

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΣΒΕΣΤΟΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ-ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΑΡΧΑΙΩΝ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ

Ιωάννης Ιωάννου

Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών & Μηχ. Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Κύπρου

Μαρία Φιλοκύπρου

Αρχιτέκτονας, Λειτουργός Πολεοδομίας, Τμήμα Πολεοδομίας και Οικήσεως

Λέξεις κλειδιά: ασβεστοκονιάματα, συντήρηση, αποκατάσταση

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η εισήγηση αυτή στηρίζεται στα πειραματικά αποτελέσματα ενός ερευνητικού προγράμματος που είχε ως στόχο το σχεδιασμό ασβεστοκονιαμάτων με βάση τις τεχνολογικές γνώσεις και τα υλικά παρασκευής αρχαίων αντίστοιχων κονιαμάτων της Κύπρου. Παρουσιάζονται τα υλικά και οι διαδικασίες εργαστηριακής παρασκευής και ελέγχου των πειραματικών κονιαμάτων. Υποδεικνύονται μερικοί από τους παράγοντες που επηρεάζουν τις φυσικομηχανικές τους ιδιότητες και αναφέρονται τα αποτελέσματα των πιλοτικών εφαρμογών αυτών των κονιαμάτων σε υποστρώματα από τοπικά παραδοσιακά υλικά.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη συντήρηση ιστορικών/παραδοσιακών κτιρίων και αρχαιολογικών χώρων είναι απαραίτητη η χρήση υλικών συμβατών με τα αυθεντικά. Η ανεξέλεγκτη χρήση τσιμεντοκονιαμάτων σε εργασίες συντήρησης τα τελευταία χρόνια είχε ως αποτέλεσμα την πρόκληση ανεπανόρθωτων ζημιών στην παγκόσμια πολιτιστική κληρονομιά. Τα τσιμεντοκονιάματα είναι άκαμπτα, έχουν μικρό πορώδες και υψηλές αντοχές. Περιέχουν επίσης διαλυτά άλατα που είναι επιβλαβή στις ιστορικές κατασκευές (Theoulakis and Moropoulou 1999). Οι πιο πάνω διαπιστώσεις, παράλληλα με τη διατύπωση των βασικών αρχών διατήρησης της αυθεντικότητας των κατασκευών (ICOMOS 1964, 1994), οδήγησαν μηχανικούς, αρχιτέκτονες και συντηρητές στην αναζήτηση παραδοσιακών κονιαμάτων για χρήση στη συντήρηση και αποκατάσταση ιστορικών κτιρίων.

Η εισήγηση αυτή στηρίζεται στα αποτελέσματα του ερευνητικού προγράμματος με Αριθμό Πρωτοκόλλου ΑΚΙΠΕ/0204/01 το οποίο χρηματοδοτήθηκε από το Ίδρυμα Προώθησης Έρευνας στην Κύπρο. Στόχος του προγράμματος ήταν ο σχεδιασμός και η αναπαραγωγή ασβεστοκονιαμάτων με βάση τις τεχνολογικές γνώσεις και τα υλικά παρασκευής αρχαίων αντίστοιχων κονιαμάτων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν διαχρονικά στο νησί, από την Προϊστορική περίοδο μέχρι και πρόσφατα. Η έρευνα περιλάμβανε αρχικά τη συλλογή και το φυσικοχημικό χαρακτηρισμό αρχαίων ασβεστοκονιαμάτων προκειμένου να γίνει γνωστή η μεθοδολογία παρασκευής τους και οι πρώτες ύλες τους. Στη συνέχεια, και με βάση τα στοιχεία που προέκυψαν από τη μελέτη των αρχαίων δειγμάτων, ακολούθησε η παρασκευή παρόμοιων πειραματικών κονιαμάτων, τα οποία προορίζονται για χρήση σε εργασίες συντήρησης ή/και αποκατάστασης. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ονομάζεται «αντίστροφη μηχανική» (Moropoulou 2000).

Μέσα από την παρούσα εισήγηση περιγράφονται τα υλικά και οι διαδικασίες εργαστηριακής παρασκευής των νέων κονιαμάτων. Γίνεται εκτενής αναφορά στις δοκιμές που υιοθετήθηκαν για το φυσικομηχανικό και χημικό χαρακτηρισμό τους και επιδιώκεται μια σύγκριση μεταξύ των αρχαίων κονιαμάτων και των αντίστοιχων νέων πειραματικών. Υποδεικνύονται επίσης μερικοί από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τις φυσικομηχανικές ιδιότητες των ασβεστοκονιαμάτων. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πιλοτικών εφαρμογών των πειραματικών κονιαμάτων σε υποστρώματα από τοπικά παραδοσιακά υλικά.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 Πρώτες ύλες

Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν κατά τις πειραματικές παρασκευές των κονιαμάτων περιελάμβαναν λεπτόκοκκα θραυστά αδρανή (άμμος) τοπικής προέλευσης, ενυδατωμένη άσβεστο (υδράσβεστο) και διάφορα υδραυλικά πρόσθετα.

Τα αδρανή προέρχονταν τόσο από ασβεστολιθικές, όσο και από ψαμμιτικές ζώνες λατόμευσης και είχαν ευρεία κοκκομετρική κατανομή, παραπλήσια αυτών που προέκυψαν από την ανάλυση ιστορικών κονιαμάτων της Μεσογειακής λεκάνης, όπως φαίνεται στην εργασία των Moropoulou and Bakolas (1998). Ο μέγιστος κόκκος και στα δύο είδη άμμου που χρησιμοποιήθηκαν δεν ξεπερνούσε τα 4 mm. Από τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων που διενεργήθηκαν με τη μέθοδο φθορισμού ακτίνων X (XRF), επισημαίνονται τα σχετικά υψηλά ποσοστά οξειδίου του ασβεστίου (35%) και η χαμηλή περιεκτικότητα σε οξείδια Na, K, Fe, Mn, Al και Mg, τόσο στον ασβεστολιθικό, όσο και στον ψαμμιτικό άμμο, καθώς επίσης και παρουσία οξειδίων Si (14%) στον ψαμμιτικό άμμο.

Η ενυδατωμένη άσβεστος που χρησιμοποιήθηκε ήταν σε μορφή ξηρής σκόνης και πληρούσε τις προδιαγραφές του EN 459-1 (2001). Για υδραυλικό πρόσθετο χρησιμοποιήθηκε κεραμιδόσκονη, σύμφωνα και με τα ευρήματα των αναλύσεων των αρχαίων δειγμάτων. Μέρος των κεραμικών που αλέστηκαν αγοράστηκε από τοπικά κεραμοποιεία (ΓΠΓ1-4, ΚΕΡ2), και μέρος προήλθε από ψήσιμο στους 750°C ράβδων πηλού που παρασκευάστηκαν εργαστηριακά (ΚΕΡ, ΚΕΡ3).

2.2 Σχεδιασμός και προετοιμασία πειραματικών κονιαμάτων

Ο σχεδιασμός των πειραματικών κονιαμάτων συντήρησης-αποκατάστασης έγινε με βάση τα στοιχεία που προέκυψαν από τη μελέτη των αρχαίων δειγμάτων. Για κάθε μίγμα κατασκευάζονταν έξι δοκίμια διαστάσεων 40 x 40 x 160 mm με ανάμιξη 400 g υδράσβεστου, 400 g υδραυλικού πρόσθετου (κεραμιδόσκονης), 1200 g ασβεστολιθικού άμμου και 1200 g ψαμμιτικού άμμου. Η πορεία ανάμιξης των πρώτων υλών είχε ως ακολούθως: αρχικά τοποθετούνταν στον κάδο του μηχανικού αναμκτήρα τα αδρανή υλικά, η υδράσβεστος και η κεραμιδόσκονη και αναμιγνύονταν μέχρι το μίγμα να αποκτήσει ομοιόμορφη χροιά. Ακολούθως προστίθετο νερό και η ανάμιξη συνεχιζόταν μέχρι την πλήρη ομογενοποίηση του μίγματος. Η απαιτούμενη ποσότητα νερού κάθε μίγματος υπολογιζόταν ώστε η συνεκτικότητα του νωπού κονιάματος, μετρούμενη με τη βοήθεια της τράπεζας εξάπλωσης κατά EN 1015-3 (1999), να είναι ίση με 165 ± 10 mm. Όπως σχολιάζουν άλλοι ερευνητές (Moropoulou et al 1998) τα ισχύοντα πρότυπα αφορούν σε κονιάματα τσιμέντου. Συνεπώς η αριστοποίηση των προδιαγραφόμενων ιδιοτήτων κονιαμάτων αποκατάστασης θα επιτευχθεί με βάση τα δεδομένα «άριστων πρακτικών» όπως η εργασιμότητα.

Αμέσως μετά την παρασκευή του κονιάματος γεμίζονταν μηχανικά σε δύο στρώσεις οι τρίδυμες μεταλλικές μήτρες, με τη βοήθεια της συσκευής συμπύκνωσης με κρούσεις, όπως περιγράφεται στο EN 196-1 (2005). Τα δοκίμια παρέμεναν στις μήτρες, οι οποίες σκεπάζονταν με γυάλινη πλάκα για αποφυγή της εξάτμισης του περιεχόμενου νερού, για μία βδομάδα, μέχρι να αποκτήσουν ικανοποιητικές αντοχές. Στη συνέχεια, αφαιρούνταν και τοποθετούνταν ανάμεσα σε βρεγμένες λινάτσες, σε θερμοκρασία δωματίου, μέχρι τον έλεγχό τους. Οι συγκεκριμένες συνθήκες συντήρησης προσομοιάζουν τις φυσικές συνθήκες στις οποίες πραγματοποιείται η παρασκευή, εφαρμογή και σκλήρυνση ασβεστοκονιαμάτων.

Προκειμένου να μελετηθούν οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη μηχανική, φυσική και χημική συμπεριφορά των κονιαμάτων συντήρησης-αποκατάστασης, προετοιμάστηκαν και κάποια μίγματα με εναλλακτικούς παραμέτρους σχεδιασμού. Σε αυτά τα μίγματα διαφοροποιήθηκαν οι αναλογίες συνδετικού:αδρανών και νερού:συνδετικού (*w/b*). Στόχος της διερεύνησης ήταν να προκύψουν οι βέλτιστες αναλογίες κατ' αντιστοιχία με τα επιθυμητά αποτελέσματα στις τιμές των εξεταζόμενων φυσικομηχανικών ιδιοτήτων. Επιπλέον, θεωρήθηκε σκόπιμο

να ερευνηθεί η επιρροή της κοκκομετρίας της κεραμιδόσκονης και των τρόπων ανάδευσης και συντήρησης στις φυσικοχημικές και μηχανικές ιδιότητες των κονιαμάτων, και γι' αυτό το λόγο προετοιμάστηκαν μερικά μίγματα με διαφορετικές κοκκομετρίες κεραμιδόσκονης, μερικά χωρίς μηχανική ανάμιξη και μερικά άλλα τα οποία συντηρήθηκαν σε νερό. Η εξέταση όλων των προαναφερθέντων παραμέτρων οδήγησε στη δημιουργία συνολικά 19 διαφορετικών μιγμάτων κονιαμάτων αποκατάστασης. Οι αναλογίες μίξεως (κατά βάρος) των μιγμάτων που παρασκευάστηκαν και μελετήθηκαν παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 1 που ακολουθεί.

Πίνακας 1. Αναλογίες μίξεως (κατά βάρος) παρασκευασθέντων κονιαμάτων

Κωδικός	Ασβεστος	Κεραμιδόσκονη	Άμμος 1*	Άμμος 2**	w/b
K.2B	2	-----	3	3	0.95
K.4B	1	1 (ΚΕΡ3 0-150 μm)	3	3	0.88
K.6B	1	1 (ΓΠ3 0-150 μm)	3	3	0.86
K.7B	1	1 (ΓΠ1 0-150 μm)	3	3	0.86
K.8B	1	1 (ΓΠ2 0-150 μm)	3	3	0.85
K.9B	1	1 (ΚΕΡ2 0-150 μm)	3	3	0.86
K.10A ⁺	1	1 (ΚΕΡ2 0-75 μm)	3	3	0.77
K.10B	1	1 (ΓΠ4 0-150 μm)	3	3	0.85
K.11B	1	1 (ΚΕΡ 0-150 μm)	3	3	0.96
K.12B	1	1 (ΚΕΡ 0-150 μm)	3	3	0.79
K.14A ⁺	1	1 (ΚΕΡ2 0-45 μm)	3	3	0.84
K.14B	1	1 (ΚΕΡ 0-150 μm)	3	3	0.88
K.15A	1	1 (ΚΕΡ2 0-45 μm)	3	3	0.77
K.16A ⁺⁺	1	1 (ΚΕΡ2 75-150 μm)	3	3	0.77
K.18A ⁺⁺	1	1 (ΚΕΡ2 0-45 μm)	2	2	0.65
K.19A	1	1 (ΚΕΡ2 0-45 μm)	4	4	1.00
K.20A	1	1 (ΚΕΡ2 150-500 μm)	3	3	0.84
K.21A	1	1 (ΚΕΡ3 0-75 μm)	3	3	0.82
K.25A	1	1 (ΚΕΡ3 0-150 μm)	3	3	0.77

⁺ Ανάμιξη χωρίς μηχανικό αναδευτήρα

⁺⁺ Συντήρηση σε νερό

* Ασβεστολιθική άμμος

** Ψαμμιτική άμμος

2.3 Χαρακτηρισμός πειραματικών κονιαμάτων

Στα παρασκευασθέντα κονιάματα μετρήθηκαν αντιπροσωπευτικές μηχανικές, φυσικές και χημικές ιδιότητες. Οι μετρήσεις των μηχανικών ιδιοτήτων αφορούσαν τη θλιπτική αντοχή και την αντοχή σε κάμψη. Πραγματοποιήθηκαν σχετικοί έλεγχοι στις 28, 90 και 180 μέρες, ενώ αριθμός δειγμάτων ελέγχθηκε και σε ηλικία 3 χρόνων. Όλες οι μετρήσεις έγιναν σύμφωνα με το EN 1015-11 (1999). Η αντοχή σε κάμψη

προσδιορίστηκε με μετρήσεις σε 2 πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 40 x 40 x 160 mm. Ο έλεγχος της αντοχής σε θλίψη πραγματοποιήθηκε σε κάθε μισό πρίσμα μήκους μεγαλύτερου των 40 mm που προέκυπτε από τη δοκιμασία σε κάμψη. Και για τις δύο δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν ειδικές διατάξεις που ορίζονται από το προαναφερθέν Ευρωπαϊκό Πρότυπο. Η φόρτιση των δοκιμίων έγινε με αυτόματη μηχανή τύπου Lloyd LR300K.

Οι φυσικές ιδιότητες που μελετήθηκαν ήταν η απορροφητικότητα, το ανοικτό πορώδες και η φαινόμενη πυκνότητα. Για τον προσδιορισμό του συντελεστή επιφανειακής απορροφητικότητας διεξήχθησαν μετρήσεις τριχοειδούς αναρρίχησης νερού σε πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 40 x 40 x 80 mm. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιγράφεται από τους Hall and Kam-Ming Tse (1986). Το ανοικτό πορώδες και η φαινόμενη πυκνότητα προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο του κορεσμού υπό συνθήκες κενού.

Όσον αφορά τις χημικές ιδιότητες, τα πειραματικά δείγματα υπεβλήθησαν σε αναλύσεις με τη βοήθεια ακτίνων X (XRF). Επιπλέον, εξετάστηκαν με τη βοήθεια πετρογραφικού μικροσκοπίου, ενώ μελετήθηκε και η κρυσταλλική τους δομή με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) εφοδιασμένο με μικροαναλυτή. Τέλος, προσδιορίστηκε ο βαθμός υδραυλικότητας τους με θερμικές μεθόδους (TG/DTA).

2.4 Πιλοτικές εφαρμογές και επί τόπου δοκιμές

Από τα μίγματα που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο επιλέχθηκε εκείνο με τις πιο αντιπροσωπευτικές ιδιότητες και εφαρμόστηκε πιλοτικά σε διάφορα είδη υποστρώματος με στόχο τον έλεγχο της συμβατότητάς του με τα παραδοσιακά υλικά. Η εφαρμογή του πειραματικού κονιάματος έγινε από έμπειρο τεχνίτη σε δύο στρώσεις που δεν ξεπερνούσαν τα 20 mm. Η δεύτερη στρώση εφαρμόστηκε μετά από παρέλευση 4 ημερών. Μετά την πήξη και σκλήρυνση του κονιάματος, ελεγχόταν περιοδικά η επιφάνειά του προκειμένου να εντοπιστούν κακοτεχνίες και ρηγματώσεις. Η πρόσφυση του κονιάματος στην τοιχοποιία ελέγχθηκε με αποκοπή και αποκόλληση δείγματος κατά το EN 1015-12 (2000).

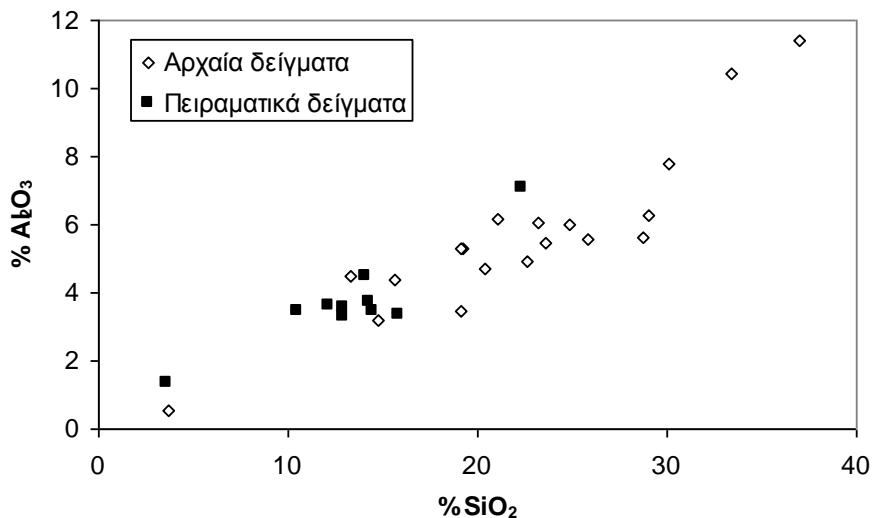
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

3.1 Χημικός, ορυκτολογικός χαρακτηρισμός και μικροσκοπικές παρατηρήσεις

Οι χημικές αναλύσεις (XRF) των πειραματικών κονιαμάτων έδειξαν υψηλό ποσοστό οξειδίων του πυριτίου και του ασβεστίου και σχετικά αυξημένο ποσοστό οξειδίων του αλουμινίου και του σιδήρου. Η παρουσία αυξημένης ποσότητας οξειδίων του πυριτίου και του αλουμινίου οφείλεται στην προσθήκη αργιλοπυριτικών συστατικών κατά την παρασκευή των κονιαμάτων. Το υψηλό ποσοστό οξειδίων του πυριτίου συνοδεύεται συνήθως από υψηλό ποσοστό οξειδίων του αλουμινίου (Εικ. 1). Η σχέση της περιεκτικότητας των πειραματικών δειγμάτων σε οξείδια του πυριτίου

και του ασβεστίου ήταν αντιστρόφως ανάλογη, σε αντίθεση με τη σχέση της περιεκτικότητάς τους σε οξειδία του αλουμινίου και του σιδήρου που ήταν γραμμική. Ανάλογα αποτελέσματα παρατηρήθηκαν και σε αρχαία δείγματα.

Κατά τη μακροσκοπική εξέταση των πειραματικών κονιαμάτων εύκολα μπορούσε κανείς να διαχωρίσει τα αδρανή από το συνδετικό υλικό που δημιουργήθηκε με την ενυδάτωση της ασβέστου και του υδραυλικού πρόσθετου. Από την εξέταση σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης εφοδιασμένο με μικροαναλυτή διαφάνηκε μεγάλη συνοχή και ισχυρή πρόσφυση μεταξύ των επιμέρους συστατικών. Επιπλέον η δομή των κονιαμάτων παρουσίαζε συνεχή μεταβολή με την πάροδο του χρόνου και επηρεαζόταν άμεσα από την περιβαλλοντική θερμοκρασία και υγρασία.



Εικόνα 1. Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων

Η σημειακή χημική ανάλυση σε διάφορα μέρη των δειγμάτων που εξετάστηκαν έδωσε παρόμοια αποτελέσματα με αυτά των αναλύσεων XRF και έδειξε ότι η μήτρα είχε κυρίως ασβεστιτική σύσταση. Στη μήτρα παρατηρήθηκαν αρκετοί κόκκοι καθαρού ασβεστίτη, όπως επίσης και ομοιόμορφα κατανεμημένες λεπτόκοκκες αργιλοπυριτικές ενώσεις. Οι ενώσεις αυτές, οι οποίες ήταν απόρροια της χρήσης κεραμιδόσκονης, αναγνωρίστηκαν ως περιοχές με υψηλό ποσοστό οξειδίων του πυριτίου και του αλουμινίου και χαμηλό ποσοστό οξειδίων του ασβεστίου.

Η πετρογραφική εξέταση των λεπτών τομών τόσο των αρχαίων, όσο και των πειραματικών δειγμάτων, οδήγησε στον προσδιορισμό κοκκινωπών εγκλεισμάτων αργιλοπυριτικής σύστασης διαφόρων μεγεθών και σχημάτων, που συχνά περιέκλειαν άλλα ορυκτά, μέσα σε ασβεστιτική μήτρα. Τα

εγκλείσματα αυτά αναγνωρίστηκαν ως θραύσματα κεραμικού, τα οποία εμφανίζονταν εξαιρετικά λεπτόκοκκα ($< 1 \text{ mm}$) και ομοιόμορφα κατανεμημένα. Οι μικρές διαστάσεις των κόκκων του κεραμικού αυξάνουν την ειδική επιφάνειά του και μεγαλώνουν σημαντικά την επιφάνεια αλληλεπίδρασης του κεραμικού με την ασβεστιτική μήτρα. Κατά τη διάρκεια της φάσης της στερεοποίησης του κονιάματος, το άμορφο τμήμα των κόκκων του κεραμικού, και κυρίως το περιμετρικό τους τμήμα, αντιδρά με το υδροξείδιο του ασβεστίου (Ca(OH)_2), το οποίο περιέχεται στο μίγμα, δημιουργώντας πυριτικές (και ίσως αργιλοπυριτικές) ένυδρες ασβεστιτικές ενώσεις στις οποίες οφείλεται η υδραυλικότητα των κονιαμάτων. Η αντίδραση μεταξύ άσβεστου και κεραμιδόσκονης επιβεβαιώνεται από το γεγονός ότι οι κόκκοι του κεραμικού στις λεπτές τομές εμφανίζονται αλλοιωμένοι, και συχνά η μετάβαση από τους κόκκους στο συνδετικό υλικό (ασβεστιτική μήτρα) εμφανίζει μια περιμετρική ζώνη αντίδρασης (ξεθώριασμα) (Moropoulou et al 1998). Οι ένυδρες ενώσεις φαίνεται να γεμίζουν τα κενά και τις ακανονιστίες της ασβεστιτικής μήτρας. Η περιμετρική ζώνη αντίδρασης και η εισχώρηση των ένυδρων ενώσεων στη μήτρα είναι ενδεικτική της μεγάλης συνοχής μεταξύ της μήτρας και των επιμέρους στοιχείων των κονιαμάτων συντήρησης-αποκατάστασης.

Οι θερμικές αναλύσεις (καμπύλες TGA) βοήθησαν στο σαφή χαρακτηρισμό και διάκριση των κονιαμάτων σε αερικά και υδραυλικά. Στα υδραυλικά καθορίστηκε επίσης ο βαθμός υδραυλικότητάς τους. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, τα περισσότερα πειραματικά κονιάματα δεν εμφάνισαν έντονο υδραυλικό χαρακτήρα (απώλεια βάρους μεταξύ $200\text{-}600^\circ\text{C}$ $< 5\%$). Η ασθενής υδραυλικότητά τους οφείλεται κυρίως στο νεαρό της ηλικίας τους, που δεν επέτρεψε να πραγματοποιηθεί μια ολοκληρωμένη αντίδραση μεταξύ άσβεστου και κεραμιδόσκονης κατά τη φάση της στερεοποίησης. Κατά συνέπεια, δεν δημιουργήθηκαν μεγάλες ποσότητες ένυδρων πυριτικών και αργιλοπυριτικών ενώσεων που θα έδιναν μεγαλύτερο βαθμό υδραυλικότητας.

3.2 Φυσικομηχανικές ιδιότητες

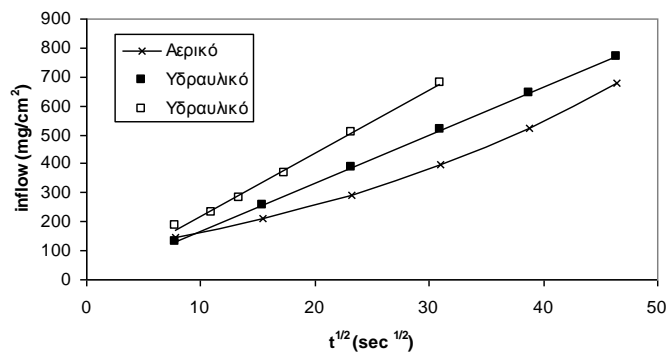
Τα αποτελέσματα των δοκιμών για τον προσδιορισμό των φυσικών ιδιοτήτων των πειραματικών κονιαμάτων παρατίθενται στον Πίνακα 2. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι το πορώδες των κονιαμάτων υδρασβέστου-κεραμιδόσκονης κυμαίνεται από $30\text{-}40\%$ και είναι ελαφρώς χαμηλότερο από το πορώδες που υπολογίστηκε στα αρχαία δείγματα. Για την επιφανειακή απορροφητικότητα, παρατηρείται μεγαλύτερο εύρος τιμών.

Χαρακτηριστικές γραφικές παραστάσεις, απόρροια των μετρήσεων για τον προσδιορισμό του συντελεστή επιφανειακής απορροφητικότητας των πειραματικών κονιαμάτων δίνονται στην Εικόνα 2. Από τα γραφήματα αυτά μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι για τα περισσότερα δείγματα ισχύει η σχέση που καθορίζει ότι η τριχοειδής αναρρόφηση είναι ανάλογη με τη ρίζα του χρόνου. Εξαίρεση αποτελούν τα αερικά κονιάματα, στα οποία

παρατηρείται μια καμπυλότητα κατά τα αρχικά στάδια της δοκιμής. Αυτή είναι απόρροια της χημικής αντίδρασης που συμβαίνει στην επιφάνειά των αερικών κονιαμάτων, λόγω και της παρουσίας διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Η αντίδραση αυτή οδηγεί στη δημιουργία κρυστάλλων ανθρακικού ασβεστίου, οι οποίοι εμποδίζουν την αναρρόφηση νερού.

Πίνακας 2. Αποτελέσματα πορώδους (Ψ_0), φαινόμενης πυκνότητας (ρ_{app}) και επιφανειακής υδατοαπορροφητικότητας (A).

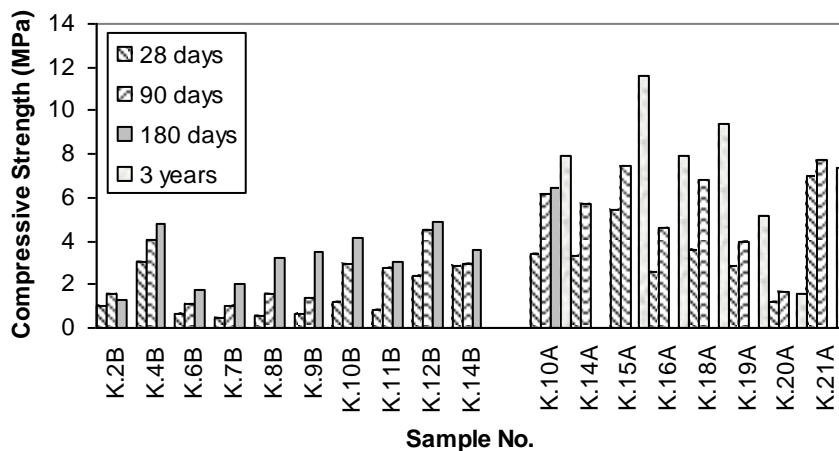
Κωδικός	Ψ_0 (%)	ρ_{app} (g/cm ³)	A (mg/cm ² s ^{1/2})
K.2B	34.8	1.8	26.4
K.4B	36.9	1.7	14.0
K.6B	38.6	1.7	15.5
K.7B	37.1	1.7	22.3
K.8B	37.3	1.7	14.1
K.9B	36.5	1.7	19.5
K.10A	30.6	1.9	16.5
K.10B	37.8	1.7	21.7
K.11B	37.5	1.7	25.9
K.12B	35.8	1.7	19.7
K.14A	32.8	1.8	-----
K.14B	37.3	1.7	19.7
K.15A	29.1	1.9	8.6
K.16A	29.9	1.9	10.6
K.18A	32.4	1.8	15.9
K.19A	30.2	1.9	-----
K.20A	34.8	1.8	21.1
K.21A	32.3	1.8	15.1
K.25A	31.0	1.9	13.1



Εικόνα 2. Αποτελέσματα δοκιμών για τον προσδιορισμό του συντελεστή επιφανειακής απορροφητικότητας πειραματικών κονιαμάτων

Ο προσδιορισμός των φυσικών ιδιοτήτων (επιφανειακής απορροφητικότητας και πορώδους) των κονιαμάτων συντήρησης-αποκατάστασης είναι ιδιαίτερα σημαντικός αφού αυτές καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τόσο την ανθεκτικότητά τους σε διάρκεια, όσο και τη συμβατότητά τους με άλλα υλικά (π.χ. δομικούς λίθους) που χρησιμοποιούνται σε αποκαταστάσεις.

Η μελέτη της θλιπτικής αντοχής και της αντοχής σε κάμψη των πειραματικών κονιαμάτων είναι επίσης απαραίτητη για την εξασφάλιση της συμβατότητάς τους τόσο με τα αυθεντικά κονιάματα, όσο και με άλλα παραδοσιακά υλικά. Από τα πειραματικά αποτελέσματα, διαφαίνεται ότι με την προσθήκη κεραμιδόσκονης στα ασβεστοκονιάματα βελτιώνονται οι μηχανικές τους αντοχές. Η αύξηση της αντοχής των κονιαμάτων υδρασβέστου-κεραμιδόσκονης μπορεί να αποδοθεί στην αντίδραση που έλαβε χώρα στη διεπιφάνεια μεταξύ της κεραμιδόσκονης, που έδρασε ως μεμβράνη και ως πηγή πυριτίου, και της ασβέστου, η οποία κατέστησε την περιοχή της διεπιφάνειας αλκαλική, προκαλώντας τη χημική αντίδραση (Bakolas et al., 1998). Αποτέλεσμα αυτής ήταν η δημιουργία συστατικών με υδραυλικά χαρακτηριστικά (ασβεστοπυριτικά και ασβεστοαργιλικά ένυδρα) στη διεπιφάνεια. Η διείδυση της ασβέστου στο κεραμικό υλικό και η προκύπτουσα αντίδραση μετέτρεψε τη μικροδομή του οπτόπλινθου, μειώνοντας την ακτίνα των πόρων και αυξάνοντας τη φαινόμενη πυκνότητα. Η μετατροπή του πορώδους οδηγείται από τον υδραυλικό χαρακτήρα της μήτρας του κονιάματος (Moropoulou et al 2000).

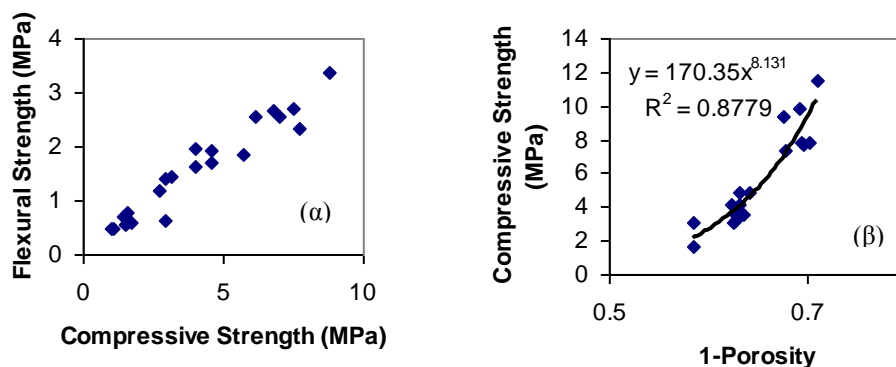


Εικόνα 3. Αντοχή σε θλίψη πειραματικών κονιαμάτων

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα (Εικ. 3), οι μηχανικές αντοχές των πειραματικών κονιαμάτων ενισχύθηκαν με την πάροδο του χρόνου. Αύξηση

στις αντοχές παρατηρήθηκε και σε δοκιμές που έγιναν σε κονιάματα ηλικίας 3 ετών. Αυτό οφείλεται στην ποζολανική αντίδραση που έλαβε χώρα μεταξύ της κεραμιδόσκονης και της άσβεστου. Σε μερικές περιπτώσεις (K.10B και K.11B), η ενίσχυση των μηχανικών αντοχών ήταν ιδιαίτερα αισθητή μετά τις 28 πρώτες μέρες. Η παρατήρηση αυτή μπορεί να οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι οι πρότυπες δοκιμές για τσιμεντοκονιάματα, που υποδεικνύουν έλεγχο αντοχών σε 28 μέρες, δεν είναι κατάλληλες για ασβεστοκονιάματα που παρουσιάζουν αργή ανάπτυξη των αντοχών τους.

Μερικά από τα δείγματα (K.6B και K.7B) που παρασκευάστηκαν με προσθήκη κεραμιδόσκονης από πρώτες ύλες που διατίθενται στο εμπόριο παρουσίασαν ιδιαίτερα μειωμένες αντοχές. Αντίθετα, δείγματα (K.4B) τα οποία παρασκευάστηκαν με κεραμιδόσκονη που ετοιμάστηκε μετά από ψήσιμο πηλού σε ελεγχόμενη θερμοκρασία, παρουσίασαν πολύ καλύτερα αποτελέσματα. Οι χαμηλές αντοχές υποδηλώνουν ότι τα υδραυλικά πρόσθετα που χρησιμοποιήθηκαν δεν ήταν δραστικά. Σημειώνεται ότι η δραστικότητα της κεραμιδόσκονης και η συμμετοχή της στην ενυδάτωση ως υλικό με ποζολανικές ιδιότητες σχετίζεται άμεσα με τη θερμοκρασία πύρωσης κατά την παρασκευή των οπτόπλινθων. Η πύρωση της αργίλου σε θερμοκρασίες μεταξύ 600-900°C καταστρέφει την κρυσταλλική δομή των συστατικών και οδηγεί σε ένα μείγμα πυριτίου και αργιλίου, άμορφης δομής, ικανό να αντιδράσει με τα ένυδρα ασβεστίου. Οι αντιδράσεις που θεωρείται ότι λαμβάνουν χώρα μεταξύ του μετακαολίνης (προϊόν της πύρωσης του καολίνης) και της ασβέστου, παρουσία νερού, οδηγούν στο σχηματισμό ένυδρου τετρασβεστίου του αργιλίου (C_4AH_{13}) και τομπερμορίτη (CSH) ή ένυδρου τριασβεστίου του αργιλίου (C_3AH_6) και τομπερμορίτη ή ένυδρου γκελενίτη (C_2ASH_8) και τομπερμορίτη. Μπορεί να θεωρηθεί ότι η επιρροή της θερμοκρασίας πύρωσης στα θραύσματα οπτόπλινθου είναι συνάρτηση της ηλικίας, των συνθηκών συντήρησης και της λεπτότητας του υλικού και συνοψίζεται στην παροχή της δυνατότητας να λάβουν χώρα ποζολανικές αντιδράσεις (Hughes and Sugden, 1999).



Εικόνα 4. (α) Αντοχή σε κάμψη Vs Αντοχή σε θλίψη. (β) Αντοχή σε θλίψη Vs πορώδες.

Μέσα από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών επιβεβαιώνονται οι σχέσεις θλιπτικής-καμπτικής αντοχής (Εικ. 4α) και πορώδους-αντοχής (Εικ. 4β). Παρατηρούμε επίσης ότι η επιφανειακή απορροφητικότητα μειώνεται όσο αυξάνεται η αντοχή των κονιαμάτων.

Από την προκαταρκτική διερεύνηση των διάφορων παραμέτρων σχεδιασμού προέκυψε ως βέλτιστη αναλογία συνδετικού:αδρανών η αναλογία 1:3. Επιπλέον, εντοπίστηκε ως η κυριότερη παράμετρος που επηρεάζει τις αντοχές των ασβεστοκονιαμάτων η κοκκομετρία της κεραμιδόσκονης. Κονιάματα με χρήση κεραμιδόσκονης με κοκκομετρία < 45 μm ανέπτυξαν μεγάλες σχετικά αντοχές, σε αντίθεση με κονιάματα με κοκκομετρία κεραμιδόσκονης > 150 μm, των οποίων οι αντοχές ήταν ιδιαίτερα χαμηλές. Σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των μηχανικών αντοχών διαδραματίζει και ο λόγος w/b . Η προσθήκη περίσσειας ποσότητας νερού κατά την ανάμιξη είχε ως αποτέλεσμα τη δραστική μείωση των μηχανικών αντοχών των σκληρυμένων κονιαμάτων. Η έλλειψη σωστής και πλήρους ανάδευσης, καθώς και ο τρόπος συντήρησης των πειραματικών κονιαμάτων επίσης επηρέασε τη διαμόρφωση των μηχανικών τους αντοχών.

3.3 Πιλοτικές εφαρμογές και επί τόπου δοκιμές

Από τα αποτελέσματα των πιλοτικών εφαρμογών μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι τα ασβεστοκονιάματα με προσθήκη κεραμιδόσκονης παρουσιάζουν αρκετά ικανοποιητική συμπεριφορά στο χρόνο. Σχεδόν ένα χρόνο μετά την εφαρμογή τους δεν παρουσιάστηκαν ρωγμές ή άλατα στις επιχρισμένες επιφάνειες. Εξίσου ενθαρρυντικά ήταν και τα αποτελέσματα των δοκιμών ελέγχου πρόσφυσης, όπου η θραύση στη διεπιφάνεια παρατηρήθηκε σε τάσεις μεγαλύτερες από το 1/30 της θλιπτικής αντοχής των κονιαμάτων. Αξίζει να αναφερθεί ότι η αντοχή των κονιαμάτων σε πρόσφυση ενισχύεται σημαντικά από τους αρμούς του υποστρώματος.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η παρασκευή συμβατών ασβεστοκονιαμάτων συντήρησης-αποκατάστασης με ικανοποιητική εργασιμότητα, είναι εφικτή μέσα από μια συνολική και ολοκληρωμένη μελέτη-ανάλυση αρχαίων ασβεστοκονιαμάτων, ακολουθώντας δηλαδή τη μέθοδο της αντίστροφης μηχανικής (Moropoulou 2000). Από τα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει ότι οι κρίσιμες παράμετροι σχεδιασμού αυτών των κονιαμάτων είναι: (i) ο τύπος και η ποσότητα του υδραυλικού πρόσθετου, (ii) η κοκκομετρία της κεραμιδόσκονης και (iii) η ποσότητα του περιεχόμενου νερού. Η προσθήκη κεραμιδόσκονης στα ασβεστοκονιάματα βελτιώνει τις ιδιότητές τους και επηρεάζει την τελική θλιπτική αντοχή του υλικού.

5. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν τους Δρ. Κ. Κυριάκου και κ. Γλ. Παπαδούρη για τη βοήθειά τους κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων και το Δρ. Ι. Μανιάτη για τη διεξαγωγή των θερμικών αναλύσεων και για τις παρατηρήσεις στο SEM.

6. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Bakolas, A., Biscontin, G., Moropoulou, A. & Zendri, E., "Characterization of structural Byzantine mortars by thermogravimetric analysis". *Thermochimica Acta*, Vol 321, No. 1-2 (1998) 151-160.

CEN Building lime. Definitions, specifications and conformity criteria, EN 459-1 (2001)

CEN Methods of test for mortar for masonry. Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table), EN 1015-3 (1999)

CEN Methods of test for mortar for masonry. Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, EN 1015-11 (1999).

CEN Methods of test for mortar for masonry. Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates, EN 1015-12 (2000).

CEN Methods of testing cement. Part 1: Determination of strength, EN 196-1 (2005)

Hall, C. & Kam-Ming Tse, T., "Water movement in porous building materials – VII. The sorptivity of mortars" *Building and Environment*, Vol. 21, No. 2 (1986) 113-118.

Hughes, D.C, & Sugden, D.B., "The use of brick dust as a pozzolanic addition to hydraulic lime mortars", in *Proceedings of the International RILEM Workshop on Historic Mortars: Characteristics and Tests* (Paisley, Scotland May 12-14, 1999), RILEM Publications, Bagneux, France (1999) 351-359.

ICOMOS International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites, The Venice Charter (1964).

ICOMOS Nara Document on Authenticity (1994).

Moropoulou, A. & Bakolas, A., "Range of acceptability limits of physical, chemical and mechanical characteristics deriving from the evaluation of historic mortars", in *Proceedings of Compatible Materials for the Protection of European Cultural Heritage*, (Athens Greece Dec, 1998), PACT 56, Athens, Greece (1998) 165-178.

Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas, P., Cakmak A.S., "Compatible restoration mortars, preparation and evaluation for Hagia Sophia earthquake protection", PACT, J. European Study Group on Physical, Chemical, Biological and Mathematical Techniques Applied to Archaeology, Vol 56 (1998) 79-118.

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, Vol 58 (2000) 81-107.

Moropoulou, A., Bakolas, A., Bisbikou, K., "Physico-chemical adhesion and cohesion bonds in joint mortars imparting durability to the historic structures", Construction and Building Materials, Vol 14, No. 1 (2000) 35-46.

Theoulakis, P. & Moropoulou, A., "Salt crystal growth as weathering mechanism of porous stone on historic masonry", J. Porous Materials, Vol 6, (1999) 345-358.

