

ΤΡΙΜΕΡΕΙΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ ΥΔΡΑΣΒΕΣΤΟΥ–ΠΟΖΟΛΑΝΗΣ – ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΩΣ ΒΑΣΗ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ & ΕΝΕΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΣΚΕΥΗ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΪΩΝ

Ελένη-Εύα Τουμπακάρη

Δρ Πολιτικός Μηχανικός, Διεύθυνση Αναστήλωσης Αρχαίων Μνημείων, ΥΠ.ΠΟ.

Λέξεις κλειδιά: τριμερείς συνθέσεις, κονίαμα, ένεμα, ιστορικές τοιχοποιίες

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην εργασία υπενθυμίζονται τα πρώτα κριτήρια που τέθηκαν για το σχεδιασμό υλικών επισκευής ιστορικών τοιχοποιιών. Διαπιστώνεται η ανάγκη να ληφθούν υπόψη κριτήρια σχεδιασμού, τα οποία ν'αναφέρονται στις τοπικές ιστορικές τεχνολογίες υλικών, αλλά και συγχρόνως να εξασφαλίζουν τη δομική επάρκεια του φορέα (απαιτήσεις ασφαλείας). Στη συνέχεια, περιγράφεται η λογική σχεδιασμού συνθέσεων υδρασβέστου-ποζολάνης-τσιμέντου, παρουσιάζονται χαρακτηριστικά αποτελέσματα από τη μελέτη τριμερών συνθέσεων αναφοράς και αναφέρονται παραδείγματα τριμερών κονιαμάτων και ενεμάτων. Δείχνεται ότι οι τριμερείς συνθέσεις μπορούν να καλύψουν ένα μεγάλο εύρος απαιτήσεων και άρα μπορούν να ικανοποιήσουν τα προαναφερθέντα κριτήρια σχεδιασμού υλικών επισκευής τοιχοποιιών, τόσο σε όρους ανθεκτικότητας και ασφαλείας όσο και σεβασμού στις ιστορικές τεχνολογίες κάθε τύπου.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο προβληματισμός αναφορικά με τα κριτήρια που πρέπει να διέπουν το σχεδιασμό υλικών επισκευής για ιστορικές τοιχοποιίες παρουσιάστηκε συστηματικά για πρώτη φορά σε συνέδριο του ICCROM (1982). Οι ακόλουθοι λόγοι έκαναν επιτακτική τη σύγκληση του συνεδρίου: «Το ζήτημα [των κονιαμάτων και ενεμάτων] αντιμετωπίστηκε ως σήμερα με λιγότερη προσοχή απ'ότι η συντήρηση της πέτρας (...). Η έλλειψη ενδιαφέροντος οδηγεί σε μια σειρά δυσμενών συνεπειών, όπως: (α) τα κονιάματα και επιχρίσματα αποτελούν σημαντική πηγή ιστορικών πληροφοριών, η οποία αξιοποιείται ανεπαρκώς. Η μελέτη τους αμελείται και αυθεντικά υλικά συχνά καταστρέφονται χωρίς διατήρηση δειγμάτων και χωρίς κατάλληλη τεκμηρίωση, (β) η εφαρμογή ενεμάτων γίνεται για τη σταθεροποίηση παλαιών τοιχοποιιών χωρίς καμία θεωρητική αντιμετώπιση

τόσο των απαιτήσεων που πρέπει να πληρεί το ίδιο το ένεμα όσο και της μελλοντικής συμπεριφοράς των επισκευασμένων κατασκευών υπό την επίδραση περιβαλλοντικών δράσεων, (γ) κονιάματα ανεπαρκούς πορώδους και υπερβολικών αντοχών, τα οποία παράγουν επικίνδυνα προϊόντα κατά τη διαδικασία πήξης, χρησιμοποιούνται συχνά σε παλαιές τοιχοποιίες, ακόμα και σε επαφή με σημαντικά έργα τέχνης (τοιχογραφίες, νωπογραφίες)».

2. ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

2.1 Απαιτήσεις σχεδιασμού υλικών σε σχέση με τα κατά χώραν υλικά: φυσικοχημική συμβατότητα

Στο ίδιο Συνέδριο αναγνωρίστηκε ρητά ότι, για την ανάπτυξη και τον σχεδιασμό υλικών επισκευής θα πρέπει να γίνεται έρευνα τόσο στα νέα όσο και στα κατά χώραν υλικά, αφενός για τον καθορισμό μερικών από τις ιδιότητες που θα πρέπει να πληρούν τα πρώτα, αφετέρου για την κατανόηση της παθολογίας των δευτέρων. Πράγματι, η μελέτη των ιστορικών κονιαμάτων διαμορφώνει τα όρια αποδοχής των κονιαμάτων αποκατάστασης (Mogoroulou and Bakolas, 1998). Για τον σχεδιασμό, τα ακόλουθα σημεία θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη (ICCRUM 1982): (α) μηχανικές αντοχές, (β) σχηματισμός ανεπιθύμητων παραπροϊόντων (αλάτων), (γ) συμπεριφορά έναντι υγρασίας και υδρατμών, (δ) διόγκωση λόγω θερμότητας ή νερού, (ε) φθορές λόγω αποσάθρωσης, (στ) εφαρμογή (να είναι όσο το δυνατόν πιο απλή και αξιόπιστη), (ζ) αναστρεψιμότητα (όσο είναι δυνατόν), (η) αισθητικοί παράγοντες (αφορά κυρίως επιχρίσματα και τελικές στρώσεις), καθώς και (θ) να είναι σαφή τα όρια των υλικών επισκευής (είτε πάνω στα υλικά ή, απαραιτήτως, στην συνοδευτική τεχνική έκθεση). Τα παραπάνω θέτουν το ζήτημα των κριτηρίων συμβατότητας με τα αυθεντικά υλικά, τα οποία ελέγχονται φυσικοχημικά από τη μικροδομή και από τις μηχανικές αντοχές (Mogoroulou et als, 2000a, 2000b).

2.2 Επιρροή υλικών επισκευής στη μηχανική συμπεριφορά των επισκευασμένων φορέων: αναγκαιότητα μελέτης μηχανισμών επιρροής

Είναι φανερό ότι οι παραπάνω απαιτήσεις σχετίζονται κυρίως με θέματα ανθεκτικότητας, συνεπάγονται δε την μείωση του περιεχόμενου τσιμέντου Portland και την προώθηση της χρήσης υδρασβέστου με πρόσμικτα. Διαπιστώνεται όμως ότι, αν και στα κριτήρια συμπεριλαμβάνονταν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών, οι προτεινόμενες τιμές αντοχών δεν βασίζονταν σε πειραματική και θεωρητική τεκμηρίωση, η οποία, με τη σειρά της, προϋποθέτει συσχέτιση ανάμεσα σε αυτά και στην μηχανική συμπεριφορά του επισκευασμένου φορέα. Χωρίς αυτή τη συσχέτιση, τα κριτήρια σχεδιασμού σε όρους μηχανικών αντοχών παραμένουν εμπειρικά.

Εστιάζοντας στο ζήτημα των ενεμάτων, ως πρόσφατα λίγες ήταν οι εργασίες οι οποίες ασχολούνταν με την συμπεριφορά τοιχοποιιών μετά από την εφαρμογή ενεμάτων (Bouineau 1985, Tomazevic M. et al 1991, Binda et al 1993α,β, Vintzileou E. & Tassios T.P. 1995, Valuzzi 2000). Αποδείχθηκε ότι η παράμετρος σχεδιασμού του ενέματος, η οποία ελέγχει τη μηχανική συμπεριφορά τρίστρωτων τοιχοποιιών είναι η συνάφεια με τα κατά χώραν υλικά και όχι π.χ. η θλιπτική αντοχή (Toumbakari 2002). Κατά συνέπεια, ως κριτήριο σχεδιασμού ενεμάτων, στη βάση απαιτήσεων δομικής επιτελεστικότητας, προτείνεται να είναι η συνάφεια. Αναφορικά με την ανάπτυξη κριτηρίων σχεδιασμού κονιαμάτων για βαθύ αρμολόγημα από δομική σκοπιά, ελάχιστες είναι οι σχετικές εργασίες (Vintzileou 2001) ενώ δεν υπάρχουν ακόμα σχετικά διατυπωμένα κριτήρια σχεδιασμού.

2.3 Ιστορικά κονιάματα του Ελλαδικού χώρου – συνέπειες για το σχεδιασμό

Όπως προκύπτει από την ανάλυση πλήθους ιστορικών κονιαμάτων του Ελλαδικού χώρου από διάφορους μελετητές, από γραπτές πηγές και από πρακτικές παραδόσεις, η συντριπτική πλειοψηφία των υλικών αυτών κατατάσσεται είτε στην κατηγορία των ασβεστοκονιαμάτων είτε σε εκείνη των ασβεστοποζολανικών κονιαμάτων, όπου η ποζολάνη είναι είτε φυσική είτε τεχνητή (κεραμάλευρο). Η σύγκλιση των συμπερασμάτων είναι σημαντική, αν ληφθεί υπόψιν ότι έχουν προκύψει από την εφαρμογή διαφορετικών, συχνά, μεθόδων, δεδομένου ότι ακόμα δεν υπάρχει ένα κοινά αποδεκτό πρωτόκολλο για την ανάλυση ιστορικών κονιαμάτων (Bartos et al eds 2000, Groot et al eds *in press*).

Οι απαιτήσεις δομικής επιτελεστικότητας θεωρούμε ότι καθιστούν αναπόφευκτη την χρήση υδραυλικών συνθέσεων. Πράγματι, η εφαρμογή καθαρών ασβεστιτικών κονιαμάτων δεν θα επέτρεπε την ανάπτυξη των επιθυμητών αντοχών σε ένα εύλογο χρονικό ορίζοντα, η δε εφαρμογή ασβεστιτικών ενεμάτων δεν έχει νόημα, δεδομένου του εξαιρετικά αργού ρυθμού ενανθράκωσης στο εσωτερικό των τοιχοποιιών. Οι υδραυλικές συνθέσεις που χρησιμοποιήθηκαν, και μάλιστα από την Αρχαιότητα, είναι κυρίως ασβεστοποζολανικές (Moropoulou et als, 1995). Εξ όσων γνωρίζουμε, η παραγωγή κι εφαρμογή υδραυλικής ασβέστου, αν υπήρξε, δεν ήταν ποτέ εκτεταμένη. Άρα, η απαίτηση για αναφορά στις τοπικές ιστορικές τεχνολογίες ικανοποιείται με τη χρήση υδρασβέστου και ποζολανών.

3. ΤΡΙΜΕΡΕΙΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ: ΛΟΓΙΚΗ ΕΠΙΛΟΓΗΣ & ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Συνθέσεις αποτελούμενες μόνο από ασβέστη και ποζολάνη (στη λεπτότητα του τσιμέντου) εμφανίζουν το μειονέκτημα της πολύ βραδείας ανάπτυξης των μηχανικών αντοχών καθώς και μειωμένης ανθεκτικότητας, όπως φαίνεται τόσο από τη βιβλιογραφία όσο και από σχετική μελέτη του

ΕΩΣ/ΕΜΠ (Βιντζηλαίου κ.α. 2008). Η προσθήκη μιας τσιμεντιτικής φάσης είναι, λοιπόν, απαραίτητη για την ανάπτυξη σε σύντομο χρονικό διάστημα μιας ανθεκτικής μικροδομής (Papayianni 1998). Η τσιμεντιτική αυτή φάση μπορεί να προέλθει από την προσθήκη τσιμέντου Portland (C_2S , C_3S κυρίως), ακόμα και, εφόσον δικαιολογείται, φυσικής υδραυλικής ασβέστου (η οποία περιέχει C_2S). Η τελευταία περιέχει επίσης $Ca(OH)_2$, το οποίο πρέπει να ληφθεί υπόψιν για την ποζολανική αντίδραση.

Για πρώτη φορά μελετήθηκαν συνθέσεις ενεμάτων με τσιμέντο Portland, υδράσβεστο, φυσικές ποζολάνες και, ενίοτε, λεπτόκοκκη άμμο ή/και κεραμάλευρο, στα τέλη της δεκαετίας του 80 (Penelis et al. 1988). Η αναγκαιότητα επίτευξης αντοχών της τάξης των 6 MPa στις 28 ημέρες σε συνδυασμό με το γεγονός ότι, όπως αποδείχθηκε από τη μελέτη επισκευασμένων τοιχοποιιών, συνθέσεις υψηλής περιεκτικότητας σε τσιμέντο δεν είναι αναγκαίες για το επίπεδο και, κυρίως, το είδος των αντοχών που απαιτούνται σε μια κατασκευή από τοιχοποιία (υπενθυμίζεται ότι κριτήριο σχεδιασμού, τουλάχιστον για τα ενέματα, είναι η συνάφεια), έκαναν αναγκαία τη μελέτη τριμερών συνθέσεων με στόχο, πέρα από τη μελέτη της ανάπτυξης της μικροδομής, να προσδιοριστεί ένα ελάχιστο όριο περιεκτικότητας σε τσιμέντο (Toumbakari 2002).

4. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ ΥΔΡΑΣΒΕΣΤΟΥ – ΠΟΖΟΛΑΝΗΣ – ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ PORTLAND

3.1 Υλικά και συνθέσεις

Σε πρώτη φάση, για τη μελέτη συστημάτων υδρασβέστου – ποζολάνης – τσιμέντου χρησιμοποιήθηκαν: (α) σκόνη υδρασβέστου, (β) τσιμέντο Portland CEM I 42.5 σε περιεκτικότητα 10% ή 30%, (δ) φυσική ποζολάνη (Trass) (0-80 μm), (ε) πυριτική παιπάλη και (στ) υπερρευστοποιητής (1-1.5%-κ.β.στερεών). Ο λόγος υδρασβέστου προς ποζολάνη κυμαινόταν από 1:3 ως 1:5. Η περιεκτικότητα σε νερό κυμαινόταν μεταξύ 0.8-0.9 και προέκυψε από τις δοκιμές διεισδυτικότητας σε στήλες άμμου με κενά μικρότερα των 0.3mm. Οι συνθέσεις αυτές προτείνονται ως βάση σχεδιασμού ενεμάτων υψηλής διεισδυτικότητας καθώς δεν περιέχουν άμμο.

3.2 Ενυδάτωση

Η μελέτη της ενυδάτωσης των συνθέσεων κατά τις πρώτες ώρες έγινε διαμέσου του προσδιορισμού των καμπυλών θερμότητας ενυδάτωσης. Το ένεμα αναφοράς Cb0 (80% κ.β. τσιμέντο, 20% υδράσβεστος) εμφάνισε τη δεύτερη κορυφή του μετά από 42 ώρες, με σχετική δηλ. καθυστέρηση σε σχέση με τις αμιγείς τσιμεντοκονίες. Τα τριμερή ενέματα εμφάνισαν τη δεύτερη κορυφή μετά από 8-12 ώρες, και μάλιστα ανεξάρτητα από το λόγο υδρασβέστου – ποζολάνης και την περιεκτικότητα ή όχι πυριτικής παιπάλης

Πίνακας 1. Συγκέντρωση SO_4^- (mmol/l) και Al^{3+} ($\mu\text{g/l}$)

C[%]	SO_4^-					Al^{3+}				
	80%	0%	30%	30%	30%	80%	0%	30%	30%	30%
t [h]	Cb0	Ποζ.	13b0	15b0	13b10	Cb0	Ποζ.	13b0	15b0	13b10
0	76.9	4.6	36.1	36.0	32.2	1072	446	24	6	0
1/2	73.3	4.5	28.1	26.2	24.6	302	370	0	0	0
1	65.5	4.8	23.2	23.2	20.9	444	304	12	0	0
2	57.4	4.7	18.5	17.8	17.8	132	210	0	4	0
4	50.7	5.1	16.2	16.2	16.5	106	306	0	0	0
8	45.3	5.0	14.9	12.9	8.9	74	192	0	0	20

C[%]: περιεκτικότητα σε τσιμέντο

(SF) . Η κορυφή αυτή αποδίδεται στην ενυδάτωση του τσιμέντου και όχι στην ποζολανική αντίδραση, η οποία γίνεται εμφανής με το πέρασ κάποιων ημερών. Για τη σύνθεση 13b0 (30% κ.β. τσιμέντο, 0% SF) η κορυφή εμφανίζεται σε 10 ώρες με τιμή 1.96 J/(g.h) και στη σύνθεση 13b10 (30% κ.β. τσιμέντο, 10% SF) στις 9.5 ώρες με τιμή 2.97 J/(g.h). Οι αντίστοιχες τιμές για τη σύνθεση αναφοράς είναι 42 ώρες και 1.6 J/(g.h).

3.3 Εξέλιξη της συγκέντρωσης ιόντων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται επιλεγμένα αποτελέσματα που αφορούν στη διάχυση ιόντων, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν ανεπιθύμητες αντιδράσεις με τα κατά χώραν υλικά. Τα θειικά ιόντα (Πίνακας 1) προέρχονται κυρίως από τη γύψο και τα θειικά αλκάλια του τσιμέντου. Η συγκέντρωση θεικών στο διάλυμα των τριμερών συνθέσεων είναι η μισή

Πίνακας 2. Συγκέντρωση K^+ (mol/l) και Na^+ (mol/l)

C[%]	K^+					Na^+				
	80%	0%	30%	30%	30%	80%	0%	30%	30%	30%
t [h]	Cb0	Ποζ.	13b0	15b0	13b10	Cb0	Ποζ.	13b0	15b0	13b10
0	83.5	6.4	24.2	17.9	33.7	35.2	14.3	28.2	26.5	33.3
1/2	95.9	6.5	19.7	16.8	21.3	40.3	19.8	27.5	25.7	27.6
1	96.8	5.7	18.3	16.3	20.4	40.0	14.8	25.6	25.8	27.6
2	99.7	5.5	66.7*	15.3	19.6	41.5	13.7	51.7*	27.3	28.8
4	102.5	5.6	16.4	15.3	20.5	42.4	17.4	25.5	26.0	39.8
8	103.4	5.7	16.8	15.2	20.0	42.5	14.4	28.0	26.1	30.2

* Οι τιμές αυτές αποδίδονται σε μη χαρακτηριστικό δείγμα

Πίνακας 3. Ορυκτολογική ανάλυση τριμερών συνθέσεων 13b0

ηλικία	CcA	CH	Cc	An.	Q
28	5.42	25.69	8.63	6.56	20.35
60	6.57	28.65	22.3	8.36	22.38
90	8.29	21.51	39.31	7.23	18.53
180	9.32	23.33	16.09	5.7	21.17
365	-	12.09	15.98	4.16	21.07

CcA : ενανθρακωμένες ασβεσταγαργλικές ενώσεις

CH : πορτλανδίτης Q : χαλαζίας

Cc : καλσίτης

Anal. : αναλσίτης

σε σχέση προς τη σύνθεση αναφοράς. Παρατηρείται επίσης μεγάλη μείωση της περιεκτικότητας σε αργίλιο, τα αποτελέσματα όμως χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης, καθώς οι μετρηθείσες συγκεντρώσεις (με ICP/MS-Inductively Coupled Plasma / Mass Spectroscopy) είναι μικρότερες εκείνων που αφορούν στην ποζολάνη. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται η μετρηθείσα, με φασματοσκοπία ατομικής απορρόφησης, συγκέντρωση αλκαλίων όπου είναι φανερή η δραστική μείωση του K^+ και η σχετική μείωση του Na^+ .

3.5 Ορυκτολογική ανάλυση

Η ορυκτολογική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της περίθλασης ακτίνων X και χαρακτηριστικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Αξίζει να σημειωθεί η ανάπτυξη ενανθρακωμένων ασβεσταγαργλικών ενώσεων, οι οποίες ανιχνεύονται από την 28^η ως την 180^η μέρα, όχι όμως και σε ηλικία 365 ημερών.

3.6 Εξέλιξη του αδιαλύτου υπολείμματος και του διαλυτού πυριτίου

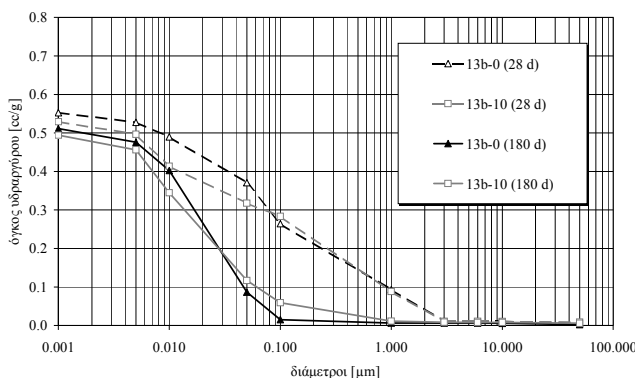
Γενικά, μια φυσική ποζολάνη δεν είναι διαλυτή σε HCl. Αντίθετα SiO_2 που προέρχεται από C-S-H είναι διαλυτό σε HCl. Για το λόγο αυτό, η ποσοτική μελέτη των συνθέσεων στηρίχτηκε στον προσδιορισμό του αδιαλύτου υπολείμματος και του διαλυτού SiO_2 σε διάφορες ηλικίες ως εκτιμητριών της εξέλιξης της ποζολανικής αντίδρασης. Χαρακτηριστικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4. Η μείωση του αδιαλύτου υπολείμματος είναι ισχυρή κατά τις πρώτες 28 ημέρες στο ένεμα 13b0 (30% κ.β. τσιμέντο, 0% SF). Στη συνέχεια, ο ρυθμός μειώνεται μέχρι τις 365 ημέρες. Στις συνθέσεις με SF (13b10) παρατηρείται μείωση του αδιαλύτου υπολείμματος μέχρι τις 90 ημέρες, και μετά πρακτικά σταθεροποίηση, γεγονός που αποδεικνύει την ισχυρή επιβράδυνση της ποζολανικής αντίδρασης. Αντίστοιχα, παρατηρείται αύξηση του διαλυτού SiO_2 , επί μεγαλύτερο χρονικό διάστημα χωρίς SF και μικρότερο, όταν υπάρχει SF.

Πίνακας 4. Αδιάλυτο υπόλειμμα και διαλυτό διοξείδιο του πυριτίου [%]

Ηλικία	αδιάλυτο υπόλειμμα		διαλυτό πυρίτιο	
	13b0	13b10	13b0	13b10
άνυδρο	36.74	δεν μετρήθηκε	7.41	δεν μετρήθηκε
28	21.96	26.39	17.37	17.83
60	21.24	23.09	17.5	21.38
90	19.33	21.68	18.12	22
180	19.12	21.49	19.62	22.45
365	17.68	δεν μετρήθηκε	21.16	δεν μετρήθηκε

3.7 Εξέλιξη του πορώδους (ποροσιμετρία υδραργύρου)

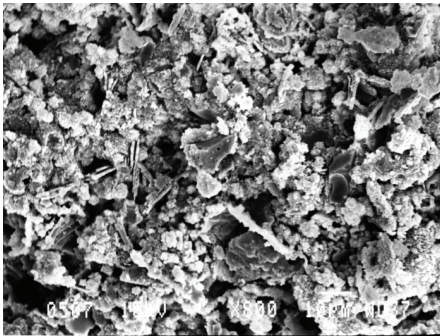
Στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται και συγκρίνεται η εξέλιξη του συνολικού πορώδους των συνθέσεων 13b0 (30% κ.β. τσιμέντο, 0% SF) και 13b10 (30% κ.β. τσιμέντο, 10% SF) στις ηλικίες των 28 και 180 ημερών, όπως μετρήθηκε με ποροσιμετρία υδραργύρου. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μείωση του πορώδους της σύνθεσης 13b10 σε σχέση με την 13b0 στην περιοχή κάτω των 0.1μm στην ηλικία των 28 ημερών, προφανώς λόγω της παρουσίας της πυριτικής παιπάλης. Με το πέρας των 180 ημερών, παρατηρείται και στις δύο περιπτώσεις μια εξαιρετική μείωση του πορώδους, ιδιαίτερα στην περιοχή μεταξύ 0.005-3 μm λόγω κυρίως της ποζολανικής αντίδρασης. Στην ηλικία των 180 ημερών, οι δύο συνθέσεις παρουσιάζουν πολύ μικρές διαφορές. Ας σημειωθεί στη θέση αυτή ότι η πορώδης αυτή δομή δεν είναι βέλτιστη και θα έπρεπε να επιδιωχθεί διατήρηση του πορώδους γύρω στο 1μm. Πάντως, το πορώδες αποτελεί λιγότερο κρίσιμη παράμετρο σχεδιασμού για τα ενέματα απ' ότι για τα κονιάματα.



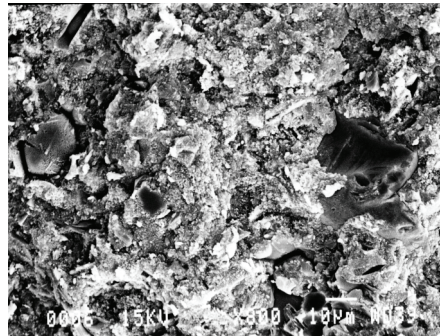
Εικόνα 1. Μεταβολή του συνολικού πορώδους συνθέσεων με (13b10) και χωρίς (13b0) πυριτική παιπάλη στην ηλικία των 28 και 180 ημερών

3.7 Εξέλιξη της μικροδομής (ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης)

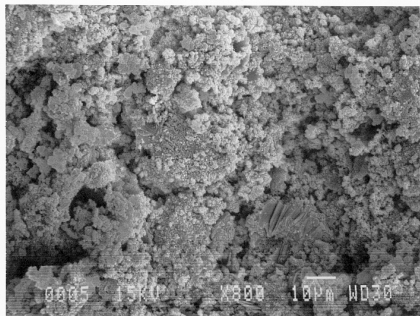
Η γενική εικόνα των ενεμάτων 15b0 (30% κ.β. τσιμέντο, 0% SF) και 15b10 (30% κ.β. τσιμέντο, 10% SF) στις ηλικίες των 28 και 180 ημερών παρουσιάζεται στην Εικόνα 2. Το ένεμα χωρίς πυριτική παιπάλη παρουσιάζει πορώδη μικροδομή, όπου φαίνονται καθαρά τα C-S-H τα οποία καλύπτουν σφαιρικούς κόκκους τσιμέντου ή ποζολάνης. Μεγαλύτεροι κόκκοι ποζολάνης και κρύσταλλοι πορτλανδίτη φαίνονται επίσης (Εικόνα 2α). Στην ηλικία των 180 ημερών το πορώδες έχει σαφώς μειωθεί ενώ οι κρύσταλλοι πορτλανδίτη δεν διακρίνονται πλέον, αν και υπάρχουν στη μάζα του υλικού (Εικόνα 2β). Συγκριτικά, το πορώδες της σύνθεσης 15b10 είναι εμφανώς μειωμένο ακόμα και στην ηλικία των 28 ημερών (Εικόνα 2γ) ενώ οι κρύσταλλοι πορτλανδίτη δεν διακρίνονται πλέον παρόλο που είναι παρόντες στη μάζα του υλικού. Στην ηλικία των 180 ημερών (Εικόνα 2δ) είναι σαφής μια εικόνα αμόρφου υλικού με εξαιρετικά μειωμένο πορώδες, παρόλο που ακόμα διακρίνονται C-S-H σε περιοχές περισσότερο πορώδεις.



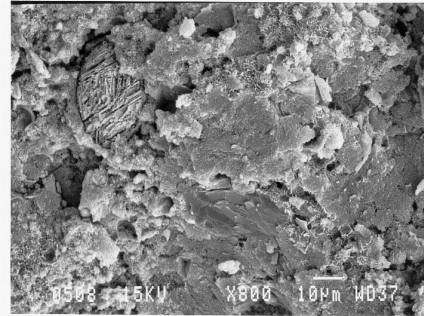
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 2. Επιφάνειες θραύσης (α) ενέματος 15b0 στις 28 και (β) στις 180 ημέρες και (γ) 15b10 στις 28 και (δ) στις 180 ημέρες (800x)

Πίνακας 5. Θλιπτική αντοχή ($f_{gr,c}$) και αντοχή σε εφελκυσμό από κάμψη ($f_{gr,t}$) συνθέσεων (ενεμάτων) αναφοράς [MPa]

C [%]:	10%				30%			
σύνθεση:	13a0		15a0		13b0		15b0	
ηλικία	$f_{gr,c}$	$f_{gr,t}$	$f_{gr,c}$	$f_{gr,t}$	$f_{gr,c}$	$f_{gr,t}$	$f_{gr,c}$	$f_{gr,t}$
14 ημ.	0.7	0.3	0.7	0.4	1.8	0.8	1.8	0.7
28 ημ.	2.2	0.7	2.1	0.8	3.2	1.5	3.5	1.2
60 ημ.	4.7	1.6	4.5	1.9	6.9	2.0	5.5	1.9
90 ημ.	5.0	1.0	5.4	1.1	7.8	2.5	7.3	2.3
180 ημ.	5.6	0.4	4.1	0.0	13.1	2.3	11.2	1.9

3.8 Εφελκυστική και θλιπτική αντοχή

Αρχικώς μελετήθηκαν διάφορες συνθέσεις ενεμάτων με σκοπό να καθοριστεί το ελάχιστο απαιτούμενο ποσοστό τσιμέντου. Δυο ποσοστά τσιμέντου εξετάστηκαν: 10%-κ.β. και 30%-κ.β. στερεών. Τα αποτελέσματα των δοκιμών σε κάμψη και θλίψη δοκιμών 40x40x160mm παρουσιάζονται στον Πίνακα 5. Η θλιπτική αντοχή των ενεμάτων που περιέχουν τσιμέντο σε ποσοστό 30%-κ.β. αυξάνεται σταθερά στο χρόνο. Αντιθέτως, στα ενέματα με το χαμηλότερο ποσοστό τσιμέντου (10%-κ.β.) παρατηρήθηκε στασιμότητα μετά τις 90 ημέρες. Και για τους δυο τύπους ενεμάτων, η αντοχή σε εφελκυσμό από κάμψη αυξήθηκε μέχρι την ηλικία των 60 ημερών. Εν συνεχεία, παρατηρήθηκε πτώση της καμπτικής αντοχής των ενεμάτων με 10% τσιμέντο. Αντίθετα, η καμπτική αντοχή των συνθέσεων με τσιμέντο 30%-κ.β., αυξήθηκε έως τις 90 ημέρες και έπειτα μειώθηκε ελαφρά. Η αντοχή σε εφελκυσμό είναι μια μηχανική ιδιότητα εντόνως εξαρτώμενη απ' την εσωτερική μικρορρηγμάτωση. Η παρατηρηθείσα μείωση της αντοχής μπορεί να αποδοθεί σε μια προοδευτική μικρορρηγμάτωση, στην οποία τα ενέματα με ποσοστό τσιμέντου 10%κ.β. είναι πιο ευάλωτα. Αντίθετα, η παρουσία ενός μεγαλύτερου ποσοστού τσιμέντου φαίνεται ότι δημιουργεί στις μικρές ηλικίες μια ανθεκτικότερη μικροδομή, στο εσωτερικό της οποίας μπορεί να εξελιχθεί η ποζολανική αντίδραση.

3.9 Εφελκυστική και διατμητική αντοχή συνάφειας

Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται χαρακτηριστικές τιμές εφελκυστικής και διατμητικής αντοχής συνάφειας των τριμερών συνθέσεων με ασβεστολιθικό υπόστρωμα και με υπόστρωμα από οπτοπλίνθους. Όσον αφορά στον εφελκυσμό επί ασβεστολιθικού υποστρώματος, δεν παρατηρήθηκαν διαφορές μεταξύ των ενεμάτων, του ενέματος αναφοράς Cb0 συμπεριλαμβανομένου. Η αλλαγή των συνθηκών συντήρησης (13b0 Θ) είχε ως αποτέλεσμα τον μηδενισμό, πρακτικά, της εφελκυστικής αντοχής συνάφειας.

Πίνακας 6 Διατμητική & εφελκυστική αντοχή συνάφειας με ασβεστολιθικό (A) υπόστρωμα και υπόστρωμα με οπτοπλίνθους (O) [MPa] (στις 60 ημ.)

διατμ.	13b0		13b10		Cb0		13b0 Θ**	
ορθή τάση	A	O	A	O	A	O	A	O
0.1	0.573	0.704	0.892	0.908	0.980	1.216	0.132	0.197
0.3	0.598	0.878	0.979	0.894	-	1.045	0.316	0.701
1	0.991	1.205	1.258	1.780	1.307	2.381	0.592	0.833
εφελκ.	1.63	0.62*	1.47	0.55*	1.76	0.53*	0	0

* αστοχία οπτοπλίνθου

** θερμές/ξηρές συνθήκες συντήρησης

Τα αποτελέσματα που αφορούν στη διατμητική αντοχή συνάφειας υπό διάφορες ορθές τάσεις έδειξαν διαφορές μεταξύ των ενεμάτων. Η παρουσία λεπτόκοκκων υλικών, όπως της πυριτικής παιπάλης, είχε ως συνέπεια τη μεγάλη αύξηση της διατμητικής αντοχή συνάφειας, η οποία πλησίασε πλέον εκείνη του τσιμεντενέματος αναφοράς Cb0. Σε πρόσφατες εργασίες (Adami et al 2006) επιβεβαιώνεται ότι, με την κατάλληλη σύνθεση, ακόμα και με υλικά όπως ο μετακαολίνης, ο οποίος είναι λιγότερο λεπτόκοκκος και πιο εύχρηστος από την πυριτική παιπάλη, μπορούν να επιτευχθούν αντοχές συνάφειας των τριμερών ενεμάτων παραπλήσιες του ενέματος αναφοράς.

4. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΤΡΙΜΕΡΩΝ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ & ΕΝΕΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΜΜΟ

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά τριμερών συνθέσεων κονιαμάτων & ενεμάτων, οι οποίες μελετήθηκαν για εφαρμογή σε ιστορικές τοιχοποιίες (Τουμπακάρη & Παπαδόπουλος 2004, Μαλαμή 2001, Μαλαμή 2004, Βιντζηλαίου κ.α. 2008). Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι: (α) υδράσβεστος σε πολτό, (β) λευκό τσιμέντο Portland I 42.5, (γ) ποζολάνη Μήλου (0-75μm), (δ) μη εμπορική ποζολάνη από την Κω σε τρεις κοκκομετρικές διαβαθμίσεις (0-8mm, 0-4mm και 0-45μm), (ε) πυριτική άμμος (0-2mm) και πυριτικά (2-8mm) και ασβεστολιθικά (4-8mm) αδρανή από την Αττική, (στ) άμμος από την Κω (περιέχει κυρίως πυριτικά αδρανή και feldspar) ως έχει (0-2.36 mm) και κοσκινισμένη (0-1.7mm), (ζ) καθαρή χαλαζιακή άμμος (0-4mm) καθώς και μικρή ποσότητα υπερρευστοποιητή.

Οι συνθέσεις δεν είναι άμεσα συγκρίσιμες - δεν είναι αυτός ο στόχος της εργασίας - διότι τόσο η διάμετρος του μέγιστου κόκκου των χρησιμοποιηθέντων αδρανών, η σύνθεση αυτών (η οποία μπορεί να είναι μίγμα διαφόρων άμμων) όσο και η κοκκομετρική καμπύλη διαφέρουν μεταξύ τους. Με την παράθεσή τους, όμως, επιχειρείται να δειχθούν τα εξής:

Πίνακας 7 Τριμερείς συνθέσεις κονιαμάτων & ενεμάτων: παραδείγματα

	Τσιμέν- ντο [%]	ηλι- κία	ft [MPa]	fc [MPa]	Φαινόμε. πορ. [%]	Συστολή ξηρ. [%]	Μέγιστος κόκκος**
M2f	0%	28	0.50	2.50	26.7		1.19 mm
		90	0.90	4.20	25.26		
DC1	7.5%	28	2.58	8.44		0.045	8 mm
		28*	2.61	9.83	22.2	0.154	8 mm
DC2	7.5%	28	3.05	12.54		0.031	8 mm
		28*	3.12	12.95	19.2	0.137	8 mm
DC3	7.5%	28	2.10	6.60			8 mm
		90	2.40	10.10			
M1f	10%	28	2.70	11.60	20.87		1.19 mm
		90	3.20	21.20	20.14		
M1c	10%	28	3.00	14.30	22.03		4 mm
		90	3.70	24.40	17.52		
ένεμα 1	12%	28	1.60	4.20			0.8 mm
		90	2.10	8.00			
ένεμα 2	30%	28	1.50	3.20			χωρίς άμμο
		90	2.50	7.80			

Η περιεκτικότητα σε τσιμέντο αναφέρεται στο συνολικό βάρος (δηλ. συμπερ. αδρανή)

* συντήρηση στο εργαστήριο και όχι σε υγρό θάλαμο

** μέγιστος κόκκος άμμου & αδρανών στο αντίστοιχο κονίαμα / ένεμα

(α) Οι τιμές αντοχών της σύνθεσης αναφοράς M2f, η οποία είναι ασβεστοποζολανική με μια μάλλον χονδρόκοκκη ποζολάνη, ιδίως δε η εφελκυστική αντοχή αυτής, δεν κρίνονται επαρκείς για επισκευή ιστορικών τοιχοποιιών. Επιπλέον, η σύνθεση αυτή αποδείχθηκε εξαιρετικά ευάλωτη σε δοκιμές ανθεκτικότητας (Βιντζηλαίου κ.α. 2008). Η διαπίστωση αυτή ενισχύει την άποψη ότι απαιτείται μια ελάχιστη περιεκτικότητα σε τσιμέντο για την ενίσχυση της μικροδομής έναντι των αναπτυσσόμενων τάσεων λόγω περιβαλλοντικών δράσεων και ενανθράκωσης του ίδιου του υλικού.

(β) Το εύρος των αντοχών που μπορούν να επιτευχθούν φαίνεται από τη μετρηθείσα θλιπτική αντοχή των 24 MPa (M1c), η οποία, αν και δεν είναι συμβατή με μια ιστορική τοιχοποιία, δείχνει τις ευρύτερες δυνατότητες των τριμερών συνθέσεων (για διάφορες εφαρμογές).

(γ) Ας παρατηρηθεί στη θέση αυτή ότι οι εφελκυστικές αντοχές από κάμψη ορισμένων συνθέσεων είναι συγκρίσιμες (π.χ. DC2 έναντι M1f) παρά τη διαφορετική σύνθεση και ποιότητα άμμου και αδρανών. Επιβεβαιώνεται, ότι η ποιότητα και κοκκοδιαβάθμιση των αδρανών επηρεάζουν τις αντοχές (και το πορώδες), και συνεπώς αποτελούν σημαντικά εργαλεία για την προσαρμογή και βελτιστοποίηση των συνθέσεων.

(δ) Από τη σύγκριση συνθέσεων στις οποίες χρησιμοποιούνται πυριτικά αδρανή σύμφωνα με πρότυπη κοκκομετρία (DC1-2) όσο και τοπικά αδρανή με κοκκοδιαβάθμιση παραπλήσια του αντίστοιχου ιστορικού κονιάματος καθώς και χονδρόκοκκη ποζολάνη (DC3) δείχνεται ότι είναι δυνατή η χρήση των τοπικών αδρανών και κοκκοδιαβαθμίσεων ενώ η συνακόλουθη σχετική πτώση των αντοχών μπορεί να αντισταθμιστεί, εάν είναι επιθυμητό, από την κατάλληλη προσαρμογή του συνδετικού υλικού.

(ε) Ο βέλτιστος λόγος υδρασβέστου προς ποζολάνη εξαρτάται από τη λεπτότητα της ποζολάνης (DC1 έναντι DC2).

(στ) Από την παράθεση των μετρήσεων συστολής ξήρανσης δείχνεται ότι οι τριμερείς συνθέσεις είναι σχετικά ευάλωτες στις συνθήκες συντήρησης.

(ζ) Ποσοστό τσιμέντου 30% κ.β. είναι αρκετό για την ανάπτυξη ενεμάτων με απαιτήσεις διεισδυτικότητας σε κενά συμβατικής διαμέτρου 0.3mm (ένεμα 2). Με αλλαγή των απαιτήσεων διεισδυτικότητας, το ποσοστό αυτό διαφοροποιείται (ένεμα 1). Το αντίστοιχο ποσοστό στα κονιάματα μπορεί να φτάσει και το 5% (επί του συνολικού ξηρού βάρους της σύνθεσης).

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τριμερείς συνθέσεις υδρασβέστου – ποζολάνης – τσιμέντου μπορούν, με τον κατάλληλο σχεδιασμό, να αναπτύξουν μια ποικιλία μηχανικών αντοχών και μικροδομικών χαρακτηριστικών, να προσαρμοστούν στις τοπικές περιβαλλοντικές συνθήκες και υλικά. Κατά συνέπεια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση για το σχεδιασμό υλικών επισκευής ιστορικών τοιχοποιιών επειδή ικανοποιούν τις τρεις δέσμες απαιτήσεων σχεδιασμού (ανθεκτικότητα, δομική επιτελεστικότητα, αναφορά σε τοπικές ιστορικές τεχνολογίες υλικών).

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Adami C.E., Vintzileou E. & Toumbakari E.-E., “Investigation of the bond mechanism between stones or bricks and grouts”, in Proceedings Intern.Conference on “Structural Analysis of Historical Constructions” (New Delhi 6-8 November 2006), MacMillan India Ltd (2006) 723-730.

Bartos P., Groot C., Hughes J. eds, Proceedings International RILEM Workshop "Historic Mortars: Characteristics and Tests", (Paisley, Scotland 12-14 May 1999) RILEM Publ. PRO12 (2004)

Binda L., Baronio G. & Tiraboschi C., “Repair of brick-masonries by injection of grouts, experimental research”, J. of Structural Engineering, Vol. 20, No 1 (1993α) 29-44.

Binda L., Modena C. & Baronio G., “Strengthening of Masonries by Injection Technique”, in Proceedings 6th North American Masonry Conference, Philadelphia, (1993β) 1-14.

Βιντζηλαίου Ε., Τουμπακάρη Ε.Ε., Αδάμη Χ., “Διεξαγωγή δοκιμών για την ανάπτυξη ενός κονιάματος επισκευής συμβατού με τα υπάρχοντα λιθοσώματα στο ναό της Αφροδίτης στην Αμαθούντα της Κύπρου”, Αθήνα, ερευν.πρόγραμμα ΕΩΣ/ΕΜΠ-Γαλλικής Αρχαιολογικής Σχολής Αθηνών, (2008) (σε εξέλιξη)

Bouineau A., « Renforcement des maçonneries par injection de coulis », in Proceedings Vth Intern.Congress on Deterioration & Conservation of Stone, Lausanne (1985) 939-947.

Groot C. G.Ashall and J. Hughes eds, “Characterisation of Old Mortars with Respect to their Repair”, RILEM TC 167-COM, *in press*.

ICCROM, «Mortars, cements and grouts used in the conservation of historic buildings», Proceedings of International Symposium (Rome 3-6 November 1981), Rome (1982)

Μαλαμή Χ., “Για την ποζολάνη Αντιμάχειας και τις δοκιμαστικές συνθέσεις κονιαμάτων επισκευής του κάστρου Del Caretto στην Κω”, Αθήνα, Τεχνική Μελέτη ΕΚΕΤ (2001)

Μαλαμή Χ., “Υλικά και συνθέσεις κονιαμάτων για την επισκευή κάστρου Del Caretto στην Κω”, Αθήνα, Τεχνική Μελέτη ΕΚΕΤ (2004).

Moropoulou, A., Bakolas, A., Bisbikou, K., “Characterization of ancient, byzantine and later historic mortars by thermal analysis and X-ray diffraction techniques”, *Thermochimica Acta*, 269/270 (1995) 779-795

Moropoulou, A., Bakolas, A., “Range of acceptability limits of physical, chemical and mechanical characteristics deriving from the evaluation of historic mortars”, PACT, J. European Study Group on Physical, Chemical, Biological and Mathematical Techniques Applied to Archaeology, 56 (1998) 165-178

Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas, P., “Criteria and methodology for restoration mortars compatible to the historic materials and structures”, in Proc. 9th Int. Symp. Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Venice (2000) 403-412

Moropoulou, A., Bakolas, A., Moundoulas, P., Avdelidis, N.P., «Evaluation of compatibility between restoration mortars and traditional building materials by the control of the microstructure», in Proc. «Conoscenze e Sviluppo di Criteri per la Definizione e Valutazione della Compatibilità nelle Malte per il Restauro», *Scienza e Beni Culturali*, Bressanone (2000) 71-78

Papayianni I., “A diachronic principle in construction: the use of mixed type binders – Durability aspects”, in Proceedings J.C.Cabrera Symposium on “Durability of Building Materials”, Bangkok, (1998) 115-129.

Penelis G., Karaveziroglou M. & Papayianni I., “Grouts for Repairing and Strengthening Old Masonry Structures” in Proceedings Intern.Conference on "Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings-STREMAH I", Computational Mechanics Publ., Florence (1988) 179-188.

Tomazevic M., Weiss P. Velechovsky T. & Apih V., "The strengthening of stone masonry walls with grouting", in Proceedings Intern.Conference on "Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings-STREMAH II", Computational Mechanics Publ., Barcelona (1991) 215-225.

Τουμπακάρη Ε.-Ε. & Παπαδόπουλος Χ., "Σχεδιασμός υλικών επισκευής για τον Προμαχώνα Del Caretto του Κάστρου της Κω", Αθήνα, Τεχνική Μελέτη (2004)

Toumbakari, E.-E. "Lime-pozzolan-cement grouts and their structural effects on composite masonry walls", Διδακτορική Διατριβή (υπό την επίβλεψη των Καθ. D.Van Gemert & Θ.Π.Τάσιου), Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Katholieke Univ.Leuven, Leuven (2002)

Valuzzi M.R., "Consolidamento di murature in pietra – Iniezioni di calce idraulica naturale", Διδακτορική Διατριβή (υπό την επίβλεψη του Καθ. C.Modena), Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Univ.Padova (2000)

Vintzileou E. & Tassios T.P., "Three-leaf stone masonry strengthened by injecting cement grouts", J. of Structural Engineering, Vol. 121, No 5 (1995) 848-856

Vintzileou E., "The effect of deep rejoining on the compressive strength of brick masonry", Masonry International, Vol. 15, No 1 (2001) 8-12.