κάθε κόσκινο και στα τρία δείγματα. Στο κλάσμα <0,063mm συγκρατήθηκε η καθαρή κονία.

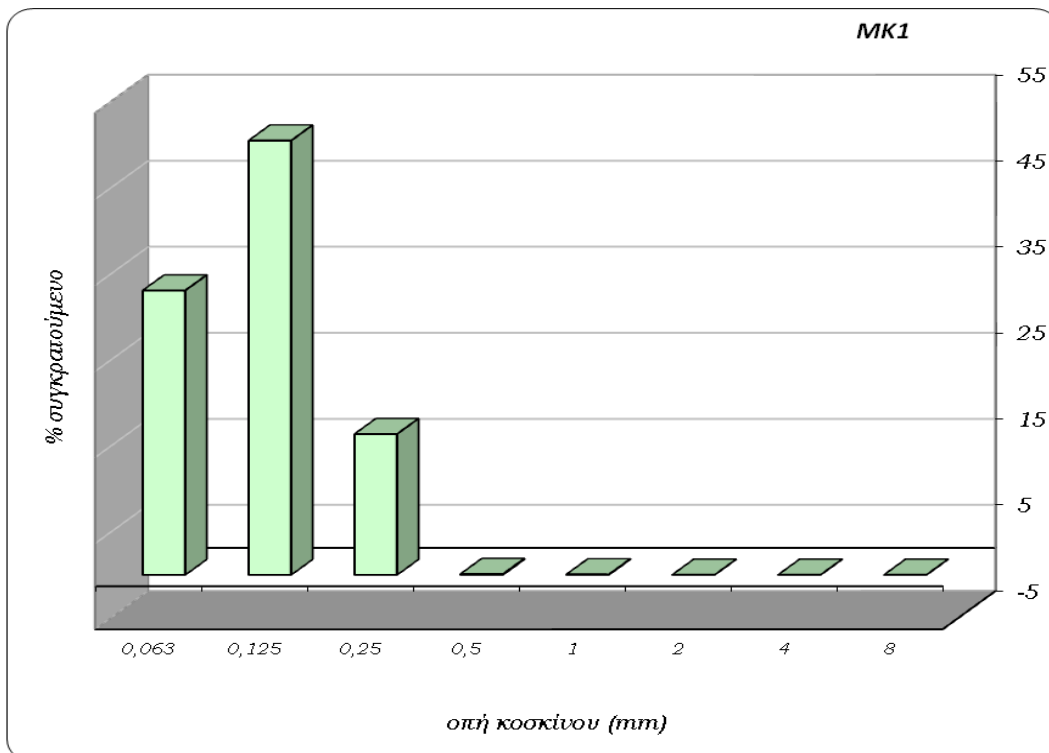
Παρατίθενται παρακάτω τα ιστογράμματα κατανομής αδρανών χωρίς την κονία για τα δείγματα που εξετάστηκαν, οι ημιλογαριθμικές καμπύλες κατανομής της μάζας για κάθε κόσκινο, καθώς και συγκριτικό ημιλογαριθμικό διάγραμμα όλων των δειγμάτων.

**Πίνακας 11: Αναλογία κονίας/αδρανών για τα δείγματα MK1, MK4, MK7**

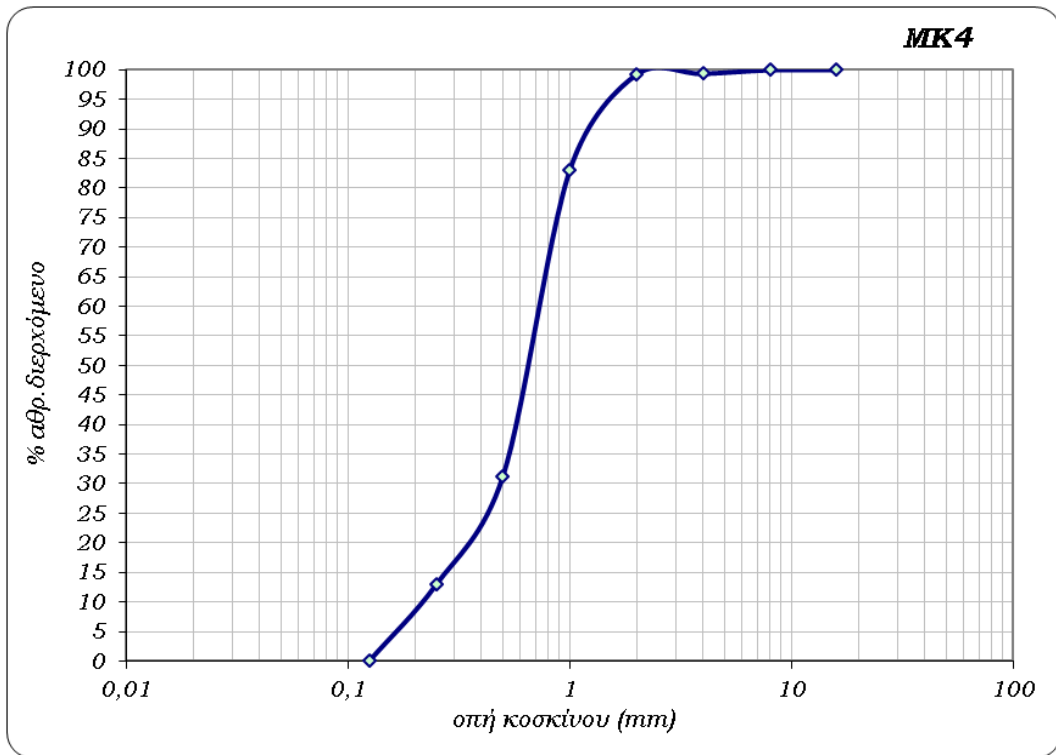
<b>Δείγμα</b>	<b>MK1</b>	<b>MK4</b>	<b>MK7</b>
<b>Κονία/αδρανή</b>	0,41 ≈ 2/5	0,65 ≈ 2/3	0,20 ≈ 1/5



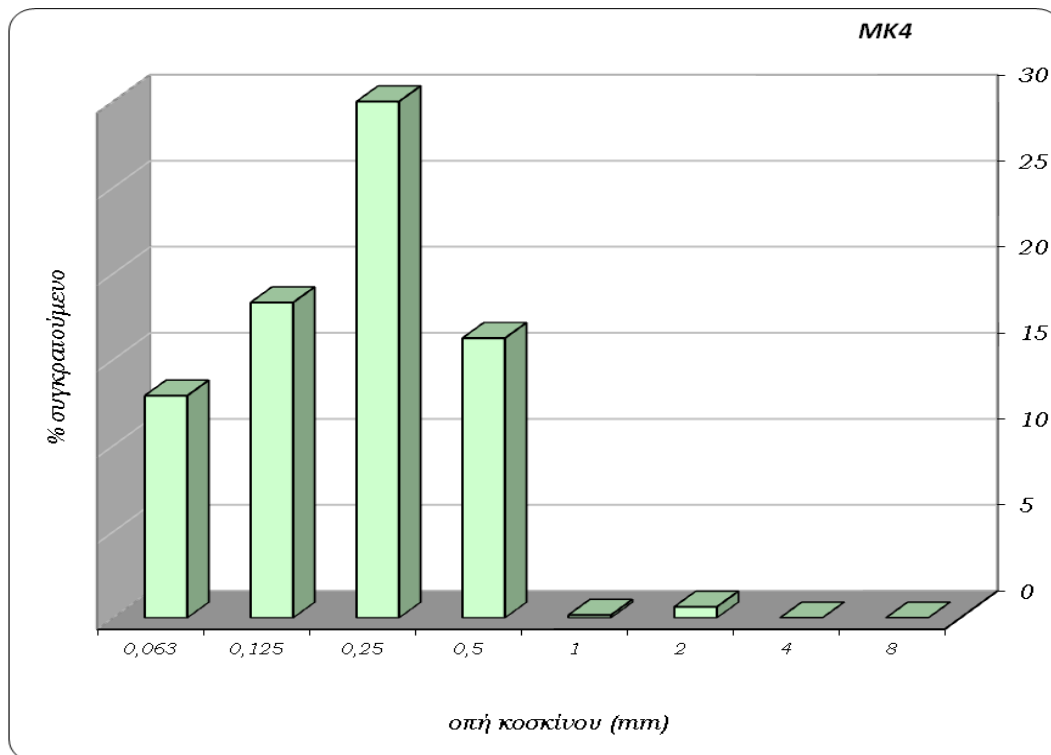
Διάγραμμα 1: Ημιλογαριθμική κλίμακα κατανομής αδρανών για το δείγμα MK1



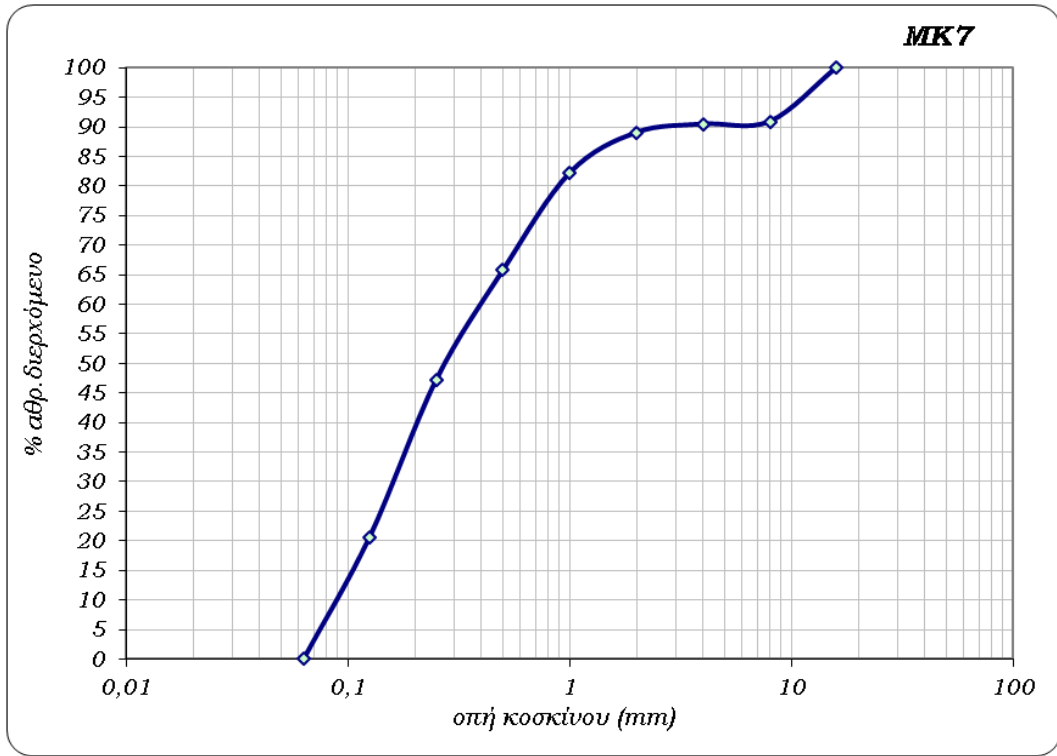
Διάγραμμα 2: Ιστόγραμμα κατανομής αδρανών για το δείγμα MK1



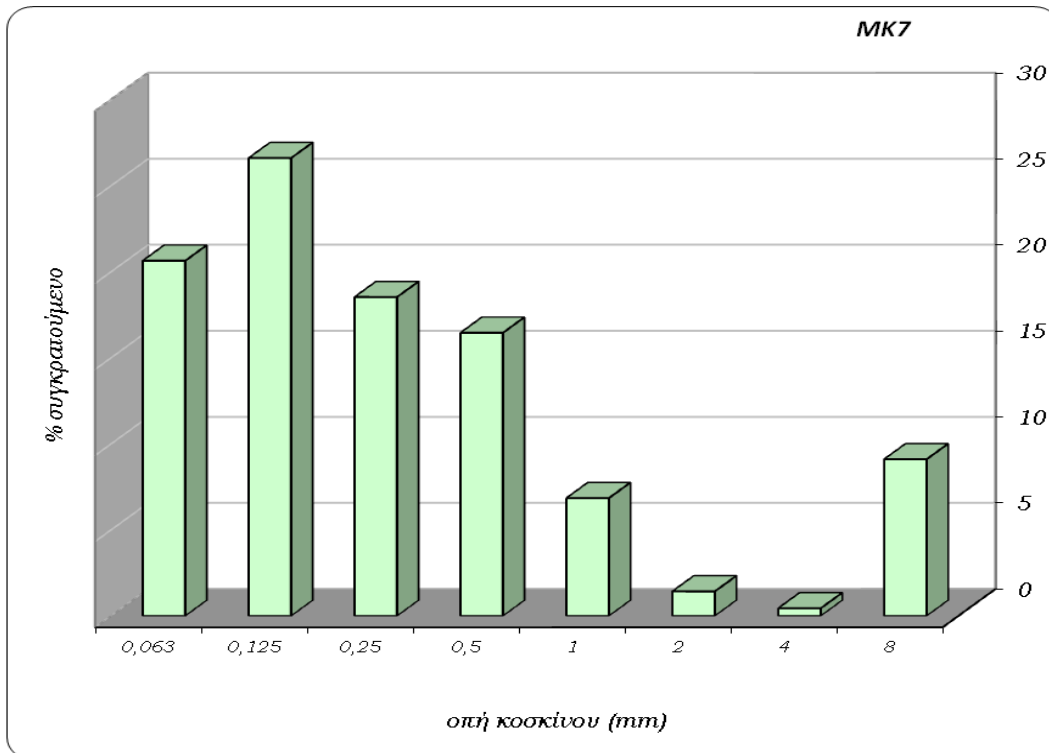
Διάγραμμα 3: Ημιλογαριθμική κλίμακα κατανομής αδρανών για το δείγμα MK4



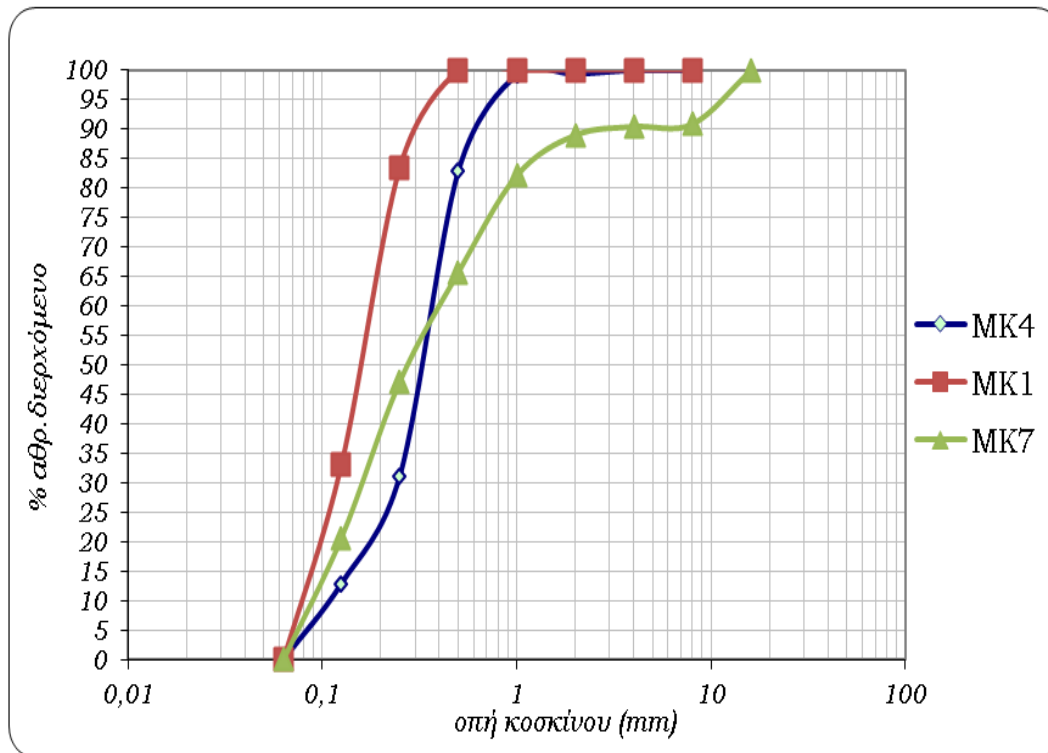
Διάγραμμα4: Ιστόγραμμα κατανομής αδρανών για το δείγμα MK4



Διάγραμμα 5: Ημιλογαριθμική κλίμακα κατανομής αδρανών για το δείγμα MK7



Διάγραμμα 6: Ιστόγραμμα κατανομής αδρανών για το δείγμα MK7



Διάγραμμα 7: Συγκριτική ημιλογαριθμική κλίμακα κατανομής αδρανών για τα τρία δείγματα

Για τα δείγματα MK1, MK4 και MK7 ο λόγος κονιάς/αδρανών είναι περίπου 2/5, 2/3 και 1/5 αντίστοιχα. Αναλυτικότερα, στα δείγματα MK1 και MK4 δεν υπάρχουν συγκρατούμενα αδρανή στα αρχικά κλάσματα ενώ οι μέγιστοι κόκκοι αδρανών ξεκινούν από το κλάσμα των 2mm. Το γεγονός ότι δεν έχουμε συγκρατούμενα αδρανή στα κόσκινα άνω των 2mm πιθανότατα οφείλεται είτε στο ότι τα συγκεκριμένα κονιάματα χρησιμοποιούνταν σε λεπτότερους αρμούς, είτε σε φθορά των συγκεκριμένων κονιαμάτων που μελετήθηκαν, ιδιαίτερα αν λάβει κανείς υπόψη την κακή κατάσταση διατήρησης που παρατηρήθηκε κατά τον μακροσκοπικό και μικροσκοπικό έλεγχο των δειγμάτων. Στο δείγμα MK7 το μέγιστο αδρανή είναι πάνω από 8mm και πιθανόν να πρόκειται για τσιβίκι. Για το δείγμα MK1 η ημιλογαριθμική καμπύλη είναι ομαλή, όπως για το MK4 ενώ στο δείγμα MK7 παρατηρείται ένα σκαλοπάτι στην καμπύλη, λόγω του μεγάλου μεγέθους του αδρανούς που συγκρατήθηκε στα 8 mm. Στο ιστόγραμμα κατανομής, ο άξονας των X αντιπροσωπεύει τις διάφορες κοκκομετρικές κλάσεις σε mm (particle ranges), ενώ ο άξονας των Y αφορά στο ποσοστό της συγκρατούμενης μάζας σε κάθε κλάση κόκκων (% retained). Το ιστογράμματα του δείγματος MK1 παρουσιάζει



μονοκόρυφη κατανομή και συχνότερη τιμή κατανομής στα 0,125mm. Το ιστόγραμμα του δείγματος MK4 παρουσιάζει μονοκόρυφη κατανομή, η συχνότερη τιμή κατανομής είναι στα 0,250mm. Το ιστόγραμμα του δείγματος MK7 παρουσιάζει μονοκόρυφη κατανομή και συχνότερη τιμή κατανομής στα 0,125mm.

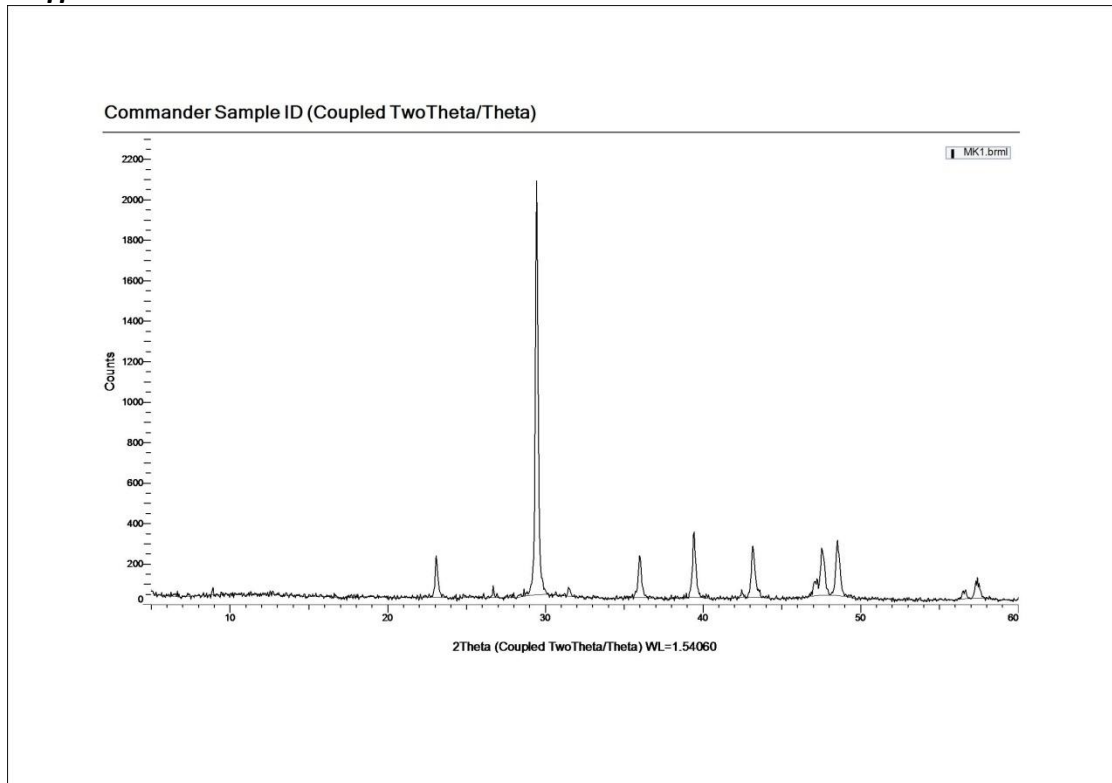
#### **4.3 Προσδιορισμός των ορυκτολογικών ενώσεων - Περίθλαση ακτίνων X (XRD)**

Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα του ορυκτολογικού προσδιορισμού των δειγμάτων και ακολουθούν τα διαγράμματα ακτίνων X.

**Πίνακας 12: ορυκτολογική σύσταση δειγμάτων**

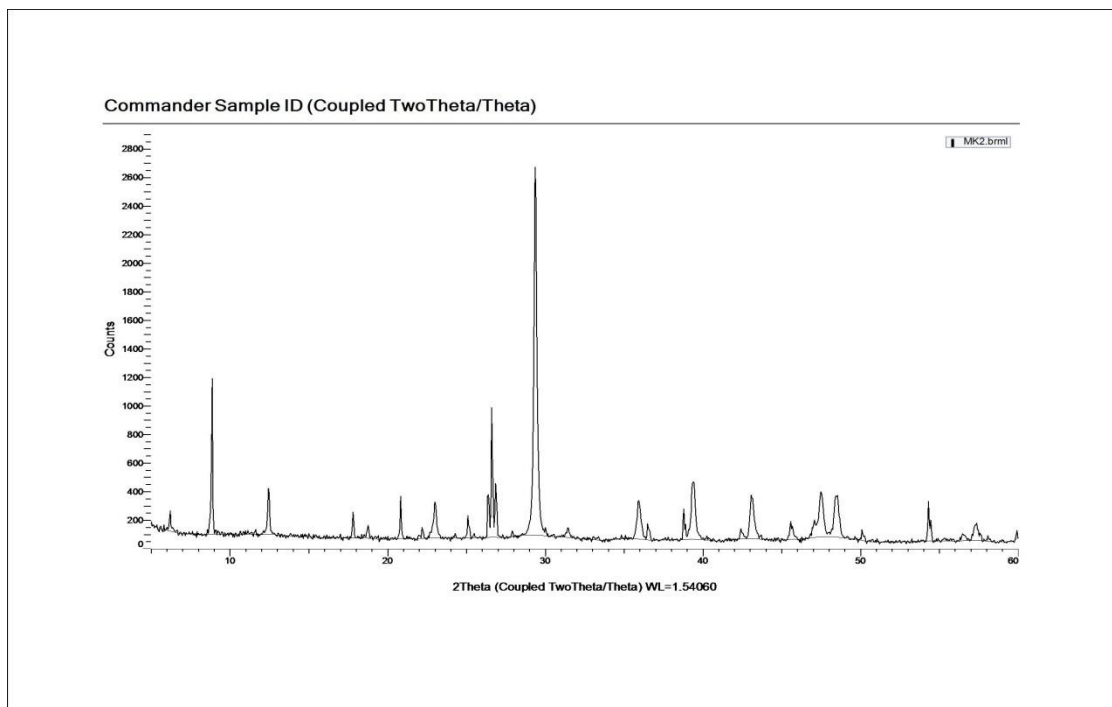
<b>Αποτελέσματα περίθλασης ακτίνων X</b>	
<b>Δείγμα</b>	<b>Ορυκτολογική Σύσταση</b>
MK1	ασβεστίτης, χαλαζίας
MK2	ασβεστίτης, μοσχοβίτης, χαλαζίας, αλβίτης, κλινόχλωρος
MK2b	ασβεστίτης, χαλαζίας, μοσχοβίτης, κλινόχλωρος
MK4	ασβεστίτης, χαλαζίας
MK4p	ασβεστίτης
MK5a	ασβεστίτης, χαλαζίας, μοσχοβίτης, κεροσίλβη, κλινόχλωρος
MK5b	ασβεστίτης, μοσχοβίτης, χαλαζίας
MK6	ασβεστίτης, χαλαζίας, μοσχοβίτης, αλβίτης, κλινόχλωρος, βατερίτης
MK7	ασβεστίτης, χαλαζίας, μοσχοβίτης, κλινόχλωρος, αλβίτης
MK8	ασβεστίτης, χαλαζίας, μοσχοβίτης, αλβίτης, κλινόχλωρος

**Δείγμα MK1**



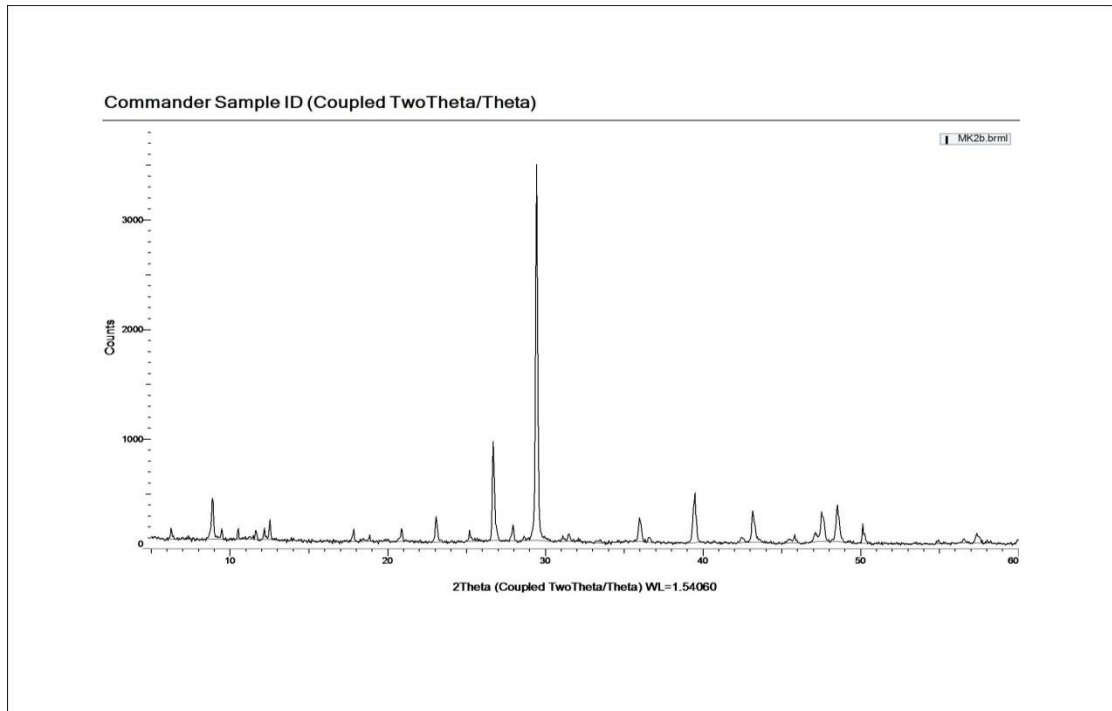
*Διάγραμμα 8: XRD για το δείγμα MK1*

**Δείγμα MK2**



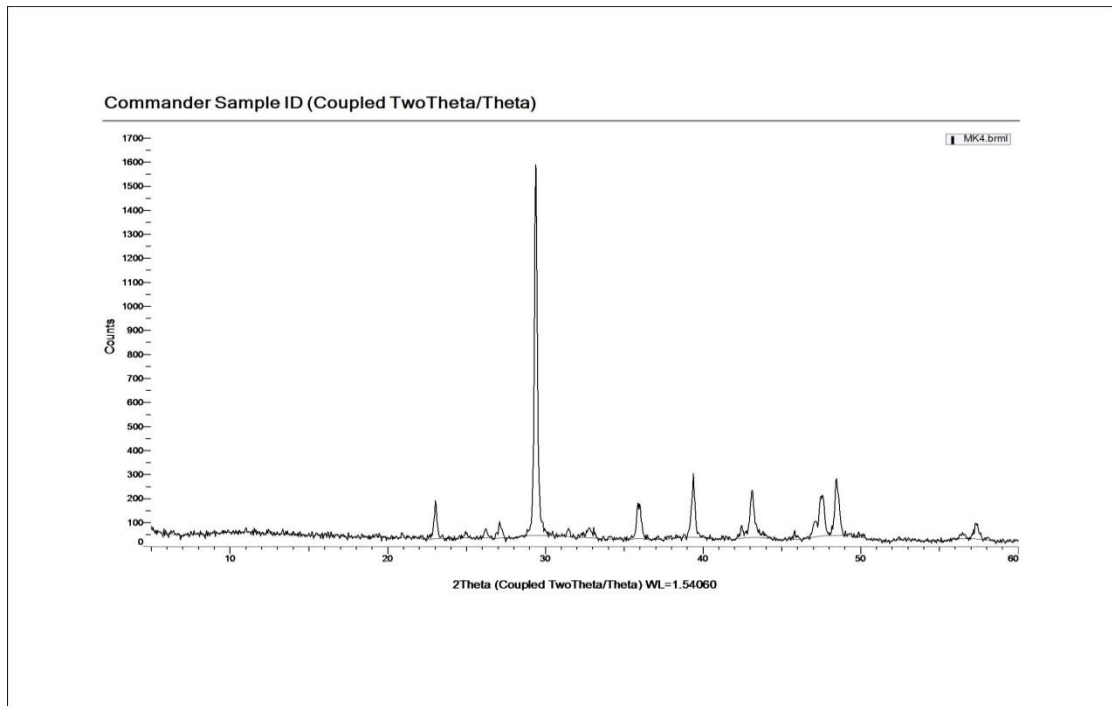
*Διάγραμμα 9: XRD για το δείγμα MK2*

### Δείγμα MK2b



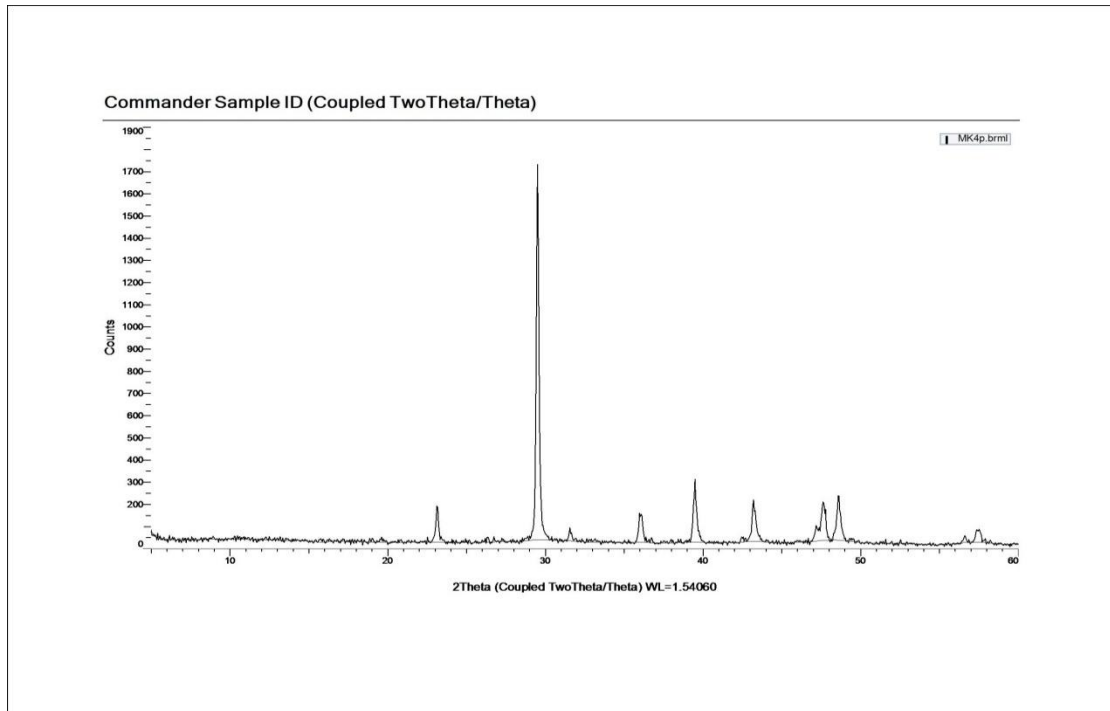
Διάγραμμα 10: XRD για το δείγμα MK2b

### Δείγμα MK4



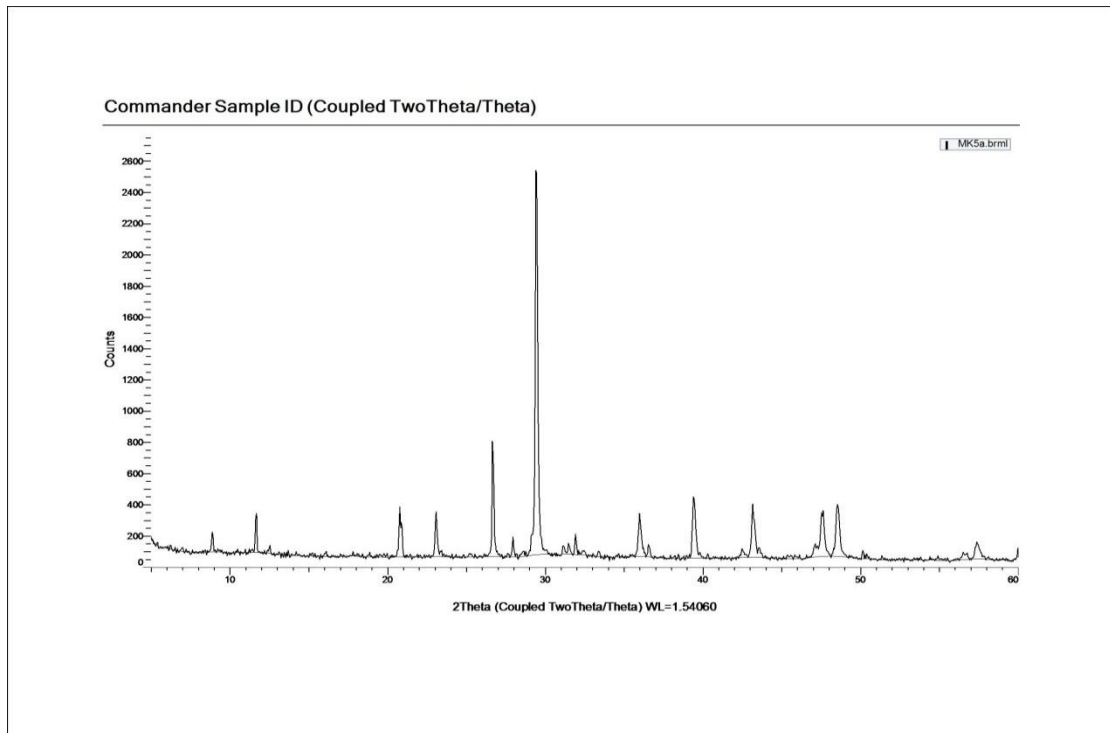
Διάγραμμα 11: XRD για το δείγμα MK4

### Δείγμα MK4p



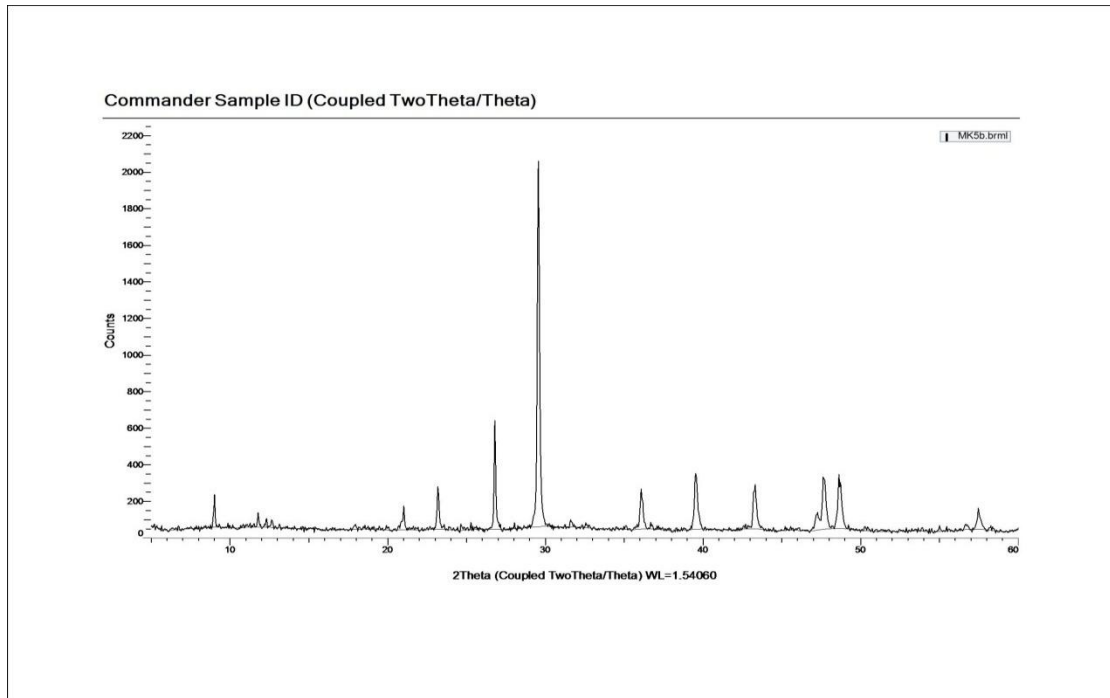
Διάγραμμα 12: XRD για το δείγμα MK4p

### Δείγμα MK5a



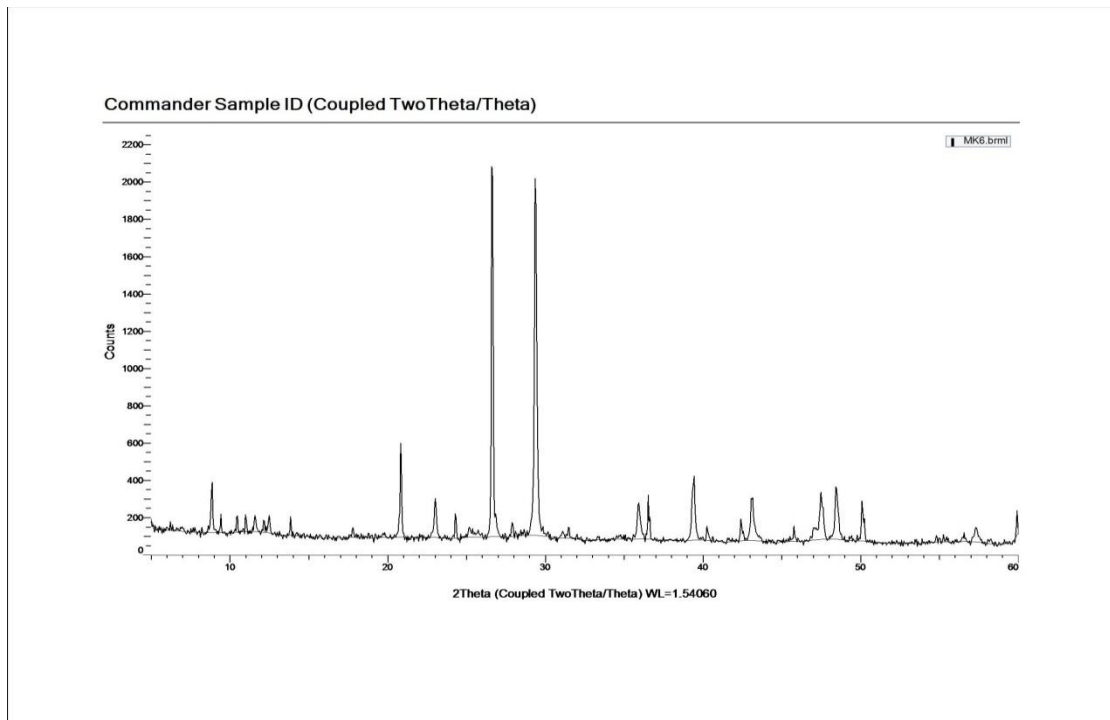
Διάγραμμα 13: XRD για το δείγμα MK5a

### Δείγμα MK5b



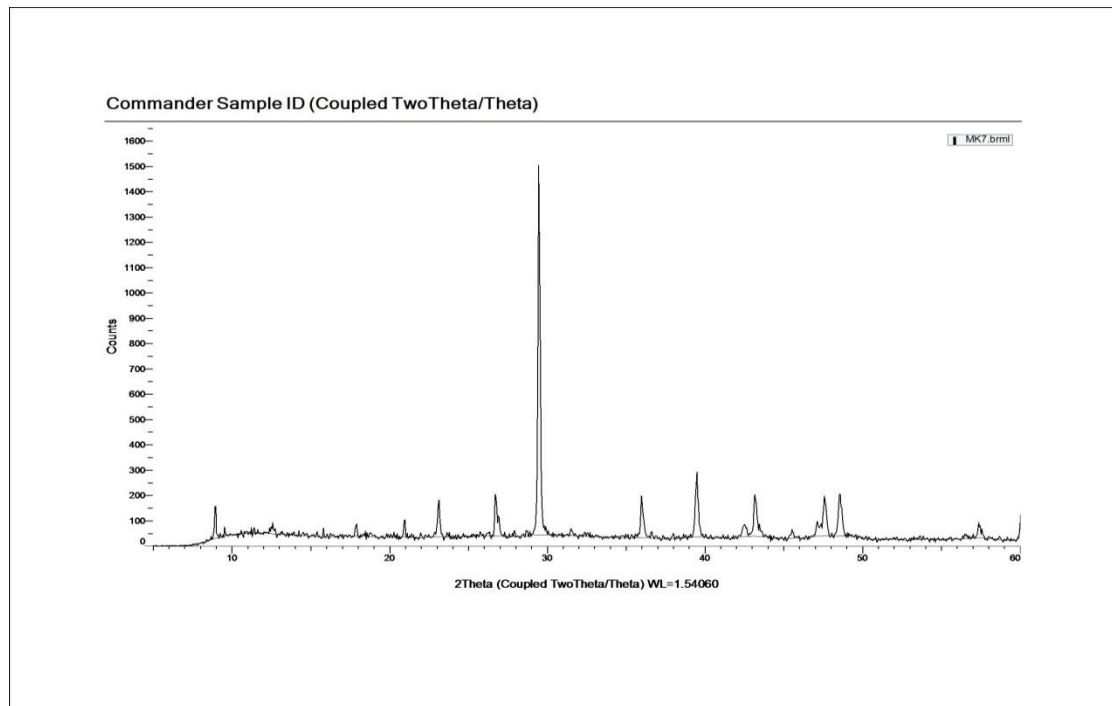
Διάγραμμα 14: XRD για το δείγμα MK5b

### Δείγμα MK6



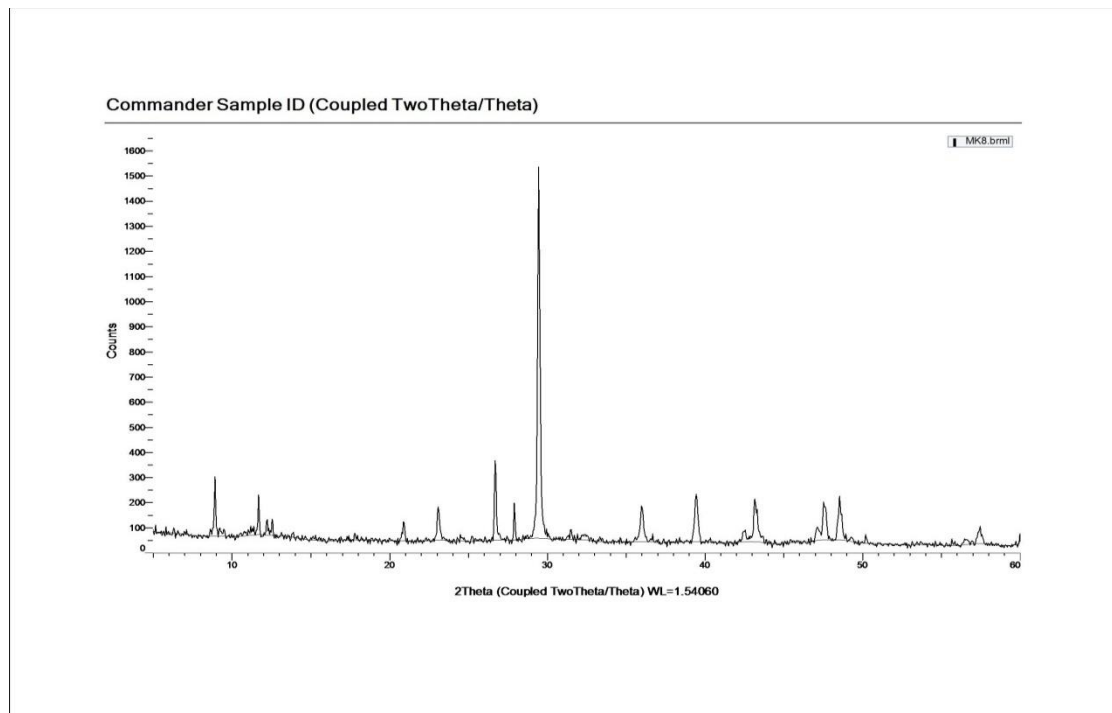
Διάγραμμα 15: XRD για το δείγμα MK6

### Δείγμα MK7



Διάγραμμα 16: XRD για το δείγμα MK7

### Δείγμα MK8



Διάγραμμα 17: XRD για το δείγμα MK8

Κατά την εφαρμογή της περίθλασης ακτίνων Χ, διαπιστώθηκε πως η κύρια ορυκτολογική φάση όλων των κονιαμάτων που εξετάστηκαν είναι ο ασβεστίτης. Αναλυτικότερα, στο δείγμα στο δείγμα MK1 προκύπτει ως κύρια ορυκτολογική φάση ο ασβεστίτης και ως δευτερεύουσα ο χαλαζίας. Στο δείγμα MK2 προκύπτει ως κύρια ορυκτολογική φάση ο ασβεστίτης και ως δευτερεύουσες ο μοσχοβίτης, ο χαλαζίας και μικρότερες κορυφές αλβίτη και κλινόχλωρου. Στο δείγμα MK2b προκύπτει ως κύρια ορυκτολογική φάση ο ασβεστίτης και ως δευτερεύουσα ο χαλαζίας, παρατηρούνται επίσης μικρές κορυφές μοσχοβίτη και κλινόχλωρου. Από τα αποτελέσματα για το δείγμα MK4 προκύπτει ως κύρια ορυκτολογική φάση ο ασβεστίτης και ως δευτερεύουσα ο χαλαζίας ενώ στο δείγμα MK4p παρατηρούνται μόνο κορυφές ασβεστίτη. Από τα αποτελέσματα για το δείγμα MK5a παρουσιάζεται ως κύρια ορυκτολογική φάση ο ασβεστίτης και ως δευτερεύουσα ο χαλαζίας. Επίσης, ως δευτερεύουσες φάσεις παρατηρούνται μικρότερες κορυφές, μοσχοβίτη, κλινόχλωρου και κεροσίλβης. Στο δείγμα MK5b παρουσιάζεται ως κύρια ορυκτολογική φάση ο ασβεστίτης και ως δευτερεύουσες ο χαλαζίας και ο μοσχοβίτης. Στο το δείγμα MK6 παρουσιάζονται ως κύριες ορυκτολογικές φάσεις ο ασβεστίτης και ο χαλαζίας ενώ ως δευτερεύουσες φάσεις ο μοσχοβίτης ο αλβίτης και μικρότερες κορυφές κλινόχλωρου και βατερίτη. Στο δείγμα MK7 παρουσιάζεται ως κύρια ορυκτολογική φάση ο ασβεστίτης και ως δευτερεύουσες φάσεις ο χαλαζίας, ο μοσχοβίτης και μικρότερες κορυφές κλινόχλωρου και αλβίτη. Από τα αποτελέσματα για το δείγμα MK8 παρουσιάζεται ως κύρια ορυκτολογική φάση ο ασβεστίτης και ως δευτερεύουσες ο χαλαζίας, ο μοσχοβίτης και μικρότερες κορυφές αλβίτη και κλινόχλωρου.

Η ύπαρξη ασβεστίτη στα κονιάματα εξηγεί το υπόλευκο χρώμα που έχουν [93]. Οι δευτερεύουσες ορυκτολογικές φάσεις των κονιαμάτων που εξετάστηκαν παρουσιάζουν κορυφές χαλαζία, μοσχοβίτη και μικρότερες κορυφές αλβίτη, βατερίτη και κλινόχλωρου. Ο κλινόχλωρος ανήκει στους χλωρίτες [94,95], και μαζί με τον μοσχοβίτη είναι φυλλοπυριτικά ορυκτά[96]. Ο αλβίτης εντάσσεται στους άστριους [97]. Ο βατερίτης αποτελεί παραλλαγή του ασβεστίτη με ίδια χημική σύσταση αλλά διαφορετικό σύστημα κρυστάλλωσης και με πολυμορφική

μορφή[98]. Με το όνομα κεροσίλβη [94]φέρεται μια σειρά σιδηρομαγνησιούχων ορυκτών μεταξύ της σιδηροκεροσίλβης και της (μαγνησιούχου) οξυκεροσίλβης ή βασαλτικής κεροσίλβης. Η σύσταση, ουσιαστικά, παραλλάσσει από την υποκατάσταση ατόμων  $Fe^{+2}$  από άτομα Mg και το αντίθετο. Η κεροσίλβη είναι περισσότερο σκουρόχρωμη και μεγαλύτερης πυκνότητας όσο περισσότερο σίδηρο περιέχει. Από τα αποτελέσματα της περίθλασης ακτίνων X συμπεραίνουμε ότι τα κονιάματα που εξετάστηκαν είναι ασβεστιτικά και τα αδρανή ασβεστιτικής και αργιλοπυριτικής φύσης.

#### **4.4 Θερμικές μέθοδοι ανάλυσης DTA-TG**

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των θερμικών αναλύσεων σε σχέση με την επί τοις εκατό απώλεια μάζας ανά θερμοκρασιακό διάστημα για το ολικό κονίαμα, καθώς και για το κλάσμα της κονίας (<63μm) στα δείγματα που έγινε διαχωρισμός κονία –αδρανών κατά την κοκκομετρική διαβάθμιση. Παρουσιάζονται επίσης τα αντίστοιχα διαγράμματα βάσει των οποίων προκύπτουν τα αποτελέσματα.

- Το θερμοκρασιακό διάστημα <120°C αντιστοιχεί στο φυσικά προσροφημένο νερό των συστατικών του δείγματος.
- Το θερμοκρασιακό διάστημα 120-20 °C αντιστοιχεί στα κρυσταλλικά νερά ενυδατωμένων αλάτων που εμπεριέχονται στο δείγμα.
- Η απώλεια βάρους που παρατηρείται στο θερμοκρασιακό διάστημα 200-600°C και συνοδεύεται από ενδόθερμη κορυφή, οφείλεται στην απώλεια χημικά δεσμευμένου νερού
- Οι εξώθερμες κορυφές που παρατηρούνται στο θερμοκρασιακό διάστημα 200-600°C και συγκεκριμένα μεταξύ 420-480°C οφείλονται σε διάσπαση οργανικών ενώσεων, πιθανότατα στη διάσπαση φυτικών ινών
- Η ενδόθερμη κορυφή στους 580° C που δεν συνοδεύεται από μεταβολή βάρους, οφείλεται στην μετάπτωση του χαλαζία α σε β
- Οι απώλειες βάρους στο θερμοκρασιακό διάστημα >600°C αντιστοιχούν στη διάσπαση ανθρακικών ενώσεων.



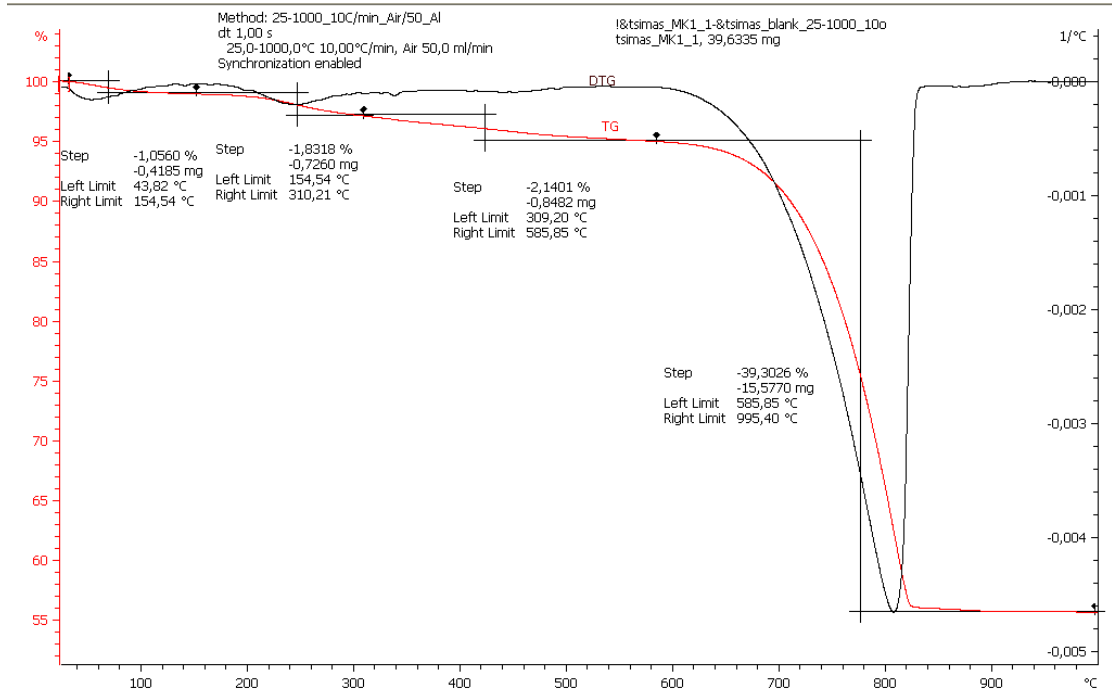
- Η αναλογία  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}_{\text{x}\Delta}$  που υπολογίζεται από τις απώλειες βάρους στα θερμοκρασιακά διαστήματα  $>600^\circ\text{C}$  και  $200-600^\circ\text{C}$  ταυτοποιεί την υδραυλικότητα του κονιάματος, στις περιπτώσεις που η απώλεια βάρους στο θερμοκρασιακό αυτό διάστημα οφείλεται σε χημικά δεσμευμένο νερό και το οποίο ακολουθείται από ενδόθερμη κορυφή στην καμπύλη DTA.
- Συνεπώς, οι απώλειες βάρους που παρατηρούνται στο διάστημα  $200-600^\circ\text{C}$ , δεν οφείλονται μόνο σε απώλεια χημικά δεσμευμένου νερού, αλλά και στη διάσπαση οργανικών ενώσεων που συνοδεύεται από εξώθερμη κορυφή, με μεγάλο πλάτος, δυσχεραίνοντας τον υπολογισμό του χημικά δεσμευμένου νερού.

**Πίνακας 13: Αποτελέσματα θερμοβαρμετρικής ανάλυσης στο ολικό κονίαμα.**

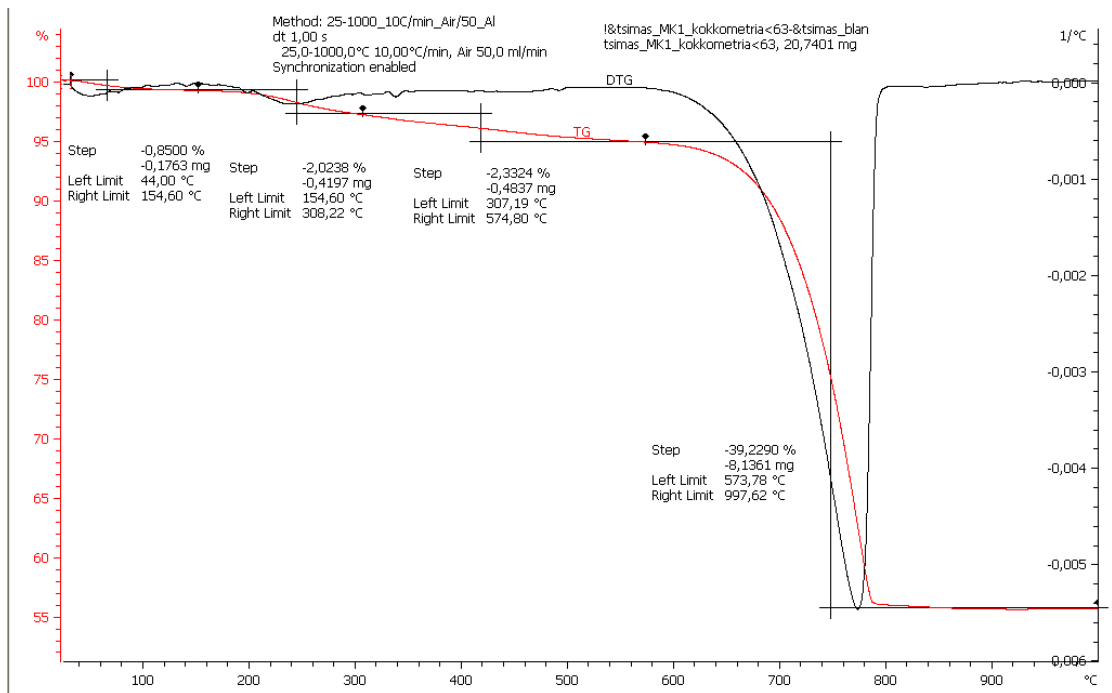
Κωδικός δείγματος	Απώλεια μάζας (%) ανά θερμοκρασιακό διάστημα					
	<120	120-200	200-600	>600	$\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}_{\text{x}\Delta}$	$\text{CaCO}_3$
	$\text{H}_2\text{O}_{\phi,\Delta}$	$\text{H}_2\text{O}_{\text{salts}}$	$\text{H}_2\text{O}_{\text{x}\Delta}$	$\text{CO}_2$		
MK1	1,06	1,83	2,14	39,30	18,36	89,21
MK2	1,21	2,34	2,03	31,43	15,48	71,35
MK2b	0,42	0,50	3,6	28,39	9,28	64,44
MK4	0,50	0,52	5,12	39,25	7,67	89,10
MK4p	0,40	0,40	3,98	39,58	9,94	89,85
MK5a	0,95	2,05	7,36	27,50	3,74	62,42
MK5b	0,68	0,90	6,05	24,55	4,06	55,73
MK6	0,38	0,54	2,76	20,35	7,37	46,19
MK7	0,50	0,57	5,93	29,87	5,04	67,80
MK8	0,69	0,96	7,7	26,48	3,44	60,11

**Πίνακας 14: Αποτελέσματα θερμοβαρμετρικής ανάλυσης στο κλάσμα της κονιάς.**

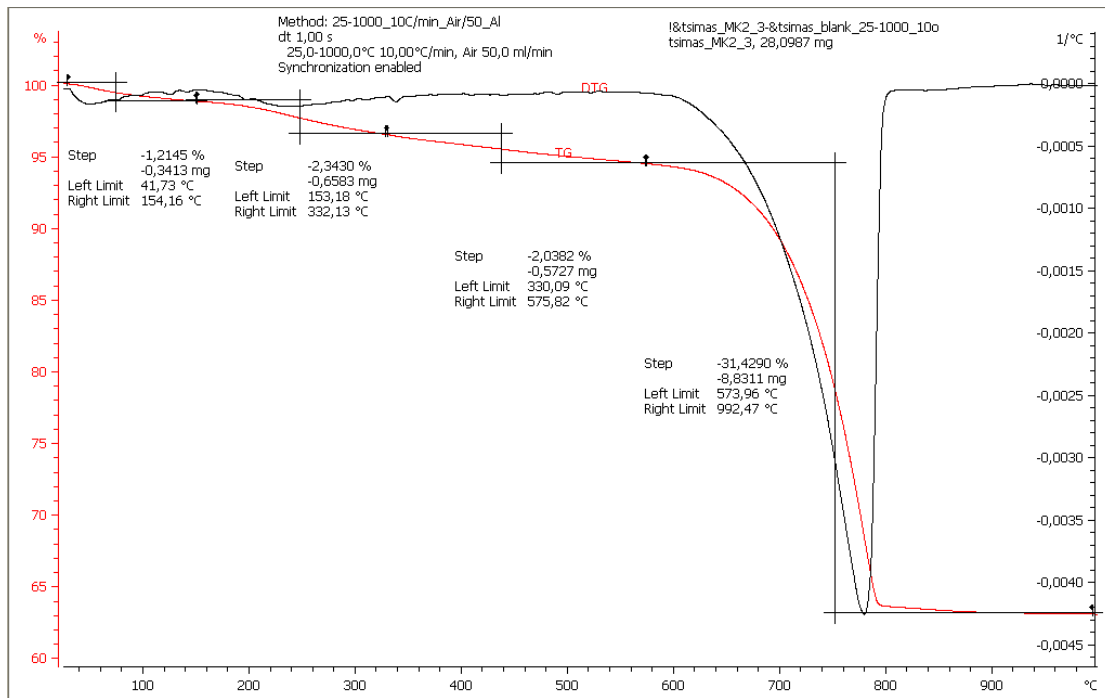
Κωδικός δείγματος	Απώλεια μάζας (%) ανά θερμοκρασιακό διάστημα					
	<120	120-200	200-600	>600	$\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}_{\text{x}\Delta}$	$\text{CaCO}_3$
	$\text{H}_2\text{O}_{\phi,\Delta}$	$\text{H}_2\text{O}_{\text{salts}}$	$\text{H}_2\text{O}_{\text{x}\Delta}$	$\text{CO}_2$		
MK1	0,85	2,02	2,33	39,22	16,83	89,03
MK4	0,52	0,45	3,82	40,00	10,47	90,80
MK7	1,09	0,20	3,14	36,80	11,71	83,54



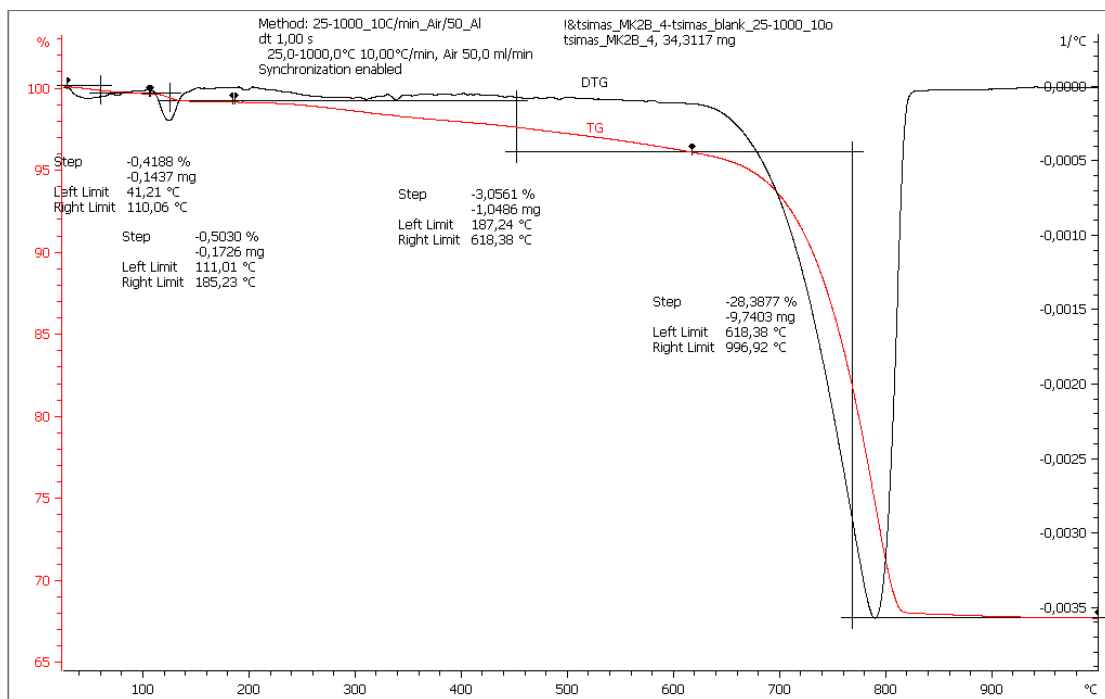
Διάγραμμα 18: Διάγραμμα Θερμικής Ανάλυσης DTA – TG για το δείγμα MK1



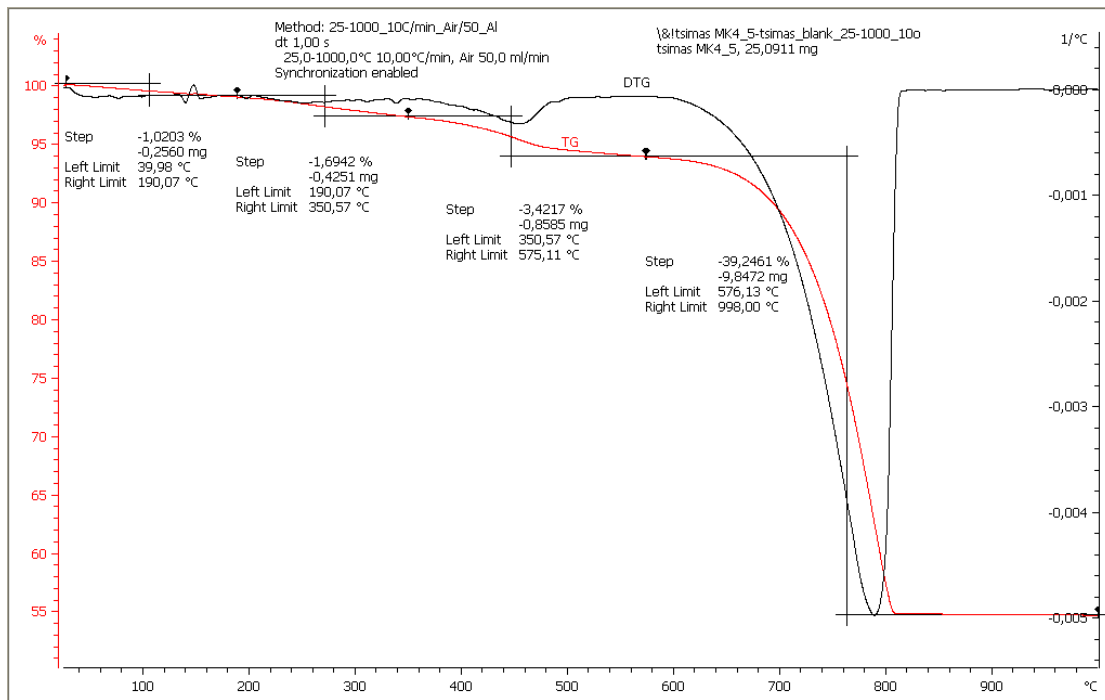
Διάγραμμα 19: Διάγραμμα Θερμικής Ανάλυσης DTA – TG της κονίας του δείγματος MK1



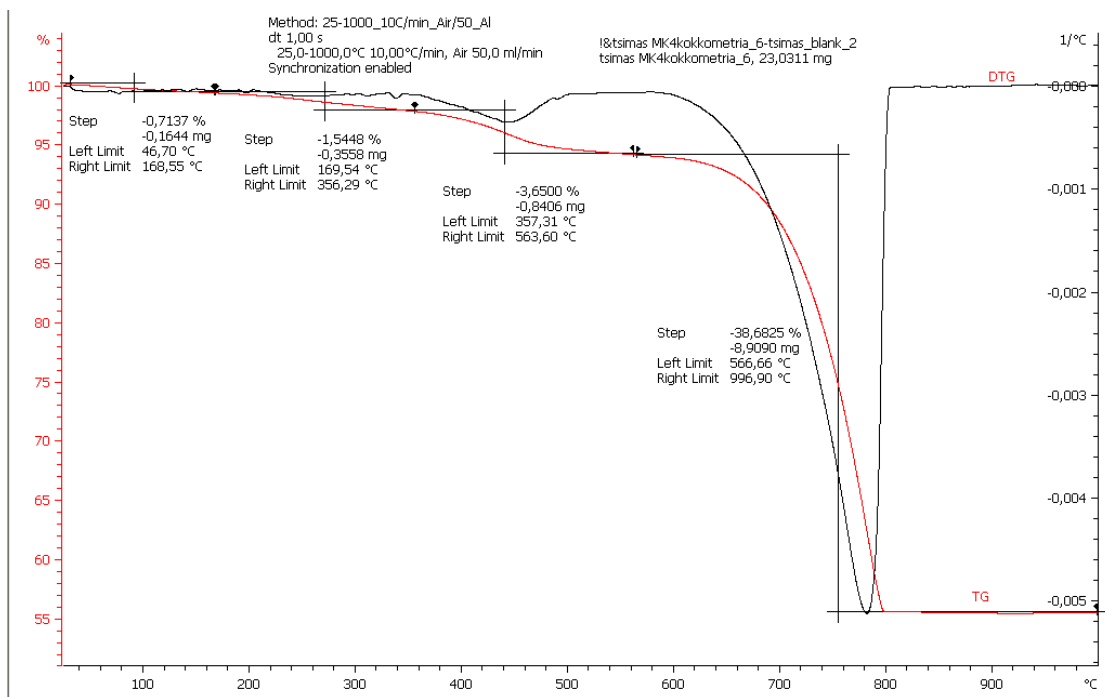
Διάγραμμα 20: Διάγραμμα Θερμικής Ανάλυσης DTA – TG για το δείγμα MK2



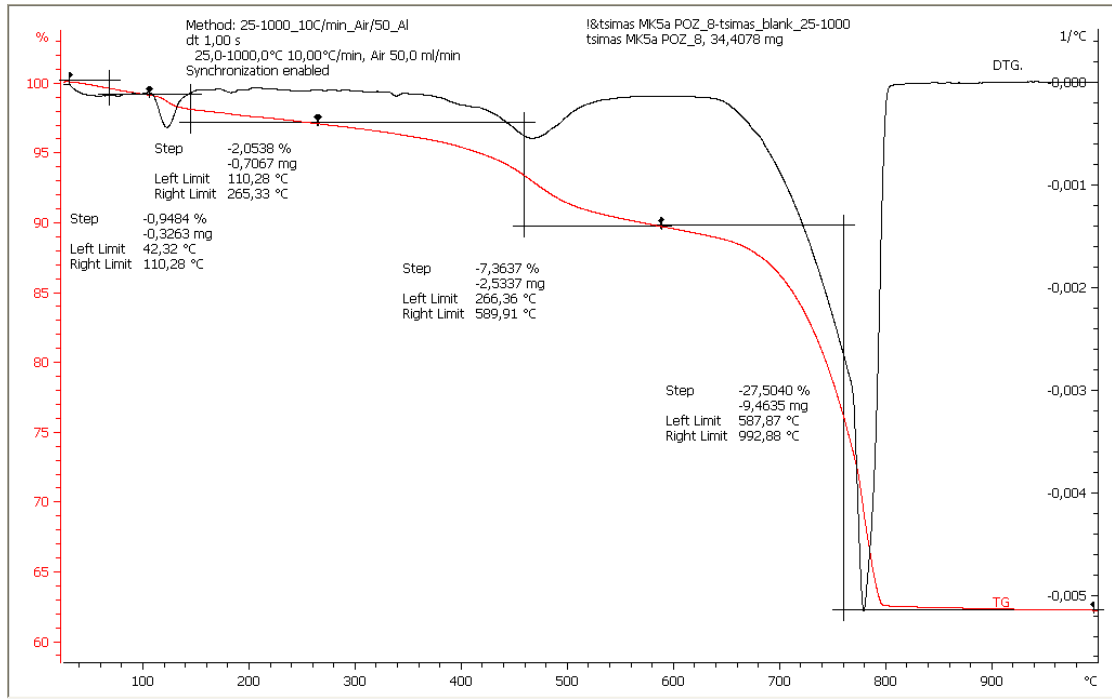
Διάγραμμα 21: Διάγραμμα Θερμικής Ανάλυσης DTA – TG για το δείγμα MK2b



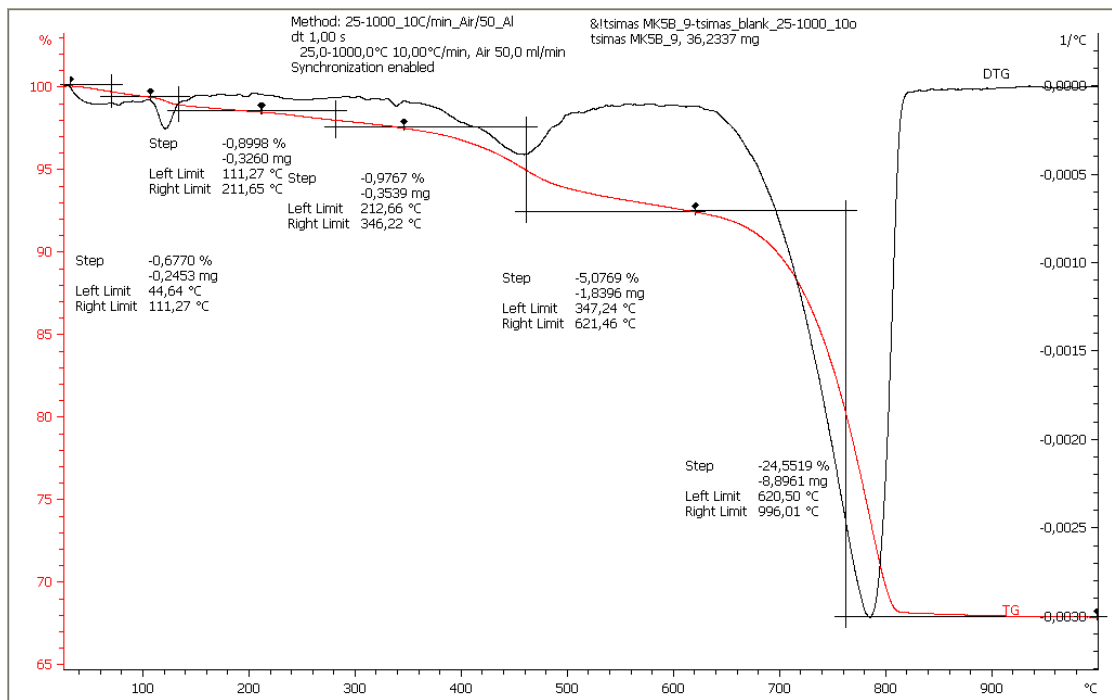
Διάγραμμα 22: Διάγραμμα Θερμικής Ανάλυσης DTA – TG για το δείγμα MK4



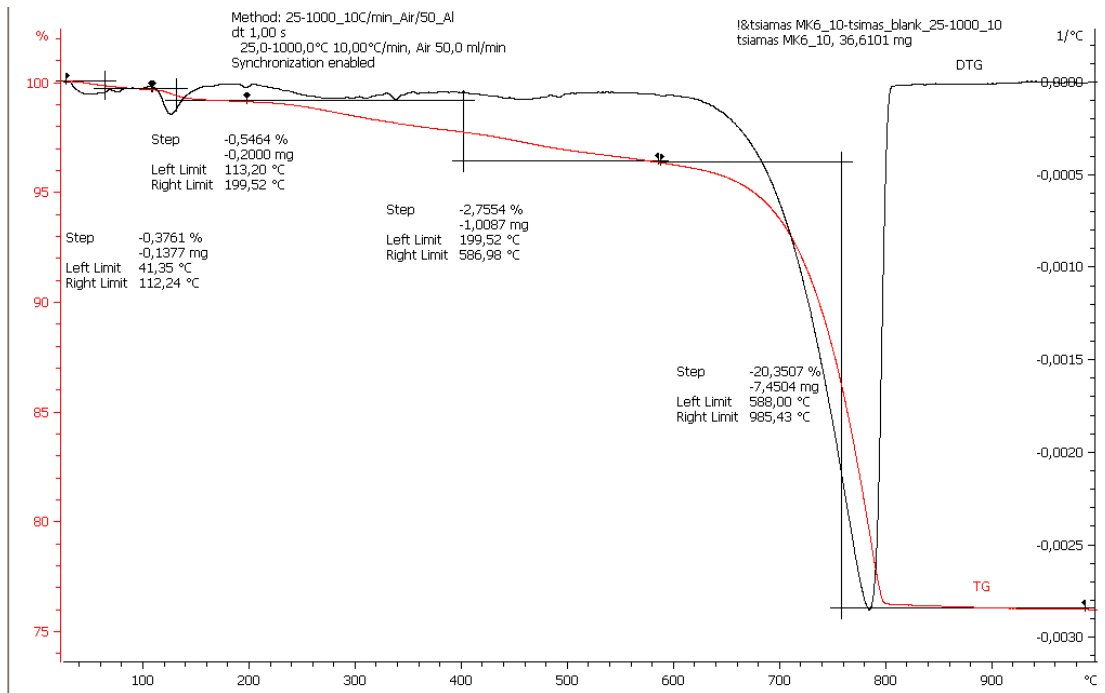
Διάγραμμα 23: Διάγραμμα Θερμικής Ανάλυσης DTA – TG της κονίας του δείγματος MK4



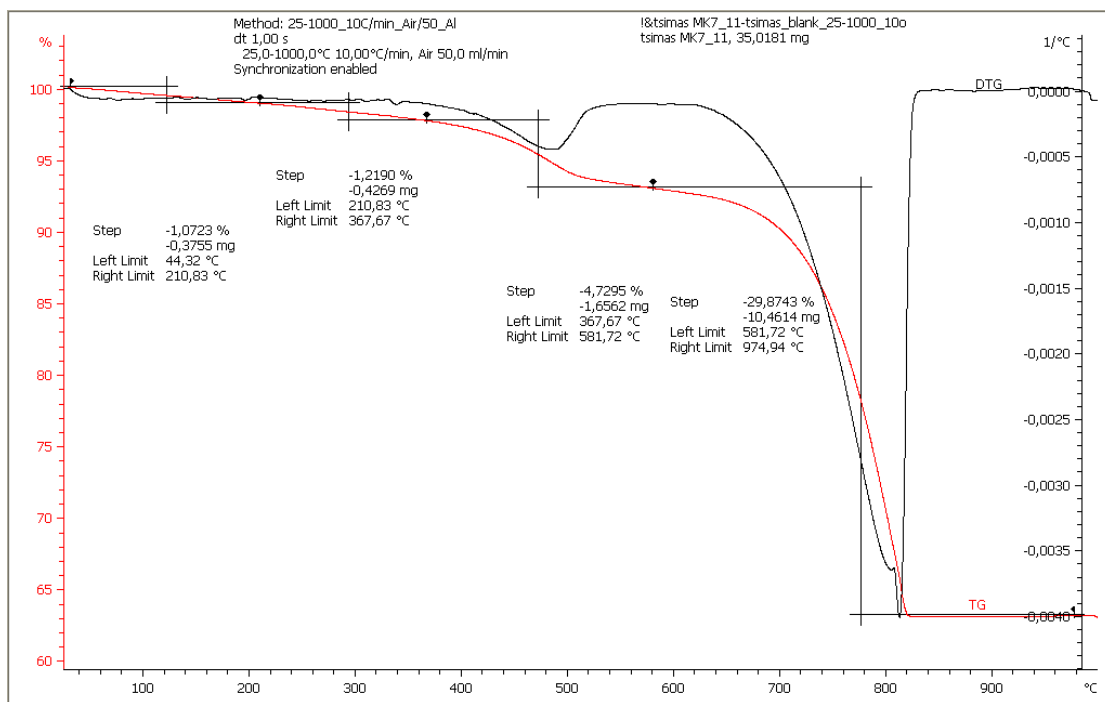
Διάγραμμα 24: Διάγραμμα Θερμικής Ανάλυσης DTA – TG για το δείγμα MK5a



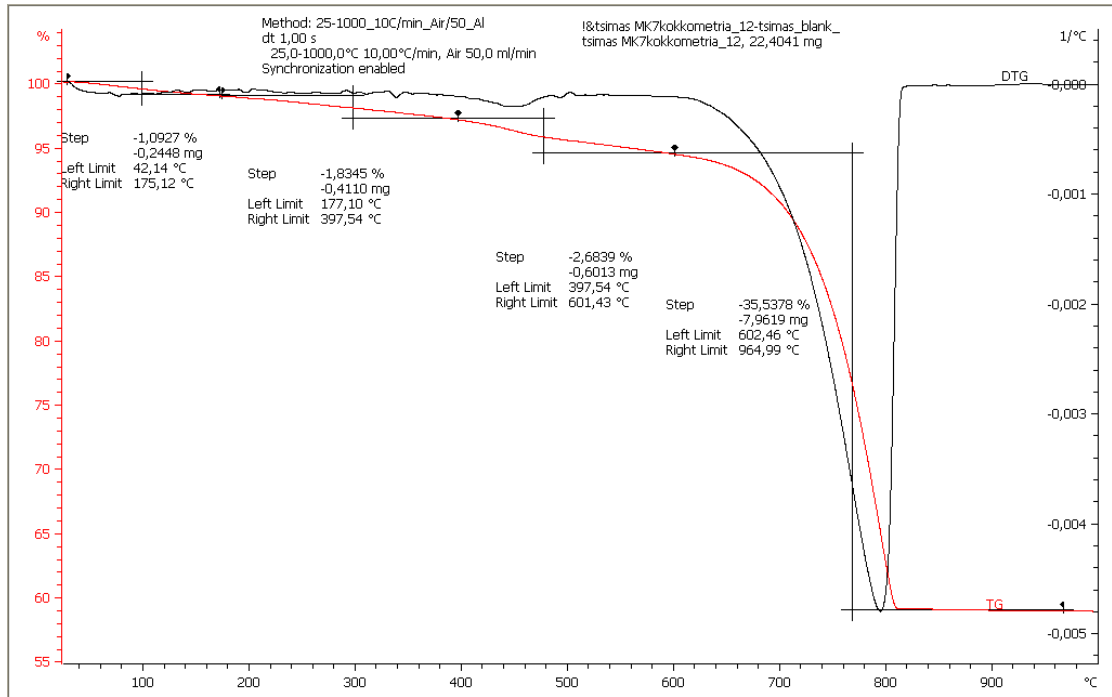
Διάγραμμα 25: Διάγραμμα Θερμικής Ανάλυσης DTA – TG για το δείγμα MK5b



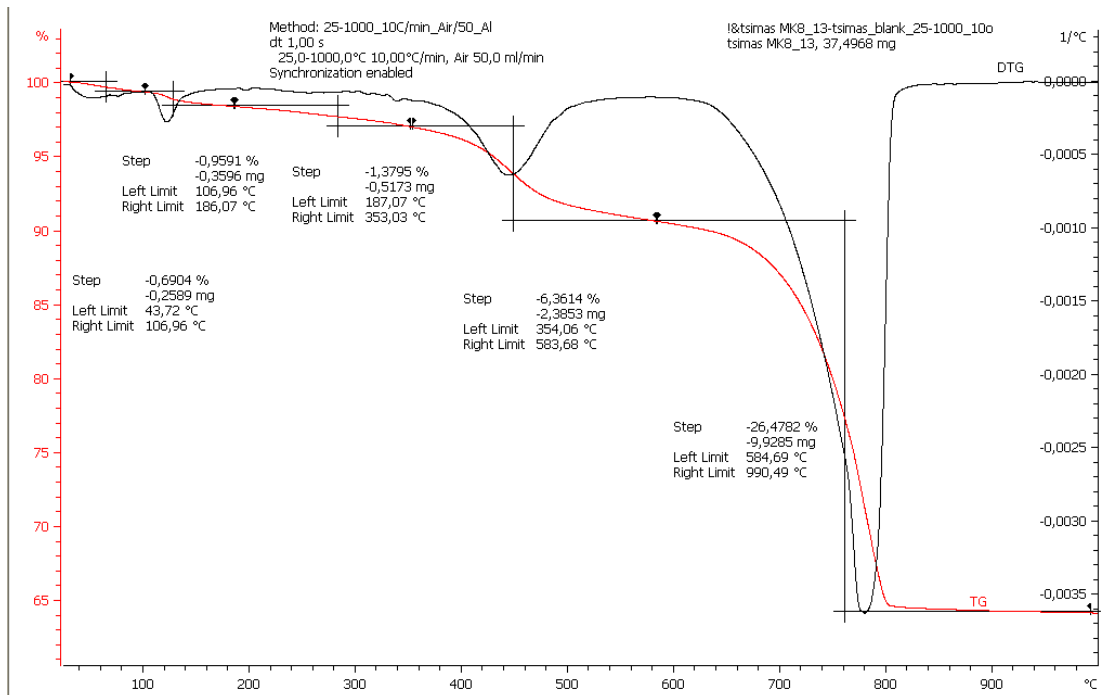
Διάγραμμα 26: Διάγραμμα Θερμικής Ανάλυσης DTA – TG για το δείγμα MK6



Διάγραμμα 27: Διάγραμμα Θερμικής Ανάλυσης DTA – TG για το δείγμα MK7



Διάγραμμα 28: Διάγραμμα Θερμικής Ανάλυσης DTA – TGτης κόνιας του δείγματος MK7



Διάγραμμα 29: Διάγραμμα Θερμικής Ανάλυσης DTA – TG για το δείγμα MK8

Από τα αποτελέσματα των θερμικών αναλύσεων προκύπτει ότι η απώλεια του φυσικά προσροφημένου νερού στο θερμοκρασιακό διάστημα  $< 120^{\circ}\text{C}$  είναι κοντά στο 1% για όλα τα δείγματα. Οι εξώθερμες κορυφές των δειγμάτων MK4, MK5a, MK5b, MK7, MK8 στο θερμοκρασιακό διάστημα  $200-600^{\circ}\text{C}$  και συγκεκριμένα μεταξύ  $420-480^{\circ}\text{C}$  όπως προκύπτει από τα διαγράμματα, οφείλονται σε διάσπαση οργανικών ενώσεων, για την ακρίβεια πιθανόν να πρόκειται για φυτικές ίνες. Τα κονιάματα της ανατολικής όψης, MK1, MK2, MK2b και το δείγμα MK4p της βόρειας όψης, παρουσιάζουν σχετικά υψηλό αντίστροφο δείκτη υδραυλικότητας, αποδεικνύοντας ότι δεν πρόκειται για υδραυλικά κονιάματα. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [99], όταν ο αντίστροφος δείκτης υδραυλικότητας είναι κοντά στο 10 τότε πρόκειται για ασβεστιτικά κονιάματα. Στα υπόλοιπα δείγματα MK4, MK5a, MK5b, MK6, MK7, MK8 παρόλο που παρατηρείται χαμηλός αντίστροφος δείκτης υδραυλικότητας, δεν πρόκειται για υδραυλικά κονιάματα, καθώς ένα μόνο τμήμα της απώλειας μάζας στο θερμοκρασιακό διάστημα  $200-600^{\circ}\text{C}$  οφείλεται σε χημικά δεσμευμένο νερό ένυδρων αργιλοπυριτικών ενώσεων και το υπόλοιπο οφείλεται στη διάσπαση οργανικών ενώσεων, και συνεπώς ο δείκτης υδραυλικότητας που υπολογίζεται δεν είναι ενδεικτικός. Τα κονιάματα MK1, MK2, MK2b, MK4 και MK4z έχουν σχεδόν αποκλειστικά ασβεστιτικά αδρανή. Τα κονιάματα MK5a, MK5b, MK6, MK7, MK8, αποτελούνται από μίξη ασβεστιτικών και αργιλοπυριτικών αδρανών, ενώ ειδικότερα στα δείγματα MK5b και MK6, υπερσχύουν τα αργιλοπυριτικά αδρανή στη μίξη έναντι των ασβεστιτικών. Τα υψηλά ποσοστά εκλυόμενου  $\text{CO}_2$  (%) αποδεικνύουν την ασβεστιτική φύση των κονιαμάτων. Επιπροσθέτως, συνυπολογίζοντας και τα αποτελέσματα των θερμικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στα κλάσματα της κονιάς για τα δείγματα MK1, MK4 και MK7, στα οποία έγινε και φυσικός διαχωρισμός μέσω κοκκομετρικής ανάλυσης, είναι φανερό πως οι τιμές μεταξύ των κονιών και των κονιαμάτων στο θερμοκρασιακό διάστημα  $>600^{\circ}\text{C}$  είναι εξαιρετικά κοντινές, επιβεβαιώνοντας την ασβεστιτική φύση της κονιάς.

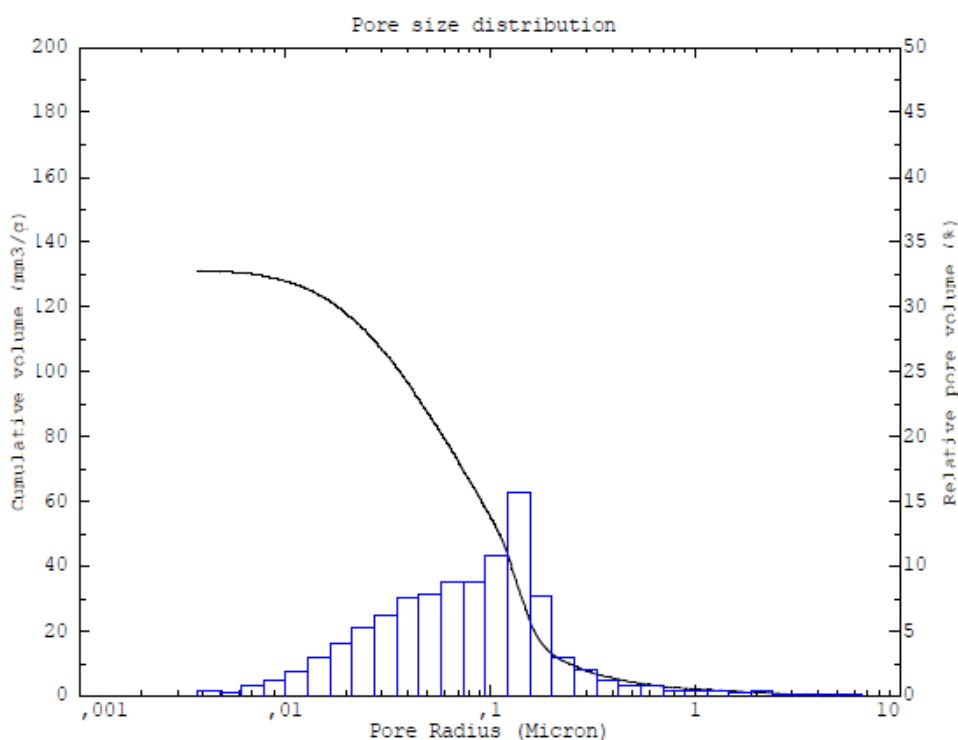


#### 4.5 Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών μικροδομής - Ποροσιμετρία Υδραργύρου (MIP)

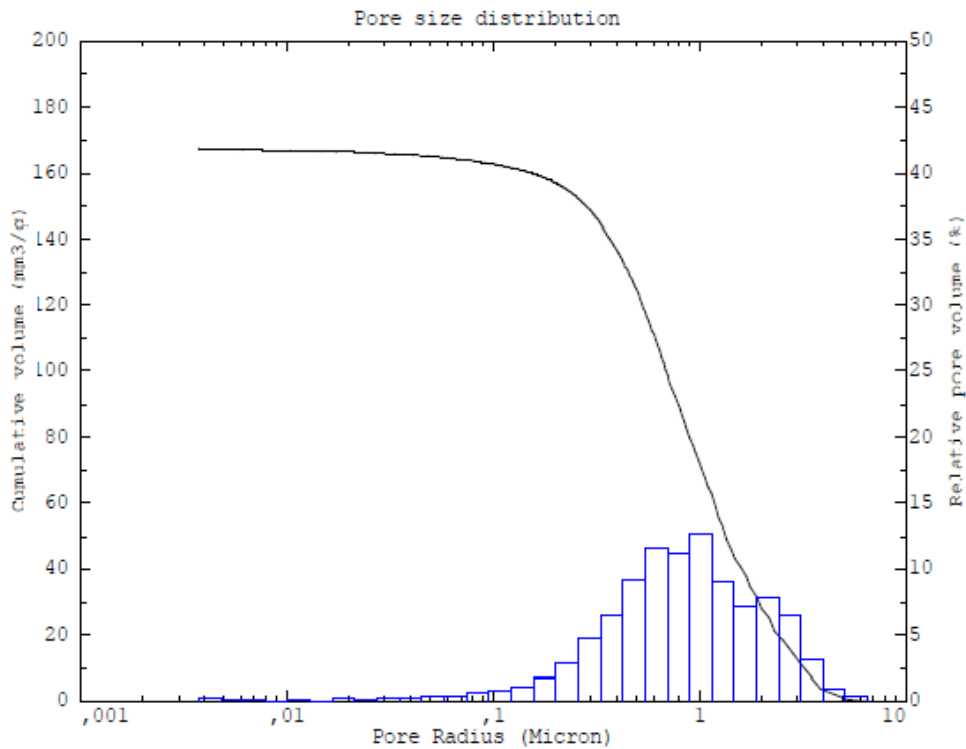
Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα της Ποροσιμετρίας Υδραργύρου (MIP). Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα κατανομής του ολικού ειδικού όγκου των κενών με την ακτίνα των πόρων.

**Πίνακας 15: Αποτελέσματα ποροσιμετρίας υδραργύρου**

Δείγμα	Ολικός ειδικός όγκος (mm <sup>3</sup> /g)	Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	Ολικό πορώδες (%)	Μέση ακτίνα πόρων(μm)	Ειδική επιφάνεια (m <sup>2</sup> /g)
<b>Κεραμικά</b>					
MK3a	131,24	1,89	24,85	0,81	5,82
MK3b	167,68	1,82	30,54	0,85	1,03
<b>Κονιάματα</b>					
MK6	233,75	1,61	37,70	0,44	3,27
MK7	337,86	1,37	46,47	0,33	5,64
MK8	255,81	1,62	36,55	0,47	3,40

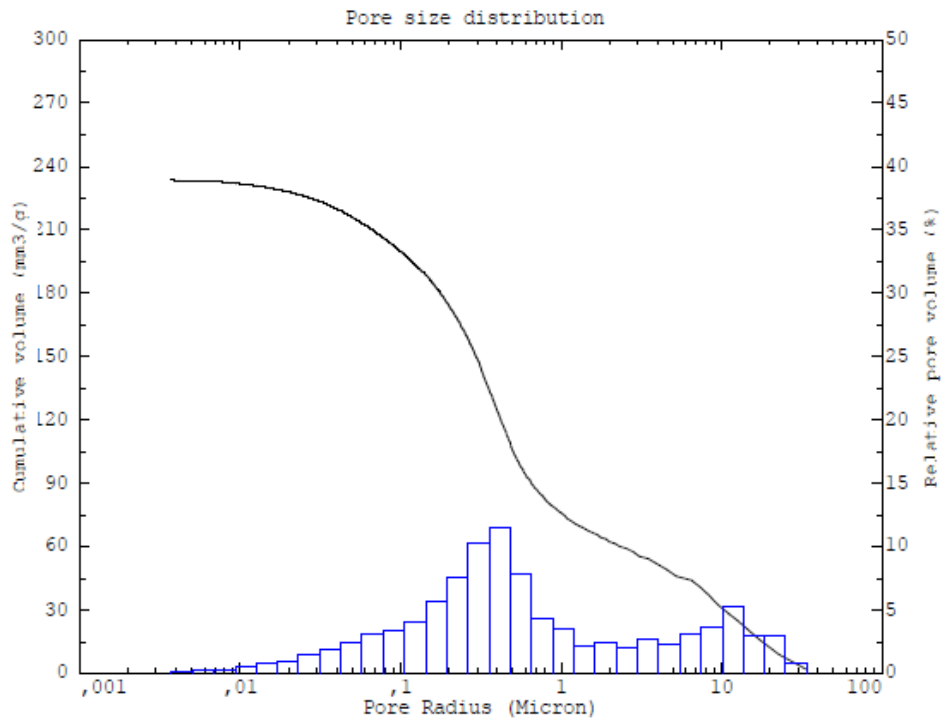


*Διάγραμμα 30: Ιστόγραμμα MIP για το δείγμα MK3a κεραμικό*

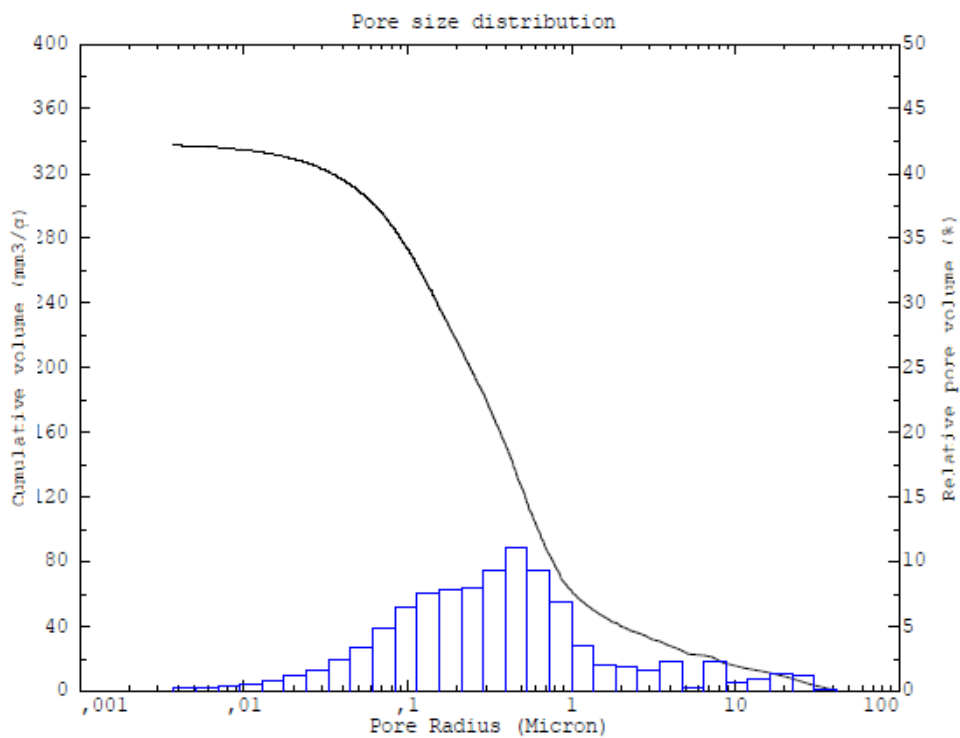


Διάγραμμα 31: Ιστόγραμμα MIP για το δείγμα MK3b κεραμικό

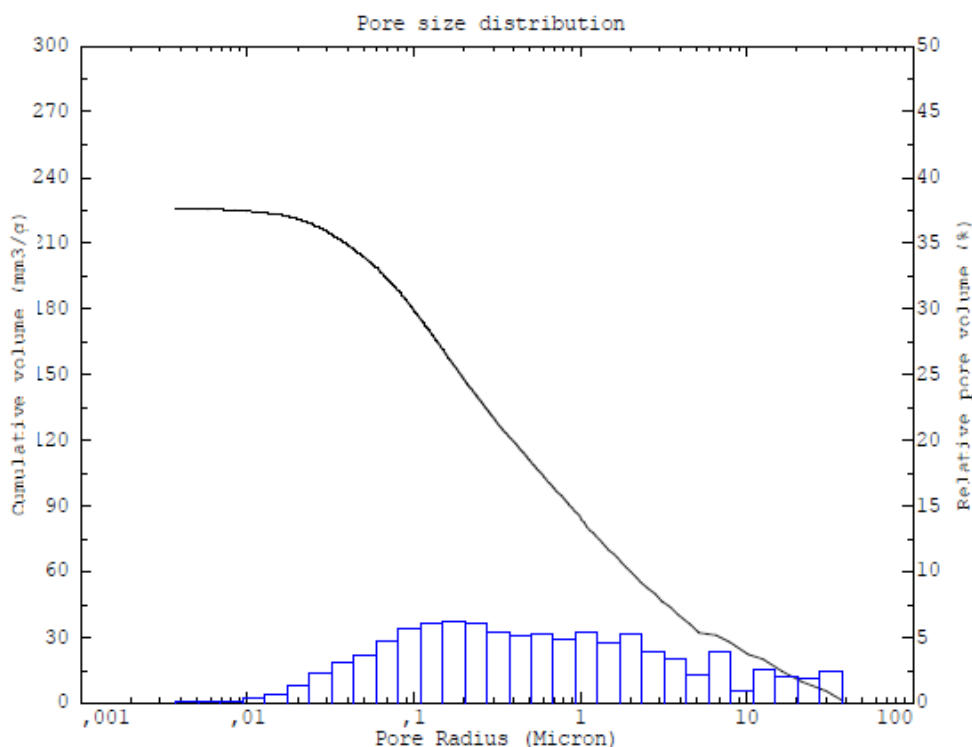
Το δείγμα MK3a αποτελεί αποφλοιωμένο τμήμα κεραμικού πλίνθου ενώ το δείγμα MK3b έχει αποσπαστεί από παρακείμενο κεραμικό πλίνθο. Από τα αποτελέσματα της πορομετρίας υδραργύρου παρατηρείται ότι η μέση ακτίνα πόρων των δύο κεραμικών παρουσιάζει παρόμοιες τιμές σε αντίθεση με το ολικό πορώδες που είναι σαφώς μεγαλύτερο για το δείγμα MK3b. Επιπλέον η ειδική επιφάνεια του δείγματος MK3a είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με το δείγμα MK3b. Ο ολικός ειδικός όγκος του δείγματος MK3b είναι μεγαλύτερος. Η φαινόμενη πυκνότητα παρουσιάζει παρόμοιες τιμές και στα δύο δείγματα. Τα ιστόγραμμα του των δύο δειγμάτων παρουσιάζουν μονοκόρυφη κατανομή, το δείγμα MK3a κοντά στα 0,2-0,3μm και το δείγμα MK3b στο 1μm. Από τα αποτελέσματα του ολικού πορώδους των δύο δειγμάτων, είναι εμφανές ότι πρόκειται για τυπικά βυζαντινά κεραμικά. Οι τιμές του ολικού πορώδους των βυζαντινών οπτόπλινθων είναι 15-35% [100,101].



Διάγραμμα 32: Ιστόγραμμα MIP για το δείγμα MK6 κονίαμα



Διάγραμμα 33: Ιστόγραμμα MIP για το δείγμα MK7 κονίαμα



Διάγραμμα 34: Ιστόγραμμα MIP για το δείγμα MK8 κονιάμα

Τα δείγματα MK6 και MK7 είναι κονιάματα που προέρχονται από το εσωτερικό του καθολικού ενώ το δείγμα MK8 είναι επίσης κονιάμα και προέρχεται από την νότια όψη. Η φαινόμενη πυκνότητα παρουσιάζει παρόμοιες τιμές για τα δείγματα MK6 και MK8 ενώ η τιμή της στο δείγμα MK7 είναι μικρότερη. Τα δείγματα MK6 και MK8 παρουσιάζουν σχεδόν κοινές τιμές ολικού πορώδους, μέσης ακτίνας πόρων και ειδικής επιφάνειας ενώ το δείγμα MK7 στις αντίστοιχες μετρήσεις παρουσιάζει λίγο πιο αυξημένες τιμές με εξαίρεση τη μέση ακτίνα πόρων όπου η τιμή του δείγματος είναι ελάχιστα μικρότερη σε σχέση με αυτή των άλλων δύο κονιαμάτων που εξετάστηκαν. Το δείγμα MK7 παρουσιάζει αρκετά μεγαλύτερο πορώδες σε σχέση με τα υπόλοιπα, μάλιστα σε τιμή που υπερβαίνει το σύνηθες για ασβεστιτικά ιστορικά κονιάματα[99] και αυτό πιθανόν οφείλεται στην κακή κατάσταση διατήρησης του κονιάματος που εμφανίζεται αποσαθρωμένο. Ο ολικός ειδικός όγκος παρουσιάζει κοντινές τιμές στα δείγματα MK6 και MK7 ενώ για το δείγμα MK8 είναι λίγο πιο αυξημένη η τιμή. Από τις τιμές του ολικού ειδικού όγκου, της φαινόμενης πυκνότητας αλλά και από τις τιμές ολικού πορώδους, συμπεραίνουμε ότι πιθανόν πρόκειται για ασβεστιτικά κονιάματα [102]. Το ιστόγραμμα του δείγματος MK6 έχει

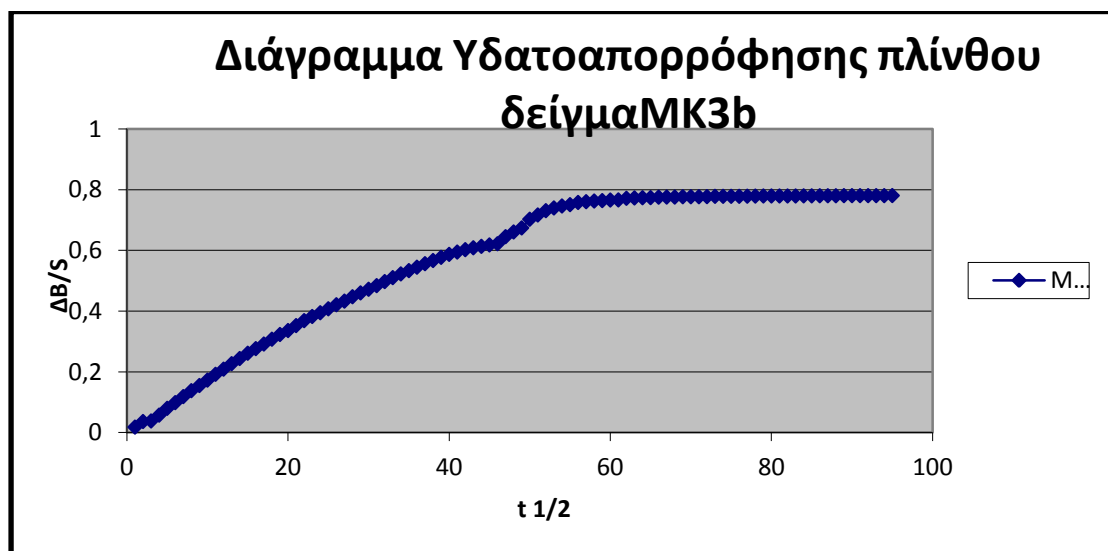
δικόρυφη κατανομή στα 0,4 μm και στα 11-13 μm, το ιστόγραμμα του δείγματος MK7 έχει μονοκόρυφη κατανομή στα 0,4 μm και το ιστόγραμμα του δείγματος MK8 παρουσιάζει εκτεταμένη κατανομή.

#### 4.6 Υδατοαπορρόφηση Πλίνθου

Η υδατοαπορρόφηση εφαρμόστηκε σύμφωνα με το πρότυπο Normal 11/85 στο δείγμα MK3b που είναι κεραμικός πλίνθος. Ακολουθούν το διάγραμμα υδατοαπορρόφησης και το διάγραμμα του συντελεστή υδατοαπορρόφησης.

Πίνακας 16: Στοιχεία διεξαγωγής της υδατοαπορρόφησης

<b>MK3 κεραμικός πλίνθος</b>	
<b>T</b> (θερμοκρασία) :	15 <sup>0</sup> C
<b>RH</b> (σχετική υγρασία):	70%
<b>P<sub>water</sub></b>	0.9991016(g/ cm <sup>3</sup> )
<b>Μάζα ξηρού δείγματος:</b>	159,87g
<b>Επιφάνεια δείγματος (S):</b>	(3,985*6,94)cm <sup>2</sup> =27,6559cm <sup>2</sup>



Διάγραμμα 35: Διάγραμμα Υδατοαπορρόφησης κεραμικού πλίνθου MK3b

Ο συντελεστής υδατοαπορρόφησης  $C$  υπολογίζεται από τον τύπο:

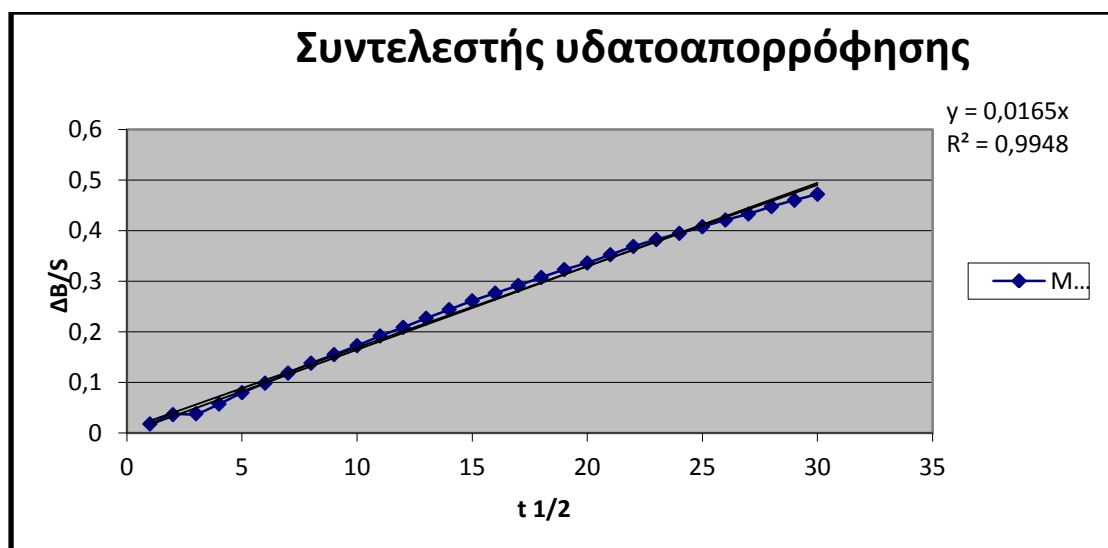
$$C = \frac{\Delta B}{S \cdot \sqrt{t}}$$

Όπου  $S$  : η επιφάνεια επαφής του δοκιμίου με το νερό

$\Delta B$  : η ποσότητα του απορροφημένου νερού σε g σε χρόνο  $t$  (s).

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα δίνεται το διάγραμμα με οριζόντιο άξονα  $\sqrt{t}$  και κατακόρυφο άξονα το πηλίκο  $\Delta B/S$ .

Για τον υπολογισμό του συντελεστή υδατοαπορρόφησης του κεραμικού πλίνθου και με δεδομένη την εκτεταμένη γραμμική περιοχή που παρουσιάζει η καμπύλη υδατοαπορρόφησης, επιλέχθηκαν οι τιμές μέχρι τον χρόνο  $\sqrt{t} = 30$  και στη συνέχεια σχεδιάστηκε η γραμμή τάσης.



Διάγραμμα 36 : Διάγραμμα για τον υπολογισμό του συντελεστή υδατοαπορρόφησης κεραμικού πλίνθου MK3b

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ο συντελεστής υδατοαπορρόφησης:  $C_{MK3b} = 16,5 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \text{s}^{1/2})$ . Η προσέγγιση στη γραμμικότητα για τις τιμές που επιλέχθηκαν είναι πολύ καλή, καθώς το  $R^2$  είναι πολύ κοντά στη μονάδα.

Για τον προσδιορισμό του νερού που απορροφήθηκε, ελήφθησαν μετρήσεις βάρους μέχρι τη σταθεροποίηση της τιμής του.

Η μεταβολή του βάρους λόγω ρόφησης μέσω τριχοειδών είναι:

$$\Delta B = B_{wet} - B_{dry} = 181,47(g) - 159,87(g) = 21,6g$$

Ο όγκος νερού που απορροφήθηκε υπολογίζεται ως εξής:

$$\Delta V_{water} = \frac{\Delta B}{\rho_{water}} = \frac{21,6(g)}{0,9991016 (g/cm^3)} = 21,62cm^3$$

Ο όγκος νερού που απορροφήθηκε ανά μονάδα μάζας είναι:

$$V_{water/Bdry} = \frac{\Delta V_{water}}{B_{dry}} = \frac{21,62(cm^3)}{159,87 (g)} = 0,1352(cm^3/g)$$

Με βάση τον υπολογισμό της φαινόμενης πυκνότητας από την Ποροσιμετρία Υδραργύρου, υπολογίζουμε το ποσοστό του πορώδους που είναι προσβάσιμο στο νερό μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης

$P\% = V_{water/Bdry} \times \text{Bulk density} = 0,135(cm^3/g) \times 1,82(cm^3/g) = 0,246$  άρα το **πορώδες προσβάσιμο στο νερό μέσω τριχοειδούς αναρρίχησης είναι 24,6%**

Από την Ποροσιμετρία Υδραργύρου (MIP) το ολικό πορώδες προέκυψε 30,54%, από τη στιγμή που οι δύο τιμές δεν είναι κοντινές, συμπεραίνουμε ότι το κεραμικό έχει σημαντικό ποσοστό άλλων πόρων εκτός από τους τριχοειδείς.

#### **4.7 Προσδιορισμός ολικών διαλυτών αλάτων (SST%) & δοκιμές ποιοτικής χημικής ανίχνευσης (SPOTTESTS)**

Για τον προσδιορισμό των ολικών διαλυτών αλάτων ζυγίστηκαν  $100 \pm 5$  mg σκόνη για κάθε ξηρό δείγμα και στη συνέχεια το κάθε δείγμα διαλύθηκε σε 100 ml απιονισμένου νερού για εικοσιτέσσερις ώρες. Κατόπιν, μετρήθηκε η αγωγιμότητά τους σε  $\mu\text{Siemens}$ . Ο προσδιορισμός της επί τοις εκατό περιεκτικότητας του κάθε δείγματος σε διαλυτά άλατα δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$SST\% = (Cx 6,88) / m$$

C: η αγωγιμότητα του προς εξέταση δείγματος σε  $\mu\text{S}$

m: το βάρος του προς εξέταση δείγματος σε mg

Η θερμοκρασία όλων των διαλυμάτων και του τυφλού ήταν 21 – 22 °C κατά τη μέτρηση της αγωγιμότητάς τους. Για την ανίχνευση των χλωριούχων (Cl<sup>-</sup>) και θειικών αλάτων (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) σε κάθε δείγμα τοποθετήθηκε μέρος του διαλύματος σε δοκιμαστικό σωλήνα μαζί με μικρή ποσότητα νιτρικού αργύρου (AgNO<sub>3</sub>) και χλωριούχου βαρίου (BaCl<sub>2</sub>) αντίστοιχα. Σε περίπτωση παρουσίας χλωριόντων σχηματίζεται χλωριούχος άργυρος (AgCl) ενώ σε περίπτωση παρουσίας θειικών ιόντων παράγεται θειικό βάριο (BaSO<sub>4</sub>).

Ποιοτικά, ανάλογα με την ένταση του θολώματος, η παρουσία των χλωριόντων και των θειικών ιόντων μπορεί να χαρακτηριστεί ως πολύ υψηλή (+++++), υψηλή (++++), μέση (+++), χαμηλή (++) , πολύ χαμηλή (+), ίχνη (tr). Επισημαίνεται ότι μέτρο σύγκρισης για την πολύ μεγάλη παρουσία χλωριόντων είναι το πόσιμο νερό.

**Πίνακας 17: Αποτελέσματα ολικών διαλυτών αλάτων και δοκιμών ποιοτικής χημικής ανίχνευσης**

Κωδικός Δείγματος	Αγωγιμότητα	Ολικά Διαλυτά Άλατα	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	NO <sup>2--</sup>
MK1	72,2	4,84	-	-	+
MK2	83,3	5,54	-	-	+
MK2β	65,7	4,38	-	+	-
MK3	53,8	3,57	-	-	-
MK4	97,1	6,53	+	-	++
MK5	122,1	8,28	-	-	+++
MK6	48,3	3,2	-	-	-
MK7	61,4	4,09	+	-	-
MK8	87,7	5,91	-	-	+

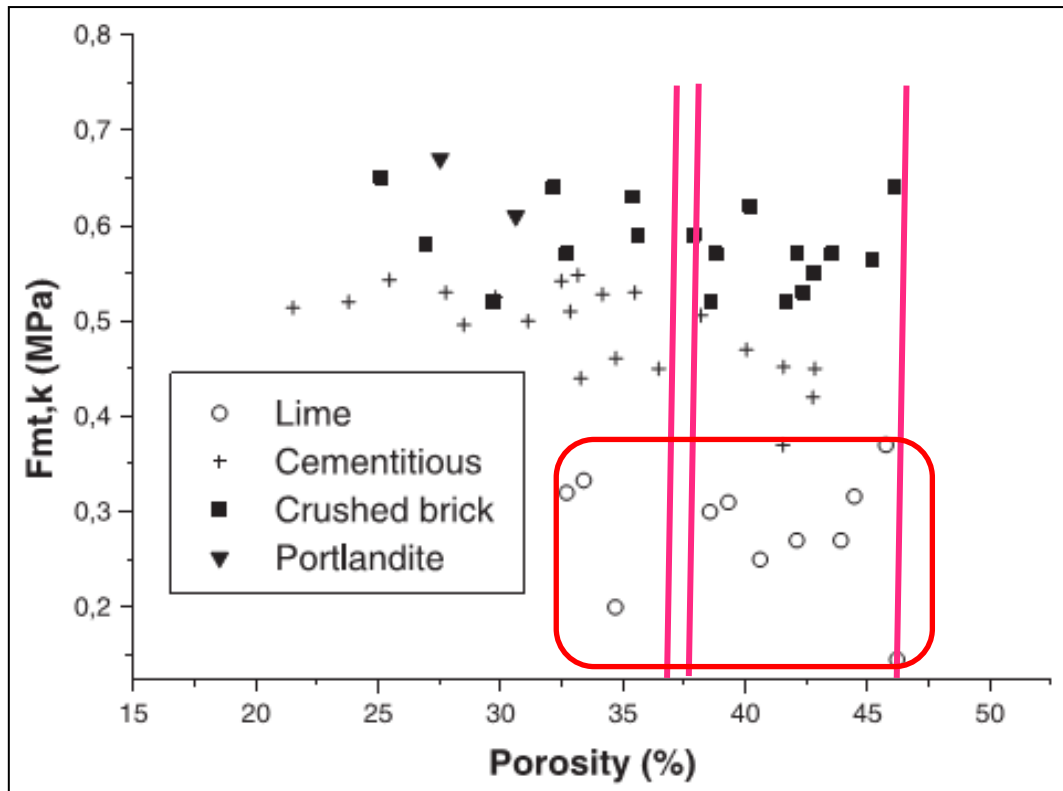


Σε όλα τα δείγματα που εξετάστηκαν, παρατηρείται μεγάλη συγκέντρωση ολικών διαλυτών αλάτων πάνω από το επιτρεπτό όριο του 3%. Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακά διαπιστώθηκε πολύ χαμηλή συγκέντρωση θεικών στο δείγμα MK2b. Επίσης, πολύ χαμηλή συγκέντρωση χλωριόντων διαπιστώθηκε στα δείγματα MK4 και MK7. Στα υπόλοιπα δείγματα δεν παρατηρούνται χλωριόντα και θειικά. Η υψηλή συγκέντρωση ολικών διαλυτών αλάτων οφείλεται στην ύπαρξη νιτρικών αλάτων που δικαιολογούνται λόγω της έντονης βιοδιάβρωσης που παρουσιάζεται σχεδόν σε όλα τα δομικά υλικά της Μονής. Τα νιτρικά άλατα είναι συνήθως προϊόντα αποσύνθεσης οργανικών υλικών[17], επομένως η ύπαρξη οστεοφυλακίου στη βόρεια πλευρά του καθολικού δικαιολογεί και την μεγάλη συγκέντρωση ολικών διαλυτών αλάτων που παρουσιάζουν τα δείγματα MK4 και MK5 που προέρχονται από την βόρεια όψη. Επιπλέον, σύμφωνα με ιστορικές πηγές, κατά το παρελθόν ο ναός είχε χρησιμοποιηθεί και ως χώρος φύλαξης οικόσιτων ζώων [103]. Ακόμα και η χρήση φυτοφαρμάκων αυξάνει την ποσότητα των νιτρικών. Παράλληλα, το υψηλό ποσοστό των αλάτων θα μπορούσε να προέρχεται και από υλικά αποκατάστασης, λόγω της κατά τόπους χρήσης ασύμβατων κονιαμάτων αποκατάστασης. Η αυξημένη παρουσία διαλυτών αλάτων στα δομικά υλικά της Μονής Καισαριανής, είναι εμφανής και μακροσκοπικά στο μνημείο, λόγω των εκτεταμένων εξανθήσεων [72] αλάτων στις τοιχοποιίες. Σε κάθε περίπτωση, η ύπαρξη μεγάλης ποσότητας διαλυτών αλάτων σε ένα περιβάλλον έντονης υγρασίας, όπως είναι το περιβάλλον της Μονής Καισαριανής, είναι σημαντικό ζήτημα για την ανθεκτικότητα των υλικών και πρέπει να ληφθεί υπόψη σε κάθε επέμβαση αποκατάστασης.

#### ***4.8 Συσχέτιση μηχανικών αντοχών και χαρακτηριστικών μικροδομής ιστορικών κονιαμάτων***

Σε έρευνα των Moropoulou et al. επετεύχθη η συσχέτιση μηχανικών αντοχών και χαρακτηριστικών μικροδομής για διάφορες κατηγορίες ιστορικών κονιαμάτων. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν 50 δείγματα κονιαμάτων διαφόρων κατηγοριών από διαφορετικές ιστορικές περιόδους και κατεγράφησαν τα αποτελέσματα των θερμικών αναλύσεων (DTA/TG), τα χαρακτηριστικά μικροδομής που παρουσιάζουν, όπως εκτιμήθηκαν μέσω ποροσιμετρίας υδραργύρου (MIP) καθώς και οι τιμές μηχανικών αντοχών, και συγκεκριμένα η εφελκυστική αντοχή, όπως εκτιμήθηκε μέσω της μεθόδου δοκιμής θραυσμάτων (fragment test method).

Η ανάλυση κυρίων συνιστωσών που πραγματοποιήθηκε, έδειξε συσχέτιση της εφελκυστικής αντοχής των ιστορικών κονιαμάτων με τον αντίστροφο λόγο υδραυλικότητας, όπως υπολογίστηκε μέσω θερμικών αναλύσεων, ανάλογα με την κατηγορία ιστορικού κονιάματος. Παράλληλα, έδειξε συσχέτιση της εφελκυστικής αντοχής των ιστορικών κονιαμάτων με το πορώδες που εμφανίζουν, επιτρέποντας την ομαδοποίησή τους σε κατηγορίες. Στην παρούσα εργασία, γίνεται χρήση του διαγράμματος συσχέτισης πορώδους και εφελκυστικής αντοχής, καθώς το ποσοστό χημικά δεσμευμένου νερού, δεν οφείλεται καθαρά σε υδραυλικές ενώσεις και δεν μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια. Στο επόμενο διάγραμμα, φαίνεται η περιοχή στην οποία κατατάσσονται τα κονιάματα της Μονής Καισαριανής.



**Σχήμα 4:** Συσχέτιση εφελκυστικής αντοχής και πορώδους (%)

Από την παραπάνω εικόνα είναι εμφανές ότι τα ασβεστοτικά κονιάματα, με τιμές πορώδους ανάμεσα σε 32,5% και 46,5%, παρουσιάζουν τιμές αντοχής σε εφελκυσμό κάτω από 0,34 MPa. Συνεπώς, από την ανωτέρω συσχέτιση, και λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση διατήρησης των κονιαμάτων της Μονής Καισαριανής, μπορεί να ληφθεί σαν πιθανή τιμή αντοχής σε θλίψη των ιστορικών κονιαμάτων η τιμή 1 MPa, ώστε να εισαχθεί στη συνέχεια σαν τιμή στις καμπύλες θραυστότητας.

## 5. ΠΡΟΤΑΣΗ ΓΙΑ ΣΥΜΒΑΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ

---

Με βάση τη μεθοδολογία της αντίστροφης μηχανικής προσέγγισης ένα βασικό βήμα στην επιλογή κονιαμάτων αποκατάστασης είναι η επιλογή των πρώτων υλών και προδιαγραφών που πρέπει να πληρούν αυτές, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρασκευή των κονιαμάτων αποκατάστασης. Παράλληλα, η μελέτη των ιστορικών υλικών και η διαγνωστική μελέτη υποδεικνύουν τις ιδιότητες που είναι επιθυμητό να πληρούν τα κονιάματα αποκατάστασης.

Σύμφωνα λοιπόν με τον χαρακτηρισμό των υλικών, τα κονιάματα δόμησης της Μονής Καισαριανής χαρακτηρίζονται ως ασβεστιτικά με ασβεστιτικά και χαλαζιακά αδρανή και την κατά περίπτωση παρουσία άχυρου για την ενίσχυση και τον οπλισμό του κονιάματος. Κατά την επιλογή κονιάματος αποκατάστασης, πρέπει να ληφθεί υπόψη και η έντονη παρουσία υγρασίας στον χώρο του μνημείου και στα δομικά υλικά, λόγω ανερχόμενης και κατερχόμενης υγρασίας, καθώς και η σχετικά μεγάλη περιεκτικότητα σε διαλυτά άλατα που μετρήθηκε στα κονιάματα και που εκδηλώνεται με την έντονη παρουσία εξανθήσεων στις τοιχοποιίες του μνημείου, η οποία παρατηρήθηκε επί τόπου κατά την διαγνωστική μελέτη.

Το κονίαμα αποκατάστασης που θα επιλεγεί θα πρέπει:

- Να έχει υδραυλικό χαρακτήρα, ώστε να είναι δυνατή η σκλήρυνση σε έντονες συνθήκες υγρασίας και παράλληλα να παρουσιάζει ικανοποιητικές μηχανικές αντοχές,
- Να γίνει χρήση κονίας, αλλά και ποζολανικού προσθέτου, ώστε να διασφαλίζεται η ανθεκτικότητα των κονιαμάτων αποκατάστασης στους διαβρωτικούς παράγοντες του μνημείου,
- Να παρουσιάζουν φυσική, χημική και φυσικοχημική συμβατότητα με τα βασικά δομικά υλικά της Μονής Καισαριανής,
- Να παρουσιάζουν ικανοποιητική συμπεριφορά σε σεισμικές καταπονήσεις.

Τα παραπάνω κριτήρια οδηγούν στη διερεύνηση συνθέσεων με πρώτες ύλες υδράβεστο, προερχόμενη από υψηλής καθαρότητας ασβεστόλιθο ή φυσική υδραυλική άβεστο σαν βασική κονία, μετακαολίνη σαν ποζολανικό πρόσθετο και αδρανή πυριτικής. Η χρήση του μετακαολίνη ως ποζολανικού πρόσθετου οδηγεί σε

υδραυλικές ενώσεις οι οποίες είναι ανθεκτικές στους έντονα διαβρωτικούς παράγοντες διαλυμάτων αλάτων από τα οποία υποφέρει η κατασκευή, διασφαλίζοντας επίσης γρήγορη και ικανή πρόσληψη μηχανικών αντοχών που αποτελεί ζητούμενο, ιδιαίτερα στον Ελλαδικό χώρο που είναι σεισμογενής.

Τα κριτήρια που πρέπει να πληρούν οι πρώτες ύλες για την παρασκευή κονιαμάτων αποκατάστασης, όπως ελήφθησαν από τη βιβλιογραφία, φαίνονται παρακάτω [54,104]:

#### **A. Συνδετική Ύλη**

##### Υδράσβεστος

- Ο ασβεστόλιθος από τον οποίο προέρχεται πρέπει να περιέχει τουλάχιστον 98-99%  $\text{CaCO}_3$ .
- Η θερμοκρασία έψησης του ασβεστόλιθου πρέπει να είναι γύρω στους  $900^\circ\text{C}$ , έτσι ώστε να παράγεται μικροκρυσταλλικό  $\text{CaO}$  με υψηλή τιμή ειδικής επιφάνειας, επαρκώς ενεργό, χωρίς προβλήματα κατά την σβέση.
- Κατάλληλη σβέση του  $\text{CaO}$  για την παραγωγή  $\text{Ca(OH)}_2$  σε μορφή σκόνης.

##### Υδραυλική Άσβεστος

- Η θερμοκρασία έψησης του αρχικού πετρώματος δεν πρέπει να ξεπερνά τους  $900^\circ\text{C}$ .
- Καλή σβέση έτσι ώστε το  $\text{CaO}$  να μετατραπεί σε  $\text{Ca(OH)}_2$  χωρίς την ενυδάτωση των υδραυλικών φάσεων.
- Παρουσία ενώσεων  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{CA}$ .
- Μικρή περιεκτικότητα σε διαλυτά άλατα.
- Τιμή αντοχής σε θλίψη όχι μικρότερη από 2MPa στις 28 ημέρες.

## **B. Αδρανή**

### Άμμος

- Πυριτικής φύσεως (ποταμίσια), δεδομένου ότι είναι πιο ανθεκτική σε περιβαλλοντικά φορτία, χωρίς να αποκλείεται η χρήση άμμου ασβεστολιθικής φύσεως, αν τίθεται θέμα με τη συμβατότητάς της με τη συνδετική κονία.
- Χωρίς προσμίξεις όπως άλατα, άργιλοι, παιπάλη κλπ.
- Κοκκοδιαβάθμιση ανάλογα με τη χρήση.

### Θραυσμένο Κεραμικό

- Θερμοκρασία έψησης αρχικού κεραμικού <900°C.
- Οι πρώτες ύλες του κεραμικού θα πρέπει να περιέχουν μικρή ποσότητα CaCO<sub>3</sub>.

## **Γ. Πρόσμικτα**

Τεχνητές ποζολάνες (μετακαολίνης):

Αντοχή σε θλίψη > 5N/mm<sup>2</sup>.

- Περιεχόμενο ποσοστό σε ενεργό πυρίτιο > 20%.
- Θερμοκρασία έψησης του κεραμικού περίπου 850°C.
- Μεγάλη λεπτότητα.

Από τη μελέτη της βιβλιογραφίας, τις προδιαγραφές που τίθενται πληρούν τα κονιάματα υδρασβέστου-μετακαολίνη, όπως μελετήθηκαν από τους Μογορούλιου *et al* 2006 [105]. Τα κονιάματα υδρασβέστου-μετακαολίνη είναι συμβατά από άποψη φυσικοχημικών χαρακτηριστικών και χαρακτηριστικών μικροδομής με τα ιστορικά κονιάματα και τα δομικά υλικά, ενώ παράλληλα επιτυγχάνουν ικανοποιητικές μηχανικές αντοχές. Μεταβάλλοντας το ποσοστό του μετακαολίνη στη σύνθεση του κονιάματος, επιτυγχάνεται ένα εύρος μηχανικών αντοχών.

Σημαντικό ρόλο στην επιλογή του κονιάματος αποκατάστασης παίζει και η συμβατότητα με τα υπόλοιπα υλικά της τοιχοποιίας. Η χαμηλή αντοχή του

κογχυλιάτη λίθου, όπως μετρήθηκε επί τόπου με κρουσίμετρο [72], αποτελεί και όριο αποδοχής για την επιλογή κονιάματος αποκατάστασης, καθώς το κονίαμα αποκατάστασης πρέπει να παρουσιάζει χαμηλότερες μηχανικές αντοχές σε σχέση με το ασθενέστερο δομικό στοιχείο, δηλαδή τον κογχυλιάτη λίθο. Συνεπώς μπορεί να επιλεγεί είτε η σύνθεση κονιάματος αποκατάστασης MK<sub>5</sub> είτε η σύνθεση MK<sub>2,5.CF.2S</sub> [23], που παρουσιάζουν συμβατή μικροδομή και αντοχή σε θλίψη F<sub>c</sub>=5,88MPa και F<sub>c</sub>=8,4MPa. Τα χαρακτηριστικά των προτεινόμενων κονιαμάτων αποκατάστασης παρατίθενται στους κάτωθι πίνακες:

**Πίνακας 18: Συνθέσεις προτεινόμενων κονιαμάτων % κατά βάρος [23]**

ΟΝΟΜΑ	NHL3.5	Lime	Μετακαολίνης	Άμμοσπυριτική (0-2mm)	Άμμοσπυριτική (0-6mm)	Θραυσμένο κεραμικό (0-16mm)
MK <sub>5</sub>	-	25	5	70	-	-
MK <sub>2,5.CF.2S</sub>	-	27,5	2,5	-	35	35

**Πίνακας 19: Ποσοστά απώλειας βάρους (%) για το κονίαμα MK<sub>5</sub> υδράσβεστου-μετακαολίνη στην εξέλιξη του χρόνου[23]**

Κωδικός	Χρόνος (μήνες)	(H) <sub>t.ch.b.</sub>	H-CH	CH	(CH) <sub>δεσμ.</sub> (%)	CO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>
MK <sub>5</sub>	0	0,23	4,70	19,33	0	1,85	4,21
	1	6,85	2,80	11,51	40	2,81	6,38
	3	3,24	2,50	10,28	47	2,88	6,54
	6	3,67	2,19	9,00	53	7,67	17,43
	12	3,60	0,00	0,00	100	10,70	24,31

\* $(H)_{ph.b.}$ : συνολικά φυσικά ροφημένο νερό,  $(H)_{ch.b.}$ : συνολικά χημικά δεσμευμένο νερό, H-CH: χημικά δεσμευμένο νερό του Ca(OH)<sub>2</sub>, CH: Ca(OH)<sub>2</sub>, (CH)<sub>δεσμ.</sub>(%): ποσοστό δεσμευμένης ποσότητας CH

Στην περίπτωση του MK<sub>2,5.CF.2S</sub> το ποσοστό του Ca(OH)<sub>2</sub> που δεν έχει δεσμευθεί στους 12 μήνες ωρίμανσης υπολογίζεται 3,8%.

**Πίνακας 20: Χαρακτηριστικά μικροδομής του προτεινόμενου κονιάματος στην εξέλιξη του χρόνου, μέσω πορομετρίας υδραργύρου[23]**

Κωδ.	Χρόνος (μήνες)	T.C.V. (mm <sup>3</sup> /g)	S.S.A. (m <sup>2</sup> /g)	Por. Rad. Av. (μm)	d <sub>bulk</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	d <sub>corr.</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Total Porosity (%)
MK <sub>5</sub>	1	183,34	9,76	0,24	1,70	2,69	31,17
	3	200,26	9,58	0,27	1,67	2,50	33,37
	6	207,55	8,59	0,25	1,67	2,55	34,58
	12	199,26	7,11	0,27	1,73	2,61	34,47
	18	191,63	5,56	0,29	1,75	2,64	33,57

Στην περίπτωση του MK<sub>2,5.CF.2S</sub>, το χαρακτηριστικό μικροδομής που ενδιαφέρει για την αποτίμησή του είναι η φαινόμενη πυκνότητα που παρουσιάζει. Η τιμή της φαινόμενης πυκνότητας είναι αυτή που αντιστοιχεί στον μέσο όρο 3 πρισματικών δοκιμών σε κάθε χρόνο ωρίμανσης. Η τελική τιμή της φαινόμενης πυκνότητας στους 12 μήνες ωρίμανσης είναι 1,62g/cm<sup>3</sup> [23].

**Πίνακας 21: Αποτελέσματα δοκιμών σε κάμψη και σε θλίψη για τα προτεινόμενα κονιάματα [23]**

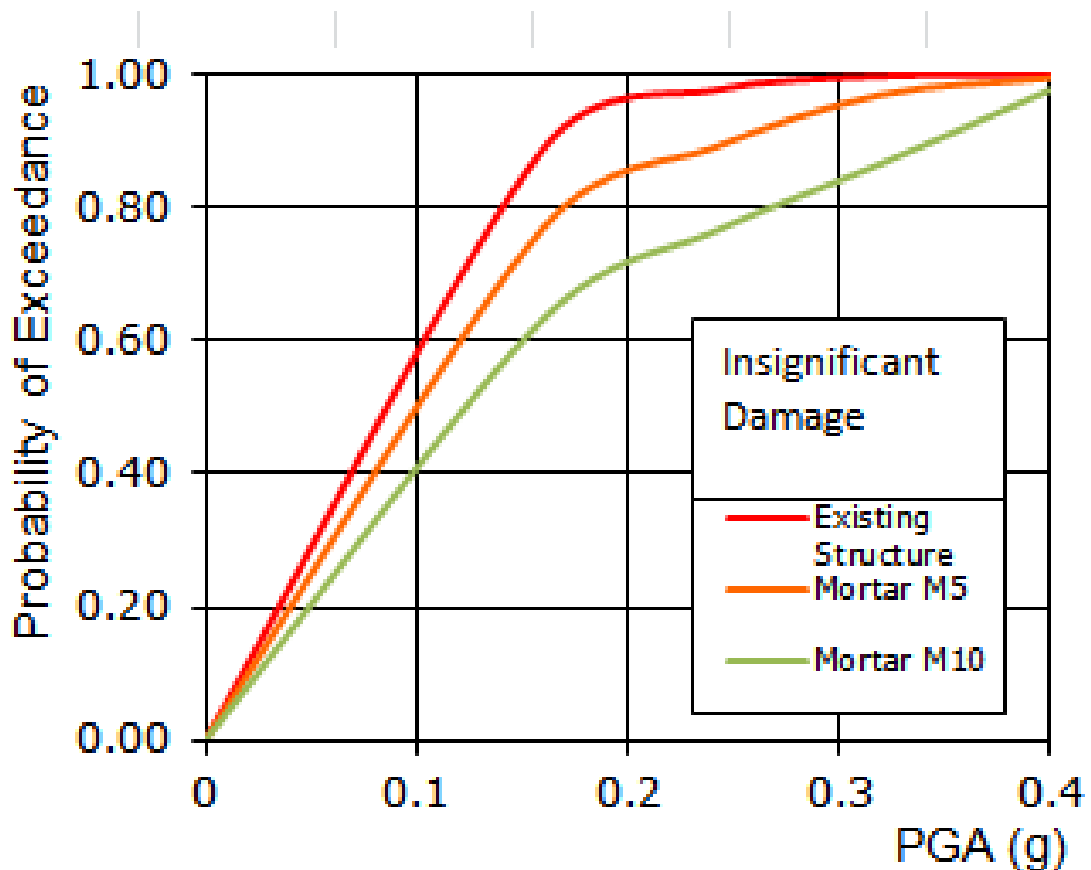
Κωδικός	Χρόνος (μήνες)	F <sub>t</sub> (MPa)	St.Dev.	F <sub>c</sub> (MPa)	St.Dev.
MK <sub>5</sub>	1	2,13	0,21	7,68	0,37
	3	2,13	0,38	8,07	0,27
	6	1,8	0,29	8,09	0,43
	12	1,51	0,46	5,88	0,88
MK <sub>2,5.CF.2S</sub>	1	0,90	0,10	5	0,15
	3	1,76	0,10	8,7	0,30
	6	1,52	0,41	8,5	0,16
	12	1,50	0,25	8,4	0,36

**\*\*F<sub>f</sub>: Αντοχή σε κάμψη (MPa), F<sub>c</sub>: Αντοχή σε θλίψη (MPa), St.Dev.: Τυπική απόκλιση**



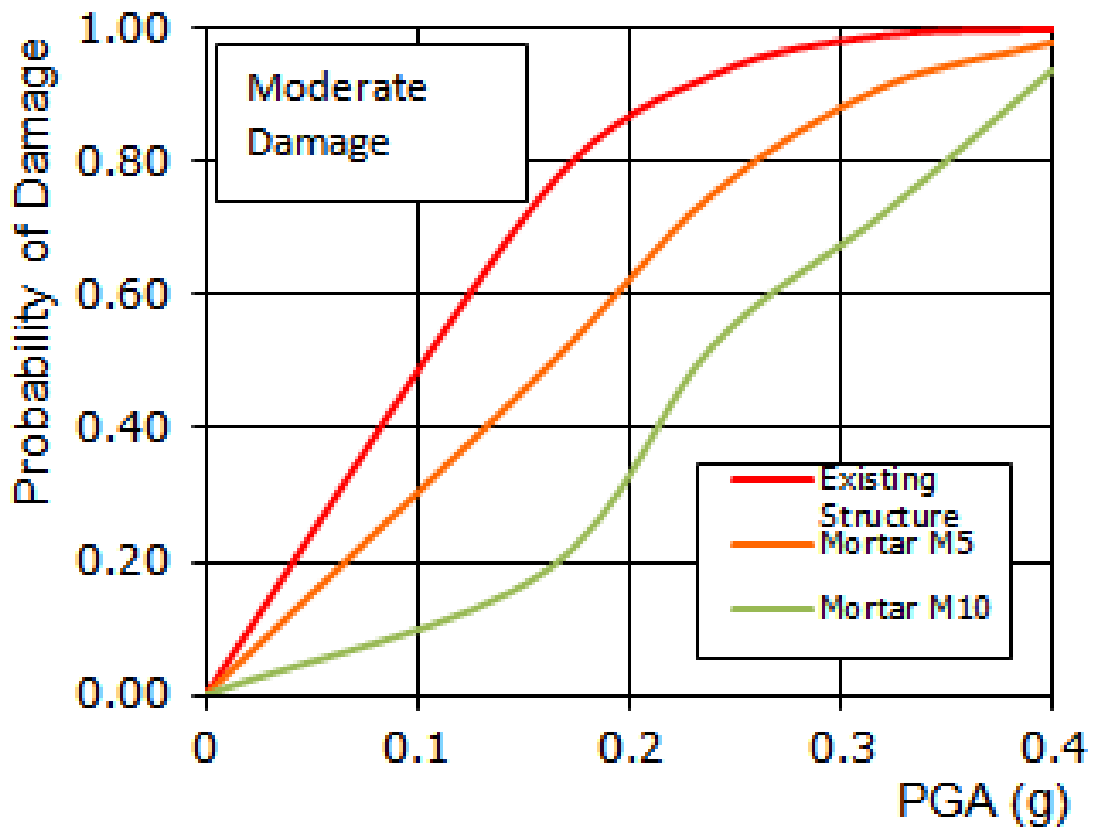
Οι Asteris et al. [106-113], στο Εργαστήριο Υπολογιστικής Μηχανικής του Τμήματος Εκπαιδευτικών Πολιτικών Μηχανικών της Ανώτατης Σχολής Παιδαγωγικής & Τεχνολογικής Εκπαίδευσης έχουν κατασκευάσει καμπύλες θραυστότητας για τη Μονή Καισαριανής (Σχήμα 6,7,8). Στα παρακάτω διαγράμματα, φαίνονται οι πιθανότητες να συμβεί μικρή, μεσαία και σημαντική βλάβη στο δόμημα, για τρία πιθανά σενάρια: την υπάρχουσα κατάσταση του μνημείου, την αντικατάσταση των υπαρχόντων κονιαμάτων με κονίαμα αποκατάστασης αντοχής 5 MPa και την αντικατάσταση των υπαρχόντων κονιαμάτων με κονίαμα αποκατάστασης αντοχής 10 MPa.

Σαν τιμές εισόδου για τα αυθεντικά υλικά της Μονής Καισαριανής, επιλέχθηκε η μέση τιμή 12 MPa για τους λίθους, λαμβάνοντας υπόψη βιβλιογραφικά δεδομένα [114, 115], καθώς και τα αποτελέσματα της κρουσιμέτρησης στους κογχυλιάτες λίθους, αλλά και το γεγονός πως στην τοιχοποιία υπάρχουν και συμπαγείς ασβεστόλιθοι με μεγαλύτερες μηχανικές αντοχές. Παράλληλα, η συσχέτιση του πορώδους και των μηχανικών αντοχών των ιστορικών κονιαμάτων, υποδεικνύει τιμές αντοχής σε θλίψη των κονιαμάτων περί του 1 MPa.



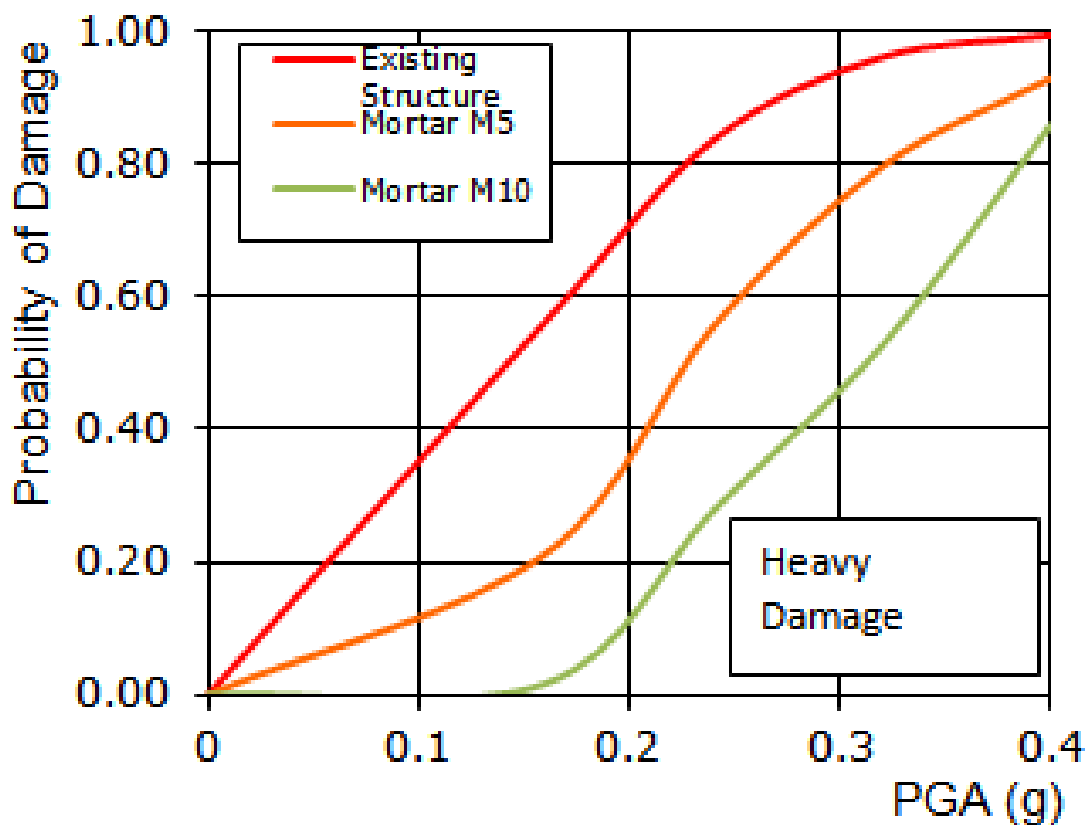
**Σχήμα 5:** Καμπύλες θραυστότητας - Πιθανότητα εμφάνισης μικρής βλάβης

Όσον αφορά στην πιθανότητα εμφάνισης μικρής βλάβης, είναι φανερό πως η αντικατάσταση των ιστορικών κονιαμάτων με κονιάματα αποκατάστασης που παρουσιάζουν αντοχή σε θλίψη 5 και 10 MPa αντίστοιχα βελτιώνει την σεισμική απόκριση της κατασκευής. Για παράδειγμα, σε περίπτωση εδαφικής επιτάχυνσης PGA: 0,2 g, η αντικατάσταση των αρμολογημάτων με το κονίαμα MK<sub>5</sub> (5 MPa) επιφέρει μείωση στην πιθανότητα εμφάνισης μικρής βλάβης κατά ~10%, ενώ ένα κονίαμα αντοχής σε θλίψη 10 MPa θα επιφέρει μείωση ~25%.



**Σχήμα 6:** Καμπύλες θραυστότητας - Πιθανότητα εμφάνισης μεσαίας βλάβης

Όσον αφορά στην πιθανότητα εμφάνισης μεσαίας βλάβης, είναι φανερό πως η αντικατάσταση των ιστορικών κονιαμάτων με κονιάματα αποκατάστασης που παρουσιάζουν αντοχή σε θλίψη 5 και 10 MPa αντίστοιχα βελτιώνει την σεισμική απόκριση της κατασκευής. Για παράδειγμα, σε περίπτωση εδαφικής επιτάχυνσης PGA: 0,2 g, η αντικατάσταση των αρμολογημάτων με το κονίαμα ΜΚ<sub>5</sub> (5 MPa) επιφέρει μείωση στην πιθανότητα εμφάνισης μεσαίας βλάβης κατά ~25%, ενώ ένα κονίαμα αντοχής σε θλίψη 10 MPa θα επιφέρει μείωση ~50%.



**Σχήμα 7:** Καμπύλες θραυστότητας - Πιθανότητα εμφάνισης σημαντικής βλάβης

Όσον αφορά στην πιθανότητα εμφάνισης σημαντικής βλάβης, είναι φανερό πως η αντικατάσταση των ιστορικών κονιαμάτων με κονιάματα αποκατάστασης που παρουσιάζουν αντοχή σε θλίψη 5 και 10 MPa αντίστοιχα βελτιώνει την σεισμική απόκριση της κατασκευής. Για παράδειγμα, σε περίπτωση εδαφικής επιτάχυνσης PGA: 0,2 g, η αντικατάσταση των αρμολογημάτων με το κονίαμα ΜΚ<sub>5</sub> (5 MPa) επιφέρει μείωση στην πιθανότητα εμφάνισης σημαντικής βλάβης κατά ~35%, ενώ ένα κονίαμα αντοχής σε θλίψη 10 MPa θα επιφέρει μείωση ~55%.

Είναι εμφανές ότι ακόμα και με αντικατάσταση των υπαρχόντων κονιαμάτων με κονίαμα αποκατάστασης αντοχής σε θλίψη 5 MPa, η πιθανότητα εμφάνισης μικρής, μεσαίας και σημαντικής βλάβης μειώνεται αισθητά, ιδιαίτερα στην περίπτωση εμφάνισης σημαντικής βλάβης, συνεπώς τα κονιάματα που προτάθηκαν είναι αποδεκτά και από άποψη επιτελεσματικότητας σε σεισμική δράση.

## **6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ**

## **6.1 Συμπεράσματα**

Με βάση τα αποτελέσματα από τον χαρακτηρισμό των υλικών του Καθολικού της Μονής Καισαριανής, τα οποία εξετάστηκαν εφαρμόζοντας συνδυασμό τεχνικών εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Τα κονιάματα παρουσιάζουν παρόμοια μορφολογικά, χημικά και ορυκτολογικά χαρακτηριστικά καθώς και παρόμοια χαρακτηριστικά μικροδομής. Πρόκειται για ασβεστιτικά κονιάματα που περιέχουν πρόσθετα και αδρανή ασβεστιτικής φύσης ή μίξη αδρανών ασβεστιτικής και αργιλοπυριτικής φύσης. Ουσιαστικά, οι διαφοροποιήσεις τους αφορούν τη φύση των αδρανών καθώς και τα πρόσθετα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη μίξη των κοναμάτων.

Αναλυτικότερα, τα δείγματα MK1, MK2, MK2b, που προέρχονται από την ανατολική όψη και το δείγμα MK4 που προέρχεται από την βόρεια όψη, είναι ασβεστιτικά κονιάματα με άχυρο και αποτελούνται σχεδόν αποκλειστικά από ασβεστιτικά αδρανή. Τα συγκεκριμένα δείγματα προέρχονται όλα από τοιχοποιίες δομημένες σύμφωνα με το τέλειο πλινθοπερίκλειστο σύστημα δόμησης. Το δείγμα MK4p της βόρειας όψης, είναι ασβεστιτικό κονίαμα χωρίς κάποιο πρόσθετο και περιέχει μόνο ασβεστιτικά αδρανή.

Το κονίαμα αρμού MK5 της βόρειας όψης, που χωρίστηκε σε δύο δείγματα λόγω της χρωματισμένης επιφάνειας που είχε. Το δείγμα MK5a το οποίο έχει ροζ απόχρωση και ήταν η εξωτερική στρώση του κονιάματος του πλινθοπερίκλειστου, είναι ασβεστιτικό κονίαμα με μίξη ασβεστιτικών και αργιλοπυριτικών αδρανών. Το πάχος του ήταν 1 mm. Το χρώμα του οφείλεται πιθανότατα στη μίξη μικρής ποσότητας καραμάλευρου κατά την παρασκευή του. Το υπόλευκο δείγμα MK5b είναι επίσης ασβεστιτικό κονίαμα με μίξη ασβεστιτικών και αργιλοπυριτικών αδρανών και για την ακρίβεια φαίνεται πως υπερισχύουν τα αργιλοπυριτικά αδρανή. Στα δείγματα υπάρχει πρόσθετο οργανικής προέλευσης και πιθανόν να πρόκειται για φυτικές ίνες. Αντίστοιχα αποτελέσματα για τη χρήση φυτικών ινών ως πρόσθετα παρατηρούνται και στα δείγματα. MK6, MK7 και MK8.

Το δείγμα MK6 που προέρχεται από την εσωτερική πλευρά του βόρειας όψης του Καθολικού είναι ασβεστιτικό κονίαμα με μίξη αδρανών ασβεστιτικής και αργιλοπυριτικής φύσης, με υπερίσχυση των αργιλοπυριτικών αδρανών. Τα

δείγματα MK7 και MK8 που προέρχονται από τον εσωτερικό δυτικό τοίχο στη συμβολή με τον Νάρθηκα και την εξωτερική νότια όψη αντίστοιχα, είναι ασβεστιτικά κονιάματα με μίξη ασβεστιτικών και αργιλοπυριτικών αδρανών.

Τα δύο δείγματα κεραμικών οπτόπλινθων MK3a και MK3b μελετήθηκαν ως προς την μικροδομή τους και παρουσιάζουν τιμές χαρακτηριστικές χειροποίητων παραδοσιακών βυζαντινών κεραμικών.

Τα κονιάματα αποκατάστασης που προτείνονται είναι συμβατά με τα δομικά υλικά του Καθολικού τόσο ως προς τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες όσο και προς τις μηχανικές τους αντοχές. Από τις καμπύλες θραυστότητας προκύπτει ότι η χρήση τους βελτιώνει την συμπεριφορά της κατασκευής σε σεισμικές καταπονήσεις, ιδιαίτερα όσον αφορά στην πιθανότητα εμφάνισης μεγάλης βλάβης. Επιπλέον, τα ασβεστοποζολανικά κονιάματα είναι και ιδιαίτερα ανθεκτικά στη φθορά από διαλυτά άλατα, το οποίο στην προκειμένη περίπτωση είναι ιδιαίτερα σημαντικό αφού το κυριότερο πρόβλημα που παρουσιάζεται στο Καθολικό είναι η μεγάλη συγκέντρωση ολικών διαλυτών αλάτων.

## **6.2. Προοπτικές**

Σε συνέχεια της παρούσας εργασίας, προτείνεται η επι τόπου πιλοτική εφαρμογή του προτεινόμενου κονιάματος σε περιοχή της τοιχοποιίας του Καθολικού και ο έλεγχος της συμπεριφοράς του στη τοιχοποιία μέσω μη καταστρεπτικών τεχνικών. Η πιλοτική εφαρμογή προτείνεται να γίνει στην βόρεια τοιχοποιία του Ναού, που παρουσιάζει και τα μεγαλύτερα προβλήματα υγρασίας και την μεγαλύτερη συγκέντρωση ολικών διαλυτών αλάτων, ώστε να αποφανθεί και επί τόπου αν το συγκεκριμένο κονίαμα είναι επιτελεστικό. Επιπλέον, θα μπορούσε να γίνει προσαρμογή στη σύνθεση MK<sub>5</sub> με προσθήκη μικρής ποσότητας κεραμάλευρου, ώστε να εφαρμοστεί ως τελική στρώση του πλινθοπερίκλειστου αρμού, σε συμφωνία με την αυθεντική τεχνική του μνημείου, όπως παρατηρήθηκε στο δείγμα MK5a. Παράλληλα, προτείνεται και η δημιουργία πιλοτικών τοιχίσκων με το βυζαντινό σύστημα δόμησης και η θραύση αυτών, ώστε να εκτιμηθούν οι μηχανικές αντοχές τοιχοποιίας δομημένης με το κονίαμα που προτείνεται.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

1. Τριανταφύλλου Αθανάσιος Χ., "Δομικά Υλικά", Πάτρα 2004-6<sup>η</sup> Έκδοση
2. J.H. Sterba, M. Foster, M. Bichler, Ch. Vasilatos & M. G. Stamatakis. 2010 «Analytical identificatino of a single source pumice from Greek shores and ancient sites in the Levant» Hellenic Journal of Geosciences, V. 45, p. 293-298.
3. N. Symeonidis, D. Papanikolaou & M. Dermitzakis. 1979 «Field guide to the Neogene of Crete» Publications of the Department of Geology & Paleontology, University of Athens, series A, No 32, 32pp.
4. Σταματάκης Μ., Τριανταφύλλου Μ. & Μ. Δερμιτζάκης. (1998). «Ορυκτολογικές και γεωχημικές αναλύσεις αρχαιολογικών ευρημάτων» Αρχαιολογικό Συμπόσιο στη μνήμη Δ.Ρ. Θεοχάρη " Η προϊστορική έρευνα στην Ελλάδα και οι Προοπτικές της: Θεωρητικοί και μεθοδολογικοί προβληματισμοί". Θεσσαλονίκη-Καστοριά, 26-28 Νοεμβρίου 1998. Τόμος Πρακτικών, σελ. 55-58.
5. Μοροπούλου Α., ΔΠΜΣ "Προστασία Μνημείων" , «Δομικοί Λίθοι», Σημειώσεις μαθήματος 1.2, Αθήνα : ΕΜΠ, 2013.
6. Pomoni-Papaioannou F., Stamatakis M.G. and Dermitzakis M.D. (2000). «Sedimentological study of building and decorative stones of Neogene limestone from the islands of Crete and Kefallinia. Comparison with Malta Stone». Mineral Wealth, N 114, p. 53-60.
7. Stamatakis M.G. (1988) «Building stones from the ancient quarries of Agiades area, Samos Island, Greece» In: Marinos P. and Koukis G. Eds, *The engineering geology ancient works, monuments and historical sites (Preservation and Protection)*, Balkema, Rotterdam 1990, V. 4, 2043-2047.
8. Ζαμπετάκη-Λέκκα Α., Σταματάκης Μ. & Α. Προβιά. (2002) «Η βιοστρωματογραφία σημαντικό βοήθημα στην αρχαιολογική έρευνα. Προστασία αρχαίων λατομείων ως πολύτιμων μνημείων της ιστορίας μας» Ο Δομικός Λίθος στα μνημεία, Διεπιστημονική Ημερίδα, 9 Νοεμβρίου 2001, Αθήνα. Υπουργείο Αιγαίου, Τόμος Πρακτικών, σελ. 332-339.
9. Μ. Andreadaki - Blasaki, «The country of Khandia through its monuments, from the prehistoric period to roman times» Ministry of Culture, Archeological Receipts Fund, Athens, 1997, 76 σελ.
10. J. Pitton de Tournefort, «Ταξίδι στην Κρήτη και τις νήσους του αρχιπελάγους 1700-1702, από το έργο Relation d'un voyage du Levant, Paris 1717», (μτφ. Μάκης και Μυρτώ Απέργη), Πανεπιστημιακές Εκδόσεις



Κρήτης, Ιδρυτική δωρεά Παγκρητικής Ενώσεως Αμερικής, Ηράκλειο, 2003, 525 σελ.

11. Zambas I., Stamatakis M.G., Cooper F., Themelis P. & C. Zambas (2007). «*Characterization of mortars used for the construction of Saithidai Heroon podium (1st century AD) in ancient Messene, Peloponnesus, Greece*» Presented in 10th Euroseminar on Microscopy applied to building materials, June 2125, 2005, Paisley Scotland. *Materials Characterization* 58, 1229-1239.
12. Dermitzakis M.D., TsiouraVlachou M., Stamatakis M.G. (1988) «*Petrological and geological study on the building material from the underground pit of Gortys area, Crete Island*» In: Marinou P. and Koukis G. eds, *The engineering geology of ancient works, monuments and historical sites (Preservation and Protection)*, Balkema, Rotterdam 1990, V.4, 2049-2056.
13. Higgins M.D. & Higgins R. 1996. «*A geological companion to Greece and the Aegean*» Gerald Duckworth & Co. Publications, London, 240pp.
14. Γεωργιάδου-Δικαιούλια Ε., Σταματάκης Μ., Δερμιτζάκης Μ. (1995) «*Συμβολή στη γνώση της γεωλογίας των κυριοτέρων ορυκτών πρώτων υλών της νήσου Κρήτης*» Ζ' Διεθνές Κρητολογικό Συνέδριο, Τόμος Α, σ. 111-123.
15. Κορωναίος Α., Πουλάκος Γ., «*Τεχνικά Υλικά*» τόμος 4, σ. 8-10, Αθήνα ΕΜΠ
16. Μανίτα, Π. & Πανταζόπουλος, Σ 2000, «*Παθολογία και Μηχανισμοί φθοράς Ιστορικών Κτιρίων*», Πρακτικά 1<sup>ου</sup> Εθνικού Συνεδρίου Ήπιες επεμβάσεις για την προστασία ιστορικών κατασκευών, σελ 331-341, Θεσ/νικη
17. Μοροπούλου Α., Καρόγλου Μ., ΔΠΜΣ "Προστασία Μνημείων" , «*Η επίδραση του νερού, αναρριχόμενη υγρασία, τεχνικές και μέθοδοι αντιμετώπισης*», Σημειώσεις μαθήματος 1.2, Αθήνα : ΕΜΠ, 2013.
18. Δρίτσος, Σ., «*Επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα*» Πάτρα, Εκδόσεις Πανεπιστήμιο Πατρών 2001
19. Μοροπούλου Α., , «*Ασύμβατες Επεμβάσεις*», ΔΠΜΣ «Προστασία μνημείων» σημειώσεις μαθήματος 2.1.
20. Μοροπούλου Α., «*Φυσικοχημεία της Φθοράς και Τεχνική της Συντήρησης των Δομικών Υλικών*» Διδακτικές Σημειώσεις για το Μάθημα Υλικά Ι 9<sup>ου</sup> εξαμήνου Τμήματος Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ
21. Ορλάνδος Α., «*Τα υλικά δομής των Αρχαίων Ελλήνων και οι τρόποι εφαρμογής αυτών κατά τους συγγραφείς, τας επιγραφάς και τα μνημεία*» Αρχαιολογική Εταιρεία, Αθήνα, 1955-1958
22. Vitruvius, «*The ten books on architecture*» M.H. Morgan Trans. Dover Publications, New York, 1964.
23. Αγγελακοπούλου Ε., «*Κριτήρια και Μέθοδοι Αποτίμησης Φυσικοχημικών και Μηχανικών Χαρακτηριστικών κατά την διερεύνηση Αριστοποίησης Συμβατών Κονιαμάτων και Σκυροδεμάτων Αποκατάστασης Ιστορικών Τοιχοποιιών, με έμφαση στις ποζολανικές πρώτες ύλες*» Διδακτορική Διατριβή ΕΜΠ (2006)

24. Τσίμας Σ. καθηγητής ΕΜΠ, Τσιβιλής Σ. καθηγητής ΕΜΠ, «*Επιστήμη και Τεχνολογία Τσιμέντου*» Αθήνα 2004
25. Zacharopoulou G., «*The renaissance of lime based mortar Technology. An appraisal of a bibliographic study, Incomarech-Raphael, Compatible Materials for the Protection of European Cultural Heritage*», Pact 55, 1998, p. 89-114.
26. Daremberg et Saglio, «*Dictionnaire des antiquetes Greques et Romaines*», Tome III, 2°, p.2008.
27. Μπαμπινιώτης Γ. «*Λεξικό της Νέας Ελληνικής Γλώσσας*», Αθήνα 1998.
28. Taylor, G.D. «*Materials of Construction*», 2<sup>nd</sup> edition, Construction Press, London 1983
29. European Standard pr EN 1015-11. «*Methods of Test for Mortar for Masonry – Part11: Determination of Flexural and Compressive Strength of Hardened Mortar*» European Committee for Standardization 1993
30. Ευρετήριο ορυκτών στη Γεωλογική Σχολή Α.Π.Θ  
[http://www.geo.auth.gr/106/az\\_gr.htm](http://www.geo.auth.gr/106/az_gr.htm)
31. Σίδερης, Κ. 1984, «*Τεχνολογία των δομικών υλικών*», τόμος Α, Ξάνθη, Εκδόσεις Δ.Π.Θ.
32. Boynton R.S., «*The chemistry and Technology of Lime and Limestone*», 1980: New York, John Willey & Sons. σελ. 396
33. Σακούλας Π., (1993) «*Τεχνικά Χρονικά*», τεύχος Νοεμβρίου – Δεκεμβρίου., 37-72
34. Κορωνάιος Α. Γ. (1985) «*Τεχνικά Υλικά*» Τομ. 1 ΕΜΠ Αθήνα
35. Μοροπούλου Α., Μπατής Γ., «*Δομικά Υλικά*» 9<sup>ο</sup> εξάμηνο ΧΜ ΕΜΠ Αθήνα 2011
36. Torraca G., «*Tecnologia delle Malte per Intonaci e della Conservazione degli Intonaci Antichi*», Gli Intonaci nell' editizia Ferrarese, Ferrara, 1988
37. Λεγάκις Α. Α. (1992) «*Τεχνικά Υλικά*» Τομ. 1, Ίδρυμα Ευγενίδου, Βιβλιοθήκη του Τεχνικού, Αθήνα
38. Bakolas A., Bertoncetto R., Biscontin G., Glisenti A., Moropoulou A., Tondello E., Zendri E., «*Chemicophysical interactions among the constituents of historical walls in Venice*», Materials Issues in art and Archaeology IV, ed. by J. R. Druzik and P.B.Vandiver, Mat. Res. Soc, Pittsburgh, 1995, p.771-777.
39. Giua M., «*Trattato di Chimica Industriale*», Vol. 3, UTET, Torino, 1958.
40. Muller-Wiener W., «*Η Αρχιτεκτονική στην Αρχαία Ελλάδα*», Αθήνα, 1995.
41. Gibbons P., «*Pozzolans for Lime Mortars*», Building Conservation Article, 1997.
42. Lea FM., «*Lea's Chemistry of Cement and Concrete*» 4th Edition, Edited by Peter C. Hewlet.
43. Αποστολοπούλου Μ., μεταπτυχιακή εργασία Δ.Π.Μ.Σ Προστασία Μνημείων 2007 «*Συμβολή στον χαρακτηρισμό των δομικών υλικών και πρόταση συμβατών επεμβάσεων αποκατάστασης του ιερού ναού της Παρηγορήτισσας στην Αρτα*»
44. A.S. Cakmak, M. Erdik, A. Moropoulou «*A joint program for the protection of the Justinian Hagia Sophia*» 4<sup>th</sup> International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Conference Proceedings, edited by A.

- Moropoulou, F. Zezza, E. Kollias & I. Papachristodoulou, Publ. Technical Chamber of Greece, Rhodes, Vol. 4 (1997), pp. 153-171.
45. A. Moropoulou, B. Christaras, G. Lavas, G. Penelis, N. Zias, G. Biscontin, E. Kollias, A. Paisios, P. Theoulakis, K. Bisbikou, A. Bakolas, A. Theodoraki, «*Weathering phenomena on the Hagia Sophia Basilica Konstantinople*», Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings III, edited by C.A. Brebbia, R.J.B. Frewer, Computational Mechanics Publications, Southampton Boston, (1993), pp. 47-66.
  46. A. Moropoulou, A.S. Cakmak, A. Bakolas, K. Labropoulos, K. Bisbikou, «*Properties and Technology of the crushed brick mortars of Hagia Sophia*», Soil Dynamics and Earthquake Engineering VII, edited by A.S. Cakmak and C.A. Brebbia, Computational Mechanics Publications, Southampton Boston, (1995), pp. 651-661.
  47. A. Moropoulou, G. Biscontin, A. Bakolas, Th. Tsiourva, K. Bisbikou, E. Zendri, «*Mortar technology in the Arsenal of Symonos Petra Monastery at Mount Athos*» Scienza e Beni Culturali X, edited by G. Biscontin, G. Driussi, Publ. Libreria Progetto Editore Padova, (1994), pp. 651-666. (cited : AATA)
  48. Θεοδωρίδης Χ.Δ. Μηχανικός Μεταλλείων – Μεταλλουργός Μηχανικός, Τεχνική Υποστήριξη BASF C.C. Ελλάς Α.Ε. 15ο «Συνέδριο Σκυροδέματος», ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη, 25-27 Οκτωβρίου., 2006.
  49. Moropoulou, A. Maravelaki – Kalaitzaki, P. Borboudakis, M. Bakolas, A. Michailidis, P. Chronopoulos, M., 1997, «*Historic mortars technologies in Crete and guidelines for compatible restoration mortars, Compatible materials for the protection of European cultural heritage*», Technical Chamber of Greece, Athens, vol. 55, pp. 55-72
  50. Moropoulou, A. Bakolas, A. Moundoulas, E. Aggelakopoulou, E. Anagnostopoulou, S., 2005, «*Strength development and lime reaction in mortars for repairing historic masonries*», Cement & Concrete Composites 27, Elsevier Ltd, pp. 289-294
  51. Τάσιος, Θ. Π. & Αλιζάκη, Κ. 1993, «*Ανθεκτικότητα οπλισμένου σκυροδέματος*», Αθήνα, Εκδόσεις Φοίβος
  52. Μοροπούλου Α., Μούνδουλας Π., ΔΠΜΣ "Προστασία Μνημείων" , «*Ιστορικά κονιάματα παραδείγματα εφαρμογών κονίες και κονιάματα, συντήρηση, αποκατάσταση, αντικατάσταση κονιαμάτων και επιχρισμάτων*», Σημειώσεις μαθήματος 2.2, Αθήνα : ΕΜΠ, 2013.
  53. Μούνδουλας Π., «*Μεθοδολογία σχεδιασμού και αποτίμησης συμβατών και επιτελεστικών κονιαμάτων αποκατάστασης ιστορικών μνημείων με κριτήρια τις ορυκτολογικές – φυσικοχημικές και φυσικομηχανικές τους ιδιότητες*». Διδακτορική Διατριβή ΕΜΠ (2004)
  54. Moropoulou A., Bakolas A., Moundoulas P., Casmak A.S. «*Compatible Restoration Mortars, Preparation and Evaluation for Hagia Sogia Earthquake Protection*».

- Compatible Materials for the Restoration of European Cultural Heritage. Pact, 1998, 56, pp. 147-166.
55. Moropoulou A, Bakolas A. «*Range of acceptability limits of physical, chemical and mechanical characteristics deriving from the evaluation of historical mortars*». PACT 1998;56:165–78.
  56. Συρμακέζης Κ., Αντωνόπουλος Α., «*Χρήση καμπύλων θραυστότητας στον αντισεισμικό σχεδιασμό κατασκευών από τοιχοποιίας*» 3<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμική Μηχανική & Τεχνική Σεισμολογίας 5-7 Νοεμβρίου 2008 άρθρο 1844
  57. K.Syrmakezis, O.Mavrouli, P.Papaevaggeliou, E.Aggelakopoulou, A.Bakolas «*Finite element analysis and fragility curves for the evaluation of restoration mortars behavior regarding the earthquake protection of historic structures*»,
  58. Μοροπούλου Α., Λαμπρόπουλος Κ., «*Κεραμικά υλικά*», ΔΠΜΣ «Προστασία μνημείων» Σημειώσεις Μαθήματος 2.1
  59. Μοροπούλου Α., ΔΠΜΣ "Προστασία Μνημείων" «*Στρατηγικός σχεδιασμός των επεμβάσεων συντήρησης των υλικών σε μνημεία βάσει των δεδομένων της διάγνωσης και της χαρτογράφησης της φθοράς των υλικών*» Σημειώσεις μαθήματος 1.2, Αθήνα ΕΜΠ, 2013
  60. Millet G., «*L'école grecque dans l'architecture byzantine*», Paris, 1916
  61. Megaw A.H.S., «*The Chronology of some Middle-Byzantine Churches*», 1931-32
  62. Νικόλαος Χαρκιολάκης, «*Τα μοναστήρια του Υμηττού*» Επτά ημέρες Καθημερινής, 28/9/1997.
  63. Χαράλαμπος Θ. Μπούρας «*Ιστορία της Αρχιτεκτονικής, τόμος Β*» Εκδοτικός Οίκος Μέλισσα
  64. Θεανώ Χατζηδάκη «*Το Μοναστήρι της Καισαριανής*», εκδόσεις Απόλλων, Αθήνα 1977.
  65. Gregory, Timothy E. (1991) «*Kaisariane*» In Kazhdan, Alexander. The Oxford Dictionary of Byzantium. Oxford and New York: Oxford University Press. p. 1090.
  66. Αναστάσιος Ορλάνδος (1923) «*Μεσαιωνικά μνημεία της πεδιάδος των Αθηνών και των κλιτύων Υμηττού – Πεντελικού, Πάρνηθου και Αιγάλεω*» Αθήναι, σελ. 158-159
  67. Hamilton J.A., «*The Church of Kaisariani in Athens*», Aberdeen, 1916
  68. Μπούρας Χαράλαμπος, «*Βυζαντινή Αθήνα, 10ος-12ος αι.*», Μουσείο Μπενάκη, Αθήνα, 2010
  69. Παπαγιαννόπουλος-Παλαιός Α., «*Καισαριανή*», ΠΟΛΕΜΩΝ Αρχαιολογικό Περιοδικό, Αθήνα, 1940
  70. Ξυγγόπουλος Α., «*Σχεδιάγραμμα ιστορίας της θρησκευτικής ζωγραφικής μετά την Άλωση*», Αθήναι, 1957
  71. «*Μονή Καισαριανής – Υμηττός*», Ε.Ι.Ε. Αρχαιολογία της πόλεως των Αθηνών.

72. Γριτσοπούλου Μ., μεταπτυχιακή εργασία Δ.Π.Μ.Σ Προστασία Μνημείων 2013«  
Επί τόπου μη καταστρεπτικός έλεγχος των τοιχοποιιών του καθολικού της μονής  
Καισαριανής για τον σχεδιασμό της αντισεισμικής προστασίας του μνημείου»
73. Robert S. Boynton «*Chemistry and technology of lime and limestone*» Wiley  
(1980) – 578 pages
74. Taylor, P.D. and Wilson, M.A., 2003 «*Palaeoecology and evolution of marine hard  
substrate communities*» Earth-Science Reviews 62: 1–103
75. Πρακτικά της Εν Αθήναις Αρχαιολογικής Εταιρείας έτους 1949, ΠΑΕ 1949 σελ.44-  
50
76. Πρακτικά της Εν Αθήναις Αρχαιολογικής Εταιρείας έτους 1950, ΠΑΕ 1959  
σελ.138-144.
77. «*Το χρονικό της Καισαριανής*», Φιλοδοσική Ένωση Αθηνών, Αθήνα 1974.
78. Αρχείο 1ης ΕΒΑ.
79. Αρχαιολογικό Δελτίο, τόμος 16, Μέρος Β, 1960, Χρονικά (ΑΔ 1960).
80. Μοροπούλου Α., Αποστολοπούλου Μ., Μουνδούλας Ρ., Καραγιάννη Μ., Δελεγιάννη Ε.,  
Λαμπροπούλου Κ., Γριτσοπούλου Μ., Βακόλας Α., «*The combination of NDTs for the  
diagnostic study of historical buildings: The case study of Kaisariani Monastery*»  
COMPDYN 2015 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods  
in Structural Dynamics and Earthquake Engineering Crete Island, Greece, 25–27  
May 2015
81. Μοροπούλου Α. ΔΠΜΣ "Προστασία Μνημείων" «*FOM Μικροσκοπία Οπτικών  
Ινών Fiber Optic Microscopy*» Σημειώσεις Μαθήματος 2.2
82. Normal 27/88 : Caratterizzazione di una malta Roma CNR ICR, 1988
83. Normal 34/91 Analysis of Clay Materials by XRD Rome 1991
84. Μοροπούλου Α. ΔΠΜΣ "Προστασία Μνημείων" «*Περίθλαση ακτίνων Χ (XRD)*»  
Σημειώσεις Μαθήματος 2.2
85. Μοροπούλου Α. ΔΠΜΣ "Προστασία Μνημείων" «*Περίθλαση ακτίνων Χ (XRD)*»  
Σημειώσεις Μαθήματος 2.2
86. Μοροπούλου Α. ΔΠΜΣ "Προστασία Μνημείων" «*Θερμικές Μέθοδοι Ανάλυσης  
DTA/TG*» Σημειώσεις Μαθήματος 2.2
87. Normal 4/80 Distribution of pore volume as a Function of Pore Diameter C.N.R.-  
I.C.R. Rome 1980
88. Μοροπούλου Α. ΔΠΜΣ "Προστασία Μνημείων" «Ποροσιμετρία  
Υδραργύρου(MIP)» Σημειώσεις Μαθήματος 2.2
89. Normal 11/85 water absorption by capillarity-coefficient of capillarity absorption  
Rome 1985
90. Μοροπούλου Α. ΔΠΜΣ "Προστασία Μνημείων" «*Εξέταση πορώδους μικροδομής  
των υλικών*» Σημειώσεις Μαθήματος 2.2
91. Normal 13/83 Dosage of Soluble Salts Rome 1983
92. Pamela K. Walker and Philip J. Rodacy «*Field Test Kit for Gunshot Residue  
Detection*»(2002).

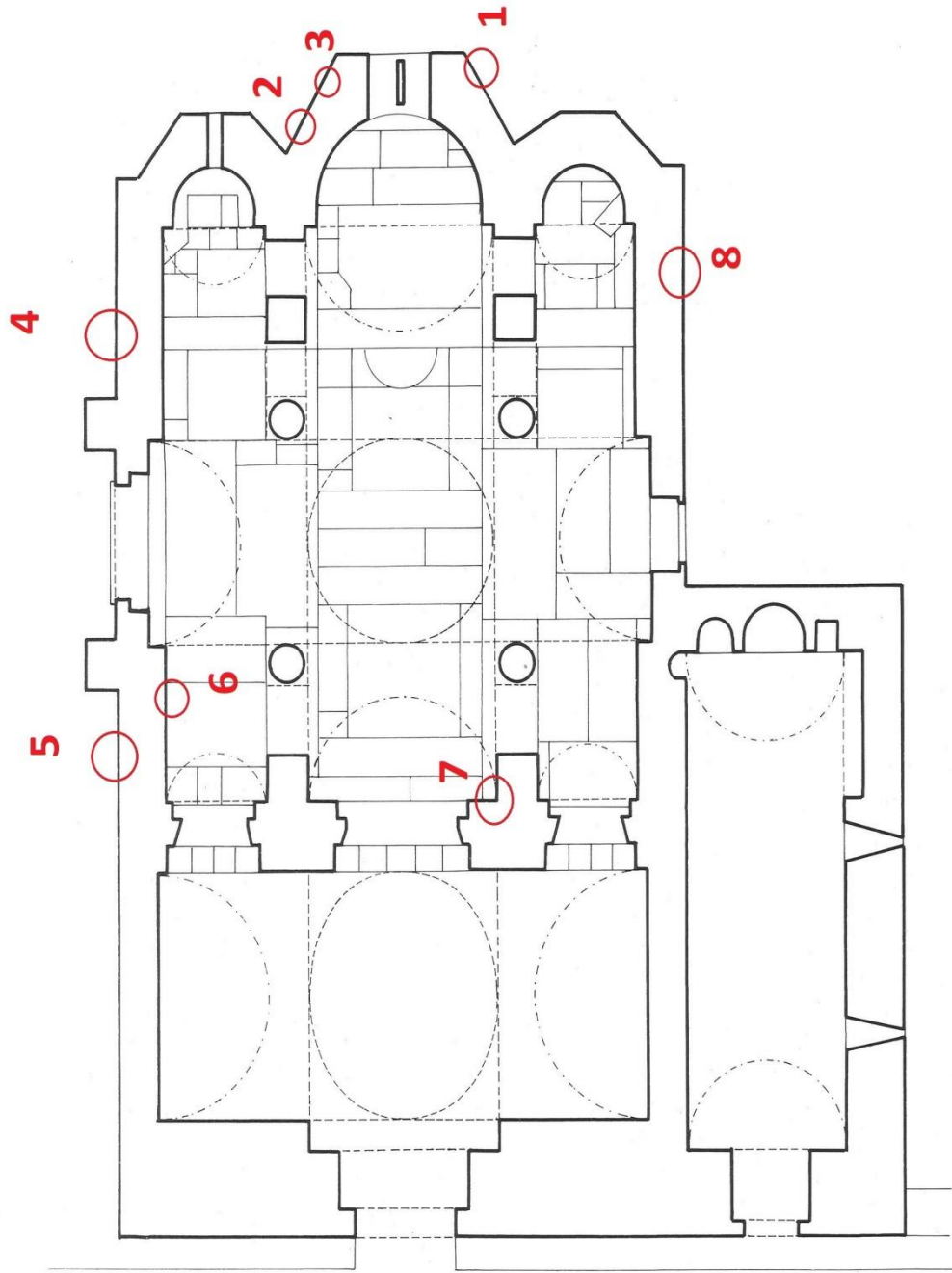
93. Μπουγιούρη Β., Βλαχοπούλου Μ., Δελέγκου Κ., Μπακόλας Α., Αργυροπούλου Κ., Καρόγλου Μ., Χανδρινός Ι., Μπατής Γ., Μοροπούλου Α., «*Διαγνωστικός Έλεγχος Υλικών και Φθοράς-Υλικά Επεμβάσεων Συντήρησης σε Κτίριο Αρχιτεκτονικής Κληρονομιάς από Φέρουσα Λιθοδομή και Οπλισμένο Σκυρόδεμα. Η Βιομηχανία ΕΜΑΓΕ στην Κέα*» 16<sup>ο</sup> Συνέδριο Σκυροδέματος , ΤΕΕ ΕΤΕΚ 21-23/10/2009 Πάφος
94. Cornelius S. Hurlbut and Cornelis Klein, «*Manual of Mineralogy*», 20th ed., John Wiley and Sons, New York 1985
95. Greenly, E. «*The Origin and Associations of the Jaspers of South-eastern Anglesey*». Quarterly Journal of the Geological Society 1902 58: 425–440
96. James Dwight Dana, «*Manual of Mineralogy and Lithology, Containing the Elements of the Science of Minerals and Rocks*», READ BOOKS, 2008
97. O.F. Tuttle, N.L. Bowen «*High-temperature albite and contiguous feldspars*» J. Geol. 1950 58(5), 572–583
98. Frederick H. Pough, Roger Tory Peterson, Jeffrey (PHT) Scovil, «*A Field Guide to Rocks and Minerals*», Houghton Mifflin Harcourt 1988
99. Moropoulou A., Bakolas A., Anagnostou S., «*Composite materials in ancient structures*» Cement and Concrete composites 27 (2005) 295-300
100. Moropoulou A., Polikreti K., «*Principal Component Analysis in monument conservation: Three application examples*» Journal of Cultural Heritage 10 (2009) 73e81
101. Francisco M. Fernandes, Paulo B. Lourenço and Fernando Castro Chapter 3 «*Ancient Clay Bricks: Manufacture and Properties*» ISISE, Civil Engineering Department Campus de Azurém
102. Moropoulou A., Polikreti K., Bakolas A., Michailidis P. «*Correlation of physicochemical and mechanical properties of historical mortars and classification by multivariate statistics*» Cement and Concrete Research 33 (2003) 891–898
103. Χριστιάνα Λύτ «*Στην Αθήνα του 1847-1848*» εκδόσεις Ερμής
104. Moropoulou, A., «*Reverse engineering to discover traditional technologies: A proper approach for compatible restoration mortars*», PACT, J. European Study Group on Physical, Chemical, Biological and Mathematical Techniques Applied to Archaeology, 58 (2000) pp. 81-107 [50]
105. Moropoulou, A., Aggelakopoulou, E., Bakolas, A., «*Earthquakes and monuments – The role of materials in the earthquake protection of monuments*», V Int. Conf. on Structural Analysis of Historical Constructions, eds Lourenço P.B., Roca P., Modena C. and Agrawal S., New Delhi, India (2006) Vol. 3, pp. 1625-1631
106. Asteris, P.G., Chronopoulos, M.P., Chrysostomou, C.Z., Varum, H., Plevris, V., Kyriakides, N., Silva, V. (2014). «*Seismic Vulnerability Assessment of Historical Masonry Structural Systems*», Engineering Structures, Volume 62-63, Pages 118-134.

- 107.**Syrmakizis, C.A., Asteris, P.G. (2001). «*Masonry Failure Criterion Under Biaxial Stress*» State Journal of Materials in Civil Engineering; American Society of Civil Engineers (ASCE), Vol. 13, Issue 1, pp. 58-64.
- 108.**Asteris, P.G., Tzamtzis, A.D., Vouthouni, P.P., Sophianopoulos, D.S. (2005). «*Earthquake Resistant Design and Rehabilitation of Masonry Historical Structures, Practice Periodical on Structural Design and Construction*», American Society of Civil Engineers (ASCE), Vol. 10, Issue 1, pp. 49-55.
- 109.**Asteris, P.G. (2008). «*On the Structural Analysis and Seismic Protection of Historical Masonry Structures*», The Open Construction and Building Technology Journal, vol. 2, pp.124-133.
- 110.**Asteris, P.G. (2010). «*A simple heuristic algorithm to determine the set of closed surfaces of the cubic tensor polynomial*», The Open Applied Mathematics Journal, vol. 4, pp.1-5.
- 111.**Asteris, P.G. (2013). «*Unified Yield Surface for the Nonlinear Analysis of Brittle Anisotropic Materials*», Nonlinear Sci. Lett. A, Vol.4, No.2, 46-56, 2013.
- 112.**Plevris, V., Asteris, P.G. (2014). «*Masonry Failure Surface under Biaxial Compressive Stress using Neural Networks*», Construction and Building Materials, Volume 55, Pages 447-461.
- 113.**Asteris, P.G., Plevris, V. (2016). «*Anisotropic Masonry Failure Criterion Using Artificial Neural Networks*», Neural Computing and Applications (NCAA), DOI 10.1007/s00521-016-2181-3
- 114.**Μαυρουλή Ο.Χ., «*Ανάλυση τοιχοποιιών ιστορικών κατασκευών έναντι σεισμικών δράσεων – Διερεύνηση απόκρισης της τοιχοποιίας με χρήση παραδοσιακών-συγχρόνως κονιαμάτων αρμολογήματος*», Μεταπτυχιακή Εργασία επί του Δ.Π.Μ.Σ. «Προστασία Μνημείων – Β' Κατεύθυνση - Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης» υπό την επίβλεψη του Καθ. Κ.Α. Συρμακέζη, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Νοέμβριος 2005
- 115.**Παπαευαγγελίου Π., «*Αναλυτική διερεύνηση της συμμετοχής λίθων-κονιάματος στη συνολική συμπεριφορά λιθοδομών: η περίπτωση της Μονής Καισαριανής*», Μεταπτυχιακή Εργασία επί του Δ.Π.Μ.Σ. «Προστασία Μνημείων – Β' Κατεύθυνση - Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης» υπό την επίβλεψη του Καθ. Κ.Α. Συρμακέζη, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Οκτώβριος 2004

# **Παράρτημα 1**

Κάτοψη Καθολικού με σημειωμένες θέσεις δειγματοληψίας





Υ. ΚΑΘΟΛΙΚΟΝ ΜΟΝΗΣ ΚΑΙΣΑΡΙΑΝΗΣ. — ΚΑΤΩΜΕΣ. ΚΑΜΑΕΣ. 1:50  
MONASTÈRE DES TRINITÉ. LE CATHOLICON — PLAN  
Μπαρτζοπούλης Α., 1957

## **Παράρτημα 2**

Πίνακες Κοκκομετρικής Διαβάθμισης

### Κοκκομετρική Διαβάθμιση δείγματος ΜΚ1

Οπές κόσκινου (mm)	Συγκρατούμενη Ποσότητα σε κάθε κόσκινο (g)	Συγκρατούμενο Ποσοστό σε κάθε κόσκινο (%)	Συγκρατούμενο Ποσοστό αθροιστικά σε κάθε κόσκινο (%)	Διερχόμενο Ποσοστό αθροιστικά από κάθε κόσκινο (%)
8	0	0	0	100
4	0	0	0	100
2	0	0	0	100
1	0,01	0,05	0,05	99,95
0,5	0,02	0,09	0,14	99,86
0,25	3,54	16,36	16,50	83,50
0,125	10,92	50,46	66,96	33,04
0,063	7,15	33,04	100	0
<0,063	8,37	27,89		

Sum 30,01 Aggregates (%) 70,56

---

Sum Aggregates 21,64 Binder (g) 9,03

---

Απώλειες (g) 0,66 Binder (%) 29,44

---

Απώλειες (%) 2,15

---

### Κοκκομετρική Διαβάθμιση δείγματος ΜΚ4

Οπές κόσκινου (mm)	Συγκρατούμενη Ποσότητα σε κάθε κόσκινο (g)	Συγκρατούμενο Ποσοστό σε κάθε κόσκινο (%)	Συγκρατούμενο Ποσοστό αθροιστικά σε κάθε κόσκινο (%)	Διερχόμενο Ποσοστό αθροιστικά από κάθε κόσκινο (%)
8	0	0	0	100
4	0	0	0	100
2	0,12	0,64	0,64	99,36
1	0,03	0,16	0,80	99,20
0,5	3,06	16,25	17,05	82,95
0,25	9,74	51,73	68,77	31,23
0,125	3,45	18,32	87,10	12,90
0,063	2,43	12,90	100	0
<0,063	11,74	38,40		

Sum 30,57 Aggregates (%) 60,49

---

Sum Aggregates 18,83 Binder (g) 12,30

---

Απώλειες (g) 0,56 Binder (%) 39,51

---

Απώλειες (%) 1,80

---

### Κοκκομετρική Διαβάθμιση δείγματος ΜΚ7

Οπές κόσκινου (mm)	Συγκρατούμενη Ποσότητα σε κάθε κόσκινο (g)	Συγκρατούμενο Ποσοστό σε κάθε κόσκινο (%)	Συγκρατούμενο Ποσοστό αθροιστικά σε κάθε κόσκινο (%)	Διερχόμενο Ποσοστό αθροιστικά από κάθε κόσκινο (%)
8	2,5	9,10	9,10	90,90
4	0,12	0,44	9,53	90,47
2	0,39	1,42	10,95	89,05
1	1,88	6,84	17,79	82,21
0,5	4,52	16,45	34,24	65,76
0,25	5,09	18,52	52,77	47,23
0,125	7,31	26,60	79,37	20,63
0,063	5,67	20,63	100	0
<0,063	5,1	15,65		

Sum 32,58 Aggregates (%) 83,17

---

Sum Aggregates 27,48 Binder (g) 5,56

---

Απώλειες (g) 0,46 Binder (%) 16,83

---

Απώλειες (%) 1,39

---

## **Παράρτημα 3**

Πίνακας Υδατοαπορρόφησης Πλίνθου

### Υδαταπορρόφηση πλίνθου ΜΚ3b

<b>t (s)</b>	<b>vt</b>	<b>Δt (s)</b>	<b>B (g)</b>	<b>ΔB</b>	<b>ΔB/S</b>
1	1	1	160,37	0,5	0,01807932
4	2	3	160,88	1,01	0,03652024
9	3	5	160,93	1,06	0,03832817
16	4	7	161,46	1,59	0,05749225
25	5	9	162,08	2,21	0,07991062
36	6	11	162,6	2,73	0,09871311
49	7	13	163,15	3,28	0,11860037
64	8	15	163,69	3,82	0,13812604
81	9	17	164,16	4,29	0,15512061
100	10	19	164,65	4,78	0,17283835
121	11	21	165,18	5,31	0,19200243
144	12	23	165,65	5,78	0,208997
169	13	25	166,15	6,28	0,22707632
196	14	27	166,62	6,75	0,24407089
225	15	29	167,1	7,23	0,26142704
256	16	31	167,52	7,65	0,27661367
289	17	33	167,94	8,07	0,2918003
324	18	35	168,38	8,51	0,30771011
361	19	37	168,81	8,94	0,32325833
400	20	39	169,17	9,3	0,33627544
441	21	41	169,62	9,75	0,35254683
484	22	43	170,07	10,2	0,36881823
529	23	45	170,45	10,58	0,38255851
576	24	47	170,79	10,92	0,39485245
625	25	49	171,15	11,28	0,40786957
676	26	51	171,52	11,65	0,42124827
729	27	53	171,85	11,98	0,43318062
784	28	55	172,25	12,38	0,44764408
841	29	57	172,6	12,73	0,46029961
900	30	59	172,93	13,06	0,47223196
961	31	61	173,26	13,39	0,48416432
1024	32	63	173,63	13,76	0,49754302
1089	33	65	173,99	14,12	0,51056013
1156	34	67	174,33	14,46	0,52285407
1225	35	69	174,63	14,76	0,53370167
1296	36	71	174,94	15,07	0,54491085
1369	37	73	175,26	15,39	0,55648162
1444	38	75	175,55	15,68	0,56696763
1521	39	77	175,84	15,97	0,57745364
1600	40	79	176,11	16,24	0,58721647
1681	41	81	176,32	16,45	0,59480979
1764	42	83	176,54	16,67	0,60276469
1849	43	85	176,71	16,84	0,60891166
1936	44	87	176,84	16,97	0,61361229
2025	45	89	176,97	17,1	0,61831291
2116	46	91	177,08	17,21	0,62229036
2209	47	93	177,72	17,85	0,6454319

2304	48	95	178,15	18,28	0,66098012
2401	49	97	178,52	18,65	0,67435882
2500	50	99	179,31	19,44	0,70292415
2601	51	101	179,7	19,83	0,71702602
2704	52	103	180,09	20,22	0,7311279
2809	53	105	180,34	20,47	0,74016756
2916	54	107	180,52	20,65	0,74667612
3025	55	109	180,64	20,77	0,75101515
3136	56	111	180,84	20,97	0,75824688
3249	57	113	180,91	21,04	0,76077799
3364	58	115	180,97	21,1	0,76294751
3481	59	117	181,01	21,14	0,76439385
3600	60	119	181,06	21,19	0,76620179
3721	61	121	181,07	21,2	0,76656337
3844	62	123	181,22	21,35	0,77198717
3969	63	125	181,25	21,38	0,77307193
4096	64	127	181,27	21,4	0,7737951
4225	65	129	181,28	21,41	0,77415669
4356	66	131	181,32	21,45	0,77560304
4489	67	133	181,33	21,46	0,77596462
4624	68	135	181,33	21,46	0,77596462
4761	69	137	181,36	21,49	0,77704938
4900	70	139	181,36	21,49	0,77704938
5041	71	141	181,36	21,49	0,77704938
5184	72	143	181,37	21,5	0,77741097
5329	73	145	181,4	21,53	0,77849573
5476	74	147	181,4	21,53	0,77849573
5625	75	149	181,4	21,53	0,77849573
5776	76	151	181,4	21,53	0,77849573
5929	77	153	181,41	21,54	0,77885731
6084	78	155	181,42	21,55	0,7792189
6241	79	157	181,43	21,56	0,77958049
6400	80	159	181,43	21,56	0,77958049
6561	81	161	181,43	21,56	0,77958049
6724	82	163	181,43	21,56	0,77958049
6889	83	165	181,43	21,56	0,77958049
7056	84	167	181,44	21,57	0,77994207
7225	85	169	181,44	21,57	0,77994207
7396	86	171	181,45	21,58	0,78030366
7569	87	173	181,45	21,58	0,78030366
7744	88	175	181,45	21,58	0,78030366
7921	89	177	181,46	21,59	0,78066525
8100	90	179	181,46	21,59	0,78066525
8281	91	181	181,46	21,59	0,78066525
8464	92	183	181,46	21,59	0,78066525
8649	93	185	181,46	21,59	0,78066525
8836	94	187	181,46	21,59	0,78066525
9025	95	189	181,47	21,6	0,78102683