



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ & ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

ΤΕΛΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ:

**“Αποτίμηση απόκρισης σε σεισμικές δράσεις δομικών συνόλων με
φέρουσα τοιχοποιία από οπτόπλινθους με συνδετικό υλικό κονιάματα
παραδοσιακού τύπου – Προδιαγραφές κατάλληλων υλικών”**

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΥΠΕΥΘΥΝΗ:

ΚΑΘ. Ε.Μ.Π. Α. ΜΟΡΟΠΟΥΛΟΥ

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΟΜΑΔΑ:

**ΜΠΑΚΟΛΑΣ ΑΣΤΕΡΙΟΣ, Διδ. Ε.Μ.Π.
ΑΓΓΕΛΑΚΟΠΟΥΛΟΥ ΕΛΕΝΗ, Μ.Δ.Ε. Προστασία Μνημείων, Υπ. Διδ. Ε.Μ.Π.**

ΣΥΝΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟΙ ΤΟΜΕΙΣ

Τομέας Δομοστατικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας - Καθ. Π. Καρύδης,

Εργαστήριο Στατικής και Αντισεισμικών Ερευνών - Καθ. Κ. Συρμακέζης

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2004

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	Σελ.
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
1. ΥΛΙΚΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΤΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	6
1.1. Πρώτες Ύλες.....	6
1.2. Σχεδιασμός κονιαμάτων αποκατάστασης.....	14
1.3 Παρασκευή και συντήρηση σκυροδεμάτων αποκατάστασης.....	18
1.4 Τεχνικές αποτίμησης - μελέτης των χαρακτηριστικών των σκυροδεμάτων αποκατάστασης	22
2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	32
2.1. Μικροσκόπιο οπτικών ινών.....	32
2.2. Μηχανικές δοκιμές	36
2.3. Μέθοδος των υπερήχων	41
2.4. Θερμικές μέθοδοι.....	43
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	45
5. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	47
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	48

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα τεχνική μελέτη αφορά στην Τελική Τεχνική Έκθεση του Ερευνητικού προγράμματος “Αποτίμηση απόκρισης σε σεισμικές δράσεις δομικών συνόλων με φέρουσα τοικοποιία από οπτόπλινθους με συνδετικό υλικό κονιάματα παραδοσιακού τύπου – Προδιαγραφές κατάλληλων υλικών” όπως αναφέρεται στην σύμβαση μεταξύ Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, Επιστημονικά Υπεύθυνη Καθ. Α. Μοροπούλου και συνεργαζόμενο τομέα, τον Τομέας Δομοστατικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., (Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας - Καθ. Π. Καρύδης, Εργαστήριο Στατικής και Αντισεισμικών Ερευνών - Καθ. Κ. Συρμακέζης) και του Οργανισμού Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ). Το παρόν ερευνητικό πρόγραμμα στοχεύει στη αποτίμηση απόκρισης σε σεισμικές δράσεις δομικών συνόλων με φέρουσα τοικοποιία από οπτόπλινθους με συνδετικό υλικό κονιάματα παραδοσιακού τύπου.

Η τελική τεχνική έκθεση αναφέρεται:

- στην μελέτη της επίδρασης της φύσης των αδρανών (κεραμικά, άμμος, γαρμπίλι) και της επίδρασης της φύσης της συνδετικής ύλης (αερίκος ασβέστης, υδραυλικός ασβέστης, ποζολάνα) στα τελικά φυσικοχημικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των κονιαμάτων όπως προέκυψε σαν αναγκαιότητα από την πρώτη τεχνική έκθεση (Σχολή Χημικών Μηχανικών, Τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, Καθ. Α. Μοροπούλου)
- στα χαρακτηριστικά μικροδομής, εξέλιξης των χημικών αντιδράσεων και των μηχανικών αντοχών για διαφορετικούς τύπους παραδοσιακών κονιαμάτων (Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, Καθ. Α. Μοροπούλου)
- στην συμπεριφορά σε στατική καταπόνηση πιλοτικών τοικοποιιών από συμπαγή τούβλα και παραδοσιακού τύπου κονιάματος (Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας Δομοστατικής, Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας - Καθ. Π. Καρύδης)
- στην συμπεριφορά σε δυναμική καταπόνηση πιλοτικών τοικοποιιών από συμπαγή τούβλα και παραδοσιακού τύπου κονιάματος με χρήση σεισμικού προσομοιωτήρα (Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας

Δομοστατικής, Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας - Καθ. Π. Καρύδης)

- στην συμπεριφορά σε δυναμική καταπόνηση ιστορικής κατασκευής με χρήση προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων (Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας Δομοστατικής, Εργαστήριο Στατικής και Αντισεισμικών Ερευνών - Καθ. Κ. Συρμακέζης)

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το Ερευνητικό πρόγραμμα με τίτλο “Αποτίμηση απόκρισης σε σεισμικές δράσεις δομικών συνόλων με φέρουσα τοιχοποιία από οπτόπλινθους με συνδετικό υλικό κονιάματα παραδοσιακού τύπου – Προδιαγραφές κατάλληλων υλικών” αποτελεί ένα ολοκληρωμένο διεπιστημονικό πρόγραμμα για την αποτίμηση της απόκρισης σε σεισμικές δράσεις δομικών συνόλων με φέρουσα τοιχοποιία από οπτόπλινθους και αρμούς μεγάλου πάχους. Το παραπάνω πρόγραμμα αποτελείται από τρεις φάσεις:

1. Σχεδιασμός, παραγωγή, αποτίμηση φυσικοχημικών και μηχανικών χαρακτηριστικών κονιαμάτων με χονδρόκοκκα αδρανή (σκυρόδεμα) – Σχολή Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., Τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, Επιστημονικά Υπεύθυνη: Καθ. Α. Μοροπούλου
2. Κατασκευή πιλοτικών τοιχοποιιών με διαφορετικές συνθέσεις κονιαμάτων/σκυροδεμάτων, – Μελέτη στατικής και δυναμικής συμπεριφοράς – Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., Τομέας Δομοστατικής, Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Καθ. Π. Καρύδης
3. Δομοστατική μελέτη μιας ιστορικής κατασκευής χρησιμοποιώντας την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων - Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., Τομέας Δομοστατικής, Εργαστήριο Στατικής και Αντισεισμικών Ερευνών, Καθ. Κ. Συρμακέζης)

Τα αποτελέσματα των παραπάνω τριών φάσεων του ερευνητικού προγράμματος παρουσιάζονται στην παρούσα τελική έκθεση του προγράμματος.

1. ΥΛΙΚΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΤΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

1.1. Πρώτες Ύλες

Σύμφωνα με τις σύγχρονες αρχές για τις εργασίες αποκατάστασης ιστορικών μνημείων, προκειμένου να εξασφαλίσουμε τη συμβατότητα μεταξύ των αυθεντικών παραδοσιακών υλικών και των υλικών αποκατάστασης, πρέπει να χρησιμοποιούνται ανάλογα υλικά.

Με βάση την αρχή αυτή και σύμφωνα με τα κριτήρια αποδοχής που ήδη ορίστηκαν, επιλέχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν παραδοσιακές πρώτες ύλες η παραγωγή των οποίων προσεγγίζει τις παραδοσιακές τεχνικές παραγωγής. Για συγκριτικούς σκοπούς χρησιμοποιήθηκε σαν πρώτη ύλη και λευκό τσιμέντο.

Αερική Άσβεστος

Προτιμήθηκε σκόνη υδρασβέστου, αντί πολτού υδρασβέστου, λόγω του ότι είναι πιο εύχρηστη και υπάρχει η δυνατότητα προσδιορισμού με ακρίβεια του νερού που απαιτείται για την ανάμιξη του σκυροδέματος. Χρησιμοποιήθηκε σκόνη υδρασβέστου από την 'ΜΑΚΕΔΟΝΙΚΗ ΑΣΒΕΣΤΟΠΟΙΙΑ', Θεσσαλονίκης.

Ο έλεγχος της συγκεκριμένης σκόνης υδρασβέστου συνίσταται στον χαρακτηρισμό της υδρασβέστου με θερμική ανάλυση (DTA-TG).

Τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης της αερικής ασβέστου περιγράφονται στον πίνακα 1.1, όπως προκύπτουν σαν μέσος όρος όλων των δειγμάτων ασβέστη που έχουν χρησιμοποιηθεί.

Πίνακας 1.1 Σύσταση αερικής ασβέστου

Σύσταση	Περιεκτικότητα %
Ca(OH)_2	81,71
CaCO_3	12,35
Mg(OH)_2	2,72
H_2O	0,40

Υδραυλική Άσβεστος

Η σύσταση της ασβέστου παρατίθενται παρακάτω. Χρησιμοποιήθηκε υδραυλική άσβεστος τύπου NHL-Z 3,5 της εταιρείας Lafarge.

Πίνακας 1.2 Σύσταση και ιδιότητες υδραυλικής ασβέστου

Σύσταση	
CaO	65%
SiO ₂	12%
CO ₂	12%
H ₂ O	8%
Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	0,8%
MgO	0,5%
K ₂ O+Na ₂ O	0,2%
Θλιπτική αντοχή (28 ημέρες)	
7 Mpa	
Φαινόμενο ειδικό βάρος	
0,65 kg/dm ³	

Λευκό Τσιμέντο

Χρησιμοποιήθηκε λευκό τσιμέντο τύπου II/A 42,5 N ΕΛΣ (λευκό) της εταιρείας "TITAN". Η σύσταση και τα χαρακτηριστικά του παρατίθενται παρακάτω.

Πίνακας 1.3 Σύσταση και ιδιότητες λευκού τσιμέντου

Σύσταση	Κλίνκερ 80%
	Γύψος 3%
	Ασβεστόλιθος 17%
Ειδική Επιφάνεια (Blaine)	4300 cm ² /gr
SO ₃	3,2%
Λευκότητα	84%
LOI	8%
I.S.T.	75 min
H ₂ O	27%
Αντοχή 2 ημ.	27 Mpa
Αντοχή 7 ημ.	40 Mpa
Αντοχή 28 ημ.	53 Mpa

Ποζολανικά Πρόσμικτα

Μηλαϊκή Γη

Η προμήθεια της Μηλαϊκής γης που χρησιμοποιήθηκε έγινε από την εταιρεία "LAVA Α.Ε.

Για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του ποζολανικού αυτού υλικού έγιναν οι ακόλουθες αναλύσεις:

§ Ανάλυση περίθλασης ακτίνων X (XRD).

Από την ανάλυση αυτή προέκυψε ότι τα βασικά συστατικά στοιχεία που περιέχονται στην μηλαϊκή γη είναι κατά κύριο λόγο χαλαζίας και ανορθίτης.

Από το σχετικό φάσμα της ανάλυσης **XRD** προκύπτει ότι πρόκειται για άμορφο υλικό με μικρό ποσοστό κρυσταλλικών φάσεων πυριτικής σύστασης.

§ Ανάλυση Φθορισμού ακτίνων X (XRF).

Από την ανάλυση αυτή προέκυψαν τα αποτελέσματα που συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1.4 Χημική σύσταση και ιδιότητες μηλαϊκής γης

Σύσταση Μηλαϊκής γης
SiO₂ 69,66%
Al₂O₃ 12,21%
Fe₂O₃ 2,34 %
CaO 2,01%
MgO 0,70%
K₂O 3,28%
Na₂O 3,28%
LOI 7,35%
Ποζολανικότητα (Mpa) 6,7
Ενεργό πυρίτιο 55,51%
Πυκνότητα 2,36 gr/cm³

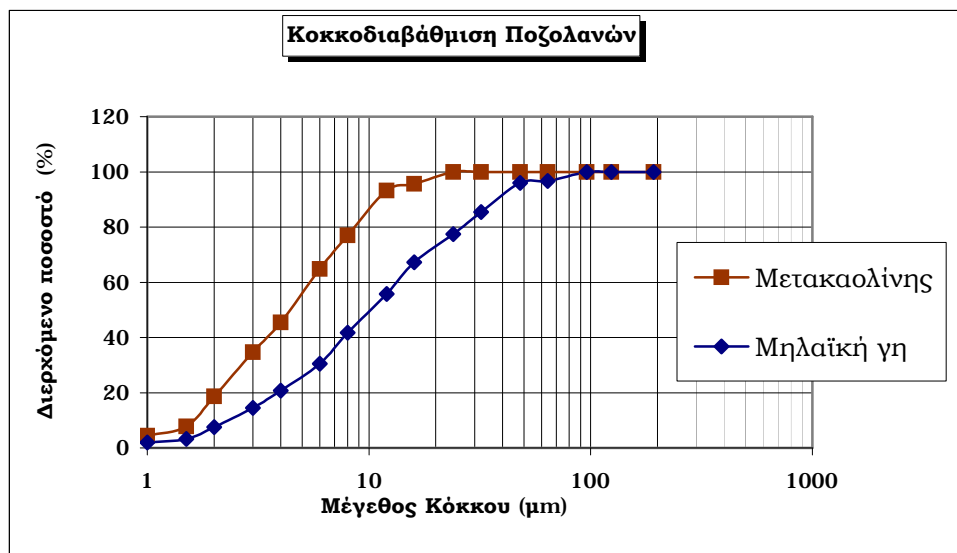
Μετακαολίνης

Η σκόνη μετακαολίνη παράγεται με κατεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες καλά αλεσμένου καολίνη. Η διαδικασία έψησης δίνει στον μετακαολίνη μια μορφή πολύ δραστική. Βελτιώνει τις ιδιότητες του σκυροδέματος επιταχύνοντας την ποζολανική αντίδραση, μειώνοντας ουσιαστικά την διαπερατότητα, προσφέροντας αντοχή σε επιθετικά διαλύματα. Χρησιμοποιήθηκε μετακαολίνης **MetaStar 501** της εταιρείας **IMERYS Minerals**. Τα χαρακτηριστικά του μετακαολίνη παρουσιάζονται στον πίνακα **1.5** ενώ στο *σχήμα 1.1* παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των ποζολανών.

Πίνακας 1.5 Χημική σύσταση & ιδιότητες μετακαολίνη

Ποζολανική δραστικότητα	950 mg δεσμευμένου Ca(OH)₂ /g ποζολάνης
Υγρασία	0,5%
Χρώμα	Λευκό
Ειδικό βάρος	0,3 gr/cm³
Ειδική Επιφάνεια	12 m²/gr
SiO ₂	51,70%
Al ₂ O ₃	40,6%
Fe ₂ O ₃	0,64%
CaO	0,71%
MgO	0,96%
K ₂ O	2,00%
Na ₂ O	0,31%
SO ₃	0,11%
LOI	1,19%
Πυκνότητα	2,52 gr/cm³

Σχήμα 1.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση της μηλαϊκής γης και του μετακαολίνη.



Αδρανή Υλικά Άμμος

1. Άμμος 1 (A1)

Άμμος χαλαζιακή ποταμίσια. Η άμμος διατίθενται σε 4 κοκκομετρίες <0,5, 0,5-1, 1-2, 3-6 mm. Η κοκκομετρική διαβάθμιση της άμμου A1 είναι:

Πίνακας 1.6 Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου A1

Διάμετρος κόσκινου (mm)	Συγκρατούμενο ποσοστό (%)			
	A1/3-6	A1/1-2	A1/0,5-1	A1/<0,5
4	82			
2	18			
1		100		
0,5			94	
0,25			6	51
0,125				49

2. Άμμος 2 (A2)

Πρόκειται για άμμο θραυστή λατομείου ασβεστολιθικής σύστασης της εταιρείας "TITAN".

Πίνακας 1.7 Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου A2

Διάμετρος κόσκινου (mm)	Συγκρατούμενο ποσοστό (%)
	A2/2-4
4	0
2	100

Φαινόμενο ειδικό βάρος: 2,71 t/m³

Μικτό ειδικό βάρος: 2,58 t/m³

Μικτό ειδικό βάρος εν κορεσμών: 2,62 t/m³

Μοναδιαίο βάρος (unit weight): 1,65 t/m³

Γαρμπίλι

Γαρμπίλι ασβεστολιθικής σύστασης της εταιρείας "TITAN", η κοκκοδιαβάθμιση του οποίου παρουσιάζεται παρακάτω:

Πίνακας 1.8 Κοκκομετρική διαβάθμιση για το γαρμπίλι

Διάμετρος κόσκινου (mm)	Συγκρατούμενο ποσοστό (%)
	16-1 mm
8	90
4	9
2	1

Φαινόμενο ειδικό βάρος: $2,72 \text{ t/m}^3$

Μικτό ειδικό βάρος: $2,65 \text{ t/m}^3$

Μικτό ειδικό βάρος εν κορεσμών: $2,68 \text{ t/m}^3$

Μοναδιαίο βάρος (unit weight): $1,36 \text{ t/m}^3$

Θραυσμένο Κεραμικό

Κεραμικό Κ1

Χρησιμοποιήθηκαν αδρανή από θραυσμένο κεραμικό προερχόμενα από συμπαγείς πλίνθους. Από τη χημική ανάλυση του πηλού προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

Πίνακας 1.9 Χημική ανάλυση πηλού

ΚΕΡΑΜΙΚΟ Κ1	
Na ₂ O	1,86%
K ₂ O	2,89%
CaO	1,59%
MgO	2,15%
Fe ₂ O ₃	6,6%
Al ₂ O ₃	12,4%
SiO ₂	64,2%
Απώλεια Βάρους	8,22%

Πίνακας 1.10 Χημική ανάλυση πηλού: % ποσοστό διαλυτών σε 0,1nHCl

ΚΕΡΑΜΙΚΟ Κ1	
Na ₂ O	0,04%
K ₂ O	0,06%
CaO	1,13%
MgO	0,62%
Fe ₂ O ₃	0,42%
Al ₂ O ₃	0,47%
SiO ₂	0,72%

Πίνακας 1.11 Χημική ανάλυση πηλού ποσοστών αλάτων

ΚΕΡΑΜΙΚΟ Κ1	
Χλωριούχα	0,04%
Νιτρικά	0,06%
Θειικά	1,13%

Πίνακας 1.12 Όρια Attemberg πηλού

ΚΕΡΑΜΙΚΟ Κ1	
Όριο υδαρότητας (W_L)	28,16%
Όριο πλαστικότητας (W_P)	23,7%
Δείκτης πλαστικότητας (I_P)	4,46%

Επομένως βάσει των ορίων **Attemberg** ο πηλός χαρακτηρίζεται ως ανόργανη άργιλος λίγο συμπιεστή.

Οι ιδιότητες των συμπαγών πλίνθων είναι:

Πίνακας 3.13 Ιδιότητες πλίνθων

Θλιπτική αντοχή (Mpa)	12
Καμπτική αντοχή (Mpa)	0,60
Πορώδες %	17,93
Ειδικό βάρος (t/m³)	1,79
Υδατοδιαλυτά άλατα SO₄⁻²%	0,067

Οι συμπαγείς πλίνθοι θραύτηκαν σε θραυστήρες. Τα θραύσματα κοσκινίστηκαν σε σειρά γερμανικών κόσκινων **DIN** διαμέτρων **16mm, 8mm, 4mm, 2mm, 1mm, 0,5mm, 0,25mm, 0,125mm**, και **0,0063mm**. Στην συνέχεια πλύθηκαν ώστε να απομακρυνθεί η παιπάλη και ξηράθηκαν σε κλίβανο μέχρι να στεγνώσουν πλήρως.

Κεραμικό Κ2

Χρησιμοποιήθηκε επίσης θραυσμένο κεραμικό που διατίθενται σε δύο κοκκομετρίες. Για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του έγιναν οι εξής αναλύσεις:

- § Ανάλυση περίθλασης ακτίνων X (**XRD**)
- § Ανάλυση φθορισμού ακτίνων X (**XRF**)
- § Θερμική ανάλυση (**DTA/TG**)
- § Πορομετρία υδραργύρου

§ Κοκκομετρική ανάλυση

§ Προσδιορισμός του φαινόμενου ειδικού βάρους επί ξηρού και επί κορεσμένου δείγματος

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων έχουν ως εξής:

Από την ανάλυση των δειγμάτων με χρήση περίθλασης ακτίνων X είναι χαρακτηριστική η παρουσία χαλαζία και ιλλίτη ενώ υπάρχουν σε μικρότερα ποσοστά ενώσεις ανορθίτη, αλβίτη και δολομίτη.

Από την ανάλυση των δειγμάτων με φθορισμό ακτίνων X προκύπτει η εξής σύσταση:

Πίνακας 1.14 Χημική ανάλυση

ΚΕΡΑΜΙΚΟ K2	
Na₂O	2,03%
K₂O	2,87%
CaO	3,54%
MgO	2,05%
Fe₂O₃	7,01%
Al₂O₃	19,47%
SiO₂	60,69%
LOI	5,02%

Από την θερμική ανάλυση μετράται συνολική απώλεια βάρους **0,53%** η οποία αντιστοιχεί στην εξώθερμη μετατροπής της στερεάς φάσης των αργιλικών ορυκτών.

Πίνακας 1.15 Αποτελέσματα ποροσιμετρίας υδραργύρου

ΚΕΡΑΜΙΚΟ K2	
Ολικός προσροφούμενος όγκος (mm ³ /g)	150,3
Ειδική επιφάνεια (m ² /g)	2,61
Μέση ακτίνα πόρων (μm)	0,59
Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm ³)	1,89
Διορθωμένη φαινόμενη πυκνότητα (g/cm ³)	2,64
Ολικό πορώδες %	28,4

Πίνακας 1.16 Ειδικό βάρος κεραμικού K2

ΚΕΡΑΜΙΚΟ K2	
Φαινόμενο ειδικό βάρος ξηρού (g/cm ³)	1,02
Φαινόμενο ειδικό βάρος κορεσμένου (g/cm ³)	1,12

Πίνακας 1.17 Κοκκομετρική διαβάθμιση κεραμικού Κ2

Διάμετρος κόσκινου (mm)	Συγκρατούμενο ποσοστό (%)	
	Κ2 0/4	Κ2 4/16
16	0	0
8	0	91,4
4	1,0	8,6
2	15,6	-
1	18,0	-
0,5	13,5	-
0,25	10,1	-
0,125	9,1	-
0,063	9,0	-
<0,063	23,7	-

1.2. Σχεδιασμός κονιαμάτων αποκατάστασης

Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος

Για τον σχεδιασμό της κοκκομετρικής καμπύλης των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν, ελήφθησαν υπόψη:

- § Το πάχος των αρμών της προς αποκατάσταση ιστορικής τοικοποιίας, που στην περίπτωση των μνημείων της πρώιμης Βυζαντινής περιόδου είναι $5 \div 6,5 \text{ cm}$ (Αγία Σοφία Κωνσταντινούπολης)
- § Το μεγαλύτερο αδρανές της Αγίας Σοφίας είχε διάσταση $1,5 \text{ cm}$
- § Η παρουσία των πιο χονδρόκοκκων αδρανών οφείλεται στο θραυσμένο κεραμικό.
- § Από το πάχος αρμών της εκάστοτε τοικοποιίας προσδιορίζεται ο μέγιστος απαιτούμενος κόκκος αδρανών ($\approx D_{max}/5$). Στην προκειμένη περίπτωση υπολογίζεται μέγιστος κόκκος $\approx 12\text{mm}$ (όπως προσδιορίζεται στα κριτήρια αποδοχής ιστορικών κονιαμάτων).
- § Η κοκκομετρική διαβάθμιση του ιστορικού κονιάματος της Αγίας Σοφίας στην Κωνσταντινούπολη [1].

Α' & Β' στάδιο παρασκευής

Στο δύο πρώτα στάδια μελετάται ο ρόλος των αδρανών στην συμπεριφορά του κονιάματος. Για το λόγο αυτό μελετώνται τρεις διαφορετικές συστάσεις/μίξεις αδρανών:

1. Άμμος-Γαρμπίλι (**Mix 1**)
2. Άμμος-Κεραμικό (**Mix 2**)
3. Κεραμικό (**Mix 3**)

Η αναλογία κονίας/αδρανών είναι **1/2,33 (30%-70%)**.

Σχεδιάστηκε η κοκκομετρική καμπύλη (Καμπύλη Α), κοινή και για τις τρεις μίξεις ώστε να προσομοιάζει αυτήν του ιστορικού κονιάματος της Αγίας Σοφίας. Οι αναλογίες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε ανάμιξη παρατίθενται στον πίνακα **1.18**.

Γ' στάδιο παρασκευής

Στο τρίτο στάδιο μελετάται ο ρόλος της φύσης της κονίας και των ποζολανικών προσμίκτων στην συμπεριφορά του σκυροδέματος. Για το λόγο αυτό μελετάται μία κοκκοδιαβάθμιση αδρανών με Άμμο-Κεραμικό (που στο εξής θα ονομάζεται **Mix 4**).

Η αναλογία κονίας/αδρανών είναι **1/2,33 (30%-70%)**.

Σχεδιάστηκε η κοκκομετρική καμπύλη (Καμπύλη Β), ώστε να προσομοιάζει αυτήν του ιστορικού κονιάματος της Αγίας Σοφίας.

Οι αναλογίες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν παρατίθενται στον πίνακα **1.19**.

Ακολουθούν παρακάτω: πίνακας με την κατανομή του μίγματος των αδρανών για τα δύο στάδια παρασκευής, καθώς και η κατανομή των αδρανών σε αθροιστική λογαριθμική κλίμακα σε σύγκριση με το ιστορικό κονίαμα της Αγίας Σοφίας και τα όρια της κοκκομετρικής διαβάθμισης μίγματος αδρανών μεγίστου κόκκου **16 mm** όπως περιγράφονται:

§ από τον ΚΤΣ για τυποποιημένα σκυροδέματα και για δύο σειρές κόσκινων (α) **DIN 4187** και **4188** και (β) **ASTM E11 [2]**,

§ και τα πρότυπα **DIN 4187** και **4188** ή **ΕΛΟΤ 408**

Πίνακας 1.19 Κατανομή αδρανών Α' & Β' παρασκευής και ιστορικού κονιάματος Αγίας Σοφίας

Διάμετρος κόσκινου (mm)	Συνολικό διερχόμενο ποσοστό %		
	Καμπύλη Α	Καμπύλη Β	Αγία Σοφία
16	100	100,0	100
8	91	86,3	91
4	68	73,2	70
2	48	57,7	52
1	32	43,4	37
0,5	20	32,1	26
0,25	9	21,4	14
0,125	0	11,4	8
0,063	0	8,1	0

Παρατηρήσεις

- § Οι κοκκομετρικές καμπύλες που προκύπτουν από τον σχεδιασμό βρίσκονται εντός των ορίων που περιγράφουν τα πρότυπα **DIN** (ΕΛΟΤ) και ο Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος. Ανεξάρτητα από αυτή την παρατήρηση, ουσιαστική σύγκριση δεν μπορεί να γίνει. Οι παραπάνω κανονισμοί αφορούν σε προτυποποιημένα υλικά με συγκεκριμένες προδιαγραφές ιδιοτήτων και ποιότητας. Για παράδειγμα ο ΚΤΣ αφορά σε σκυροδέματα που παρασκευάζονται με συνήθη λίθινα αδρανή ειδικού βάρους **2,40-3,00 t/m³** ενώ δεν αποτελούν αντικείμενό του σκυροδέματα που παρασκευάζονται με ελαφρύτερα ή βαρύτερα αδρανή. Οι παραπάνω κανονισμοί αφορούν σε σκυρόδεμα με συνδετική ύλη το τσιμέντο. Επομένως η σύγκριση των σκυροδεμάτων αποκατάστασης με τους παραπάνω κανονισμούς είναι απλά ενδεικτική για την ποιότητα της κοκκοδιαβάθμισης.
- § Σύμφωνα με την μέθοδο τη αντίστροφης μηχανικής προσέγγισης οι καμπύλη που πραγματικά ενδιαφέρει να εξετάσουμε είναι αυτή του ιστορικού κονιάματος της Αγίας Σοφίας. Από την σύγκριση των τριών αυτών κατανομών των αδρανών παρατηρούμε πως υπάρχει μια αρκετά καλή προσέγγιση της κατανομής των αδρανών του ιστορικού κονιάματος.

Επιλογή συνθέσεων

Ο σκοπός της εργασίας αυτής διττός. Να μελετηθεί η επίδραση: (α) της φύσης των αδρανών στην συμπεριφορά του σκυροδέματος, (β) του είδους της κονιάς στη συμπεριφορά του σκυροδέματος.

Για το σκοπό αυτό παρασκευάστηκαν:

Α. Δύο συνθέσεις με συνδετική ύλη ασβέστη και ποζολάνη Μηλαϊκή γη με την ίδια αναλογία ανάμιξης και για τις δύο συνθέσεις, και διαφορετικά αδρανή άμμο-γαρμπίλι (**Mix 1**) και άμμο-κεραμικό (**Mix 2**).

Β. Τρεις συνθέσεις με συνδετική ύλη ασβέστη και ποζολάνη μετακαολίνης με την ίδια αναλογία ανάμιξης και για τις τρεις συνθέσεις, και διαφορετικά αδρανή άμμο-γαρμπίλι, (**Mix 1**), άμμο-κεραμικό (**Mix 2**), και κεραμικό (**Mix 3**).

Γ. Τρεις συνθέσεις με διαφορετική συνδετική ύλη: ασβέστης, τσιμέντο, υδραυλική ασβεστος και χρήση ποζολάνης μετακαολίνη, αλλά με αδρανή κοινά ως προς τη φύση, την αναλογία και την κοκκομετρική διαβάθμιση και για τις τρεις συνθέσεις (**Mix 4**).

Αναλυτικά οι συνθέσεις που σχεδιάστηκαν και παρασκευάστηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα 1.20.

Πίνακας 1.20 Συνθέσεις – Υλικά και Αναλογίες

Στάδιο	Σύνθεση	Κονία			Ποζολανικό Πρόσμικτο		Αδρανή %	Λόγος Νερό/Κονία	Κάθιση (cm)
		Ασβέστης %	Τσιμέντο %	Υδραυλική Ασβεστος %	Μηλαϊκή γη %	Μετακαολίνης %			
A	I	10			20		Mix 1-70	0,54	1,30
A	II	10			20		Mix 2-70	0,70	0,80
B	III	15				15	Mix 1-70	0,73	2,60
B	IV	15				15	Mix 2-70	0,89	1,25
B	V	15				15	Mix 3-70	1,10	3,50
Γ	VI	20				10	Mix 4-70	0,87	2,85
Γ	VII	15	15				Mix 4-70	0,57	2,00
Γ	VIII			30			Mix 4-70	0,57	1,30

Αντικείμενο μελέτης αναλυτικά

1. Σύγκριση των συνθέσεων I και II με σκοπό την διερεύνηση της επίδρασης της φύσης των αδρανών στις μηχανικές αντοχές και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος.

2. Σύγκριση των συνθέσεων III, IV και V με σκοπό την διερεύνηση της επίδρασης της φύσης των αδρανών στις μηχανικές αντοχές και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος.
3. Σύγκριση των συνθέσεων VI, VII και VIII, με σκοπό την διερεύνηση της επίδρασης της φύσης της κονίας στην συμπεριφορά του σκυροδέματος για το ίδιο μίγμα αδρανών.
4. Σύγκριση των συνθέσεων I και III, με σκοπό την διερεύνηση της επίδρασης της φύσης της κονίας στην συμπεριφορά του σκυροδέματος για το ίδιο μίγμα αδρανών.
5. Σύγκριση των συνθέσεων II και IV, με σκοπό την διερεύνηση της επίδρασης της φύσης της κονίας στην συμπεριφορά του σκυροδέματος για το ίδιο μίγμα αδρανών.

1.3 Παρασκευή και συντήρηση σκυροδεμάτων αποκατάστασης

Διαδικασία παρασκευής

Ένα από τα καθοριστικά στάδια στην παρασκευή των κονιαμάτων - σκυροδεμάτων είναι η προετοιμασία και η ανάμιξη των πρώτων υλών για την παραγωγή του νωπού σκυροδέματος.

Η διαδικασία που ακολουθείται κατά την προετοιμασία και την ανάμιξη των πρώτων υλών παίζει καθοριστικό ρόλο στη μετέπειτα συμπεριφορά του κονιάματος.

Οι απαιτούμενες για κάθε σύνθεση πρώτες ύλες πριν την ανάμιξη ζυγίζονται σε ξηρή κατάσταση. Τα κεραμικά έχουν ήδη ξηρανθεί σε φούρνο ώστε να είναι απαλλαγμένα από υγρασία.

Πριν από την ανάμιξη για την παρασκευή του σκυροδέματος τα κεραμικά αδρανή τοποθετούνται μαζί με μέρος του προς ανάμιξη νερού στον αναμικτήρα για 15 λεπτά περίπου ώστε να μην απορροφήσουν πολύ νερό από το συνολικό νερό του μίγματος κατά την ανάμιξη όλων των υλικών, ούτε να αποδώσουν επιπλέον υγρασία στο σκυρόδεμα που παρασκευάζεται. Επίσης σύμφωνα με όσα έχουν προαναφερθεί στο ειδικό θεωρητικό μέρος η διαβροχή των κεραμικών έχει θετική επίδραση στην πρόσφυση μεταξύ κονίας και αδρανών και την δημιουργία ισχυρού δεσμού στην διεπιφάνεια [3].

Η παρασκευή συνθέσεων έγινε με μικρό ηλεκτροκίνητο αναδευτήρα **Schwelm 70** στροφών/λεπτό. Η διαδικασία εισαγωγής των υλικών στον αναδευτήρα είναι η ακόλουθη: Μετά τα κεραμικά αδρανή και την παρέλευση των 15 λεπτών εισάγεται στην μπετονιέρα η άμμος και ακολουθεί χειρονακτική

ανάδευση ώστε το μίγμα να γίνει κατά το δυνατόν ομογενές, προσθέτοντας σιγά σιγά λίγο νερό. Τέλος προστίθενται η κονία με ποσότητα νερού και τίθεται σε λειτουργία. Στην περίπτωση που στα αδρανή περιλαμβάνονται και χονδρόκοκκα κεραμικά αυτά δεν προστίθενται στην αρχή αλλά 2 λεπτά περίπου πριν να ολοκληρωθεί η ανάδευση ώστε να μην σπάσουν σε μικρότερης διαμέτρου τεμάχια, με αποτέλεσμα να αλλοιωθεί η κοκκοδιαβάθμιση. Κατά τη διάρκεια της ανάδευσης προστίθενται σιγά σιγά νερό ώστε το μίγμα να “δουλεύεται” χωρίς να είναι πολύ υδαρές.

Η ανάμιξη διαρκεί μέχρι την πλήρη ομογενοποίηση του νωπού κονιάματος –σκυροδέματος 15 λεπτά περίπου. Κάθε σύνθεση παρασκευάζεται σε δύο χυτεύσεις. (Φωτ. 1.1)



Φωτ. 1.1 Παρασκευή σκυροδέματος σε ηλεκτροκίνητο αναδευτήρα

Έλεγχος εργασιμότητας νωπού κονιάματος

Ο έλεγχος της εργασιμότητας του νωπού κονιάματος για όλες τις συνθέσεις έγινε με σύμφωνα με τη μέθοδο ελέγχου ΣΚ-309 “Μέθοδος δοκιμής κάθισης” (Φωτ. 1.2).

Δεχθήκαμε σαν όριο κάθισης 1-4 cm, δεδομένου ότι δεν υπάρχει αντίστοιχο πρότυπο για Βυζαντινού τύπου σκυροδέματα, και με την λογική ότι το σκυρόδεμα πρέπει να είναι εργάσιμο χωρίς να είναι πολύ υδαρές γεγονός που

θα καθυστερούσε την πήξη και την πρόοδο των αντιδράσεων μεταξύ κονίας-ποζολάνης, ενώ ταυτόχρονα θα μείωνε τις μηχανικές αντοχές.



Φωτ. 1.2 Έλεγχος εργασιμότητας σκυροδέματος

Συμπύκνωση - πλήρωση δοκιμίων

Το νωπό σκυρόδεμα τοποθετήθηκε στα δοκίμια πληρώνοντας τα κατά το ήμισυ τα οποία στην συνέχεια δονήθηκαν σε δονητική τράπεζα για 30 δευτερόλεπτα/στρώση. Ακολουθούσε το γέμισμα της μήτρας και δόνηση για άλλα 30 δευτερόλεπτα (Φωτ. 1.3). Για τα κυλινδρικά δοκίμια η δόνηση γινόταν σε τρεις στρώσεις και για 30 '' η κάθε μια. Μετά τη δόνηση και την τελική πλήρωση του καλουπιού έγινε επιμελημένη εξομάλυνση της επιφάνειας του με μυστρί και ταυτόχρονα απομάκρυνση των υπολειμμάτων του νωπού κονιάματος.

Τα καλούπια πριν πληρωθούν με το κονίαμα επαλείφθηκαν επιμελώς με λάδι.



Φωτ. 1.3 Συμπύκνωση δοκιμίων σκυροδέματος σε δονητική τράπεζα

Συντήρηση δοκιμίων

Τα καλούπια μετά την πλήρωση τους, καλύφθηκαν με λινάτσες οι οποίες διαβρέχονταν ώστε τα δοκίμια να παραμένουν σε σταθερές συνθήκες υγρασίας **RH > 95%** μέχρι το ξεκαλούπωμα. Μετά την απομάκρυνση τους από τα καλούπια συντηρήθηκαν σε περιβάλλον εργαστηρίου με υγρασία **RH 50 ± 5 %**. Η θερμοκρασία ήταν **20 ± 2 °C** τόσο πριν όσο και μετά το ξεκαλούπωμα των δοκιμίων και μέχρι τη θραύση τους.

Ο χρόνος που απαιτείται για το ξεκαλούπωμα των δοκιμίων ποικίλει λόγω του ότι εξαρτάται από την σύνθεση του κονιάματος και από τον χρόνο που απαιτείται για να προσλάβει το δοκίμιο αντοχές τέτοιες που να επιτρέψουν την αφαίρεση του καλουπιού χωρίς τον κίνδυνο καταστροφής του.

Οι συνθέσεις με συνδετική ύλη μηλαϊκή γη που είναι λιγότερο δραστική ξεκαλουπώθηκαν στις **14** ημέρες ενώ για τις υπόλοιπες ο χρόνος ξεκαλουπώματος ήταν **7** ημέρες.

1.4 Τεχνικές αποτίμησης - μελέτης των χαρακτηριστικών των σκυροδεμάτων αποκατάστασης

Για την αποτίμηση των σκυροδεμάτων αποκατάστασης που παρασκευάστηκαν, εξετάζονται τα εξής τεχνικά χαρακτηριστικά τους:

- Ομοιογένεια, πρόσφυση, κοκκοδιαβάθμιση, με χρήση μικροσκόπιου οπτικών ινών.
- Μηχανικές αντοχές, με χρήση των διατάξεων δοκιμών θλίψης-κάμψης.
- Στατικό μέτρο ελαστικότητας (κλίση χορδής διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων), δυναμικό μέτρο ελαστικότητας με χρήση της μεθόδου των υπερήχων.
- Χημική εξέλιξη αντίδρασης συνδετικής ύλης-ποζολανικών προσμίκτων, με χρήση των θερμικών μεθόδων ανάλυσης (DTA/TG)

Μικροσκόπιο οπτικών ινών

Η μέθοδος της μικροσκοπίας οπτικών ινών αποτελεί μια μη καταστρεπτική τεχνική, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό σε περιπτώσεις εξέτασης υλικών μεγάλης ιστορικής και καλλιτεχνικής αξίας.

Βασική αρχή της Μικροσκοπίας Οπτικών Ινών αποτελεί η μετατροπή του ηλεκτρικού σήματος (φωνή, εικόνα, δεδομένα κ.α.), που πρόκειται να μεταδοθεί, σε ακολουθία ψηφιακών παλμών στο ένα άκρο της οπτικής ζεύξης. Οι παλμοί αυτοί διοχετεύονται στην οπτική ίνα, ανιχνεύονται στο άλλο άκρο της ζεύξης και μετατρέπονται σε αντίστοιχο ηλεκτρικό σήμα.

Η Μικροσκοπία Οπτικών Ινών χρησιμοποιείται για την επί τόπου αναγνώριση των τύπων φθοράς, την εκτίμηση των αποτελεσμάτων εφαρμογών μεθόδων συντήρησης, καθαρισμού και προστασίας επιφανειών. Επίσης χρησιμοποιείται για την αρχική εκτίμηση της μικροδομής του υλικού, την επί τόπου παρατήρηση σύνθετων υλικών (κονιαμάτων, χαρτιού κ.α.), καθώς και για παρατήρηση διεπιφανειακών φαινομένων.

Η τεχνική αυτή βασίζεται στη χρήση ενός φορητού μικροσκοπίου, τύπου **Pico Scopeman – Moritex**, πολύ εύχρηστου, με το οποίο μπορεί να εξεταστεί επί τόπου ολόκληρη η επιφάνεια ενός ιστορικού συνόλου, χωρίς να απαιτείται η προ-κατεργασία ή αλλοίωση των υλικών. Το σημαντικότερο τμήμα του

μικροσκοπίου οπτικών ινών είναι οι φακοί οπτικών ινών. Στις αρχές λειτουργίας τους βασίζεται και η λειτουργία της μεθόδου.

Τα κυριότερα τμήματα της συσκευής είναι:

- α Λάμπα αλογόνου που λειτουργεί στα **100 W**.
- α Σύστημα ελέγχου της έντασης του φωτός. Η ποσότητα φωτός που ανακλάται από το αντικείμενο, εξαρτάται από το χρώμα και το υλικό του αντικειμένου. Το μικροσκόπιο αυτόματα προσαρμόζει την ένταση του φωτός της λάμπας, έτσι ώστε να υπάρχει ένα σταθερό επίπεδο φωτεινότητας στη λαμβανόμενη εικόνα.
- α Σύστημα εστίασης.
- α Αντικειμενικοί φακοί. Κατά τη διάρκεια της εφαρμογής μπορεί να αλλάξει κανείς περισσότερους φακούς, για να πάρει εικόνες διαφορετικών μεγεθύνσεων (οι δυνατές λαμβανόμενες μεγεθύνσεις είναι **x25, x50, x100, x200, x600**). Οι φακοί συνδέονται στο σύστημα μετάδοσης εικόνας μέσω οπτικών ινών.

Τέλος, το μικροσκόπιο οπτικών ινών διαθέτει έξοδο τυποποιημένου βίντεο σήματος (**PAL**), παρέχοντας τη δυνατότητα σύνδεσης με **video** μόνιτορ και συσκευή εγγραφής. Οι εικόνες καταγράφονται σε μαγνητικό μέσο και έτσι μπορούν να αναπαραχθούν ανά πάσα στιγμή με ευκολία στο βίντεο. Η τυποποιημένη έξοδο σήματος επιτρέπει την εισαγωγή της εικόνας και σε υπολογιστή και κατ' επέκταση σε σύστημα ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας (η ψηφιακή ανάλυση εικόνας **Pal** είναι **768 x 576 pixel**), παρέχοντας περαιτέρω δυνατότητες επεξεργασίας.

Μηχανικές δοκιμές

Δοκιμή θλίψης

Η δοκιμή θλίψης εφαρμόζεται κυρίως στα ψαθυρά υλικά που κατά τη λειτουργία τους δέχονται κυρίως θλιπτικά φορτία. Οι θλιπτικές τάσεις S_q προκαλούν βράχυνση των δοκιμίων και θλιπτική παραμόρφωση e_q .

Στην περιοχή των ελαστικών παραμορφώσεων ισχύει: $S_q = E \cdot e_q$, όπου E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού.

Γενικώς, δεχόμαστε ότι τα μέτρα ελαστικότητας σε εφελκυσμό και θλίψη ταυτίζονται αν και υπάρχουν υλικά που δεν υπακούουν στον περιορισμό αυτό.

Η θραύση των ψαθυρών υλικών σε θλίψη επέρχεται κατά τη διεύθυνση της μέγιστης διατμητικής τάσης, το δε όριο θραύσης βρίσκεται κατά κανόνα τόσο κοντά στο όριο διαρροής ώστε για τα περισσότερα ψαθυρά υλικά να θεωρούμε ότι ταυτίζονται.

Προσδιοριζόμενα μεγέθη:

$$\text{Τόση θραύσεως } S = \frac{P_q}{F_o}$$

όπου: P_q το φορτίο θραύσεως

F_o η αρχική επιφάνεια επιβολής φορτίου

Εφαρμοζόμενοι κανονισμοί

Μέθοδος ελέγχου ΣΚ-304

Πειραματική διάταξη

Χρησιμοποιήθηκε μηχανή δοκιμής σε θλίψη TONI TECHNIK INSTRUMENT, μέγιστου φορτίου **3000 KN**, με ρυθμιζόμενη ταχύτητα επιβολής φορτίου. Στις συνθέσεις με συνδετική ύλη μηλαϊκή γη η επιβληθείσα ταχύτητα ήταν **0,5 KN/sec** ενώ στις υπόλοιπες ήταν **1 KN/sec**. Η επιβολή του φορτίου γίνεται αυτόματα, όπως και η καταγραφή του μέγιστου φορτίου θραύσης.

Η μέγιστη επιβαλλόμενη δύναμη θραύσεως για κάθε κυβικό δοκίμιο ή κυβικό από πρισματικό δίνεται σε KN.

Στην συνέχεια υπολογίζεται η θλιπτική αντοχή του δοκιμίου $f_c = \frac{P}{F_o}$

Μέσω της δοκιμής σε θλίψη κυλινδρικών δοκιμίων υπολογίστηκε το στατικό μέτρο ελαστικότητας των σκυροδεμάτων σαν κλίση της χορδής του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε μονοαξονική θλίψη υπό συνθήκες επιβαλλόμενου φορτίου σε μηχανή **Amsler**

μέγιστης ικανότητας 2000 KN . Η μέτρηση των αξονικών και εγκάρσιων παρ/σεων έγιναν με τη βοήθεια ηλεκτρομηκυσιομέτρων μήκους 70 cm που κολλήθηκαν στην τελική επιφάνεια με εποξειδική ρητίνη, στο μέσο ύψος των δοκιμίων. Τα ηλεκτρομηκυσιομέτρα τοποθετήθηκαν αντιδιαμετρικά στα κυλινδρικά δοκίμια και στις απέναντι μεγάλες πλευρές των πρισμάτων, συνολικά 4 για κάθε δοκίμιο, σχηματίζοντας ανά 2 μεταξύ τους σταυρό (βλ. Φωτ.1.4). Οι παραμορφώσεις κατά τον διαμήκη άξονα μετρήθηκαν επίσης από βελόμετρο ενσωματωμένο σε ειδική διάταξη που προσαρμοζόταν περιμετρικώς του δοκιμίου. Για τη μέτρηση του επιβαλλόμενου φορτίου χρησιμοποιήθηκε το δυναμόμετρο της μηχανής φόρτισης. Στη μηχανή θλίψης είναι ενσωματωμένη συσκευή καταγραφής και ανάλυσης πληροφοριών. Η ταχύτητα φόρτισης καθοριζόταν χειρονακτικώς και δεν ξεπερνούσε τα 2 KN/sec .



Φωτ. 1.4 Θραύση κυλινδρικών δοκιμίων σε μονοαξονική θλίψη

Δοκιμή κάμψης

Με τη δοκιμή κάμψης ελέγχεται η συμπεριφορά ενός υλικού όταν πρισματικό δοκίμιο από το υλικό αυτό καταπονείται από εγκάρσια φορτία ή ροπές με διάνυσμα κάθετο στον διαμήκη άξονα του δοκιμίου.

Η εντατική κατάσταση που αναπτύσσεται σε μία δοκό που καταπονείται σε κάμψη είναι υπό ορισμένες συνθήκες μονοαξονική και μεταβάλλεται σε κάθε

κάθετη διατομή. Εάν η τιμή της ροπής κάμψης είναι τέτοια ώστε το υλικό να βρίσκεται στην ελαστική περιοχή τότε οι τάσεις σε μια τέτοια διατομή μεταβάλλονται σύμφωνα με το νόμο:

$$\sigma_f = \frac{M_z}{W} = \frac{M_z}{I_z} \cdot y$$

όπου y η απόσταση από τον ουδέτερο άξονα, W η ροπή αντίστασης και I_z η ροπή αδράνειας της διατομής της δοκού.

Η απολύτως μέγιστη τιμή των τάσεων εμφανίζεται επομένως στις εξωτερικές ίνες της δοκού. Στην κάτω περιοχή οι τάσεις είναι εφελκυστικές ενώ στην άνω περιοχή οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι θλιπτικές.

Σύμφωνα με το νόμο του **Hook**e, η παραμόρφωση στην κάμψη προκύπτει από τον τύπο:

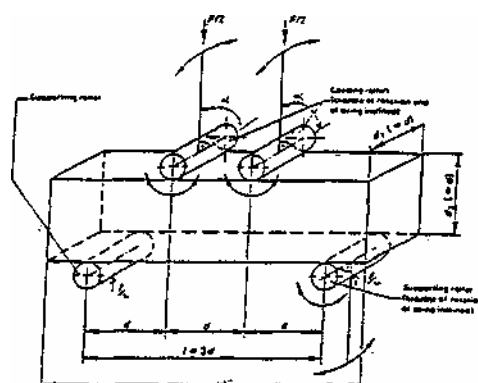
$$\varepsilon = \frac{s}{E} = \frac{M_z}{EI_z} \cdot y$$

Με τη δοκιμή της κάμψης προσδιορίζονται τα μεγέθη:

- Αντοχή κάμψης f_f που για τα ψαθυρά υλικά ορίζεται ως ο λόγος της ροπής κάμψης τη στιγμή της θραύσης προς τη ροπή αντίστασης της διατομής:

$$f_f = \frac{M_z}{W}$$

Για δοκό ορθογωνικής διατομής πλάτους d_1 και ύψους d_2 που στηρίζεται σε εφάδρανα που απέχουν απόσταση L , και φορτίζονται σε δύο σημεία κατά την παρακάτω διάταξη



Σχήμα 1.3 Πειραματική διάταξη δοκιμής σε κάμψη

η καμπτική αντοχή υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$f_f = \frac{P \cdot L}{d_1 \cdot d_2^2} \quad (1)$$

$$f_f = \frac{3 \cdot P \cdot L \cdot a}{d_1 \cdot d_2^2} \quad (2)$$

όπου

P το μέγιστο επιβαλλόμενο φορτίο (N)

L η απόσταση μεταξύ των εδράσεων (mm)

d_1, d_2 το πλάτος και ύψος αντίστοιχα, του δοκιμίου (mm)

a η μέση απόσταση της γραμμής θραύσης από την πλησιέστερη έδραση μετρημένη στη εφελκυσόμενη επιφάνεια

Η σχέση (1) ισχύει για την περίπτωση που η θραύση πραγματοποιείται στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου μήκους $L/3$, ενώ η (2) στην περίπτωση που η θραύση συμβαίνει στα ακραία τμήματα μήκους $L/3$ του δοκιμίου.

Βέλος κάμψης κατά τη στιγμή της θραύσης είναι η κατακόρυφη μετακίνηση του υπό μελέτη σημείου κατά τη θραύση.

- Δυσκαμψία K είναι ο λόγος της αντοχής κάμψης προς το βέλος κάμψης τη στιγμή της θραύσης της δοκού.
- Ο συντελεστής κάμψης λ_f που ορίζεται ως ο λόγος της αντοχής σε κάμψη f_f

προς την αντοχή σε εφελκυσμό f_t : $\lambda_f = \frac{f_f}{f_t}$

Εφαρμοζόμενοι κανονισμοί

ASTM C 78-94

Πειραματική διάταξη

Για τη δοκιμή σε κάμψη χρησιμοποιήθηκε η μηχανή **AVERY – DENISON 7122** μέγιστου φορτίου **2.000KN** με ειδική διάταξη, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα **3.3**.

Το πρισματικό δοκίμιο τοποθετείται σε δύο κυλίνδρους στήριξης, η μεταξύ των οποίων απόσταση είναι **450mm**. Το επιβαλλόμενο με αυτή τη μηχανή φορτίο μπορεί να είναι στατικό και επιβάλλεται σταδιακά στο πρισματικό δοκίμιο σε δύο θέσεις που ισαπέχουν **7,5cm** από το μέσον του δοκιμίου μέσω κυλίνδρων φόρτισης καθ' όλο το πλάτος του δοκιμίου.

Το φορτίο επιβάλλεται ομαλά με ταχύτητα **10 KN/min**.

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω μετρήσεις υπολογίζονται:

Η αντοχή σε κάμψη του δοκιμίου:

$$f_f = \frac{PL}{d_1 \cdot d_2^2}$$

όπου: P το μέγιστο επιβαλλόμενο φορτίο (N)

L η απόσταση μεταξύ των εδράσεων (mm)

d₁, d₂ το πλάτος και ύψος αντίστοιχα, του δοκιμίου (mm).

Μέθοδος των υπερήχων

Στη δόκιμη με υπέρηχους χρησιμοποιείται μια δέσμη ηχητικών κυμάτων υψηλής συχνότητας με την οποία γίνεται ο έλεγχος του υλικού.

Η μέθοδος ελέγχου των υλικών με τη χρήση των υπερήχων είναι μία μη καταστροφική μέθοδος με την οποία είναι δυνατόν να ανιχνεύονται εσωτερικές ατέλειες των υλικών και να εκτιμάται η γενικότερη κατάσταση συντήρησής τους.

Επίσης, με τη μέθοδο των υπερήχων είναι δυνατό να προσδιορίζονται οι δυναμικές μηχανικές ιδιότητες των υλικών, όπως είναι το μέτρο ελαστικότητας (Ed) ο λόγος του Poisson (νd), το μέτρο διατμήσεως G κ.α., χωρίς να απαιτείται η κατασκευή και η θραύση ειδικών δοκιμίων.

Στις απέναντι πλευρές των δοκιμίων τοποθετούνται οι δύο κεφαλές (η μία κεφαλή λειτουργεί σαν πομπός της υπερηχητικής δέσμης (διαμήκη κύματα) και η άλλη κεφαλή σαν δέκτης της συσκευής υπερήχων και γίνεται μέτρηση του χρόνου διάδοσης του κύματος μέσα στο δοκίμιο συγκεκριμένα στην απόσταση μεταξύ των δύο κεφαλών [4].

Στη συνέχεια υπολογίζεται η ταχύτητα διάδοσης του ηχητικού κύματος με βάση τον τύπο $u = \frac{s}{t}$ όπου s είναι η απόσταση των απέναντι πλευρών του δοκιμίου (απόσταση κεφαλών) και t ο χρόνος διάδοσης του κύματος.

Ο υπολογισμός του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας Ed των κονιαμάτων υπολογίζεται από τη σχέση: $E_d = d \cdot u^2 \cdot f(n_d)$

όπου d η πυκνότητα του κονιάματος

u η ταχύτητα του κύματος

$$f(n_d) = (1 + n_d) \cdot (1 - 2n_d) / (1 - n_d)$$

όπου n_d ο δυναμικός λόγος του Poisson.

Ο δυναμικός λόγος του Poisson n_d είναι εξαιρετικά δύσκολο να προσδιορισθεί πειραματικά με ακρίβεια.

Μεταβολή εξ άλλου του δυναμικού λόγου **Poisson** από **0,16** σε **0,25** (ακραίες τιμές) μειώνει την τιμή του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας μόνο κατά **11 %**. [5]

Κρίθηκε λοιπόν σκόπιμο να ληφθεί από την βιβλιογραφία μια μέση τιμή του δυναμικού λόγου **Poisson** για κονιάματα ίση προς $n_d = 0,194$ με αντίστοιχη τιμή $f(n_d) = 0,9066$ [6].

Εφαρμοζόμενοι Κανονισμοί

Ταχύτητα υπερήχων (V, ASTM 597, ASTM D 2845-83)

Πειραματική διάταξη

Στη παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκε μηχανήμα υπερήχων **PUNDIT 6** και συχνότητα **54 KHZ**. Στα δοκίμια του πειράματος (πρισματικά) μετρήθηκε ο χρόνος διάδοσης του ηχητικού κύματος σε (μs) με την τοποθέτηση των δύο κεφαλών του υπερήχου σε όλες τις απέναντι πλευρές αυτών ανά ζεύγη. Συνολικά για κάθε δοκίμιο η μέτρηση της ταχύτητας πραγματοποιήθηκε σε έξι θέσεις και υπολογίστηκε ο μέσος όρος.

Υπολογίστηκε στη συνέχεια η αντίστοιχη ταχύτητα του διαμήκους ηχητικού κύματος. Τα δοκίμια ζυγίστηκαν με ακρίβεια, μετρήθηκαν οι διαστάσεις τους και υπολογίστηκε η πυκνότητα του κονιάματος.

Τέλος με βάση την σχέση $Ed = d \cdot u^2 \cdot 0,9066$ υπολογίστηκε το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας για όλα τα δοκίμια.

Θερμικές μέθοδοι ανάλυσης (DTA/TG)

Οι θερμικές μέθοδοι ανάλυσης χρησιμοποιούνται για να εκτιμηθούν οι χημικές μεταβολές που υφίσταται το δείγμα του υλικού σε μια θερμοκρασιακή κλίμακα από **25** ως **1000 °C**, με ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας **10 °C/min**. Επιτυγχάνεται ποιοτική και κατά περιπτώσεις ποσοτική ανάλυση, όταν η συγκεκριμένη χημική μεταβολή συνοδεύεται και από μεταβολή του βάρους του δείγματος.

Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA Differential Thermal Analysis)

Η διαφορική θερμική ανάλυση είναι μέθοδος προσδιορισμού του θερμοτονισμού ενός φαινομένου, δηλαδή της μεταβολής της ενέργειας κατά τη διάρκεια μιας αντίδρασης, που μπορεί να εμφανιστεί ως εκλυόμενη ή απορροφούμενη θερμότητα ή/και ως εσωτερική ενέργεια.

Η τεχνική συνίσταται στη μέτρηση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του προς μέτρηση δείγματος και ενός δείγματος αναφοράς. Ως δείγμα αναφοράς χρησιμοποιείται η αλουμίνα ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) η οποία δεν υφίσταται μετασχηματισμούς στο συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος. Και τα δύο δείγματα υπόκεινται σε ένα προκαθορισμένο θερμοκρασιακό πρόγραμμα. Όταν λαμβάνει χώρα μια αντίδραση, που περιλαμβάνει ενεργειακές μεταβολές, τότε αρχίζει να παρουσιάζεται διαφορά ανάμεσα στο προς μέτρηση δείγμα και το δείγμα αναφοράς. Αυτή η διαφορά παρουσιάζεται ως διαφορά τάσης ανάμεσα στα θερμοστοιχεία και ενισχύεται ηλεκτρονικά. Παρουσιάζεται έτσι ως θερμικό διάγραμμα στην οθόνη του ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Θερμοβαρυμετρική Ανάλυση (TG Thermogravimetry)

Στη θερμοβαρυμετρική ανάλυση προσδιορίζεται η μεταβολή της μάζας (βάρους) δείγματος που υπόκειται σε θερμική καταπόνηση, κάτω από ένα προκαθορισμένο θερμοκρασιακό πρόγραμμα. Μεταβολή μάζας επέρχεται κατά την αντίδραση του δείγματος, προς δημιουργία αερίων-ατμών. Οι μετρήσεις διεξάγονται με τη βοήθεια θερμοζυγού. Κάθε βαθμίδα του θερμικού φάσματος αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη αντίδραση και μπορεί να αποδοθεί σε συγκεκριμένη χημική ένωση.

Η θερμική και θερμοβαρυμετρική ανάλυση διεξάγονται παράλληλα, αποδίδοντας τιμές απώλειας βάρους με παράλληλη καταγραφή των μεταβολών θερμότητας. Ειδικότερα, για θερμοκρασίες μικρότερες των **120 °C** η μεταβολή του βάρους οφείλεται κυρίως σε εξάτμιση υγρασίας, στο θερμοκρασιακό διάστημα **120-200 °C** αποβάλλεται το νερό των ένυδρων αλάτων (π.χ. γύψος), στο διάστημα μέχρι τους **600 °C** αποβάλλεται το χημικά δεσμευμένο νερό των ένυδρων αργιλοπυριτικών φάσεων και το χημικά δεσμευμένο νερό των υδροξειδίων του ασβεστίου και του μαγνησίου, εφόσον απουσιάζουν οργανικές προσμίξεις, ενώ πάνω από τους **600 °C** αποσυντίθενται οι ανθρακικές ενώσεις (ανθρακικό ασβέστιο και μαγνήσιο) απελευθερώνοντας **CO₂**.

Η διάταξη που χρησιμοποιείται είναι **STA (Simultaneous Thermal Analysis) NETSCH 409 EP DTA/TG**. Απαιτείται πολύ μικρή ποσότητα του δείγματος (περίπου **100 mg**), το οποίο εισάγεται κονιορτοποιημένο στον φούρνο μέσα σε κωνευτήρι πορσελάνης. Η ευαισθησία της μέτρησης είναι **0,01 mg** και μέσα στον κλίβανο επικρατεί στατική ατμόσφαιρα αέρα. Τα δεδομένα συλλέγονται σε υπολογιστή που διαθέτει το κατάλληλο λογισμικό για την επεξεργασία και την απόδοση των δεδομένων σε διαγράμματα.

Στην παρούσα εργασία, οι θερμικές μέθοδοι **DTA/TG** χρησιμοποιούνται τόσο στο στάδιο της ανάλυσης των πρώτων υλών, όσο και στο στάδιο της παρασκευής και αποτίμησης των σκυροδεμάτων αποκατάστασης.

Στο στάδιο της αποτίμησης των σκυροδεμάτων αποκατάστασης χρησιμοποιείται η Διαφορική Θερμική Ανάλυση για τον ποιοτικό προσδιορισμό του υδροξειδίου του ασβεστίου, του νερού των αργιλοπυριτικών ενώσεων και του ανθρακικού ασβεστίου, που περιέχονται στα σκυροδέματα, καθώς ο ποσοτικός προσδιορισμός δεν είναι εφικτός λόγω της αναπόφευκτης παρουσίας και αδρανών στο εξεταζόμενο δείγμα [7].

Η αφυδάτωση του **Ca(OH)₂** αποτελεί ενδόθερμο φαινόμενο, που εκφράζεται με μια κορυφή στην καμπύλη **DTA**, στην περιοχή των **400-520 °C**, και μια αντίστοιχη απώλεια βάρους στην καμπύλη **TG**, που αντιστοιχεί στο **H₂O** που απελευθερώνεται. Από την απώλεια βάρους αυτή μπορεί να υπολογιστεί το περιεχόμενο **Ca(OH)₂** στο σκυρόδεμα.

Στην θερμοκρασιακή περιοχή μεταξύ **200** και **650 °C**, διασπάται το **H₂O** των ένυδρων αργιλοπυριτικών ενώσεων του ασβεστίου, που ονομάζεται και υδραυλικό νερό. Η διάσπαση αυτή υποδηλώνεται, στην καμπύλη **TG**, από μια σταδιακή απώλεια βάρους, στην περιοχή αυτή των θερμοκρασιών (**200-650 °C**), που δεν οφείλεται στη διάσπαση του **Ca(OH)₂** (απότομη απώλεια βάρους μεταξύ **400-520 °C**). Για τα σκυροδέματα αποκατάστασης που εξετάζονται, τα ένυδρα αργιλοπυριτικά άλατα του ασβεστίου είναι προϊόντα της ποζολανικής αντίδρασης. Έτσι η απώλεια βάρους, εξαιτίας της διάσπασης των υδραυλικών νερών, αποτελεί έναν δείκτη ποζολανικότητας.

Πάνω από τους **600 °C** αποσυντίθενται οι ανθρακικές ενώσεις (ανθρακικό ασβέστιο και μαγνήσιο) απελευθερώνοντας **CO₂**. Η αποσύνθεση του ανθρακικού ασβεστίου δίνει μια ενδόθερμη κορυφή στην περιοχή **820-840 °C**, ενώ η απώλεια βάρους, λόγω της απελευθέρωσης του **CO₂**, δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού του περιεχόμενου **CaCO₃**.

Για τον έλεγχο λοιπόν των σκυροδεμάτων αποκατάστασης με θερμικές μεθόδους ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία: Μετά από κάθε θραύση δοκιμίου ένα μικρό δείγμα λήφθηκε από το εσωτερικό του. Το δείγμα αυτό αλέστηκε σε μορφή πούδρας αφού αφαιρέθηκαν, στον βαθμό που αυτό ήταν δυνατό, τα αδρανή. Στη συνέχεια ζυγίστηκε και τοποθετήθηκε στη διάταξη. Με τον τρόπο αυτό μελετήθηκε η εξέλιξη της ποζολανικής αντίδρασης συναρτήσει του χρόνου.

2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

2.1. Μικροσκόπιο οπτικών ινών

Ακολουθούν φωτογραφίες από μικροσκόπιο οπτικών ινών σε θραυσμένα κυλινδρικά δοκίμια καθώς και φυσικές μακροσκοπικές φωτογραφίες.



(x25)



(x50)



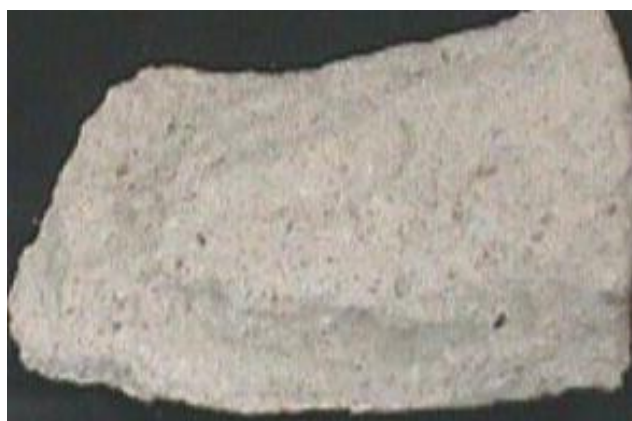
Φωτ.1.5 Σύνθεση I - Συνδετική ύλη: ασβέστης - μηλαϊκή γη - Αδρανή: άμμος - γαρμπίλι



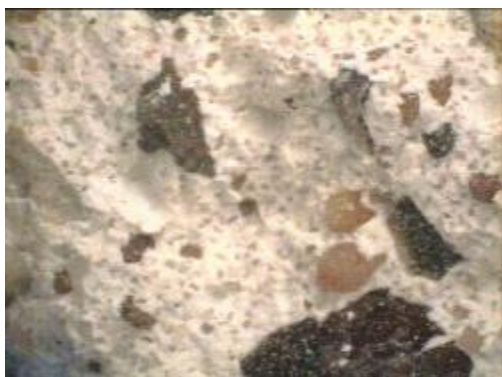
(x25)



(x50)



Φωτ. 1.6 Σύνθεση II - Συνδετική ύλη: ασβέστης - μηλαϊκή γη - Αδρανή: άμμος - κεραμικό



(x25)



(x50)



Φωτ. 1.7 Σύνθεση ΙΙΙ - Συνδετική ύλη: ασβέστης - μετακαολίνης - Αδρανή: άμμος - γαρμπίλι



(x25)



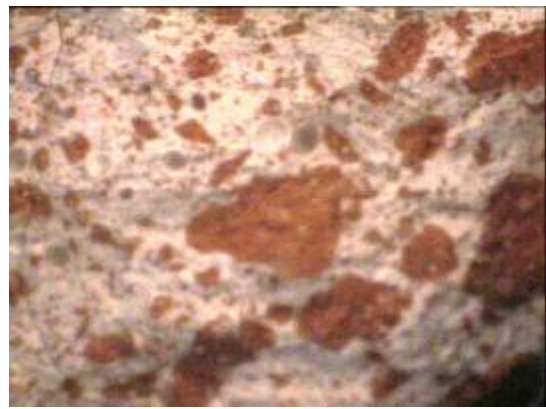
(x50)



Φωτ. 1.8 Σύνθεση IV - Συνδετική ύλη: ασβέστης - μετακαολίνης - Αδρανή: άμμος
- κεραμικό



(x100)



(x50)



Φωτ. 1.9 Σύνθεση V - Συνδετική ύλη: ασβέστης - μετακαολίνης - Αδρανή: κεραμικό

Από την παρατήρηση μακροσκοπικά διαπιστώνεται:

- § Όλες οι συνθέσεις παρουσιάζουν πολύ καλή ομοιογένεια. Η κατανομή των αδρανών είναι ομοιόμορφη, καθώς για όλες τις συνθέσεις τα αδρανή κατανέμονται στο σύνολο της μάζας χωρίς να υπάρχουν φαινόμενα διαχωρισμού λεπτόκοκκων-χονδρόκοκκων.

Από την παρατήρηση με το μικροσκόπιο οπτικών ινών διαπιστώνονται τα εξής:

- § Η πρόσφυση μεταξύ μήτρας κονίας και αδρανών κρίνεται ικανοποιητική. Ιδιαίτερα στην περίπτωση του κεραμικού είναι εμφανής η θραύση των κόκκων κεραμικού και όχι η αποκόλληση στην διεπιφάνεια.

2.2. Μηχανικές δοκιμές

Παρατηρήσεις

- Η δοκιμή θλίψης έγινε σε πρέσα πιστοποιημένη με σταθερή ταχύτητα φόρτισης δεν υπάρχουν αβεβαιότητες και τα αποτελέσματα που προκύπτουν

είναι αξιόπιστα.

- Η δοκιμή κάμψης έγινε σε μη πιστοποιημένη μηχανή. Η ελάχιστη ταχύτητα φόρτισης ήταν μεγάλη και για μικρές τιμές αντοχών ($<2 \text{ MPa}$) όπως συμβαίνει στην περίπτωση των συνθέσεων Ι και ΙΙ με συνδετική ύλη μηλαϊκή γη υπάρχει αβεβαιότητα προσδιορισμού του φορτίου και ως εκ τούτου τα αποτελέσματα που προκύπτουν δεν είναι αξιόπιστα.
- Οι δοκιμές θλίψης σε κυλίνδρους έγιναν με σκοπό τον προσδιορισμό του στατικού μέτρου ελαστικότητας E_s . Όμως οι παραμορφώσεις που μετρήθηκαν τόσο από τα ηλεκτρομηκυνσιόμετρα όσο και από το βελόμετρο της πρέσας που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά και οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας που προκύπτουν αμφισβητούνται για την ορθότητά τους.

Κριτήρια

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η παρασκευή και αποτίμηση σκυροδεμάτων αποκατάστασης Βυζαντινών τοιχοποιιών με δομικά στοιχεία πλίνθους και αρμούς μεγάλου πάχους.

Ένα από τα κριτήρια καταλληλότητας για την αποδοχή των σκυροδεμάτων είναι η θλιπτική αντοχή τους, η οποία δεν πρέπει να υπερβαίνει την αντοχή του πλίνθου. Η θλιπτική αντοχή των πλίνθων ποικίλλει ωστόσο για πλίνθους ιστορικού/παραδοσιακού τύπου οι θλιπτικές αντοχές τους είναι περίπου **14-18 MPa [8]**, Επομένως ένα σκυρόδεμα αποκατάστασης είναι θεμιτό να παρουσιάζει θλιπτική αντοχή μικρότερη από το δομικό στοιχείο, επομένως τιμές στο φάσμα **8-12 MPa** θεωρούνται ικανοποιητικές.

Επίσης, οι δοκιμές της εφελκυστικής αντοχής των ιστορικών κονιαμάτων κυμαίνονταν μεταξύ **1,5-2,5 MPa**, οπότε και πιστεύεται ότι τα κονιάματα αποκατάστασης θα πρέπει να παρουσιάζουν εφελκυστική αντοχή σίγουρα μεγαλύτερη των **2 MPa** και όσο το δυνατόν υψηλότερη. Σε αυτή την περίπτωση ο λόγος θλιπτική / εφελκυστική αντοχή (f_t/f_c) θα πρέπει να είναι μικρότερος του **6**.

Τέλος, όσον αφορά το μέτρο ελαστικότητας, κονιάματα με ελαστική συμπεριφορά θεωρούνται εκείνα που παρουσιάζουν στατικό μέτρο ελαστικότητας μικρότερο από **12000 GPa**, επομένως στην περίπτωση μας που μετράται το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (σύμφωνα με βιβλιογραφία οι τιμές

του είναι ελαφρώς μεγαλύτερες του αντίστοιχου στατικού) τιμές μικρότερες του **14000** θεωρούνται αποδεκτές.

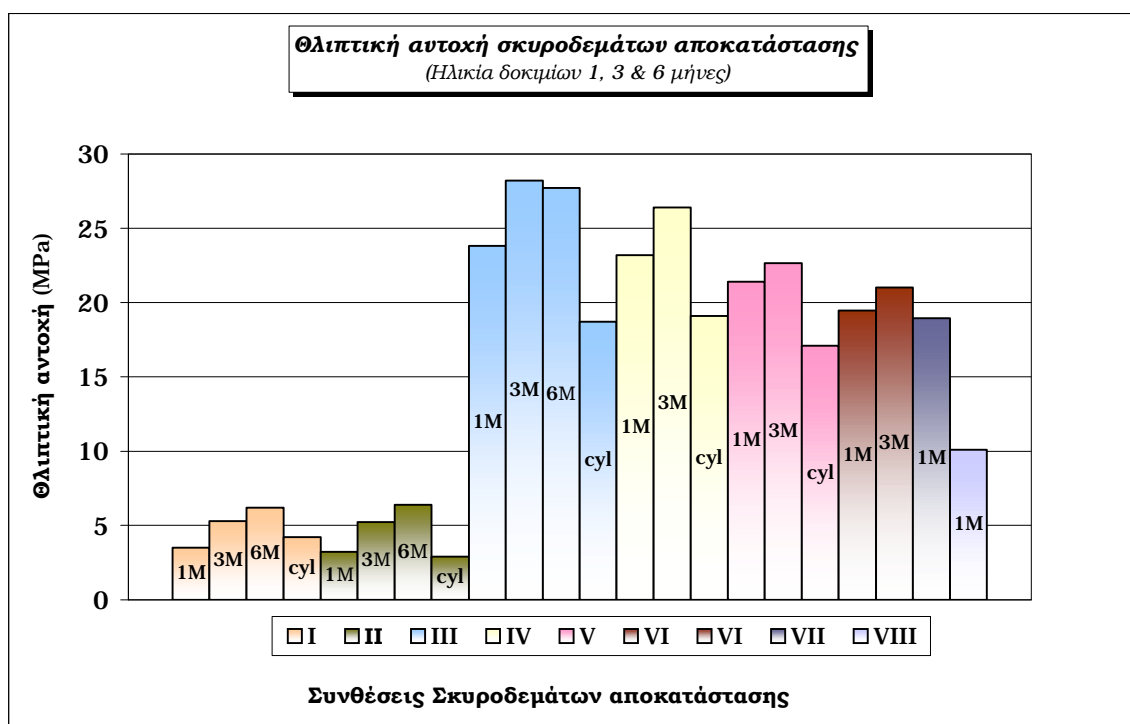
Αποτελέσματα

Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται τα αποτελέσματα των δοκιμών σε θλίψη και κάμψη. Η θλιπτική αντοχή προκύπτει σαν μέσος όρος **6** τιμών για κάθε θραύση ενώ η καμπτική αντοχή σαν μέσος όρος **3** τιμών. Για τα κυλινδρικά δοκίμια η αντοχή προκύπτει σαν μέσος όρος **3** τιμών. Σε δοκιμή θλίψης υποβλήθηκαν τα κυλινδρικά δοκίμια των συνθέσεων εκείνων που σύμφωνα με τις θερμικές αναλύσεις είχε ολοκληρωθεί η ποζολανική αντίδραση.

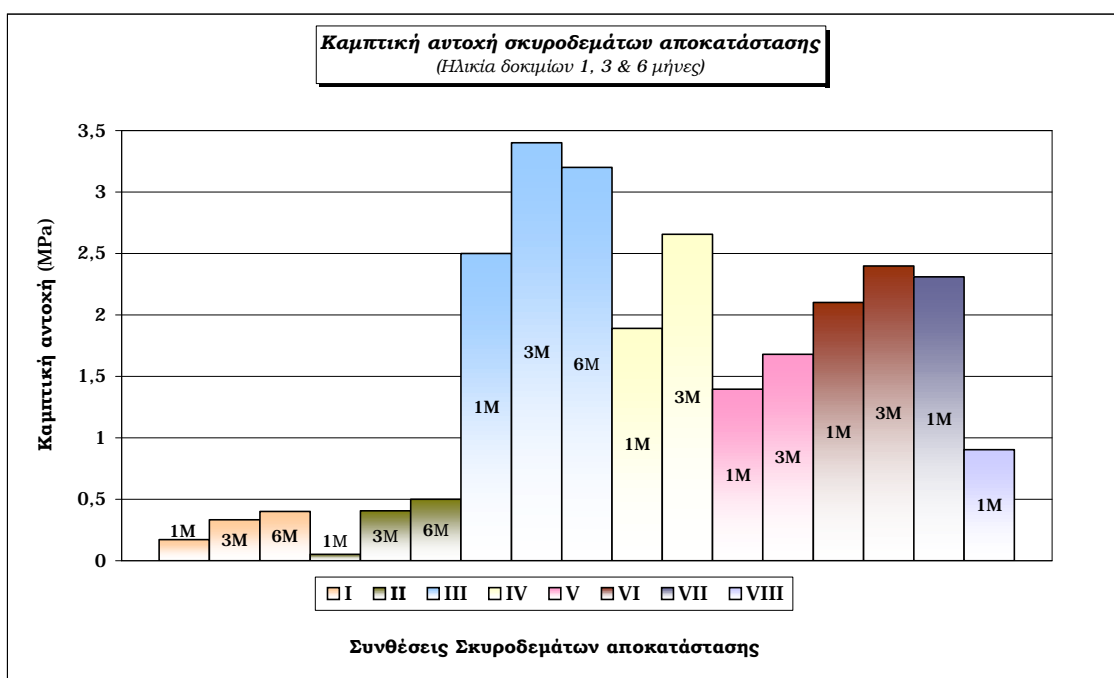
Πίνακας 1.21 Αποτελέσματα δοκιμών σε θλίψη και κάμψη

ΣΥΝΘ.	ΕΙΔΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΗΛΙΚΙΑ	ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ f_c (MPa)	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ f_t (MPa)	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	f_c / f_t
I	ΚΥΒΟΣ	1m	3,5	0,16	0,2	0,10	-
		3m	5,3	0,42	0,3	0,18	-
		6m	6,2	0,52	0,4	0,11	-
	ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ	7m	4,2	0,10	-	-	-
II	ΚΥΒΟΣ	1m	3,2	0,19	-	-	-
		3m	5,2	0,71	0,4	0,20	-
		6m	6,4	0,85	0,5	0,18	-
	ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ	7m	2,9	0,00	-	-	-
III	ΚΥΒΟΣ	1m	23,8	0,9	2,5	0,00	9,5
		3m	28,2	0,10	3,4	0,22	8,3
		6m	27,7	0,49	3,2	0,00	8,7
	ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ	6m	18,7	3,59	-	-	-
IV	ΚΥΒΟΣ	1m	23,2	0,98	1,9	0,18	12,3
		3m	26,4	1,42	2,7	0,20	9,9
	ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ	5m	19,1	0,48	-	-	-
V	ΚΥΒΟΣ	1m	21,4	1,15	1,4	0,28	15,3
		3m	22,7	1,25	1,7	0,18	13,5
	ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ	5m	17,1	0,45	-	-	-
VI	ΚΥΒΟΣ	1m	19,5	0,40	2,1	0,29	9,3
		3m	21,0	1,91	2,4	0,39	8,8
VII	ΚΥΒΟΣ	1m	19,0	1,23	2,3	0,50	8,2
VIII	ΚΥΒΟΣ	1m	10,1	0,33	0,9	0,47	11,2

Τα κυλινδρικά δοκίμια παρουσιάζουν μικρότερες τιμές θλιπτικών αντοχών σε σχέση με τα κυβικά όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο από τη διεθνή βιβλιογραφία.



Σχήμα 1.4 Θλιπτική αντοχή σκυροδεμάτων αποκατάστασης για ηλικίες δοκιμών 1, 3 & 6 μήνες



Σχήμα 1.5 Καμπτική αντοχή σκυροδεμάτων αποκατάστασης για ηλικίες δοκιμών 1, 3 & 6 μήνες

Συμπεράσματα

§ Μηλαϊκή γη

Τα σκυροδέματα με συνδετική ύλη μηλαϊκή γη παρουσιάζουν πολύ χαμηλές αντοχές, (αντοχή στους **6** μήνες **6,2 & 6,4 MPa** για τις συνθέσεις I & II). Στην ηλικία των **6** μηνών το σύστημα δεν έχει σταθεροποιηθεί, καθώς αυξάνουν οι αντοχές, ενώ και από τις θερμικές αναλύσεις προκύπτει πως δεν έχει δεσμευτεί όλη η ποσότητα **Ca(OH)₂**. Επομένως, η μηλαϊκή γη παρουσιάζει μειωμένη δραστηριότητα όσον αφορά την δέσμευση **Ca(OH)₂**, γεγονός που επιβεβαιώνεται και με τον χαμηλό ρυθμό ανάπτυξης των μηχανικών αντοχών που παρουσιάζει, ο οποίος αποτελεί και μία ένδειξη του βαθμού ποζολανικότητας, ενώ και οι μηχανικές αντοχές δεν είναι μεγάλες σαν απόλυτες τιμές. Είναι σκόπιμο να αναφερθεί ότι κονιάματα καθαρού ασβέστη χωρίς ποζολανικά πρόσμικτα παρουσίασαν θλιπτική αντοχή **4,6 MPa** σε ηλικία **6** μηνών, ενώ με ασβέστη/μηλαϊκή παρουσίασαν αντοχή **2,5 MPa** [9].

§ Μετακαολίνη

Πολύ δραστική ποζολάνη όπως επιβεβαιώνεται και από τις θερμικές αναλύσεις καθώς από τον πρώτο μήνα έχει ήδη δεσμευτεί όλη η ποσότητα **Ca(OH)₂**. Τα σκυροδέματα με ποζολάνη τον μετακαολίνη παρουσιάζουν εξαιρετικά υψηλές αντοχές σε θλίψη: **27,7 MPa** για την σύνθεση III στους **6** μήνες, **26,4 MPa** για την σύνθεση IV στους **3** μήνες, και **21MPa** για την σύνθεση VI στους **3** μήνες, ενώ η αύξηση της αντοχής από τον 1^ο στον 3^ο μήνα είναι μικρή ~15%. Στον 3^ο μήνα οι αντοχές φαίνεται να σταθεροποιούνται. Οι πολύ μεγάλες αντοχές σε σχέση με αυτές των σκυροδεμάτων της μηλαϊκής γης οφείλονται:

- Στην πολύ λεπτή κοκκομετρία του μετακαολίνη
- Στην χημική και ορυκτολογική σύσταση
- Στην μεγάλη ειδική επιφάνεια

Η καμπτική αντοχή των συνθέσεων με μετακαολίνη είναι μεγάλη σε σχέση με αυτή των συνθέσεων με μηλαϊκή γη. Στις **28** ημέρες το σκυρόδεμα έχει αποκτήσει το **90%** της καμπτικής αντοχής του και όπως και στην περίπτωση της θλίψης στους **3** μήνες η αντοχή σταθεροποιείται.

Συγκρίνοντας τις συνθέσεις IV & VI διαπιστώνεται ότι η σύνθεση με αναλογία ασβέστη/μετακαολίνη 2/1 μειώνει τις θλιπτικές αντοχές συγκριτικά με τη σύνθεση με αναλογία των δύο υλικών 1/1 καθώς και το λόγο f_t/f_c .

Επομένως ο μετακαολίνης παρουσιάζει αυξημένη δραστηριότητα όσον αφορά στην δέσμευση Ca(OH)_2 , που σε αναλογίες 1/ 1 και 2/1 με τον ασβέστη παράγει σκυρόδεμα πολύ υψηλής αντοχής. Οι αντοχές όμως ξεπερνούν κατά πολύ τις αντοχές των πλίνθων και συνεπώς αυτές οι συνθέσεις δεν κρίνονται κατάλληλες για την αποκατάσταση Βυζαντινών τοιχοποιιών. Αύξηση της αναλογίας ασβέστη/μετακαολίνη σε τιμές μεγαλύτερες από 2 μπορεί να οδηγήσει στην παρασκευή σκυροδεμάτων με χαμηλότερες αντοχές μέσα στα επιθυμητά όρια και καλύτερο λόγο f_t/f_c .

§ Ασβέστης-Τσιμέντο

Η σύνθεση με συνδετική ύλη ασβέστη-τσιμέντο δίνει πολύ υψηλή θλιπτική αντοχή και τον χαμηλότερο λόγο f_t/f_c σε σύγκριση με όλες τις συνθέσεις που παρασκευάστηκαν. Επομένως όπως και στην περίπτωση του μετακαολίνης δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε τοιχοποιίες με δομικά υλικά πλίνθους.

§ Υδραυλική άσβεστος

Δίνει θλιπτική αντοχή **10 MPa** που είναι αποδεκτή για την αποκατάσταση τοιχοποιιών με πλίνθους. Για την αντοχή σε κάμψη υπάρχει αβεβαιότητα. Ωστόσο πιο ολοκληρωμένα συμπεράσματα θα εξαχθούν μετά τους 3 μήνες για την εξέλιξη τόσο της θλιπτικής όσο και της καμπτικής αντοχής.

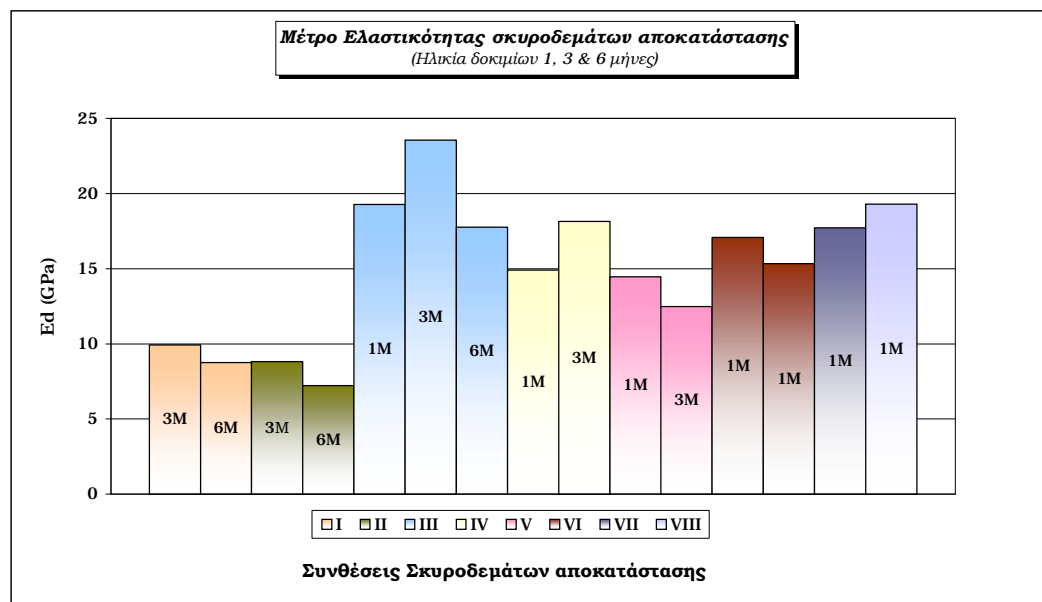
2.3. Μέθοδος των υπερήχων

Αποτελέσματα

Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται τα αποτελέσματα των ελέγχων με τη μέθοδο των υπερήχων. Υπολογίζεται το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας για κάθε σύνθεση σαν μέσος όρος 6 μετρήσεων.

Πίνακας 1.22 Αποτελέσματα ελέγχων με τη μέθοδο των υπερήχων

ΣΥΝΘ.	ΗΛΙΚΙΑ	ρ (g/cm ³)	τυπική απόκλιση	Ταχύτητα (m/sec)	τυπική απόκλιση	Ed (GPa)	τυπική απόκλιση
I	1m	-	-	-	-	-	-
	3m	1,911	0,021	2390	142	9,9	1,2
	6m	1,916	0,022	2243	123	8,8	0,9
II	1m	-	-	-	-	-	-
	3m	1,744	0,014	2353	182	8,8	1,4
	6m	1,742	0,014	2128	217	7,2	1,5
III	1m	1,931	0,000	3316	68	19,3	0,8
	3m	1,931	0,015	3666	36	23,5	1,8
	6m	1,884	0,000	3223	101	17,8	1,1
IV	1m	1,802	0,016	3019	107	14,9	1,1
	3m	1,799	0,023	3330	183	18,1	2,1
V	1m	1,722	0,009	3041	126	14,5	1,2
	3m	1,638	0,008	2898	74	12,5	0,7
VI	1m	1,722	0,010	3219	195	17,1	2,0
	3m	1,773	0,010	3081	219	15,3	2,3
VII	1m	1,905	0,030	3202	195	17,7	1,2
VIII	1m	1,973	0,014	3284	103	19,3	1,2



Σχήμα 3.6 Μέτρο ελαστικότητας σκυροδεμάτων αποκατάστασης για ηλικίες δοκιμίων 1, 3 & 6 μήνες

Συμπεράσματα

- § Γενικά για υψηλές τιμές θλιπτικών αντοχών εμφανίζονται και τα μεγαλύτερα μέτρα ελαστικότητας. Η διαφορά στις συνθέσεις μηλαϊκής γης και μετακαολίνη ως προς το μέτρο ελαστικότητας δεν είναι της τάξης των θλιπτικών αντοχών αναμενόμενο άλλωστε σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [5].
- § Γενικότερα παρατηρείται μείωση των μέτρων ελαστικότητας από τον 1 στους 3 μήνες.

Η μέτρηση των στατικών μέτρων ελαστικότητας έδωσε μεγάλη διασπορά αποτελεσμάτων και ως εκ τούτου τα αποτελέσματα δεν είναι αξιόπιστα.

2.4. Θερμικές μέθοδοι

Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα των θερμικών μεθόδων που πραγματοποιήθηκαν στα σκυροδέματα που παρασκευάστηκαν παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα, και αφορούν στη μέτρηση ποσοτήτων του χημικά δεσμευμένου νερού, του νερού που προέρχεται από τη διάσπαση του ελεύθερου Ca(OH)_2 , καθώς και του εκλυόμενου CO_2 . Επίσης υπολογίζεται και η υδραυλικότητα του κονιάματος η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη του λόγου CO_2 /χημικά δεσμευμένο νερό.

Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα των θερμικών αναλύσεων προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- § Όσον αφορά στην δραστικότητα της μηλαϊκής γης σαν ποζολανικό πρόσμικτο (συνθέσεις I & II), από το θερμοδιάγραμμα παρουσιάζεται μία ενδόθερμη κορυφή (**peak**) γύρω στους $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ που αποδίδεται στην διάσπαση του Ca(OH)_2 , και αυτή εμφανίζεται τόσο στην ηλικία τόσο του ενός όσο και των τριών & και 6 μηνών. Η ύπαρξη ακόμα ποσότητας Ca(OH)_2 δηλώνει ότι η ποζολανική αντίδραση είναι ακόμα σε εξέλιξη. Παράλληλα στο θερμοκρασιακό διάστημα μεταξύ $120\text{-}600^{\circ}\text{C}$ ενδόθερμες κορυφές ανιχνεύονται γεγονός που δηλώνει το σχηματισμό ένυδρων αργιλοπυριτικών ενώσεων με ταυτόχρονη απώλεια βάρους από την χημική δέσμευση του νερού. Τέλος σε θερμοκρασία 800°C το CaCO_3 διασπάται με ταυτόχρονη απώλεια βάρους λόγω της αποβολής CO_2 .

Πίνακας 1.23 Αποτελέσματα θερμικών αναλύσεων

ΣΥΝΘΕΣΗ	ΗΛΙΚΙΑ	120-600°C	350-450°C		>600 °C		CO ₂ /H ₂ O
		Χημικά δεσμευμένο H ₂ O	H ₂ O από διάσπαση Ca(OH) ₂	Ca(OH) ₂	CO ₂	CaCO ₃	
I	1m	-	-	-	-	-	-
	3m	3,63	0,60	2,47	7,79	17,7	2,14
	6m	4,72	0,66	2,72	3,71	8,42	0,79
II	1m	8,05	1,90	7,81	7,86	17,86	0,98
	3m	1,68	1,04	4,27	7,00	15,91	4,17
	6m	5,03	0,88	3,62	4,55	10,32	0,91
III	1m	-	-	-	-	-	-
	3m	19,85	-	-	3,53	8,02	0,18
	6m	21,04	-	-	6,55	14,86	0,31
IV	1m	-	-	-	-	-	-
	3m	19,66	-	-	3,06	6,95	0,15
V	1m	12,85	-	-	1,35	3,07	0,11
	3m	10,19	-	-	1,78	4,04	0,17
VI	1m	17,80	0,68	2,79	2,64	6,00	0,15
	3m	16,90	-	-	2,78	6,310	0,37
VII	1m	6,95	3,35	13,77	3,43	7,80	0,49
VIII	1m	7,58	2,85	11,71	4,99	11,34	0,66

§ Μελετώντας τον μετακαολίνη ως προς τη δραστικότητα στις συνθέσεις III και IV παρατηρούμε ότι στο χρονικό διάστημα των τριών μηνών καμία ενδόθερμη κορυφή δεν εμφανίζεται στους 480°C και άρα συμπεραίνουμε πως η ποζολανική αντίδραση έχει ολοκληρωθεί. Επομένως μπορούμε να πούμε με σιγουριά πως για την περίπτωση του μετακαολίνη σε αναλογία 1/1 με αερική άσβεστο η εξέλιξη της ποζολανικής αντίδρασης είναι πολύ γρήγορη.

§ Για τις συνθέσεις VII, VIII τα διατιθέμενα αποτελέσματα περιορίζονται στο ένα μήνα. Ενδόθερμες κορυφές εμφανίζονται τόσο θερμοκρασιακό εύρος των 120-600°C, δηλαδή σχηματισμός ένυδρων αργιλοπυριτικών ενώσεων, καθώς και στους 480 °C με ταυτόχρονη διάσπαση Ca(OH)₂, και στους 800 °C με διάσπαση του CaCO₃. Η ποζολανική αντίδραση βρίσκεται σε εξέλιξη και για τις δύο συνθέσεις. Για την VI σύνθεση που διατίθενται και αποτελέσματα

στους 3 μήνες διαπιστώνεται ότι στο χρονικό αυτό διάστημα η ποζολανική αντίδραση έχει ολοκληρωθεί.

Πρέπει να σημειωθεί πως μεγαλύτερη σημασία έχει ο ποιοτικός έλεγχος της εξέλιξης των αντιδράσεων καθώς ο ποσοτικός αποκλίνει από την πραγματικότητα λόγω του ότι στο δείγμα που εξετάζεται είναι δύσκολο να διαχωριστεί και να απομονωθεί η κονία από τα αδρανή.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. *Επίδραση της φύσης της κονίας στις μηχανικές αντοχές των σκυροδεμάτων*

Α Η μηλαϊκή γη δεν παρουσιάζει αυξημένη δραστικότητα όσον αφορά την δέσμευση του Ca(OH)_2 , η μέγιστη τιμή της θλιπτικής και της καμπτικής αντοχής είναι μικρή ενώ ο ρυθμός πρόσληψης των μηχανικών αντοχών γίνεται εξαιρετικά αργός.

Α Ο μετακαολίνης παρουσιάζει αυξημένη δραστικότητα όσον αφορά την δέσμευση του Ca(OH)_2 , γεγονός που οφείλεται στην χημική, ορυκτολογική του σύσταση καθώς και στην λεπτή του κοκκοδιαβάθμιση. Αποτέλεσμα της υψηλής δραστικότητας του είναι η πρόσληψη υψηλών τιμών αντοχών σε θλίψη και κάμψη σε μικρό χρονικό διάστημα και επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ποζολανικό πρόσθετο στα ασβεστιτικά κονιάματα, προκειμένου να βελτιώσει τις πρώιμες αντοχές των κονιαμάτων.

Α Η σύνθεση του σκυροδέματος με αναλογία ανάμιξης υδτάσβεστος/μετακαολίνης/θραυσμένο κεραμικό/άμμος: 20/10/35/35 (% κ.β.) παρουσίασε ικανοποιητική τιμή του λόγου F_c/F_f (θλιπτική/καμπτική αντοχή) και του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας. Επιπλέον, εκτιμάται ότι αυξάνοντας τον λόγο υδράσβεστο/μετακαολίνη θα μειωθεί περαιτέρω η τιμή του E_d και του F_c .

Α Η σύνθεση του υδραυλικού ασβέστη παρουσίασε ικανοποιητική συμπεριφορά σχετικά με την θλιπτική αντοχή αλλά υψηλές τιμές του

δυναμικού μέτρου ελαστικότητας **Ed** και χαμηλές για την καμπτική αντοχή **Ff**. Ωστόσο, η συγκεκριμένη σύνθεση είναι σε χημική εξέλιξη (όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα της τεχνικής **DTA/TG**) επομένως τα μηχανικά χαρακτηριστικά της είναι απαραίτητο να αποτιμηθούν στους **3** και **6** μήνες.

ΑΕ Τέλος, η σύνθεση του τσιμέντου παρουσίασε αρκετά υψηλές τιμές θλιπτικής αντοχής και δυναμικού μέτρου ελαστικότητας **Ed**.

2. Η επίδραση της φύσης των αδρανών στα μηχανικά χαρακτηριστικά των σκυροδεμάτων

ΑΕ Η χρήση των θραυσμένων κεραμικών σαν αδρανή στα σκυροδέματα επηρεάζει κυρίως την τιμή του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας των σκυροδεμάτων. Αντίθετα, επηρεάζει ελάχιστα την τιμή της καμπτικής αντοχής και σχεδόν καθόλου την αντίστοιχη της θλιπτικής.

3. Γενικά

ΑΕ Αρκετές συνθέσεις σκυροδεμάτων βρίσκονται σε εξέλιξη όσον αφορά στην χημικές αντιδράσεις και στην πρόσληψη των μηχανικών αντοχών, επομένως τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν επίσης, στους **3**, **6** και **12** μήνες.

5. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως προκύπτει από τα προκαταρκτικά αποτελέσματα της ερευνητικής εργασίας του Τομέα Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. – Καθ. Α. Μοροπούλου και των αντίστοιχων εργασιών των Εργαστηρίων «Αντισεισμικής Τεχνολογίας» - Καθ. Π. Καρύδης και «Στατικής και Αντισεισμικών Ερευνών» - Καθ. Κ. Συρμακέζης του Τομέα Δομοστατικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., τα σκυροδέματα με υδραυλικό ασβέστη και ασβέστη/μετακαολίνη παρουσίασαν ικανοποιητική συμπεριφορά σε στατικές και δυναμικές καταπονήσεις σαν δομικά στοιχεία των τοιχοποιιών. Ωστόσο, η επεξεργασία των τελικών αποτελεσμάτων είναι ακόμη σε εξέλιξη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Α. Μπακόλας "Κριτήρια και μέθοδοι χαρακτηρισμού ιστορικών κονιαμάτων"
" Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα **2002**
2. Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος-97, Φ.Ε.Κ.:315/Β/17.4.97 &
Φ.Ε.Κ.:479/Β/ 11.6.97.
3. **Chase G.W. "Investigation of the Interface Between Brick and Mortar"**
4. Πρασιανάκης Ι., Κουρκουλής Σ., «Σημειώσεις για τα εργαστήρια
πειραματικής αντοχής υλικών», Αθήνα **1998**
5. **Neville AM., "Properties of concrete", 4th edition, Longman Ltd, Harlow, 1995.**
6. Μελέτη Ροτόντας, Καθ. Γ. Γ. Πενέλης, Θεσσαλονίκη 1980.
7. Addleson L., Rice C., "Performance of materials in Buildings Study for the
Principles and Agencies of change", Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, 1991
8. Κ. Αθανασιάδου, Μεταπτυχιακή εργασία, "Μελέτη σεισμικής συμπεριφοράς
κονιαμάτων αποκατάστασης ιστορικών μνημείων. Εφαρμογή στα κονιάματα
με θραυσμένα κεραμικά για την αποκατάσταση τοιχοποιιών από συμπαγείς
πλίνθους και αρμούς μεγάλου πάχους (Κονιάματα-σκυροδέματα ασβέστη
και ασβέστη ποζολάνης)", Νοέμβριος **2001**.
9. Ε. Αγγελικοπούλου, Διδακτορική διατριβή, Σχολή Χημικών Μηχανικών
Ε.Μ.Π. "Αριστοποίηση της παρασκευής των κονιαμάτων αποκατάστασης με
κριτήριο τη συμβατότητα προς τα ιστορικά δομικά υλικά", επιβλέπουσα
καθ. Α. Μοροπούλου, υπό εξέλιξη.