



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΚΙΣΣΗΡΗΣ ΣΤΑ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
ΤΟΥ ΔΟΜΙΚΟΥ ΚΙΣΣΗΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στρογγύλης Ιωάννης
Τουρλούκης Απόστολος

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Ζέρης Α. Χρήστος
Αναπληρωτής καθηγητής

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Αθήνα, Μάρτιος, 2017

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	8
Abstract.....	8
Λέξεις Κλειδιά.....	9
Key Words	9
Ευχαριστίες	10
1. Βιβλιογραφική και θεωρητική διερεύνηση του Ελαφροσκυροδέματος	13
1.1 Ιστορικά στοιχεία	13
1.2 Δομικό Ελαφροσκυρόδεμα στην Ελλάδα.....	16
1.3 Το ελαφροσκυρόδεμα: Ορισμός	17
1.4 Δομή ελαφροσκυροδέματος	17
1.5 Ελαφροαδρανή.....	20
1.5.1 Ορισμοί σε κώδικες και πρότυπα.....	20
1.5.2 Περιγραφή των διάφορων τύπων ελαφροαδρανών	20
1.5.2.1 Τεχνητά παραγόμενα ελαφροαδρανή	20
1.5.2.2 Επεξεργασμένα φυσικά υλικά.....	24
1.5.2.3 Επεξεργασμένα υποπροϊόντα	26
1.5.2.4 Φυσικά σχηματισμένα και άλλα ελαφροαδρανή	27
1.6 Χαρακτηριστικά ελαφροαδρανών	30
1.6.1 Ιδιότητες σχήματος και επιφάνειας	30
1.6.2 Μέγεθος των κόκκων των αδρανών	31
1.6.3 Αντοχή των αδρανών.....	31
1.6.4 Πυκνότητα	32
1.6.5 Πορώδες και απορροφητικότητα ύδατος.....	32
1.7 Κατηγορίες ελαφροσκυροδέματος	33
1.8 Ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα	36
1.9 Τεχνικά χαρακτηριστικά Ελαφροσκυροδέματος - (ΕΣ) και σύγκριση του με το Σκυρόδεμα Κανονικού Βάρους - (ΣΚΒ) και το Ινοπλισμένο Ελαφροσκυρόδεμα (ΙΕΣ)	38
1.9.1 Θλιπτική αντοχή	38
1.9.2 Εφελκυστική αντοχή.....	40
1.9.2.1 Εφελκυστική αντοχή σε κάμψη και διάρρηξη	40
1.9.2.2 Επιρροή υγρασίας και συνθηκών συντήρησης.....	40
1.9.2.3 Προσθήκη ινών από χάλυβα στη μάζα του ελαφροσκυροδέματος	41
1.9.3 Διατμητική αντοχή	42

1.9.3.1 Διατμητική αντοχή ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος.....	42
1.9.4 Μέτρο ελαστικότητας και σχέση τάσης-παραμόρφωσης	43
1.9.4.1 Μέτρο ελαστικότητας και σχέση τάσης-παραμόρφωσης ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος	45
1.9.5 Εργασιμότητα	46
1.9.5.1 Εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος.....	46
1.9.5.2 Εργασιμότητα ελαφροσκυροδέματος.....	46
1.9.5.3 Εργασιμότητα ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος	47
1.9.6 Κόπωση.....	48
1.9.7 Ανθεκτικότητα	48
1.9.7.1 Διαπερατότητα	49
1.9.7.2 Διάβρωση και προστασία διαβρώσεως.....	50
1.9.7.3 Αντοχή έναντι φθοράς.....	53
1.9.7.4 Αντίσταση έναντι αποσάρθρωσης λόγω εναλλαγών κύκλων ψύξης απόψυξης	53
1.9.7.5 Αντίσταση έναντι χημικών προσβολών από θειικά άλατα και αλκαλοπυριτικές αντιδράσεις.....	55
1.9.8 Χρονικά μεταβαλλόμενη παραμορφωσιακή συμπεριφορά.....	56
1.9.8.1 Ερπυσμός.....	56
1.9.8.2 Συστολή ξήρανσης.....	59
1.9.9 Θερμομόνωση και πυρασφάλεια	60
1.10 Βιβλιογραφική διερεύνηση πειραματικών εργασιών στο κισσηρόδεμα	61
1.11 Κανονιστικό πλαίσιο.....	76
1.11.1 Γενικά.....	76
1.11.2 Πυκνότητα	76
1.11.3 Εφελκυστική αντοχή.....	77
1.11.4 Ελαστικές παραμορφώσεις.....	77
1.11.5 Σχέσεις έντασης παραμόρφωσης για τη μη-γραμμική ανάλυση	78
1.12 Συμπεράσματα βιβλιογραφικής διερεύνησης.....	79
2. Προετοιμασία πειραμάτων	81
2.1 Εξοπλισμός σκυροδετήσεων	81
2.2 Πρώτες Ύλες.....	82
2.3 Περιγραφή των συνθέσεων	88
2.4 Περιγραφή της προετοιμασίας των δοκιμίων	90
3. Πειραματικές δοκιμές	103

3.1 Δοκιμές θλιπτικής αντοχής.....	103
3.2 Δοκιμές εφελκυστικής αντοχής.....	115
3.2.1 Δοκιμές εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη (Brazilian test)	115
3.2.2 Δοκιμές εφελκυστικής αντοχής σε κάμψη 3 σημείων	118
3.3 Δοκιμές Μέτρου Ελαστικότητας	124
3.4 Δοκιμές λόγου Poisson	142
4. Σύγκριση πειραματικών τιμών της παρούσας διπλωματικής εργασίας με άλλες εργασίες και τις προβλεπόμενες τιμές κατά EC2.....	156
5. Συμπεράσματα διπλωματικής εργασίας	164
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ	166
Παράρτημα Α	171
Παράρτημα Β	177

Περίληψη

Η χρήση του ελαφροσκυροδέματος σε διάφορες κατασκευές γίνεται ολοένα και πιο διαδεδομένη, λόγω του μικρού του ίδιου βάρους (σε σχέση με το συνήθους πυκνότητας σκυρόδεμα) που οδηγεί σε σημαντικά μειωμένα αδρανειακά φορτία και φορτία βαρύτητας στις κατασκευές. Βέβαια η χρήση του ελαφροσκυροδέματος εγκυμονεί κινδύνους για ιδιαίτερα αυξημένα βέλη και παραμορφώσεις, εξαιτίας του μειωμένου μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με το Σκυρόδεμα Κανονικού Βάρους. Λόγω των διαφοροποιήσεων που παρουσιάζει σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα και των ωφελειών που προκύπτουν από τη χρήση του, καθίσταται αναγκαία η εμβάθυνση στην κατανόηση των μεταβολών των μηχανικών του ιδιοτήτων. Επομένως, απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση των μεταβολών αυτών, ανάλογα με τη διαφοροποίηση του ελαφροαδρανούς που θα χρησιμοποιηθεί, καθώς και την τελική πυκνότητα του ελαφροσκυροδέματος.

Ο βασικός στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η αποτίμηση του υλικού, δηλαδή να μελετηθούν οι μεταβολές των μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμίων άοπλου και ινοπλισμένου κισσηροδέματος για τις διάφορες πυκνότητες που επιλέχθηκαν. Ο πειραματικός έλεγχος των δοκιμίων θα επιτευχθεί με δοκιμές σε πρότυπα δοκίμια που χυτεύθηκαν με βάση τις συνθέσεις της LaFargeBeton στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Από τις συνθέσεις αυτές 2 ήταν με ένα και δύο χωρίς.

Συγκεκριμένα, αντικείμενο μελέτης ήταν η ανάπτυξη της θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων κισσηροδέματος 4 συνθέσεων στις 7, 14 και 28 ημέρες, καθώς και το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος Poisson και η εφελκυστική αντοχή μέσω διάρρηξης και κάμψης στις 28 ημέρες. Η κατάλληλη εκτίμηση των ιδιοτήτων επιτεύχθηκε με μια σειρά από πειράματα κυλινδρικών, κυβικών δοκιμίων και πρισμάτων στις πιστοποιημένες μηχανές του ΕΟΣ ΕΜΠ.

Abstract

The usage of lightweight concrete in various constructions is becoming significantly popular, due to the lower self-weight (in comparison to the normal density concrete), which leads to importantly lower inertial and gravity loads. Of course, the usage of lightweight aggregate concrete poses dangers of big displacements and arrows, because of the smaller modulus of elasticity in comparison to the Normal Weight Concrete. Owing to the differences and gains it appears to have in comparison to the normal weight concrete, the better understanding of the modification of the LWAC (lightweight aggregate concrete) mechanical properties is necessitated. Therefore, it is required to further investigate these modifications, depending on the type of lightweight aggregate that is used and the final density of the concrete.

The primary object of this thesis is to better evaluate the lightweight pumice aggregate concrete, by studying the changes on the mechanical properties depending on the chosen densities and the reinforcement with steel fibers. The experimental control of the specimens will take place in the Reinforced Concrete Lab of the National Technical University

of Athens, based on the concrete mix proportions provided by Lafarge Beton. From the mix proportions two of them included steel fibers.

Specifically, the object of study was the progress of the stress strength after 7, 14 and 28 days of the lightweight pumice aggregate concrete specimens, and also their Modulus of Elasticity and flexural and splitting tensile strength after 28 days. The appropriate evaluation of these properties was achieved with a series of tests on cylindrical, cubic and prismatic specimens on the certified machines in the Reinforced Concrete Lab of the Civil Engineering of the National Technical University of Athens.

Λέξεις Κλειδιά

Ελαφροσκυρόδεμα, Κίσηρη, Δομικό Ελαφροσκυρόδεμα, Κίσηρόδεμα, Δομικό Κίσηρόδεμα, Μηχανικές ιδιότητες, Ινοπλισμένο Κίσηρόδεμα, Ελαφροαδρανή, Θλιπτική Αντοχή, Εφελκυστική Αντοχή Διάρρηξης, Καμπτική Εφελκυστική Αντοχή, Μέτρο Ελαστικότητας

Key Words

Lightweight Concrete, Pumice, Structural Lightweight Aggregate Concrete, Lightweight Pumice Aggregate Concrete, Structural Lightweight Aggregate Pumice Concrete, Mechanical Properties, Steel Fiber Reinforced Lightweight Pumice Aggregate concrete, Lightweight Aggregates, Stress Strength, Splitting Tensile Strength, Flexural Strength, Modulus of Elasticity

Ευχαριστίες

Με την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, ολοκληρώνεται επίσημα ο κύκλος σπουδών μου σαν φοιτητής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για αυτό είναι έντονο το αίσθημα της ανάγκης να ευχαριστήσω κάποιους ανθρώπους που στάθηκαν στο πλευρό μου και με βοήθησαν να ξεπεραστούν όλα τα εμπόδια τόσο στη συγκεκριμένη εργασία όσο και γενικότερα όλα αυτά τα χρόνια.

Κατ' αρχάς, ευχαριστίες οφείλω στον επιβλέποντα της εργασίας κ. Χρήστο Ζέρη, τόσο για την ανάθεση ενός θέματος που προσωπικά με ενδιέφερε πάρα πολύ, όσο και για τη βοήθεια που μας παρείχε για τη διεξαγωγή των σκυροδετήσεων και των πειραμάτων.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρία LaFarge Beton, η οποία μας προμήθευσε με όλα τα υλικά και τις συνθέσεις που απαιτούνταν για την εκπόνηση της διπλωματικής, καθώς και με εργασίες για να εξασφαλισθεί η ποιότητα των αποτελεσμάτων.

Εγκάρδιες ευχαριστίες οφείλω στους φίλους και συμφοιτητές μου για τις υπέροχες στιγμές που περάσαμε όλα αυτά τα χρόνια των προπτυχιακών μου σπουδών και στον άνθρωπο μου την Ειρήνη. Πάνω απ' όλα όμως, θέλω να πω ένα τεράστιο ευχαριστώ στους γονείς μου Βάσω και Γιώργο, στην αδερφή μου Αναστασία, οι οποίοι μου παρείχαν αμέριστη στήριξη και συμπαράσταση όλα αυτά τα χρόνια.

Στρογγύλης Ιωάννης

Στην παράγραφο αυτή, που είναι και η πιο σημαντική, θα ήθελα να αναφέρω όλους εκείνους που συνέβαλαν προκειμένου να εκπονηθεί με επιτυχία η παρούσα διπλωματική εργασία.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας μου κ. Χρήστο Ζέρη για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου με την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος διπλωματικής εργασίας και την εξαιρετική συνεργασία μας. Επιπλέον, η συνεχής καθοδήγησή του σε όλα τα στάδια της εργασίας, οι επισημάνσεις του, καθώς και ο χρόνος και η προσπάθεια που κατέβαλλε για την διεξαγωγή των σκυροδετήσεων και των πειραμάτων, βοήθησαν ουσιαστικά, ώστε η συγκεκριμένη εργασία να παρουσιαστεί άρτια και γεμάτη χρήσιμα συμπεράσματα.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρία LaFarge Beton, η οποία μας προμήθευσε με όλες τις πρώτες ύλες που απαιτούνταν για τη διεξαγωγή των σκυροδετήσεων και με ένα σημαντικό αριθμό μητρώων.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά τους γονείς μου Γεωργία και Γιάννη, για την ανιδιοτελή υποστήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας και ιδιαίτερα τον αδερφό μου Κώστα, που με στήριζε και με ηρεμούσε σε όλα τα στάδια της

εργασίας και που χωρίς τη σημαντική του βοήθεια στην προετοιμασία των μητρών δε θα ήταν δυνατό να πραγματοποιηθούν οι σκυροδετήσεις σε τόσο σύντομο χρονικό διάστημα.

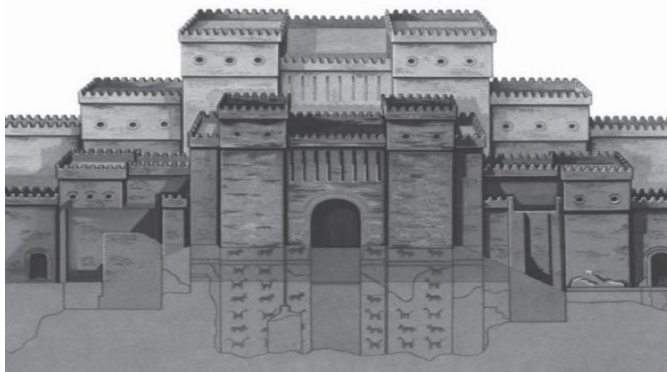
Τουρλούκης Απόστολος

1. Βιβλιογραφική και θεωρητική διερεύνηση του Ελαφροσκυροδέματος

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του ελαφροσκυροδέματος (ΕΣ) –lightweight concrete (LWC) είναι η μείωση του ίδιου βάρους, χωρίς να υπάρχει μεγάλη μείωση της αντοχής του. Η ιδιότητα του αυτή είναι η λύση στο πρόβλημα των μεγάλων ίδιων βαρών και νεκρών φορτίων που προκύπτουν από τη χρήση οπλισμένου σκυροδέματος, το οποίο αποτελεί και το πιο διαδεδομένο δομικό υλικό στις κατασκευές.

1.1 Ιστορικά στοιχεία

Η χρήση βέβαια ΕΣ για την πραγματοποίηση κατασκευών δεν είναι κάτι καινούριο. Ήδη από την αρχαιότητα σε λαούς με ηφαιστιογενή εδάφη υπάρχουν αναφορές για την αξιοποίηση διάφορων δομικών υλικών που μπορούν να χαρακτηριστούν ΕΣ και τα οποία περιέχουν κίσηρη, σκωρία κ.α.(1) Πρώτοι φαίνεται πως τα αξιοποίησαν οι Σουμέριοι κατά την ανέγερση της Βαβυλώνας την 3η χιλιετία προ Χριστού, ενώ αξιοποιήθηκε η κίσηρη ως αδρανές σε αριστουργήματα τα οποία διασώζονται μέχρι σήμερα από τους Βυζαντινούς και τους Ρωμαίους, όπως π.χ. η Αγία Σοφία στην Κωνσταντινούπολη, το Πάνθεον και το υδραγωγείο της Ρώμης.(2)

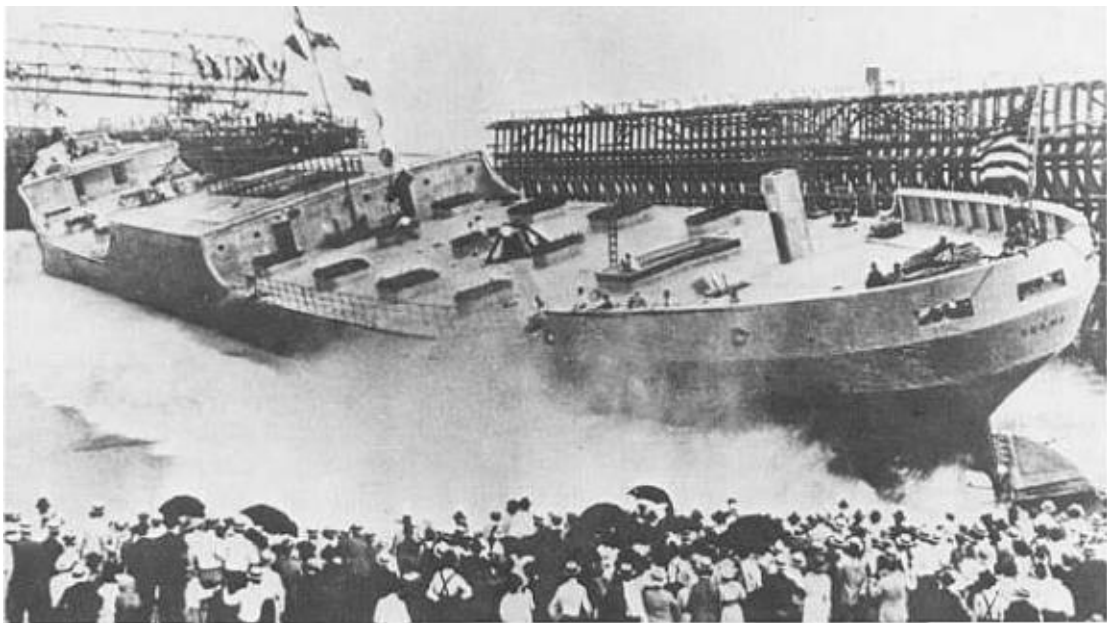


Εικόνα 1.1 Βαβυλώνα, Σουμέριοι 3η χιλιετία π.Χ.



Εικόνα 1.2 Αγία Σοφία, Κωνσταντινούπολη, 4^{ος} αιώνας μ.Χ.

Κατά τον 19^ο αιώνα υπήρξε σημαντική αύξηση της ζήτησης για ΕΣ, όμως συνοδευόταν από τη δυσκολία για την εύρεση ποσότητας αδρανών ικανής να καλύψει τη ζήτηση που είχε δημιουργηθεί. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος, ξεκίνησε στη Γερμανία και αργότερα επεκτάθηκε και σε άλλες χώρες της Ευρώπης τον ίδιο αιώνα η παραγωγή τεχνητών ελαφροαδρανών (ΕΑ)-lightweight aggregates (LWA), όπως πορώδη αργιλικά κομμάτια μέσω της ταχείας εξάτμισης του νερού. Στη Γερμανία επίσης ξεκίνησε η εκμετάλλευση του ΕΣ σε βιομηχανική κλίμακα και συγκεκριμένα το 1845 από τον Ferdinand Nebel, ο οποίος υπήρξε ο πρωτοπόρος στην παραγωγή τοιχοποιιών από κίσηρη με οξείδιο του ασβεστίου (CaO –burnt lime) ως συνδετικό υλικό(2). Τη μεγάλη όμως άνθιση η χρήση του ΕΣ, τη γνώρισε κατά τη διάρκεια του πρώτου παγκοσμίου πολέμου. Τότε ξεκίνησε η προσπάθεια παραγωγής πλοίων από ΕΣ, στοχεύοντας με αυτόν τον τρόπο στην εξοικονόμηση χάλυβα. Καθοριστικό ρόλο στην πραγματοποίηση αυτών των πρωτοπόρων κατασκευών έπαιξε ο μηχανικός Stephen Hayde, ο οποίος, ήδη από το Φεβρουάριο του 1918, είχε χορηγηθεί με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για την πρόοδο που είχε κάνει στις συνθέσεις του ΕΣ, ώστε να πετύχει την όσο το δυνατόν καλύτερη αξιοποίηση των χαρακτηριστικών του. Με τη χρηματοδότηση της Κυβερνήσεως των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής, παραδόθηκαν για χρήση το Δεκέμβρη του 1918 το πλοίο «Ατλαντίς» και τον Ιούνιο του 1919 το πλοίο «Σέλμα», το οποίο χρίζει ιδιαίτερης προσοχής, καθώς αποτελεί σταθμό στις κατασκευές από ΕΣ, λόγω του επιβλητικού μεγέθους του. Το «Σέλμα» ήταν ένα τάνκερ χωρητικότητας 7500 τόνων, μήκους 132 μέτρων, πλάτους 13 μέτρων και 8 μέτρων βυθίσματος υπό πλήρες φορτίο. (3)



Εικόνα 1.3 Καθέλκυση του «Σέλμα» στις 28 Ιουνίου του 1919(3)

Η έρευνα και η εκμετάλλευση του ΕΣ κατά τον 1^ο παγκόσμιο πόλεμο οδήγησε στη βιομηχανική παραγωγή του, καθώς και στην περαιτέρω διερεύνηση των ιδιοτήτων του μετά τον πόλεμο. Αποτέλεσμα όλων αυτών, ήταν η εισήγηση του αρχιμηχανικού της κατασκευαστικής εταιρίας Turner στην Νέα Υόρκη τον Ιούνιο του 1919, για να ξεκινήσει η

χρησιμοποίηση ΕΣ στις συμβατικές κατασκευές, για μείωση του κόστους. Το πρώτο σύγχρονο κτήριο που κατασκευάστηκε από ΕΣ, συγκεκριμένα με αδρανή από διογκωμένο σχιστόλιθο, ήταν ένα γυμναστήριο στο Westport High School στο Κάνσας το 1922. Με τη χρήση του ΕΣ επιτεύχθηκε η αποφυγή των δύσκολων εργασιών θεμελίωσης του γυμναστηρίου, που θα απαιτούνταν, αν το έργο γινόταν με συμβατικό σκυρόδεμα. Οι εργασίες αυτές θα ήταν υπεραπαραίτητες λόγω της πολύ χαμηλής φέρουσας αντοχής του εδάφους της περιοχής. Χρρίζει ιδιαίτερης μνείας, το γεγονός πως παρά τη διαφορά της τιμής του ΕΣ την εποχή εκείνη (6 δολάρια ανά κυβική γιάρδα) σε σχέση με σκυροδέματα που περιείχαν την συνήθη άμμο και χαλίκι (2,5 δολάρια ανά κυβική γιάρδα) η λύση που επιλέχθηκε με τη χρήση του "ακριβού" ελαφροσκυροδέματος ήταν οικονομικότερη. Το παράδοξο αυτό εξηγείται λόγω της πιο απλής θεμελίωσης που κατέστη δυνατή από τη μείωση του ίδιου βάρους της κατασκευής.(3)

Πέρασαν αρκετά χρόνια για την χρησιμοποίηση του ΕΣ σε ένα μεγάλο έργο. Το 1928-1929, όμως επιλέχθηκε η χρήση ΕΣ, για την προσθήκη επιπλέον 14 ορόφων στο κτίριο Southwestern Bell Telephone στο Κάνσας. Με μελέτες που έγιναν για την αντοχή της θεμελίωσης εκτιμήθηκε πως η χρήση συμβατικού σκυροδέματος θα επέτρεπε την προσθήκη μόνο 8 επιπλέον ορόφων στο ήδη δεκατετραόροφο κτήριο. Έτσι και με την τεχνογνωσία του Πανεπιστημίου του Κάνσας ξεπεράστηκαν οι δυσκολίες που αναμενόμενα συναντήθηκαν και το φιλόδοξο αυτό έργο πραγματοποιήθηκε.(3)



Εικόνα 1.4 Southwestern Bell Telephone Company, Κάνσας, πολιτεία του Μιζούρι(3)

Ένας άλλος σταθμός στην εξέλιξη του ΕΣ αποτελεί η πρώτη ανέγερση ουρανοξύστη από ΕΣ, και συγκεκριμένα το Park Plaza Hotel στο St. Louis το έτος 1929. Στον 28όροφο ουρανοξύστη έγινε εκτεταμένη χρήση ελαφροσκυροδέματος τόσο στα

πλαίσια και στις πλάκες ορόφων, όσο και για την εξασφάλιση επαρκούς πυροπροστασίας.(3)



Εικόνα 1.5 Chase-Park Plaza Hotel, St. Louis, πολιτεία του Μισούρι(3)

1.2 Δομικό Ελαφροσκυρόδεμα στην Ελλάδα

Η παρασκευή ελαφροσκυροδέματος στην Ελλάδα γίνεται χρησιμοποιώντας κυρίως την κίσηρη ως αδρανές. Η κίσηρη υπάρχει σε ικανοποιητικές ποσότητες σε νησιά των Δωδεκανήσων, και συγκεκριμένα στη Σαντορίνη, στη Νίσυρο και στο Γυαλί.(5) Και τα 3 αυτά νησιά είναι ηφαιστιογενή, επομένως έτσι εξηγούνται οι μεγάλες ποσότητες κίσηρης που υπάρχουν σε αυτά. Η κίσηρη είναι ένα ορυκτό πορώδες υλικό ποζωλανικής φύσεως με τυπική χημική σύσταση: 70% SiO₂, 11% Al₂O₃, 4% K₂O, 3% Na₂O και 3% CaO, δραστικό SiO₂ → 47 έως 66%. Ένα χαρακτηριστικό της κίσηρης, που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, είναι πως παρουσιάζει μεταβολές ως προς την υγρασία της ανάλογα την εποχή, εξαιτίας της μεγάλης ικανότητας της να συγκρατεί νερό, που δικαιολογείται από την πορώδη φύση της.(4) Η πορώδης δομή της δημιουργείται από το σχηματισμό φυσαλίδων ή κενών αέρα, όταν τα αέρια που περιέχονται στην τρεχούμενη υγρή λάβα από το ηφαίστειο παγιδεύονται κατά την ψύξη της.(6) Αποτέλεσμα αυτής της δομής είναι να χαρακτηρίζεται από χαμηλή φαινόμενη πυκνότητα (300-800kg/m³)

Άλλα χαρακτηριστικά της κίσηρης είναι η μεγάλη θερμομονωτική και ηχομονωτική ικανότητα, όπως και η διατήρηση της αντοχής της σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (π.χ. πυρκαγιά), καθώς και η μεγάλη υδατοαπορροφητικότητα της (30%-80% κ.β.).(4)

1.3 Το ελαφροσκυρόδεμα: Ορισμός

Οι ορισμοί που δίνονται στους περισσότερους κανονισμούς σκυροδέματος για το ΕΣ (LC- Lightweight concrete ή LWC- LWAC- Lightweight aggregate concrete, συντομογραφίες στη διεθνή βιβλιογραφία) είναι άμεσα συνυφασμένοι με τον τύπο και την πυκνότητα του αδρανούς, καθώς και την πυκνότητα του ΕΣ. Σε ορισμένες περιπτώσεις στους κανονισμούς αυτούς υπάρχουν αναφορές και για την αντοχή του. Στον EN 206-1 ορίζεται ως ελαφροσκυρόδεμα το σκυρόδεμα του οποίου η πυκνότητα δεν είναι κάτω από 800 kg/m^3 και δεν ξεπερνάει τα 2200 kg/m^3 . Επίσης, ποσότητα των φυσικών ή τεχνητών αδρανών που περιέχονται οφείλει να είναι μικρότερη των 2000 kg/m^3 . **(8)** Υπάρχουν 3 ήδη αδρανών:

- a) Αδρανή φυσικής προελεύσεως, με σημαντικότερο όλων για τον ελλαδικό χώρο την κίσηρη, καθώς και την σκωρία και το διατομίτη.
- b) Τεχνητά ή βιομηχανικά είναι τα αδρανή, τα οποία έχουν προκύψει ως προϊόντα βιομηχανικής δραστηριότητας από χημική ή θερμική επεξεργασία πρώτων υλών ορυκτής ή άλλης προέλευσης και χαρακτηρίζονται διογκωμένα. Τέτοια πετρώματα είναι η άργιλος, ο σχιστόλιθος, ο περλίτης, ο βερμικουλίτης, κ.α.
- c) Ανακυκλωμένα είναι τα αδρανή που προκύπτουν από την επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση δομικών υλικών από υφιστάμενες κατασκευές. **(9), (10)**

1.4 Δομή ελαφροσκυροδέματος

Για την καλύτερη κατανόηση του ΕΣ και τη σύγκριση με το σκυρόδεμα κανονικού βάρους- ΣΚΒ (Normal weight concrete- NWC) παρόμοιας αντοχής εξετάζεται η δομή τους και οι διαφορές τους. Το σκυρόδεμα είναι ένα ετερογενές υλικό του οποίου οι ιδιότητες ως σύνολο εξαρτώνται τόσο από τις ιδιότητες των επί μέρους "συστατικών" όσο και από την αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Για τα ελαφροαδρανή είναι δεδομένο πως υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις στις ιδιότητες ανάλογα το είδος, ενώ ρόλο παίζει ακόμα και η προέλευση τους. Οι πιο σημαντικές ιδιότητες που επηρεάζονται από τα ΕΑ είναι οι εξής:

- a. Επιτελεστικότητα
- b. Αντοχή
- c. Μέτρο Ελαστικότητας
- d. Πυκνότητα
- e. Αντοχή έναντι πυρκαγιάς και παγετού
- f. Θερμική αγωγιμότητα
- g. Συρρίκνωση
- h. Ερπυσμός/Συστολή ξήρανσης **(10)**

Σε μεσοσκοπική κλίμακα (μεγέθη χιλιοστού, μέχρι μερικών εκατοστών) το σκυρόδεμα προσομοιώνεται ως ένα υλικό δύο φάσεων - υλικών, και συγκεκριμένα: τους κόκκους του αδρανούς και τον σκληρυμένο τσιμεντοπολτό (Smerplass 1992). Το ΣΚΒ περιέχει συνήθως αδρανή τα οποία έχουν μεγαλύτερη αντοχή και μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας

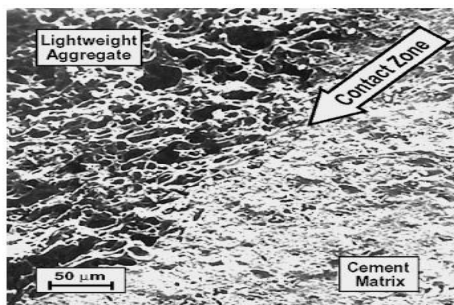
από τον τσιμεντοπολτό και συνεπώς αυτή η διαφορά επηρεάζει την κατανομή των τάσεων, τις θέσεις των μικρορηγματώσεων και τελικώς τη μορφή της θραύσης του σκυροδέματος.

Στα χαμηλής αντοχής ΣΚΒ η διεπιφανειακή ζώνη μεταξύ αδρανούς – τσιμέντου έχει μικρότερη αντοχή και μέτρο ελαστικότητας από τον σκληρυμένο τσιμεντοπολτό, με αποτέλεσμα να θεωρείται κατά τον Monteiro ως ένα τρίτο υλικό της προσομοίωσης στη μεσοσκοπική κλίμακα. Η ζώνη αυτή ρηγματώνεται σε σχετικά μικρότερη εξωτερική ένταση, και όσο αυξάνεται η τάση, εμφανίζεται στη ζώνη αυτή κατανεμημένη μικρορηγματώση και σταδιακή αύξηση του πλάτους της.

Με την αύξηση της τάσεως, ένα μεγαλύτερο μέρος της επιβαλλόμενης ελαστικής ενέργειας καταναλώνεται στο σχηματισμό των ρηγματώσεων με αποτέλεσμα το διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων του ΣΚΒ να αποκλίνει από τη γραμμικότητα. Όταν φτάσει στην οριακή αντοχή, το μοτίβο της μικρορηγματώσεως θα οδηγήσει σε μια εσωτερική ανακατανομή της εντάσεως, με τελικό αποτέλεσμα μια πιο ψαθυρή αστοχία. Αυτές οι διαφορές ανάμεσα στην αντοχή και στο μέτρο ελαστικότητας των 3 υλικών είναι υπεύθυνες για τον ετερογενή χαρακτήρα του σκυροδέματος σε μεσοσκοπικό επίπεδο.

Ο ετερογενής χαρακτήρας του σκληρυμένου σκυροδέματος τείνει να μειώνεται, όσο μειώνονται οι διαφορές στην αντοχή και στο μέτρο ελαστικότητας μεταξύ των διαφορετικών υλικών-φάσεων. Στο ελαφροσκυρόδεμα οι διαφορές αυτές είναι σχεδόν αμελητέες και επομένως η αντοχή και η ακαμψία της σκληρυμένης πάστας με τα ελαφροαδρανή είναι σχεδόν ίσες.

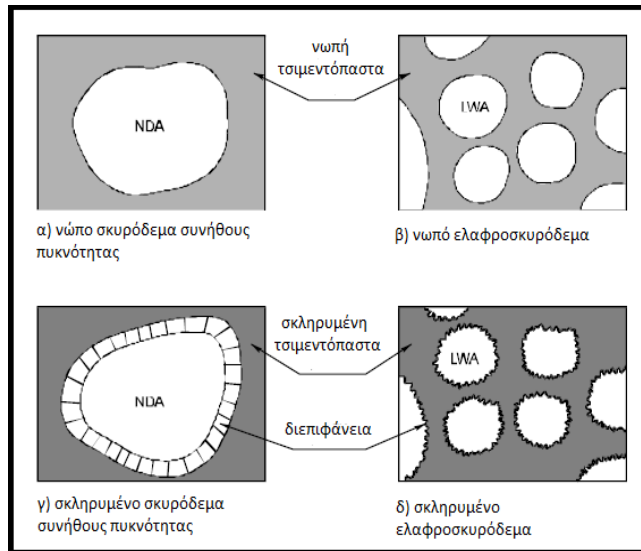
Η διεπιφάνεια μεταξύ του αδρανούς και της πάστας είναι καλύτερης ποιότητας σε σχέση με τα κανονικά σκυροδέματα με αποτέλεσμα να μην αποτελεί πλέον σε πολλά ελαφροσκυροδέματα το πιο “αδύναμο” σημείο κατά την αστοχία. Αυτή η αλλαγή στην διεπιφάνεια είναι τεράστιας σημασίας για τις μηχανικές ιδιότητες, την πορεία θραύσης και γενικότερα την αντοχή του.**(10),(9)** Για τη μελέτη της αλλαγής της συμπεριφοράς της διεπιφάνειας, χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι. Αυτές είναι είτε ασυμπτωτικές μέθοδοι, στις οποίες γίνεται η παραδοχή μηδενικού πάχους διεπιφάνειας, είτε μέθοδοι στις οποίες το ελαφροσκυρόδεμα λαμβάνεται ως ένα υλικό τριών φάσεων, είτε με πεπερασμένα στοιχεία και ασυνέχεια υλικού.**(11)**



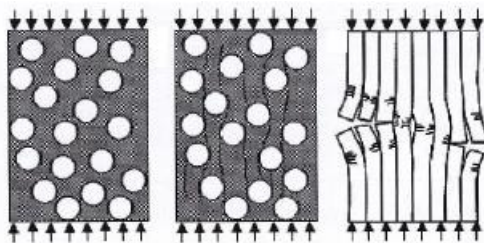
Εικόνα 1.6 Μικρογραφία της διεπιφάνειας μεταξύ του αδρανούς και της τσιμεντόπαστας

Όταν η αντοχή και η δυσκαμψία του αδρανούς είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες του τσιμεντοπολτού, η συμπεριφορά που παρατηρείται στην μεσοσκοπική αλλά και στην μακροσκοπική κλίμακα είναι εντελώς διαφορετική. Πλέον οι ρωγμές στον τσιμεντοπολτό

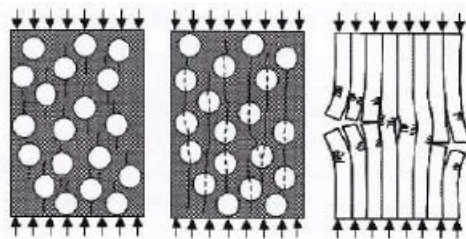
έχουν την τάση να διέρχονται εντός των κόκκων του ΕΑ και όχι μέσα από την επιφανειακή ζώνη. Άρα η ρηγματώση συνήθως χαρακτηρίζεται από λίγες και κυρίαρχες διακριτές ρωγμές, αφού δεν αναπτύσσεται πλήθος αμελητέων μικρορηγματώσεων στην επιφανειακή ζώνη.



Εικόνα 1.7 Διαφορά στη δομή του ελαφροσκυροδέματος και του σκυροδέματος κανονικού βάρους σε μεσοσκοπικό επίπεδο(10)



Εικόνα 1.8 Διαδοχικές φάσεις ρηγματώσης σε προσομοίωμα συμβατικού σκυροδέματος(12)



Εικόνα 1.9 Διαδοχικές φάσεις ρηγματώσης σε προσομοίωμα ελαφροσκυροδέματος έως την αστοχία(12)

Για καλύτερη εποπτεία των προηγούμενων στον παρακάτω πίνακα δίνονται ενδεικτικές τιμές για την αντοχή σε θλίψη και το μέτρο της ελαστικότητας ελαφροαδρανών, αδρανών και της τσιμεντόπαστας.(13)

	Μέτρο ελαστικότητας
Ελαφροαδρανή	5-30 N/mm ²
Τσιμεντόπαστα	20-60 N/mm ²
Συνήθη αδρανή	60-100 N/mm ²

Πίνακας 1.1 Ενδεικτικές τιμές μέτρου ελαστικότητας

1.5 Ελαφροαδρανή¹

1.5.1 Ορισμοί σε κώδικες και πρότυπα

Παρατίθενται παρακάτω ορισμένοι ορισμοί για τα ελαφροαδρανή που χρησιμοποιούνται σε διεθνείς κώδικες και πρότυπα:

- **DIN 4226-7 (Γερμανία):** " Ελαφροαδρανή είναι ένα μείγμα θρυμματισμένων και/ή μη θρυμματισμένων κόκκων από φυσικά ή τεχνητά ορυκτά. "

Δε δίνονται όρια για την πυκνότητα. Ο περλίτης, ο βερμικουλίτης και ο πετροβάμβακας δεν καλύπτονται από αυτό το πρότυπο.

- **BS 3797 (Ηνωμένο Βασίλειο):** "Αδρανή με χαλαρή φαινόμενη πυκνότητα από 400 έως 1200 kg/m³ για λεπτόκοκκα αδρανή ή από 250 έως 1000 kg/m³ για χονδρόκοκκα αδρανή."
- **NEN 3543 (Ολλανδία):** "Το πρότυπο αυτό αφορά τα ελαφροαδρανή, τεχνητά (κυρίως πορώδη υλικά) αλλά και τα φυσικά με ονομαστικό μέγεθος κόκκων τουλάχιστον 4mm για σκυρόδεμα για δομικές κατασκευές και πυκνότητα μέχρι 2000 kg/m³."
- **ACI 318-95, section 2.1 (Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής):** "Αδρανή με ξηρό χαλαρό βάρος έως και 1120 kg/m³."
- **prEN 206:** "Αδρανή ορυκτής προέλευσης με πυκνότητα σωματιδίων που δεν υπερβαίνει τα 2000 kg/m³ ή χαλαρή φαινόμενη πυκνότητα που δεν υπερβαίνει τα 1200 kg/m³."

1.5.2 Περιγραφή των διάφορων τύπων ελαφροαδρανών

Παγκοσμίως χρησιμοποιούνται πολλοί διαφορετικοί τύποι αδρανών. Μια μεγάλη ποικιλία υλικών ακολουθεί τους ορισμούς που διατυπώθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Σε αυτή την παράγραφο θα δοθεί η βασική περιγραφή των ελαφροαδρανών τα οποία κυρίως χωρίζονται σε τεχνητά παραγόμενα αδρανή και σε φυσικά σχηματιζόμενα αδρανή.

1.5.2.1 Τεχνητά παραγόμενα ελαφροαδρανή

Τα τεχνητά ελαφροαδρανή που παράγονται αποτελούνται κυρίως από άργιλο, σχιστόλιθο ή υπτάμενη τέφρα και υπόκεινται σε μια διαδικασία διαστολής (φουσκώματος) ή συσσωρεύσεως. Κατά τη διαστολή το υλικό θερμαίνεται μέχρι τη θερμοκρασία τήξεως,

¹ Το παρόν κεφάλαιο βασίζεται στο κεφάλαιο 2 General description of LWA, LWAC της βιβλιογραφικής αναφοράς (10) EuroLightCon, Definition and International Consensus Report, Economic Design and Construction with Light Weight Aggregate Concrete, April 1988

όπου συμβαίνει η πυρο-πλαστικότητα του υλικού, με ταυτόχρονη παραγωγή αερίου. Συσσώρευση συμβαίνει όταν ένα μέρος του υλικού λιώνει με αποτέλεσμα την ένωση των μορίων μεταξύ τους.

Για να επιτευχθεί η επιθυμητή διαστολή το ακατέργαστο υλικό θα πρέπει να ικανοποιεί τις παρακάτω απαιτήσεις:

- Θα πρέπει να περιέχει ικανοποιητική ποσότητα αέριων παραγόμενων στοιχείων
- Η πυρο-πλαστικότητα θα πρέπει να συμβαίνει ταυτόχρονα με την παραγωγή του αερίου

Η απαιτούμενη παραγωγή αερίου μπορεί να συμβεί λόγω διάφορων αντιδράσεων:

- Αποσύνθεση και ανάφλεξη των σουλφιδίων και των ενώσεων άνθρακα από τους 400°C
- Αποβολή του ύδατος της υγρασίας των αργιλικών υλικών γύρω στους 600°C
- Απομάκρυνση του CO₂ από τα ανθρακικά στους 900°C
- Μείωση του Fe₂O₃ στους 1100°C που προκαλεί την απελευθέρωση του οξυγόνου

Γενικές μέθοδοι παρασκευής ελαφροαδρανών

Για την παρασκευή των ελαφροαδρανών χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, οι πιο σημαντικές από τις οποίες περιγράφονται σε αυτή την παράγραφο. Προκειμένου να προκληθεί η διόγκωση στα ακατέργαστα υλικά, τα περισσότερα τεχνητά ελαφροαδρανή υφίστανται θέρμανση κατά την παρασκευή τους. Αυτή η θέρμανση πραγματοποιείται συνήθως σε περιστροφικούς κλίβανους, κατακόρυφους κλίβανους, sinterstrands ή foamingbeds (κλίνες διόγκωσης) ως ακολούθως:

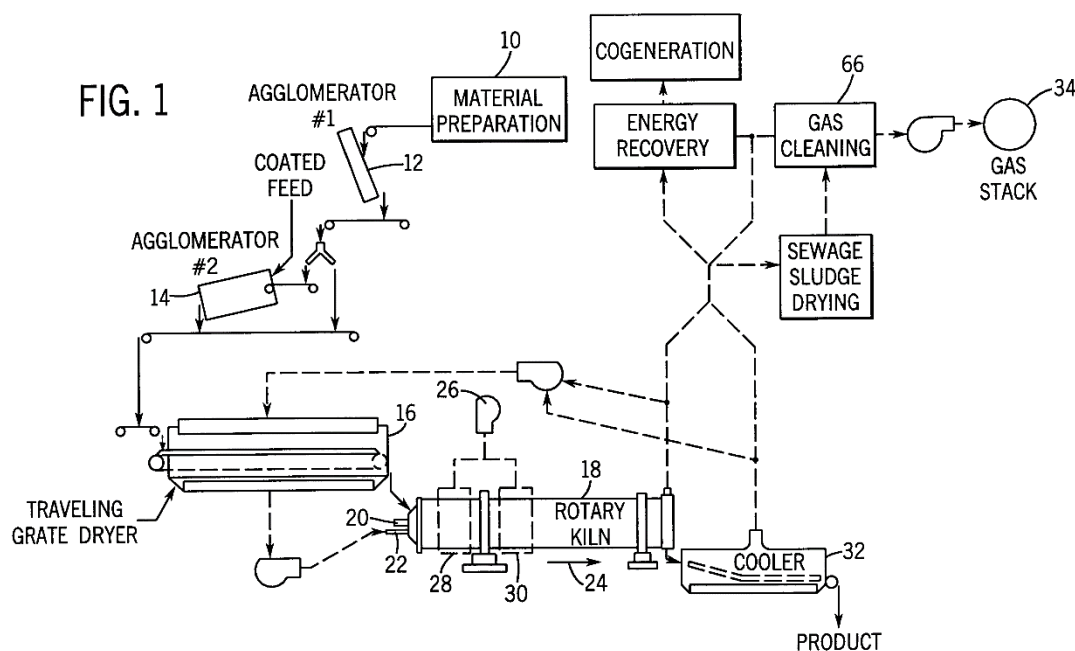
Περιστροφικοί κλίβανοι



Εικόνα 1.10 Περιστροφικός κλίβανος αργίλου

Ο περιστροφικός κλίβανος αποτελείται από ένα μακρύ χαλύβδινο κύλινδρο, ο οποίος είναι επενδυμένος στο εσωτερικό του με πυρίμαχα τούβλα και είναι ικανός να περιστρέφεται περί το διαμήκη άξονά του, που είναι ανασηκωμένος κατά 5° ως προς την

οριζόντιο. Το μήκος του κλιβάνου εξαρτάται εν μέρει από την σύνθεση του ακατέργαστου υλικού που πρόκειται να κατεργαστεί, αλλά συνήθως κυμαίνεται από τριάντα έως εξήντα μέτρα. Το προετοιμασμένο ακατέργαστο υλικό εισάγεται στον κλίβανο από το υψηλότερο σημείο του, ενώ το άναμμα γίνεται στο χαμηλότερο σημείο του. Κατά την κατεργασία των αδρανών μέσα στον κλίβανο, η θερμοκρασία των μορίων σταδιακά αυξάνεται με αποτέλεσμα να διαστέλλονται. Στη συνέχεια το υλικό απομακρύνεται σε ένα δοχείο ψύξης, όπου ψύχεται με κρύο αέρα. Η μέθοδος αυτή επινοήθηκε από τον Hayde, και χρησιμοποιείται κυρίως σε αργίλους και σχιστόλιθους που αποτελούν τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα ελαφροαδρανή. Έχουν σχεδόν ίδια χημική σύνθεση και πρέπει να βρίσκονται σε αρκετά πλαστική μορφή προκειμένου να διασταλούν, κάτι που συμβαίνει στους 1150°C-1200°C. Ο σχιστόλιθος έχει υψηλότερη θερμοκρασία διαστολής (1300°C-1400°C) λόγω του μεγαλύτερου ποσοστού άνθρακα που περιέχει (4%-10%). Τα ελαφροαδρανή από σχιστόλιθο έχουν φαινόμενη πυκνότητα γύρω στα 800kg/m³, ενώ αυτά από άργιλο ή διογκωμένο σχιστόλιθο φτάνουν σε μία ελάχιστη πυκνότητα γύρω στα 300kg/m³.



Εικόνα 1.11 Διαδικασία επεξεργασίας ελαφροαδρανών με περιστροφικό κλίβανο

Κατεργασία με ξηρό σύστημα

Συνήθως χρησιμοποιείται σε πολύ μαλακές αργίλους, όπου το ακατέργαστο υλικό μετατρέπεται σε πολύ λεπτή σκόνη μέσω σύνθλιψης και άλεσης. Το υλικό θα πρέπει να είναι πολύ ξηρό πριν αλεστεί προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η διαδικασία. Στη συνέχεια η ξηρή σκόνη αναμειγνύεται με νερό σε μία καυτή περιστρεφόμενη σφαιρική πλάκα, όπου σχηματίζονται μικρές σφαίρες. Η ταχύτητα και η κλίση της περιστρεφόμενης πλάκας μπορούν να περιορίσουν το μέγεθος των σφαιρών. Αυτή η διαδικασία δίνει τα πιο καλοσηματισμένα αδρανή τα οποία στη συνέχεια πασπαλίζονται με ανθρακικό ασβέστιο και ρίχνονται στον κλίβανο.

Στον περιστρεφόμενο κλίβανο διακρίνονται τρία στάδια. Πρώτο στάδιο, στον κλίβανο προθέρμανσης, όπου η θερμοκρασία φτάνει τους 900°C-1000°C. Στο επόμενο στάδιο, τον διεσταλμένο κλίβανο, η θερμοκρασία ανεβαίνει απότομα στους 1150°C, προκαλώντας της διαστολή της αργίλου. Το τρίτο στάδιο είναι αυτό του κλίβανου ψύξης.

Κατεργασία με υγρό σύστημα

Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για σκληρούς σχιστόλιθους (Sprintzner 1995). Σε αυτή τη διαδικασία η άργιλος ή ο σχιστόλιθος έχει αναμειχθεί έτσι ώστε να δημιουργηθεί μια ομοιογενής λάσπη, η οποία στη συνέχεια εξωθείται και μετατρέπεται σε βώλους. Οι βώλοι ρίχνονται στον κλίβανο, στον οποίο υπάρχουν λεπίδες στο εσωτερικό του. Το σχήμα των ελαφροαδρανών επιτυγχάνεται από την περιστροφική κίνηση του κλιβάνου και μέσω της διαστολής, όπως και στην κατεργασία με το ξηρό σύστημα. Ο κλίβανος έχει μόνο ένα στάδιο. Το μέγεθος των αδρανών δεν ελέγχεται όμως τόσο εύκολα όσο στο ξηρό σύστημα, γι' αυτό τα υλικά θα πρέπει να θραύονται σε αυτή τη διαδικασία.

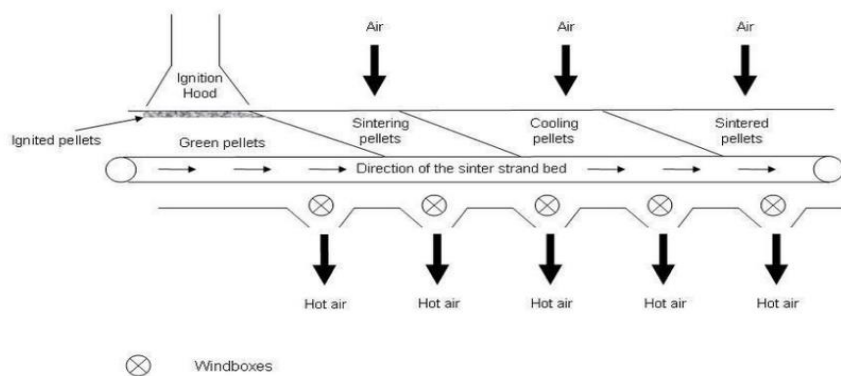
Κατακόρυφοι κλίβανοι

Σε αυτή την περίπτωση, το προετοιμασμένο κατάλληλα ακατέργαστο υλικό ρίχνεται στον κατακόρυφο κλίβανο σε παρτίδες. Ένα καυτό σπρέι αερίων εισέρχεται στον κλίβανο από το κέντρο της βάσης του θαλάμου εσωτερικής καύσης και ανασηκώνει το υλικό μέχρις ότου η δύναμη βαρύτητας να υπερνικήσει την πίεση του σπρέι αερίων. Στη συνέχεια το υλικό πέφτει στον πόδα του θαλάμου εσωτερικής καύσης, που έχει σχήμα χωνιού, από όπου ένα νέο σπρέι το ανασηκώνει ξανά. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται αρκετές φορές σε μία περίοδο του ενός λεπτού για κάθε παρτίδα.

Sinter strands

Το κατάλληλα προετοιμασμένο ακατέργαστο υλικό τοποθετείται σε χαλαρές στρώσεις πάχους περίπου από 150mm έως 300mm πάνω σε κινούμενες σειρές τήξης και μεταφέρεται κάτω από κουκούλες ξήρανσης, με τέτοιο τρόπο, ώστε το κάψιμο που πραγματοποιείται στην επιφάνεια να διαπερνά όλο το πάχος της στρώσης του υλικού. Τα αέρια που παράγονται από αυτή τη διαδικασία προκαλούν διόγκωση, ωστόσο σε ορισμένες περιπτώσεις λόγω της δομής των υλικών, της καύσης των καυσίμων και της απώλειας υγρασίας, τα λεπτά μόρια του ακατέργαστου υλικού ενώνονται μεταξύ τους.

Στη σειρά τήξης το ακατέργαστο υλικό θα πρέπει να αναμειχθεί με καύσιμο. Οι κόκκοι θα πρέπει να έχουν διαμορφωθεί από πριν, διαφορετικά δε θα είναι στρογγυλεμένοι (Weigleretal, 1972). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για ιπτάμενη τέφρα, παρόλο που μπορεί να εφαρμοσθεί και για άλλα αδρανή, ενώ η φαινόμενη πυκνότητα μπορεί και να ξεπεράσει τα 700kg/m³.



Εικόνα 1.12 Διαδικασία επεξεργασίας ελαφροαδρανών με sinter strands

Foaming beds (κλίνες διόγκωσης)

Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την παραγωγή αφρώδους τέφρας υψικαμίνου, η οποία χύνεται πάνω στα foaming beds, τα οποία αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό πιδάκων νερού πάνω σε μία τσιμεντένια βάση. Το νερό μετατρέπεται σε ατμό κατά την επαφή του με το λιωμένο υλικό και εισχωρεί στο σώμα του υλικού το οποίο εκείνη τη στιγμή είναι καυτό. Λόγω της απότομης διεύρυνσης που λαμβάνει χώρα, το υλικό διαστέλλεται. Εναλλακτικές μέθοδοι περιλαμβάνουν σπρέι νερού πάνω στο λιωμένο υλικό, ώστε αυτό να ψυχθεί απότομα και ο ατμός που παράγεται να εγκλωβιστεί στο εσωτερικό του. Τέλος, σε μία άλλη μέθοδο το λιωμένο υλικό ρίχνεται σε ένα μήλο με περιστρεφόμενα κουπιά και τροφοδοτείται με ατμό.

1.5.2.2 Επεξεργασμένα φυσικά υλικά

Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει τη διογκωμένη άργιλο, πλάκα σχιστόλιθου, το διογκωμένο σχιστόλιθο, το διογκωμένο περλίτη και τον απολεπισμένο βερμικουλίτη.

Διογκωμένη άργιλος

Τα ελαφροαδρανή από διογκωμένη άργιλο παράγονται από μια ειδική κατηγορία αργίλου κατάλληλη για διόγκωση (φούσκωμα). Η άργιλος, μετά την αποθήκευσή της, υφίσταται άλεση και ανάμειξη με πρόσθετα, τα οποία βοηθούν στο φούσκωμα και στη συνέχεια εισάγεται στον περιστρεφόμενο κλίβανο. Για το άναμμα του κλιβάνου χρησιμοποιείται ένα μείγμα κονιοποιημένου άνθρακα και πετρελαίου, ενώ η θερμοκρασία στο εσωτερικό του φτάνει τους 1200°C. Το υλικό, που σχηματίζεται από αυτή τη διαδικασία, αποτελείται από σκληρά στρογγυλά σωματίδια με λείο πυκνό φλοιό και κυψέλες στο εσωτερικό τους. Τα υπερμεγέθη υλικά συνθλίβονται και για αυτό μόνο μια μικρή ποσότητα του υλικού έχει γωνίες και αιχμές. Μια εναλλακτική μέθοδος παρασκευής περιλαμβάνει την εισαγωγή των έτοιμων σωματιδίων σε ένα κατακόρυφο κλίβανο. Στην περίπτωση αυτή, το αρχικό σχήμα των σωματιδίων διατηρείται σε μεγαλύτερο βαθμό σε σύγκριση με τη μέθοδο της διόγκωσης.

Διογκωμένος σχιστόλιθος

Σε αυτή την περίπτωση ο ακατέργαστος σχιστόλιθος, π.χ. από απόβλητα ορυχείου, θραύεται σε κόκκους με διάμετρο περίπου 10mm, αναμειγνύεται με εδαφικό άνθρακα ή οπτάνθρακα και τοποθετείται σε sinter strands, όπου θερμαίνεται στους 1200°C περίπου. Σε αυτή την θερμοκρασία τα μόρια διαστέλλονται και ενώνονται μεταξύ τους, παγιδευόμενα στο εσωτερικό της δομής του υλικού ποσότητες αέρα. Κατά την ψύξη, ένα πολύ σκληρό, μισό-υαλοποιημένο κλίνκερ παράγεται το οποίο έχει πορώδη εξωτερική επιφάνεια. Μετά τη θραύση τα σωματίδια με γωνίες εξομαλύνονται. Σε ορισμένες διαδικασίες παρασκευής, ωστόσο, ο σχιστόλιθος θραύεται αρχικά σε κομμάτια ποικίλων μεγεθών, τα οποία θερμαίνονται σε περιστρεφόμενους κλιβάνους ξεχωριστά, σχηματίζοντας έτσι σφαιρικά σωματίδια τα οποία δε χρειάζονται περαιτέρω σπάσιμο.

Διογκωμένη πλάκα σχιστόλιθου

Επιλεγμένος ακατέργαστος σχιστόλιθος θραύεται, προκειμένου να περάσει από κόσκινα των 13mm και εισάγεται σε περιστρεφόμενους κλιβάνους, που διαστέλλουν τον σχιστόλιθο στους 1200°C περίπου. Μετά την απομάκρυνσή του από τον κλίβανο και την ψύξη του, το υλικό είναι χημικά αδρανές και έχει μια αρκετά υαλοποιημένη εσωτερικά πορώδη δομή. Το υλικό στη συνέχεια θραύεται και αλέθεται.

Διογκωμένος περλίτης

Ο περλίτης είναι ηφαιστειακό γυαλί που περιέχει νερό. Η πιο συνήθης βιομηχανική διαδικασία, που χρησιμοποιείται για την παρασκευή ελαφροαδρανών, αποτελείται από τη θραύση του πετρώματος σε κόκκους με διάμετρο 1mm, κατά προσέγγιση, και την ταχεία θέρμανση του μέχρι το σημείο που αρχίζει η σύντηξη (περίπου στους 1800°C). Σε αυτή τη θερμοκρασία το περιεχόμενο νερό εξατμίζεται, δημιουργώντας μικροσκοπικές φυσαλίδες στο εσωτερικό του καυτού γυαλιού, σχηματίζοντας έτσι ένα υλικό με όγκο μέχρι και 20 φορές μεγαλύτερο από τον αρχικό. Σε άλλες πιο σύγχρονες βιομηχανικές μεθόδους παρασκευής, τα μόρια του περλίτη (<100μm) αναμειγνύονται με αλκαλικό διάλυμα και αλάτι και εισάγονται σε ένα κοκκοποιητή. Στη συνέχεια το υλικό ξηραίνεται και τοποθετείται σε ένα περιστρεφόμενο κλίβανο στους 860°C.

Απολεπισμένος βερμικουλίτης

Ο ακατέργαστος βερμικουλίτης, ο οποίος προσομοιάζει τη μαρμαρυγία σε όψη, αποτελείται από πολύ μικρές επίπεδες νιφάδες που περιέχουν μικροσκοπικά σωματίδια νερού. Όταν αυτές οι νιφάδες υποβληθούν απότομα σε πολύ μεγάλες θερμοκρασίες (περίπου 700-1000°C), απολεπίζονται (διογκώνονται) και ο όγκος τους αυξάνεται αρκετά σε σχέση με τον αρχικό, λόγω του σχηματισμού ατμού που απομακρύνει τις στρώσεις μεταξύ τους. Το υλικό που παράγεται αποτελείται από κόκκους, σε μορφή ακορντεόν, που περιέχουν πολλά λεπτά στρώματα αέρα.

1.5.2.3 Επεξεργασμένα υποπροϊόντα

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν η πορώδης ιπτάμενη τέφρα, η αφρώδης σκωρία υψικαμίνου και η palletized slag (σκωρία σε μορφή πέλλετ).

Πορώδης ιπτάμενη τέφρα

Η τέφρα, που συλλέγεται από τα καυσαέρια των σύγχρονων σταθμών παραγωγής ενέργειας, οι οποίοι καταναλώνουν κονιοποιημένα καύσιμα, γνωστή ως ιπτάμενη τέφρα αποτελείται από λεπτά σφαιρικά γυάλινα σωματίδια τα οποία είναι τόσο λεπτά (αν όχι λεπτότερα) όσο και στο τσιμέντο. Η τέφρα αναμειγνύεται με νερό και κονίαμα άνθρακα σε μίξερ και στη συνέχεια ρίχνεται σε περιστρεφόμενες λεκάνες (pelletisers) προκειμένου να σχηματιστούν σφαιρίδια. Τα “πράσινα” σφαιρίδια τοποθετούνται σε sinterstrand και η καύση εξελίσσεται σε θερμοκρασία 1300°C περίπου. Σε αυτή τη θερμοκρασία τα μόρια της τέφρας πήζουν, χωρίς να λιώσουν τελείως, για να σχηματίσουν σκληρά σφαιρικά μόρια, όπως στα τούβλα. Μετά την ψύξη του το υλικό κοσκινίζεται και αλέθεται.

Ιπτάμενη τέφρα με ψυχρή ένωση

Εδώ δεν απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες. Τα αδρανή σχηματίζονται χρησιμοποιώντας τις ποζολανικές ιδιότητες της ιπτάμενης τέφρας. Η στερεά ιπτάμενη τέφρα και ο άσβεστος μεταφέρονται από κοινού σε πολύ ισχυρά μίξερ επεξεργασίας, όπου προστίθεται νερό μέχρι να σχηματιστεί ένα πρασινωπό μείγμα. Δύο μεγάλες λεκάνες με μορφή δίσκου (pelletisers) σχηματίζουν, από το μείγμα, σφαιρίδια (pellets), λόγω της συγκολλητικότητας του μείγματος. Προκειμένου να ενισχυθούν τα ακόμη ευάλωτα “πράσινα σφαιρίδια” (“greenpellets”), περνούν μέσα από μια συνεχόμενη ροή τέφρας και μεταφέρονται σε σιλό συντήρησης. Εκεί, ο ατμός συμπυκνώνεται γύρω από κάθε σφαιρίδιο. Η ενέργεια που απελευθερώνεται έμμεσα ζεσταίνει τα σφαιρίδια σε μία θερμοκρασία γύρω στους 85°C. Μετά από 15 ώρες απομακρύνονται από τα σιλό. Τα σκληρά σφαιρίδια περνούν από κόσκινα διαφόρων μεγεθών. Τα υπερμεγέθη υλικά θραύονται σε κατάλληλα μεγέθη.

Αφρώδης σκωρία υψικαμίνου

Η αφρώδης σκωρία είναι υποπροϊόν της παραγωγής σιδήρου και σχηματίζεται εισάγοντας νερό ή ατμό στο λιωμένο υλικό, είτε σε foamingbeds είτε με ψεκαστήρες. Το υλικό μετά την ανόπτηση και την ψύξη του, έχει γωνιώδες σχήμα με αιχμηρή και ακανόνιστη γυάλινη υφή. Τα εσωτερικά κενά έχουν μορφή σφαιρικών κοιλοτήτων, οι οποίες ποικίλουν ανάλογα με τη μέθοδο παρασκευής που έχει εφαρμοστεί.

Pelletised slag (σκωρία σε μορφή πέλλετ)

Η σκωρία σε μορφή πέλλετ, όπως και η αφρώδης σκωρία είναι υποπροϊόν της παραγωγής σιδήρου και σχηματίζεται υποβάλλοντας τη λιωμένη σκωρία σε μία ελεγχόμενη ποσότητα νερού και ρίχνοντας την στη συνέχεια σε ένα περιστρεφόμενο τύμπανο με πτερύγια. Το νερό φουσκώνει την σκωρία ενώ το περιστρεφόμενο τύμπανο εκσφενδονίζει τα σωματίδια του υλικού στον αέρα, μετατρέποντας τα σε ημισφαιρικά αδρανή. Το υλικό

είναι ελαφρύτερο από την αφρώδη σκυρία και έχει μία λεία επιφάνεια σαν αυτή του γυαλιού.

Διογκωμένο γυαλί

Το ανακυκλωμένο γυαλί θραύεται και ανακατεύεται προκειμένου να αποκτήσει μια γυάλινης μορφής μίξη με περιορισμούς στο ποσοστό μάζας των αλκαλικών οξειδίων. Το μείγμα συμπιέζεται και θραύεται σε χοντρούς κόκκους. Οι κόκκοι αφρίζουν μέσα σε ένα φούρνο στους 700-850°C για μία περίοδο από 3 έως 30 λεπτά. Μετά από μία ορισμένη περίοδο ψύξης, το γυαλί έχει χαμηλή πυκνότητα (200-300kg/m³) με πόρους στο εσωτερικό από 0,0001 έως 0,5 mm και ένα επιφανειακό στρώμα με χαμηλή διαπερατότητα.

1.5.2.4 Φυσικά σχηματισμένα και άλλα ελαφροαδρανή

Σε αντίθεση με τα τεχνητά παρασκευασμένα ελαφροαδρανή υπάρχουν και φυσικά σχηματισμένα αδρανή, ανεπεξέργαστα υποπροϊόντα και οργανικά υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ελαφροαδρανή.

Φυσικά υλικά

Τα περισσότερα από τα φυσικά ελαφροαδρανή είναι ηφαιστειακές πέτρες, που παρήχθησαν σε μία ηφαιστειακή έκρηξη από τον αφρό του μάγματος που στερεοποιήθηκε στη συνέχεια, σχηματίζοντας την κίσηρη. Τα φυσικά αδρανή υποβάλλονται μόνο σε μηχανική μεταχείριση, θραύση και κοσκίνισμα.

Κίσηρη (ελαφρόπετρα)

Η κίσηρη είναι το παλαιότερο γνωστό ελαφροαδρανές και χρησιμοποιούταν από τους ρωμαϊκούς χρόνους. Είναι ελαφρύ και αρκετά ισχυρό για να χρησιμοποιείται στη φυσική του κατάσταση, αλλά έχει διαφορετικές ιδιότητες ανάλογα με την προέλευσή του. Η μοριακή δομή της κίσηρης, εξ ου και η χαμηλή πυκνότητά της, οφείλεται στον σχηματισμό φυσαλίδων ή κενών, όταν τα αέρια που περιέχονταν στη λιωμένη λάβα παγιδεύτηκαν στο εσωτερικό της κατά την ψύξη της. Οι κυψέλες είναι επιμήκης και παράλληλες μεταξύ τους και μερικές φορές συνδέονται εσωτερικά. Είναι χημικά αδρανής και συνήθως περιέχει πυρίτιο σε ποσοστό 70% κατά προσέγγιση.



Εικόνα 1.13 Κίσηρη (ή Ελαφρόπετρα)

Σκωρία

Η σκωρία χρησιμοποιείται σαν όρος για το υλικό το οποίο βρίσκεται συνήθως μέσα ή γύρω από ηφαιστειακούς κρατήρες και διαφέρει από την κίσηρη, αφού είναι πυκνότερη και έχει διαφορετική δομή πόρων. Η δομή των πόρων στην σκωρία είναι πιο ακανόνιστη, τα “γυάλινα” τοιχώματα μεταξύ των πόρων είναι πιο λεπτά και η συνολική αντοχή της είναι μεγαλύτερη από αυτή της κίσηρης. Η κίσηρη είναι υλικό που σχηματίστηκε από λάβα πλούσια σε πυρίτιο (ρυόλιθος), εξ ου και το πιο ανοιχτό χρώμα της, ενώ η σκωρία προέρχεται από λάβα μικρότερης περιεκτικότητας σε πυρίτιο (βασάλτης) και έχει πιο σκούρο χρώμα που ποικίλει από καφέ σε κόκκινο, γκρι και μαύρο. Η περιεκτικότητα σε πυρίτιο της ισλανδικής σκωρίας είναι γύρω στο 50% και η χημική της σύσταση είναι παρόμοια με αυτή του ισλανδικού βασάλτη.



Εικόνα 1.14 Σκωρία

Διατομίτης

Ο διατομίτης είναι ένα πυρωμένο διατόμων πέτρωμα που σχηματίστηκε από λεπτούς απολιθωμένους σκελετούς θαλάσσιας ζωής γνωστούς ως ‘diatoms’. Πρόκειται για ημι-ενοποιημένες ιζηματογενείς αποθέσεις που σχηματίζονται σε περιβάλλοντα με κρύο νερό.



Εικόνα 1.15 Ελαφροαδρανή από διατομίτη πάχους 25 mm

Μη επεξεργασμένα υποπροϊόντα

Κλίνκερ κλιβάνου

Αυτός ο τύπος αδρανών συνήθως αποκτάται από παλαιούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας, όπου τα μπόιλερ θερμαίνονται με στερεά καύσιμα σε θερμοστές με αλυσιδωτές σχάρες. Αφού πρόκειται για κλιβάνους υψηλής θερμοκρασίας, η ποσότητα του καυσίμου στο απομένον κλίνκερ μειώνεται στο ελάχιστο. Το κλίνκερ το οποίο έχει υψηλό υπόλειμμα σε μη καμένο ή μερικώς καμένο άνθρακα, θα οδηγήσει στην παραγωγή ενός επισφαλούς αδρανούς, το οποίο με τη σειρά του θα οδηγήσει στην παραγωγή τσιμέντου με χαμηλή αντοχή και μεγάλη συρρίκνωση. Επιπροσθέτως, επειδή το κλίνκερ περιέχει θείο και άλλα συστατικά θα προκαλέσει διάβρωση στον σιδηροπλισμό.

Τέφρα από τον πάτο του κλιβάνου

Οι σύγχρονοι σταθμοί παραγωγής ενέργειας χρησιμοποιούν ιπτάμενη τέφρα για το άναμμα των κλιβάνων. Η τέφρα που δημιουργείται συλλέγεται είτε από τα αέρια των καπνοδόχων σαν ιπτάμενη τέφρα, είτε σαν τέφρα από τον πάτο του κλιβάνου. Σε ορισμένους σταθμούς παραγωγής ενέργειας η τέφρα που συλλέγεται από τον πάτο αποτελεί το 10 με 25% της συνολικής ποσότητας που δημιουργείται και μερικές φορές έχει τη μορφή του κλίνκερ. Αυτή η τέφρα, ακόμα και με τη μορφή του κλίνκερ, ποικίλει αρκετά και ως προς τα χημικά συστατικά της και ως προς την ποιότητά της. Ωστόσο, είναι πιθανό, μετά τη θραύση και την κατάταξη, να χρησιμοποιηθούν οι καλύτερες μόνο κατηγορίες για ελαφροαδρανή. Τέφρα από τον πάτο κλιβάνου με μεγάλη απώλεια ανάφλεξης δεν συνίσταται για σκυρόδεμα υψηλών αντοχών.

Οργανικά υλικά

Πριονίδια

Πριονίδια τα οποία έχουν βαθμονομηθεί πρώτα, χρησιμοποιούνται ως αδρανή εδώ και πολλά χρόνια, ωστόσο είναι απαραίτητη μία επεξεργασία του υλικού πριν χρησιμοποιηθεί, διαφορετικά η ταννίνη, οι διαλυτοί υδρογονάνθρακες, το κερί, οι ρητίνες και τα υπόλοιπα αρωματικά έλαια που περιέχονται στο ξύλο, μπορούν να επηρεάσουν την ενυδάτωση του τσιμέντου. Υπάρχουν διαθέσιμες διάφορες μέθοδοι επεξεργασίας, πάντως στα περισσότερα μαλακά ξύλα είναι απαραίτητη η ανάμειξή τους με ασβέστη ή το βράσιμο των σωματιδίων τους με νερό, στο οποίο έχει προστεθεί θειικός σίδηρος.

Πλαστικά σωματίδια

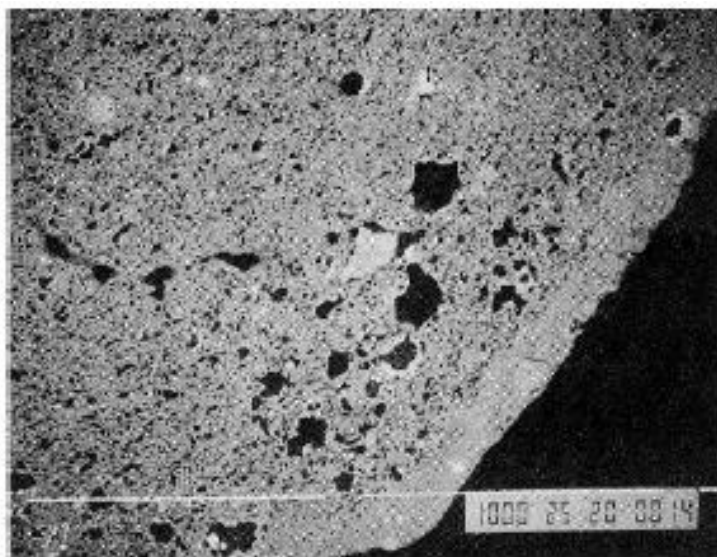
Διογκούμενα πλαστικά σωματίδια, όπως το πολυστυρένιο, παίρνουν τη μορφή πλαστικών σταγονιδίων, στα οποία μία ουσία που προκαλεί διόγκωση έχει διαλυθεί. Το πλαστικό υλικό μαλακώνει σε καυτό ατμό, και η ουσία διόγκωσης εξαναγκάζει τα μόρια να διασταλούν. Αρχικά, τα σταγονίδια έχουν προσεγγιστικά διάμετρο 1 mm, αλλά κατά την επεξεργασία τους διαστέλλονται και το μέγεθός τους αυξάνεται τρεις έως και τέσσερις φορές σε σύγκριση με το αρχικό. Ύστερα από τη διόγκωσή τους τα σταγονίδια καλύπτονται με τσιμέντο ή ρητίνες.

1.6 Χαρακτηριστικά ελαφροαδρανών

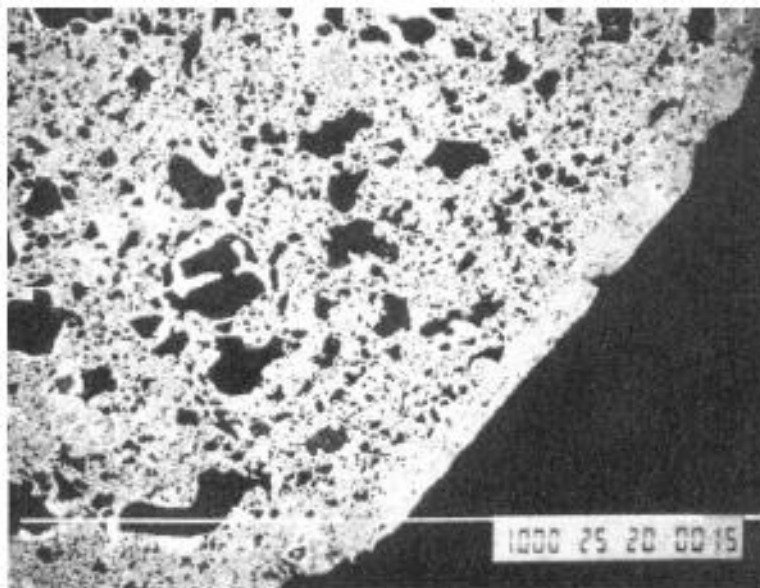
Εξαιτίας του μεγαλύτερου πορώδους τους, τα αδρανή που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή ελαφροσκυροδέματος, έχουν μικρότερη αντοχή από εκείνα που χρησιμοποιούνται στο συμβατικό σκυρόδεμα. Έτσι λοιπόν, το πιο αδύναμο στοιχείο του ελαφροσκυροδέματος δεν είναι η δομή του τσιμέντου, ούτε η διεπιφανειακή ζώνη μεταξύ τσιμεντοπολτού και αδρανών, αλλά τα ίδια τα αδρανή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την επίδραση των χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων των ελαφροαδρανών στην μηχανική απόδοση του ελαφροσκυροδέματος (15).

1.6.1 Ιδιότητες σχήματος και επιφάνειας

Η προέλευση και η μέθοδος επεξεργασίας των αδρανών που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή ελαφροσκυροδέματος ποικίλει αρκετά, με αποτέλεσμα τόσο το σχήμα, όσο και η εξωτερική υφή των σωματιδίων τους να μεταβάλλονται. Συνεπώς, τα σωματίδια μπορεί να έχουν γωνίες ή σφαιρικό σχήμα (οι περιστρεφόμενοι κλίβανοι δημιουργούν τα πιο τέλεια σφαιρικά αδρανή), ενώ η εξωτερική επιφάνειά τους, μπορεί να είναι λεία και πυκνή ή τραχεία και πορώδης. Η μέθοδος επεξεργασίας των πρώτων υλών είναι αυτή που παίζει κυρίαρχο ρόλο στο σχηματισμό της επιφάνειας των σωματιδίων και κατ' επέκταση στο πορώδες τους. Αυτές οι διαφορές στο πορώδες και γενικά στις ιδιότητες της εξωτερικής επιφάνειας είναι που καθορίζουν τη μηχανική συμπεριφορά των αδρανών στο σκυρόδεμα και ειδικότερα τη δυνατότητα απορρόφησης νερού κατά τη φάση της ενυδάτωσης. Γνωρίζοντας λοιπόν, αυτές τις ιδιότητες των ελαφροαδρανών μπορούμε να προβούμε στις κατάλληλες μεθόδους επεξεργασίας, έτσι ώστε να παραχθεί ελαφροσκυρόδεμα με τις βέλτιστες κατά το δυνατό μηχανικές ιδιότητες και με επαρκή ανθεκτικότητα. (14)



Εικόνα 1.16 Φωτογραφία κόκκου ελαφροαδρανούς από διογκωμένη άργιλο (με πυκνότητα σωματιδίων περίπου ίση με $1,44 \text{ kg/dm}^3$). Το σωματίδιο έχει σχετικά πυκνό εξωτερικό περίβλημα) (14)



Εικόνα 1.17 Φωτογραφία κόκκου ελαφροαδρανούς από διογκωμένη άργιλο (με πυκνότητα σωματιδίων περίπου $1,27 \text{ kg/dm}^3$). Το σωματίδιο έχει σχετικά πυκνά εξωτερικό περίβλημα, αλλά όχι τόσο πυκνό όσο του κόκκου της Εικόνας 1.16

1.6.2 Μέγεθος των κόκκων των αδρανών

Το μέγεθος των κόκκων των αδρανών, καθώς και η κατανομή του μεγέθους τους στη μάζα του ελαφροσκυροδέματος, επηρεάζει τόσο τις ιδιότητες του νωπού ακόμα σκυροδέματος, όσο και του σκληρυμένου. Γι' αυτό λοιπόν, η κοκκομετρία των ελαφροαδρανών έχει πολύ μεγάλη σημασία. Το μέγεθος των σωματιδίων του υλικού εξαρτάται από τη διαδικασία επεξεργασίας και στην περίπτωση των φυσικών ελαφροαδρανών, από τη διαδικασία άλεσης. Τα αδρανή τα οποία θραύονται, είτε αυτά είναι φυσικά είτε τεχνητά, παράγουν μια μεγάλη ποσότητα λεπτών κόκκων, οι οποίοι θα πρέπει να περαστούν από κόσκινα προκειμένου να ικανοποιήσουν τις σχετικές απαιτήσεις. Λεπτόκοκκα αδρανή μπορούν επίσης να προκύψουν, κατά την αποθήκευση και μεταφορά, εξαιτίας της σύνθλιψης και της τριβής μεταξύ των σωματιδίων. Τέλος, το μέγεθος των κόκκων μπορεί να επηρεάσει την αντοχή του ελαφροσκυροδέματος, ωστόσο αυτό δε συμβαίνει πάντοτε.(14)

1.6.3 Αντοχή των αδρανών

Τα αδρανή καταλαμβάνουν ένα σημαντικό ποσοστό του όγκου του ελαφροσκυροδέματος και γι' αυτό επηρεάζουν σημαντικά το μέτρο ελαστικότητας του, αλλά και γενικά όλες τις ιδιότητές του. Εφόσον τα σωματίδια των ανεπεξέργαστων ελαφροαδρανών έχουν σχετικά μικρή αντοχή, πολλές φορές είναι αυτά που καθορίζουν και την αντοχή του ελαφροσκυροδέματος(16). Θα πρέπει λοιπόν, να διερευνηθεί και να κατανοηθεί περισσότερο η επίδραση της αντοχής των αδρανών στο μέτρο ελαστικότητας και στη θλιπτική αντοχή του ελαφροσκυροδέματος. Οι Yang και Huang επισήμαναν την επίδραση του κλασματικού όγκου, της αντοχής και γενικά των ιδιοτήτων των αδρανών στη θλιπτική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος (17). Ενώ οι Chang και Su πραγματοποίησαν ατομικές μετρήσεις της θλιπτικής αντοχής των σωματιδίων των ελαφροαδρανών και έκαναν μία στατιστική μελέτη για να αξιολογήσουν τη μηχανική αντοχή αδρανών(15). Τέλος ο Lydon επισήμανε ότι για μερικά ελαφροαδρανή, η θλιπτική

αντοχή εξαρτάται από τον τύπο των αδρανών και μάλιστα αυξάνεται όσο αυξάνεται η πυκνότητα τους **(18)**.

Η αντοχή των αδρανών μπορεί να προκύψει από άμεσες ή έμμεσες μετρήσεις. Στις άμεσες μετρήσεις μια συγκεκριμένη ποσότητα υλικού εισάγεται σε ένα κύλινδρο πίεσης και συμπιέζεται με τη βοήθεια ενός πιστονιού. Η δύναμη που απαιτείται για να συμπιέσει το υλικό μέχρι μια συγκεκριμένη απόσταση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέτρο της αντοχής του υλικού. Στις έμμεσες μετρήσεις τώρα, αφού η σχέση μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης για το ελαφροσκυρόδεμα είναι σχεδόν γραμμική μέχρι την αστοχία, η αντοχή των ελαφροαδρανών μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας απλά μοντέλα σύνθεσης, υποθέτοντας ότι το ελαφροσκυρόδεμα είναι καλά σχεδιασμένο και γι' αυτό το λόγο τα ελαφροαδρανή είναι αυτά που καθορίζουν την αντοχή.**(14)**

1.6.4 Πυκνότητα

Η πυκνότητα αποτελεί σημαντική ιδιότητα των ελαφροαδρανών και επηρεάζει άμεσα τα χαρακτηριστικά του ελαφροσκυροδέματος. Ο Zhang και ο Gjogj επισήμαναν την επίδραση της πυκνότητας των ελαφροαδρανών στη μηχανική αντοχή και τους μηχανισμούς αστοχίας των ελαφροσκυροδεμάτων υψηλής αντοχής. Γενικά, η ποιότητα των ελαφροαδρανών εκτιμάται μέσω της πυκνότητάς τους, μιας και η μέτρηση των μηχανικών τους ιδιοτήτων είναι δύσκολη **(15)**. Ωστόσο, ο Wasserman και ο Bentur έδειξαν ότι η ίδια πυκνότητα αδρανών δεν οδηγεί πάντα σε ίδια αντοχή σκυροδέματος **(19)**.

Ορισμοί

- **Φαινόμενη πυκνότητα των ελαφροαδρανών:** είναι η σχέση μεταξύ της μάζας που έχει μια στοίβα αδρανούς και του όγκου που καταλαμβάνει, περιλαμβανομένων των κενών μεταξύ των κόκκων. Κατά κανόνα είναι υψηλότερη στα λεπτόκοκκα αδρανή και χαμηλότερη στα χονδρόκοκκα.
- **Πυκνότητα των κόκκων των αδρανών:** αναφέρεται και ως πραγματική πυκνότητα και είναι η σχέση μεταξύ της μάζας και του συνολικού όγκου που καταλαμβάνουν οι κόκκοι, περιλαμβανομένων και των πόρων που δημιουργούνται. Οι πόροι της επιφάνειας θα περιλαμβάνονται στον παραπάνω όγκο, μόνο αν είναι τόσο μικροί, ώστε ο τσιμεντοπολτός να μη μπορεί να τους γεμίσει. Ο πιο σημαντικός παράγοντας που καθορίζει την πυκνότητα κόκκων είναι το πορώδες, αφού το στερεό υλικό έχει συγκεκριμένη πυκνότητα περίπου ίση με 2.7 g/cm^3 .

Η σχέση μεταξύ της φαινόμενης και της πραγματικής πυκνότητας στα ελαφροαδρανή, εξαρτάται από την κατανομή του μεγέθους και του σχήματος των κόκκων. Ελαφροαδρανή με στρογγυλεμένους και γωνιώδεις κόκκους, από το ίδιο υλικό (ίδιο ειδικό βάρος), μπορεί να έχουν φαινόμενες πυκνότητες που διαφέρουν μεταξύ τους πάνω από 80 kg/m^3 .**(14)**

1.6.5 Πορώδες και απορροφητικότητα ύδατος

Το βασικό χαρακτηριστικό των ελαφροαδρανών είναι το υψηλό πορώδες στο εσωτερικό τους, το οποίο προφανώς οδηγεί σε χαμηλό ειδικό βάρος.**(16)** Επιπλέον, η διεπιφανειακή ζώνη μεταξύ του τσιμεντοπολτού και των αδρανών, η οποία παίζει καθοριστικό ρόλο στην αντοχή και τη διαπερατότητα του ελαφροσκυροδέματος, επηρεάζεται σημαντικά από το πορώδες. Αφού λοιπόν, τα ελαφροαδρανή είναι πορώδη

υλικά με μεγάλη απορροφητικότητα, η διεπιφανειακή ζώνη σε αυτά διαφέρει από εκείνη του συμβατικού σκυροδέματος. Έχει περισσότερους πόρους, οι οποίοι οφείλονται στον σχηματισμό μεγάλων κρυσταλλικών προϊόντων (π.χ. πλακοειδείς κρύσταλλοι υδροξειδίου του ασβεστίου στη γειτνίαση των αδρανών με τους κόκκους τσιμέντου), είναι πιο στενή και χαρακτηρίζεται από το μηχανικό αλληλοκλείδωμα, σε συνδυασμό με τη χημική αλληλεπίδραση τσιμεντοπολτού/ελαφροαδρανών υπό τη μορφή ποζολανικής αντίδρασης.(20)

Το πορώδες και τα χαρακτηριστικά απορροφητικότητας επηρεάζουν σημαντικά τις ιδιότητες ανάμειξης και ενυδάτωσης του ελαφροσκυροδέματος. Ο ρυθμός και η ποσότητα του νερού που απορροφάται εξαρτάται από:

- το συνολικό πορώδες
- την κατανομή των πόρων
- τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας των σωματιδίων των ελαφροαδρανών
- την αρχική περιεχόμενη υγρασία

Τα θραυόμενα υλικά θα απορροφήσουν πιο γρήγορα νερό από τα μη θραυόμενα, εξαιτίας της μεγαλύτερης ειδικής επιφάνειάς τους. Αυτό ισχύει κυρίως για τα λεπτόκοκκα αδρανή, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι η συνολική ποσότητα νερού που απορροφάται από αυτά, είναι μεγαλύτερη από εκείνη των χονδροκόκκων. Η απορροφητικότητα των λεπτόκοκκων αδρανών οφείλεται κυρίως στην απορρόφηση νερού από την εξωτερική επιφάνειά των σωματιδίων και για μια μικρή ποσότητα νερού μόνο, εξαιτίας της εισαγωγής του στη δομή των πόρων.(14)

Τέλος, αναφέρεται ότι η απορροφητικότητα του ύδατος εξαρτάται περισσότερο από την “ενδοσύνδεση” μεταξύ των πόρων, παρά από το συνολικό πορώδες των ελαφροαδρανών.(14)

1.7 Κατηγορίες ελαφροσκυροδέματος

Η κατηγοριοποίηση του ελαφροσκυροδέματος γίνεται με διάφορους τρόπους, ανάλογα με τα κριτήρια που επιλέγονται.

Μια πρώτη κατηγοριοποίηση γίνεται με βάση την αντοχή και την πυκνότητα, και επομένως την χρήση του.

1. Η πρώτη κατηγορία ονομάζεται ΕΣ χαμηλής αντοχής, η οποία αντιστοιχεί σε ΕΣ χαμηλής πυκνότητας και χρησιμοποιείται κυρίως για μονωτικούς σκοπούς.
2. Η δεύτερη κατηγορία ονομάζεται ΕΣ μέτριας αντοχής και χρησιμοποιείται κυρίως σε κατασκευές πλήρωσης.
3. Η τρίτη κατηγορία είναι το ΕΣ υψηλής αντοχής ή δομικό ελαφροσκυρόδεμα, το οποίο με την κατάλληλη όπλιση χρησιμοποιείται στις κατασκευές ως φέρον στοιχείο.(21)

	Lightweight Concrete								
	Low-strength			Moderate-strength			Structural		
Density (kg/m ³)	250	500	750	1000	1250	1400	1500	1750	2000
Strength (N/mm ²)	(0.7-2)			(2-14)			(17-41)		
Aggregate	Vermiculite			Pumice			Fly Ash		
	Perlite			Scoria			Expanded Clay		
							Foamed Slag		
	Aerated Concrete								

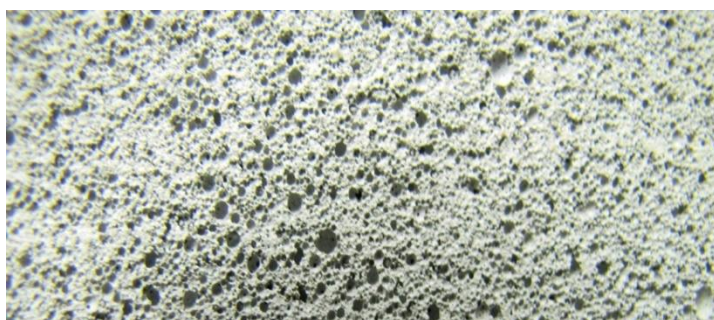
Πίνακας 1.2 Φάσμα ελαφροσκυροδεμάτων σύμφωνα με την πυκνότητα και την αντοχή τους(21)

Μια ακόμα κατηγοριοποίηση που γίνεται είναι αναλόγως τον τρόπο παρασκευής και τα συστατικά τους:(22),

1. Με ελαφρά αδρανή. Τα ΕΣ με ελαφρά αδρανή κατασκευάζονται συνήθως όπως τα κανονικά σκυροδέματα. Μέρος ή το σύνολο των συνήθων αδρανών αντικαθίσταται από αδρανή με αυξημένο πορώδες και σχετικά μικρό ειδικό βάρος. Όπως αναφέρθηκε και πριν τα αδρανή αυτά μπορεί να είναι φυσικά ή τεχνητά. Τα ΕΑ χρησιμοποιούνται με ή χωρίς την προσθήκη άμμου, ενώ το κονίαμα δεν περιέχει αέρα, εκτός από μικροποσότητες που υπεισέρχονται τυχαία κατά την ανάμειξη και δεν απομακρύνονται με τη συμπύκνωση, καθώς και τον περιεχόμενο αέρα στα αδρανή.
2. Τα ελαφροσκυροδέματα με εγκιβωτισμένο αέρα ή αέριο (κυψελωτά κονιοδέματα) παρασκευάζονται με την εισαγωγή φυσαλίδων διαμέτρου 0,1-1 mm. Η δημιουργία φυσαλίδων είναι αποτέλεσμα είτε εγκλωβισμού παραγόμενου από κάποια χημική αντίδραση αέρα (αεριοσκυρόδεμα), είτε εγκλωβισμού αέρα σε μορφή αφρού (αφροσκυρόδεμα). Στην 1^η περίπτωση εισάγεται στο νωπό τσιμεντοκονίαμα κάποιο χημικό πρόσθετο, που αντιδρά με το τσιμέντο και προκαλεί φυσαλίδες, συνήθως υδρογόνου ή οξυγόνου. Το αφροσκυρόδεμα παρασκευάζεται με την προσθήκη κατά την ανάμειξη ενός αφροποιοητικού υλικού και ενός σταθεροποιητή, ή με τη εισαγωγή στο κονίαμα αφρού, ο οποίος παρασκευάζεται σε ειδική συσκευή με ανάμειξη των συστατικών του. Τα κονιάματα αυτού του τύπου παρασκευάζονται χωρίς χονδρόκοκκα αδρανή, γεγονός που οδηγεί σε πολύ μικρή πυκνότητα. Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη κατηγοριοποίηση τα σκυροδέματα αυτά λόγω της μικρής πυκνότητας-αντοχής χρησιμοποιούνται μόνο για θερμομόνωση. Μια ειδική κατηγορία αυτού του είδους ελαφροσκυροδεμάτων είναι το κυψελοκονίαμα αυτοκλείστου (autoclaved cellular concrete ή autoclaved aerated concrete) το οποίο είναι ένα προκατασκευασμένο σκυρόδεμα που η συντήρηση του γίνεται κάτω από υψηλή θερμοκρασία σε αυτόκλειστο. Το αυτόκλειστο χρησιμοποιεί ατμό υψηλής πίεσης σε θερμοκρασία περίπου 180 °C με σκοπό την επιτάχυνση της ενυδατώσεως του σκυροδέματος. Με αυτόν τον τρόπο δίνονται μέσα σε 8 με 14 ώρες αντοχές ίσες με τις χαρακτηριστικές αντοχές των 28 ημερών κανονικής συντήρησης. Το κυψελοκονίαμα αυτοκλείστου

περιέχει μόνο λεπτόκοκκα αδρανή και αυτό που το διαφοροποιεί από το σκυρόδεμα με ελαφρά αδρανή είναι πως περιέχει πολύ μεγάλο αριθμό μικροσκοπικών κυψελίδων, οι οποίες δημιουργούνται κατά την παρασκευή του.

3. Χωρίς λεπτόκοκκα αδρανή (no fines concrete). Το σκυρόδεμα αυτό αποτελείται από τσιμέντο και χονδρόκοκκα αδρανή μόνο. Απαιτείται αφενός το 95% των χρησιμοποιούμενων αδρανών να διέρχονται από το κόσκινο τρύπας 20 χιλιοστών, αφετέρου λιγότερο από 10% να διέρχεται από το κόσκινο των 10 mm. Έτσι το αποτέλεσμα αυτής της κοκκοβαθμικής διαβάθμισης είναι το σκυρόδεμα να έχει πολλά ομοιόμορφα κατανεμημένα κενά στη μάζα του. Η πυκνότητα του είναι ίση με τα 2/3 η τα 3/4 της πυκνότητας κανονικού σκυροδέματος ίδιων υλικών. Χρησιμοποιείται σε φέροντα στοιχεία, τοποθετούμενο επί τόπου σε εσωτερικές ή εξωτερικές τοιχοποιίες, σε μη φέρουσες τοιχοποιίες και ως πλήρωση κάτω από το δάπεδο, για την επίτευξη συμπαγούς δαπέδου. **(22),(23)**



Εικόνα 1.18 Κυψελωτό κονιόδεμα



Εικόνα 1.19 Κυψελοκονιάμα αυτόκλειστου



Εικόνα 1.20 Σκυρόδεμα χωρίς λεπτόκοκκα αδρανή (no fines concrete).

Επίσης, τα ελαφροσκυροδέματα χωρίζονται και με βάση την προέλευση των αδρανών τους. Όπως αναφέρθηκε και εκτεταμένα προηγουμένως τα αδρανή μπορεί να είναι:

1. Φυσικής προελεύσεως, χωρίς επεξεργασία
2. Φυσικής προελεύσεως μετά από θερμική διεργασία
3. Επεξεργασμένα βιομηχανικά υποπροϊόντα

1.8 Ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα

Η μεγαλύτερη ευθραυστότητα και οι χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες του ΕΣ με ελαφροβαρή αδρανή, σε σχέση με το ΣΚΒ ίδιας θλιπτικής αντοχής, αποτελούν ανασταλτικούς παράγοντες στην εξάπλωση της χρήσης του στις κατασκευές ως δομικό υλικό.**(24)** Η αντιμετώπιση των παραγόντων αυτών επιτυγχάνεται με τη χρήση ινών στο μείγμα του ΕΣ κατά την ανάμιξη, όπως αποδεικνύεται από πλήθος ερευνών. Μάλιστα, λόγω της χαμηλής αντοχής του ελαφροσκυροδέματος σε εφελκυσμό, πολλές φορές η χρήση ινών έχει μεγαλύτερη ευεργετική επίδραση στο ελαφροσκυρόδεμα σε σχέση με το κανονικό σκυρόδεμα.**(26)** Οι ίνες αυτές μπορεί να είναι είτε από φυσικό υλικό, όπως το αμιάντο, το σιζάλ και κυτταρίνη, είτε από τεχνητά υλικά, όπως το γυαλί, ο χάλυβας, ο άνθρακας και το πολυμερές. Η ιδέα της χρήσης ινών για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών ενός υλικού χρονολογείται 5000 χρόνια πριν, όταν οι Αιγύπτιοι χρησιμοποιούσαν ίνες αμιάντου για την ενίσχυση των πήλινων δοχείων. Όμως, η συστηματική σύγχρονη μελέτη της συμπεριφοράς του ινοπλισμένου ΕΣ ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 60.**(24)** Η περισσότερη από την πραγματοποιήσα έρευνα αποδεικνύει πως η χρήση ινών δρα θετικά κυρίως στην πλαστικότητα, στην ανθεκτικότητα, στην ολκιμότητα μετά τη θραύση και τον περιορισμό των ρωγμών. Επιπρόσθετα, η τοποθέτηση ινών στο σκυρόδεμα συγκεκριμένα έχει αποδειχθεί πως αυξάνει την ολκιμότητα κατά τη θλίψη, τη σκληρότητα και την απορρόφηση ενέργειας κατά τις πρώτες μέρες του σκυροδέματος.**(24),(26)**

Από τα διάφορα είδη των ινών, οι ως επί το πλείστον χρησιμοποιούμενες για δομικούς (και μη) σκοπούς στο ελαφροσκυρόδεμα είναι οι μεταλλικές. Αυτό συμβαίνει λόγω της μεγαλύτερης οικονομικότητας τους, τις πολλές εγκαταστάσεις κατασκευής τους, των καλύτερων μηχανικών ιδιοτήτων κατά τη χρησιμοποίησή τους καθώς και της ανθεκτικότητας τους στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. **(24)**

Ειδική μνεία αξίζει να γίνει για το δραστικό περιορισμό των ρωγμών με τη χρήση ινών. Το σκυρόδεμα αποτελεί ένα ψαθυρό υλικό και με την αύξηση της αντοχής του αυξάνεται και η ψαθυρότητα του, κάνοντας το ιδιαίτερα ευάλωτο στην ανάπτυξη ρωγμών. Η ρωγμάτωση αυτή μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητα αποτελέσματα, όπως ο πρώιμος κορεσμός, απολέπιση και αποχρωματισμό του σκυροδέματος, καθώς και διάβρωση του περιεχόμενου χάλυβα οπλισμού. Έχει αποδειχθεί πως με τη χρήση χαλύβδινων ινών, μειώνεται τόσο το πλήθος των ρωγμών που σχηματίζονται καθώς και το άνοιγμα τους, ιδιαίτερα τις πρώτες μέρες του ελαφροσκυροδέματος. Επομένως, όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, το ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα είναι πιο ανθεκτικό στις κατασκευές σε

σχέση με το συμβατικό ελαφροσκυρόδεμα, διότι οι ίνες δρουν ανασταλτικά στην εξάπλωση των ρωγμών μέσα στο σκυρόδεμα.(24)

Το είδος των ινών (τύπος, μήκος, ίσιες ή με καμπυλωτό τελείωμα) και το κλάσμα όγκου τους έχουν σημαντική επίδραση στις ιδιότητες του ινοπλισμένου ΕΣ. Τα ινοπλισμένα υλικά μπορούν να περιγραφούν συναρτήσει του κλάσματος όγκου των περιεχόμενων ινών. Συγκεκριμένα όταν:

- Κλάσμα όγκου < 1% , τότε μικρή περιεκτικότητα σε ίνες
- 1% < κλάσμα όγκου < 2% , τότε μέτρια περιεκτικότητα
- 2% < κλάσμα όγκου, τότε μεγάλη περιεκτικότητα(24)

Είναι σημαντικό να αναφερθούν κάποια παραπάνω πράγματα συγκεκριμένα για τις μεταλλικές ίνες, καθώς αυτές είναι και οι πιο διαδεδομένες και επιπλέον θα εξεταστεί η χρησιμοποίησή τους στην παρούσα διπλωματική εργασία. Μετά από πολλά πειράματα είναι πλέον αποδεκτό πως μια περιεκτικότητα της τάξης του 1% με 1,5% σε μεταλλικές ίνες μπορεί να οδηγήσει σε διπλάσια αντοχή σε εφελκυσμό, σε υπερδιπλάσια αντοχή σε κάμψη, ενώ υπάρχει μικρή επίδραση στην θλιπτική αντοχή. Επιπλέον, με τη χρήση των ινών απορρέουν τα εξής οφέλη: αύξηση της αντοχής σε κρούση, μεγαλύτερη ανθεκτικότητα, απαιτείται περισσότερη ενέργεια για τη θραύση του, βελτίωση της συμπεριφοράς του υλικού μετά την υπέρβαση της αντοχής του και μείωση της ψαθυρότητας του υλικού. Εκτός όμως από οφέλη οι ίνες συνεπάγονται και ορισμένα μειονεκτήματα. Τα μειονεκτήματα αυτά είναι η μείωση του εργασίμου του νωπού σκυροδέματος και η αύξηση του βάρους του σκυροδέματος, λόγω του μεγάλου ίδιου βάρους του χάλυβα. Ένα ακόμα δευτερεύον μειονέκτημα είναι πως σε αρκετές περιπτώσεις απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος για το ανακάτεμα και την διάστρωση του σε σχέση με το απλό σκυρόδεμα.(24)



Εικόνα 1.21 Νωπό ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα

1.9 Τεχνικά χαρακτηριστικά Ελαφροσκυροδέματος - (ΕΣ) και σύγκριση του με το Σκυρόδεμα Κανονικού Βάρους - (ΣΚΒ) και το Ινοπλισμένο Ελαφροσκυρόδεμα (ΙΕΣ)

1.9.1 Θλιπτική αντοχή

Η παραγωγή του ελαφροσκυροδέματος γίνεται με μερική ή ολική αντικατάσταση των συμβατικών αδρανών με τα ελαφροαδρανή. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, αύξηση του περιεχόμενου ποσοστού σε ελαφροαδρανή, οδηγεί πάντα σε μείωση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος. Επιπλέον, και η αντικατάσταση της άμμου με λεπτόκοκκα αδρανή, ή γενικότερα η αύξηση του μεγέθους των ελαφροαδρανών οδηγούν σε μια σχετική μείωση της αντοχής. **(4),(14),(25)**

Έχοντας ως δεδομένο πως η κίσηρη ως αδρανές έχει γενικά μικρές αντοχές, σε σχέση με τα συνήθη αδρανή, η αντοχή του ΕΣ ως υλικό εξαρτάται κυρίως από τον τιμεντοπολτό και τα όρια αντοχής του ως συνδετικό υλικό. Παράλληλα, έχει αποδειχθεί μεταξύ άλλων από τους Zhang et al. (1995) και Newman (1993) ότι το άνω όριο της αντοχής του ΕΣ ελέγχεται πρωτίστως από την αντοχή του χρησιμοποιούμενου ΕΑ. **(4),(14)**

Η κίσηρη αποτελεί ένα υλικό χαμηλής αντοχής. Η διαφορά μεταξύ της δυνατότητας παραλαβής τάσης από τα ελαφροαδρανή και της αποκτούμενης αντοχής του ελαφροσκυροδέματος, αυξάνεται με τη μείωση της αντοχής του ελαφροαδρανούς. Επομένως στο ΚΔ, η αντοχή του εξαρτάται από την ικανότητα παραλαβής τάσεων του τιμεντοπολτού, δηλαδή να αναλαμβάνει τις μεγαλύτερες τάσεις χωρίς να αστοχεί. Αυτή η προσέλευση των μεγαλύτερων τάσεων από τον τιμεντοπολτό οφείλεται στο μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας του σε σχέση με την κίσηρη. **(4),(14)**

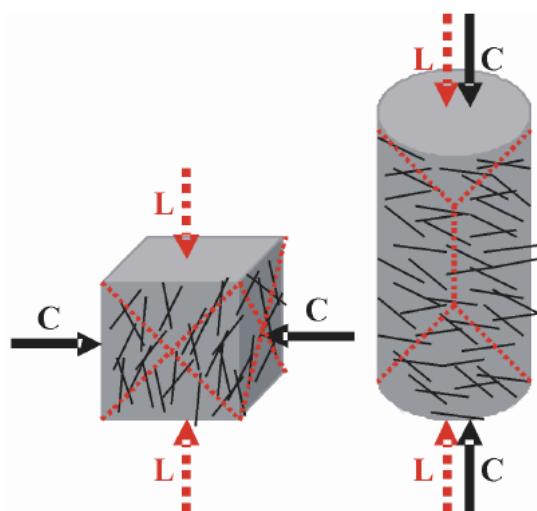
Γενικά, για την απόκτηση υψηλής αντοχής το ελαφροσκυρόδεμα απαιτεί την προσθήκη μεγαλύτερης ποσότητας τιμέντου, σε σύγκριση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Ειδικά στο ΚΔ, λόγω της χαμηλής αντοχής της κίσηρης, απαιτείται ακόμα περισσότερο ποσοστό περιεχόμενου τιμέντου. Βέβαια, στο κίσηρόδεμα η αύξηση της ποσότητας του τιμέντου οδηγεί σε μικρότερη αναλογικά αύξηση της θλιπτικής αντοχής του, σε σχέση με τα ΣΚΒ, διότι στο ΚΔ οι κόκκοι της κίσηρης είναι το πιο “αδύναμο” υλικό και όχι η τιμεντόπασα.

Τόσο ο Smeplass (1992), όσο και ο Rønne (1993) διαπίστωσαν πως δεν υπάρχει σημαντική αλλαγή της αντοχής στις περιπτώσεις των βρεγμένων και στεγνών αδρανών κατά την παραγωγή του ΕΣ. **(14)** Παρατηρήθηκε ακόμα, πως δεν εμφανίζεται το φαινόμενο της κλιμάκωσης της αντοχής σε σχέση με το μέγεθος του εξεταζόμενου δοκιμίου, σε αντίθεση με το ΣΚΒ. Η θλιπτική αντοχή στα μικρότερα κυλινδρικά δοκίμια είναι σχεδόν ίδια σε σχέση με τα κυλινδρικά δοκίμια μεγαλύτερων διαστάσεων, το οποίο οφείλεται στην καλύτερη ομοιογένεια του ΕΣ. **(26)**

Το ΕΣ χαρακτηρίζεται από ταχύτερη ανάπτυξη της αντοχής στο αρχικό στάδιο της σκλήρυνσης, φτάνοντας συνήθως στο 80% της χαρακτηριστικής αντοχής (28 ημερών) την 7^η ημέρα. Από εκεί και πέρα, η αύξηση της αντοχής είναι σχετικά μικρή και μειώνεται όσο

αυξάνεται η χαρακτηριστική αντοχή (f_{ick}), γεγονός που οφείλεται κατά πάσα πιθανότητα στη μειωμένη αντοχή των ΕΑ. Αυτή η μικρή αύξηση της αντοχής μακροπρόθεσμα στο ΕΣ είναι αρκετά αρνητική, καθώς μειώνεται ο παράγοντας της υπεραντοχής, ο οποίος είναι ιδιαίτερα ευεργετικός στις κατασκευές από ΣΚΒ. **(14), (25)**

Η προσθήκη ινών στο ΚΔ έχει αμελητέα διαφορά στη θλιπτική αντοχή του, όταν εξετάζεται σε κυβικά δοκίμια, ανεξάρτητα από το μέγεθος και την ηλικία των δοκιμίων. Αυτή η απουσία αύξησης της αντοχής στα κυβικά δοκίμια (Lucina Domangala) συμβαίνει και στο ΣΚΒ, όπως δείχνουν τα περισσότερα πειράματα (Balaguru and Shah 1992, "Fiber Reinforced Composites"). Αυτή η αδυναμία αύξησης της αντοχής του υλικού οφείλεται στο γεγονός, πως παρά τη μεγαλύτερη αντοχή των χαλύβδινων ινών, το περιεχόμενο ποσοστό ινών αυτών στο ΚΔ ($V_f < 2\%$) δεν επαρκεί για να αλλάξει τη συνολική αντοχή του ΚΔ. Μάλιστα αξίζει να σημειωθεί πως αν αυξηθεί η περιεκτικότητα σε χαλύβδινες ίνες είναι πιθανό να επέλθει μια μείωση της αντοχής, λόγω των ακατάλληλων ρεολογικών ιδιοτήτων του υλικού, που το εμποδίζουν να είναι συμπαγές και ομοιογενές. **(26)** Τα παραπάνω δεν ισχύουν στα κυλινδρικά δοκίμια. Ενώ στα κυβικά δοκίμια οι κατευθύνσεις χύτευσης και φόρτισης είναι κάθετες, στα κυλινδρικά είναι παράλληλες. Έτσι στα κυλινδρικά δοκίμια η θέση των ινών είναι πιο ευνοϊκή για το γεφύρωμα των ρωγμών που δημιουργούνται κατά τη φόρτιση. Επιπλέον, δεν πρέπει να αμεληθεί και η επιρροή των διαφορετικών πορειών αστοχίας λόγω των διαφορετικών σχημάτων των δοκιμίων (εικόνα 1.22). Επιπρόσθετα, η αύξηση της θλιπτικής αντοχής στα κυλινδρικά δοκίμια εξαρτάται τόσο από το ποσοστό της αντικατάστασης των συνηθισμένων αδρανών με κίσηρη, όσο και από το ποσοστό των περιεχόμενων ινών, όπως δείχνουν τα αποτελέσματα της έρευνας του Oğuz Akin Düzgün και των συνεργατών του, σχετικά με την αύξηση της θλιπτικής αντοχής του κίσηροδέματος ανάλογα με το ποσοστό αντικατάστασης κανονικών αδρανών με κίσηρη και ανάλογα με το περιεχόμενο ποσοστό του υλικού σε μεταλλικές ίνες. **(27)**



Εικόνα 1.22 . Επιρροή των μεταλλικών ινών στη δυνατότητα γεφύρωσης των ρωγμών κατά τη φόρτιση του σκυροδέματος κυβικών και κυλινδρικών δοκιμίων. C= διεύθυνση χύτευσης, L= διεύθυνσης φόρτισης (26)

Στον Ευρωκώδικα 2 (EC 2) δεν υπάρχει άμεση συσχέτιση μεταξύ της πυκνότητας του ΕΣ και της αντοχής του. Το άνω όριο της αντοχής σε θλίψη φέροντος ελαφροσκυροδέματος κατά τον Ευρωκώδικα 2 φτάνει τα 80 MPa.**(8)**

1.9.2 Εφελκυστική αντοχή

1.9.2.1 Εφελκυστική αντοχή σε κάμψη και διάρρηξη

Η εφελκυστική αντοχή του ΕΣ είναι σημαντική, όταν μελετάμε την ρηγμάτωση. Οι κύριες διαφορές μεταξύ ΕΣ και ΣΚΒ είναι οι εξής:

- Τροχιά ρωγμών: αυτές διέρχονται μέσα από τα σωματίδια των ΕΑ και όχι περιμετρικά τους, όπως στο ΣΚΒ (βλ. αναλυτικά «Δομή Ελαφροσκυροδέματος»).
- Συνολικό περιεχόμενο νερό: αυτό είναι συνήθως περισσότερο στο ΕΣ, επομένως η διαφορά υγρασίας μεταξύ του εσωτερικού του ΕΣ και της εξωτερικής επιφάνειάς του κατά την περίοδο της συντήρησης (και λόγω της μεγαλύτερης θερμοκρασίας ενυδάτωσης) θα προκαλέσει σημαντική μείωση της εφελκυστικής αντοχής.
- Η καμπτική εφελκυστική αντοχή επηρεάζεται περισσότερο από την αντοχή σε διάρρηξη (Newman, 1993)

Στον EC2 η καμπτική συμπεριφορά του ΕΣ θεωρείται κατώτερη από εκείνη του ΣΚΒ (Clarke, 1993). Στο νορβηγικό κανονισμό (NS 3473 E/1992) η εφελκυστική αντοχή μειώνεται με τον συντελεστή $0.3+0.7\rho/2400$, αν η εφελκυστική αντοχή δεν προσδιορίζεται πειραματικά. Σημειώνεται όμως, ότι για υψηλής αντοχής (της τάξεως των 80 MPa) ΤΣΚΒ-MNDC² η αντοχή σε διάρρηξη εμφανίζεται αυξημένη κατά 11% σε σύγκριση με το ΣΚΒ. Αυτό αποδίδεται στη βελτιωμένη επιφανειακή ζώνη αδρανών-τσιμεντοπολτού. Η αύξηση είναι ακόμα μεγαλύτερη στην άμεση εφελκυστική αντοχή (36%) σε αντίθεση με το τι είναι σύνηθες στους περισσότερους κανονισμούς για το ΕΣ (Hoff, 1995).**(14)**

Έχει παρατηρηθεί γενικότερα, ότι σε σύγκριση με το ΣΚΒ της ίδιας θλιπτικής αντοχής, το ΕΣ χαρακτηρίζεται από χαμηλότερη εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη και κάμψη, χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας και παραμέτρους θραύσης.**(26)** Η αντοχή σε διάρρηξη κάτω από μια συγκεντρωμένη γραμμή φορτίου δε διαφέρει σημαντικά από το ΣΚΒ. Όμως, η αντοχή των δοκιμών που υποβάλλονται σε έκκεντρα συγκεντρωμένα φορτία σχετίζεται με την πυκνότητα του σκυροδέματος (den Uijl et al., 1995). Η αναλογία μεταξύ καμπτικής αντοχής και αντοχής σε διάρρηξη ΕΣ υψηλής αντοχής βρέθηκε να είναι μεταξύ των τιμών 1.5 και 1.6 (Curcio et al., 1998).**(14)**

Σε πειράματα που διεξήχθησαν από την CUR (1995), δεν παρατηρήθηκε σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ ΕΣ και ΣΚΒ, όσον αφορά την αντοχή σε διάρρηξη επίπεδων πάνελ από ΕΣ και τις εγκάρσιες παραμορφώσεις λόγω του φορτίου.**(29)**

1.9.2.2 Επιρροή υγρασίας και συνθηκών συντήρησης

Η επιρροή της υγρασίας στις μηχανικές ιδιότητες μελετήθηκε από τον Hammer. **(30)** Μια γενική τάση για όλες τις μηχανικές ιδιότητες είναι η επιρροή της υγρασίας να μειώνεται με την αύξηση της αντοχής. Οι πιο σημαντικές επιρροές βρέθηκαν αναφορικά με

² Τροποποιημένο Σκυρόδεμα Κανονικού Βάρους- **Modified Normal Density Concrete**, σκυρόδεμα με αδρανή συνήθους πυκνότητας τα οποία έχουν τμηματικά αντικατασταθεί από ΕΑ

την εφελκυστική αντοχή. Συγκριτικά με την συντήρηση μέσα στο νερό, παρατηρήθηκε μείωση της εφελκυστικής αντοχής για ένα LC75, της τάξεως του 45-70% για συντήρηση στο περιβάλλον (αέρας) και 0-20% για συντήρηση σε αεροστεγές περιβάλλον. Μια παρόμοια ανάπτυξη υπήρξε και για την καμπτική αντοχή, αλλά οι μειώσεις ήταν προσεγγιστικά 10% μικρότερες.

Η αντοχή σε διάρρηξη που μετρήθηκε σε κύβους υπό συντήρηση σε στεγνό περιβάλλον έδειξαν μια μείωση της τάξεως του 10%, σε σχέση με την αντίστοιχη που μετρήθηκε σε κύβους υπό συντήρηση μέσα στο νερό. Για το λόγο αυτό συνήθως η εφελκυστική αντοχή του ΕΣ ορίζεται λίγο μικρότερη από την αντίστοιχη του ΣΚΒ.

1.9.2.3 Προσθήκη ινών από χάλυβα στη μάζα του ελαφροσκυροδέματος

Θα πρέπει να σημειωθεί αρχικά, ότι ο αριθμός των δημοσιεύσεων και μελετητικών προγραμμάτων για το ποια είναι η επίδραση των ινών στο ΕΣ και ποιες μπορεί να είναι οι εφαρμογές του κατασκευαστικού ινοπλισμένου ΕΣ, είναι σημαντικά λιγότερες από εκείνες για το ΣΚΒ. **(26)**

Εξαιτίας της μικρότερης εφελκυστικής αντοχής του ΕΣ και του γεγονότος ότι πρόκειται για ένα πιο εύθραυστο κατασκευαστικό υλικό, η προσθήκη των ινών από χάλυβα αυξάνει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητές του, ιδίως την εφελκυστική αντοχή, την αντοχή σε θραύση και την αντισεισμική συμπεριφορά του.**(26),(28)** Η αποδοτικότητα της προσθήκης ινών στο ΕΣ, εξαρτάται κυρίως από:

1. Το είδος των ΕΑ που χρησιμοποιούνται
2. Τον τύπο των ινών από χάλυβα (ευθείς ή με άγκιστρο στα άκρα, με μήκος από 5 έως 50 mm)
3. Το ποσοστό όγκου των ινών (0.5-2.0% κατ' όγκο).**(26)**

Σε αντίθεση με την θλιπτική αντοχή του ΕΣ, που όπως αναφέρθηκε προηγουμένως δεν αυξάνει σημαντικά με την προσθήκη των ινών από χάλυβα, η εφελκυστική αντοχή τόσο σε κάμψη, όσο και σε διάρρηξη, βελτιώνονται αρκετά. Ο λόγος που η καμπτική εφελκυστική αντοχή αυξάνει, οφείλεται στο γεγονός ότι μόλις το σκυρόδεμα εμφανίσει ρωγμές, οι ίνες αναλαμβάνουν το φορτίο που προκάλεσε τη ρωγμάτωση, μέσω της διεπιφανειακής σύνδεσης που έχουν αναπτύξει με το ΕΣ. Οι Swamy και Mangat κατέληξαν σε μία γραμμική σχέση μεταξύ του όγκου των ινών στο ΕΣ και της εφελκυστικής αντοχής σε κάμψη και συμπέραναν ότι η επίδραση των ινών στην αύξηση της αντοχής του ΕΣ είναι σημαντικότερη στο ΕΣ από ότι στο ΣΚΒ.**(28)** Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η καμπτική εφελκυστική αντοχή τόσο του απλού, όσο και του ινοπλισμένου ΕΣ εξαρτάται από τον όγκο του στοιχείου. Όσο μεγαλύτερο είναι το στοιχείο, τόσο μικραίνει η καμπτική εφελκυστική αντοχή του. Βέβαια, στην περίπτωση του ινοπλισμένου ΕΣ η επίδραση του μεγέθους είναι μικρότερη, αφού η ενσωμάτωση των ινών βελτιώνει την ολκιμότητα του υλικού.**(31)**

Οι Gao, Sun και Morino επισήμαναν ότι η εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη αυξάνει σχεδόν γραμμικά με την αύξηση του όγκου των ινών από χάλυβα στο ΕΣ.**(28)** Ενώ, οι Balaguru και Foden, οι οποίοι μελέτησαν το ινοπλισμένο σκυρόδεμα με διάφορα λεπτόκοκκα ΕΑ, συμπέραναν ότι η εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη βελτιώνεται

περισσότερο στο ΕΣ από ότι στο ΣΚΒ. Γενικότερα πάντως, για τον ίδιο τύπο και όγκο ινών, η εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη αυξάνεται περισσότερο στο ΕΣ από ότι στο ΣΚΒ.(31)

Είναι λοιπόν εύκολα αντιληπτό, ότι η ευεργετική επίδραση των ινών στις μηχανικές ιδιότητες του ΕΣ είναι πιο ουσιαστική σε σύγκριση με αυτή του ΣΚΒ ίδιας θλιπτικής αντοχής.(26)

1.9.3 Διατμητική αντοχή

Η αντοχή σε διάτμηση ΕΣ υψηλής αντοχής μπορεί να προβλεφθεί ικανοποιητικά ως τροποποιημένη αντοχή σε εφελκυσμό, όμως για ΟΕΣ (Ολικό Ελαφροσκυρόδεμα, δηλαδή σκυρόδεμα στο οποίο το σύνολο των αδρανών έχει αντικατασταθεί από ελαφροαδρανή χαμηλής αντοχής) η αντοχή σε διάτμηση συνήθως υπερεκτιμάται.(14) Ο Thorenfeldt (1995) έκρινε πως η ψαθυρότητα του σκυροδέματος θα πρέπει να εισαχθεί σαν μια νέα παράμετρος στους κανονισμούς, κάτι που υιοθετήθηκε πχ. από τον EC-2.(32) Το προσομοίωμα δικτυώματος με μεταβλητή γωνία θλιπτήρων είναι εφαρμόσιμο και στο ΕΣ. Δεν υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ της διατμητικής συμπεριφοράς του ΣΚΒ και του ΕΣ. Στο ΕΣ, παρά τα σπασμένα ΕΑ, υπεύθυνο για τη μετάδοση των διατμητικών δυνάμεων είναι το ακανόνιστο σχήμα των σπασμένων πλευρών. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι οι διατμητικές παραμορφώσεις στο ΕΣ ήταν σχεδόν διπλάσιες από εκείνες του ΣΚΒ (Walraven et al., 1995).(14) Ωστόσο, σύμφωνα με τον Thorenfeldt (1995) η αντίσταση στη διατμητική ολίσθηση κατά μήκος της επιφάνειας της ρωγμής είναι χαμηλότερη στο ΕΣ.(32)

Η αντοχή σε διάτμηση δοκών από ΟΕΣ χωρίς οπλισμό διάτμησης μελετήθηκε από τον Thorenfeldt (1995).(32) Τα συμπεράσματα ήταν ότι η αντοχή σε διάτμηση ενός ΟΕΣ με πυκνότητα 1500 kg/m^3 ήταν μικρότερη από την αναμενόμενη, ειδικά σε σύγκριση με άλλα ΕΣ και ΣΚΒ. Μελέτες που πραγματοποιήθηκαν από το CUR το 1995 ανέφεραν μια μέση διατμητική αντοχή δοκών από ΕΣ με οπλισμό διάτμησης μόνο 7% μικρότερη από εκείνη του ΣΚΒ με ίδια θλιπτική αντοχή, με βάση διαγώνιο θλιπτήρα 45° .(14)

1.9.3.1 Διατμητική αντοχή ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος

Παρόλο που υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός μελετών πάνω στα φέροντα στοιχεία από ινοπλισμένο ΣΚΒ και έχουν διεξαχθεί πειράματα από πολλούς ερευνητές τις τελευταίες δεκαετίες, οι μελέτες πάνω στη μηχανική συμπεριφορά και συνεπώς στη διατμητική αντοχή δομικών στοιχείων από ινοπλισμένο ΕΣ είναι περιορισμένες. (33)

Η προσθήκη ινών από χάλυβα στο ΣΚΒ είναι γνωστό ότι αυξάνει τη διατμητική και καμπτική αντοχή και προσδίδει μία πιο όλκιμη συμπεριφορά στο υλικό όταν το ποσοστό όγκου των ινών είναι τουλάχιστον 1%. Αυτό συμβαίνει, επειδή η προσθήκη των ινών κάνει το σκυρόδεμα πιο ομογενές και ισότροπο με αποτέλεσμα να μετατρέπεται από ψαθυρό σε πιο όλκιμο υλικό. Όταν το σκυρόδεμα ρηγματώνεται, οι τυχαία διασκορπισμένες ίνες από χάλυβα εμποδίζουν την ανάπτυξη του μικρομηχανισμού ρηγμάτωσης και περιορίζουν την εξάπλωσή του, βελτιώνοντας έτσι την αντοχή και την ολκιμότητα.(27) Μία παρόμοια βελτίωση με την προσθήκη των ινών αναμένεται και στο ΕΣ. Ωστόσο, η εφαρμογή του ελάχιστου ποσοστού όγκου ινών από χάλυβα (0.75%) στο ΕΣ, σύμφωνα με το ACI 318-08, είναι αμφισβητήσιμη εξαιτίας της έλλειψης δεδομένων.(34)



Εικόνα 1.23 Ίνες από χάλυβα οι οποίες εμποδίζουν το άνοιγμα ρωγμών κατά τη διάρκεια δοκιμής σε διάτμηση

Οι Kang, Kim, Kwak και Hong μελέτησαν τη διατμητική αντοχή δοκών από ινοπλισμένο ΕΣ χωρίς οπλισμό διάτμησης με παραμέτρους το ποσοστό όγκου των ινών (V_f) και το λόγο ανοίγματος προς ενεργό βάθος της δοκού (a/d). Από πειράματα που πραγματοποίησαν κατέληξαν ότι:

1. Η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων και της διατμητικής αντοχής είναι μεγαλύτερη στο ΣΚΒ από ότι στο ΕΣ ίδιας θλιπτικής αντοχής. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας συντελεστής μετατροπής λ για τη διατμητική αντοχή σχεδιασμού του ΕΣ.
2. Η προσθήκη των ινών βελτίωσε την ολκιμότητα και το μετρήσιμο φορτίο διάτμησης σε διαγώνια ρηγμάτωση V_{cr} , κατά 35% κατά μέσο όρο. Το πιο σημαντικό όμως ήταν ότι παρατηρήθηκε αλλαγή στη μορφή αστοχίας με την αύξηση του όγκου των ινών, από ψαθυρή σε όλκιμη.
3. Ο λόγος a/d επηρεάζει δυσμενώς τη διατμητική συμπεριφορά των δοκών από ινοπλισμένο ΕΣ και μάλιστα περισσότερο από ότι στο ΣΚΒ. **(33)**

Επίσης, οι Swamy, Jones και Chiam μελέτησαν την επίδραση των ινών από χάλυβα στη διατμητική αντίσταση δοκών Ι από ΕΣ και εκτίμησαν την αποτελεσματικότητά τους ως οπλισμός διάτμησης. Από τα πειράματα που διεξήχθησαν διαπιστώθηκε ότι οι ίνες μειώνουν σημαντικά τις παραμορφώσεις των δοκών σε όλα τα επίπεδα φόρτισης, ελέγχουν τη διατμητική ρηγμάτωση, μειώνουν το θρυμματισμό στην επιφάνεια και βοηθούν στη διατήρηση της ολκιμότητας και της συνολικής ακεραιότητας του δομικού μέλους. Τέλος, η απόλυτη διατμητική αντοχή αυξήθηκε από 60 έως και 200%.

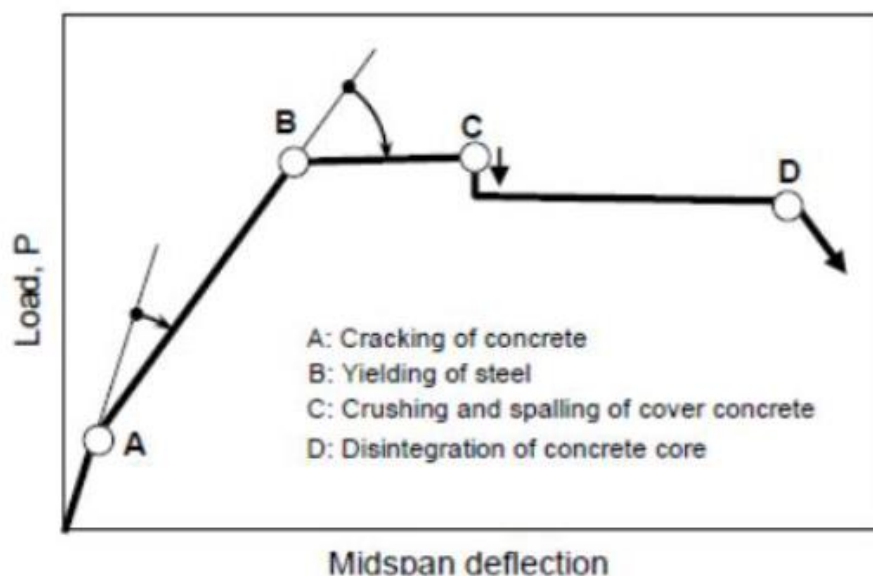
1.9.4 Μέτρο ελαστικότητας και σχέση τάσης-παραμόρφωσης

Το μέτρο ελαστικότητας εξαρτάται από τα μέτρα ελαστικότητας των επιμέρους συστατικών του μείγματος, την αναλογία μεταξύ τους και το δεσμό μεταξύ αδρανών και τσιμεντοπολτού. Καθώς το ποσοστό των αδρανών στο ΕΣ είναι μεγάλο και σε συνδυασμό με το μικρό μέτρο ελαστικότητας των περισσότερων ΕΑ, το ΕΣ έχει συνήθως μικρότερο μέτρο σε σύγκριση με το ΣΚΒ (Zhang et al., 1995). **(14)** Εξαιτίας του μεγάλου ποσοστού όγκου που καταλαμβάνουν γενικά τα ΕΑ (αποτελούν το 70 με 80% του όγκου στο τσιμέντο Portland), έχουν σημαντική επίδραση στο μέτρο ελαστικότητας και αναμένεται να επηρεάσουν και τις υπόλοιπες ιδιότητες του ΕΣ. Οι Chi, Huang, Yang και Chang μελέτησαν την επίδραση των

ιδιοτήτων των ΕΑ στην αντοχή του ΕΣ και μετά από πειράματα διαπίστωσαν, ότι τόσο τα χαρακτηριστικά των ΕΑ όσο και η αναλογία νερού, αποτελούν δύο σημαντικούς παράγοντες που καθορίζουν το μέτρο ελαστικότητας και τη θλιπτική αντοχή του ΕΣ.**(16)** Το μέτρο ελαστικότητας ΕΣ με χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα ΕΑ θα είναι μικρότερο από εκείνο ενός ΕΣ με χονδρόκοκκα ΕΑ αλλά φυσικά λεπτόκοκκα αδρανή (Newman, 1993).**(14)**

Σύμφωνα με τον Smerglass (1992) για υψηλής αντοχής ΕΣ κατηγορίας LC60 έως LC90 και αναλογία νερού από 0.32 έως 0.43, το μέτρο ελαστικότητας είναι μειωμένο κατά 20-30% συγκριτικά με το ΣΚΒ. Ακόμα και με μείωση της αναλογίας νερού δεν παρατηρείται μεταβολή στο μέτρο ελαστικότητας. Φαίνεται να υπάρχει καλή συσχέτιση μεταξύ του μέτρου ελαστικότητας και της θλιπτικής αντοχής (Hammer et al., 1995). Με το ίδιο συμπέρασμα συμφωνεί και η μελέτη του Curcio et al. (1998). Τα πειραματικά αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι ο τύπος των ΕΑ δεν έχει σημαντική επίδραση παρά μόνο στη θλιπτική αντοχή.**(14)**

Η σχέση τάσης-παραμόρφωσης στο ΕΣ γενικά χαρακτηρίζεται από ένα πιο γραμμικό ανοδικό τμήμα, περιορισμένο πλαστικό τμήμα και πιο απότομο καθοδικό κλάδο, σε σχέση με το ΣΚΒ.**(14)**



Εικόνα 1.24 Σχηματικό διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης. A: Ρηγμάτωση σκυροδέματος, B: Διαρροή χάλυβα οπλισμού, C: Θρυμματισμός επιφάνειας σκυροδέματος, D: Αποσάθρωση πυρήνα σκυροδέματος (12)

Αυτή η γραμμική, ψαθυρή συμπεριφορά συνήθως γίνεται πιο έντονη με την αύξηση της θλιπτικής αντοχής. Αυτό θα γίνει επίσης φανερό και σε ΕΣ μέσης αντοχής, αν τα ΕΑ μέσης πυκνότητας συνδυαστούν με τιμμεντοποπλό υψηλής αντοχής (Thorenfeldt, 1995). Η πιο ψαθυρή σχέση τάσης-παραμόρφωσης για το ΕΣ, που έχει επισημανθεί και από τους Curcio et al. (1998), μπορεί πιθανώς να αποδοθεί στη μεγαλύτερη συμβατότητα μεταξύ των σωματιδίων των ΕΑ και του τιμμεντοειδούς περιβλήματός του (βλ. αναλυτικά «Δομή

Ελαφροσκυροδέματος»). Στην περίπτωση του ΣΚΒ, ο σχηματισμός και η διάδοση μικρορηγματώσεων, 2-5 μm , έχουν ήδη αναγνωριστεί ως η αιτία αστοχίας του σκυροδέματος και η αξιοπρόσεκτη μη γραμμικότητα των καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης, ειδικά κοντά στο μέγιστο δυνατό επίπεδο έντασης. Αν και κάποιες από αυτές τις ασυνέχειες προϋπάρχουν λόγω της συρρίκνωσης του νωπού σκυροδέματος, ο σχηματισμός των μικρορηγματώσεων οφείλεται κυρίως στη συγκέντρωση τάσεων και παραμορφώσεων, λόγω της ασυμβατότητας των μέτρων ελαστικότητας των αδρανών και του τσιμεντοπολτού. Η διαδικασία ρηγμάτωσης στο ΣΚΒ ξεκινά με μία σταθερή φάση αρχικής ρηγμάτωσης και συνεχίζεται με μία σταθερή φάση διάδοσης που ακολουθείται από ασταθή φάση διάδοσης. Στο ΕΣ, η φάση της αρχικής σταθερής ρηγμάτωσης παρατείνεται και το ασταθές στάδιο μειώνεται κι έτσι η πλήρης διάσπαση συμβαίνει απότομα στο μέγιστο (Newman, 1993). Σύμφωνα με τον Smerlass (1998), η σχεδόν τέλεια γραμμικότητα των διαγραμμάτων τάσης-παραμόρφωσης του ΕΣ, μεταφράζεται σε μείωση τόσο της σταθερής φάσης, όσο και της ασταθούς φάσης αρχικής ρηγμάτωσης.(14)

Η μικρότερη δυσκαμψία των σωματιδίων των ΕΑ και συχνά το υψηλό ποσοστό τσιμέντου, οδηγούν σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις (Newman, 1993). Μια μείωση των μεγάλων αυτών παραμορφώσεων συμβαίνει λόγω του μικρότερου ιδίου βάρους και του υψηλότερου λόγου μέτρων ελαστικότητας ($E_{\text{steel}}/E_{\text{LC}}$), η οποία αυξάνει την ισοδύναμη ροπή αδρανείας της ρηγματωμένης διατομής. Στο προεντεταμένο σκυρόδεμα όμως, δεν υφίστανται αυτές οι ευνοϊκές συνθήκες, καθώς η μικρότερη δυσκαμψία οδηγεί σε μεγαλύτερες καμπυλώσεις και μικρότερη ανακούφιση αναμένεται επειδή τα μόνιμα φορτία είναι γενικά χαμηλότερα (Bardhan-Roy, et al., 1995).(14)

1.9.4.1 Μέτρο ελαστικότητας και σχέση τάσης-παραμόρφωσης ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος

Το μέτρο ελαστικότητας εξαρτάται από τη θλιπτική αντοχή. Αφού λοιπόν η προσθήκη ινών από χάλυβα αυξάνει τη θλιπτική αντοχή του ΕΣ, θα αυξάνει και το μέτρο ελαστικότητάς του.(27) Οι Gao, Sun και Morino μελέτησαν τις μηχανικές ιδιότητες του ινοπλισμένου ΕΣ υψηλής αντοχής και επισήμαναν την επίδραση του ποσοστού όγκου (V_f) των ινών και του λόγου διαστάσεών τους (l_f/d_f) στο μέτρο ελαστικότητας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το μέτρο ελαστικότητας του ΕΣ είναι μικρότερο από εκείνο του ΣΚΒ, αφού τα ΕΑ είναι πιο πορώδη υλικά, έχουν μικρότερη αντοχή και καταλαμβάνουν μεγάλο ποσοστό του όγκου του μείγματος. Ωστόσο, με την προσθήκη των ινών στο ΕΣ, το μέτρο ελαστικότητας σταδιακά αυξάνεται με την αύξηση του όγκου των ινών και αυτό οφείλεται κυρίως στο μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας των ινών από χάλυβα και στη μείωση του αριθμού των ρωγμών λόγω συρρίκνωσης του νωπού σκυροδέματος, εξαιτίας της αντίστασης που προβάλλουν οι ίνες στη ρηγμάτωση. Αναφέρεται επίσης, ότι με την προσθήκη των ινών στο ΕΣ ο λόγος Poisson τείνει να μειωθεί. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην επίδραση της αντίστασης των ινών στην παραμόρφωση.(28)

Η προσθήκη των ινών αυξάνει την παραμόρφωση που πραγματοποιείται για τη μέγιστη τάση. Η παραμορφωσιμότητα αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση του όγκου των ινών στο μείγμα. Τόσο ο ανοδικός, όσο και ο καθοδικός κλάδος του διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης επηρεάζονται από την προσθήκη ινών. Ωστόσο, σημαντικότερη είναι η επίδραση στον καθοδικό κλάδο του διαγράμματος, όπου η κλίση του μειώνεται με την

αύξηση του όγκου των ινών στο μείγμα (θεωρώντας το λόγο διαστάσεων των ινών σταθερό).(27)

1.9.5 Εργασιμότητα

1.9.5.1 Εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος

Σύμφωνα με το ASTM C125 ως εργασιμότητα ορίζεται “ Η ιδιότητα που καθορίζει το έργο (προσπάθεια) που απαιτείται για τη μεταχείριση μιας ποσότητας νωπού σκυροδέματος με την ελάχιστη δυνατή απώλεια ομοιογένειας.”(35) Η ποιότητα του ΕΣ εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος κατά τη μεταφορά, την τοποθέτηση, την συμπύκνωση και την ενοποίηση. Το σκυρόδεμα είναι ένα περίπλοκο υλικό και οι ιδιότητες του στη νωπή κατάσταση επιδρούν άμεσα στις αντίστοιχες ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος. Ο ορισμός της εργασιμότητας περιλαμβάνει τη χρήση των όρων: σταθερότητα, συμβατότητα και κινητικότητα.(36) Η προσπάθεια που απαιτείται για την τοποθέτηση ενός μείγματος σκυροδέματος καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το συνολικό έργο που χρειάζεται για να ξεκινήσει και να διατηρηθεί η ροή. Αυτό εξαρτάται από τις ρεολογικές ιδιότητες του τσιμεντοπολτού, από την εσωτερική τριβή μεταξύ των αδρανών και από την εξωτερική τριβή μεταξύ του σκυροδέματος και του ξυλότυπου. Η συνοχή, η οποία συχνά προκύπτει από μετρήσεις κάθισης, χρησιμοποιείται σαν ένας απλός δείκτης της κινητικότητας και της ρευστότητας του νωπού σκυροδέματος.(37) Η προσπάθεια που απαιτείται για τη συμπύκνωση του σκυροδέματος διέπεται από τα ρεολογικά χαρακτηριστικά και την ευκολία με την οποία μπορούν να μειωθούν τα κενά, χωρίς να χαθεί η σταθερότητα υπό πίεση. Η σταθερότητα είναι ένας δείκτης, τόσο για την κατακράτηση νερού, όσο και για την περιεχόμενη ποσότητα χονδρόκοκκων αδρανών στο μείγμα του σκυροδέματος. Η ποιοτική ερμηνεία αυτών των χαρακτηριστικών καλύπτεται γενικά από τον όρο της συνεκτικότητας.(38) Έτσι λοιπόν, η συνεκτικότητα περιγράφει την ευκολία ροής, ενώ η συνοχή την τάση αντίστασης στο διαχωρισμό του σκυροδέματος. Επομένως η εργασιμότητα είναι μία ιδιότητα του υλικού που περιγράφεται τουλάχιστον από δύο χαρακτηριστικά.

1.9.5.2 Εργασιμότητα ελαφροσκυροδέματος

Όσον αφορά το ΕΣ, οι ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος και η ποιότητα του, καθορίζονται από το στάδιο παραγωγής και επομένως η εργασιμότητα, περιλαμβανομένων της συνοχής και της συνεκτικότητας του νωπού σκυροδέματος, δεν μπορούν να παραβλέπονται. Σημειώνεται ότι η διαβάθμιση των ΕΑ παίζει σπουδαίο ρόλο στη εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος. Ενώ, η προσθήκη υπερρρευστοποιητή και προσμίξεων που επιτρέπουν την εισαγωγή αέρα στο μίγμα, βελτιώνουν την εργασιμότητα, μειώνοντας το διαχωρισμό στο νωπό σκυρόδεμα.(39)

Όταν χρησιμοποιούνται ΕΑ με σημαντικά χαμηλότερη πυκνότητα από εκείνη του τσιμεντοπολτού, είναι πιθανό να συμβεί ένας προς τα άνω διαχωρισμός των χονδρόκοκκων αδρανών. Αντίθετα με το ΣΚΒ, όπου τα χονδρόκοκκα αδρανή συνήθως διαχωρίζονται και καθιζάνουν. Ακόμη, για το ΕΣ απαιτείται μεγαλύτερη ενέργεια δόνησης από ότι στο ΣΚΒ για αποτελεσματική συμπύκνωση.(40) Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο ΕΣ τα ΕΑ δρουν ως “προστατευτικά μαξιλάρια” κατά τη διάρκεια της δόνησης. Στην πράξη, το ΕΣ χάνει την εργασιμότητα του πιο γρήγορα σε σχέση με το ΣΚΒ, λόγω της μεγαλύτερης

απορροφητικότητας νερού των ΕΑ (εάν δε χρησιμοποιούνται προ-εμποτισμένα αδρανή). Όπως και στο ΣΚΒ, έτσι και στο ΕΣ η εργασιμότητα εκτιμάται κυρίως χρησιμοποιώντας εμπειρικές μεθόδους δοκιμών. Παρόλο που οι δοκιμές αυτές είναι έγκυρες και για το ΕΣ, η συνοχή που εκτιμάται από αυτές τις μεθόδους είναι γενικά υποτιμημένη, λόγω του σχήματος των αδρανών και της πυκνότητας του σκυροδέματος.**(41)** Εξαιτίας της χαμηλότερης πυκνότητας των ΕΑ, το ΕΣ δε καθιζάνει τόσο πολύ όσο το ΣΚΒ ίδιας εργασιμότητας.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι παρόλο που υπάρχουν πολλές δημοσιεύσεις σχετικά με τη ρεολογία του ΣΚΒ, η βιβλιογραφία για τη ρεολογία του ΕΣ και οι γνώσεις σχετικά με την εργασιμότητα του είναι αρκετά περιορισμένες. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στις δυσκολίες καθορισμού των ακριβών αναλογιών ανάμειξης.

1.9.5.3 Εργασιμότητα ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος

Είναι γενικά πλέον αποδεκτό, ότι όπως και στο ΣΚΒ, η εργασιμότητα του ινοπλισμένου ΕΣ είναι περίπλοκη και επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, οι σημαντικότεροι από τους οποίους είναι:

- Το μέγεθος των ινών
- Ο λόγος διαστάσεων των ινών που χρησιμοποιούνται
- Το ποσοστό όγκου που καταλαμβάνουν οι ίνες

Όπως συμβαίνει και στο ΣΚΒ έτσι και στο ΕΣ, αναμείξεις με ίνες είναι λιγότερο συμβατές και εργάσιμες από αντίστοιχες που δεν περιέχουν ίνες.

Οι συνήθεις δοκιμές εργασιμότητας, όπως η δοκιμή κάθισης και η δοκιμή του συντελεστή συμπίκνωσης, εφαρμόστηκαν στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα και διαπιστώθηκε ότι τόσο η δοκιμή κάθισης, όσο και η δοκιμή του συντελεστή συμπίκνωσης δε μπορούν να θεωρηθούν ικανοποιητικές για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Πρόσφατα, έγιναν κάποιες μετατροπές στις υπάρχουσες δοκιμές εργασιμότητας και επανεκτιμήθηκε η εφαρμογή τους. Τα χαρακτηριστικά ροής του ινοπλισμένου σκυροδέματος ενισχύθηκαν με τη μερική αντικατάσταση του τιμέντου από ΕΑ και οι δοκιμές έδειξαν ότι μπορεί να επιτευχθεί τέλεια συμβατότητα, παρόλο που οι συμβατικές μέθοδοι δοκιμών εργασιμότητας υποδεικνύουν όχι και τόσο συμβατά μείγματα.**(42)**

Η επιτροπή 544 του ACI (American Concrete Institute) πρότεινε μία διαδικασία δοκιμής γνωστή ως Δοκιμή Ανεστραμμένου Κώνου Καθίζησης (Inverted Slump Cone Test) για τη μέτρηση της κινητικότητας ή της ρευστότητας των νωπών ινοπλισμένων μειγμάτων, η οποία λαμβάνει υπόψη την επίδραση των αδρανών και τις ιδιότητες των ινών, καθώς και την αλληλεπίδρασή τους.**(43)** Ωστόσο, η εμπειρία από αυτή τη δοκιμή είναι αρκετά περιορισμένη.

Προφανώς, το ινοπλισμένο ΕΣ είναι λιγότερο εργάσιμο από το μη ινοπλισμένο και η εργασιμότητα του εξαρτάται κυρίως από το σχήμα και το λόγο διαστάσεων των ινών που χρησιμοποιούνται. Τέλος, αναφέρεται ότι γενικά η συμβατότητα των ινοπλισμένων ΕΣ που περιέχουν την ίδια ποσότητα και τύπο ινών, μειώνεται όσο αυξάνεται η αντοχή σχεδιασμού.**(42)**

1.9.6 Κόπωση

Μία εμπειριστατωμένη έρευνα από δοκιμές υπό επαναλαμβανόμενο θλιπτικό φορτίο έδειξε ότι το ΕΣ με πυκνότητα κάτω από 1500 kg/m^3 έχει την ίδια ευαισθησία σε κόπωση που έχει το ΣΚΒ (Owens, 1993) και μερικές φορές έχει και ελαφρά καλύτερη συμπεριφορά (Waagaard et al., 1987). Επίσης, υπάρχει μικρή διαφορά στις καμπύλες S-N του ΕΣ και του ΣΚΒ υψηλής αντοχής (Thorenfeldt, 1995).

Η δυναμική συμπεριφορά όσον αφορά τα καμπτικά χαρακτηριστικά μιας γέφυρας μεγάλων ανοιγμάτων, ηλικίας 31 ετών, από ΕΣ επαλήθευσε τα συμπεράσματα των εργαστηριακών πειραμάτων. Το ΕΣ συμπεριφέρθηκε εξίσου καλά και σε πολλές περιπτώσεις ακόμα καλύτερα από το ΣΚΒ (Brown et al., 1995). Είχε προταθεί ότι η βελτιωμένη συμπεριφορά οφειλόταν στην ελαστική συμβατότητα των σωματιδίων του ΕΣ και της περιβάλλουσας τσιμεντόπαστας. Στο δομικό ΕΣ, τα Μέτρα Ελαστικότητας των συστατικών φάσεων είναι σχετικά όμοια, ενώ στο ΣΚΒ το Μέτρο Ελαστικότητας των αδρανών μπορεί να είναι και 5 φορές μεγαλύτερο από εκείνο του περιβάλλοντος πολτού (Bremner et al., 1984).

Πληροφορίες που συγκεντρώθηκαν από το CEB δείχνουν ότι η αντοχή σε κόπωση του ΕΣ υπό επαναλαμβανόμενη εφελκυστική τάση είναι ίδια ή ελαφρά υψηλότερη από εκείνη του ΣΚΒ, ενώ η αντοχή σε κόπωση υπό εφελκυστικές-θλιπτικές εντατικές καταστάσεις είναι ελαφρά χαμηλότερη (Owens, 1993).

Ένα συμπέρασμα, που διατυπώθηκε ως προτεινόμενη διαδικασία και βασίζεται σε μία σειρά δοκιμών σε σκυρόδεμα υψηλής αντοχής με κανονική πυκνότητα και ελαφροαδρανή, βρίσκεται στο Dyngeland et al. (1994). Στην ίδια μελέτη διαπιστώθηκε ότι δεν υπάρχει σημαντική διαφορά που να αφορά στην κόπωση μεταξύ ΣΚΒ και ΕΣ. Το συμπέρασμα αυτό είναι πολύ χρήσιμο για υψηλής αντοχής σκυρόδεμα με ελαφροαδρανή από διογκούμενη άργιλο. **(14)**

Όσον αφορά το ινοπλισμένο ΕΣ με ίνες από χάλυβα, δεν υπάρχουν ακόμα αρκετά δεδομένα σχετικά με την αντοχή του σε κόπωση καθώς έχουν πραγματοποιηθεί ελάχιστες έρευνες και πειράματα.

1.9.7 Ανθεκτικότητα

Η ανθεκτικότητα ορίζεται στον Ευρωκώδικα 2 (EC2-2004) ως η ικανότητα μιας κατασκευής να ικανοποιεί τις απαιτήσεις λειτουργικότητας, αντοχής και ευστάθειας καθ'όλη τη διάρκεια του επιδιωκόμενου χρόνου ζωής σχεδιασμού, χωρίς σημαντικές απώλειες χρηστικότητας, ούτε υπερβολική και απρόβλεπτη συντήρηση. **(8)** Θα μπορούσαμε να δώσουμε σαν ένα γενικότερο ορισμό πως ανθεκτικότητα ενός προϊόντος (ή π.χ. ενός δομικού στοιχείου, μιας συνδεσμολογίας ή μιας κατασκευής) είναι η ικανότητα τους να διατηρεί τα αρχικά χαρακτηριστικά του για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα υπό ορισμένες συνθήκες περιβάλλοντος. Για το σκυρόδεμα ειδικά οι εξωτερικές επιρροές που λαμβάνονται υπ' όψη είναι οι κλιματικές συνθήκες που επικρατούν, η έκθεση σε ακραίες συνθήκες περιβάλλοντος (π.χ. παγετός), χημικές προσβολές ή αντιδράσεις και τέλος φθορά από τριβή ή από κρούση (π.χ. λόγω ανέμου, κύμα κ.α.). **(14),(29)**

Η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα και την διαπερατότητα της επιφάνειας του υλικού. **(14)** Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξετασθούν αναλυτικά οι εξής παράγοντες που έχουν μεγάλη επιρροή στην αποσάρθρωση του σκυροδέματος:

- i. Διαπερατότητα
- ii. Διάβρωση
- iii. Αντίσταση σε φθορά
- iv. Εναλλαγή ψύξης- απόψυξης
- v. Χημικές προσβολές από θειικά άλατα και αλκαλοπυριτικές αντιδράσεις.

1.9.7.1 Διαπερατότητα

Η διαπερατότητα του σκυροδέματος είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με το πορώδες του. Ως πορώδες ορίζουμε το μηχανισμό δημιουργίας των ρηγματώσεων και μικρορηγματώσεων στο σκυρόδεμα και σχετίζεται με το βασικό μηχανισμό σκλήρυνσης του σκυροδέματος και της αύξησης της αντοχής του: την εξώθερμη χημική αντίδραση που ονομάζεται «ενυδάτωση του τσιμέντου». **(29)**

Χονδρικά η αντίδραση είναι η εξής:

Στην αρχή της αντίδρασης τα στοιχεία του τσιμέντου διαλύονται στο νερό, απελευθερώνοντας ιόντα σε αυτό. Αποτέλεσμα αυτού είναι η δημιουργία ενός υδατικού διαλύματος το οποίο περιέχει πληθώρα από ιοντικά είδη. Ο γύψος και τα ανόργανα στοιχεία του τσιμέντου είναι εξαιρετικά διαλυτά και επομένως οι συγκεντρώσεις των ιόντων αυξάνονται ραγδαία με την επαφή του τσιμέντου με το νερό. Τελικά, καθώς προχωρά η αντίδραση η συγκέντρωση των ιόντων είναι τόσο μεγάλη στο μείγμα καθιστώντας το υπερκορεσμένο, με αποτέλεσμα να είναι ενεργειακά ευνοϊκό για κάποια από τα ιόντα να ενωθούν δημιουργώντας στερεές ενώσεις. Αυτό οδηγεί στη δημιουργία σύμπλοκων αλάτων σε μορφή βελόνας. Αρχικά, αυτή η διαδικασία συμβαίνει στην εξωτερική επιφάνεια του κόκκου και όσο προχωράει η αντίδραση προς το εσωτερικό του κόκκου, τόσο πιο πολλά άλατα δημιουργούνται καταλαμβάνοντας μεγαλύτερο όγκο. Η αντίδραση προχωράει ασυμπτωτικά με την πάροδο του χρόνου, οπότε ο όγκος των αλάτων καταλαμβάνει το μέγιστο όγκο που μπορεί να καταλάβει χωρίς όμως να επιτυγχάνεται η πλήρης ενυδάτωση του τσιμέντου. Οι βελόνες των σύμπλοκων αλάτων-προϊόντων αντίδρασης τσιμέντου-νερού των κόκκων που γειτνιάζουν μπλέκονται μεταξύ τους, δημιουργώντας μαζί με τα περιεχόμενα αδρανή το σκληρυμένο σκυρόδεμα. **(29),(45)**

Το σύνολο των κενών που απομένει μεταξύ των προϊόντων της ενυδάτωσης, αποτελεί το πορώδες του σκυροδέματος. Το πορώδες του υλικού καθορίζει το ρυθμό με τον οποίο επιβλαβή στοιχεία θα εισέρχονται στη μάζα και θα προκαλούν διάσπαση της συνοχής του σκυροδέματος. Ο ρυθμός της εισαγωγής των στοιχείων αυτών καθορίζεται από την συνολική διαπερατότητα του υλικού, καθώς και από την κατανομή του πορώδους τμηματικά. **(46)** Όσο περισσότερο είναι το νερό σε σχέση με το τσιμέντο, οι «βελόνες» των προϊόντων ενυδάτωσης μπλέκονται λιγότερο μεταξύ τους και επομένως τα κενά που σχηματίζονται μεταξύ των προϊόντων ενυδάτωσης είναι σχετικά μεγάλα, αυξάνοντας το πορώδες. Αυξημένο πορώδες σημαίνει πως είναι πιο εύκολο για αυτά τα ανεπιθύμητα στοιχεία να εισέλθουν στο εσωτερικό του σκυροδέματος, λόγω του ότι μέσω των κενών

βρίσκουν μια δίοδο, δημιουργώντας δηλαδή διαδρομές.**(46),(29)** Ένας ακόμη παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψιν είναι και η διεπιφανειακή ζώνη μεταξύ του αδρανούς και της τσιμεντόπαστας, στην οποία όπως έχουμε δει υπάρχει σχηματισμός μικρορωγμών, όταν τα χρησιμοποιούμενα αδρανή είναι συνήθους βάρους. **(46)**

Ενώ στη βιβλιογραφία του σκυροδέματος υπάρχει πολύ μεγάλος όγκος έρευνας για τη διαπερατότητα του ΣΚΒ, υπάρχει σχετικά μικρός αριθμός ερευνών σχετικά με τη σύγκριση της διαπερατότητας ανάμεσα σε ΕΣ και ΣΚΒ υπό τις ίδιες συνθήκες. Πειράματα για τον καθορισμό της διαπερατότητας σε Ελαφροσκυροδέματα και Σκυροδέματα Κανονικού Βάρους με τα ίδια κριτήρια ελέγχου έχουν διεξαχθεί από τους Khokrinm, Nishi, Keeton και Bamforth. Αξιοπρόσεκτο είναι το γεγονός, πως παρά τις μεγάλες μεταβολές στις παραμέτρους της αντοχής, των μέσων για την διεξαγωγή των πειραμάτων (νερό, αέριο, λάδι) και στις τεχνικές ελέγχου που προτιμήθηκαν το ελαφροσκυρόδεμα είχε ίση ή μικρότερη διαπερατότητα από το αντίστοιχης αντοχής ΣΚΒ. **(47)** Αυτό εξηγείται κατά τον Khokrin από τη μικρή διαφορά στα μέτρα ελαστικότητας μεταξύ του αδρανούς και της τσιμεντόπαστας, καθώς και από την ενισχυμένη διεπιφάνεια μεταξύ του αδρανούς και του τσιμέντου, η οποία είναι αποτέλεσμα της παρόμοιας συμπεριφοράς που επιδεικνύουν τα δυο αυτά υλικά σε αλλαγές της θερμοκρασίας ή φορτίσεις.**(14),(47)** Η διεπιφάνεια αυτή είναι ακόμα πιο ισχυρή αν χρησιμοποιηθούν αρχικώς στεγνά αδρανή. Τόσο η ενισχυμένη διεπιφάνεια, όσο και η πυκνή τσιμεντόπαστα εμποδίζουν τη διείσδυση οξυγόνου και νερού.**(14)**

Επιπλέον η ζώνη επαφής μεταξύ των δύο υλικών είναι ουσιαστικά η διεπιφάνεια μεταξύ δυο πορωδών στοιχείων, του ελαφροαδρανούς και της ζώνης τσιμέντου που περιβάλλει το αδρανές. Έτσι επιτυγχάνεται μια εξισορρόπηση στην περιεχόμενη υγρασία των δυο αυτών υλικών, μειώνοντας τις «αδύναμες» ζώνες εξαιτίας της συγκέντρωσης νερού. Αυτό δεν ισχύει στα σκυροδέματα με συνήθη αδρανή, καθώς τα αδρανή αυτά δεν είναι υδατοαπορροφητικά. Τέλος, στο μικρότερο πορώδες των ΕΣ συμβάλλουν η μικρότερη ψαθυρότητα και μικρότερη συστολή τους (τόσο αυτογενής, όσο και ξήρανσης) σε σχέση με τα ΣΚΒ.**(14),(48)**

1.9.7.2 Διάβρωση και προστασία διαβρώσεως

Η επιτυχία προστασίας του οπλισμού ενίσχυσης από το φαινόμενο της διαβρώσεως είναι κρίσιμης σημασίας για την επίτευξη δημιουργίας ανθεκτικού φέροντος ελαφροσκυροδέματος. Ο πιο σοβαρός μηχανισμός αποσάθρωσης κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα ή ελαφροσκυρόδεμα είναι η διάβρωση ή οξειδωση του οπλισμού. Η οξειδωση του οπλισμού έχει σαν αποτέλεσμα την απομείωση της διατομής του χάλυβα, καθιστώντας αδύνατη την ανάληψη των φορτίων σχεδιασμού. Μια άλλη συνέπεια της οξειδωσης του οπλισμού είναι πως προκαλεί διόγκωση, η οποία με τη σειρά της προκαλεί εφελκυστικές τάσεις στο σκυρόδεμα που περιβάλλει τον οπλισμό, δημιουργώντας μεγάλες ρηγματώσεις και αποκόλληση της επικάλυψης του οπλισμού.**(14),(29)**

Η διάβρωση του οπλισμού γενικά οφείλεται στο διοξείδιο του άνθρακα CO₂ της ατμόσφαιρας και/ή στην ύπαρξη χλωριόντων. Παρά την τάση του χάλυβα να υπόκειται σε αντιδράσεις διάβρωσης, το αλκαλικό περιβάλλον του τσιμέντου (η τιμή του PH κυμαίνεται μεταξύ 12 και 13) προσδίδει μια επαρκή προστασία απέναντι στη διάβρωση. Σε αυτές τις

υψηλές τιμές του PH θεωρείται πως σχηματίζεται ένα λεπτό, συνεχές, αδιάλυτο στρώμα οξειδίου γύρω από το χάλυβα, εμποδίζοντας τη διάλυση των μεταλλικών ατόμων. Το διοξείδιο του άνθρακα που εισέρχεται στο σκυρόδεμα αλλάζει το PH του σκυροδέματος που περιβάλλει τον οπλισμό, με αποτέλεσμα να καταστρέφεται η προστατευτική αυτή στρώση, ενώ τα χλωριόντα διαβρώνουν τον οπλισμό με ηλεκτροχημική δράση.**(49)** Επομένως, προκύπτει εύλογα το συμπέρασμα πως για να ξεκινήσει η διάβρωση, απαιτείται η εξουδετέρωση της προστατευτικής στρώσης του σκυροδέματος μέσω της ενανθράκωσης του.**(14)**

Ενανθράκωση

Η ταχύτητα ενανθράκωσης εξαρτάται από το μέγεθος του πορώδους του σκυροδέματος, τη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα (μεγαλύτερα επίπεδα μόλυνσης της ατμόσφαιρας συνεπάγονται μεγαλύτερη συγκέντρωση CO₂), τη θερμοκρασία και το ύψος της σχετικής υγρασίας της ατμόσφαιρας και του σκυροδέματος.**(29)** Η μέγιστη ταχύτητα διείσδυσης επιτυγχάνεται όταν η σχετική υγρασία κυμαίνεται μεταξύ του 50% και του 75%. Για ένα ποσοστό μικρότερο του 25% της σχετικής υγρασίας ο βαθμός της ενανθράκωσης που λαμβάνει χώρα είναι αμελητέος, ενώ για ποσοστό μεγαλύτερο του 75%, η υγρασία στους πόρους εμποδίζει την εισχώρηση του διοξειδίου του άνθρακα.**(49)** Επειδή η ενανθράκωση ξεκινά από την επιφάνεια, η ποιότητα της προστατευτικής στρώσης του σκυροδέματος έχει τεράστια σημασία, καθώς αποτελεί την πρώτη γραμμή άμυνας για το περιεχόμενο σκυρόδεμα και τον οπλισμό ενίσχυσης.

Σε αντίθεση με το ΣΚΒ, το πορώδες στο ΕΣ εξαρτάται τόσο από τη σύνθεση της τσιμεντόπαστας όσο και από τον τύπο του περιεχόμενου ελαφροαδρανούς. Ευεργετικά λειτουργεί στο ΕΣ η ύπαρξη πυκνότερης τσιμεντόπαστας σε σχέση με το ΣΚΒ παρόμοιας αντοχής, καθώς η ενανθράκωση τείνει να εξελίσσεται πιο αργά στο σκληρυμένο τσιμέντο. Αυτή η αύξηση της πυκνότητας της τσιμεντόπαστας οφείλεται στο μικρότερο κλάσμα του περιεχόμενου νερού/τσιμέντου. Όσον αφορά τα ελαφροαδρανή έχουν μικρότερη αντίσταση στη διάχυση αερίου σε σχέση με αδρανή κανονικού βάρους, εξαιτίας του μεγαλύτερου πορώδους τους, το οποίο ευνοεί τη διάδοση του διοξειδίου του άνθρακα μέσα στο σκυρόδεμα. Μάλιστα σύμφωνα με τους Zhang και GjØrn, ακόμα και όταν χρησιμοποιούνται υψηλής ποιότητας ΕΑ, η περατότητα των αδρανών είναι περίπου ίση με την περατότητα μιας τσιμεντόπαστας με κλάσμα νερού/τσιμέντου της τάξης του 0,9. Έχει αποδειχθεί, μετά από ανάλυση των Schulze και Günzler για το σχήμα του «μετώπου» της ενανθράκωσης, πως υπάρχει μια πιο ταχεία διάχυση του διοξειδίου του άνθρακα μέσα από τα ελαφροαδρανή. Η ταχύτητα της διαχύσεως είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με το πορώδες του αδρανούς, καθιστώντας αναγκαία την ύπαρξη, ικανοποιητικής διασποράς των αδρανών μέσω της καλής ανάμιξης του μίγματος και την περικάλυψη των σωματιδίων του ΕΑ από υψηλής ποιότητας τσιμεντόπαστα. Για την εξασφάλιση, πως δε θα είναι ένα σωματίδιο αδρανούς, το οποίο βρίσκεται στην επιφάνεια του τσιμέντου, σε επαφή με κάποια ράβδο του οπλισμού ενίσχυσης, και για να το εμποδίσει να λειτουργήσει ως μια γέφυρα για τη διάχυση του διοξειδίου του άνθρακα, απαιτείται η ελάχιστη επικάλυψη του οπλισμού να είναι τουλάχιστον 5 χιλιοστά μεγαλύτερη από τη μέγιστη διάμετρο των κόκκων του αδρανούς. Κατά τον Newman οι ρυθμοί ενανθράκωσης των ΕΣ και ΣΚΒ είναι παρόμοιοι, εφόσον τα ελαφροαδρανή είναι επαρκώς επικαλυπτόμενα από υψηλής ποιότητας τσιμεντόπαστα. Αντίθετα οι Vaysburd και Bremner υποστηρίζουν μέσα από την έρευνα τους

πως στο ΕΣ το βάθος της ενανθράκωσης είναι μικρότερο λόγω του μεγαλύτερου ποσοστού περιεχόμενου τσιμέντου. **(50),(14)** Επομένως μπορούμε να πούμε σε γενικές γραμμές πως το ΕΣ έχει κατά κύριο λόγο παρόμοιο ή μικρότερο βάθος ενανθράκωσης σε σχέση με το ΣΚΒ στις ίδιες συνθήκες.**(50)**

Διείσδυση-διάχυση των χλωριόντων

Η ταχύτητα διείσδυσης-διάχυσης των χλωριόντων, εκτός από το μέγεθος του πορώδους, εξαρτάται επίσης από τη θερμοκρασία και από τη χημική σύσταση του τσιμέντου. Για τη διάβρωση του οπλισμού από τα χλωριόντα απαραίτητη είναι η παρουσία οξυγόνου και υγρασίας, ενώ σημαντικό ρόλο παίζει και η ηλεκτρική αγωγιμότητα του τσιμέντου. Το πρόβλημα της διείσδυσης των χλωριόντων στο τσιμέντο γίνεται πολύ πιο έντονο με την παρουσία αλατιού (π.χ. θαλάσσιο περιβάλλον, δρόμος στον οποίο χρησιμοποιείται αλάτι για την απομάκρυνση του πάγου). Τα διαλυμένα στο νερό χλωριούχα μπορούν να διαπεράσουν ακόμα και αρηγμάτωτο σκυρόδεμα ή να φτάσουν στις ράβδους χάλυβα μέσω των ρωγμών. Επίσης, διάβρωση μπορεί να προκληθεί και από χλωριούχα πρόσθετα σκυροδέματος. Ο μηχανισμός με τον οποίον τα χλωριόντα προάγουν τη διάβρωση δεν είναι ακόμα πλήρως κατανοητός, αλλά η επικρατούσα άποψη υποστηρίζει πως τα χλωριόντα εισχωρούν πιο εύκολα σε σχέση με τα άλλα ιόντα στο προστατευτικό στρώμα οξειδίου, αφήνοντας έτσι το χάλυβα ευάλωτο στη διάβρωση.**(49)**

Ο ρυθμός με τον οποίον εισέρχονται χλωριόντα στο σκυρόδεμα εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τις ιδιότητες της τσιμεντόπαστας. Υψηλά κλάσματα αναλογίας νερού/τσιμέντου οδηγούν σε πιο περατά σκυροδέματα, ενώ αντίθετα σκυροδέματα που περιέχουν ποζολάνες και σκωρία υψικαμίνων επιβραδύνουν την ταχύτητα διείσδυσης των χλωριόντων. Το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφορές στα ΕΣ σε σχέση με τα ΣΚΒ παρόμοιας σύνθεσης, λόγω της καλύτερης ποιότητας διεπιφανειακής ζώνης μεταξύ της τσιμεντόπαστας και του ελαφροαδρανούς. Εξαιρέση αποτελούν ΕΣ, στα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί ελαφροαδρανή με πολύ υψηλό πορώδες ή ελαφροαδρανή, στα οποία δεν υπάρχει πυκνό εξωτερικό περίβλημα, με αποτέλεσμα να υπάρχει μια μικρή αύξηση στον ρυθμό διείσδυσης των χλωριόντων. Για αυτό το λόγο σε περίπτωση που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί κισσηρόδεμα σε περιβάλλον με ακραίες συνθήκες, απαιτείται να ληφθούν κάποια πρόσθετα μέτρα ασφαλείας, όπως η χρησιμοποίηση ανθεκτικού σε διάβρωση οπλισμού ή η τοποθέτηση καθοδικής προστασίας στη φάση κατασκευής. **(14),(51)**

Είναι ευρέως αποδεδειγμένο πως στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα με μεταλλικές ίνες, η διάβρωση που συντελείται στις ίνες αυτές είναι λιγότερο σοβαρή σε σχέση με τη διάβρωση των ράβδων χάλυβα στο οπλισμένο σκυρόδεμα. Εξαιτίας της μεγάλης επιφάνειας προς την αναλογία όγκου, οι μεταλλικές ίνες είναι πιο αποτελεσματικά σκεπασμένες από την προστατευτική στρώση σε σχέση με τις συμβατικές μεταλλικές ράβδους που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές. Παρόλα αυτά, η διάβρωση των ινών μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία μικρορωγμών στο τσιμέντο, καθώς και στη μείωση της ενεργούς διατομής των ινών. Για τους δύο αυτούς λόγους εγείρεται ανησυχία για την μακροπρόθεσμη συμπεριφορά και επάρκεια του υλικού στις κατασκευές.

Η διάβρωση των ινών εξαρτάται από τους ίδιους παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση του συμβατικού οπλισμένου σκυροδέματος, επομένως η ενανθράκωση και η διείσδυση χλωριόντων είναι κατά κύριο λόγο εξαρτώμενες από την ποιότητα της τσιμεντόπαστας.

Στην περίπτωση της χρήσης μεταλλικών ινών, οι ίνες είναι διασκορπισμένες ομοιόμορφα σε όλον τον όγκο του σκυροδέματος. Οι ίνες που είναι κοντά στην επιφάνεια του έχουν πολύ μικρή επικάλυψη, με αποτέλεσμα να είναι πιο ευάλωτες σε διάβρωση, αν δεν ληφθούν ειδικά μέτρα για την αποφυγή της. Αυτό οδηγεί, τόσο στη δημιουργία επιφανειακών ρωγμών που μπορεί να επηρεάσει την αντοχή της κατασκευής, όσο και στην εμφάνιση σημείων στην επιφάνεια του εκτεθειμένου σκυροδέματος, στα οποία είναι εμφανής η διάβρωση των ινών.

Γενικά είναι κοινά αποδεκτό, πως η εισαγωγή μεταλλικών ινών στο σκυρόδεμα δεν μεταβάλλει την ανθεκτικότητα του ΕΣ σε διάβρωση. **(52)**

1.9.7.3 Αντοχή έναντι φθοράς

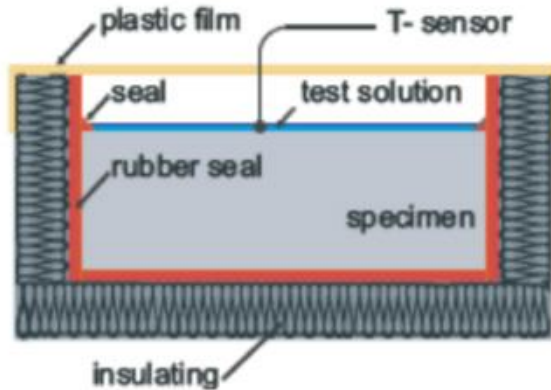
Η αντοχή σε φθορά του σκυροδέματος εξαρτάται από τη σκληρότητα, την θλιπτική αντοχή της τσιμεντόπαστας, το είδος των περιεχόμενων αδρανών, καθώς και τον δεσμό μεταξύ των δυο αυτών συστατικών. Αν και τα περισσότερα ελαφροαδρανή αποτελούνται από σκληρό υλικό (περίπου ίσης σκληρότητας με το χαλαζία στη κλίμακα Μος), λόγω του πορώδους η αντοχή τους σε δυνάμεις διάτμησης μπορεί να είναι μικρότερη από την αντοχή των περισσότερων φυσικών αδρανών. Η καθαρή αντίσταση έναντι των δυνάμεων φθοράς και τριβής του ΕΣ είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με το ΣΚΒ, ειδικά μετά την φθορά της επιφάνειας και την έκθεση των αδρανών.

Γενικά, η αντοχή στη τριβή μειώνεται με τη χρήση ελαφροαδρανών, ενώ η αντοχή έναντι της τριβής αυξάνεται με την αύξηση της θλιπτικής δύναμης, όπως άλλωστε συμβαίνει και στο ΣΚΒ. Επιπλέον, η αντίσταση έναντι τριβής του ΕΣ εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θλιπτική αντοχή του. **(14),(53)**

1.9.7.4 Αντίσταση έναντι αποσάρθρωσης λόγω εναλλαγών κύκλων ψύξης απόψυξης

Η αποσάρθρωση λόγω εναλλαγών κύκλων ψύξης απόψυξης οφείλεται στην παρουσία νερού (ή υγρασίας), το οποίο κατά τη φάση της ψύξης λόγω της μετατροπής της σε πάγο διογκώνεται και αποσαθρώνει το σκυρόδεμα που περικλείει πόρους ή ρωγμές γεμάτες με νερό. Ο βαθμός του κορεσμού είναι σημαντικότερος παράγοντας για την αντίσταση του σκυροδέματος έναντι παγετού. Λόγω της πορώδους φύσης τους, τα ελαφροαδρανή είναι πιθανό να συγκρατούν στο εσωτερικό τους σημαντικές ποσότητες νερού, με αρνητικές συνέπειες για το σκυρόδεμα. **(14),(44)** Για τον έλεγχο της αντίστασης του υλικού έναντι ψύξης και απόψυξης χρησιμοποιούνται συχνά άμεσες μέθοδοι, στις οποίες το υλικό υποβάλλεται σε ψύξη και απόψυξη. Η κύρια ιδέα πίσω από αυτές τις μεθόδους είναι να προσομοιαστούν τα πραγματικά φορτία θερμοκρασίας, μέσω των επιταχυνόμενων αυτών διαδικασιών. Αυτό επιτυγχάνεται με εναλλαγές θερμοκρασίας πάνω και κάτω από το σημείο ψύξης του νερού, δηλαδή τους 0°C. **(54)**

Ένας συχνά χρησιμοποιούμενος τρόπος για την εκτίμηση της αντίστασης έναντι ψύξης και απόψυξης, όσον αφορά τη φθορά στο εσωτερικό του σκυροδέματος, με βάση τα ευρωπαϊκά στάνταρ, είναι οι μετρήσεις με βάση το στάνταρ: Slab- Test in CEN/TR 15177 (2006), το οποίο βασίζεται στο σουηδικό κανονισμό SS 13 72 44 (μέθοδος του Boras). Σε αυτόν τον κανονισμό η μέτρηση γίνεται με βάση τη διόγκωση της επιφάνειας, καθώς το εξεταζόμενο δοκίμιο περιβάλλεται από υγρό, το οποίο υπόκειται στις εναλλαγές της θερμοκρασίας, μόνο στη μία πλευρά του. Αξίζει να σημειωθεί πως το υγρό με το οποίο σκεπάζεται το δοκίμιο, είναι απιονισμένο νερό με 3% διαλυμένο άλας.



Εικόνα 1.25 Διάταξη ελέγχου της αντίστασης σε Ψύξη και Απόψυξη με βάση τον κανονισμό Slab- Test in CEN/TR 15177 (2006) (54)

Αντίθετα ο έλεγχος στην Βόρεια Αμερική γίνεται κατά κύριο λόγο με βάση τον κανονισμό ASTM C666/C666M-03(2008). Σε αυτή τη περίπτωση υπάρχουν δύο διαδικασίες:

- Ταχεία Ψύξη και Απόψυξη σε νερό
- Ταχεία Ψύξη σε αέρα και Απόψυξη σε νερό

Κοινό στοιχείο και στις δυο διαδικασίες είναι πως η Ψύξη και η Απόψυξη των δοκιμίων γίνεται σε όλες τις πλευρές, δηλαδή σε όλο τον όγκο του (σε αντίθεση με την προηγούμενη μέθοδο). (54)

Όπως και στο ΣΚΒ, έτσι και στο ΕΣ ο πιο συνηθισμένος τρόπος βελτίωσης της αντίστασης του ενάντια στην εσωτερική ρωγμάτωση, λόγω ψύξης και απόψυξης είναι η εισαγωγή φυσαλίδων αέρα. Λόγω της πορώδους φύσης των ΕΑ, το ΕΣ παρουσιάζει συνήθως βελτιωμένη αντίσταση στους κύκλους ψύξης και απόψυξης στους οποίους υποβάλλεται με βάση τους παραπάνω κανονισμούς. Σημαντικό ρόλο παίζει ο χαμηλός λόγος του περιεχόμενου νερού προς το περιεχόμενο τσιμέντο. Ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η απορροφητικότητα των χρησιμοποιούμενων ελαφροαδρανών, σε περίπτωση που αυτά θα είναι βυθισμένα πριν την χρησιμοποίησή τους σε υγρό, καθώς αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική «χειροτέρευση» των αποτελεσμάτων. Η επαρκής ανθεκτικότητα μπορεί να σιγουρευτεί με την χρησιμοποίηση χονδρόκοκκων ΕΑ με συντελεστή απορροφητικότητας αδρανούς μικρότερο του 2% (ως συντελεστής απορροφητικότητας αδρανούς ορίζεται ως η ποσοστιαία μεταβολή της απορρόφησης νερού του χονδρόκοκκου αδρανούς, λόγω έκθεσης του για χρονικό διάστημα που εξαρτάται από το ξηρό του βάρος και κυμαίνεται μεταξύ 100 και 1000 λεπτών. Τέλος,

όπως είναι λογικό επηρεάζει την ανθεκτικότητα στον παγετό και το είδος του χρησιμοποιούμενου αδρανούς.(14) Γενικά, από τα πειράματα που έχουν γίνει φαίνεται πως το ελαφροσκυρόδεμα για την πλειοψηφία των ελαφροαδρανών, τόσο στην μουσκεμένη, όσο και στην στεγνή κατάσταση, χωρίς την χρήση αερακτικών πρόσθετων αέρα, είναι πιο ανθεκτικό σε περιβάλλον ψύξης/απόψυξης από το αντίστοιχο σκυρόδεμα κανονικού βάρους χωρίς αερακτικά πρόσθετα. Για ΕΣ με αερακτικά πρόσθετα και μουσκεμένα ελαφροαδρανή η συμπεριφορά του ΕΣ δεν διαφέρει ιδιαίτερα από αυτή του ΣΚΒ, ενώ αν χρησιμοποιηθούν στεγνά αδρανή το ΕΣ παρουσιάζει σημαντικά βελτιωμένη συμπεριφορά σε σχέση με το ΣΚΒ. Ελαφροσκυροδέματα με ελαφροαδρανή υψηλής αντοχής παρουσιάζουν εξαιρετικές επιδόσεις στον έλεγχο έναντι παγετού. Απαιτείτο παρατεταμένη έκθεση σε υπεράκτιες αρκτικές συνθήκες για να υπάρξει βλάβη στο υλικό και η συμπεριφορά του εξαρτάται κυρίως από την περιεχόμενη υγρασία και από την υγρασία των αδρανών. (1)

Τα αποτελέσματα των ερευνών πάνω στην ανθεκτικότητα έναντι του παγετού του νοπλισμένου σκυροδέματος ποικίλουν, λόγω της ποικιλίας των εξεταζόμενων σκυροδεμάτων, των διαφορετικών ινών και των διαφορετικών μεθόδων εξέτασης που ακολουθούνται. Γενικά, η χρήση κοντών μεταλλικών ινών φαίνεται να λειτουργεί ευεργετικά. Αυτό εξηγείται από το γεγονός πως λόγω των κοντών ινών υπάρχει μεγαλύτερος αριθμός μικροϊνών ανά μονάδα όγκου και στην επιφάνεια. Σκεπτόμενοι τον τρόπο με τον οποίο βλάπτει το σκυρόδεμα ο παγετός, οι κατάλληλα επιλεγμένες ίνες μπορούν να παίξουν έναν προστατευτικό ρόλο στη διαδικασία έναρξης της μικρορηγματώσης. Οι ίνες απορροφούν μέρος της εφελκυστικής δύναμης η οποία ασκείται τοπικά λόγω της κυκλικής εναλλαγής της θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα να μειώνουν το ρυθμό διάδοσης των μικρορωγμών, βοηθώντας να διατηρείται συμπαγές το υλικό, ιδιαίτερα στην επιφάνεια. (55)

Αξίζει να σημειωθεί πως στην Ελλάδα λόγω κλίματος είναι λίγες οι περιοχές, οι οποίες επηρεάζονται από αυτό το φαινόμενο.(44)

1.9.7.5 Αντίσταση έναντι χημικών προσβολών από θειικά άλατα και αλκαλοπυριτικές αντιδράσεις

Γενικά, η χημική αντίσταση των ελαφροαδρανών είναι τουλάχιστον ισάξια με αυτήν των περισσότερων φυσικών αδρανών. Αυτό οφείλεται στο ότι κατά το σχηματισμό τους η θερμοκρασία φτάνει τους 1200°C. Επιπλέον, το μικρότερο ποσοστό περιεχόμενου νερού/τσιμέντο σε σχέση με το ΣΚΒ βελτιώνει την αντίσταση της τσιμεντόμασας απέναντι στις χημικές επιθέσεις.(1)

Προσβολή από θειικά άλατα

Τα θειικά άλατα μπορεί να προέρχονται είτε από πηγές στο εσωτερικό του σκυροδέματος, είτε από εξωτερικές πηγές. Το να προέρχονται από εσωτερικές πηγές είναι πιο σπάνιο και αυτές οι πηγές μπορεί να είναι: παρουσία φυσικού γύψου στα αδρανή, τσιμέντο με υπερβολική ποσότητα θεικών, από πρόσθετα. Αντίθετα, η ύπαρξη εξωτερικών πηγών σε θειικά άλατα είναι πιο συχνή και συνήθως οφείλεται, είτε σε εδάφη ή υπόγειους

υδροφόρους ορίζοντες εμπλουτισμένους με θειικά άλατα, είτε σε μόλυνση του νερού ή της ατμόσφαιρας. (56)

Συγκεκριμένα, όταν χρησιμοποιούνται αδρανή που περιέχουν θειικά άλατα, αυτά μπορεί να διηθούν αργά από τα αδρανή και να προκαλέσουν καθυστερημένο σχηματισμό ετρινγκίτη και γύψου στο σκληρυμένο σκυρόδεμα. Τα σουλφίδια μπορεί με αργό ρυθμό να οξειδωθούν σε θειικά άλατα, με αποτέλεσμα την εσωτερική διόγκωση. Επομένως, ελαφροαδρανή εμπλουτισμένα με θειικά άλατα μπορεί να δημιουργήσουν μακροπρόθεσμα πρόβλημα ανθεκτικότητας. Τα πειράματα τα οποία διενεργήθηκαν από τον Curcio (1998) έδειξαν πως το ΕΣ είναι αρκετά ανθεκτικό στην εισβολή θειούχων ιόντων.(14)

Αντίσταση έναντι των αλκαλοπυριτικών αντιδράσεων

Η αποσάθρωση λόγω αλκαλοπυριτικής αντίδρασης οφείλεται σε αντίδραση των αλκαλίων του τσιμέντου με συγκεκριμένο είδος πυριτικών αδρανών που περιέχουν συγκεκριμένο είδος άμορφου SiO₂. Η αντίδραση αυτή, με την παρουσία υγρασίας προκαλεί διόγκωση στην οποία οφείλεται η αποσάθρωση του σκυροδέματος. Η αντίδραση αυτή μπορεί να περιγραφεί σαν μια διαδικασία δύο βημάτων:

1. Αλκάλια+ αντιδρών διοξείδιο του πυριτίου (σίλικα) → αλκαλοπυριτικό τζελ
2. Αλκαλοπυριτικό τζελ+ υγρασία → διόγκωση(44),

Τα ΕΑ είναι πολύ σταθερά όσον αφορά την αντιδραστικότητα των αλκαλίων με το πυρίτιο. Έτσι, ακόμα και με την παρουσία αλκαλίων και υγρασίας στο σκυρόδεμα είναι σχεδόν απίθανο να υπάρξει αλκαλοπυριτική αντίδραση. Προσοχή όμως πρέπει να δοθεί αν χρησιμοποιούνται χονδρόκοκκα ελαφροαδρανή με λεπτόκοκκα αδρανή κανονικού βάρους, καθώς τα λεπτόκοκκα αδρανή μπορεί να προκαλέσουν την αντίδραση. Σε αυτήν την περίπτωση για την προφύλαξη της κατασκευής θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί τσιμέντο με χαμηλά αλκάλια (low alkali concrete).

Η παρουσία μεταλλικών ινών δεν φαίνεται να επηρεάζει με κάποιο τρόπο, τόσο την ανθεκτικότητα έναντι προσβολής από θειικά άλατα, όσο και την αντίσταση από το σχηματισμό αλκαλοπυριτικής αντίδρασης.

1.9.8 Χρονικά μεταβαλλόμενη παραμορφωσιακή συμπεριφορά

Η χρονικά μεταβαλλόμενη παραμορφωσιακή συμπεριφορά του σκυροδέματος αποτελείται από τις στιγμιαίες, ελαστικές παραμορφώσεις και από τις παραμορφώσεις που εξελίσσονται με το χρόνο. Οι τελευταίες περιλαμβάνουν τον ερπυσμό και τη συστολή ξήρασης.(14)

1.9.8.1 Ερπυσμός

Με τον όρο «ερπυσμός» δηλώνεται η προοδευτική με την πάροδο του χρόνου παραμόρφωση του σκυροδέματος, όταν υπόκειται σε σταθερή θλιπτική τάση. Οφείλεται κυρίως στη μετακίνηση των μορίων νερού στους πόρους του πηγματος από θέσεις υψηλής πίεσης προς θέσεις μικρότερης πίεσης. Κατά τον EC2 ο ερπυσμός του σκυροδέματος εξαρτάται από την υγρασία, τις διαστάσεις του στοιχείου, τη σύνθεση του σκυροδέματος, το βαθμό ωρίμανσης του σκυροδέματος κατά την πρώτη επιβολή του φορτίου, καθώς και

το τη διάρκεια και το μέγεθος της φόρτισης. **(8)** Ο ερπυσμός γενικά ορίζεται με βάση τον συντελεστή ερπυσμού $\phi(t, \tau)$:

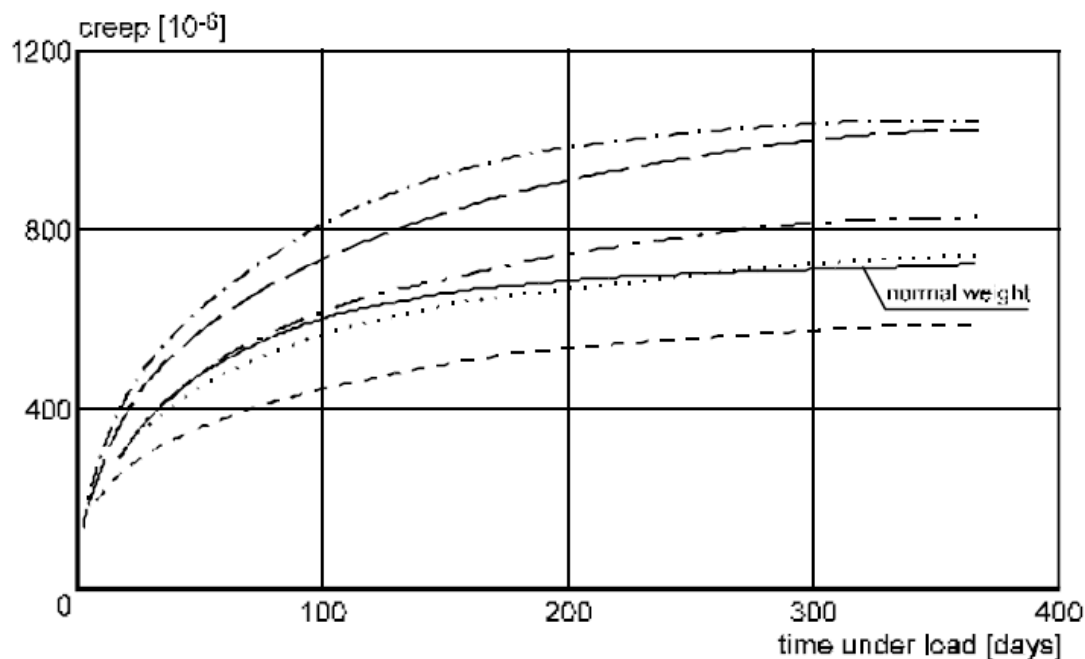
$$\phi(t, \tau) = \frac{\varepsilon_{cr}(t)}{\varepsilon_{el}(t)}$$

όπου $\varepsilon_{cr}(t)$ = χρονικά εξαρτώμενη παραμόρφωση σε διάστημα (t- τ)

$\varepsilon_{el}(t)$ = ελαστική παραμόρφωση κατά τη στιγμή της φορτίσεως **(14)**

Η μελέτη του ερπυσμού του ελαφροσκυροδέματος με βάση τον παραπάνω συντελεστή ϕ και η σύγκριση του με το ΣΚΒ, μπορεί να οδηγήσει σε λάθος εκτιμήσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως οι ελαστικές παραμορφώσεις του ΕΣ είναι γενικά μεγαλύτερες σε σύγκριση με αυτές του ΣΚΒ παρόμοιας αντοχής. Έτσι, η ίδια ερπυστική παραμόρφωση για ένα ΕΣ και ένα ΣΚΒ, συνδυασμένη με μια υψηλή ελαστική παραμόρφωση του ΕΣ και μια χαμηλή ελαστική παραμόρφωση για το ΣΚΒ, θα οδηγήσει σε έναν χαμηλό συντελεστή ερπυσμού « ϕ » για το ΕΣ και έναν σχετικά υψηλό συντελεστή ερπυσμού για το ΣΚΒ, ενώ η συνολική παραμόρφωση του ΕΣ μπορεί να ξεπερνάει αυτή του ΣΚΒ.

Μία από τις σημαντικότερες μελέτες πάνω στον ερπυσμό του ελαφροσκυροδέματος είναι η πειραματική εργασία του Schideler το έτος 1957. Στην εικόνα 1.26 φαίνονται τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής, όπου υπάρχει μια σύγκριση του ερπυσμού διαφόρων ΕΣ με διαφορετικά ελαφροαδρανή με ένα ΣΚΒ. Ένα συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί από αυτό το διάγραμμα είναι πως ο ερπυσμός των ΕΣ σε μεγαλύτερες ηλικίες τείνει να συνεχίζεται ταχύτερα σε σχέση με το ΣΚΒ. Μια πιθανή αιτία αυτού βρίσκεται στη μεταφορά των τάσεων από την τσιμεντόπαστα στα αδρανή. Συγκεκριμένα, με δεδομένο πως η τσιμεντόπαστα θεωρείται πως ευθύνεται για τις ερπυστικές παραμορφώσεις και κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης της παραμόρφωσης, οι τάσεις της τσιμεντόπαστας μεταφέρονται σταδιακά στα αδρανή. Έτσι, όσο πιο σκληρά είναι τα αδρανή, τόσο μεγαλύτερο θα είναι η τάση σε αυτά, με αποτέλεσμα τη μείωση της τάσης στην τσιμεντόπαστα. Μια μείωση των τάσεων στη τσιμεντόπαστα οδηγεί σε μικρότερες ερπυστικές παραμορφώσεις της τσιμεντόπαστας και επομένως του σκυροδέματος. Όμως, επειδή τα ελαφροαδρανή στο ΕΣ έχουν συνήθως μικρότερο μέτρο ελαστικότητας, η τάση στη τσιμεντόπαστα θα παραμένει υψηλή και έτσι σε μεγάλες ηλικίες, η ερπυστική παραμόρφωση θα είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή του ΣΚΒ. Είναι γενικά αποδεκτό ότι ο ερπυσμός αναμένεται να είναι γενικά κατά 20-60% μεγαλύτερος στα ΕΣ σε σχέση με τα ΣΚΒ και ότι η μέγιστη παραμόρφωση μεγαλώνει όσο μικραίνει η αντοχή του. Αυτή η άποψη διατυπώθηκε αρχικά από τον Short το 1963.



Εικόνα 1.26 Ερπυσμός σκυροδεμάτων με διαφορετικά ΕΑ. Ηλικία φορτίσεως $t=7$ μέρες, τάση $\sigma=4.1$ MPa, αντοχή 11,2-15,6 MPa (Schideler 1957) (14)

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω ο ερπυσμός του σκυροδέματος εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την ποιότητα της τσιμεντόπαστας. Μάλιστα, παλαιότερα επικρατούσε η άποψη πως το μέτρο ελαστικότητας των ελαφροαδρανών δεν επηρεάζει τις τελικές τιμές ερπυσμού του ΕΣ και πως για τις ίδιες αναλογίες και ποιότητες τσιμεντόπαστας ο ερπυσμός θα είναι ίδιος ανάμεσα στο ΕΣ και στο αντίστοιχο ΣΚΒ. Αυτή η άποψη όμως διαψεύστηκε από τα πειραματικά δεδομένα. Επιπλέον, και από θεωρητική σκοπιά θα περίμενε κανείς να υπάρχει διαφοροποίηση της ερπυστικής συμπεριφοράς του ΕΣ σε σχέση με το ΣΚΒ. Τα πειραματικά αποτελέσματα υποδεικνύουν μια σαφή επιρροή του μέτρου ελαστικότητας του αδρανούς. Αρχικά, σε αντίθεση με τα κανονικά αδρανή, κάποια ΕΑ παρουσιάζουν ερπυσμό, όπως απέδειξε αρχικά ο Nevill (1982). Ο Nevill ακολούθησε το μοντέλο, σύμφωνα με το οποίο το σκυροδέμα περιγράφεται ως ένα υλικό δύο φάσεων. Με βάση αυτό το μοντέλο η μεταβίβαση των τάσεων από την τσιμεντόπαστα στα αδρανή και οι επιπτώσεις αυτής της μεταβίβασης στον ερπυσμό μπορούν εύκολα να εξηγηθούν. Το συμπέρασμα που προέκυψε είναι πως το μέγεθος και ο ρυθμός ανάπτυξης του ερπυσμού αυξάνονται με τη μείωση του μέτρου ελαστικότητας του αδρανούς.

Στο εγχειρίδιο CEB/FIP για τα ΕΣ ο συντελεστής ερπυσμού τους είναι αυξημένος κατά 10-30% σε σχέση με τα ΣΚΒ παρόμοιας σύστασης. Συγκεκριμένα, ο συντελεστής ερπυσμού ορίζεται από τη σχέση

$$f_{LWAC} = 1.2 * \frac{E_{NDC}}{E_{LWAC}} * f_{NDC} \quad , \text{ όπου } E_{LWAC} \text{ και } E_{NDC} \text{ είναι τα μέτρα ελαστικότητας του ΕΣ και ΣΚΒ αντίστοιχα.}$$

Επιπλέον, και το πορώδες του αδρανούς επηρεάζει τον ερπυσμό του σκυροδέματος μέσω του μέτρου ελαστικότητας του αδρανούς. Στη μελέτη η οποία διεξήχθη από τον Kordina το 1960 μελετήθηκε η σχέση μεταξύ της απορροφητικότητας 8 διαφορετικών

αδρανών και του μέτρου ελαστικότητας τους. Από την έρευνα αυτή εξήχθη το συμπέρασμα, πως η αύξηση της απορροφητικότητας οδηγούσε σε μείωση του μέτρου ελαστικότητας, το οποίο σημαίνει πως το μεγαλύτερο πορώδες μειώνει το μέτρο ελαστικότητας των αδρανών και επομένως σε μεγαλύτερο ερπυσμό. Ένας άλλος παράγοντας που παίζει ρόλο στον ερπυσμό του σκυροδέματος είναι η σκληρότητα της επιφάνειας των αδρανών. Όσο πιο σκληρή είναι η επιφάνεια τους, τόσο καλύτερη θα είναι η διεπιφάνεια ελαφροαδρανούς και τσιμεντόπαστας, γεγονός που οδηγεί σε μείωση του ερπυσμού. Επιπλέον, φαίνεται από την πραγματοποιήσα έρευνα πως καλύτερη συμπεριφορά επιδεικνύουν τα ΕΣ με αδρανή κλειστής επιφάνειας. **(14)**

Στη βιβλιογραφία υπάρχει πολύ λίγη έρευνα για τη μελέτη της μεταβολής του ερπυσμού, με τη χρήση μεταλλικών ινών στο ΕΣ. Όμως από την έρευνα των Jenn-Chuan Chern και Chin-Huai Young φαίνεται πως η χρήση μεταλλικών ινών συνεπάγεται μια μικρή μείωση του ερπυσμού, η οποία εντείνεται με την αύξηση του ποσοστού των περιεχόμενων ινών.**(58)**

1.9.8.2 Συστολή ξήρανσης

Στο ΣΚΒ η μεταφορά υγρασίας καθορίζεται κυρίως από την περατότητα της τσιμεντόπαστας. Αντίθετα, στο ΕΣ η πορώδης σύσταση των αδρανών πιθανώς να συμβάλει στην περατότητα του σκυροδέματος. Ταυτόχρονα, τα αδρανή μπορεί να λειτουργούν ως «ρεζερβουάρ» νερού, του οποίου η παρουσία μπορεί να επηρεάσει δραστικά τη μεταφορά του νερού μέσα στο σκυρόδεμα. Εξαιτίας του ότι η μεταφορά νερού μέσα στο σκυρόδεμα αποτελεί τη βάση για την εμφάνιση συστολής λόγω ξήρανσης, το αυξημένο πορώδες των ΕΑ αναμένεται να επηρεάσει το μέγεθος της συστολής ξήρανσης στο ΕΣ.

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως για να επιτευχθεί ένα ΕΣ παρόμοιας αντοχής με ΣΚΒ, απαιτείται να αυξηθεί το περιεχόμενο ποσοστό τσιμεντόπαστας, λόγω της μειωμένης αντοχής των ΕΑ. Εφόσον η τσιμεντόπαστα καθορίζει κατά κύριο λόγο το μέγεθος της συστολής ξήρανσης, αναμένεται αυξημένη συστολή στα ΕΣ, σε σύγκριση με τα ΣΚΒ παρόμοιας αντοχής.

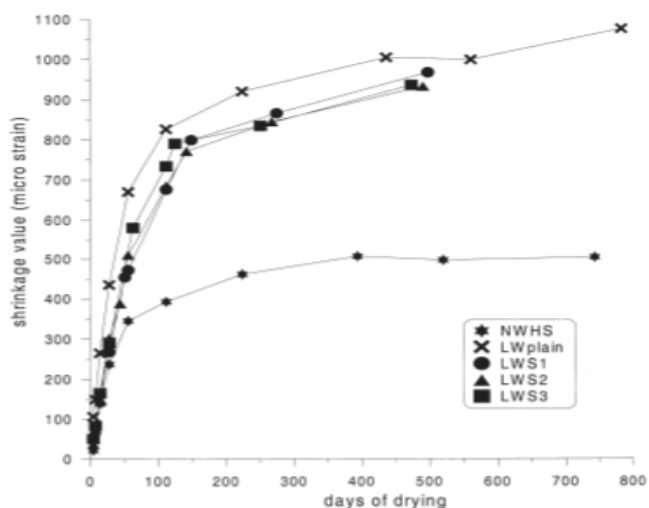
Πειράματα για την μελέτη της συστολής ξήρανσης δομικού ΕΣ σε ξηρό δωμάτιο έδωσαν αποτελέσματα της τάξης 0,4 με 1%. Αυτό το ποσοστό είναι περίπου ίσο έως και 50% παραπάνω από τα αντίστοιχα νούμερα της συστολής ξήρανσης στο ΣΚΒ αντίστοιχης αντοχής. Σύμφωνα με την έρευνα του Hoffman που εκδόθηκε το 1983 με αντικείμενο τη συστολή ξήρανσης διαφόρων σκυροδεμάτων, διαπιστώθηκε πως η διαφορά που παρατηρείται είναι της τάξεως του 30%. Αυτή η διαφορά είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τη διαφορά στις ερπυστικές παραμορφώσεις μεταξύ των σκυροδεμάτων αυτών. Αξίζει όμως να σημειωθεί πως οι τιμές αυτές είναι ενδεικτικές και εξαρτώνται άμεσα από τον τρόπο με τον οποίον έγινε η συντήρηση και από το μέγεθος των δοκιμίων στις οποίες έγιναν οι μετρήσεις.

Όπως και στον ερπυσμό, έτσι και στη συστολή ξήρανσης επιρροή έχει το μέτρο ελαστικότητας του αδρανούς. Μεγαλύτερη δυσκαμψία του αδρανούς οδηγεί σε συγκράτηση της συρρίκνωσης, με αποτέλεσμα τη μείωση της συστολής ξήρανσης. Έχει παρατηρηθεί πως η μικρότερη δυσκαμψία του αδρανούς, η οποία οδηγεί σε μεγαλύτερη

συστολή ξήρανσης, έχει το πλεονέκτημα της μείωσης των τάσεων στο τσιμεντοπολλτό, λόγω του μικρότερου βαθμού παρεμπόδισης της συστολής του. **(14)**

Από την έρευνα που έχει πραγματοποιηθεί πάνω στο αντικείμενο της συστολής ξήρανσης του ΕΣ, φαίνεται πως ευεργετικά λειτουργεί η χρήση κορεσμένων ελαφροαδρανών. Αυτό συμβαίνει, διότι το νερό το οποίο είναι «αποθηκευμένο» μέσα στους πόρους των αδρανών, οδηγεί στη μείωση κυρίως της αυτογενούς συστολής ξήρανσης. Βέβαια, η χρήση κορεσμένων αδρανών εγκυμονεί κινδύνους με σημαντικότερο, την αποδυνάμωση της διεπιφανειακής ζώνης μεταξύ κόκκου και τσιμεντόπαστας. **(59)**

Η προσθήκη μεταλλικών ινών λειτουργεί ευεργετικά στη μείωση της συστολής ξήρανσης του ελαφροσκυροδέματος. Όπως φαίνεται και από την έρευνα των O. Kayali, M. N. Haque και B. Zhu, με τη χρήση μεταλλικών ινών σε ΕΣ από ιπτάμενη τέφρα υπάρχει μη αμελητέα μείωση της συστολής του σκυροδέματος. Μάλιστα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα η αύξηση του ποσοστού των περιεχόμενων ινών συνεπάγεται περαιτέρω μείωση της συστολής ξήρανσης. **(60)**



Εικόνα 1.27 Σύγκριση της συστολής ξήρανσης ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος με ιπτάμενη τέφρα με ΣΚΒ και ΕΣ χωρίς μεταλλικές ίνες. Όπου NWHS=υψηλής αντοχής σκυρόδεμα κανονικού βάρους, LWplain= μη ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα, LWS1= ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα με μικρό ποσοστό ινών, LWS2== ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα με μέτριο ποσοστό ινών, LWS3= ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα με υψηλό ποσοστό ινών. (60)

1.9.9 Θερμομόνωση και πυρασφάλεια

Λόγω της πορώδους δομής των ΕΑ, στοιχείο που τους προσδίδει και το χαρακτηριστικά μικρότερο τους βάρος, μειώνεται σημαντικά ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας διαμέσου τους, συγκριτικά με τα πιο συμπαγή αδρανή του ΣΚΒ. Έτσι, μειώνεται η θερμική αγωγιμότητα του ΕΣ. Ακόμα, το ΕΣ χαρακτηρίζεται από μικρότερο συντελεστή θερμικής διαστολής. **(14)**

Το δομικό ΕΣ γενικά επιδεικνύει μεγαλύτερη αντίσταση στην πυρκαγιά συγκριτικά με το δομικό ΣΚΒ. Η ιδιότητα αυτή οφείλεται στον συνδυασμό των εξής στοιχείων: μικρότερη θερμική αγωγιμότητα (που οδηγεί σε μικρότερη άνοδο της θερμοκρασίας στην εκτεθειμένη επιφάνειά του), μικρότερος συντελεστής θερμικής διαστολής (που οδηγεί στην ανάπτυξη μικρότερων τάσεων λόγω περιορισμού της ελευθερίας κίνησης) και το έμφυτο

χαρακτηριστικό των ΕΑ, που είναι η μεγαλύτερη θερμική σταθερότητά τους, επειδή έχουν ήδη εκτεθεί σε υψηλές θερμοκρασίες κατά τη φυσική ή τεχνητή επεξεργασία τους.(14)

Η αντίσταση στο θρυμματισμό κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς είναι μία ιδιότητα που εξαρτάται από την περιεχόμενη υγρασία του σκυροδέματος. Έτσι λοιπόν, η χρήση κορεσμένων ΕΑ θα αυξήσει τον κίνδυνο θρυμματισμού του σκυροδέματος. Ο ρυθμός με τον οποίο το νερό μπορεί να κινείται διαμέσου του σκυροδέματος (ως ατμός) κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς, μπορεί επίσης να επηρεάσει το φαινόμενο του θρυμματισμού. Η χαμηλή διαπερατότητα ατμών, που αποτελεί χαρακτηριστική ιδιότητα των σκυροδεμάτων με μικρό λόγο νερού/συνδετικών υλών, θα οδηγήσει στην ανάπτυξη υψηλών εσωτερικών τάσεων, καθώς ο ατμός επιχειρεί να διαφύγει. Το ξηρό σκυρόδεμα είναι λιγότερο επιρρεπές στο θρυμματισμό.(14)

Όσον αφορά το ινοπλισμένο ΕΣ με ίνες από χάλυβα η βιβλιογραφία και οι έρευνες που έχουν γίνει σχετικά με την πυρασφάλειά του είναι αρκετά περιορισμένες. Ωστόσο, η ενσωμάτωση ινών από πολυπροπυλένιο (θερμοπλαστικό πολυμερές) σε ΕΣ υψηλής αντοχής, μπορεί να βελτιώσει την αντίσταση στην πυρκαγιά, καθώς οι ίνες λιώνουν κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς και επιτρέπουν στον ατμό να διαφύγει. Παρόλα αυτά και πάλι η περιεχόμενη υγρασία του σκυροδέματος παίζει καθοριστικό ρόλο.(14)

1.10 Βιβλιογραφική διερεύνηση πειραματικών εργασιών στο κίσηρόδεμα

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια σύντομη παρουσίαση πειραματικών εργασιών στις οποίες αναπτύχθηκαν και δοκιμάστηκαν διάφορες συνθέσεις από ΚΔ, για την καλύτερη μελέτη των τεχνικών χαρακτηριστικών του.

Η Α. Μπάκα το 1981 ανέπτυξε ΚΔ το οποίο είχε μέγιστο κόκκο αδρανούς 7mm, με κίσηρη από την νήσο Γυαλί, σε δοκίμια καταλήγοντας στα εξής αποτελέσματα.

- Το ΚΔ ανέπτυξε αντοχές περίπου μέχρι 35 MPa με πυκνότητα ίση με 1500 kg/m³ και περιεκτικότητα τσιμέντου περίπου 400 kg/m³. Όσον αφορά το μέτρο ελαστικότητας, αυτό εκτιμήθηκε ίσο με 11 GPa, με μέγιστη παραμόρφωση της τάξης του 2.2 ‰. Ενώ αποδείχτηκε πως η συνάφεια του χάλυβα με το ΚΔ είναι αντίστοιχη της συνάφειας στο ΣΚΒ.
- Σε σύγκριση με το ΣΚΒ ίδιας περιεκτικότητας σε τσιμέντο, ίσης με 350 kg/m³, προέκυψε μείωση της θλιπτικής αντοχής κατά 10%, με τη διαφορά αυτή να αναμένεται αυξημένη σε περίπτωση αύξησης της περιεκτικότητας σε τσιμέντο. Αντίστοιχα και η εφελκυστική αντοχή εμφανίστηκε όπως αναμενόταν μειωμένη στο ΚΔ.
- Τέλος, το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων προσέγγιζε τη γραμμικότητα όσο αυξανόταν η περιεκτικότητα τσιμέντου στη σύνθεση.(9)

Στην εργασία της Γ. Τασούλα προετοιμάστηκαν 12 συνθέσεις ΚΔ. Οι πυκνότητες των δοκιμών κυμαίνονταν μεταξύ των 1460,88-1643,13 kg/m³, ενώ προέκυψαν μέσες θλιπτικές αντοχές από 28 έως 36,4 MPa. Επιπλέον, για το χαρακτηρισμό του ΚΔ, από τα

Κεφάλαιο 1: Βιβλιογραφική και θεωρητική διερεύνηση του ελαφροσκυροδέματος

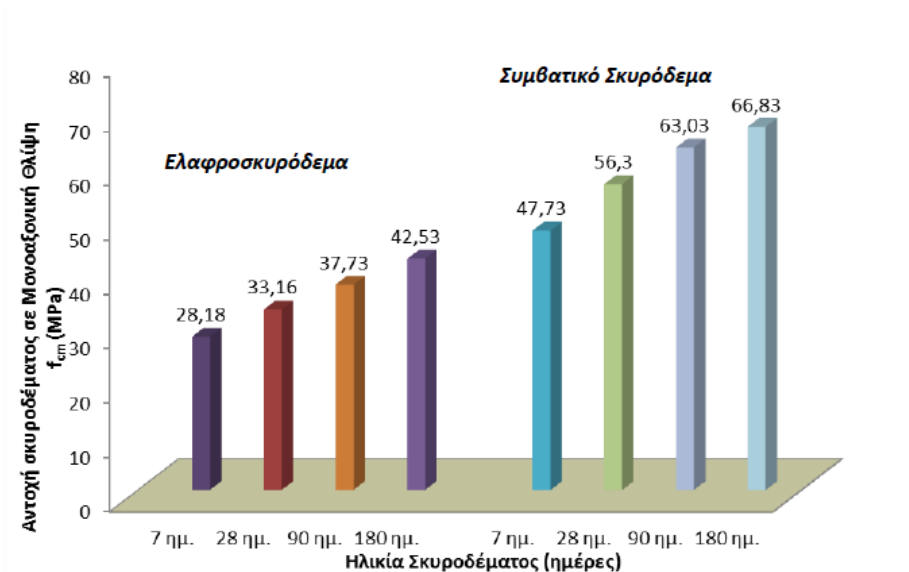
αποτελέσματα θλίψης κυβικών δοκιμών διαστάσεων 100*100 mm του παραγόμενου ελαφροσκυροδέματος στις 7 ημέρες υπολογίστηκε αντοχή 28,18 MPa, στις 28 ημέρες 33,16 MPa, στις 90 ημέρες 32,73 MPa και στις 180 ημέρες 42,53 MPa. Η μέση εφελκυστική αντοχή διάρρηξης εκτιμήθηκε ίση με 2,4 MPa, χωρίς να υπάρχει σημαντική αύξηση στις 90 σε σχέση με την τιμή των 28 ημερών. Αντίθετα, στη θλιπτική αντοχή υπήρξε σημαντική αύξηση η οποία φαίνεται και στην εικόνα. Η πειραματική τιμή του Μέτρου Ελαστικότητας μετρήθηκε ίση με $E_{cm}=14.84$ GPa (12)

Δοκός	Σύνθεση	Ποσότητες Συστατικών Σύνθεσης (kg/m ³)				
		Τσιμέντο	Νερό		Κίσηρης (0-7 mm)	Ρευστοποιητής (Chemium 174)
			Ενεργός Λόγος N/T _{ev}	Συνολικό Νερό		
Δ1	Δ1 - 1	350.00	0.42	131.84	1252.50	6.00
	Δ1 - 2	350.00	0.42	131.84	1252.50	8.00
Δ2	Δ2 - 1	350.00	0.42	141.26	1252.50	5.00
	Δ2 - 2	350.00	0.42	131.84	1252.50	7.00
Δ3	Δ3 - 1	350.00	0.42	258.50	1058.34	4.00
	Δ3 - 2	350.00	0.42	258.50	1058.34	4.00
Δ4	Δ4 - 1	350.00	0.42	258.50	1058.34	4.00
	Δ4 - 2	350.00	0.42	258.50	1058.34	4.00
Δ5	Δ5 - 1	350.00	0.42	266.66	738.00	4.00
	Δ5 - 2	350.00	0.42	243.80	738.00	3.00
Δ6	Δ6 - 1	350.00	0.42	243.80	1161.90	3.00
	Δ6 - 2	350.00	0.42	243.80	1161.90	3.00

Πίνακας 1.3 Ποσότητες (κ.β.) Συστατικών Συνθέσεων Σκυροδέματος (Γ. Τασούλα) (12)

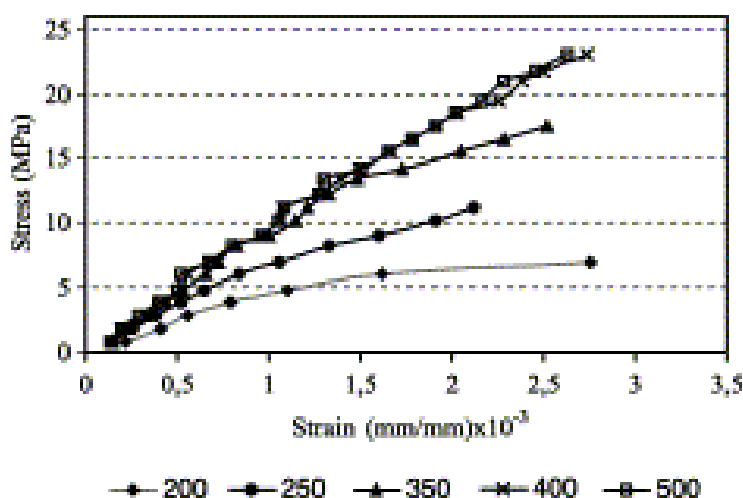
Σύνθεση	Μέσο μοναδιαίο βάρος (kg/m ³)	Μέση θλιπτική αντοχή f_{cm} (MPa)
Δ1-2	1643,125	36,4
Δ2-2	1630,625	32,4
Δ3-2	1556,88	26,5
Δ4-2	1459,13	22,8
Δ5-2	1476,13	25,2
Δ6-2	1460,88	28

Πίνακας 1.4 Μέσο μοναδιαίο βάρος δοκιμών και μέση αντοχή 28 ημερών κυβικών δοκιμών σε θλίψη (Γ. Τασούλα) (12)

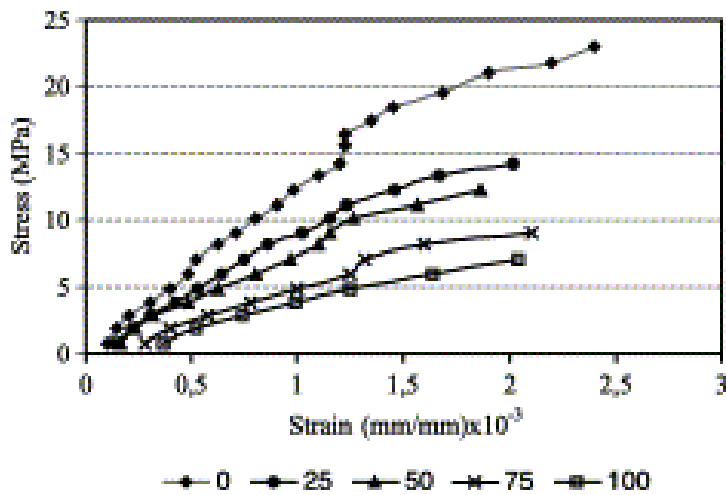


Εικόνα 1.28 Μέση θλιπτική αντοχή ($f_{c,m}$) σε διάφορες ηλικίες ωρίμανσης ελαφροσκυροδέματος και συμβατικού σκυροδέματος (Γ. Τασούλα) (12)

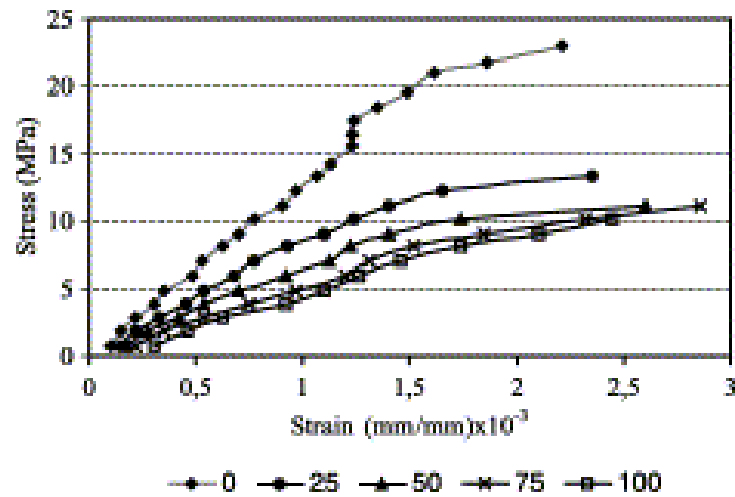
Πειραματική μελέτη με αντικείμενο την επιρροή στη θλιπτική αντοχή και πυκνότητα τους σκυροδέματος με βάση τη μεταβολή των ποσοστών του τσιμέντου και της αντικατάστασης κανονικών αδρανών με κίσηρη, καθώς και τη μεταβολή της κάθισης, πραγματοποιήθηκε και από τους Sahin et al. Το 2003. Στη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκαν αδρανή των οποίων η μέγιστη διάμετρος ήταν 16 mm, η περιεκτικότητα σε τσιμέντο μεταβαλλόταν από 200 έως 500 kg/m³, ενώ η κάθιση κυμαινόταν από 3,5 έως 7 cm. Παρακάτω δίνονται ενδεικτικά οι πειραματικές καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων του ΚΔ που διερευνήθηκαν, καθώς και οι πυκνότητες των δοκιμίων του ΚΔ για τα διαφορετικά ποσοστά αντικατάστασης των αδρανών συνήθους βάρους με κίσηρη και τις διαφορετικές καθίσεις. (61)



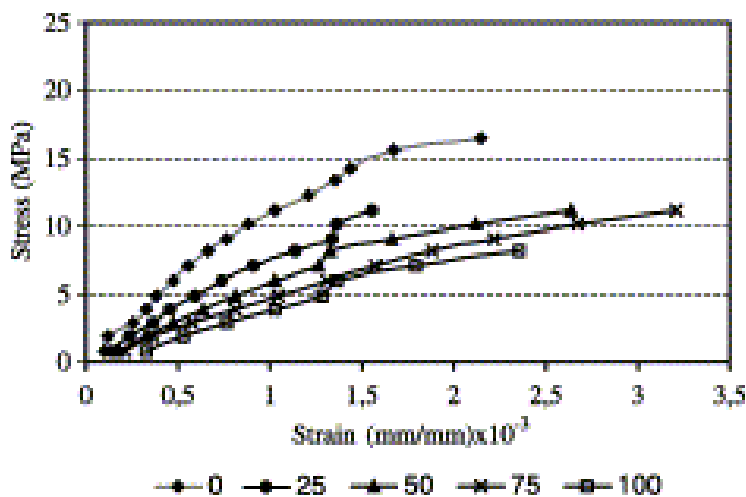
Εικόνα 1.29 Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για μεταβολή της περιεκτικότητας σε τσιμέντο από 200 ως 500 kg/m³. (61)



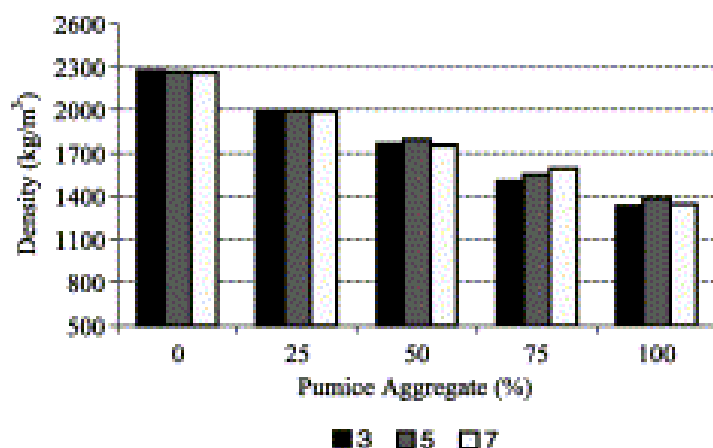
Εικόνα 1.30 Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για διάφορα ποσοστά αντικατάστασης του αδρανούς συνήθους βάρους με κίσηρη, με κάθιση σκυροδέματος 3cm.(61)



Εικόνα 1.31 Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για διάφορα ποσοστά αντικατάστασης του αδρανούς συνήθους βάρους με κίσηρη, με κάθιση σκυροδέματος 5cm.(61)



Εικόνα 1.32 Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για διάφορα ποσοστά αντικατάστασης του αδρανούς συνήθους βάρους με κίσηρη, με κάθιση σκυροδέματος 7cm. (61)



Εικόνα 1.33 Σχέση μεταξύ των διαφορετικών καθίσεων του ΚΔ (3-5-7cm), του ποσοστού των αδρανών κίσηρης και της τελικής πυκνότητας. (61)

Το 2014 οι L. H. Nguyen et al. μελέτησαν, μέσα από μια σειρά πειραμάτων την επιρροή επτά διαφορετικών ελαφροαδρανών, μεταξύ των οποίων και η κίσηρη, στις θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του δομικού ΕΣ. Για όλες τις συνθέσεις ο λόγος νερού προς τσιμέντου ήταν 0,45, ενώ για να μην μεταβληθεί ο λόγος νερού προς τσιμέντο, λόγω απορρόφησης νερού από την κίσηρη, χρησιμοποιήθηκαν κορεσμένα αδρανή. Για καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων των πειραμάτων αναπτύχθηκε και ΣΚΒ. Και σε αυτήν την περίπτωση οι συνθέσεις του ΚΔ, είχαν ως βασικό χαρακτηριστικό την τμηματική αντικατάσταση των συμβατικών αδρανών με κίσηρη. Η ποσότητα ρευστοποιητή που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή που απαιτείτο για την διατήρηση της εργασιμότητας των σκυροδεμάτων.(62)

Οι συνθέσεις των ΚΔ και τα αποτελέσματα των πειραμάτων, όσον αφορά την πυκνότητα, τη θλιπτική αντοχή και το Μέτρο Ελαστικότητας «Ε» ήταν τα εξής:

Σύνθεση	Τσιμέντο (kg/m ³)	Χονδρόκοκκα αδρανή (kg/m ³)		Λεπτόκοκκα αδρανή (kg/m ³)		Νερό (kg/m ³)	Ρευστοποιητής (g/l)
		5/8 κ.	4/10 σ.	0/5 κ.	0/2 σ.		
OP-0	426	626	0	0	554	190	3.7
OP-50	426	626	0	177	277	190	4.3
OP-100	426	626	0	354	0	190	6
NWC	426	0	1105	0	554	190	2.2

Πίνακας 1.5 Ποσότητες των υλικών για τις συνθέσεις ΚΔ (Nguyen et al. 2014) (62)

Σύνθεση	Πυκνότητα ρ (kg/m ³)	Θλιπτική αντοχή f _c (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας Ε (GPa)
OP-0	1490	34.8	19.1
OP-50	1410	33	17
OP-100	1340	31.4	15.3
NWC	2030	45.3	32.7

Πίνακας 1.6 Μηχανικά χαρακτηριστικά συνθέσεων ΚΔ (Nguyen et al. 2014) (62)

Από τα παραπάνω αποτελέσματα γίνεται εύκολα αντιληπτό πως με την αύξηση της ποσότητας του ΚΔ προκύπτει μείωση της πυκνότητας, της θλιπτικής αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας, όπως και αναμενόταν.

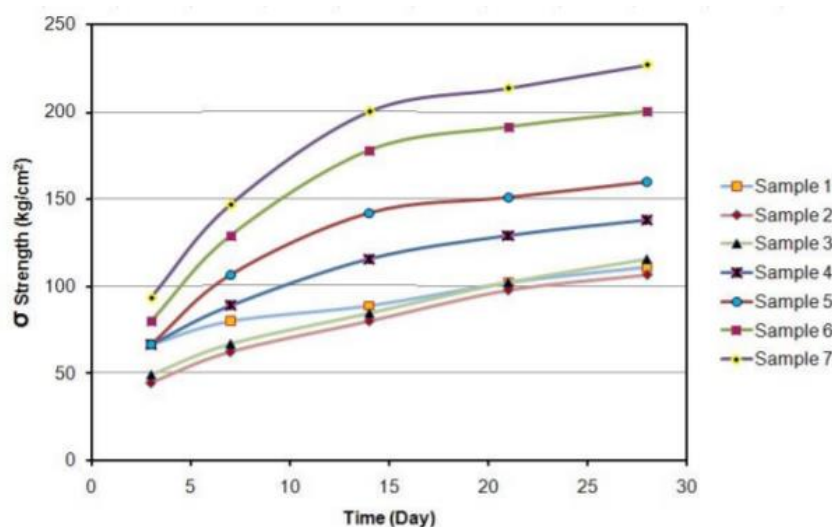
Παρόμοια πειράματα για τη καλύτερη μελέτη του ΚΔ, σε συνδυασμό με την παρουσία τέφρας φλοιού ρυζιού πραγματοποιήσαν και οι Azhar et al. το 2014. Συγκεκριμένα πραγματοποίησαν μια σειρά από συνθέσεις στις οποίες η μοναδική μεταβλητή ήταν η ποσότητα της κίσηρης. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται 7 διαφορετικές συνθέσεις οι οποίες θεωρούνται αντιπροσωπευτικές για το σύνολο της έρευνας και στις οποίες υπάρχει μια σταδιακή μείωση του ποσοστού της κίσηρης. Από τις συνθέσεις αυτές εξαγόμενο αποτέλεσμα είναι η συσχέτιση της πυκνότητας με τη χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή, καθώς και η εξέλιξη της αντοχής μέχρι τις 28 μέρες.(63)

Σύνθεση	Τσιμέντο	Άμμος	Κίσηρη	Τέφρα φλοιού ρυζιού	Νερό
1	1	1	1.1	0.05	0.5
2	1	1	1.0	0.05	0.5
3	1	1	0.9	0.05	0.5
4	1	1	0.7	0.05	0.5
5	1	1	0.4	0.05	0.5
6	1	1	0.6	0.05	0.5
7	1	1	0.5	0.05	0.5

Πίνακας 1.7 Αναλογίες του τσιμέντου, της άμμου, της κίσηρης, της τέφρας φλοιού ρυζιού και του νερού των συνθέσεων του ΚΔ (Azhar et al. 2014) (63)

Σύνθεση	Πυκνότητα γ (kg/m ³)	Αντοχή κύβου (Kg/cm ²)	Αντοχή κύβου (MPa)
1	1389.63	111.11	11.1
2	1452.15	112.67	11.3
3	1791.11	115.56	11.5
4	1799.41	137.78	13.8
5	1960.00	160.00	16.0
6	1928.89	200.00	20.0
7	1776.59	226.67	22.7

Πίνακας 1.8 Πυκνότητα και θλιπτική αντοχή κύβου 28 ημερών διαφόρων συνθέσεων ΚΔ (Azhar et al. 2014) (63)



Εικόνα 1.34 Διάγραμμα ανάπτυξης θλιπτικής αντοχής στο διάστημα 3 έως 28 ημέρες, 7 δοκιμών ΚΔ (Azhar et al. 2014) (63)

Οι Khandaker et al. διερεύνησαν το 2002 την καταλληλότητα της αντικατάστασης τσιμέντου με ηφαιστειακή κίσηρη και την καταλληλότητα της ως χονδρόκοκκο αδρανές. Διενεργήθηκαν πειράματα, στα οποία υπήρχε αντικατάσταση του τσιμέντου από 0% ως 25% κατά βάρος και αντικατάσταση των συμβατικών αδρανών με αδρανή από κίσηρη από 0% έως 100%. Στον παρακάτω πίνακα 1.8 δίνονται τα αποτελέσματα της χαρακτηριστικής αντοχής σε θλίψη, του υπολογιζόμενου μέτρου ελαστικότητας, της ξηρής πυκνότητας και της εφελκυστικής αντοχής των διάφορων συνθέσεων. Για την καλύτερη κατανόηση του πίνακα πρέπει να εξηγηθεί πως το VPC Mix 1=1:2:3 σημαίνει πως το μείγμα 1 είχε αναλογία τσιμέντο/λεπτόκοκκό αδρανές/χονδρόκοκκο αδρανές 1/2/3 ενώ το μείγμα VPC Mix 2=1:2:4 είχε αναλογία 1/2/4 αντίστοιχα. Επιπλέον, στις διάφορες συνθέσεις (A,B,C,D,E) το πρώτο νούμερο αντιπροσωπεύει το ποσοστό της κίσηρης στο σύνολο των χονδρόκοκκων αδρανών, το δεύτερο νούμερο αντιπροσωπεύει το ποσοστό κατά βάρος της κίσηρης στο σύνολο των αδρανών και το τρίτο νούμερο το λόγο του βάρους των αδρανών προς το βάρος του τσιμέντο. Τέλος, ο λόγος νερού προς τσιμέντο ήταν για όλες τις συνθέσεις 0,45.(6)

Mix designation	28 day strength, MPa			Modulus of elasticity (kN/mm ²)	Dry density (kg/m ³)
	Compressive		Tensile		
	Cylinder	Cube	Split cylinder		
<i>VPC Mix 1 = 1:2:3</i>					
A: 100–36.9–2.38	22	28	2.6	10.5	1852
B: 90–25.6–2.55	25	30	2.9	11.0	1940
C: 75–19.4–2.80	27	32	3.0	12.0	1990
D: 50–11.3–3.22	29	36	3.5	14.5	2158
E: 0–0–4.07	35	40	3.7	21.2	2515
<i>VPC Mix 2 = 1:2:4</i>					
P: 100–36.9–2.62	18	24	2.2	10.0	1831
Q: 90–30.6–2.85	23	25	2.0	11.9	1908
R: 75–22.8–3.18	25	28	2.6	12.2	1970
S: 50–12.9–3.75	28	36	3.2	14.5	2145
T: 0–0–4.87	34	40	3.4	20.7	2475

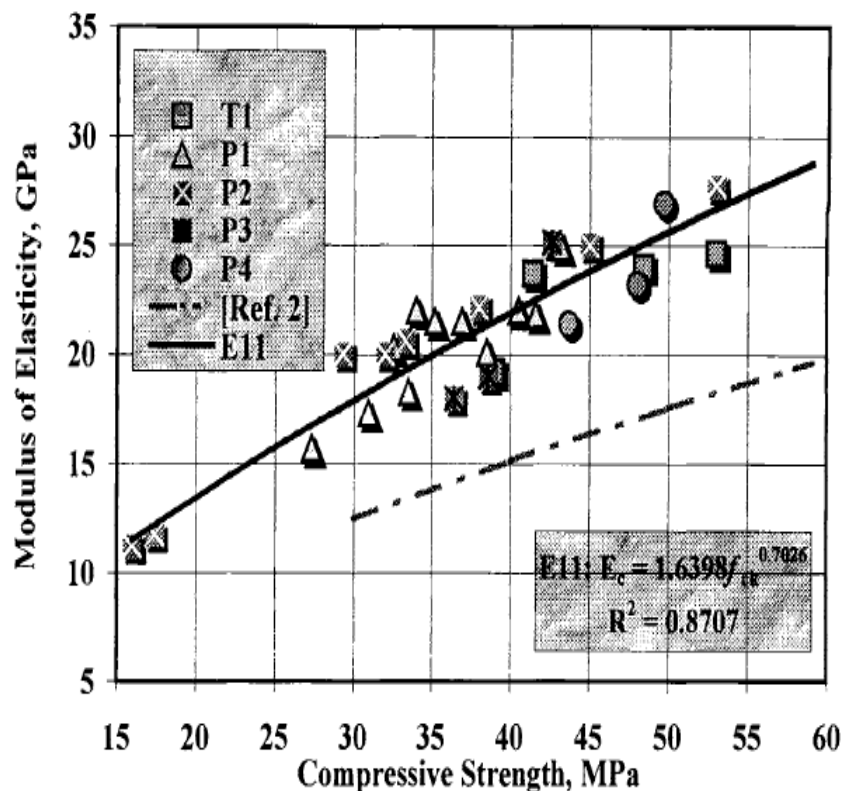
Πίνακας 1.9 Μηχανικά χαρακτηριστικά ΚΔ κατά Khandaker et al. 2002 (6)

Στην εργασία των Yeginobali et al. χρησιμοποιήθηκε ο συνδυασμός κίσηρης και τόφφου από την Τουρκία ως ελαφροαδρανή, με προσθήκη πυριτικής παιπάλης (silica fume). Το ειδικό βάρος του νωπού σκυροδέματος των συνθέσεων του κυμάνθηκε από 1870 ως 2280 kg/m³, ενώ η μέγιστη θλιπτική αντοχή που επιτεύχθηκε έφτασε τα 55 MPa. Αξίζει να σημειωθεί πως αύξηση του περιεχόμενου τσιμέντου από 445 kg/m³ σε 633 kg/m³ οδήγησε σε αύξηση της θλιπτικής αντοχής από 29,3 σε 55 MPa, ενώ οι διάφορες συνθέσεις είχαν αποκτήσει στις 7 μέρες κατά μέσο όρο το 84% της αντοχής των 28 ημερών και στις 90 μέρες δεν υπήρξε κάποια σημαντική αύξηση της αντοχής σε σχέση με αυτή των 28 ημερών. Όσον αφορά το μέτρο ελαστικότητας, αυτό κυμάνθηκε από 17,1 GPa έως 28,9 GPa για θλιπτικές αντοχές από 38,6 έως 53 MPa αντίστοιχα. Η εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη κυμάνθηκε από 2,1 έως 5,5 MPa για θλιπτικές αντοχές από 33 έως 55MPa αντίστοιχα. Στην

εικόνα (1.35) δίνεται η πειραματική σχέση μεταξύ του Μέτρου Ελαστικότητας και της θλιπτικής αντοχής, όπως αυτή προέκυψε από την επεξεργασία των δεδομένων. (64)

Steps	Equation	Mixture Proportions	NLWA Type				
			T1	P1	P2	P3	P4
7	-	Cement, kg/m^3	519	498	474	446	406
5	5	Silica Fume, kg/m^3	74	71	68	64	58
4	6	Total Binder, kg/m^3	593	569	542	510	464
6	-	Superplasticizer, kg/m^3	7.4	7.1	6.8	6.4	5.8
12	-	Total Water, kg/m^3	276	226	246	257	263
9	-	NLWA, kg/m^3	566	241	327	366	430
10	-	Fine Aggregate, kg/m^3	679	940	709	799	708
11	-	Absorbed Water, kg/m^3	121	65	80	89	100
3	4	Free W/C	0.262	0.284	0.307	0.329	0.350
8	14	Fine to NLWA Ratio	0.572	1.442	1.090	0.844	0.644
Fresh Properties							
-	-	Slump, <i>cm</i>	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
-	1	VB, <i>s</i>	4	4	4	4	4
13	3	Fresh Unit Weight, kg/m^3	2155	2092	2037	1990	1952
-	-	Air Content, %	2	2	2	2	2
Mechanical Properties							
Compressive Strength, <i>MPa</i>							
13	8	- 7 days	36.4	33.5	31.0	28.9	27.3
2	7	- 28 days	45.6	42.4	39.4	36.5	33.8
14	9	- 90 days	42.3	38.8	35.9	33.6	31.8
15	10	Splitting Tensile Strength, <i>MPa</i>	3.1	2.7	2.4	2.2	2.0
16	11	Modulus of Elasticity, <i>GPa</i>	24.0	22.8	21.6	20.5	19.5
17	12	Poisson's Ratio	0.207	0.180	0.164	0.157	0.158
Heat Insulation Properties							
1	-	Dry Unit Weight, kg/m^3	1950	1900	1850	1800	1750
19	15	Thermal Conductivity, W/m^2K	0.582	0.564	0.546	0.530	0.514

Εικόνα 1.35 Πίνακας αναλογιών και μηχανικών χαρακτηριστικών συνθέσεων



Εικόνα 1.35 Πειραματική συσχέτιση του μέτρου ελαστικότητας και της θλιπτικής αντοχής κατά Yeginobali et al 1998 (64)

Κεφάλαιο 1: Βιβλιογραφική και θεωρητική διερεύνηση του ελαφροσκυροδέματος

Στην έρευνα των Hossain et al. (2011) παρουσιάζεται η εξέλιξη κισσηροδέματος, στο οποίο χρησιμοποιείται τσιμέντο τύπου ASTM Type 1 αναμειγμένο με κίσηρη, καθώς και ελαφροαδρανή κίσηρης. Η αξιολόγηση των συνθέσεων έγινε μετά από σειρά δοκιμών τόσο στο νωπό ΕΣ, όσο και στο σκληρυμένο. Οι μεταβλητές της έρευνας περιλαμβάνουν: τμηματική αντικατάσταση των συμβατικών χονδρόκοκκων ΕΑ με χονδρόκοκκα αδρανή κίσηρης (συγκεκριμένα 0%, 50%, 75%, 100%), ολική αντικατάσταση της άμμου με κίσηρη ως λεπτόκοκκο αδρανές, μεταβολή του λόγου του βάρους των αδρανών προς το τσιμέντο (1,3-3,7), σταθερό λόγο νερού προς τσιμέντο και τέλος τη χρησιμοποίηση δύο ειδών τσιμέντου (ASTM Type 1 τσιμέντο Portland και Portland αναμειγμένο με κίσηρη). Επίσης, για την ασφαλέστερη εξαγωγή συμπερασμάτων παρασκευάστηκε και ένα ΣΚΒ. Τα χαρακτηριστικά των συνθέσεων και τα αποτελέσματα των δοκιμών για τις μηχανικές τους ιδιότητες φαίνονται στους πίνακες 1.10 και 1.11. Στην Εικόνα 1.36 υπάρχει η πειραματική σχέση μεταξύ του μέτρου ελαστικότητας και της θλιπτικής αντοχής, όπως αυτή προέκυψε από την επεξεργασία των δεδομένων.(65)

Mix ID	Ratio		Binder (kg/m ³)		Aggregates (kg/m ³)				Slump (mm)	Air content (%)
	A/B	W/B	PC	VP	Coarse		Fine			
					VPA	GA	VPA	Sand		
<i>Type A: with PC, coarse VPA, coarse GA and S (W/B = 0.45)</i>										
A-100-PC-S	2.34	0.45	462	-	368	0	-	714	60	4.1
A-75-PC-S	2.68	0.45	462	-	276	247	-	714	68	3.5
A-50-PC-S	3.01	0.45	462	-	184	494	-	714	75	3.3
A-0-PC-S ^a	3.68	0.45	462	-	0	988	-	714	82	2.8
<i>Type B: with PC, coarse VPA, coarse GA and fine VPA (W/B = 0.45)</i>										
B-100-PC	1.60	0.45	462	-	368	0	369	-	50	4.8
B-75-PC	1.93	0.45	462	-	276	247	369	-	56	4.1
B-50-PC	2.27	0.45	462	-	184	494	369	-	62	3.9
B-0-PC	2.94	0.45	462	-	0	988	369	-	68	3.3
<i>Type C: with PVPC, coarse VPA, coarse GA and S (W/B = 0.45)</i>										
C-100-PVPC-S	2.23	0.45	370	92	368	0	-	662	58	4.4
C-75-PVPC-S	2.56	0.45	370	92	276	247	-	662	65	3.7
C-50-PVPC-S	2.90	0.45	370	92	184	494	-	662	72	3.5
C-0-PVPC-S	3.57	0.45	370	92	0	988	-	662	79	3.0
<i>Type D: with PVPC, coarse VPA, coarse GA and fine VPA (W/B = 0.45)</i>										
D-100-PVPC	1.92	0.45	296	74	368	0	342	-	47	5.2
D-75-PVPC	2.34	0.45	296	74	276	247	342	-	54	4.5
D-50-PVPC	2.76	0.45	296	74	184	494	342	-	59	4.2
D-0-PVPC	3.60	0.45	296	74	0	988	342	-	65	3.6

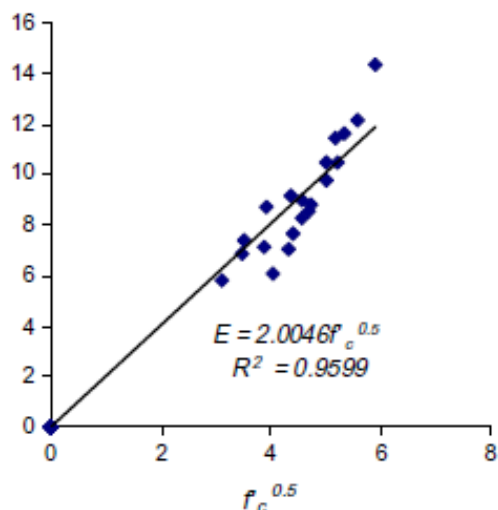
A: total aggregate; PC: ASTM Type I Portland cement; W = water; VPA: volcanic pumice aggregate; B: binder (PC + VP); GA: gravel aggregate; A/B: total aggregate-binder ratio by mass; Mix ID: first letter represents mix type, numeric represents %VPA in the mix, PC or PVPC (blended Portland VP cement) represents type of cement, and S represents sand (if used as fine aggregate).
^a A-0-PC-S: control normal density concrete (NC).

Πίνακας 1.10 Λεπτομέρειες συνθέσεων και ιδιότητες νωπού σκυροδέματος κατά Hossain et al. (65)

Mix ID	28-Day mechanical properties			
	Density (d) (kg/m ³)	f'_c (MPa)	f_t (MPa)	E (GPa)
<i>Type A: with PC, coarse VPA, coarse GA and S (W/B = 0.45)</i>				
A-100-PC-S ^b	1857	27	2.6	10.5
A-75-PC-S ^b	2021	31	3.0	12.1
A-50-PC-S ^b	2186	35	3.5	14.3
A-0-PC-S ^c	2514	40	3.7	18.2
<i>Type B: with PC, coarse VPA, coarse GA and fine VPA (W/B = 0.45)</i>				
B-100-PC ^a	1492	19	1.8	7.7
B-75-PC ^a	1656	22	2.1	8.8
B-50-PC ^a	1820	25	2.5	10.4
B-0-PC	2149	29	2.6	13.3
<i>Type C: with PVPC, coarse VPA, coarse GA and S (W/B = 0.45)</i>				
C-100-PVPC-S ^a	1802	22	2.1	8.5
C-75-PVPC-S ^b	1966	25	2.4	9.8
C-50-PVPC-S ^b	2130	28	2.8	11.6
C-0-PVPC-S	2459	32	2.9	14.7
<i>Type D: with PVPC, coarse VPA, coarse GA and fine VPA (W/B = 0.45)</i>				
D-100-PVPC ^a	1463	16	1.5	6.1
D-75-PVPC ^a	1627	19	1.7	7.0
D-50-PVPC ^a	1792	21	2.0	8.3
D-0-PVPC	2120	24	2.1	10.5

f'_c : compressive strength; f_t : tensile strength; E : modulus of elasticity.
 DS: drying shrinkage.
^a Lightweight structural concrete.
^b Semi-lightweight structural concrete.
^c Normal weight concrete (NC).

Πίνακας 1.11 Μηχανικές ιδιότητες συνθέσεων κατά Hossain et al. (65)



Εικόνα 1.36 Πειραματικός συσχετισμός μεταξύ θλιπτικής αντοχής και μέτρου ελαστικότητας

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η έρευνα που πραγματοποιήθηκε το 2005 από τους Gunduz et al. και αντικείμενο της αποτελεί η επιρροή της μεταβολής του λόγου των λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων αδρανών προς το τσιμέντο στο δομικό ελαφροσκυροδέμα, χωρίς τη χρήση πρόσμικτων σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν λεπτόκοκκα αδρανή κίσηρης από την περιοχή Nevehir της Τουρκίας και χονδρόκοκκα αδρανή κίσηρης από την ελληνική νήσο Γυαλί. Για την μελέτη των επιπτώσεων των διαφορετικών αναλογιών κίσηρης και τσιμέντου στο δομικό ΕΣ

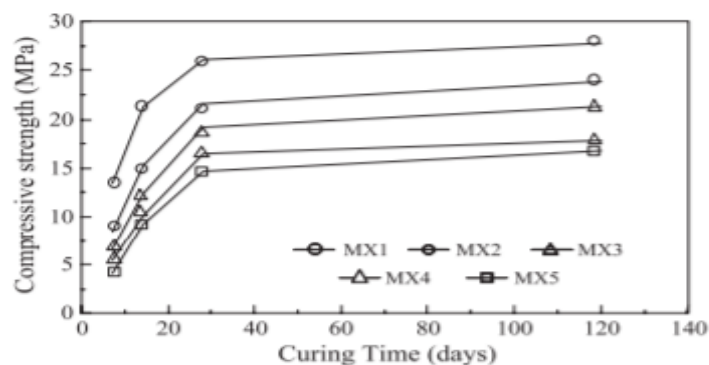
Κεφάλαιο 1: Βιβλιογραφική και θεωρητική διερεύνηση του ελαφροσκυροδέματος

εξετάστηκαν οι εξής κατά βάρος αναλογίες: 2:1; 2,5/1; 3:1; 3,5:1; 4:1, που αντιστοιχούν σε περιεχόμενο τσιμέντο 440;375;320;280;245 kg/m³ αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως το δομικό ΚΔ φτάνει αντοχές παρόμοιες με το ΣΚΒ, με το προνόμιο όμως πως είναι περίπου 30-40% ελαφρύτερο. Επιπλέον η μείωση της αναλογίας των αδρανών προς τσιμέντο οδηγεί, όπως αναμενόταν, σε βελτίωση της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας, καθώς και σε αύξηση της πυκνότητας. Παρακάτω δίνονται εικόνες ενδεικτικές των αποτελεσμάτων της έρευνας.(66)

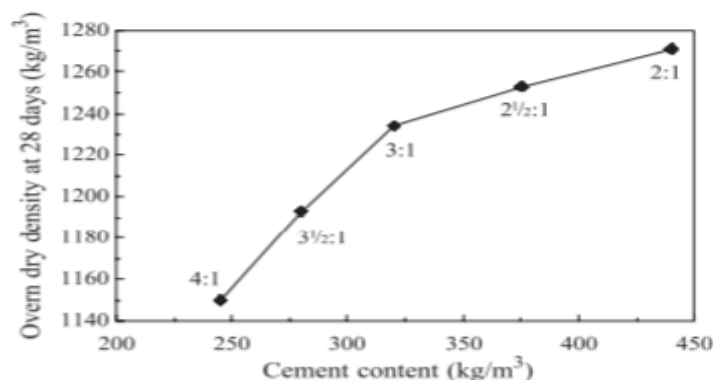
Mixture proportions and concrete densities

Mixture	A/C	C (kg/m ³)	FPA (kg/m ³)	CPA (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Fines (%)	W/C	Fresh density (kg/m ³)	Air dry density (kg/m ³)
MX1	2:1	440	423	458	281	48	0.64	1526±25	1473±22
MX2	2 1/2:1	375	488	450	293	52	0.78	1515±22	1459±28
MX3	3:1	320	538	422	291	56	0.91	1503±18	1473±24
MX4	3 1/2:1	280	608	372	300	62	1.07	1501±44	1415±39
MX5	4:1	245	666	314	301	68	1.23	1472±57	1378±42

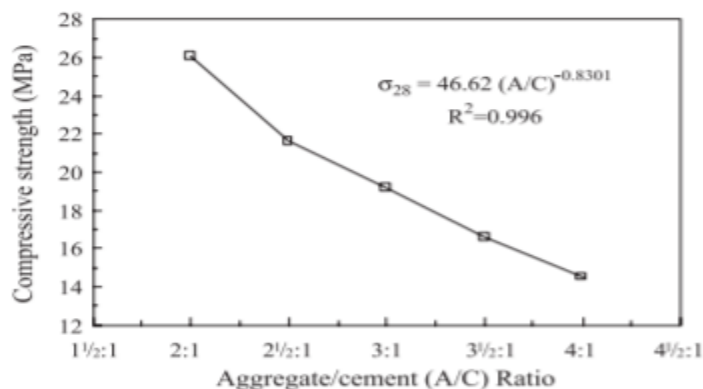
Πίνακας 1.12 Αναλογίες και πυκνότητες των συνθέσεων (Gunduz et al. 2005) (66)



Εικόνα 1.37 Διάγραμμα ανάπτυξης θλιπτικής αντοχής των συνθέσεων (Gunduz et al. 2005) (66)



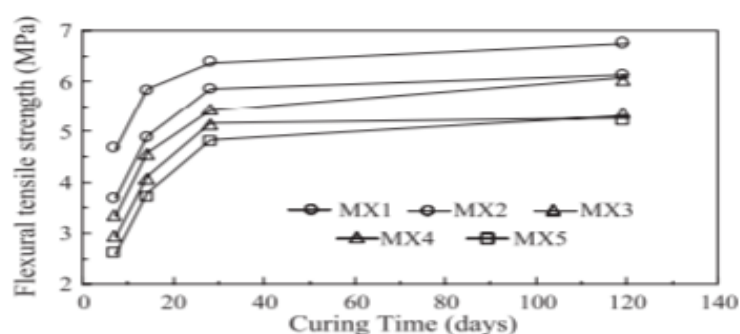
Εικόνα 1.38 Διάγραμμα απεικόνισης της σχέσης μεταξύ πυκνότητας στις 28 μέρες και περιεχόμενου τσιμέντου (Gunduz et al. 2005) (66)



Εικόνα 1.39 Διάγραμμα απεικόνισης της σχέσης μεταξύ του λόγου αδρανών/τσιμέντο και της θλιπτικής αντοχής του ΕΣ (Gunduz et al. 2005) (66)

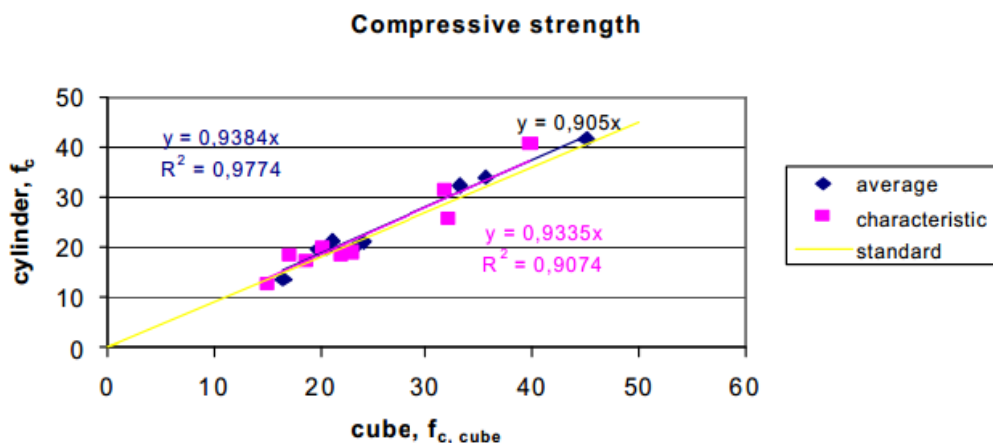
Mixture code	Compressive strength (MPa)		Static elasticity modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	
	28 days	4 months		28 days	4 months
MX1	26.09	27.86	11,129	6.38	6.75
MX2	21.62	23.87	10,302	5.86	6.16
MX3	19.17	21.32	9735	5.42	6.08
MX4	16.57	17.83	9189	5.17	5.28
MX5	14.63	16.72	8714	4.84	5.32

Πίνακας 1.13 Θλιπτική αντοχή, εφελκυστική καμπτική αντοχή και Μέτρο Ελαστικότητας στις 28 μέρες και στους 4 μήνες (Gunduz et al. 2005) (66)



Εικόνα 1.40 Διάγραμμα απεικόνισης της ανάπτυξης καμπτικής εφελκυστικής αντοχής σε συνάρτηση με το χρόνο ωρίμανσης (Gunduz et al. 2005) (66)

Στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Προγράμματος Eurolightcon (2000), πραγματοποιήθηκε σειρά πειραμάτων με σκοπό την αποτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών ΚΔ για την παραγωγή του οποίου χρησιμοποιήθηκε ως ΕΑ η κίσηρη Ισλανδίας. Συνολικά υλοποιήθηκαν δεκατέσσερις διαφορετικές συνθέσεις, με αντοχές 16 και 25 MPa. Στα αποτελέσματα της εργασίας περιλαμβάνεται η σύγκριση μεταξύ θλιπτικής αντοχής κύβου και κυλίνδρου όπως φαίνεται στην εικόνα 1.41. **(67)**



Εικόνα 1.41 Σύγκριση θλιπτικής αντοχής κύβου και κυλίνδρου ΚΔ (EuroligtCon 1998) (67)

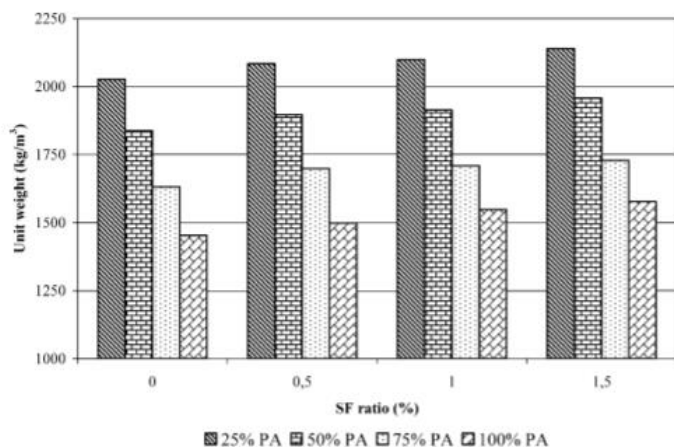
Όσον αφορά τα λοιπά μηχανικά χαρακτηριστικά παρατηρήθηκαν, πως σε δοκιμές εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη το ΚΔ εμφάνισε αντοχές της τάξης του 1-1.6 MPa, ενώ η καμπτική εφελκυστική αντοχή σε πρίσματα διατομής 10x10 cm και μήκους 40/50 cm ΕΣ θλιπτικής αντοχής LC 16 μετρήθηκε 1,3 MPa για ξηρή συντήρηση και 3.1 MPa για υγρή. Επιπλέον για την κατηγορία LC16 αποτιμήθηκε μέτρο ελαστικότητας 19-21 GPa και μεταξύ 22-25 GPa για κατηγορία LC25, ενώ για μια διαφορετική σύνθεση ΕΣ η οποία οδηγούσε σε αντοχή 16 MPa, το Μέτρο Ελαστικότητας μετρήθηκε 9.9-11.3 MPa. (67)

Για τη μελέτη των χαρακτηριστικών του ινοπλισμένου σκυροδέματος οι Mīnaru et al. μελέτησαν το 2014 πειραματικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά ινοπλισμένων ΕΣ, στα οποία τα χονδρόκοκκα αδρανή αντικαθίστανται με κίσηρη, πυριτική παιπάλη και ιπτάμενη τέφρα. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μηχανικών χαρακτηριστικών κάθε συνθέσεως ΚΔ όπως αυτά προέκυψαν από τα πειράματα. Η έρευνα αυτή έχει το μειονέκτημα πως δεν δείχνει το ποσοστό των μεταλλικών ινών στις συνθέσεις. Η πυκνότητα των συνθέσεων υπολογίστηκε με βάση το βάρος των μικρών δοκαριών που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις με διαστάσεις 10x10x50 cm. (68)

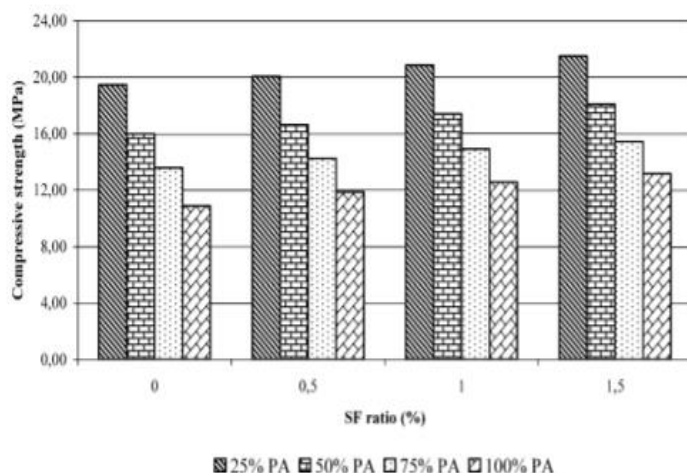
Σύνθεση	Θλιπτική αντοχή κύβου πλευράς 15cm (MPa)	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Αντοχή σε κάμψη (MPa)	Βάρος δοκιμίων διαστάσεων 10x10x50 cm (Kgs)	Πυκνότητα (Kgs/m ³)
1.M30 Control Mix	38.22	4.8	7.5	9.81	1962
2. M30 10% κίσηρη	36.44	4.38	6.75	8.53	1706
3. M30 20% κίσηρη	35.11	4.24	6.00	8.46	1692
4. M30 30% κίσηρη	32.00	3.96	5.00	8.31	1662
5. M30 40% κίσηρη	30.66	3.53	4.25	8.09	1618
6. M30 50% κίσηρη	29.77	3.11	3.5	7.96	1592

Πίνακας 1.14 Χαρακτηριστικά συνθέσεων των ΚΔ κατά Minaru et al. 2014 (68)

Στη μελέτη των Duzgun et al. αντικείμενο έρευνας αποτέλεσε η επιρροή των μεταλλικών ινών στις μηχανικές ιδιότητες του ΚΔ. Οι μεταβλητές για να καθοριστεί η επίδραση του ποσοστού των μεταλλικών ινών στις μηχανικές ιδιότητες του ΚΔ ήταν οι εξής, **α)** υπήρξε αντικατάσταση των συμβατικών αδρανών με κίσηρη σε ποσοστά 25%, 50%, 75%, 100%, **β)** χρησιμοποίηση ποσοστών κατ' όγκο μεταλλικών ινών 0.5%, 1.0%, και 1.5%, **γ)** δόση τσιμέντου 300kg/m³ και κάθιση σκυροδέματος 3±0.5 cm. Στις παρακάτω εικόνες δίνονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων των δοκιμών των διάφορων συνθέσεων που περιγράφηκαν, σχετικά με την πυκνότητα (Εικόνα 1.42), θλιπτική αντοχή (Εικόνα 1.43), εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη (Εικόνα 1.44), καμπτική αντοχή (Εικόνα 1.45) και η καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης (Εικόνα 1.46). Όπως φαίνεται και από τις εικόνες, η αύξηση του ποσοστού σε κίσηρη οδηγούσε σε μείωση της πυκνότητας, της θλιπτικής αντοχής, της εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη και στην αντοχή σε κάμψη. Την αντίθετη επίδραση στα προαναφερθείσα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος έχει η αύξηση του ποσοστού των περιεχόμενων ινών. **(69)**

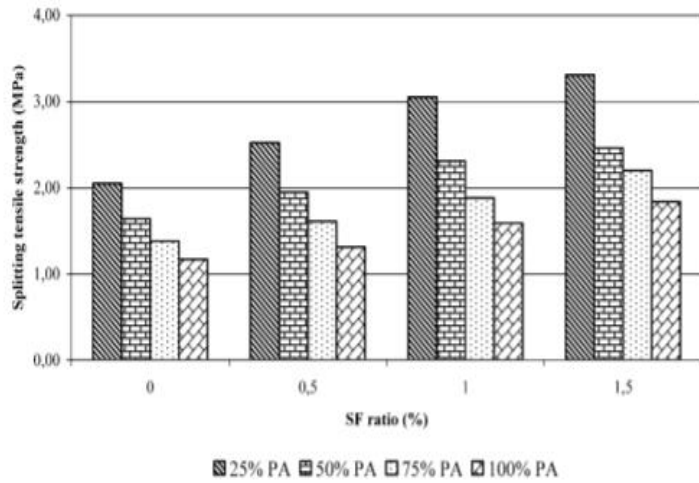


Εικόνα 1.42 Πυκνότητες των διαφόρων συνθέσεων απλού και ινοπλισμένου ΚΔ (PA=rumice aggregate, SF= steel fibres) κατά Duzgun et al. 2005 (69)

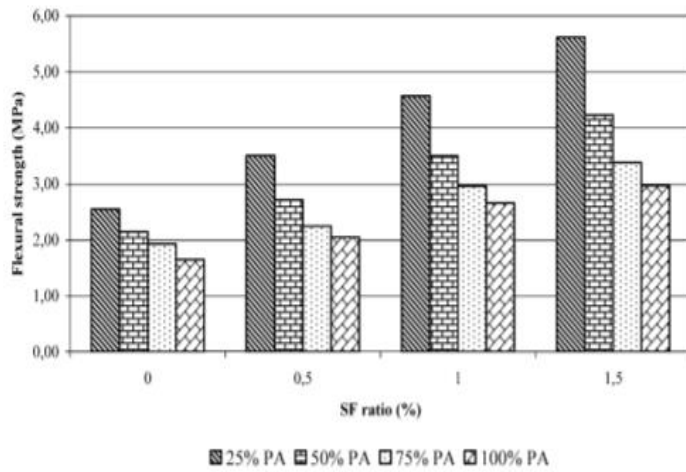


Εικόνα 1.43 Θλιπτικές αντοχές των διαφόρων συνθέσεων απλού και ινοπλισμένου ΚΔ (PA=rumice aggregate, SF= steel fibres) κατά Duzgun et al. 2005 (69)

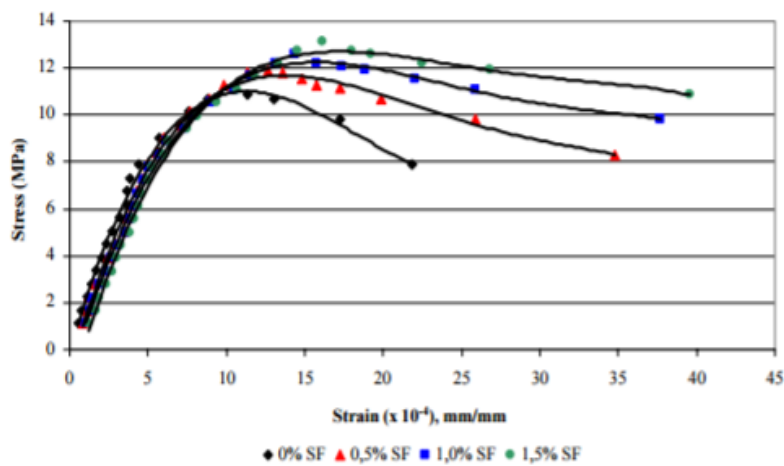
Κεφάλαιο 1: Βιβλιογραφική και θεωρητική διερεύνηση του ελαφροσκυροδέματος



Εικόνα 1.44 Εφελκυστικές αντοχές σε διάρρηξη των διαφόρων συνθέσεων απλού και ινοπλισμένου ΚΔ (PA=rumice aggregate, SF= steel fibres) κατά Duzgun et al. 2005 (69)(69)



Εικόνα 1.45 Καμπτικές αντοχές των διαφόρων συνθέσεων απλού και ινοπλισμένου ΚΔ (PA=rumice aggregate, SF= steel fibres) κατά Duzgun et al. 2005 (69)



Εικόνα 1.46 Τυπικά διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων συνθέσεων ΚΔ για κάθε ποσοστό σε ίνες (SF= steel fibres) κατά Duzgun et al. 2005 (69)

1.11 Κανονιστικό πλαίσιο

1.11.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι κυριότερες ειδικές διατάξεις του Ευρωκώδικα 2 για το ΕΣ, οι οποίες θα ληφθούν υπόψιν κατά την αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων. Στον Πίνακα 1.15 δίνονται συγκεντρωτικά τα χαρακτηριστικά αντοχών και παραμορφώσεων για το ελαφροσκυρόδεμα.

Κατηγορίες αντοχών ελαφροσκυροδέματος													Αναλυτική σχέση / επεξήγηση	
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	
$f_{ck,cube}$	13	18	22	28	33	38	44	50	55	60	66	77	88	
f_{cm} (MPa)	17	22	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	Για $f_{ck} \geq 20$ MPa $f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)
f_{ctm} (MPa)	$f_{ctm} = f_{ctm} \cdot \eta_1$												$\eta_1 = 0,40 + 0,80\rho/2200$	
$f_{ctk,0,05}$ (MPa)	$f_{ctk,0,05} = f_{ctk,0,05} \cdot \eta_1$												κάτω όριο 5%	
$f_{ctk,0,95}$ (MPa)	$f_{ctk,0,95} = f_{ctk,0,95} \cdot \eta_1$												άνω όριο 95%	
E_{ctm} (GPa)	$E_{ctm} = E_{cm} \cdot \eta_E$												$\eta_E = (\rho/2200)^2$	
ϵ_{ic1} (‰)	$k f_{ctm} / (E_{ic1} \cdot \eta_E)$ $k = 1,1$ για ελαφροσκυρόδεμα με άμμο												βλέπε Σχήμα 3.2	
ϵ_{icu1} (‰)	ϵ_{ic1}												βλέπε Σχήμα 3.2	
ϵ_{ic2} (‰)	2,0				2,2				2,3	2,4	2,5			βλέπε Σχήμα 3.3
ϵ_{icu2} (‰)	3,5 η_1				3,1 η_1				2,9 η_1	2,7 η_1	2,6 η_1			βλέπε Σχήμα 3.3 $ \epsilon_{cu2} > \epsilon_{ic2} $
η	2,0				1,75				1,6	1,45	1,4			
ϵ_{ic3} (‰)	1,75				1,8				1,9	2,0	2,2			βλέπε Σχήμα 3.4
ϵ_{icu3} (‰)	3,5 η_1				3,1 η_1				2,9 η_1	2,7 η_1	2,6 η_1			βλέπε Σχήμα 3.4 $ \epsilon_{cu3} > \epsilon_{ic3} $

Πίνακας 1.15 Χαρακτηριστικά αντοχών και παραμορφώσεων ΕΣ

1.11.2 Πυκνότητα

Στο EN 206-1, το ΕΣ κατηγοριοποιείται ανάλογα με τη πυκνότητα μετά από ξήρανση σε κλίβανο, όπως φαίνεται στον πίνακα 1.16.

Κατηγορία Πυκνότητας	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Πυκνότητα (kg/m ³)	801-1000	1001-1200	1201-1400	1401-1600	1601-1800	1801-2000

Πίνακας 1.16 Κατηγορίες Πυκνότητας σύμφωνα με το EN 206-1

1.11.3 Εφελκυστική αντοχή

Η εφελκυστική αντοχή του ΕΣ μπορεί να ληφθεί με πολλαπλασιασμό των τιμών f_{ct} που δίνονται στον πίνακα 1.17 με το συντελεστή:

$$\eta_1 = 0,40 + 0,60 * \frac{\rho}{2200}$$

όπου ρ = άνω όριο της πυκνότητας για την αντίστοιχη κατηγορία σύμφωνα με τον Πίνακα 1.15.

Αντοχή	Αναλυτική σχέση / Εξήγηση														
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
$f_{ck,ube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	$f_{ctm} = 0,30 * f_{ck} \leq C50/60$ $f_{ctm} = 2,12 * \ln(1 + (f_{cm}/10)) > C50/60$
$f_{ctk,0.05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	$f_{ctk,0.05} = 0,7 * f_{ctm}$ 5% οριακό ποσοστό (fractile)
$F_{ctk,0.95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6	$f_{ctk,0.95} = 1,3 * f_{ctm}$ 95% οριακό ποσοστό (fractile)
E_{cm} (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44	$E_{cm} = 22 * [(f_{cm})/10]^{0.3}$ (f_{cm} ln MPa)
ϵ_{c1} (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8	βλ. Σχήμα 3.2 $\epsilon_{c1} (\text{‰}) = 0,7 * f_{cm} / 0,31 - 28$
ϵ_{cu1} (‰)	3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8	βλ. Σχήμα 3.2 για $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{c1} (\text{‰}) = 2,8 + 27 / (98 - f_{ck})$
ϵ_{cu2} (‰)	2,0									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	βλ. Σχήμα 3.3 για $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{cu2} (\text{‰}) = 2,0 + 0,085 * (f_{ck} - 50) / 0,53$
ϵ_{cu3} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	βλ. Σχήμα 3.3 για $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{cu3} (\text{‰}) = 2,6 + 35 / (90 - f_{ck})$
N	2,0									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4	για $f_{ck} \geq 50$ Mpa $n = 1,4 + 23,4 / (90 - f_{ck}) / 100$ 4
ϵ_{c3} (‰)	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	βλ. Σχήμα 3.4 για $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{c3} (\text{‰}) = 1,75 + 0,55 * [(f_{ck} - 50) / 40]$
ϵ_{cu3} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	βλ. Σχήμα 3.4 για $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{cu3} (\text{‰}) = 2,6 + 35 / (90 - f_{ck}) / 100$ 4

Πίνακας 1.17 Χαρακτηριστικά αντοχής και παραμόρφωσης σκυροδέματος κανονικής πυκνότητας

1.11.4 Ελαστικές παραμορφώσεις

Μια εκτίμηση των μέσων τιμών του επιβατικού μέτρου ελαστικότητας E_{icm} για το ελαφροσκυρόδεμα μπορεί να ληφθεί με πολλαπλασιασμό των τιμών του Πίνακα 1.15 για το σκυρόδεμα κανονικής πυκνότητας με τον παρακάτω συντελεστή

$$\eta_E = \left(\frac{\rho}{2200}\right)^2$$

όπου το ρ δηλώνει το άνω όριο της πυκνότητας για την αντίστοιχη κατηγορία (βλ. Πίνακα 1.14)

Επιπλέον ο κανονισμός επισημαίνει, πως όπου χρειάζονται ακριβή δεδομένα, π.χ. όταν οι βυθίσεις είναι πολύ σημαντικές, απαιτούνται πειραματικές δοκιμές έτσι ώστε να καθορίζονται οι τιμές του E_{lcm} σύμφωνα με το ISO 6784.

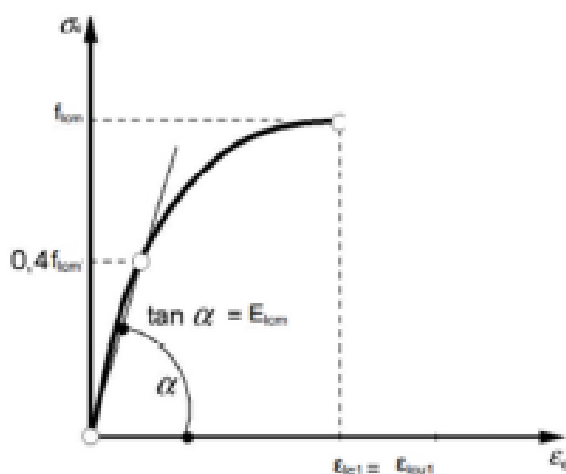
1.11.5 Σχέσεις έντασης παραμόρφωσης για τη μη-γραμμική ανάλυση

Το διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων για το ελαφροσκυρόδεμα ορίζεται από το παρακάτω διάγραμμα το οποίο προκύπτει από τη σχέση:

$$\frac{\sigma_c}{f_{lcm}} = \frac{k_1 \eta - \eta^2}{1 + (k_1 - 2) \eta}$$

όπου:

- $\eta = \epsilon_c / \epsilon_{lc1}$
- ϵ_{lc1} είναι η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη κορυφή της τάσης (σύμφωνα με τον Πίνακα 1.15) και μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση $\epsilon_{lc1} = \frac{k_2 * f_{lcm}}{E_{lcm}}$, με $k_2 = 1,1$ για ελαφροσκυρόδεμα με άμμο
- E_{lcm} το μέτρο Ελαστικότητας του ΕΣ
- $k_1 = 1.05 E_{lcm} * |\epsilon_{lc1}| / f_{lcm}$
- f_{lcm} η μέση θλιπτική αντοχή του ΕΣ



Εικόνα 1.47 Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για το ΕΣ, σύμφωνα με τον EC2 (2004)

1.12 Συμπεράσματα βιβλιογραφικής διερεύνησης

Το ΕΣ (ινοπλισμένο ή μη) αποτελεί ένα ευρέως διαδεδομένο δομικό υλικό στο εξωτερικό και αυτό οφείλεται στις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζει. Το μικρότερο ειδικό του βάρος είναι ιδιαίτερα ευεργετικό για τις κατασκευές, καθώς υπάρχει μείωση των φορτίων που οφείλονται στο ίδιο βάρος της κατασκευής και μάλιστα τα φορτία αυτά αξίζει να επισημανθεί, πως αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος των μονίμων φορτίων σε συνήθεις κατασκευές. Η μείωση των φορτίων που οφείλονται στο ίδιο βάρος της κατασκευής με τη σειρά της συνεπάγεται συνήθως μεγαλύτερη οικονομία, η οποία οφείλεται στη μείωση των διατομών των δομικών στοιχείων, τη μείωση του απαιτούμενου χάλυβα, καθώς και στη μείωση του κόστους που απαιτείται για τη μεταφορά του υλικού. Μια άλλη παράμετρος συμβολής του μικρότερου βάρους του ΕΣ είναι, όπως διαπιστώσαμε και στο παράδειγμα της παραγράφου 1.1, η επιρροή στη θεμελίωση των κατασκευών, διότι το μικρότερο τελικό βάρος του φορέα είναι πιθανό να επιτρέψει οικονομικότερες μεθόδους θεμελίωσης σε χειρότερης ποιότητας εδάφη. Επίσης, δεν πρέπει ειδικά για την Ελλάδα, η οποία είναι μια χώρα έντονης σεισμικής δραστηριότητας, να αμελείται η συνεισφορά της μείωσης των αδρανειακών φορτίων κατά τη διάρκεια του σεισμού με τη χρήση δομικού ΕΣ στις κατασκευές. Θετική επίδραση έχει η χρήση του ΕΣ και στις προκατασκευές, καθώς το μικρότερο βάρος του υλικού συμβάλλει στην ευκολότερη μεταφορά, στην ταχύτητα αποπεράτωσης και γενικά στη μείωση του κόστους.

Το ΕΣ παρουσιάζει και άλλες ιδιαιτερότητες οι οποίες χρίζουν ιδιαίτερης προσοχής και μελέτης. Όπως είδαμε εκτενώς στη βιβλιογραφία, ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία του ΕΣ είναι η επίτευξη παρόμοιων μηχανικών χαρακτηριστικών, λόγω της καλύτερης ποιότητας της διεπιφάνειας μεταξύ των αδρανών και της τσιμεντόπαστας. Η βελτιωμένη διεπιφάνεια σε συνδυασμό με την μικρότερη αντοχή των αδρανών, οδηγεί σε βελτίωση της ομοιογένειας, καθιστώντας πλέον τη διεπιφάνεια να μην είναι το πιο αδύναμο σημείο του υλικού, γεγονός που έχει τεράστια επιρροή στην πορεία θραύσης και στα άλλα χαρακτηριστικά του ΕΣ.

Η θλιπτική αντοχή του ΕΣ εξαρτάται κυρίως από το περιεχόμενο τσιμέντο, ενώ στο ΚΔ αυτό το φαινόμενο μεγεθύνεται, διότι οι κόκκοι της κίσηρης είναι το πιο αδύναμο στοιχείο του υλικού. Επομένως, με την αύξηση του περιεχόμενου τσιμέντου αναμένεται να υπάρξει αύξηση της αντοχής του υλικού. Η προσθήκη ινών δεν φαίνεται να έχει κάποια σημαντική επιρροή στην αντοχή του ΕΣ, παρά μόνο μια μικρή αύξηση της αντοχής σε κυλινδρικά δοκίμια, λόγω του καλύτερου γεφυρώματος των ρωγμών.

Όσον αφορά την εφελκυστική αντοχή του, το ΕΣ παρουσιάζει να έχει κάπως μειωμένη αντοχή σε διάρρηξη και κάμψη. Βέβαια, αυτό το μειονέκτημα του ΕΣ αντιμετωπίζεται σε μεγάλο βαθμό με την ενίσχυση του υλικού με ίνες. Στο ινοπλισμένο ΕΣ, οι ίνες αναλαμβάνουν το φορτίο κατά τη διάνοιξη των ρωγμών μέσω της διεπιφανειακής σύνδεσης που έχουν αναπτύξει με το ΕΣ, οδηγώντας έτσι σε αρκετά μεγαλύτερες αντοχές. Μάλιστα έχει αποδειχθεί πως η προσθήκη ινών στο ΕΣ είναι περισσότερο ευεργετική για την αύξηση της εφελκυστικής αντοχής σε κάμψη και διάρρηξη σε σχέση με τα ΣΚΒ παρόμοιας αντοχής.

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα του ΕΣ είναι το χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας, το οποίο οδηγεί σε αρκετά μεγαλύτερες παραμορφώσεις, τόσο στιγμιαίες, όσο και αυτές που εξελίσσονται με τον χρόνο (ερπυσμός και συστολή ξήρανσης), οι οποίες μπορεί πολλές φορές να μην είναι πλέον ανεκτές. Επιπλέον, το ΕΣ παρουσιάζει πολύ μικρότερο πλαστικό κλάδο κατά την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης, καθιστώντας το ένα σχεδόν ψαθυρό υλικό. Όπως είναι λογικό, η προσθήκη ινών βοηθά στην αύξηση του μέτρου ελαστικότητας, λόγω του μεγαλύτερου μέτρου ελαστικότητας των ινών και στη μείωση του αριθμού των ρωγμών λόγω συρρίκνωσης του νωπού σκυροδέματος, εξαιτίας της αντίστασης που προβάλλουν στη ρηγμάτωση. Επιπρόσθετα, οι ίνες αυξάνουν κατά ένα πολύ μεγάλο ποσοστό τον πλαστικό κλάδο του υλικού, αυξάνοντας δραστικά την πλαστιμότητα του υλικού, το οποίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε μια σεισμική χώρα, όπως η Ελλάδα.

Από τη βιβλιογραφία φαίνεται πως δεν υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση του ΕΣ όσον αφορά τη διατμητική αντοχή του, την κόπωση και την εργασιμότητα του. Βέβαια, η προσθήκη ινών στο μείγμα και ειδικά για μεγάλες ποσότητες ινών, μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα εργασιμότητας, τα οποία αντιμετωπίζονται με την προσθήκη υπερρευστοποιητή και επιβραδυντή.

Τέλος, ένα άλλο πολύ σημαντικό πλεονέκτημα του ΕΣ έναντι του ΣΚΒ είναι η μικρότερη θερμική του αγωγιμότητα. Αυτό το καθιστά ως ένα επιθυμητό υλικό κατασκευών, διότι η μεγαλύτερη θερμομονωτική του ικανότητα οδηγεί σε μείωση του κόστους που απαιτείται για την προσθήκη πρόσθετης θερμομόνωσης στην κατασκευή ή μηχανισμών ψύξης και θέρμανσης των εσωτερικών χώρων. Αξίζει να επισημανθεί, πως ο συνδυασμός της μικρότερης θερμικής αγωγιμότητας, του μικρότερου θερμικού συντελεστή διαστολής και της μεγαλύτερης θερμικής σταθερότητας του ΕΣ, έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη συμπεριφορά του σε συνθήκες πυρκαγιάς σε σχέση με το ΣΚΒ. Έτσι υπάρχει και εδώ μείωση του κόστους, καθώς απαιτείται μικρότερη επικάλυψη για την βελτίωση της πυροπροστασίας, ιδιαίτερα σε τοιχοποιίες. Οι μεταλλικές ίνες δεν φαίνεται να επηρεάζουν ιδιαίτερα τις ιδιότητες που περιγράφηκαν σε αυτήν την παράγραφο.

Είναι αναγκαίο να τονιστεί πως ανάλογα με τα χρησιμοποιούμενα ελαφροαδρανή, είναι υπαρκτό το ενδεχόμενο οι ιδιότητες που έχουν περιγραφεί παραπάνω να μην ανταποκρίνονται πλήρως στην πραγματικότητα για όλα τα είδη ΕΣ. Έτσι, θα πρέπει να υπάρξει μια περαιτέρω διερεύνηση των ιδιοτήτων της ελληνικής κίσηρης στο σκυρόδεμα, για να είναι απολύτως ασφαλής η χρησιμοποίησή της ως δομικό υλικό και για να γίνει πιο διαδεδομένη η χρησιμοποίησή της.

2. Προετοιμασία πειραμάτων

2.1 Εξοπλισμός σκυροδετήσεων

Το Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου διαθέτει αναμικτήρα ονομαστικού όγκου 250 lt (διάμετρος 90 cm και ύψος 40 cm).

Τα συστατικά του κίσηροδέματος τροφοδοτούνται στον αναμικτήρα με την εξής σειρά με επικάλυψη των χρονικών διαστημάτων τροφοδότησης.

- Αδρανή
- Τσιμέντο
- Νερό
- Πρόσθετα σκυροδέματος

Για τις ανάγκες της σκυροδέτησης χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 78 μήτρες. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν:

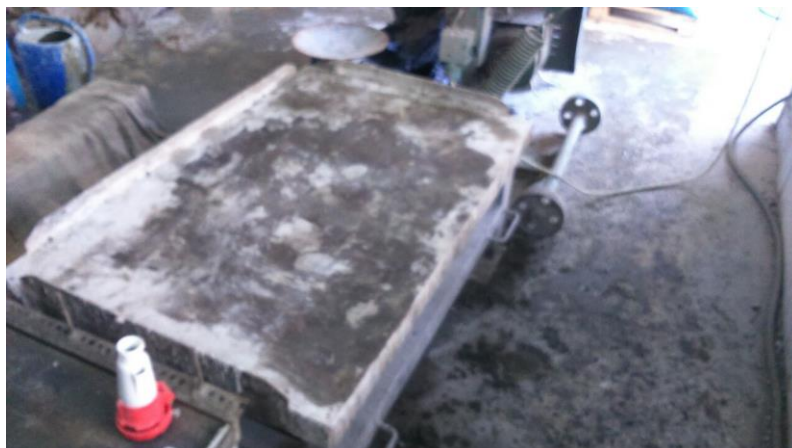
- 18 κύβοι διαστάσεων ακμής 100 mm
- 13 κύβοι διαστάσεων ακμής 150 mm
- 18 κύλινδροι διαμέτρου 100 mm και μήκους 200 mm
- 17 κύλινδροι διαμέτρου 150 mm και μήκους 300 mm
- 6 πρίσματα διαστάσεων πλευρών 100*100*500 mm
- 6 πρίσματα διαστάσεων πλευρών 150*150*600 mm

Από αυτές τις μήτρες κάποιες ανήκουν στο ΕΟΣ του ΕΜΠ και κάποιες μεταφέρθηκαν από το ΕΚΕΤ το οποίο αποτελεί ερευνητικό κέντρο της ΑΓΕΤ Ηρακλής. Συγκεκριμένα, για τις ανάγκες των σκυροδετήσεων μεταφέρθηκαν 7 κύβοι διαστάσεων ακμής 150 mm, 6 κύλινδροι διαμέτρου 100 mm και μήκους 200 mm, 11 κύλινδροι διαμέτρου 150 mm και μήκους 300 mm και 6 πρίσματα διαστάσεων πλευρών 150*150*600 mm.



Εικόνα 2.1 Συναρμολογημένες και λαδωμένες μήτρες του ΕΟΣ ΕΜΠ που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα

Η δόνηση των δοκιμίων έγινε πάνω στη δονητική τράπεζα που διαθέτει το ΕΟΣ του ΕΜΠ διαστάσεων 120*80 cm.



Εικόνα 2.2 δονητική τράπεζα του ΕΟΣ ΕΜΠ

2.2 Πρώτες Ύλες

Για την εργαστηριακή παραγωγή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν οι εξής πρώτες ύλες:

- Τσιμέντο CEM II /B-M (P-W-L) 42.5 ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ

Το CEM II / B-M (P-W-L) 42,5 N είναι ένα τσιμέντο Πόρτλαντ υπτάμενης τέφρας – ποζολάνης - ασβεστόλιθου ειδικά κατάλληλο για έργα πολιτικού μηχανικού, οικοδομικά έργα, έτοιμο σκυρόδεμα και προϊόντα σκυροδέματος. Σε σύγκριση με το τσιμέντο CEM I είναι ανθεκτικότερο στην προσβολή θεικών και έχει χαμηλότερη θερμότητα ενυδάτωσης. Έχει ως βάση το κλίνκερ τύπου Πόρτλαντ, που έχει αλεσθεί μαζί με πρόσθετα (συνδετικά). Σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1, το CEM II / B-M (P-W-L) 42,5 N είναι ένα Σύνθετο Τσιμέντο Πόρτλαντ κατηγορίας αντοχής 42,5. Καλύπτει πλήρως τις απαιτήσεις του προτύπου ΕΛΟΤ EN 197-1 και φέρει σήμα CE.

Εφαρμόζεται για την παρασκευή οπλισμένου σκυροδέματος κατασκευών, παραθαλάσσιου σκυροδέματος, τσιμέντου με σχετικά χαμηλή θερμότητα ενυδάτωσης, για την αποφυγή θερμικών τάσεων σε μεγάλους όγκους και επιφάνειες σκυροδέματος. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί στις περισσότερες εφαρμογές, που είναι κατάλληλες για τσιμέντο Πόρτλαντ CEM I ή ποζολανικό τσιμέντο CEM IV.

Το συγκεκριμένο τσιμέντο μπορεί να χαρακτηριστεί από τις εξής ιδιότητες:

- Φαιό χρώμα
- Σταθερότητα στην αντοχή, που ικανοποιεί όλα τα κριτήρια συμμόρφωσης του προτύπου ΕΛΟΤ EN 197-1-2000 «Τσιμέντο-Μέρος 1: Σύνθεση προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για κοινά τσιμέντα»
- Συμβατό με πρόσθετα σκυροδέματος.
- Συνιστάται να γίνονται δοκιμές, ώστε να προσδιορίζονται οι βέλτιστες αναλογίες ανάμιξης.

Το τσιμέντο CEM II / B-M (P-W-L) 42,5 N διατίθεται χύδην σε ολόκληρη την Ελλάδα και το χύδην προϊόν πρέπει να φυλάσσεται σε σφραγισμένα σιλό.

Το CEM II / B-M (P-W-L) 42,5 N μπορεί να χρησιμοποιείται σε μεγάλη ποικιλία σκυροδεμάτων. Για άριστη απόδοση του τσιμέντου CEM II / B-M (P-W-L) 42,5 N σε σκυρόδεμα ή σε άλλα προϊόντα, είναι σημαντικό να χρησιμοποιείται σωστά. Είναι σημαντικό να χρησιμοποιούνται τα σωστά υλικά, η σωστή αναλογία και να αναμιγνύονται τα υλικά κατάλληλα. Ακόμη, θα πρέπει να προστίθεται η σωστή ποσότητα νερού και να γίνεται σωστή συμπύκνωση, ωρίμανση και προστασία του σκυροδέματος. Όταν χρησιμοποιείται τσιμέντο CEM II / B-M (P-W-L) 42,5 N, είναι πολύ σημαντικό να διασφαλίζεται η σωστή ωρίμανσή του. Τέλος, πρέπει να τηρείται και η ορθή πρακτική για ζεστό και ψυχρό καιρό αντίστοιχα, ενώ η ποιότητα της τελικής επίστρωσης του υλικού εξαρτάται από την επιδεξιότητα και εξοικείωση του τεχνίτη με τα υλικά και τις μεθόδους εφαρμογής.

Για να προφυλαχθεί η υγεία και η ασφάλεια πρέπει να επισημανθεί πως η επαφή σωματικών υγρών (όπως ο ιδρώτας) με σκόνη τσιμέντου μπορεί να προκαλέσει ερεθισμό, δερματίτιδα ή εγκαύματα. Το τσιμέντο ανήκει στις ερεθιστικές χημικές ουσίες (Hazard Information and Packaging Regulations).

- ΚΙΣΣΗΡΗ 0,8 ΛΑΒΑ ΑΕ

Χρησιμοποιήθηκε κίσσηρη της ΛΑΒΑ ΑΕ με τυπικό μέγεθος κόκκου 0-8mm, εμπορικής ονομασίας «besser», με τη φυσική της υγρασία. Η κίσσηρη της ΛΑΒΑ ΑΕ εξάγεται σε ποικίλες κοκκομετρικές διαβαθμίσεις (όπως φαίνεται και στον ακόλουθο σύνδεσμο «[ΕΛΑΦΡΟΠΕΤΡΑ ΛΑΒΑ ΑΕ](#)»). Τα προϊόντα ΛΑΒΑ φέρουν τη σήμανση CE σύμφωνα με ευρωπαϊκά πρότυπα και ικανοποιούν και τα αμερικάνικα πρότυπα ASTM ως ελαφροβαρές αδρανές για το δομικό σκυρόδεμα (οι ονομασίες λειτουργούν ως links):

1. [EN 13055-1 : 2002](#) Ελαφροβαρή αδρανή για σκυροδέματα, κονιάματα και ενέματα (Lightweight aggregates for concrete, mortar and grout)
2. [EN 13055-2: 2004](#) Ελαφροβαρή αδρανή για ασφαλτομίγματα, επιφανειακές επιστρώσεις και εφαρμογές με σταθεροποιημένα ή μη σταθεροποιημένα υλικά. (Lightweight aggregates for bituminous mixtures and surface treatments for roads, airfields and other trafficked areas)
3. [ASTM C330-09](#) Ελαφροβαρή αδρανή για δομικό σκυρόδεμα (Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete)
4. [ASTM C331-10](#) Ελαφροβαρή αδρανή για κατασκευή στοιχείων τοιχοποιίας (Standard Specifications for Lightweight Aggregates for Concrete Masonry Units)

Η τυπική χημική σύσταση της κίσσηρης της ΛΑΒΑ ΑΕ, όπως αυτή δίνεται στην επίσημη ιστοσελίδα της εταιρίας, είναι η εξής:

Οξείδιο του Πυριτίου SiO ₂	71.91%
Οξείδιο του Αργίλου Al ₂ O ₃	12.66%
Τριοξείδιο του Σιδήρου Fe ₂ O ₃	1.13%
Οξείδιο του Ασβεστίου CaO	0.46%
Οξείδιο του Μαγνησίου MgO	0.32%
Τριοξείδιο του Θείου SO ₃	0.03%
Οξείδιο του Καλίου K ₂ O	4.30%
Οξείδιο του Νατρίου Na ₂ O	3.45%
Απώλεια Πυρώσεως	4.53%
Απροσδιόριστα	0.21%
	100.00 %

Πίνακας 2.1 Τυπική χημική σύσταση της κίσηρης της ΛΑΒΑ ΑΕ

Στο ΕΟΣ δεν πραγματοποιήθηκε κοκκομετρική διαβάθμιση της Ελαφρόπετρας 0/8mm, όμως παρακάτω δίνεται η κοκκομετρική της διαβάθμιση σύμφωνα με το πρότυπο EN 933-1 (Tests for geometrical properties of aggregates, Determination of particle size distribution, Slieving method)

Κόσκινο (mm)	Διερχόμενο (%)	Εύρος (%)
8	99	95-100
4	78	68-88
2	54	44-64
1	38	30-46
0.5	27	20-34
0.25	20	15-25
0.125	15	10-20

Πίνακας 2.2 Κοκκομετρική διαβάθμιση (%) σύμφωνα με το πρότυπο EN 933-1 της Ελαφρόπετρας 0/8 mm της εταιρίας ΛΑΒΑ ΑΕ.

Στο ΕΟΣ πραγματοποιήθηκαν 4 δοκιμές μέτρησης για τον προσδιορισμό της περιεχόμενης υγρασίας της κίσηρης. Στην πρώτη δοκιμή, η οποία πραγματοποιήθηκε στις 25 Ιανουαρίου η κίσηρη ψήθηκε στους 100°C για 75 λεπτά και προέκυψε λόγος εξατμιζόμενου νερού κατά το ψήσιμο προς το αρχικό ολικό βάρος ίσος με 14,6%. Η δεύτερη δοκιμή, η οποία πραγματοποιήθηκε στις 26 Ιανουαρίου, προέκυψε μετά από ψήσιμο στους 100°C για μια ώρα και ο λόγος ήταν ίσος με 15%, ενώ στη 1 ώρα και 20 λεπτά 18%, ενώ στη μια ώρα και 50 λεπτά 21.4%. Στις 30 Ιανουαρίου έγινε μέτρηση του λόγου μετά από 4 ώρες ψήσιματος με αποτέλεσμα 22,2%. Η τελευταία δοκιμή πραγματοποιήθηκε στις 31 Ιανουαρίου με αποτέλεσμα 22%. Στις συνθέσεις λήφθηκε υγρασία 24,1%, όπως δόθηκε από τη Lafarge Beton. Το ποσοστό αυτό υγρασίας θα προέκυπτε μετά από πολύωρο ψήσιμο (περίπου 10 ώρες), το οποίο οφείλεται στην πορώδη φύση του υλικού. Για τη μέτρηση της υγρασία ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία: Αρχικά ζυγίστηκε το βάρος του ταψιού στο οποίο θα τοποθετηθεί η κίσηρη. Έπειτα τοποθετήθηκαν στο ταψί 500-600 γραμμάρια κίσηρης, τα οποία επρόκειτο να μπουν στο φούρνο για το ψήσιμο. Μετά από τις ώρες που περιγράφονται παραπάνω για τις εκάστοτε δοκιμές μέσα στο φούρνο, το ταψί με την περιεχόμενη κίσηρη ξαναζυγίστηκε. Η διαφορά των δύο ζυγίσεων ισούται με το βάρος του

εξατμιζόμενου νερού. Έπειτα, υπολογίστηκε ο λόγος του εξατμιζόμενου νερού προς το βάρος της υγρής κίσηρης, καθώς αν η τελική κίσηρη έφτανε να είναι εντελώς ξηρή αυτός ο λόγος θα ήταν η υγρασία (σε υγρή βάση) της κίσηρης.



Εικόνα 2.3 Ζυγαριά ακριβείας του ΕΟΣ ΕΜΠ, με την οποία έγιναν οι μετρήσεις του βάρους της κίσηρης πριν και μετά το ψήσιμο για τις δοκιμές μέτρησης της υγρασίας.



Εικόνα 2.4 Φούρνος ψήσιματος του ΕΟΣ ΕΜΠ που χρησιμοποιήθηκε κατά το ψήσιμο της κίσηρης για τις δοκιμές μέτρησης της υγρασίας

- Άμμος θραυστή ασβεστολιθική

Οι συνθέσεις του κισηροδέματος περιείχαν και θραυστή ασβεστολιθική άμμο. Η υγρασία της άμμου, τόσο από τα δεδομένα της Lafarge Beton, όσο και κατά τη μέτρηση της στο εργαστήριο οπλισμένου σκυροδέματος του ΕΜΠ, μετά από ψήσιμο για 40 λεπτά στους 100 °C, ήταν περίπου 1%.

- Πρόσθετα σκυροδέματος
 - a. **Υπερρευστοποιητής Viscocrete-300**

Το Viscocrete – 300 είναι ένας νέας γενιάς ισχυρός υπερρευστοποιητής για σκυρόδεμα υψηλών απαιτήσεων. Ανήκει στους 3^{ης} γενιάς υπερρευστοποιητές και είναι βασισμένο στην τεχνολογία πολυκαρβοξυλικών πολυμερών. Με χρήση του καθίσταται δυνατή η υψηλή μείωση νερού σε συνδυασμό με αυξημένη ρευστότητα του μείγματος.

Χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου υπάρχει απαίτηση για:

- Παραγωγή εργοταξιακού σκυροδέματος για έργα υψηλών προδιαγραφών

- Αυξημένες πρώιμες και τελικές αντοχές
- Παραγωγή ποιοτικού σκυροδέματος υψηλών απαιτήσεων
- Για σκυρόδεμα με απαίτηση υψηλής κάθισης (S4 ή S5) και χαμηλό λόγο N/T (<0,50)
- Σε μονάδες παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος (Ready Mix)
- Για μεταφορά σκυροδέματος σε μεγάλες αποστάσεις

Το Viscocrete – 300 είναι ένας ισχυρός υπερρρευστοποιητής, που προσφέρει υψηλή αρχική εργασιμότητα μείγματος και επιπλέον έχει τα εξής πλεονεκτήματα/χαρακτηριστικά:

- 1) Μπορεί να ανταποκριθεί σε καθίσους κατηγορίας S4 & S5, ακόμα και σε σκυρόδεμα με χαμηλό λόγο N/T
- 2) Προσδίδει στο σκυρόδεμα πολύ μεγάλη ρευστότητα και διατήρηση κάθισης
- 3) Οδηγεί σε παραγωγή σκυροδέματος με υψηλές αρχικές και τελικές αντοχές, μειωμένη υδατοπερατότητα, αντοχή σε μηχανικές και χημικές προσβολές
- 4) Έχει σαν αποτέλεσμα μειωμένη συρρίκνωση και μειωμένο ερπυσμό
- 5) Για κατασκευές σκυροδέματος εξαιρετικής ανθεκτικότητας, καθώς και με πολύ καλά αισθητικά αποτελέσματα
- 6) Το Viscocrete – 300 δεν περιέχει χλωρίδια ή άλλα συστατικά που προκαλούν διάβρωση του οπλισμού. Είναι επομένως κατάλληλο για οπλισμένο και προεντεταμένο σκυρόδεμα.

Κατέχει πιστοποίηση ως πρόσθετο μεγάλης μείωσης νερού / Υπερρρευστοποιητής σύμφωνα με EN 934-2 Π.3.1 & Π.3.2 και δήλωση Επίδοσης (DoP) 01 13 01 01 100 0 000315 1200, πιστοποιημένη από τον οργανισμό πιστοποίησης του ελέγχου της παραγωγής στο εργοστάσιο, 2079, με αριθμό πιστοποιητικού 0013-048/01/12 και φέρει τη σήμανση CE.

Το Viscocrete – 300 είναι υγρό διάλυμα που έχει καφέ χρώμα και συσκευάζεται σε δεξαμενές των 1000 kg, σε βαρέλια των 220 kg ή παραδίδεται χύμα κατόπιν ζήτησης. Η διάρκεια ζωής του είναι 8 μήνες από την ημερομηνία παραγωγής, με την προϋπόθεση να παραμείνει αποθηκευμένο στην κλειστή αρχική σφραγισμένη συσκευασία, σε ξηρές συνθήκες σε θερμοκρασία +5°C και +35°C. Επίσης, θα πρέπει να προστατεύεται από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία και τον παγετό.

Όσον αφορά τα τεχνικά χαρακτηριστικά του προϊόντος, πρόκειται για υδατικό διάλυμα πολυκαρβοξυλικών πολυμερών, με πυκνότητα 1 kg/l (στους 20°C) και τιμή pH 3,5-5,5 (στους 20°C), ενώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι είναι συμβατό με το ρευστοποιητή που θα χρησιμοποιήσουμε στις συνθέσεις Plastiment 30.

Για τη σωστή αξιοποίηση του, το Viscocrete – 300 προστίθεται στο νερό ανάμειξης ή στο νωπό σκυρόδεμα και ποτέ στο ξερό τσιμέντο. Κατά την σκυροδέτηση πρέπει να τηρούνται οι τυπικοί κανονισμοί σε ό,τι αφορά την παραγωγή και την τοποθέτηση του σκυροδέματος και να γίνεται αναφορά σε σχετικούς κανονισμούς. Το νωπό σκυρόδεμα πρέπει να ωριμάσει κατάλληλα.

b. Ρευστοποιητής Plastiment 30

Το Plastiment 30 είναι ένας πολλαπλής χρήσεως ρευστοποιητής σκυροδέματος με επιβράδυνση πήξης. Χρησιμοποιείται για καλής ποιότητας σκυρόδεμα, που χρειάζεται και διατήρηση εργασιμότητας. Η ρευστοποιητική του δράση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη:

- Σε μονάδες παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος

- Για παραγωγή εργοταξιακού σκυροδέματος
- Σε υψηλές θερμοκρασίες και υπό δύσκολες συνθήκες σκυροδέτησης

Το Plastiment 30 προσδίδει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά/πλεονεκτήματα στο σκυρόδεμα:

1. Αυξάνει την εργασιμότητα, χωρίς να αυξάνεται το νερό ανάμειξης
2. Μειώνει το λόγο N/T διατηρώντας την ίδια εργασιμότητα
3. Προσφέρει διατήρηση εργασιμότητας υπό συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών
4. Μειώνει τις συστολές και τον ερπυσμό

Κατέχει πιστοποίηση ως πρόσθετο πολλαπλής ενέργειας: Επιβραδυντικό πήξης / μειωτής νερού / Ρευστοποιητής σύμφωνα με EN 934-2 Π.10, ενώ κατέχει και δήλωση επίδοσης (DoP) 01 13 03 01 100 0 000093 1200, πιστοποιημένη από τον οργανισμό πιστοποίησης του ελέγχου της παραγωγής στο εργοστάσιο, 2079, με αριθμό πιστοποιητικού 0013-048/01/12 και φέρει τη σήμανση CE.

Το Plastiment 30 είναι υγρό διάλυμα και έχει χρώμα καφέ σκούρο. Συσκευάζεται σε δεξαμενές των 1140 kg, σε βαρέλια των 240 kg, σε πλαστικά δοχεία των 20 kg και διατίθεται και χύμα κατόπιν ζήτησης. Έχει διάρκεια ζωής 12 μήνες από την ημερομηνία παραγωγής, με την προϋπόθεση να είναι αποθηκευμένο στην κλειστή αρχική σφραγισμένη συσκευασία, σε ξηρές συνθήκες σε θερμοκρασίες μεταξύ +5°C και +35°C. Τέλος, θα πρέπει να προστατεύεται από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία και τον παγετό. Όσον αφορά τα τεχνικά χαρακτηριστικά του προϊόντος, το Plastiment 30 έχει ως χημική βάση τροποποιημένα λιγνοσουλφονικά πολυμερή, διαθέτει πυκνότητα περίπου 1,15 kg/l (στους 20°C) και τιμή pH μεταξύ 8,0 και 11,0 (στους 20°C). Θα πρέπει να σημειωθεί επίσης, ότι είναι απόλυτα συμβατό με τον ισχυρό υπερευστοποιητή Viscocrete – 300, που θα χρησιμοποιήσουμε στις σκυροδετήσεις μας.

Για τη σωστή αξιοποίηση του, το Plastiment 30 προστίθεται στο νερό ανάμειξης ή στο νωπό σκυρόδεμα και ποτέ στο ξερό τσιμέντο. Κατά τη σκυροδέτηση πρέπει να τηρούνται οι τυπικοί κανονισμοί σε ό,τι αφορά την παραγωγή και την τοποθέτηση του σκυροδέματος και να γίνεται αναφορά σε σχετικούς κανονισμούς. Το νωπό σκυρόδεμα πρέπει να ωριμάσει κατάλληλα.

- Μεταλλικές ίνες Dramix 4D 65/60 BG



Εικόνα 2.5 Σχήμα μεταλλικών ινών κατηγορίας Dramix 4D 65/60 BG

Οι μεταλλικές ίνες Dramix 4D series έχουν σχεδιαστεί με γνώμονα τη βέλτιστη λειτουργικότητα. Η εφελκυστική αντοχή τους και τα κεκαμμένα άκρα τους έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να επηρεάζουν τις ρωγμές που το άνοιγμα τους κυμαίνεται από 0,1

έως 0,3 mm, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα κατασκευής ανθεκτικών και υδατοδιαπέρατων κατασκευών. Στην ονομασία το 65 αναφέρεται στο λόγο του μήκους L προς το εμβαδό της διατομής της ίνας, το 60 είναι το μήκος l, το B υποδεικνύει τη φωτεινότητα της (Bright) και τέλος το G πως είναι κολλημένη (Glued). Όσον αφορά τα γεωμετρικά της χαρακτηριστικά, όπως αυτά δίνονται στο φυλλάδιο επεξήγησης της Dramix, το μήκος (l) είναι 60 mm, η διάμετρος (d) είναι 0,9 mm και επομένως ο λόγος του μήκους προς τη διάμετρο (l/d) είναι περίπου ίσος με 65. Επιπλέον, χαρακτηρίζεται ως 4D λόγω των 3 σπασιμάτων στα κεκαμμένα άκρα. Όσον αφορά τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ινών η εφελκυστική της αντοχή είναι ίση με $R_{m,nom}=1500 \text{ N/mm}^2$, με ανοχή της εφελκυστικής αντοχής κατά μέσο όρο 7,5% και Μέτρο Ελαστικότητας $E=210000 \text{ N/mm}^2$.

Το υλικό αυτό είναι πιστοποιημένο για χρήση σε κατασκευές, τόσο για τα ευρωπαϊκά πρότυπα, όσο και για τα αμερικάνικα. Συγκεκριμένα, φέρει τη σήμανση CE, σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 14889-1 «Ίνες σκυροδέματος/Μεταλλικές ίνες/Ορισμοί, προδιαγραφές και συμμόρφωση (Fibres for concrete. Steel fibres. Definitions, specifications and conformity)». Επιπλέον, οι ίνες αυτές συμμορφώνονται με τις διατάξεις του αμερικάνικου πρότυπου ASTM A820 «Βασικές Προδιαγραφές Μεταλλικών Ινών για Ινοπλισμένο Σκυρόδεμα (Standard Specification for Steel Fibres for Fiber-Reinforced Concrete)». Τέλος, όλα τα προϊόντα της Dramix έχουν πιστοποιήσεις για το πρότυπο διαχείρισης ποιότητας ISO 9001 και το πρότυπο Συστημάτων Διαχείρισης Περιβαλλοντικής Ασφάλειας ISO 14001.

2.3 Περιγραφή των συνθέσεων

Πραγματοποιήθηκαν τέσσερις (4) συνθέσεις, τα επιμέρους στοιχεία των οποίων φαίνονται στον πίνακα. Στις συνθέσεις Ntua S1 και Ntua S2 γίνεται παραγωγή ελαφροσκυροδέματος με διαφοροποίηση της αναλογίας της άμμου, του τσιμέντου και της κίσηρης με μέγεθος κόκκου 0-8 mm. Και οι 4 συνθέσεις βασίστηκαν στις μελέτες σύνθεσης της Lafarge Beton.

Συστατικά (kg/m ³)	NTUA S1	NTUA S2	NTUA SF1	NTUA SF2
Cement II42.5 Τσιμέντο II42,5	494	521	494	521
Pumice 0-8 dry Ξηρή κίσηρη 0-8	617	573	617	573
Sand Άμμος	397	454	397	454
Fibers Ίνες	0	0	60	60
Pumice moist Περιεχόμενο νερό κίσηρης	199	186	199	186
Add water Πρόσθετο νερό	144(146)	146(148)	144(146)	146(148)
Superplasticizer Υπερρευστοποιητής	6.2(7.0)	6.2(8.4)	6.2(13.8)	6.2(13.9)
Retarded-plasticizer Επιβραδυντής	3.1	3.1	3.1(4.3)	3.1(4.3)
Pumice moist, wet-b (%) Ποσοστό υγρασίας κίσηρης (%)	24	24	24	24
Sand moist, wet-b (%) Ποσοστό υγρασίας άμμου (%)	1	1	1	1
Approximate density wet-b (kg/m³) Εκτιμώμενη πυκνότητα σε υγρή βάση(kg/m ³)	1860	1888	1860	1888
Air calc. v/v (%) Ποσοστό περιεχόμενου αέρα (%)	7	7	7	7
w_{add}/c Λόγος προστιθέμενου νερού προς τσιμέντο	0.29 (0.295)	0.28(0.285)	0.29 (0.295)	0.28(0.285)
W_{tot}/c Λόγος ολικού νερού προς τσιμέντο	0.69 (0.70)	0.64 (0.64)	0.69 (0.70)	0.64 (0.64)
Total water (kg/m³) Συνολική ποσότητα νερού (kg/m ³)	343 (345)	334 (336)	343 (345)	334 (336)
Steel fiber volume fraction V_f (%) Κλάσμα όγκου μεταλλικών ινών (%)	0	0	0.76	0.76

Πίνακας 2.3 Ποσότητες (κ.β.) συστατικών συνθέσεων σκυροδέματος.

Αξίζει να επισημανθεί, πως η υγρή κίσηρη που χρησιμοποιήθηκε είχε μικρότερη υγρασία από αυτήν που περιγράφεται στις συνθέσεις, λόγω της πορώδους φύσης του υλικού. Έτσι, κατά τη διάρκεια της σκυροδέτησης της σύνθεσης NTUA S1 εκτιμήθηκε πως το σκυρόδεμα με την παραπάνω σύνθεση δεν ήταν αρκετά υδαρό και επομένως για να επιτευχθεί η απαιτούμενη εργασιμότητα, προστέθηκαν την ώρα της σκυροδέτησης 300 ml νερό και περίπου 150 gr υπερρυστοποιητή. Στην παρένθεση φαίνονται οι καινούριες αναλογίες που προκύπτουν με βάση αυτήν την αλλαγή. Πρόσθεση νερού και υπερρυστοποιητή έγινε και κατά τη σκυροδέτηση της σύνθεσης NTUA S2, όπου πάλι προστέθηκαν 300 ml νερού και 370 gr υπερρυστοποιητή. Για την διατήρηση της επιθυμητής αναλογίας νερού προς τσιμέντο προστέθηκε η απαιτούμενη ποσότητα νερού και στις συνθέσεις SF1 και SF2. Λόγω όμως της παρουσίας της ίνας, η οποία συνεπάγεται μείωση του εργάσιμου, προστέθηκε στις SF1 και SF2 μεγαλύτερη ποσότητα υπερρυστοποιητή και επιβραδυντή σε σύγκριση με τις S1 και S2 αντίστοιχα, όπως φαίνεται και στον πίνακα 2.3.

2.4 Περιγραφή της προετοιμασίας των δοκιμών

Τα δοκίμια τα οποία δοκιμάσθηκαν προέρχονται από τις μελέτες σύνθεσης, οι οποίες περιγράφονται παραπάνω. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2.3 στο εργαστήριο οπλισμένου σκυροδέματος (ΕΟΣ) πραγματοποιήθηκαν 4 σκυροδετήσεις, από τις οποίες οι δύο περιέχουν μεταλλική ίνα. Οι σκυροδετήσεις χωρίς την ίνα, βασίστηκαν στις μελέτες σύνθεσης της Lafarge beton. Η πρώτη σκυροδέτηση (ΣΚ1) συνολικού όγκου 117.5 lt πραγματοποιήθηκε στις 1/2/2017 και βασίστηκε στη μελέτη σύνθεσης NTUA S1. Η δεύτερη σκυροδέτηση (ΣΚ2) συνολικού όγκου 130.2 lt πραγματοποιήθηκε την επόμενη μέρα στις 2/2/2017, βασιζόμενη στη μελέτη σύνθεσης NTUA S2. Για την επιτυχία των σκυροδετήσεων έγινε συναρμολόγηση κάποιων μητρών, ενώ στις ήδη συναρμολογημένες πραγματοποιήθηκε έλεγχος της σταθερότητας τους, παράλληλα με τον καθαρισμό τους από διάφορα υπολείμματα προηγούμενων σκυροδετήσεων.

Αφού εξασφαλίστηκε η σωστή συναρμολόγηση, η καθαρότητα και η σταθερότητα των μητρών που επρόκειτο να χρησιμοποιηθούν στις σκυροδετήσεις NTUA S1 και NTUA S2, έγινε το απαραίτητο λάδωμα των τοιχωμάτων των μητρών με κατάλληλο αποκαλουπωτικό λάδι το οποίο προμηθευτήκαμε από το ΕΟΣ.

Κατά την **ΣΚ1** σκυροδετήθηκαν: 9 κύβοι διαστάσεων ακμής 100 mm, 6 κύβοι διαστάσεων ακμής 150 mm, 12 κύλινδροι διαμέτρου 100 mm και μήκους 200 mm, 6 κύλινδροι διαμέτρου 150 mm και μήκους 300 mm και 3 πρίσματα διαστάσεων πλευρών 100*100*500 mm. Αντίστοιχα, στη δεύτερη σκυροδέτηση **ΣΚ2** χρησιμοποιήθηκαν: 9 κύβοι διαστάσεων ακμής 100 mm, 7 κύβοι διαστάσεων ακμής 150 mm, 6 κύλινδροι διαμέτρου 100 mm και μήκους 200 mm, 11 κύλινδροι διαμέτρου 150 mm και μήκους 300 mm και 3 πρίσματα διαστάσεων πλευρών 100*100*500 mm. Αυτή η «ανισορροπία» μεταξύ των παραγόμενων δοκιμών κατά τις δύο αυτές σκυροδετήσεις, οφείλεται στην έλλειψη μικρών κυλίνδρων και στην ύπαρξη αρκετών μεγάλων. Αυτό έγινε ώστε να εξαχθούν όσο το δυνατόν πιο ασφαλή συμπεράσματα για τις μηχανικές ιδιότητες των κίσηροδεμάτων με τις συγκεκριμένες συνθέσεις.



Εικόνα 2.6 Ανάμιξη των αδρανών και του τσιμέντου πριν την εισαγωγή του νερού και των ρευστοποιητών κατά τη ΣΚ1



Εικόνα 2.7 Ανάμιξη του μίγματος κατά τη ΣΚ1



Εικόνα 2.8 Νωπό σκυρόδεμα μετά την ανάμιξη του κατά την ΣΚ2

Μόλις τελείωσε η ανάμιξη, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κάθισης στα σκυροδέματα σύμφωνα με τις διατάξεις του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος (Κ.Τ.Σ.). Συγκεκριμένα, ο κώνος γεμίστηκε με τη σέσουλα σε τρεις στρώσεις ίσου ύψους με σκυρόδεμα. Ο κώνος διατηρήθηκε ακίνητος καθ'όλη τη διάρκεια του γεμίσματος και κάθε στρώση συμπυκνωνόταν με 16 χτυπήματα ράβδου συμπυκνώσεως, τα οποία κατανεμήθηκαν κατά το δυνατόν ομοιόμορφα στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Αμέσως μετά το γέμισμα του κώνου και τη συμπύκνωση της πάστας του σκυροδέματος έγινε η ανάσυρση του κώνου από τις πλευρικές χειρολαβές ομαλά και με σταθερή ταχύτητα. Έπειτα μετρήθηκε η διαφορά ανάμεσα στο ύψος του κώνου και του υψηλότερου σημείου του σκυροδέματος, η οποία αποτελεί και την κάθιση του σκυροδέματος.

Η κάθιση της ΣΚ1 ήταν 20 cm, ενώ της ΣΚ2 μόλις 5 cm. Βέβαια, αξίζει να επισημανθεί πως στην ΣΚ2, μετά τη σκυροδέτηση 4 κύβων με διαστάσεις ακμής 100 mm, 5 κυλίνδρων διαμέτρου 150 mm και μήκους 300 mm και 3 πρισμάτων διαστάσεων πλευρών 100*100*500 mm προστέθηκε υπερρευστοποιητής και επιβραδυντής με συνέπεια η κάθιση των 5 cm να μην είναι πλέον αντιπροσωπευτικό αποτέλεσμα.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα το σκυρόδεμα της σύνθεσης S1 είναι κατηγορίας «S4», το σκυρόδεμα της σύνθεσης S2 ήταν πριν την προσθήκη του επιβραδυντή και ρευστοποιητή κατηγορίας «S2».



Εικόνες 2.9 και 2.10 Έλεγχος κάθισης του ελαφροσκυροδέματος που παράχθηκε με βάση τη σύνθεση NTUA S1



Εικόνες 2.11 και 2.12 Έλεγχος κάθισης του ελαφροσκυροδέματος που παράχθηκε με βάση τη σύνθεση NTUA S2

Αφού χυτεύθηκε το σκυρόδεμα στις μήτρες, πραγματοποιήθηκε η απαραίτητη δόνηση του στην τράπεζα δόνησης, για την συμπύκνωση του και την απομάκρυνση του περιεχόμενου αέρα. Η δόνηση των μητρών διήρκησε περίπου 1 λεπτό. Μετά το πέρας αυτής της διαδικασίας της δόνησης και τη μεταφορά των μητρών στο χώρο που θα φυλάσσονται, έγινε τοποθέτηση βρεγμένων λινάτσων πάνω από τα δοκίμια για την καλύτερη συντήρησή τους, μέχρι τη στιγμή του ξεκαλουπώματος. Οι βρεγμένες λινάτσες παρείχαν την απαιτούμενη υγρασία για την ενυδάτωση του ελαφροσκυροδέματος τις πρώτες 2-3 μέρες. Επιπλέον, υπήρξε καθημερινή διαβροχή με νερό των δοκιμίων όσο αυτά έμεναν μέσα στα καλούπια, ώστε να συνεχιστεί σωστά η ενυδάτωση των συστατικών του τσιμέντου.



Εικόνα 2.13 Δοκίμα σκυροδέτησης ΣΚ1 μετά το πέρας της δόνησης τους



Εικόνα 2.14 Δοκίμα σκυροδέτησης ΣΚ2 μετά το πέρας της δόνησης τους (1/2)



Εικόνα 2.15 Δοκίμα σκυροδέτησης ΣΚ2 μετά το πέρας της δόνησης τους (2/2)



Εικόνα 2.16 Συντήρηση των δοκιμίων πριν το ξεκαλούπωμα με βρεγμένες λινάτσες

Στις 3/2/2017 πραγματοποιήθηκε το ξεκαλούπωμα των δοκιμίων τις ΣΚ1. Κατά τη διαδικασία αυτή έγινε με ιδιαίτερη προσοχή μερική αποσυναρμολόγηση των μητρών και με τη βοήθεια κατάλληλου σφυριού το ξεκαλούπωμα των δοκιμίων. Στη συνέχεια, τα δοκίμια ζυγίστηκαν για τον προσδιορισμό της πυκνότητάς τους και ύστερα τοποθετήθηκαν σε ειδικές μπανιέρες υγρής συντήρησης του ΕΟΣ. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων βάρους για κάθε τύπο δοκιμίου φαίνονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα (για κάθε τύπο δοκιμίου εκτός από τα πρίσματα έγιναν τρεις μετρήσεις):



Εικόνα 2.17 Ξεκαλούπωμα πρίσματος σύνθεσης S1



Εικόνα 2.18 Ζύγισμα νωπών κυλίνδρου μετά το ξεκαλούπωμα της σκυροδέτησης SK1

Τύπος δοκιμίου/Μέτρηση	1 ^η Μέτρηση	2 ^η Μέτρηση	3 ^η Μέτρηση	Μέση Τιμή	Πυκνότητα kg/m ³
Κύβος 10x10x10 cm	1.890 kg	1.833 kg	1.815 kg	1.846 kg	1846
Κύβος 15x15x15 cm	6.344 kg	6.318 kg	6.316 kg	6.326 kg	1874
Κύλινδρος Φ10 cm	2.930 kg	2.930 kg	2.938 kg	2.933 kg	1867
Κύλινδρος Φ15 cm	9.836 kg	9.760 kg	9.815 kg	9.803 kg	1849
Πρίσμα 10x10x50 cm	-	-	-	-	-

Πίνακας 2.4 Μετρήσεις ίδιου βάρους δοκιμίων της SK1 και προσδιορισμός της πυκνότητας τους

Όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα η προκύπτουσα μέση πυκνότητα **1859 kg/m³** του σκυροδέματος είναι πολύ κοντά σε αυτή των 1860 kg/m³, που εκτιμά η LaFarge Beton.

Στις 6/2/2017 πραγματοποιήθηκε το ξεκαλούπωμα των δοκιμίων τις SK2. Η καθυστέρηση οφείλεται στο γεγονός ότι μεσολαβούσε σαββατοκύριακο και το ΕΟΣ ήταν κλειστό. Όπως και στην SK1, έτσι και στην SK2 ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία ξεκαλουπώματος και ζυγίσματος με τα δοκίμια να τοποθετούνται στη συνέχεια στις μπανιέρες συντήρησης του ΕΟΣ. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων ίδιου βάρους των δοκιμίων (αυτή τη φορά έγινε μέτρηση βάρους και για τα πρίσματα 10x10x50 cm):

Τύπος δοκιμίου/Μέτρηση	1 ^η Μέτρηση	2 ^η Μέτρηση	3 ^η Μέτρηση	Μέση Τιμή	Πυκνότητα kg/m ³
Κύβος 10x10x10 cm	1.910 kg	1.926 kg	1.894 kg	1.910 kg	1910
Κύβος 15x15x15 cm	6.396 kg	6.364 kg	6.456 kg	6.405 kg	1898
Κύλινδρος Φ10 cm	2.996 kg	2.976 kg	3.114 kg	3.029 kg	1928
Κύλινδρος Φ15 cm	10.160 kg	10.062 kg	9.970 kg	10.064 kg	1898
Πρίσμα 10x10x50 cm	9.350 kg	9.296 kg	9.532 kg	9.393kg	1879

Πίνακας 2.5 Μετρήσεις ίδιου βάρους δοκιμίων της SK2 και προσδιορισμός της πυκνότητας τους

Παρατηρούμε ότι και στην ΣΚ2 η μέση προκύπτουσα πυκνότητα του σκυροδέματος, ή οποία ισούται με **1902 kg/m³** είναι κοντά σε αυτή των 1888 kg/m³, που εκτιμά η LaFarge Beton.

Στις 8/2/2017 πραγματοποιήθηκε η τρίτη σκυροδέτηση ΣΚ3, η οποία περιείχε μεταλλική ίνα και βασίστηκε στη μελέτη σύνθεσης της LaFarge Beton NTUA SF1 με τη μόνη διαφοροποίηση της προσθήκης μεταλλικών ινών με αναλογία 60 kg/m³. Στις 9/2/2017 πραγματοποιήθηκε η τέταρτη και τελευταία σκυροδέτηση ΣΚ4, που βασίστηκε στη μελέτη σύνθεσης NTUA SF2 με τη μόνη διαφοροποίηση και πάλι να είναι αυτή της προσθήκης ινών με αναλογία 60 kg/m³. Για την επιτυχία των σκυροδετήσεων είχε προηγηθεί τις προηγούμενες μέρες ο καθαρισμός, η συναρμολόγηση, ο έλεγχος σταθερότητας και το λάδωμα των μητρών.

Όπως και στην ΣΚ1 έτσι και στην ΣΚ3 χρησιμοποιήθηκαν 9 κυβικές μήτρες διαστάσεων 100x100x100 mm, 12 κυλινδρικές διαμέτρου 100 mm και ύψους 200 mm, 6 κυβικές ακμής 150 mm, 6 κυλινδρικές διαμέτρου 150 mm και ύψους 300 mm, 3 πρίσματα διαστάσεων 100x100x500 mm, ενώ χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα 3 πρίσματα διαστάσεων 150x150x600 mm. Για την ΣΚ4 χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες μήτρες όπως και στην ΣΚ2, δηλαδή 9 κυβικές ακμής 100 mm, 6 κυλινδρικές διαμέτρου 100 mm και ύψους 200 mm, 7 κυβικές ακμής 150 mm, 11 κυλινδρικές διαμέτρου 150 mm και ύψους 300 mm και 3 πρισματικές διαστάσεων 100x100x500 mm, καθώς και 3 επιπλέον πρισματικές διαστάσεων 150x150x600 mm. Ομοίως με τις ΣΚ1 και ΣΚ2, έτσι και μεταξύ των ΣΚ3 και ΣΚ4 υπάρχει ανισορροπία μεταξύ των μητρών, άρα και των δοκιμίων, εξαιτίας της έλλειψης κυλινδρικών μητρών διαμέτρου 100 mm. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται και πάλι περισσότερες κυλινδρικές Φ150 mm στην ΣΚ4.

Η σκυροδέτηση για την σύνθεση SF1 πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια: SF1(1) συνολικού όγκου 87.9 lt, SF1(2) συνολικού όγκου 53.5 lt. Αντίστοιχα και η σκυροδέτηση για τη σύνθεση SF2 πραγματοποιήθηκε παρομοίως σε δύο στάδια SF2(1) συνολικού όγκου 83.4 lt, SF2(2) συνολικού όγκου 83.4 lt. Η πραγματοποίηση των σκυροδετήσεων σε δύο επί μέρους τμήματα έγινε εξαιτίας της μεγαλύτερης ποσότητας του μείγματος σκυροδέματος που προέκυπτε με την προσθήκη των μεταλλικών ινών και κυρίως των πρισματικών μητρών διαστάσεων 150x150x600 mm. Στον αναμικτήρα τοποθετήθηκαν αρχικά τα αδρανή, το τσιμέντο και οι μεταλλικές ίνες, ακολούθησε μια πρώτη ανάδευση και στη συνέχεια προστέθηκε το νερό, ο υπερρρευστοποιητής (Viscocrete 300) και ο ρευστοποιητής (Plastiment 30) σύμφωνα με τη μελέτη σύνθεσης κάθε φορά. Λόγω της μικρότερης περιεχόμενης υγρασίας της κίσηρης από την εκτιμώμενη της LaFarge Beton προστέθηκαν κατά την σκυροδέτηση ΣΚ3 νερό, υπερρρευστοποιητής και ρευστοποιητής, για να επιτευχθεί η απαιτούμενη εργασιμότητα. Πρόσθεση νερού υπερρρευστοποιητή και ρευστοποιητή έγινε και την ώρα της σκυροδέτησης ΣΚ4.



Εικόνες 2.19 και 2.20 Νωπό ινοπλισμένο κισσηρόδεμα των σκυροδετήσεων ΣΚ3 και ΣΚ4 αντίστοιχα

Μόλις τελείωσε η ανάμειξη, πραγματοποιήθηκε δοκιμή κάθισης του σκυροδέματος, τόσο για την ΣΚ3, όσο και για την ΣΚ4, με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω για τις ΣΚ1 και ΣΚ2. Η κάθιση της ΣΚ3 ήταν 25 cm, όπως και της ΣΚ4. Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα το σκυρόδεμα και των δύο συνθέσεων SF1 και SF2 είναι κατηγορίας «S5».



Εικόνα 2.21 Δοκιμή καθίσεως σύνθεσης ινοπλισμένου κισσηρόδεματος SF1

Μετά τη δοκιμή κάθισης, το σκυρόδεμα χυτεύθηκε στις μήτρες και ακολούθησε δόνηση των μητρών για περίπου ένα λεπτό πάνω στη δονητική τράπεζα του ΕΟΣ. Στη συνέχεια, οι γεμισμένες μήτρες μεταφέρθηκαν στο χώρο φύλαξής τους, όπου τοποθετήθηκαν στο πάνω μέρος τους βρεγμένες λινάτσες. Ακολούθησε καθημερινή διαβροχή των λιναστών και τον δοκιμίων με νερό, ώστε να συνεχίζεται η ενυδάτωσή τους μέχρι και το ξεκαλούπωμά τους.



Εικόνα 2.22 Δοκίμια σκυροδέτησης ΣΚ3 μετά το πέρας της δόνησης τους



Εικόνα 2.23 Συντήρηση των δοκιμίων της ΣΚ3 πριν το ξεκαλούπωμα με βρεγμένες λινάτσες

Στις 10/2/2017 πραγματοποιήθηκε με προσοχή το ξεκαλούπωμα των δοκιμίων της ΣΚ3. Ακολούθησε το ζύγισμα των δοκιμίων για τον προσδιορισμό της πυκνότητάς τους και η τοποθέτησή τους στις ειδικές μπανιέρες υγρής συντήρησης του ΕΟΣ. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων ίδιου βάρους των δοκιμίων φαίνονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα:

Τύπος δοκιμίου/Μέτρηση	1 ^η Μέτρηση	2 ^η Μέτρηση	3 ^η Μέτρηση	Μέση Τιμή	Πυκνότητα kg/m ³
Κύβος 10x10x10 cm	1.928 kg	1.912 kg	1.918 kg	1.919 kg	1919
Κύβος 15x15x15 cm	6.512 kg	6.512 kg	6.404 kg	6.476 kg	1919
Κύλινδρος Φ10 cm	3.064 kg	3.066 kg	3.060 kg	3.063 kg	1950
Κύλινδρος Φ15 cm	9.936 kg	9.984 kg	9.900 kg	9.940 kg	1875
Πρίσμα 10x10x50 cm	9.516 kg	9.690 kg	9.706 kg	9.637kg	1927
Πρίσμα 15x15x60 cm	25.364 kg	25.644 kg	25.508 kg	25.505kg	1890

Πίνακας 2.6 Μετρήσεις ίδιου βάρους δοκιμίων της ΣΚ3 και προσδιορισμός της πυκνότητάς τους

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι η εκτιμώμενη πυκνότητα της LaFarge Beton για την SF1 των 1920 kg/m³ στους περισσότερους τύπους δοκιμίων, επιτυγχάνεται προσεγγιστικά. Οι αποκλίσεις μεταξύ των πυκνοτήτων οφείλονται είτε στο κακό τελείωμα των δοκιμίων κατά τη σκυροδέτησή τους, είτε στην πιθανή συγκέντρωση περισσότερων

ινών σε κάποια δοκίμια σε σχέση με κάποια άλλα. Η μέση πυκνότητα προκύπτει **1913 kg/m³**.

Στις 13/2/2017 πραγματοποιήθηκε το ξεκαλούπωμα των δοκιμών της ΣΚ4. Ακολούθησε, όπως και πριν, το ζύγισμα και η τοποθέτηση των δοκιμών στις μπανιέρες συντήρησης του ΕΟΣ. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των ιδίων βαρών των δοκιμών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Τύπος δοκιμίου/Μέτρηση	1 ^η Μέτρηση	2 ^η Μέτρηση	3 ^η Μέτρηση	Μέση Τιμή	Πυκνότητα kg/m ³
Κύβος 10x10x10 cm	1.932 kg	1.930 kg	1.978 kg	1.947 kg	1947
Κύβος 15x15x15 cm	6.498 kg	6.552 kg	6.518 kg	6.523 kg	1933
Κύλινδρος Φ10 cm	3.036 kg	3.064 kg	3.042 kg	3.047 kg	1940
Κύλινδρος Φ15 cm	10.130 kg	10.740 kg	10.212 kg	10.361 kg	1954
Πρίσμα 10x10x50 cm	9.818 kg	9.718 kg	9.534 kg	9.690 kg	1938
Πρίσμα 15x15x60 cm	26.202 kg	26.554 kg	26.386 kg	26.381kg	1954

Πίνακας 2.7 Μετρήσεις ίδιου βάρους δοκιμών της ΣΚ4 και προσδιορισμός της πυκνότητας τους

Παρατηρούμε από τον παραπάνω πίνακα ότι και για τη ΣΚ4 σκυροδέτηση η προκύπτουσα πυκνότητα για κάθε τύπο δοκιμίου είναι προσεγγιστικά κοντά στην εκτιμώμενη πυκνότητα των 1948 kg/m³ της LaFarge Beton για την SF2. Η μέση πυκνότητα προκύπτει **1944 kg/m³**, η οποία είναι πολύ κοντά στην εκτιμώμενη.



Εικόνες 2.24 και 2.25 Μπανιέρες υγρής συντήρησης του ΕΟΣ ΕΜΠ

Πριν τις δοκιμές των 28 ημερών πραγματοποιήθηκαν εκ νέου μετρήσεις του βάρους για τον προσδιορισμό της πυκνότητας των δοκιμών που είχαν αφεθεί να στεγνώσουν. Για τη σκυροδέτηση ΣΚ1 οι μετρήσεις του βάρους των δοκιμών έγιναν μετά από 5 μέρες από την απομάκρυνση τους από την μπανιέρα υγρής συντήρησης. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων, από τα οποία η προκύπτουσα μέση πυκνότητα του ΚΔ της σύνθεσης S1 είναι **1836 kg/m³**.

Τύπος δοκιμίου/Μέτρηση	1 ^η Μέτρηση	2 ^η Μέτρηση	3 ^η Μέτρηση	Μέση Τιμή	Πυκνότητα kg/m ³
Κύβος 10x10x10 cm	K1) 1.844 kg	K2) 1.830 kg	K3)1.850 kg	1.841 kg	1841
Κύβος 15x15x15 cm	K1) 6.178 kg	K2)6.258 kg	K3)6.266 kg	6.234 kg	1847
Κύλινδρος Φ10 cm	K1)2.864 kg	K2)2.922 kg	K3)2.848 kg	2.877 kg	1831
	K4)2.884 kg	K5)2.862 kg	K6)2.882 kg		
Κύλινδρος Φ15 cm	K1)9.734 kg	K2)9.646 kg	K3)9.656 kg	9.674 kg	1825
	K4) 9.686 kg	K5)9.720 kg	K6)9.602 kg		
Πρίσμα 10x10x50 cm	-	-	-	-	-

Πίνακας 2.8 Μετρήσεις ίδιου βάρους δοκιμίων της ΣΚ1 και προσδιορισμός της πυκνότητας τους πριν την διεξαγωγή των πειραμάτων των 28 ημερών

Στη σκυροδέτηση ΣΚ2 η απομάκρυνση των δοκιμίων από την μπανιέρα έγινε 6 μέρες πριν από τις δοκιμές. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων, από τα οποία η προκύπτουσα μέση πυκνότητα του ΚΔ της σύνθεσης S2 είναι **1876 kg/m³**.

Τύπος δοκιμίου/Μέτρηση	1 ^η Μέτρηση	2 ^η Μέτρηση	3 ^η Μέτρηση	Μέση Τιμή	Πυκνότητα kg/m ³
Κύβος 10x10x10 cm	K1)1.876 kg	K2)1.896 kg	K3)1.900 kg	1.891 kg	1891
Κύβος 15x15x15 cm	K1)6.190 kg	K2)6.262 kg	K3)6.276 kg	6.243 kg	1850
Κύλινδρος Φ10 cm	K1)3.070	K2)2.938	K3)2.926	2.978 kg	1896
Κύλινδρος Φ15 cm	K1)9.956 kg	K2)10.048kg	K3)9.738 kg	9.992 kg	1885
	K4)9.824 kg	K5)10.392kg	-		
Πρίσμα 10x10x50 cm	K1)9.238 kg	K2)9.180kg	K3)9.420 kg	9.279 kg	1856

Πίνακας 2.9 Μετρήσεις ίδιου βάρους δοκιμίων της ΣΚ2 και προσδιορισμός της πυκνότητας τους πριν την διεξαγωγή των πειραμάτων των 32 ημερών.

Στη σκυροδέτηση ΣΚ3 η απομάκρυνση των δοκιμίων από την μπανιέρα έγινε 6 μέρες πριν από τις δοκιμές. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων, από τα οποία η προκύπτουσα μέση πυκνότητα του ΚΔ της σύνθεσης SF1 είναι **1900 kg/m³**.

Τύπος δοκιμίου/Μέτρηση	1 ^η Μέτρηση	2 ^η Μέτρηση	3 ^η Μέτρηση	Μέση Τιμή	Πυκνότητα kg/m ³
Κύβος 10x10x10 cm	K1)1.902 kg	K2)1.932 kg	K3)1.884 kg	1.906 kg	1906
Κύβος 15x15x15 cm	K1)6.542 kg	K2)6.340 kg	K3)6.396 kg	6.426 kg	1904
Κύλινδρος Φ10 cm	K1)3.002 kg	K2)3.114 kg	K3)2.956 kg	3.024 kg	1925
Κύλινδρος Φ15 cm	K1)9.846 kg	K2)9.830kg	K3)9.854 kg	9.834 kg	1855
	K4)9.780 kg	K5)9.804 kg	K6)9.892 kg		
Πρίσμα 10x10x50 cm	K1)9.418 kg	K2)9.602 kg	K3)9.602 kg	9.541 kg	1908

Πίνακας 2.10 Μετρήσεις ίδιου βάρους δοκιμίων της ΣΚ3 και προσδιορισμός της πυκνότητας τους πριν την διεξαγωγή των πειραμάτων των 28 ημερών.

Στη σκυροδέτηση ΣΚ4 η απομάκρυνση των δοκιμίων από την μπανιέρα έγινε 6 μέρες πριν από τις δοκιμές. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων, από τα οποία η προκύπτουσα μέση πυκνότητα του ΚΔ της σύνθεσης SF1 είναι **1915 kg/m³**.

Τύπος δοκιμίου/Μέτρηση	1 ^η Μέτρηση	2 ^η Μέτρηση	3 ^η Μέτρηση	Μέση Τιμή	Πυκνότητα kg/m ³
Κύβος 10x10x10 cm	K1)1.938 kg	K2)1.958 kg	K3)1.910 kg	1.935 kg	1910
Κύβος 15x15x15 cm	K1)6.454 kg	K2)6.452 kg	K3)6.456 kg	6.454 kg	1912
Κύλινδρος Φ10 cm	K1)3.114 kg	K2)3.024 kg	K3)2.988 kg	3.042kg	1937
Κύλινδρος Φ15 cm	K1)10.096 kg	K2)10.058kg	K3)10.118 kg	10.080kg	1901
	K4)10.002 kg	K5)10.126kg	-		
Πρίσμα 10x10x50 cm	K1)9.708 kg	K2)9.412 kg	K3)9.606 kg	9.575 kg	1915

Πίνακας 2.11 Μετρήσεις ίδιου βάρους δοκιμίων της ΣΚ4 και προσδιορισμός της πυκνότητας τους πριν την διεξαγωγή των πειραμάτων των 28 ημερών.

Για τον προσδιορισμό της πυκνότητας μετά από ξήρανση σε κλίβανο (oven dry density) ψήθηκαν 2 κυλινδρικά δοκίμια της σύνθεσης S1 και της S2 για δύο μέρες στους 110°C. Η συνολική απώλεια υγρασίας κατά το «στέγνωμα» και το ψήσιμο των δοκιμίων οδηγεί σε μείωση της πυκνότητας για τις συνθέσεις S1, SF1 και S2, SF2 κατά 10,1% και 10,3% αντίστοιχα. Επομένως:

Σύνθεση	S1	S2	SF1	SF2
ρ_{ovendry} (kg/m ³)	1671	1706	1720	1744

Πίνακας 2.12 Πυκνότητα μετά από ξήρανση σε κλίβανο (oven dry density) των συνθέσεων.

Με βάση τον Ευρωκώδικα 2 (EN 206-1) το κισσηρόδεμα όλων των συνθέσεων εμπίπτει στην κατηγορία πυκνότητας 1,8.

3. Πειραματικές δοκιμές

3.1 Δοκιμές θλιπτικής αντοχής

Οι δοκιμές αντοχής σε θλίψη πραγματοποιήθηκαν στις μηχανές θραύσης Tonipact αντοχής 600 KN και Wykeham Farrance Slough England αντοχής 3000 KN. Δοκιμάστηκαν κυβικά δοκίμια με ακμή 100 mm και 150 mm, κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 100 mm και μήκους 200 και κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 150 και μήκους 300 mm. Συγκεκριμένα δοκιμάστηκαν για κάθε μια από τις συνθέσεις S1 και SF1: 9 κύβοι με ακμή 100 mm, 3 κύβοι με ακμή 150 mm, 9 κύλινδροι διαμέτρου 100 mm και 3 κύλινδροι διαμέτρου 150mm, ενώ για την κάθε μία από τις συνθέσεις S2 και SF2 δοκιμάστηκαν: 9 κύβοι με ακμή 100 mm, 4 κύβοι με ακμή 150 mm, 3 κύλινδροι διαμέτρου 100 mm και 8 κύλινδροι διαμέτρου 150mm. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιγράφεται στο πρότυπο ASTM C39. **(70)** Οι κύβοι τοποθετούνται με τέτοιο προσανατολισμό, ώστε να μην φορτίζεται η ελεύθερη πλευρά της σκυροδέτησης με σκοπό την ομοιόμορφη κατανομή της τάσης στις δυο επιφάνειες φόρτισης.

Όλες οι δοκιμές έγιναν στην καθορισμένη ημερομηνία. Τα δοκίμια αφέθηκαν μια μέρα πριν την δοκιμή στο Εργαστήριο, έξω από την μπανιέρα συντήρησης, για να στεγνώσουν. Δοκιμές θλίψης έγιναν στις 7, στις 14 και στις 28 ημέρες μετά τη σκυροδέτηση των δοκιμίων, ώστε να υπάρξει όσο το δυνατόν καλύτερη παρακολούθηση της απόκτησης αντοχής των δοκιμίων συναρτήσει με το χρόνο ωρίμανσης τους. Σημειώνεται, πως λόγω προβλήματος στον λειαντήρα του ΕΟΣ δεν έγινε λείανση της ελεύθερης επιφάνειας σκυροδέτησης των κυλίνδρων, με αποτέλεσμα να υπάρξει σε κάποια δοκίμια εκκεντρότητα φόρτισης, καθιστώντας τα αποτελέσματα της θλίψης των δοκιμίων αυτών ανακριβή. Τα δοκίμια, όπως αναμενόταν, αστόχησαν με διαμήκη ρωγμάτωση, με σχετικά αυξημένη ψαθυρότητα στις δοκιμές των συνθέσεων S1 και S2. Στα δοκίμια των συνθέσεων με ίνα (SF1 και SF2), η αστοχία ήταν πολύ πιο πλαστική και η ρωγμάτωση πολύ μικρότερη, όπως φαίνεται και στις εικόνες.

Το πλάνο θραύσης των δοκιμίων όριζε πως από κάθε σύνθεση θα γίνει δοκιμή της θλιπτικής αντοχής 3 κύβων ακμής 100 mm στις 7, στις 14 και στις 28 ημέρες, καθώς και 3 κύβων ακμής 150 mm στις 28 ημέρες. Λόγω περισσias ενός κύβου ακμής 150 mm στις σκυροδετήσεις ΣΚ2 και ΣΚ4 αποφασίστηκε να εξεταστεί η θλιπτική του αντοχή στις 14 ημέρες. Όσον αφορά τους κυλίνδρους με διάμετρο 100 mm, για τις συνθέσεις S1 και SF1 έγινε θραύση 3 κυλίνδρων στις 7, στις 14 και στις 28 ημέρες, ενώ εξετάστηκαν και 3 κύλινδροι με διάμετρο 150 mm μετά από 28 ημέρες υγρής συντήρησης. Για τις συνθέσεις S2 και SF2 έγινε θραύση 3 κυλίνδρων με διάμετρο 150 mm στις 7 και 14 ημέρες, 2 κυλίνδρων με διάμετρο 150 mm στις 28 ημέρες, ενώ εξετάστηκαν και 3 κύλινδροι με διάμετρο 100 mm μετά από 28 ημέρες από την σκυροδέτηση.

Τα μικρά δοκίμια, δηλαδή οι κύβοι ακμής 100 mm και οι κύλινδροι με διάμετρο 100 mm εξετάστηκαν στη μηχανή θραύσης Tonipact αντοχής 600 KN, ενώ οι κύβοι με ακμή 150

mm και οι κύλινδροι με διάμετρο 150 mm στη μηχανή θραύσης Wykeham Farrance Slough England αντοχής 3000 KN.



Εικόνες 3.1 και 3.2 Δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε κυβικό δοκίμιο ακμής 10 cm και σε κυλινδρικό δοκίμιο διαμέτρου Φ 10 cm



Εικόνες 3.3 και 3.4 Δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε κυλινδρικό δοκίμιο διαμέτρου Φ 15 cm και σε κυβικό δοκίμιο ακμής 15 cm



Εικόνα 3.5 Θραυόμενα κυβικά δοκίμια 7 ημερών της σύνθεσης S1



Εικόνες 3.6 και 3.7 Θραυόμενα κυβικά δοκίμια με ίνα 7 ημερών της σύνθεσης S1 και της σύνθεσης SF2 αντίστοιχα



Εικόνες 3.8 και 3.9 Θραυόμενα κυλινδρικά δοκίμια 14 ημερών της σύνθεσης S2 και 7 ημερών της SF2



Εικόνες 3.10 και 3.11 Σύγκριση μεταξύ θραυόμενων κυβικών και κυλινδρικών δοκιμών με ή χωρίς ίνα.



Εικόνες 3.12 και 3.13 Κυλινδρικό δοκίμιο της σύνθεσης S1 των 7 ημερών, ο οποίος παρουσίασε εκκεντρότητα κατά τη φόρτιση και κυλινδρικά δοκίμια της σύνθεσης 7 ημερών της S2 τα οποία παρουσίασαν σφάλμα λόγω τοποθέτησης καπακιού από μόλυβδο, αντίστοιχα.



Εικόνα 3.14 Θραυόμενα κυβικά δοκίμια 28 ημερών της σύνθεσης S1, που παρουσίασαν αστοχία λοξότητας φορτίσεως



Εικόνα 3.15 Σύγκριση θραυόμενων κυβικών δοκιμών 28 ημερών των συνθέσεων SF1 (με ίνα) και S1 (χωρίς ίνα)

Κεφάλαιο 3: Πειραματικές δοκιμές

ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ(cm)	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΘΡΑΥΣΗΣ	ΗΛΙΚΙΑ (ΗΜΕΡΕΣ)	F(KN)	f _c (MPa)	f _{cm} (MPa)	CV (%)
S1	10*10*10	01/02/2017	08/02/2017	7	346.6	34.66	37.84	8.9
	10*10*10	01/02/2017	08/02/2017	7	413.7	41.37		
	10*10*10	01/02/2017	08/02/2017	7	374.8	37.48		
	10*10*10	01/02/2017	15/02/2017	14	428.8	42.88	40.35	5.4
	10*10*10	01/02/2017	15/02/2017	14	392.5	39.25		
	10*10*10	01/02/2017	15/02/2017	14	389.3	38.93		
	10*10*10	01/02/2017	01/03/2017	28	452.2	45.22	46.12	3.4
	10*10*10	01/02/2017	01/03/2017	28	481.7	48.17		
	10*10*10	01/02/2017	01/03/2017	28	469.0	46.9		
	15*15*15	01/02/2017	01/03/2017	28	1033.0	45.9		
	15*15*15	01/02/2017	01/03/2017	28	982.5	43.7		
	15*15*15	01/02/2017	01/03/2017	28	1054.2	46.85		
S2	10*10*10	02/02/2017	09/02/2017	7	404.4	40.44	39.79	8.5
	10*10*10	02/02/2017	09/02/2017	7	428.1	42.81		
	10*10*10	02/02/2017	09/02/2017	7	361.2	36.12		
	10*10*10	02/02/2017	16/02/2017	14	399.1	39.91	40.59	2.5
	10*10*10	02/02/2017	16/02/2017	14	400.8	40.08		
	10*10*10	02/02/2017	16/02/2017	14	(352.8)	(35.28)		
	15*15*15	02/02/2017	16/02/2017	14	940.1	41.78	47.9	3.7
	10*10*10	02/02/2017	06/03/2017	32	(370.4)	(37.04)		
	10*10*10	02/02/2017	06/03/2017	32	(363.5)	(36.35)		
	10*10*10	02/02/2017	06/03/2017	32	503.5	50.35		
	15*15*15	02/02/2017	06/03/2017	32	1041.3	46.3		
	15*15*15	02/02/2017	06/03/2017	32	1056.7	47.0		
15*15*15	02/02/2017	06/03/2017	32	1074.4	47.8			

Πίνακας 3.1 Πειραματική εκτίμηση αντοχής κύβων για τις συνθέσεις S1 και S2

ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ(cm)	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΘΡΑΥΣΗΣ	ΗΛΙΚΙΑ (ΗΜΕΡΕΣ)	F(KN)	f _c (MPa)	f _{cm} (MPa)	CV (%)
SF1 (Με ίνα 60 kg/m ³)	10*10*10	08/02/2017	15/02/2017	7	396.1	39.61	39.66	6.2
	10*10*10	08/02/2017	15/02/2017	7	372.4	37.24		
	10*10*10	08/02/2017	15/02/2017	7	421.4	42.14		
	10*10*10	08/02/2017	22/02/2017	14	418.7	41.87	40.84	3.1
	10*10*10	08/02/2017	22/02/2017	14	412.2	41.22		
	10*10*10	08/02/2017	22/02/2017	14	394.2	39.42		
	10*10*10	08/02/2017	08/03/2017	28	444.9	44.49	46.93	6.5
	10*10*10	08/02/2017	08/03/2017	28	482.1	48.20		
	10*10*10	08/02/2017	08/03/2017	28	433.5	43.35		
	15*15*15	08/02/2017	08/03/2017	28	1147.6	51.00		
	15*15*15	08/02/2017	08/03/2017	28	(940.7)	(41.8)		
	15*15*15	08/02/2017	08/03/2017	28	1070.7	47.6		
	SF2 (Με ίνα 60 kg/m ³)	10*10*10	09/02/2017	16/02/2017	7	401.9	40.19	42.15
10*10*10		09/02/2017	16/02/2017	7	432.7	43.27		
10*10*10		09/02/2017	16/02/2017	7	429.8	42.98		
10*10*10		09/02/2017	23/02/2017	14	378	37.8	39.02	2.8
10*10*10		09/02/2017	23/02/2017	14	394	39.4		
10*10*10		09/02/2017	23/02/2017	14	(295)	(29.5)		
15*15*15		09/02/2017	23/02/2017	14	896.6	39.85	49.74	2.6
10*10*10		09/02/2017	09/03/2017	28	501.3	50.13		
10*10*10		09/02/2017	09/03/2017	28	(399.3)	(39.93)		
10*10*10		09/02/2017	09/03/2017	28	516.2	51.62		
15*15*15		09/02/2017	09/03/2017	28	1115.6	49.58		
15*15*15		09/02/2017	09/03/2017	28	1082.9	48.13		
15*15*15		09/02/2017	09/03/2017	28	1107.6	49.23		

Πίνακας 3.2 Πειραματική εκτίμηση αντοχής κύβων για τις συνθέσεις SF1 και SF2

ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ(cm)	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΘΡΑΥΣΗΣ	ΗΛΙΚΙΑ (ΗΜΕΡΕΣ)	F(KN)	f _c (MPa)	f _{cm} (MPa)	CV (%)
S1	Φ10*20	01/02/2017	08/02/2017	7	(161.6)	(20.57)	28.15	-
	Φ10*20	01/02/2017	08/02/2017	7	(152.2)	(19.38)		
	Φ10*20	01/02/2017	08/02/2017	7	221.1	28.15		
	Φ10*20	01/02/2017	15/02/2017	14	266.2	33.89	31.23	12.0
	Φ10*20	01/02/2017	15/02/2017	14	224.4	28.57		
	Φ10*20	01/02/2017	15/02/2017	14	---	---		
	Φ10*20	01/02/2017	13/03/2017	40	248.5	31.64	33.46	7.3
	Φ10*20	01/02/2017	13/03/2017	40	255.3	32.50		
	Φ10*20	01/02/2017	13/03/2017	40	284.7	36.25		
	Φ15*30	01/02/2017	01/03/2017	28	(492.0)	(27.84)	(29.15)	(4.1)
	Φ15*30	01/02/2017	01/03/2017	28	(533.0)	(30.16)		
	Φ15*30	01/02/2017	01/03/2017	28	(520.5)	(29.45)		
S2	Φ15*30	02/02/2017	09/02/2017	7	(404.8)	(22.91)	(23.94)	(12.0)
	Φ15*30	02/02/2017	09/02/2017	7	(480.1)	(27.17)		
	Φ15*30	02/02/2017	09/02/2017	7	(384.1)	(21.7)		
	Φ15*30	02/02/2017	16/02/2017	14	596.8	33.77	32.92	7.8
	Φ15*30	02/02/2017	16/02/2017	14	530.6	30.03		
	Φ15*30	02/02/2017	16/02/2017	14	617.7	34.95		
	1)Φ15*30	02/02/2017	09/03/2017	35	605.9	34.30	36.87	10.62
	5)Φ15*30	02/02/2017	09/03/2017	35	717.7	40.60		
	1)Φ10*20	02/02/2017	10/3/2017	36	314.9	40.09		
	2)Φ10*20	02/02/2017	13/03/2017	39	247.0	31.45		
	3)Φ10*20	02/02/2017	13/3/2017	39	297.7	37.91		

Πίνακας 3.3 Πειραματική εκτίμηση αντοχής κυλίνδρων για τις συνθέσεις S1 και S2

ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ(cm)	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΘΡΑΥΣΗΣ	ΗΛΙΚΙΑ (ΗΜΕΡΕΣ)	F(KN)	f _c (MPa)	f _{cm} (MPa)	CV (%)
SF1 (Με ίνα 60 kg/m ³)	Φ10*20	08/02/2017	15/02/2017	7	226.5	28.84	32.45	10.4
	Φ10*20	08/02/2017	15/02/2017	7	278.7	35.49		
	Φ10*20	08/02/2017	15/02/2017	7	259.4	33.03		
	Φ10*20	08/02/2017	22/02/2017	14	269.6	34.33	34.5	0.7
	Φ10*20	08/02/2017	22/02/2017	14	272.4	34.68		
	Φ10*20	08/02/2017	22/02/2017	14	(225.0)	(28.65)		
	Φ10*20	08/02/2017	13/03/2017	33	300.0	38.20	38.53	7.3
	Φ10*20	08/02/2017	13/03/2017	33	321.8	40.97		
	Φ10*20	08/02/2017	13/03/2017	33	333.2	42.43		
	2)Φ15*30	08/02/2017	09/03/2017	29	618.5	35.00		
	4)Φ15*30	08/02/2017	09/03/2017	29	639.8	36.16		
	6)Φ15*30	08/02/2017	09/03/2017	29	679.2	38.43		
SF2 (Με ίνα 60 kg/m ³)	Φ15*30	09/02/2017	09/02/2017	7	639.7	36.2	36.03	5.6
	Φ15*30	09/02/2017	09/02/2017	7	670.6	37.95		
	Φ15*30	09/02/2017	09/02/2017	7	599.6	33.93		
	Φ15*30	09/02/2017	16/02/2017	14	648.01	36.67	39.2	5.7
	Φ15*30	09/02/2017	16/02/2017	15	737.3	41.72		
	Φ15*30	09/02/2017	16/02/2017	15	693.4	39.24		
	Φ15*30	09/02/2017	09/03/2017	28	733.3	41.50	42.01	6.6
	Φ15*30	09/02/2017	09/03/2017	28	667.0	37.7		
	Φ10*20	09/02/2017	13/03/2017	32	330.6	42.09		
	Φ10*20	09/02/2017	13/03/2017	32	353.7	45.04		
	Φ10*20	09/02/2017	13/03/2017	32	343.4	43.72		
	Φ10*20	09/02/2017	13/03/2017	32	343.4	43.72		

Πίνακας 3.4 Πειραματική εκτίμηση αντοχής κυλίνδρων για τις συνθέσεις SF1 και SF2

Όπως αναμενόταν η σύνθεση S2 δίνει μεγαλύτερη αντοχή από τη σύνθεση S1, ενώ το ίδιο ισχύει και για τις συνθέσεις SF2 και SF1 αντίστοιχα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως στις συνθέσεις S2 και SF2 το ποσοστό της άμμου και του τσιμέντου είναι μεγαλύτερα, ενώ μειώνεται και η ποσότητα της κίσης. Έτσι όπως φαίνεται και από τις μετρήσεις του βάρους των δοκιμών, με την αύξηση της πυκνότητας αυξάνεται και η αντοχή.

Κατά την εκτέλεση των πειραμάτων, όπως είναι φυσιολογικό σημειώθηκαν αρκετά σφάλματα, τα οποία οδήγησαν σε αναξιόπιστα αποτελέσματα. Τα σφάλματα αυτά ήταν:

- Δοκιμές 7 ημερών:

A) 2 κύλινδροι Φ10*20 cm της σύνθεσης S1 ήταν έκκεντροι, λόγω αποτυχημένης προσπάθειας λείανσης τους (κακή λειτουργία του λειαντήρα)

B) 3 κύλινδροι Φ15*30 cm της σύνθεσης S2, λόγω τοποθέτησης «καπακιού» από μόλυβδο κατά τη διάρκεια των πειραμάτων με αποτέλεσμα την συγκέντρωση τάσεων

- Δοκιμές 14 ημερών

A) 1 κυβικό δοκίμιο της σύνθεσης S2 και ένας ακόμη κύβος της σύνθεσης SF2, λόγω κακής καταστάσεως της μήτρας.

B) Αυξημένη υγρασία στα δοκίμια. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε πως στα κυβικά δοκίμια της σύνθεσης SF2, υπάρχει μείωση της αντοχής στις 14 μέρες σε σχέση με αυτή των 7 ημερών. Αυτό, κατά πάσα πιθανότητα οφείλεται στο γεγονός πως δεν επαρκούσε η μια μέρα έξω από την υγρή συντήρηση για τα δοκίμια για να στεγνώσουν, λόγω της μεγαλύτερης απορρόφησης νερού στις 14 σε σχέση με τις 7 μέρες. Έτσι, το συγκρατούμενο νερό στα δοκίμια οδήγησε σε μη αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα σχετικά με την αντοχή. Είναι πιθανό, η πολύ μικρή αύξηση της αντοχής και στις προηγούμενες συνθέσεις στις 14 μέρες να οφείλεται σε αυτό το γεγονός. Στη δοκιμή θλίψεως 14 ημερών των κυλίνδρων της SF2 αποφασίστηκε οι 2 από τους 3 κυλίνδρους να αφεθούν να στεγνώσουν μια μέρα παραπάνω, προκειμένου να δώσουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, αφού ο πρώτος κύλινδρος δεν είχε στεγνώσει επαρκώς, με αποτέλεσμα να αστοχήσει πολύ νωρίς.

- Δοκιμές 28 ημερών

A) 3 κύλινδροι διαμέτρου 15 cm και ένας κύλινδρος διαμέτρου 10 cm της σύνθεσης S1, λόγω εκκεντρότητας φορτίσεως και συγκέντρωσης τάσεων

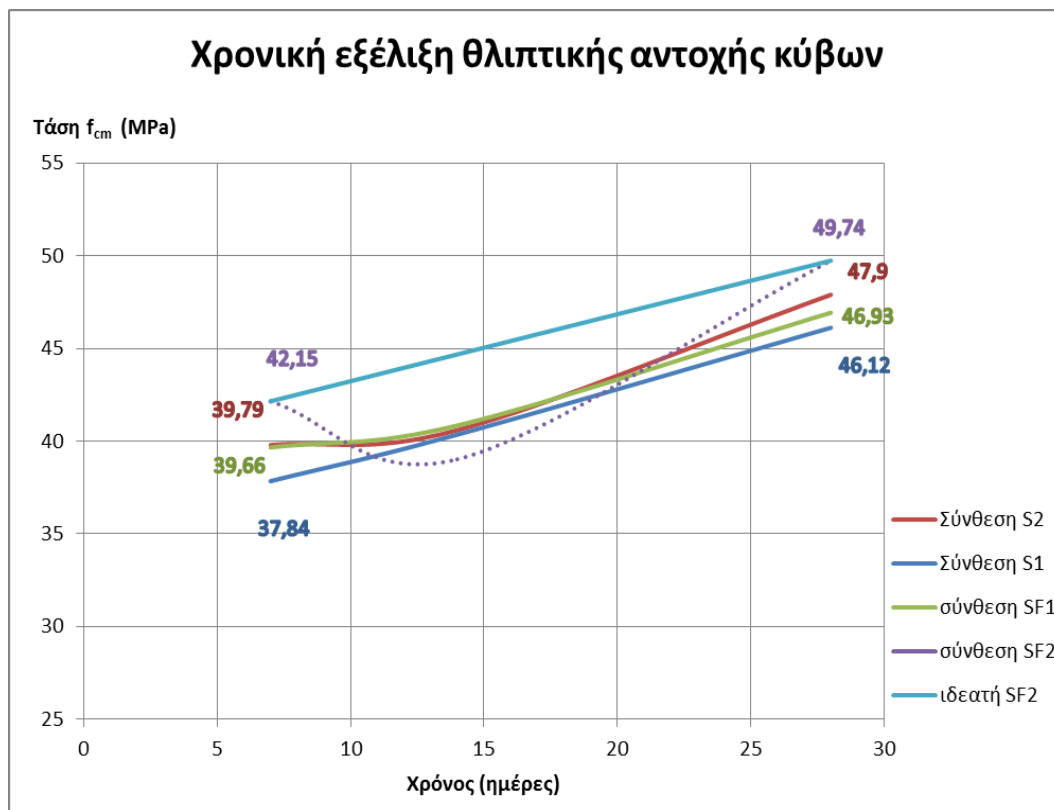
B) 2 κυβικά δοκίμια της σύνθεσης S2 με διάσταση ακμής 10 cm, λόγω λοξότητας των πλευρών, που οφείλεται σε κακή κατάσταση των μητρών σκυροδέτησης

Γ) 1 κυβικό δοκίμιο της σύνθεσης SF2 με διάσταση ακμής 10 cm, λόγω λοξότητας των πλευρών, που οφείλεται σε κακή κατάσταση των μητρών σκυροδέτησης

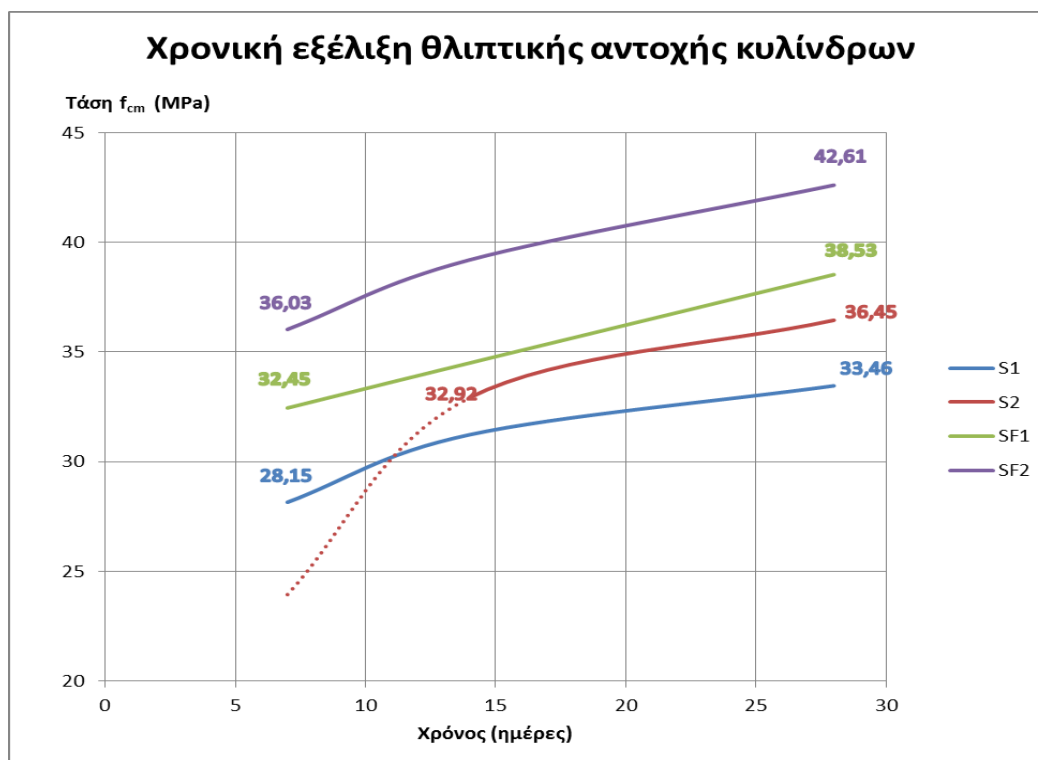
Τα δοκίμια στα οποία διαπιστώθηκε εκκεντρότητα φόρτισης ή μειωμένες τιμές λόγω μη επαρκούς στεγνώματος έχουν τοποθετηθεί μέσα σε παρενθέσεις και δεν λήφθηκαν υπόψη στους υπολογισμούς των μέσων τιμών αντοχής και διασποράς.

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων των 28 ημερών τα δοκίμια αφέθηκαν από 5 έως 6 μέρες εκτός της μπανιέρας, διότι παρατηρήθηκε πως η παραμονή τους στις μπανιέρες συντήρησης οδήγησε στο να έχουν απορροφήσει αρκετή ποσότητα νερού. Αποτέλεσμα αυτού ήταν να μην επαρκεί η απομάκρυνση τους από το νερό, 2 ημέρες πριν από την τέλεση των πειραμάτων. Ο λόγος αυτός είναι και η αιτία που τα πειράματα θλιπτικής αντοχής της S2 πραγματοποιήθηκαν στις 29 ημέρες από τη σκυροδέτηση. Οφείλει να επισημανθεί πως η διαφορά από τις 28 στις 29 μέρες στην αντοχή είναι αμελητέα και επομένως δεν επηρεάζεται η εξαγωγή σωστών συμπερασμάτων. Οι καθυστερήσεις στην εξέταση της αντοχής των κυλινδρικών δοκιμίων οφείλονται στο γεγονός ότι στάλθηκαν στο εργαστήριο της Lafarge Beton για να γίνει καλούπωμα με ειδική τσιμεντοκονία. Η τσιμεντοκονία αυτή αναιρεί τις όποιες πιθανές εκκεντρότητες φόρτισης και συγκεντρώσεων τάσεων.

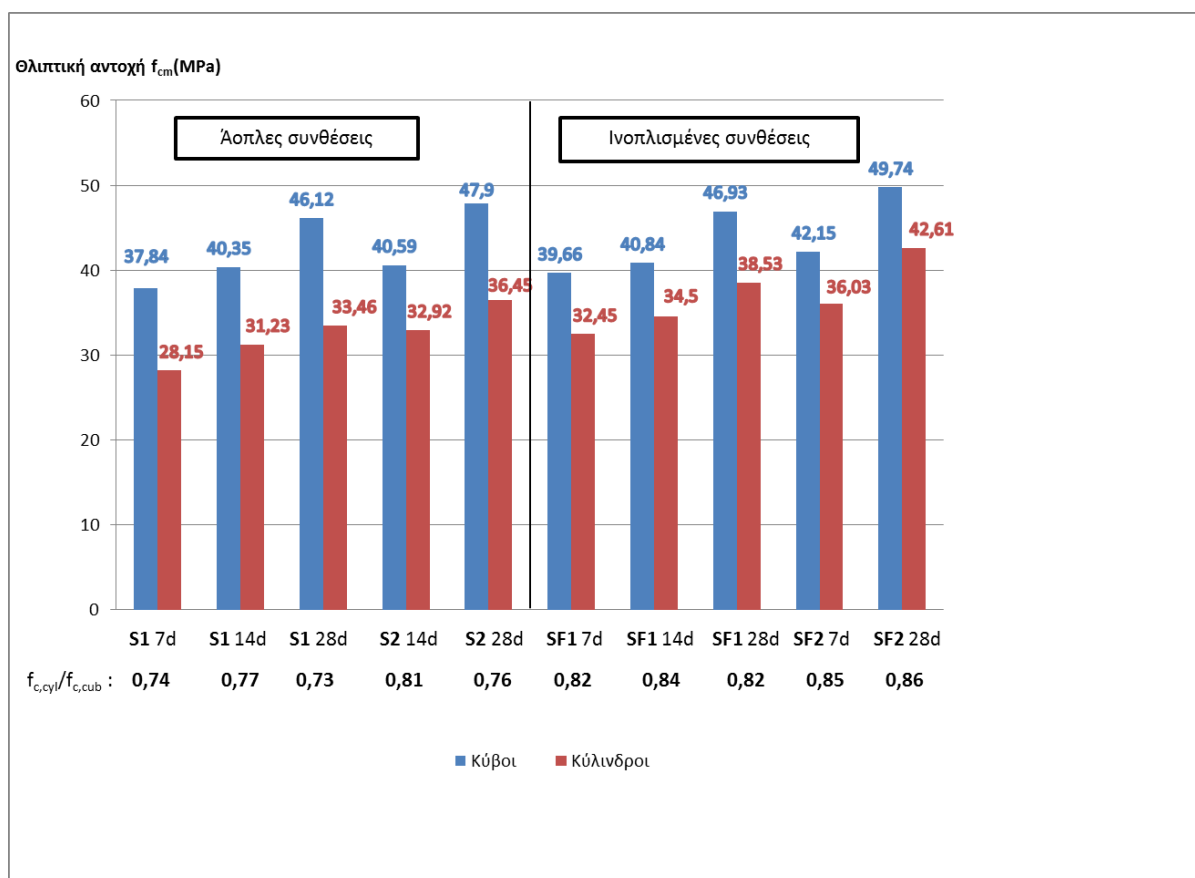
Επομένως, με βάση τις παραπάνω τιμές της θλιπτικής αντοχής των πινάκων 3.1 έως 3.4 προκύπτουν τα διαγράμματα της χρονικής εξέλιξης θλιπτικής αντοχής των κύβων και κυλίνδρων, καθώς και το ραβδόγραμμα συσχέτισης θλιπτικής αντοχής κύβων και κυλίνδρων:



Εικόνα 3.16 Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης θλιπτικής αντοχής κύβων



Εικόνα 3.17 Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης θλιπτικής αντοχής κυλίνδρων



Εικόνα 3.18 Ραβδόγραμμα συσχέτισης θλιπτικής αντοχής κύβου-κυλίνδρου

Από τη μέση τιμή της θλιπτικής αντοχής κυλίνδρου στις 28 μέρες και με βάση τις διατάξεις του ευρωκώδικα EC2 προκύπτει η κατηγορία αντοχής του ελαφροσκυροδέματος για τις συνθέσεις του κισσηροδέματος που εξετάστηκαν. Για τον προσδιορισμό της κατηγορίας αντοχής του ΕΣ, επιλέγεται η κατηγορία αντοχής του ευρωκώδικα που είναι πιο κοντά στην πειραματική μέση αντοχή των κυλίνδρων στις 28 μέρες.

Σύνθεση	Πειραματική μέση αντοχή κυλίνδρων f_{lcm}	Κατηγορία αντοχής Ελαφροσκυροδέματος
S1	33.46	LC 25/28
S2	36.45	LC 30/33
SF1	38.53	LC 30/33
SF2	42.61	LC 35/38

Πίνακας 3.5 Προσδιορισμός κατηγορίας αντοχής ΕΣ των συνθέσεων

3.2 Δοκιμές εφελκυστικής αντοχής

Όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 1.9.2.1 η εφελκυστική αντοχή του ΕΣ είναι σημαντική, όταν μελετάμε τη ρηγμάτωση. Η αστοχία δοκιμίων σκυροδέματος σε μονοαξονικό εφελκυσμό οφείλεται στην επέκταση ρωγμών κάθετα στη διεύθυνση φόρτισης. Τέτοιες ρωγμές μειώνουν τη διατομή των δοκιμίων και επιφέρουν συγκεντρώσεις τάσεων. Τελικά, η αστοχία του υλικού προκαλείται λόγω της απότομης επέκτασης λίγων σχετικά ρωγμών, έτσι ώστε να είναι αρκετά δύσκολο να καταγραφεί πειραματικά το τμήμα της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης μετά τη μέγιστη τάση. Ο λόγος εφελκυστικής προς θλιπτική αντοχή για το σκυρόδεμα είναι μόλις 0.07-0.13, κάτι που οδηγεί συνήθως στο να θεωρείται η εφελκυστική αντοχή πρακτικά ίση με το μηδέν. Μερικές φορές όμως μία εκτίμηση του μεγέθους της είναι απαραίτητη, όπως π.χ. για τον υπολογισμό των φορτίων που προκαλούν ρηγμάτωση. Η άμεση μέτρηση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος είναι αρκετά περίπλοκη, γιατί απαιτεί ή τη χρήση ειδικών δοκιμίων με αρπαγές εφελκυσμού ή την επικόλληση πρισματικών δοκιμίων σε μεταλλικές πλάκες εφαρμογής φορτίου, αλλά και συχνά μη ακριβής, λόγω της ανάπτυξης δευτερευουσών τάσεων.

Λόγω των δυσχερειών των πειραμάτων για τον άμεσο προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής (απαιτούνται δοκίμια και πειραματικές διατάξεις ειδικού τύπου, οι οποίες μάλιστα οδηγούν σε αποτελέσματα με μεγάλη διασπορά) έχουν αναπτυχθεί έμμεσες δοκιμές για τον προσδιορισμό της. Οι έμμεσες δοκιμές αυτές είναι οι δοκιμές εφελκυσμού σε διάρρηξη ή σε κάμψη και τα αποτελέσματά τους είναι διασποράς ανάλογης με αυτήν των δοκιμών θλίψης. Επομένως, για την εκτίμηση της εφελκυστικής αντοχής του ΕΣ των συνθέσεων θα πραγματοποιηθούν πειραματικές δοκιμές σε διάρρηξη και κάμψη 3 σημείων.

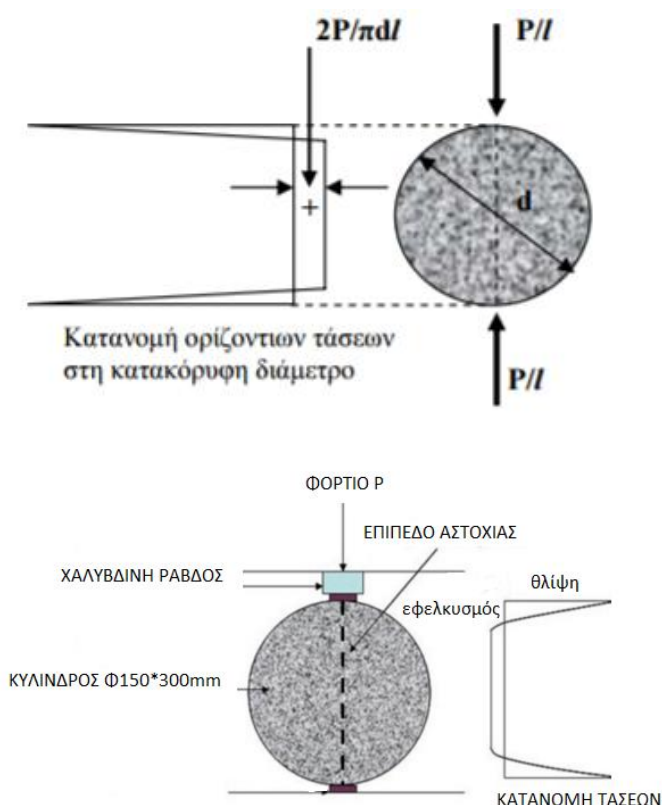
3.2.1 Δοκιμές εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη (Brazilian test)

Οι δοκιμές σε διάρρηξη έγιναν με βάση το πρότυπο ASTM C496 σε πρότυπα κυλινδρικά δοκίμια με διάμετρο 150 mm και μήκος 300 mm.**(71)** Στη δοκιμή αυτή, γνωστή και ως “Brazilian test”, το κυλινδρικό δοκίμιο υποβάλλεται προσδευτικά σε αυξανόμενο θλιπτικό φορτίο P ομοιόμορφα κατανεμημένο κατά μήκος δύο αντιδιαμετρικών γενετειρών της παράπλευρης επιφάνειας. Τα αντιδιαμετρικά αυτά φορτία προκαλούν οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις σ_h , ομοιόμορφα κατανεμημένες στο μεγαλύτερο τμήμα του

κατακόρυφου επιπέδου του οριζόμενου από τις αντιδιαμετρικές γενέτειρες, με μέγεθος ίσο με $\sigma_h = \frac{2P}{\pi dl}$. Με την αύξηση του θλιπτικού φορτίου οι τάσεις σ_h φθάνουν τη μέγιστη τιμή τους και το δοκίμιο χωρίζεται («διαρρηγνύεται») κατά μήκος του επιπέδου αυτού. Η μέγιστη τιμή $f_{ct,sp}$ της εφελκυστικής αυτής τάσης, οριζόμενη ως εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη δίνεται συναρτήσει του μέγιστου θλιπτικού φορτίου διάρρηξης P_{sp} από τη σχέση:

$$f_{ct,sp} = \frac{2 * P_{sp}}{\pi * d * l}$$

Από πειραματικά αποτελέσματα έχει βρεθεί ότι με αυτή τη μέθοδο υπάρχει μια υπερεκτίμηση της αντοχής κατά περίπου 10%, επομένως $f_{ct} = 0.9f_{ct,sp}$.



Εικόνες 3.19 και 3.20 Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού από διάρρηξη.

Για τη δοκιμή αυτή χρησιμοποιήθηκε η μηχανή θραύσης Wykeham Farrance Slough England αντοχής 3000 KN. Έγινε θραύση 3 κυλίνδρων με διάμετρο 150 mm και μήκος 300 mm για την κάθε σύνθεση. Τα αποτελέσματα φαίνονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 3.6.



Εικόνα 3.21 Δοκιμή διάρρηξης κυλινδρικού δοκιμίου Φ15*30 cm της σύνθεσης S1



Εικόνες 3.22 και 3.23 Κυλινδρικό δοκίμιο της σύνθεσης S1 μετά τη δοκιμή της διάρρηξης



Εικόνα 3.24 Κυλινδρικό δοκίμιο της σύνθεσης SF2 μετά τη δοκιμή σε διάρρηξη



Εικόνα 3.25 Κυλινδρικό δοκίμιο της σύνθεσης SF1 μετά τη διατομή της διάρρηξης

ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (cm)	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΘΡΑΥΣΗΣ	ΗΛΙΚΙΑ (ΗΜΕΡΕΣ)	P_{sp} (KN)	Μήκος κυλίνδρων (cm)	$f_{ct,sp}$ (MPa)	$f_{ctm,sp}$ (MPa)	CV (%)
S1	1)Φ15*30	01/02/2017	01/03/2017	28	185.3	30.0	2.62	2.29	13.2
	2)Φ15*30	01/02/2017	01/03/2017	28	133.6	30.0	1.89		
	3)Φ15*30	01/02/2017	01/03/2017	28	166.7	30.0	2.36		
S2	2)Φ15*30	02/02/2017	06/03/2017	32	168.3	29.8	2.38	2.33	3.8
	3)Φ15*30	02/02/2017	06/03/2017	32	156.3	30.0	2.23		
	4)Φ15*30	02/02/2017	06/03/2017	32	164.2	29.7	2.39		
SF1 (με ίνα 60 kg/m ³)	1)Φ15*30	08/02/2017	08/03/2017	28	433.1	30.0	6.13	6.38	4.7
	3)Φ15*30	08/02/2017	08/03/2017	28	443.0	29.8	6.31		
	5)Φ15*30	08/02/2017	08/03/2017	28	472.8	29.9	6.71		
SF2 (με ίνα 60 kg/m ³)	3)Φ15*30	09/02/2017	09/03/2017	28	464.2	30.0	6.57	6.36	3.2
	4)Φ15*30	09/02/2017	09/03/2017	28	431.7	29.7	6.17		
	5)Φ15*30	09/02/2017	09/03/2017	28	444.2	29.8	6.33		

Πίνακας 3.6 Πειραματική εκτίμηση της αντοχής κυλίνδρων Φ15*30 σε διάρρηξη

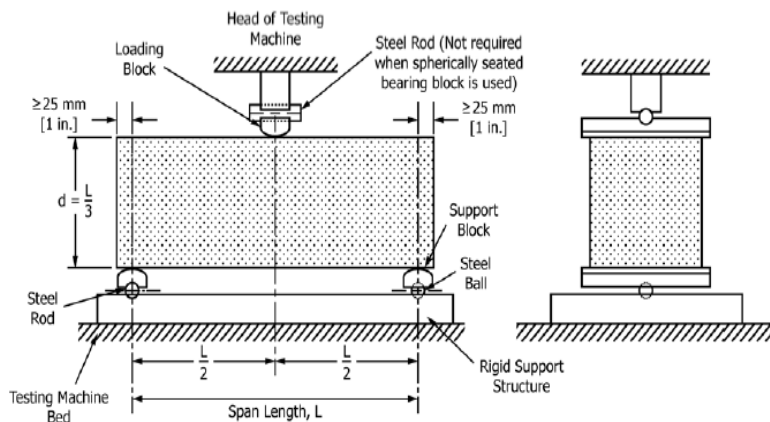
3.2.2 Δοκιμές εφελκυστικής αντοχής σε κάμψη 3 σημείων

Μία εύκολη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού είναι η δοκιμή πρισμάτων, που υποβάλλονται σε κάμψη ως αμφιέρειστες ή αμφιπροέχουσες δοκοί με φορτίο στη μέση του ανοίγματος. Η δοκιμή αυτή περιγράφεται λεπτομερώς στο Πρότυπο ΕΛΟΤ-739. Λόγω της επιβαλλόμενης καμπτικής επιπόνησης αναπτύσσονται ορθές τάσεις καθ' ύψος της εγκάρσιας διατομής της δοκού, με μέγεθος στις ακραίες ίνες ίσο με $\sigma=M/W$. Όταν με την αύξηση του φορτίου η εφελκυστική τάση σ φτάσει στην οριακή της τιμή, η δοκός θραύεται στη μεσαία διατομή. Η μέγιστη εφελκυστική τάση $f_{ct,fl}$ κατά τη θραύση του πρισματικού δοκιμίου ("μέτρο θραύσης" ή "αντοχή σε εφελκυσμό από κάμψη") δίνεται από τη σχέση:

$$f_{ct,fl} = \frac{6M_{max}}{bh^2}$$

όπου M_{max} είναι η ροπή θραύσης του δοκιμίου, ενώ b και h είναι το πλάτος και το ύψος της διατομής του δοκιμίου αντίστοιχα. Η παραπάνω εξίσωση υποθέτει γραμμική κατανομή των τάσεων καθ' ύψος της διατομής, κάτι που δεν είναι απόλυτα σωστό, λόγω της μη γραμμικότητας της καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων του σκυροδέματος και επειδή οι διαστάσεις του δοκιμίου δε δικαιολογούν την εφαρμογή της τεχνικής θεωρίας της κάμψης (στην οποία στηρίζεται η παραπάνω εξίσωση). Επιπλέον, η μέγιστη εφελκυστική τάση αναπτύσσεται μόνο στην ακραία ίνα του δοκιμίου και όχι σε όλα τα σημεία της διατομής (όπως στην περίπτωση άμεσου εφελκυσμού, οπότε και η πιθανότητα ύπαρξης περιοχών αδυναμίας είναι μεγαλύτερη), γι' αυτό και η έμμεση εφελκυστική αντοχή από κάμψη είναι μεγαλύτερη αυτής από άμεσο εφελκυσμό κατά 50-100%. Από πειραματικά αποτελέσματα έχει βρεθεί ότι $f_{ct} \approx 0.5 * f_{ct,fl}$. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η καμπτική εφελκυστική αντοχή επηρεάζεται περισσότερο από την αντοχή σε διάρρηξη και ότι γενικά έχει παρατηρηθεί ότι η καμπτική συμπεριφορά του ΕΣ είναι κατώτερη από εκείνη του ΣΚΒ.

Τα δοκίμια που δοκιμάσθηκαν ήταν πρισματικά διαστάσεων 100x100x500 mm. Η κάμψη τριών σημείων έγινε σύμφωνα με το ASTM C293-02(72) (Εικόνα 3.26) και η μηχανή κάμψης που χρησιμοποιήθηκε είναι η Avery – Denison μέγιστου φορτίου 600 kN του ΕΟΣ ΕΜΠ. Στα δοκίμια της σύνθεσης S2 χρησιμοποιήθηκε δυναμοκυψέλη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.29. Κατά τις δοκιμές της συνθέσεως S1 το καθαρό μήκος ανοίγματος μεταξύ των στηρίξεων ήταν ίσο με 39 cm για τα πρίσματα 100x100x500 mm, ενώ για τη σύνθεση S2 το καθαρό μήκος ανοίγματος ήταν 40 cm. Για τη μέτρηση του βέλους κάμψης στο μέσο της δοκού χρησιμοποιήθηκε μηχανοσύριγμο SDP 200D με εύρος μετρήσεων 200 mm και ευαισθησία μέτρησης $50 * 10^{-6} / \text{mm}$, το οποίο κατά τη δοκιμή κάμψης της σύνθεσης S1 τοποθετήθηκε όπως φαίνεται στην εικόνα. Βέβαια, όπως παρατηρήθηκε από την εξαγωγή του μέτρου ελαστικότητας από τα διαγράμματα φορτίου-βύθισης, τα αποτελέσματα δεν ήταν αντιπροσωπευτικά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως το μηχανοσύριγμο είχε τοποθετηθεί σε τέτοιο σημείο που μέτραγε την «κάθιση» όλης της μηχανής με αποτέλεσμα να επηρεάζονται πολύ τα αποτελέσματα από εξωγενείς παράγοντες. Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνεται η πειραματική διάταξη και η μορφή αστοχίας των δοκιμίων.



Εικόνα 3.26 Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης της δοκιμής κάμψης τριών σημείων σύμφωνα με το ASTM C293-02



Εικόνα 3.27 Μηχανή θραύσης Avery-Denison αντοχής 600 KN, στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές κάμψης 3 σημείων.

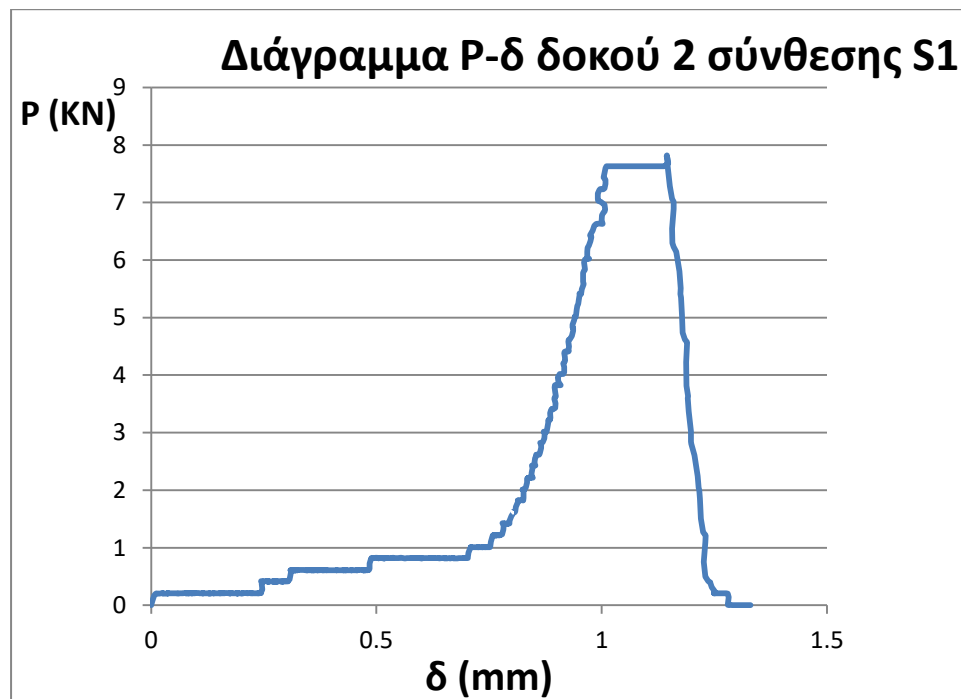


Εικόνα 3.28 Δοκιμή κάμψης 3 σημείων σε πρίσμα διαστάσεων 10*10*50 cm της σύνθεσης S1

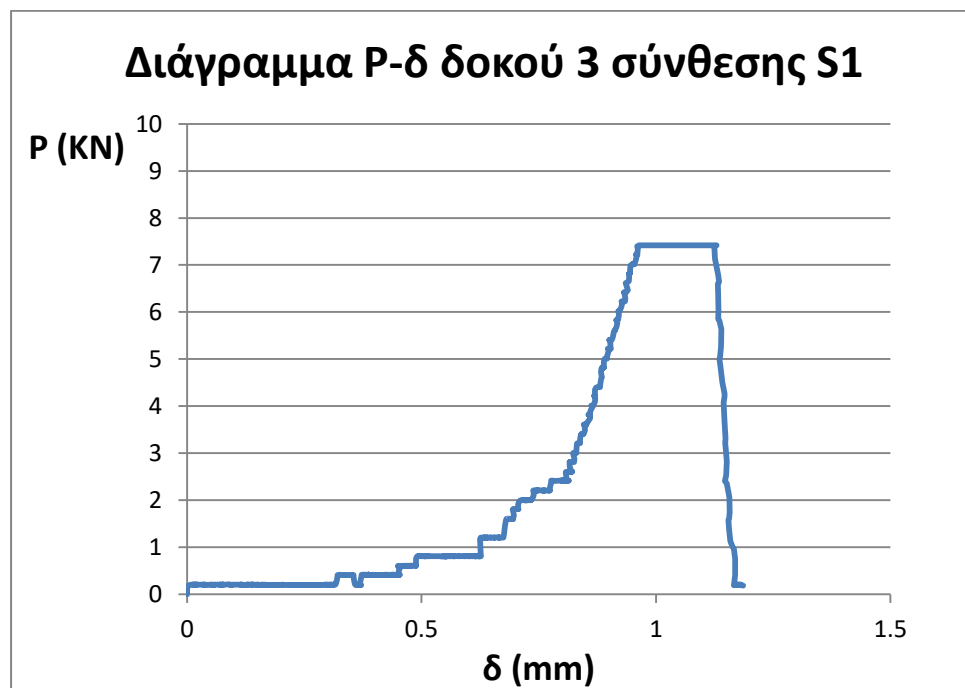


Εικόνα 3.29 Δοκιμή κάμψης 3 σημείων με τη χρήση loadcell σε πρίσμα διαστάσεων 10*10*50 της σύνθεσης S2

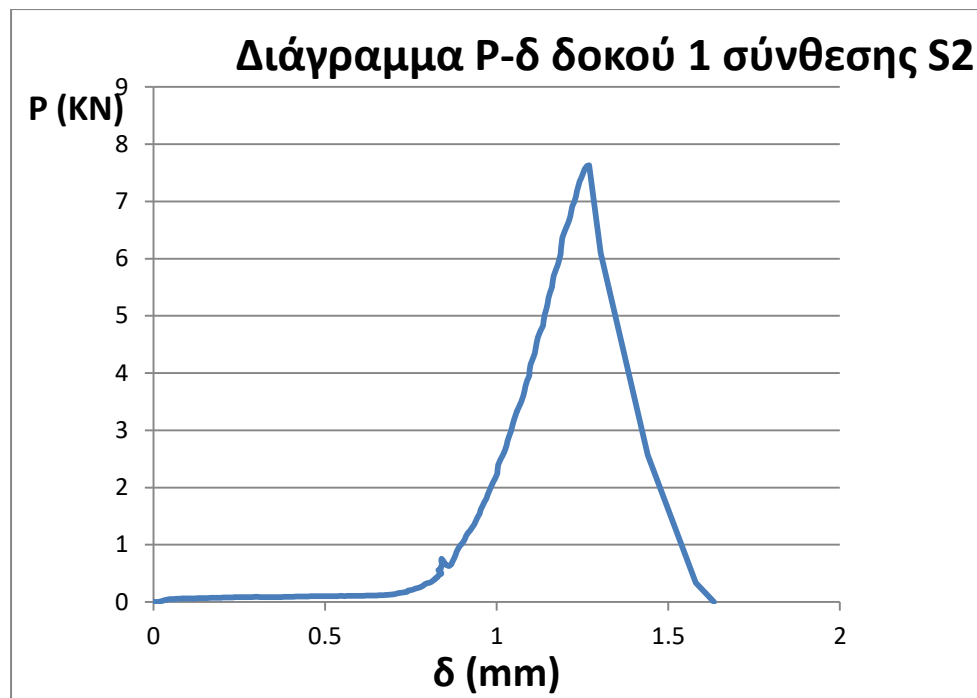
Για κάθε μία σκυροδέτηση από τις ΣΚ1 και ΣΚ2 δοκιμάστηκαν 3 πρίσματα διαστάσεων 100x100x500 mm. Παρακάτω δίνονται τα διαγράμματα φορτίου – βύθισης (P-δ) για τα πρισματικά δοκίμια, τα οποία λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς.



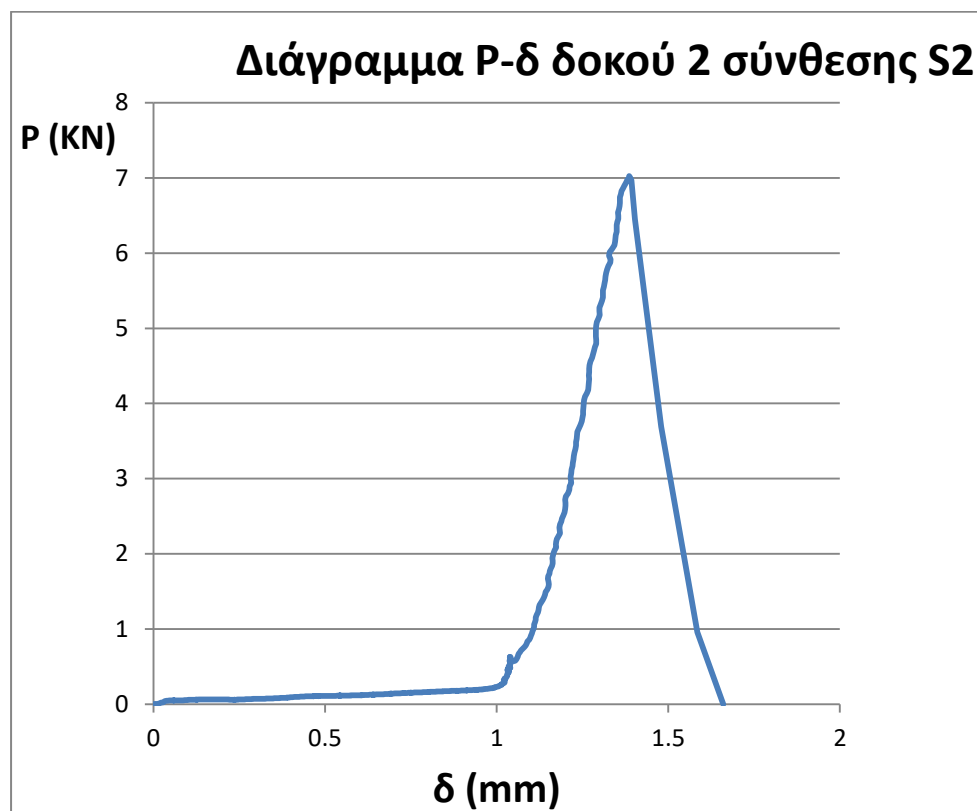
Εικόνα 3.30 Διάγραμμα σχέσης επιβαλλόμενου φορτίου «P» με τη βύθιση στο μέσο του πρίσματος «δ» δοκού 2 σύνθεσης S1



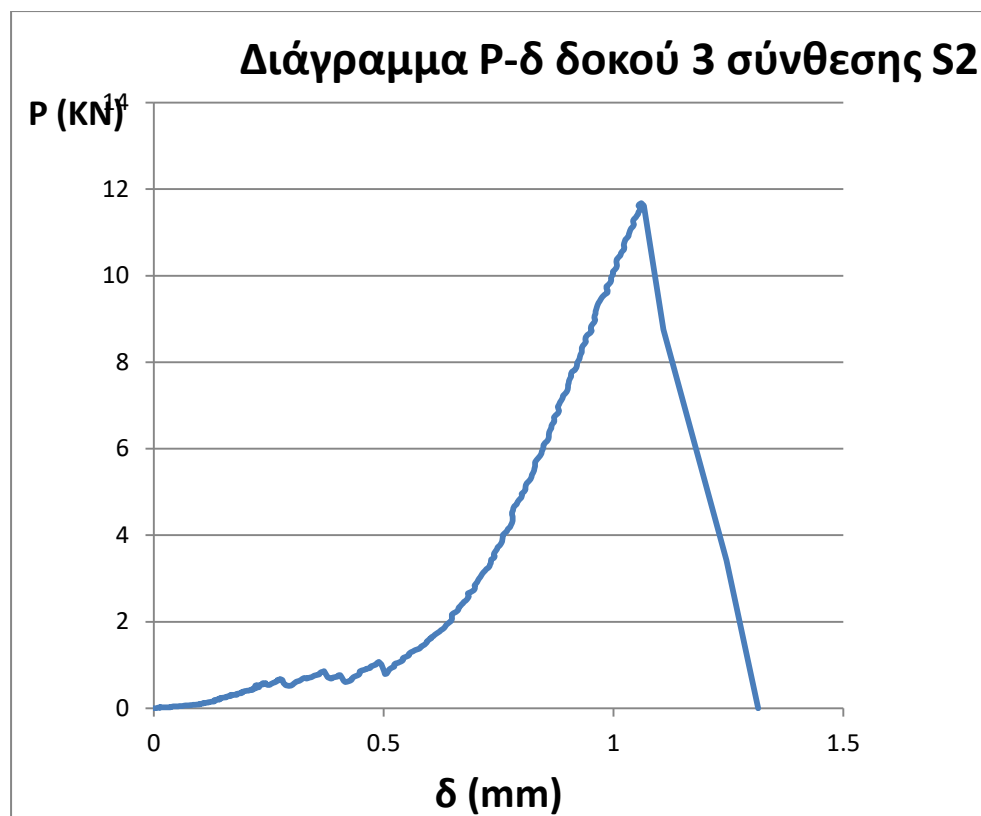
Εικόνα 3.31 Διάγραμμα σχέσης επιβαλλόμενου φορτίου «P» με τη βύθιση στο μέσο του πρίσματος «δ» δοκού 3 σύνθεσης S1



Εικόνα 3.32 Διάγραμμα σχέσης επιβαλλόμενου φορτίου «P» με τη βύθιση στο μέσο του πρίσματος «δ» δοκού 1 σύνθεσης S2



Εικόνα 3.33 Διάγραμμα σχέσης επιβαλλόμενου φορτίου «P» με τη βύθιση στο μέσο του πρίσματος «δ» δοκού 2 σύνθεσης S2



Εικόνα 3.34 Διάγραμμα σχέσης επιβαλλόμενου φορτίου «P» με τη βύθιση στο μέσο του πρίσματος «δ» δοκού 3 σύνθεσης S2

Τα «σκαλάκια» που παρουσιάζονται στις δοκιμές της σύνθεσης S1, οφείλονται στο γεγονός, πως η θλιπτική μηχανή στην οποία πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα δίνει δεδομένα ανά 0,1 kN, ενώ το χρησιμοποιούμενο μηκνσιόμετρο δίνει ενδείξεις ανά 0,2 sec (συχνότητα $f=5$ Hz). Έτσι, όταν η πλάκα της μηχανής πλησιάζει το δοκίμιο αυξάνοντας τη μετατόπιση του μηκνσιόμετρο, η δύναμη ουσιαστικά παραμένει σταθερή και δεν δίνεται νέα ένδειξη, παρά μόνο όταν έχουμε μεταβολή φορτίου άνω του 0,1 kN. Για τα δοκίμια της σύνθεσης S2 χρησιμοποιήθηκε δυναμοκυψέλη (loadcell), προκειμένου να εξαλειφθούν τα «σκαλάκια» των διαγραμμάτων.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών αποτίμησης της καμπτικής εφελκυστικής συμπεριφοράς τριών σημείων, καθώς και οι ημερομηνίες σκυροδέτησης και δοκιμής συνοψίζονται στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα.

ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ	ΑΡΙΘΜΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (cm)	ΗΜΕΡ/ΝΙΑ ΣΚΥΡ/ΣΗΣ	ΗΜΕΡ/ΝΙΑ ΘΡΑΥΣΗΣ	ΗΛΙΚΙΑ (ΗΜΕΡΕΣ)	P_{max} (kN)	Καθαρό μήκος L (cm)	M_{max} (kNm)	$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{ctm,fl}$ (MPa)	CV (%)
S1	1) 10*10*50	01/02/2017	01/03/2017	28	(1.43)	39	(0.139)	(0.834)	4.398	4.0
	2) 10*10*50	01/02/2017	01/03/2017	28	7.82	39	0.762	4.572		
	3) 10*10*50	01/02/2017	01/03/2017	28	7.22	39	0.704	4.224		
S2	1) 10*10*50	02/02/2017	03/03/2017	29	7.63	40	0.763	4.578	4.265	6.8
	2) 10*10*50	02/02/2017	03/03/2017	29	7.01	40	0.701	4.206		
	3) 10*10*50	02/02/2017	03/03/2017	29	11.62	23	0.668	4.010		

Πίνακας 3.7 Πειραματική εκτίμηση της εφελκυστικής αντοχής σε κάμψη πρισμάτων διαστάσεων 10*10*50 cm.

Το δοκίμιο 1 της σύνθεσης S1 δεν αστόχησε σωστά, δηλαδή στο κέντρο του πρίσματος και κάθετα στο επίπεδο φόρτισης. Επομένως, το αποτέλεσμα αυτής της δοκιμής δεν λαμβάνεται υπόψη στις εκτιμήσεις της μέσης εφελκυστικής αντοχής σε κάμψη και στη διασπορά των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε και πριν, κατά τις δοκιμές της σύνθεσης S1 οι ενδείξεις του μηκυνσιόμετρου για τη βύθιση δεν είναι ακριβείς, επομένως το μέτρο ελαστικότητας που υπολογίστηκε δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.



Εικόνα 3.35 Πρισματικό δοκίμιο 1 μετά τη δοκιμή διάρρηξης, όπου φαίνεται το σφάλμα κατά τη θραύση.

3.3 Δοκιμές Μέτρου Ελαστικότητας

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εκτίμηση του Μέτρου Ελαστικότητας του ΚΔ περιγράφεται στο πρότυπο C 469-02 του ASTM.(73) Αυτή η μέθοδος προσφέρει ένα διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης για το σκληρυμένο σκυρόδεμα. Η μέτρηση γίνεται μέσω μιας συσκευής, η οποία αποτελείται από δυο δακτυλίους, από τους οποίους ο ένας είναι στερεωμένος στο δοκίμιο χωρίς τη δυνατότητα μετακίνησης, ενώ ο άλλος στερεώνεται σε δυο αντιδιαμετρικά σημεία στο δοκίμιο, έτσι ώστε να μπορεί να περιστρέφεται. Σε ένα σημείο της περιφέρειας του περιστρεφόμενου δακτυλίου, ανάμεσα στις δύο στηρίξεις του, χρησιμοποιούμε μια ράβδο περιστροφής για να διατηρήσουμε μια σταθερή απόσταση ανάμεσα στους δύο δακτυλίους. Στο αντιδιαμετρικό σημείο της περιφέρειας του περιστρεφόμενου δακτυλίου, η διαφορά των αποστάσεων ανάμεσα στους δύο δακτυλίους (αυτή τη διαφορά μας δίνει το μηκυνσιόμετρο που τοποθετείται εκεί) είναι ίση με το άθροισμα της μετατόπισης εξαιτίας της παραμόρφωσης του δοκιμίου και της μετατόπισης εξαιτίας της περιστροφής του δακτυλίου περί της ράβδου περιστροφής (βλ. εικόνα). Εάν οι αποστάσεις μεταξύ της ακλόνητης ράβδου και του μηκυνσιόμετρου από το κάθετο επίπεδο που διέρχεται από τα σημεία στήριξης των δακτυλίων είναι ίσες, τότε η παραμόρφωση του δοκιμίου είναι ίση με τη μισή μέτρηση του μηκυνσιόμετρου. Σε διαφορετική περίπτωση, η παραμόρφωση του δοκιμίου υπολογίζεται ως εξής:

$$d = ge_r / (e_r + e_g)$$

Όπου:

d = συνολική παραμόρφωση του δοκιμίου σε όλο το ενεργό μήκος

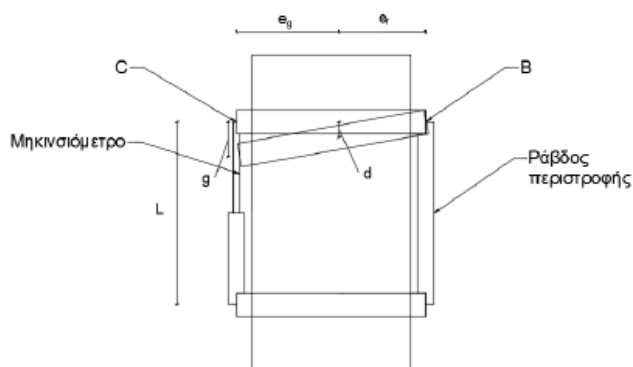
g = μέτρηση μηκυνσιόμετρου

e_r = οριζόντια απόσταση, μετρούμενη από την ακλόνητη ράβδο προς το κατακόρυφο επίπεδο που διέρχεται νοητά από τα δύο σημεία στήριξης του δάκτυλου περιστροφής (με ακρίβεια μετρήσεως 0,2 mm)

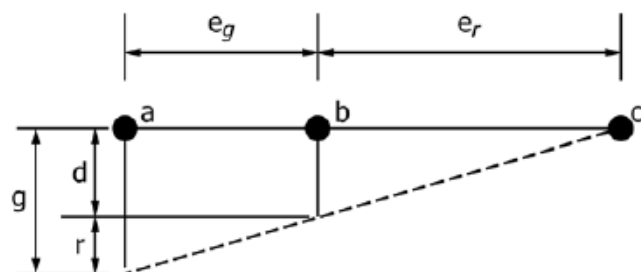
e_g = οριζόντια απόσταση, μετρούμενη από το μηκυνσιόμετρο προς το κατακόρυφο επίπεδο που διέρχεται νοητά από τα δύο σημεία στήριξης του δάκτυλου περιστροφής (με ακρίβεια μετρήσεως 0,2 mm)

Κατά το πρότυπο πρέπει να γίνει φόρτιση του δοκιμίου τουλάχιστον 3 φορές, ενώ τα στοιχεία της 1^{ης} φόρτισης δεν θα ληφθούν υπόψη στους υπολογισμούς. Ο υπολογισμός του Μέτρου Ελαστικότητας θα γίνει με βάση τις μέσες τιμές των αποτελεσμάτων των φορτίσεων. Οι κύκλοι φόρτισης θα φτάνουν μέχρι το 40% της αντοχής των δοκιμίων, όπως αυτό θα έχει εκτιμηθεί από προγενέστερες δοκιμές θλίψης.

Το Μέτρο Ελαστικότητας που εκτιμάται με τη διαδικασία του προτύπου (ASTM C469-02) αναμένεται να είναι μικρότερο από το μέτρο υπό συνθήκες ταχείας φορτίσεως (πχ σεισμός ή δυναμικές φορτίσεις), καθώς και μεγαλύτερο από το μέτρο όταν η ταχύτητα εφαρμογής του φορτίου είναι μικρή ή η διάρκεια της φόρτισης είναι εκτεταμένη.



Εικόνα 3.36 Σκαρίφημα πειραματικής διάταξης μέτρησης του Μέτρου Ελαστικότητας για κυλίνδρους με διάμετρο 100 mm και μήκος 200 mm και διάμετρο 150 mm και μήκος 300 mm.



Εικόνα 3.37 Σχηματική απεικόνιση μετατοπίσεων, όπου d = μετατόπιση λόγω παραμόρφωσης του δοκιμίου r =πρόσθετη μετατόπιση λόγω της περιστροφής του δακτυλίου περί της ακλόνητης ράβδου περιστροφής a = αρχική θέση του μετρητή b = θέση στήριξης του περιστρεφόμενου δακτυλίου g = μέτρηση του μηκυνσιόμετρου

Για τις δοκιμές του Μέτρου Ελαστικότητας χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 10 cm και μήκους 20 cm. Η ενεργός απόσταση μέτρησης L είναι 11.5 cm και οι αποστάσεις e_g και e_r είναι 9.5 και 8 cm αντίστοιχα. Ο ρυθμός μεταβολής του φορτίου, όπως αυτός ορίστηκε στη μηχανή θλίψης είναι 1.5 kN/s, το οποίο αντιστοιχεί σε 191 kPa/s για τους κυλίνδρους με $\Phi 10$ cm. Το σημείο B είναι το σημείο περιστροφής του άνω δακτυλιού και το σημείο C βρίσκεται αντιδιαμετρικά του B, επομένως η μεταβολή της θέσης του σημείου B αναγόμενη στο μέσο του δοκιμίου, είναι η παραμόρφωση του δοκιμίου.

Σύμφωνα με τη διαδικασία, πραγματοποιούνται 4 κύκλοι φόρτισης, με το μέγιστο φορτίο σε κάθε κύκλο να αντιστοιχεί στο 40% της θλιπτικής αντοχής του δοκιμίου. Για την καταγραφή των παραμορφώσεων χρησιμοποιήθηκαν μηκυνσιόμετρα (LVDT – linear variable differential transformer) με ονομαστική ακρίβεια 2 μ m και καταγραφικό τύπου HBM QuantumX MX/840 8 καναλιών. Η επιφάνεια των δοκιμών, που ήταν εκτεθειμένη κατά τη σκυροδέτηση, «καπελώθηκε» με ειδικό υλικό από τσιμεντοκονίαμα στο εργαστήριο της LaFarge Beton, για να εξομαλυνθούν τυχόν ανωμαλίες τις επιφάνειας και να αποφευχθούν εκκεντρότητες φόρτισης. Για τη θραύση των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε η μηχανή θραύσης Tonipact Toni-Technik μέγιστου φορτίου 600 kN του ΕΟΣ ΕΜΠ.



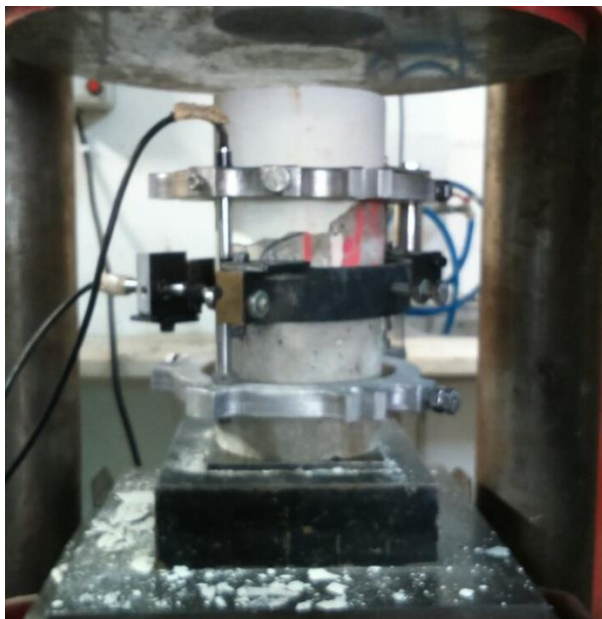
Εικόνα 3.38 «Καπέλωμα» δοκιμών στην επιφάνεια σκυροδέτησης



Εικόνα 3.39 Πειραματική διάταξη της δοκιμής εκτίμησης του Μέτρου Ελαστικότητας (πλάγια όψη)



Εικόνα 3.40 Πειραματική διάταξη της δοκιμής εκτίμησης του Μέτρου Ελαστικότητας (πίσω όψη)



Εικόνα 3.41 Πειραματική διάταξη της δοκιμής εκτίμησης του Μέτρου Ελαστικότητας (μπροστά όψη)



Εικόνα 3.42 Κυλινδρικά δοκίμια $\Phi 10 \times 20$ μετά τη δοκιμή για την εκτίμηση του Μέτρου Ελαστικότητας



Εικόνα 3.43 Σύγκριση δοκιμών των συνθέσεων S1 και SF1 μετά τη δοκιμή εκτίμησης του μέτρου ελαστικότητας



Εικόνα 3.44 Σύγκριση δοκιμών των συνθέσεων S2 και SF2 μετά τη δοκιμή εκτίμησης του μέτρου ελαστικότητας

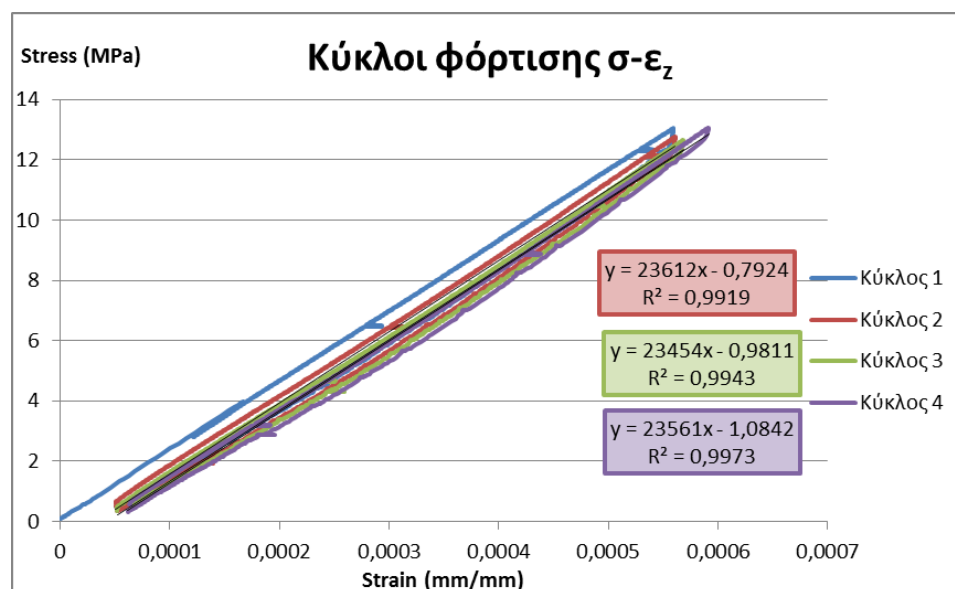
Για τον υπολογισμό του Μέτρου Ελαστικότητας που αντιστοιχεί σε κάθε κύκλο, χρησιμοποιείται η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων για μεγαλύτερη ακρίβεια. Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με επιβαλλόμενο φορτίο, συνεπώς δεν λαμβάνεται πειραματικά ο φθίνων κλάδος του διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων. Επισημαίνεται ότι σύμφωνα με τον EC2 (2004), για μη γραμμικές αναλύσεις κατά το σχεδιασμό δεν χρησιμοποιείται φθιτός κλάδος στο ΕΣ. Για κάθε δοκίμιο παρουσιάζονται γραφικά τα εξής:

- Το διάγραμμα των κύκλων φόρτισης από 0 ως περίπου $0.4f_c$ με την αντίστοιχη για κάθε κύκλο φόρτισης γραμμική προσαρμογή (γραμμική γραμμή τάσης), η κλίση της οποίας ταυτίζεται με το πειραματικό Μέτρο Ελαστικότητας του εν λόγω κύκλου φόρτισης.
- Το πειραματικό διάγραμμα τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης $\sigma-\varepsilon_z$ βάση καταγραφών
- Το θεωρητικό διάγραμμα $\sigma-\varepsilon$ το οποίο προκύπτει από τον EC2 (2004) (βλ. κεφ 1.11.5) με τις πειραματικά εκτιμώμενες τιμές της θλιπτικής αντοχής f_{cm} , της

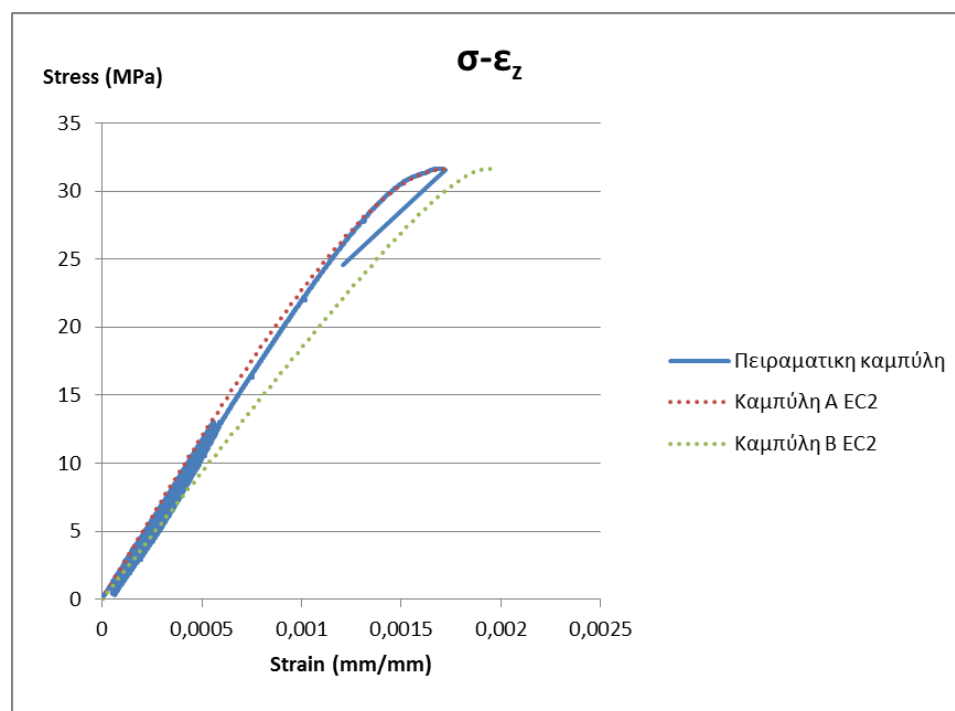
μέγιστης παραμόρφωσης ϵ_{ic1} και του Μέτρου Ελαστικότητας E_{icm} και ονομάζεται για λόγους συντομίας καμπύλη Α

- Το θεωρητικό διάγραμμα σ - ϵ υπολογιζόμενο κατά EC2 (2004) αυτή τη φορά όμως μόνο η f_{icm} λαμβάνεται πειραματικά και οι υπολειπόμενες τιμές (ϵ_{ic1} , E_{icm}) να υπολογίζονται από τις εξισώσεις κατά EC (2004) και ονομάζεται για λόγους συντομίας καμπύλη Β

Δοκίμιο S1A

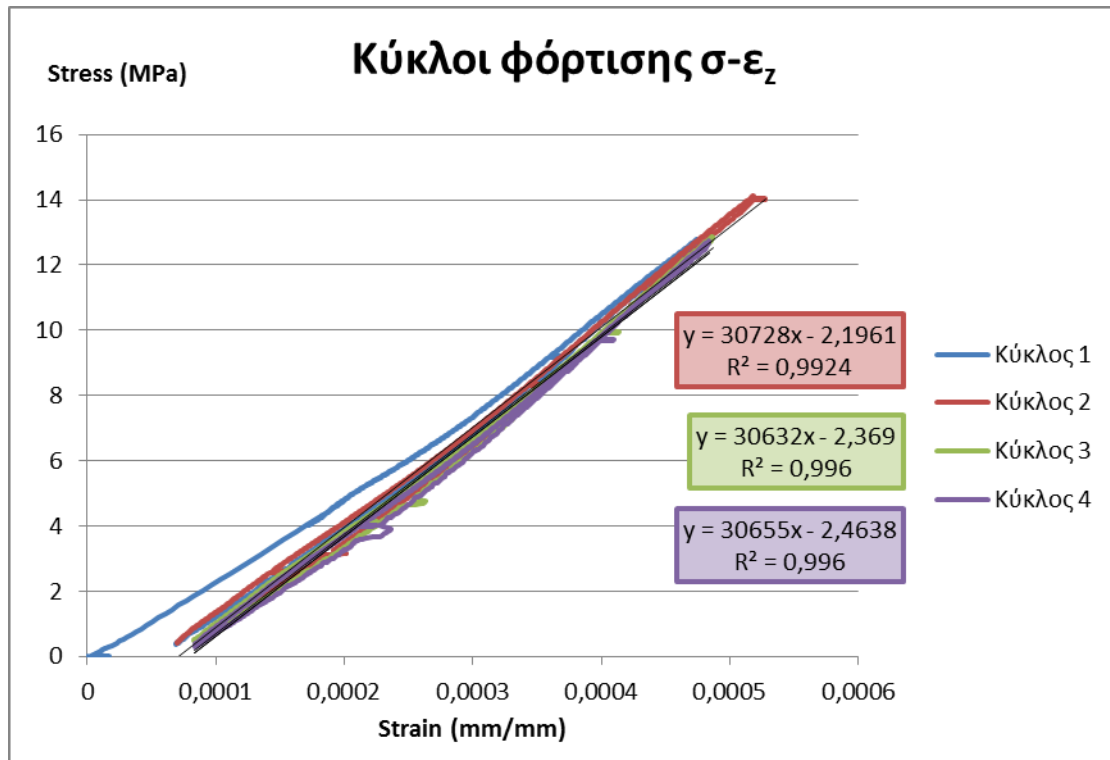


Εικόνα 3.45 Κύκλοι φόρτισης για την εκτίμηση του Μέτρου Ελαστικότητας

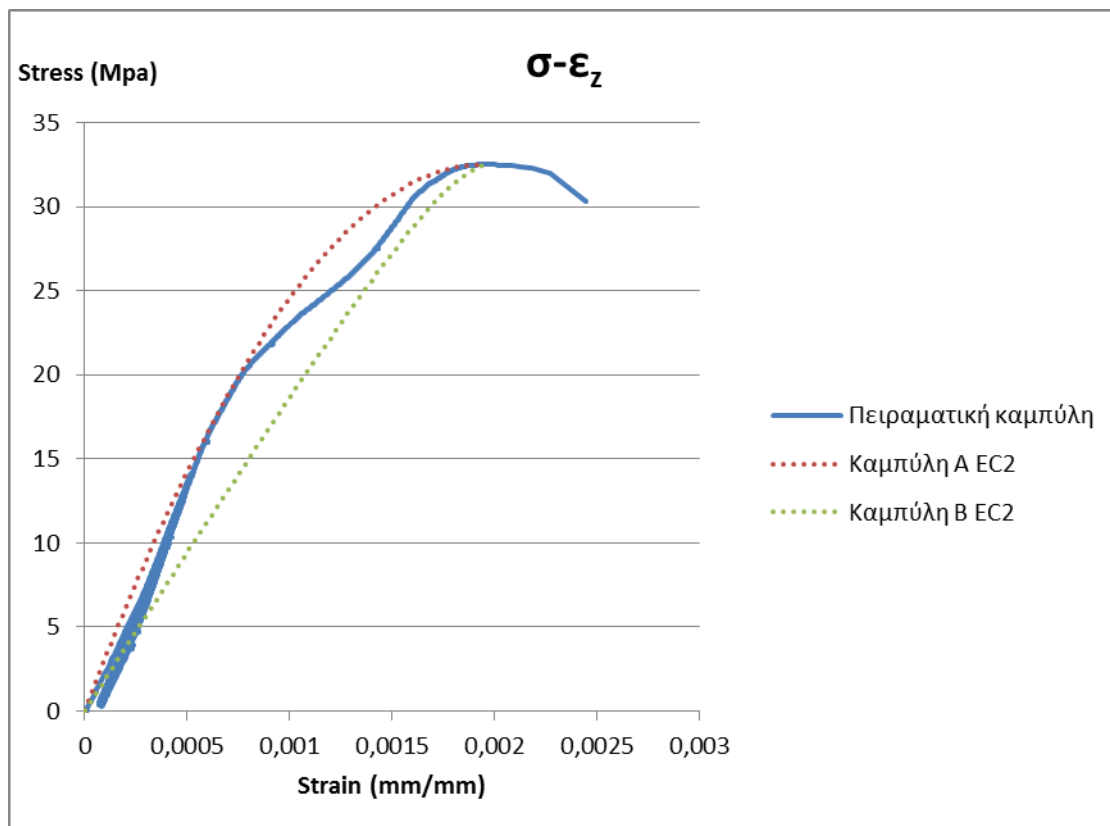


Εικόνα 3.46 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων

Δοκίμιο S1B

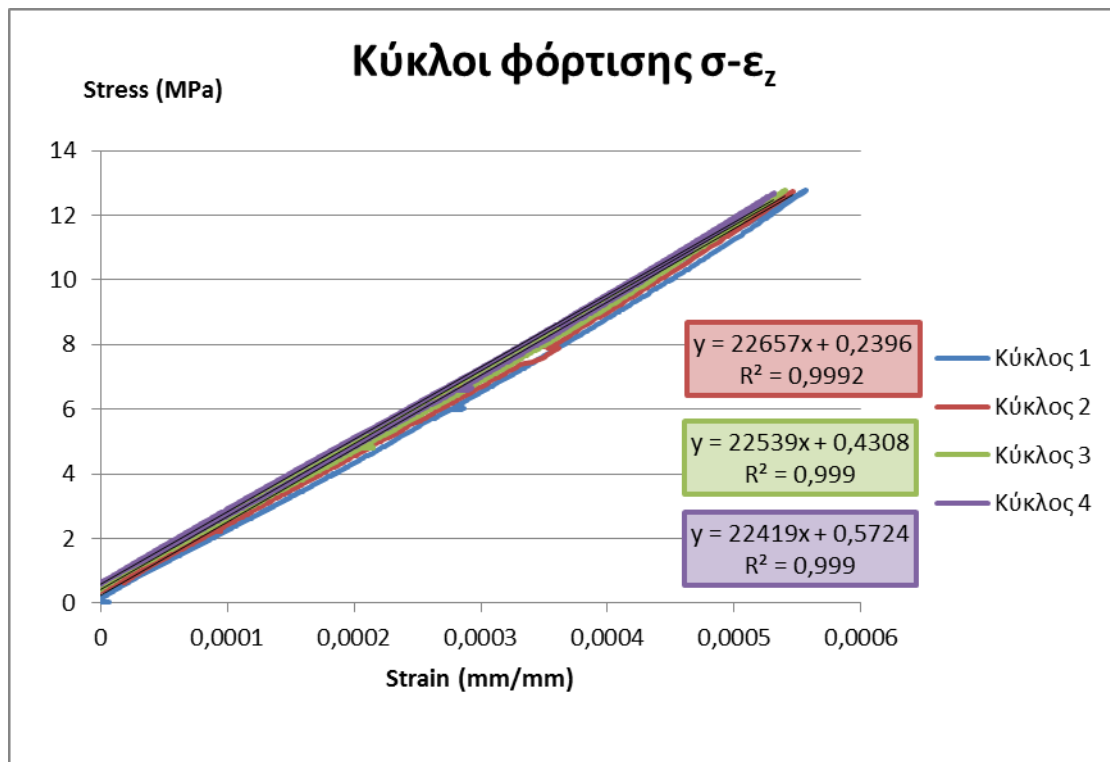


Εικόνα 3.47 Κύκλοι φόρτισης για την εκτίμηση του Μέτρου Ελαστικότητας

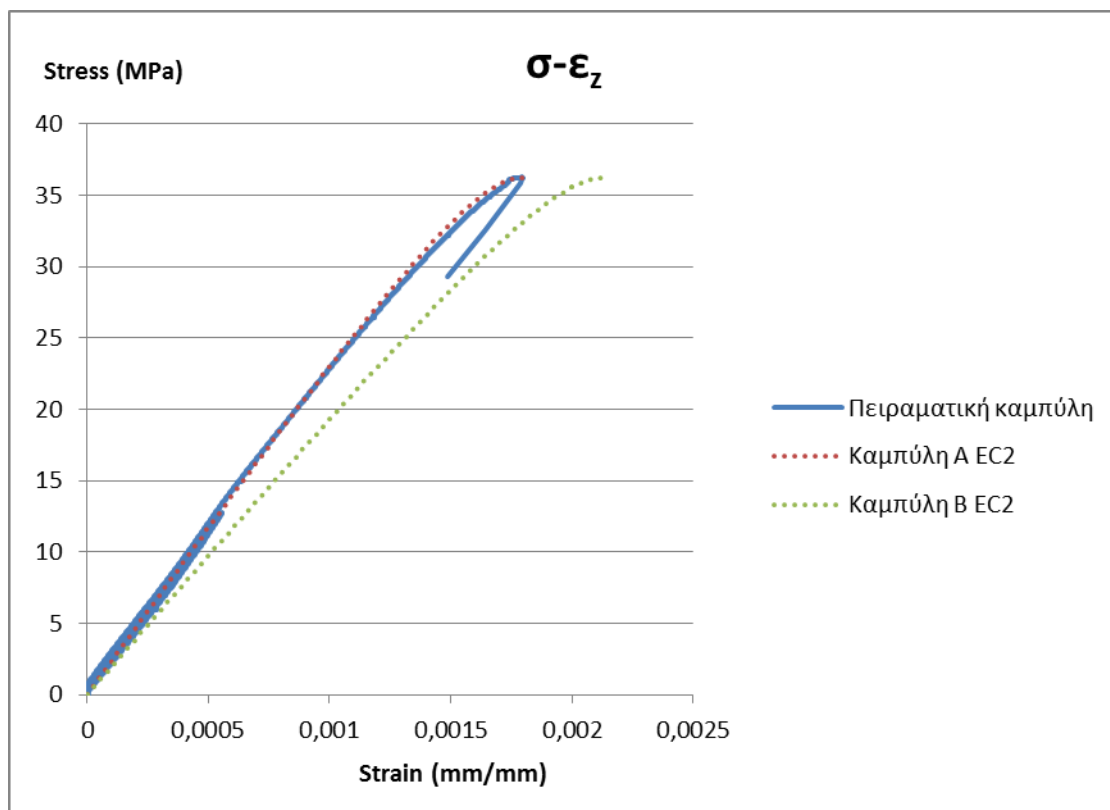


Εικόνα 3.48 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων

Δοκίμιο S1Γ

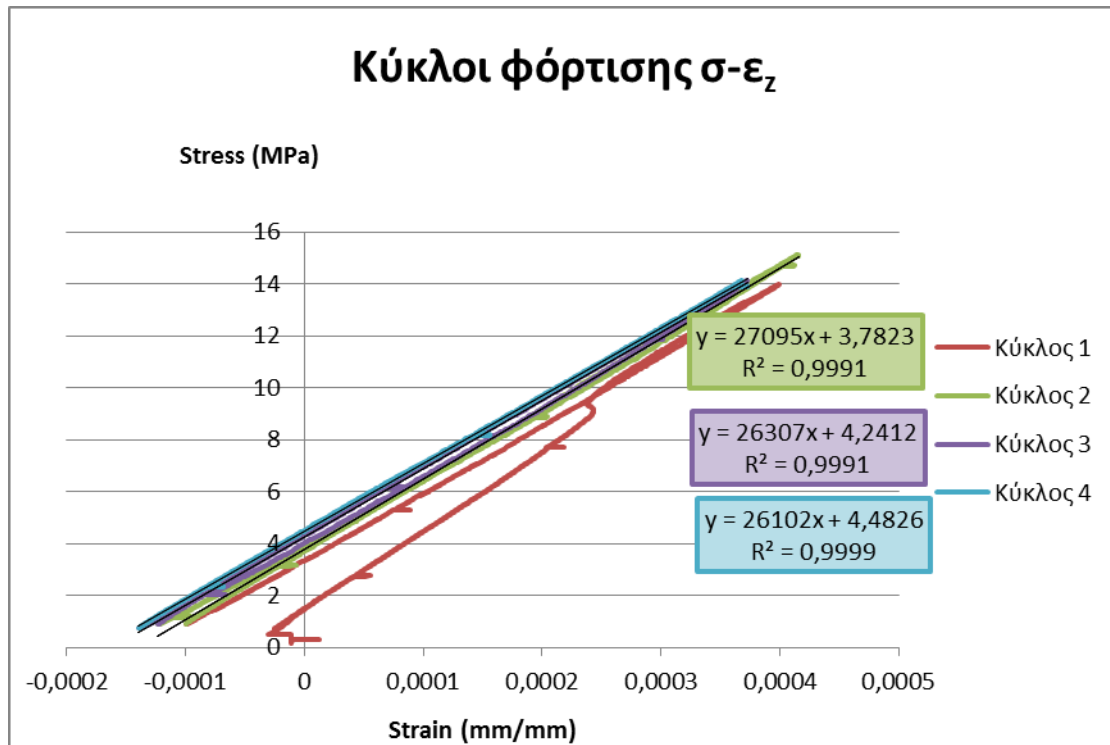


Εικόνα 3.49 Κύκλοι φόρτισης για την εκτίμηση του Μέρους Ελαστικότητας

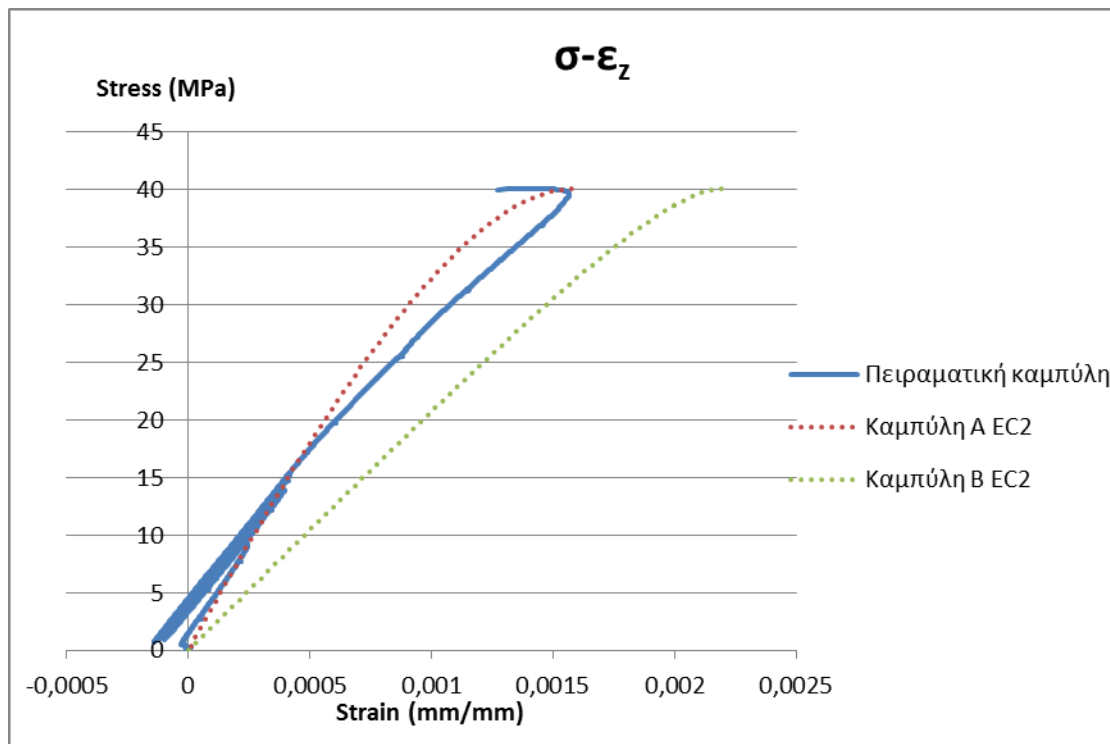


Εικόνα 3.50 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων

Δοκίμιο S2A

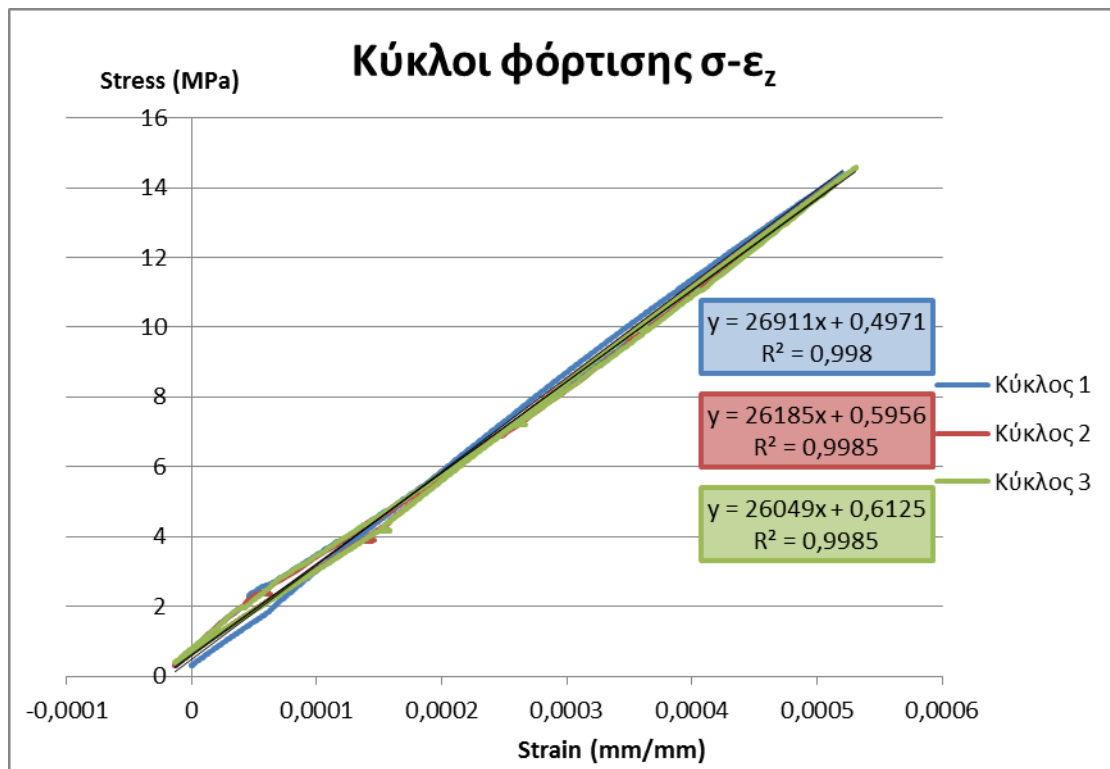


Εικόνα 3.51 Κύκλοι φόρτισης για την εκτίμηση του Μέτρου Ελαστικότητας

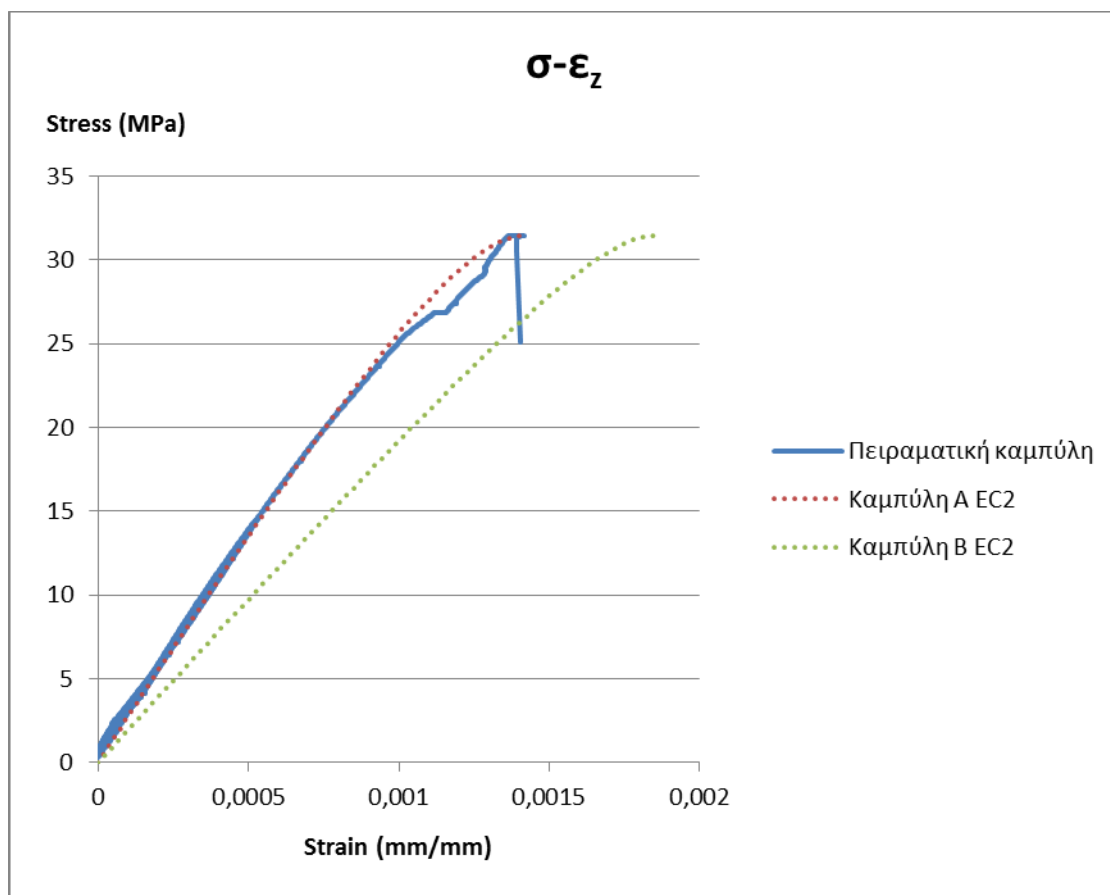


Εικόνα 3.52 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων

Δοκίμιο S2B

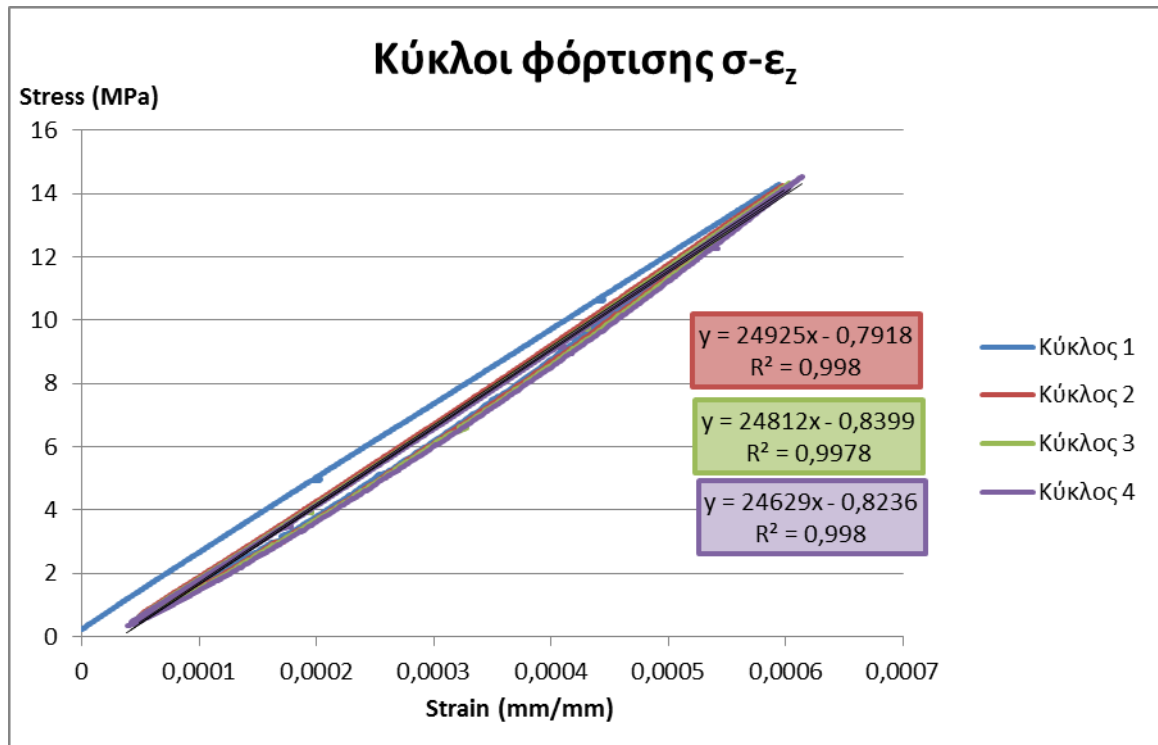


Εικόνα 3.53 Κύκλοι φόρτισης για την εκτίμηση του Μέτρου Ελαστικότητας

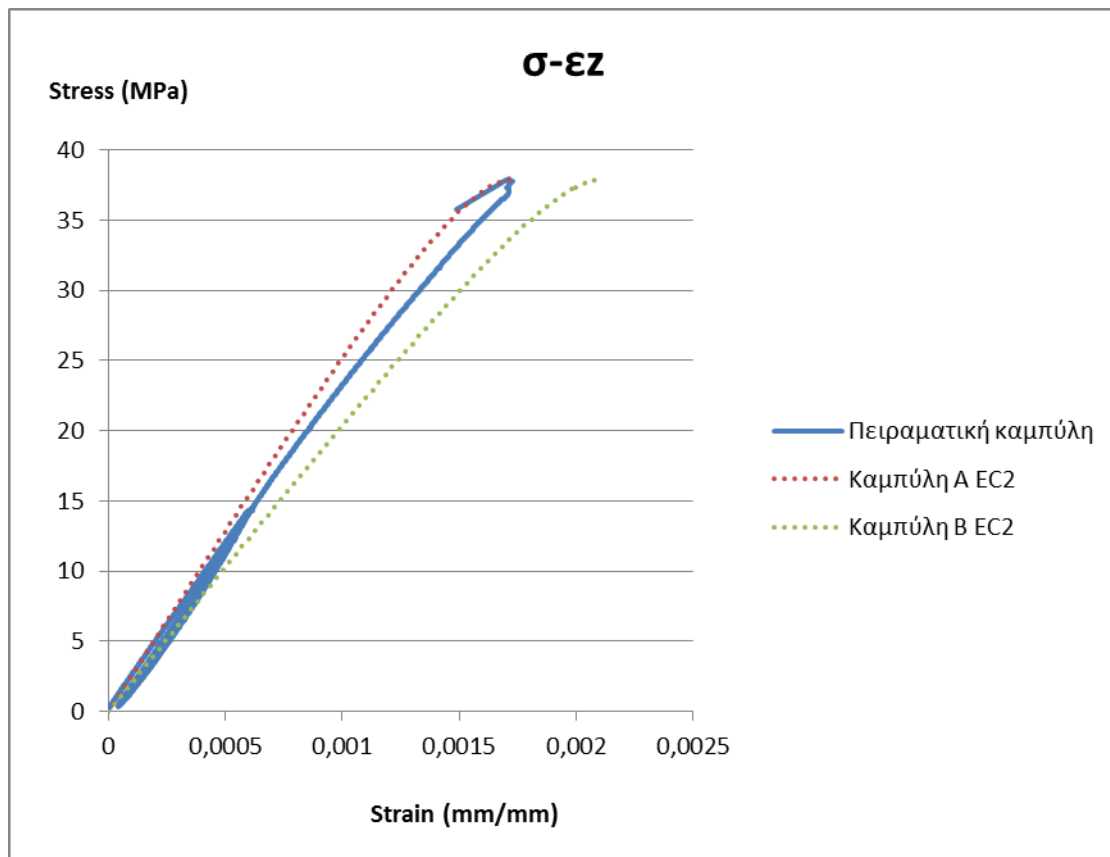


Εικόνα 3.54 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων

Δοκίμιο S2Γ

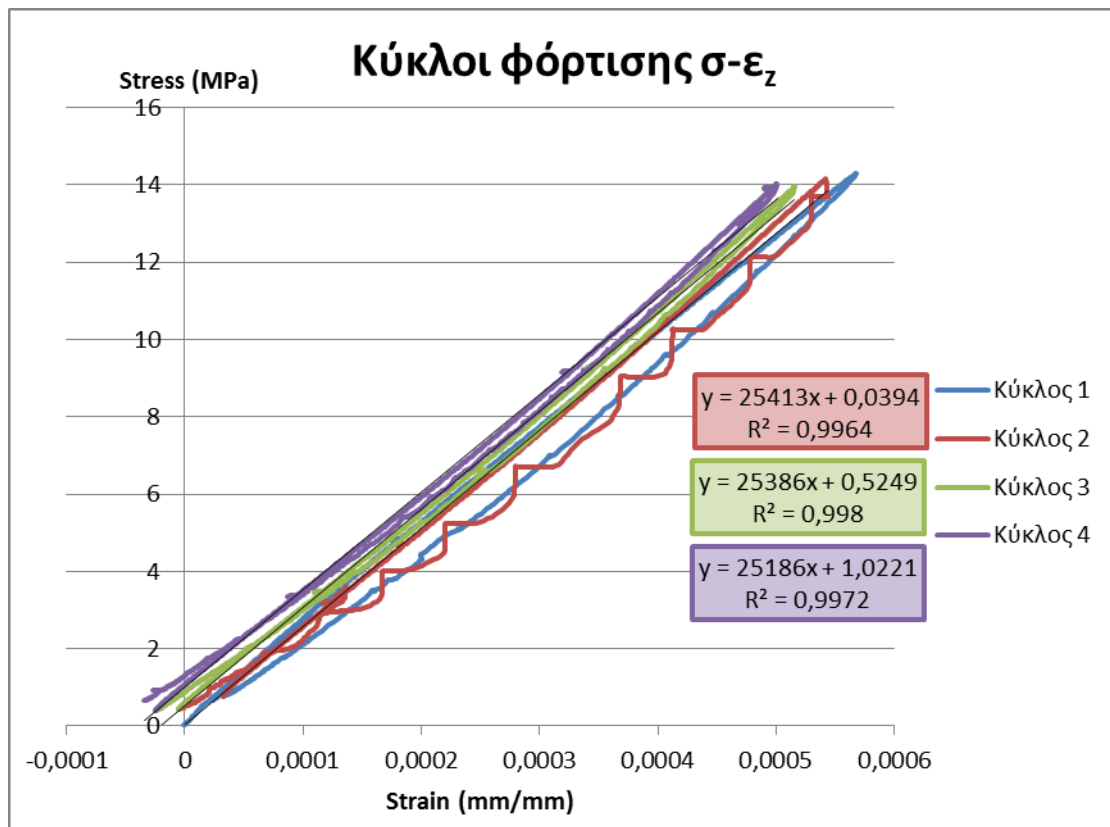


Εικόνα 3.55 Κύκλοι φόρτισης για την εκτίμηση του Μέτρου Ελαστικότητας

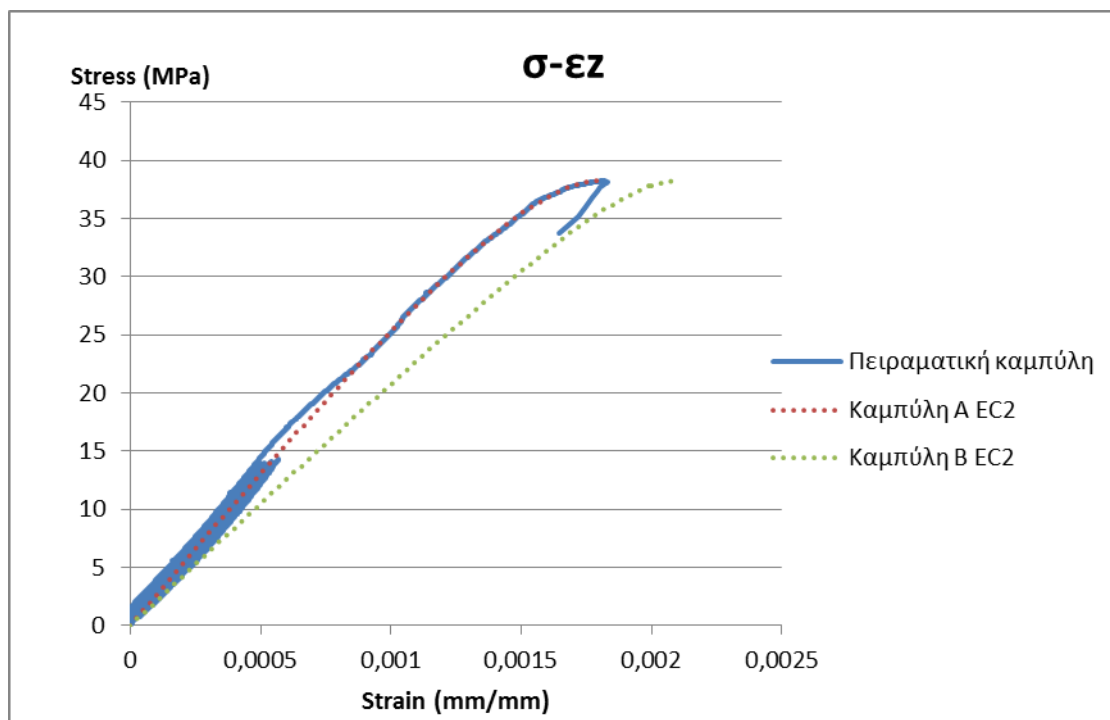


Εικόνα 3.56 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων

Δοκίμιο SF1A

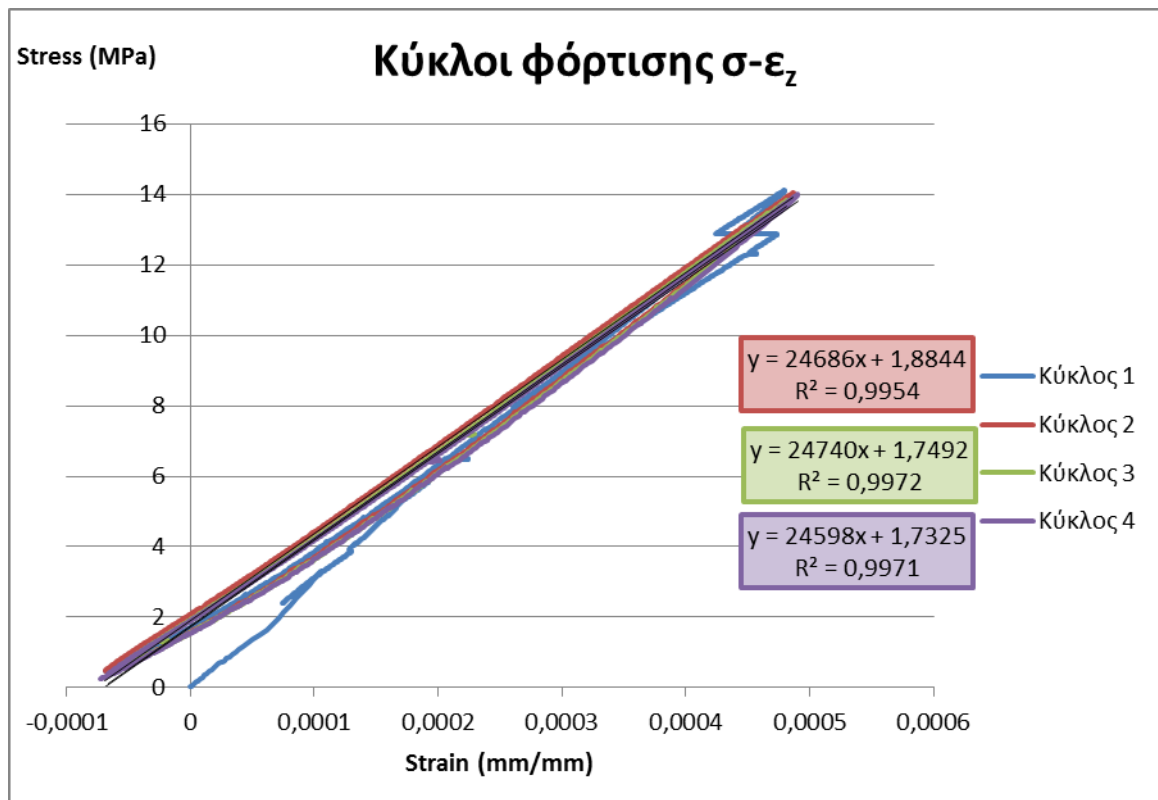


Εικόνα 3.57 Κύκλοι φόρτισης για την εκτίμηση του Μέτρου Ελαστικότητας

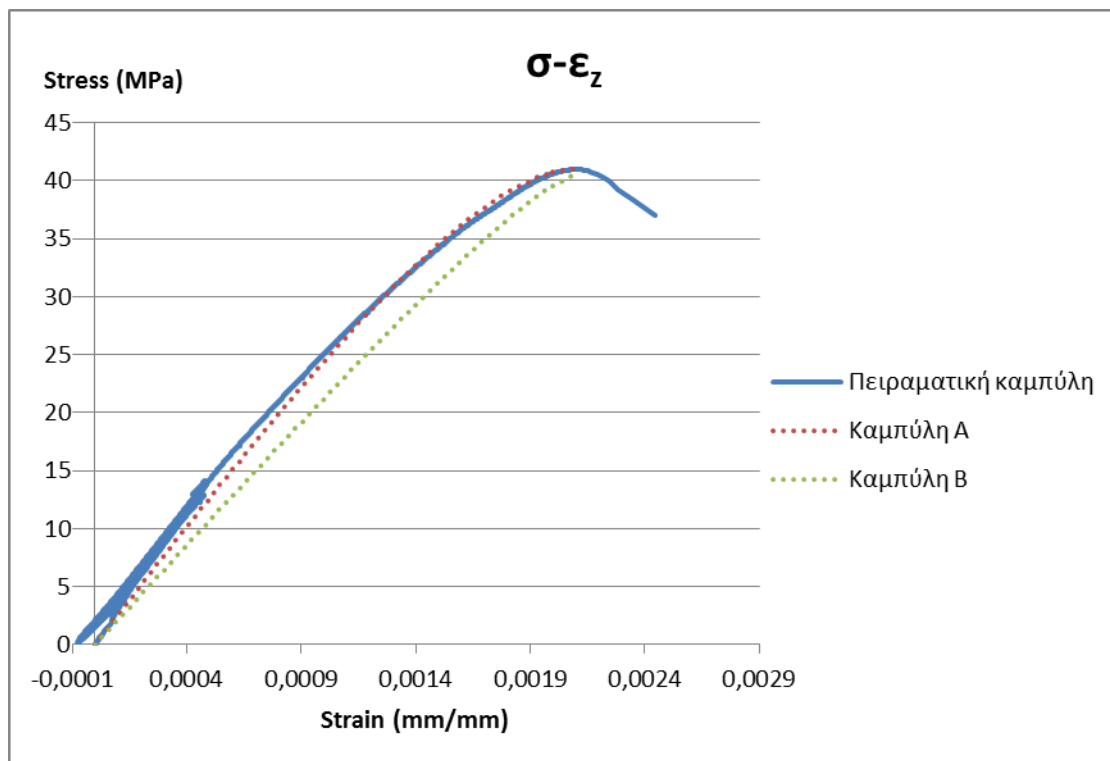


Εικόνα 3.58 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων

Δοκίμιο SF1B

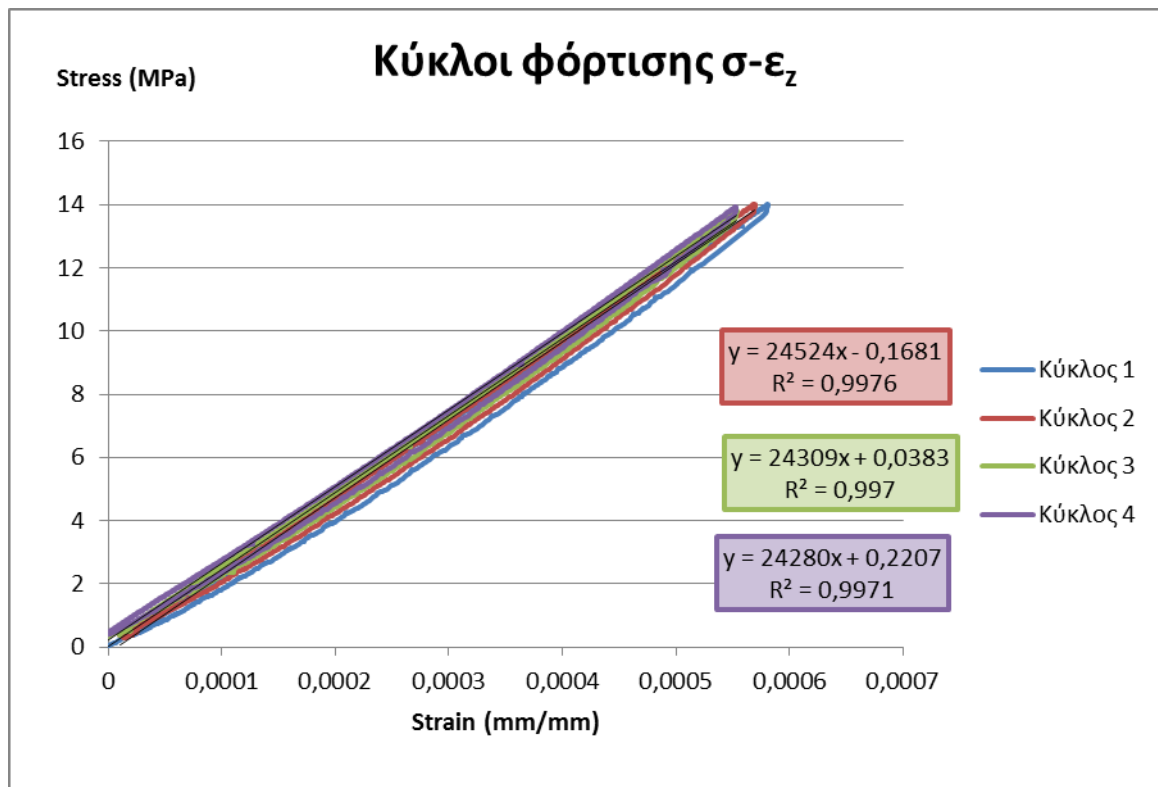


Εικόνα 3.59 Κύκλοι φόρτισης για την εκτίμηση του Μέτρου Ελαστικότητας

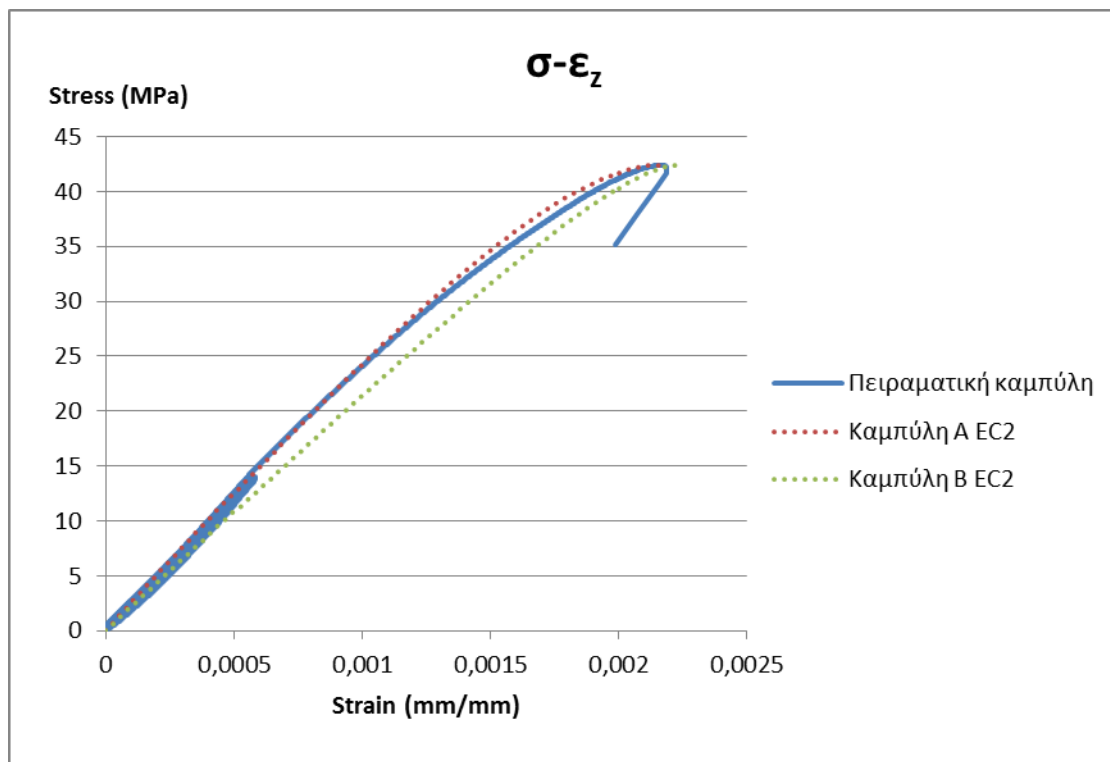


Εικόνα 3.60 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων

Δοκίμιο SF1Γ

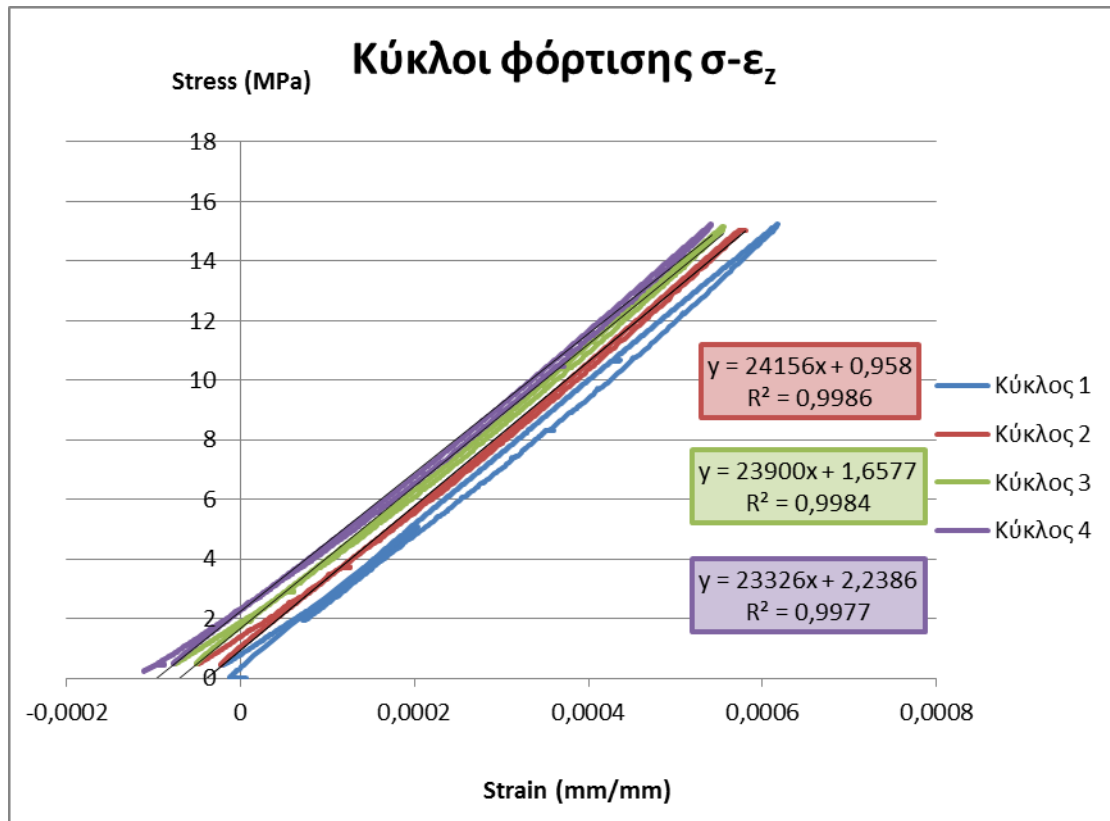


Εικόνα 3.61 Κύκλοι φόρτισης για την εκτίμηση του Μέτρου Ελαστικότητας

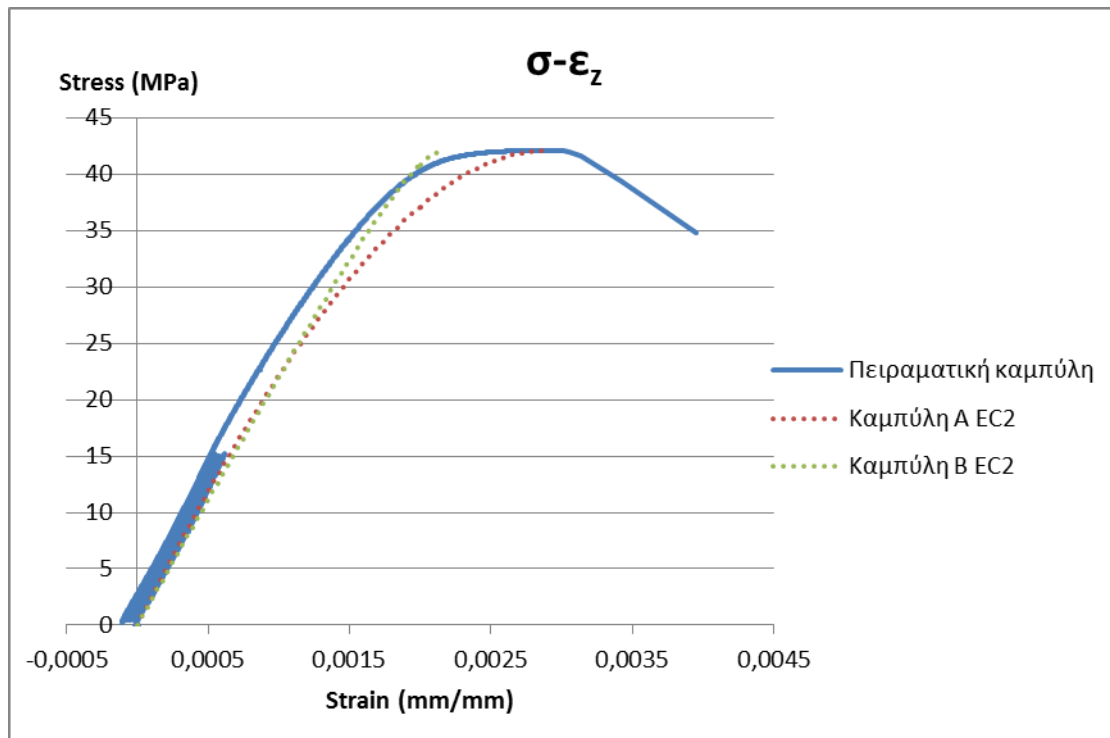


Εικόνα 3.62 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων

Δοκίμιο SF2A

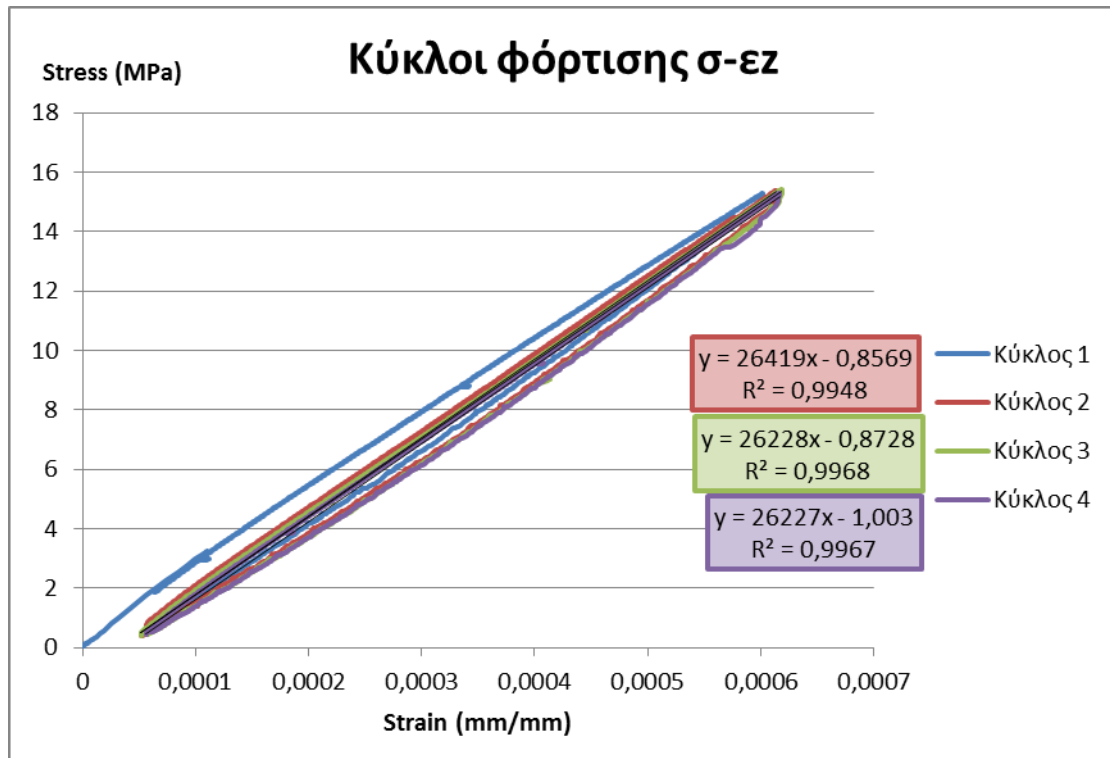


Εικόνα 3.63 Κύκλοι φόρτισης για την εκτίμηση του Μέτρου Ελαστικότητας

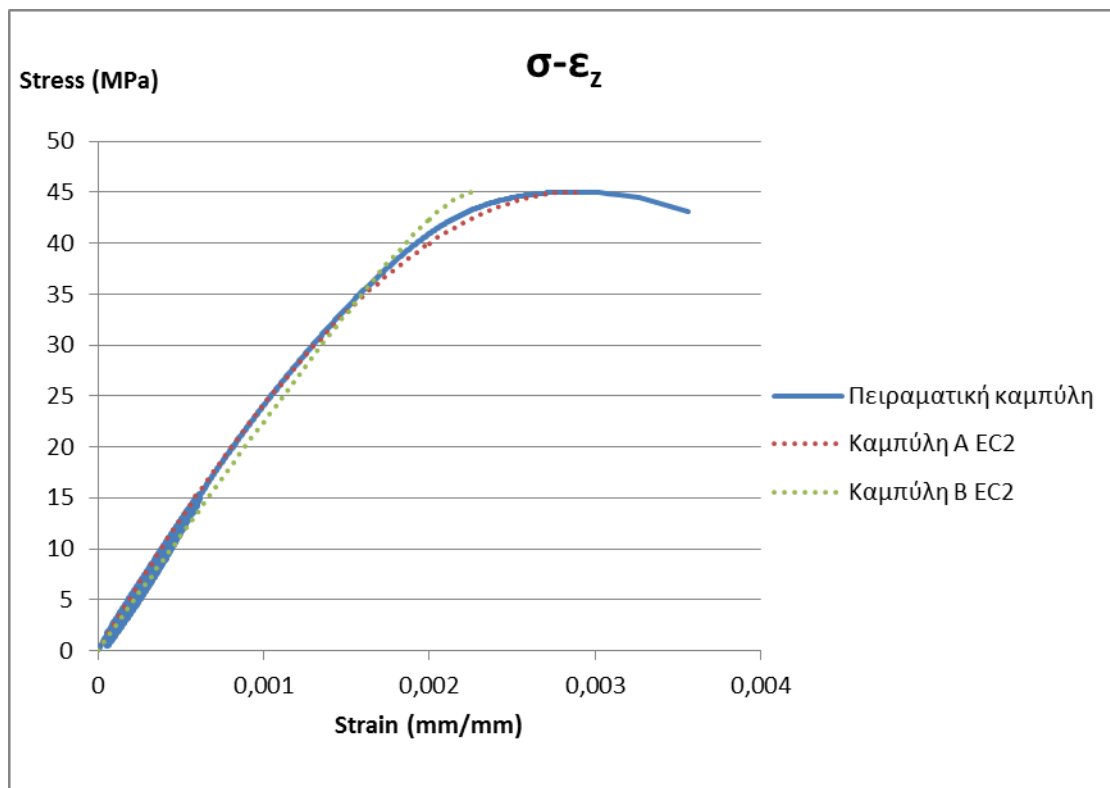


Εικόνα 3.64 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων

Δοκίμιο SF2B

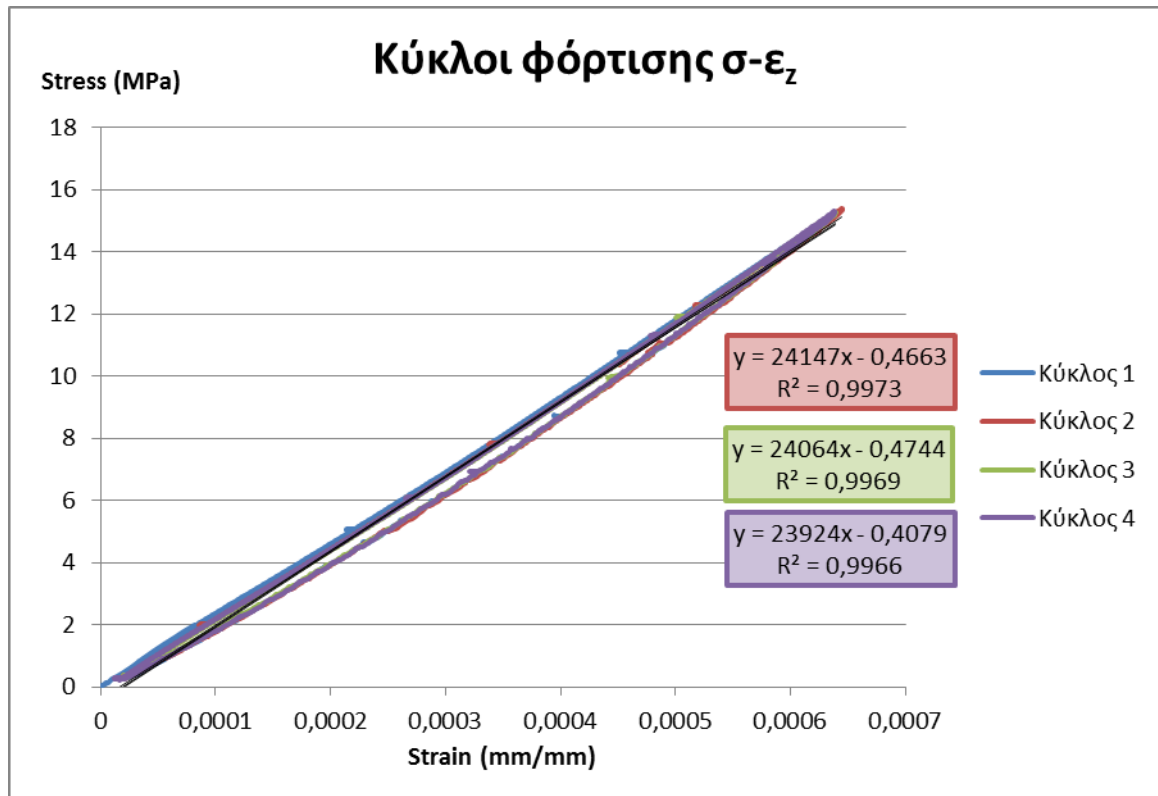


Εικόνα 3.65 Κύκλοι φόρτισης για την εκτίμηση του Μέτρου Ελαστικότητας

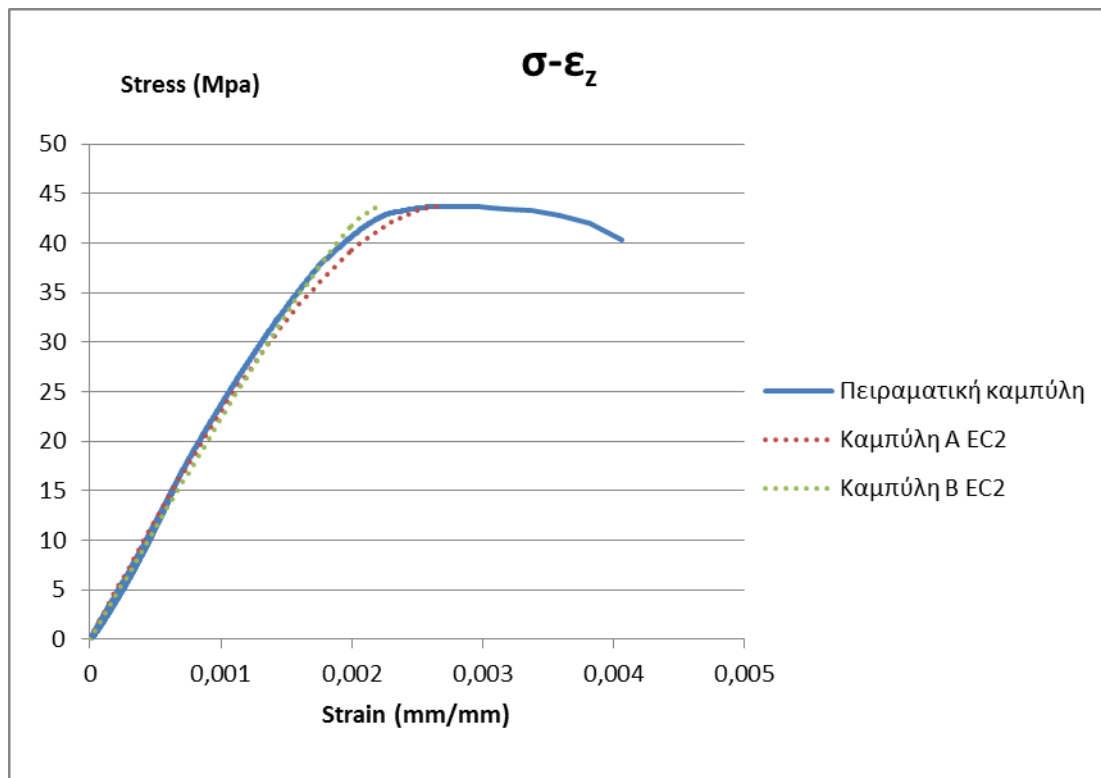


Εικόνα 3.66 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων

Δοκίμιο SF2Γ



Εικόνα 3.67 Κύκλοι φόρτισης για την εκτίμηση του Μέτρου Ελαστικότητας



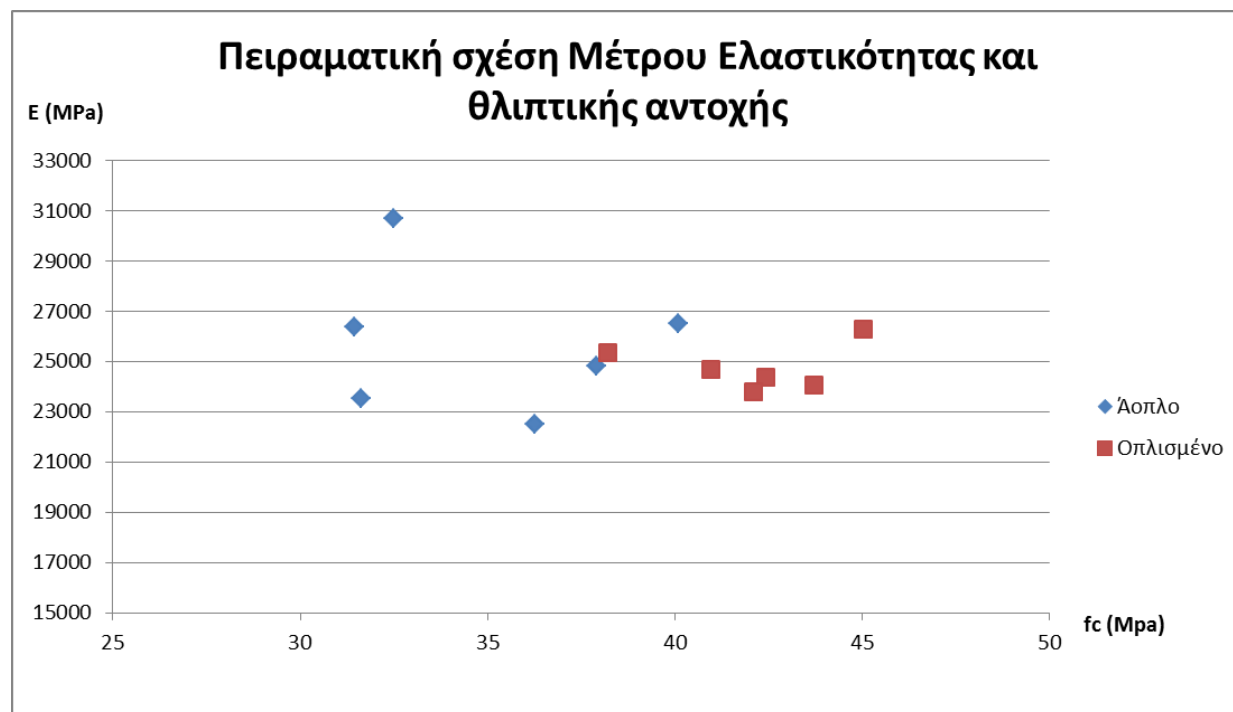
Εικόνα 3.68 Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών εκτίμησης του Μέτρου Ελαστικότητας:

Σύνθεση	Κωδικός δοκιμίου	Ηλικία (Ημέρες)	$\rho_{oven,dry}$ (kg/m ³)	f_{ic} (MPa)	ϵ_{ic1}	E_{ic} (MPa)	E_{icm} (MPa)	CV (%)
S1	A	40	1785	31.64	0.00172	23542	25574	17.4
	B	40	1785	32.5	0.00194	30672		
	Γ	40	1785	36.25	0.0018	22508		
S2	A	36	1826	40.09	0.00158	26501	25891	3.7
	B	39	1826	31.45	0.00142	26382		
	Γ	39	1826	37.91	0.00173	24789		
SF1	A	33	1836	38.2	0.00183	25328	24791	2.0
	B	33	1836	40.97	0.0021	24675		
	Γ	33	1836	42.43	0.00217	24371		
SF2	A	32	1870	42.09	0.00289	23794	24710	5.6
	B	32	1870	45.04	0.00278	26291		
	Γ	32	1870	43.72	0.00272	24045		

Πίνακας 3.7 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμών Μέτρου Ελαστικότητας

Με βάση τις τιμές του παραπάνω πίνακα συντάσσεται το διάγραμμα της πειραματικής σχέσης Μέτρου Ελαστικότητας και θλιπτικής αντοχής:



Εικόνα 3.69 Πειραματική σχέση Μέτρου Ελαστικότητας και θλιπτικής αντοχής

3.4 Δοκιμές λόγου Poisson

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εκτίμηση του λόγου Poisson του ΚΔ περιγράφεται αναλυτικά στο πρότυπο C469-02 του ASTM.(73) Ο λόγος Poisson ορίζεται μέσω της σχέσης $\nu = -\epsilon_y / \epsilon_z$, όπου ϵ_y η εγκάρσια παραμόρφωση (διόγκωση για τη δοκιμή θλίψης) και ϵ_z η κατακόρυφη παραμόρφωση. Για τη μέτρηση της εγκάρσιας παραμόρφωσης του δοκιμίου προστίθεται στη διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας κυλινδρικών δοκιμών Φ10/20 cm (περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.3) στέλεχος, μέσω του οποίου προσαρτήθηκε οριζόντιο μηκυσιόμετρο (η συσκευή τώρα διαθέτει και συμπιεσόμετρο και μηκυσιόμετρο). Το μηκυσιόμετρο μετρά τη μεταβολή της διαμέτρου στο μέσο του κυλινδρικού δοκιμίου. Η συσκευή που χρησιμοποιείται για τη δοκιμή αυτή θα πρέπει να διαθέτει και ένα τρίτο δακτύλιο (αποτελούμενο από δύο ίσα τμήματα), ο οποίος είναι τοποθετημένος στο μέσο της απόστασης των δύο δακτυλίων που χρησιμοποιήθηκαν για το μέτρο ελαστικότητας και στερεωμένος στο δοκίμιο σε δύο αντιδιαμετρικά σημεία. Στο μέσο της απόστασης των σημείων αυτών χρησιμοποιείται μία κοντή ράβδος περιστροφής, δίπλα στη μακριά ράβδο περιστροφής, που διατηρεί σταθερή την απόσταση μεταξύ του κάτω και του μεσαίου δακτυλίου. Ο μεσαίος δακτύλιος στερεώνεται στο σημείο περιστροφής, ώστε να επιτρέπεται η περιστροφή των δύο τμημάτων του κυλίνδρου στο οριζόντιο επίπεδο. Στο αντιδιαμετρικό σημείο της περιφέρειας, συνδέονται τα δύο τμήματα μέσω μίας συσκευής μέτρησης της εγκάρσιας παραμόρφωσης. Εάν οι αποστάσεις του σημείου στερέωσης της ράβδου περιστροφής και του μηκυσιόμετρου από το κατακόρυφο επίπεδο που περνούν μέσω των σημείων στήριξης του μεσαίου δακτυλίου είναι ίσες, τότε η εγκάρσια παραμόρφωση της διαμέτρου του δοκιμίου είναι ίση με τη μισή μέτρηση του μηκυσιόμετρου. Εάν οι αποστάσεις αυτές δεν είναι ίσες, τότε η εγκάρσια παραμόρφωση του δοκιμίου υπολογίζεται με βάση την παρακάτω εξίσωση:

$$d' = g' e'_h / (e'_h + e'_g)$$

Όπου:

d' = η εγκάρσια παραμόρφωση της διαμέτρου του δοκιμίου

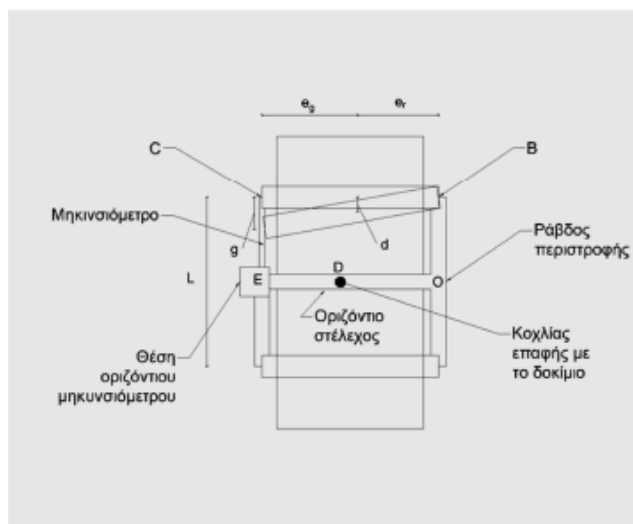
g' = η μέτρηση του μηκυσιόμετρου

e'_h = η κατακόρυφη απόσταση από το σημείο στερέωσης της ράβδου περιστροφής μέχρι το κατακόρυφο επίπεδο που διέρχεται νοητά από τα σημεία στήριξης του μεσαίου δακτυλίου

e'_g = η κατακόρυφη απόσταση, από το μηκυσιόμετρο μέχρι το κατακόρυφο επίπεδο που διέρχεται νοητά από τα σημεία στήριξης του μεσαίου δακτυλίου

Κατά το πρότυπο πρέπει να γίνει φόρτιση του δοκιμίου τουλάχιστον τρεις φορές, ενώ τα στοιχεία της πρώτης φόρτισης δε θα ληφθούν υπόψη στους υπολογισμούς. Ο υπολογισμός του λόγου Poisson θα γίνει με βάση τις μέσες τιμές των αποτελεσμάτων των φορτίσεων. Οι κύκλοι φόρτισης θα φθάνουν μέχρι το 40% της αντοχής των δοκιμίων, όπως αυτή θα έχει εκτιμηθεί από προγενέστερες δοκιμές θλίψης.

Για τις δοκιμές του λόγου Poisson χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά δοκίμια $\Phi 10/20$ cm με την πειραματική διάταξη που φαίνεται στις παρακάτω εικόνες (βλ. Εικόνα 3.70, Εικόνα 3.71) και αποστάσεις e'_h και e'_g ίσες με 13 cm και 9 cm αντίστοιχα. Η μέτρηση της εγκάρσιας παραμόρφωσης επιτυγχάνεται με τον εξής τρόπο: καθώς το δοκίμιο διογκώνεται, ωθεί και το οριζόντιο στέλεχος στα σημεία D και D' (όπου D' το κατοπτρικό σημείο του D στην άλλη όψη του δοκιμίου εκτός επιπέδου) σε εγκάρσια διόγκωση, με κάθε τμήμα του στελέχους να περιστρέφεται γύρω από το σημείο O. Το οριζόντιο μηκυσιόμετρο είναι τοποθετημένο στη θέση E, η δε εγκάρσια παραμόρφωση του δοκιμίου υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τις τιμές που καταγράφει το μηκυσιόμετρο με το λόγο OD/OE.



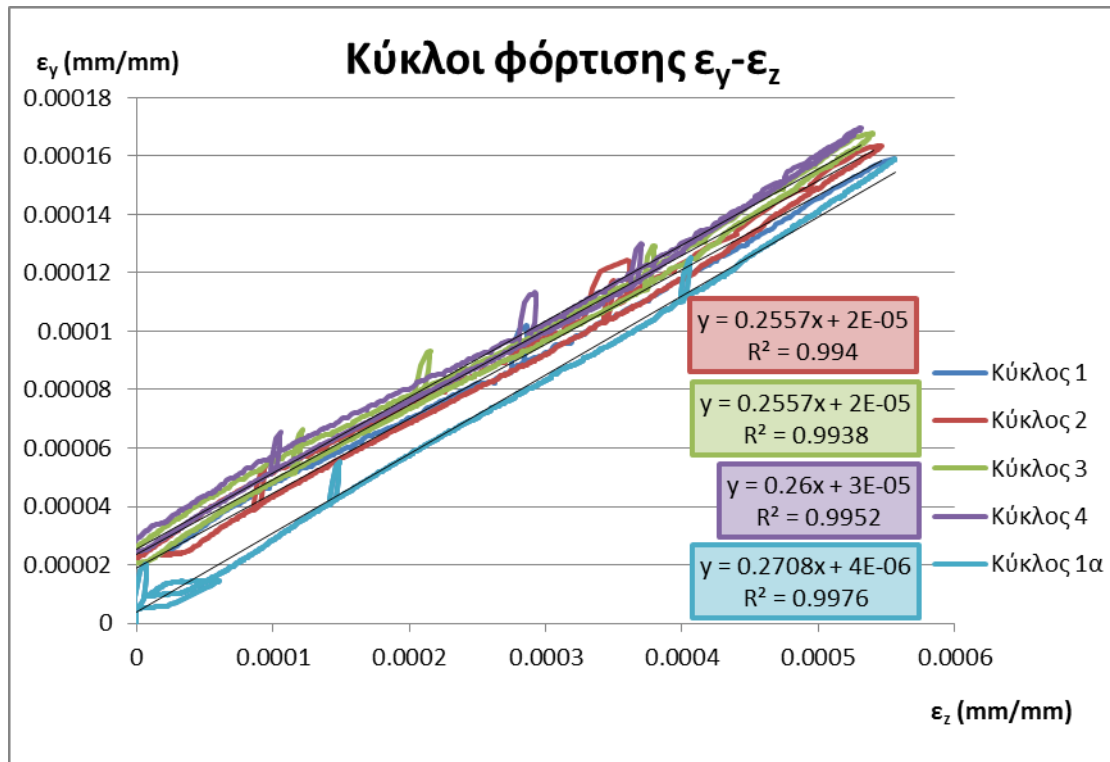
Εικόνα 3.70 Πειραματική διάταξη εκτίμησης λόγου Poisson



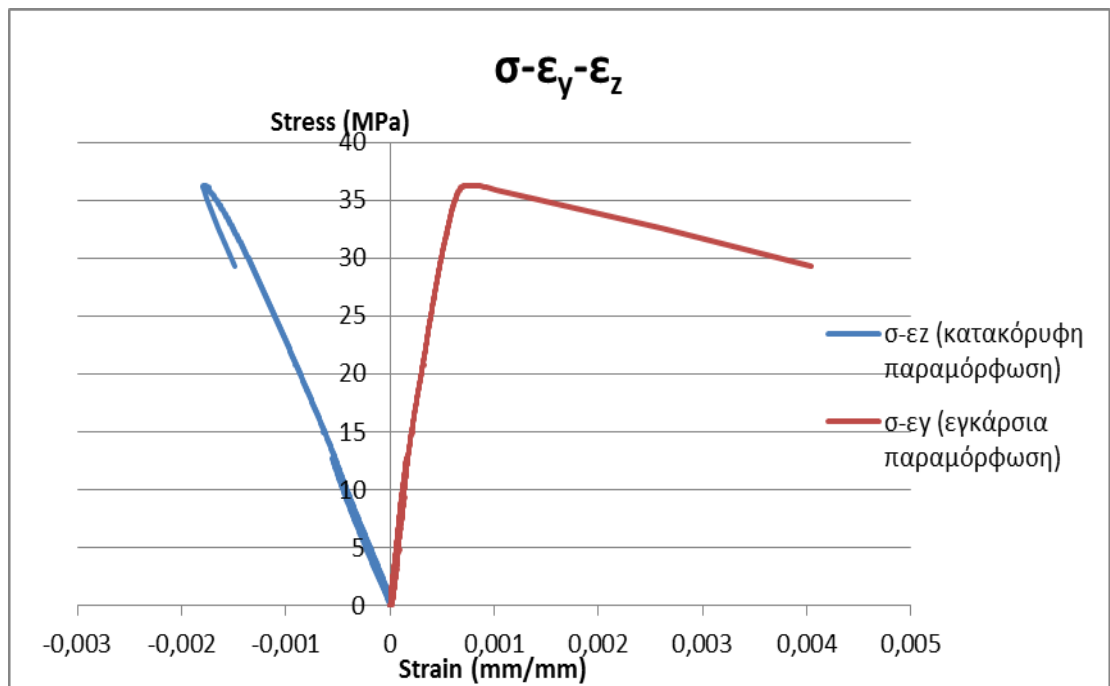
Εικόνα 3.71 Πειραματική διάταξη κατά τη δοκιμή αποτίμησης του λόγου Poisson

Για την καταγραφή των παραμορφώσεων χρησιμοποιήθηκαν μηκυνσιόμετρα (LVDT – linear variable differential transformer) με ονομαστική ακρίβεια 2 μm και καταγραφικό τύπου HBM QuantumX MX/840 8 καναλιών. Η επιφάνεια των δοκιμών που ήταν εκτεθειμένη κατά τη σκυροδέτηση «καπελώθηκε» με ειδικό υλικό από τσιμεντοκονίαμα στο εργαστήριο της LaFarge Beton για να εξομαλυνθούν τυχόν ανωμαλίες τις επιφάνειας και να αποφευχθούν εκκεντρότητες φόρτισης. Για τη θραύση των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε η μηχανή θραύσης Tonipact Toni-Technik μέγιστου φορτίου 600 kN του ΕΟΣ ΕΜΠ. Παρακάτω παρουσιάζονται οι κύκλοι φόρτισης για την αποτίμηση του λόγου Poisson και τα διαγράμματα τάσεων-εγκάρσιων και κατακόρυφων παραμορφώσεων. Για τα δοκίμια S1A και S1B, λόγω κακής τοποθέτησης του οριζόντιου μηκυνσιόμετρου τα αποτελέσματα δεν είναι αντιπροσωπευτικά και επομένως παραλείπονται τα διαγράμματά τους.

Δοκίμιο S1Γ

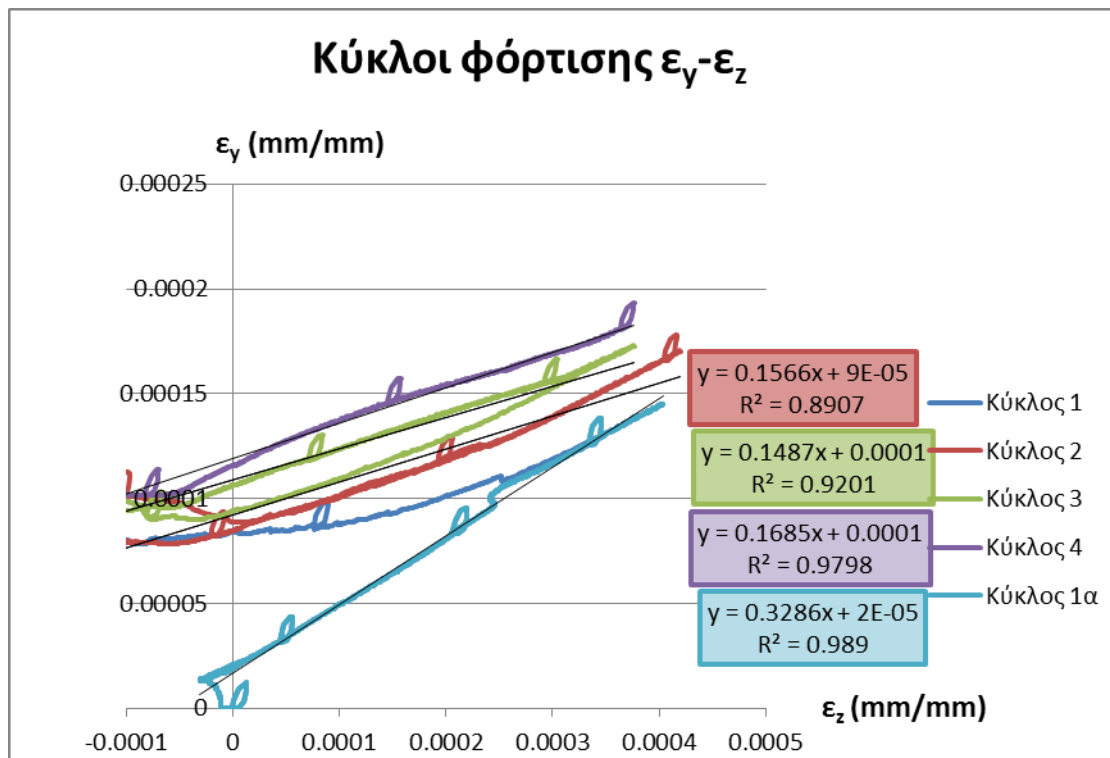


Εικόνα 3.72 Διάγραμμα εγκάρσιων-κατακόρυφων παραμορφώσεων για την εκτίμηση του λόγου Poisson «ν»

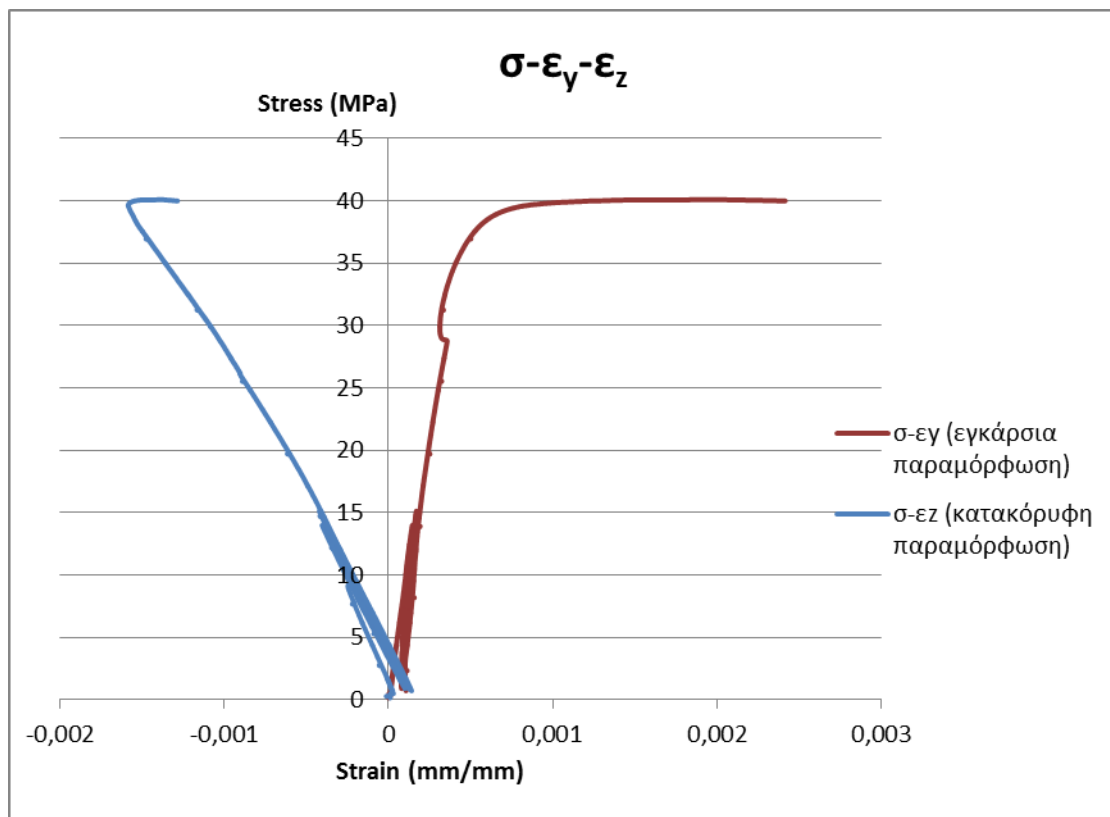


Εικόνα 3.73 Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων-εγκάρσιων και κάθετων παραμορφώσεων

Δοκίμιο S2A

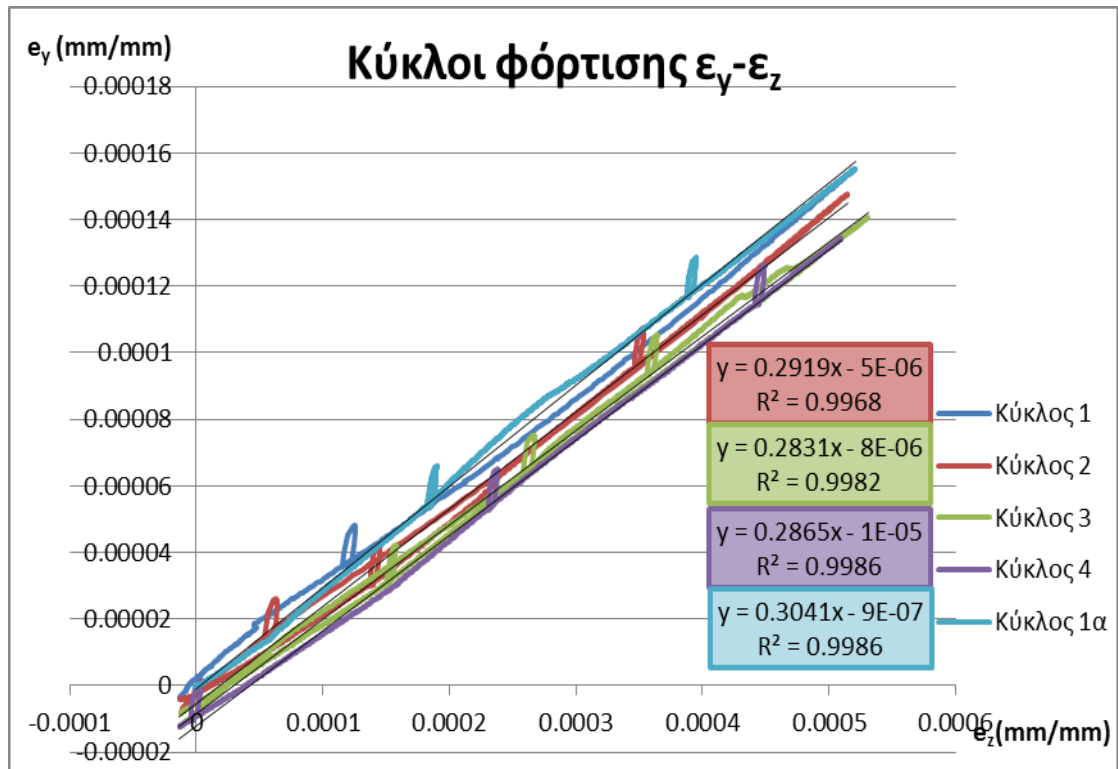


Εικόνα 3.74 Διάγραμμα εγκάρσιων-κατακόρυφων παραμορφώσεων για την εκτίμηση του λόγου Poisson «ν»

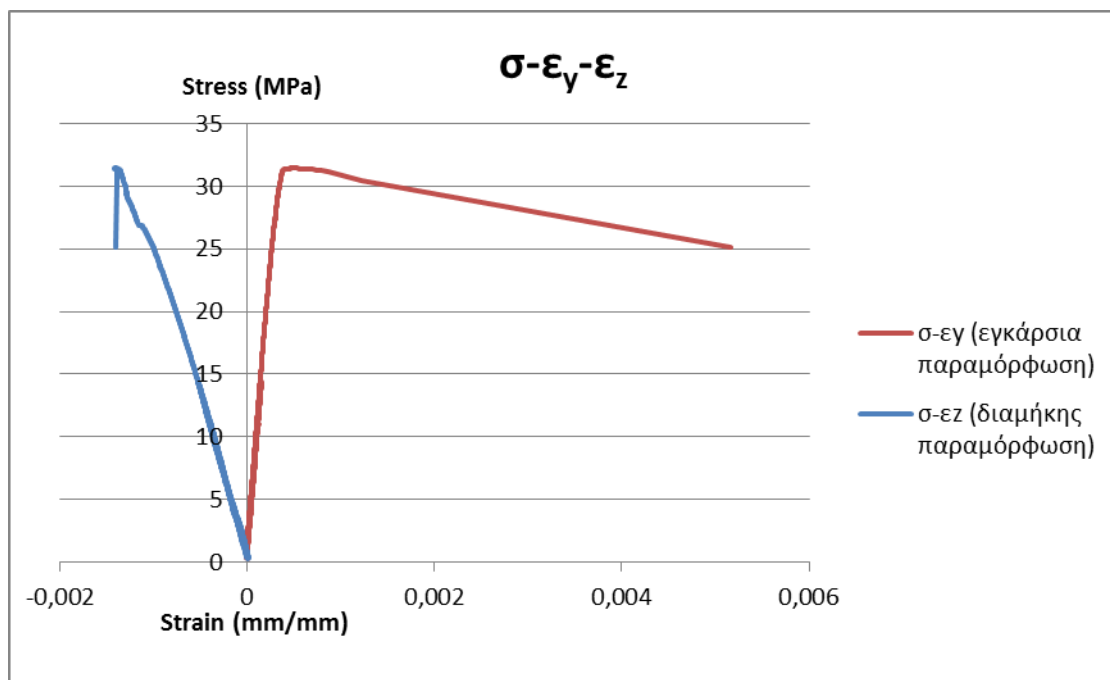


Εικόνα 3.75 Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων-εγκάρσιων και κάθετων παραμορφώσεων

Δοκίμιο S2B

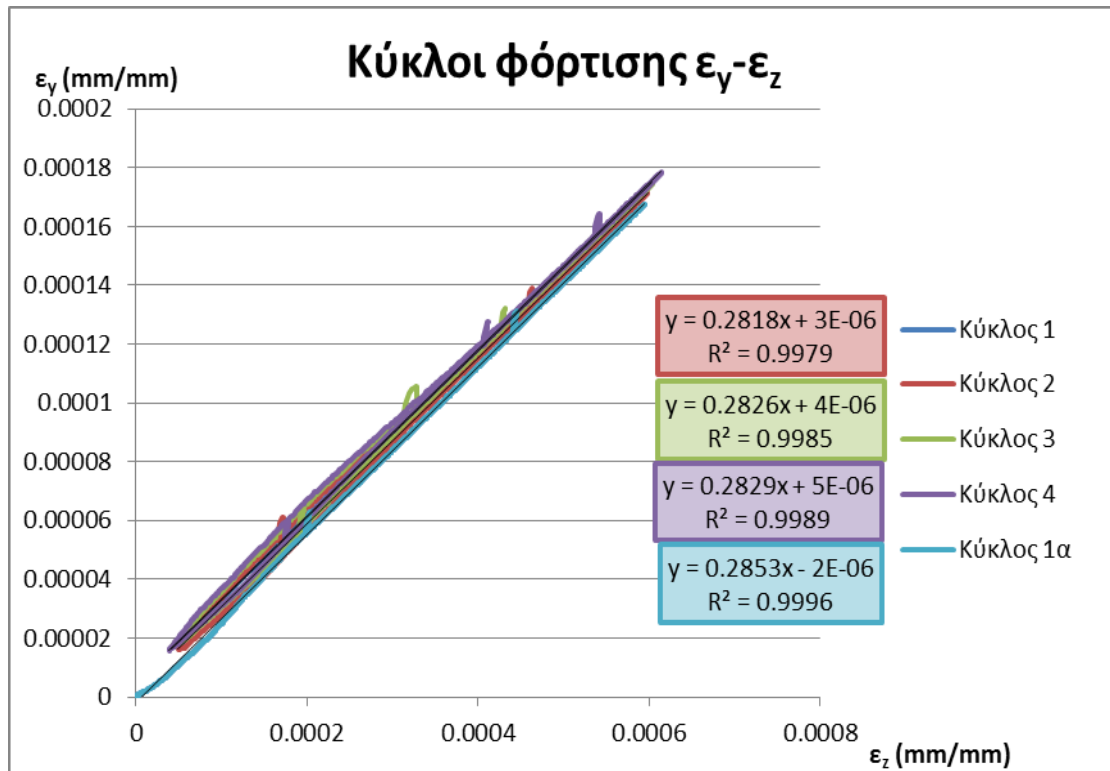


Εικόνα 3.76 Διάγραμμα εγκάρσιων-κατακόρυφων παραμορφώσεων για την εκτίμηση του λόγου Poisson «ν»

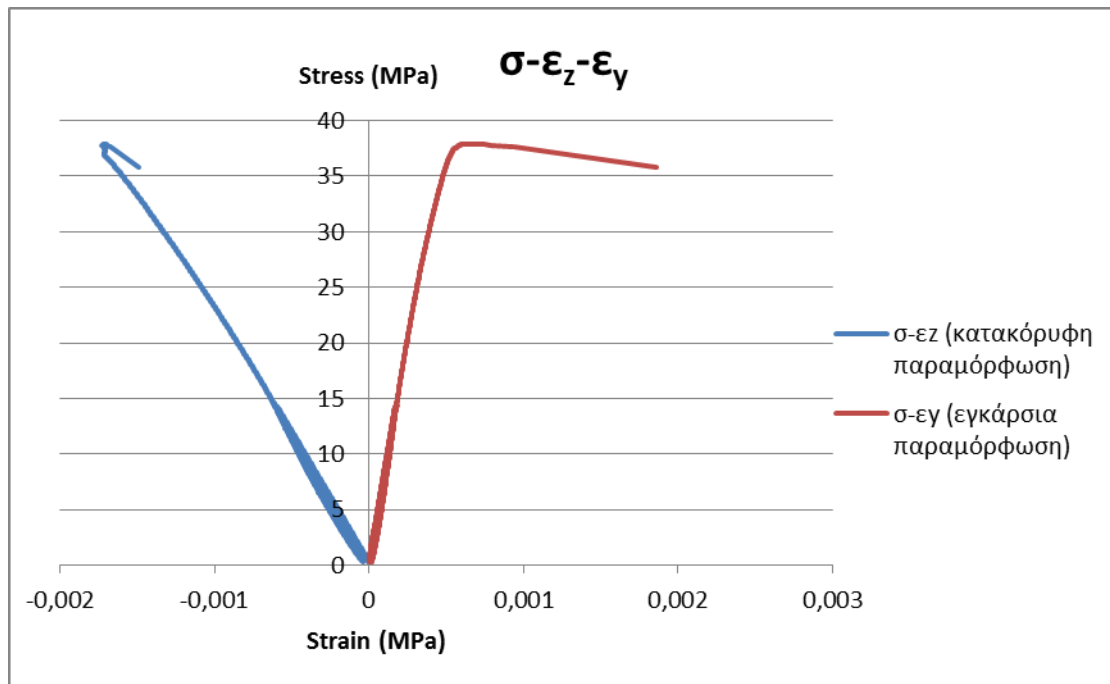


Εικόνα 3.77 Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων-εγκάρσιων και κάθετων παραμορφώσεων

Δοκίμιο S2Γ

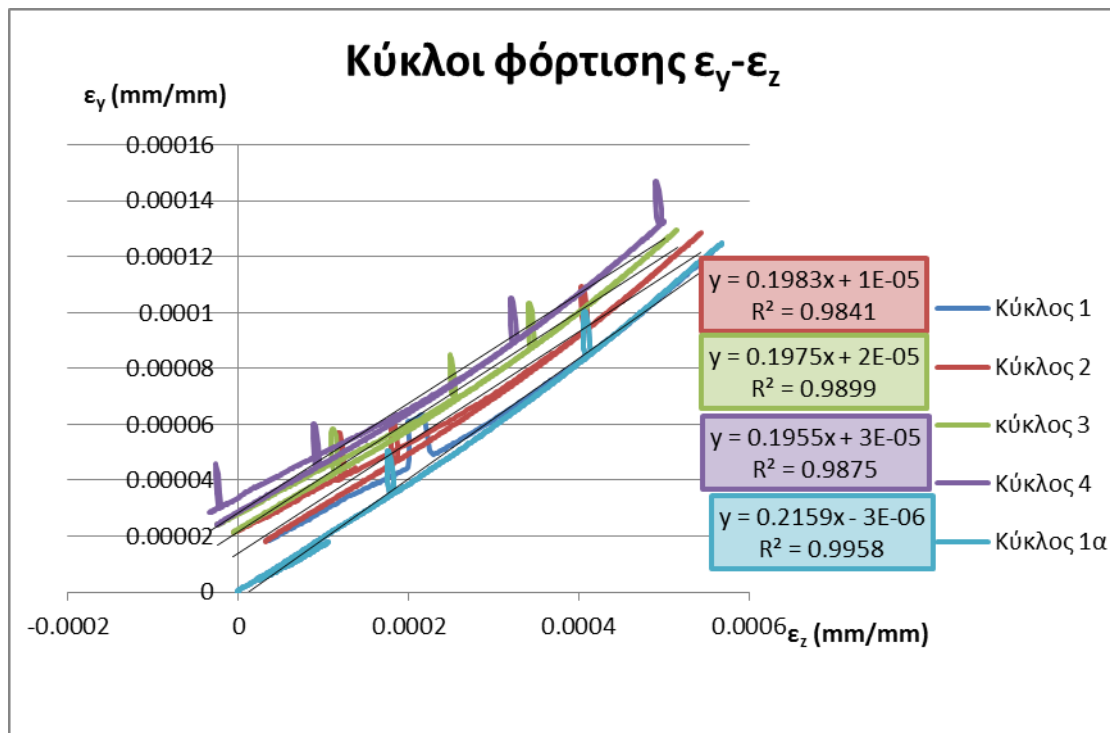


Εικόνα 3.78 Διάγραμμα εγκάρσιων-κατακόρυφων παραμορφώσεων για την εκτίμηση του λόγου Poisson «ν»

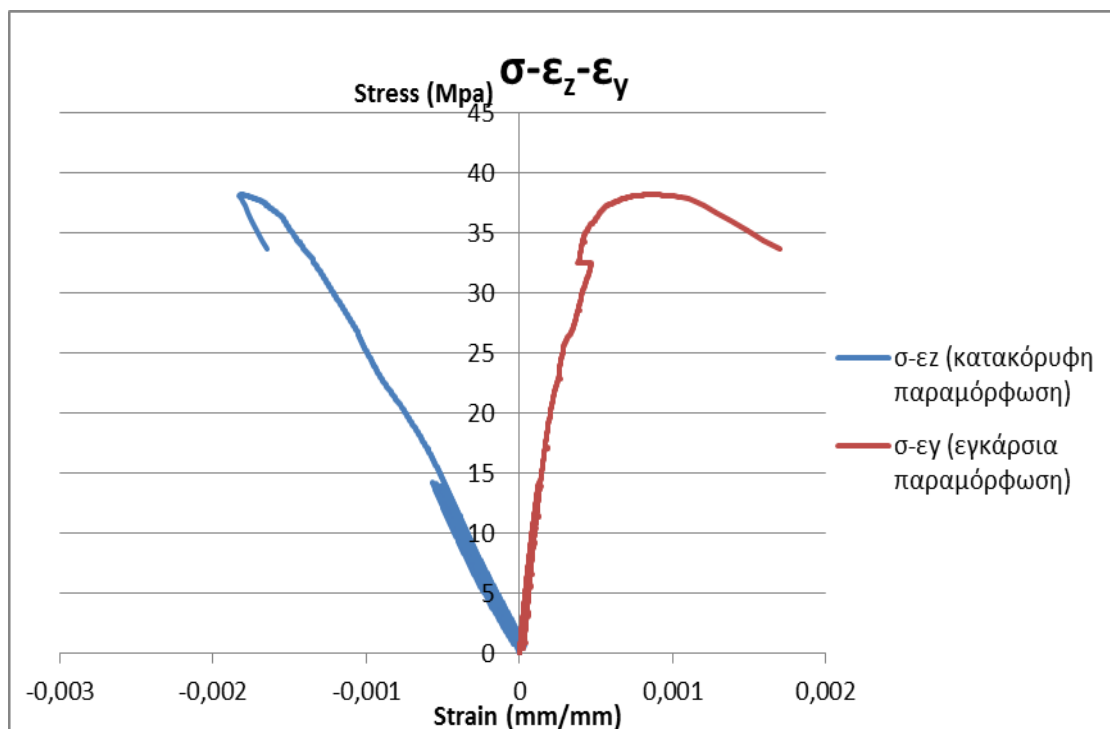


Εικόνα 3.79 Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων-εγκάρσιων και κάθετων παραμορφώσεων

Δοκίμιο SF1A

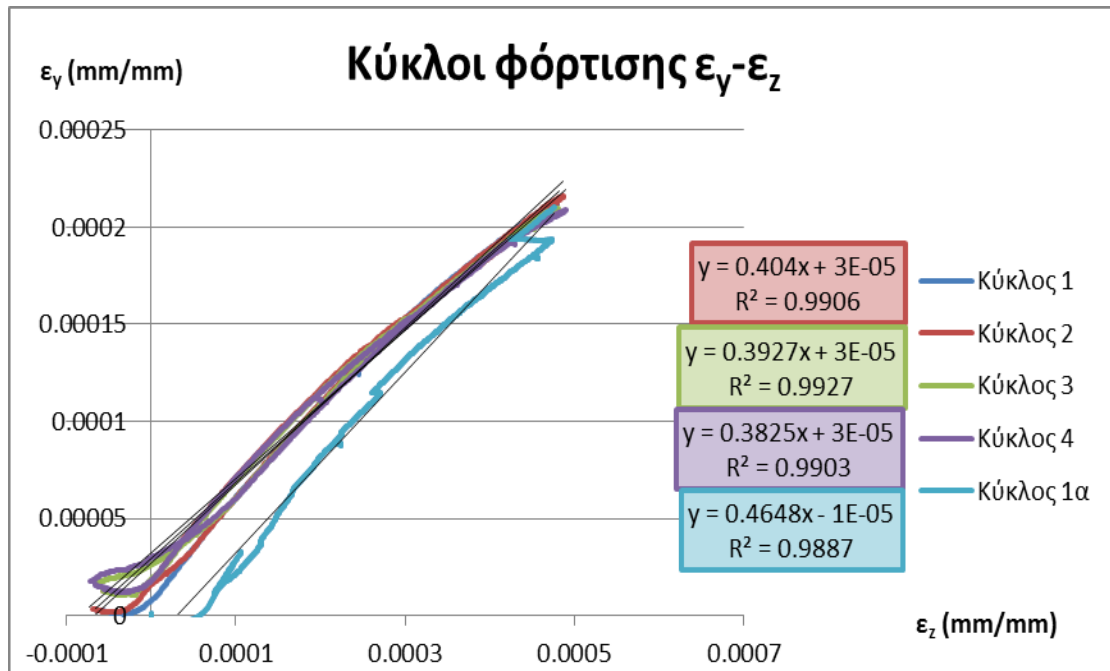


Εικόνα 3.80 Διάγραμμα εγκάρσιων-κατακόρυφων παραμορφώσεων για την εκτίμηση του λόγου Poisson «ν»

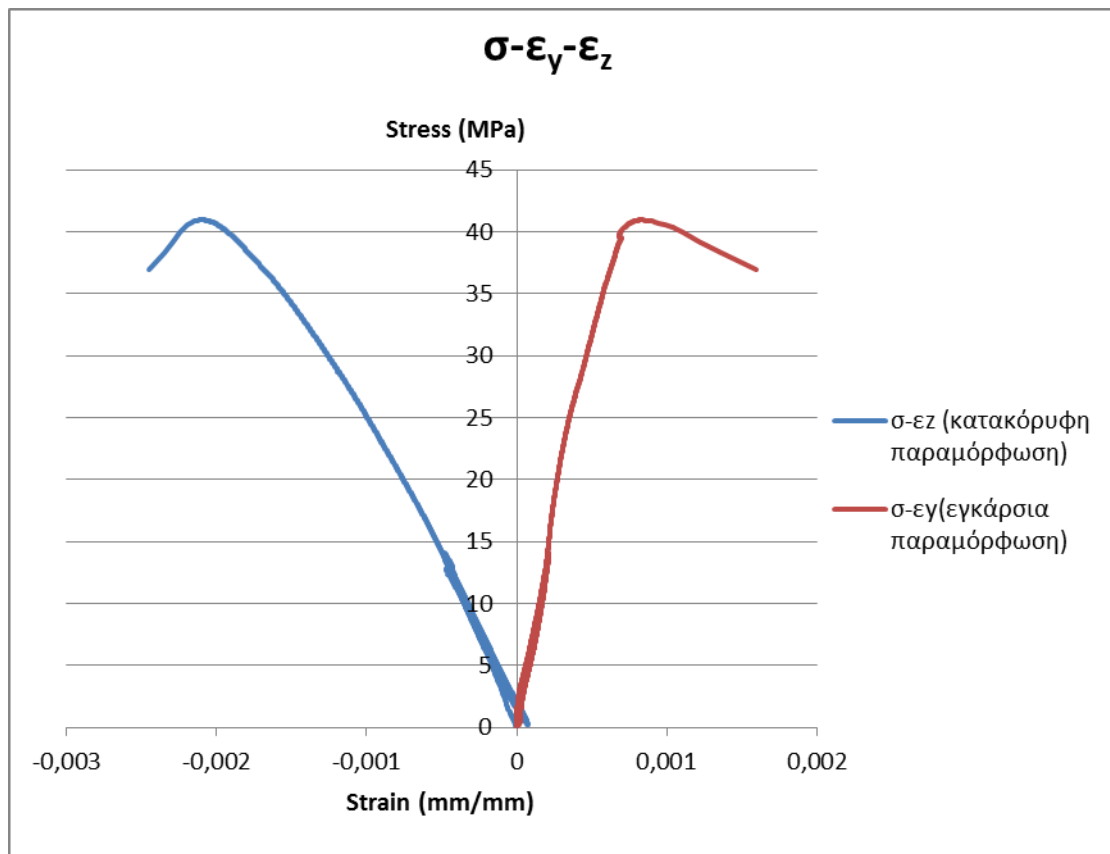


Εικόνα 3.81 Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων-εγκάρσιων και κάθετων παραμορφώσεων

Δοκίμιο SF1B

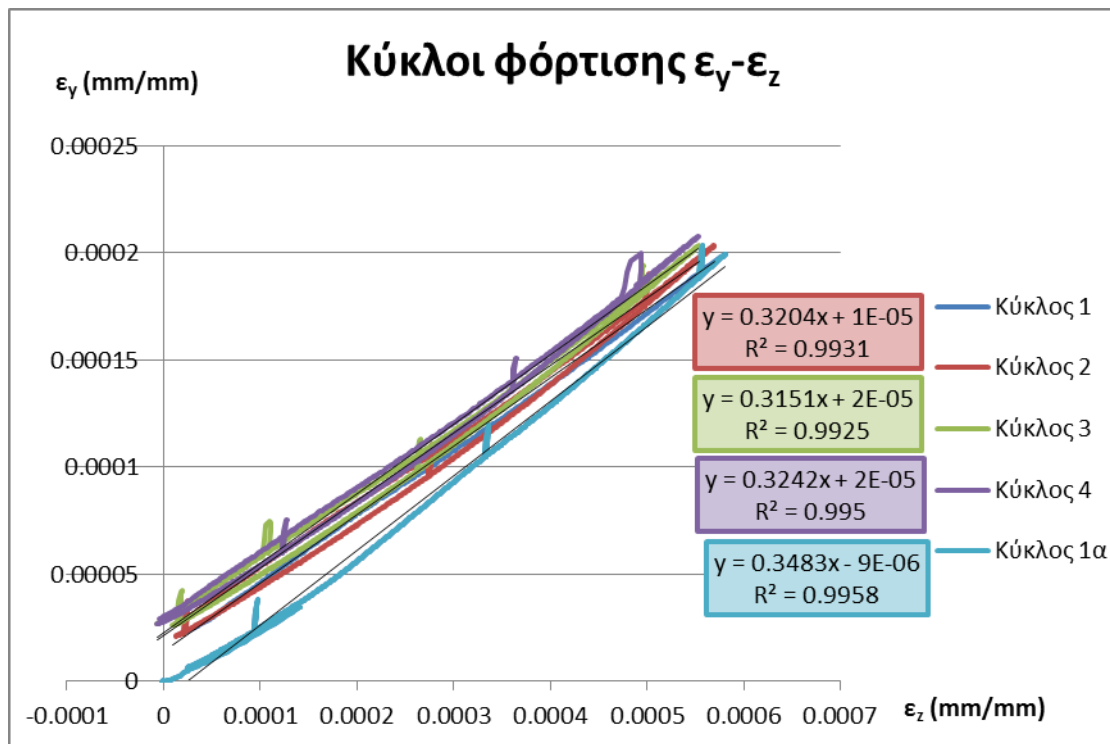


Εικόνα 3.82 Διάγραμμα εγκάρσιων-κατακόρυφων παραμορφώσεων για την εκτίμηση του λόγου Poisson «ν»

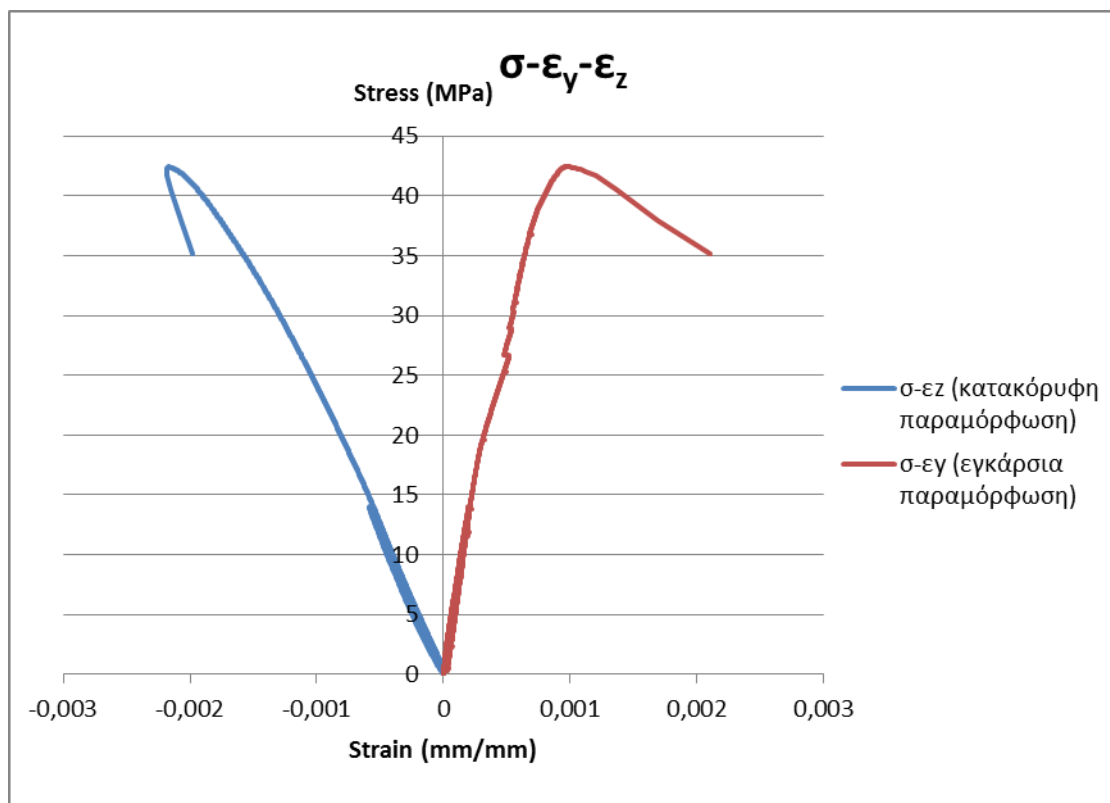


Εικόνα 3.83 Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων-εγκάρσιων και κάθετων παραμορφώσεων

Δοκίμιο SF1Γ

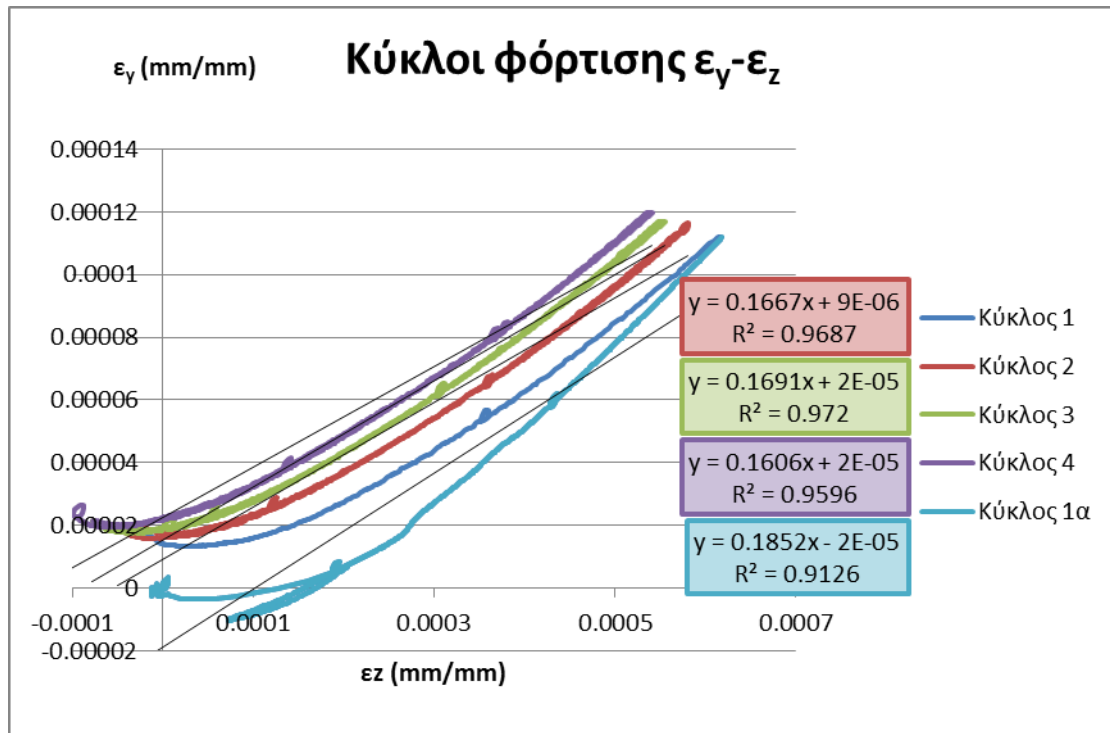


Εικόνα 3.84 Διάγραμμα εγκάρσιων-κατακόρυφων παραμορφώσεων για την εκτίμηση του λόγου Poisson «ν»

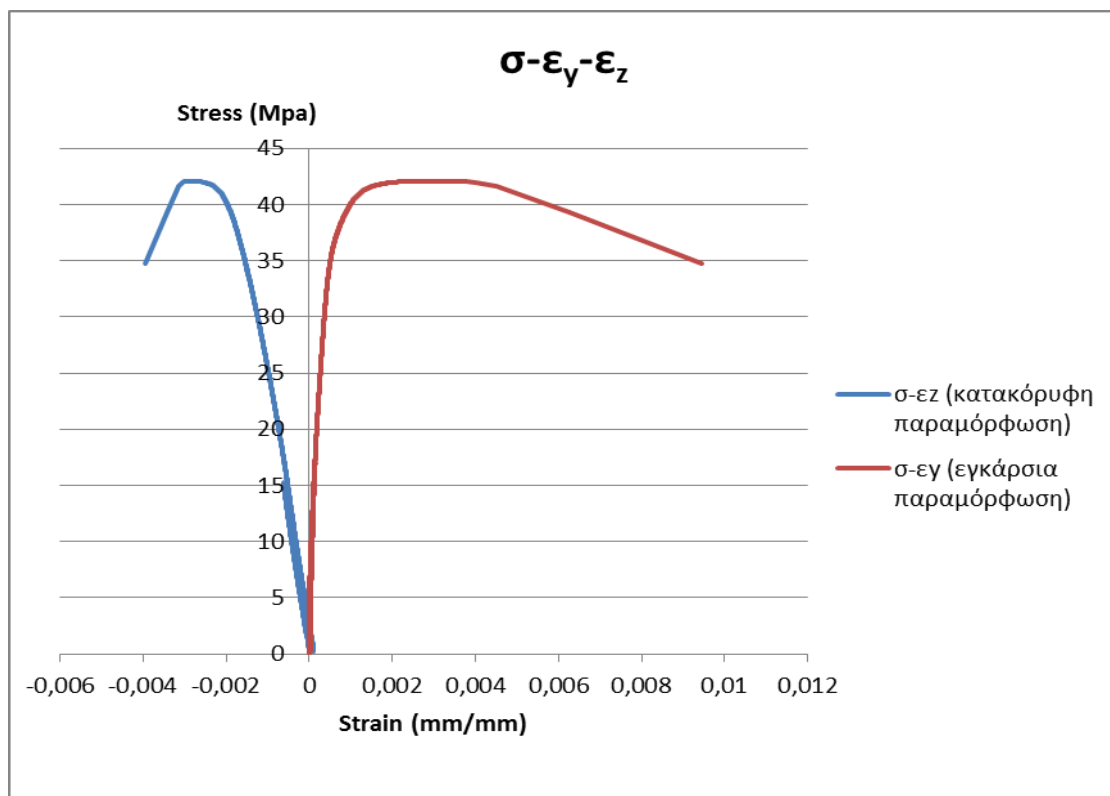


Εικόνα 4.85 Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων-εγκάρσιων και κάθετων παραμορφώσεων

Δοκίμιο SF2A

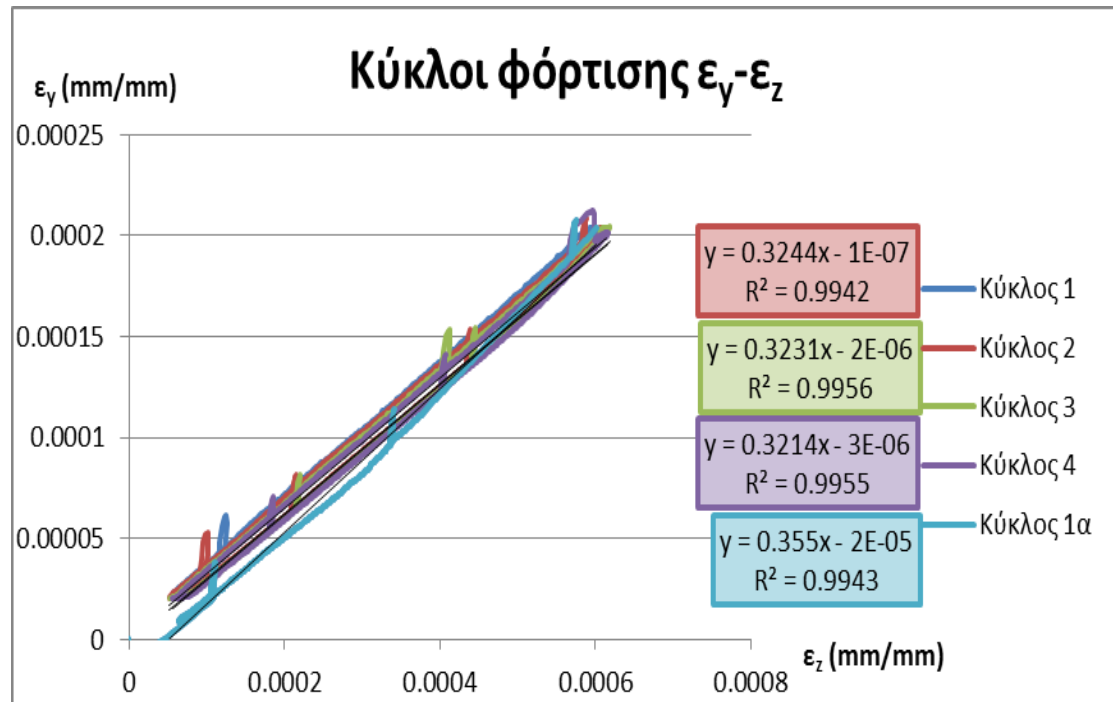


Εικόνα 3.86 Διάγραμμα εγκάρσιων-κατακόρυφων παραμορφώσεων για την εκτίμηση του λόγου Poisson «ν»

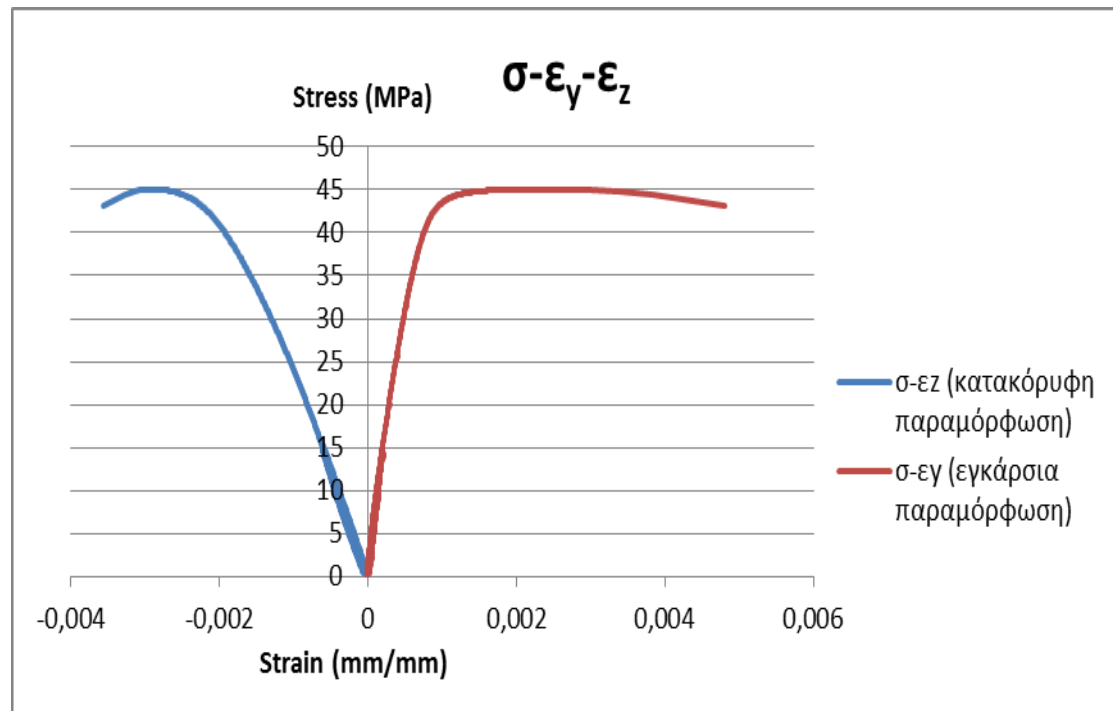


Εικόνα 3.87 Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων-εγκάρσιων και κάθετων παραμορφώσεων

Δοκίμιο SF2B

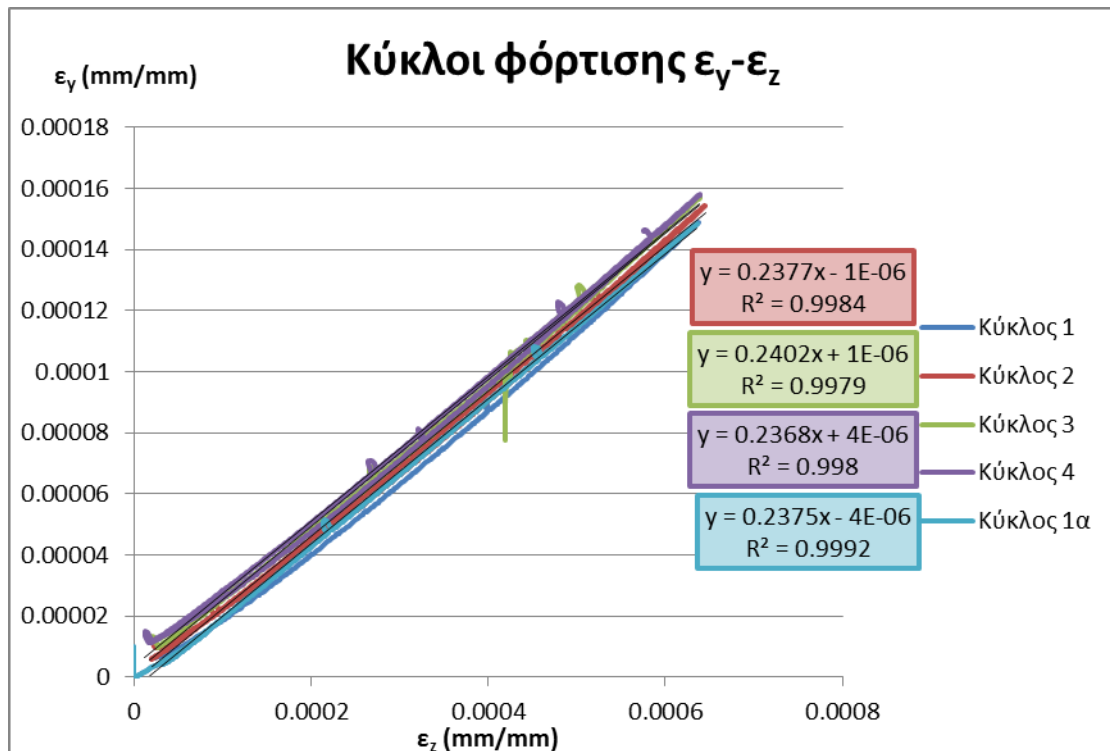


Εικόνα 3.88 Διάγραμμα εγκάρσιων-κατακόρυφων παραμορφώσεων για την εκτίμηση του λόγου Poisson «ν»

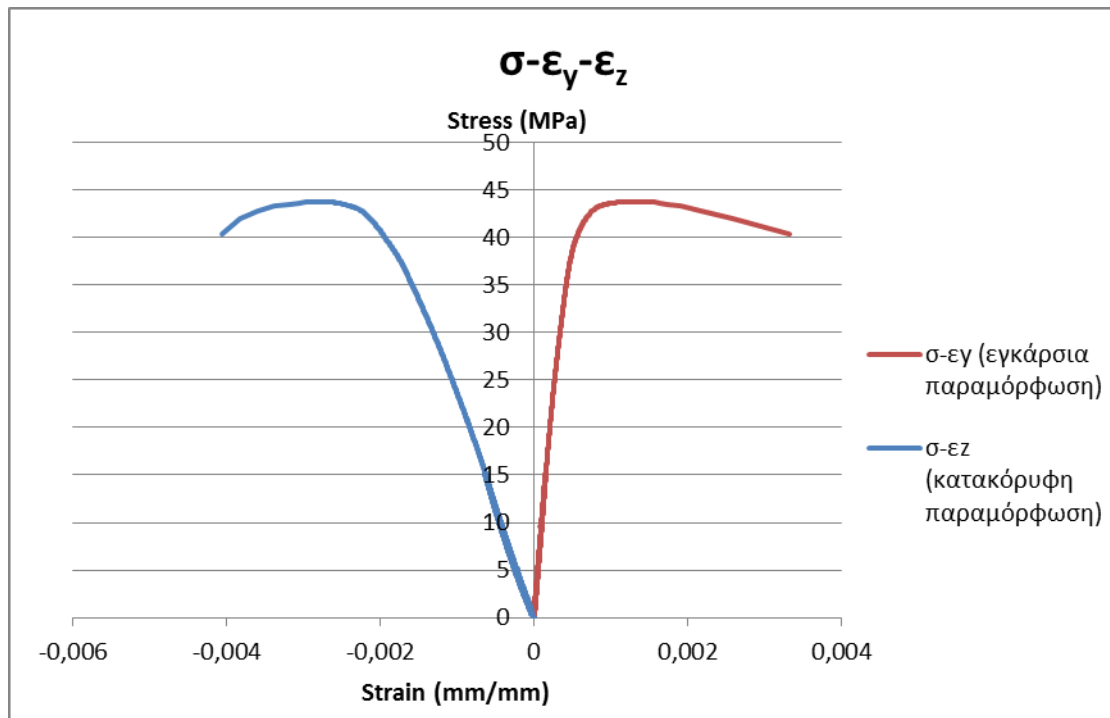


Εικόνα 3.89 Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων-εγκάρσιων και κάθετων παραμορφώσεων

Δοκίμιο SF2Γ



Εικόνα 3.90 Διάγραμμα εγκάρσιων-κατακόρυφων παραμορφώσεων για την εκτίμηση του λόγου Poisson «ν»



Εικόνα 3.91 Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων-εγκάρσιων και κάθετων παραμορφώσεων

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών αποτίμησης του λόγου Poisson.

Σύνθεση	Κωδικός δοκιμίου	Ημερομηνία σκυροδέτησης	Ημερομηνία θραύσης	Ηλικία (ημέρες)	f_{lc} (MPa)	ϵ_{lc1}	E_{lc} (MPa)	ν	Μέση τιμή ν	CV (%)
S1	A	1/2/2017	13/3/2017	40	31.64	0.00172	23542	-	0.257	-
	B	1/2/2017	13/3/2017	40	32.50	0.00194	30672	(0.480)		
	Γ	1/2/2017	13/3/2017	40	36.25	0.00180	22508	0.257		
S2	A	2/2/2017	10/3/2017	36	40.09	0.00158	26501	0.1579	0.243	30.2
	B	2/2/2017	13/3/2017	39	31.45	0.00142	26382	0.2872		
	Γ	2/2/2017	13/3/2017	39	37.91	0.00173	24789	0.2824		
SF1	A	8/2/2017	13/3/2017	33	38.20	0.00183	25328	0.1971	0.303	32.6
	B	8/2/2017	13/3/2017	33	40.97	0.00210	24675	0.3931		
	Γ	8/2/2017	13/3/2017	33	42.43	0.00217	24371	0.3199		
SF2	A	9/2/2017	13/3/2017	32	42.09	0.00289	23794	0.1655	0.242	32.5
	B	9/2/2017	13/3/2017	32	45.04	0.00288	26291	0.3230		
	Γ	9/2/2017	13/3/2017	32	43.72	0.00272	24045	0.2382		

Πίνακας 3.8 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων δοκιμής αποτίμησης λόγου Poisson με βάση τους κύκλους φόρτισης

Λόγω της μεγάλης απόκλισης που παρουσιάζουν μεταξύ τους οι πειραματικές τιμές αποτίμησης του λόγου Poisson, αποφασίστηκε να ληφθεί και η τιμή που προκύπτει από τον ανοδικό κλάδο του 1^{ου} κύκλου φόρτισης, παρόλο που αντικρούει με τις διατάξεις του πρότυπου ASTM C469-02. Αυτό έγινε με το σκεπτικό, πως ίσως λόγω της ψαθυρότητας του υλικού οι διακριτές ρωγμές που δημιουργούνται μετά τη φόρτιση στο 40% της αντοχής του δοκιμίου δημιουργούν έναν τυχηματικό παράγοντα που αφορά το πως θα διογκωθεί το υλικό και επομένως τη τιμή του λόγου Poisson.

Σύνθεση	Κωδικός δοκιμίου	ν ανοδικού τμήματος 1 ^{ου} κύκλου φόρτισης	Μέση τιμή ν	CV (%)
S1	A	-	0.2708	-
	B	(0.4940)		
	Γ	0.2708		
S2	A	0.3286	0.3060	7.1
	B	0.3041		
	Γ	0.2853		
SF1	A	0.2159	0.2821	23.5
	B	(0.46)		
	Γ	0.3483		
SF2	A	0.1852	0.2592	33.5
	B	0.3550		
	Γ	0.2375		

Πίνακας 3.9 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων δοκιμής αποτίμησης λόγου Poisson με βάση τον ανοδικό κλάδο του 1^{ου} κύκλου φόρτισης

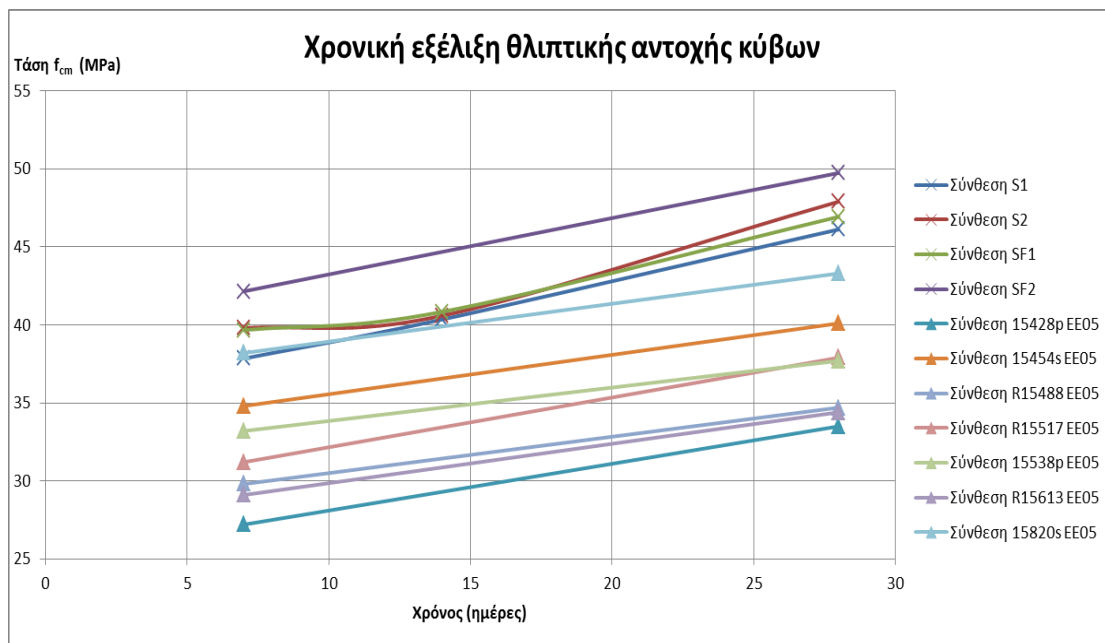
Παρατηρούμε και πάλι πως η διασπορά μεταξύ των τιμών παραμένει μεγάλη για σχεδόν όλες τις συνθέσεις σκυροδέματος.

4. Σύγκριση πειραματικών τιμών της παρούσας διπλωματικής εργασίας με άλλες εργασίες και τις προβλεπόμενες τιμές κατά EC2

Προκειμένου να προσδιοριστεί η αξιοπιστία των πειραματικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν, θεωρείται σκόπιμη η σύγκριση τους με τις τιμές που προκύπτουν από τις σχετικές διατάξεις του Ευρωκώδικα 2 (EC2). Μάλιστα, για την καλύτερη εποπτεία της διαδικασίας αυτή, χρησιμοποιούνται και ορισμένα αποτελέσματα της ενότητας εργασίας ΕΕ05, της οποίας τα πειραματικά αποτελέσματα και οι πίνακες συνθέσεων παρουσιάζονται συνοπτικά στο Παράρτημα Α.

Αξίζει να επισημανθεί, πως στον ευρωκώδικα δεν αναφέρονται ειδικές διατάξεις για το ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα και η σύγκριση γίνεται με τις τιμές που προκύπτουν για το άοπλο Ελαφροσκυρόδεμα.

Με βάση τα αποτελέσματα της χρονικής εξέλιξης της θλιπτικής αντοχής των κυβικών δοκιμών και σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της «ΕΕ04: Πιλοτική παραγωγή σε μονά» συντάσσεται το παρακάτω διάγραμμα:



Εικόνα 4.1 Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης θλιπτικής αντοχής κύβων

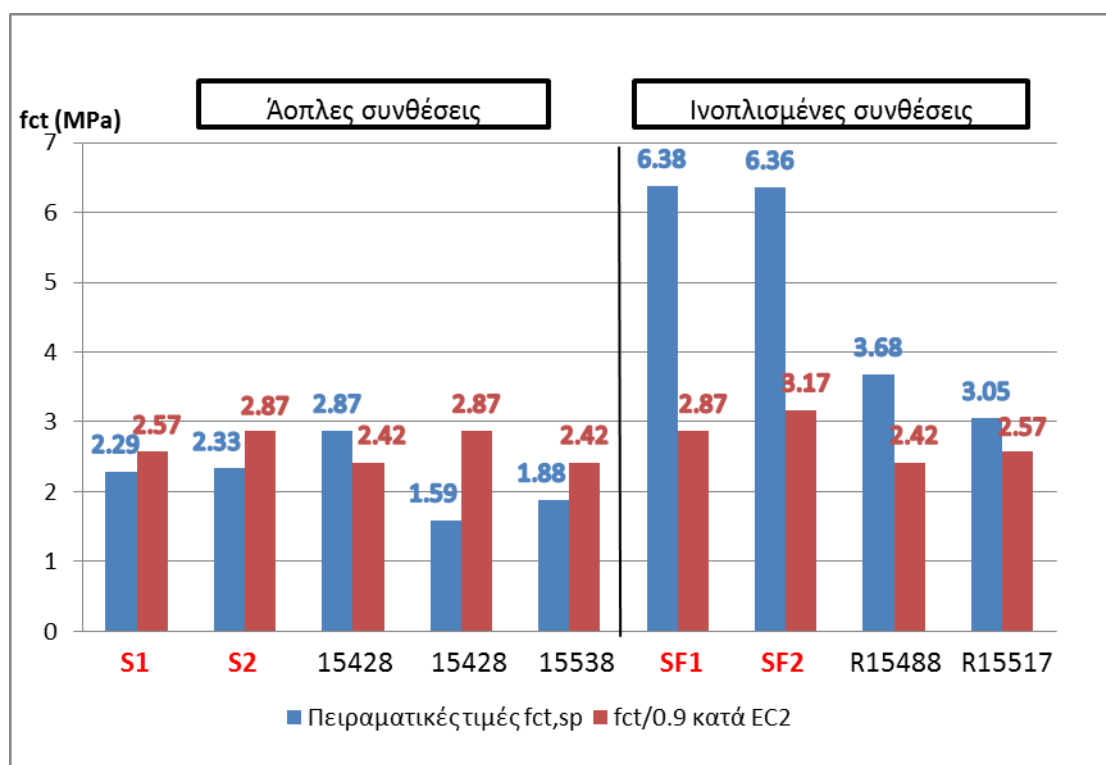
Μετά την εκτίμηση της μέσης εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη των συνθέσεων γίνεται σύγκριση με τις προβλεπόμενες τιμές του ευρωκώδικα 2 στον παρακάτω πίνακα.

Κεφάλαιο 4: Σύγκριση πειραματικών τιμών της παρούσας διπλωματικής εργασίας με άλλες εργασίες και τις προβλεπόμενες τιμές κατά EC2

Σύνθεση	$f_{ctm,sp}$ (MPa)	Άνω όριο κατηγορίας πυκνότητας [EC2] (kg/m^3)	η_1 [EC2]	f_{ctm} [EC2] (MPa)	$f_{ictm}/0,9$ (για άοπλο) [EC2] (MPa)
S1 LC25/28	2.29	1800	0.891	2.6	2.57
S2 LC30/33	2.33	1800	0.891	2.9	2.87
SF1 (60 kg/m^3) LC30/33	6.38	1800	0.891	2.9	2.87
SF2 (60 kg/m^3) LC35/38	6.36	1800	0.891	3.2	3.17

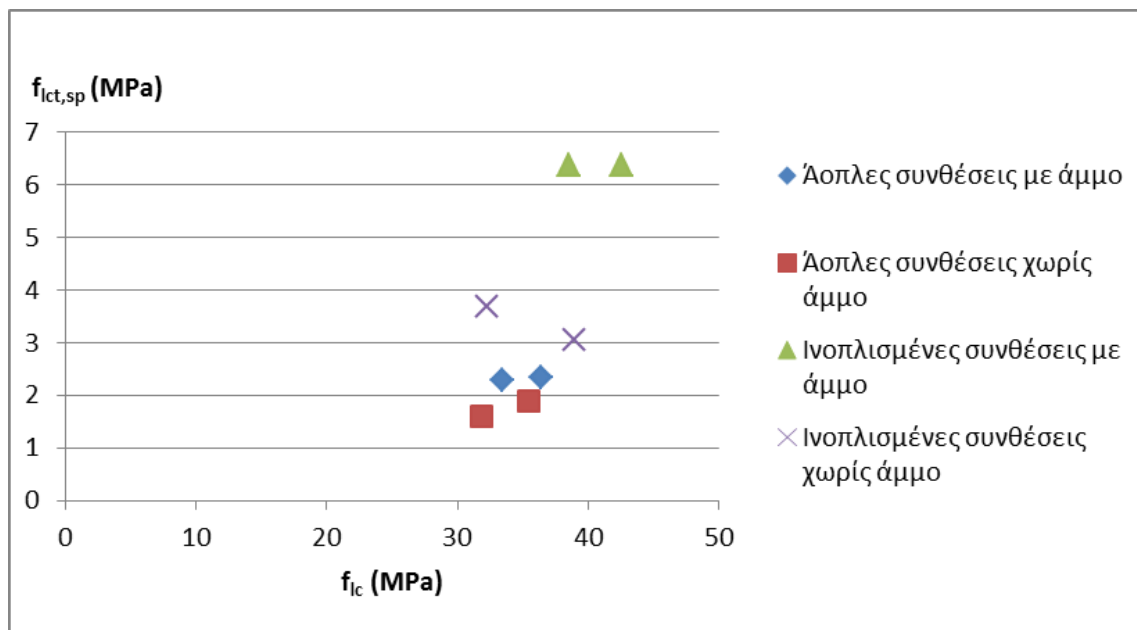
Πίνακας 4.1 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με τις προβλεπόμενες τιμές του EC2

Δίνεται παρακάτω το διάγραμμα της σύγκρισης των πειραματικών αποτελεσμάτων της εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη με τις προβλεπόμενες τιμές του EC2 διαιρεμένες με συντελεστή 0,9. Επιπλέον, παρουσιάζεται το διάγραμμα συσχέτισης της θλιπτικής αντοχής με την εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη για τις συνθέσεις της παρούσας εργασίας, τις συνθέσεις 15428, 15538 (άοπλες συνθέσεις χωρίς άμμο) και τις R15488, R15517 (ινοπλισμένες συνθέσεις χωρίς άμμο).



Εικόνα 4.2 Ραβδόγραμμα σύγκρισης πειραματικών αποτελεσμάτων εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη με τις προβλεπόμενες τιμές του Ευρωκώδικα διαιρεμένες με συντελεστή 0,9.

Κεφάλαιο 4: Σύγκριση πειραματικών τιμών της παρούσας διπλωματικής εργασίας με άλλες εργασίες και τις προβλεπόμενες τιμές κατά EC2

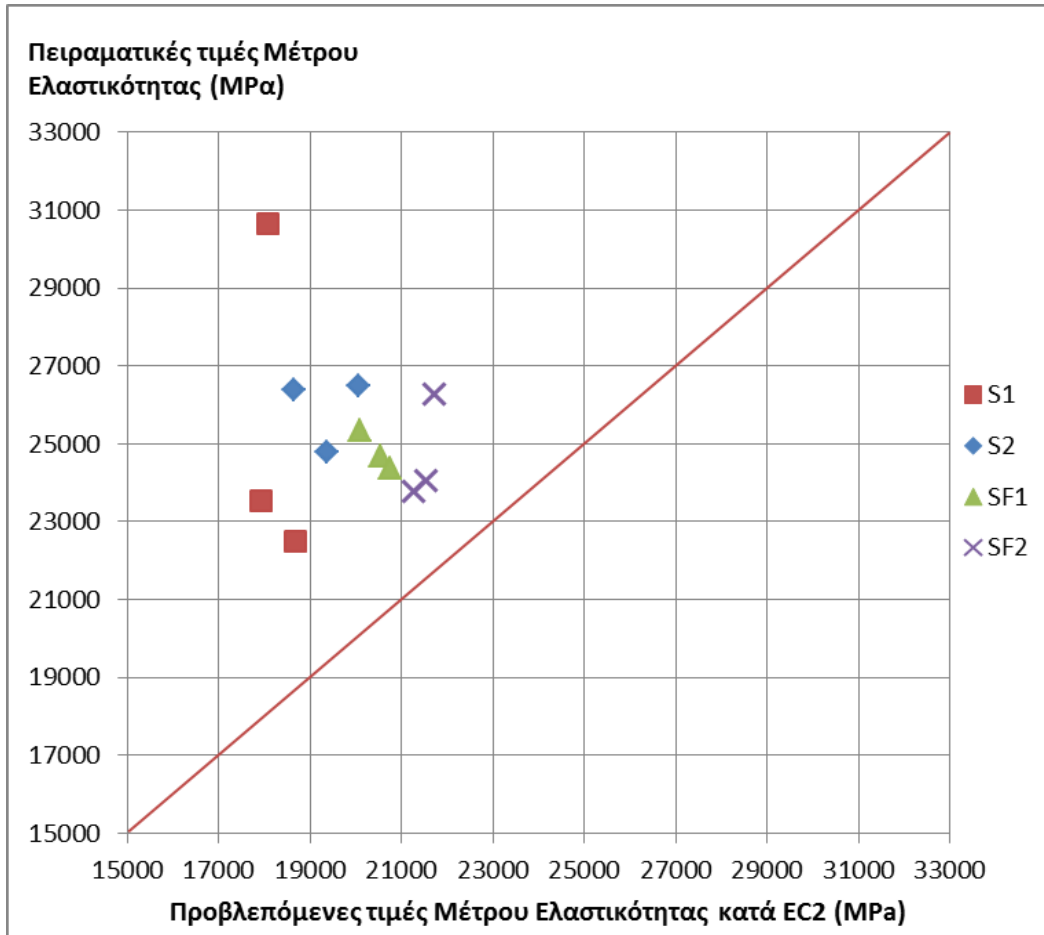


Εικόνα 4.3 Διάγραμμα συσχέτισης θλιπτικής αντοχής και εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη

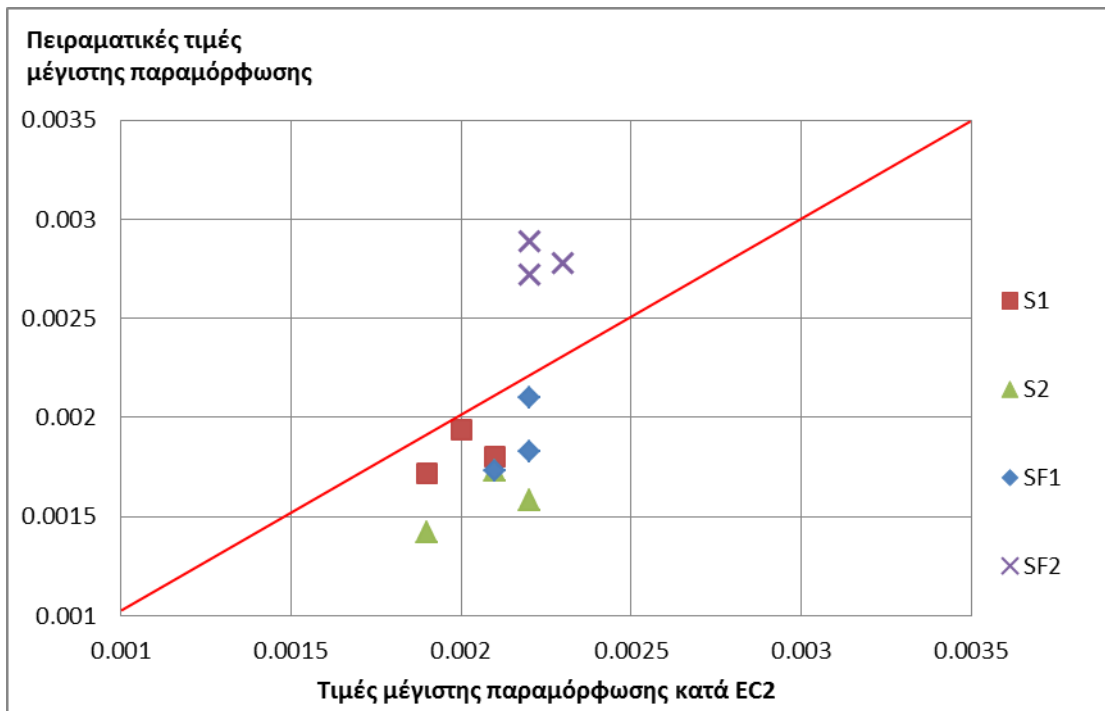
Με βάση τις τιμές των πειραμάτων για την εκτίμηση του Μέτρου Ελαστικότητας και τις σχετικές διατάξεις του Ευρωκώδικα, όπως αυτές περιγράφονται στην ενότητα 1.11.4 συντάσσονται ο παρακάτω πίνακας και το διάγραμμα σύγκρισης πειραματικών αποτελεσμάτων με τις προβλεπόμενες τιμές κατά EC2.

Σύνθεση	Κωδικός Δοκιμίου	ϵ_{ic1}	E_k (MPa)	f_{ic} (MPa)	k_2 για ϵ_{ic1}	$\rho_{oven,dry}$ (kg/m^3)	η_E	E_{cm} [EC2] (MPa)	ϵ_{ic1} [EC2]	E_{ic} [EC2] (MPa)
S1	A	0.00172	23542	31.64	1.1	1671	0.5769	31081	0.0019	17931
	B	0.00194	30672	32.5	1.1	1671	0.5769	31132	0.0020	18076
	Γ	0.0018	22508	36.25	1.1	1671	0.5769	32375	0.0021	18678
S2	A	0.00158	26501	40.09	1.1	1706	0.6013	33368	0.0022	20065
	B	0.00142	26382	31.45	1.1	1706	0.6013	31025	0.0019	18656
	Γ	0.00173	24789	37.91	1.1	1706	0.6013	32813	0.0021	19372
SF1	A	0.00183	25328	38.2	1.1	1720	0.6112	32888	0.0021	20103
	B	0.0021	24675	40.97	1.1	1720	0.6112	33586	0.0022	20529
	Γ	0.00217	24371	42.43	1.1	1720	0.6112	33941	0.0022	20746
SF2	A	0.00289	23794	42.09	1.1	1744	0.6284	33859	0.0022	21278
	B	0.00278	26291	45.04	1.1	1744	0.6284	34554	0.0023	21714
	Γ	0.00272	24045	43.72	1.1	1744	0.6284	34247	0.0022	21522

Πίνακας 4.2 Σύγκριση πειραματικών τιμών με τις προβλεπόμενες τιμές κατά EC2



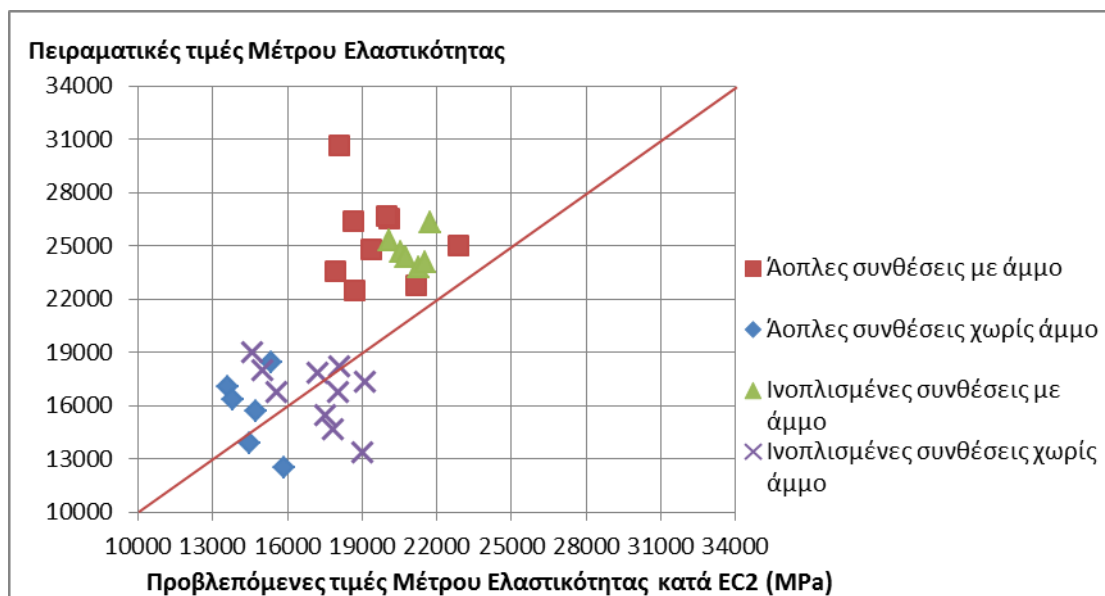
Εικόνα 4.4 Σύγκριση πειραματικών τιμών Μέτρου Ελαστικότητας με τις προβλεπόμενες τιμές κατά EC2



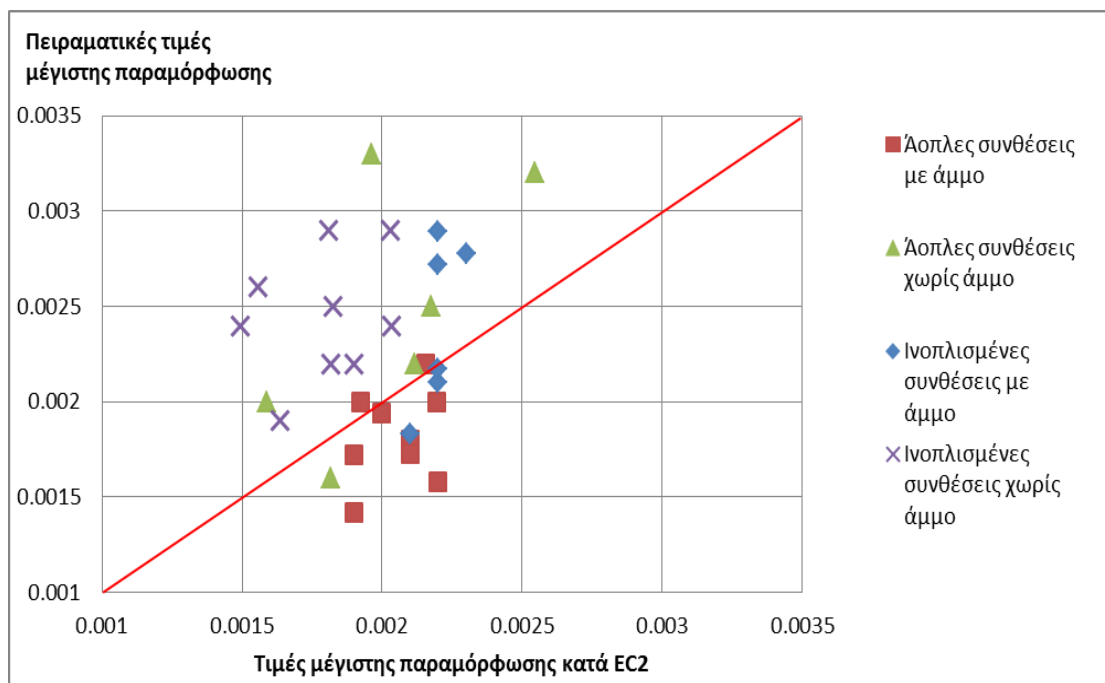
Εικόνα 4.5 Σύγκριση πειραματικών τιμών μέγιστης παραμόρφωσης με τις προβλεπόμενες τιμές κατά EC2

Κεφάλαιο 4: Σύγκριση πειραματικών τιμών της παρούσας διπλωματικής εργασίας με άλλες εργασίες και τις προβλεπόμενες τιμές κατά EC2

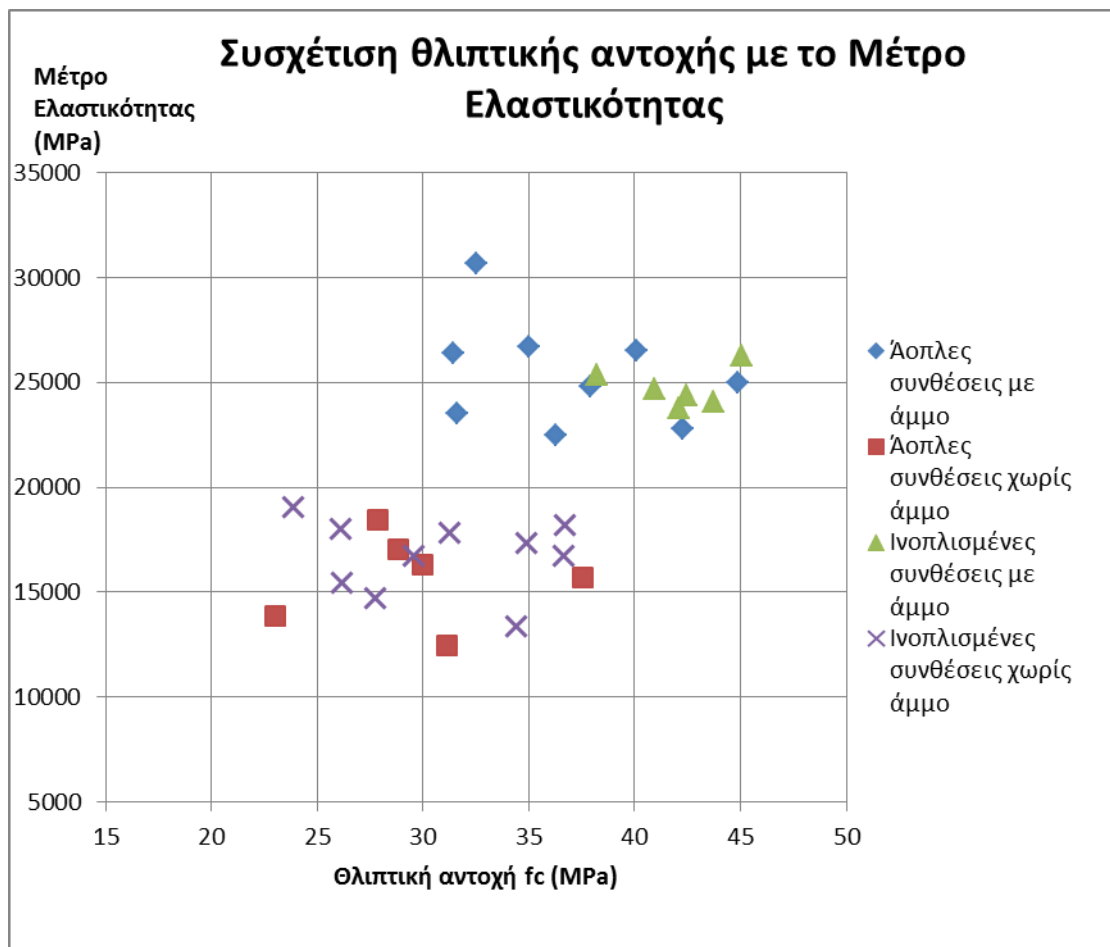
Για την εξαγωγή πιο ασφαλών συμπερασμάτων σχετικά με την ακρίβεια των προβλεπόμενων τιμών κατά EC2 για το Μέτρο Ελαστικότητας στα παραπάνω διαγράμματα προστίθενται και τα αποτελέσματα της ενότητας εργασίας ΕΕ05. Συγκεκριμένα, στα διαγράμματα εισήχθησαν τα πειραματικά αποτελέσματα των άοπλων συνθέσεων 15454s (με άμμο), 15538p (μόνο κίσηρη) και των ινοπλισμένων συνθέσεων R15488, R15517, R15613 (μόνο κίσηρη και για τις 3 συνθέσεις).



Εικόνα 4.6 Σύγκριση πειραματικών τιμών Μέτρου Ελαστικότητας με τις προβλεπόμενες τιμές κατά EC2.

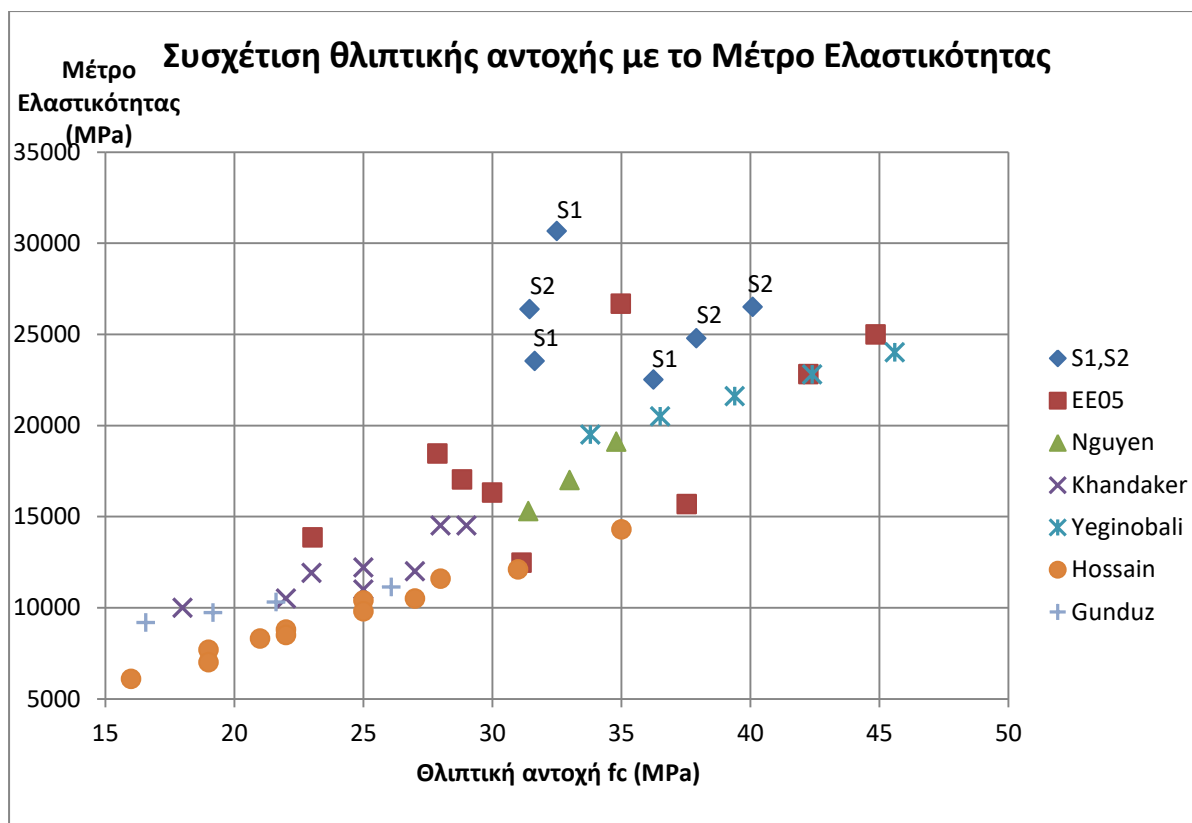


Εικόνα 4.7 Σύγκριση πειραματικών τιμών μέγιστης παραμόρφωσης με τις προβλεπόμενες τιμές κατά EC2



Εικόνα 4.8 Διάγραμμα συσχέτισης θλιπτικής αντοχής με το Μέτρο Ελαστικότητας

Πέρα από τη σύγκριση με την ενότητα εργασίας ΕΕ05 για λόγους πληρότητας παρουσιάζεται η συσχέτιση θλιπτικής αντοχής με το μέτρο ελαστικότητας και από τις άλλες εργασίες που υπάρχουν στο κεφάλαιο 1.10 «Βιβλιογραφική διερεύνηση πειραματικών εργασιών στο Κισσηρόδεμα», καθώς και η σύγκριση των πειραματικών τιμών του Μέρου Ελαστικότητας με τις προβλεπόμενες τιμές των κανονισμών που παρουσιάζονται στο παράρτημα Β.

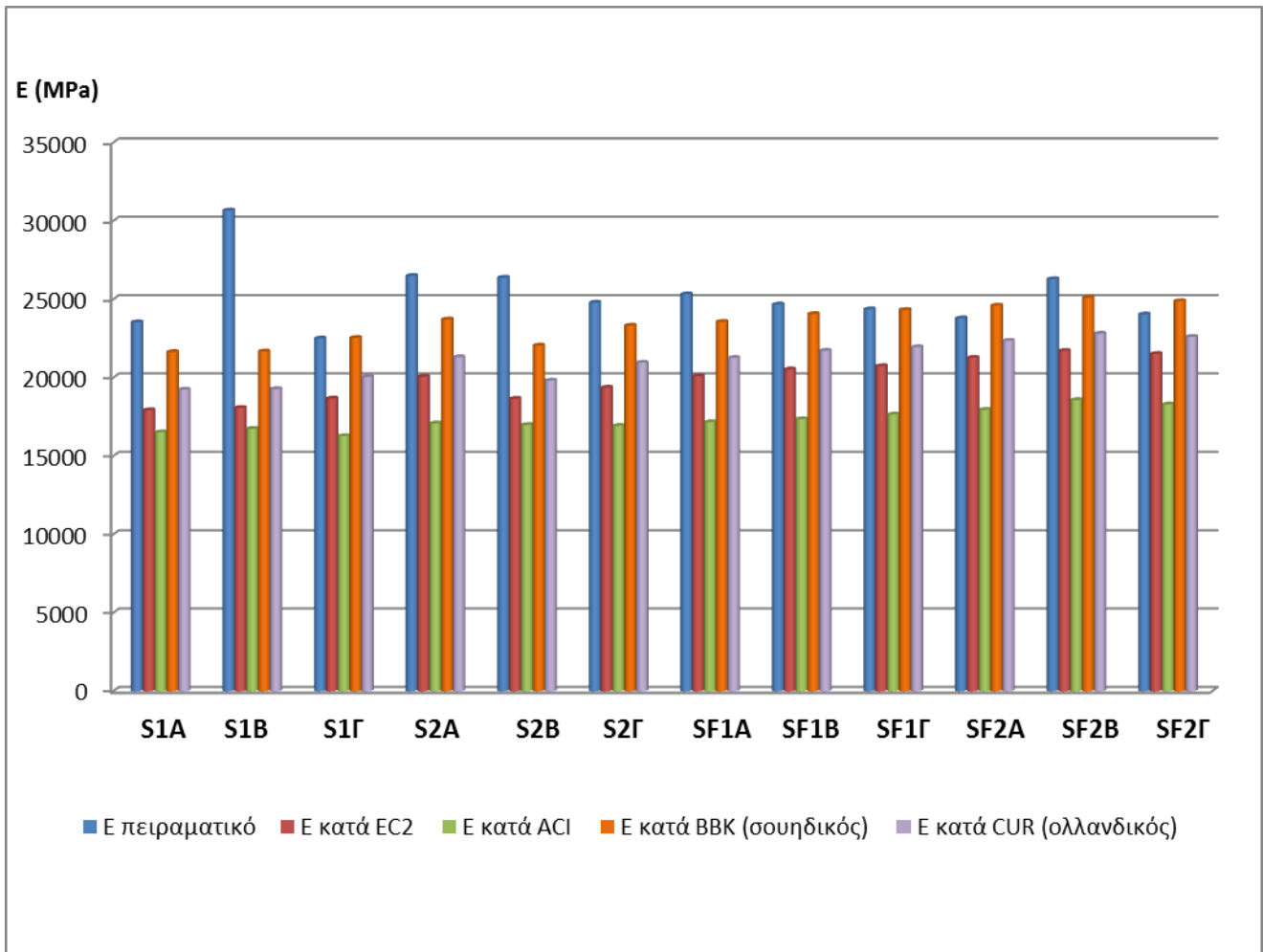


Εικόνα 4.9 Διάγραμμα συσχέτισης θλιπτικής αντοχής με το Μέτρο Ελαστικότητα

Σύνθεση	Δοκίμιο	$\rho_{dry,oven}$ (kg/m^3)	f_c (MPa)	E_k (MPa)	E_{ic} [EC2] (MPa)	E_{ic} [ACI] (MPa)	E_{ic} [BBK] (MPa)	E_{ic} [CUR] (MPa)
S1	A	1671	31.64	23542	17931	16522	21640	19247
	B	1671	32.50	30672	18076	16745	21676	19279
	Γ	1671	36.25	22508	18678	16279	22541	20049
S2	A	1706	40.09	26501	20065	17089	23719	21316
	B	1706	31.45	26382	18656	16992	22054	19819
	Γ	1706	37.91	24789	19372	16933	23325	20962
SF1	A	1720	38.20	25328	20103	17165	23570	21269
	B	1720	40.97	24675	20529	17355	24070	21720
	Γ	1720	42.43	24371	20746	17657	24324	21950
SF2	A	1744	42.09	23794	21278	17955	24604	22356
	B	1744	45.04	26291	21714	18574	25109	22815
	Γ	1744	43.72	24045	21522	18300	24886	22613

Πίνακας 4.3 Σύγκριση πειραματικών τιμών με θεωρητικά υπολογισμένων κατά διαφόρων κανονισμών

Κεφάλαιο 4: Σύγκριση πειραματικών τιμών της παρούσας διπλωματικής εργασίας με άλλες εργασίες και τις προβλεπόμενες τιμές κατά EC2



Εικόνα 4.10 Σύγκριση πειραματικής τιμής του Μέτρου Ελαστικότητας με τις υπολογιζόμενες τιμές διάφορων κανονισμών

5. Συμπεράσματα διπλωματικής εργασίας

Τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα διπλωματική εργασία είναι τα εξής:

- Η συντήρηση των εξεταζόμενων δοκιμίων μέσα σε μπανιέρες υγρής συντήρησης είχε σαν αποτέλεσμα την πολύ μεγάλη αύξηση της υγρασίας στο εσωτερικό των δοκιμίων, λόγω της πορώδους φύσεως του Κισσηροδέματος. Αυτό φάνηκε και στο ότι δεν αρκούσαν 6 μέρες έξω από τις μπανιέρες συντήρησης για το στέγνωμα των δοκιμίων, με αποτέλεσμα να προκύπτουν μειωμένες τιμές στις πειραματικές δοκιμές.
- Αύξηση του ποσοστού άμμου έναντι της κίσηρης έδωσε αυξημένες αντοχές στις δοκιμές θλίψεως, όπως φάνηκε και από τα πειραματικά αποτελέσματα της σύνθεσης S2 έναντι της S1. Επιπλέον, η προσθήκη ινών λειτουργεί ευεργετικά, ιδιαίτερα στους κυλίνδρους, για την αύξηση της θλιπτικής αντοχής.
- Δεν υπήρξε σημαντική διαφοροποίηση της εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη και της καμπτικής εφελκυστικής αντοχής ανάμεσα στις δύο συνθέσεις. Όμως, η προσθήκη μεταλλικών ινών αύξησε θεαματικά την εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη των δοκιμίων κατά 277%.
- Το Μέτρο Ελαστικότητας είναι μειωμένο στο ΚΔ συγκριτικά με το ΣΚΒ, όπως άλλωστε αναμενόταν και από τη βιβλιογραφία και τις ήδη υπάρχουσες πειραματικές μελέτες, καθώς και τις κανονιστικές συστάσεις. Πάντως, αξίζει να επισημανθεί πως το Μέτρο Ελαστικότητας των εξεταζόμενων συνθέσεων ΚΔ της παρούσας διπλωματικής προκύπτει αρκετά μεγαλύτερο από το θεωρητικά προβλεπόμενο κατά τις διατάξεις του EC2.
- Στις δοκιμές του Μέρους Ελαστικότητας παρατηρείται πως η διασπορά των κύκλων φόρτισης κατά την εκτίμηση του είναι πολύ μικρή.
- Τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων εμφανίζουν μεγάλο τμήμα γραμμικής συμπεριφοράς στις συνθέσεις S1 και S2 (σχεδόν μέχρι τη θραύση). Οι τιμές της μέγιστης παραμόρφωσης σε κεντρική θλίψη προκύπτουν λίγο μικρότερες σε σχέση με τις προβλεπόμενες τιμές κατά EC2, με εξαίρεση εκείνες της SF2.
- Τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών για την αποτίμηση του λόγου Poisson είχαν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ τους, καθιστώντας τα αποτελέσματα πιθανώς αναξιόπιστα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ

- (1) [John L. Clarke, Structural Lightweight Aggregate Concrete, 2005](#)
- (2) [Satish Sandra and Leif Berntsson, Lightweight Aggregate Concrete, 2002](#)
- (3) [ESCSI, Expanded Shale Clay and Slate Institute, Lightweight Concrete, History, Applications, Economics. 1971](#)
- (4) ["Δομικό Ελαφροσκυρόδεμα Υψηλής Επιτελεστικότητας με Κίσηρη" Ημερίδα στο ΕΚΕΤ, 21 Ιουλίου 2015](#)
- (5) [Α. Μπάκα, Αντισεισμική Αξία Φέροντος Μικροκίσηροδέματος, Συνέδριο Σκυροδέματος, Βόλος 1983](#)
- (6) [Khandaker M. Anwar Hossain, Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete, Cement and Concrete Research, Volume 34, Issue 2, Pages 283-291, Φεβρουάριος 2004](#)
- (7) [L. Cavaleri, N. Miraglia, M. Papia, Pumice concrete for structural wall panels, Engineering Structures, Volume 25, Issue 1, Pages 115-125, Ιανουάριος 2003](#)
- (8) [EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures- Part 1-1: General rules and rules for building, April 2004](#)
- (9) [Δομικό ελαφροσκυρόδεμα υψηλής επιτελεστικότητας με κίσηρη, έκθεση ενότητας εργασίας 05: Μετρήσεις χαρακτηρισμού κίσηροδέματος και ινοπλισμένου κίσηροδέματος σε καμπτική και αξονική καταπόνηση, Υπεργολάβος ΕΟΣ ΕΜΠ, 2013](#)
- (10) [EuroLightCon, Definition and International Consensus Report, Economic Design and Construction with Light Weight Aggregate Concrete, April 1988](#)
- (11) [Y. Ke, S. Ortola, A.L. Beaucour, H. Dumontet, Identification of microstructural characteristics in lightweight aggregate concretes by micromechanical modelling including the interfacial transition zone \(ITZ\), Cement and Concrete Research, Volume 40, Issue 11, Pages 1590-1600, November 2010](#)
- (12) [Τασούλα Γ.Θ. Μελέτη σύνθεσης ελαφροσκυροδέματος με κίσηρη και εφαρμογή του στον αντισεισμικό σχεδιασμό, Φεβρουάριος 2013, Ε.Μ.Π. Αθήνα](#)
- (13) [H. Bombard, International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Volume 2, Issue 4, Pages 193-209, Δεκέμβριος 1980](#)
- (14) [EuroLightCon, LWAC Material Properties State-of-the-Art, Economic Design and Construction with Light Weight Aggregate Concrete, December 1998](#)
- (15) [Y. Ke, A. L. Beaucour, S. Ortola, H. Dumontet, R. Cabrillac Influence of volume fraction and characteristics of lightweight aggregates on the mechanical properties of concrete, Construction and Building Materials, Volume 23, Issue 8, Pages 2821–2828, Αύγουστος 2009](#)
- (16) [J.M. Chi, R. Huang, C.C. Yang, J.J. Chang Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of, Cement & Concrete Composites, Volume 25, Issue 2, Pages 197-205, Φεβρουάριος 2003](#)
- (17) [C.C. Yang, R. Huang, Approximate strength of lightweight aggregate using micromechanics method, Advanced Cement Based Materials, Volume 7, Issue 3-4, Pages 133-138, April- May 1998](#)
- (18) [Lydon FD Concrete mix design 2nd ed. London: AppliedSciencePublishers, 1982](#)

- (19)[R. Wasserman, A. Bentur Effect of lightweight fly ash aggregate microstructure on the strength of concretes, Cement and Concrete Research, Volume 27, Issue 4, Pages 525-537, Απρίλιος 1997](#)
- (20)[T. Y. Lo, H. Z. Cui, Effect of porous lightweight aggregate on strength of concrete, Materials Letters, Volume 58, Issue 6, Pages 916-919, February 2004](#)
- (21)[D. Sari, A.G. Pasamehmetoglu, Cement and Concrete Research, Volume 35, Issue 5, Pages 936-942, May 2005](#)
- (22)http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/PIRANT_YLIKA/pir_5_6.htm
- (23)<http://theconstructor.org/concrete/all-about-light-weight-concrete/1670/>
- (24)[Mahmoud Hassanpour, PayamShafigh, Hilmi Bin Mahmud, Lightweight aggregate concrete fiber reinforcement- A review, Construction and Building Materilas, Volume 37, Pages 452-461, December 2012](#)
- (25)[Prannoy Suraneni, Paula C. Bran Anleu, Robert J. Flatt, Factors affecting the strength of structural lightweight aggregate concrete with and without fibers in the 1,200–1,600 kg/m³ density range, Materials and Structures, Volume 49, Issue 1, Pages 677–688, January 2016](#)
- (26)[LucynaDomagala, Modification of properties of structural lightweight concrete with steel fibres, Journal of Civil Engineering and Management, Volume 17, Issue 1, Pages 36-44, April 2011](#)
- (27)[Oğuz Akın Düzgün, Rüstem Gül, Abdulkadir Cüneyt Aydın, Effect of steel fibers on the mechanical properties of natural lightweight aggregate concrete, Materials Letters, Volume 59, Issue 27, Pages 3357–3363, November 2005](#)
- (28)[Jianmin Gao, Wei Sun, Keiji Morino, "Mechanical Properties of steel fiber-reinforced high strength, lightweight concrete", Cement and Concrete Composites, Volume 19, Issue 4, Pages 307-313, April 1997](#)
- (29)CUR Centre for Civil Engineering Research and Codes. Structural behavior of concrete with coarse lightweight aggregates. Report 173, Gouda, Netherlands, 1995
- (30)T.A., H., High Strength Concrete, Report 4.11: Effect of Moisture on the Mechanical Properties of High Strength Concrete. SINTEF-report STF70 A93088. Trondheim, Norway. 1993
- (31)[R. V Balendran, F. P Zhou, A Nadeem, A. Y. T Leung, Influence of steel fibres on strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete, Building and Environment, Volume 37, Issue 12, Pages 1361-1367, December 2002](#)
- (32)Thorenfeldt, E., Design Criteria of Lightweight Aggregate Concrete. CEB/FIP International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Sandefjord, Norway. Editors: I. Holand et al. 1995, Pages 720-732
- (33)[Thomas H. K. Kang, Woosuk Kim, Yoon-Keun Kwak, Sung-Gul Hong, Shear Testing of Steel Fiber-Reinforced Lightweight Concrete Beams without Web Reinforcement, ACI Structural Journal, Title no. 108-S52, Pages 553-561, September-October 2011](#)
- (34)ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2008, Page 473
- (35)ASTM C125-00. Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates, Annual Book of ASTM Standards, Section 4-Construction, Volume 04.02-Concrete and Aggregates, ASTM International

- (36)ACI 309, (1993). "Behavior of Fresh Concrete During Vibration," Manual of Concrete Practice, ACI 309.1 R-93 (Re-approved 1998), Page 19
- (37)ACI 116, (2000). "Cement and Concrete Terminology," Manual of Concrete Practice, ACI 116R-00, (Re-approved 2005), Page 73
- (38)Mehta, P.K., and Monteiro, P.J.M., (1993). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, 2nd edition, McGraw-Hill, New York, Page 548
- (39)[D. Sari, A.G.Pasamehmetoglu, The effects of gradation and admixture on the pumice lightweight aggregate concrete, Cement and Concrete Research, Volume 35, Issue 5, Pages 936-942, May 2005](#)
- (40)Dutch Concrete Society (1978). Structural lightweight-aggregate concrete for marine and offshore applications. Concrete Society, Technical Report no.16
- (41)Weigler, H., Karl, S., and Lieser, P., (1972). "The bending load capacity of reinforced lightweight concrete," Betonwerk und Fertigteil-Technik 38, No.5, Pages 324-334 and No.6, Pages 445-449
- (42)[R.N. Swamy, A.H. Jojagha, Workability of steel fibre reinforced lightweight aggregate concrete, International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Volume 4, Issue 2, Pages 103-109, May 1982](#)
- (43)ACI Committee 544, 'Measurement of properties of fibre reinforced concrete', Journal, American Concrete Inshtute, Proceedings, Volume 75, No 7, Pages 283-290, July 1978
- (44)[Γεωργίου, Ανθεκτικότητα σκυροδέματος και Ελληνικές πρακτικές κατασκευής, περίληψη εισήγησης στην ημερίδα με θέμα «Θέματα Τεχνολογίας Σκυροδέματος και Δομικών Χαλύβων με τα Νέα Ευρωπαϊκά Πρότυπα ΕΛΟΤ EN», Νοέμβριος 2004 ,](#)
- (45)http://iti.northwestern.edu/cement/monograph/Monograph5_1.html
- (46)[D. M. Roy, P. W. Brown, D. Shi, B. E. Scheetz, W. May, Concrete Microstructure Porosity and Permeability, National Research Council, Washington, DC 1993](#)
- (47)[ESCI, Expanded Shale, Clay and Slate Institute, Chapter 6, Physical Properties of Structural Lightweight Concrete, April 2007](#)
- (48)[Min-Hong Zhang, Odd E. GjØrv, Microstructure of the interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste, Division of Building Materials, Trondheim Norway, December 1989](#)
- (49)[Corrosion of Embedded Metals, America's Cement Manufacturers](#)
- (50)[J. Alexandre Bogas, Sofia Real, Beatriz Ferrer, Biphasic carbonation behaviour of structural lightweight aggregate concrete produced with different type of binder, Cement and Concrete Composites, Volume 71, Pages 110-121, August 2016](#)
- (51)[Sofia Real, J. Alexandre Bogas, Jorge Pontes, Chloride migration in structural lightweight aggregate concrete produced with different binders, Construction and Building Materials, Volume 98, Pages 425-436, November 2015](#)
- (52)[Cristina Frazão, Aires Camões, Joaquim Barros, Delfina Gonçalves, Durability of steel fiber reinforces self-compacting concrete, 5th International Conference on the Concrete Future, May 2013](#)
- (53)[İlker Bekir Topçu, Tayfun Uygunoğlu, Effect of aggregate type on properties of hardened self-consolidating lightweight concrete \(SCLC\), Construction and Building Materials, Volume 24, Issue 7, Pages 1286-1295, July 2010](#)
- (54)[Hannele Kuosa, Miguel Ferreira, Markku Leivo, Freeze- thaw testing, CSLA Projekct- Task 1 Literature Review, August 2013](#)

- (55) [Piotr Berkowski, Marta Kosior-Kazberuk, Effect of Fiber on the Concrete Resistance to Surface Scaling Due to Cyclic Freezing and Thawing, XIV R-S-P seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering \(24RSP\) \(TFoCE 2015\), Volume 111, Pages 121-127, 2015](#)
- (56) [Sulphate Attack on Concrete- Process and Control of Sulphate Attack, theconstructor.org](#)
- (57) [James A. Farny, Beatrix Kerkhoff, Diagnosis and Control of Alkali- Aggregate Reactions in Concrete, Concrete Technology](#)
- (58) [Jenn-Chuan Chern, Chin-Huai Young, "Compressive creep and shrinkage of steel fibre reinforced concrete", International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Volume 11, Issue 4, Pages 205-214, November 1989](#)
- (59) [Barbara Kucharczyková, Ondřej Pospíchal, Petr Misák, Petr Daněk, Tomáš Vymazal, "Shrinkage of LWAC - Effect on Aggregate Absorption, Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Τσυχία, Μάιος 2010](#)
- (60) [O. Kayali, M.N. Haque, B. Zhu, "Drying shrinkage of fibre- reinforced lightweight aggregate concrete containing fly ash", Cement and Concrete Research, Volume 29, Issue 11, Pages 1835-1840, Νοέμβριος 1999](#)
- (61) [Remzi Sahin, Ramazan Demirboga, Habib Uysal, Rüstem Gül, "The effects of different cement dosages, slumps and pumice aggregate ratios on the compressive strength and densities of concrete", Cement and Concrete Research, Volume 33, Issue 8, Pages 1245-1249, Αύγουστος 2003](#)
- (62) [L.H. Nguyen, A.-L. Beaucour, S. Ortola, A. Noumowé, Influence of the volume fraction and the nature of fine lightweight aggregates on the thermal and mechanical properties of structural concrete, Construction and Building Materials, Volume 51, Pages 121-132, Ιανουάριος 2014](#)
- (63) [Moh Azhar, Azwar Manaf, Bambang Soegjono, Rice Husk Ash and Pumice in Lightweight Concrete of Engineering Materials to Improve Mechanical Strength Portland Cement Composites, International Journal of Civil and Environmental Engineering, Volume 14, Issue 3, Ιούνιος 2014](#)
- (64) [A. Yeginoball, K.G. Sobolev, S.V. Soboleva, M. Tokyay, "High Strength Natural lightweight Aggregate Concrete with Silica Fume", Special Publication, Volume 178, Pages 739-758, Ιανουάριος 1998](#)
- (65) [K. M. A. Hossain, S. Ahmed, M. Lachemi, "Lightweight concrete incorporating pumice based blended cement and aggregate: Mechanical and durability characteristics", Construction and Building Materials, Volume 25, Issue 3, Pages 1186-1195, Μάρτιος 2011](#)
- (66) [L. Gunduz, I. Ugur, "The effects of different fine and coarse pumice aggregate/cement ratios on the structural concrete properties without using any admixtures", Cement and Concrete Research, Volume 35, Issue 9, Pages 1859-1864, Σεπτέμβριος 2005](#)
- (67) [EuroLightCon, Mechanical Properties of LWAC compared with both NWC and HSC, Economic Design and Construction with Light Weight Aggregate Concrete, April 1988](#)
- (68) [Lakshmi Kumar Minapu, M. K. M. V. Ratnam, Dr. U. Rangaraju, "Experimental Study on Lightweight Aggregate Concrete with Pumice Stone, Silica Fume and Fly Ash as a Partial Replacement of Coarse Aggregate", International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology, Volume 3, Issue 12, Pages 18130-18138, Δεκέμβριος 2014](#)

- (69)[Oguz Akin Duzgun, Rustem Gul, Abdulkadir Cunevt Aydin, "Effect of steel fibers on the mechanical properties of natural lightweight aggregate concrete", Volume 59, Issue 27, Pages 3357-3363, Νοέμβριος 2005](#)
- (70)ASTM C39/C39M, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International
- (71)ASTM C496/C496M-11, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International
- (72)ASTM C78/C78M-15a, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third- Point Loading), ASTM International
- (73)ASTM C469/C469M-14, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, ASTM International
- (74)[ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ, "ΕΕ04 Πιλοτική παραγωγή σε μονάδα έτοιμου σκυροδέματος", Δομικό ελαφροσκυρόδεμα υψηλής επιτελεστικότητας με κίσηρη](#)

Παράρτημα Α

Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων ενότητας εργασίας ΕΕ05

Στην ενότητα εργασίας ΕΕ05 με τίτλο “Μετρήσεις χαρακτηρισμού κισσηροδέματος και ινοπλισμένου κισσηροδέματος σε αξονική και καμπτική καταπόνηση” πραγματοποιήθηκαν πέντε σκυροδετήσεις, καθεμία από τις οποίες έχει την συντομογραφία ΣΚ1,2-5. Οι σκυροδετήσεις αυτές βασίστηκαν στις μελέτες σύνθεσης που περιγράφονται στην ενότητα εργασίας ΕΕ04 με τίτλο “Πιλοτική παραγωγή σε μονάδα έτοιμου σκυροδέματος”. Συνεπώς η σκυροδέτηση ΣΚ1 αντιστοιχεί στη μελέτη σύνθεσης 15538, ενώ η ΣΚ2 αντιστοιχεί στη μελέτη σύνθεσης 15613. Τα δοκίμια που σκυροδετήθηκαν και δοκιμάσθηκαν σε θλίψη, βασίστηκαν στις εξής μελέτες σύνθεσης (της ενότητας εργασίας ΕΕ04): 15428, 15454, R15488, R15517, 15538, 15613, 15820 (το γράμμα R πριν τον αριθμό δηλώνει ότι η συγκεκριμένη σύνθεση περιέχει ίνες). Οι πίνακες που αντιστοιχούν σε αυτές τις μελέτες φαίνονται συνοπτικά παρακάτω:

Συστατικά (kg/m ³)	15428	15454	R15488	R15517	15538	15613	15820
Cement II42.5 Τοιμέντο II 42.5	406	477	423	414	443	430	467
Pumice 0-8 dry Κίσηρη ξηρή 0-8	854	665	856	858	876	901	649
Sand Άμμος	0	326	0	0	0	0	311
Fibers Ίνες	0	0	42	65	0	0	0
Pumice moist Περιεχόμενο νερό κίσηρης	271	215	302	242	223	200	198
Add water Πρόσθετο νερό	120	142	124	125	147	156	157
Superplasticizer Υπερρευστοποιητής	4,9	5,8	5,0	5,0	5,3	5,2	5,6
Retarded-plasticizer Επιβραδυντής	2,5	2,9	2,5	2,5	2,7	2,6	2,8
Pumice moist, wet-b (%) Ποσοστό υγρασίας κίσηρης (%)	24,1	24,1	26,1	22,0	20,3	18,2	23,1
Sand moist, wet-b (%) Ποσοστό υγρασίας άμμου (%)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Approximate density wet-b (kg/m³) Εκτιμώμενη πυκνότητα σε υγρή βάση (kg/m ³)	1659	1834	1755	1712	1698	1737	1790
Air calc. v/v (%) Ποσοστό περιεχόμενου αέρα (%)	10	6,9	5,3	11,2	9,9	10,2	8,6

Πίνακας Α.1 Ποσότητες (κ.β.) συστατικών συνθέσεων σκυροδέματος της ΕΕ04

Για τις συνθέσεις 15428, 15538 και R15488 η κατηγορία πυκνότητας είναι 1.6, ενώ για τις συνθέσεις 15454, R15517, 15613 και 15820 η κατηγορία είναι 1.8 σύμφωνα με τον Πίνακα 1.11 του EC2 (2004).

Οι δοκιμές αντοχής σε θλίψη πραγματοποιήθηκαν στη μηχανή θραύσης Topiract της Topi-Technik μέγιστου φορτίου 600 kN του ΕΟΣ ΕΜΠ. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι ίδια με αυτή που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3.1. Οι συγκεντρωτικοί Πίνακες αποτελεσμάτων, που περιέχουν πληροφορίες για την εκάστοτε σύνθεση του δοκιμίου, τις ημερομηνίες σκυροδέτησης και θραύσης αυτών, το βάρος και τη μέση αντοχή των συνθέσεων του ΚΔ, φαίνονται συνοπτικά παρακάτω:

Σύνθεση	Ημερομηνία σκυροδέτησης	Ημερομηνία θραύσης	Ηλικία (ημέρες)	F (kN)	Βάρος (kg)	f _c (MPa)	f _{cm} (MPa)	CV
15538	6/4/2015	4/5/2015	28	385	1.626	38.5	38.8	3%
				400.3	1.59	40		
				379.5	1.614	38		
15613	21/4/2015	20/5/2015	29	332	1.8215	33.2	32.9	2%
				334.5	1.7657	33.5		
				320.9	1.7568	32.1		
15820	18/5/2015	25/5/2015	7	358.5	1.8533	35.9	35.4	1%
				353.6	1.7858	35.4		
				349.6	1.8678	35.0		
	18/5/2015	15/6/2015	28	421.8	1.796	42.2	44.9	6%
				472.5	1.799	47.3		
				451.9	1.731	45.2		

Πίνακας Α.2 Αποτελέσματα δοκιμών θλιπτικής αντοχής κυβικών δοκιμίων 10x10x10 cm της ΕΕ05

Σύνθεση	Ημερομηνία σκυροδέτησης	Ημερομηνία θραύσης	Ηλικία (ημέρες)	F (kN)	Βάρος (kg)	f _c (MPa)
LC 25/28, 15428	17/3/2015	17/4/2015	31	250.9	2.569	31.9
LC 30/33, 15454	20/3/2015	21/4/2015	32	307.5	2.861	39.2
FLC 25/28, R15488 (40 kg/m ³)	27/3/2015	27/4/2015	31	253.6	2.708	32.3
FLC 30/33 R15517 (65 kg/m ³)	31/3/2015	28/4/2015	28	306.5	2.745	39.0
LC 25/28 15538	6/4/2015	4/5/2015	28	279.4	2.57	39.6
				153.1	2.566	19.5
				277	2.696	35.3

Πίνακας Α.3 Αποτελέσματα δοκιμών θλιπτικής αντοχής κυλινδρικών δοκιμίων Φ10/20 cm της ΕΕ05

Στην ενότητα εργασίας ΕΕ05 πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μέτρου ελαστικότητας του ΚΔ διαφόρων συνθέσεων. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στις δοκιμές του μέτρου ελαστικότητας έγινε σύμφωνα με το πρότυπο C 469-02 του ASTM. Η πειραματική διάταξη περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.3. Η μηχανή θραύσης που χρησιμοποιήθηκε είναι η Tonipact Toni-Technik μέγιστου φορτίου 600 kN. Για τη μέτρηση της κατακόρυφης παραμόρφωσης του κάθε δοκιμίου χρησιμοποιήθηκε μηκυσιόμετρο (LVDT – linear variable differential transformer) με ονομαστική ακρίβεια 2 μm . Το φορτίο και η παραμόρφωση λήφθηκαν σε Η/Υ με σύστημα καταγραφής HBM QuantumX MX840, με συχνότητα λήψης 50 Hz. Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών εκτίμησης του μέτρου ελαστικότητας των διαφόρων συνθέσεων κισσηροδέματος που αναπτύχθηκαν από τη LaFarge Beton:

Σύνθεση	Ημερομηνία σκυροδέτησης	Ημερομηνία θραύσης	Ηλικία (ημέρες)	f_k (MPa)	ϵ_{k1}	E_k (MPa)	E_{km} (MPa)
15538	6/4/2015	8/5/2015	32	27.87	0.0016	18454	14930
		11/5/2015	35	31.13	0.0033	12477	
		11/5/2015	35	23.03	0.0020	13860	
15428	17/3/2015	8/5/2015	52	28.82	0.0022	17033	16347
				29.99	0.0025	16322	
				37.54	0.0032	15687	
15454	20/3/2015	8/5/2015	49	34.98	0.0020	26679	24742
				42.25	0.0020	22806	
R15488 (40 kg/m^3)	27/3/2015	8/5/2015	42	29.57	0.0022	16756	17935
				26.07	0.0038	18000	
				23.88	0.0019	19049	
R15517 (65 kg/m^3)	31/3/2015	11/5/2015	41	36.72	0.0024	18230	17607
				36.61	0.0029	16741	
				31.27	0.0022	17850	
R15613 (40 kg/m^3)	21/4/2015	1/7/2015	71	26.17	0.0024	15474	15848
				27.75	0.0026	14700	
				34.91	0.0025	17369	

Πίνακας Α.4 Αποτελέσματα δοκιμών μέτρου ελαστικότητας της ΕΕ05

Για τον προσδιορισμό της καμπτικής αντοχής του ΚΔ πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της ενότητας εργασίας ΕΕ05 δοκιμές κάμψης τριών σημείων (καμπτική εφελκυστική αντοχή). Τα δοκίμια που δοκιμάστηκαν ήταν πρισματικά διαστάσεων 100x100x500 mm. Η δοκιμές κάμψης τριών σημείων έγιναν σύμφωνα με το ASTM C293-02 με καθαρό μήκος ανοίγματος (από στήριξη σε στήριξη) 350 mm. Στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα συνοψίζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών αποτίμησης της

καμπτικής εφελκυστικής συμπεριφοράς τριών σημείων του ΚΔ διαφόρων συνθέσεων, καθώς και οι ημερομηνίες σκυροδέτησης και θραύσης των δοκιμών.

Σύνθεση	Ημερομηνία σκυροδέτησης	Ημερομηνία θραύσης	Ηλικία (ημέρες)	maxP (kN)	M (kNm)	$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{ct,fl}$ (MPa) (ASTM C293)	$f_{ctm,fl}$ (MPa)	CV
15488	17/3/2015	27/4/2015	41	8.5	0.74	4.5	4.5	3.5	0.26
				6.2	0.54	3.3	3.3		
				5.2	0.46	2.7	2.7		
15454	20/3/2015	27/4/2015	38	9.1	0.80	4.8	4.8	3.2	0.43
				5.1	0.45	2.7	2.7		
				4.2	0.37	2.2	2.2		

Πίνακας Α.5 Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης τριών σημείων της ΕΕ05

Στο πλαίσιο της ενότητας εργασίας ΕΕ05 πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής του ΚΔ διαφόρων συνθέσεων δοκιμές σε διάρρηξη. Οι δοκιμές σε διάρρηξη έγιναν σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C496 σε κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 100 mm και ύψους 200 mm και σε κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 150 mm και ύψους 300 mm. Χρησιμοποιήθηκε η μηχανή θραύσης toni του ΕΟΣ για τα δοκίμια διαμέτρου 100 mm, ενώ για τα δοκίμια διαμέτρου 150 mm η μηχανή Avery. Η toni είναι προγραμματισμένη να σταματάει την πίεση αυτόματα, όταν συμβεί απότομη αύξηση της μετατόπισης (δηλαδή όταν το δοκίμιο πρακτικά αστοχήσει). Στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα συνοψίζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών διάρρηξης του ΚΔ διαφόρων συνθέσεων, οι ημερομηνίες σκυροδέτησης και θραύσης των δοκιμών καθώς και οι αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από τις διατάξεις του EC2.

Σύνθεση	Ημερομηνία σκυροδέτησης	Ημερομηνία θραύσης	Ηλικία (ημέρες)	Παρατηρήσεις	F (kN)	$f_{ct,sp}$ (MPa)	$f_{ctm,sp}$ (MPa)	$\sigma/f_{ctm,sp}$ (σ: τυπική απόκλιση)	Άνω όριο κατηγορίας πυκνότητας	η_1	F_{ctm} (για άοπλο) (MPa)					
LC25/28, 15428	17/3/2015	17/4/2015	31	-	89.6	2.87	2.87	-	1600	0.836	2.42					
	20/3/2015	21/4/2015	32	Δεν έσπασε ομοιόμορφα	50.13	1.58	1.59	0.006	1800	0.891	2.87					
				-	47.06	1.59										
LC 25/28, 15538	6/4/2015	4/5/2015	28	-	42.7	1.33	1.88	0.220	1600	0.836	2.42					
				-	51.5	1.63										
				-	54.6	1.74										
		8/5/2015	32	Χάθηκε λόγω λανθασμένης ρύθμισης της μηχανής θραύσης	-	-						1.88	0.220	1600	0.836	2.42
				-	134	1.91										
				-	177.7	2.51										
	4/6/2015	59	-	150	2.12	2.11	0.010	1600	0.836	2.42						
			-	147.8	2.09											
FLC25/28, R15488 (40 kg/m ³)	27/3/2015	27/4/2015	31	Η πρέσσα στάματησε στα 84.1 kN	117.9	3.95	3.68	0.104	1600	0.836	2.42					
				-	101.2	3.41										
FLC30/33 R15517 (65 kg/m ³)	31/3/2015	28/4/2015	28	Στάματησε στα 73 kN και έγινε επανεκκίνηση	79.1	2.68	3.05	0.174	1800	0.891	2.57					
				-	102.3	3.43										

Πίνακας Α.6 Αποτελέσματα δοκιμών διάρρηξης της ΕΕ05

Στο πλαίσιο της ενότητας εργασίας ΕΕ05 πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές εκτίμησεις του λόγου Poisson του ΚΔ διαφόρων συνθέσεων. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στις δοκιμές του λόγου Poisson έγινε σύμφωνα με το πρότυπο C469-02 του ASTM. Στην πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές εκτίμησης του μέτρου ελαστικότητας και περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.3, προστέθηκε και στερεώθηκε επί του δοκιμίου στέλεχος μέσω του οποίου προσαρτήθηκε οριζόντιο

μηκυσιόμετρο, με σκοπό τη μέτρηση της εγκάρσιας διόγκωσης του δοκιμίου κατά την επιβολή της διαμήκους αξονικής δύναμης.

Με τις εν λόγω διατάξεις αποτιμήθηκε ο λόγος Poisson, ο οποίος ορίζεται μέσω της σχέσης $\nu = -\varepsilon_y/\varepsilon_z$, όπου ε_y η εγκάρσια παραμόρφωση (διόγκωση για τη δοκιμή θλίψης) και ε_z η κατακόρυφη παραμόρφωση. Οι τρόποι με τους οποίους επιτυγχάνεται τόσο η μέτρηση της κατακόρυφης παραμόρφωσης, όσο και της εγκάρσιας παραμόρφωσης περιγράφονται στα κεφάλαια 3.3 και 3.4 αντίστοιχα.

Για την καταγραφή των παραμορφώσεων χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρονικά μηκυσιόμετρα (electronic full bridge displacement transducer) μέγιστης μήκυνσης 5mm της RDP και καταγραφικό τύπου HBM QuantumX MX/840 8 καναλιών. Η συχνότητα καταγραφής επιλέχθηκε στα 20 Hz.

Τα δοκίμια φορτίστηκαν μονοτονικά μέχρι τη θραύση τους με ελεγχόμενες επιβαλλόμενες τάσεις με ρυθμό 2 kN/s και ο λόγος Poisson, μετρούμενος συνεχώς σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής, αποτιμήθηκε τη στιγμή που η τάση αντιστοιχούσε στο 40% της μέγιστης τάσης κατά την αστοχία. Όλα τα δοκίμια ήταν πρότυπων διαστάσεων είτε Φ10/20 cm για τα οποία χρησιμοποιήθηκε η μηχανή θραύσης του ΕΟΣ Τονίρακτ Τονί-Technik μέγιστου φορτίου 600 kN, είτε Φ15/30 cm για τα οποία χρησιμοποιήθηκε πρέσσα δυναμικότητας 600 τόνων της ΣΕΜΦΕ του ΕΜΠ. Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών αποτίμησης του λόγου Poisson των διαφόρων συνθέσεων ΚΔ που αναπτύχθηκαν από τη LaFarge Beton.

Σύνθεση	Ημερομηνία σκυροδέτησης	Ημερομηνία θραύσης	Ηλικία (ημέρες)	f_{ic} (MPa)	ε_{ic1}	E_{ic} (MPa)	ν	Μέση τιμή ν	CV
15820	18/5/2015	2/12/2015	198	35.80	0.0029	13749	0.204	0.185	12.9%
				41.55	0.0029	14515	0.192		
				47.22	0.0030	15980	0.158		
R15613	21/4/2015	8/12/2015	231	34.40	0.0029	13365	0.160	0.160	-
R15488 (40 kg/m³)	27/3/2015	8/12/2015	256	45.24	0.0025	19311	0.221	0.221	-
15428	17/3/2015	8/12/2015	266	35.14	0.0023	17353	0.297	0.297	-
15454s	20/3/2015	9/12/2015	264	44.85	0.0022	24993	0.212	0.212	-

Πίνακας Α.7 Αποτελέσματα δοκιμών αποτίμησης του λόγου Poisson της ΕΕ05

Παράρτημα Β

Διατάξεις κανονισμών για τον υπολογισμό του Μέτρου Ελαστικότητας

Σύμφωνα με τον αμερικανικό κανονισμό **ACI 318 Chapter 7.3 Elastic Properties** το μέτρο ελαστικότητας E_{lcm} του ΕΣ μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

- Για σκυροδέματα με πυκνότητες μεταξύ 1440 και 2500 kg/m³ και εύρος αντοχής μέχρι 35 MPa, το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$E = 0,043\rho^{1,5}\sqrt{f'_c} \quad \text{όπου } \rho = \text{πυκνότητα (kg/m}^3\text{)}$$

- Για σκυροδέματα με πυκνότητες μεταξύ 1440 και 2500 kg/m³ και εύρος αντοχής μεγαλύτερο από 35 MPa, ο τύπος του υπολογισμού του μέτρου ελαστικότητας μεταβάλλεται ως εξής:

$$E = C * \rho^{1,5}\sqrt{f'_c} \quad \text{όπου } C=0.040 \text{ για θλιπτική αντοχή } 35 \text{ MPa}$$

$$C=0.038 \text{ για θλιπτική αντοχή } 41 \text{ MPa}$$

για αντοχές μεγαλύτερες των 41 MPa ο συντελεστής C λαμβάνεται 0.038

Σύμφωνα με το σουηδικό κανονισμό **BBK94, Section 2.4.4** το μέτρο ελαστικότητας ορίζεται ως εξής:

$$E_{lcm} = E * \frac{\rho}{2400} \quad \text{όπου } E = \text{το μέτρο ελαστικότητας του συμβατικού σκυροδέματος ίδιας αντοχής και } \rho \text{ την πυκνότητα του ΕΣ}$$

Ο ολλανδικός κανονισμός **CUR-Recommendation 39, Part I Section 6.1** ορίζει:

$$E_{lcm} = E * \left(\frac{\rho}{2300}\right)^{1,5}$$

