

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΕΡΓΟ ΟΑΣΠ:

Μελέτη της συμπεριφοράς στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος, μετά από σεισμική καταπόνηση, κατά τις πρώτες ώρες, καθώς και 2-3 ημέρες μετά την σκυροδέτηση.

**ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΕΡΕΥΝΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΕΠΕ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΕΜΠ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ ΕΜΠ**

ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2003

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
2	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
3	ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ ΣΕ ΜΕΓΑΛΑ ΔΟΚΙΜΙΑ	8
3.1	ΔΟΚΙΜΙΑ	9
3.2	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ	10
3.2.1	Ημιτονική διέγερση σταθερής επιτάχυνσης	10
3.2.2	Σεισμικές διεγέρσεις	12
3.3	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	13
3.4	ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	14
3.5	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ	15
3.6	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗΡΑ	15
3.7	ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	16
3.7.1	Καταγραφή Ρωγμών	16
3.7.2	Συντελεστής Μεγέθυνσης Επιτάχυνσης	19
3.7.3	Μέγιστη Τέμνουσα Βάσης	19
3.7.4	Υστερητική Συμπεριφορά	20
3.8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	21
3.9	ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 3	23
4	ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	24
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	24
4.2	ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	24
4.3	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΑΡΧΗΣ ΚΑΙ ΤΕΛΟΥΣ ΠΗΞΗΣ	25
4.4	ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	26
4.5	ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΠΡΙΝ ΤΗ ΦΑΣΗ II	29
4.5.1	Εκτίμηση αντοχής σκυροδέματος με κρουσιμέτρηση	29
4.5.2	Εκτίμηση αντοχής σκυροδέματος με εξόλκευση ήλου	34
4.5.3	Συμβατική θλιπτική και εκτιμώμενη αντοχή σκυροδέματος	36
4.5.4	Εκτίμηση κατάστασης σκυροδέματος με μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων	37
4.6	ΕΛΕΓΧΟΙ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕΤΑ ΤΗ ΦΑΣΗ II	46
4.7	ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΞΟΛΚΕΥΣΗΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΕ ΜΙΚΡΑ ΔΟΚΙΜΙΑ	49
4.8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	52
4.9	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	52
4.10	ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 4	53
5	ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΟΔΟΥ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΣΕ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ XRD και TGA	54
5.1	ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ – ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ	54
5.2	ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗΣ	55
5.3	ΡΥΘΜΟΣ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗΣ	56
5.4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	57
5.5	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	57

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΔΟΚΙΜΙΟ Ι-Α

ΔΟΚΙΜΙΟ Ι-Β

ΔΟΚΙΜΙΟ ΙΙ-Α

ΔΟΚΙΜΙΟ ΙΙ-Β

ΔΟΚΙΜΙΟ ΙΙΙ-Α

ΔΟΚΙΜΙΟ ΙΙΙ-Β

ΔΟΚΙΜΙΟ ΙV-Α

ΔΟΚΙΜΙΟ ΙV-Β

ΔΟΚΙΜΙΟ V-Α

ΔΟΚΙΜΙΟ V-Β

ΔΟΚΙΜΙΟ VI

ΔΟΚΙΜΙΟ VII-Α

ΔΟΚΙΜΙΟ VII-Β

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο παρόν ερευνητικό έργο επιχειρείται η μελέτη των επιπτώσεων του σεισμού σε κατασκευές από σκυρόδεμα, όταν η σεισμική δράση εμφανίζεται τις πρώτες ώρες μετά την σκυροδέτηση και ενόσω το καλουπωμένο σκυρόδεμα είναι στο στάδιο της πήξης ή στην αρχή της σκλήρυνσης. Στο έργο συμμετείχαν, το Ελληνικό Κεντρο Ερευνών Τσιμέντου ΕΠΕ, το Εργαστήριο. Αντισεισμικής Τεχνολογίας ΕΜΠ και το Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας ΕΜΠ.

Το έργο περιλαμβάνει:

- Πειράματα μεγάλης κλίμακας για την μελέτη της συμπεριφοράς 7 πλαισίων οπλισμένου σκυροδέματος (κατηγορίας C20/25) διαστάσεων 3.30x3.30x3.00h mxmxm τα οποία κατά τα στάδια της πήξης ή της αρχικής σκλήρυνσης του σκυροδέματος έχουν υποστεί σεισμική διέγερση σε σεισμικό προσομοιωτήρα (Εργ. Αντισεισμικής Τεχνολογίας ΕΜΠ). Η δυναμική συμπεριφορά των μεγάλων αυτών δοκιμών έγινε σε δύο φάσεις. Κατά την **Φάση I**, οι σεισμικές διεγέρσεις πραγματοποιήθηκαν στα δοκίμια με ξυλότυπο κατά τα στάδια της πήξης ή της αρχικής σκλήρυνσης του σκυροδέματος 2, 4, 8, 12, και 24 (2 δοκίμια) ή μετά την σκυροδέτηση. Κατά την **Φάση II**, μετά από παρέλευση τουλάχιστον 28 ημερών από την σκυροδέτηση (και απομάκρυνση των ξυλοτύπων) πραγματοποιούνταν σεισμικές δοκιμές μέχρι την αστοχία του δοκιμίου. Τα αποτελέσματα και των δύο Φάσεων συγκρίνονται με εκείνα ενός δοκιμίου αναφοράς το οποίο δεν δέχθηκε σεισμική διέγερση στη Φάση I. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι χρόνοι σεισμικής διέγερσης από την σκυροδέτηση των 7 μεγάλων δοκιμών:

	Χρόνος σεισμικής διέγερσης μετά την σκυροδέτηση
Δοκίμιο I	2 h
Δοκίμιο II	4 h
Δοκίμιο III	8 h
Δοκίμιο IV	12 h
Δοκίμιο V	24 h
Δοκίμιο VI	Δοκίμιο αναφοράς χωρίς σεισμική διέγερση
Δοκίμιο VII	12 h Σεισμική διέγερση 25% εκείνης του Δοκιμίου IV

- Εργαστηριακές συνθέσεις για τον προσδιορισμό του συμβατικού χρόνου της αρχής και του τέλους της πήξης των συνθέσεων σκυροδέματος οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στα 7 δοκίμια των πειραμάτων μεγάλης κλίμακας (ΕΚΕΤ).
- Εργαστηριακές μετρήσεις για τον έλεγχο της ποιότητας του σκυροδέματος των πειραμάτων μεγάλης κλίμακας (ΕΚΕΤ).
- Μη καταστροφικούς και καταστροφικούς διερευνητικούς ελέγχους στα 7 δοκίμια των πειραμάτων μεγάλης κλίμακας (ΕΚΕΤ).

- Μετρήσεις εξόλκευσης οπλισμού σε μικρά δοκίμια σκυροδέματος στα οποία ο οπλισμός έχει υποστεί εγκάρσια δόνηση κατά τα στάδια της πήξης ή της αρχικής σκλήρυνσης του σκυροδέματος (EKET).
- Μελέτη της προόδου ενυδάτωσης του τσιμέντου σε πρώιμες ηλικίες σε κονίαμα που προσομοιάζει στις συνθέσεις σκυροδέματος οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στα 7 δοκίμια των πειραμάτων μεγάλης κλίμακας (Εργ. Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας ΕΜΠ).

Τα κύρια συμπεράσματα που συνάγονται από το ερευνητικό έργο είναι:

- Οι αναπτυσσόμενες επιταχύνσεις στην κορυφή ενός δοκιμίου από οπλισμένο σκυρόδεμα σε σεισμική διέγερση κατά τη φάση ωρίμανσης του είναι μειωμένες σε σχέση με την αντίστοιχη κατασκευή όπου το σκυρόδεμα έχει αποκτήσει την τελική του αντοχή.
- Τα δοκίμια στη Φάση I (διεγέρσεις κατά τη φάση ωρίμανσης του δοκιμίου) παρουσίασαν διαφορετικά δυναμικά χαρακτηριστικά από τη Φάση II (διεγέρσεις όταν το σκυρόδεμα έχει αποκτήσει αντοχή). Τα δυναμικά χαρακτηριστικά που υπολογίστηκαν στο ξυλότυπο είχαν μικρή διαφορά από αυτά που υπολογίστηκαν στο νωπό σκυρόδεμα κατά τις δοκιμές στη Φάση I. Η ιδιοσυχνότητα των δοκιμών κατά τη Φάση I αυξάνει με την αύξηση του χρόνου δοκιμής από τη λήξη της σκυροδέτησης λόγω της συμμετοχής του σκυροδέματος στην ακαμψία του δοκιμίου. Η υπολογιζόμενη απόσβεση στο τέλος της Φάσης I για τα Δοκίμια II – IV και VII αυξάνει λόγω των ρηγματώσεων που υπέστησαν.
- **Η επίδραση της σεισμικής διέγερσης στις 12 και 24h μετά τη σκυροδέτηση δημιουργεί βλάβες στα στοιχεία σκυροδέματος (εξαρτώμενες από τη σεισμική διέγερση).** Κατά τη Φάση II, παρατηρείται μεγαλύτερη μείωση της ακαμψίας του Δοκιμίου IV (διέγερση 12 ώρες μετά τη σκυροδέτηση). Αντίστοιχη μείωση παρατηρείται και στην ακαμψία του Δοκιμίου VII (διέγερση 12 ώρες μετά τη σκυροδέτηση - επανάληψη) το οποίο κατά τη Φάση I διεγέρθηκε μόνο σε ποσοστό 25% του τεχνητού σεισμού.
- Σεισμική διέγερση σε δοκίμιο με νωπό σκυρόδεμα προκαλεί μετακίνηση του οπλισμού από την αρχική του θέση. Το πρόβλημα μπορεί να περιοριστεί με καλό δέσιμο του οπλισμού και στερέωση του ξυλοτύπου.
- Μετά το τέλος της Φάσης I και την απομάκρυνση των ξυλοτύπων παρατηρήθηκαν ρωγμές σε όλα τα δοκίμια (κόμβους δοκών –υποστυλωμάτων και στη διεπιφάνεια δοκού –υποστυλώματος Γενικά οι ρωγμές ήταν μικρού εύρους, δύσκολα διακρινόμενες, οι οποίες συνήθως κατά τις επιθεωρήσεις κρίνονται ως ασήμαντες, ενώ η παραμένουσα αντοχή των δοκιμών ήταν δυσανάλογα μικρή, όπως προέκυψε από τις δοκιμές της Φάσης II.
- Μετά το τέλος των δοκιμών, αφαιρέθηκαν με τη μέθοδο της αδιατάραχτης κοπής τμήματα των δοκών των δοκιμών. Παρατηρήθηκε οριζόντια ρωγμή σε κάθε άκρο στη θέση αγκύρωσης του κεκαμένου οπλισμού της δοκού η οποία διέρχεται κατά μήκος του χάλυβα οπλισμού της πλάκας. Η ρωγμή δεν εμφανίζεται στην εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος με αποτέλεσμα να είναι επικινδυνή μη ανιχνεύσιμη βλάβη του στοιχείου σκυροδέματος.

- Οι έλεγχοι (κρουσιμέτρηση, εξόλκευση ήλου, ταχύτητα υπερήχων, πυρηνοληψία) σε σκληρυμένο σκυρόδεμα που έχει υποστεί σεισμική διέγερση σε νεαρή ηλικία δεν παρέχουν συστηματικές ενδείξεις για τις τυχόν βλάβες που έχουν δημιουργηθεί (απώλεια συνάφειας οπλισμού σκυροδέματος, μικρορρηγματώσεις).
- Τα αποτελέσματα της μελέτης ενυδάτωσης του τσιμέντου σε συνθήκες όμοιες με αυτές που επικρατούν στο σκυρόδεμα δείχνουν καλή συμφωνία μεταξύ συμβατικού χρόνου αρχής και τέλους πήξης όπως προσδιορίζεται από την μέθοδο ASTM C 403/C 403M – 95 και προόδου ενυδάτωσης όπως προσδιορίζεται από τις μεθόδους XRD και TGA.

Με βάση τα παραπάνω συμπεράσματα προτείνεται ότι η έρευνα για τις επιπτώσεις σεισμικών δονήσεων σε στοιχεία σκυροδέματος κατά το στάδιο της πήξης ή στην αρχή της σκλήρυνσης πρέπει να εστιασθεί:

- Στη μελέτη του συσχετισμού ανιχνεύσιμων βλαβών και παραμένουσας αντοχής των στοιχείων σκυροδέματος
- Στην επινόηση τεχνικών ανίχνευσης και αξιολόγησης μη ορατών βλαβών (απώλεια συνάφειας οπλισμού σκυροδέματος, εσωτερικές ρηγματώσεις) καθώς και στην επινόηση τεχνικών για την επισκευή τους.

2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μετά την εκδήλωση του σεισμού της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999, που έπληξε την περιοχή των Αθηνών, υπήρξε μεγάλο ενδιαφέρον από τους μηχανικούς και κατασκευαστές δομικών έργων σχετικά με τις επιπτώσεις των μετασεισμών σε κατασκευές από σκυρόδεμα πρώιμης ηλικίας. Στις πρώιμες ηλικίες το σκυρόδεμα βρίσκεται στα στάδια της πήξης ή της αρχικής σκλήρυνσης χωρίς να έχει αποκτήσει επαρκή μηχανική αντοχή. Οι κύριες βλάβες που μπορεί να προκληθούν και δεν ανιχνεύονται είναι:

- Η μείωση της συνάφειας μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος
- Η δημιουργία μικρορηγματώσεων που μπορεί να επουλωθούν μερικώς προκαλώντας μείωση της αντοχής ή/και της ανθεκτικότητας των στοιχείων σκυροδέματος.

Λίγες είναι οι σχετικές ερευνητικές εργασίες και αφορούν δοκιμές σε μικρά δοκίμια (βλ. Κ.Γ. Τρέζος και Χ. Γεωργίου, «Σεισμική καταπόνηση νωπού σκυροδέματος: Επιπτώσεις στη συνάφεια», 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας, Θεσσαλονίκη 28-30 Νοεμβρίου 2001, Πρακτικά Συνεδρίου).

Η πρωτοτυπία του παρόντος ερευνητικού έργου είναι οι **ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ ΣΕ ΜΕΓΑΛΑ ΔΟΚΙΜΙΑ** (κεφάλαιο 3) σε σεισμικό προσωμοιωτήρα, σε δύο Φάσεις. Τα δοκίμια ήταν μονώροφα πλαίσια από οπλισμένο σκυρόδεμα διαστάσεων 3.30x3.30x3.00^h mxmxm. Κατά την Φάση I, οι διεγέρσεις πραγματοποιήθηκαν στα δοκίμια με ξυλότυπο κατά τα στάδια της πήξης ή της αρχικής σκλήρυνσης του σκυροδέματος 2, 4, 8, 12, και 24 (2 δοκίμια) ή μετά την σκυροδέτηση. Μετά την παρέλευση 8 ημερών για την απόκτηση ικανοποιητικής αντοχής απομακρύνονταν οι ξυλότυποι. Κατά την Φάση II, μετά από παρέλευση τουλάχιστον 28 ημερών από την σκυροδέτηση πραγματοποιούνταν σεισμικές δοκιμές μέχρι την αστοχία του δοκιμίου. Τα αποτελέσματα και των δύο Φάσεων συγκρίνονται με εκείνα ενός δοκιμίου αναφοράς το οποίο δεν δέχθηκε σεισμική διέγερση στη Φάση I. Τα μεγάλα δοκίμια σκυροδετήθηκαν με εργοστασιακό σκυρόδεμα και οι ξυλότυποι κατασκευάζονταν από εργολάβο οικοδομών. Το τμήμα αυτό του έργου πραγματοποιήθηκε και η μελέτη εκπονήθηκε από το **Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας ΕΜΠ** και συμμετείχαν οι:

- Π. Καρύδης, Δρ Πολ. Μηχ., Καθηγητής
- Χ. Μουζάκης, Δρ Πολ. Μηχ., Λέκτορας
- Α. Καραπίττα, Πολ. Μηχ.
- Σ. Ασημακόπουλος, Ηλεκτρονικός Μηχ. ΤΕ
- Γ. Μικέλης, Μηχανολόγος Μηχ. ΤΕ
- Κ. Σιοχτούρης, Τεχνικός

Τα μεγάλα δοκίμια κατασκευάστηκαν στο ΕΜΠ από εργολάβο κατασκευών σκυροδέματος και σκυροδετήθηκαν με εργοστασιακό σκυρόδεμα.

Με σκοπό τον συσχετισμό η/και την καταγραφή/συγκέντρωση τεχνικών δεδομένων για χρήση από τους μηχανικούς μελετητές διεξήχθησαν επίσης ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ (κεφάλαιο 4) και ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΟΔΟΥ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΣΕ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ XRD και TGA (κεφάλαιο 5).

Το τμήμα του έργου **ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ** εκπονήθηκε από το **Ελληνικό Κέντρο Ερευνών Τσιμέντου ΕΠΕ (ΕΚΕΤ)** που ήταν ο ανάδοχος του ερευνητικού προγράμματος και συμμετείχαν οι:

- Β. Καλοϊδάς, Δρ Χημ. Μηχ.
- Ζ. Τσιμπούκη, Μετ. Μετ. Μηχ.
- Χ. Μαλαμή, Δρ Χημ. Μηχ.
- Π. Γράτσος, Χημ. Μηχ.
- Χ. Μαμίτσας, Πολ. Μηχ.
- Γ. Ρουβέλας, Εργοδηγός, Τεχνικός Δομικών Εργων
- Χ. Ντέτσικας, Τεχνικός Εργαστηρίου
- Δ. Ραχιώτης, Εφαρμοστής
- Χ. Σκιαδάς, Εργατοτεχνίτης

Το τμήμα του έργου **ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΟΔΟΥ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΣΕ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ XRD και TGA** εκπονήθηκε από το **Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας ΕΜΠ** και συμμετείχαν οι:

- Σ. Τσιβιλής, Δρ Χημ. Μηχ., Αν. Καθηγητής
- Γ. Κάκαλη, Δρ Χημ. Μηχ., Επ. Καθηγήτρια
- Α. Σκαροπούλου, Χημ. Μηχ.

Στην παρούσα τεχνική έκθεση οι πίνακες και τα σχήματα αριθμούνται εξ αρχής σε κάθε κεφάλαιο. Τα σχήματα των κεφαλαίων 3 και 4 είναι τοποθετημένα σε αντίστοιχη παράγραφο στο τέλος κάθε κεφαλαίου. Αναλυτικά στοιχεία των πειραμάτων παρουσιάζονται στο αντίστοιχο παράρτημα του κάθε κεφαλαίου. Σημειώνεται επίσης ότι οι τύποι των τσιμέντων χαρακτηρίζονται σύμφωνα με το ΠΔ244/80

3 ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ ΣΕ ΜΕΓΑΛΑ ΔΟΚΙΜΙΑ

Οι παρούσες σεισμικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας (Ε.Α.Τ.) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π.) στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος του ΟΑΣΠ σε συνεργασία με το ΕΚΕΤ. Στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας είναι εγκατεστημένος ο σεισμικός προσομοιωτήρας 6 βαθμών ελευθερίας, με πλήρη ηλεκτρονικό έλεγχο και σύστημα συλλογής δεδομένων 64 καναλιών.

Στόχος των πειραμάτων ήταν η διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς πλαισίων οπλισμένου σκυροδέματος τα οποία έχουν υποστεί σεισμική διέγερση λίγες ώρες μετά την ολοκλήρωση της σκυροδέτησης (2, 4, 8 12 και 24 ώρες) και τα επακόλουθα της καταπόνησης αυτής, στην τελική συμπεριφορά του πλαισίου οπλισμένου σκυροδέματος σε σεισμική καταπόνηση.

Η πειραματική διαδικασία χωρίστηκε σε δύο φάσεις. Η πρώτη Φάση (Φάση Ι) συμπεριλάμβανε την κατασκευή του δοκιμίου πάνω στο σεισμικό προσομοιωτήρα, την σκυροδέτηση του και την πραγματοποίηση σεισμικών δοκιμών σε προκαθορισμένες ώρες μετά τη σκυροδέτηση του. Ο ξυλότυπος ήταν ίδιος για όλα τα δοκίμια με εξαίρεση το πρώτο δοκίμιο το οποίο ήταν διαφορετικό από τα υπόλοιπα. Μετά τις δοκιμές, το δοκίμιο παρέμενε στο σεισμικό προσομοιωτήρα για 8 μέρες έτσι ώστε το σκυροδέμα να αποκτήσει ικανοποιητική αντοχή. Στη συνέχεια απομακρύνονταν οι ξυλότυποι και το δοκίμιο μεταφερόταν από το σεισμικό προσομοιωτήρα σε χώρο δίπλα σ' αυτόν. Μετά τη διέλευση 30 ημερών και την απόκτηση των αντοχών του σκυροδέματος ακολουθούσε η δεύτερη Φάση (Φάση ΙΙ) κατά την οποία πραγματοποιούνταν σεισμικές δοκιμές μέχρι την αστοχία του δοκιμίου.

Η διαδικασία αυτή ήταν ίδια και για τις δύο φάσεις για όλα τα δοκίμια.

Αρχικά το κάθε δοκίμιο διεγέρθηκε από μια χρονοϊστορία λογαριθμικής ημιτονικής σάρωσης για τον προσδιορισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών του (ιδιοπερίοδος και λόγος απόσβεσης). Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν σεισμικές δοκιμές κατά τις οποίες κάθε δοκίμιο διεγέρθηκε από χρονοϊστορίες επιτάχυνσης στις διευθύνσεις X, Y και Z. Οι χρονοϊστορίες αυτές αποτελούσαν τις συνιστώσες ενός τεχνητού σεισμού το οποίο περιβάλλει φάσμα απόκρισης με μέγιστη εδαφική επιτάχυνση 0.40g και χαρακτηριστικές ιδιοπεριόδους $T_1=0.10\text{sec}$ και $T_2=0.80\text{sec}$. Κατά τη Φάση Ι τα δοκίμια υπέστησαν διαδοχικές κλιμακωτές σεισμικές διεγέρσεις σε ποσοστό 25%, 50% και 100% του τεχνητού σεισμού. Κατά τη Φάση ΙΙ τα δοκίμια διεγέρθηκαν από τον ίδιο τεχνητό σεισμό με διαδοχικές κλιμακωτές διεγέρσεις μέχρι την αστοχία τους. Κατά τη Φάση Ι τα Δοκίμια Ι και ΙΙ διεγέρθηκαν με σεισμική διέγερση οι χρονοϊστορίες της προσομοίαζαν τον κύριο σεισμό της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999 που έπληξε την περιοχή των Αθηνών.

Συνολικά εξετάστηκαν 7 δοκίμια. Εξετάστηκαν δοκίμια τα οποία καταπονήθηκαν 2 (Δοκίμιο Ι), 4 (Δοκίμιο ΙΙ), 8 (Δοκίμιο ΙΙΙ) 12 (Δοκίμιο ΙV) και 24 (Δοκίμιο V) ώρες μετά

την ολοκλήρωση της σκυροδέτησης. Ένα δοκίμιο (Δοκίμιο VI) διεγέρθηκε μετά την ανάπτυξη των επιθυμητών αντοχών του σκυροδέματος και αποτελούσε το Δοκίμιο Αναφοράς, ενώ η δοκιμή μετά την ολοκλήρωση 12 ωρών από τη σκυροδέτηση έδωσε τα δυσμενέστερα αποτελέσματα και επαναλήφθηκε (Δοκίμιο VII). Στον Πίνακα 1 περιγράφονται τα εξεταζόμενα δοκίμια. Για λόγους ευκολίας το δοκίμιο το οποίο εξετάστηκε κατά τη φάση ωρίμανσης του σκυροδέματος (Φάση I) θα έχει στην ονομασία του το χαρακτηριστικό γράμμα A, ενώ το δοκίμιο το οποίο εξετάστηκε μετά την απόκτηση των τελικών αντοχών του σκυροδέματος (Φάση II) θα έχει στην ονομασία του το χαρακτηριστικό γράμμα B

Πίνακας 1. Περιγραφή Δοκιμίων

Δοκίμιο	Φάση I	Δοκίμιο	Φάση II
I-A	Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν 2 ώρες μετά την σκυροδέτηση του.	I-B	Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν 52 μέρες μετά τις δοκιμές της Φάσης I.
II-A	Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν 4 ώρες μετά την σκυροδέτηση του.	II-B	Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν 30 μέρες μετά τις δοκιμές της Φάσης I.
III-A	Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν 8 ώρες μετά την σκυροδέτηση του.	III-B	Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν 30 μέρες μετά τις δοκιμές της Φάσης I.
IV-A	Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν 12 ώρες μετά την σκυροδέτηση του.	IV-B	Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν 30 μέρες μετά τις δοκιμές της Φάσης I.
V-A	Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν 24 ώρες μετά την σκυροδέτηση του.	V-B	Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν 30 μέρες μετά τις δοκιμές της Φάσης I.
VI	Δοκίμιο Αναφοράς	VI	Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν 44 μέρες μετά τις δοκιμές της Φάσης I.
VII-A	Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν 12 ώρες μετά την σκυροδέτηση του.	VII-B	Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν 66 μέρες μετά τις δοκιμές της Φάσης I.

3.1 ΔΟΚΙΜΙΑ

Τα δοκίμια ήταν μονώροφα πλαίσια από οπλισμένο σκυρόδεμα σε φυσική κλίμακα. Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν πάνω στο σεισμικό προσομοιωτήρα και είχαν διαστάσεις κάτοψης 3.300x3.300 m² και ύψος 3.00m. Τα υποστυλώματα ήταν διατομής 0.30x0.30 και τα δοκάρια διατομής 0.30/0.50. Η πλάκα είχε πάχος 0.15m. Τα δοκίμια παγιώθηκαν στο σεισμικό προσομοιωτήρα μέσω μεταλλικών βάσεων διαστάσεων 0.70m x0.70m x0.02m. Η συνολική μάζα του κάθε δοκιμίου ήταν 10Mgr.

Η πειραματική διάταξη των δοκιμών στο σεισμικό προσομοιωτήρα κατά τη Φάση I παρουσιάζεται στο Σχήμα 1(α), ενώ στο Σχήμα 1(β) φαίνεται η διάταξη των δοκιμών στο σεισμικό προσομοιωτήρα κατά τη φάση II. Στο Σχήμα 2 φαίνεται ο προσανατολισμός των δοκιμών στο σεισμικό προσομοιωτήρα και οι φορές των θετικών αξόνων. Για την κατασκευή των δοκιμών πάνω στο σεισμικό προσομοιωτήρα χρησιμοποιήθηκε ακριβώς ο ίδιος ξυλότυπος (με εξαίρεση το Δοκίμιο I-A) και δόθηκε έμφαση στην ομοιόμορφη κατασκευή του σε όλα τα δοκίμια.

Ο διαμήκης οπλισμός των υποστυλωμάτων αποτελείτο από 4Φ20+4Φ10 και ο εγκάρσιος από συνδετήρες υπό μορφή μανδύα Φ8/120. Στα δοκάρια του ισογείου και στα

συνδετήρια δοκάρια είχε τοποθετηθεί διαμήκης οπλισμός αποτελούμενος από 4Φ12 άνω και 4Φ12 κάτω και εγκάρσιος οπλισμός αποτελούμενος από συνδετήρες υπό μορφή μανδύα Φ8/110. Ο οπλισμός της πλάκας ήταν Φ8/150. Ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε ήταν ποιότητας S500 και το σκυρόδεμα ποιότητας C20/25. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται ο ξυλότυπος και οι οπλισμοί των πλαισίων οπλισμένου σκυροδέματος. Στα Σχήματα 4(α) και 4(β) παρουσιάζονται ο οπλισμός των υποστυλωμάτων, των συνδετήριων δοκών και ο οπλισμός της πλάκας ενώ στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται το δοκίμιο πριν από τη σκυροδέτηση του. Επίσης, λήφθηκε μέριμνα για την αγκύρωση των οπλισμών των υποστυλωμάτων στους κόμβους σύμφωνα με τις διατάξεις του Κανονισμού Οπλισμένου Σκυροδέματος. Οι οπλισμοί στους κάτω κόμβους των υποστυλωμάτων συγκολλήθηκαν στις μεταλλικές πλάκες παγίωσης του δοκιμίου σύμφωνα με τις διατάξεις συγκόλλησης δομικών χαλύβων.

Στο Δοκίμιο I-A υπήρχαν συνδετήρια δοκάρια (μάζα δοκιμίου 13Mgr). Τα δοκάρια αυτά αποκόπηκαν πριν τις δοκιμές της Φάσης II και αποφασίστηκε να μην κατασκευαστούν στα επόμενα δοκίμια.

3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ

3.2.1 Ημιτονική διέγερση σταθερής επιτάχυνσης

Για τον υπολογισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών των δοκιμίων – ιδιοσυχνότητα f (Hz) ή ιδιοπερίοδος T (sec) και λόγος απόσβεσης ζ – κάθε δοκίμιο διεγέρθηκε από μια χρονοϊστορία ημιτονικής μορφής σταθερής επιτάχυνσης 0.05g με λογαριθμική σάρωση συχνοτήτων από 1-30Hz. Η ταχύτητα σάρωσης ήταν μία οκτάβα το λεπτό. Κατά τις δοκιμές καταγράφονταν οι επιταχύνσεις στη στάθμη της οροφής κάθε δοκιμίου. Οι δοκιμές αυτές διενεργήθηκαν κατά τη Χ και Υ διεύθυνση ξεχωριστά. Η ιδιοσυχνότητα του δοκιμίου για τη σάρωση από 0 1-30Hz και 1 οκτάβα ανά λεπτό δίνεται από την πιο κάτω σχέση:

$$f(\text{Hz}) = 1.0 \cdot 2^{\frac{\text{TIME}(\text{sec})}{60}}$$

όπου TIME (sec) είναι η χρονική στιγμή η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη απόκριση του δοκιμίου (συντονισμός).

Ο λόγος απόσβεσης ζ προσδιορίστηκε με τη μέθοδο της μισής ισχύος πλάτους λωρίδας. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, σχεδιάζεται μια γραμμή παράλληλη στον άξονα του χρόνου, η οποία τέμνει την χρονοϊστορία της απόκρισης του δοκιμίου με $1/\sqrt{2}$ φορές την τιμή της απόκρισης του σε συντονισμό. Με τη χρήση του πιο πάνω τύπου προσδιορίζονται οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων στις οποίες η γραμμή τέμνει την απόκριση και ο λόγος απόσβεσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\zeta = \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1}, \text{ όπου } f_2 > f_1$$

Μετά το πέρας των σεισμικών δοκιμών στο τέλος κάθε Φάσης, πραγματοποιούνταν ημιτονικές διεγέρσεις σταθερής επιτάχυνσης 0.05g με λογαριθμική σάρωση συχνοτήτων από 1–8Hz. Οι διεγέρσεις αυτές πραγματοποιούνταν για να υπολογιστούν οι μεταβολές στα δυναμικά χαρακτηριστικά των δοκιμών μετά τις σεισμικές δοκιμές. Στον Πίνακα 2 δίνονται οι τιμές της ιδιοσυχνότητας ή ιδιοπερίοδος και του λόγου απόσβεσης οι οποίες αντιστοιχούν στον συντονισμό της πρώτης κανονικής μορφής για όλα τα δοκίμια τόσο στη αρχή όσο και στο τέλος κάθε Φάσης.

Πίνακας 2. Δυναμικά χαρακτηριστικά Δοκιμών – Υπολογισμοί από μετρήσεις πάνω στο σκυρόδεμα.

Αρ. Δοκιμίου		Φάση I				Φάση II			
		X		Y		X		Y	
		f (Hz) T (sec)	ζ (%)	f (Hz) T (sec)	ζ (%)	f (Hz) T (sec)	ζ (%)	f (Hz) T (sec)	ζ (%)
I	Αρχή	2.94 0.34	2.60	2.17 0.46	5.33	4.35 0.23	2.40	4.17 0.24	4.80
	Τέλος	-	-	-	-	-	-	-	-
II	Αρχή	1.64 0.61	3.86	1.75 0.57	5.21	3.50 0.29	1.40	3.45 0.29	3.40
	Τέλος	-	-	-	-	2.05 0.49	4.04	2.13 0.47	6.73
III	Αρχή	2.78 0.36	2.64	3.17 0.32	2.82	2.40 0.42	2.49	3.24 0.31	2.46
	Τέλος	-	-	-	-	-	-	-	-
IV	Αρχή	3.63 0.28	2.47	4.07 0.25	2.56	1.72 0.58	6.20	1.86 0.54	4.90
	Τέλος	-	-	1.57 0.64	19.70	-	-	-	-
V	Αρχή	6.28 0.16	1.70	5.95 0.17	6.30	3.95 0.25	3.72	4.00 0.25	5.13
	Τέλος	3.40 0.29	4.17	3.43 0.29	8.54	-	-	-	-
VI	Αρχή	ΔΟΚΙΜΙΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ				6.38 0.16	3.40	6.25 0.16	4.76
	Τέλος					1.41 0.71	8.15	1.21 0.83	9.92
VII	Αρχή	5.22 0.20	2.25	5.37 0.19	4.42	1.43 0.70	7.70	1.64 0.61	5.60
	Τέλος	1.20 0.83	6.12	1.47 0.68	9.21	-	-	-	-

Στα δοκίμια I-A και II-A, η διέγερση σταθερής επιτάχυνσης πραγματοποιήθηκε και στη διεύθυνση Z. Η ιδιοσυχνότητα στη διεύθυνση αυτή τόσο για το Δοκίμιο I-A όσο και για το Δοκίμιο I-B υπολογίστηκε στα 20 Hz με λόγο απόσβεσης 5.89% για το Δοκίμιο I-A και 6.40% για το Δοκίμιο I-B. Η διέγερση αυτή στη διεύθυνση Z δεν πραγματοποιήθηκε μόνο σε ορισμένα δοκίμια και η ιδιοσυχνότητα στη διεύθυνση αυτή υπολογιζόταν κοντά στα 20Hz.

Κατά τη Φάση I, ο υπολογισμός της ιδιοσυχνότητας - απόσβεσης έγιναν από μετρήσεις τόσο στον ξυλότυπο όσο και πάνω στο νωπό σκυρόδεμα. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά που υπολογίστηκαν στο ξυλότυπο είχαν μικρή διαφορά από αυτά που υπολογίστηκαν στο νωπό σκυρόδεμα. Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται τα δυναμικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων της Φάσης I τα οποία υπολογίστηκαν από την απόκριση των επιταχυνσιομέτρων τα οποία ήταν τοποθετημένα στον ξυλότυπο (βλ. Μετρητική Διάταξη).

Πίνακας 3. Δυναμικά Χαρακτηριστικά Φάσης I.
Υπολογισμοί από μετρήσεις στον ξυλότυπο.

Αρ. Δοκιμίου		Φάση I			
		X		Y	
		f (Hz) T (sec)	ζ (%)	f (Hz) T (sec)	ζ (%)
I	Αρχή	2.94 0.34	2.60	2.17 0.46	5.33
	Τέλος	-	-	-	-
II	Αρχή	1.64 0.61	3.86	1.75 0.57	5.21
	Τέλος	-	-	-	-
III	Αρχή	2.78 0.36	2.64	3.17 0.32	2.82
	Τέλος	-	-	-	-
IV	Αρχή	3.63 0.28	2.47	4.07 0.25	2.56
	Τέλος	-	-	1.57 0.64	19.70
V	Αρχή	6.28 0.16	1.70	5.95 0.17	6.30
	Τέλος	3.40 0.29	4.17	3.43 0.29	8.54
VI	ΔΟΚΙΜΙΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ				
VII	Αρχή	5.22 0.20	2.25	5.37 0.19	4.42
	Τέλος	1.20 0.83	6.12	1.47 0.68	9.21

3.2.2 Σεισμικές διεγέρσεις

Τόσο κατά τη Φάση I όσο και κατά τη Φάση II, τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε τριαξονική διέγερση με τρεις διαφορετικές χρονοϊστορίες επιταχύνσεων στους τρεις μεταφορικούς άξονες X, Y και Z. Οι χρονοϊστορίες αυτές (Σχήμα 6) αποτελούσαν τις συνιστώσες ενός τεχνητού σεισμού το φάσμα του οποίου έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Μέγιστη επιτάχυνση εδάφους: 0.40g

Χαρακτηριστικές Ιδιοπερίοδοι: $T_1=0.10$ sec, $T_2=0.80$ sec

Συντελεστής Σπουδαιότητας: Σ2
Συντελεστής θεμελίωσης: $\theta=1.00$
Απόσβεση: 5%

Η παραγωγή των τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων έγινε σύμφωνα με τις σχετικές διατάξεις του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού (Παράρτημα Α). Η συνολική διάρκεια των τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων ήταν 4098sec με χρονικό βήμα 0.01sec. Για τον υπολογισμό της χρονοϊστορίας της επιτάχυνσης στην κατακόρυφη διεύθυνση δεν λήφθηκε υπόψη η μείωση του φάσματος του Ελληνικού Κανονισμού στα 2/3 του αντίστοιχου φάσματος στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις. Κατά τη Φάση Ι, τα Δοκίμια Ι-Α και ΙΙ-Α διεγέρθηκαν με τις χρονοϊστορίες ενός τεχνητού σεισμού (Σχήμα 7) ο οποίος προσομοίαζε τον κύριο σεισμό της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999 που έπληξε την περιοχή των Αθηνών.

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές των επιταχύνσεων των τριών συνιστωσών του τεχνητού σεισμού και του τεχνητού σεισμού της 7^{ης} Σεπτεμβρίου. Στα Σχήματα 6 και 7 φαίνονται οι συνιστώσες και τα αντίστοιχα φάσματα επιταχύνσεων των δύο προαναφερόμενων σεισμών. Όλα τα φάσματα υπολογίστηκαν για 1/18 της οκτάβας και ποσοστό απόσβεσης 5%. Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται οι σεισμικές διεγέρσεις που πραγματοποιήθηκαν σε κάθε δοκίμιο κατά τη Φάση Ι και τη Φάση ΙΙ.

Πίνακας 4. Μέγιστες τιμές επιταχύνσεων συνιστωσών τεχνητού σεισμού και σεισμού Αθηνών, 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999.

Διεύθυνση	Μέγιστη τιμή επιτάχυνση Συνιστώσες τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων (m/sec ²)	Μέγιστη τιμή επιτάχυνση Συνιστώσες σεισμού της 7 ^{ης} Σεπτεμβρίου 1999 (m/sec ²)
X	4.502	5.40
Y	4.847	6.66
Z	4.813	5.30

3.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν πάνω στο σεισμικό προσομοιωτήρα μέσω τεσσάρων μεταλλικών βάσεων διαστάσεων 0.70m x 0.70m x 0.02m οι οποίες παγιώθηκαν στο σεισμικό προσομοιωτήρα. Η παγίωση τους εξασφαλίστηκε μέσω 8 κοχλιών M30 ποιότητας 8.8. Η ροπή σύσφιξης των κοχλιών ήταν 500Nm. Ο κατακόρυφος ολισμός των υποστυλωμάτων συγκολλήθηκε στις βάσεις. Στα Σχήματα 8 και 9 φαίνεται ο τρόπος παγίωσης των δοκιμίων στο σεισμικό προσομοιωτήρα και η συγκόλληση του κύριου οπλισμού των υποστυλωμάτων στις μεταλλικές βάσεις. Η τοποθέτηση των δοκιμίων στο σεισμικό προσομοιωτήρα και η παγίωση τους έγινε από το προσωπικό του Εργαστηρίου. Η πειραματική διάταξη των δοκιμίων στο σεισμικό προσομοιωτήρα παρουσιάζεται στο Σχήμα 1, ενώ στο Σχήμα 2 φαίνεται ο προσανατολισμός των δοκιμίων και οι θετικές φορές των αξόνων του σεισμικού προσομοιωτήρα.

Πίνακας 5. Σεισμικές δοκιμές κατά τη Φάση I και Φάση II

Αρ. Δοκιμίου	Φάση I	Φάση II
I	Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 25% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 50% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 100% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 150%	Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 10% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 25% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 50% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 100% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 125%
II	Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 25% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 50% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 100% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 150%	Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 25% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 50% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 100% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 100%
III	Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 25% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 50% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 100%	Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 25% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 50% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 100% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 140%
IV	Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 25% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 50% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 100%	Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 25% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 50% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 100% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 140%
V	Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 25% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 50% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 100%	Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 25% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 50% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 100% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 140% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 200% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 250% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 200%
VI	ΔΟΚΙΜΙΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 25% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 50% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 100% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 140% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 180% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 250%
VII	Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 25%	Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 25% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 50% Σεισμική Διέγερση σε ποσοστό 100%

* Οι δοκιμές διακόπηκαν – κίνδυνος κατάρρευσης του δοκιμίου.

3.4 ΜΕΤΡΗΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών καταγράφονταν σε κάθε δοκίμιο οι επιταχύνσεις του σεισμικού προσομοιωτήρα καθώς επίσης και οι αναπτυσσόμενες επιταχύνσεις στη στάθμη οροφής κάθε δοκιμίου κατά τις τρεις διευθύνσεις X, Y και Z. Κατά τη Φάση I η αναπτυσσόμενη επιτάχυνση καταγραφόταν τόσο στο νωπό σκυρόδεμα όσο και στον ξυλότυπο. Κατά τη Φάση II, εκτός από τις προαναφερόμενες επιταχύνσεις καταγράφονταν και οι αναπτυσσόμενες σχετικές μετακινήσεις. Στα Σχήματα 10(α)-10(β) και 11, παρουσιάζονται ενδεικτικά οι θέσεις μέτρησης των επιταχύνσεων και των

μετακινήσεων κατά τη Φάση I και Φάση II. Οι θέσεις μέτρησης κάθε δοκιμίου παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα Α.

Τα επιταχυνσιόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τις δοκιμές ήταν της εταιρείας ENDEVCO/USA και της εταιρείας KYOWA/JAPAN. Η βαθμονόμηση των επιταχυνσιομέτρων τόσο της σεισμικής τράπεζας όσο των επιταχυνσιομέτρων πάνω στα δοκίμια βαθμονομήθηκαν χρησιμοποιώντας τον βαθμονομητή επιταχυνσιομέτρων ENDEVCO 28959 DV αλλά και τη μέθοδο της στατικής βαθμονόμησης σύμφωνα με την οποία ένα επιταχυνσιόμετρο αφού μηδενιστεί σε μια θέση αναποδογυρίζεται. Τα βελόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν της εταιρείας CELESCO τύπου PT8101-0050-111-1110. Στο Παράρτημα Α δίνονται αναλυτικά οι θέσεις μέτρησης για κάθε δοκίμιο. Στα Σχήματα 12 και 13 παρουσιάζονται τα επιταχυνσιόμετρα στα διάφορα σημεία μέτρησης για τη Φάση I και Φάση II αντίστοιχα, ενώ στα Σχήματα 14 και 15 φαίνονται τα βελόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της σχετικής μετακίνησης κατά τη Φάση II.

3.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

Στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται όλες οι χρονοϊστορίες των σημάτων όπως αυτά αναλύθηκαν στα διάφορα σημεία μέτρησης για όλες τις δοκιμές για τα εξεταζόμενα δοκίμια. Πιο συγκεκριμένα για κάθε δοκίμιο παρουσιάζονται οι ακόλουθες χρονοϊστορίες:

1. Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων σεισμικού προσομοιωτήρα κατά τις διευθύνσεις X, Y και Z.
2. Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων κατά τις διευθύνσεις X, Y και Z στα διάφορα σημεία μέτρησης.
3. Χρονοϊστορίες μετακινήσεων στα σημεία μέτρησης DX και DY (Φάση II).

Στο ίδιο παράρτημα παρουσιάζονται επίσης η μετρική διάταξη κάθε δοκιμίου, η πορεία των δοκιμών και ο Πίνακας με τις απόλυτες μέγιστες τιμές σε κάθε σημείο μέτρησης για τις σεισμικές δοκιμές καθώς επίσης και τα διαγράμματα τέμνουσας βάσης - μετακίνησης για τα διάφορα επίπεδα σεισμικής καταπόνησης του κάθε δοκιμίου στη Φάση II.

3.6 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗΡΑ

Πλατφόρμα-Μηχανικά χαρακτηριστικά:

Διαστάσεις: 4m x 4m x 6m

Βάρος : 100 kN Υλικό: Χάλυβας

Αριθμός ανεξάρτητων βαθμών ελευθερίας: έξι (6)

Μέγιστο βάρος δοκιμίου 100 kN, σε ύψος 2m από τον σεισμικό προσομοιωτήρα.

Δοκίμια με μεγαλύτερο βάρος πρέπει να τροποποιηθεί σύμφωνα με τις καμπύλες βαθμονόμησης.

Μέγιστη Οριζόντια Δύναμη (Διεύθυνση X,Y): 320 (kN) μέγιστη κατακόρυφη δύναμη (Διεύθυνση Z): 640 (kN) μέγιστη μετακίνηση σεισμικού προσομοιωτήρα σε κάθε διεύθυνση: ± 10 (cm)

Μέγιστη στροφή ανά άξονα: 7×10^{-2} (rad)

Μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση ανά άξονα: (X,Y): 2.0 g μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση (Z): 4.0 g

Μέγιστη ταχύτητα ανά άξονα: 100 cm/sec

Συχνότητες λειτουργίας ανά βαθμό ελευθερίας: 0.1- 50 Hz

Εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς: 1200 kVA

Αναλογικός: Ειδική αναλογική μονάδα με δυνατότητα και ανεξάρτητης λειτουργίας για κάθε διεύθυνση. Παραγωγή δονήσεων.

Ψηφιακός: P.C. Δυνατότητα διέγερσης με μετατροπή ψηφιακού / αναλογικού οπουδήποτε κραδασμού (τεχνητού ή πραγματικού) που υπάρχει στη μνήμη του H/Y.

Σύστημα συλλογής και καταγραφής δεδομένων: ειδική μονάδα με 64 κανάλια (αναλογικά / ψηφιακά), με υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας για παρακολούθηση δυναμικών φαινομένων από διάφορους αισθητήρες. Αποθήκευση στο δίσκο του H/Y. Επεξεργασία δεδομένων και ανάλυση συμπεριφοράς δοκιμών με τη βοήθεια ειδικών προγραμμάτων H/Y που υπάρχουν στη βιβλιοθήκη του H/Y του Εργαστηρίου Αντισεισμικής Τεχνολογίας.

3.7 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

3.7.1 Καταγραφή Ρωγμών

3.7.1.1 Δοκίμιο I-A/ Δοκίμιο I-B

Το **Δοκίμιο I-A** διεγέρθηκε σε ποσοστό 25% (Δοκιμή 4), 50% (Δοκιμή 5), 100% (Δοκιμή 6) και 150% (Δοκιμή 7) του τεχνητού σεισμού της 7^{ης} Σεπτεμβρίου μετά τη διέλευση 2 ωρών από τη λήξη της σκυροδέτησης. Στο Σχήμα 16 παρουσιάζονται οι ρωγμές που αποκαλύφθηκαν στο δοκίμιο μετά την αφαίρεση των ξυλοτύπων. Παρατηρήθηκαν μια οριζόντια ρωγμή στον Α.Ν. κόμβο και μια κεκλιμένη ρωγμή στον Α.Β. κόμβο, ενώ οι υπόλοιποι κόμβοι του δοκιμίου δεν παρουσίασαν ρωγμές.

Το **Δοκίμιο I-B** διεγέρθηκε σε ποσοστό 10% (Δοκιμή 3), 25% (Δοκιμή 4) και 50% (Δοκιμή 5) 100% (Δοκιμή 6) και 125% (Δοκιμή 7) του τεχνητού σεισμού. Στο Σχήμα 17 παρουσιάζονται οι ρηγματώσεις του δοκιμίου μετά το τέλος των δοκιμών. Γενικά παρουσιάστηκαν οριζόντιες και διαγώνιες ρωγμές σε όλους τους κόμβους καθώς επίσης και θραύση του σκυροδέματος .

3.7.1.2 Δοκίμιο II-A/ Δοκίμιο II-B

Το **Δοκίμιο II-A** διεγέρθηκε σε ποσοστό 25% (Δοκιμή 4), 50% (Δοκιμή 5), 100% (Δοκιμή 6) και 150% (Δοκιμή 7) του τεχνητού σεισμού της 7^{ης} Σεπτεμβρίου μετά τη διέλευση 4 ωρών από τη λήξη της σκυροδέτησης. Στο Σχήμα 18 παρουσιάζονται οι ρωγμές που δημιουργήθηκαν μετά το τέλος της Φάσης I. Γενικά παρατηρήθηκαν οριζόντιες ρωγμές μικρού εύρους σε όλους τους κόμβους δοκών - υποστυλωμάτων του πλαισίου. Επίσης παρατηρήθηκαν ρωγμές εγκάρσια σε όλους τους κόμβους.

Το **Δοκίμιο II-B** διεγέρθηκε σε ποσοστό 25% (Δοκιμή 3), 50% (Δοκιμή 4) και 100% (Δοκιμή 5 και Δοκιμή 6) του τεχνητού σεισμού. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών ανοιγόκλειναν κυρίως οι ήδη υπάρχουσες ρωγμές σε όλους τους κόμβους δοκών - υποστυλωμάτων του πλαισίου που δημιουργήθηκαν στη Φάση I, ενώ ελάχιστες καινούργιες ρωγμές εμφανίστηκαν. Μετά το τέλος των δοκιμών παρατηρήθηκαν επίσης θραύση του σκυροδέματος στους κάτω κόμβους των υποστυλωμάτων καθώς επίσης αστοχία των συγκολλήσεων του διαμήκη οπλισμού στις μεταλλικές βάσεις. Στο Σχήμα 19 παρουσιάζονται οι ρωγμές που δημιουργήθηκαν μετά το τέλος της Φάσης II.

3.7.1.3 Δοκίμιο III-A/ Δοκίμιο III-B

Το **Δοκίμιο III-A** διεγέρθηκε σε ποσοστό 25% (Δοκιμή 4), 50% (Δοκιμή 5) και 100% (Δοκιμή 6) του τεχνητού σεισμού μετά τη διέλευση 8 ωρών από τη λήξη της σκυροδέτησης. Στα Σχήμα 20 παρουσιάζονται οι ρωγμές που αποκαλύφθηκαν μετά την αφαίρεση των ξυλοτύπων. Γενικά παρατηρήθηκαν οριζόντιες ρωγμές μικρού εύρους σε όλους τους κόμβους δοκών - υποστυλωμάτων και στη διεπιφάνεια δοκού - υποστυλώματος.

Το **Δοκίμιο III-B** διεγέρθηκε σε ποσοστό 25% (Δοκιμή 3), 50% (Δοκιμή 4), 100% (Δοκιμή 5) και 140% (Δοκιμή 6) του τεχνητού σεισμού. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών ανοιγόκλειναν κυρίως οι ήδη υπάρχουσες ρωγμές σε όλους τους κόμβους δοκών - υποστυλωμάτων του πλαισίου που δημιουργήθηκαν στη Φάση I και κυρίως οι ρωγμές στη διεπιφάνεια δοκού - υποστυλώματος. Παράλληλα εμφανίστηκαν λίγες καινούργιες ρωγμές στους κόμβους ενώ παρατηρήθηκε επίσης θραύση του σκυροδέματος στους κάτω κόμβους των υποστυλωμάτων. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών αναπτύχθηκαν επίσης εγκάρσιες ρωγμές σε όλους τους κόμβους. Οι ρηγματώσεις που περιγράφηκαν αναπτύχθηκαν κυρίως στη Δοκιμή 5. Στα Σχήματα 21 και 22(α)-22(β) παρουσιάζονται οι ρωγμές που δημιουργήθηκαν μετά το τέλος της Φάσης II.

3.7.1.4 Δοκίμιο IV-A/ Δοκίμιο IV-B

Το **Δοκίμιο IV-A** διεγέρθηκε σε ποσοστό 25% (Δοκιμή 4), 50% (Δοκιμή 5) και 100% (Δοκιμή 6) του τεχνητού σεισμού μετά τη διέλευση 12 ωρών από τη λήξη της σκυροδέτησης. Στο Σχήμα 23 παρουσιάζονται οι ρωγμές που αποκαλύφθηκαν μετά την αφαίρεση των ξυλοτύπων. Γενικά παρατηρήθηκαν οριζόντιες ρωγμές μικρού εύρους σε όλους τους κόμβους δοκών - υποστυλωμάτων και στη διεπιφάνεια δοκού - υποστυλώματος, όμοιες με τις ρωγμές που εμφανίστηκαν και στα προηγούμενα δοκίμια κατά Φάση I, μετά την αφαίρεση των ξυλοτύπων.

Το **Δοκίμιο IV-B** διεγέρθηκε σε ποσοστό 25% (Δοκιμή 3), 50% (Δοκιμή 4), 100% (Δοκιμή 5) και 140% (Δοκιμή 6) του τεχνητού σεισμού. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών ανοιγόκλειναν κυρίως οι ήδη υπάρχουσες ρωγμές σε όλους τους κόμβους δοκών - υποστυλωμάτων του πλαισίου που δημιουργήθηκαν στη Φάση I, ενώ εμφανίστηκαν και μερικές καινούργιες ρωγμές στους κόμβους. Στην τελευταία δοκιμή παρατηρήθηκε θραύση του σκυροδέματος και αποκάλυψη του κύριου οπλισμού των υποστυλωμάτων στον N-A και Δ-N κόμβο. Οι κόμβοι αυτοί υπέστησαν και τις μεγαλύτερες ζημιές.

Επίσης παρατηρήθηκαν εγκάρσιες ρωγμές σε κόμβους δοκών -υποστυλωμάτων. Στο Σχήμα 24 παρουσιάζονται οι ρωγμές που δημιουργήθηκαν μετά το τέλος της Φάσης II.

3.7.1.5 Δοκίμιο V-A/ Δοκίμιο V-B

Το **Δοκίμιο V-A** διεγέρθηκε σε ποσοστό 25% (Δοκιμή 4), 50% (Δοκιμή 5) και 100% (Δοκιμή 6) του τεχνητού σεισμού μετά τη διέλευση 24 ωρών από τη λήξη της σκυροδέτησης. Στο Σχήμα 25 παρουσιάζονται οι ρωγμές που αποκαλύφθηκαν μετά την αφαίρεση των ξυλοτύπων. Γενικά παρατηρήθηκαν οριζόντιες ρωγμές μικρού εύρους σε όλους τους κόμβους δοκών - υποστυλωμάτων και στη διεπιφάνεια δοκού – υποστυλώματος.

Το **Δοκίμιο V-B** διεγέρθηκε σε ποσοστό 25% (Δοκιμή 3), 50% (Δοκιμή 4), 100% (Δοκιμή 5), 140% (Δοκιμή 6) και 200% (Δοκιμή 7) του τεχνητού σεισμού. Οι δύο επόμενες δοκιμές σε ποσοστό 250% (Δοκιμή 8) και επανάληψη της διέγερσης σε ποσοστό 200% (Δοκιμή 9) δεν ολοκληρώθηκαν λόγω ανάπτυξης μεγάλων μετακινήσεων του δοκιμίου με κίνδυνο κατάρρευσης του. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών ανοιγόκλειναν κυρίως οι ήδη υπάρχουσες ρωγμές σε όλους τους κόμβους δοκών - υποστυλωμάτων του πλαισίου που δημιουργήθηκαν στη Φάση I, ενώ εμφανίστηκαν και μερικές καινούργιες ρωγμές στους κόμβους. Στο Σχήμα 26 παρουσιάζονται οι ρωγμές που δημιουργήθηκαν μετά το τέλος της Φάσης II.

3.7.1.6 Δοκίμιο VI- Δοκίμιο Αναφοράς

Το **Δοκίμιο VI** διεγέρθηκε μόνο κατά τη Φάση II μετά την απόκτηση των τελικών αντοχών του σκυροδέματος και αποτελεί το Δοκίμιο αναφοράς. Το δοκίμιο διεγέρθηκε σε ποσοστό 25% (Δοκιμή 3), 50% (Δοκιμή 4), 100% (Δοκιμή 5), 140% (Δοκιμή 6) και 180% (Δοκιμή 7) και 250% (Δοκιμή 8) του τεχνητού σεισμού. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών εμφανίστηκαν ρωγμές σε όλους τους κόμβους δοκών - υποστυλωμάτων του πλαισίου. Στο Σχήμα 27 παρουσιάζονται οι ρωγμές που δημιουργήθηκαν μετά το τέλος της Φάσης II.

3.7.1.7 Δοκίμιο VII-A/ Δοκίμιο VII-B

Το **Δοκίμιο VII-A** διεγέρθηκε σε ποσοστό 25% (Δοκιμή 3 και 4) του τεχνητού σεισμού μετά τη διέλευση 12 ωρών από τη λήξη της σκυροδέτησης. Στο Σχήμα 28 παρουσιάζονται οι ρωγμές που αποκαλύφθηκαν μετά την αφαίρεση των ξυλοτύπων. Γενικά παρατηρήθηκαν οριζόντιες ρωγμές μικρού εύρους σε όλους τους κόμβους δοκών - υποστυλωμάτων και στη διεπιφάνεια δοκού – υποστυλώματος.

Το **Δοκίμιο VII-B** διεγέρθηκε σε ποσοστό 25% (Δοκιμή 3), 50% (Δοκιμή 4) και 100% (Δοκιμή 5) του τεχνητού σεισμού. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών ανοιγόκλειναν κυρίως οι ήδη υπάρχουσες ρωγμές σε όλους τους κόμβους δοκών - υποστυλωμάτων του πλαισίου που δημιουργήθηκαν στη Φάση I, ενώ παράλληλα το εύρος του διευρύνθηκε, ενώ παράλληλα δημιουργήθηκαν και λίγες καινούργιες ρωγμές στους κόμβους. Στην τελευταία δοκιμή παρατηρήθηκε εκτεταμένη ζημιά σε όλους τους κόμβους δοκών –

υποστυλωμάτων με θραύση του σκυροδέματος και αποκάλυψη του κύριου οπλισμού. Στο Σχήμα 29 παρουσιάζονται οι ρωγμές που δημιουργήθηκαν μετά το τέλος της Φάσης II.

3.7.2 Συντελεστής Μεγέθυνσης Επιτάχυνσης

Ο συντελεστής μεγέθυνσης επιτάχυνσης υπολογίζεται ως ο λόγος της μέγιστης επιτάχυνσης που αναπτύχθηκε στην οροφή του δοκιμίου (σκυρόδεμα ή ξυλότυπος - Φάση I) προς τη μέγιστη επιτάχυνση της βάσης του (μέγιστη επιτάχυνση σεισμικού προσομοιωτήρα). Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται οι συντελεστές μεγέθυνσης επιτάχυνσης στις διευθύνσεις X, Y και Z που υπολογίστηκαν για όλα τα Δοκίμιο τόσο στη Φάση I όσο και στη Φάση II. για την ισχυρή σεισμική δοκιμή σε ποσοστό 100%, του τεχνητού σεισμού.

Πίνακας 6. Συντελεστής Μεγέθυνσης Επιτάχυνσης

Δοκίμιο	Συντελεστής Μεγέθυνσης επιτάχυνσης	Φάση I		Φάση II
		Σκυρόδεμα	Ξυλότυπος	
I	X	0.862	0.814	2.113
	Y	1.043	0.786	1.862
	Z	2.419	-	1.364
II	X	0.268	0.283	2.225
	Y	0.248	0.323	1.841
	Z	3.089	-	1.294
III	X	1.174	1.461	1.836
	Y	1.189	0.977	1.456
	Z	1.682	-	1.331
IV	X	1.752	1.767	1.734
	Y	1.373	1.430	1.593
	Z	1.944	-	1.225
V	X	1.496	1.867	2.206
	Y	1.467	1.611	1.807
	Z	2.105	-	1.182
VI	X	ΔΟΚΙΜΙΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ		1.815
	Y			1.731
	Z			1.087
VII	X	1.498	1.434	1.308
	Y	1.311	0.674	1.489
	Z	1.581	-	1.305

3.7.3 Μέγιστη Τέμνουσα Βάσης

Στον Πίνακα 7 παρουσιάζεται η μέγιστη τέμνουσα βάσης που αναπτύχθηκε στα δοκίμια κατά τη Φάση II σε ποσοστό 100% του τεχνητού σεισμού. Η τέμνουσα αυτή

υπολογίζεται ως το γινόμενο του μέσου όρου της μέγιστης αναπτυσσόμενης επιτάχυνσης στην οροφή του δοκιμίου επί τη μάζα του δοκιμίου.

Πίνακας 7. Φάση II: Τέμνουσα Βάσης

Δοκίμιο	Τέμνουσα Βάσης (kN)	Τεχνητός σεισμός 100%
I	X	116.36
	Y	104.69
II	X	107.15
	Y	105.84
III	X	105.54
	Y	90.74
IV	X	100.90
	Y	109.22
V	X	111.58
	Y	98.94
VI	X	100.43
	Y	98.94
VII	X	79.47
	Y	98.44

3.7.4 Υστερητική Συμπεριφορά

Το διάγραμμα αλληλεπίδρασης τέμνουσας βάσης – μετακίνηση οροφής για τα Δοκίμια I-B, II-B, III-B, IV-B, V-B, VII-B και του Δοκιμίου VI (Δοκίμιο Αναφοράς) όπως καταγράφηκαν στις ισχυρές σεισμικές δοκιμές φαίνονται στο παράρτημα Α. Οι βρόχοι αυτοί παρουσιάζονται για τη διεύθυνση X και Y (όπου αυτό κατέστη δυνατόν). Οι σχετικές μετακινήσεις σε κάθε διεύθυνση προέκυψαν από την αναγωγή των μεταβολών των διαγώνιων βελομέτρων D1 – D4 στις οριζόντιες διευθύνσεις (D1, D2 στη διεύθυνση X και D3, D4 στη διεύθυνση Y). Η σχετική μετακίνηση για κάθε βελόμετρο (D1- D4) υπολογίστηκε από τον τύπο:

$$\delta_i = \frac{\Delta d_i}{l} \sqrt{l^2 + h^2}$$

όπου Δd_i είναι η μεταβολή του μήκους της i διαγώνιου, l και h είναι η οριζόντια και η κατακόρυφη προβολή της διαγώνιου του βελομέτρου αντίστοιχα. Η τελική μετακίνηση προέκυψε ως ο μέσος όρος των απόλυτων τιμών των σχετικών μετακινήσεων σε κάθε διεύθυνση.

Η τέμνουσα σε κάθε διεύθυνση προέκυψε από το μέσο όρο των επιταχύνσεων στην αντίστοιχη διεύθυνση. Στις πολύ ισχυρές δοκιμές των δοκιμίων δεν παρουσιάζονται τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης λόγω αφαίρεσης των διαγώνιων βελομέτρων (κίνδυνος κατάρρευσης του δοκιμίου και καταστροφής των οργάνων μέτρησης).

Στα Σχήματα 30 έως 35 γίνεται σύγκριση των διαγραμμάτων τέμνουσας βάσης - μετακίνησης στη διεύθυνση X όλων των δοκιμίων με το Δοκίμιο αναφοράς (Δοκίμιο VI)

για τη σεισμική διέγερση σε ποσοστό 100% του τεχνητού σεισμού, ενώ στο Σχήμα 36 γίνεται σύγκριση των διαγραμμάτων τέμνουσας βάσης – μετακίνησης όλων των εξεταζόμενων δοκιμών για το ίδιο ποσοστό σεισμικής διέγερσης.

3.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με τις εν λόγω δοκιμές γίνεται συγκριτική μελέτη της συμπεριφοράς των διαφόρων δοκιμών σε σχέση με το χρόνο σκυροδέτησης τους. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων των δοκιμών οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στις 2, 4, 8, 12 και 24 ώρες μετά τη σκυροδέτηση των δοκιμών και τις μετέπειτα δοκιμές τους μετά το πέρας τουλάχιστον 30 ημερών προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Οι αναπτυσσόμενες επιταχύνσεις στην κορυφή ενός δοκιμίου από οπλισμένο σκυρόδεμα σε σεισμική διέγερση κατά τη φάση ωρίμανσης του είναι μειωμένες σε σχέση με την αντίστοιχη κατασκευή όπου το σκυρόδεμα έχει αποκτήσει την τελική του αντοχή.
1. Τα δοκίμια στη Φάση I (διεγέρσεις κατά τη φάση ωρίμανσης του δοκιμίου) παρουσίασαν διαφορετικά δυναμικά χαρακτηριστικά από τη Φάση II (διεγέρσεις όταν το σκυρόδεμα έχει αποκτήσει αντοχή). Τα δυναμικά χαρακτηριστικά που υπολογίστηκαν στο ξυλότυπο είχαν μικρή διαφορά από αυτά που υπολογίστηκαν στο νωπό σκυρόδεμα κατά τις δοκιμές στη Φάση I. Οι αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν στα δυναμικά χαρακτηριστικά κάθε δοκιμίου στις διευθύνσεις X και Y οφείλονται κυρίως στο γεγονός ότι ο ξυλότυπος δεν είναι συμμετρικά τοποθετημένος και απόλυτα στερεωμένος, κάτι το οποίο παρατηρείται σε πραγματικές συνθήκες εργοταξίου. Από τον Πίνακα 2 παρατηρείται επίσης ότι η ιδιοσυχνότητα των δοκιμών αυξάνει με την αύξηση του χρόνου δοκιμής από τη λήξη της σκυροδέτησης λόγω της συμμετοχής του σκυροδέματος στην ακαμψία του δοκιμίου. Από τον ίδιο Πίνακα παρατηρείται επίσης ότι η απόσβεση η οποία υπολογίστηκε στο τέλος της Φάσης I για τα Δοκίμια II – IV και VII αυξάνει λόγω των ρηγματώσεων που υπέστησαν τα δοκίμια.
2. Συγκρίνοντας τα Σχήματα 30 - 35 στα οποία παρουσιάζονται η σύγκριση του διαγράμματα τέμνουσας βάσης – μετακίνησης του κάθε δοκιμίου με το δοκίμιο αναφοράς κατά τη Φάση II καθώς επίσης και η σύγκριση όλων των δοκιμών (Σχήμα 36), παρατηρείται μεγαλύτερη μείωση της ακαμψίας του Δοκιμίου IV (διέγερση 12 ώρες μετά τη σκυροδέτηση). Αντίστοιχη μείωση παρατηρείται και στην ακαμψία του Δοκιμίου VII (διέγερση 12 ώρες μετά τη σκυροδέτηση - επανάληψη) το οποίο επισημαίνεται ότι κατά τη Φάση I διεγέρθηκε μόνο σε ποσοστό 25% του τεχνητού σεισμού. Από τα διαγράμματα αυτά παρατηρείται επίσης μια βαθμιαία μείωση της ακαμψίας των δοκιμών όσο αυξάνει ο χρόνος δοκιμής από τη λήξη της σκυροδέτησης.
3. Μετά το τέλος Φάση I και την απομάκρυνση των ξυλοτύπων παρατηρήθηκαν ρωγμές σε όλα τα δοκίμια (κόμβους δοκών –υποστυλωμάτων και στη

διεπιφάνεια δοκού –υποστυλώματος Γενικά οι ρωγμές αυτές ήταν μικρού εύρους, δύσκολα διακρινόμενες, οι οποίες συχνά κρίνονται ασήμαντες. Τα δοκίμια I-A (2 ώρες) και V-A (24 ώρες) παρουσίασαν τις λιγότερες ρωγμές σε σχέση με τα Δοκίμια II-A (4 ώρες), III-A (8 ώρες), IV-A και VII-A (12 ώρες). Μετά το τέλος της Φάσης II τα δοκίμια I-B (2 ώρες), V-B (24 ώρες) παρουσίασαν μεγάλου εύρους ορατές ρωγμές, διαρροή του χάλυβα οπλισμού στους κόμβους, στα δοκάρια και τα υποστυλώματα, όπου ήταν εμφανής η μεγάλη καταπόνηση τους. Αντίστοιχες βλάβες παρουσίασε και το Δοκίμιο VI - Δοκίμιο Αναφοράς. Στα δοκίμια II-B (4 ώρες), III-B (8 ώρες) και IV-B και VII-B (12 ώρες), κατά τη Φάση II ανοιγόκλειναν κυρίως οι ήδη υπάρχουσες ρωγμές που δημιουργήθηκαν στη Φάση I και μόνο ελάχιστες καινούργιες ρωγμές παρουσιάστηκαν. Οι τελικές ρωγμές των δοκιμίων αυτών και κυρίως των δοκιμίων IV-B και VII-B (δοκιμές μετά από 12 ώρες), δεν πρόβαλλαν ούτε τις μεγάλες μετακινήσεις που αναπτύχθηκαν στα δοκίμια ούτε τη μικρή παραμένουσα αντοχή τους, Η δυσαναλογία αυτή ρωγμών - παραμένουσας αντοχής δημιουργεί πολύ μεγάλο πρόβλημα.

4. Σεισμική διέγερση σε δοκίμιο με νωπό σκυρόδεμα προκαλεί πιθανή μετακίνηση του οπλισμού από την αρχική του θέση. Το πρόβλημα μπορεί να περιοριστεί με καλό δέσιμο του οπλισμού και στερέωση του ξυλοτύπου.
5. Μετά το τέλος των δοκιμών της Φάσης II και την αφαίρεση τμήματος από τους κόμβους των δοκιμίων II-B (4 ώρες), III-B (8 ώρες), IV-B (12 ώρες) και VII-B (12 ώρες) (Σχήμα 37 (α) –(β)) προέκυψε ότι υπήρχε κινητότητα του οπλισμού – αποκόλληση του οπλισμού από το σκυρόδεμα – με την ύπαρξη κενών γύρω από τον κύριο οπλισμό του υποστυλώματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειωθεί εν μέρει η συνάφεια χάλυβα – σκυροδέματος.

Μετά το τέλος των δοκιμών, αφαιρέθηκαν με τη μέθοδο της αδιατάραχτης κοπής τμήματα των δοκών των δοκιμίων όπως φαίνεται στο Σχήματα 38(α) -38(γ). Από τα Σχήματα αυτά μπορεί να παρατηρήσει κανείς μια οριζόντια ρωγμή σε κάθε άκρο στη θέση αγκύρωσης του κεκαμένου οπλισμού της δοκού η οποία διέρχεται κατά μήκος του χάλυβα οπλισμού της πλάκας. Η ρωγμή αυτή κρίνεται πολύ επικίνδυνη γιατί είναι βλάβη η οποία δεν εμφανίζεται στην εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος με αποτέλεσμα να μην μπορεί να εξακριβωθεί η ύπαρξη της επί τόπου και άμεσα. Η λεπτομερής ερμηνεία και ο μηχανισμός ανάπτυξης των εν λόγω ρωγμών είναι αντικείμενο περαιτέρω έρευνας.

3.9 ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 3

4 ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η συνάφεια μεταξύ σκληρυμένου σκυροδέματος και οπλισμού προέρχεται από την τριβή και από τη δημιουργία συγκολλητικού υλικού μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα καθώς και από την μηχανική εμπλοκή στην περίπτωση ράβδων οπλισμού με νευρώσεις [1]. Η διεπιφάνεια μεταξύ χάλυβα και τσιμέντου Portland αποτελείται από ασυνεχή στοιβάδα πολυκρυσταλλικού πορτλανδίτη με διαφορετικά πάχη και περιέχει εγκλείσματα γέλης CSH [2].

Η συνάφεια αυξάνει με τις μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος που εξελίσσονται στο χρόνο. Οι ασκούμενες τάσεις μπορεί να προκαλέσουν μετατόπιση του οπλισμού στο σκληρυμένο σκυρόδεμα με αποτέλεσμα την ολική ή μερική απώλεια της συνάφειας. Στην δεύτερη περίπτωση λειτουργούν μόνο οι δυνάμεις τριβής. Όταν το σκυρόδεμα είναι νωπό η επίδραση της μετατόπισης του οπλισμού στη συνάφεια μεταξύ οπλισμού και τελικώς σκληρυμένου σκυροδέματος εξαρτάται από τα ρεολογικά χαρακτηριστικά του κονιάματος.

Μετά την ανάμιξη του τσιμέντου, των αδρανών και του νερού τα συστατικά του τσιμέντου C_3A και C_4AF αντιδρούν ταχέως με το νερό και το $CaSO_4$ και το παραγόμενο νωπό σκυρόδεμα έχει ιξώδη υφή (στάδιο επώασης). Στην περίπτωση διαταραχής κατά το στάδιο αυτό, το σκυρόδεμα μπορεί να ανακτήσει το σχήμα του μέσα στον ξυλότυπο.

Μερικές ώρες αργότερα αρχίζει η πήξη του σκυροδέματος με την δημιουργία βελονοειδών κρυστάλλων εντριγγίτη. Στο στάδιο αυτό το σκυρόδεμα είναι πλαστικό αλλά δεν είναι εργάσιμο και στην περίπτωση παραμόρφωσης δεν επανακτά το αρχικό σχήμα του στους ξυλότυπους.

Το στάδιο της πήξης ακολουθείται από το στάδιο της σκλήρυνσης το οποίο κατά σύμβαση αρχίζει όταν το σκυρόδεμα αποκτήσει θλιπτική αντοχή περίπου 0,7 MPa αρχίζει το στάδιο της σκλήρυνσης. Κατά το πρώτο στάδιο της σκλήρυνσης, που το σκυρόδεμα έχει πολύ μικρή μηχανική αντοχή, οποιαδήποτε διαταραχή μπορεί να δημιουργήσει ρηγματώσεις και μόνιμη απώλεια της συνάφειας μεταξύ οπλισμού και κονιάματος.

4.2 ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Στις σκυροδετήσεις των μεγάλων δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί προμηθευτές με συνθέσεις σκυροδέματος κατηγορίας C20/25 όπως φαίνεται στον Πίνακα 1. Για την σκυροδέτηση των δοκιμών II έως VII προτιμήθηκε ο προμηθευτής της σύνθεσης 2 λόγω γειννίας της μονάδας παραγωγής σκυροδέματος με το Εργ. Αντισεισμικής Τεχνολογίας ΕΜΠ με σκοπό την αποφυγή καθυστερήσεων από την

παρασκευή του σκυροδέματος έως την διάστρωση. Σημειώνεται ότι σύμφωνα με τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος 97 §7.2 (παραπομπή στο σχέδιο Προτύπου ΕΛΟΤ 346) ο χρόνος μεταξύ παρασκευής και διάστρωσης του σκυροδέματος δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 110 min στην περίπτωση χρήσης επιβραδυντικού προσθέτου.

Πίνακας 1: Στοιχεία εργοστασιακών συνθέσεων σκυροδέματος

	Σύνθεση 1 Δοκίμιο Ι	Σύνθεση 2 Δοκίμια ΙΙ έως VII
Προμηθευτής	ΑΣΤΗΡ ΛΑΤΟ	ΑΛΦΑ ΜΠΕΤΟΝ
Κατηγορία Σκυροδέματος	C 20/25	C 20/25
Άμμος (kg/m ³)	950	979
Γαρμπίλι (kg/m ³)	300 (12.5 mm P95%)	211
Χαλίκι (kg/m ³)	610 (16 mm P21%)	632
Τσιμέντο ΙΙ 45 (kg/m ³)	185	310
Τσιμέντο ΙΙ 35 (kg/m ³)	115	0
Νερό (kg/m ³)	190	200
Πρόσθετο (kg/m ³)	0.90 (CHEM I)	1.50 (Pozzoloth 132)
Κατηγορία Κάθισης	S3	S3

Και οι δύο συνθέσεις έχουν κατηγορία κάθισης S3. Η σύνθεση 1 περιέχει 300 kg/m³ μίγματος τσιμεντών τύπων ΙΙ45 και ΙΙ35 (κατά ΠΔ244/80) ενώ η σύνθεση 2 περιέχει 310 kg/m³ τσιμέντο τύπου ΙΙ45.

4.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΑΡΧΗΣ ΚΑΙ ΤΕΛΟΥΣ ΠΗΞΗΣ

Η δοκιμή για τον προσδιορισμό του χρόνου αρχής και τέλους πήξης προδιαγράφεται από το πρότυπο ASTM C 403/C 403M – 95 και χρησιμοποιείται για λόγους σύγκρισης. Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν απόλυτη μέτρηση επειδή η δοκιμή πραγματοποιείται στο κονίαμα που προκύπτει με το κοσκίνισμα του σκυροδέματος στο κόσκινο ASTM No. 4 και όχι στο αρχικό σκυρόδεμα. Μία βελόνα, γνωστή σαν βελόνα Proctor, χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των χρόνων που η αντίσταση σε βύθιση είναι ίση με 3.5 MPa (500 psi) και 27.6 MPa (4000 psi). Οι χρόνοι αυτοί αναφέρονται σαν χρόνος αρχής πήξης και χρόνος τέλους πήξης αντίστοιχα και είναι διαφορετικοί από τους χρόνους πήξης του τσιμέντου.

Για τον προσδιορισμό του χρόνου της αρχής και τέλους της πήξης του σκυροδέματος οι συνθέσεις 1 και 2 του Πίνακα 1 αναπαρήχθησαν στο εργαστήριο με τους αντίστοιχους κωδικούς 1216 και 1219 όπως φαίνεται στον Πίνακα 2. Με σκοπό την εκτίμηση της επίδρασης της περιεκτικότητας σε επιβραδυντή στο χρόνο αρχής και τέλους της πήξης παρασκευάστηκε η σύνθεση 1218 (βλ. Πίνακα 2) που είναι όμοια με την σύνθεση 1219 περιέχει όμως 1.91 kg Pozzoloth132 /m³. Αναλυτικά στοιχεία των εργαστηριακών συνθέσεων σκυροδέματος παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.

Πίνακας 2: Στοιχεία εργαστηριακών συνθέσεων και χρόνος αρχής και τέλους πήξης σκυροδέματος

Κωδικός σύνθεσης ΕΚΕΤ	1216	1219	1218
Κατηγορία Σκυροδέματος	C 20/25	C 20/25	C 20/25
Άμμος (kg/m ³)	956	983	983
Γαρμπίλι (kg/m ³)	306	215	215
Χαλίκι (kg/m ³)	625	646	646
Τσιμέντο CEM II 42.5 (kg/m ³)	185	310	310
Τσιμέντο CEM IV 32.5 (kg/m ³)	115	0	0
Νερό (kg/m ³)	190	200	200
Λόγος Νερό/Τσιμέντο	0.63	0.65	0.65
Πρόσθετο (kg/m ³)	0.90 (CHEM I)	1.50 (Pozzoloth 132)	1.91 (Pozzoloth 132)
Λόγος Πρόσθετο/Τσιμέντο	0.0030	0.0048	0.0062
Κάθιση (cm)	17	20	19
Χρόνος αρχής πήξης (h)	9.9	7.4	8.3
Χρόνος τέλους πήξης (h)	13.3	9.7	10.6
Θλιπτική αντοχή 7 d (MPa) *	24,5	31,1	31,6
Θλιπτική αντοχή 28 d (MPa) *	31,9	38,1	39,2

* κυβικά δοκίμια

Παρατηρείται ότι ο χρόνος τέλους πήξης στις συνθέσεις 1216 και 1219 προσδιορίζεται από 9.7 ως 12.3 h. Σημειώνεται ή αύξηση του χρόνου τέλους πήξης από 9.7h (σύνθεση 1216) σε 10.6 h (σύνθεση 1218) με αύξηση της περιεκτικότητας σε Pozzoloth 132 από 1.50 kg/m³ σε 1.91 kg/m³ αντίστοιχα. Γραφική παράσταση της αντίστασης σε βύθιση με τον χρόνο για τον προσδιορισμό των χρόνων αρχής και τέλους πήξης των εργαστηριακών συνθέσεων σκυροδέματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.

Η συμβατική θλιπτική αντοχή της εργαστηριακής σύνθεσης 1216 είναι 31,9 MPa, καλύπτει την κατηγορία C20/25 ενώ των συνθέσεων 1219 και 1218 είναι είναι κατά περίπου 6,5 MPa υψηλότερη, 38,1 και 39,2 MPa αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι τα τσιμέντα τύπου IV συνεχίζουν να αναπτύσουν αντοχές σε μακρύ χρονικό διάστημα.

4.4 ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Κατά την σκυροδέτηση των δοκιμών/οικίσκων ελήφθησαν δοκίμια σκυροδέματος για τον έλεγχο της συμβατικής αντοχής του υλικού κατά ΚΤΣ 97. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στους Πίνακες 3 έως 9. Στο σκυρόδεμα του δοκιμίου Ι εμφανίζεται οριακά χαμηλή συμβατική αντοχή και δεν ικανοποιείται ο πρώτος κανόνας του κριτηρίου Ε. Το φαινόμενο αποδίδεται στο γεγονός ότι λόγω χωροταξικών περιορισμών η σκυροδέτηση άρχισε τουλάχιστον 2 h μετά την παραγωγή του αναμίγματος σκυροδέτησης.

Πίνακας 3: Συμβατική αντοχή δοκιμών σκυροδέματος - Δοκίμιο Ι

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 25/09/2001						
Φορτίο Θραύσης (kN)	Θλιπτική αντοχή 28 ημερών (MPa)	Διαστάσεις (mm)			Βάρος Δοκιμίου (g)	Πυκνότητα Δοκιμίου (kg/m ³)
		Υ	Π	Μ		
566.0	25.2	150	150	150	7746	2295
596.0	26.7	150	150	149	7743	2310
608.7	27.1	150	150	150	7771	2303
average	26.3					2302
sd	1.0					7.3
Κριτήριο E	C 20/25					
aver(Xi) =	26.3	av(Xi) ≥ f _{ck} +3.7 (MPa) =			28.7	Δεν ικανοποιείται
f _{ck} =	25.0	X _i ≥ f _{ck} (MPa) =			25.0	Ικανοποιείται

Πίνακας 4: Συμβατική αντοχή δοκιμών σκυροδέματος - Δοκίμιο ΙΙ

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 16/10/2001						
Φορτίο Θραύσης (kN)	Θλιπτική αντοχή 28 ημερών (MPa)	Διαστάσεις (mm)			Βάρος Δοκιμίου (g)	Πυκνότητα Δοκιμίου (kg/m ³)
		Υ	Π	Μ		
725.3	32.2	150	150	150	7985	2366
763.9	34.0	150	150	150	7986	2366
751.7	33.2	150	150	151	7945	2338
average	33.1					2357
sd	0.9					15.9
Κριτήριο E	C 20/25					
aver(Xi) =	33.1	av(Xi) ≥ f _{ck} +3.7 (MPa) =			28.7	Ικανοποιείται
f _{ck} =	25.0	X _i ≥ f _{ck} (MPa) =			25.0	Ικανοποιείται

Πίνακας 5: Συμβατική αντοχή δοκιμών σκυροδέματος - Δοκίμιο ΙΙΙ

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 07/02/2002						
Φορτίο Θραύσης (kN)	Θλιπτική αντοχή 28 ημερών (MPa)	Διαστάσεις (mm)			Βάρος Δοκιμίου (g)	Πυκνότητα Δοκιμίου (kg/m ³)
		Υ	Π	Μ		
771.4	34.3	150	150	150	8042	2383
795.6	35.4	150	150	150	8146	2414
746.7	33.6	150	150	148	7998	2402
average	34.4					2399
sd	0.9					15.5
Κριτήριο E	C 20/25					
aver(Xi) =	34.4	av(Xi) ≥ f _{ck} +3.7 (MPa) =			28.7	Ικανοποιείται
f _{ck} =	25.0	X _i ≥ f _{ck} (MPa) =			25.0	Ικανοποιείται

Πίνακας 6: Συμβατική αντοχή δοκιμών σκυροδέματος - Δοκίμιο IV

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 18/02/2002						
Φορτίο Θραύσης (kN)	Θλιπτική αντοχή 28 ημερών (MPa)	Διαστάσεις (mm)			Βάρος Δοκιμίου (g)	Πυκνότητα Δοκιμίου (kg/m ³)
		Υ	Λ	-		
448.3	25.4	300	150	-	12780	2411
515.9	29.2	300	150	-	12825	2419
532.2	30.1	300	150	-	12840	2422
average	28.2					2417
sd	2.5					5.9
Κριτήριο E	C 20/25					
aver(Xi) =	28.2	av(Xi) ≥ f _{ck} +3.7 (MPa) =			23.7	Ικανοποιείται
f _{ck} =	20.0	X _i ≥ f _{ck} (MPa) =			20.0	Ικανοποιείται

Πίνακας 7: Συμβατική αντοχή δοκιμών σκυροδέματος - Δοκίμιο V

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 26/02/2002						
Φορτίο Θραύσης (kN)	Θλιπτική αντοχή 28 ημερών (MPa)	Διαστάσεις (mm)			Βάρος Δοκιμίου (g)	Πυκνότητα Δοκιμίου (kg/m ³)
		Υ	Π	M		
699.5	31.1	150	150	150	8062	2389
711.3	31.6	150	150	150	8046	2384
727.8	32.3	150	150	150	8070	2391
average	31.7					2388
sd	0.6					3.6
Κριτήριο E	C 20/25					
aver(Xi) =	31.7	av(Xi) ≥ f _{ck} +3.7 (MPa) =			28.7	Ικανοποιείται
f _{ck} =	25.0	X _i ≥ f _{ck} (MPa) =			25.0	Ικανοποιείται

Πίνακας 8: Συμβατική αντοχή δοκιμών σκυροδέματος - Δοκίμιο VI

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 10/04/2002						
Φορτίο Θραύσης (kN)	Θλιπτική αντοχή 28 ημερών (MPa)	Διαστάσεις (mm)			Βάρος Δοκιμίου (g)	Πυκνότητα Δοκιμίου (kg/m ³)
		Υ	Λ	-		
566.0	32.0	300	150	-	12540	2365
505.3	28.6	300	150	-	12690	2394
558.9	31.6	300	150	-	12525	2363
average	30.8					2374
sd	1.9					17.2
Κριτήριο E	C 20/25					
aver(Xi) =	30.8	av(Xi) ≥ f _{ck} +3.7 (MPa) =			23.7	Ικανοποιείται
f _{ck} =	20.0	X _i ≥ f _{ck} (MPa) =			20.0	Ικανοποιείται

Πίνακας 9: Συμβατική αντοχή δοκιμίων σκυροδέματος - Δοκίμιο VII

Ημερομηνία Σκυροδέτησης: 26/04/2002						
Φορτίο Θραύσης (kN)	Θλιπτική αντοχή 28 ημερών (MPa)	Διαστάσεις (mm)			Βάρος Δοκιμίου (g)	Πυκνότητα Δοκιμίου (kg/m ³)
		Υ	Π	Μ		
675.1	30.0	150	150	150	8028	2379
696.0	30.9	150	150	150	8006	2372
669.1	29.7	150	150	150	7970	2361
average	30.2					2371
sd	0.6					8.7
Κριτήριο E	C 20/25					
aver(Xi) =	30.2	av(Xi) ≥ f _{ck} + 3.7 (MPa) =			28.7	Ικανοποιείται
f _{ck} =	25.0	X _i ≥ f _{ck} (MPa) =			25.0	Ικανοποιείται

4.5 ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΠΡΙΝ ΤΗ ΦΑΣΗ II

Οι μη καταστρεπτικοί έλεγχοι στο σκυρόδεμα των δοκιμίων πραγματοποιήθηκαν με την παρέλευση 28 έως 52 ημερών από την σκυροδέτηση. Συγκεκριμένα η ηλικία κάθε δοκιμίου κατά την εκτέλεση των ελέγχων δίνεται στον Πίνακα 10. Μετά την ολοκλήρωσή τους ακολούθησε η δεύτερη φάση σεισμικών δοκιμών (Φάση II) μέχρι την αστοχία του δοκιμίου. Σκοπός των μετρήσεων ήταν η εκτίμηση της αντοχής και γενικότερα της κατάστασης του σκυροδέματος των δοκιμίων.

Πίνακας 10: Ηλικία δοκιμίου κατά την εκτέλεση ελέγχων με μη καταστρεπτικές μεθόδους

	Ηλικία (ημέρες)
Δοκίμιο I	52
Δοκίμιο II	31
Δοκίμιο III	28
Δοκίμιο IV	29
Δοκίμιο V	28
Δοκίμιο VII	35

4.5.1 Εκτίμηση αντοχής σκυροδέματος με κρουσιμέτρηση

Η δοκιμή της κρουσιμέτρησης για την εκτίμηση της αντοχής έγινε σε δύο στοιχεία για κάθε δοκίμιο και οι πρωτογενείς μετρήσεις (ανάγνωση του οργάνου) δίνονται στους Πίνακες 11 έως 13. Οι μετρηθείσες τιμές μετατρέπονται σε αντοχή με βάση την καμπύλη βαθμονόμησης του οργάνου και η εκτιμώμενη αντοχή για κάθε στοιχείο υπολογίζεται αφαιρώντας τις τρεις μεγαλύτερες και τις τρεις μικρότερες τιμές που μετρήθηκαν.

Στους Πίνακες 14 έως 19 δίνονται για κάθε στοιχείο η εκτιμώμενη αντοχή σαν μέσος όρος 6 τιμών (avg), η τυπική απόκλιση των 6 τιμών (sd), το εκτιμώμενο από την καμπύλη του οργάνου σφάλμα (curv-error) για κάθε τιμή avg και το στατιστικό σφάλμα μέτρησης βάση της τυπικής απόκλισης των 6 τιμών ($T=2.57 \times sd$). Τέλος υπολογίζεται η ελάχιστη εκτιμώμενη αντοχή (minS) όπως προκύπτει από την αφαίρεση (avg – curv error).

Επισημαίνεται ότι οι τιμές αντοχής που εκτιμώνται βάσει κρουσιμέτρησης αποτελούν εκτίμηση της επι τόπου πραγματικής αντοχής ($f_{c,ins}$) ενώ οι συμβατικές τιμές αντοχής ($f_{c,stand}$), εξάγονται από τη θραύση δοκιμίων που λαμβάνονται, συντηρούνται και θραύονται με τον συμβατικό τρόπο. Σύμφωνα με ορισμένες βιβλιογραφικές πηγές [3, 4] ο λόγος της μέσης επι τόπου αντοχής προς την αντίστοιχη μέση συμβατική $f_{c,ins,m} / f_{c,stand,m}$ μπορεί να είναι 0.85 έως 0.95.

Από τα αποτελέσματα της κρουσιμέτρησης παρατηρείται ότι:

Δοκίμιο II:

Η εκτιμώμενη θλιπτική αντοχή στην ηλικία των 31 ημερών (22.8 και 23.6 MPa) είναι μικρότερη από την θλιπτική αντοχή των συμβατικών δοκιμίων στην ηλικία των 28 ημερών (33.1 MPa) και αποδίδεται στις σημαντικές διαφορές στον τρόπο συμπίκνωσης και συντήρησης του σκυροδέματος στην κατασκευή και στα συμβατικά δοκίμια.

Δοκίμιο I:

Η εκτιμώμενη θλιπτική αντοχή στην ηλικία των 52 ημερών (26.7 και 29.2 MPa) είναι περίπου ίση με την θλιπτική αντοχή των συμβατικών δοκιμίων στην ηλικία των 28 ημερών (26.3 MPa). Στην περίπτωση αυτή οι διαφορές στον τρόπο συμπίκνωσης και συντήρησης αντισταθμίζονται από την διαφορετική ηλικία του σκυροδέματος στην κατασκευή και στα συμβατικά δοκίμια.

Πίνακας 11: Πρωτογενείς μετρήσεις κρουσιμετρήσεων για τα Δοκίμια I και II

α/α	Δοκίμιο I		Δοκίμιο II	
	Υποστύλωμα C1	Υποστύλωμα C3	Υποστύλωμα C3	Δοκός B4
1	32	33	30	28
2	32	34	30	27
3	30	32	29	31
4	33	38	29	26
5	33	34	29	31
6	31	32	32	31
7	31	35	26	32
8	32	33	27	31
9	36	32	27	25
10	32	33	31	31
11	31	32	29	31
12	31	34	32	26

Δοκίμια III, IV, V και VII:

Τα αποτελέσματα των κρουσιμετρήσεων για τα δοκίμια III έως V και VII δίνονται στους Πίνακες 16 έως 19 αντίστοιχα.

Πίνακας 12: Πρωτογενείς μετρήσεις κρουσιμετρήσεων για τα Δοκίμια III και IV

α/α	Δοκίμιο III		Δοκίμιο IV	
	Υποστύλωμα C3	Δοκός B4	Υποστύλωμα C3	Δοκός B2
1	28	28	29	29
2	25	29	28	29
3	28	28	28	27
4	34	31	29	25
5	27	32	26	29
6	28	28	28	26
7	29	29	29	29
8	28	30	28	27
9	30	26	27	24
10	28	28	25	25
11	31	28	29	27
12	29	31	28	24

Πίνακας 13: Πρωτογενείς μετρήσεις κρουσιμετρήσεων για τα Δοκίμια V και VII

Α/α	Δοκίμιο V		Δοκίμιο VII	
	Υποστύλωμα C4	Δοκός B4	Υποστύλωμα C3	Δοκός B1
1	26	28	33	33
2	25	27	32	31
3	25	23	34	32
4	23	28	32	36
5	24	22	32	32
6	26	27	33	32
7	26	30	33	32
8	30	25	32	36
9	27	24	34	31
10	26	23	33	30
11	24	27	30	32
12	27	26	30	34

Πίνακας 14: Αποτελέσματα κρουσιμετρήσεων - Δοκίμιο Ι

α/α	Μέτρηση		Εκτιμώμενη αντοχή (MPa)	
	Υποστύλωμα C1	Υποστύλωμα C3	Υποστύλωμα C1	Υποστύλωμα C3
1	31	32	25.6	27.3
2	31	33	25.6	29.0
3	32	33	27.3	29.0
4	32	33	27.3	29.0
5	32	34	27.3	30.6
6	32	34	27.3	30.6
avg (MPa)			26.7	29.2
sd			0.9	1.3
T=sd\times2.57			2.2	3.3
curv-error			6.1	6.3
min S (MPa)			20.6	22.9

Πίνακας 15: Αποτελέσματα κρουσιμετρήσεων - Δοκίμιο ΙΙ

α/α	Μέτρηση		Εκτιμώμενη αντοχή (MPa)	
	Υποστύλωμα C3	Δοκός B4	Υποστύλωμα C3	Δοκός B4
1	29	27	22.2	18.8
2	29	28	22.2	20.5
3	29	31	22.2	25.6
4	29	31	22.2	25.6
5	30	31	23.9	25.6
6	30	31	23.9	25.6
avg (MPa)			22.8	23.6
sd			0.9	3.1
T=sd\times2.57			2.2	8.0
curv-error			5.8	5.9
min S (MPa)			16.9	17.7

Πίνακας 16: Αποτελέσματα κρουσιμετρήσεων - Δοκίμιο III

α/α	Μέτρηση		Εκτιμώμενη αντοχή (MPa)	
	Υποστύλωμα C3	Δοκός B4	Υποστύλωμα C3	Δοκός B4
1	28	28	20.5	20.5
2	28	28	20.5	20.5
3	28	28	20.5	20.5
4	28	29	20.5	22.2
5	29	29	22.2	22.2
6	29	30	22.2	23.9
avg (MPa)			21.1	21.6
sd			0.9	1.4
T=sd\times2.57			2.2	3.5
Curv-error			5.7	5.7
min S (MPa)			15.4	15.9

Πίνακας 17: Αποτελέσματα κρουσιμετρήσεων - Δοκίμιο IV

α/α	Μέτρηση		Εκτιμώμενη αντοχή (MPa)	
	Υποστύλωμα C3	Δοκός B2	Υποστύλωμα C3	Δοκός B2
1	28	25	20.6	16.5
2	28	26	20.6	17.9
3	28	27	20.6	19.3
4	28	27	20.6	19.3
5	28	27	20.6	19.3
6	29	29	22.0	22.0
avg (MPa)			20.9	19.0
sd			0.6	1.8
T=sd\times2.57			1.4	4.7
Curv-error			5.7	5.5
min S (MPa)			15.2	13.5

Πίνακας 18: Αποτελέσματα κρουσιμετρήσεων - Δοκίμιο V

Α/α	Μέτρηση		Εκτιμώμενη αντοχή (MPa)	
	Υποστύλωμα C4	Δοκός B4	Υποστύλωμα C4	Δοκός B4
1	25	24	16.5	15.1
2	25	25	16.5	16.5
3	26	26	17.9	17.9
4	26	27	17.9	19.3
5	26	27	17.9	19.3
6	26	27	17.9	19.3
avg (MPa)			17.4	17.9
sd			0.7	1.7
T=sd \times 2.57			1.8	4.5
Curv-error			5.4	5.4
min S (MPa)			12.0	12.5

Πίνακας 19: Αποτελέσματα κρουσιμετρήσεων - Δοκίμιο VII

Α/α	Μέτρηση		Εκτιμώμενη αντοχή (MPa)	
	Υποστύλωμα C3	Δοκός B1	Υποστύλωμα C3	Δοκός B1
1	32	32	27.3	27.3
2	32	32	27.3	27.3
3	32	32	27.3	27.3
4	33	32	29.0	27.3
5	33	32	29.0	27.3
6	33	33	29.0	29.0
avg (MPa)			28.1	27.6
sd			0.9	0.7
T=sd \times 2.57			2.4	1.8
Curv-error			6.2	6.2
min S (MPa)			21.9	21.3

4.5.2 Εκτίμηση αντοχής σκυροδέματος με εξόλκευση ήλου

Η μέθοδος της εξόλκευσης ήλου παρέχει μία εκτίμηση της αντοχής του σκυροδέματος και βασίζεται στο συσχετισμό της δύναμης που απαιτείται για την εξόλκευση ενός «ειδικού καρφιού» (ήλου) από το ελεγχόμενο σκυρόδεμα, με την αντοχή του. Προϋπόθεση είναι η καλή βαθμονόμηση του οργάνου μέτρησης (συνάρτηση συσχετισμού αποτελέσματος μέτρησης – αντοχής σκυροδέματος).

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τα δοκίμια III έως V και VII δίνονται στους Πίνακες 20 έως 23 αντίστοιχα, όπου οι μετρηθείσες τιμές μετατρέπονται σε αντοχή με βάση την καμπύλη βαθμονόμησης του οργάνου. Επίσης δίνονται για κάθε στοιχείο η εκτιμώμενη αντοχή σαν μέσος όρος 3, 4 ή 5 τιμών (avg) και η τυπική απόκλιση (sd).

Πίνακας 20: Αποτελέσματα εξόλκευσης ήλου - Δοκίμιο III

α/α	Μέτρηση (kN)		Εκτιμώμενη αντοχή (MPa)	
	Υποστύλωμα C3	Δοκός B4	Υποστύλωμα C3	Δοκός B4
1	9.00	7.00	32.3	24.7
2	8.50	9.50	30.4	34.2
3	6.75	7.00	23.8	24.7
4	8.00	7.75	28.5	27.5
avg (MPa)			28.7	27.8
sd			3.7	4.5

Πίνακας 21: Αποτελέσματα εξόλκευσης ήλου - Δοκίμιο IV

α/α	Μέτρηση (kN)		Εκτιμώμενη αντοχή (MPa)	
	Υποστύλωμα C3	Δοκός B2	Υποστύλωμα C3	Δοκός B2
1	8.25	8.25	29.4	29.4
2	7.50	10.00	26.6	36.0
3	9.50	3.00	34.2	9.6
4	7.25	10.00	25.6	36.0
5	3.00	7.5	9.6	26.6
avg (MPa)			25.1	27.5
sd			9.3	10.9

Πίνακας 22: Αποτελέσματα εξόλκευσης ήλου - Δοκίμιο V

α/α	Μέτρηση (kN)		Εκτιμώμενη αντοχή (MPa)	
	Υποστύλωμα C4	Δοκός B4	Υποστύλωμα C4	Δοκός B4
1	6.00	7.25	20.9	25.6
2	8.50	7.50	30.4	26.6
3	-	7.00	-	24.7
4	5.50	-	19.0	-
avg (MPa)			23.4	25.6
sd			6.1	1.0

Πίνακας 23: Αποτελέσματα εξόλκευσης ήλου - Δοκίμιο VII

α/α	Μέτρηση (kN)		Εκτιμώμενη αντοχή (MPa)	
	Υποστύλωμα C1	Δοκός B3	Υποστύλωμα C1	Δοκός B3
1	10.25	8.50	37.0	30.4
2	9.25	10.00	33.2	36.0
3	10.50	8.00	37.9	28.5
4	10.25	10.25	37.0	37.0
5	10.75	9.50	38.9	34.2
avg (MPa)			36.8	33.2
sd			2.2	3.7

4.5.3 Συμβατική θλιπτική και εκτιμώμενη αντοχή σκυροδέματος

Στον Πίνακα 24 συνοψίζονται για κάθε δοκίμιο ο μέσος όρος θλιπτικής αντοχής των 6 συμβατικών δοκιμών σκυροδέματος και οι τιμές εκτιμώμενης αντοχής με μη καταστρεπτικές μεθόδους. Οι τιμές εκτιμώμενης αντοχής με κρουσιμέτρηση και εξόλκευση ήλου υπολογίζονται σαν μέσος όρος 2 τιμών των υπο εξέταση στοιχείων κάθε δοκιμίου.

Πίνακας 24: Συμβατική και εκτιμώμενη αντοχή σκυροδέματος των δοκιμών

Δοκίμιο	Συμβατική αντοχή (MPa)	Ηλικία (ημέρες)	Εκτιμώμενη αντοχή (MPa)	
			Κρουσιμέτρηση	Εξόλκευση ήλου
I	26.3*	52	28.0	-
II	32.2*	31	23.2	-
III	34.4*	28	21.4	28.3
IV	28.2** 33.1 ⁺	29	20.0	26.3
V	31.7*	28	17.7	24.5
VI	30.8**	-	-	-
VII	30.2* 35.9 ⁺	35	27.9	35.0

* κυβικά συμβατικά δοκίμια ακμής 15 cm

** κυλινδρικά συμβατικά δοκίμια διαμέτρου 15 cm και ύψους 30 cm

⁺ ισοδύναμη θλιπτική αντοχή κυβικών συμβατικών δοκιμών ακμής 15 cm [5]

Στον Πίνακα 24 παρατηρείται συστηματική μείωση της εκτιμώμενης αντοχής με κρουσιμέτρηση στα δοκίμια I, II, III, IV και V τα οποία διεγέρθηκαν σεισμικά σε 2, 4, 8, 12 και 24 h αντίστοιχα μετά τη σκυροδέτηση. Οι διαφορές μπορεί να μη θεωρηθούν στατιστικά σημαντικές λόγω της αβεβαιότητας με την οποία προσδιορίζεται η θλιπτική αντοχή με την κρουσιμέτρηση (διασπορά 6,5 MPa). Επειδή η κρουσιμέτρηση σχετίζεται μόνο με τις επιφανειακές μηχανικές ιδιότητες το σκυροδέματος αξίζει να διερευνηθεί το

ενδεχόμενο της δημιουργίας επιφανειακών ρηγματώσεων στα στοιχεία σκυροδέματος πρώιμης ηλικίας έπειτα από σεισμική διέγερση.

4.5.4 Εκτίμηση κατάστασης σκυροδέματος με μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων

Ο έλεγχος με τη μέθοδο των υπερήχων παρέχει μία εκτίμηση της κατάστασης του σκυροδέματος όσον αφορά την ομοιομορφία του σκυροδέματος της κατασκευής και την ύπαρξη ρωγμών, πόρων ή άλλων ανωμαλιών στο εσωτερικό της μάζας του. Από βιβλιογραφικά δεδομένα [6] συνάγεται ότι η ταχύτητα των υπερήχων για θλιπτική αντοχή 20 έως 30 MPa κυμαίνεται στο διάστημα 4000-4800 m/s. Συγκριτικά αναφέρεται ότι από την βάση δεδομένων του EKET το εύρος ταχύτητας διάδοσης υπερήχων σε σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25 σε κατασκευές βρίσκεται στην περιοχή 4100-4700 m/s (άμεση μέτρηση) όπως φαίνεται στον Πίνακα 25.

Πίνακας 25: Ταχύτητα διάδοσης υπερήχων σε σκυρόδεμα κατασκευών

Κατηγορία σκυροδέματος C20/25	Ηλικία 28-35 ημέρες
	Ταχύτητα διάδοσης υπερήχων 54 kHz σε m/s
Άμεση μέτρηση	4100 – 4700
Έμμεση μέτρηση (τριών σημείων)	3700 – 4300

Τιμές χαμηλότερες από αυτές παραπέμπουν σε ύπαρξη ρωγμών, διάκενων και πορώδους. Επίσης η μετρούμενη ταχύτητα των υπερήχων στις περιοχές των δομικών στοιχείων που περιέχουν ράβδους οπλισμού είναι συνήθως υψηλότερη σε σχέση με την ταχύτητα που μετράται σε περιοχές ελεύθερες από οπλισμό.

Η μέτρηση έγινε με το σύστημα TICO της εταιρίας *PROCEQ*, που είναι εφοδιασμένο με αισθητήρες 54 kHz και εφαρμόστηκαν δύο τρόποι:

- Ο πρώτος είναι τοποθετώντας τους δύο κρυστάλλους σε αντικρυστές πλευρές του προς εξέταση στοιχείου (άμεση διάδοση, direct transmission). Σε αυτές τις περιπτώσεις αναφέρεται μόνο μία τιμή χρόνου (t) και η τιμή b (απόσταση πομπού-δέκτη) είναι η διάσταση του στοιχείου.
- Ο δεύτερος είναι τοποθετώντας τους κρυστάλλους στην ίδια πλευρά του δομικού στοιχείου (έμμεση διάδοση, indirect of surface transmission), οπότε αναφέρονται δύο τιμές χρόνου. Σ' αυτές τις μετρήσεις η απόσταση b ελήφθη 20 cm. Σημειώνεται ότι κατά τον έμμεσο τρόπο η ταχύτητα διάδοσης είναι συστηματικά μικρότερη από αυτή που προσδιορίζεται με τον άμεσο τρόπο.

(α) Δοκίμιο I

Με τον άμεσο τρόπο ελέγχθηκαν 2 υποστυλώματα (C2 και C3) σε τρεις διαφορετικές θέσεις καθ' ύψος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 26, όπου σημειώνεται η διεύθυνση διάδοσης των υπερήχων και η απόσταση της θέσης μέτρησης από την βάση του υποστυλώματος.

Με τον έμμεσο τρόπο εξετάστηκαν 2 υποστύλωματα (C3 και C4) και μία δοκός (B3). Οι θέσεις μετρήσεων φαίνονται στο Σχήμα 2. Σε κάθε υποστύλωμα ελέγχθηκαν 2 κάθετες μεταξύ τους πλευρές και σε κάθε πλευρά λήφθηκαν 2 μετρήσεις. Για την πρώτη μέτρηση ο πομπός τοποθετήθηκε στο σημείο α και ο δέκτης διαδοχικά στα σημεία β και γ ενώ για την δεύτερη ο πομπός ήταν στη θέση β και ο δέκτης έλαβε τις θέσεις γ και δ (Σχήμα 2 (α) και (β)). Στη δοκό B3 έγιναν μετρήσεις σε δύο θέσεις που απέχουν μεταξύ τους 1m, στα σημεία που φαίνονται στο Σχήμα 2(γ). Στον Πίνακα 27 παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα, όπου σημειώνονται και οι πλευρές του κάθε στοιχείου στις οποίες έγινε μέτρηση.

Πίνακας 26: Άμεση μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων - Δοκίμιο I

Στοιχείο	Διεύθυνση	Απόσταση από έδραση (m)	Απόσταση b (cm)	Χρόνος t (μs)	Ταχύτητα υπερήχων (m/s)	Μέσος όρος (m/s)
Υποστύλωμα C2	Y	1.0	31.0	66.5	4660	4520
	Y	1.5	31.0	67.0	4630	
	Y	2.0	30.0	70.3	4270	
Υποστύλωμα C3	X	1.0	30.0	69.6	4310	4223
	X	1.5	30.0	71.7	4180	
	X	2.0	30.0	71.7	4180	

Πίνακας 27: Έμμεση μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων - Δοκίμιο I

Στοιχείο	Πλευρά Στοιχείου	Απόσταση b (cm)	Χρόνος $t_{\alpha\beta}$ (μs)	Χρόνος $t_{\alpha\gamma}$ (μs)	Χρόνος $t_{\beta\gamma}$ (μs)	Χρόνος $t_{\beta\delta}$ (μs)	Ταχύτητα υπερήχων (m/s)
Υποστύλωμα C3	Ανατολική	20.0	61.8	114.6			3790
		20.0			53.1	158.5	1898
	Νότια	20.0	52.6	103.4			3940
		20.0			48.5	147.6	2020
Υποστύλωμα C4	Νότια	20.0	51.4	105.5			3700
		20.0			52.6	125.4	2750
	Δυτική	20.0	50.2	107.6			3480
		20.0			49.5	165.5	1724
Δοκός B3	Βορινή	20.0	49.7	104.1			3680
		20.0	52.6	130.7			3910

Οι μετρήσεις ταχύτητας υπερήχων του Πίνακα 26 βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τις τιμές που αντιστοιχούν σε σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25. Στον Πίνακα 27 (έμμεση μέτρηση) εμφανίζονται τιμές ταχύτητας υπερήχων στην περιοχή 1700 – 2000 m/s που αντιστοιχούν σε ρηγματώσεις του σκυροδέματος.

(β) Δοκίμιο II

Με τον άμεσο τρόπο ελέγχθηκαν 2 υποστυλώματα (C1 και C3) σε τρεις διαφορετικές θέσεις καθ' ύψος και η δοκός B2 στα σημεία 2 και 3, όπως αυτά απεικονίζονται στο Σχήμα 3(α). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 28, όπου σημειώνεται η διεύθυνση διάδοσης των υπερήχων και η απόσταση της θέσης μέτρησης από την βάση ή την παρειά του υποστυλώματος.

Με τον έμμεσο τρόπο εξετάστηκαν οι δοκοί B2 και B4 σε τρία και δύο σημεία αντίστοιχα, της ίδιας πλευράς. Οι θέσεις μετρήσεων και τα σημεία τοποθέτησης του πομπού και του δέκτη φαίνονται στα Σχήματα 3(α) και (β). Στον Πίνακα 29 παρουσιάζονται όλα τα αποτελέσματα, όπου σημειώνονται οι πλευρές και οι θέσεις κάθε στοιχείου στις οποίες έγινε μέτρηση.

Επιπλέον, στον κόμβο των δοκών B1, B4 και του υποστυλώματος C2 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις του χρόνου που απαιτείται για τη διάδοση των υπερήχων μεταξύ δύο σημείων. Τα σημεία που επιλέγησαν φαίνονται στο Σχήμα 3(γ) και τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στον Πίνακα 30. Τα αποτελέσματα πρόκειται να συγκριθούν με αυτά αντίστοιχων μετρήσεων στα επόμενα δοκίμια.

Πίνακας 28: Άμεση μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων - Δοκίμιο II

Στοιχείο	Διεύθυνση	Απόσταση από έδραση/ παρειά (m)	Απόσταση b (cm)	Χρόνος t (μs)	Ταχύτητα υπερήχων (m/s)	Μέσος όρος (m/s)
Υποστύλωμα C1	X	0.60	30.0	61.7	4470	4503
	X	1.20	30.0	66.0	4510	
	X	1.70	30.0	66.2	4530	
Υποστύλωμα C3	Y	0.30	31.0	68.5	4530	4527
	Y	0.80	31.0	69.6	4450	
	Y	1.36	31.0	67.4	4600	
Δοκός B2	Y	0.73	30.0	74.2	4040	4090
	Y	1.46	30.0	72.4	4140	

Οι μετρήσεις ταχύτητας υπερήχων στους Πίνακες 28 και 29 βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τις τιμές που αντιστοιχούν σε σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25.

Πίνακας 29: Έμμεση μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων - Δοκίμιο II

Στοιχείο	Πλευρά Στοιχείου	Θέση	Απόσταση b (cm)	Χρόνος $t_{\alpha\beta}$ (μ s)	Χρόνος $t_{\alpha\gamma}$ (μ s)	Ταχύτητα υπερήχων (m/s)	Μέσος όρος (m/s)
Δοκός B2	Δυτική	1	20.0	50.0	96.6	4290	4107
		2	20.0	46.5	97.2	3940	
		3	20.0	47.7	96.6	4090	
Δοκός B4	Νότια	1	20.0	51.6	104.6	3770	3660
		2	20.0	47.2	103.5	3550	

Πίνακας 30: Μετρήσεις χρόνου διάδοσης υπερήχων στον κόμβο (B1-C2-B4) - Δοκίμιο II

Θέση πομπού	Θέση δέκτη	Χρόνος t (μ s)	Θέση πομπού	Θέση δέκτη	Χρόνος t (μ s)
α	β	49.2	ϵ	ζ	45.1
α	γ	189.8	ϵ	η	229.0-284.0
α	δ	282.0	ϵ	θ	256.0
β	γ	119.5	ζ	η	134.2
β	δ	212.0	ζ	θ	175.7
γ	δ	49.7	η	θ	46.6

(γ) Δοκίμιο III

Με τον άμεσο τρόπο ελέγχθηκαν 2 υποστυλώματα (C2 και C3) σε τρεις διαφορετικές θέσεις καθ' ύψος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 31, όπου σημειώνεται η διεύθυνση διάδοσης των υπερήχων και η απόσταση της θέσης μέτρησης από την βάση του υποστυλώματος. Τα ίδια υποστυλώματα εξετάστηκαν και με τον έμμεσο τρόπο σε δύο διαφορετικές καθ' ύψος θέσεις, της ίδιας πλευράς. Οι θέσεις μετρήσεων και τα σημεία τοποθέτησης του πομπού και του δέκτη φαίνονται στα Σχήματα 4(α) και (β) και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 31.

Στη δοκό B2 πραγματοποιήθηκαν από 2 μετρήσεις με τον άμεσο και τον έμμεσο τρόπο, Σχήμα 4(γ). Στον Πίνακα 32 δίνονται όλα τα αποτελέσματα, όπου σημειώνονται η διεύθυνση ή η πλευρά ελέγχου και οι θέσεις στις οποίες έγινε μέτρηση.

Επιπλέον, στον κόμβο των δοκών B2, B3 και του υποστυλώματος C3 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις του χρόνου που απαιτείται για τη διάδοση των υπερήχων μεταξύ δύο σημείων. Τα σημεία που επιλέγησαν φαίνονται στο Σχήμα 4(δ) και τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στον Πίνακα 33.

Τέλος, διενεργήθηκε έλεγχος βάθους ρωγμών σε δύο πλευρές του υποστυλώματος C3. Ο έλεγχος έγινε με την μέθοδο εκτίμησης του βάθους ρωγμής, όπως περιγράφεται στο πρότυπο BS1881:Part 203:1986, παράγραφος 9.3, και διενεργήθηκε με το σύστημα TICO της εταιρείας *PROCEQ*. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων το βάθος ρωγμής στα σημεία ελέγχου εκτιμάται 109 mm στη νότια και 46 mm στην ανατολική πλευρά αντιστοίχως.

Πίνακας 31: Άμεση και έμμεση μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων σε υποστυλώματα - Δοκίμιο III

Στοιχείο	Διεύθυνση/ Πλευρά Στοιχείου	Απόσταση από έδραση (m)	Απόσταση b (cm)	Χρόνος $t_{αβ}$ (μs)	Χρόνος $t_{αγ}$ (μs)	Ταχύτητα υπερήχων (m/s)	Μέσος όρος (m/s)
Υποστύλωμα C2	Y	0.60	30.1	65.2	-	4600	4590
	Y	1.20	30.1	65.4	-	4590	
	Y	2.00	30.1	65.5	-	4580	
	Ανατολική	1.20	20.0	45.5	95.2	4020	4035
	Ανατολική	2.00	20.0	44.7	94.1	4050	
Υποστύλωμα C3	Y	0.60	30.0	66.1	-	4540	4523
	Y	1.20	30.0	65.9	-	4550	
	Y	1.70	30.0	67.0	-	4480	
	Ανατολική	1.20	20.0	43.6	92.6	4080	4155
	Ανατολική	2.00	20.0	45.2	92.5	4230	

Πίνακας 32: Άμεση και έμμεση μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων σε δοκό - Δοκίμιο III

Στοιχείο	Διεύθυνση/ Πλευρά Στοιχείου	Θέση	Απόσταση b (cm)	Χρόνος $t_{αβ}$ (μs)	Χρόνος $t_{αγ}$ (μs)	Ταχύτητα υπερήχων (m/s)	Μέσος όρος (m/s)
Δοκός B2	Y	2	31.0	67.5	-	4590	4625
	Y	4	31.0	66.6	-	4660	
	Ανατολική	1	20.0	44.1	91.4	4230	4310
	Ανατολική	3	20.0	42.6	88.2	4390	

Πίνακας 33: Μετρήσεις χρόνου διάδοσης υπερήχων στον κόμβο (B2-C3-B3)- Δοκίμιο III

Θέση πομπού	Θέση δέκτη	Χρόνος t (μs)	Θέση πομπού	Θέση δέκτη	Χρόνος t (μs)
α	β	46.6	ε	ζ	40.5
α	γ	224.0	ε	η	130.1-131.8
α	δ	251.0	ε	θ	228.0
β	γ	135.0	ζ	η	87.4
β	δ	221.0	ζ	θ	132.6
γ	δ	45.1	η	θ	42.6

(δ) Δοκίμιο IV

Ελέγχθηκε το υποστύλωμα C3 με τον άμεσο (διεύθυνση Υ) και τον έμμεσο τρόπο (ανατολική πλευρά) σε δύο θέσεις καθ' ύψος για κάθε δοκιμή και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 34. Στο μέσο της δοκού B2 πραγματοποιήθηκε μέτρηση με τον άμεσο (διεύθυνση Υ) και τον έμμεσο τρόπο (ανατολική πλευρά), Πίνακας 35. Τα σημεία τοποθέτησης του πομπού και του δέκτη για τις έμμεσες μετρήσεις είναι παρόμοια εκείνων που χρησιμοποιήθηκαν στον έλεγχο προηγούμενων δοκιμών.

Οι μετρήσεις του χρόνου που απαιτείται για την διάδοση των υπερήχων μεταξύ δύο σημείων του κόμβου B2-C3-B3 δίνονται στον Πίνακα 36. Τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι ίδια με εκείνα του Δοκιμίου III (Σχήμα 4(δ)).

Πίνακας 34: Άμεση και έμμεση μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων σε υποστύλωμα - Δοκίμιο IV

Στοιχείο	Διεύθυνση/ Πλευρά Στοιχείου	Απόσταση από έδραση (m)	Απόσταση b (cm)	Χρόνος t _{αβ} (μs)	Χρόνος t _{αγ} (μs)	Ταχύτητα υπερήχων (m/s)	Μέσος όρος (m/s)
Υποστύλωμα C3	Υ	1.20	30.0	66.1	-	4540	4525
	Υ	1.70	30.0	66.6	-	4510	
	Ανατολική	1.20	20.0	48.2	94.6	4310	4065
	Ανατολική	1.70	20.0	46.4	98.7	3820	

Πίνακας 35: Άμεση και έμμεση μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων σε δοκό - Δοκίμιο IV

Στοιχείο	Διεύθυνση/ Πλευρά Στοιχείου	Θέση	Απόσταση b (cm)	Χρόνος t _{αβ} (μs)	Χρόνος t _{αγ} (μs)	Ταχύτητα υπερήχων (m/s)
Δοκός B2	Υ	μέσον	30.0	69.0	-	4350
	Ανατολική	μέσον	20.0	45.3	92.2	4260

Πίνακας 36: Μετρήσεις χρόνου διάδοσης υπερήχων στον κόμβο (B2-C3-B3)- Δοκίμιο IV

Θέση πομπού	Θέση δέκτη	Χρόνος t (μs)	Θέση πομπού	Θέση δέκτη	Χρόνος t (μs)
α	β	47.6	ϵ	ζ	49.6
α	γ	221.0	ϵ	η	156.0
α	δ	342.0	ϵ	θ	245.0
β	γ	143.6	ζ	η	107.0
β	δ	224.0	ζ	θ	193.3
γ	δ	49.4	η	θ	63.5

(ε) Δοκίμιο V

Ελέγχθηκε το υποστύλωμα C4 με τον άμεσο (διεύθυνση Y) και τον έμμεσο τρόπο (ανατολική πλευρά) σε τρεις και δύο θέσεις καθ' ύψος αντίστοιχα και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 37. Στο μέσο της δοκού B4 πραγματοποιήθηκε μέτρηση με τον άμεσο (διεύθυνση X) και τον έμμεσο τρόπο (βορινή πλευρά), Πίνακας 38.

Οι μετρήσεις του χρόνου που απαιτείται για την διάδοση των υπερήχων μεταξύ δύο σημείων του κόμβου B1-C2-B4 δίνονται στον Πίνακα 39. Τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι ίδια με εκείνα του Δοκιμίου III (Σχήμα 4(δ)).

Πίνακας 37: Άμεση και έμμεση μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων σε υποστύλωμα - Δοκίμιο V

Στοιχείο	Διεύθυνση/ Πλευρά Στοιχείου	Απόσταση από έδραση (m)	Απόσταση b (cm)	Χρόνος $t_{\alpha\beta}$ (μs)	Χρόνος $t_{\alpha\gamma}$ (μs)	Ταχύτητα υπερήχων (m/s)	Μέσος όρος (m/s)
Υποστύλωμα C4	Y	0.60	30.0	70.1	-	4280	4277
	Y	1.20	30.0	70.1	-	4280	
	Y	1.70	30.0	70.2	-	4270	
	Ανατολική	0.60	20.0	43.1	95.2	3840	3720
	Ανατολική	1.70	20.0	44.6	100.1	3600	

Πίνακας 38: Άμεση και έμμεση μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων σε δοκό - Δοκίμιο V

Στοιχείο	Διεύθυνση/ Πλευρά Στοιχείου	Θέση	Απόσταση b (cm)	Χρόνος $t_{\alpha\beta}$ (μs)	Χρόνος $t_{\alpha\gamma}$ (μs)	Ταχύτητα υπερήχων (m/s)
Δοκός B4	X	μέσον	30.0	71.1	-	4220
	Βορινή	μέσον	20.0	41.2	95.1	3710

Πίνακας 39: Μετρήσεις χρόνου διάδοσης υπερήχων στον κόμβο (B1-C2-B4)- Δοκίμιο V

Θέση πομπού	Θέση δέκτη	Χρόνος t (μs)	Θέση πομπού	Θέση δέκτη	Χρόνος t (μs)
α	β	44.6	ε	ζ	42.2
α	γ	157.4	ε	η	192.3
α	δ	203.0	ε	θ	99.3
β	γ	69.7	ζ	η	291.0
β	δ	157.2	ζ	θ	180.9
γ	δ	45.6	η	θ	53.4

(στ) Δοκίμιο VII

Με βάση τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στα δοκίμια που προηγήθηκαν, ελέγχθηκαν το υποστύλωμα C3, η δοκός B1 και ο κόμβος B1-C2-B4 και τα αποτελέσματα δίνονται στους Πίνακες 40 έως 42.

Πίνακας 40: Άμεση και έμμεση μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων σε υποστύλωμα - Δοκίμιο VII

Στοιχείο	Διεύθυνση/ Πλευρά Στοιχείου	Απόσταση από έδραση (m)	Απόσταση b (cm)	Χρόνος t _{αβ} (μs)	Χρόνος t _{αγ} (μs)	Ταχύτητα υπερήχων (m/s)	Μέσος όρος (m/s)
Υποστύλωμα C3	Υ	0.60	30.0	66.5	-	4510	4553
	Υ	1.20	30.0	65.5	-	4580	
	Υ	1.70	30.0	65.6	-	4570	
	Ανατολική	1.10	20.0	44.2	90.2	4350	4380
	Ανατολική	1.50	20.0	48.1	93.5	4410	

Πίνακας 41: Άμεση και έμμεση μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων σε δοκό - Δοκίμιο VII

Στοιχείο	Διεύθυνση/ Πλευρά Στοιχείου	Θέση	Απόσταση b (cm)	Χρόνος t _{αβ} (μs)	Χρόνος t _{αγ} (μs)	Ταχύτητα υπερήχων (m/s)	Μέσος όρος (m/s)
Δοκός B1	Υ	1	30.0	66.3	-	4530	4570
	Υ	2	30.0	65.1	-	4610	
	Δυτική	3	20.0	48.5	93.5	4440	4085
	Δυτική	4	20.0	46.1	99.7	3730	

Πίνακας 42: Μετρήσεις χρόνου διάδοσης υπερήχων στον κόμβο (B1-C2-B4) - Δοκίμιο VII

Θέση πομπού	Θέση δέκτη	Χρόνος t (μs)	Θέση πομπού	Θέση δέκτη	Χρόνος t (μs)
α	β	51.5	ε	ζ	60.6
α	γ	328.0	ε	η	342.0
α	δ	415.0	ε	θ	375.0
β	γ	232.0	ζ	η	259.0
β	δ	421.0	ζ	θ	323.0
γ	δ	52.1	η	θ	50.6

Στον Πίνακα 43 συγκρίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων χρόνων διάδοσης υπερήχων στους κόμβους των δοκιμίων II, III, IV, V και VII. Παρατηρείται ότι μεταξύ αντιστοιχών θέσεων πομπού και δέκτη που βρίσκονται σε διαφορετική δοκό ή υποστήλωμα (α-γ, α-δ, β-γ, β-δ, ε-η, ε-θ, ζ-η, ζ-θ) οι μετρούμενοι χρόνοι για τα δοκίμια II, III, IV, V είναι μικρότεροι από τους αντίστοιχους του δοκιμίου VII. Το αποτέλεσμα είναι αντίθετο από το αναμενόμενο επειδή το δοκίμιο VII έχει δεχθεί μικρότερη σεισμική διέγερση από το αντίστοιχο δοκίμιο IV, με αποτέλεσμα λιγότερες βλάβες και ρηγματώσεις στον κόμβο.

Πίνακας 43. Σύγκριση χρόνων διάδοσης υπερήχων στους κόμβους των δοκιμίων II, III, IV, V και VII.

Θέση πομπού	Θέση δέκτη	Δοκίμιο II	Δοκίμιο III	Δοκίμιο IV	Δοκίμιο V	Δοκίμιο VII
		Χρόνος t (μs)	Χρόνος t (μs)	Χρόνος t (μs)	Χρόνος t (μs)	Χρόνος t (μs)
α	β	49.2	46.6	47.6	44.6	51.5
α	γ	189.8	224.0	221.0	157.4	328.0
α	δ	282.0	251.0	342.0	203.0	415.0
β	γ	119.5	135.0	143.6	69.7	232.0
β	δ	212.0	221.0	224.0	157.2	421.0
γ	δ	49.7	45.1	49.4	45.6	52.1
ε	ζ	45.1	40.5	49.6	42.2	60.6
ε	η	229.0- 284.0	130.1- 131.8	156.0	192.3	342.0
ε	θ	256.0	228.0	245.0	99.3	375.0
ζ	η	134.2	87.4	107.0	291.0	259.0
ζ	θ	175.7	132.6	193.3	180.9	323.0
η	θ	46.6	42.6	63.5	53.4	50.6

4.6 ΕΛΕΓΧΟΙ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕΤΑ ΤΗ ΦΑΣΗ II

Με σκοπό τη διερεύνηση της παρατήρησης σχετικά με τη συστηματική μείωση της εκτιμώμενης αντοχής με κρουσιμέτρηση στα δοκίμια I, II, III, IV και V (παράγραφος 4.5.3 και Πίνακας 24) πραγματοποιήθηκαν έλεγχοι εκτίμησης της θλιπτικής αντοχής στο σκληρυμένο σκυρόδεμα των μεγάλων δοκιμίων μετά την Φάση II, 13 – 24 μήνες μετά την κατασκευή τους. Οι έλεγχοι πραγματοποιήθηκαν στο μέσον των υποστυλωμάτων και δοκών, δηλαδή σε σημεία που διαταράχθηκαν κατά το δυνατόν λιγότερο από τη σεισμική διέγερση της Φάσης II.

Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν ήταν:

- Κρουσιμέτρηση σε τρία υποστυλώματα και μία δοκό σε κάθε δοκίμιο.
- Εξόλκευση ήλου σε ένα έως δύο υποστηλώματα σε κάθε δοκίμιο.
- Αποκοπή τριών πυρήνων σκυροδέματος διαμέτρου 10 cm από διαφορετικό υποστύλωμα κάθε δοκιμίου και προσδιορισμός θλιπτικής αντοχής.

Στους Πίνακες 44 – 50 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ελέγχων για κάθε δοκίμιο. Οι αντοχές που εκτιμώνται από την εξόλκευση ήλου εμφανίζονται συστηματικά μεγαλύτερες από αυτές που εκτιμώνται με τις άλλες δύο τεχνικές.

Πίνακας 44. Δοκίμιο I. Αποτελέσματα ελέγχων σκυροδέματος μετά τη 22,3 μήνες μετά τη Φάση II

	ΚΡΟΥΣΙΜΕΤΡΗΣΕΙΣ				ΕΞΟΛΚ. ΗΛΟΥ		ΠΥΡΗΝΕΣ
	C	C	C	B	C	C	C
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
	46,0	35,3	33,6	38,8	59,4		32,0
	46,0	37,1	35,3	38,8	56,6		35,3
	46,0	37,1	35,3	40,6	49,3		29,9
	47,9	38,8	35,3	40,6	59,4		
	49,7	38,8	35,3	42,4	45,7		
	51,6	38,8	35,3	42,4			
mean	47,9	37,6	35,0	40,6	54,1		32,4
std	2,4	1,4	0,7	1,6	6,3		2,7

Πίνακας 45. Δοκίμιο II. Αποτελέσματα ελέγχων σκυροδέματος μετά τη 18,4 μήνες μετά τη Φάση II

	ΚΡΟΥΣΙΜΕΤΡΗΣΕΙΣ				ΕΞΟΛΚ. ΗΛΟΥ		ΠΥΡΗΝΕΣ
	C	C	C	B	C	C	C
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
	37,1	40,6	46,0	38,8	49,3		40,2
	38,8	42,4	47,9	42,4	49,3		41,9
	40,6	42,4	49,7	44,2	52,1		
	40,6	46,0	49,7	46,0	52,1		
	44,2	46,0	51,6	46,0	44,8		
	46,0	46,0	51,6	46,0			
mean	41,2	43,9	49,4	43,9	49,5		41,1
std	3,3	2,4	2,2	2,9	3,0		1,2

Πίνακας 46. Δοκίμιο III. Αποτελέσματα ελέγχων σκυροδέματος μετά τη 14,7 μήνες μετά τη Φάση II

	ΚΡΟΥΣΙΜΕΤΡΗΣΕΙΣ				ΕΞΟΛΚ. ΗΛΟΥ		ΠΥΡΗΝΕΣ
	C	C	C	B	C	C	C
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
	37,1	42,4	40,6	38,8	53,0	59,4	41,1
	37,1	44,2	42,4	38,8	57,6	57,6	40,1
	42,4	46,0	44,2	38,8	53,0	59,4	42,6
	42,4	46,0	44,2	38,8	47,5	55,7	
	46,0	46,0	46,0	40,6		57,6	
	47,9	46,0	46,0	42,4			
mean	42,1	45,1	43,9	39,7	52,8	57,9	41,3
std	4,5	1,5	2,1	1,5	4,1	1,5	1,3

Πίνακας 47. Δοκίμιο IV. Αποτελέσματα ελέγχων σκυροδέματος μετά τη 14,3 μήνες μετά τη Φάση II

	ΚΡΟΥΣΙΜΕΤΡΗΣΕΙΣ				ΕΞΟΛΚ. ΗΛΟΥ		ΠΥΡΗΝΕΣ
	C	C	C	B	C	C	C
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
	33,6	37,1	35,3	37,1	47,5		41,0
	33,6	38,8	35,3	37,1	55,7		38,9
	35,3	38,8	35,3	37,1	44,8		42,6
	35,3	38,8	37,1	37,1	46,6		
	37,1	38,8	37,1	37,1	57,6		
	37,1	40,6	37,1	38,8			
mean	35,3	38,8	36,2	37,3	50,4		40,8
std	1,5	1,1	0,9	0,7	5,8		1,9

Πίνακας 48. Δοκίμιο V. Αποτελέσματα ελέγχων σκυροδέματος μετά τη 14,1 μήνες μετά τη Φάση II

	ΚΡΟΥΣΙΜΕΤΡΗΣΕΙΣ				ΕΞΟΛΚ. ΗΛΟΥ		ΠΥΡΗΝΕΣ
	C	C	C	B	C	C	C
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
	35,3	31,9	35,3	38,8	53,0	53,9	35,0
	35,3	33,6	38,8	38,8	51,2	41,1	33,9
	37,1	33,6	38,8	38,8	56,6	40,2	33,5
	38,8	33,6	40,6	40,6	47,5	36,5	
	38,8	33,6	42,4	40,6	49,3	47,5	
	38,8	35,3	42,4	40,6			
mean	37,4	33,6	39,7	39,7	51,5	43,8	34,1
std	1,7	1,1	2,7	1,0	3,5	6,9	0,8

Πίνακας 49. Δοκίμιο VI. Αποτελέσματα ελέγχων σκυροδέματος μετά τη 13,6 μήνες μετά τη Φάση II

	ΚΡΟΥΣΙΜΕΤΡΗΣΕΙΣ				ΕΞΟΛΚ. ΗΛΟΥ		ΠΥΡΗΝΕΣ
	C	C	C	B	C	C	C
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
	38,8	35,3	35,3	40,6	42,9		31,5
	38,8	35,3	35,3	40,6	42,0		42,3
	38,8	35,3	37,1	42,4	41,1		43,1
	38,8	35,3	37,1	42,4	44,8		
	42,4	37,1	37,1	44,2	42,0		
	44,2	37,1	38,8	44,2			
mean	40,3	35,9	36,8	42,4	42,6		39,0
std	2,4	0,9	1,3	1,6	1,4		6,5

Πίνακας 50. Δοκίμιο VII. Αποτελέσματα ελέγχων σκυροδέματος μετά τη 11,9 μήνες μετά τη Φάση II

	ΚΡΟΥΣΙΜΕΤΡΗΣΕΙΣ				ΕΞΟΛΚ. ΗΛΟΥ		ΠΥΡΗΝΕΣ
	C	C	C	B	C	C	C
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
	38,8	38,8	37,1	37,1	49,3		38,2
	38,8	42,4	38,8	38,8	43,8		41,2
	38,8	44,2	38,8	38,8	35,6		41,2
	44,2	44,2	38,8	42,4	50,2		
	44,2	46,0	40,6	42,4	51,2		
	46,0	46,0	42,4	42,4			
mean	41,8	43,6	39,4	40,3	46,0		40,2
std	3,3	2,7	1,8	2,4	6,5		1,7

Στον Πίνακα 51 συγκρίνονται οι μέσες τιμές των αποτελεσμάτων των Πινάκων 44 – 50 (μετρήσεις μετά τη Φάση II) με τα αποτελέσματα των κρουσιμετρήσεων του Πίνακα 24 (μετρήσεις πριν τη Φάση II). Οι μετρήσεις μετά τη Φάση II δεν δείχνουν να συσχετίζονται με τις φθίνουσες μετρήσεις πριν τη Φάση II στα δοκίμια I, II, III, IV και V.

Πίνακας 51. Εκτιμώμενη θλιπτική αντοχή σκυροδέματος μεγάλων δοκιμίων πριν και μετά τη Φάση II.

	ΠΡΙΝ ΤΗ ΦΑΣΗ II	ΜΕΤΑ ΤΗ ΦΑΣΗ II		
	ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΗ ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ			
ΔΟΚΙΜΙΟ	ΚΡΟΥΣΙΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	ΚΡΟΥΣΙΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	ΕΞΟΛΚ. ΗΛΟΥ	ΠΥΡΗΝΕΣ
	MPa	MPa	MPa	MPa
I	28,0	40,3	54,1	32,4
II	23,2	44,6	49,5	41,1
III	21,4	42,7	55,3	41,3
IV	19,9	36,9	50,4	40,8
V	17,7	37,6	47,7	34,1
VI		38,8	42,6	39,0
VII	27,8	41,3	46,0	40,2

4.7 ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΞΟΛΚΕΥΣΗΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΕ ΜΙΚΡΑ ΔΟΚΙΜΙΑ

Με σκοπό τη διερεύνηση του φαινομένου της απώλειας συνάφειας μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος λόγω δόνησης του οπλισμού κατά τις σεισμικές διεγέρσεις σε σκυρόδεμα μικρής ηλικίας, πραγματοποιήθηκε σειρά πειραμάτων εξόλκευσης οπλισμού σε μικρά δοκίμια τροποποιώντας τις συνθήκες παρομοίων πειραμάτων που αναφέρονται στη βιβλιογραφία [7].

Σε ξύλινες μήτρες χυτεύθηκαν παραλληλεπίπεδα δοκίμια σκυροδέματος διαστάσεων 25x20x25^h cmxcmxcm, με ράβδο νευροχάλυβα Φ14 τοποθετημένη κατά τον άξονα του δοκιμίου και κάθετα στην έδρα των 25x25 cmxcm (δηλ. το μήκος οπλισμού που ήταν σε επαφή με το σκυρόδεμα ήταν ίσο με 20 cm) όπως φαίνεται στο Σχήμα 5. Η ράβδος οπλισμού μήκους 1,7 m διαπερνούσε την μήτρα μέσω δύο οπών διαμέτρου 20 mm για να έχει δυνατότητα εγκάρσιας κίνησης χωρίς να έρχεται σε επαφή με τη μήτρα. Η σύνθεση του σκυροδέματος ήταν η εργοστασιακή σύνθεση 1 του Πίνακα 1 (που αντιστοιχεί στην εργαστηριακή σύνθεση 1216 του Πίνακα 2). Σε χρόνους 2, 4, 8, 12 και 24 h μετά τη χύτευση του σκυροδέματος η μήτρα πακτωνόταν και εφαρμόζονταν εγκάρσιες ταλαντώσεις με τη χρήση δονητικής τράπεζας σε ένα μόνο σημείο του οπλισμού όπως φαίνεται στο Σχήμα 6. Η απόσταση του σημείου ταλάντωσης από τη μήτρα ήταν 20 cm. Το πλάτος ταλάντωσης στο σημείο σύνδεσης του οπλισμού με τη δονητική τράπεζα ήταν 3 mm, η συχνότητα ταλάντωσης 50 Hz και ο συνολικός χρόνος ταλαντώσεων 20 s. Στον Πίνακα 52 φαίνονται οι κωδικοί των δοκιμίων και οι αντίστοιχοι χρόνοι μετά τη σκυροδέτηση κατά τους κατά τους οποίους δονήθηκε ο οπλισμός.

Πίνακας 52. Ηλικία σκυροδέματος κατά την εγκάρσια δόνηση του οπλισμού σε μικρά δοκίμια σκυροδέματος.

Κωδ. δοκιμίου	Ηλικία σκυροδέματος κατά τη δόνηση του οπλισμού
11, 12, 19	2 h
6, 10, 14	4 h
1, 2, 13	8 h
4, 8, 17	12 h
9, 16, 18	18h
3, 5, 7	24 h
15, 20	Δοκίμια αναφοράς χωρίς δόνηση οπλισμού

Μετά την παρέλευση 32 h από τη σκυροδέτηση αφαιρέθηκαν οι ξύλινες μήτρες και στην ηλικία των 15 ημερών τα δοκίμια μεταφέρθηκαν στο Εργ. Αντισεισμικής Τεχνολογίας ΕΜΠ για μετρήσεις εξόλκευσης οπλισμού. Οι εξολκεύσεις πραγματοποιήθηκαν στην ηλικία των 3 μηνών από τη σκυροδέτηση. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της δύναμης συνάφειας φαίνεται στο Σχήμα 7. Η επιβολή της δύναμης έγινε μέσω ενός εμβόλου ENERPAC ικανότητας 300 kN. Η δύναμη καταγραφόταν μέσω κυψέλης φορτίου τύπου DBBSE-10T της εταιρίας Applied Measurements/UK. Ταυτόχρονα κατά τη διάρκεια του πειράματος καταγραφόταν οι μετακινήσεις του οπλισμού μέσω τριών βελομέτρων της εταιρίας CELESCO.

Στον Πίνακα 53 παρουσιάζεται η μέγιστη δύναμη συνάφειας οπλισμού -σκυροδέματος που αναπτύχθηκε για κάθε δοκίμιο.

Πίνακας 53. Αποτελέσματα εξόλκευσης οπλισμού σε μικρά δοκίμια

Κωδ. Δοκιμίου	Ηλικία σκυροδέματος	Δύναμη εξόλκευσης			Μέση τιμή	Τυπική απόκλ.	Τάση εξολκ.
		kN	kN	kN	kN	kN	MPa
11, 12, 19	2 h	111,17	112,45	107,79	110,5	2,4	12,6
6, 10, 14	4 h	114,66	101,95	112,36	109,7	6,8	12,5
1, 2, 13	8 h	72,91	52,08	51,53	58,8	12,2	6,7
4, 8, 17	12 h	96,03	99,8	-	97,9	2,7	11,1
9, 16, 18	18h	93,63	95,1	99	95,9	2,8	10,9
3, 5, 7	24 h	97,12	96,65	98,36	97,4	0,9	11,1
15, 20	Δοκίμια αναφοράς	87,52	94,43		91,0	4,9	10,3

Η τάση εξόλκευσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sigma_{εξ} = F_{εξ}/(\pi DL)$$

όπου:

$\sigma_{εξ}$: τάση εξόλκευσης

$F_{εξ}$: δύναμη εξόλκευσης

D : 0,014 m διάμετρος ράβδου οπλισμού

L : 0, 20 m μήκος οπλισμού μέσα στο δοκίμιο

Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται η μορφή αστοχίας που παρατηρήθηκε κατά τις δοκιμές. Στα Σχήματα 9-27 παρουσιάζονται οι πειραματικές καμπύλες δύναμης – μετακίνησης (μέσος όρος των καταγραφών των τριών βελομέτρων) της ράβδου οπλισμού.

Από τις μετρήσεις προκύπτει ότι η δύναμη συνάφειας οπλισμού – σκυροδέματος ήταν μειωμένη στα δοκίμια τα οποία είχαν υποστεί εγκάρσια δόνηση 8 ώρες μετά τη σκυροδέτησή τους.

4.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Οι συμβατικοί χρόνοι αρχής και τέλους πήξης για την ίδια κατηγορία αντοχής σκυροδέματος παρουσιάζουν σημαντικό εύρος τιμών που εξαρτώνται από τον τύπο του τσιμέντου και από την περιεκτικότητα σε επιβραδυντικό πρόσθετο του σκυροδέματος. Για τις συνθέσεις σκυροδέματος κατηγορίας C20/25 που χρησιμοποιήθηκαν στο παρόν έργο οι χρόνοι αρχής πήξης διέφεραν έως και 2,5 h και οι χρόνοι τέλους πήξης έως 3,6 h.
- Οι έλεγχοι (κρουσιμέτρηση, εξόλκευση ήλου, ταχύτητα υπερήχων, πυρηνοληψία) σε σκληρυμένο σκυρόδεμα που έχει υποστεί σεισμική διέγερση σε νεαρή ηλικία δεν παρέχουν συστηματικές ενδείξεις για τις τυχόν βλάβες που έχουν δημιουργηθεί (απώλεια συνάφειας οπλισμού σκυροδέματος, μικρορηγματώσεις).

4.9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] A.M. Neville and J.J. Brooks, Concrete Technology, Longman, USA, 1999, pp. 207
- [2] M.N. Al Khalaf and C.L. Page, Steel/mortar interfaces: Microstructural features and mode of failure, Cement and Concrete Research, Vol. 9, pp. 197-208, 1979.
- [3] N. Petersons, "Recommendations for estimation of quality of concrete in finished structures", Mater. Constr., vol 4, No 24, p.379, 1971.
- [4] T.P. Tassios, "Uncertainties of instructure assessment of concrete strength", ACI Symposium, 4-9/3/84, p.22, 1984.
- [5] Υ.Π.Ε.ΧΩ.ΔΕ ΕΓΚΥΚΛΙΟΣ Ε7 Δ14/19066 28.03.1997 Πίνακας 3.
- [6] A.M. Neville, "Properties of Concrete", Longman, Essex, 1995, pp. 632.
- [7] Κ.Γ. Τρέζος και Χ. Γεωργίου, «Σεισμική καταπόνηση νωπού σκυροδέματος: Επιπτώσεις στη συνάφεια», 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας, Θεσσαλονίκη, 28-30 Νοεμβρίου 2001, Πρακτικά Συνεδρίου

4.10 ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 4

5 ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΟΔΟΥ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΣΕ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ XRD και TGA

5.1 ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ – ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ

Σκοπός του παρόντος τμήματος έργου ήταν η μελέτη της ενυδάτωσης του τσιμέντου σε συνθήκες όμοιες με αυτές που επικρατούν στο σκυρόδεμα. Επειδή τα δείγματα που απαιτούνται για τις φυσικές μεθόδους ανάλυσης XRD και TGA είναι μικρά (0,5 – 2 g) και πρέπει να είναι ομογενή παρασκευάστηκαν αντίστοιχα κονιάματα που είχαν τον ίδιο λόγο w/c με αυτά της εργαστηριακής σύνθεσης σκυροδέματος 1216 (βλ. παρ. 4.3), όπου τα χονδρόκοκκα αδρανή (χαλίκι και γαρμπίλι) αντικαταστάθηκαν με άμμο ίσης επιφάνειας. Με την τεχνική αυτή το ποσοστό του κατανεμημένου νερού στην επιφάνεια των αδρανών είναι το ίδιο τόσο στο σκυρόδεμα όσο και στο ισοδύναμο κονίαμα. Η σύνθεση του κονιάματος έγινε στο EKET με χρήση κατάλληλου λογισμικού σύμφωνα με την τεχνική που έχει αναπτυχθεί στον Ομίλο LAFARGE (εργαστηριακές δοκιμές microconcrete). Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται η αντιστοιχία της σύνθεσης σκυροδέματος 1216 και του ισοδύναμου κονιάματος MC 1216.

Πίνακας 1 Σύνθεση σκυροδέματος 1216 και ισοδύναμου κονιάματος με ίση επιφάνεια αδρανών

Κωδικός σύνθεσης EKET	1216	MC 1216
Κατηγορία Σκυροδέματος	C 20/25	-
Άμμος (kg/m ³)	956	1555.7
Γαρμπίλι (kg/m ³)	306	0,0
Χαλίκι (kg/m ³)	625	0.0
Τσιμέντο CEM II 42.5 (kg/m ³)	185	277.9
Τσιμέντο CEM IV 32.5 (kg/m ³)	115	172.7
Νερό (kg/m ³)	190	279.1
Λόγος Νερό/Τσιμέντο (w/w)	0.63	0.62
Πρόσθετο (kg/m ³)	0.90 (CHEM I)	1.35
Λόγος Πρόσθετο/Τσιμέντο (w/w)	0.0030	0.0030

Στα ξηρά κονιάματα προστέθηκαν νερό και ρευστοποιητής. Μετά από καλή ανάμειξη, τα κονιάματα διατηρήθηκαν σε χώρο υγρασίας επί 2 ώρες και στη συνέχεια μεταφέρθηκαν σε νερό. Μετά από 2, 4, 8, 12 και 24 ώρες καθώς και μετά από 28 ημέρες, έγινε διακοπή ενυδάτωσης η οποία περιελάμβανε λειοτρίβηση, έκπλυση με ακετόνη και διαιθυλαιθέρα, ξήρανση σε κενό επί 24 ώρες και αεροστεγή διατήρηση των δειγμάτων.

Τα δείγματα που προέκυψαν εξετάστηκαν με Περιθλασιμετρία Ακτίνων Χ (Powder X-Ray Diffraction) και θερμοβαρυτομετρία (Thermogravimetry). Στα δείγματα που εξετάστηκαν με XRD, πριν τη λειοτρίβηση, έγινε ήπια θράυση και απομάκρυνση του χονδρόκοκκου υλικού. Αυτό αποσκοπούσε στη μερική απομάκρυνση της άμμου και τον εμπλουτισμό του δείγματος σε ενυδατωμένα προϊόντα.

5.2 ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗΣ

Γενικά, η δυνατότητα να γίνει πλήρης ταυτοποίηση των προϊόντων ενυδάτωσης σε κονιάματα (ιδιαίτερα στις αρχικές ηλικίες) περιορίζεται από i) τη χαμηλή περιεκτικότητα του τσιμέντου στο κονίαμα, ii) τη μικρή ποσότητα των ενυδατωμένων ενώσεων και iii) το μικρό βαθμό κρυσταλλικότητας τους.

Στο Παράρτημα Γ δίνονται τα XRD γραφήματα για όλα τα δείγματα. Παρά τη μερική απομάκρυνση της άμμου, είναι εμφανείς οι κορυφές που αντιστοιχούν στον καλσίτη των ασβεστολιθικών αδρανών. Παράλληλα φαίνονται οι κύριες κορυφές των άνυδρων ασβεστοπυριτικών ενώσεων οι οποίες απομειώνονται με την αύξηση του χρόνου ενυδάτωσης και οι κορυφές της υδρασβέστου κυρίως στις 28 ημέρες. Οι μετρήσεις XRD επαναλήφθηκαν στην περιοχή 2θ : $5-20^\circ$, με μικρότερη ταχύτητα σάρωσης και μεγαλύτερο χρόνο μέτρησης, έτσι ώστε να γίνει καλύτερη αποτύπωση των μικρών κορυφών. Από αυτά τα γραφήματα προκύπτουν ενδιαφέρουσες ενδείξεις για το σταδιακό σχηματισμό των προϊόντων ενυδάτωσης, χωρίς όμως και πάλι να μπορεί να γίνει ασφαλής ταυτοποίηση αφού για κάθε ένωση είναι διακριτές μόνο 1-2 κορυφές.

Η μελέτη των XRD γραφημάτων οδήγησε στις παρακάτω παρατηρήσεις οι οποίες συνοψίζονται στον Πίνακα 2.

- Κατά τις πρώτες ώρες (2-12) δεν υπάρχουν ποσοτικές ενδείξεις για ενυδάτωση των ασβεστοπυριτικών ενώσεων (C_3S και C_2S). Στις 24 ώρες καταγράφεται απομείωση των κορυφών των άνυδρων ενώσεων ($d \sim 0.28, 0.27, 0.26, 0.30, 0.18 \text{ \AA}$) και συγχρόνως ταυτοποιείται ο σχηματισμός πορτλαντίτη ($d \sim 2.6, 4.9 \text{ \AA}$).
- Στις 24 ώρες υπάρχουν επίσης ενδείξεις για σχηματισμό τομπερμορίτη ($C-S-H$, $d \sim 11.3 \text{ \AA}$).
- Μετά τις 12 ώρες υπάρχει εμφανής απομείωση της χαρακτηριστικής κορυφής του C_4AF ($d \sim 7.3 \text{ \AA}$).
- Μετά τις πρώτες 4 ώρες αρχίζει να σχηματίζεται ετρινγκίτης ($d \sim 9.7 \text{ \AA}$), ο οποίος μετά τις 8 ώρες μετασχηματίζεται σε μονοθεϊκό άλας ($d \sim 8.5 \text{ \AA}$).
- Μετά τις 4 ώρες αρχίζουν επίσης να σχηματίζονται ένυδρες ασβεσταργλικές ενώσεις όπως $C_3A \cdot xH_2O$ ($d \sim \text{\AA}$), $CA \cdot 10H_2O$ ($d \sim 7.2 \text{ \AA}$) και $C_4A \cdot 13H_2O$ ($d \sim 8.0 \text{ \AA}$). Οι ενώσεις αυτές είναι συνήθεις σε τσιμέντα που περιέχουν και άλλα κύρια συστατικά τα οποία ανεβάζουν την περιεκτικότητα σε Al_2O_3 , όπως Ιπτάμενη Τέφρα και φυσική ποζολάνη.
- Μετά τις 12 ώρες υπάρχουν ενδείξεις για σχηματισμό ενύδρων ενώσεων $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ (π.χ. $CaAl_2Si_7O_{18} \cdot xH_2O$, $d \sim 7.3, 4.9 \text{ \AA}$).

Γενικά, τα προϊόντα ενυδάτωσης είναι αυτά που αναμένονται στην περίπτωση των σύνθετων τσιμέντων, όπου εκτός από τα κλασσικά προϊόντα της ενυδάτωσης του OPC (ετρινγκίτης, μονοθεϊκό, πορτλαντίτης, τομπερμορίτης), σχηματίζονται επίσης ενυδατωμένες ασβεσταργλικές ασβεσταργιλοπυριτικές φάσεις.

Πίνακας 2. Ταυτοποίηση φάσεων ενυδατωμένων δειγμάτων (XRD)

Ένωση	Χρόνος ενυδάτωσης					
	2 h	4 h	8 h	12 h	24 h	28 d
$C_3S - C_2S$	xx	xx	xx	xx	xx	xx
C_3A	x					
C_4AF	xx	xx	xx	xx	x	
Ετρινγίτης		x	x			
Μονοθευκό			x	x		
$C_3A \cdot xH_2O$		x	x	x	x	x
$CA \cdot 10H_2O$		x	x	x	x	x
$C_4A \cdot 13H_2O$		x	x	x	x	x
$Ca(OH)_2$					xx	xx
C-S-H					xx	xx
$CaO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$				x	x	x

x : ισχυρές ενδείξεις xx : ταυτοποίηση

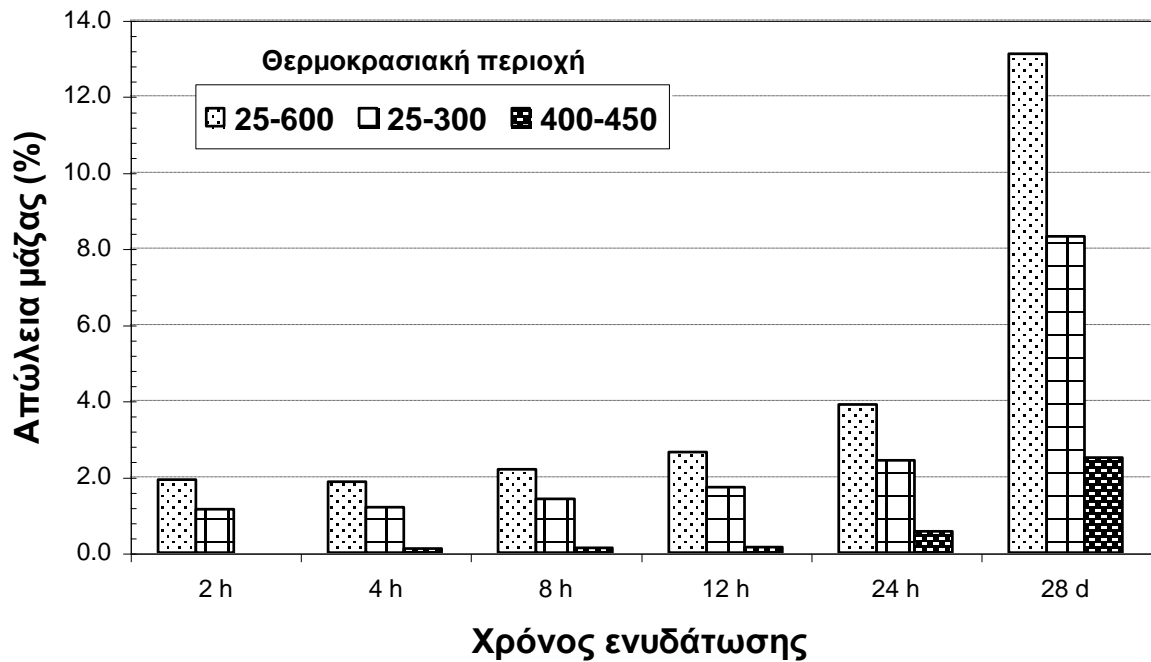
5.3 ΡΥΘΜΟΣ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗΣ

Η απώλεια βάρους των δειγμάτων μετρήθηκε σε Θερμοζυγό (T: 25-600°C, ρυθμός: 10°C/min, ατμόσφαιρα: N₂, 50ml/min). Τα διαγράμματα με τις βαρυτομετρικές καμπύλες (TG) και την πρώτη παράγωγό τους (DTG), δίνονται στο Παράρτημα Γ.

Η συνολική απώλεια βάρους οφείλεται στην απομάκρυνση του χημικά συνδεδεμένου νερού και είναι ενδεικτική του συνολικού βαθμού ενυδάτωσης. Ειδικότερα, ο ετρινγκίτης διασπάται στην περιοχή 135-140°C, το αντίστοιχο μονοθευκό άλας στην περιοχή 185-200 °C και οι ενυδατωμένες ασβεστοπυριτικές ενώσεις στην περιοχή 115-200 °C. Επειδή οι παραπάνω αντιδράσεις είναι σχετικά αργές υπάρχει επικάλυψη των κορυφών με αποτέλεσμα να μη καταγράφονται διακριτά στάδια απώλειας βάρους. Η διάσπαση της υδρασβέστου, αντίθετα καταγράφεται με ευκρίνεια που επιτρέπει τον ποσοστικό προσδιορισμό της. Έτσι η εκτίμηση του ρυθμού ενυδάτωσης έγινε με βάση τη συνολική απώλεια βάρους, την απώλεια βάρους στην περιοχή 25-300 °C που είναι ενδεικτική της περιεκτικότητας σε ενυδατωμένες ενώσεις και την απώλεια βάρους στην περιοχή 400-450 °C που είναι ενδεικτική της ενυδάτωσης των ασβεστοπυριτικών ενώσεων. Στο Σχήμα 1 δίνεται η απώλεια βάρους των δειγμάτων στις παραπάνω θερμοκρασιακές περιοχές.

Όπως είναι γνωστό και φαίνεται και από το Σχήμα 1, οι αντιδράσεις ενυδάτωσης αρχίζουν αμέσως μετά την ανάμειξη του υλικού με το νερό και ήδη στις 2 πρώτες ώρες έχουν σχηματισθεί προϊόντα που περιέχουν χημικά συνδεδεμένο νερό. Στις 4 ώρες εμφανίζεται μικρή ποσότητα υδρασβέστου η οποία όμως μπορεί να προέρχεται και από την αντίδραση των ασβεστούχων συστατικών της Ι.Τ. με το νερό. Οι αντιδράσεις ενυδάτωσης εμφανίζουν μια στασιμότητα μέχρι τις πρώτες 8 ώρες και επιταχύνονται στη

συνέχεια. Στις 28 ημέρες όπως είναι αναμενόμενο υπάρχουν υψηλά ποσοστά υδρασβέστου και άλλων ενυδατωμένων προϊόντων.



Σχήμα 1. Απώλεια βάρους των δειγμάτων σε συγκεκριμένες θερμοκρασιακές περιοχές

5.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- Τα αποτελέσματα της μελέτης ενυδάτωσης του τσιμέντου σε συνθήκες όμοιες με αυτές που επικρατούν στο σκυρόδεμα δείχνουν καλή συμφωνία μεταξύ συμβατικού χρόνου αρχής και τέλους πήξης (9,9 και 13,3 h αντίστοιχα για τη εργαστηριακή σύνθεση 1216) και προόδου ενυδάτωσης όπως προσδιορίζεται από τις μεθόδους XRD και TGA (τέλος χρόνου επώασης > 8h και χρόνος επανέναρξης ενυδάτωσης 8-12 h).

5.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Σ. Τσίμας, Σ. Τσιβιλής, Επιστήμη και Τεχνολογία Τσιμέντου, Αθήνα, Ε.Μ.Π. (2001)
- [2] N. Voglis, G. Kakali, S. Tsivilis, Identification of composite cement hydration products by means of X-ray diffraction, Mikrochimica Acta, 136 (2001) 181-183.
- [3] G. Kakali, S. Tsivilis, E. Aggeli, M. Bati, Hydration products of C_3A , C_3S and Portland cement in the presence of $CaCO_3$, Cem Concr Res 30 (2000) 1073-1077.
- [4] H. F. W. Taylor, Cement chemistry, Thomas Telford, 2nd edition, London, 1997.
- [5] C. P. Hewlett, Lea's chemistry of cement and concrete, Arnold, London, 1998.