

# ΕΝΕΜΑΤΑ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΑΣΒΕΣΤΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΣΚΕΥΗ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Άννα Καλαγρή,

*MSc Χημικός Μηχανικός, ΥΠ.ΠΟ/ Διεύθυνση Τεχνικών Ερευνών Αναστήλωσης*

Ανδρονίκη Μιλτιάδου – Fezans,

*Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, ΥΠ.ΠΟ/ Διεύθυνση Τεχνικών Ερευνών Αναστήλωσης*

Ελισάβετ Βιντζηλαίου,

*Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Αν. Καθηγήτρια, ΕΜΠ/ Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος*

*Λέξεις κλειδιά: Ένεμα, υδραυλική άσβεστος, τρίστρωτη τοιχοποιία*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Η παρούσα εργασία έχει στόχο τον σχεδιασμό και την επιλογή κατάλληλων συνθέσεων ενεμάτων για την ενίσχυση ιστορικών κατασκευών από λιθοδομή. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα προβλήματα ασυμβατότητας μεταξύ των υπαρχόντων υλικών και των ενεμάτων, εξετάστηκαν συνθέσεις ενεμάτων με βάση την φυσική υδραυλική άσβεστος, καθώς επίσης και ένα τριμερές ένεμα υδρασβέστου, ποζολάνης και λευκού τσιμέντου σε χαμηλό ποσοστό. Η επιλογή των κατάλληλων συνθέσεων πραγματοποιήθηκε μετά από έλεγχο, τόσο των χαρακτηριστικών ενεσιμότητας (ρευστότητα, διεισδυτικότητα, σταθερότητα), όσο και των μηχανικών αντοχών (θλίψη, κάμψη) των ενεμάτων. Δοκίμια από τις βέλτιστες συνθέσεις υποβλήθηκαν σε δοκιμές ανθεκτικότητας στη δράση των αλάτων. Τέλος, οι βέλτιστες συνθέσεις ενέθηκαν σε κυλινδρικά δοκίμια τα οποία προσομοιώνουν το υλικό πλήρωσης τρίστρωτης τοιχοποιίας. Τα πειραματικά αποτελέσματα των μηχανικών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στα ενισχυμένα δοκίμια έδειξαν ότι όλα τα εξεταζόμενα μίγματα έχουν την ικανότητα να ενισχύουν ικανοποιητικά το υλικό πλήρωσης. Η προσπάθεια συσχέτισης των πειραματικών αποτελεσμάτων των μηχανικών δοκιμών οδήγησε στην εξαγωγή μια σχέσης μεταξύ της θλιπτικής αντοχής των ενισχυμένων κυλινδρικών δοκιμίων και της εφελκυστικής αντοχής των ενεμάτων.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εφαρμογή κατάλληλων υδραυλικών ενεμάτων αποτελεί πλέον μια συνήθη πρακτική για την επισκευή και ενίσχυση ρηγματωμένων και αποδιοργανωμένων αρχιτεκτονικών μελών ή κατασκευών από παλαιές λιθοδομές, ιδιαίτερα σε σεισμογενείς περιοχές. Η τεχνική αυτή

χρησιμοποιείται επίσης για την επί τόπου στερέωση τοιχογραφικού και ψηφιδωτού διακόσμου, ώστε να αποφεύγεται σε πολλές περιπτώσεις η αποτοίχιση και η επανατοποθέτησή του. Πρόκειται για μια μέθοδο η οποία μπορεί να είναι τεχνικά αποτελεσματική και ταυτόχρονα ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα από την άποψη των αναστηλωτικών αρχών, καθώς διαθέτει το μεγάλο πλεονέκτημα να μπορεί (σε συνδυασμό με κατάλληλα αρμολογήματα και σφραγίσεις) να εξασφαλίζει εκ νέου τη συνέχεια, συνοχή και αντοχή των αρχιτεκτονικών μελών, του διακόσμου ή του συνόλου των κατασκευών, χωρίς αλλοίωση της εξωτερικής μορφής και γεωμετρίας τους και χωρίς αλλαγή του φέροντος συστήματός τους. Δεδομένου όμως ότι πρόκειται για μια επέμβαση που δεν είναι αναστρέψιμη, τόσο το ένεμα όσο και ο τρόπος εφαρμογής του θα πρέπει να σχεδιασθούν κατάλληλα, έτσι ώστε να ικανοποιούνται όλες οι απαιτήσεις επιτελεστικότητας, συμπεριλαμβανομένης και αυτής της επανεπεμβασιμότητας. Οι απαιτήσεις τίθενται με βάση μια ολιστική θεώρηση της προς στερέωση κατασκευής και συμπεριλαμβάνουν την ενεσιμότητα, τις αντοχές και την ανθεκτικότητα.

Τα ενέματα με βάση τις υδραυλικές ασβέστους (σε συνδυασμό με ή χωρίς ποζολανικά υλικά) αποτελούν μια εναλλακτική λύση έναντι των σύνθετων ενεμάτων με βάση το τσιμέντο διότι οι υδραυλικές ασβέστοι είναι υλικά που ομοιάζουν περισσότερο με αυτά που απαντώνται σε μια ιστορική κατασκευή, ενώ παράλληλα μπορούν να αναπτύξουν ικανοποιητικές πρώιμες αντοχές. Παρά την μεγάλη τους σπουδαιότητα, είναι λιγότερες οι εργασίες που έχουν μελετήσει συστηματικά τέτοια ενέματα, τόσο ως προς τα ρεολογικά τους χαρακτηριστικά, όσο και ως προς την επιτελεστικότητά τους στην δομητική στερέωση των τοιχοποιιών (Valluzzi 2000).

Στην παρούσα μελέτη, μετά την αναγνώριση των πρώτων υλών, σχεδιάστηκαν συνθέσεις υδραυλικών ενεμάτων στερέωσης με βάση διάφορες υδραυλικές ασβέστους που διατίθενται στην ελληνική και στην παγκόσμια αγορά, καθώς και ένα τριμερές ένεμα λευκού τσιμέντου – υδρασβέστου – ποζολάνης με χαμηλό ποσοστό (30%κ.β) λευκού τσιμέντου ειδικών προδιαγραφών, έτσι ώστε να πληρούνται όλα τα βασικά χαρακτηριστικά ενεσιμότητας (διεισδυτικότητα, ρευστότητα, σταθερότητα).

Για τον σκοπό αυτό έγινε παραμετρική διερεύνηση για τον προσδιορισμό του εκάστοτε βέλτιστου ποσοστού νερού με ή χωρίς παρουσία ρευστοποιητικών προσθέτων. Με τον τρόπο αυτό επιλέχθηκαν οι βέλτιστες συνθέσεις οι οποίες στη συνέχεια εξετάστηκαν αφενός ως προς την ανθεκτικότητά τους σε περιβάλλον με υψηλή συγκέντρωση θεικών και αφετέρου ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά, τόσο του ενέματος, όσο και ενισχυμένων με αυτό μικτών δοκιμίων (κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου  $D \sim 25\text{cm}$ , ύψους  $L \sim 50\text{cm}$ ), που προσομοιώνουν το υλικό πλήρωσης τρίστρωτης τοιχοποιίας. Για μεν το ένεμα προσδιορίστηκε η αντοχή σε θλίψη και κάμψη σε διάφορες ηλικίες σκλήρυνσης, για δε τους κυλίνδρους του υλικού πλήρωσης προσδιορίστηκε η αντοχή σε θλίψη πριν απ' την εφαρμογή ενεμάτων και 6 μήνες μετά από την εφαρμογή τους. Τα

πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι με τα υλικά αυτά επιτυγχάνονται: α) συνθέσεις ενεμάτων με παρόμοια χαρακτηριστικά ενεσιμότητας, αποδεκτή ανθεκτικότητα και ποικίλες αντοχές και β) ικανοποιητική ενίσχυση του υλικού πλήρωσης της τοιχοποιίας για όλες τις συνθέσεις που δοκιμάστηκαν.

## 2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΝΕΜΑΤΩΝ

Στην παρούσα εργασία, ο σχεδιασμός των ενεμάτων υδραυλικής ασβέστου έγινε με στόχο να εξασφαλιστεί υψηλή ενεσιμότητα, υπό χαμηλή πίεση, σε ρωγμές και κενά εύρους μερικών δεκάδων του χιλιοστού ( $W_{nom} \sim 200 \mu m$ ). Για τον σκοπό αυτό εξετάστηκαν συστηματικά τα χαρακτηριστικά ρευστότητας, διεισδυτικότητας και σταθερότητας των αιωρημάτων, για διάφορους λόγους νερού/στερεά, με ή χωρίς τη χρήση ρευστοποιητικών προσμίκτων (Miltiadou 1990). Ο έλεγχος της διεισδυτικότητας πραγματοποιήθηκε με χρήση της πρότυπης δοκιμής της στήλης άμμου (NF P18-891), οι δε έλεγχοι της ρευστότητας και της σταθερότητας πραγματοποιήθηκαν με βάση τα πρότυπα NF P18-358 και NF P18-359. Επιπρόσθετα, εξετάστηκε και ένα τριμερές ένεμα με χαμηλό ποσοστό τσιμέντου (30% λευκό τσιμέντο Δανίας, 25% υδράσβεστος σκόνη, 45% φυσική ποζολάνη, 1% ρευστοποιητής).

Για την ανάμιξη των υλικών χρησιμοποιήθηκε αναμικτήρας υπερήχων σε συνδυασμό με μηχανική ανάδευση. Ο χρόνος ανάμιξης ήταν 3 min για τα ενέματα της υδραυλικής ασβέστου και 6 min για το τριμερές ένεμα (2 min/στερεό συστατικό).

Τα κριτήρια ενεσιμότητας τα οποία ετέθησαν για την επιλογή των βέλτιστων συνθέσεων ήταν: α) χρόνος ροής ( $T_{36}$ ) στη στήλη άμμου  $< 50$  sec, β) χρόνος εκροής ( $t_{d=4,7mm}$ ) των 500ml ενέματος από τον κώνο Marsh, διαμέτρου οπής στομίου 4,7mm,  $< 45$  sec και δείκτης ρευστότητας  $> 0,7 \times 10^3$  mm/sec, (Miltiadou & Tassios 2007). Ως μέγιστη αποδεκτή τιμή της εξίδρωσης ετέθη το 5%.

Οι πρώτες ύλες οι οποίες επιλέχθηκαν για την εν λόγω μελέτη ήταν τέσσερεις υδραυλικές άσβεστοι (NHL5 της St. Astier, Chaux Blanche της Lafarge, Calx Romana της IAR και Albaria Calce Albazzana της Degussa) και ένα προαναμεμιγμένο ενέσιμο υλικό με βάση την υδραυλική άσβεστο (Unilit B Fluid 0/0 της Unilit). Από τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης των πρώτων υλών με λείζερ, προέκυψε ότι η διάμετρος κόκκων του 85% και 99% της στερεάς φάσης των ενεμάτων υδραυλικής ασβέστου ήταν  $< 40 \mu m$  ( $< W_{nom}/5$ ) και  $< 100 \mu m$  ( $< W_{nom}/2$ ) αντίστοιχα, τιμές οι οποίες ικανοποιούν τα κριτήρια κοκκομετρίας ώστε να εξασφαλίζεται η διείσδυση του ενέματος σε κενά και ρωγμές με ονομαστικό εύρος  $W_{nom} \sim 200 \mu m$  (Miltiadou & Tassios 2003).

Η αποτίμηση της επιτελεστικότητας των ενεμάτων έγινε με βάση: α) τα φυσικο-χημικά χαρακτηριστικά τους, β) τα χαρακτηριστικά ενεσιμότητας (ρευστότητα, διεισδυτικότητα, σταθερότητα) και τις μηχανικές ιδιότητες

τους (αντοχή σε κάμψη και θλίψη) και γ) την συμπεριφορά τους στη διαβρωτική δράση των αλάτων.

Πίνακας 1. Οι βέλτιστες συνθέσεις ενεμάτων από απόψεως ενεσιμότητας - Εξέλιξη των μηχανικών αντοχών τους στο χρόνο.

<b>ΤΡΙΜΕΡΕΣ ΕΝΕΜΑ</b>										
Λευκό τσιμέντο Δανίας	Υδρά- σβεστος (σκόνη)	Ποζο- λάνη ( $d_{max} < 75\mu m$ )	SP1 *	Νερό *	Αντοχή σε Θλίψη και Κάμψη (MPa)					
					Ηλικία (ημέρες)					
					28		90		180	
					$f_{gc}$	$f_{gt}$	$f_{gc}$	$f_{gt}$	$f_{gc}$	$f_{gt}$
G1: 30	25	45	1	80	4,08	2,11	8,16	2,29	10,6	3,13
<b>ΕΝΕΜΑΤΑ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΑΣΒΕΣΤΟΥ</b>										
<b>NHL5 (St Astier)</b>		<b>SP2</b>	<b>Νερό</b>							
G2:	100	1		80	2,82	1,90	4,50	2,52	6,36	3,87
G3:	100			80	2,06	1,10	4,88	1,75	6,00	2,70
<b>Chaux Blanche</b>		<b>SP3</b>								
G4:	100	0,7		80	3,10	1,65	4,67	2,19	6,72	1,05
<b>Calx Romana</b>										
G5:	100			70	2,25	1,51	3,04	1,39	2,88	1,08
<b>Albaria Calce Albazzana</b>										
G6:	100			70	1,69	1,02	2,60	0,88	2,49	0,65
<b>Unilit B Fluid 0/0</b>										
G7:	100			70	1,53	1,27	2,56	1,53	2,53	0,98

\* % της στερεάς φάσης του ενέματος. SP1, SP2 και SP3 ρευστοποιητές με βάση τα ναφθαλενοσουλφονικά, λιγνοσουλφονικά άλατα και τον πολυκαρβοξυλικό αιθέρα αντίστοιχα

Η θλιπτική αντοχή των επιλεγμένων συνθέσεων αυξάνεται γενικά με τον χρόνο ή παραμένει περίπου σταθερή (λ.χ. για τα ενέματα G5, G6 και G7). Η αντοχή σε κάμψη (προσδιορισμένη μέσω της δοκιμής κάμψης τριών σημείων) παρουσίασε μία ελάττωση για τις συνθέσεις ενεμάτων G5, G6 και G7. Η ελάττωση αυτή στην αντοχή μπορεί να οφείλεται στο φαινόμενο της ενανθράκωσης, η οποία οδηγεί σε μικρορηγματώση (Toumbakari 2002).

Σημειώνεται ότι στα δοκίμια των ενεμάτων G5, G6 και G7, παρατηρήθηκε, με εφαρμογή φαινολοφθαλεΐνης, σημαντική ενανθράκωση από τις 90 στις 180 ημέρες. Βέβαια, το φαινόμενο αυτό αναμένεται να περιοριστεί όταν το ένεμα εισαχθεί εντός της τοιχοποιίας.

Με βάση την θλιπτική αντοχή τους ( $f_{gc}$ ) σε ηλικία 6 μηνών, οι επιλεγμένες συνθέσεις ενεμάτων (Πιν. 1) μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες: α) τριμερές ένεμα ( $N/\Sigma=0,8$ ), με  $f_{gc}=10,6$  MPa και  $f_{gt}=3,1$  MPa, β) ενέματα υδραυλικής ασβέστου ( $N/\Sigma=0,8$ ), με  $f_{gc}$  6–6,7 MPa και  $f_{gt}$  1,0–3,9 MPa και γ) ενέματα υδραυλικής ασβέστου ( $N/\Sigma=0,7$ ), με  $f_{gc}$  2,5–2,9 MPa και  $f_{gt}$  0,6–1,1 MPa.

Δοκίμια από τις επιλεγμένες συνθέσεις υποβλήθηκαν σε δοκιμές ανθεκτικότητας στη δράση των αλάτων, ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία που αναφέρεται στη βιβλιογραφία (Tsui et al. 2003) (ελαφρώς τροποποιημένη λαμβάνοντας υπόψη τη φύση των ενεμάτων): σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 °C δοκίμια, σε ηλικία σκλήρυνσης 9 μηνών, εμποτίζονται με κορεσμένο διάλυμα μισαβιλίτη και ξηραίνονται για 6 έξι κύκλους στους 20 °C. Μετά τον 6<sup>ο</sup> κύκλο τα μισά από αυτά εμποτίζονται και ξηραίνονται στους 20 °C, ενώ τα υπόλοιπα ξηραίνονται στους 50 °C, μέχρι σταθερού βάρους. Ο Πίνακας 2 συνοψίζει τα αποτελέσματα των δοκιμών στους κύκλους των αλάτων, όπου γίνεται εμφανές ότι την καλύτερη συμπεριφορά επέδειξαν κατά σειρά τα ενέματα G2 (ένεμα της υδραυλικής ασβέστου NHL5) και G1 (τριμερές ένεμα).

Πίνακας 2. Μεταβολές βάρους (%) και κυρίαρχη μορφολογία φθοράς κατά τις δοκιμές ανθεκτικότητας στη δράση των αλάτων.

ENEMA	Μεταβολή βάρους μέχρι τον 6 <sup>ο</sup> κύκλο Ξήρανση στους 20°C	Μεταβολή βάρους από τον 7 <sup>ο</sup> έως τον 11 <sup>ο</sup> κύκλο. Ξήρανση στους 20°C (έως)	Μεταβολή βάρους από τον 7 <sup>ο</sup> έως τον 9 <sup>ο</sup> κύκλο. Ξήρανση στους 50°C (έως)
G1	33%	7% (αποστρογγύλευση ακμών)	8% (ρηγμάτωση)
G2	21%	-1,6% (αποστρογγύλευση ακμών)	-4% (αποστρογγύλευση ακμών)
G4	29%	-6,3% (αποκόλληση στρωμάτων)	-25% (έντονη αποκόλληση στρωμάτων και αποστρογγύλευση ακμών)
G5	13%	3,4% (αποστρογγύλευση ακμών)	Κατάρρευση του υλικού σε κομμάτια
G6	18%	4,6% (αποστρογγύλευση ακμών)	Κατάρρευση του υλικού σε κομμάτια

Μετά την ολοκλήρωση των εργασιών προσδιορισμού των βέλτιστων συνθέσεων ενεμάτων (ενεσιμότητα, αντοχές) οι συνθέσεις αυτές, οι οποίες παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά ενεσιμότητας (βλ. Πιν. 3),

ενέθηκαν υπό χαμηλή πίεση σε κυλινδρικά δοκίμια που προσομοιώνουν το υλικό πλήρωσης τρίστρωτης τοιχοποιίας.

Πίνακας 3. Χαρακτηριστικά ενεσιμότητας των βέλτιστων συνθέσεων

ENEMA	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7
T <sub>36</sub> (sec) – Στήλη άμμου 1,25/2,50 mm (κενά ~0,2-0,4 mm)	19	18	37	26	17	12	22
t <sub>d=4,7mm</sub> (sec) - 500ml ενέματος	21	22	26	24	22	23	22
Εξίδρωση	2%	2%	1%	1%	1%	1%	<1%
Δείκτης ρευστότητας (x10 <sup>3</sup> mm/sec)	1,15	0,99	0,76	0,81	1,04	1,00	0,99

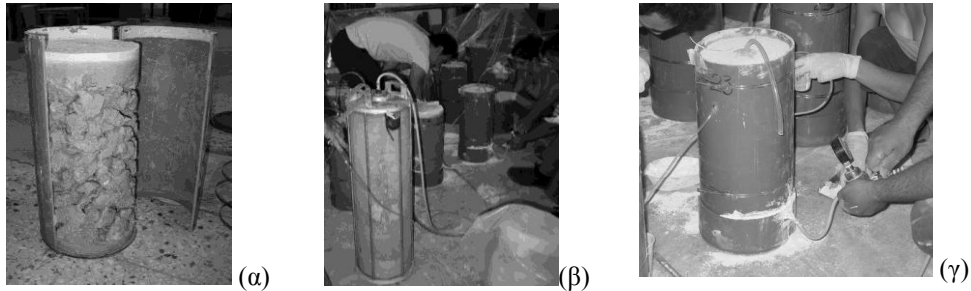
### 3. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΠΡΙΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΕΝΕΜΑΤΩΝ

Κυλινδρικά δοκίμια (D=25 cm, L=50cm) κατασκευάστηκαν σε πλαστικότυπους με ανάμιξη ασβεστοποζολανικού κονιάματος και τεμαχίων τραβερτίνη λίθου (μεγέθους: 20 έως 50 mm), σε κατάλληλη αναλογία, προκειμένου να επιτευχθούν κενά 40%. Η όλη διαδικασία για την κατασκευή των δοκιμίων ήταν παρόμοια με αυτήν που περιγράφεται σε σχετική βιβλιογραφία (Miltiadiou 1990).

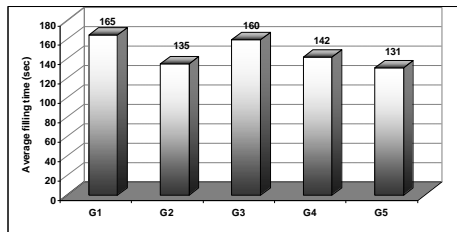
Όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4, μόνον τρεις (από σύνολο εικοσιοκτώ κυλίνδρων) δοκιμάστηκαν σε μονοαξονική θλίψη πριν την εφαρμογή των ενεμάτων, παρά το γεγονός ότι ο αρχικός σχεδιασμός προέβλεπε την δοκιμασία και των εικοσιοκτώ κυλίνδρων. Αφενός οι μεγάλες παραμορφώσεις (πλευρική διασταλτικότητα), οι οποίες δεν θα επέτρεπαν την επανατοποθέτηση των κυλίνδρων στους πλαστικότυπους, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η εφαρμογή των ενεμάτων και αφετέρου η μη αξιόπιστη μέτρηση των κατακόρυφων παραμορφώσεων λόγω της δυσκολίας τοποθέτησης μετρητικών οργάνων στους άθικτους κυλίνδρους [Εικ. 1(α)], οδήγησαν σε περιορισμό του αριθμού των κυλίνδρων, οι οποίοι δοκιμάστηκαν πριν απ' την εφαρμογή ενεμάτων. Η αρχική θλιπτική αντοχή του υλικού πλήρωσης ήταν κατά μέσο όρο ίση με 0,15N/mm<sup>2</sup>.

Στη συνέχεια, τα δοκίμια (τοποθετημένα μέσα στα καλούπια) ενέθηκαν υπό χαμηλή πίεση ~0,75bar, με χρήση ειδικά κατασκευασμένου εξοπλισμού. Οι ενέσεις πραγματοποιήθηκαν από τους σωληνίσκους που ήταν τοποθετημένοι στο κάτω άκρο των καλουπιών, ενώ παράλληλα καταγράφονταν οι χρόνοι που απαιτήθηκαν μέχρι να εξέλθει το ένεμα από το άνω άκρο των κυλίνδρων, καθώς και η ποσότητα του ενέματος που

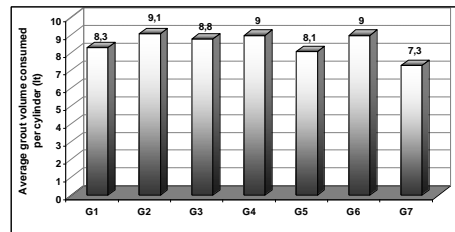
καταναλώθηκε σε κάθε κύλινδρο (Εικ. 2). Μετά την πάροδο 180 ημερών, οι ενισχυμένοι με τα ενέματα κύλινδροι υποβλήθηκαν στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.



Εικόνα 1. (α) Κύλινδρος πριν την εφαρμογή του ενέματος, (β) και (γ) διαδικασία εφαρμογής των ενεμάτων στους κυλίνδρους

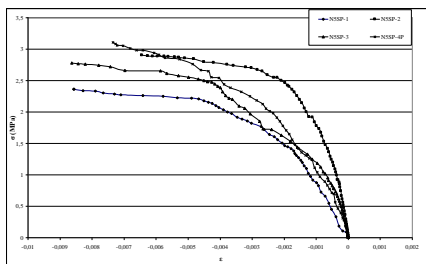


(α)

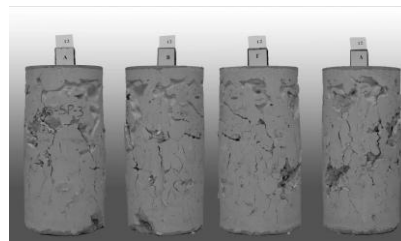


(β)

Εικόνα 2. (α) Χρόνος που απαιτήθηκε για την πλήρωση των κυλίνδρων με ένεμα (μέση τιμή), (β) Όγκος ενέματος που καταναλώθηκε σε κάθε κύλινδρο (μέση τιμή)



Εικόνα 3. Τυπικά διαγράμματα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων



Εικόνα 4. Μορφολογία της αστοχίας

Ο Πίνακας 4 συνοψίζει τα αποτελέσματα των μηχανικών δοκιμών στους ενισχυμένους με ενέματα κυλίνδρους, ενώ στην Εικόνα 3 παρουσιάζονται τυπικά διαγράμματα τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης. Η μορφολογία της

αστοχίας χαρακτηρίζεται κυρίως από τον σχηματισμό κατακόρυφων ρωγμών (Εικ. 4).

Πίνακας 4. Συνοπτική παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων δοκιμών σε ενισχυμένους με ενέματα κυλίνδρους όπως προέκυψαν από την παρούσα διερεύνηση.

Μηχανικές ιδιότητες:						
	Κυλίνδρων πριν την εφαρμογή του ενέματος	Ενέματος		Κυλίνδρων μετά την εφαρμογή του ενέματος		
	$f_c$ (MPa)	$f_{gc}$ (MPa)	$f_{gt}$ (MPa)	$f_{c,in}$ (MPa)	$E_{in}$ (GPa)	$\lambda_f$
G1	0,15	10,58	3,13	3,04	1,662	20,3
G2	0,15	6,36	3,87	2,79	1,683	18,6
G3	0,15	6,00	2,70	3,26	1,556	21,7
G4		6,72	1,05	3,25	2,097	
G5		2,88	1,08	2,65	1,928	
G6		2,49	0,65	2,26	1,355	
G7		2,53	0,98	2,01	0,618	

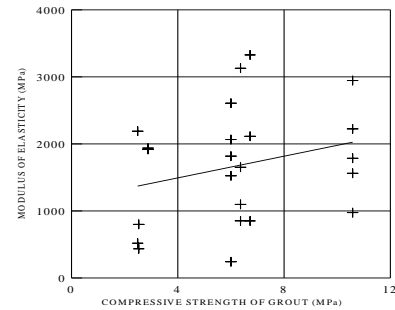
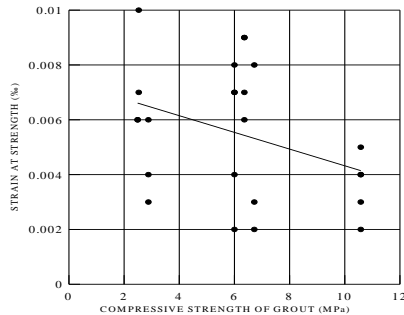
% κενά (Μ.Ο): G1 (7 κύλινδροι)= 39,5%, G2 (5 κύλινδροι)= 42,2%, G3 (6 κύλινδροι)= 41,30%, G4 (3 κύλινδροι)= 42,2%, G5 (3 κύλινδροι)= 38,1%, G6 (2 κύλινδροι)= 42,2%, G7 (2 κύλινδροι)= 35,5%

$f_c$ : Θλιπτική αντοχή κυλίνδρων πριν την εφαρμογή των ενεμάτων  
 $f_{gc}$  και  $f_{gt}$ : Αντοχή σε θλίψη και κάμψη του ενέματος  
 $f_{c,in}$  και  $E_{in}$ : Θλιπτική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας των κυλίνδρων μετά την εφαρμογή των ενεμάτων,  $\lambda_f = f_{c,in} / f_c$

Στην Εικόνα 5 μπορεί να παρατηρήσει κανείς ότι, γενικά, η παραμόρφωση η οποία αντιστοιχεί στην θλιπτική αντοχή των ενισχυμένων κυλίνδρων είναι μικρότερη για τα ενέματα των υψηλότερων αντοχών. Πράγματι, παρά την αναμενόμενη σχετικώς μεγάλη διασπορά των μετρούμενων τιμών της παραμόρφωσης (Εικ. 5), διαφαίνεται η τάση των ισχυρότερων ενεμάτων να παράγουν πιο άκαμπτο ενισχυμένο υλικό πλήρωσης. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στις Εικόνες 6 και 7, όπου το μέτρο ελαστικότητας (υπολογισμένο στο 1/3 της θλιπτικής αντοχής) και ο λόγος της ανηγμένης παραμόρφωσης προς την αντίστοιχη θλιπτική αντοχή, απεικονίζονται συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής του ενέματος. Ωστόσο, οι μετρούμενες τιμές του μέτρου ελαστικότητας δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές: Για θλιπτική αντοχή ενέματος η οποία κυμαίνεται μεταξύ των 2

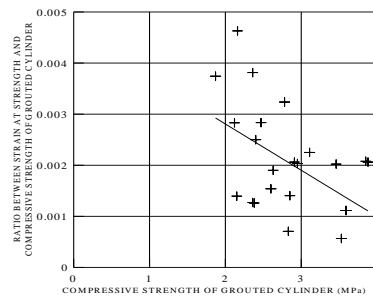


και 10 MPa, οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας κυμαίνονταν μεταξύ των 600 και 2000 MPa (Εικ. 6).



Εικόνα 5. Ανηγμένη παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην θραύση των ενισχυμένων κυλίνδρων, συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής του ενέματος

Εικόνα 6. Μέτρο ελαστικότητας των ενισχυμένων κυλίνδρων, συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής του ενέματος



Εικόνα 7. Λόγος της ανηγμένης παραμόρφωσης προς την θλιπτική αντοχή των ενισχυμένων κυλίνδρων συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής των ενισχυμένων κυλίνδρων

#### 4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΕΝΕΜΑΤΑ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Στην δημοσίευση των Vintzileou and Tassios (1995), παρουσιάζεται μια απλή σχέση [Εξ. (1)] η οποία επιτρέπει τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας μετά την ενίσχυση της με ενέματα. Η εξαγωγή της σχέσεως αυτής στηρίχθηκε στη παραδοχή ότι το ένεμα επηρεάζει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες κυρίως του υλικού πλήρωσης.

$$f_{wc,i} = f_{wc,0} \left( 1 + 1,25 \frac{V_i}{V_w} \frac{\sqrt{f_{gr,c}}}{f_{wc,0}} \right) \quad (1)$$

όπου,  $f_{wc,0}$  και  $f_{wc,i}$  η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας πριν και μετά την εφαρμογή του ενέματος,  $V_i$  και  $V_w$  ο όγκος του υλικού πλήρωσης και ο συνολικός όγκος της τοιχοποιίας, αντίστοιχα και  $f_{gr,c}$  η θλιπτική αντοχή του ενέματος

Σημειώνεται ότι στην Εξίσωση (1) εισάγεται η τετραγωνική ρίζα της θλιπτικής αντοχής του ενέματος, ως μέτρο της εφελκυστικής του αντοχής, καθώς τα πειραματικά αποτελέσματα των Vintzileou & Tassios (1995) και Miltiadiou-Fezans et al. (2006) έδειξαν ότι η αύξηση της αντοχής του υλικού πλήρωσης μετά την εφαρμογή των ενεμάτων (και, έτσι, η αύξηση συνολικά της αντοχής της τοιχοποιίας) είναι ανάλογη της εφελκυστικής αντοχής του ενέματος (Vintzileou 2007).

Παρά ταύτα, η Valluzzi (2000), με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών σε κυλινδρικά δοκίμια ενισχυμένα με ενέματα υδραυλικής ασβέστου, πρότεινε την ακόλουθη εμπειρική σχέση για την πρόβλεψη της θλιπτικής αντοχής του ενισχυμένου με ενέματα υλικού πλήρωσης, συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής του ενέματος:

$$f_{c,in} = 0,31 f_{gr,c}^{1,18} \quad (2)$$

όπου,  $f_{gr,c}$  η θλιπτική αντοχή του ενέματος και  $f_{c,in}$  η θλιπτική αντοχή των κυλίνδρων μετά την εφαρμογή των ενεμάτων

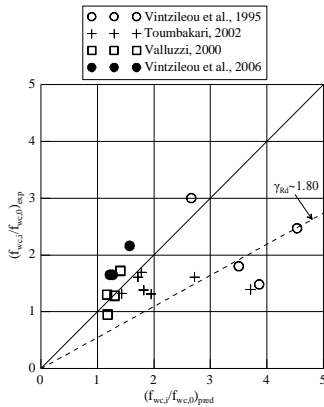
Η εφαρμογή της Εξίσωσης (1) δίνει εκτιμώμενες τιμές της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας μετά την εφαρμογή των ενεμάτων οι οποίες συσχετίζονται εν γένει ικανοποιητικά με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές. Αντιθέτως, η εφαρμογή της Εξίσωσης (2), σε συνδυασμό με την Εξίσωση (3) [η οποία αποτελεί την αρχική μορφή της Εξ. (1)], (Vintzileou 2007), εν γένει οδηγεί σε σημαντική υπερεκτίμηση της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας (βλ. Εικ. 8).

$$f_{wc,i} = f_{wc,0} \left( 1 + \frac{V_i}{V_w} \frac{f_{c,in}}{f_{wc,0}} \right) \quad (3)$$

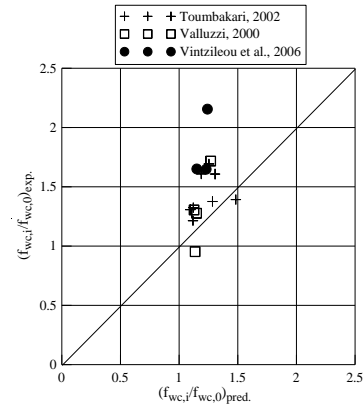
Αυτό επιβεβαιώνει την υπόθεση ότι ο τύπος της αστοχίας των ομοιωμάτων τριστρωτής τοιχοποιίας καθορίζεται μάλλον από την εφελκυστική αντοχή και την συνάφεια μεταξύ των υλικών παρά από την θλιπτική αντοχή του ενέματος. Πράγματι, εάν θέσουμε στην Εξίσωση (3) την θλιπτική αντοχή του ενισχυμένου υλικού πλήρωσης,  $f_{c,in}$ , υπολογισμένη από την Εξίσωση (2), η οποία προκύπτει βάσει όλων των διατιθέμενων δοκιμών σε κυλίνδρους υλικού πληρώσεως (Vintzileou 2007), οι προβλεπόμενες τιμές που προκύπτουν από την Εξίσωση (3) είναι σε καλή συμφωνία με τις πειραματικές (βλ. Εικ.9).

$$f_{c,in} = 1,60 + 0,50f_{gr,t} \quad (4)$$

όπου,  $f_{gr,t}$  η εφελκυστική αντοχή του ενέματος



Εικόνα 8. Σύγκριση των πειραματικών με τις προβλεπόμενες τιμές από τον συνδυασμό των Εξισώσεων (2) και (3)



Εικόνα 9. Σύγκριση των πειραματικών με τις προβλεπόμενες τιμές από τον συνδυασμό των Εξισώσεων (3) και (4)

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα πειραματικά αποτελέσματα από τις μηχανικές δοκιμές σε κυλινδρικά δοκίμια ενισχυμένα με διάφορες συνθέσεις ενεμάτων έδειξαν την ικανότητα όλων των εξεταζόμενων συνθέσεων να ενισχύουν ικανοποιητικά το υλικό πλήρωσης, παρά τις διαφορές στις μηχανικές ιδιότητες τους. Συγκεκριμένα, για συνθέσεις ενεμάτων των οποίων η θλιπτική αντοχή κυμαινόταν μεταξύ των 2 και 10 MPa, η θλιπτική αντοχή των ενισχυμένων κυλίνδρων προέκυψε μεταξύ των 2 και 3,3 MPa. Οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας των ενισχυμένων με ενέματα κυλίνδρων κυμάνθηκε από 0,6 έως 2 GPa, δείχνοντας καλή συμφωνία με άλλα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα τα οποία αναφέρονται στη βιβλιογραφία (Valluzzi 2000). Τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας εργασίας καταδεικνύουν ότι τα ενέματα χαμηλής και μεσαίας θλιπτικής αντοχής μπορούν να εξασφαλίσουν ικανοποιητική ενίσχυση του υλικού πλήρωσης. Οι καθοριστικές ιδιότητες για την βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων της τοιχοποιίας είναι κυρίως η εφελκυστική αντοχή του ενέματος, όπως επίσης, και η συνάφεια μεταξύ του ενέματος και των υπαρχόντων υλικών.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλονται στο επιστημονικό και τεχνικό προσωπικό της Διεύθυνσης Τεχνικών Ερευνών Αναστήλωσης (Υπουργείο Πολιτισμού) καθώς και στο προσωπικό του Εργαστηρίου Ωπλισμένου Σκυροδέματος

(Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο) που συμμετείχε σε όλα τα στάδια της πειραματικής διαδικασίας. Το έργο είναι ενταγμένο στο Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΣ» και χρηματοδοτείται κατά 75% από Κοινοτικούς Πόρους και 25% από Εθνικούς Πόρους.

#### ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Miltiadou, A., «Etude des coulis hydrauliques pour la réparation et le renforcement des structures et des monuments historiques en maçonnerie», PHD Th., ENPC Pub. in 1991 by LCPC ISSN 1161-028X, Paris, France (1990)

Miltiadou-Fezans, A. & Tassios, T.P., «Penetrability of Hydraulic Grouts in Structural Strengthening», in Proceedings of Structural research. Anniversary volume honouring Peter Lenkei (ed. Dr. Barsony), University of Pecs, Hungary (2003)

Miltiadou-Fezans, A., Vintzileou, E., Papadopoulou, E. & Kalagri, A., «Mechanical properties of three-leaf stone masonry after grouting», in 5th International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi, India (2006)

Miltiadou, A. & Tassios, T.P., «Fluidity of hydraulic grouts for masonry – strengthening», in Int. Symposium Studies on Historical Heritage, 17-21 September, Antalya, Turkey (2007)

Normes Françaises P18-358 and P18-359, «Adjuvant pour bétons, mortiers et coulis - Coulis courants d'injection pour précontrainte - Mesure de la fluidité et de la réduction d'eau - Mesure de l'exsudation» Paris, France, (1985), 8pp+4pp.

Norme Française P18-891, «Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique - Produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques pour injections dans des structures en béton - Essai d'injectabilité à la colonne de sable en milieu sec et/ou humide» Paris, France, (1992), 12pp

Toumbakari, E.E., «Lime-Pozzolan-Cement grouts and their structural effects on composite masonry walls», PHD Thesis, Department of Civil Engineering, KULeuven (2002)

Tsui, N., Flatt, R. J. & Scherer, G. W., «Crystallization damage by sodium sulphate», Journal of Cultural Heritage, Vol. 4, (2003)109-115

Valluzzi, M.-R., «Comportamento meccanico di murature storiche consolidate con materiali e tecniche a base di calce», PHD Th., Univ. of Trieste (2000)

Vintzileou, E., & Tassios, T.P., «Three leaf stone masonry strengthened by injecting cement grouts», Journal of Structural Engineering, ASCE, 121(5), (1995) 848 - 856

Vintzileou, E., «Grouting of three-leaf masonry: Experimental results and prediction of mechanical properties», in Proceedings of Seminar CIAS, Cyprus (2007)