



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

**ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΗ 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, Δρ. Ε.Μ.Π.**

**ΑΓΓΕΛΑΚΟΠΟΥΛΟΥ ΕΛΕΝΗ, Μ.Δ.Ε. Προστασία Μνημείων, Υ. Δρ. 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, ΜΑΡΤΙΟΣ 2005**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
I. ΥΛΙΚΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΤΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	5
1. Πρώτες ύλες.....	5
2. Σχεδιασμός σκυροδεμάτων αποκατάστασης.....	13
3. Παρασκευή και συντήρηση σκυροδεμάτων αποκατάστασης.....	17
4. Τεχνικές αποτίμησης σκυροδεμάτων αποκατάστασης.....	20
II. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	31
1. Τεχνικά Χαρακτηριστικά Νωπών κονιαματων.....	31
2. Μικροσκόπιο οπτικών ινών.....	32
3. Συρρίκνωση.....	34
4. Μηχανικές δοκιμές - Αντοχή σε Θλίψη, Κάμψη – Στατικό Μέτρο Ελαστικότητας.....	35
5. Ταχύτητα Διάδοσης Υπερήχων – Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας.....	40
6. Διαφορική Θερμική και Θερμοβαρυμετρική DTA/TG).....	44
III. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	48
IV. ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ – ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	50
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	54

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Η παρούσα τεχνική μελέτη αποτελεί συμπληρωματική έκθεση της Τελικής Τεχνικής Έκθεσης του Ερευνητικού προγράμματος “Αποτίμηση απόκρισης σε σεισμικές δράσεις δομικών συνόλων με φέρουσα τοιχοποιία από οπτόπλινθους με συνδετικό υλικό κονιάματα παραδοσιακού τύπου – Προδιαγραφές κατάλληλων υλικών”. Το παραπάνω πρόγραμμα εκπονήθηκε από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και πιο συγκεκριμένα από την Σχολή Χημικών Μηχανικών - Τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών με Επιστημονικά Υπεύθυνη, την Καθ. Α. Μοροπούλου, η οποία αποτελεί και την γενική συντονίστρια του ερευνητικού προγράμματος, και με συνεργαζόμενο τομέα, τον Τομέα Δομοστατικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., (Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας - Καθ. Π. Καρύδης, Εργαστήριο Στατικής και Αντισεισμικών Ερευνών - Καθ. Κ. Συρμακέζης), κατόπιν ανάθεσης από τον Οργανισμό Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ). Το παρόν ερευνητικό πρόγραμμα στοχεύει στη αποτίμηση απόκρισης σε σεισμικές δράσεις δομικών συνόλων με φέρουσα τοιχοποιία από οπτόπλινθους με συνδετικό υλικό κονιάματα παραδοσιακού τύπου.

Η συμπληρωματική τελική τεχνική έκθεση αναφέρεται:

- στην ολοκλήρωση της αποτίμησης των φυσικοχημικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των συνθέσεων κονιαμάτων (Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, Τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, Καθ. Α. Μοροπούλου)
- στην σύνταξη οδηγιών – προδιαγραφών που πρέπει να πληρούν τα κονιάματα αποκατάστασης/δόμησης παραδοσιακού τύπου (Σχολή Χημικών Μηχανικών, Τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, Καθ. Α. Μοροπούλου)
- στην σύνταξη καμπυλών θραυστότητας για διαφορετικές συνθέσεις κονιαμάτων (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:

- 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
- 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
- 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)

Η συγκεκριμένη έκθεση αποτελεί συμπληρωματική της τελικής τεχνικής έκθεσης του ερευνητικού προγράμματος και αφορά στην ολοκληρωμένη αποτίμηση των φυσικοχημικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των συνθέσεων κονιαμάτων, στη σύνταξη οδηγιών – προδιαγραφών που πρέπει να πληρούν τα κονιάματα αποκατάστασης/δόμησης παραδοσιακού τύπου και στη σύνταξη καμπυλών θραυστότητας για διαφορετικές συνθέσεις κονιαμάτων.

# Ι. ΥΛΙΚΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΤΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

## 1. ΠΡΩΤΕΣ ΥΛΕΣ

### ΚΟΝΙΕΣ

#### Υδράσβεστος

Η Υδράσβεστος (L) που χρησιμοποιήθηκε είναι βιομηχανικό προϊόν (Μακεδονική Ασβεστοποιία) και διατίθεται σε μορφή σκόνης. Η χημική της σύσταση προσδιορίστηκε με χρήση της DTA/TG. Το συνολικό περιεχόμενο ποσοστό σε  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ανέρχεται σε 89.10% ενώ το αντίστοιχο ποσοστό του  $\text{CaCO}_3$  σε 5.98%.

Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης της υδρασβέστου με χρήση της τεχνικής Φθορισμού Ακτινών Χ (XRF) καθώς και τις τιμές της πραγματικής πυκνότητας (ASTM C-188-95), της φαινόμενης πυκνότητας (EN-459 “Building Lime-Part 2: Test Methods”) και της ειδικής επιφάνειας προσδιορισμένης διαμέσου της διάταξης ρόφησης αζώτου (BET).

Πίνακας 1 Αποτελέσματα XRF της υδρασβέστου σκόνης.

$\text{SiO}_2$ (%)	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (%)	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	$\text{CaO}$ (%)	$\text{MgO}$ (%)	$\text{K}_2\text{O}$ (%)	$\text{Na}_2\text{O}$ (%)	$\text{SO}_3$ (%)	LOI (%)	dapp. g/cm <sup>3</sup>	dreal g/cm <sup>3</sup>	As m <sup>2</sup> /g
0.17	0.18	0.07	70.06	2.35	-	-	0.77	25.60	0.5	2.34	13.60

#### Υδραυλική Ασβεστος

Χρησιμοποιήθηκε υδραυλική ασβεστος τύπου NHL-Z 3,5 της εταιρείας Lafarge. Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει την σύσταση και τα χαρακτηριστικά της χρησιμοποιούμενης υδραυλικής ασβέστου.

Πίνακας 2 Σύσταση και ιδιότητες υδραυλικής ασβέστου

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

### Λευκό Τσιμέντο

Χρησιμοποιήθηκε λευκό τσιμέντο τύπου II/A 42,5 N ΕΛΣ (λευκό) της εταιρείας "TITAN". Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει την σύσταση και τα χαρακτηριστικά του λευκού τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκε.

Πίνακας 3 Σύσταση και ιδιότητες λευκού τσιμέντου

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

### ΠΟΖΟΛΑΝΙΚΑ ΠΡΟΣΘΕΤΑ

Τα ποζολανικά πρόσθετα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των κονιαμάτων είναι τα ίδια εξής:

- Μετακαολίνης (MK),
- Μηλαϊκή Γη (EM)

Ο Πίνακας 4 παρουσιάζει τις τιμές της φαινόμενης πυκνότητας των κονιών και ποζολανικών προσμίκτων που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των σκυροδεμάτων.

Πίνακας 4 Τιμές Φαινόμενης Πυκνότητας Κονιών και Ποζολανικών Προσμίκτων

Κονίες - Ποζολάνες	dapp. (g/cm <sup>3</sup> )
Υδράβεστος	0,53
NHL3,5-Z	0,77
Λευκό Τσιμέντο	
MK	0,37
EM	0,89
CP	0,83

### **Μηλαϊκή Γη**

Η προμήθεια της Μηλαϊκής γης που χρησιμοποιήθηκε έγινε από την εταιρεία "LAVA A.E. 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 5 Χημική σύσταση και ιδιότητες μηλαϊκής γης

Σύσταση Μηλαϊκής γης	
SiO <sub>2</sub>	69,66%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,21%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,34 %
CaO	2,01%
MgO	0,70%
K <sub>2</sub> O	3,28%
Na <sub>2</sub> O	3,28%
LOI	7,35%
Ποζολανικότητα (MPa)	6,7
Ενεργό πυρίτιο	55,51%
Πυκνότητα	2,36 gr/cm <sup>3</sup>

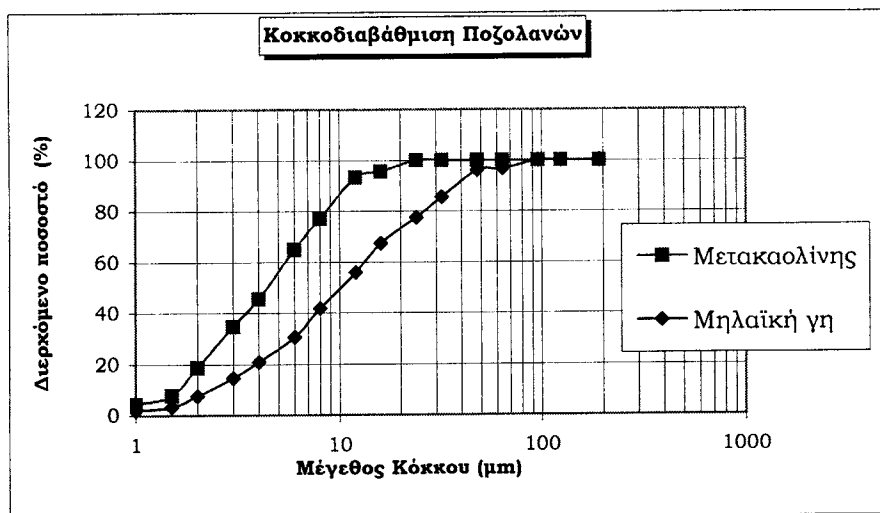
### **Μετακαολίνης**

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

παρακάτω πίνακα ενώ στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των ποζολανών.

Πίνακας 6 Χαρακτηριστικά του μετακαολίνης

Ποζολανική δραστικότητα	950 mg δεσμευμένου $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /g ποζολάνης
Υγρασία	0,5%
Χρώμα	Λευκό
Ειδικό βάρος	0,3 $\text{gr}/\text{cm}^3$
Ειδική Επιφάνεια	12 $\text{m}^2/\text{gr}$
$\text{SiO}_2$	51,70%
$\text{Al}_2\text{O}_3$	40,6%
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,64%
$\text{CaO}$	0,71%
$\text{MgO}$	0,96%
$\text{K}_2\text{O}$	2,00%
$\text{Na}_2\text{O}$	0,31%
$\text{SO}_3$	0,11%
LOI	1,19%
Πυκνότητα	2,52 $\text{gr}/\text{cm}^3$



Σχήμα 1 Κοκκομετρική διαβάθμιση της μηλαϊκής γης και του μετακαολίνης.

## ΑΔΡΑΝΗ ΥΛΙΚΑ

### Γαρμπίλι-Gr.Cc.4/16

Γαρμπίλι ασβεστολιθικής σύστασης της εταιρείας "TITAN", η κοκκοδιαβάθμιση του οποίου παρουσιάζεται στον Πίνακα 7.



Σχετικά με τα ειδικά του γαρμπιλιού δίνονται τα στοιχεία:

- Φαινόμενο ειδικό βάρος: 2,72 t/m<sup>3</sup>
- Μικτό ειδικό βάρος: 2,65 t/m<sup>3</sup>
- Μικτό ειδικό βάρος εν κορεσμών: 2,68 t/m<sup>3</sup>
- Μοναδιαίο βάρος (unit weight): 1,36 t/m<sup>3</sup>

Πίνακας 7 Κοκκομετρική διαβάθμιση των διαφόρων αδρανών

Siev.D. (mm)	Συγκρατούμενο Ποσοστό (%)							
	Gr.-Cc 4-16 mm	CF.C. 4-16mm	CF.F. 0 8mm	S.A1-Q 3 6mm	S.A2-Cc 2 4mm	S.A1-Q 1-2mm	S.A1-Q 0,5-1mm	S.A1-Q <0,5mm
16								
8	90	91						
4	10	9	1	82				
2			16	18	100			
1			18			100		
0,5			14				94	
0,25			10				6	50
0,125			9					49
0,063			9					1
<0,063			24					

### Άμμος S.Q.

Άμμος χαλαζιακή ποταμίσια. Η άμμος διατίθενται σε 4 κοκκομετρίες:

- 3-6 mm – S.Q.3/6
- 1-2 mm – S.Q.1/2
- 0,5-1 mm – S.Q.0.5/1
- <0,5 mm – S.Q.<0.5

Η κοκκομετρική διαβάθμιση της άμμου S.Q. φαίνεται στον Πίνακας 7

### Άμμος S.Cc.2/4

Πρόκειται για άμμο θραυστή λατομείου ασβεστολιθικής σύστασης της εταιρείας "TITAN". Ο Πίνακας 7 παρουσιάζει την κοκκομετρική διαβάθμιση της άμμου. Σχετικά με τα ειδικά της βάρη δίνονται τα στοιχεία:

Φαινόμενο ειδικό βάρος: 2,71 t/m<sup>3</sup>

Μικτό ειδικό βάρος: 2,58 t/m<sup>3</sup>

Μικτό ειδικό βάρος εν κορεσμών: 2,62 t/m<sup>3</sup>

Μοναδιαίο βάρος (unit weight): 1,65 t/m<sup>3</sup>

### Θραυσμένο Κεραμικό

### Κεραμικό-C.F.1.

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

Πίνακας 8 Χημική ανάλυση πηλού

Κεραμικό C.F.1	
Na <sub>2</sub> O	1,86%
K <sub>2</sub> O	2,89%
CaO	1,59%
MgO	2,15%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,6%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,4%
SiO <sub>2</sub>	64,2%
Απώλεια Βάρους	8,22%

Πίνακας 9 Χημική ανάλυση πηλού: % ποσοστό διαλυτών σε 0,1nHCl

Κεραμικό C.F.1	
Na <sub>2</sub> O	0,04%
K <sub>2</sub> O	0,06%
CaO	1,13%
MgO	0,62%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,42%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,47%
SiO <sub>2</sub>	0,72%

Πίνακας 10 Χημική ανάλυση πηλού ποσοστών αλάτων

Κεραμικό C.F.1	
Χλωριούχα	0,04%
Νιτρικά	0,06%
Θειικά	1,13%

Πίνακας 11 Όρια Attemberg πηλού

Κεραμικό C.F.1	
Όριο υδαρότητας (W <sub>L</sub> )	28,16%
Όριο πλαστικότητας (W <sub>P</sub> )	23,7%
Δείκτης πλαστικότητας (Ip)	4,46%

Επομένως βάσει των ορίων Attemberg ο πηλός χαρακτηρίζεται ως ανόργανη άργιλος λίγο συμπιεστή. Οι ιδιότητες των συμπαγών πλίνθων είναι:

Πίνακας 12 Ιδιότητες πλίνθων

Θλιπτική αντοχή (MPa)	12
Καμπτική αντοχή (MPa)	0,60
Πορώδες %	17,93
Ειδικό βάρος (t/m <sup>3</sup> )	1,79
Υδατοδιαλυτά άλατα SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> %	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-C.F.2

Χρησιμοποιήθηκε επίσης θραυσμένο κεραμικό που διατίθενται σε δύο κοκκομετρίες:

- Χοντρόκοκκο Κεραμικό – C.F.C.4/16
- Λεπτόκοκκο Κεραμικό – C.F.F.0/8

Ο Πίνακας 16 παρουσιάζει την κοκκομετρική διαβάθμιση των δύο κεραμικών.

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 φαινομένου 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 13 Χημική ανάλυση

Κεραμικό-C.F.2	
Na <sub>2</sub> O	2,03%
K <sub>2</sub> O	2,87%
CaO	3,54%
MgO	2,05%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,01%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,47%
SiO <sub>2</sub>	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 14 Αποτελέσματα πορομετρίας υδραργύρου

Κεραμικό C.F.2	
Ολικός προσροφούμενος όγκος (mm <sup>3</sup> /g)	150,3
Ειδική επιφάνεια (m <sup>2</sup> /g)	2,61
Μέση ακτίνα πόρων (μm)	0,59
Φαινόμενη πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	1,89
Διορθωμένη φαινόμενη πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	2,64
Ολικό πορώδες %	28,4

Πίνακας 15 Ειδικό βάρος κεραμικού C.F.2

Κεραμικό C.F.2	
Φαινόμενο ειδικό βάρος ξηρού (g/cm <sup>3</sup> )	1,02
Φαινόμενο ειδικό βάρος κορεσμένου (g/cm <sup>3</sup> )	1,12

Πίνακας 16 Κοκκομετρική διαβάθμιση κεραμικού C.F.2

Διάμετρος κόσκινου (mm)	Συγκρατούμενο ποσοστό (%)	
	K2 0/4	K2 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	-

Ο Πίνακας 17 παρουσιάζει τις τιμές φαινόμενης πυκνότητας των αδρανών που έχουν χρησιμοποιηθεί για την παρασκευή των σκυροδεμάτων.

Πίνακας 17 Τιμές φαινόμενης πυκνότητας των χρησιμοποιούμενων αδρανών.

<b>Αδρανή</b>	<b>dapp. (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Gr.Cc.4/16	2,72
S.Q.3/6	1,46
S.Cc.2/4	2,70
S.Q.1/2	1,52
S.Q.0,5/1	1,54
S.Q.<0,5	1,43
CF.C.4-16mm	1,05
CF.F. 0-8mm	0,97

## 2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Για τον σχεδιασμό των σκυροδεμάτων, ελήφθησαν υπόψη τα χαρακτηριστικά των ιστορικών κονιαμάτων ενός μνημείου με τοιχοποιίες μεγάλου αρμού (Βυζαντινού Περιόδου) το οποίο να έχει παρουσιάσει άριστη συμπεριφορά στις σεισμικές δράσεις. Το μνημείο που επιλέχθηκε, το οποίο λειτούργησε σαν πρότυπο για τον σχεδιασμό των κονιαμάτων για τοιχοποιίες μεγάλου αρμού είναι η Αγία Σοφία της Κωνσταντινούπολης. Πιο συγκεκριμένα, ο χαρακτηρισμός των ιστορικών κονιαμάτων της Αγίας Σοφίας απεκάλυψε τα εξής χαρακτηριστικά:

- Η συνδετική κονία, παρουσιάζει ελαφρώς υδραυλική φύση
- Τα χρησιμοποιούμενα αδρανή
- αποτελούνται από ανάμιξη σπασμένου κεραμικού και άμμου.
- Η κοκκοδιαβάθμιση των αδρανών είναι στην κλίμακα 0-16mm, και η διάμετρος του μέγιστου κόκκου ίση με  $D_{max} \sim 12mm$  (ίσο με το 1/5 του αρμού της τοιχοποιίας που είναι περίπου ίσο με 6 cm).
- Τα χονδρόκοκκα αδρανή (με διάμετρο μεγαλύτερη των 8mm) αποτελούνται αποκλειστικά από σπασμένο κεραμικό ενώ το κλάσμα που αντιστοιχεί σε μικρότερες κοκκοδιαβαθμίσεις (<8mm), αποτελείται από όλο και μεγαλύτερο ποσοστό άμμου, καταλήγοντας τα πιο λεπτόκοκκα κλάσματα να αποτελούνται αποκλειστικά από άμμο.
- Το συνολικό ποσοστό των σπασμένων κεραμικών στο μίγμα των αδρανών ανέρχεται σε 40%.

- Με βάση τα παραπάνω, και λαμβάνοντας επίσης, υπόψη ότι δευτερεύοντες στόχοι της συγκεκριμένης εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της φύσης της κονιάς και της φύσης των αδρανών στα μηχανικά χαρακτηριστικά των κονιαμάτων, παρασκευάστηκαν εννέα συνθέσεις. Πιο συγκεκριμένα, η παραγωγή των σκυροδεμάτων θα μπορούσε να διαχωριστεί σε δύο φάσεις:

Φάση 1 - Κονιάματα/σκυροδέματα 1-5: Επίδραση χρήσης αδρανών διαφορετικής φύσης στα μηχανικά χαρακτηριστικά των σκυροδεμάτων.

Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου παρασκευάστηκαν οι συνθέσεις 1-2 με χρήση υδρασβέστου και μηλαϊκής γης και αδρανή είτε γαρμπίλι – άμμος (Σκυρ.1) είτε σπασμένο κεραμικό – άμμος (Σκυρ.2).

Επίσης, παρασκευάστηκαν άλλες τρεις συνθέσεις με χρήση υδρασβέστου, μετακαολίνη και αδρανή είτε γαρμπίλι – άμμος (Σκυρ.3) είτε σπασμένο κεραμικό – άμμος (Σκυρ.4), είτε αμιγώς σπασμένο κεραμικό (Σκυρ.5).

Προκειμένου να ελέγξουμε την επίδραση της φύσης των αδρανών όλες οι υπόλοιπες παράμετροι (αναλογία κονιάς/αδρανής:30/70%, ίδια καμπύλη κοκκοδιαβάθμισης) παρέμειναν σταθερές.

Φάση 2 - Κονιάματα/σκυροδέματα 6-9: Επίδραση χρήσης συνδετικής κονιάς διαφορετικής φύσης στα μηχανικά χαρακτηριστικά των σκυροδεμάτων.

Στη δεύτερη φάση, παρασκευάστηκαν συνθέσεις σκυροδεμάτων με την χρήση ίδιων αδρανών όσον αφορά στην φύση, την αναλογία και την κοκκομετρική διαβάθμιση αλλά διαφορετικών συνδετικών κονιών.

Τα αδρανή σε όλες τις συνθέσεις ήταν μίξη σπασμένων κεραμικών και αδρανών ενώ χρησιμοποιήθηκαν οι εξής συνδετικές κονίες και ποζολανικά πρόσθετα: υδράσβεστος, υδραυλική άσβεστος, τσιμέντο, μετακαολίνης.

Η αναλογία κονιάς/αδρανών για όλες τις συνθέσεις είναι 1/2,33 (30%-70%).

Ο Πίνακας 18 παρουσιάζει τα ποσοστά (%) κατά βάρος των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των συνθέσεων των σκυροδεμάτων.

Πίνακας 18 Ποσοστά (%) κατά βάρος των υλικών για την παρασκευή των συνθέσεων των σκυροδεμάτων

Φάση	Α/Α	Κωδ.	L	EM	MK	C	NHL	Αδρανή	
								(%κ.β.)	Φύση
A	1	EM2.Gr.S.	10	20				70	Μίξη άμμων/γαρμπίλι
	2	EM2.CF1.S.	10	20				70	Μίξη άμμων/θραυσμένο κεραμικό C.F.1.
	3	MK1.Gr.S.	15		15			70	Μίξη άμμων/γαρμπίλι
	4	MK1.CF1.S.	15		15			70	Μίξη άμμων/θραυσμένο κεραμικό C.F.1.
	5	MK1.CF1.	15		15			70	Θραυσμένο κεραμικό C.F.1.
B	6	MK05.CF2.S.	20		10			70	Μίξη άμμων/θραυσμένο κεραμικό C.F.2.
	7	Cem1.CF2.S.	15			15		70	Μίξη άμμων/θραυσμένο κεραμικό C.F.2.
	8	NHL.CF2.S.					30	70	Μίξη άμμων/θραυσμένο κεραμικό C.F.2.
	9	MK2.5.CF2.S.	27,5		2,5			70	Μίξη άμμων/θραυσμένο κεραμικό C.F.2.

#### ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΑΔΡΑΝΩΝ

Για τον σχεδιασμό της κοκκομετρικής διαβάθμιση των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν, ελήφθησαν υπόψη η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών των ιστορικών κονιαμάτων της Αγίας Σοφίας.

Ο Πίνακας 19 παρουσιάζει τις αναλογίες ανάμιξης διαφορετικών τύπων αδρανών για κάθε σύνθεση.

Όπως παρατηρείται στον πίνακα, σε όλες τις συνθέσεις χρησιμοποιήθηκαν αδρανή σε ποσοστό 70%κ.β., ενώ όπου υπήρχε ανάμιξη σπασμένων κεραμικών με άμμου, η μεταξύ τους ανάμιξη έγινε με ποσοστό 50/50%.

Όσον αφορά στην κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν, ο Πίνακας 20 παρουσιάζει το συνολικά αθροισμένο διερχόμενο ποσοστό σε κάθε κλάσμα των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των σκυροδεμάτων 1-5 και 6-9 καθώς και τις αντίστοιχες τιμές της κατανομής των αδρανών για ιστορικό κονίαμα της Αγίας Σοφίας. Παρατηρείται ότι τα χρησιμοποιούμενα αδρανή για την παρασκευή των σκυροδεμάτων της φάσης A παρουσιάζουν ανάλογες τιμές με τις αντίστοιχες του ιστορικού κονιάματος ενώ τα κονιάματα/σκυροδέματα της φάσης B παρουσιάζουν μια μικρή απόκλιση από τα αντίστοιχα του ιστορικού.

Το Σχήμα 2 παρουσιάζει την κατανομή των αδρανών σε αθροιστική λογαριθμική κλίμακα σε σύγκριση με το ιστορικό κονίαμα της Αγίας Σοφίας, όπου και παρατηρείται μια αρκετά καλή προσέγγιση της κατανομής των αδρανών του ιστορικού κονιάματος.

Πίνακας 19 Αναλογίες Ανάμιξης Διαφορετικών Τύπων Αδρανών για κάθε Σύνθεση

Φάση	Κωδ.	Γαρμπίλι- Άμμος (Gravel - Sand)						Θραυσμένο Κεραμικό 1. - C.F.1.						C.F.2.		Συνολικά			
		Gr.Cc 4/16	S.Q. 3/6	S.Cc 2/4	S.Q. 1/2	S.Q. 0,5-1	S.Q. <0,5	8/16	4/8	2/4	1/2	0,5/1	0,25/ 1	0,125/ 0,25	4/16	0/8	Sum	S.	C.F.
A	1	7	19	11	11	9	13										70	70	
	2		10	5	6	5	10	6	8	7	6	4	2	2			70	35	35
	3	7	19	11	11	9	13										70	70	
	4		10	5	6	5	10	6	8	7	6	4	2	2			70	35	35
	5							6	16	14	11	9	7	7			70		70
B	6		10	5	6	5	10								9	26	70	35	35
	7		10	5	6	5	10								9	26	70	35	35
	8		10	5	6	5	10								9	26	70	35	35
	9		10	5	6	5	10								9	26	70	35	35

Gr.Cc (Gravel Calclitic): Γαρμπίλι ανθρακικής φύσης, S.Q.(Sand Quartz): άμμος χαλαζιακής φύσης, S.Cc.(Sand Calclitic): άμμος ανθρακικής φύσης C.F.1.(Ceramic Fragment Type 1): Θραυσμένο κεραμικό τύπου 1, C.F.2.(Ceramic Fragment Type 2): Θραυσμένο κεραμικό τύπου 2, S (Sand): άμμος συνολικά C.F. (Ceramic Fragment): Θραυσμένο κεραμικό συνολικά

Ο Πίνακας 21 παρουσιάζει την αναλογία ανάμιξης σπασμένου κεραμικού και άμμου σε κάθε κλάσμα των αδρανών, για όλες τις συνθέσεις των σκυροδεμάτων, όπου και παρατηρείται ότι η καλύτερη αναλογία ανάμιξης σπασμένου κεραμικού και άμμου σε κάθε κλάσμα αδρανών, ισχύει για την συνθέσεις της Φάσης A.

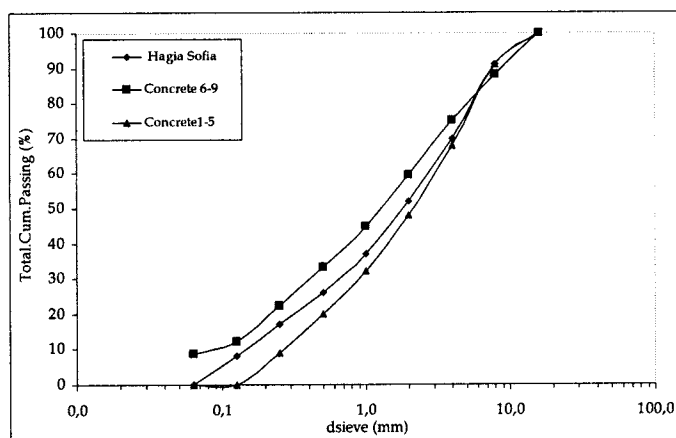
Ωστόσο, για όλες τις συνθέσεις και των δύο φάσεων η ανάμιξη σπασμένων κεραμικών με άμμου στο σύνολο έγινε με ποσοστό 50/50%.

Πίνακας 20 που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των σκυροδεμάτων και του ιστορικού κονιάματος της Αγίας Σοφίας

dsiev. (mm)	Tot.Cum.Pass.(%)		
	Αγία Σοφία	Σκυρόδ. 1-5	Σκυρόδ. 6-9
16	100	100	100
8	91	91	88
4	70	68	75
2	52	48	59
1	37	32	45
0,5	26	20	33
0,25	17	9	22
0,125	8	0	12
0,063	0	0	9
			0

dsiev.: Διάμετρος οπής κόσκινου, Tot.Cum.Pass.: Συνολικά διερχόμενο ποσοστό, S (Sand): άμμος συνολικά C.F. (Ceramic Fragment): Θραυσμένο κεραμικό συνολικά





Σχήμα 2 Κατανομή αδρανών των ιστορικών κονιαμάτων της Αγίας Σοφίας και των σκυροδεμάτων αποκατάστασης

Πίνακας 21 Αναλογία Ανάμιξης Σπασμένου Κεραμικού και άμμου σε κάθε κλάσμα των αδρανών

dsiev. (mm)	Αναλογία Ανάμιξης C.F./S. σε κάθε	
	Σκυρόδ. 1-5	Σκυρόδ. 6-9
16	0	0
8	100-0	100-0
4	50-50	11 89
2	50-50	37-63
1	50-50	45-55
0,5	45-55	43-57
0,25	30-70	34-66
0,125	30-70	33-67
0,063	0	96-04

S (Sand): άμμος συνολικά C.F. (Ceramic Fragment): Θραυσμένο κεραμικό συνολικά

### 3.ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

#### ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ

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.

Στην συγκεκριμένη εργασία η διαδικασία παρασκευής των σκυροδεμάτων ήταν η ακόλουθη. Οι απαιτούμενες για κάθε σύνθεση πρώτες ύλες πριν την ανάμιξη ζυγίζονται σε ξηρή κατάσταση. Τα κεραμικά έχουν ήδη ξηρανθεί σε φούρνο ώστε να μην περιέχουν υγρασία.

Πριν από την ανάμιξη για την παρασκευή του σκυροδέματος τα κεραμικά αδρανή τοποθετούνται μαζί με μέρος του προς ανάμιξη νερού στον αναδευτήρα για 15 λεπτά περίπου ώστε να μην υπάρξει λάθος εκτίμηση της συνολικής ποσότητας του νερού που απαιτεί το μίγμα.

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, και αλλοιωθεί η τελική κοκκοδιαβάθμιση. Κατά τη διάρκεια της ανάδευσης προστίθενται αργά νερό ώστε το μίγμα να "δουλεύεται" χωρίς να είναι πολύ υδαρές.

Η ανάμιξη διαρκεί μέχρι την πλήρη ομογενοποίηση του νωπού κονιάματος – σκυροδέματος και καθορίστηκε σε συνολικό χρόνο ανάδευσης ίσο προς 15 λεπτά (Εικόνα 1). Κάθε σύνθεση παρασκευάζεται σε δύο χυτεύσεις. Η κάθε χύτευση αντιστοιχεί σε 70 κιλά ξηρού υλικού.



Εικόνα 1 Παρασκευή σκυροδέματος σε ηλεκτροκίνητο αναδευτήρα

#### ΈΛΕΓΧΟΣ ΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΝΩΠΟΥ ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ

Ο έλεγχος της εργασιμότητας του νωπού κονιάματος για όλες τις συνθέσεις έγινε με σύμφωνα με τη μέθοδο ελέγχου ΣΚ-309 "Μέθοδος δοκιμής κάθισης" (Εικόνα 2).

Σκοπός του ελέγχου της εργασιμότητας των σκυροδεμάτων είναι η παρασκευή συνθέσεων με ανάλογη εργασιμότητα, ώστε να είναι συγκρίσιμες οι ιδιότητές τους. Σαν αποδεκτό όριο κάθισης ορίστηκε η περιοχή τιμών 1-4 cm, δεδομένου ότι είναι απαραίτητο να παρασκευαστούν κονιάματα/σκυροδέματα με το ελάχιστο απαιτούμενο νερό ώστε αφενός να επιτευχθεί ικανοποιητική εργασιμότητα και αφετέρου να μειωθεί στο ελάχιστο η πιθανή μεγάλη συρρίκνωση (λόγω εξάτμισης της περίσσειας του νερού) και οι χαμηλές τιμές των μηχανικών αντοχών.



Εικόνα 2 Έλεγχος εργασιμότητας σκυροδέματος

#### ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ - ΠΛΗΡΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Σε κάθε σύνθεση χυτεύονται 12 πρισματικές μήτρες διαστάσεων 10x10x50cm, των οποίων τα δοκίμια χρησιμοποιούνται στην συνέχεια για την αποτίμηση των μηχανικών αντοχών (δυναμικό μέτρο ελαστικότητας, κάμψη, θλίψη, θερμικές μέθοδοι) και 3 κυλινδρικών μητρών διαμέτρου 15cm και ύψους 30cm για την αποτίμηση της θλιπτικής αντοχής και του στατικού μέτρου ελαστικότητας.

Η διαδικασία της πλήρωσης των δοκιμίων είναι η ακόλουθη. Το νωπό σκυρόδεμα τοποθετήθηκε στα δοκίμια, τα οποία είχαν επαλειφθεί επιμελώς με λάδι, πληρώνοντας τα κατά το ήμισυ και στην συνέχεια δονούνται σε δονητική τράπεζα για 30 δευτερόλεπτα. Ακολουθούσε το γέμισμα της μήτρας και δόνηση για άλλα 30 δευτερόλεπτα (Εικόνα 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 επιφάνειάς του με μυστρί και ταυτόχρονα απομάκρυνση των υπολειμμάτων του νωπού κονιάματος.





Εικόνα 3 Συμπύκνωση δοκιμίων σκυροδέματος σε δονητική τράπεζα

#### ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

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  $RH = 50 \pm 5 \%$ . Η θερμοκρασία ήταν  $20 \pm 2^\circ C$  τόσο πριν όσο και μετά το ξεκαλούπωμα των δοκιμίων και μέχρι τη θραύση τους.

Ο χρόνος που απαιτείται για το ξεκαλούπωμα των δοκιμίων ποικίλει δεδομένου 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.

#### 4. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

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

- Ομοιογένεια, πρόσφυση, κατανομή αδρανών με χρήση μικροσκόπου οπτικών ινών.
- Μηχανικές αντοχές, με χρήση των διατάξεων δοκιμών θλίψης-κάμψης.
- Στατικό μέτρο ελαστικότητας μέσω δοκιμής σε θλίψη,
- Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας με χρήση της μεθόδου των υπερήχων.

- Χημική εξέλιξη αντίδρασης συνδυαστικής ύλης-ποζολανικών προσμίκτων, με χρήση των θερμικών μεθόδων ανάλυσης (DTA/TG)

### ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

Η μέθοδος της μικροσκοπίας οπτικών ινών αποτελεί μια πολύ πρόσφατη μη καταστρεπτική τεχνική. Η ιδιαίτερη σημασία της μεθόδου συνίσταται στον μη καταστρεπτικό της χαρακτήρα, 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 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 προκατεργασία 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:

- Λάμπα αλογόνου που λειτουργεί στα 100 W.
- 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.
- Σύστημα εστίασης.
- 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 έξοδος 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.

## ΔΟΚΙΜΗ ΚΑΜΨΗΣ

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:

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

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 Hooke, η παραμόρφωση στην κάμψη προκύπτει από τον τύπο:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{M_z}{EI_z} y$$

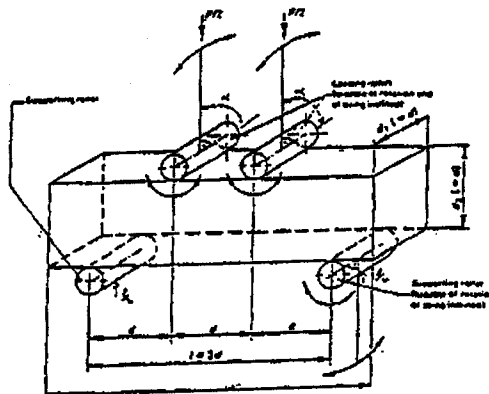
Με τη δοκιμή της κάμψης προσδιορίζονται τα μεγέθη:

- Αντοχή κάμψης  $f_f$  που για τα ψαθυρά υλικά ορίζεται ως ο λόγος της ροπής κάμψης

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

τη στιγμή της θραύσης προς τη ροπή αντίστασης της διατομής:

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



#### Εικόνα 4 Πειραματική διάταξη δοκιμής σε κάμψη

η καμπτική αντοχή υπολογίζεται από τις σχέσεις:

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

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

όπου

- P το μέγιστο επιβαλλόμενο φορτίο (N)
- L η απόσταση μεταξύ των εδράσεων (mm)
- d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub> το πλάτος και ύψος αντίστοιχα, του δοκιμίου (mm)
- α η μέση απόσταση της γραμμής θραύσης από την πλησιέστερη έδραση μετρημένη στη εφελκυστική 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<sub>f</sub> που ορίζεται ως ο λόγος της αντοχής σε κάμψη f<sub>f</sub> προς

την αντοχή σε εφελκυσμό f<sub>t</sub>:  $\lambda_f = \frac{f_f}{f_t}$

Εφαρμοζόμενοι κανονισμοί: ASTM C 78-94

Πειραματική διάταξη

Για τη δοκιμή σε κάμψη χρησιμοποιήθηκε η μηχανή Triscan 100, μέγιστου φορτίου 100KN με ειδική διάταξη (Εικόνα 5, Εικόνα 6, Εικόνα 7).

Το πρισματικό δοκίμιο τοποθετείται σε δύο κυλίνδρους στήριξης, η μεταξύ των οποίων απόσταση είναι 300mm. 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 0.07mm/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)

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

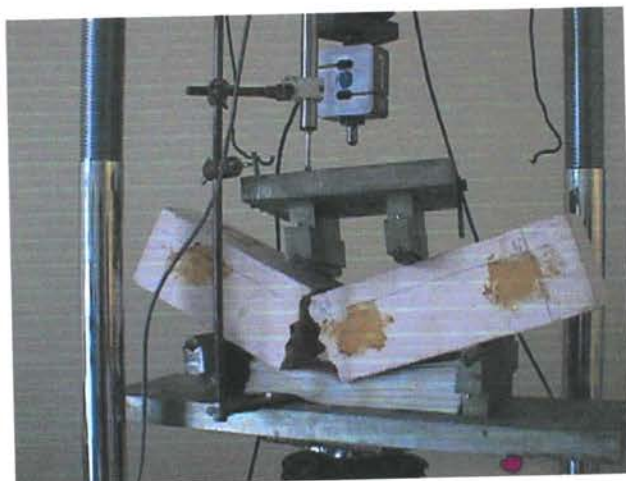


Εικόνα 5 Δοκιμή Κάμψης τριών σημείων Σκυροδεμάτων



Εικόνα 6 Δοκιμή Κάμψης τριών σημείων Σκυροδεμάτων





Εικόνα 7 Θραύση δοκιμίου σκυροδέματος σε κάμψη

#### ΔΟΚΙΜΗ ΘΛΙΨΗΣ

Η δοκιμή θλίψης εφαρμόζεται κυρίως στα ψαθυρά υλικά που κατά τη λειτουργία τους δέχονται κυρίως θλιπτικά φορτία. Οι θλιπτικές τάσεις  $\sigma_\theta$  προκαλούν βράχυνση των δοκιμίων και θλιπτική παραμόρφωση  $\varepsilon_\theta$ .

Στην περιοχή των ελαστικών παραμορφώσεων ισχύει:  $\sigma_\theta = E \cdot \varepsilon_\theta$ , 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 κανόνα 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:

$$\text{Τόση θραύσεως } \sigma_\theta = \frac{P_\theta}{F_0}$$

όπου:  $P_\theta$  το φορτίο θραύσεως

$F_0$  η αρχική επιφάνεια επιβολής φορτίου

Εφαρμοζόμενοι κανονισμοί: Μέθοδος ελέγχου ΣΚ-304

Πειραματική διάταξη

Χρησιμοποιήθηκε μηχανή δοκιμής σε θλίψη Form – Test, Type: 110/300 (1996)

Max Load: 300 KNt ενώ για τα κυλινδρικά δοκίμια χρησιμοποιήθηκε η πρέσσα Impact CTE 19 με μέγιστο φορτίο 2000 KNt, 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  $f_c = \frac{P_{\theta}}{F_0}$

Μέσω της δοκιμής σε θλίψη κυλινδρικών δοκιμίων υπολογίστηκε το στατικό μέτρο ελαστικότητας των σκυροδεμάτων σαν κλίση της περιοχής του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων που αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή. 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. 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.



Εικόνα 8 Δοκιμή Μονοαξονικής Θλίψης σε κυβικά δοκίμια



Εικόνα 9 Κυβικό δοκίμιο σκυροδέματος που αστόχησε σε θλίψη



Εικόνα 10 Δοκιμή Μονοαξονικής Θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια – Στατικού μέτρου ελαστικότητας



Εικόνα 11 Δοκιμή Μονοαξονικής Θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια – Στατικού μέτρου ελαστικότητας



Εικόνα 12 Κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος που αστόχησαν σε θλίψη

#### ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΥΠΕΡΗΧΩΝ

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 ( $E_d$ ) ο λόγος του

Poisson (vd), 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.

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  $E_d$  των κονιαμάτων υπολογίζεται από τη σχέση:  $E_d = d \cdot u^2 \cdot f(v_d)$

όπου  $d$  η πυκνότητα του κονιάματος

$u$  η ταχύτητα του κύματος

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

όπου  $v_d$  ο δυναμικός λόγος του Poisson.

Ο δυναμικός λόγος του Poisson  $v_d$  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 %.

Κρίθηκε λοιπόν σκόπιμο να ληφθεί από την βιβλιογραφία μια μέση τιμή του δυναμικού λόγου Poisson για κονιάματα ίση προς  $v_d=0.20$  με αντίστοιχη τιμή  $f(v_d) = 0,90$ .

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 ( $\mu s$ ) 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  $E_d = d \cdot u^2 \cdot 0,9066$  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 (βάρος) 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  $\text{CO}_2$ .

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 χωνευτήρι 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 κονιαμάτων 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 κονιάματα/σκυροδέματα, καθώς ο ποσοτικός προσδιορισμός δεν είναι εφικτός λόγω της αναπόφευκτης παρουσίας και αδρανών στο εξεταζόμενο δείγμα [7].

Η αφυδάτωση του  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  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  $\text{H}_2\text{O}$  που απελευθερώνεται. Από την απώλεια βάρους αυτή μπορεί να υπολογιστεί το περιεχόμενο  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  στο σκυρόδεμα.

Στην θερμοκρασιακή περιοχή μεταξύ 200 και 650 °C, διασπάται το  $\text{H}_2\text{O}$  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  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (απότομη απώλεια βάρους μεταξύ 400-520 °C). Για τα κονιάματα/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  $\text{CO}_2$ . Η αποσύνθεση του ανθρακικού ασβεστίου δίνει μια ενδόθερμη κορυφή στην περιοχή 820-840 °C, ενώ η απώλεια βάρους, λόγω της απελευθέρωσης του  $\text{CO}_2$ , δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού του περιεχόμενου  $\text{CaCO}_3$ . Για τον έλεγχο λοιπόν των κονιαμάτων 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.

## II. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 1. ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΝΩΠΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ

Ο Πίνακας 22 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των νωπών σκυροδεμάτων. Παρατηρείται ότι τα κονιάματα/σκυροδέματα μετακαολίνη απαιτούσαν την μεγαλύτερη ποσότητα νερού για ανάμιξη, προφανώς λόγω της λεπτότητας του προϊόντος, ενώ επίσης υψηλές τιμές στην αναλογία (w/b+p) παρατηρήθηκε και στην περίπτωση των σκυροδεμάτων με θραυσμένο κεραμικό προφανώς λόγω της αυξημένης υδαταπορρόφησης που παρουσιάζουν τα συγκεκριμένα αδρανή έναντι των συμβατικών αδρανών. Τέλος, ανάλογη ποσότητα νερού χρησιμοποιήθηκε για την ανάμιξη των σκυροδεμάτων της υδραυλικής ασβέστου και της υδρασβέστου/λευκού τσιμέντου. Όλα τα κονιάματα/σκυροδέματα παρουσίασαν ανάλογη εργασιμότητα, δεδομένου ότι η μετρούμενη κάθιση είναι στο εύρος 0,80-3,5 cm. Η φαινόμενη πυκνότητα του νωπού κονιάματος μειώνεται με χρήση του μετακαολίνη έναντι της μηλαϊκής γης ως ποζολανικού πρόσθετου και με χρήση των θραυσμένων κεραμικών έναντι των συμβατικών αδρανών.

Πίνακας 22 Αποτελέσματα νωπών σκυροδεμάτων

A/A	Κωδικός	w/(b.+p.)	Κάθιση	d.νωπού (g/cm <sup>3</sup> )
1	EM2.Gr.S.	0,54	1,30	2,07
2	EM2.CF1.S.	0,70	0,80	1,97
3	MK1.Gr.S.	0,73	2,60	1,97
4	MK1.CF1.S.	0,89	1,25	1,89
5	MK1.CF1.	1,10	3,50	1,80
6	MK05.CF2.S.	0,87	2,80	1,90
7	LCem.CF2.S.	0,56	2,00	1,89
8	NHL.CF2.S.	0,57	0,80	1,91
9	MK2.5.CF2.S.	0,82	1,25	1,87

## 2. ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

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



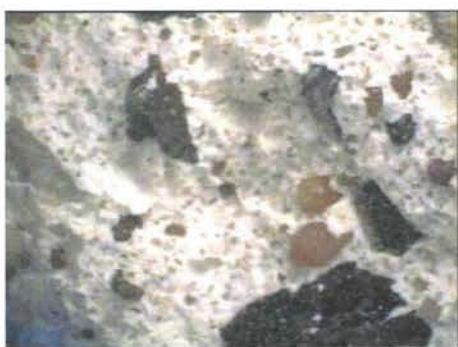
Εικόνα 13 Σύνθεση 1 - Συνδετική ύλη: υδρασβέστος – μηλαϊκή γη – Αδρανή: άμμος – γαρμπίλι



Εικόνα 14 Σύνθεση 2 Συνδετική ύλη: υδρασβέστος – μηλαϊκή γη – Αδρανή: άμμος –



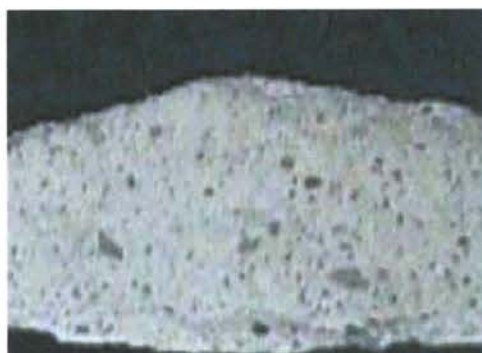
κεραμικό



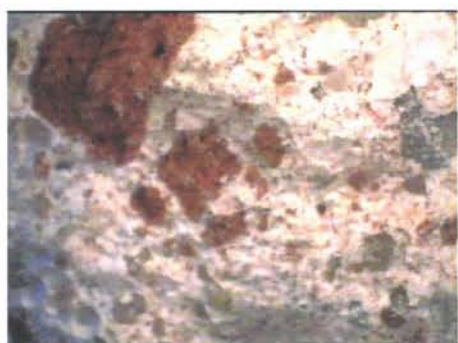
(x25)



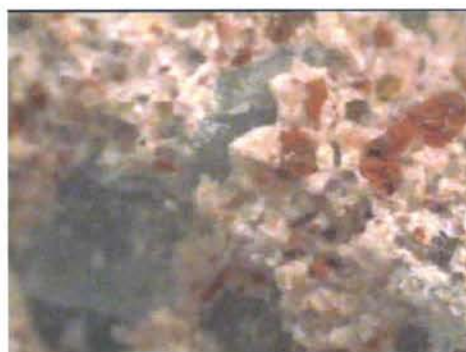
(x50)



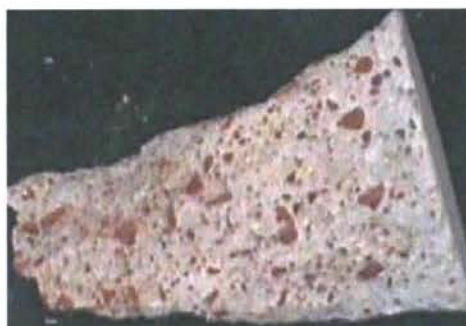
Εικόνα 15 Σύνθεση 3 Συνδετική ύλη: υδρασβέστος – μετακαολίνης – Αδρανή: άμμος – γαρμπίλι



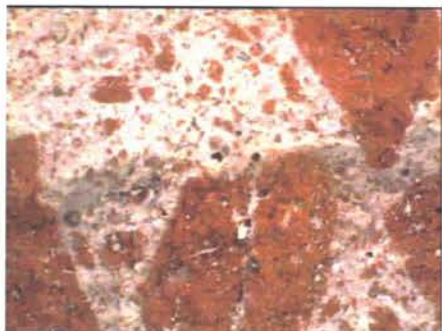
(x25)



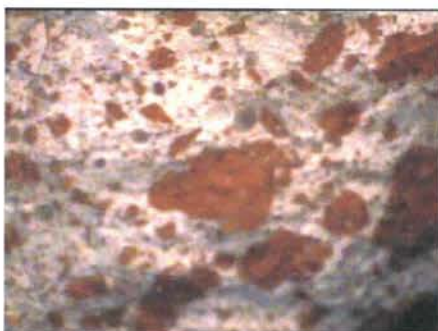
(x50)



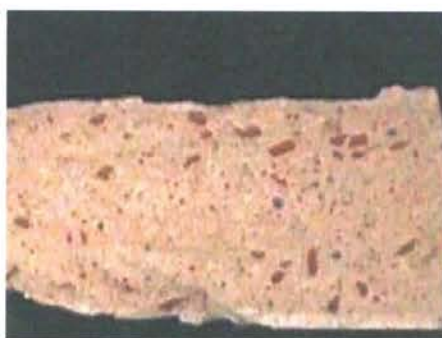
Εικόνα 16 Σύνθεση 4 Συνδετική ύλη: υδρασβέστος – μετακαολίνης – Αδρανή: άμμος – κεραμικό



(x25)



(x50)



Εικόνα 17 Σύνθεση 5 - Συνδετική ύλη: υδρασβέστος – μετακαολίνης – Αδρανή: κεραμικό

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

- 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 αδρανών.
- Η πρόσφυση μεταξύ μήτρας κονιάς και αδρανών κρίνεται ικανοποιητική για όλες τις συνθέσεις των σκυροδεμάτων, ωστόσο στην περίπτωση της χρήσης θραυσμένων κεραμικών η πρόσφυση είναι πιο έντονη προφανώς λόγω του αυξημένου πορώδους που παρουσιάζουν τα κεραμικά έναντι των συμβατικών αδρανών. Ιδιαίτερα στην περίπτωση του κεραμικού, κατά των δοκιμών θλίψης κάμψης παρατηρήθηκε ότι η θράυση συνέβαινε στο κέντρο των κεραμικών και όχι στην διεπιφάνεια της κονιάς με τα αδρανή, γεγονός ενισχυτικό της παραπάνω υπόθεσης.

### 3. ΣΥΡΡΙΚΝΩΣΗ

Τα αποτελέσματα της συρρίκνωσης των δοκιμίων των σκυροδεμάτων στους 12 μήνες ωρίμανσης έδειξαν ότι τα κονιάματα/σκυροδέματα υδρασβέστου/μηλαϊκής γης καθώς και το σκυρόδεμα της υδρασβέστου με προσθήκη μικρής ποσότητας μετακαολίνης παρουσιάζουν συρρίκνωση από 3-3,8% κατά όγκο. Αντίθετα, τα

κονιάματα/σκυροδέματα υδρασβέστου-μετακαολίνη καθώς και του υδραυλικού ασβέστη, υδρασβέστου-τσιμέντου παρουσιάζουν ελάχιστες συρρικνώσεις 0,2-0,8 % κατά όγκο.

Πίνακας 23 Αποτελέσματα συρρίκνωσης % κ. όγκο των σκυροδεμάτων σε 12 μήνες ωρίμανσης.

Κωδ.	T (μήνες)	Shrin. (% V)	st.dev.
1	12	3,2	0,70
2	12	3,8	2,00
3	12	0,2	0,00
4	12	0,3	0,00
5	12	0,8	0,20
6	12	0,5	0,10
7	12	0,3	0,00
8	12	0,2	0,00
9	12	3,0	0,40

#### 4. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ - ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ, ΚΑΜΨΗ – ΣΤΑΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

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, Επομένως ένα σκυρόδεμα αποκατάστασης είναι θεμιτό να παρουσιάζει θλιπτική αντοχή μικρότερη από το δομικό στοιχείο, επομένως τιμές στο φάσμα 8-10 MPa θεωρούνται ικανοποιητικές.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται τα αποτελέσματα των δοκιμών σε θλίψη και κάμψη (Πίνακας 22). Η θλιπτική αντοχή προκύπτει σαν μέσος όρος των τιμών 6 δοκιμών που έχουν υποστεί θλίψη ενώ η καμπτική αντοχή σαν μέσος όρος 3 τιμών. Πιο συγκεκριμένα για κάθε σύνθεση παρατηρείται ότι:

Τα κονιάματα/σκυροδέματα με συνδετική ύλη μηλαϊκή γη παρουσιάζουν χαμηλές θλιπτικές αντοχές (6,2 & 5,8 MPa για τις συνθέσεις 1 & 2, αντίστοιχα στους 12 μήνες ωρίμανσης) και εξαιρετικά χαμηλές καμπτικές αντοχές (0,44-0,54 MPa). Το παραπάνω γεγονός προφανώς οφείλεται μειωμένη δραστητικότητα όσον αφορά την δέσμευση  $\text{Ca(OH)}_2$  που παρουσιάζει η μηλαϊκή γη, γεγονός που ταυτοποιήθηκε και στην μελέτη της μηλαϊκής γης ως ποζολανικού προσμίκτου στις πάστες υδρασβέστου αλλά και στα κονιάματα. Επίσης, παρατηρείται ότι οι συνθέσεις 1 και 2 έχουν αποκτήσει το μέγιστο των αντοχών τους στους 6 μήνες ωρίμανσης, ενώ όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα της Θερμικής ανάλυσης ένα μικρό ποσοστό του διαθέσιμου  $\text{Ca(OH)}_2$  δεν έχει δεσμευτεί (2-3,5%) στους 6 μήνες σκλήρυνσης.

Από την άλλη πλευρά, τα κονιάματα/σκυροδέματα υδρασβέστου-μετακαολίνη παρουσιάζουν εξαιρετικά υψηλές αντοχές σε θλίψη: 26,5 MPa, 23,4 MPa και 22,3 MPa για τις συνθέσεις 3, 4 και 5 αντίστοιχα σε 12 μήνες ωρίμανσης. Επίσης, παρατηρείται ότι όλες οι συνθέσεις του μετακαολίνη παρουσιάζουν μια μέγιστη τιμή

σε χρονικό διάστημα 3 έως 6 μηνών ενώ μετά το πέρας τους παραπάνω χρονικού διαστήματος μειώνονται τόσο οι θλιπτική όσο και η καμπτική αντοχή τους. Το παραπάνω γεγονός παρατηρήθηκε στην περίπτωση του συστήματος υδρασβέστου-μετακαολίνη και στην μορφή των παστών και στην μορφή των κονιαμάτων, γεγονός που αποδίδεται στην μεγάλη ποσότητα των αργιλικών φάσεων που παρουσιάζει ο μετακαολίνης οι οποίες αντιδρώντας με την υδράσβεστο παράγουν προϊόντα τα οποία αυξάνουν την πρώιμη αντοχή ενώ μειώνουν την τελική αντοχή τους. Επιπλέον, καμπτική αντοχή τους παρουσιάζουν και υψηλή καμπτική αντοχή σε σχέση με τα κονιάματα/σκυροδέματα της μηλαϊκής γης ενώ επίσης παρατηρείται ότι η τιμή της καμπτικής αντοχής μειώνεται με προσθήκη θραυσμένων κεραμικών σαν αδρανή στην μάζα τους. Συγκρίνοντας τις αντοχές των συνθέσεων 4 και 6 παρατηρείται ότι αυξάνοντας την ποσότητα της προστιθέμενης υδρασβέστου μειώνεται ελάχιστα η θλιπτική αντοχή ενώ η καμπτική αντοχή παραμένει σταθερή. Επίσης, στην περίπτωση της σύνθεσης 6 παρατηρείται ελάχιστη πτώση στις μηχανικές αντοχές.

Ωστόσο, οι συνθέσεις 3, 4, 5 και 6 του μετακαολίνη παρουσιάζουν αρκετά υψηλές μηχανικές αντοχές προκειμένου να χρησιμοποιηθούν σαν κονιάματα αποκατάστασης σε ιστορικές τοιχοποιίες μεγάλου αρμού. Αντίθετα, η σύνθεση 9, η οποία παρασκευάστηκε με ανάμιξη μικρού ποσοστού μετακαολίνη (2,5% κ.β. στο σύνολο) παρουσιάζει μηχανικές αντοχές, συμβατές με τις αντίστοιχες των αυθεντικών υλικών ιστορικής τοιχοποιίας. Τέλος, συγκρίνοντας την συμπεριφορά του μετακαολίνη με την μηλαϊκή γη σαν ποζολανικά πρόσμικτα για τα κονιάματα/σκυροδέματα υδρασβέστου, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι ο μετακαολίνης είναι ένα εξαιρετικά δραστικό ποζολανικό πρόσμικτο όσον αφορά στην δέσμευση του  $\text{Ca(OH)}_2$  όπως επιβεβαιώνεται και από τις θερμικές αναλύσεις καθώς από τον πρώτο μήνα έχει ήδη δεσμευτεί όλη η ποσότητα  $\text{Ca(OH)}_2$ . 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

Όσον αφορά στη σύνθεση υδρασβέστου-τσιμέντου παρατηρείται αύξηση στην θλιπτική και καμπτική αντοχή στην εξέλιξη του χρόνου, ενώ η συγκεκριμένη σύνθεση παρουσίασε και τις μεγαλύτερες τιμές της τυπικής απόκλισης στις μηχανικές αντοχές, γεγονός που αποδίδεται στην μεγαλύτερη ανομοιομορφία που παρουσιάζουν τα δοκίμια πιθανώς λόγω της φύσης των 2 κονιών που έχουν αναμειχθεί. Επίσης, η συγκεκριμένη σύνθεση συνεχίζει να ανεβάζει τις μηχανικές αντοχές μέχρι το χρονικό διάστημα των 12 μηνών.

Τέλος, όσον αφορά στην σύνθεση της υδραυλικής ασβέστου αυξάνει τις μηχανικές αντοχές μέχρι τους 12 μήνες, ωστόσο και σε αυτή την περίπτωση όπως και στην περίπτωση του σκυροδέματος υδρασβέστου-τσιμέντου οι τελικές μηχανικές αντοχές είναι αρκετά υψηλές για χρήση τους σε ιστορικές τοιχοποιίες.

Ο Πίνακας 25 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής των κυλινδρικών δοκιμίων (μέσος όρος 3 μετρήσεων) και του στατικού μέτρου ελαστικότητας, υπολογιζόμενο με τρεις διαφορετικούς τρόπους (secant, average, tangent στο 40% της μέγιστης αντοχής) για τις διαφορετικές συνθέσεις των σκυροδεμάτων. Από τα εξαγόμενα αποτελέσματα παρατηρείται ότι τα κυλινδρικά δοκίμια παρουσιάζουν

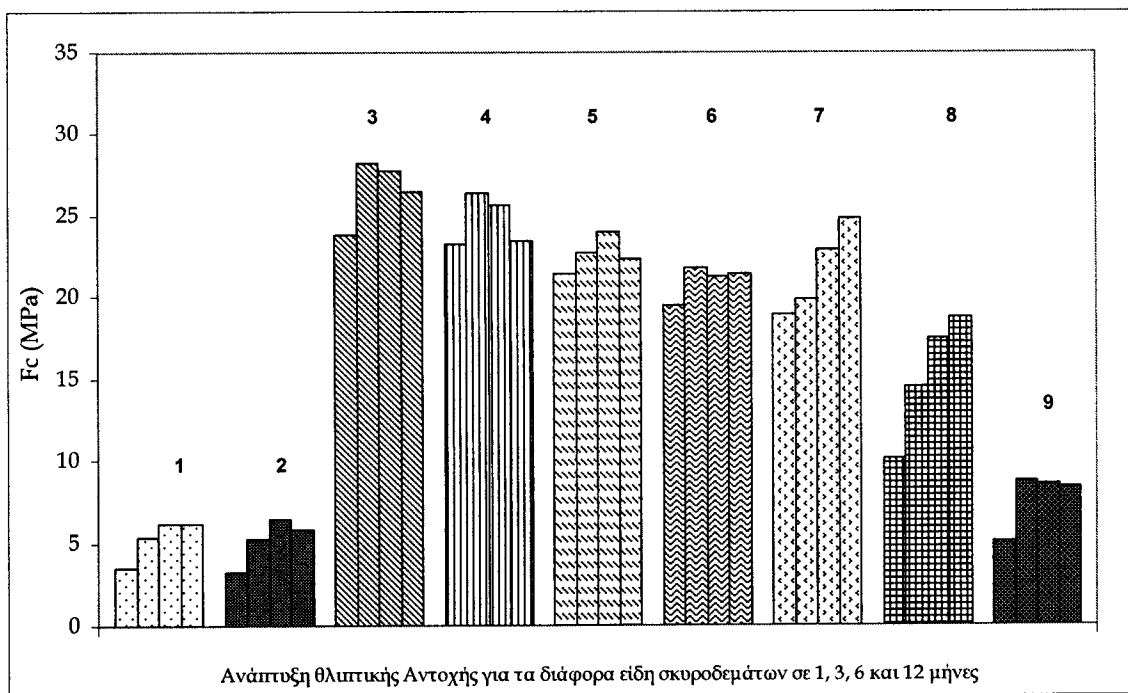
μικρότερες τιμές θλιπτικών αντοχών σε σχέση με τα κυβικά γεγονός που συμφωνεί με τη διεθνή βιβλιογραφία.

Από την άλλη πλευρά όσον αφορά στο στατικό μέτρο ελαστικότητας (Est), παρατηρείται ότι σε γενικές γραμμές τα κονιάματα/σκυροδέματα που παρουσίασαν υψηλή θλιπτική αντοχή παρουσίασαν και υψηλό μέτρο ελαστικότητας ενώ συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των τριών μεθόδων προσδιορισμού του Est παρατηρείται ότι η τιμή του average συγκλίνει με την τιμή του tangent.40% ενώ η τιμή του secant απέχει αρκετά από τις άλλες δύο. Πιο συγκεκριμένα, τα κονιάματα/σκυροδέματα της μηλαϊκής γης παρουσίασαν χαμηλές τιμές μέτρου ελαστικότητας (337-570 MPa) ενώ τα κονιάματα/σκυροδέματα υδρασβέστου-μετακαολίνη παρουσίασαν υψηλές τιμές Est που φτάνουν έως και 100 φορές την αντίστοιχη τιμή των σκυροδεμάτων της μηλαϊκής γης. Επίσης, παρατηρείται ότι με χρήση θραυσμένου κεραμικού μειώνονται οι τιμές του στατικού μέτρου ελαστικότητας καταλήγοντας, η σύνθεση 6 να παρουσιάζει τιμή Est μειωμένο κατά ~50%, γεγονός που συνδράμει με τα αποτελέσματα της διεθνούς βιβλιογραφίας. Από την άλλη πλευρά, παρατηρείται ότι και η χρήση υδρασβέστου μειώνει το στατικό μέτρο ελαστικότητας (σύγκριση σύνθεσης 4 με 6, μείωση του Est από 4190 σε 2419 MPa). Τα κονιάματα/σκυροδέματα υδρασβέστου-τσιμέντου και υδραυλικού ασβέστη παρουσίασαν υψηλό μέτρο ελαστικότητας ενώ η σύνθεση 9 παρασκευασμένη με υδράσβεστο με μικρό ποσοστό μετακαολίνη παρουσίασε χαμηλό μέτρο ελαστικότητας ~1070 MPa.

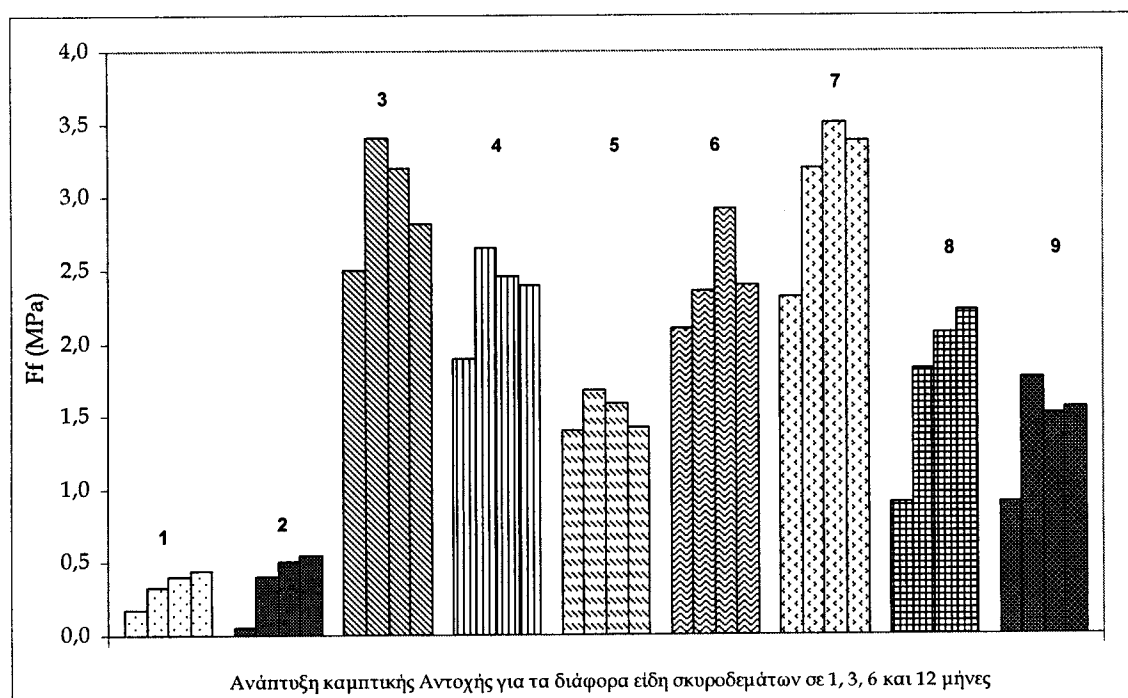
Πίνακας 24 Αποτελέσματα δοκιμών σε θλίψη και κάμψη

A/A	Κωδ.	Χρόνος (μήνες)	Fc (MPa)	St.Dev.	Ff (MPa)	St.Dev.
1	EM2.Gr.S.	1	3,5	0,16	0,17	0,10
		3	5,3	0,42	0,33	0,18
		6	6,2	0,52	0,40	0,11
		12	6,2	1,27	0,44	0,10
2	EM2.CF1.S.	1	3,2	0,19	0,05	0,01
		3	5,2	0,71	0,41	0,20
		6	6,4	0,85	0,50	0,18
		12	5,8	0,88	0,54	0,34
3	MK1.Gr.S.	1	23,8	0,90	2,50	0,00
		3	28,2	0,10	3,40	0,22
		6	27,7	0,49	3,20	0,00
		12	26,5	1,23	2,82	0,13
4	MK1.CF1.S.	1	23,2	0,98	1,89	0,18
		3	26,4	1,42	2,66	0,20
		6	25,6	1,52	2,46	0,39
		12	23,4	0,10	2,40	0,24
5	MK1.CF1.	1	21,4	1,15	1,40	0,28
		3	22,7	1,25	1,68	0,18
		6	24,0	1,58	1,58	0,02
		12	22,3	1,56	1,42	0,01
6	MK05.CF2.S.	1	19,5	0,40	2,10	0,29
		3	21,8	0,63	2,36	0,39
		6	21,3	0,96	2,93	0,21
		12	21,4	1,26	2,40	0,35
7	LCem.CF2.S.	1	19,0	1,23	2,31	0,50
		3	19,8	3,31	3,20	0,18
		6	22,9	4,75	3,51	0,19
		12	24,8	5,48	3,38	0,08
8	NHL.CF2.S.	1	10,1	0,33	0,90	0,47
		3	14,5	0,84	1,82	0,21
		6	17,5	0,66	2,07	0,25
		12	18,7	0,50	2,22	0,27
9	MK2.5.CF2.S.	1	5,0	0,15	0,90	0,10
		3	8,7	0,30	1,76	0,10
		6	8,5	0,16	1,52	0,41
		12	8,4	0,18	1,55	0,25





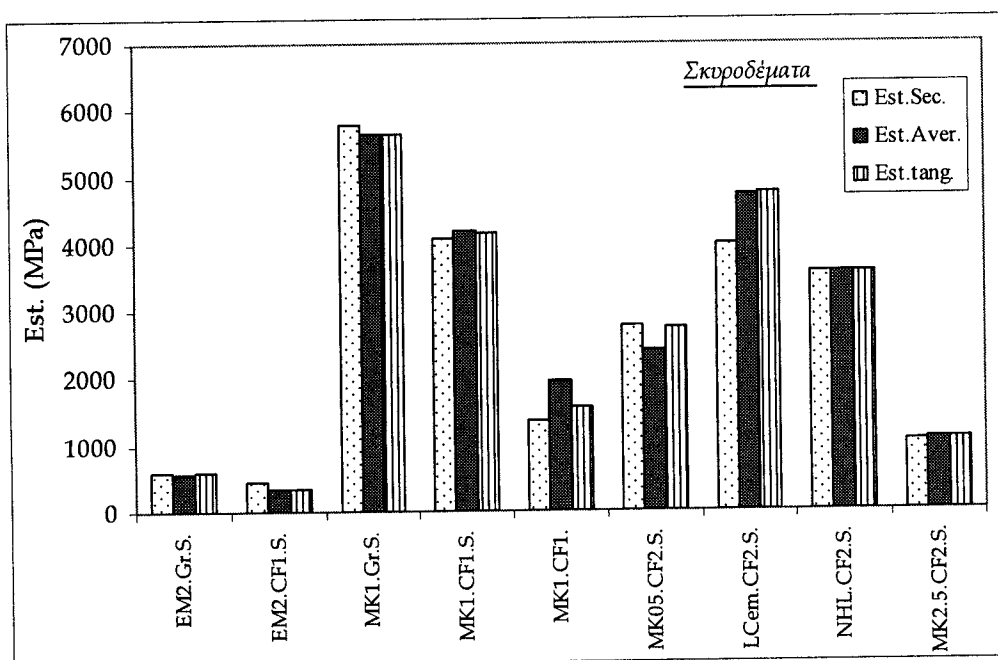
Σχήμα 3 Θλιπτική αντοχή σκυροδεμάτων αποκατάστασης



Σχήμα 4 Καμπτική αντοχή σκυροδεμάτων αποκατάστασης

Πίνακας 25 Αντοχή σε Θλίψη, Στατικό μέτρο Ελαστικότητας, Τυπική Απόκλιση των σκυροδεμάτων σε 12 μήνες ωρίμανσης

A/A	Κωδ.	T (μήνες)	Fc (MPa)	St.Dev.	Est.sec. (MPa)	St.Dev.	Est.aver. (MPa)	St.Dev.	Est.tang.40 % (MPa)	St.Dev.
1	EM2.Gr.S.	12	4,2	0,10	595	283	570	214	585	228
2	EM2.CF1.S.	12	2,9	1,40	451	324	337	288	340	263
3	MK1.Gr.S.	12	18,7	3,59	5780	410	5650	415	5630	314
4	MK1.CF1.S.	12	18,1	0,48	4085	341	4190	365	4170	342
5	MK1.CF1.	12	11,9	0,90	1350	242	1950	265	1568	243
6	MK05.CF2.S.	12	14,0	2,00	2784	462	2419	251	2751	214
7	LCem.CF2.S.	12	15,4	1,10	4000	276	4744	474	4760	554
8	NHL.CF2.S.	12	13,9	0,80	3572	468	3574	619	3579	680
9	MK2.5.CF2.S.	12	5,8	0,60	1035	195	1070	222	1075	203



Σχήμα 5 Στατικό μέτρο ελαστικότητας (secant, average, tangent) για τις συνθέσεις σκυροδεμάτων σε 12 μήνες ωρίμανσης

## 5. ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΥΠΕΡΗΧΩΝ – ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

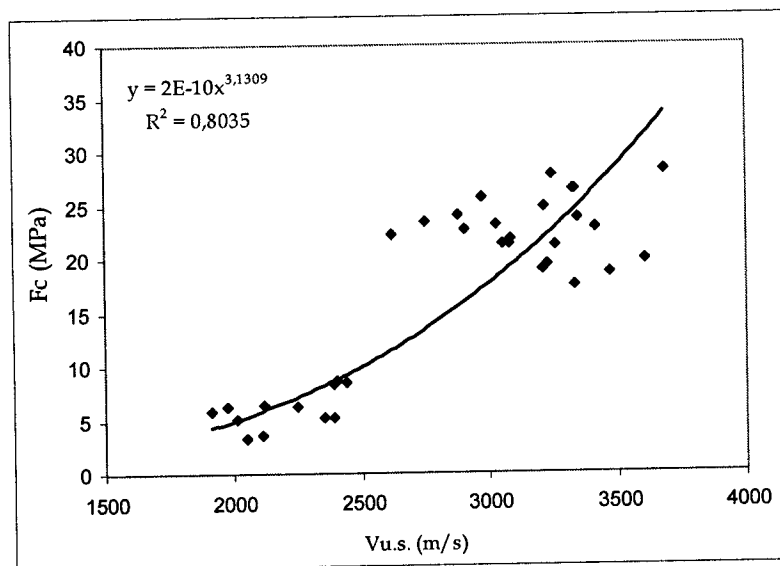
Ο Πίνακας 26 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της φαινόμενης πυκνότητας (μέσος όρος 3 πρισματικών δοκιμών σε κάθε χρονικό διάστημα) των διαφόρων συνθέσεων σκυροδεμάτων καθώς και την ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων (μέσος όρος 21 μετρήσεων – 7 μετρήσεων σε κάθε δοκίμιο, σύνολο: 3 πρισματικά δοκίμια σε κάθε χρονικό διάστημα) και του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας (μέσος όρος τιμών 3 πρισματικών δοκιμών σε κάθε χρονικό διάστημα).

Όσον αφορά στην φαινόμενη πυκνότητα παρατηρείται ότι για όλες τις συνθέσεις η τιμή της φαινόμενης πυκνότητας μειώνεται στην εξέλιξη του χρόνου. Συγκρίνοντας



τις τελικές τιμές της φαινόμενης πυκνότητας, η ελάχιστη τιμή παρατηρείται στην περίπτωση της σύνθεσης 5 ( $\sim 1,56 \text{ g/cm}^3$ ), όπου έχουν χρησιμοποιηθεί αποκλειστικά θραυσμένα κεραμικά σαν αδρανή ενώ η μέγιστη παρατηρείται για την σύνθεση 1 ( $\sim 1,95 \text{ g/cm}^3$ ) όπου η μεγάλη τιμή οφείλεται στην χρήση της άμμου-γαρμπιλιού σαν αδρανή και στην μηλαϊκή γη που παρουσιάζει αυξημένη φαινόμενη πυκνότητα έναντι το μετακαολίνη. Επίσης, χαμηλή τιμή της φαινόμενης πυκνότητας παρουσιάζει και η σύνθεση 9 ( $\sim 1,63 \text{ g/cm}^3$ ), προφανώς λόγω της χρήσης της υδρασβέστου σε μεγάλο ποσοστό.

Από την άλλη πλευρά η ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων μειώνεται στην εξέλιξη του χρόνου για τις συνθέσεις 1-7, όπως άλλωστε συμβαίνει και με τις αντοχές για τα παραπάνω κονιάματα, εκτός από τις συνθέσεις 8, 9 στις οποίες οι ταχύτητες διάδοσης αυξάνονται όπως και η θλιπτική αντοχή τους στον χρόνο. Σε γενικές γραμμές, θα μπορούσε να ειπωθεί πως υψηλές ταχύτητες διάδοσης υπερήχων δηλώνουν και υψηλές μηχανικές αντοχές, μεταξύ των οποίων υπάρχει καλή συσχέτιση όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.

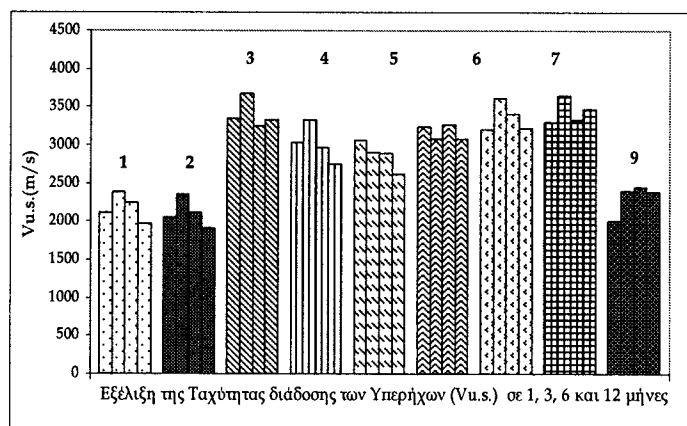


Σχήμα 6 Αντοχή σε θλίψη προς ταχύτητα διάδοσης υπερήχων για τις διάφορες συνθέσεις σκυροδέματος

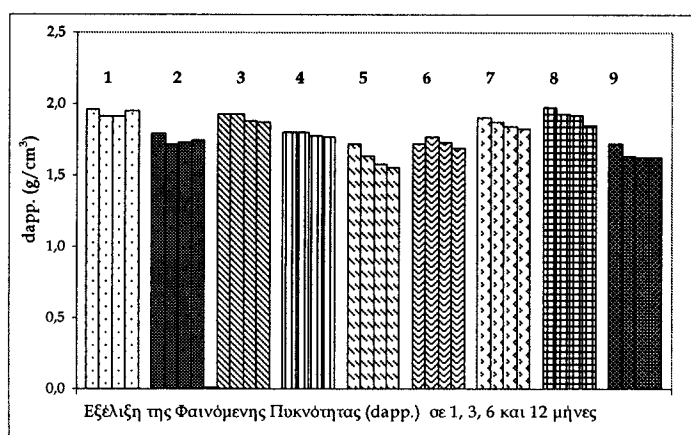
Ανάλογη τάση με την ταχύτητα διάδοσης υπερήχων παρατηρείται και στην περίπτωση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας δεδομένου ότι η τιμή του σχετίζεται άμεσα από το τετράγωνο της ταχύτητας. Έτσι, η μέγιστη παρατηρείται στην περίπτωση της σύνθεσης 8 του υδραυλικού ασβέστη ενώ ακολουθούν τα κονιάματα/σκυροδέματα 3 και 7. Αντίθετα, οι χαμηλότερες τιμές παρατηρούνται στην περίπτωση των σκυροδεμάτων της μηλαϊκής γης και της σύνθεσης υδρασβέστου με μετακαολίνη 2,5% κ.β. (σύνθεση 9, Ed: 8387 MPa).

Πίνακας 26 Αποτελέσματα ελέγχων με τη μέθοδο των υπερήχων

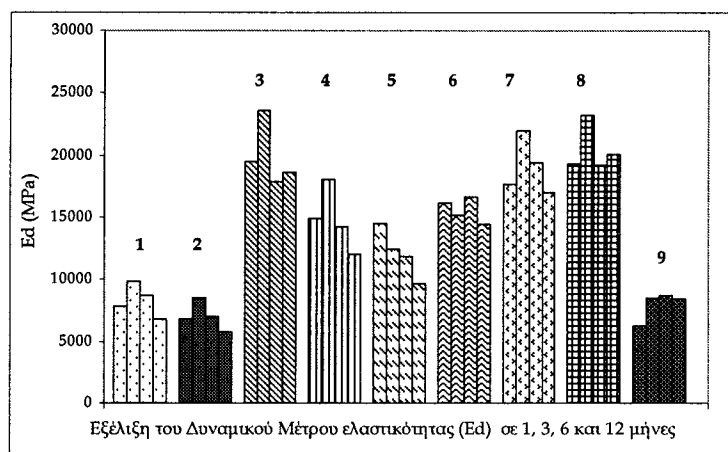
Κωδ.	t (μήνες)	dapp. (g/cm <sup>3</sup> )	st.dev.	Vu.s. (m/sec)	st.dev.	Ed (MPa)
EM2.Gr.S.	1	1,96	0,02	2108	124	7835
	3	1,91	0,02	2388	142	9806
	6	1,92	0,02	2244	115	8682
	12	1,95	0,04	1970	126	6811
EM2.CF1.S.	1	1,80	0,03	2049	142	6783
	3	1,71	0,04	2349	183	8503
	6	1,73	0,03	2115	216	6969
	12	1,74	0,02	1909	128	5720
MK1.Gr.S.	1	1,93	0,01	3345	97	19448
	3	1,93	0,02	3683	47	23575
	6	1,88	0,00	3245	83	17854
	12	1,87	0,02	3328	137	18676
MK1.CF1.S.	1	1,80	0,02	3030	118	14890
	3	1,80	0,02	3336	194	18014
	6	1,78	0,02	2975	139	14189
	12	1,77	0,01	2753	78	12080
MK1.CF1.	1	1,72	0,01	3057	121	14483
	3	1,64	0,01	2906	67	12450
	6	1,58	0,00	2882	69	11836
	12	1,56	0,01	2618	50	9604
MK05.CF2.S.	1	1,72	0,01	3230	198	16161
	3	1,77	0,01	3087	213	15206
	6	1,73	0,01	3263	68	16592
	12	1,69	0,03	3077	57	14401
LCem.CF2.S.	1	1,90	0,03	3213	198	17690
	3	1,87	0,05	3610	213	21932
	6	1,84	0,01	3418	68	19367
	12	1,83	0,04	3214	225	17001
NHL.CF2.S.	1	1,97	0,01	3293	110	19253
	3	1,93	0,01	3652	175	23188
	6	1,92	0,01	3337	129	19230
	12	1,85	0,03	3469	139	20031
MK2.5.CF2.S.	1	1,72	0,02	2008	53	6253
	3	1,63	0,01	2402	56	8480
	6	1,63	0,01	2442	79	8732
	12	1,63	0,01	2391	88	8387



Σχήμα 7 Ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων για συνθέσεις σκυροδεμάτων στους 1, 3, 6, 12 μήνες ωρίμανσης



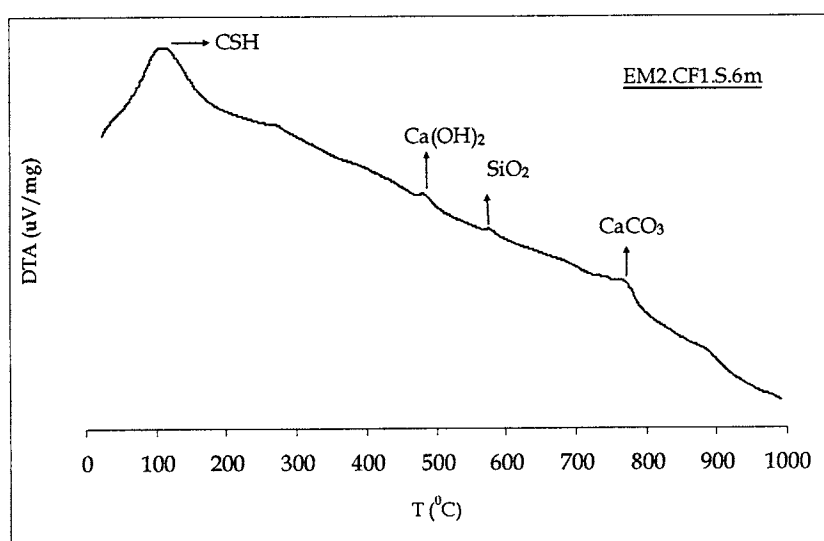
Σχήμα 8 Φαινόμενη πυκνότητα για συνθέσεις σκυροδεμάτων στους 1, 3, 6, 12 μήνες ωρίμανσης



Σχήμα 9 Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας για συνθέσεις σκυροδεμάτων στους 1, 3, 6, 12 μήνες ωρίμανσης

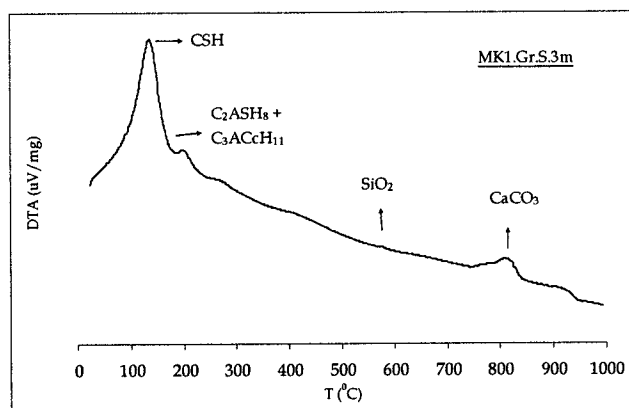
## 6. ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΒΑΡΥΜΕΤΡΙΚΗ DTA/TG)

Από τα διαγράμματα της DTA παρατηρούμε ότι στην περίπτωση των σκυροδεμάτων υδρασβέστου μηλαϊκής γης υπάρχει μια ενδόθερμη κορυφή στους  $\sim 110^\circ\text{C}$ , η οποία προφανώς αντιστοιχεί στην διάσπαση των ένυδρων αργιλοπυριτικών ενώσεων του ασβεστίου (CSH) ενώ και μέχρι την θερμοκρασία των  $500^\circ\text{C}$ , παρουσιάζεται απώλεια μάζας λόγω της απώλειας του χημικά δεσμευμένου νερού των προϊόντων της αντίδρασης υδρασβέστου - μηλαϊκής γης. Επίσης, για όλα τις συνθέσεις σκυροδεμάτων, η ενδόθερμη κορυφή στους  $\sim 480^\circ\text{C}$  είναι χαρακτηριστική της αποσύνθεσης του CH, ενώ η επόμενη ενδόθερμη στους  $580^\circ\text{C}$  αντιστοιχεί στον χαλαζία ο οποίος στην συγκεκριμένη θερμοκρασία αλλάζει κρυσταλλική δομή και από α-χαλαζία μετατρέπεται σε β-χαλαζία. Τέλος, η τελευταία ενδόθερμη κορυφή που ανιχνεύεται στους  $\sim 800^\circ\text{C}$  αντιστοιχεί στο διάσπαση του  $\text{CaCO}_3$  και παραγωγή του  $\text{CaO}$  και του  $\text{CO}_2$  (Σχήμα 10).

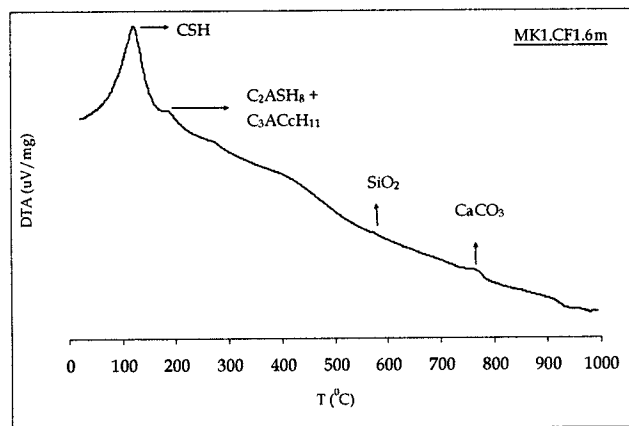


Σχήμα 10 DTA Θερμόγραμμα για το σκυρόδεμα υδρασβέστου-μηλαϊκής γης-θραυσμένο κεραμικό-άμμος (Σύνθεση2), για 6 μήνες ωρίμανσης

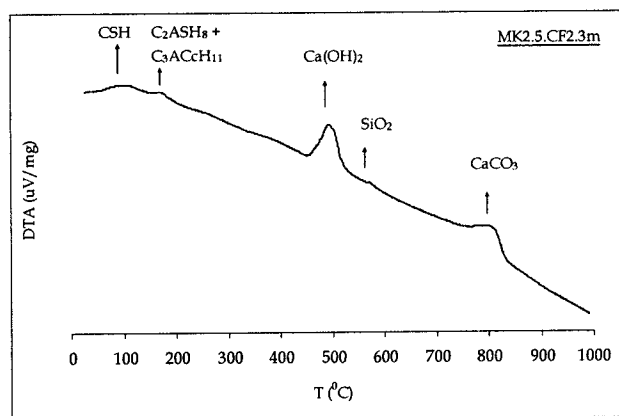
Στην περίπτωση των σκυροδεμάτων υδρασβέστου μετακαολίνη υπάρχουν δύο καθαρές κορυφές στους  $\sim 110^\circ\text{C}$  και  $\sim 180^\circ\text{C}$ , οι οποίες και προφανώς αντιστοιχούν στην διάσπαση των ένυδρων αργιλοπυριτικών ενώσεων του ασβεστίου, σαν προϊόντα της αντίδρασης της υδρασβέστου με τον μετακαολίνη και πιο συγκεκριμένα η πρώτη κορυφή αναφέρεται στο CSH ενώ η δεύτερη στον ένυδρο γελενήτη και στο  $\text{C}_4\text{SAH}_8$  (monocarboaluminate), προϊόντα τα οποία έχουν ταυτοποιηθεί και στην περίπτωση των παστών και των κονιαμάτων (Σχήμα 11, Σχήμα 12, Σχήμα 13).



Σχήμα 11 DTA Θερμόγραμμα για το σκυρόδεμα υδρασβέστου-μετακαολίνη-γαρμπίλι-άμμος (Σύνθεση3), για 3 μήνες ωρίμανσης

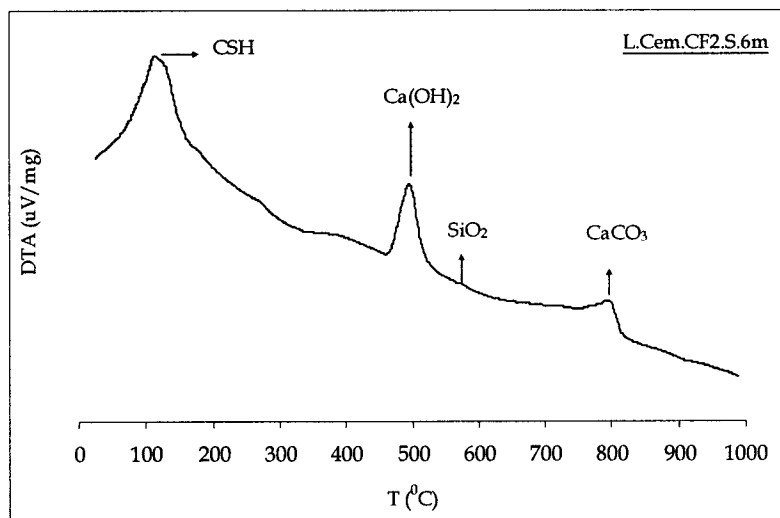


Σχήμα 12 DTA Θερμόγραμμα για το σκυρόδεμα υδρασβέστου-μετακαολίνη-θραυσμένο κεραμικό (Σύνθεση 5), για 6 μήνες ωρίμανσης

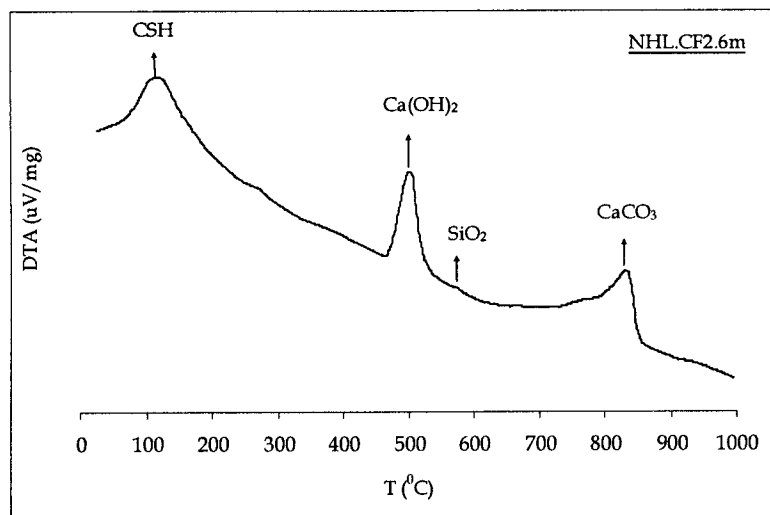


Σχήμα 13 DTA Θερμόγραμμα για το σκυρόδεμα υδρασβέστου-μετακαολίνη-θραυσμένο κεραμικό -άμμος (Σύνθεση 9), για 3 μήνες ωρίμανσης

Η χαρακτηριστική ενδόθερμη κορυφή στους  $\sim 120^\circ\text{C}$ , λόγω της απώλειας του χημικά δεσμευμένου νερού παρουσιάζεται και στην περίπτωση των σκυροδεμάτων υδρασβέστου – τσιμέντου και υδραυλικής ασβέστου (Σχήμα 14, Σχήμα 15).



Σχήμα 14 DTA Θερμόγραμμα για το σκυρόδεμα υδρασβέστου-τσιμέντου-θραυσμένο κεραμικό -άμμος (Σύνθεση 7), για 6 μήνες ωρίμανσης



Σχήμα 15 DTA Θερμόγραμμα για το σκυρόδεμα υδραυλικού ασβέστη -θραυσμένο κεραμικό -άμμος (Σύνθεση 8), για 6 μήνες ωρίμανσης

Ο Πίνακας 27 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της Θερμοβαρυμετρικής Ανάλυσης (TG) που πραγματοποιήθηκε στα κονιάματα/σκυροδέματα που παρασκευάστηκαν, σε χρόνους, 0, 1, 3, 6 και 12 μηνών. Με χρήση της Θερμικής ανάλυσης προσδιορίστηκε η απώλεια του χημικά δεσμευμένου νερού που αφορά στο περιεχόμενο ελεύθερο  $\text{Ca(OH)}_2$ , το οποίο στη συνέχεια ανάχθηκε σε περιεχόμενο  $\text{Ca(OH)}_2$  (μέσος όρος τριών μετρήσεων).

Όσον αφορά στις συνθέσεις της υδρασβέστου/μηλαϊκής γης παρατηρείται ότι η περιεχόμενη ποσότητα του CH μειώνεται με τον χρόνο με σχετικά αργό ρυθμό, ενώ στην περίοδο των 12 μηνών, η ποσότητα του περιεχόμενου CH μηδενίζεται.

Από την άλλη πλευρά, ο μετακαολίνης δεσμεύει όλη την ποσότητα του ελεύθερου  $\text{Ca(OH)}_2$  σε περίοδο μόλις 1 μήνα στις συνθέσεις που η αναλογία ανάμιξης υδρασβέστου/μηλαϊκή ήταν 1/1 (συνθέσεις 3, 4, 5). Η σύνθεση 6 στην οποία η προστιθέμενη ποσότητα της υδρασβέστου είναι μεγαλύτερη παρατηρείται ότι η ποσότητα του ελεύθερου CH μηδενίζεται σε χρονικό διάστημα 3 μηνών.

Όσον αφορά στην σύνθεση υδρασβέστου/τσιμέντου καθώς και στην σύνθεση της υδραυλικής ασβέστου, στους 12 μήνες υπάρχει ακόμη ανιχνεύσιμο ελεύθερο CH, γεγονός που σημαίνει ότι το σύστημα δε έχει ακόμη σταθεροποιηθεί χημικά και επομένως απαιτείται η αποτίμησή του σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Τέλος για την σύνθεση 9, παρατηρείται ότι η ποσότητα του ελεύθερου  $\text{Ca(OH)}_2$  μειώνεται σταδιακά με τον χρόνο ενώ στους 12 μήνες υπάρχει ακόμη ανιχνεύσιμη ποσότητα ελεύθερου CH (~3,8%).

Επομένως, σχετικά με τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης θα μπορούσε να ειπωθεί συμπερασματικά ότι

Ο μετακαολίνης παρουσιάζει μεγάλη δραστηριότητα όσον αφορά την δέσμευση του CH σε σχέση με την μηλαϊκή γη. Ο μετακαολίνης κατάφερε να δεσμεύσει όλη την διαθέσιμη ποσότητα της ελεύθερης υδρασβέστου σε χρονικό διάστημα ενός μήνα ενώ το αντίστοιχο χρονικό διάστημα για την μηλαϊκή γη ανέρχεται σε 12 μήνες.

Οι συνθέσεις υδρασβέστου/τσιμέντου, υδραυλικής ασβέστου και υδρασβέστου μετακαολίνη σε αναλογία ανάμιξης 27,5/2,5 βρίσκονται ακόμη σε χημική εξέλιξη μετά την πάροδο των 12 μηνών.

Οι θερμικές μέθοδοι ανάλυσης αποτελούν χρήσιμο εργαλείο για τον έλεγχο της χημικής σταθερότητας των σκυροδεμάτων.

Πίνακας 27 Αποτελέσματα θερμικών αναλύσεων

Α/Α	Κωδ.	CH (%)				
		Χρόνος (μήνες)				
		0	1	3	6	12
1	EM2.Gr.S.	12,5	10,3	6,5	3,5	0,0
2	EM2.CF1.S.	7,8	6,5	1,2	2,1	0,0
3	MK1.Gr.S.	12,5	0,0	0,0	0,0	0,0
4	MK1.CF1.S.	11,5	0,0	0,0	0,0	0,0
5	MK1.CF1.	12,5	0,0	0,0	0,0	0,0
6	MK05.CF2.S.	16,5	3,2	0,0	0,0	0,0
7	LCem.CF2.S.	12,6	13,5	12,6	10,8	10,3
8	NHL.CF2.S.	12,5	12,1	14,1	11,7	4,1
9	MK2.5.CF2.S.	23,5	18,3	16,4	10,2	3,8

### III. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

Από τα εξαγόμενα αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

Η μηλαϊκή γη δεν παρουσιάζει αυξημένη δραστηριότητα όσον αφορά στην δέσμευση του  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  με αποτέλεσμα η τελική τιμή της θλιπτικής και της καμπτικής αντοχής είναι μικρή ενώ ο ρυθμός πρόσληψης των μηχανικών αντοχών είναι εξαιρετικά αργός.

Ο μετακαολίνης παρουσιάζει αυξημένη δραστηριότητα όσον αφορά στην δέσμευση του  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , γεγονός που οφείλεται στην χημική, ορυκτολογική του σύσταση καθώς και στην λεπτή του κοκκοδιαβάθμιση. Αποτέλεσμα της υψηλής δραστηριότητας 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.

Η σύνθεση του σκυροδέματος με αναλογία ανάμιξης υδράσβεστος / μετακαολίνης / θραυσμένο κεραμικό / άμμος: 27,5/2,5/35/35 (% κ.β.) παρουσίασε ικανοποιητικές τελικές μηχανικές αντοχές ( $F_c$ : 8.4 MPa,  $F_f$ : 1.55 MPa,  $E_{st}$ : 1070 MPa,  $E_d$ : 8387 MPa), και απόλυτα συμβατές με τα αυθεντικά δομικά υλικά (οπτόπλινθοι και ιστορικά κονιάματα) σύμφωνα με τα δεδομένα της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με τις ιστορικές τοιχοποιίες.

Οι συνθέσεις υδρασβέστου-μετακαολίνη, με προσθήκη του μετακαολίνης σε ποσοστό μεγαλύτερο του 10%κ.β.στο σύνολο του σκυροδέματος, καθώς και οι συνθέσεις του υδραυλικού ασβέστη και της υδρασβέστου/τσιμέντου παρουσίασαν υψηλές τιμές μηχανικών αντοχών. Οι παραπάνω συνθέσεις κρίνονται ασύμβατες όσον αφορά στα μηχανικά χαρακτηριστικά των αυθεντικών δομικών υλικών μιας ιστορικής οπτοπλινθοδομής (οπτόπλινθοι και ιστορικά κονιάματα), γεγονός που θα μπορούσε να δημιουργήσει πρόβλημα μηχανικής ασυμβατότητας στην τοιχοποιία.

Όσον αφορά στη επίδραση της φύσης των αδρανών στα μηχανικά χαρακτηριστικά των σκυροδεμάτων, παρατηρείται ότι η χρήση των θραυσμένων κεραμικών σαν αδρανή στα κονιάματα/σκυροδέματα μειώνει το στατικό (μείωση έως και 40% με αντικατάσταση 50% κ.β. των συμβατικών αδρανών με κεραμικά) και το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας καθώς και την αντοχή σε θλίψη και κάμψη των σκυροδεμάτων. Επίσης, μειώνει την φαινόμενη πυκνότητα τους συντελώντας στην παραγωγή ελαφροβαρούς προϊόντος (μείωση στο εύρος 5-10% της τελικής τιμής της φαινόμενης πυκνότητας με αντικατάσταση 50% κ.β. των συμβατικών αδρανών με κεραμικά).

Επίσης, η χρήση των θραυσμένων κεραμικών σαν αδρανή στα κονιάματα/σκυροδέματα μειώνει το στατικό (μείωση έως και 40% με αντικατάσταση 50% κ.β. των συμβατικών αδρανών με κεραμικά) και το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας καθώς και την αντοχή σε θλίψη και κάμψη των σκυροδεμάτων. Επίσης, μειώνει την φαινόμενη πυκνότητα τους συντελώντας στην παραγωγή ελαφροβαρούς προϊόντος (μείωση στο εύρος 5-10% της τελικής τιμής της φαινόμενης πυκνότητας με αντικατάσταση 50% κ.β. των συμβατικών αδρανών με κεραμικά).

Επιπλέον, η χρήση περισσότερης ποσότητας υδρασβέστου στα κονιάματα μειώνει το στατικό (μείωση ~60% στην τιμή του  $E_{st}$  από την σύνθεση MK05.CF2.S. στην σύνθεση MK2.5.CF2.S., όπου και χρησιμοποιήθηκαν ποσότητα υδρασβέστου 20%



κ.β. και 27,5% κ.β., αντίστοιχα) και το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (μείωση ~40% στην τιμή του  $E_d$  από την σύνθεση MK05.CF2.S. στην σύνθεση MK2.5.CF2.S.) καθώς και η αντοχή σε θλίψη και κάμψη των σκυροδεμάτων.

Οι θερμικές μέθοδοι ανάλυσης αποτελούν χρήσιμο εργαλείο για τον έλεγχο της χημικής σταθερότητας των σκυροδεμάτων. Ο μετακαολίνη έχει δεσμεύσει όλη την διαθέσιμη ποσότητα της ελεύθερης υδρασβέστου σε χρονικό διάστημα ενός μήνα ενώ το αντίστοιχο χρονικό διάστημα για την μηλαϊκή γη ανέρχεται σε 12 μήνες, γεγονός που συμφωνεί και με τις υψηλές μηχανικές αντοχές των σκυροδεμάτων μετακαολίνη.

## **IV. ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ – ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ**

---

Τα κονιάματα αποκατάστασης προκειμένου να διασφαλίζουν την ομαλή συμπεριφορά των τοιχοποιιών σε σεισμικές δράσεις και την μακροβιότητα της κατασκευής στον χρόνο είναι απαραίτητο να ακολουθούν συγκεκριμένες προδιαγραφές τόσο κατά τον σχεδιασμό, την παρασκευή και την συντήρηση των κονιαμάτων/σκυροδεμάτων όσο και όσον αφορά στα φυσικοχημικά και μηχανικά χαρακτηριστικά. Πιο συγκεκριμένα, για την κάθε φάση προτείνονται οι κάτωθι προδιαγραφές:

### **A. ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ, ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ**

- Ο σχεδιασμός των κονιαμάτων αποκατάστασης θα πρέπει να στηρίζεται στα χαρακτηριστικά των ιστορικών / παραδοσιακών κονιαμάτων (ανάλογες πρώτες ύλες, ανάλογη τεχνολογία παρασκευής, ανάλογα φυσικοχημικά και μηχανικά χαρακτηριστικά) ώστε να διασφαλίζεται η συμβατότητα. Ωστόσο, είναι απαραίτητο να λαμβάνεται υπόψη το συνολικό σύστημα της τοιχοποιίας, (τα συγκεκριμένα δομικά στοιχεία, η πρόσφυση που απαιτείται κ.λ.π.) καθώς και η φθορά που παρουσιάζεται (π.χ. ύπαρξη αλάτων) σε συνδυασμό με τις ιδιαίτερες περιβαλλοντικές συνθήκες.
- Προκειμένου να διασφαλιστεί η ομοιογένεια των κονιαμάτων/σκυροδεμάτων απαιτείται χρόνος ανάμιξης του μίγματος >15 λεπτά.
- Οι συνθήκες συντήρησης των κονιαμάτων/σκυροδεμάτων θα πρέπει να είναι κατάλληλες ανάλογα με την φύση της συνδετικής κονίας (σχετικά ξηρό περιβάλλον για κονιάματα υδρασβέστου, υγρό περιβάλλον για ποζολανικά κονιάματα).
- Οι πρώτες ύλες για την παρασκευή των κονιαμάτων είναι απαραίτητο να πληρούν τα παρακάτω κριτήρια:

#### ***Υδράσβεστος***

- Ο αρχικός ασβεστόλιθος είναι απαραίτητο να παρουσιάζει περιεκτικότητα σε  $\text{CaCO}_3$  >95%.
- Η βέλτιστη θερμοκρασία έψησης για την παραγωγή άσβεστου μεγάλης δραστηρότητας και υψηλής ποιότητας εκτιμάται ~900 °C.
- Η παραγόμενη άσβεστος είναι απαραίτητο να ακολουθήσει κατάλληλη διαδικασία σβέσης ανάλογα με τον τύπο της υδρασβέστου που παράγεται (σκόνη ή πολτός).
- Η παραγόμενη υδράσβεστος να παρουσιάζει
  - Ειδική επιφάνεια >12 m<sup>2</sup>/g.
  - Περιεκτικότητα σε  $\text{MgO}$  ≤5.
  - Περιεκτικότητα σε  $\text{SO}_3$  ≤2.

- Στην περίπτωση του ασβέστη πολτού, το ποσοστό του ελευθέρου νερού δεν πρέπει να ξεπερνά το 50%.

#### **Υδραυλικός Ασβέστης**

- Χαμηλή θερμοκρασία έψησης (~900 °C).
- Επιλογή του κατάλληλου τύπου υδραυλικού ασβέστη (NHL2, NHL3,5, NHL5, NHL3.5-Z) ανάλογα με την χρήση.
- Χαμηλή περιεκτικότητα σε αλκάλια και C<sub>3</sub>A.
- Απουσία C<sub>3</sub>S.
- Περιεκτικότητα σε SO<sub>3</sub> ≤3.

#### **Ποζολανικά Πρόσμικτα**

##### **Φυσικά ποζολανικά πρόσμικτα**

- Λεπτή κοκκομετρία. Συνολικό ποσοστό διερχόμενο: 100% από τα 75μm.
- Υψηλή ειδική επιφάνεια (>8 m<sup>2</sup>/g).
- Υψηλό ποσοστό δραστικού πυριτίου (>30%).
- Υψηλό ποσοστό άμορφου οξειδίου του πυριτίου και του αργιλίου (>80%).
- Αντοχή σε θλίψη με δομική ποζολανικότητας ≥6MPa.

##### **Τεχνητά ποζολανικά πρόσμικτα**

##### **Παραδοσιακά τεχνητά ποζολανικά πρόσμικτα - Κεραμάλευρο**

- Υψηλή περιεκτικότητα σε αργλικές φάσεις στην αρχική άργιλο.
- Όπτηση στην βέλτιστη θερμοκρασία ανάλογα με την αρχική άργιλο, που ωστόσο πρέπει να διατηρείται σε χαμηλές τιμές (<900 °C).
- Λεπτή κοκκομετρία. Συνολικό ποσοστό διερχόμενο: 100% από τα 75μm.
- Υψηλή ειδική επιφάνεια (>8 m<sup>2</sup>/g)
- Υψηλό ποσοστό δραστικού πυριτίου (>30%)
- Υψηλό ποσοστό άμορφου οξειδίου του πυριτίου και του αργιλίου (>80%)

##### **Σύγχρονα τεχνητά ποζολανικά πρόσμικτα – Μετακαολίνης**

- Λεπτή κοκκομετρία. Συνολικό ποσοστό διερχόμενο: 100% από τα 24μm.
- Υψηλή ειδική επιφάνεια (≥11 m<sup>2</sup>/g).
- Ποζολανική δραστηριότητα (δοκιμή Chapelle) ≥900 mgCa(OH)<sub>2</sub>/g)

## **Αδρανή**

### **Άμμος**

- Κατάλληλη κοκκομετρική καμπύλη ανάλογα με την χρήση.
- Φύση αδρανών (χαλαζιακή ή ανθρακική) ανάλογα την χρησιμοποιούμενη κονία.
- Απουσία αλάτων, αργίλων και άλλων ανόργανων και οργανικών προσμίξεων.
- Ισοδύναμο άμμου >65%.

### **Θραυσμένο κεραμικό**

- Κατάλληλη κοκκομετρική καμπύλη ανάλογα με την χρήση.
- Απουσία αλάτων, αργίλων και άλλων ανόργανων και οργανικών προσμίξεων.
- Επιθυμητή η ποζολανική δραστηριότητα.
- Χαμηλή τιμή φαινόμενης πυκνότητας.

## **Β. ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΑ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ**

Τα κονιάματα αποκατάστασης προκειμένου να διασφαλίζουν την μακροβιότητα της κατασκευής στον χρόνο είναι απαραίτητο να παρουσιάζουν τα κάτωθι χαρακτηριστικά:

- Ομοιογένεια σε όλη την μάζα του κονιάματος (καλή ανάμιξη της συνδετικής κονίας με τα πρόσμικτα, ομοιόμορφη κατανομή των αδρανών σε όλη την μάζα του κονιάματος η οποία διασφαλίζεται με ικανοποιητική δόνηση και με κατάλληλη κοκκομετρία των χρησιμοποιούμενων αδρανών).
- Συρρίκνωση  $\leq 3\%$  κατά όγκο.
- Οι μηχανικές αντοχές των κονιαμάτων (αντοχή σε θλίψη, κάμψη, στατικό μέτρο ελαστικότητας) μικρότερες των παραδοσιακών τεχνητών και φυσικών δομικών στοιχείων των ιστορικών τοιχοποιιών.
- Το στατικό και το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας των κονιαμάτων είναι δόκιμο να είναι όσο το δυνατό μικρότερο δεδομένου ότι χαμηλή τιμή του αποτελεί ένδειξη ικανότητας παραμόρφωσης.
- Όσον αφορά στις μηχανικές αντοχές των κονιαμάτων αποκατάστασης για ιστορική πλινθοδομή με μεγάλους αρμούς, προκειμένου να διασφαλίζεται η μηχανική συμβατότητα, είναι οι ακόλουθες
  - ✓ Αντοχή σε θλίψη  $\leq 10\text{MPa}$ .
  - ✓ Αντοχή σε κάμψη  $\geq 1,5\text{MPa}$ .
  - ✓ Στατικό μέτρο ελαστικότητας  $\leq 1100\text{MPa}$

- ✓ Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας  $\leq 8500$  MPa

Από τις συνθέσεις που παρασκευάστηκαν και αποτιμήθηκαν, τα παραπάνω μηχανικά χαρακτηριστικά πληρούνται από την σύνθεση (σύνθεση 9) που έχει παρασκευαστεί με:

- ✓ Υδράσβεστο σκόνη: 27,5% κ.β.
- ✓ Μετακαολίνη: 2,5% κ.β.
- ✓ Θραυσμένο κεραμικό σαν αδρανές: 35% κ.β.
- ✓ Άμμος: 35% κ.β.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

---

1. Lea P.M., "The chemistry of cement and concrete", 3rd edition, Arnold Ltd, London, 1988.
2. Gottardi V., "Tecnologia dei materiali e chimica applicata", Sesta Edizione, Patron Editore, Bologna, 1992
3. Moropoulou A., Bakolas A., Aggelakopoulou E., "Evaluation of Pozzolanic Activity of Natural and Artificial Pozzolans by Thermal Analysis".
4. G. Baronio, L. Binda, N. Lombardini, "The role of brick pebbles and dust in conglomerates based on hydrated lime and crushed bricks", Construction & Building Materials No1 1997.
5. Neville AM., "Properties of concrete", 4<sup>th</sup> edition, Longman Ltd, Harlow, 1995.
6. Murdock LJ., Brook KM., "Concrete materials and practice", 5<sup>th</sup> Edition, Arnold Ltd, London, 1979.
7. Α. Μπακόλας "Κριτήρια και μέθοδοι χαρακτηρισμού ιστορικών κονιαμάτων " Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 2002
8. Ορλάνδος Αν. «Τα υλικά δομής των αρχαίων Ελλήνων και οι τρόποι εφαρμογής αυτών»
9. C. Mango, "Materials for the study of the mosaics of St. Sophia at Istanbul", Washington D.C.1962.
10. Θεοχαρίδου Κ., «Η Αρχιτεκτονική της Αγίας Σοφίας στη Θεσσαλονίκη», Αθήνα 1994.
11. Α. Μπακόλας "Κριτήρια και μέθοδοι χαρακτηρισμού ιστορικών κονιαμάτων " Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα 2002
12. Yuzugulu O., Durukal E., Beyen K., "Assessment of mortar and brick properties of Hagia Sophia by non-destructive testing techniques", Dep. of Earthquake Engineering, Bogazici University, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Istanbul.
13. Penelis G, Karaveziroglou M., Stylianidis K., Leodaridis D.: «The Rotonda of Thessaloniki: Seismic Behavior of Roman and Byzantine Structures » HAGIA SOFIA: from the age of Justinian to the present, Ed. Mark R. - Cakmak, A. S. , Cambridge University Press, 1992.
14. Theoharidou K. "The structure of Hagia Sophia in Thessaloniki from its construction to the present" HAGIA SOFIA: from the age of Justinian to the present, Ed. Mark R. - Cakmak, A. S., Cambridge University Press, 1992.
15. Suheyl Akman M. - Abdurrahman Gunez - Ismail Hakki Aksoy, "The History and properties of Khorasan mortar and concrete", Inter Congress of the History of Turkish and Islamic science and technology, 1986.
16. Moropoulou A., Cakmak A.S., Lohvyn N. "Earthquake resistant construction techniques and materials on Byzantine monuments in Kiev", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 19 (2000), pp 603-615.

17. Moropoulou A. , Bakolas A. , “Range of Acceptability limits of Physical, Chemical and Mechanical Characteristics deriving from the Evaluation of Historic Mortars, Compatible Materials for the Restoration of European Cultural Heritage “, *Pact*, 56 (1998) 165 -178.
18. Ersen A. - Karaguler M. -Gulec A., “Possible substitutes for Khorasan mortar in Byzantine and Ottoman Monuments” ICCROM/Inter. Colloquium Rome, 19-21 June 1995
19. A Bakolas, G. Biskotin, A. Moropoulou, E. Zendri, “Characterization of structural byzantine mortars by thermo gravimetric analysis” *Thermochimica Acta* 321 (1998)
20. Livingston R.A., Stutzman P.E., Mark R. and Erdik M., Preliminary analysis of the masonry of the Ayasofya Basilica, Istanbul, materials issues in art and archaeology, III, MRS Symposium, v.267, P. Vandiver et al.(eds.), Materials Research Society, Pittsburg PA, pp. 721-736, 1993
21. Livingston R.A, “Materials Analysis of the masonry of the Hagia Sofia. Basilica”, Istanbul.
22. Moropoulou A., Cakmak A.S., Biscontin G., Bakolas A., Zendri E., (2002) “Advanced Byzantine cement based composites resisting earthquake stresses: the crushed brick/ lime mortars of Justinian’s Hagia Sophia”, *Construction and Building Materials*, 16, pp543-552.
23. Moropoulou A., Bakolas A., Bisbikou K. (1995) “Thermal analysis as a method of characterizing ancient ceramic technologies” *Thermochimica Acta*, 2570, 1995. pp743-753.
24. Cakmak A.S., Moropoulou A., Mullen C.L. “Interdisciplinary study of dynamic behavior and earthquake response of Hagia Sofia”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 14, (1995), pp 125-133.
25. Papayianni, “Criteria and Methodology for manufacturing Compatible Repair Mortars”, (*Pact* 56), 1998.
26. Goodwin J.F. and West H.W.H. “A Review of the Literature on Brick/Mortar Bond”, British Ceramic Research Association, 1982, pp 23-36.
27. Chase G.W. “Investigation of the Interface Between Brick and Mortar”
28. Πρασιανάκης Ι., Κουρκουλής Σ., «Σημειώσεις για τα εργαστήρια πειραματικής αντοχής υλικών», Αθήνα 1998
29. Μελέτη Ροτόντας, Καθ. Γ. Γ. Πενέλης, Θεσσαλονίκη 1980