

ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ – REVERSE ENGINEERING ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΣΥΜΒΑΤΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ – Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΑΓΙΑ ΣΟΦΙΑΣ

Πέτρος Μούνδουλας,

Δρ. Χημικός Μηχανικός, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αστέριος Μπακόλας

Δρ. Βιομηχανικής Χημείας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών

Ελένη Αγγελακοπούλου

Δρ. Χημικός Μηχανικός, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών

Αντωνία Μοροπούλου

Καθηγήτρια, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών

Ahmet Cakmak

Professor, Dept. Civil Engineering & Operations Research, Princeton University

Λέξεις κλειδιά: Reverse engineering, Αγία Σοφιά, κονιάματα αποκατάστασης, συμβατότητα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ:

Ο σχεδιασμός των κονιαμάτων αποκατάστασης ιστορικών/ παραδοσιακών τοιχοποιιών πρέπει να βασίζεται στην συμβατότητα (φυσικοχημική και μηχανική) με τα αυθεντικά ιστορικά δομικά υλικά, ώστε να διασφαλίζεται η μακροβιότητα των ιστορικών κατασκευών. Η χρήση μη συμβατών με τα ιστορικά υλικών αναδεικνύει την ανάγκη ανάπτυξης μιας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας (Αντίστροφη Μηχανική Προσέγγιση) για τον σχεδιασμό συμβατών κονιαμάτων αποκατάστασης, η οποία στηρίζεται στα κριτήρια που απορρέουν από τον χαρακτηρισμό των ιστορικών κονιαμάτων, με στόχους: Την προσομοίωση των ιστορικών κονιαμάτων, την βελτίωσή των ιδιοτήτων τους, την αναπαραγωγισιμότητα και τον έλεγχο της παρασκευής τους βάσει προδιαγραφών.

Η Αντίστροφη Μηχανική Προσέγγιση βασίζεται αρχικά στον χαρακτηρισμό /αποτίμηση ιστορικών κονιαμάτων. Τα εξαγόμενα Όρια Αποδοχής αποτελούν συγκριτικά κριτήρια αποτίμησης των κονιαμάτων αποκατάστασης. Στην συνέχεια επιλογή κατάλληλων πρώτων υλών με

προδιαγραφές και σχεδιασμός συνθέσεων. Παρασκευή αυτών και καταγραφή των τεχνικών χαρακτηριστικών των νωπών κονιαμάτων. Αποτίμηση φυσικοχημικών, μηχανικών ιδιοτήτων των κονιαμάτων στον χρόνο και αριστοποίηση των συνθέσεων προς εφαρμογή. Τέλος πιλοτική επί τόπου εφαρμογή για την αποτίμηση στην κλίμακα της τοιχοποιίας.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάγκη της αναγνώρισης των παραδοσιακών δομικών υλικών ήταν πάντα δεδομένη. Αρνητικά αποτελέσματα σε πρόσφατα αποκατεστημένα κτίρια, την έκαναν πιο επιτακτική. Ωστόσο, η τεχνολογία παραγωγής των παραδοσιακών δομικών υλικών, ενώ έχει αποδείξει αξιοσημείωτη μακροβιότητα, έχει απολεσθεί, δεδομένου ότι τα παραδοσιακά υλικά έχουν εκτοπισθεί από σύγχρονα υλικά, μη συμβατά με τα αυθεντικά, με αρνητικές συνέπειες σε μνημεία της αρχιτεκτονικής κληρονομιάς.

Μια συστηματική έρευνα, σε αρχιτεκτονικά μνημεία στην περιοχή της Μεσογείου, αποκάλυψε την τεχνογνωσία παρασκευής τους και προχώρησε στην ταξινόμηση των υλικών αυτών σε κατηγορίες ανά ιστορικές περιόδους, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε σε μεγάλο αριθμό δειγμάτων κονιαμάτων, από μνημεία της αρχαίας Ελληνικής/ Ελληνιστικής περιόδου, Ρωμαϊκά, Βυζαντινά, Μεταβυζαντινά και Ενετικά μνημεία, και σε δείγματα κονιαμάτων αποκαταστάσεων από οχρωματικά έργα, μοναστήρια και ιστορικά κτίρια της Μεγάλης Ελλάδας, της Ρόδου, της Κρήτης, της Κέρκυρας, του Αγίου Όρους, της Βενετίας και της Κωνσταντινούπολης.[1-25] Η μεθοδολογία, για την αξιολόγηση των φυσικοχημικών και μηχανικών ιδιοτήτων αυτών των παραδοσιακών υλικών, είναι η μεθοδολογία της αντίστροφης μηχανικής προσέγγισης (Reverse Engineering), η οποία ακολουθείται στο Εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών του Ε.Μ.Π.. Με χρήση νέων τεχνικών είναι δυνατή η ανάλυση των ιστορικών κονιαμάτων και η εξαγωγή συμπερασμάτων για τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν και την τεχνολογία παραγωγής τους. Τα σημεία της αντίστροφης μηχανικής και οι ακολουθούμενες φάσεις περιγράφονται συνοπτικά στην περίληψη και θα αναλυθούν και στο επίπεδο της εφαρμογής για τα κονιάματα της Αγιά Σοφιάς.

2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ - ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ

Ο χαρακτηρισμός των ιστορικών κονιαμάτων, πραγματοποιείται όσον αφορά τις παραμέτρους μικροδομής τους (Ποροσιμετρία Υδραργύρου), την αναλογία συνδετικής ύλης/αδρανών (Κοκκοδιαβάθμιση), το είδος της συνδετικής ύλης αλλά και των αδρανών (Θερμικές Μέθοδοι Ανάλυσης, Περίθλαση Ακτίνων Χ, Οπτικό Μικροσκόπιο, Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης), και τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά, βάσει αναλυτικών μεθόδων.[26-30]

2.1 Κατάταξη ιστορικών κονιαμάτων

Η επεξεργασία και η συσχέτιση των λαμβανόμενων αποτελεσμάτων, επιτρέπει την ταξινόμηση των κονιαμάτων σε κατηγορίες, ανάλογα με τη φύση της συνδετικής ύλης και των αδρανών υλικών. Αναλυτικότερα:

1. Συμβατικά ασβεστιτικά κονιάματα: Υδράσβεστος και αδρανή ασβεστιτικής ή αργιλλοπυριτικής φύσης, με συνήθη αναλογία υδρασβέστου/ αδρανών 1:3 κ.β.
2. Κονιάματα με θραυσμένο κεραμικό: Υδράσβεστος και θραυσμένο κεραμικό ως αδρανές. Παρουσιάζουν υδραυλικά χαρακτηριστικά από τις αντιδράσεις ποζολανικής φύσης, που πραγματοποιούνται στη διεπιφάνεια συνδετικής ύλης/κεραμικού. Αναλογία συνδετικής ύλης/αδρανή κ.ό από 1:2 - 1:4 ανάλογα με την εφαρμογή. Χαρακτηριστική ιδιότητα, η αυξημένη ελαστικότητά και η αντοχή σε τάσεις.
3. Κονιάματα υψηλής επί τόπου σβέσης της ασβέστου: ανάμιξη επί τόπου των υλικών. Υψηλές θερμοκρασίες κατά την επί τόπου έσβεση της ασβέστου βοηθούν στην αντίδραση ποζολανικών προσθέτων με την υδράσβεστο. Παρουσιάζουν σημαντικές υδραυλικές ιδιότητες και μηχανικές αντοχές μεγαλύτερες από τα κονιάματα με θραυσμένο κεραμικό. Η μέση αναλογία συνδετικής ύλης/αδρανή 1:3.
4. Υδραυλικά κονιάματα: Υδραυλική άσβεστος και ενεργά αδρανή (ποζολάνη), με μέση αναλογία συνδετικής ύλης/αδρανή 1:3. Παρουσιάζουν αξιόλογες μηχανικές αντοχές, λόγω των υδραυλικών ενώσεων με συμβατές μικροδομές με τα ιστορικά δομικά στοιχεία των τοιχοποιιών, και αξιόλογη μακροβιότητα.

5. Κονιάματα με γύψο: Γύψος με διάφορα αδρανή, σε αναλογία συνδετικής ύλης/αδρανή 1:2 - 1:3. Παρουσιάζουν συνήθως χαμηλές μηχανικές αντοχές, που βελτιώνονται με πρόσθετα οργανικής και ανόργανης φύσης.
6. Κονιάματα διπλής εσωτερικής τοιχοποιίας: Υδράσβεστος, αδρανή και ενεργά αδρανή, με παράλληλη προσθήκη νερού κατά την εφαρμογή τους. Η υψηλή θερμοκρασία, που αναπτύσσεται ευνοεί τον σχηματισμό υδραυλικών φάσεων. Παρουσιάζουν σημαντικές μηχανικές αντοχές.

Στη βάση των μετρούμενων φυσικο-χημικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των ιστορικών κονιαμάτων της κάθε κατηγορίας είναι δυνατός ο καθορισμός του εύρους των ορίων αποδοχής των κονιαμάτων αποκατάστασης. Οι φυσικο-μηχανικές παράμετροι για τον καθορισμό των αποδεκτών ορίων είναι η κατανομή του μεγέθους των κόκκων των αδρανών, τα ποσοστά ανάμιξης συνδετικής ύλης/αδρανών, οι παράμετροι μικροδομής και αντοχής σε εφελκυσμό, βάσει της δοκιμής θραυσμάτων.

Οι χημικές παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη είναι το ποσοστό υγροσκοπικού νερού, το περιεχόμενο CO₂ (%), το περιεχόμενο υδραυλικού νερού (%) και ο λόγος CO₂/H₂O, ο οποίος εκφράζει τον υδραυλικό χαρακτήρα του μίγματος. Τα όρια αποδοχής, για κάθε κατηγορία, φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.[23]

Ειδικά για το κονίαμα της Αγιά Σοφιάς το οποίο κατατάσσεται στην κατηγορία των κονιαμάτων θραυσμένου κεραμικού, και παρουσιάζει εξαιρετικές ιδιότητες/ αξιοθαύμαστη αντοχή σε δυναμικές καταπονήσεις, οι ορυκτολογικές, χημικές, φυσικοχημικές αναλύσεις και οι αναλύσεις μικροδομής που πραγματοποιήθηκαν στα δείγματα κονιαμάτων δίνουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Παρατηρήσεις μικροσκοπίου δείχνουν προϊόντα αντιδράσεων στα όρια των κόκκων του κεραμικού. Τα προϊόντα διαχέονται υπό την μορφή φλεβών στο μητρικό πλέγμα, πληρώνοντας τα κενά και τις ασυνέχειες της δομής. Λεπτόκκοκα πυριτικά αδρανή, καλύπτουν μερικώς την επιφάνεια και ενσωματώνονται στο ασβεστιτικό πλέγμα.

Όρια αποδοχής με βάση τα χαρακτηριστικά της μικροδομής.

Είδος κονιαμάτων	Ολικός ειδικός όγκος (mm ³ /g)	Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm ³)	Μέση ακτίνα πόρων (μm)	Ειδική επιφάνεια (m ² /g)	Ολικό πορώδες (%)
Ασβεστοκίττα	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

Όρια αποδοχής με βάση τις θερμικές μεθόδους ανάλυσης.

Είδος κονιαμάτων	Υγροσκοπικό Νερό (%)	Υδραυλικό Νερό (%)	Περιεχόμενο CO ₂ (%)	Λόγος CO ₂ /H ₂ O	Εφελκυστική Αντοχή (MPa)
Ασβεστοκίττα	<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	-

Οι αντιδράσεις αποδίδονται σε αλκαλιπυριτικές αντιδράσεις στην διεπιφάνεια του συνδετικού υλικού και των θραυσμάτων του κεραμικού, που δρουν ως πηγή πυριτίου και η μεμβράνη οσμωτικής διείσδυσης της ασβέστου που αλκαλοποιεί την διεπιφάνεια, ενεργοποιεί τις ενώσεις του πυριτίου προκαλώντας χημικές αντιδράσεις. Η συνάφεια που αναπτύσσεται είναι φυσικοχημικής μορφής. Εξαρτάται από το κεραμικό, αλλά και από το περιεχόμενο σε υδροξείδιο του ασβεστίου της κονιάς. Αναπτύσσεται συμβατή μικροδομή με τα κεραμικά στοιχεία της τοιχοποιίας. Τα δείγματα που εξετάστηκαν με θερμικές μεθόδους ανάλυσης μετά και από κοκκοδιαβάθμιση παρουσιάζουν διακύμανση του λόγου συνδετικής

κονίας/αδρανή ανάλογα με τις ιστορικές περιόδους, 6^{ος}-10^{ος} αιώνας, από 1/4 έως 1/2. Ο λόγος 1:3 μπορεί να προσδιοριστεί ως ο κατάλληλος για συνθέσεις κονιαμάτων αποκατάστασης.

Η έρευνα αυτή αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία θα προχωρήσουν τα υπόλοιπα βήματα της αντίστροφης μηχανικής προσέγγισης για την προσομοίωση των αυθεντικών ιστορικών κονιαμάτων, με συμβατά κονιάματα αποκατάστασης.

3. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Κατά τη φάση της παρασκευής, πρέπει να καθοριστούν πλήρως οι πρώτες ύλες, η αναλογία τους κατά την μίξη, και ο τρόπος εφαρμογής τους. Η διαφορετική τεχνολογία παραγωγής των νέων υλικών επηρεάζει τα χαρακτηριστικά τους, άρα και τα χαρακτηριστικά του κονιάματος. Από την ανάλυση των ιστορικών κονιαμάτων είναι δυνατό να καθοριστούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά για τις πρώτες ύλες. Έτσι αναλυτικότερα για το κάθε συστατικό:[31-34]

A. Συνδετική Ύλη

Υδράσβεστος: Ο ασβεστόλιθος καθαρότητας 98-99% CaCO₃, η θερμοκρασία έψησης του γύρω στους 900°C, έτσι ώστε να παράγεται μικροκρυσταλλικό CaO με υψηλή τιμή ειδικής επιφάνειας, ενεργό και χωρίς προβλήματα στην σβέση, κατάλληλη σβέση του CaO για παραγωγή Ca(OH)₂ σε μορφή πολτού.

Υδραυλική Άσβεστος: Θερμοκρασία έψησης του αρχικού πετρώματος γύρω στους 900°C, καλή σβέση όπως άνω, χωρίς την ενυδάτωση των υδραυλικών φάσεων, παρουσία ενώσεων C₂S, CA, μικρή περιεκτικότητα σε διαλυτά άλατα, τιμή αντοχής σε θλίψη όχι μικρότερη από 2MPa στις 28 ημέρες.

B. Αδρανή

Άμμος: Πυριτικής φύσεως (ποταμίσις, ανθεκτική σε περιβαλλοντικά φορτία), χωρίς να αποκλείεται ασβεστολιθική άμμος, λόγω συμβατότητάς με τη συνδετική κονία), χωρίς προσμίξεις, κατάλληλης κοκκομετρίας.

Θραυσμένο Κεραμίδι: Θερμοκρασία έψησης αρχικού κεραμικού <900°C, οι πρώτες ύλες του κεραμικού θα πρέπει να περιέχουν μικρή ποσότητα CaCO₃.

Γ. Πρόσμικτα

Φυσικές Ποζολάνες και τεχνητές ποζολάνες: Δοκιμή ποζολανικότητας: Αντοχή σε θλίψη > 5N/mm², Περιεχόμενο ποσοστό σε ενεργό πυρίτιο > 20%, θερμοκρασία έψησης του κεραμικού περίπου 850°C (για τις τεχνητές), μεγάλη καθαρότητα από ανεπιθύμητες προσμίξεις, μεγάλη λεπτότητα

4. ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ (ΥΛΙΚΑ – ΑΝΑΛΟΓΙΕΣ – ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ)

Η επιλογή των συνθέσεων αποτελεί σημαντικό στάδιο της Αντίστροφης Μηχανικής Προσέγγισης. Στην περίπτωση της Αγιά–Σοφιάς, στόχο αποτελεί η προσομοίωση των ιστορικών κονιαμάτων, αφού αυτά αποδεικνύονται ιδιαίτερος ανθεκτικά και έχει αποδειχθεί ότι εισφέρουν στην στατική του μνημείου.

Τα υλικά που επιλέγονται έχουν ως εξής:

- Συνδετικά Υλικά
Υδράσβεστος σε πολτό: LP (Lime Putty), Υδράσβεστος σε σκόνη: PL (Powder of Lime), Φυσική Υδραυλική Άσβεστος: NHL (Natural Hydraulic Lime), Τσιμέντο: C (Cement)
- Ποζολανικά πρόσμικτα – πρόσμικτα
Μηλαϊκή γη: NP (Natural Pozzolana), Κεραμάλευρο: AP (Artificial Pozzolana), Σκόνη Αλουμινίου: A (Aluminum)
- Αδρανή
Άμμος χαμηλής κοκκοδιαβάθμισης: FS (Fine Sand), Άμμος με αδρανή μεγάλης διαμέτρου κόκκων: CS (Coarse Sand), Θραυσμένο Κεραμικό: CB (Crushed Brick)

4.1 Δοκιμές εξέτασης πρώτων υλών

Για την εξέταση των πρώτων υλών διεξήχθησαν οι ακόλουθες δοκιμές: Κοκκομετρική Ανάλυση (Αδρανή Υλικά), Προσδιορισμός Φαινόμενου Βάρους (Αδρανή Υλικά), Δοκιμή Ισοδυνάμου Άμμου (Άμμος), Ανάλυση φθορισμού ακτίνων X (XRF) (Αδρανή Υλικά, Κονίες, Πρόσθετα) Προσδιορισμός ενεργού πυριτίου (Ποζολανικά Πρόσθετα). Όλες οι πρώτες ύλες εξετάστηκαν με τις αντίστοιχες δοκιμές και κρίθηκαν ως ικανοποιητικές προς χρήση σύμφωνα με τα κριτήρια που είχαν τεθεί παραπάνω.

4.2 Συνθέσεις

Οι συνθέσεις που σχεδιάστηκαν και παρασκευάστηκαν με σκοπό την προσομοίωση των κονιαμάτων της Αγια-Σοφιάς κυρίως ως προς την κοκκοδιαβάθμιση, παρουσιάζονται παρακάτω με αναλυτικά τα ποσοστά κατά βάρος των αδρανών, των συνδετικών υλικών και των προσθέτων, καθώς επίσης και του μεγέθους των κόκκων.

Τυπικά ασβεστιτικά κονιάματα

▪ **ΣΥΝΘΕΣΗ 1 (LPSC)**

ΥΔΡΑΣΒΕΣΤΟΣ ΣΕ ΠΟΛΤΟ (30%) - ΑΜΜΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΚΟΚΚΟΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ (70%)

Αδρανή (%) κατά βάρος:

10,5<250μm<6,5<500μm<9,5<1mm<12<2mm<13<4mm<13<8mm<5,5<1,5cm

▪ **ΣΥΝΘΕΣΗ 2 (LPFS)**

ΥΔΡΑΣΒΕΣΤΟΣ ΣΕ ΠΟΛΤΟ (37%) - ΑΜΜΟΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΚΟΚΚΟΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ (63%)

Αδρανή (%) κατά βάρος:

31<250μm<18,5<500μm<8,5<1mm<3,2<2mm<1,4<4mm<0,4<8mm

▪ **ΣΥΝΘΕΣΗ 3 (LPFSCB)**

ΥΔΡΑΣΒΕΣΤΟΣ ΣΕ ΠΟΛΤΟ (30%) – ΑΜΜΟΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΚΟΚΚΟΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ (31,5%) –

ΘΡΑΥΣΜΕΝΟ ΚΕΡΑΜΙΚΟ (38,5%)

Αδρανών (%) κατά βάρος:

Άμμος: 10,5<250μm<5,5<500μm<6,5<1mm<5<2mm<4<4mm

Κεραμικό: 250μm<1<500μm<3<1mm<7<2mm<9<4mm<13<8mm<5,5<1,5cm

Κονιάματα υδραυλικής ασβέστου

▪ **ΣΥΝΘΕΣΗ 4 (NHLCS)**

ΦΥΣΙΚΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΣΒΕΣΤΟΣ (25%) – ΑΜΜΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΚΟΚΚΟΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ (75%)

Αδρανή (%) κατά βάρος:

11<250μm<7<500μm<10<1mm<13<2mm<14<4mm<14<8mm<6<1,5cm

▪ **ΣΥΝΘΕΣΗ 5 (NHLFS)**

ΦΥΣΙΚΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΣΒΕΣΤΟΣ (25%) - ΑΜΜΟΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΚΟΚΚΟΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ (75%)

Αδρανή (%) κατά βάρος:

37<250μm<22<500μm<10<1mm<4<2mm<1,5<4mm<0,5<8mm

▪ **ΣΥΝΘΕΣΗ 6 (NHLCSA)**

ΦΥΣΙΚΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΣΒΕΣΤΟΣ (29%) – ΘΡΑΥΣΜΕΝΟ ΚΕΡΑΜΙΚΟ (70%) – ΣΚΟΝΗ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

(1%)

Αδρανών (%) κατά βάρος:

22<250μm<20<500μm<17<1mm<8<2mm<3<4mm

▪ **ΣΥΝΘΕΣΗ 7 (NHLFSCB)**

ΦΥΣΙΚΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΣΒΕΣΤΟΣ (25%) - ΑΜΜΟΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΚΟΚΚΟΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ (32%) -

ΘΡΑΥΣΜΕΝΟ ΚΕΡΑΜΙΚΟ (43%)

Αδρανή (%) κατά βάρος:

Άμμος: 11<250μm<6<500μm<6<1mm<5<2mm<4<4mm

Κεραμικό: 250μm<1<500μm<4<1mm<8<2mm<10<4mm<14<8mm<6<1.5cm

Κονιάματα με ποζολανικά πρόσθετα (Μηλαϊκή γη ή κεραμάλευρο)

▪ **ΣΥΝΘΕΣΗ 8 (LPNPCS)**

ΥΔΡΑΣΒΕΣΤΟΣ ΣΕ ΠΟΛΤΟ (20%) – ΜΗΛΑΪΚΗ ΓΗ (10%) - ΑΜΜΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΚΟΚΚΟΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ (70%)

Αδρανή (%) κατά βάρος:

10,5<250μm<6,5<500μm<9,5<1mm<12<2mm<13<4mm<13<8mm<5,5<1.5cm

▪ **ΣΥΝΘΕΣΗ 9 (LPAPCS)**

ΥΔΡΑΣΒΕΣΤΟΣ ΣΕ ΠΟΛΤΟ (20%) – ΚΕΡΑΜΑΛΕΥΡΟ (10%) – ΑΜΜΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΚΟΚΚΟΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ (70%)

Αδρανή (%) κατά βάρος:

10,5<250μm<6,5<500μm<9,5<1mm<12<2mm<13<4mm<13<8mm<5,5<1,5cm

▪ **ΣΥΝΘΕΣΗ 10 (LPAPFSCB)**

ΥΔΡΑΣΒΕΣΤΟΣ ΣΕ ΠΟΛΤΟ (20%) – ΚΕΡΑΜΑΛΕΥΡΟ (10%) – ΑΜΜΟΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΚΟΚΚΟΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ (31,5%) – ΚΕΡΑΜΙΚΟ (38,5%)

Αδρανή (%) κατά βάρος:

Άμμος: 10,5<250μm<5,5<500μm<6,5<1mm<5<2mm<4<4mm

Κεραμικό: 250μm<1<500μm<3<1mm<7<2mm<9<4mm<13<8mm<5,5<1,5cm

▪ **ΣΥΝΘΕΣΗ 11 (LPNPFSCB)**

ΥΔΡΑΣΒΕΣΤΟΣ ΣΕ ΠΟΛΤΟ (20%) – ΜΗΛΑΪΚΗ ΓΗ (10%) - ΑΜΜΟΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΚΟΚΚΟΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ (31,5%) – ΚΕΡΑΜΙΚΟ (38,5%)

Αδρανή (%) κατά βάρος:

Άμμος: 10,5<250μm<5,5<500μm<6,5<1mm<5<2mm<4<4mm

Κεραμικό: 250μm<1<500μm<3<1mm<7<2mm<9<4mm<13<8mm<5,5<1,5cm

Κονιάματα σύγκρισης με συνδετικό υλικό ασβέστη-τσιμέντο

▪ **ΣΥΝΘΕΣΗ 12 (LPCCS)**

ΥΔΡΑΣΒΕΣΤΟΣ ΣΕ ΠΟΛΤΟ (25%) - ΤΣΙΜΕΝΤΟ (5%) - ΑΜΜΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΚΟΚΚΟΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ (70%)

Αδρανή (%) κατά βάρος:

10,5<250μm<6,5<500μm<9,5<1mm<12<2mm<13<4mm<13<8mm<5,5<1,5cm

▪ **ΣΥΝΘΕΣΗ 13 (LPCFSCB)**

ΥΔΡΑΣΒΕΣΤΟΣ ΣΕ ΠΟΛΤΟ (25%) – ΤΣΙΜΕΝΤΟ (5%) – ΑΜΜΟΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΚΟΚΚΟΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ (31,5%) – ΘΡΑΥΣΜΕΝΟ ΚΕΡΑΜΙΚΟ (38,5%)

Αδρανή (%) κατά βάρος:

Άμμος: 10,5<250μm<5,5<500μm<6,5<1mm<5<2mm<4<4mm

Κεραμικό: 250μm<1<500μm<3<1mm<7<2mm<9<4mm<13<8mm<5,5<1,5cm

Το πρώτο στάδιο παρασκευής των κονιαμάτων είναι οι δοκιμές για τη μέτρηση των βασικών τεχνικών χαρακτηριστικών των νωπών κονιαμάτων. Αυτές είναι: η εξάπλωση, ο περιεχόμενος αέρας, το συγκρατούμενο νερό και το ειδικό βάρος. Οι δοκιμές των νωπών κονιαμάτων διεξάγονται βάσει του προτύπου DIN 18555, September 1982, και επιτρέπουν την αριστοποίηση τόσο των συνθηκών παρασκευής τους όσο και των ίδιων των συνθέσεων. Το πρότυπο αφορά σε τσιμεντοκονιάματα. Οι δοκιμές για τα κονιάματα αποκατάστασης ιστορικών μνημείων ακολουθούν όλες τις διαδικασίες σύμφωνα με το πρότυπο, εκτός από αυτές της ανάμιξης. Στόχο αποτελεί η προτυποποίηση στην παρασκευή των κονιαμάτων αποκατάστασης με παραδοσιακά υλικά, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η αναπαραγωγισιμότητα τους. Όπως προαναφέρθηκε, στην ημιβιομηχανική κλίμακα, και στη περίπτωση των συνθέσεων που αφορούν στην Αγία Σοφία, η ανάμιξη γίνεται με το χέρι και η βασική παράμετρος που αριστοποιείται είναι το προστιθέμενο κατά την ανάμιξη νερό. Τα αποτελέσματα για την εξάπλωση κυμαίνονται από 13,5 – 16,5 cm, και για το συγκρατούμενο νερό από 80 – 97,7%. Παρατηρούνται πολύ χαμηλά ποσοστά περιεχόμενου αέρα γύρω στο 2,5% εκτός από την σύνθεση με

αερακτικό όπου εκεί το ποσοστό ανεβαίνει στο 9%. Καταγράφονται επίσης τα στοιχεία για το ειδικό βάρος του κάθε νωπού κονιάματος

Τα αποτελέσματα κρίνονται ως ικανοποιητικά και σε όρους εξάπλωσης αλλά και σε όρους συγκρατούμενου νερού. Στην συνέχεια τα νωπά κονιάματα εισέρχονται σε μήτρες συντηρούνται και φυλάσσονται σε ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας.

4.4 Αποτίμηση κονιαμάτων αποκατάστασης κατά την φάση πήξης και σκλήρυνσης

Η αποτίμηση των κονιαμάτων αποκατάστασης που προτείνονται για την Αγιά Σοφιά πραγματοποιήθηκε με θερμικές μεθόδους ανάλυσης, με ποροσιμετρία υδραργύρου και με δοκιμές μηχανικών αντοχών.

4.4.1 Θερμικές Μέθοδοι Ανάλυσης

Κονιάματα υδραυλικής ασβέστου

Στην κατηγορία των κονιαμάτων υδραυλικής ασβέστου φαίνεται η ταχύτερη εξέλιξη της ενανθράκωσης, σε μερικές περιπτώσεις ακόμη και στις 28 ημέρες, καθώς επίσης και η ανάπτυξη υδραυλικών φάσεων, η οποία βοηθά και στην ανάπτυξη των μηχανικών αντοχών, όπως φαίνεται από τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

Τα διαγράμματα του λόγου του διοξειδίου του άνθρακα με το χημικά δεσμευμένο νερό δείχνουν ότι οι συνθέσεις με υδραυλική ασβέστο παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές υδραυλικότητας ως προς όλες τις υπόλοιπες συνθέσεις.

Ασβεστιτικά κονιάματα

Παρουσιάζουν τους βραδύτερους ρυθμούς ενανθράκωσης. Από τα διαγράμματα φαίνεται ότι ακόμη και μετά από 9 μήνες η ενανθράκωση δεν έχει ολοκληρωθεί. Ο ρυθμός της ενανθράκωσης είναι βραδύς ακόμη και μέχρι τους 3 μήνες. Αντιστοίχια παρατηρείται με τα αποτελέσματα των μηχανικών αντοχών όπου η αύξηση τους φαίνεται στον 6ο και τον 9ο μήνα.

Στα διαγράμματα που δείχνουν το βαθμό υδραυλικότητας των κονιαμάτων τα ασβεστιτικά κονιάματα παρουσιάζουν τις χαμηλότερες επιδόσεις, ενώ η σύνθεση με λεπτή άμμο δεν παρουσιάζει χημικά δεσμευμένο νερό.

Κονιάματα με ποζολανικά πρόσθετα ως συνδετικό υλικό

Τα κονιάματα της κατηγορίας παρουσιάζονται από άποψης εξέλιξης της ενανθράκωσης και ανάπτυξης των μηχανικών αντοχών, ακριβώς μετά τα κονιάματα υδραυλικής ασβέστου. Η ενανθράκωση εξελίσσεται με μέσους ρυθμούς, όπως και οι μηχανικές αντοχές χωρίς να παρατηρούνται απότομες μεταβολές. Οι συνθέσεις με κεραμάλευρο σαν συνδετικό υλικό υπερτερούν έναντι αυτών με μηλαϊκή γη.

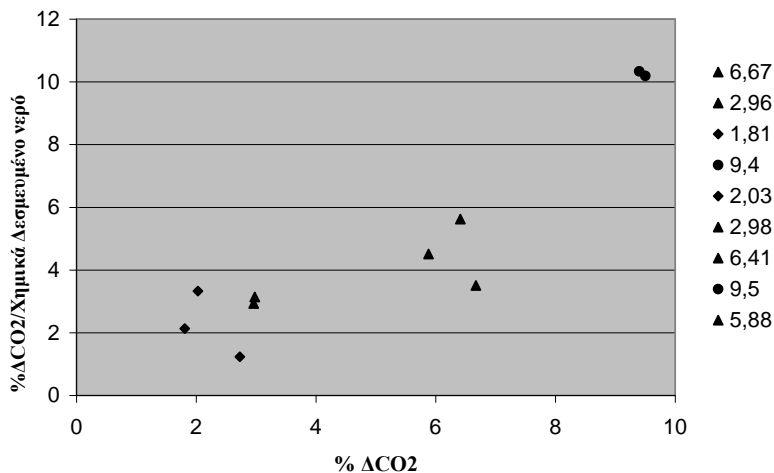
Παρατηρούνται παρόμοια αποτελέσματα ως προς την κατάταξή τους με το κριτήριο της υδραυλικότητας. Οι συνθέσεις με ποζολανικά πρόσθετα βρίσκονται στην περιοχή ανάμεσα στα υδραυλικά κονιάματα και τις υπόλοιπες κατηγορίες καταλαμβάνοντας την μεσαία περιοχή των διαγραμμάτων, παρουσιάζοντας ικανούς βαθμούς υδραυλικότητας.

Κονιάματα σύγκρισης ασβέστη - τσιμέντου

Τα κονιάματα της κατηγορίας αυτής παρουσιάζουν τα μεγαλύτερα προβλήματα. Αποδεικνύεται ότι το "πάντρεμα" ασβέστη / τσιμέντου με το δεύτερο σε τόσο μικρή αναλογία δεν αποδίδει τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης δείχνουν ότι η ενανθράκωση βρίσκεται ακόμη σε εξέλιξη μετά από 9 μήνες. Ο ρυθμός της ενανθράκωσης την πρώτη εβδομάδα της σκλήρυνσης είναι ταχύτατος ενώ στη συνέχεια επιβραδύνεται χωρίς όμως να σταματήσει η μετατροπή του υδροξειδίου του ασβεστίου σε ανθρακικό ασβέστιο.

Τα αποτελέσματα των μηχανικών αντοχών δεν συμβαδίζουν με αυτά της θερμικής ανάλυσης, δηλαδή ενώ η ενανθράκωση και η σκλήρυνση βρίσκονται σε εξέλιξη δεν έχουμε αντίστοιχη αύξηση των μηχανικών αντοχών. Ο λόγος για τον οποίο παρουσιάζεται αυτή η ανακολουθία είναι ότι σε αναλογίες μεταξύ ασβέστη/ τσιμέντου μικρότερες του 1:1 επέρχεται διαχωρισμός φάσεων, ο οποίος καταστρέφει τη συνοχή και τη μικροδομή του κονιαμάτος.

Στους Πίνακες που ακολουθούν φαίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων των θερμικών αναλύσεων στους 9 μήνες για τις συνθέσεις που προτείνονται για την Αγια-Σοφία για τις διάφορες κατηγορίες κονιαμάτων όπως αυτές παρουσιάστηκαν.



Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η συσχέτιση της εξέλιξης της ενανθράκωσης με την υδραυλικότητα ενός κονιάματος. Με τρίγωνο εμφανίζονται τα ποζολανικά κονιάματα τα οποία παρουσιάζουν μέσες τιμές υδραυλικότητας. Με κύκλο τα κονιάματα σύγκρισης ασβέστη-τσιμέντου τα οποία παρά τα αναμενόμενα δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερη υδραυλικότητα, συμπεριφερόμενα σαν αμιγώς ασβεστιτικά, ενώ τα κονιάματα με ρόμβο, δηλαδή τα κονιάματα υδραυλικής ασβέστου, φαίνονται πολύ κοντά στην συμβολή των αξόνων. Το παραπάνω διάγραμμα έχει πολλές ομοιότητες με αυτό που προκύπτει από την μελέτη και την κατάταξη των ιστορικών κονιαμάτων.

Αποτελέσματα θερμοκόν αναλύσεων

Συνθέσεις	Φυσικά Ροφημένο Νερό	Χημικά Δεσμευμένο Νερό	Δεσμευμένο Νερό		% CO ₂
			Λόγω Ca(OH) ₂	Λόγω Mg(OH) ₂	
LPSCS	0,30	0,75	0,24	0,26	19,02
LPFSCB	0,32	0,62	0,68	0,30	9,98
LPFS	0,30	0,50	1,07	0,30	11,28
NHLCS	0,35	1,90	0,00		16,47
NHLFSCB	0,70	2,22	0,00		11,09
NHLFS	0,68	2,03	0,00		11,12
NHLCBA	0,65	1,29	0,39		30,75
LPAPCS	0,31	1,01	0,24	0,20	11,15
LPNPCS	0,42	0,85	0,39	0,20	11,14
LPAPFSCB	0,24	0,61	0,19	0,24	7,23
LPNPFSCB	0,43	0,95	0,25	0,18	7,41
LPCCS	0,53	0,91	0,36	0,22	14,03
LPCFSCB	0,77	1,14	0,40	0,22	10,23

4.4.2 Σχόλια για τα αποτελέσματα της μελέτης μικροδομής

Η πολυπλοκότητα των εξεταζόμενων συστημάτων κάνει δύσκολη και την εκτίμηση της μικροδομής με απόλυτη ακρίβεια. Ιδιαίτερα όταν κάποια από τα συστατικά των συνθέσεων έχουν άμεση σχέση με τα αποτελέσματα της

μικροδομής. Ειδικότερα για τις συνθέσεις, που έχουν ως αδρανές θραυσμένο κεραμικό όλα τα χαρακτηριστικά της μικροδομής εξαρτώνται από την κατανομή του κεραμικού στο προς μέτρηση δείγμα.. Αν παρά τα παραπάνω εξετάσουμε τις συνθέσεις ανάλογα με το συνδετικό υλικό έχουμε:

Κονιάματα Υδραυλικής Ασβέστου

Συσχέτιση ανάμεσα στην ανάπτυξη των μηχανικών αντοχών με χαρακτηριστικά της μικροδομής, δηλαδή αύξηση της ειδικής επιφάνειας σε αναλογία με την ανάπτυξη της αντοχής σε θλίψη, καθώς επίσης και αντιστρόφως ανάλογη σχέση ανάμεσα στην φαινόμενη πυκνότητα και την αντοχή σε κάμψη. Τα όρια αποδοχής που έχουν προκύψει για τα κονιάματα με υδραυλική ασβέστο είναι: για το συνολικό πορώδες 20-30%, για τη φαινόμενη πυκνότητα 1,7-1,9g/cm³, για τον συνολικό αθροιστικό όγκο 110-180mm³/g και για τη μέση ακτίνα πόρων 0,30-0,80μm. Συγκρίνοντας αυτά με τα αποτελέσματα που προκύπτουν, εξάγεται ότι οι περισσότερες συνθέσεις για τα περισσότερα χαρακτηριστικά βρίσκονται εντός ορίων ή θα μπορούσαν να βρεθούν με μικρές βελτιώσεις.

Κονιάματα αερικής ασβέστου

Στις συνθέσεις της κατηγορίας αυτή παρατηρείται η τάση μείωσης του συνολικού αθροιστικού όγκου με παράλληλη αύξηση της φαινόμενης πυκνότητας και μείωση του συνολικού πορώδους. Η σύγκριση με τα όρια αποδοχής για τα ασβεστιτικά κονιάματα (για το συνολικό πορώδες 30-40%, για τη φαινόμενη πυκνότητα 1,5-1,9g/cm³, για τον συνολικό αθροιστικό όγκο 170-290mm³/g και για τη μέση ακτίνα πόρων 0,80-3,30μm), δείχνει ότι τα κονιάματα της κατηγορίας αυτής επιδέχονται βελτίωσης, ως προς την κοκκοδιαβάθμιση και την αναλογία κονιάς αδρανών.

Κονιάματα με ποζολανικά πρόσθετα

Στις συνθέσεις αυτής της κατηγορίας λόγω της πολυπλοκότητας των συστημάτων είναι δύσκολο να βρούμε κοινά και ομοιόμορφα χαρακτηριστικά στο σύνολο των συνθέσεων. Η σύγκριση με τα όρια αποδοχής για τα κονιάματα με ποζολανικά πρόσθετα (για το συνολικό πορώδες 30-42%, για τη φαινόμενη πυκνότητα 1,6-1,9g/cm³, για τον συνολικό αθροιστικό όγκο 170-290mm³/g και για τη μέση ακτίνα πόρων 0,10-1,50μm), δείχνει ότι τα κονιάματα της κατηγορίας αυτής επιδέχονται βελτίωσης, όπως παραπάνω.

Κονιάματα με συνδετικό υλικό ασβέστη-τσιμέντο

Όπως έχει εξηγηθεί παραπάνω, λόγω του διαχωρισμού των φάσεων τα κονιάματα της κατηγορίας αυτής προσεγγίζουν σε συμπεριφορά τα ασβεστιτικά κονιάματα και δεν αποκτούν καμιά από τις ιδιότητες, τις οποίες θα προσέδιδε το τσιμέντο στη μικροδομή.

4.4.3 Αποτελέσματα των μηχανικών αντοχών

Στον Πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα αποτελέσματα των μηχανικών αντοχών καθώς αυτά έχουν σχολιαστεί σε συνδυασμό τόσο με τα αποτελέσματα των θερμικών αναλύσεων όσο και με τα χαρακτηριστικά της μικροδομής. Στην τελευταία στήλη του πίνακα καταγράφεται ο λόγος

μεταξύ εφελκυστικής προς θλιπτική αντοχή ο οποίος μας επιτρέπει την αποτίμηση της επιτελεστικότητας των κονιαμάτων στην τοιχοποιία και πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 1/4 – 1/6 για τα παραδοσιακού τύπου κονιάματα σύμφωνα με τον Καθ. Τάσιο.

Μηχανικές Αντοχές Κονιαμάτων Αποκατάστασης μετά από 9 μήνες

Σύνθεση	Θλίψη (MPa)	Κάμψη (MPa)	Εφελκυσμός (MPa)	Λόγος
LPCS	1,6	0,5	0,3	1 / 5,3
LPFSCB	1,3	0,4	0,3	1 / 4,3
LPFS	1,9	0,7	0,5	1 / 3,8
LPCCS	1,7	0,3	0,2	1 / 8,5
LPCFSCB	0,7	0,4	0,3	1 / 2,3
NHLCS	4,5	1,0	0,7	1 / 6,4
NHLFSCB	3,5	0,8	0,5	1 / 7
NHLFS	2,9	0,8	0,5	1 / 5,8
NHLCBA	5,4	1,9	1,3	1 / 4,2
LPAPCS	1,9	0,5	0,3	1 / 6,3
LPNPCS	1,5	0,4	0,3	1 / 5
LPAPFSCB	2,5	0,6	0,4	1 / 6,25
LPNPFSCB	0,6	0,5	0,3	1 / 2

5. ΦΑΣΗ ΑΡΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η αριστοποίηση της παρασκευής των κονιαμάτων αποκατάστασης στηρίχθηκε στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την πρώτη φάση παρασκευής κονιαμάτων, και σε βιβλιογραφικά δεδομένα κονιαμάτων αποκατάστασης παραδοσιακών οικοδομικών εργασιών των αρχών του αιώνα,[35] αλλά και σε νεότερες εργασίες και κανονισμούς με ικανοποιητικά αποτελέσματα.[36-38]

Από τις εξεταζόμενες συνθέσεις στην α' φάση προέκυψε ότι οι συνθέσεις με μικρό ποσοστό προστιθέμενου τσιμέντου δεν παρουσιάζουν ικανοποιητικές μηχανικές αντοχές, ενώ παράλληλα παρατηρείται το φαινόμενο του διαχωρισμού των φάσεων. Την καλύτερη συμπεριφορά

έδωσαν οι συνθέσεις με υδραυλική άσβεστο και ποζολανικά πρόσμικτα, οι οποίες ωστόσο μπορούν να βελτιωθούν ως προς την κοκκομετρία, το ποσοστό της κονιάς και την λεπτότητα των πρόσμικτων. Βάσει των παρατηρήσεων αυτών, έγινε η αριστοποίηση των συνθέσεων.

Βασικά κριτήρια ήταν το ποσοστό της κονιάς, το οποίο αυξήθηκε στο σύνολο των συνθέσεων, το ποσοστό της ποζολάνης, το οποίο επίσης αυξήθηκε έτσι ώστε ο λόγος συνδετικής κονιάς/ποζολάνη να είναι 1/1. Τέλος σημαντική διαφοροποίηση έγινε στο μίγμα των αδρανών. Αυξήθηκε το ποσοστό του λεπτόκοκκου υλικού στο μίγμα (άμμος). Στο μίγμα των αδρανών εξετάστηκε ο όγκος των κενών που υπάρχουν, ο οποίος θεωρητικά πληρώνεται από τη συνδετική κονία. Επιλέχθηκε τέτοια κοκκομετρία λεπτόκοκκων και αδρόκοκκων υλικών, ώστε το μίγμα να παρουσιάζει ομαλή καμπύλη κοκκοδιαβάθμισης.

Σε αυτήν τη δεύτερη φάση χρησιμοποιήθηκε σταθερό μίγμα αδρανών σε όλες τις συνθέσεις. Το μίγμα που επιλέχθηκε αποτελείται από 65% άμμο πλυμένη λεπτότητας 0/1mm και 35% θραυσμένο κεραμικό, κοκκομετρίας 1/6mm.

Οι προτεινόμενες συνθέσεις κονιαμάτων αποκατάστασης και τα αποτελέσματα της φάσης της αποτίμησης των νωπών κονιαμάτων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα

Συνθέσεις	Αναλογίες	Δόκιμες νωπών κονιαμάτων				
		Ειδικό Βάρος (g/cm ³)	Εξάπλωση (cm)	Απαιτούμενο νερό (mL/Kg)	Συγκρατούμενο νερό (%)	
Υδραυλικά κονιάματα	NHLFSCB 1:3.3	30% NHL-2 +70% αδρανή	1,95	17,0	210,8	85,9
Ασβεσπιτικά κονιάματα	LPFSCB 1:2,5	40% υδράσβεστος Κρήτης +60% αδρανή	1,85	16,0	0	75,8
	LPoFSCB 1:1:2	35% σκόνη υδρασβέστου +65% αδρανή	1,70	15,3	387,5	90,7
Ποζολανικά κονιάματα	LPNPFSCB 1:1:2	25% υδράσβεστος Κρήτης +25% μηλαϊκή γη +50% αδρανή	1,84	17,0	139,4	89,8
	LPAPFSCB 1:1:2	25% υδράσβεστος Κρήτης +25% κεραμάλευρο	1,89	16,8	103,6	92,9

+50% αδρανή

LPoAPFS CB 1:1:2	25% σκόνη υδρασβέστου +25% κεραμάλευρο +50% αδρανή	1,84	15,5	300,3	89,5
------------------------	--	------	------	-------	------

Δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις στο σύνολο σχεδόν των χαρακτηριστικών που καταγράφονται σε σχέση με την α' φάση.

Η αποτίμηση των συνθέσεων στην φάση της αριστοποίησης γίνεται με τις ίδιες τεχνικές όπως και στην προηγούμενη φάση. Αποτελέσματα παρατίθενται συγκεντρωτικά στον πίνακα που ακολουθεί για τις μηχανικές αντοχές και τις παραμέτρους μικροδομής.

Συνθέσεις	Παράμετροι Μικροδομής					Μηχανικές Αντοχές			
	Ολικός Ειδικός Όγκος (mm ³ /g)	Ειδική επιφάνεια (m ² /g)	Μέση ακτίνα πόρων (μm)	Φαινόμενη Πυκνότητα (g/cm ³)	Ολικό πορώδες (%)	Κάμψη (MPa)	Θλίψη (MPa)	Εφελκυσμός (MPa)	
Υδρ/κές	216,31	5,24	1,43	1,70	36,77	0,62	2,53	0,41	
Ασβεστιτικές	Πολτός	225,83	5,91	0,45	1,75	39,51	0,52	1,34	0,35
	Σκόνη	248,23	5,90	0,38	1,61	39,96	0,76	2,40	0,51
Ποζολανικές	Μηλαϊκή Γη	257,77	4,24	2,14	1,53	39,43	0,40	1,12	0,27
	Κεραμάλ/ πολτός	252,23	5,64	0,68	1,58	39,85	0,46	1,23	0,31
	Κεραμάλ/ σκόνη	228,87	6,47	0,41	1,64	37,53	1,03	4,36	0,69

Από τα αποτελέσματα εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- οι αριστοποιημένες συνθέσεις των κονιαμάτων αποκατάστασης εμφανίζουν γενικά συμπεριφορά ικανοποιητικότερη αυτής των αντίστοιχων συνθέσεων που εξετάστηκαν κατά την πρώτη φάση παρασκευής
- οι μετρούμενες μηχανικές αντοχές (αντοχή σε κάμψη, αντοχή σε θλίψη) στο διάστημα του πρώτου μήνα σκλήρυνσης παρουσιάζουν αυξημένες

- τιμές σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μετρούμενα μεγέθη της πρώτης φάσης
- το ολικό πορώδες των κονιαμάτων ελαττώνεται στα επιθυμητά επίπεδα, γεγονός που αποδίδεται στην αύξηση του ποσοστού της συνδετικής κονιάς στο μίγμα, ενώ η ειδική επιφάνεια των κονιαμάτων μειώνεται δεδομένης της φύσης της συνδετικής κονιάς -ειδικά στην περίπτωση της σκόνης υδρασβέστου-, της αύξησης του ποσοστού του λεπτόκοκκου αδρανούς υλικού στο μίγμα και της μεγαλύτερης λεπτότητας των ποζολανικών προσμίκτων.

Από το σύνολο των εξεταζόμενων συνθέσεων την καλύτερη συμπεριφορά παρουσιάζει η σύνθεση με υδραυλική άσβεστο ως συνδετική ύλη, καθώς και η σύνθεση με συνδετική ύλη σκόνη υδρασβέστου και κεραμάλευρο ως ποζολανικό πρόσμικτο.

6. ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Η πιλοτική εφαρμογή πραγματοποιήθηκε σε τοιχοποιία που υποδείχθηκε από τις αρχές του Μουσείου της Αγιά Σοφιάς σε συνεργασία με την ερευνητική ομάδα που πραγματοποίησε την επί τόπου εφαρμογή.

Βάσει των εργαστηριακών δοκιμών που προηγήθηκαν της πιλοτικής επί τόπου εφαρμογής πεδίου, επιλέχθηκαν οι συνθέσεις εκείνες των κονιαμάτων αποκατάστασης που απέδωσαν τη βέλτιστη συμπεριφορά, όσον αφορά τις προσλαμβανόμενες μηχανικές και φυσικοχημικές παραμέτρους.

Οι συνθέσεις που εφαρμόστηκαν και οι αντίστοιχες κατηγορίες είναι οι εξής:

- 1. Κονίαμα με φυσικό ποζολανικό πρόσμικτο:** 25% σκόνη υδρασβέστου +25% κεραμάλευρο +50% αδρανή [μίγμα άμμου (0/1mm)+θραυσμένου κεραμικού (1mm/1,5cm)]
- 2. Κονίαμα υδραυλικής άσβεστου:** 25% υδραυλική άσβεστος (NHL-2) +10% κεραμάλευρο +65% αδρανή [μίγμα άμμου (0/1mm)+θραυσμένου κεραμικού (1mm/1,5cm)]
- 3. Κονίαμα με τεχνητό ποζολανικό πρόσμικτο:** 25% σκόνη υδρασβέστου +25% μετακαολινίτης +50% αδρανή [μίγμα άμμου+θραυσμένου κεραμικού (0/3)]

Ο δοσομετρικός προσδιορισμός των πρώτων υλών που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των συνθέσεων των κονιαμάτων έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του Πανεπιστημίου του Bogazici της

Κωνσταντινούπολης. Ειδικά για το συγκεκριμένο μνημείο της Αγίας Σοφίας, (αρμοί 5-7cm) και κονιάματα θραυσμένου κεραμικού με μέγιστη διάμετρο κεραμικού αδρανούς 2cm. Στις συνθέσεις προστέθηκαν αυθεντικά θραύσματα κεραμικού διαστάσεων 1-1,5cm, η χρήση των οποίων ήταν επιβεβλημένη λόγω του πάχους των αρμών της τοιχοποιίας, αλλά και προκειμένου να προσομοιαστούν τα αυθεντικά κονιάματα του μνημείου.

Για την εφαρμογή των κονιαμάτων αποκατάστασης ακολουθήθηκαν τρία στάδια τα οποία είναι όλα μεγάλης σπουδαιότητας καθώς σε κάθε ένα από αυτά θα πρέπει να υπάρχει μεγάλη προσοχή και συντονισμός, άλλως πολλές παράμετροι μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά το εγχείρημα.

Τα στάδια αυτά συνοπτικά είναι αυτό της επί τόπου ανάμειξης των κονιαμάτων και της προετοιμασίας της τοιχοποιίας, της εφαρμογής των κονιαμάτων και της συντήρησής τους μετά την εφαρμογή.



Καθαρισμός και προετοιμασία της τοιχοποιίας πριν την εφαρμογή.
Εφαρμογή των κονιαμάτων στην τοιχοποιία

Η εφαρμογή πεδίου των κονιαμάτων αποκατάστασης στην πιλοτική τοιχοποιία της Αγια-Σοφιάς παρουσίασε ικανοποιητικά αποτελέσματα, δεδομένου ότι τα εφαρμοζόμενα κονιάματα απέδωσαν πολύ καλή εργασιμότητα, όπως είχε παρατηρηθεί και σε εργαστηριακή κλίμακα, η οποία διευκόλυνε την επί τόπου εφαρμογή τους.

Τα κονιάματα αποκατάστασης επί της τοιχοποιίας παρουσίασαν ικανοποιητικούς ρυθμούς πήξης. Μολονότι οι συνθέσεις ήταν διαφορετικής χημικής σύστασης, σε καμία από τις ζώνες εφαρμογής δεν παρατηρήθηκαν μικρορηγματώσεις καθ' όλο το χρονικό διάστημα των πρώτων ημερών αμέσως μετά την εφαρμογή.

Η συντήρησή τους θα πρέπει να είναι συνεχής, με διαβροχή αυτών, ώστε να συγκρατούν ικανοποιητικό ποσό υγρασίας απαραίτητο για την κανονική σκλήρυνσή τους στο χρόνο. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι για την ολοκλήρωση της πρόσληψης των μηχανικών αντοχών των κονιαμάτων θα απαιτηθεί διάστημα τουλάχιστον έξι μηνών και πιθανόν μεγαλύτερο δεδομένου του μεγάλου πάχους των αρμών. Επιπλέον, η συμπεριφορά στις περιβαλλοντικές συνθήκες θα είναι εμφανής μετά από το χρονικό διάστημα του ενός χρόνου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. R.A. LIVINGSTON, "Materials analysis of the masonry of the Hagia Sophia Basilica, Istanbul", Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings III, Editors: C.A.Brebbia, R.J.B.Frewer, Computational Mechanics Publications, (STREMA), Bath, 1993.
2. LIVINGSTON R.A., STUTZMAN P.E., MARK R., ERDIK M., "Preliminary analysis of the masonry of the Hagia Sophia Basilica, Istanbul", Materials Issues in Art and Archeology, III, MRS Symposium Vol. 267 ed. Vandiver P. et al., Materials Research Society, Pittsburg, PA, pp. 721-736, 1993.
3. R.J. MAINSTONE, "The structural conservation of Hagia Sophia", Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings III, Editors: C.A.Brebbia, R.J.B.Frewer, Computational Mechanics Publications, (STREMA), Bath, 1993
4. MOROPOULOU A., CAKMAK A.S., BISCONTIN G., BAKOLAS A., ZENDRI E., "Advanced Byzantine cement based composites resisting earthquake stresses: The crushed brick/lime mortars of Justinian's Hagia Sophia."
5. MOROPOULOU A., CAKMAK A.S., BISCONTIN G., "Crushed brick/lime mortars of Justinian's Hagia Sophia."
6. CAKMAK A.S., MOROPOULOU A., MULLEN C.A., "Interdisciplinary study of the Dynamic Analysis and Earthquake response of Hagia Sophia", Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, No 14, pp. 125-133 (1995)
7. MOROPOULOU A., BAKOLAS A., MICHAILIDIS P., CHRONOPOULOS M., SPANOS CH., "Traditional Technologies in Crete providing mortars with effective mechanical properties", Structural Studies of Historical Buildings IV, edited by C.A.Brebbia and B.Leftheris, Computational Mechanics Publications, Southampton, Boston, vol. 1, 1995, pp. 151-161
8. Μπακόλας Καραγιάννης Αστέριος «Κριτήρια και μέθοδοι Χαρακτηρισμού Ιστορικών Κονιαμάτων» ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ, Αθήνα 2002
9. MOROPOULOU A., BAKOLAS A., BISBIKOU K., "Characterization of ancient, byzantine and later historic mortars by thermal analysis and X-ray diffraction techniques", Thermochemica Acta, 269/270 (1995), pp. 779-795
10. MOROPOULOU A., BAKOLAS A., BISBIKOU K., "Thermal analysis as a method of characterizing ancient ceramic technologies", Thermochemica Acta, 2570 (1995), pp. 743-753
11. BISCONTIN G., BAKOLAS A., MOROPOULOU A., ZENDRI E., "Microstructural characterization of the historical mortars in Venice", 3rd

International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Conference Proceedings, edited by V. Fassina, H. Ott & F. Zezza, Venice, 1994, pp. 405-410

12. BAKOLAS A., BISCONTIN G., MOROPOULOU A., ZENDRI E., "Physicochemical characteristics of traditional mortars in Venice", Structural Studies of Historical Buildings IV, edited by C.A. Brebbia and B. Leftheris, Computational Mechanics Publications, Southampton, vol. 1, 1995, pp. 187-194
13. BAKOLAS A., BISCONTIN G., MOROPOULOU A., ZENDRI E., "Characterization of Structural Byzantine Mortars by thermogravimetric analysis", *Thermochimica Acta*, 321 (1998), pp. 151-160
14. MARK R., CAKMAK A.S., "Mechanical Test of Material from the Hagia Sophia Dome", *Dumbarton Oaks Papers*, (1994), p.48
15. MOROPOULOU A., BISCONTIN G., BISBIKOU K., BAKOLAS A., THEOULAKIS P., THEODORAKI A., TSIOURVA TH., "Physicochemical study of adhesion mechanisms among binding material and brick fragments in 'cocciopesto'", *Scienza e Beni Culturali IX*, 1993, pp. 415-429
16. MOROPOULOU A., BISCONTIN G., THEOULAKIS P., ZENDRI E., BAKOLAS A., BISBIKOU K., THEODORAKI A., "Study of mortars in the Medieval City of Rhodes", In Proc. Int. Congress on the Conservation of Stone and Other Materials, UNESCO-RILEM, Paris, 1993, pp. 394-401
17. MOROPOULOU A., BISCONTIN G., BAKOLAS A., MICHAILIDIS P., BASIOTIS J., "Historic Mortars in Mediterranean Monuments", 4th Int. Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Conference Proceedings, Publ. Technical Chamber of Greece, Rhodes, vol.3 (1997), pp. 213-237
18. MOROPOULOU A., THEODORAKI A., BISBIKOU K., MICHAILIDIS P., "Restoration Synthesis of crushed brick mortars simulating Byzantine lime and Material Technologies in Crete", *Materials Issues in Art and Archeology*, Materials Research Society, vol. 352 (1995), pp. 759-769
19. BISCONTIN G., BAKOLAS A., ZENDRI E., ZANCANARO D., "Study of the composition of historical mortars of the Roman Arena in Padova", In Proc. of the 4th Int. Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Rhodes, 1997, vol. 2, pp. 43-52
20. MOROPOULOU A., TSIOURVA TH., BISBIKOU A., BAKOLAS A., "Hot lime technology imparting high strength to historic mortars", *Construction and Building Materials*, vol. 2, 1996, pp. 151-159
21. MOROPOULOU A., CAKMAK A., BISCONTIN G., "Crushed brick lime mortars of Justinian's Hagia Sophia", *Materials Issues in Art and Archeology V*, Mat. Res. Soc., Pittsburgh, 1996, pp. 317-322
22. MOROPOULOU A., BISCONTIN G., BAKOLAS A., BISBIKOU A., "Technology and behavior of rubble masonry mortars", *Construction and Building Materials*, 11 (2), 1997, pp. 119-129
23. MOROPOULOU A., BAKOLAS A., "Range of acceptability limits of Physical, Chemical and Mechanical Characteristics deriving from the Evaluation of Historic Mortars", *Compatible Materials for the Restoration of European Cultural Heritage*, Part 56, 1998, pp. 165-178

24. PAPAYIANNI I., KARAVEZIROGLOU M., "Aggregate gradation of ancient mortars, Relationship to strength and Porosity", Conservation of Stone and Other Materials, ed. By M.-J. Thiel, UNESCO-RILEM, E & FN SPON, Chapman & Hall, Paris, vol. 2 (1993), pp. 493-500
25. KARAVEZIROGLOU M., PAPAYIANNI I., "Compressive Strength of Masonry with thick mortar joints", Conservation of Stone and Other Materials, ed. By M.-J. Thiel, UNESCO-RILEM, E & FN SPON, Chapman & Hall, Paris, vol. 2 (1993), pp. 212-219
26. ALLESSANDRINI G., "Gli intonaci nell' edilizia storica: metodologie analitiche per la caratterizzazione chimica e fisica", Scienza e Beni Culturali I, 1985, pp. 147-166
27. CHIARI G., SANTARELLI M.L., TORRACA G., "Charatterizzazione delle malte antiche mediante l' analisi di campioni non frazionati", Materiali e Strutture 3, 1992, pp. 111-137
28. MACKENZIE R.C., "Differential Thermal Analysis 2", 1st ed., Academic Press, London, 1970
29. ADAMS J.E., KNELLER A.W., "Thermal Analysis of medieval Mortars from Gothic Cathedrals in France", in Engineering Geology of Ancient Works, Balkema, Rotterdam, 1988, pp. 1019-1026
30. TASSIOS TH., VACHLIOTIS C., SPANOS C., "In situ strength measurements of masonry mortars", In Proc. Int. Conference on Repair and strengthening of Stone Masonries, ICCROM, Athens, 1989, pp. 53-61
31. ROTA ROSSI P., "Mortars for restoration: basic requirements and quality control", Materiaux et Constructions, 1989, pp. 445-448
32. MOROPOULOU A., BAKOLAS A., MOUNDOULAS P., CAKMAK A.S., "Compatible Restoration Mortars, Preparation and Evaluation for Hagia Sophia earthquake protection", Compatible Materials for the Restoration of European Cultural Heritage, Pact 56, 1998, pp. 79-118
33. CAKMAK A.S., MOROPOULOU A., MULLEN C.A., "Interdisciplinary Study of Dynamic Behaviour and Earthquake Response of Hagia Sophia", Soil Dynamics and earthquake engineering, 14, 1995, pp. 125-133
34. CAKMAK A.S., MOROPOULOU A., ERDIK M., "Interdisciplinary research proposal for the earthquake protection of Hagia Sophia", submitted to the Council of Europe, 1995
35. A. Moropoulou, G. Biscontin, A. Bakolas, K. Bisbikou, P. Theoulakis, A. Theodoraki, E. Zendri, "Physico-chemical investigation on characterisation and behaviour of rubble masonry mortars 'Calcestruzzo da Sacco Murario'", Scienza e Beni Culturali IX, edited by G. Biscontin, D. Mietto, Publ. Libreria Progetto Editore Padova, (1993), pp. 373-387. (cited : AATA)
36. A. Moropoulou, B. Chararas, 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 Sofia Basilica Konstantinople", Soil Dynamics and Earthquake Engineering VI, edited by A.S. Cakmak and C.A. Brebbia, Publ. Computational Mechanics Publications, Southampton Boston, Elsevier Applied Science, London NY, (1993), pp.923-942.

37. 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.
38. 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)