



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Διερεύνηση μεταβολής αντοχών δοκών οπλισμένου σκυροδέματος παρασκευασμένες με προσθήκη κίσηρης στην σύνθεση και μείωση του χονδρόκοκκου αδρανούς.



Φοιτητής: Μιχαήλ Κωνσταντίνος
ΑΜ: 44546551

Επιβλέπων Καθηγητές

Δρίβας Δημήτριος
Ρεπαπής Κωνσταντίνος

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, 2022



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

Diploma Thesis

Research on the bending endurance of reinforced concrete beams constructed with the addition of pumice to the composition and reduction of coarse aggregate.



Student: Michelis Konstantinos
Registration Number: 44546551

Supervisors

Drivas Demitrios
Constantinos Repapis

ATHENS-EGALEO, 2022

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Νικόλαος Πνευματικός Αναπληρωτής Καθηγητής	Κωνσταντίνος Ρεπαπής Αναπληρωτής Καθηγητής	Δημήτριος Δρίβας Επιβλέπων

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και ΜΙΧΕΛΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ,
ΙΟΥΛΙΟΣ, 2022**

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΜΙΧΕΛΗΣ του ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΥ, με αριθμό μητρώου 44546551 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Η παρούσα Διπλωματική Εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του μαθήματος του Οπλισμένου Σκυροδέματος του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής κατά το χρονικό διάστημα μεταξύ Σεπτεμβρίου 2021 και Ιανουαρίου του 2022 υπό την επίβλεψη του κυρίου Δρίβα Δημήτριου.

Η Πειραματική διερεύνηση, της οποίας τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα κεφάλαια που θα ακολουθήσουν, διεξάχθηκε στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Με την αφορμή αυτή, θα ήθελα να ευχαριστήσω το προσωπικό του Εργαστηρίου για τη βοήθεια που μου προσέφερε κατά την εκτέλεση των δοκιμών αυτών.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω γονείς, φίλους και συμφοιτητές οι οποίοι με τον τρόπο τους βοήθησαν καθοριστικά στην εκπόνηση της εργασίας αυτής

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε πειραματική διερεύνηση των καμπτικών αντοχών δοκών οπλισμένου σκυροδέματος με μείωση του χονδρόκοκκου αδρανούς και προσθήκη κίσηρης.

Στα πειραματικά πλαίσια της έγινε σύγκριση των καμπτικών αντοχών 9 δοκών οπλισμένου σκυροδέματος παρασκευασμένες με σύνθεση σκυροδέματος με προσθήκη κίσηρης και ελάττωση των χονδρόκοκκων αδρανών. Πραγματοποιήθηκε σύγκριση των τιμών που προέκυψαν από σύνθεση σκυροδέματος κατηγορίας C16/20 με τσιμέντο τύπου CEM II/B-M (P-L-W) 42.5N EN197-1 , λόγο νερού προς τσιμέντο 0,7 και ωρίμανση αντοχών σύμφωνα με τους κανονισμούς, με τις τιμές που προέκυψαν από τις σκυροδετήσεις κίσηροδέματος με λόγο νερού προς τσιμέντο 0,7 και ωρίμανση αντοχών ίδιας περιόδου. Ο στόχος της εργασίας είναι ο προσδιορισμός του κατά πόσο είναι εφικτή η παρασκευή οπλισμένων δοκών κίσηροδέματος με μειωμένο βάρος και παρόμοιες καμπτικές αντοχές προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ως δευτερεύον η και πρωτεύων δομικό στοιχείο σε κατασκευές σκυροδέματος, προσφέροντας πλεονεκτήματα τόσο στην μεταφορά όσο και στον οικονομικό κομμάτι της κατασκευής μειώνοντας σημαντικά το κόστος του προϋπολογισμού.

Λέξεις κλειδιά

Σκυρόδεμα, Κίσηρη (ελαφρόπετρα), χάλυβας οπλισμού, αντοχή σε κάμψη, ελαφροσκυρόδεμα, Δοκός οπλισμένου σκυροδέματος , χονδρόκοκκο αδρανές (χαλίκι), σύνθεση σκυροδέματος

Abstract

The object of this research is the investigation of the bending endurance of reinforced concrete beams constructed with the addition of pumice and the reduction of coarse aggregates. For this study 9 lightweight reinforced concrete beams were constructed and compared with 3 reinforced concrete beams produced by C16/20 CEM II/B-M (P-L-W) 42.5N EN197-1 with water to concrete ratio 0,70. Lightweight beams had an endurance of 28 days and common concrete beams an endurance also of 28 days. Finally, the ultimate goal of this research is to determine whether lightweight reinforced beams can be used as construction materials of secondary or even primary structural elements in order to exploit their positive attributes such as less weight which will help extremely with transportation, and also exploit their economic advantages by reducing the costs and making the overall budget of the construction more affordable.

Key Words

Concrete, pumice, reinforcing bar, bending strength, lightweight concrete, reinforced steel beam, coarse aggregate, concrete mixture

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο – ΤΣΙΜΕΝΤΟ- ΑΔΡΑΝΗ.....	12
1.1 Τσιμέντο.....	12
1.1.1 Φυσικοχημικές ιδιότητες τσιμέντου.....	13
1.1.2 Λεπτότητα τσιμέντου.....	13
1.1.3 Αντοχή Τσιμέντου.....	13
1.1.4 Συμπιεσμένη δύναμη (Comprehensive strength).....	13
1.1.5 Χρόνος Πήξης Τσιμέντου.....	14
1.1.6 Θερμότητα Ενυδάτωσης (Heat of Hydration).....	14
1.1.7 Απώλεια Ανάφλεξης (Loss of Ignition).....	15
1.1.8 Χύδην πυκνότητα (Bulk Density).....	15
1.1.9 Ειδικό Βάρος (Σχετική Πυκνότητα).....	15
1.1.10 Χημικές Ιδιότητες.....	15
1.2 Σύνθεση Κλίνκερ.....	17
1.2.1 Τύποι κλίνκερ.....	17
1.3 Πρόσθετα Τσιμέντου.....	19
1.3.1 Ιπτάμενη τέφρα.....	20
1.3.2 Πυριτική Παιπάλη.....	20
1.3.3 Σκωρία Υψικαμίνου.....	21
1.4 Αδρανή.....	21
1.4.1 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα με βάση την προέλευση και το υλικό τους.....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο - ΧΑΛΥΒΑΣ.....	26
2.1 Χάλυβας Οπλισμού Σκυροδέματος.....	26
2.1.1 Ποιότητες Χάλυβα.....	27
2.1.2 Μέθοδοι παραγωγής Χάλυβα.....	29
2.2 Μηχανικές Ιδιότητες Χάλυβα.....	31
2.3 Πρότυπα Χάλυβα οπλισμού Σκυροδέματος κατά ΕΛΟΤ.....	33
2.3.1 Στοιχεία και διαφορές που εντάσσουν τα πρότυπα (1421 1-3)	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	37
3.1 Σκυρόδεμα.....	37
3.2 Νωπό Σκυρόδεμα-Σύνθεση.....	38
3.3 Ανάμιξη Σκυροδέματος.....	39
3.4 Νερό Αναμίξεως.....	39
3.5 Πρόσθετα Σκυροδέματος.....	40
3.5.1 Ρευστοποιητές.....	40
3.5.2 Αερακτικά.....	40
3.5.3 Επιβραδυντές.....	40
3.5.4 Επιταχυντές.....	41
3.5.5 Υπερευστοποποιητές.....	41

3.6 Εργασιμότητα Σκυροδέματος.....	41
3.7 Ιδιότητες Σκυροδέματος κατά (ΕΚΩΣ 2000)	43
3.7.1 Θλιπτική Αντοχή.....	43
3.7.2 Μέτρο ελαστικότητας	44
3.7.3 Παραμορφώσεις	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο - ΚΙΣΣΗΡΗ.....	46
4.1 Κίσηρης – Χημική σύσταση	46
4.2 Κίσηρης στην Ελλάδα και Ελαφροσκυρόδεμα.....	47
4.2.1 Απόθεμα κίσηρης στην Ελλάδα	47
4.2.2 Ελαφροσκυρόδεμα	47
4.3 Συστατικά Ελαφροσκυροδέματος.....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	50
5.1 Περιγραφή	50
5.2 Υλικά-Μελέτη Σύνθεσης.....	50
5.3 Δοκίμια.....	52
5.4 Μέτρηση Θλιπτικής αντοχής.....	58
5.5 Δοκιμή Κάμψης -Μέτρηση Αντοχών	60
5.6 Πειραματικά Αποτελέσματα.....	67
5.6.1 Κυβικά Δοκίμια	67
5.6.2 Γραμμικά Δοκίμια (Δοκοί).....	68
5.6.3 Διαγράμματα συμβατικών-πειραματικών δοκών	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο -ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	73
6.1 Συμβατικά γραμμικά δοκίμια.....	74
6.1.1 Δοκός VR-1	74
6.1.2 Δοκός VR-2	74
6.1.3 Δοκός VR-3	74
6.2 Πειραματικά γραμμικά δοκίμια	74
6.2.1 Πειραματική Δοκός KS-1	74
6.2.2 Πειραματική Δοκός KS-2	75
6.2.3 Πειραματική Δοκός KS-3	75
6.2.4 Πειραματική Δοκός KS-4	75
6.2.5 Πειραματική Δοκός KS-5	75
6.2.6 Πειραματική Δοκός KS-6	75
6.2.7 Πειραματική Δοκός KS-7	76
6.2.8 Πειραματική Δοκός KS-8	76
6.2.9 Πειραματική Δοκός KS-9	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	79
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	80

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1. Κύρια είδη τσιμέντου	12
Πίνακας 2. Απαιτήσεις Αντοχών	13
Πίνακας 3. Χαρακτηριστικά των αδρανών	25
Πίνακας 4. Όρια εφελκυσμού χάλυβα.....	31
Πίνακας 5. Έλεγχοι χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος κατά ΕΛΟΤ 959 - ΕΛΟΤ 971 και κατά ΕΛΟΤ EN 10080, ΕΛΟΤ 1421- 2, ΕΛΟΤ 1421- 3.	36
Πίνακας 6. Κατηγορίες σκυροδέματος.....	43
Πίνακας 7. Εφελκυστική αντοχή σε ΜΡα.....	44
Πίνακας 8. Μέτρο ελαστικότητας σε GPa.....	44
Πίνακας 9. Σύσταση Κίσηρης	46
Πίνακας 10. Ποσότητες διερχόμενων αδρανών από τα κόσκινα που χρησιμοποιήθηκαν	50
Πίνακας 11. Διερεύνηση της μεταβολής της θλιπτικής αντοχής των 3 δοκιμίων, συμβατικών και με δοκίμια με προσθήκη κίσηρης.....	67
Πίνακας 12. Φορτία και ύψη συμβατικών γραμμικών δοκιμίων.....	68
Πίνακας 13. Φορτία και στατικά ύψη πειραματικών γραμμικών δοκιμίων.....	68
Πίνακας 14 . Μέγιστες ροπές αντοχής συμβατικών δοκιμίων.....	76
Πίνακας 15. Μέγιστες ροπές αντοχής Δοκών με κίσηρη.....	76

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1. Οικοδομικό Κλινκερ	19
Εικόνα 2. Πυριτική παιπάλη από μικροσκόπιο	20
Εικόνα 3. Θραυστά αδρανή υλικά.	23
Εικόνα 4. Χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος.....	27
Εικόνα 5. Διάγραμμα τάσεων για δυο περιπτώσεις χάλυβα	29
Εικόνα 6. Σχεδιάγραμμα μεθόδου	30
Εικόνα 7. Λόγος Poisson	33
Εικόνα 8. Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων σκυροδέματος	45
Εικόνα 9. Τομή γραμμικού δοκιμίου(δοκού)	52
Εικόνα 10. Κάτοψη γραμμικού δοκιμίου(δοκού).....	53
Εικόνα 11. Μήτρες κυβικών δοκιμίων	53

Εικόνα 12. Ξυλότυπος γραμμικού δοκιμίου και οπλισμός.....	54
Εικόνα 13. Ξυλότυπος γραμμικού δοκιμίου και οπλισμός.....	55
Εικόνα 14. Ανάμιξη μείγματος σκυροδέματος σε ηλεκτρική μπετονιέρα, διάστρωση και συντήρηση δοκιμίων στο νερό	56
Εικόνα 15.	57
Εικόνα 16. Ζυγαριά Μέτρησης βάρους & διαστάσεις κυβικού δοκιμίου	557
Εικόνα 17. Διάταξη μηχανής μονοαξονικής κάμψης στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του Π.Α.Δ.Α	58
Εικόνα 18. Παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό κυβικό δοκίμιο μετά το πέρας της δοκιμής σε μονοαξονική θλίψη και παρατηρείται η σχετική «ρηγματώση»του.	59
Εικόνα 19. Πειραματική διάταξη δοκιμίου και σχεδιάγραμμα φόρτισης	60
Εικόνα 20. Συμβατικό δοκίμιο 1.	61
Εικόνα 21. Συμβατικό δοκίμιο 2.	62
Εικόνα 22. Συμβατικό δοκίμιο 3.	62
Εικόνα 23. Πειραματική δοκός κίςσης 1.	63
Εικόνα 24. Πειραματική δοκός κίςσης 2	64
Εικόνα 25. Πειραματική δοκός κίςσης 3.	64
Εικόνα 26. Πειραματική δοκός κίςσης 4.	65
Εικόνα 27. Πειραματική δοκός κίςσης 5.	65
Εικόνα 28. Πειραματική δοκός κίςσης 6.	66
Εικόνα 29. Πειραματική δοκός κίςσης 7, 8 και 9.	66
Εικόνα 30. Σύγκριση αντοχών κυβικών δοκιμίων	67
Εικόνα 31. Διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης Δοκιμίου 1	69
Εικόνα 32. Διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης Δοκιμίου 2.....	69
Εικόνα 33. Διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης Δοκιμίου 3.....	69
Εικόνα 34. Διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης Δοκιμίου κίςσης 1.....	70
Εικόνα 35. Διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης Δοκιμίου κίςσης 2.....	70
Εικόνα 36. Διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης Δοκιμίου κίςσης 4.....	70
Εικόνα 37. Διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης Δοκιμίου κίςσης 5.....	71
Εικόνα 38. Διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης Δοκιμίου κίςσης 6.....	71
Εικόνα 39. Διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης Δοκιμίου κίςσης 7.....	71
Εικόνα 40. Διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης Δοκιμίου κίςσης 8.....	72
Εικόνα 41. Διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης Δοκιμίου κίςσης 9.....	72

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο – ΤΣΙΜΕΝΤΟ- ΑΔΡΑΝΗ

1.1 Τσιμέντο

Το τσιμέντο αποτελεί ένα από τα κυριότερα ίσως και το κυριότερο υλικό στην οικοδομική βιομηχανία. Με γνώμονά τα στοιχεία της 'Ένωσης Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος' [1], και παράλληλα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 89/106, από 01/04/01 τα τσιμέντα που υπάρχουν διαθέσιμα σε όλες τις χώρες της Ε.Ε υποχρεούνται να είναι πιστοποιημένα, να φέρουν εμφανώς την ένδειξη «CE» και να συμφωνούν με τα παρακάτω εν ενεργεία Ευρωπαϊκά Πρότυπα (EN 197-1 : Τσιμέντο Μέρος - 1 : "Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για κοινά τσιμέντα" και EN 197-2 : Τσιμέντο Μέρος - 2 : "Αξιολόγηση συμμόρφωσης"). Κατά την παραγωγή του τσιμέντου γίνεται αξιοποίηση διαφόρων πρώτων υλών αλλά και κάποιων προσθέτων χημικών ή φυσικών όπως (ποζολάνη, ιπτάμενη τέφρα - πυριτική ή ασβεστολιθική, σκωρία υψικαμίνου). Η διαθεσιμότητα των πρώτων υλών καθώς και οι διαφορετικές απαιτήσεις σε κάθε είδους εφαρμογή οδήγησαν στην δημιουργία και την παραγωγή των διαφορετικών τύπων τσιμέντων που παράγονται παγκοσμίως, όπως καθαρό ή αμιγές τσιμέντο, τσιμέντο με ποζολάνη, ιπτάμενη τέφρα, σκωρία υψικαμίνου, , πυριτική παιπάλη τα οποία περιέχονται στα πρότυπα. Γενικότερα υπάρχουν περίπου 27 τύποι τσιμέντων οι οποίοι δεν παράγονται και δεν κυκλοφορούν σε όλες τις χώρες , εξαιτίας κάποιων χαρακτηριστικών που αναφέρθηκαν παραπάνω .

Οι πέντε κύριοι τύποι τσιμέντου σύμφωνα με το πρότυπο EN 197-1 παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 1. Κύρια είδη τσιμέντου

Τύπος Τσιμέντου	Τίτλος
CEM I	Τσιμέντο Πόρτλαντ
CEM II	Σύνθετο Τσιμέντο Πόρτλαντ
CEM III	Σκωριοτσιμέντο
CEM IV	Ποζολανικό Τσιμέντο
CEM V	Σύνθετο Τσιμέντο

Η κατάταξη των τσιμέντων βάσει της πρώιμης και της τελικής θλιπτικής αντοχής τους σε σχέση με το χρόνο κατατάσσονται στις κατηγορίες που φαίνονται στον Πίνακα 2. Στον Πίνακα αυτόν παρουσιάζονται επίσης χρόνος πήξης και η διαστολή του τσιμέντου.

Πίνακας 2. Απαιτήσεις αντοχών.

Κατηγορία Αντοχής	Αντοχή στη θλίψη (MPa)				Διόγκωση (mm)
	Αρχική Αντοχή		Τυπική Αντοχή		
	2 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες		
32.5 N	-	> 16.0	>32.5	>52.5	< 10
32.5 R	>10	-			
42.5 N	>10	-	>42.5	>62.5	
42.5 R	>20	-			
52.5 N	>20	-	>52.5	-	
52.5 R	>30	-			

1.1.1 Φυσικοχημικές ιδιότητες τσιμέντου.

Σε αυτή την υπό-ενότητα, θα παρουσιαστούν οι φυσικές και χημικές ιδιότητες του τσιμέντου και θα παρατεθούν ευρήματα από την διεθνή βιβλιογραφία. Οι κύριες φυσικές ιδιότητες του τσιμέντου συνοψίζονται στις εξής [2]:

1.1.2 Λεπτότητα τσιμέντου

Η λεπτότητα του τσιμέντου αναφέρεται στο μέγεθος των σωματιδίων του (κόκκοι). Η απαιτούμενη λεπτότητα του τσιμέντου επιτυγχάνεται με την άλεση του κλίνκερ στο τελικό βήμα της διαδικασίας παραγωγής τσιμέντου. Καθώς ο ρυθμός ενυδάτωσης του τσιμέντου σχετίζεται άμεσα με το μέγεθος των κόκκων του, η λεπτότητα του τσιμέντου επηρεάζει άμεσα το πόσο ανθεκτικό είναι .

1.1.3 Αντοχή Τσιμέντου

Μετρώνται τρεις τύποι αντοχής τσιμεντοκονίας – θλιπτική, εφελκυστική και κάμψη. Διάφοροι παράγοντες επηρεάζουν την αντοχή, όπως η αναλογία νερού-τσιμέντου, η αναλογία τσιμέντου-λεπτού αδρανούς, οι συνθήκες σκλήρυνσης, το μέγεθος και το σχήμα ενός δείγματος, ο τρόπος χύτευσης και ανάμειξης, οι συνθήκες φόρτωσης και η ηλικία. Κατά τη δοκιμή της αντοχής, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα ακόλουθα: Η αντοχή της τσιμεντοκονίας και η αντοχή του τσιμέντου δεν σχετίζονται άμεσα. Η αντοχή του τσιμέντου είναι απλώς ένα μέτρο ποιοτικού ελέγχου. Οι δοκιμές αντοχής γίνονται σε μείγμα τσιμεντοκονίας και όχι σε τσιμεντοπολτό. Η αντοχή του τσιμέντου μεγαλώνει με το πέρασ του χρόνου γιατί τον λόγο πρέπει να αναφέρεται ο συγκεκριμένος χρόνος εκτέλεσης της δοκιμής.

1.1.4 Συμπιεσμένη δύναμη (Comprehensive strength)

Είναι η πιο κοινή δοκιμή αντοχής. Λαμβάνεται ένα δείγμα δοκιμής και υποβάλλεται σε συμπιεστικό φορτίο μέχρι την αστοχία. Η ακολουθία φόρτωσης πρέπει να είναι εντός 20 δευτερολέπτων και 80 δευτερολέπτων.

Τυπικές δοκιμές:

AASHTO T 106 και ASTM C 109: Θλιπτική Αντοχή Υδραυλικών Τσιμεντοκονιαμάτων (Χρησιμοποιώντας Δείγματα Κύβων 50 mm ή 2 ιντσών)

ASTM C 349: Αντοχή σε θλίψη υδραυλικών τσιμεντοκονιών (χρησιμοποιώντας τμήματα πρισμάτων σπασμένα σε κάμψη).

1.1.5 Χρόνος Πήξης Τσιμέντου

Το τσιμέντο πήζει και σκληραίνει όταν γίνεται προσθήκη νερού και ανάμιξη . Αυτός ο χρόνος πήξης μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με πολλούς παράγοντες, όπως λεπτότητα τσιμέντου, αναλογία τσιμέντου-νερού, χημική περιεκτικότητα και τυχόν πρόσμικτα που έχουν προστεθεί. Το τσιμέντο που χρησιμοποιείται στην κατασκευή θα πρέπει να έχει έναν αρχικό χρόνο πήξης όχι πολύ χαμηλό και έναν τελικό χρόνο πήξης όχι πολύ υψηλό. Επομένως, μετρούνται δύο χρόνοι ρύθμισης:

Αρχικό σετ: Όταν η πάστα αρχίζει να σκληραίνει αισθητά (συνήθως εμφανίζεται μέσα σε 30-45 λεπτά)

Τελικό σετ: Όταν το τσιμέντο σκληραίνει, μπορεί να αντέξει κάποιο φορτίο (συμβαίνει κάτω από 10 ώρες)

Και πάλι, ο χρόνος πήξης μπορεί επίσης να είναι ένας δείκτης του ρυθμού ενυδάτωσης.

Τυπικές δοκιμές:

AASHTO T 131 και ASTM C 191: Χρόνος πήξεως τσιμέντου με βάση Vicat Needle

AASHTO T 154: Χρόνος πήξεως τσιμέντου με βάση Gillmore Needles

ASTM C 266: Χρόνος πήξεως τσιμέντου με βάση Gillmore Needles

1.1.6 Θερμότητα Ενυδάτωσης (Heat of Hydration)

Όταν προστίθεται νερό στο τσιμέντο, η αντίδραση που λαμβάνει χώρα ονομάζεται ενυδάτωση. Η θερμότητα που παράγεται εξαιτίας της ενυδάτωσης , έχει την δυνατότητα επιρροής της ποιότητας του τσιμέντου και επίσης να είναι ευεργετική στη διατήρηση της θερμοκρασίας σκλήρυνσης κατά τη διάρκεια του κρύου καιρού. Αντιθέτως όταν η θερμότητα που παράγεται είναι υψηλή, ειδικά σε μεγάλες κατασκευές, μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητη καταπόνηση. Η θερμότητα της ενυδάτωσης επηρεάζεται περισσότερο από τα C3S και C3A που υπάρχουν στο τσιμέντο, καθώς και από την αναλογία νερού-τσιμέντου, τη λεπτότητα και τη θερμοκρασία σκλήρυνσης. Η θερμότητα ενυδάτωσης του τσιμέντου Portland υπολογίζεται με τον προσδιορισμό της διαφοράς μεταξύ του ξηρού και του μερικώς ενυδατωμένου τσιμέντου (που λαμβάνεται συγκρίνοντάς τα την 7η και την 28η ημέρα).

Τυπική δοκιμή: ASTM C 186: Θερμότητα Ενυδάτωσης Τσιμέντου

1.1.7 Απώλεια Ανάφλεξης (Loss of Ignition)

Η θέρμανση ενός δείγματος τσιμέντου στους 900 - 1000°C (δηλαδή μέχρι να επιτευχθεί σταθερό βάρος) προκαλεί απώλεια βάρους. Αυτή η απώλεια βάρους κατά τη θέρμανση υπολογίζεται ως απώλεια ανάφλεξης. Η ακατάλληλη και παρατεταμένη αποθήκευση ή νοθεία κατά τη μεταφορά μπορεί να οδηγήσει σε προ-ενυδάτωση και ενανθράκωση, τα οποία και τα δύο μπορεί να υποδεικνύονται από αυξημένη απώλεια ανάφλεξης.

Τυπική δοκιμή: AASHTO T 105 και ASTM C 114: Χημική Ανάλυση Τσιμέντου

1.1.8 Χύδην πυκνότητα (Bulk Density)

Όταν το τσιμέντο αναμειγνύεται με νερό, το νερό αντικαθιστά περιοχές όπου κανονικά θα υπήρχε αέρας. Εξαιτίας αυτού, η χύδην πυκνότητα του τσιμέντου δεν είναι πολύ σημαντική. Το τσιμέντο έχει ποικίλο εύρος πυκνότητας ανάλογα με το ποσοστό της σύστασης του τσιμέντου. Η πυκνότητα του τσιμέντου μπορεί να είναι οπουδήποτε από 62 έως 78 λίβρες ανά κυβικό πόδι.

1.1.9 Ειδικό Βάρος (Σχετική Πυκνότητα)

Το ειδικό βάρος χρησιμοποιείται γενικά στους υπολογισμούς αναλογίας μείγματος. Το τσιμέντο Portland έχει ειδικό βάρος 3,15, αλλά άλλοι τύποι τσιμέντου (για παράδειγμα, τσιμέντο Portland-υφικαμίνων-σκωρία και Portland-ποζολανικό τσιμέντο) μπορεί να έχουν ειδικό βάρος περίπου 2,90.

Τυπική δοκιμή: AASHTO T 133 και ASTM C 188: Πυκνότητα Τσιμέντου

1.1.10 Χημικές Ιδιότητες

Οι χημικές ιδιότητες του τσιμέντου παρατίθενται με βάση τις αναφορές [3], [4] και [5] παρακάτω:

Οι βασικότερες πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται κατά την παραγωγή τσιμέντου είναι ασβεστόλιθος (ασβέστιο), άμμος ή πηλός (πυρίτιο), βωξίτης (αλουμίνιο) και σιδηρομετάλλευμα και μπορεί να περιλαμβάνουν, κιμωλία, μάργα, σχιστόλιθο, άργιλο, κα. Η χημική ανάλυση των πρώτων υλών τσιμέντου παρέχει μια εικόνα για τις χημικές ιδιότητες του τσιμέντου.

Αργλικό τριασβέστιο (Tricalcium aluminate) (C_3A)

Η χαμηλή περιεκτικότητα σε C_3A καθιστά το τσιμέντο ανθεκτικό στο θειικό άλας. Ο γύψος μειώνει την ενυδάτωση του C_3A , το οποίο απελευθερώνει πολλή θερμότητα στα αρχικά στάδια της ενυδάτωσης. Το C_3A δεν συμμετέχει σημαντικά στην αντοχή.

Τσιμέντο τύπου I: περιέχει έως και 3,5% SO_3 (σε τσιμέντο που έχει περισσότερο από 8% C_3A)

Τσιμέντο τύπου II: περιέχει έως και 3% SO_3 (σε τσιμέντο με λιγότερο από 8% C_3A)

Πυριτικό τριασβέστιο (Tricalcium silicate) (C_3S)

Το C_3S προκαλεί ταχεία ενυδάτωση καθώς και σκλήρυνση και είναι υπεύθυνο για την πρώιμη αντοχή του τσιμέντου όταν αποκτά μια αρχική πήξη.

Πυριτικό όξινο ασβέστιο (Dicalcium silicate) (C_2S)

Σε αντίθεση με το πυριτικό τριασβέστιο, το οποίο βοηθά στην πρώιμη αύξηση της αντοχής, το πυριτικό όξινο ασβέστιο στο τσιμέντο, βοηθά στην αύξηση της αντοχής μετά από μία εβδομάδα.

Φερρίτης (C_4AF)

Ο φερρίτης είναι ένας παράγοντας ροής. Μειώνει τη θερμοκρασία τήξης των πρώτων υλών στον κλίβανο από $3.000^{\circ}F$ σε $2.600^{\circ}F$. Αν και ενυδατώνεται γρήγορα, δεν συμβάλλει πολύ στην αντοχή του τσιμέντου.

Μαγνησία (MgO)

Η διαδικασία παραγωγής του τσιμέντου Portland χρησιμοποιεί τη μαγνήσια ως πρώτη ύλη σε εργοστάσια ξηρής επεξεργασίας. Μια περίσσεια ποσότητας μαγνήσιας μπορεί να καταστήσει το τσιμέντο ακατάλληλο αλλά λίγη ποσότητα μπορεί να προσθέσει αντοχή στο τσιμέντο. Η παραγωγή τσιμέντου με βάση το MgO προκαλεί επίσης λιγότερες εκπομπές CO_2 , όλο το τσιμέντο περιέχει 6% σε MgO .

Οξειδίο σιδήρου

Εκτός από την προσθήκη αντοχής και σκληρότητας, το οξειδίο του σιδήρου είναι κυρίως υπεύθυνο για το χρώμα του τσιμέντου.

Αλκάλια

Οι ποσότητες οξειδίου του καλίου (K_2O) και οξειδίου του νατρίου (Na_2O) καθορίζουν την περιεκτικότητα του τσιμέντου σε αλκάλια. Η μεγάλη περιεκτικότητα σε ποσότητες αλκαλίων μπορεί να προκαλέσει δυσκολίες στη ρύθμιση του χρόνου πήξης του τσιμέντου. Το χαμηλό αλκαλικό τσιμέντο όταν χρησιμοποιείται με χλωριούχο ασβέστιο στο σκυρόδεμα, μπορεί να προκαλέσει αποχρωματισμό. Στο τσιμέντο σκωρίας-άσβεστου, (slag-lime cement) η σκωρία υψικαμίνου που έχει υποβληθεί σε άλεση (κοκκοποίηση) δεν είναι από μόνη της ρευστή, αλλά «ενεργοποιείται» με την προσθήκη αλκαλίων. Υπάρχει ένα προαιρετικό όριο στη συνολική περιεκτικότητα σε αλκάλια 0,60%, που υπολογίζεται με την εξίσωση $Na_2O + 0,658 K_2O$.

Ασβέστης (Free lime)

Ο ελεύθερος ασβέστης, ο οποίος μερικές φορές υπάρχει στο τσιμέντο, μπορεί να προκαλέσει διαστολή.

Ατμοί πυριτίου (Silica fumes)

Ο καπνός πυριτίας προστίθεται στο τσιμέντο προκειμένου να βελτιωθεί μια ποικιλία ιδιοτήτων, η αντοχή στην τριβή και η αντοχή συγκόλλησης. Αν και ο χρόνος πήξης παρατείνεται με την προσθήκη καπνού πυριτίου, μπορεί να δώσει εξαιρετικά υψηλή αντοχή. Ως εκ τούτου, το τσιμέντο Portland που περιέχει 5-20% καπνό πυριτίας

παράγεται συνήθως για έργα και κατασκευές σκυροδέματος που απαιτούν υψηλή αντοχή.

1.2 Σύνθεση Κλίνκερ

Το κλίνκερ είναι ένα πορώδες υλικό που παράγεται στον κλίβανο, σαν υπό προϊόν, κατά την παραγωγή τσιμέντου και χρησιμοποιείται ως συνδετικό υλικό σε πολλά προϊόντα τσιμέντου. Οι κόκκοι του κλίνκερ έχουν συνήθως διάμετρο 3-25 mm και σκούρο γκρι χρώμα. Παράγεται με θέρμανση ασβεστόλιθου και αργίλου μέχρι το σημείο υγροποίησης στους περίπου 1400°C-1500°C στον περιστροφικό κλίβανο. Όταν το κλίνκερ αναμειχθεί κυρίως με νερό καθώς και με άλλα υλικά πχ. γύψο (για τον έλεγχο των σκληρυντικών ιδιοτήτων του τσιμέντου και τη διασφάλιση της αντοχής σε θλίψη) παράγεται τσιμέντο. Το κλίνκερ μπορεί να αποθηκευτεί για μεγάλες χρονικές περιόδους σε ξηρή κατάσταση χωρίς υποβάθμιση της ποιότητας του και ως εκ τούτου διακινείται διεθνώς και χρησιμοποιείται από τους κατασκευαστές τσιμέντου [10].

Η σύνθεση του κλίνκερ εξετάζεται με δύο ξεχωριστές προσεγγίσεις: Πρώτων, ορυκτολογική ανάλυση, με χρήση πετρογραφικής μικροσκοπίας ή/και ανάλυσης περίθλασης ακτινών «X» και δεύτερον, χημική ανάλυση, με μεγαλύτερη ακρίβεια με φασματομετρία φθορισμού ακτινών «X». Τα τέσσερα κύρια συστατικά του κλίνκερ είναι [11]:

Αλίτης: πυριτικό τριασβέστιο (συνήθως περίπου 65% του συνόλου)

Μπελίτης: όξινο πυριτικό ασβέστιο (συνήθως περίπου 15% του συνόλου)

Αλουμίνιο: αργιλικό τριασβέστιο (συνήθως περίπου 7% του συνόλου)

Φερρίτης: αλουμινοφερρίτης τετρασβεστίου (συνήθως περίπου 8% του συνόλου)

1.2.1 Τύποι κλίνκερ

Ο πιο συνηθισμένος τύπος κλίνκερ παράγεται για το τσιμέντο Portland και τα μείγματα του. Οι τύποι κλίνκερ ποικίλλουν ανάλογα με το είδος του τσιμέντου για το οποίο παράγεται το κλίνκερ. Εκτός από τα μείγματα τσιμέντου Portland, μερικοί ειδικοί τύποι κλίνκερ τσιμέντου παρατίθενται παρακάτω [12]:

- Κλίνκερ ανθεκτικό στα θειικά

Περιέχει 76% αλίτη, 5% μπελίτη, 2% αργιλικό τριασβέστιο, 16% αλουμινοφερρίτη τετρασβεστίου και 1% ελεύθερο οξείδιο του ασβεστίου. Η παραγωγή του έχει μειωθεί τα τελευταία χρόνια επειδή η αντοχή στα θειικά μπορεί εύκολα να επιτευχθεί με τη χρήση κοκκοποιημένης σκωρίας υψικαμίνου στην παραγωγή τσιμέντου.

- Κλίνκερ χαμηλής θερμότητας

Περιέχει 29% αλίτη, 54% μπελίτη, 2% αργιλικό τριασβέστιο και 15% αλουμινοφερρίτη τετρασβεστίου, με χαμηλή ποσότητα σε ελεύθερο ασβέστη. Δεν

παράγεται πλέον επειδή το τσιμέντο που παράγεται από συνηθισμένο κλίνκερ και αλεσμένη σκωρία υψικαμίνου έχει εξαιρετικές ιδιότητες χαμηλής θερμότητας.

- Λευκό Κλίνκερ

Περιέχει 76% αλίτη, 15% μπελίτη, 7% αργιλικό τριασβέστιο, καθόλου αλουμινοφερρίτη τετρασβεστίου και 2% ελεύθερο ασβέστη, αλλά η σύνθεση μπορεί να ποικίλλει πολύ. Το λευκό κλίνκερ παράγει λευκό τσιμέντο το οποίο χρησιμοποιείται για αισθητικούς σκοπούς στις κατασκευές. Η πλειοψηφία του λευκού τσιμέντου πηγαίνει σε εργοστασιακές εφαρμογές προχυτού σκυροδέματος.

- Κλίνκερ χαμηλού αλκαλίου

Η μείωση της περιεκτικότητας σε αλκάλια στο κλίνκερ γίνεται είτε με την αντικατάσταση της πηγής ακατέργαστου μίγματος αλουμίνας με άλλο συστατικό (έτσι αποκτώντας ένα πιο ακριβό υλικό από μια πιο μακρινή πηγή) είτε με την εγκατάσταση μιας "αλκαλικής διαρροής", η οποία περιλαμβάνει την αφαίρεση μέρους του συστήματος του κλιβάνου αέρια υψηλής θερμοκρασίας (τα οποία περιέχουν τα αλκάλια ως αναθυμιάσεις), με αποτέλεσμα κάποια σπατάλη θερμότητας.

- Τερνεσίτης (BCT)

Αυτή η ιδέα χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενός τύπου κλίνκερ με έως και 30% λιγότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Η ενεργειακή απόδοση βελτιώνεται και το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας για τη διαδικασία παραγωγής είναι επίσης περίπου 15% χαμηλότερο.

Οι συγγραφείς στην μελέτη [13], εξετάζουν τις προτεινόμενες τεχνικές προσεγγίσεις για την κατασκευή και τη χρήση του κλίνκερ στην δημιουργία τσιμέντου Portland, ως του κύριου δραστικού συνδετικού συστατικού για συνηθισμένες κατασκευές σκυροδέματος σε μη ειδικές εφαρμογές. Παράλληλα, παρέχει χαμηλότερες εκπομπές CO₂ κατά τη χρήση. Αυτή η ανάλυση, έλαβε υπόψη ένα ευρύ φάσμα τεχνικών εκτιμήσεων, και κατέληξε πως, υπάρχουν μόνο τέσσερις κατηγορίες εναλλακτικών συστημάτων κλίνκερ που αξίζουν σοβαρής προσοχής σε σχέση με τις μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος που σχετίζονται με το σκυρόδεμα:

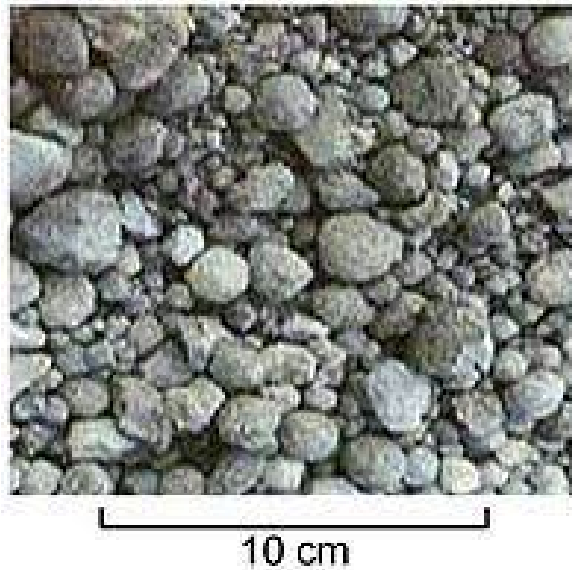
(Α) Αντιδραστικό κλίνκερ τσιμέντου Portland (RBPC)

(Β) Κλίνκερ Μπελίτη - Φερρίτη (BYF).

(Γ) Ανθρακούχο κλίνκερ πυριτικού ασβεστίου (CCSC)

(Δ) Οξειδία μαγνησίου που προέρχονται από πυριτικά άλατα μαγνησίου (MOMS)

Τα Α και Β είναι «υδραυλικά» κλίνκερ, (δηλαδή κλίνκερ που σκληραίνουν με αντίδραση με νερό), το Γ είναι ένα «ανθρακικό» κλίνκερ, (δηλαδή ένα που σκληραίνει κατά την αντίδραση με διοξείδιο του άνθρακα CO₂), το Δ μπορεί να συνδυαστεί και στις δύο κατηγορίες.



Εικόνα 1. Οικοδομικό κλίνκερ.

1.3 Πρόσθετα Τσιμέντου

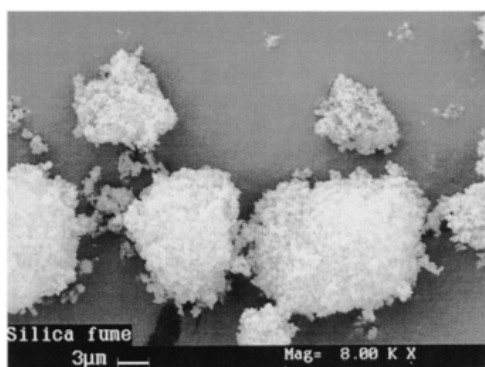
Τα τελευταία χρόνια, έρευνες έχουν δείξει, πως η απόδοση του τελικού προϊόντος βελτιώνεται με την χρήση πρόσθετων ουσιών-υλικών στο τσιμέντο. Τα σύνθετα αυτά τσιμέντα μπορούν να κατανεμηθούν σε διάφορους τύπους και η παραγωγή τους γίνεται ανάλογα με τις απαιτήσεις που υπάρχουν σε κάθε χώρα. Τα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται, τα οποία εμφανίζουν υδραυλικές ιδιότητες, είναι είτε αδρανή, είτε φυσικά υλικά όπως ο ασβεστόλιθος, είτε βιομηχανικά παραπροϊόντα, όπως η σκωρία υψικαμίνου, οι ιπτάμενες τέφρες και η πυριτική παιπάλη. Τα σύνθετα τσιμέντα Portland συμβάλλουν θετικά σε πολλές από τις ιδιότητες του σκυροδέματος ενώ παράλληλα πολλά από τα υλικά που χρησιμοποιούνται αποτελούν παραπροϊόντα που προέρχονται από άλλες βιομηχανικές διαδικασίες, και άρα έτσι αξιοποιούνται μειώνοντας και τα πιθανά περιβαλλοντικά προβλήματα που θα δημιουργούσε η απόρριψή τους. Για αυτούς του λόγους η παραγωγή και χρήση τους είναι πολύ διαδεδομένη. Επιπλέον, το κόστος παραγωγής των σύνθετων τσιμέντων είναι γενικότερα μικρότερο, η χρήση τους συμβάλλει στην εξοικονόμηση μεγάλου ποσοστού ενέργειας, πρώτων υλών και φυσικών πόρων, ενώ συγχρόνως οι εκπομπές διοξειδίου άνθρακα που είναι συνδεδεμένες με την παραγωγή κλίνκερ ελαττώνονται. Οι κυριότερες ιδιότητες που παρουσιάζουν τα σύνθετα τσιμέντα Portland είναι: παρουσιάζουν βελτιωμένη αντοχή σε θειικά και άλλα διαλύματα οξέων, έχουν χαμηλή θερμότητα ενυδάτωσης, βελτιώνουν κάποια χαρακτηριστικά του σκυροδέματος όπως η ανθεκτικότητά του και η προστασία οπλισμού, ενώ αναπτύσσονται κι οι αντοχές. Όλα τα παραπάνω σε συνδυασμό με την βελτίωση της αποτελεσματικότητάς τους και την ανάγκη των τελευταίων χρόνων για πράσινη ανάπτυξη έγιναν ο κύριος σκοπός παραγωγής τους..

1.3.1 Ιπτάμενη τέφρα

Ιπτάμενη τέφρα ονομάζεται μία πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται ως πρόσμικτο στην παρασκευή τσιμέντου, προσφέροντας του ενδιαφέρουσες τεχνικές με αποτέλεσμα να εμφανίζει αρκετά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τα κοινά τσιμέντα. Η συμπεριφορά της είναι διαφορετική από τις ποζολάνες αλλά δείχνει να επηρεάζει κατά μεγάλο λόγο στις τελικές αντοχές των μιγμάτων. Η ιπτάμενη τέφρα αντιθέτως με τα βασικά ποζολανικά υλικά έχει διαφορετική συμπεριφορά. Η ιπτάμενη τέφρα είναι υλικό περίπου ίδιας χημικής σύστασης με το κλίνκερ αφού και αυτή περιέχει οξείδια CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , κ.ά. και έχει πάρει σχήμα σε μεγάλες θερμοκρασίες. Η αναμενόμενη συμπεριφορά της προκύπτει να είναι ίδια με του κλίνκερ ως προς την πορεία της ενυδάτωσης, χωρίς αυτή η ενυδάτωση να σημαίνει και ανάπτυξη υψηλών αντοχών όπως τσιμέντο. Η ενυδάτωση του τσιμέντου είναι μια απαραίτητη αντίδραση για να αντιδράσει η τέφρα με το Ca(OH)_2 του ενυδατωμένου τσιμέντου.

1.3.2 Πυριτική Παιπάλη

Η πυριτική παιπάλη, είναι άμορφη, μη κρυσταλλική, και αποτελείται κατά κύριο λόγο από διοξειδίου του πυριτίου. Είναι μια σκόνη πολύ λεπτή που συλλέγεται σαν παραπροϊόν της βιομηχανίας πυριτικών μετάλλων και σιδηροπυριτικών κραμάτων και αποτελείται από σφαιρικά σωματίδια με μέση διάμετρο σωματιδίων 150 nm. Αυτό την καθιστά περίπου 100 φορές μικρότερη από το μέσο όρο των σωματιδίων του τσιμέντου. Το κύριο εύρος χρησιμοποίησης της είναι ως ποζολανικό υλικό για σκυρόδεμα υψηλών επιδόσεων. Με την χρήση της πυριτικής παιπάλης στο σκυρόδεμα γίνεται μείωση της διαπερατότητας του σε ιόντα χλωρίου το συγκεκριμένο παρέχει ένα στρώμα προστασίας στον οπλισμό από την διάβρωση πιο συγκεκριμένα σε περιβάλλοντα με μεγάλη περιεκτικότητα σε χλωριόντα, όπως παραθαλάσσιες περιοχές ή ακόμα γέφυρες που βρίσκονται πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας



Εικόνα 2. Πυριτική παιπάλη από μικροσκόπιο.

1.3.3 Σκωρία Υψικαμίνου

Η σκωρία υψικαμίνου (Granulated Blast Furnace Slag), αποτελεί παραπροϊόν υψικαμίνων σιδηρομεταλλευμάτων σε μορφή σκωρίας, δηλαδή προκύπτει από την παραγωγική διαδικασία του χάλυβα. Είναι υλικό μη μεταλλικό, που αποτελείται από πυριτικά και αργιλοπυριτικά άλατα του ασβεστίου. Η χημική της σύσταση χαρακτηρίζεται κυρίως από οξειδία ασβεστίου, σιδήρου και μαγνησίου (CaO, FeO, MgO) και άλλα οξειδία και στοιχεία σε μικρότερες αναλογίες (SiO, MnO, Al₂O₃, P₂O₅, S). Δημιουργείται όταν το μετάλλευμα σιδήρου λιώνει ταυτόχρονα με ασβεστόλιθο ή δολομίτη, σε κλίβανο με πεπιεσμένο αέρα. Στον υψικάμινο, οι σκωρίες επιπλέον στο μέταλλο κι έπειτα η λειωμένη σκωρία ψύχεται και στερεοποιείται. Αν η ψύξη της σκωρίας πραγματοποιηθεί πολύ γρήγορα με έκθεση στο νερό, σχηματίζεται διεσταλμένη σκωρία, η οποία στη συνέχεια συνθλίβεται προκειμένου να παραχθούν τα διάφορα μεγέθη για όποιες ενέργειες υπάρχει απαίτηση. Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία της τήξεως, το ασβέστιο έχει ενωθεί χημικά με τα αργιλικά και πυριτικά άλατα του μεταλλεύματος και της τέφρας, ώστε να προκύψει αυτό το μη μεταλλικό προϊόν. Μαζί με τη σκωρία από φούρνους χάλυβα, η σκωρία υψικαμίνου αποτελεί τους σημαντικότερους τύπους σκωρίας. Στις σκωρίες υπάρχουν αυτούσια υδραυλικά χαρακτηριστικά. Εάν όμως γίνει ενυδάτωση χωρίς την παρουσία και την ανάμιξη τσιμέντου ο ρυθμός και η ποσότητα παραγωγής υδραυλικού υλικού είναι μειωμένος. Για το λόγο αυτό γίνεται σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις ανάμιξη με τσιμέντο τύπου Portland. Η σκωρία υψικαμίνου έχει πολλά πλεονεκτήματα ως πρόσθετο στο τσιμέντο, όπως: 1) η υψηλή τελική αντοχή, με χαμηλές πρώιμες αντοχές, 2) αντίσταση στα θειικά ιόντα και τα ιόντα χλωρίου, 3) χαμηλή θερμοκρασία ενυδάτωσης, 4) μείωση του πορώδους και της διαπερατότητας του τσιμέντου. Το τσιμέντο που περιέχει σκωρία παρουσιάζει καλή εργασιμότητα και μεγάλη μείωση στην απαίτηση σε νερό. Η θερμοκρασία καθορίζει σημαντικά την αντίδραση ενυδάτωσης στην σκωρία, όσο υψηλότερη η θερμοκρασία τόσο πιο γρήγορα γίνεται η αντίδραση ενώ όσο χαμηλώνει τόσο μειώνεται ο ρυθμός της. [30]

1.4 Αδρανή

Αδρανή ονομάζουμε τα υλικά, ορυκτής ή βιομηχανικής προέλευσης, η χρήση των οποίων γίνεται είτε αυτούσια (έρμα σιδηροδρομικών γραμμών, στραγγιστηρίων, βράχοι θωράκισης,) είτε με συγκολλητικό υλικό (για παρασκευή κονιαμάτων, σκυροδεμάτων, ασφαλτομιγμάτων κλπ), σε πάσης φύσεως τεχνικά έργα. Τα αδρανή δεν παρουσιάζουν χημικές συνδετικές ιδιότητες μεταξύ τους, παρά μόνο φυσική συνοχή λόγω της γεωμετρικής ταξινόμησης των κόκκων τους και του βάρους τους [6].

Ο διαχωρισμός των αδρανών αναλύεται σε κατηγορίες παρακάτω: [7], [8].

A) Πρώτον, με γνώμονα από πού προέρχονται-παραλαμβάνονται διακρίνονται σε :

-Φυσικής προέλευσης, δηλαδή αδρανή τα οποία έχουν προέρθει από την φύση και δεν έχουν υποστεί μηχανική επεξεργασία θραύσης, πλυσίματος και διαλογής (πχ θραυστά πετρώματα, αποθέσεις άμμων ή χαλίκων, λάβα, λατομικά προϊόντα κλπ)

-Τεχνητά ή βιομηχανικά, δηλαδή αδρανή που έχουν προκύψει ως προϊόντα ή παραπροϊόντα βιομηχανικής δραστηριότητας από χημική ή θερμική επεξεργασία πρώτων υλών ορυκτής ή άλλης προέλευσης (πχ τέφρες, σκωρίες, υπολείμματα καύσεων, άργιλοι, βερμικουλίτης, περλίτης, υλικά στίλβωσης)

- Αδρανή λόγω ανακύκλωσης ονομάζονται τα αδρανή τα οποία προέρχονται από κατεργασία και επαναχρησιμοποίηση διαφόρων υλικών κυρίως του φέρον οργανισμού από ήδη υπάρχουσες κατασκευές (υλικά κατεδαφίσεως σκυροδέματος, τοιχοποιίας, ασφαλικών έργων)

B) Δεύτερον, με γνώμονα την πηγή λήψης διακρίνονται σε:

- «Φυσικά» ή συλλεκτά αδρανή, δηλαδή αδρανή που έχουν ληφθεί από φυσικές αποθέσεις (π.χ. ποτάμια, ορυχεία κτλ.). Η χρήση τους μπορεί να γίνει ως έχουν ή να υποστούν παραπάνω επεξεργασία ανάλογα με τις απαιτήσεις (π.χ. θραύση, πλύσιμο, κτλ.).

- Αδρανή λατομείων, δηλαδή αδρανή που έχουν προκύψει από εξόρυξη και θραύση όγκων πετρώματος. Στην Ελλάδα, είναι η κύρια κατηγορία αδρανών υλικών που χρησιμοποιούνται.

Οι παραπάνω κατηγορίες αναφέρονται στα πρωτογενή αδρανή φυσικής προέλευσης, ανεξάρτητα αν ακολουθεί άλλη κατεργασία που μπορεί να τα μετατρέψει σε τεχνητά – βιομηχανικά.

Γ) Τρίτον, με βάση το ειδικό τους βάρος διακρίνονται σε :

- Κανονικού ειδικού βάρους, δηλαδή αδρανή με ειδικό βάρος από <2 έως <3 Mg/m³

- Ελαφροβαρή, δηλαδή αδρανή με ειδικό βάρος < 2 Mg/m³

- Βαρέα, δηλαδή αδρανή με ειδικό βάρος > 3 Mg/m³

Δ) Τέταρτον, με γνώμονα το εύρος των κόκκων (σύμφωνα με τους Ευρωπαϊκούς Κανονισμούς Αδρανών Υλικών) χωρίζονται σε:

- Χονδρόκοκκα, τα οποία είναι τα αδρανή με μέγιστο εύρος κόκκου > 4 mm, και χαμηλότατο >2 mm , όπως οι ογκόλιθοι, το χαλίκι, το γαρμπίλι, οι κροκάλες, το ρυζάκι

-Λεπτόκοκκα, δηλαδή τα αδρανή με μέγιστο μέγεθος κόκκου < 4 mm (διάφορα είδη άμμων)

- Filler, το οποίο είναι το διαβαθμισμένο λεπτό αδρανές υλικό με μεγαλύτερο κόκκο 2 mm, και το οποίο μπορεί να περάσει σε ποσοστό 70-100% από το κόσκινο 0,063 mm



Εικόνα 3. Θραυστά αδρανή υλικά¹

1.4.1 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα με βάση την προέλευση και το υλικό τους.

- Θραυστά Αδρανή προϊόντα εξόρυξης λατομείων.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα που παρουσιάζεται σε αυτήν την κατηγορία αδρανών είναι ότι κατά κύριο λόγο αποτελούν ένα υγιές υλικό. Εφόσον η εξόρυξη και παραγωγική διαδικασία γίνεται σωστά και υπό επίβλεψη η δομή που παρουσιάζουν δεν μεταβάλλεται και μπορεί να ελεγχθεί. Το κύριο μειονέκτημα που παρουσιάζουν βασίζεται στο ότι το ποσοστό παιπάλης που περιέχουν τα λεπτόκοκκα κλάσματα προκύπτει αρκετά μεγαλύτερο από τα άλλα φυσικά αδρανή υλικά.

- Θραυστά Αδρανή, προϊόντα θραύσης φυσικών αποθέσεων (ποταμοί, χείμαρροι, λίμνες κλπ)

Το βασικό πλεονέκτημα που παρουσιάζεται είναι ότι είναι υλικό που έχει μεγάλη σκληρότητα. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, δημιουργεί προϊόντα που έχουν χαμηλό ποσοστό παιπάλης. Ωστόσο, το μειονέκτημά του γίνεται φανερό κατά την μελέτη προσμίξεων αργίλου και αλλουβιακών σχηματισμών. Είναι υψηλής σημασίας να γίνεται πλύσιμο προ της θραύσης. Άλλο ένα μειονέκτημα είναι πως ενδέχεται να παρουσιάζεται υψηλό ποσοστό άμορφου SiO₃ που πραγματοποιεί αντίδραση με τα αλκάλια που υπάρχουν στο τσιμέντο. Επιπλέον, είναι απαραίτητο να γίνεται εξέταση πριν να χρησιμοποιηθούν σε σκυρόδεμα ή σε διάφορες κονίες.

- Φυσικά Αδρανή, προϊόντα που ταξινομούνται ανάλογα τις φυσικές αποθέσεις (ποταμοί, χείμαρροι, λίμνες κλπ)

¹ <https://www.orykta.gr/oryktes-protos-ytes-tis-ellados/latomika-orykta/adrani>

Το πολύ χαμηλό ποσοστό παιπάλης αποτελεί κύριο πλεονέκτημα των λεπτόκοκκων φυσικών αδρανών. Ωστόσο, επιβάλλεται το πλύσιμο και συγκεκριμένα απαιτείται όσο το δυνατόν πιο στρογγυλό σχήμα κόκκων και επιφάνεια χωρίς ανομοιομορφίες.

- Άμμος Θάλασσας

Ανήκει στην κατηγορία των λεπτόκοκκων άμμων και είναι κατάλληλη για την χρήση σε κονιάματα. Το βασικό μειονέκτημα όμως είναι πως επίσης επιβάλλεται το πλύσιμο πριν την χρήση, ενώ σε αυτήν μπορεί να βρεθούν κοχύλια και χλωρίοντα.

- Τεχνητά αδρανή προερχόμενα από κατεργασία πετρωμάτων (π.χ. κίσηρη, περλίτης κλπ)

Ανήκουν στα ελαφροβαρή αδρανή, και είναι κατάλληλα για ελαφροβαρές σκυρόδεμα και οδοποιία. Όμως επιβάλλεται να υποστούν βιομηχανική επεξεργασία.

- Σκωρίες (slags)

Είναι η λύση για την παραγωγή αδρανών που συμβάλουν για την αντιολίσθηση στην οδοποιία, ωστόσο, πριν την χρήση τους πρέπει να εξετάζονται οι ιδιότητες που μπορεί να έχουν.

- Αδρανή ανακύκλωσης προερχόμενα από τον θρυμματισμό παλαιών κατασκευών (σκυρόδεμα, ασφαλτοτάπητες).

Τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα που έχουν είναι περιβαλλοντικής και οικονομικής φύσης. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικά βάσης ή για να παραχθεί άοπλο σκυρόδεμα σε κατασκευές (σκυρόδεμα καθαριότητας). Ωστόσο, ένα βασικό μειονέκτημα είναι η δύσκολη διαλογή τους (π.χ. όταν διαχωρίζεται το σκυρόδεμα με τον χάλυβα) που αυξάνει και το κόστος της χρήσης τους. Επιπλέον, είναι σημαντικό πριν την χρήση τους να γίνεται έλεγχος για τα το ποσοστά χλωριόντων και SO₃.

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει το ειδικό βάρος μερικών αδρανών υλικών σε kg/m³.

Πίνακας 3. Χαρακτηριστικά των αδρανών [9].

Αδρανές	Ειδικό Βάρος [kg/m³]
Κίσσηρη	400-480
Άργιλος	1200-1840
Γύψος	2300-2400
Άμμος	2600-2800
Σκύρα	2600-2800
Βωξίτες	2650-2850
Γρανίτες	2550-2750
Σχιστόλιθοι	2820-2900

Οι επιθυμητές ιδιότητες των αδρανών συνοψίζονται στις εξής:

- Ελαφρά Αδρανή

Μικρό βάρος – Θερμική μόνωση – Αντοχή – Σκληρότητα

- Αδρανή για έργα οδοποιίας

Υψηλές αντοχές – Υψηλές φυσικοχημικές αντοχές

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο - ΧΑΛΥΒΑΣ

2.1 Χάλυβας Οπλισμού Σκυροδέματος

Η κυριότερη και η πιο συνηθισμένη εφαρμογή του οπλισμένου σκυροδέματος είναι σε κατασκευές με φέροντα οργανισμό. Για τον λόγο ότι η εφελκυστική αντοχή του μη οπλισμένου σκυροδέματος είναι πολύ χαμηλή συνηθίζεται η χρήση χαλύβδινων ράβδων οπλισμού μαζί του επειδή ο χάλυβας είναι πιο ανθεκτικός στις εφελκυστικές τάσεις. Ο συνδυασμός των δύο υλικών επιτυγχάνεται με την ικανοποίηση των 2 παρακάτω παρατηρήσεων.

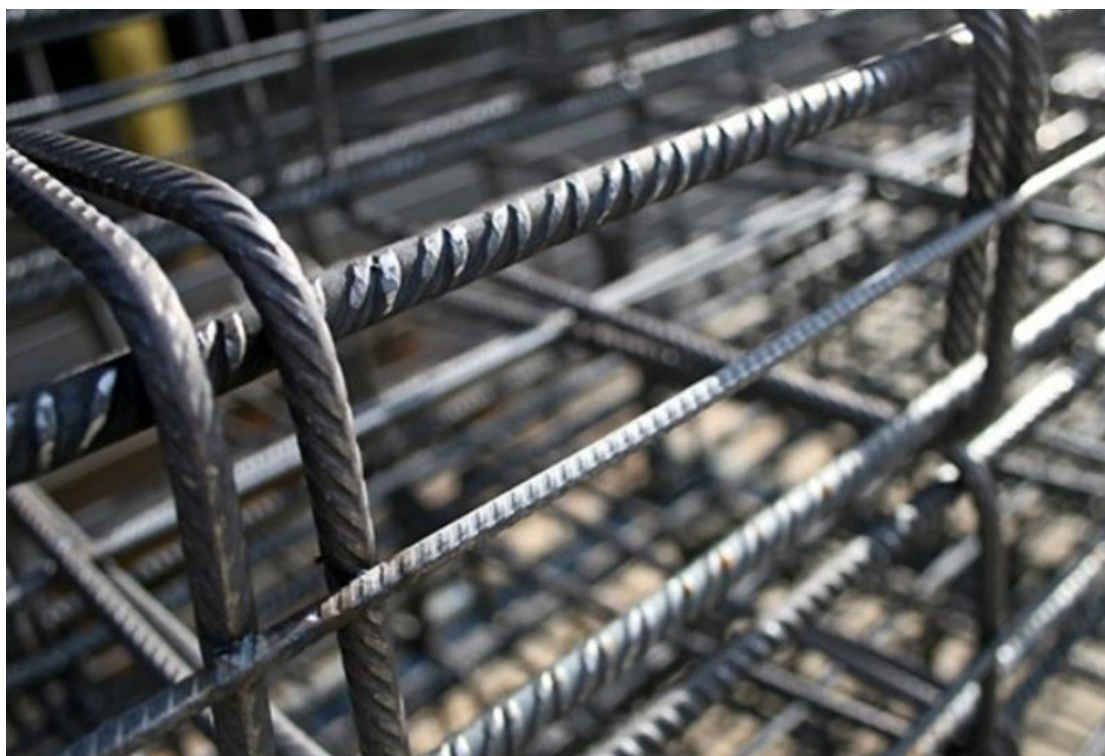
- Πρώτον μεταξύ των τμημάτων του οπλισμού και της συνολικής επιφάνειας του σκυροδέματος που έρχονται σε επαφή δημιουργούνται δυνάμεις συνάφειας, από τις οποίες προκύπτει σαν αποτέλεσμα τα δύο υλικά να συνδυαστούν σαν ένα. Προκειμένου να υπάρχουν αυξημένες δυνάμεις συνάφειας χρησιμοποιούνται χάλυβες που έχουν νευρώσεις, επίσης πρέπει ο χάλυβας να μην έχει υποστεί διάβρωση «σκούριασμα» η οποία θα προξενήσει πρόβλημα στην ένωση των δύο υλικών καθώς θα εκμηδενίσει τις δυνάμεις που δημιουργήθηκαν πριν.
- Δεύτερον, το άοπλο σκυρόδεμα και ο χάλυβας υποφέρουν από τις ίδιες παραμορφώσεις λόγω της θερμότητας (διαστολικές και συστολικές) καθώς έχουν παραπλήσιο συντελεστή θερμικής διαστολής όπως παρουσιάζεται από τον τύπο:

$$\Delta l = \alpha \times L \times \Delta T$$

όπου ΔL είναι η διαφορά του μήκους της ράβδου, η οποία έχει μήκος ίσο με L , η διαφορά θερμοκρασίας της οποίας είναι ίση με ΔT . Η τιμή της διαστολής λόγω θερμότητας του χάλυβα είναι 10×10^{-6} ανά $^{\circ}\text{C}$. Η ένωση χάλυβα οπλισμού - σκυροδέματος έχει ακόμα τα παρακάτω πλεονεκτήματα όσον αφορά την φυσική κατάσταση του υλικού. Ο χάλυβας αντιδρά στην μείωση των ρωγμών που παρουσιάζονται στο σκυρόδεμα λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας, επίσης ελαττώνει τις ρηγματώσεις του σκυροδέματος λόγω συστολής πήξεως, ακόμη ο οπλισμός συνεισφέρει στην αύξηση της φέρουσας, ικανότητας των οπλισμένων στοιχείων. Η αύξηση πραγματοποιείται με οπλισμό σε κάθετο σε 2 κατευθύνσεις, οπλισμό ο οποίος είναι παράλληλος στην δύναμη που θλίβει καθώς και οπλισμό κάθετο στον τελευταίο. Επίσης ο οπλισμός μειώνει το εύρος των ρηγματώσεων που παρουσιάζει ο εφελκυσμός στο σκυρόδεμα. [14].

2.1.1 Ποιότητες Χάλυβα

Με βάση τις διαφορετικές ιδιότητες τους οι χάλυβες οπλισμού διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες, : S220, S400, S500, S400s, S500s οι οποίες παρουσιάζονται στα παρακάτω πρότυπα ΕΛΟΤ 959 και ΕΛΟΤ 971 του Ελληνικού Οργανισμού Τυποποίησης. Ο δείκτης s, που υπάρχει στις κατηγορίες S400 και S500 σημαίνει ότι αυτές οι κατηγορίες αφορούν συγκολλησίμους χάλυβες. Οι ποιότητες του χάλυβα είναι υποχρεωτικό να παρουσιάζονται ολογράφως στα ανάλογα έγγραφα εμπορίας και διακίνησης του, (τιμολόγια, δελτία αποστολής, διασαφηνίσεις, δικαιολογητικά ανοίγματος πίστωσης). Οι δείκτες της κάθε κατηγορίας είναι η τιμή διαρροής του χάλυβα μετρούμενη σε ΜΡα. Όσο πιο μεγάλος είναι ο δείκτης τόσο καλύτερη είναι και η ποιότητα του χάλυβα. [15].



Εικόνα 4. Χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος.

Κατανομή και διαχωρισμός χαλύβων:

Αναλόγως την μέθοδο παραγωγής του χάλυβα που χρησιμοποιείται στον οπλισμό του σκυροδέματος γίνεται ο παρακάτω διαχωρισμός:

- Θερμής έλασης, δεν πραγματοποιείται περαιτέρω θερμική επεξεργασία οποιασδήποτε μορφής.
- Θερμικής έλασης, που την ακολουθεί μια διαδικασία θερμικής κατεργασίας και είναι και η βασική μορφή χάλυβα που κυκλοφορεί και είναι γνωστοί ως χάλυβες Tempcore.
- Ψυχρής κατεργασίας με ολική έλαση του αρχικού προϊόντος που προέρχεται από θερμική έλαση ή διαφορετικά με την στρέψη του αρχικού προϊόντος αλλά και με έναν συνδυασμό των δύο.

Αναλόγως τον τρόπο παραγωγής τους προκύπτουν διαφορές σε ορισμένες ιδιότητες-συμπεριφορές τους όπως:

- Διαφορετική συμπεριφορά σε ακραίες θερμοκρασίες.
- Διαφορετικό διάγραμμα τάσεων.
- Τροποποιημένο όριο διαρροής.
- Τροποποιημένη ολκιμότητα.

Η ψυχρή επεξεργασία γίνεται με σκοπό την ενίσχυση της ανθεκτικότητας του χάλυβα. Ωστόσο η συγκεκριμένη μέθοδος έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση τη ολκιμότητας του χάλυβα λόγω φαινομένων γήρανσης. Επιπλέον προκύπτει σημαντική ελάττωση της αντοχής του μετά από παρουσία σε μεγάλες θερμοκρασίες. Για αυτούς τους λόγους, χάλυβες ψυχρής κατεργασίας με στρέψη, δεν παράγονται πλέον.

Διάκριση χαλύβων μπορεί να γίνει και ανάλογα με την μορφή της επιφάνειας των ράβδων. Εκείνοι διακρίνονται σε:

- Λείους κυκλικής διατομής, που ωστόσο δεν καλύπτονται από τα πρότυπα του ΕΛΟΤ 1421-2.
- Χάλυβες με ανάγλυφες αυλακώσεις υψηλής συνάφειας.

Διάκριση μπορεί να γίνει και σύμφωνα με την ολκιμότητα, ως εξής:

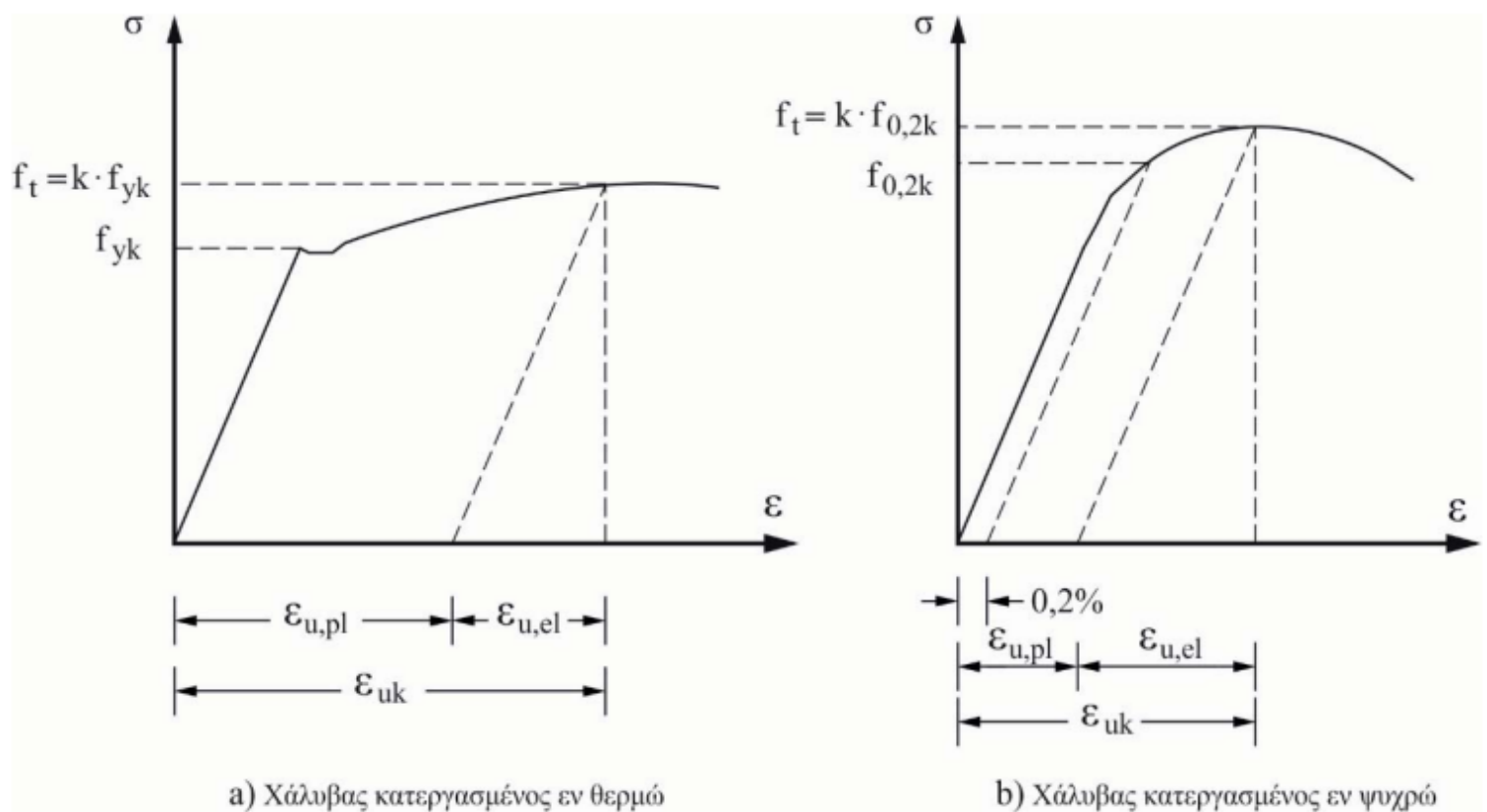
- Χάλυβες χαμηλής ολκιμότητας που ανήκουν στην κατηγορία B500A και είναι αποδεκτό να γίνεται χρησιμοποίησή τους μόνο για την παραγωγή διαφόρων πλεγμάτων με διάμετρο έως Φ8.
- Χάλυβες υψηλής ολκιμότητας που ανήκουν στην κατηγορία B500C οι συγκεκριμένοι αφορούν την κάλυψη των αναγκών για την συμπεριφορά εναντίον του σεισμού

Διάκριση χαλύβων πραγματοποιείται επίσης και σύμφωνα με την συγκολλησιμότητα τους. Έτσι διακρίνονται σε:

- Συγκολλήσιμους
- Μη Συγκολλήσιμους ή υπό προϋποθέσεις. Οι τελευταίοι δεν επιτρέπεται να χρησιμοποιούνται μετά το 2007.
-

Διάκριση η οποία αφορά την ανθεκτικότητα τους σε διάβρωση:

- Κοινοί χάλυβες κράματα σιδήρου με άνθρακα καθώς και με διαφορά άλλα στοιχεία που περιέχονται σε ποσότητες μικρότερες του 1%
- Ανοξειδωτοι χάλυβες που περιέχουν χρώμιο σε ποσοστό 12%, οι οποίοι είναι ανθεκτικοί στην διάβρωση.



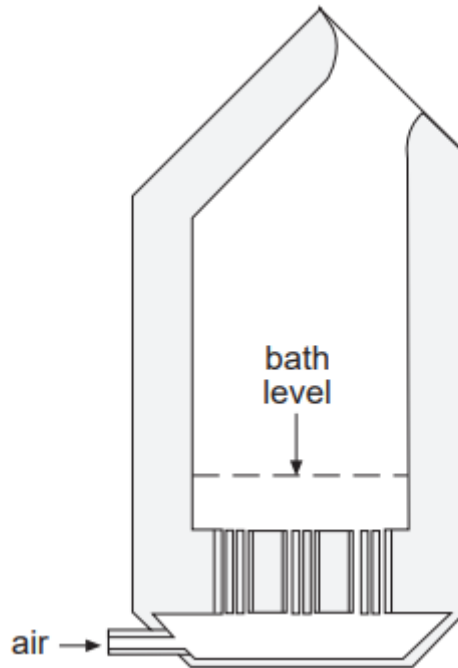
Εικόνα 5. Διάγραμμα τάσεων για δυο περιπτώσεις χάλυβα.

2.1.2 Μέθοδοι παραγωγής Χάλυβα

Μέθοδος Bessemer [16]

Αυτή η διαδικασία, αναπτύχθηκε αρχικά από τους William και Henry Bessemer, και περιλάμβανε την εμφύσηση αέρα μέσα σε ρευστό χυτοσίδηρο που περιείχε ένα δοχείο με εμφύσηση στον πυθμένα επενδεδυμένο με όξινα (πυριτικά) πυρίμαχα υλικά. Η διαδικασία ήταν η πρώτη που παρείχε την δυνατότητα παραγωγής μεγάλης κλίμακας και με την οποία ο χυτοσίδηρος μπορούσε γρήγορα και φθηνά να μετατραπεί σε υγρό χάλυβα. Η διαδικασία bessemer μειώνει το λιωμένο χυτοσίδηρο στους λεγόμενους μετατροπείς bessemer – δηλαδή δοχεία σε σχήμα αυγού με κύριο υλικό κατασκευής το πυρίτιο, πηλό ή δολομίτη, χωρητικότητας 5 έως 30 τόνων τηγμένου σιδήρου. Ένα άνοιγμα στο επάνω τμήμα του μετατροπέα bessemer επιτρέπει την εισαγωγή σιδήρου και την έκχυση του τελικού προϊόντος. Η τήξη του μετάλλου συνήθως επιτυγχάνεται με καύση άνθρακα. Ο αέρας ωθείται προς τα πάνω μέσω των διατρήσεων στο φαρδύ κάτω άκρο του μετατροπέα. Καθώς ο αέρας περνά προς τα πάνω μέσα από τον λιωμένο χυτοσίδηρο, ακαθαρσίες όπως το πυρίτιο, το μαγγάνιο και ο άνθρακας οξειδώνονται. Οι χάλυβες διαφορετικών ιδιοτήτων παράγονται με την εισαγωγή πρόσθετων στοιχείων, όπως το spiegeleisen - ένα κράμα σιδήρου-άνθρακα-μαγγανίου-στο λιωμένο μέταλλο μετά την ολοκλήρωση της οξειδωσης. Στη συνέχεια, ο μετατροπέας αδειάζεται σε κουτάλες από τις οποίες χύνεται ο χάλυβας σε καλούπια. Δεδομένου ότι

η όλη διαδικασία μπορούσε να ολοκληρωθεί συνήθως σε πολύ λιγότερο από 1 ώρα και για πολύ μεγαλύτερες ποσότητες από ό,τι με χωνευτήρια, η παραγωγή χάλυβα bessemer βοήθησε σημαντικά στην κάλυψη των απαιτήσεων χάλυβα κατά την έναρξη της βιομηχανικής επανάστασης. Καθώς η παραγωγή χάλυβα αυξήθηκε έτσι η ζήτηση για άνθρακα αυξήθηκε κατά πολύ.



Εικόνα 6. Σχεδιάγραμμα μεθόδου Bessemer.

Μέθοδος ανοιχτής εστίας [17]

Ο Karl Wilhelm Siemens, το 1868, απέδειξε ότι ήταν δυνατό να οξειδωθεί ο άνθρακας στον υγρό χυτοσίδηρο χρησιμοποιώντας σιδηρομετάλλευμα, η διαδικασία ήταν αρχικά γνωστή ως «διεργασία χοίρου και μεταλλεύματος». Συνοπτικά, η μέθοδος του Siemens ήταν η εξής. Μια ορθογώνια σκεπαστή εστία χρησιμοποιήθηκε για να περιέχει το φορτίο χυτοσίδηρου ή χυτοσίδηρο και «σκράπ». Το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας που απαιτείται για την προώθηση των χημικών αντιδράσεων που είναι απαραίτητες για τον καθαρισμό του φορτίου παρέχονταν με διέλευση νερού. Λόγω ότι ο σίδηρος είναι δύσκολο να παραχθεί εξαιτίας του μεγάλου σημείου τήξης του, τα απλά καύσιμα και οι φούρνοι αποδείχθηκαν ανεπαρκή οπότε και δημιουργήθηκε ο κλίβανος ανοιχτής εστίας προκειμένου να ξεπεραστεί αυτό το εμπόδιο. Πρόσθετα κράματα παράγονται όπως, και ένα μη μεταλλικό κράμα, που αποτελείται από σιδηρομετάλλευμα, πυροσυσσωμάτωση ανοιχτής εστίας, ασβεστόλιθο, ασβέστη, βωξίτη και φθορίτη. Ο χυτοσίδηρος, ο οποίος χρησιμοποιείται σε λιωμένη κατάσταση ή με τη μορφή πλινθωμάτων, ενώ η κύρια πηγή άνθρακα και παρέχει θερμότητα για την κανονική λειτουργία της διαδικασίας. Η ποσότητα απορριμμάτων χυτοσίδηρου και χάλυβα στη γόμωση μπορεί να ποικίλλει σε οποιαδήποτε αναλογία, ανάλογα με τον τύπο της διαδικασίας, τις οικονομικές εκτιμήσεις και τις ποιότητες του παραγόμενου χάλυβα.

2.2 Μηχανικές Ιδιότητες Χάλυβα

- Αντοχή εφελκυσμού

Τα επιτρεπόμενα όρια των μηχανικών χαρακτηριστικών όσον αφορά τον εφελκυσμό του χάλυβα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Το όριο διαρροής f_y για τις τιμές του πίνακα που προκύπτουν είναι ανάλογα του 95%. Για την συνολική ανοιγμένη παραμόρφωση, το υψηλότερο φορτίο e_u , τον λόγο f_t/f_y , οι αναφερόμενες τιμές είναι χαρακτηριστικές του 90%.

Πίνακας 4. Όρια εφελκυσμού χάλυβα.

Ιδιότητα	Τεχνική κατηγορία ποιότητας	
	B500A	B500C
Όριο διαρροής, f_y (MPa)	≥ 500	≥ 500
Λόγος της πραγματικής προς την ονομαστική τιμή του ορίου διαρροής, $f_{y,act}/f_{y,nom}$	-	≤ 1.25
Λόγος της εφελκυστικής αντοχής προς το όριο διαρροής, f_t/f_y	≥ 1.05 (≥ 1.03 για $d < 6\text{mm}$)	≥ 1.15 ≤ 1.35
Συνολική ανοιγμένη παραμόρφωση (επιμήκυνση) στο μέγιστο φορτίο ϵ_{uk} (%)	≥ 2.5 (≥ 2 για $d < 6\text{mm}$)	≥ 7.5

- Αντοχή σε διάτμηση

Όσον αφορά τα πλέγματα για δομικές κατασκευές, το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 10080, ορίζει πως η αντοχή σε διάτμηση των σημείων που είναι συγκολλημένα στις διασταυρούμενες ράβδους θα πρέπει να υπολογίζεται από την σχέση

$$F_s > 0.25f_y A$$

f_y είναι η ονομαστική τιμή του ορίου διαρροής του χάλυβα οπλισμού που είναι περίπου 500 MPa. Και A η διατομή της ράβδου.

- Αντοχή σε Κόπωση

Σύμφωνα με τα πρότυπα του ΕΛΟΤ, οι χάλυβες θα πρέπει να αναπτύσσουν ανθεκτικότητα για συγκεκριμένο κύκλο επαναλαμβανόμενης αξονικής φόρτισης με τάσεις που θα κυμαίνονται από σ_{min} ως και σ_{max} με εύρος διακύμανσης

$$2\sigma_A = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

Έλεγχος κόπωσης εφαρμόζεται συνήθως σε χάλυβες που ανήκουν στη κατηγορία B500C που πρέπει να έχουν αντοχή σε δοκιμή κόπωσης 2 εκατομμύρια κύκλους φόρτισης σε μέγιστη τάση 300 MPa, και φάσμα διακύμανσης $2\sigma_A = 150\text{MPa}$. Επίσης η διάρκεια αυξομειώσης του φορτίου είναι χαμηλότερη ή κα ίση με 200Hz.

Αντίστοιχα νούμερα ισχύουν και για τις ηλεκτροσυγκολλημένες ράβδους και τα πλέγματα που ανήκουν στην κατηγορία B500C.

- Αντοχή σε ακραίες θερμοκρασιακές μεταβολές

Ακραίες θερμοκρασίες για τον χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος, μπορεί να χαρακτηριστούν από 0 °C ως και 200 °C. Σε αυτές τις τιμές θερμοκρασίας, είναι πιθανό να υπάρξουν μεταβολές – αλλοιώσεις των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα και του σκυροδέματος. Με την αύξηση της θερμοκρασίας επηρεάζονται οι εξής ιδιότητες:

- Το όριο διαρροής
- Η αντοχή σε εφελκυσμό
- Η παραμόρφωση

Η διαφορά της συμπεριφοράς του χάλυβα σε πολύ υψηλές η πολύ χαμηλές θερμοκρασίες έχει κύρια επιρροή από τους παρακάτω παράγοντες:

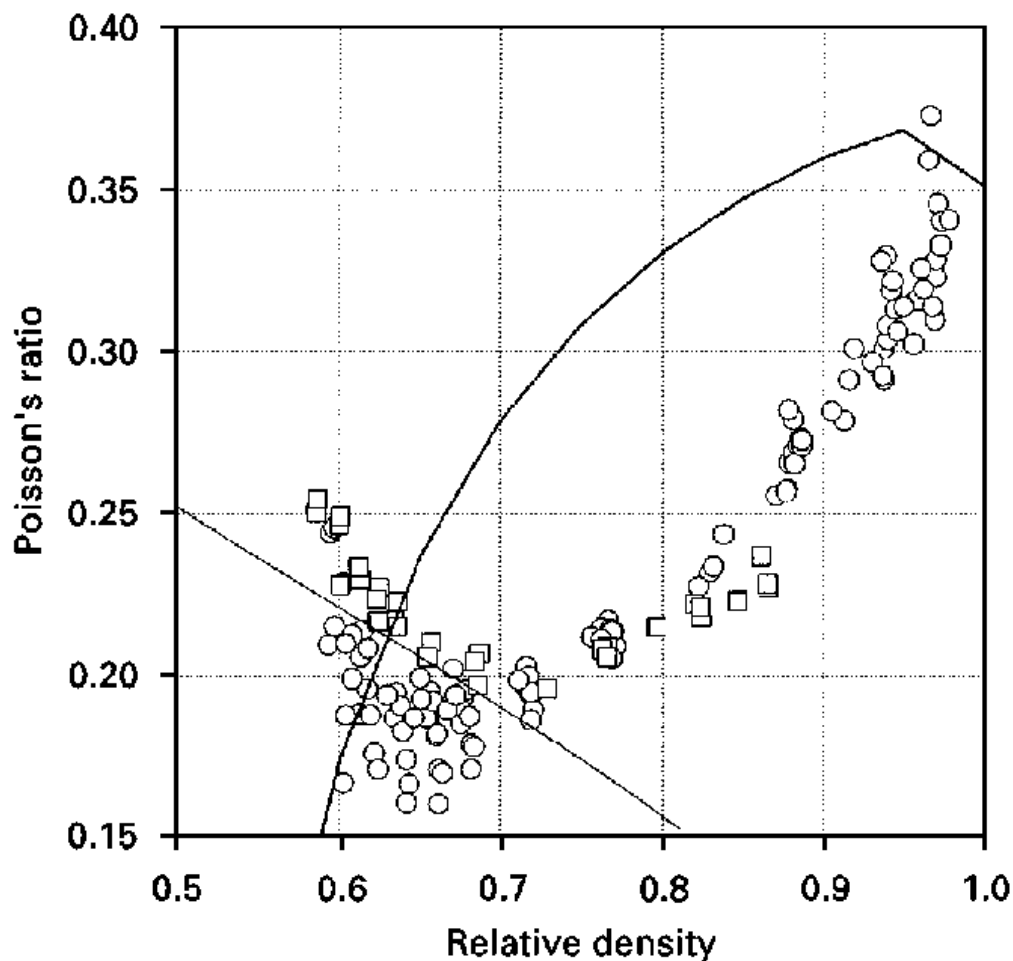
- Την θερμοκρασία έκθεσης
- Τον χρόνο έκθεσης
- Τη χημική σύσταση και μέθοδο παραγωγής.

- Λόγος Poisson

Όταν εφαρμόζουμε εφελκυστική τάση στο υλικό, υπάρχει επιμήκυνση στην κατεύθυνση της εφαρμοζόμενης δύναμης και συρρίκνωση στην εγκάρσια / πλευρική κίνηση. Έτσι το στέλεχος παράγεται και στις δύο κατευθύνσεις. Ο λόγος της παραμόρφωσης που παράγεται κατά την εγκάρσια κατεύθυνση προς το στέλεχος που παράγεται προς την κατεύθυνση εφαρμογής εφελκυστικής τάσης είναι γνωστός ως λόγος Poisson. Ο λόγος Poisson είναι μια παράμετρος που σχετίζεται με αυτές τις παραμορφώσεις, η οποία είναι χρήσιμη στην επιλογή και εφαρμογή υλικού και περιγράφεται από την εξής εξίσωση:

$$\nu = - \left(\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} \right)$$

Η τιμή του λόγου Poisson για χάλυβα κυμαίνεται από 0.25 έως 0.33. Η μέση τιμή της αναλογίας Poisson για χάλυβα είναι 0.28 και εξαρτάται από τον τύπο χάλυβα που χρησιμοποιείται.



Εικόνα 7. Λόγος Poisson

2.3 Πρότυπα Χάλυβα οπλισμού Σκυροδέματος κατά ΕΛΟΤ

Σε αυτήν την υπό-ενότητα, παρατέθηκαν τα πρότυπα του ΕΛΟΤ για τις προδιαγραφές χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος. Τα πρότυπα που αναλύθηκαν είναι τα:

- **ΕΛΟΤ EN 10080 (ΕΛΟΤ 1421-1):** Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος – Συγκολλησιμοι χάλυβες – Γενικές απαιτήσεις.
- **ΕΛΟΤ 1421-2:** Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος - Συγκολλησιμοι χάλυβες – Μέρος 2: Τεχνική κατηγορία B500A
- **ΕΛΟΤ 1421-3:** Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος - Συγκολλησιμοι χάλυβες – Μέρος 3: Τεχνική κατηγορία B500C.

Τα παρακάτω στοιχεία αντλήθηκαν από το πρότυπο του ΕΛΟΤ [22].

ΕΛΟΤ EN 10080:

Σε αυτό το Πρότυπο δηλώνονται οι γενικές απαιτήσεις που πρέπει να πληρούνται καθώς και οι ορισμοί που αφορούν τα χαρακτηριστικά επίδοσης των συγκολλησιμων

χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος, που παραδίδονται ως τελικό προϊόν με τις ακόλουθες μορφές:

- ράβδων, ρόλων και ευθυγραμμισμένων προϊόντων,
- φύλλων ηλεκτροσυγκολλημένων πλεγμάτων βιομηχανικής παραγωγής
- δικτυωμάτων.

Αυτό το Πρότυπο δεν καθορίζει συγκεκριμένες τεχνικές κατηγορίες ποιότητας.

ΕΛΟΤ 1421-2:

Σε αυτό το Πρότυπο δηλώνονται οι γενικές απαιτήσεις που πρέπει να πληρούνται καθώς και οι ορισμοί που αφορούν τα χαρακτηριστικά επίδοσης των συγκολλησίμων χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος της τεχνικής κατηγορίας B500A.

Οι μορφές στις οποίες διατίθενται οι χάλυβες είναι:

- ρόλοι για την παραγωγή ηλεκτροσυγκολλημένων πλεγμάτων βιομηχανικής παραγωγής,
- φύλλα ηλεκτροσυγκολλημένων πλεγμάτων βιομηχανικής παραγωγής,
- δικτυώματα.

Οι χάλυβες κατηγορίας B500A έχουν περιορισμένες εφαρμογές, συγκεκριμένα επιτρέπεται η χρήση τους μόνο για την παραγωγή τυποποιημένων δομικών πλεγμάτων ή δικτυωμάτων σε διαμέτρους έως 8mm.

ΕΛΟΤ 1421-3:

Σε αυτό το Πρότυπο δηλώνονται οι γενικές απαιτήσεις που πρέπει να πληρούνται καθώς και οι ορισμοί που αφορούν τα χαρακτηριστικά επίδοσης των συγκολλησίμων χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος της τεχνικής κατηγορίας B500C.

Οι μορφές στις οποίες παραδίδονται ως τελικό προϊόν είναι οι εξής:

- ράβδοι, ρόλοι και ευθυγραμμισμένα προϊόντα,
- φύλλα ηλεκτροσυγκολλημένων πλεγμάτων βιομηχανικής παραγωγής,
- δικτυώματα.

Οι χάλυβες κατηγορίας B500C κατατάσσονται σε χάλυβες υψηλής ολκιμότητας.

2.3.1 Στοιχεία και διαφορές που εντάσσουν τα πρότυπα (1421 1-3)

Ανάμεσα στα Πρότυπα υπάρχουν ορισμένες διαφορές. Τα προαναφερθέντα Πρότυπα ΕΛΟΤ EN 10080, ΕΛΟΤ 1421-2 και ΕΛΟΤ 1421-3 έχουν ως βάση αναφοράς τους συγκολλησίμους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος, ενώ πλέον η χρήση των μη συγκολλησίμων χαλύβων αποσύρεται και τυπικά.

Για αυτούς τους χάλυβες ορίζονται:

- Νέες τεχνικές κατηγορίες ποιότητας B500A (χαμηλής ολκιμότητας) και B500C (υψηλής ολκιμότητας).

- Έλεγχοι και κριτήρια αξιολόγησης ανάλογα με τη μορφή που διατίθενται (ράβδοι, ρόλοι, ευθυγραμμισμένα προϊόντα, πλέγματα, δικτυώματα).

- Αυστηρότερα όρια για τις ιδιότητες σε εφελκυσμό και μέτρηση νέων μεγεθών (όπως ο λόγος $f_{y,act}/f_{y,nom}$ και το eu,k).

- Νέοι έλεγχοι και μετρήσεις όπως:

- έλεγχος της γεωμετρίας των νευρώσεων (αντοχή συνάφειας), δοκιμή κόπωσης,
- αντοχή σε διάτμηση για τις σταυρωτές σημειακές συγκολλήσεις πλεγμάτων και δικτυωμάτων.

- Διαφορετικός τρόπος εκτέλεσης δοκιμών, αλλά και μέτρησης ιδιοτήτων:

- η καταλληλότητα σε κάμψη θα ελέγχεται με τη δοκιμή αναδίπλωσης ανεξαρτήτως διαμέτρου,
- η ανοιγμένη παραμόρφωση θα μετριέται στο μέγιστο φορτίο και όχι μετά τη θραύση,
- οι τάσεις θα υπολογίζονται με την ονομαστική διατομή και όχι με την πραγματική,
- στη χημική σύσταση θα μετριέται και η περιεκτικότητα σε χαλκό.

- Συγκεκριμένο σύστημα σήμανσης για την αναγνώριση της προέλευσης (χώρα κι μονάδα παραγωγής) και της τεχνικής κατηγορία.

- Κριτήρια συμμόρφωσης για τους παραγωγούς (αρχικός, εσωτερικός και μακροχρόνιος έλεγχος).

- Έλεγχοι σε περιπτώσεις αμφισβητήσεων.

Επιπλέον στα Παραρτήματα του ΕΛΟΤ EN 10080 περιγράφονται και τα ακόλουθα:

- Μέθοδοι δοκιμών για τα ηλεκτροσυγκολλημένα δικτυώματα.

- Εναλλακτικές δοκιμές για τον έλεγχο της αντοχής συνάφειας.

Στον Πίνακα 5 δίνονται οι έλεγχοι που προβλέπονται στα Πρότυπα που προαναφέρθηκαν και για λόγους σύγκρισης εκείνοι των προηγούμενων Προτύπων(959,971).

Έλεγχοι		ΕΛΟΤ 959, ΕΛΟΤ 971	ΕΛΟΤ EN 10080, ΕΛΟΤ 1421-2, ΕΛΟΤ 1421- 3
1	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά		
	- διατομή, αηγμένη μάζα	+	+
	- άλλες διαστάσεις	-	+
	- γεωμετρία νευρώσεων (αντοχή συνάφειας)	-	+
2	Μηχανικά χαρακτηριστικά		
	A. Ιδιότητες σε εφελκυσμό		
	- όριο διαρροής (f_y)	+	+
	- εφελκυστική αντοχή (f_t)	+	+
	- λόγος εφελκυστικής αντοχής προς όριο διαρροής (f_t/f_y)	+	+
	- λόγος πραγματικής τιμής του ορίου διαρροής προς την ονομαστική τιμή ορίου διαρροής ($f_{y,act}/f_{y,nom}$)	-	+
	- επιμήκυνση μετά τη θραύση ϵ_s (%)	+	-
	- επιμήκυνση στο μέγιστο φορτίο $\epsilon_{u,k}$ (%)	-	+
	- λόγος της πραγματικής τιμής ορίου διαρροής προς την ονομαστική τιμή του ορίου διαρροής, $f_{y,act}/f_{y,nom}$	-	+
	B. Καταλληλότητα σε κάμψη (Δοκιμή αναδίπλωσης)		
	- Κάμψη/ανάκαμψη ή αναδίπλωση (ανάλογα με τη διάμετρο)	+	-
	- Αναδίπλωση	-	+
	Γ. Αντοχή σταυρωτών σημειακών συγκολλήσεων (Δοκιμή διάτμησης)	-	+
	Δ. Κόπωση	-	+
3	Χημική σύσταση (Συγκολλησιμότητα)	+	+
4	Σήμανση		
	- για αναγνώριση κατηγορίας	-	+
	- για αναγνώριση μονάδας παραγωγής και χώρας προέλευσης	-	+

Πίνακας 5. Έλεγχοι χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος κατά ΕΛΟΤ 959 - ΕΛΟΤ 971 και κατά ΕΛΟΤ EN 10080, ΕΛΟΤ 1421- 2, ΕΛΟΤ 1421- 3.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο - ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

3.1 Σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα αποτελεί το υλικό του οποίου η χρήση είναι πιο διαδεδομένη στον τομέα των κατασκευών. Η ευελιξία που μορφώνονται κατασκευές διαφόρων σχημάτων και μεγεθών, το μικρό κόστος, η άμεση διαθεσιμότητα των αποτελούμενων συστατικών του καθώς και κυρίως οι μηχανικές ιδιότητες του είναι οι λόγοι που είναι τόσο δημοφιλές. Η δομή του είναι πολύ ανομοιογενής και πολύπλοκη. Κατευθείαν μετά την ανάμειξη των επιμέρους υλικών συμπεριφέρεται ως αιώρημα σωματιδίων (κόκκοι τσιμέντου, άμμου, χαλίκια, φυσαλίδες αέρα) πολλαπλών μεγεθών σε νερό, αλλά με την πάροδο του χρόνου και την πρόοδο της αντίδρασης ενυδάτωσης γίνεται η μετατροπή του σε πορώδες στερεό υλικό. Αυτό βασίζεται στη δημιουργία των στερεών εγκλεισμάτων που σιγά σιγά σχηματίζουν ένα ενιαίο δίκτυο το οποίο είναι υπεύθυνο για την ικανότητα ανάληψης φορτίων του σκυροδέματος. Όταν το τσιμέντο με το νερό αναμιγνύονται και με την πάροδο του χρόνου, κάνουν την εμφάνισή τους κρύσταλλοι ένυδρων ενώσεων που γεμίζουν τον χώρο που καλυπτόταν από νερό και κόκκους τσιμέντου. Η απόδοση του σκυροδέματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις αρχικές αναλογίες που έχουν τα συστατικά. Στοιχειομετρικά απαραίτητο για την αντίδραση ενυδάτωσης είναι να υπάρχει αναλογία του νερού προς το τσιμέντο κατά μάζα, w/c, περίπου 0.23 [35]. Το υλικό γίνεται δύσκαμπτο καθώς οι κρύσταλλοι που εμφανίζονται, λόγω της αναλογίας που αναφέρθηκε, κατά την αύξηση τους, μετατρέπονται σε ομογενοποιημένο δίκτυο. Ωστόσο, στην πράξη ο λόγος τσιμέντου νερού παίρνει πολύ υψηλότερες τιμές, από τη μία ώστε να εξασφαλιστεί πως όλη η ποσότητα του τσιμέντου θα ενυδατωθεί, και από την άλλη ώστε να καταστεί το νωπό υλικό μορφοποιήσιμο σε καλούπια αλλά και να μπορεί να αντληθεί. Το νερό, κατά την χρήση του στην αντίδραση ενυδάτωσης δεσμεύεται χημικά και αφήνει κενό δίκτυο πορώδους. Επιπλέον, η περίσσεια νερού στο νωπό σκυρόδεμα οδηγεί σε αυξημένο πορώδες με δυσμενείς συνθήκες στην αντοχή, αλλά και μακροπρόθεσμα στην ανθεκτικότητα, αφού διαβρωτικοί παράγοντες διεισδύουν και υποβαθμίζουν τις ιδιότητες του ίδιου του σκυροδέματος αλλά και του μεταλλικού οπλισμού [33]. Ωστόσο, επειδή η αντοχή του σκυροδέματος εξελίσσεται με το χρόνο δεν είναι δυνατή η σαφής πρόβλεψη της τελικής αντοχής του και της εν γένει απόδοσής του σε μια κατασκευή. 28 ημέρες μετά την σκυροδέτηση με την χρήση θλιπτικών δοκιμών σε δοκίμια που έχουν φυλαχθεί υπό κατάλληλες συνθήκες γίνεται η μέτρηση της αντοχής. Το πόσο χρησιμεύει αυτή η μέτρηση ωστόσο είναι αμφίβολο καθώς πραγματοποιείται αρκετά αργότερα και εφόσον το υλικό έχει ενωθεί πλέον με την κατασκευή. Καθίσταται σαφές επομένως ότι η εκτίμηση της ποιότητας του υλικού οφείλει να πραγματοποιείται νωρίτερα, μέχρι και πριν το σκυρόδεμα τοποθετηθεί στο έργο. Αφού διασφαλιστεί ότι το υλικό διαθέτει τη σωστή αναλογία των υλικών που το αποτελούν και τηρηθούν οι απαιτούμενες διαδικασίες υπάρχει ελάχιστη πιθανότητα οι τελικές ιδιότητες να μην ικανοποιούν. Στην πράξη η αποδοχή ή όχι του νωπού υλικού στο εργοτάξιο βασίζεται στη δοκιμή κάθισης (ASTM C143). Η κάθιση συσχετίζεται με την περιεκτικότητα σε νερό, δίχως η σχέση αυτή να είναι σαφής και αξιόπιστη, αποτελώντας απλά και μόνο μία ένδειξη καταλληλότητας.

3.2 Νωπό Σκυρόδεμα-Σύνθεση

Ως νωπό σκυρόδεμα ορίζουμε το σκυρόδεμα το οποίο μόλις έχει παραχθεί, βρίσκεται ακόμα σε νωπή μορφή και είναι έτοιμο να συμπυκνωθεί και να μορφοποιηθεί μέσω των καλουπιών.

Η παραγωγή του νωπού σκυροδέματος από τα επιμέρους συστατικά του πρέπει να ικανοποιεί τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

1. Να διαθέτει κατά τη νωπή κατάσταση την συνεκτικότητα που απαιτείται ώστε να μορφοποιηθεί στο καλούπι δίχως να υπάρχουν κενά .

2. Όταν το σκυρόδεμα σκληρύνει να μπορεί έχει την αντοχή, την ανθεκτικότητα και τις μηχανικές ιδιότητες όλα τα παραπάνω τα οποία προβλέπονται από τις προδιαγραφές.

Ο λόγος νερού προς νωπό σκυρόδεμα αποτελεί τον βασικότερο παράγοντα για τις ιδιότητες του σκυροδέματος. Το που θα περιέχεται στο σκυρόδεμα οφείλει να είναι στη σωστή ποσότητα προκειμένου να πετύχουμε την ζητούμενη αντοχή η οποία ως γνωστόν μεγαλώνει όσο μεγαλώνουμε και προσθέτουμε περισσότερο τσιμέντο. Επιπλέον η ποσότητα του τσιμέντου διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στο κατά πόσο οι οπλισμοί προστατεύονται από την οξείδωση.

Συνεπώς πρέπει να γίνει προδιαγραφή των ποσοτήτων των συστατικών του σκυροδέματος.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η μελέτη σύνθεσης του σκυροδέματος τα απαραίτητα δεδομένα αναφέρονται παρακάτω:

- Η μορφή των δοκιμίων.
- Ο μέγιστος κόκκος Αδρανών.
- Η απαιτούμενη αντοχή .
- Η κάθιση του νωπού σκυροδέματος.
- Η μικρότερη περιεκτικότητα σε τσιμέντο.
- Ειδικές απαιτήσεις όπως παραθαλάσσιο περιβάλλον, επιχρισμένο ή ανεπίχριστο σκυρόδεμα κλπ.

Οι ποσότητες που θα προκύψουν από την μελέτη είναι οι παρακάτω :

- Η ποσότητα του τσιμέντου σε kg
- Η ποσότητα του νερού σε kg
- Η ποσότητα των αδρανών σε kg
- Οι σχέσεις προκύπτουν από τον ορισμό εργαστηριακής μελέτης σύνθεσης για 1 m³ σκυροδέματος.

3.3 Ανάμιξη Σκυροδέματος

Προκειμένου να αναμιχθεί το σκυρόδεμα πραγματοποιείται χρήση μηχανικών αναμικτήρων διαφόρων τύπων (σταθεροί, κεκλιμένου άξονα, σταθερούς οριζόντιου άξονα κλπ). Λαμβάνει χώρα σε μερικές περιπτώσεις στο σημείο της κατασκευής, ενώ σε άλλες περιπτώσεις στις εγκαταστάσεις του εργοστασίου παραγωγής σκυροδέματος.

Το σκυρόδεμα το οποίο παράγεται στις εγκαταστάσεις του εργοστασίου έχει αρκετά θετικά όπως: είναι το χαμηλότερο κόστος του καθώς και δυνατότητα για διενέργεια ποιοτικού ελέγχου. Για αυτούς τους λόγους είναι πιο διαδεδομένο από το εργοταξιακό σκυρόδεμα το οποίο όπως είναι και το όνομά του παρασκευάζεται στο εργοτάξιο.

Κατά την φάση της ανάμιξης προστίθενται πρώτα τα χονδρόκοκκα αδρανή στον αναμικτήρα έπειτα ακολουθούν τα λεπτόκοκκα και η προσθήκη του τσιμέντου. Τα υλικά αναμιγνύονται για περίπου 1 λεπτό και στη συνέχεια προστίθεται νερό σύμφωνα με την δοσολογία όπως επίσης και τυχόν πρόσθετα ή πρόσμικτα στις περιπτώσεις όπου υπάρχει απαίτηση. Όταν γίνεται χρήση ρευστοποιητών ή υπερρευστοποιητών, αυτοί τοποθετούνται στιγμές πριν το μίγμα διαστρωθεί, λόγω του ότι η δράση τους κρατά λίγο χρονικό διάστημα. Ο πιο συνηθισμένος χρόνος αναμίξεως για μπετονιέρες η αναμεικτήρες με λοξό άξονα είναι οι 30 με 40 στροφές ενώ ως μέγιστος χρόνος υπολογίζεται η 1 ώρα και 30 λεπτά που αντιστοιχεί κάπου σε 300 στροφές [41].

3.4 Νερό Αναμίξεως

Το νερό ανάμιξης μπορεί να επιφέρει μείωση της αντοχής του σκυροδέματος στην περίπτωση που το πρώτο περιέχει επιβλαβείς χημικές ουσίες. Για το λόγο αυτό δεν πρέπει να χρησιμοποιείται θαλασσινό νερό για την παρασκευή σκυροδέματος. Επίσης όπως προδιαγράφεται από το πρότυπο ΕΛΟΤ 345, το νερό ανάμιξης όπως και το νερό συντήρησης δεν θα πρέπει να περιέχει συστατικά που θα έχουν δυσάρεστες συνέπειες στην αντοχή και την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος και του οπλισμού του. Το χρησιμοποιούμενο νερό δεν πρέπει να προέρχεται από βιομηχανικά απόβλητα ούτε θα πρέπει να περιέχει ζωικά απορρίμματα, σάκχαρα και ανθρακικό κάλιο.

Επιπλέον δεν πρέπει να αμελείται η σημασία του λόγου νερού προς τσιμέντο (N/T) στη θλιπτική αντοχή του παραχθέντος σκυροδέματος. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων ο λόγος N/T κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0,40 και 0,65 ενώ αν χρησιμοποιηθούν ρευστοποιητές η απαίτηση για νερό αυξάνεται και συνεπώς αυξάνεται και ο λόγος N/T. Ωστόσο, έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι αύξηση του λόγου N/T επιφέρει μείωση της τελικής αντοχής του σκυροδέματος.

Συνοψίζοντας λοιπόν είναι εμφανής ο καταλυτικός ρόλος του νερού στην ανθεκτικότητα μιας κατασκευής από σκυρόδεμα, κι αυτό γιατί:

- Επηρεάζει το πορώδες (υψηλός λόγος w/c, αυξάνει την παρουσία τριχοειδών πόρων).
- Αποτελεί το μέσο διάχυσης των διαβρωτικών συστατικών στους πόρους τους σκυροδέματος.

- Αποτελεί το διαλύτη των διαβρωτικών μέσων.
- Συμμετέχει στην αντίδραση διάβρωσης του οπλισμού και στην καταστροφή της παθητικής του προστασίας.
- Συμμετέχει στην αλκαλοπυριτική αντίδραση και στην ενανθράκωση.
- Απουσία νερού, δεν προχωράει σχεδόν καμία δράση φθοράς.

3.5 Πρόσθετα Σκυροδέματος

3.5.1 Ρευστοποιητές

Οι ρευστοποιητές χρησιμοποιούνται για αύξηση της ρευστότητας του νωπού σκυροδέματος, (είναι πιο χρήσιμα στην πράξη). Η χρήση τους είναι σχεδόν απαραίτητη για σκυροδέματα υψηλής ποιότητας, που αναγκαστικά περιέχουν λιγότερο νερό, ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες. Όταν χρησιμοποιούνται υπερρευστοποιητικά πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η επίδραση τους στην ρευστότητα του μίγματος κατά κανόνα εξαφανίζεται μετά από 20-30 min από την προσθήκη τους στο μίγμα. Για τον λόγο αυτό, αν η ανάμειξη των υλικών του σκυροδέματος γίνεται σε εργοστάσιο ετοιμού σκυροδέματος και ακολουθεί μεταφορά στο έργο σε, μπετονιέρα, ένα μέρος ή και το σύνολο του υπερρευστοποιητικού χρειάζεται να προστίθεται στο μείγμα όχι στο εργοστάσιο παραγωγής αλλά επιτόπου στο έργο, λίγο πριν τη σκυροδέτηση. Σε αυτό το πείραμα χρησιμοποιήθηκαν οι εξής ρευστοποιητές, Visco techno 10+ και Plastoncrete οι οποίοι θα αναλυθούν σε άλλο κεφάλαιο.

3.5.2. Αερακτικά

Τα αερακτικά στο σκυρόδεμα είναι η σκόπιμη δημιουργία μικροσκοπικών φυσαλίδων αέρα σε μια παρτίδα με την προσθήκη ενός παράγοντα που συμπαρασύρει αέρα κατά την ανάμειξη. Μια μορφή επιφανειοδραστικής ουσίας (μια επιφανειοδραστική ουσία που στην περίπτωση μειώνει την επιφανειακή τάση μεταξύ νερού και στερεών) επιτρέπει τη δημιουργία φυσαλίδων επιθυμητού μεγέθους. Αυτά δημιουργούνται κατά την ανάμειξη του σκυροδέματος με τον περισσότερο αέρα να παραμένει μέρος του όταν σκληρυνθεί. Η εισαγωγή αέρα κάνει το σκυρόδεμα πιο λειτουργικό κατά την τοποθέτηση και αυξάνει την αντοχή του όταν σκληρύνεται, ιδιαίτερα σε κλίματα που υπόκεινται σε κύκλους κατάψυξης-απόψυξης. Τα αερακτικά (Air entrainers) δεδομένου ότι δεν είναι πολύ διαδεδομένα αποτελούν μία πολυ καλή κατηγορία των προσθέτων. Αποτελούν τα πρόσθετα αυτά που επιτρέπουν σε μία ελεγχόμενη ποσότητα φυσαλίδων αέρα, ίσα κατανεμημένων, να ενσωματώνονται όταν πραγματοποιείται η ανάμειξη και να μένουν όταν σκληραίνει το σκυροδέμα. Χρησιμοποιούνται για τη μακροχρόνια αντιπαγετική προστασία του μπετόν και της αντίστασής του, έναντι των κύκλων πήξης-τήξης, καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργικής του ζωής [39].

3.5.3 Επιβραδυντές

Αποσκοπούν στο να μεγαλώσει ο χρόνος πήξεως και γίνεται χρήση τους στον μίγμα συχνά μαζί με άλλα πρόσθετα σε διάφορες αναλογίες. Επίσης συμβάλλουν στην ομοιόμορφη πήξη του σκυροδέματος καθώς και στην καλύτερη και πιο εύκολη

εργασιμότητα με χρήση μικρότερης ποσότητας νερού. Έχουν επίδραση στην ενυδάτωση του C3S & C3A που ευθύνονται για την πήξη του σκυροδέματος κατά τις πρώτες ώρες παραγωγής του. Τα μειονεκτήματά του είναι η αύξηση του αέρα που περιέχεται στο σκυρόδεμα, ο μεγαλύτερος χρόνος συντήρησης όπως και οι μικρότερες αρχικές αντοχές που έχουν ως αποτέλεσμα τη συστολή και τον ερπυσμό.

3.5.4 Επιταχυντές

Η χρήση τους οδηγεί στην πιο γρήγορη ανάπτυξη των αρχικών αντοχών του σκυροδέματος αυξάνοντας ταυτόχρονα την πήξη του τσιμέντου. Ωστόσο γενικότερα μειώνουν την αντοχή του σκυροδέματος κατά 15%. Γενικά η χρήση των επιταχυντών γίνεται όταν το σκυρόδεμα πρόκειται να χυτευτεί σε χαμηλές θερμοκρασίες περίπου μεταξύ 2°C - 4°C. Όταν χρησιμοποιούνται σε υψηλές ποσότητες έχουν ως αποτέλεσμα την συρρίκνωση του σκυροδέματος λόγω της εκλυόμενης θερμότητας κατά τη φάση ενυδάτωσης του τσιμέντου. Ο συγκεκριμένος τύπος πρόσθετων επιδρά στο μηχανισμό ενυδάτωσης του C3S. Ο γνωστότερος επιταχυντής πήξης είναι το CaCl₂ που έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή της αλκαλικότητας στο διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος. Ωστόσο, το χλωριούχο ασβέστιο παρά τις αντιπαγετικές του ιδιότητες, προκαλεί μείωση στην ανθεκτικότητα σε θειικά, διαβρώνει τον οπλισμό εξαιτίας της υψηλής συγκέντρωσης σε ιόντα Cl⁻ για συγκέντρωση > 1% κ.β. Ταυτόχρονα αυξάνει τον κίνδυνο δημιουργίας ρηγματώσεων λόγω συρρίκνωσης και ερπυσμού. Προκειμένου να υπάρξει αποφυγή των παραπάνω γίνεται προσθήκη με διάφορα είδη ποζολανών.

3.5.5 Υπερρυστοποιητές

Πρόκειται για ειδική κατηγορία χημικών πρόσθετων που έχουν δράση στην επιφάνεια και προκαλούν αύξηση της ρευστότητας του σκυροδέματος 3 έως 4 φορές περισσότερο από τα απλά ρευστοποιητικά, δίνοντας την δυνατότητα για τη μείωση του νερού ανάμιξης περίπου στο 20 - 25% δίχως όμως ελάττωση της εργασιμότητας. Η προσθήκη των υπερρυστοποιητικών στο σκυρόδεμα είναι συνήθως από 0.5 – 0.8% έως 1.2% κ.β. τσιμέντου. Δεν προκαλούν αργότερη πήξη του σκυροδέματος αντιθέτως η δράση τους προξενεί την εξαιρετική διασπορά των κόκκων τσιμέντου που έχει ως αποτέλεσμα την πιο γρήγορη ενυδάτωση του σκυροδέματος. Οι ενώσεις που χρησιμοποιούνται γενικώς ως υπερρυστοποιητικά σκυροδέματος είναι άλατα μελαμίνης, ενώσεις φορμαλδεϋδης και χρησιμοποιούνται για να επιτευχθούν υψηλές αντοχές. Το Βρετανικό πρότυπο BS EN-5075 έχει κατατάξει τα χημικά πρόσθετα του σκυροδέματος σε επιταχυντές, επιβραδυντές, ρευστοποιητές και υπερρυστοποιητές. Οι απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούν τα πρόσθετα αναλύονται από τον Ευρωκώδικα EN 934-02. Επιπροσθέτως, τα πρόσθετα υποχρεούνται να ικανοποιούν τις γενικές απαιτήσεις του ΕΛΟΤ EN 934-1:2008 και τις ειδικές απαιτήσεις του ΕΛΟΤ EN 934-2.[41]

3.6 Εργασιμότητα Σκυροδέματος

Εργασιμότητα είναι η ιδιότητα του νωπού σκυροδέματος που χαρακτηρίζει την ευκολία με την οποία αυτό μεταφέρεται, διαστρώνεται και συμπτυκνώνεται. Διαφορετικά εργασιμότητα μπορεί να οριστεί η ιδιότητα εκείνη που διέπει την προσπάθεια-έργο που απαιτείται για τη μεταφορά, διάστρωση, συμπίκνωση και

τελείωμα του σκυροδέματος χωρίς απόμιξη των υλικών (είναι το φαινόμενο της διαφορικής καθ' ύψος κατανομής, λόγω μεγέθους, των αδρανών στη μάζα του σκυροδέματος). Η εργασιμότητα εξαρτάται βασικά από την ευκολία ροής, δηλαδή τη ρευστότητα του νωπού σκυροδέματος και τη συνοχή της μάζας ή συνεκτικότητα (την ικανότητα του νωπού σκυροδέματος να συγκρατεί τόσο το νερό όσο και τα αδρανή σε μία ομοιόμορφη μάζα). Όπως και η ανθεκτικότητα σε διάρκεια (durability), η εργασιμότητα δεν αποτελεί θεμελιώδη ιδιότητα του σκυροδέματος, αλλά σχετίζεται με τον τύπο της κατασκευής και τις μεθόδους διάστρωσης, συμπύκνωσης και τελειώματος. Για παράδειγμα, σκυρόδεμα που θεωρείται ικανοποιητικής εργασιμότητας για την κατασκευή ενός φράγματος μπορεί να είναι τελείως ακατάλληλο (από άποψη εργασιμότητας) για την κατασκευή υποστυλωμάτων και δοκών. Η σημασία της εργασιμότητας στην τεχνολογία σκυροδέματος είναι τεράστια, καθώς σκυροδέματα που διαστρώνονται ή συμπυκνώνονται δύσκολα συνήθως εμφανίζουν προβληματική ανάπτυξη, τελική τιμή αντοχών και προβληματική ανθεκτικότητα σε διάρκεια. Η εργασιμότητα του σκυροδέματος πρέπει να ελέγχεται πριν τη διάστρωση, μετά την εκφόρτωση συγκεκριμένης ποσότητας του αναμίγματος ή του φορτίου του αυτοκινήτου-μπετονιέρα (το $\frac{1}{3}$ σύμφωνα με τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος, τα 0.3 m³ σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 12350-1) [37].

Πειραματικοί Έλεγχοι Μέτρησης της Εργασιμότητας Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 206-1:

- Δοκιμή κάθισης

Η κάθιση αποτελεί ένα μέτρο εργασιμότητας που εκφράζεται με την απώλεια ύψους, σε cm που έχει μια κωνική στήλη νωπού σκυροδέματος, όταν ανασυρθεί η μήτρα σε σχήμα κώνου (κώνος καθίσεως) η οποία χρησιμοποιήθηκε για την μόρφωση (είναι ο πρακτικότερος και πιο συνηθισμένος τρόπος μέτρησης της εργασιμότητας). Αυτή η μέθοδος πραγματοποιείται σε σκυροδέματα όπου ο μεγαλύτερος κόκκος αδρανούς είναι μεγαλύτερος από 40 mm. Το δείγμα οφείλει να είναι αντιπροσωπευτικό της παρτίδας, πρέπει να γίνεται λήψη βάσης των οδηγιών του προτύπου ΕΛΟΤ 516 το οποίο αφορά την δειγματοληψία του νωπού σκυροδέματος, και να πραγματοποιείται έλεγχος το λιγότερο μέσα σε 5 λεπτά από όταν πάρθηκε το δείγμα. Γίνεται μέτρηση της διαφοράς ύψους του πιο ψηλού σημείου του σκυροδέματος, όπως έγινε η κάθιση, μετά το πέσιμο από το ύψος του αρχικού κώνου, προσέγγιση είναι 5 mm. Αν το δείγμα διαλυθεί η δοκιμή δεν λαμβάνεται υπόψιν και οφείλει να επαναληφθεί με νέο μέρος του δείγματος. Αν δύο συνεχόμενες δοκιμές έχουν ως αποτέλεσμα την διάλυση του σκυροδέματος, τότε θεωρούμε ότι το σκυρόδεμα δεν έχει αποκτήσει την απαιτούμενη πλαστικότητα και συνοχή προκειμένου να εφαρμοστεί η δοκιμή της κάθισης. Αν η κάθιση είναι μικρότερη από 10 mm το σκυρόδεμα θεωρείται ύφυγρο και η μέθοδος αυτή είναι ακατάλληλη για το συγκεκριμένο σκυρόδεμα [19].

- Δοκιμή Vebe (ιδιαίτερα για αναμίγματα μικρής ρευστότητας).

- Δοκιμή βαθμού συμπύκνωσης (προσδιορίζει κυρίως την ευκολία συμπύκνωσης του νωπού σκυροδέματος).

- Δοκιμή μέτρου εξάπλωσης (ιδιαίτερα για σκυροδέματα μεγάλης ρευστότητας). Η δοκιμή εκτελείται σε «τράπεζα εξάπλωσης» της οποίας η επιφάνεια καλύπτεται με

πλάκα λαμαρίνας. Επάνω στην τράπεζα είναι χαραγμένος ένας κύκλος διαμέτρου 20 cm και δύο άξονες αριθμημένοι, με γωνία 90°, που διέρχονται από το κέντρο του κύκλου. Χρησιμοποιείται ένας κώνος μεταλλικός του τύπου που χρησιμοποιείται στη δοκιμή κάθισης. Δηλαδή με ανοικτή την επάνω και κάτω βάση του, και δύο χερούλια. Η άνω βάση έχει διάμετρο 10 cm και η κάτω βάση 20 cm. Το χωνί αυτό τοποθετείται ακριβώς επάνω στον κύκλο της τράπεζας. Πραγματοποιείται πλήρωση του κώνου με το υπό δοκιμή σκυρόδεμα, με τρόπο που προδιαγράφει η μέθοδος, τμηματικά. Το χωνί «κοπανίζεται» εξωτερικά με ξύλινο κόπανο ειδικό βάσει οδηγιών της μεθόδου ώστε το σκυρόδεμα να συμπυκνωθεί. Ισοπεδώνεται το σκυρόδεμα στην επάνω επιφάνεια του κώνου, και αμέσως ανασύρεται το χωνί αργά και κατακόρυφα. Το σκυρόδεμα εξαπλώνεται γύρω από τον κύκλο ανάλογα με την συνεκτικότητα του περισσότερο ή λιγότερο επάνω στην τράπεζα. Μετά από αυτό, η τράπεζα ανασηκώνεται από το χερούλι που έχει στο πλάι και αφήνεται να πέσει ελεύθερα 15 φορές οπότε πραγματοποιείται η κυρίως εξάπλωση του σκυροδέματος.

3.7 Ιδιότητες Σκυροδέματος κατά (ΕΚΩΣ 2000)

3.7.1 Θλιπτική Αντοχή

Η θλιπτική αντοχή προκύπτει από την αντοχή σκυροδέματος στο οποίο γίνεται μέτρηση στις 28 μέρες σε κυλινδρικά δοκίμια τα οποία έχουν διάμετρο 150 mm καθώς και ύψος 300 mm, σύμφωνα με τις οδηγίες του κανονισμού τεχνολογίας σκυροδέματος. Χαρακτηριστική αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου F_{ck} ονομάζεται εκείνη η τιμή της αντοχής κάτω της οποίας υπάρχει 5% πιθανότητα να υπάρξει η τιμή της αντοχής ενός τυχαίου δοκιμίου. Στην πραγματικότητα και στην πράξη το σκυρόδεμα θεωρείται ότι ανήκει στην κατηγορία που αναφέρεται στην μελέτη, αν και εφόσον οι δοκιμές μας δώσουν ενδείξεις που συμφωνούν με τον ΕΚΩΣ. Η διαστασιολόγηση πρέπει να βασίζεται σε κατηγορία σκυροδέματος που αντιστοιχεί σε καθορισμένη τιμή της χαρακτηριστικής αντοχής. Οι κατηγορίες παρουσιάζονται στον πίνακα 5, όπου ο πρώτος αριθμός κάθε κατηγορίας, ορίζει την χαρακτηριστική αντοχή κυλίνδρου σε MPa στις 28 μέρες. Η χρήση της κατηγορίας C12/15 σε οπλισμένο σκυρόδεμα επιτρέπεται μόνο για κτίρια χωρίς αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας με τρεις το πολύ ορόφους. Η χρήση της κατηγορίας C16/20 σε οπλισμένο σκυρόδεμα επιτρέπεται μόνο:

- για κατασκευές οι οποίες δεν έχουν μεγάλες απαιτήσεις πλαστιμότητας, με αδιάφορο αριθμό ορόφων.
- για κατασκευές που έχουν μεγάλες απαιτήσεις πλαστιμότητας, με τρεις το μέγιστο αριθμό σε ορόφους.

Για το σκυρόδεμα που περιέχει ίνες (προεντεταμένο) δεν επιτρέπονται οι κατηγορίες C12/15, C16/20 και C20/25.

Πίνακας 6.Κατηγορίες σκυροδέματος.

C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος μπορεί να εκτιμηθεί με βάση την χαρακτηριστική αντοχή από τον πίνακα 6. Όπου οι τιμές προκύπτουν από την σχέση

$$f_{cm} = 0.3 f_{ck}^{\frac{2}{3}}$$

Πίνακας 7. Εφελκυστική αντοχή σε MPa.

f_{ck}	12	16	20	25	30	35	40	45	50
$f_{ctk0.05}$	1.10	1.30	1.50	1.80	2.00	2.20	2.50	2.70	2.90
f_{ctm}	1.60	1.90	2.20	2.60	2.90	3.20	3.50	3.80	4.10
$f_{ctk0.95}$	2.00	2.50	2.90	3.30	3.80	4.20	4.60	4.90	5.30

Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των συστατικών του σκυροδέματος και την ταχύτητα επιβολής των παραμορφώσεων, για συνήθεις περιπτώσεις, η τετμημένη της κορυφής του διαγράμματος κυμαίνεται μεταξύ -0,2% και -0,25%, η συμβατική παραμόρφωση θραύσης μεταξύ -0,5% και 0,7% και η τάση θραύσης μεταξύ $0.75 f_c$ και $1,25 f_c$.

3.7.2 Μέτρο ελαστικότητας

Ως μέτρο ελαστικότητας E_{cm} ορίζεται η κλίση της ευθείας του διαγράμματος σ - ϵ που οδηγεί στο 40% της θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος. Ο πίνακας 7, παρουσιάζει το μέτρο ελαστικότητας σε GPa, και μπορεί να εκτιμηθεί βάσει της χαρακτηριστικής θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, και υπολογίζεται με βάση την εξίσωση

$$E_{cm} = 9.5(f_{ck} + 8)^{\frac{1}{3}} [GPa]$$

ενώ οι τιμές του πίνακα αντιστοιχούν σε περιπτώσεις κατά τις οποίες

$$\sigma_c = 0.4 f_{ck}$$

Πίνακας 8. Μέτρο ελαστικότητας σε GPa.

f_{ck}	12	16	20	25	30	35	40	45	50
E_{cm}	26	27.5	29	30.5	32	33.5	35	36	37

3.7.3 Παραμορφώσεις

Όπως είναι γνωστό από την Αντοχή των Υλικών οι τάσεις των μελών που υφίστανται καταπόνηση μπορούν να μετρηθούν μόνο μέσω των παραμορφώσεων που επιφέρουν.

Είναι επίσης γνωστό ότι η σχέση που συνδέει τα δύο παραπάνω μεγέθη είναι γνωστή ως νόμος του Hooke και προκύπτει από τη σχέση:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Όπου σ : η τάση, ε : η παραμόρφωση και E : το μέτρο ελαστικότητας

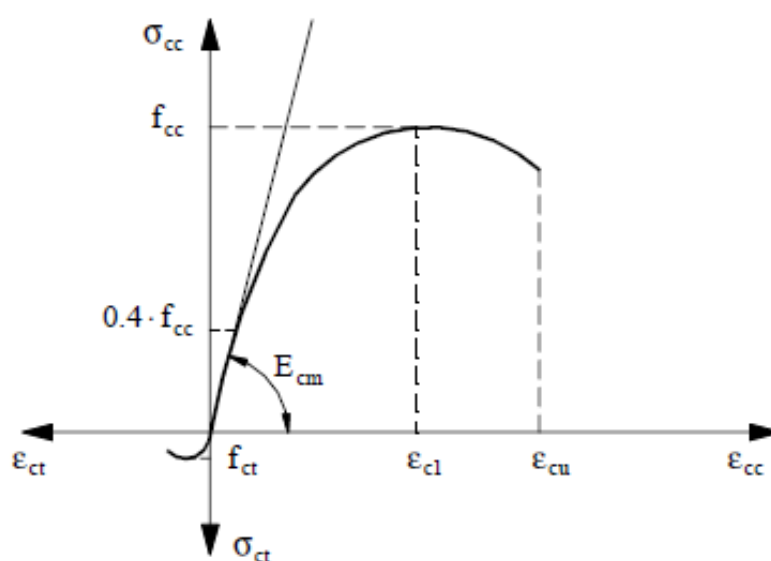
Η παραμόρφωση διακρίνεται σε ελαστική η οποία εξαλείφεται εφόσον σταματήσει η καταπόνηση που την επέβαλε, και σε πλαστική η οποία παραμένει ακόμα και αν απομακρυνθεί το αίτιο που την προκάλεσε.

Η φύση του εκάστοτε έργου μπορεί να απαιτεί την μελέτη διάφορων μορφών του διαγράμματος τάσεων – παραμορφώσεων, ανάλογα με την φύση του έργου και με τις ειδικές απαιτήσεις της μελέτης. Για οικοδομικά έργα, κατάλληλα ιδεατά διαγράμματα περιλαμβάνουν και εκείνο που παρουσιάζεται στην εικόνα 8.

Τα διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων παριστάνουν τη συμπεριφορά των υλικών σύμφωνα με μια σειρά πειραμάτων διεθνώς και εφαρμόζονται κατά τον σχεδιασμό των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος.

Το βασικό σχήμα του διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης στο σκυρόδεμα αναλύεται στην εικόνα 8 που φανερώνεται ότι η αντοχή του σκυροδέματος σχετικά με την θλίψη είναι περίπου δεκαπλάσια από την αντίστοιχη έναντι εφελκυσμού.

Στον άξονα των χ φαίνονται οι παραμορφώσεις για τις αντίστοιχες τάσεις του άξονα ψ .



Εικόνα 8. Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων σκυροδέματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο - ΚΙΣΣΗΡΗ

4.1 Κίσσηρης – Χημική σύσταση

Η κίσσηρης είναι το καταλληλότερο αδρανές από το οποίο μπορεί να γίνει παραγωγή ελαφροβαρών δομικών στοιχείων (κίσσηρολίθων), ελαφροσκυροδέματος (δομικού και πληρώσεως) ελαφροβαρών προκατασκευασμένων στοιχείων και ελαφροβαρών μονωτικών επιχρισμάτων. Επειδή είναι ένα ισχυρό απορροφητικό υλικό προσφέρεται για την εξυγίανση χαλαρών εδαφών και υπογείων υδάτων σε έργα οδοποιίας, κατασκευή λιμένων, γηπέδων κλπ.. Η κίσσηρης ανήκει στην οικογένεια των πυριγενών πετρωμάτων, δηλαδή πετρωμάτων που έχουν δημιουργηθεί από την σκλήρωση και την στεριοποίηση του μάγματος. Το μάγμα είναι φυσικό τήγμα που βρίσκεται μέσα στη γη σε διάφορα βάθη και όταν εκχυθεί στην επιφάνεια γίνεται λάβα. Τα κυριότερα πυριγενή πετρώματα είναι ο γρανίτης, ο ρυόλιθος, ο πηγματίτης ή απλίτης, ο συηνίτης, ο τραχείτης, ο γρανοδιορίτης, ο δακίτης, ο διορίτης, ο ανδεσίτης, ο βασάλτης και οι περιδοτίτες. Συγκεκριμένα, ο ρυόλιθος προκύπτει ως έκτυση του γρανίτη. Έχει πορφυριτικό ιστό και αποτελείται από φαινοκρυστάλλους χαλαζία και σανιδίνου. Ο βιοτίτης και σπάνια η κεροσίλβη είναι αυτά που επικρατούν από τα φεμικά. Περλίτης είναι η ρυολιθική λάβα σφαιρικής μορφής με νερό σε ποσοστό 3-10%, ενώ αν η υφή είναι κίσσηρώδης, πράγμα που οφείλεται στην διαφυγή πολλών αερίων, ονομάζεται κίσσηρης. Η κίσσηρης είναι όπως προαναφέρθηκε ένα χημικά αδρανές, πορώδες, ηφαιστειογενές ορυκτό. Η πορώδης μορφή του υλικού είναι άμεση συνέπεια των κενών που δημιουργούνται, ενώ ψύχεται η λάβα, από τον ατμό που διαφεύγει. Τα φυσικά χαρακτηριστικά που απαντώνται στην κίσσηρη είναι:

- το χαμηλό ειδικό βάρος
- το σταθερό και ομοιόμορφο χρώμα
- οι θερμομονωτικές και ηχοαπορροφητικές ιδιότητες
- η μεγάλη μηχανική αντοχή

Πίνακας 9. Σύσταση κίσσηρης [39].

Οξείδιο του Πυριτίου	SiO ₂
Οξείδιο του Αργιλίου	Al ₂ O ₃
Τριοξειδίου του Σιδήρου	Fe ₂ O ₃
Οξείδιο του Ασβεστίου	CaO
Οξείδιο του Μαγνησίου	MgO
Τριοξείδιο του Θείου	SO ₃
Οξείδιο του Καλίου	K ₂ O
Οξείδιο του Νατρίου	Na ₂ O
Απώλεια Πυρώσεως	

Η κίσσηρη χρησιμοποιείται εδώ και αιώνες στον κόσμο. Τα αδρανή κίσσηρης μπορούν να εντοπιστούν σε σημεία του κόσμου όπου υπάρχουν και υπήρχαν τα ηφαιστεια. Αν και έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε πολλές χώρες, η εύρεση νέων και βελτιωμένων τρόπων κατασκευής με κίσσηρη γίνεται ευρέως διαδεδομένη. Λόγω της σκληρότητας και της αντοχής της, η κίσσηρη είναι ένα πολύ γνωστό αδρανές ελαφρού σκυροδέματος

για περισσότερα από 2000 χρόνια. Τα αδρανή ελαφρόπετρας σε συνδυασμό με τσιμέντο Portland και νερό παράγουν ένα ελαφρύ θερμομονωτικό και ηχομονωτικό, πυρίμαχο ελαφρύ σκυρόδεμα για οροφές, ελαφριά γεμίσματα δαπέδων, μονωτικά δομικά καταστρώματα δαπέδων, σύστημα κουρτινών κλπ. Η δημοφιλία της κίσηρης ως πρώτης ύλης ελαφρού πετρώματος έχει αυξηθεί τόσο λόγω του μεγάλου εύρους των εφαρμογών της όσο και λόγω του ότι παρουσιάζει καλή ικανότητα παραγωγής διαφορετικών προϊόντων με βάση τη φυσική τους κατάσταση, χημικές και μηχανικές ιδιότητες. Το αδρανές κίσηρης βρίσκει μεγάλη έκταση χρήσης στην πολιτική βιομηχανία ως δομικό υλικό [33]. Γενικά η κίσηρη προτείνεται να χρησιμοποιηθεί ως πρόσμιγμα. Είναι δυνατή η ανάπτυξη ελαφρού σκυροδέματος χρησιμοποιώντας ελαφρόπετρα με ξηρή πυκνότητα 1200 kg/m³ έως 1450 kg/m³. Προς το παρόν, έχει πραγματοποιηθεί ο όγκος των εργασιών για τη διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων του ελαφρού αδρανούς σκυροδέματος (δηλ.) η αντοχή σε θλίψη, η αντοχή σε εφελκυσμό σε διάσπαση, η αντίσταση στα οξέα και η θερμική αντίσταση έχουν διερευνηθεί διάφορες ηλικίες ωρίμανσης. Ο στόχος είναι η ανάπτυξη ελαφρού σκυροδέματος χρησιμοποιώντας κίσηρη και να μελετηθεί η συμπεριφορά της κίσηρης ελαφρού σκυροδέματος υπό κάμψη. Στο τέλος της έρευνας, βγήκαν τα ακόλουθα συμπεράσματα: η δομική θλιπτική αντοχή της ελαφρόπετρας σχεδόν έφτασε την κανονική αντοχή σε θλίψη χονδρόκοκκου αδρανούς. Η μείωση της πυκνότητας επιβεβαιώνει ότι είναι ελαφρύ και το ελαφροσκυρόδεμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ελαφριές κατασκευές.

4.2 Κίσηρης στην Ελλάδα και Ελαφροσκυρόδεμα

4.2.1 Απόθεμα κίσηρης στην Ελλάδα

Η κίσηρης στην Ελλάδα μπορεί να βρεθεί κυρίως στο νησί Γυαλί (από το οποίο εξορύσσοντας και οι μεγαλύτερες ποσότητες του υλικού) ενώ επίσης μπορεί να βρεθεί και στην Νίσυρο, την Σαντορίνη αλλά και την Μήλο, πραγματοποιούνται μεγάλες εξαγωγές του υλικού στο εξωτερικό. Τα αποθέματα σε κίσηρη κυμαίνονται περίπου στο νησί Γυαλί περί τα 100 εκατομμύρια κυβικά μέτρα, ενώ στην Σαντορίνη αλλά και στην Νίσυρο είναι πρακτικά ανεξάντλητα. Η εκμετάλλευση των κοιτασμάτων της κίσηρης γίνεται από το 1952 από την εταιρεία ΛΑΒΑ, ανώνυμο εταιρεία, η οποία έως και σήμερα έχει και το προνόμιο της αποκλειστικής εκμετάλλευσης.

4.2.2 Ελαφροσκυρόδεμα

Η λογική της χρήσης ελαφροσκυροδέματος στις κατασκευές έγκειται πρωτίστως στην προσπάθεια μείωσης του ίδιου βάρους των κατασκευών, καθώς το ελαφροσκυρόδεμα είτε με μείωση της ποσότητας τσιμέντου λόγω αντικατάστασης με υδραυλικά συστατικά (ποζολάνες) είτε με τη χρήση ελαφροβαρών αδρανών κίσηρης, περλίτης κλπ.), παρουσιάζει μικρότερο ειδικό βάρος. Με τον τρόπο αυτό μειώνονται και τα σεισμικά φορτία που αναλαμβάνουν οι κατασκευές σε περίπτωση σεισμικής φόρτισης, καθώς είναι ανάλογα της μάζας τους και επομένως μειώνεται ο κίνδυνος αστοχίας λόγω σεισμού. Επιπρόσθετα, μικρότερο βάρος στο υλικό κατασκευής σημαίνει και μικρότερο συνολικό φορτίο, άρα και μικρότερες διαστάσεις διατομών των μελών της κατασκευής το οποίο μεταφράζεται σε λιγότερο οπλισμό, μικρότερη επιβάρυνση στη θεμελίωση και επομένως μείωση του κόστους. Επιπλέον, η δυνατότητα για μικρότερες

διατομές δίνει ένα ακόμα πλεονέκτημα στην αισθητική διάσταση των κατασκευών καθώς επιτρέπεται μεγαλύτερη ελευθερία σχεδιασμού με μεγαλύτερα ανοίγματα και ύψη και είναι αρκετές οι φορές που το ελαφροσκυρόδεμα έχει εφαρμογή σε αρχιτεκτονικές λύσεις που είναι αδύνατες με το κανονικό σκυρόδεμα. Ένα ακόμα πλεονέκτημα στη χρήση ελαφροσκυροδέματος είναι οι θερμομονωτικές ικανότητες που αυτό προσφέρει. Τα τελευταία χρόνια, στις χώρες ήπιου κλίματος, συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας, δίνεται έμφαση στην ενεργειακή πλευρά των κατασκευών και συγκεκριμένα στην μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης αυτών. Προς αυτή την κατεύθυνση, είναι και η προσπάθεια εύρεσης καινοτόμων και αποτελεσματικών λύσεων για τη θερμομόνωση των κτιρίων. Η μεταφορά της θερμότητας με τον αποδοτικότερο τρόπο χρησιμοποιώντας επαρκή υλικά μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών στοιχείων της κατασκευής, είναι εξίσου σημαντική με την αποφυγή των ενεργειακών απωλειών μιας κατοικίας. Έτσι, η γνώση των φυσικών ιδιοτήτων των υλικών κατασκευής και ειδικότερα του σκυροδέματος, είναι απαραίτητη σε όλα τα έργα πολιτικού μηχανικού. Η θερμική συμπεριφορά του σκυροδέματος και επομένως και του ελαφροσκυροδέματος, όπως αναφέρθηκε και πρωτύτερα, εξαρτάται πρωτίστως από την ποιότητα αλλά και από την ποσότητα των αδρανών που περιέχει. Χαλαζιτικά και ψαμμιτικά αδρανή έχουν την υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα, γρανιτικά, σχιστολιθικά και δολομιτικά ενδιάμεση θερμική αγωγιμότητα, ενώ αδρανή όπως ο βασάλτης παρουσιάζουν την ελάχιστη. Αδρανή με μικρή θερμική αγωγιμότητα παράγουν σκυρόδεμα χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας, ενώ το αντίθετο συμβαίνει με τη χρήση αδρανών χαμηλής θερμοχωρητικότητας. Έχει αποδειχθεί από έρευνες ότι το είδος του αδρανούς ενδέχεται ακόμα και να διπλασιάσει τη θερμική αγωγιμότητα του σκυροδέματος [38].

4.3 Συστατικά Ελαφροσκυροδέματος

Η καταλληλότητα των αδρανών για χρήση τους στην παραγωγή σκυροδέματος καθορίζεται στα Ευρωπαϊκά Πρότυπα EN 12620 (για τα κανονικού βάρους και τα βαριά αδρανή) και EN 13055-1 (για τα ελαφρά αδρανή). Κύριο χαρακτηριστικό της δομής του ελαφροσκυροδέματος είναι τα κενά αέρα στα αδρανή του, που είναι και ο λόγος για το μειωμένο βάρος του, συγκριτικά με το συμβατικό σκυρόδεμα. Το χαμηλό βάρος των ελαφροβαρών αδρανών (πυκνότητα κόκκων $\leq 2000 \text{ kg/m}^3$ ή φαινόμενη πυκνότητα σωρού $\leq 1200 \text{ kg/m}^3$) οφείλεται στο μεγάλο πορώδες, ενώ η αντοχή τους σε θλίψη συνήθως αυξάνεται, με την πυκνότητα υψωμένη σε δύναμη της τάξης του 1.5. Από τα γνωστότερα φυσικά ελαφροβαρή αδρανή είναι η κίσηρης η οποία προέρχεται από τη θραύση ανοιχτόχρωμου ηφαιστειακού πετρώματος που δημιουργήθηκε από την απότομη ψύξη λάβας με σύγχρονη αποβολή αερίων, και αποτελεί το κυριότερο και φθηνότερο ελαφρό αδρανές στη χώρα μας.

Το ελαφροσκυρόδεμα διαχωρίζεται στις παρακάτω κατηγορίες με βάση το ελαφροαδρανές υλικό από το οποίο έχει προέλθει:

- **Τεχνητά ελαφροαδρανή**

Τα πιο βασικά ελαφροαδρανή προκύπτουν είτε μέσω της διαδικασίας διόγκωσης (expansion) είτε μέσω της διαδικασίας συρρίκνωσης (agglomeration).

Όσον αφορά την μέθοδο της διόγκωσης, το υλικό θερμαίνεται στο σημείο τήξης, στο οποίο το σημείο πυροπλαστικότητας συμβαίνει ταυτόχρονα με το σχηματισμό αερίων.

Από την άλλη πλευρά στην μέθοδο της συρρίκνωσης, μέρος του υλικού λιώνει και τα διάφορα στοιχεία ενώνονται μεταξύ τους. Τα τεχνητά ελαφροαδρανή υπάρχει περίπτωση να προέρχονται είτε από φυσικά υλικά στα οποία έχει γίνει κατεργασία, είτε από βιομηχανικά παραπροϊόντα στα οποία έχει γίνει επεξεργασία. Παραδείγματα που αφορούν την πρώτη κατηγορία ελαφροαδρανών είναι η διογκωμένη άργιλος, (expanded clay), ο διογκωμένος σχιστόλιθος (expanded shale), ο διογκωμένος περλίτης (expanded perlite) και ο αποφυλλισμένος βερμικουλίτης (exfoliated vermiculite), ενώ παραδείγματα που αφορούν την δεύτερη κατηγορία είναι ελαφροαδρανή που προκύπτουν από την κατεργασία της ιπτάμενης τέφρας (fly ash) (πχ. sintered pulverized – fuel ash και cold bonded pulverized – fuel ash), υποπροϊόν των θερμοηλεκτρικών σταθμών που παράγουν.

- **Φυσικά ελαφροαδρανή**

Φυσικά ελαφροαδρανή ονομάζονται τα ελαφροαδρανή που έχουν προκύψει χωρίς να έχει γίνει κάποια ειδική κατεργασία. Τα βασικά ορυκτά ελαφροαδρανή είναι η κίσηρη (ή ελαφρόπετρα - pumice), η σκωρία (scoria) και ο διατομίτης (diatomite). Η σκωρία είναι παραπλήσιος λίθος με την κίσηρη, η κυριότερη διαφορά που υπάρχει μεταξύ τους είναι η δομή του πορώδους, η οποία υπάρχει από την δημιουργία του κάθε λίθου λόγω διαφορετικών παραγόντων που υπήρχαν τότε. Ο διατομίτης είναι ιζηματογενές ορυκτό που προέρχεται από τη συσσώρευση των διατομών, ένα θαλάσσιο φυτικό είδος. Τα βασικότερα υποπροϊόντα των οποίων γίνεται χρήση χωρίς ειδική κατεργασία ως ελαφροαδρανή είναι το furnace clinker, που προέρχεται από τους παλαιότερης τεχνολογίας θερμοηλεκτρικούς σταθμούς και η τέφρα πυθμένα (furnace bottom ash), προερχόμενη από τους σύγχρονους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Εν κατακλείδι οργανικά υλικά όπως είναι για παράδειγμα το πλαστικό η υποπροϊόντα ξύλου υπάρχει δυνατότητα χρήσης τους ως ελαφροαδρανή για εφαρμογές δομικών έργων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

5.1 Περιγραφή

Το πειραματικό μέρος της παρούσας έρευνας παρουσιάζεται παρακάτω.

Η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει την μελέτη για την υλοποίηση της σύνθεσης παρασκευής των δοκιμών καθώς επίσης περιλαμβάνει και την κατασκευή γραμμικών δοκιμών (δοκών) βάση της μελέτης σύνθεσης που προηγήθηκε.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε ογκομέτρηση σε κυβική μήτρα (15cm x15cm x 15cm) τόσο στην κίσηρη όσο και στο χονδρόκοκκο αδρανές προκειμένου να βρεθεί η ποσότητα κίσης που χρησιμοποιήθηκε στην σύνθεση. Η σύνθεση μελετήθηκε για σταθερό λόγο N/T ίσο με 0,7 προκειμένου να επιτευχθούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (π.χ. κάθιση S3).

Στην συνέχεια κατασκευάστηκαν τρεις (3) συμβατικοί δοκοί οπλισμένου σκυροδέματος (με χαρακτηριστικά που θα αναλυθούν παρακάτω). Κατασκευάστηκαν επίσης εννέα (9) πειραματικοί δοκοί οπλισμένου ελαφροσκυροδέματος ιδίων διαστάσεων ,καθώς και έξι (6) κυβικά δοκίμια.

5.2 Υλικά-Μελέτη Σύνθεσης

- Κίσηρη

Το αδρανές το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή του πειράματος είναι η κίσηρη ή αλλιώς ελαφρόπετρα (pumice). Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε κίσηρη (0-8mm).

- Αδρανή

Τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ασβεστολιθική άμμος (0-2 mm), γαρμπίλι (4-8 mm) και χαλίκι (8-16 mm).

Πίνακας 10 Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι ποσότητες διερχόμενων αδρανών από τα κόσκινα που χρησιμοποιήθηκαν σύμφωνα με το Πρότυπο EN 933-1

No Κοσκίνου	Χαλίκι (gr)	Γαρμπίλι (gr)	Άμμος (gr)
3/8''	2112	2125,5	
1/2''	2257,5	51,5	
3/4''	238,5		
1''	19,5		
1 1/2''	0		
4	81,5	262,5	2,5
8	15	41,5	651
100	5	12	4306
200	2413	2472	
Παιπάλη			39

- Τσιμέντο

Τόσο για τη μελέτη σύνθεσης όσο και για τα οπλισμένα γραμμικά στοιχεία από ελαφροσκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου CEM II/A-M(P-LL)42,5N της εταιρίας Lafarge.

- Υπερ-ρυστοποιητές

Χρησιμοποιήθηκαν οι υπερ-ρυστοποιητές ViscoCrete Techno-10+ και Plastocrete της εταιρείας Sika σε όλες τις περιπτώσεις παρασκευής σκυροδέματος. Πληρούν τις προδιαγραφές των Προτύπων EN 934-2 § 3.1. - 3.2, ASTM C 494 A & F (ΣΚ 308) και C1017 (ΣΚ 316). Η ποσότητα των ρυστοποιητών Plastocrete και Visco Techno 10+ που χρησιμοποιήθηκαν υπολογίστηκαν ίση με 0,5% και 0,6% αντίστοιχα ανά βάρος τσιμέντου.

- Χάλυβας

Για την παρασκευή των οπλισμένων δοκών προτύπων και πειραματικών χρησιμοποιήθηκε χάλυβας οπλισμού κατηγορίας B500C, με διάμετρο στην περίπτωση των διαμήκων οπλισμών εφελκυσμού και θλίψης Φ8 και Φ8 και στην περίπτωση του κατακόρυφου οπλισμού διάτμησης Φ8. Οι ονομαστικές διαμέτροι, οι ονομαστικές διατομές καθώς και η ονομαστική μάζα δίνονται παρακάτω. Οι τιμές βρίσκονται σε συμφωνία με τα Πρότυπα ΕΛΟΤ 971 και ΕΛΟΤ 1421.

Ονομαστική διάμετρος d(mm): 8

Ονομαστική διατομή A(mm²): 50.3 , Ανοχές(%): ±6

Ονομαστική μάζα (kg/m): 0.395

- **Μελέτη σύνθεσης και παρασκευής σκυροδέματος C16/20 S3**

Πραγματοποιήθηκαν δύο κύριες (2) συνθέσεις (σύνθεση 1 και 2) τα επιμέρους στοιχεία των οποίων παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες. Η σύνθεση 0 αφορά σε συμβατικό σκυρόδεμα C16/20 και ορίστηκε ως σύνθεση αναφοράς για τις υπόλοιπες. Οι συνθέσεις 1 και 2 ήταν αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των δοκών. Τα υλικά εισήχθησαν στην ηλεκτρική μετονιέρα με βάση τον όγκο των δοκιμίων σκυροδέτησης κάθε παρτίδας. Σε όλες τις συνθέσεις διατηρήθηκε ο λόγος νερού προς τσιμέντο ίσος με 0,7 (N/T=0,7).

ΑΜΜΟΣ	ΧΑΛΙΚΙ	ΓΑΡΜΠΙΛΙ	ΤΣΙΜΕΝΤΟ	ΝΕΡΟ
1090 kg	640 kg	180 kg	270 kg	190 kg

Σύνθεση 0 (σύνθεση αναφοράς)

Έπειτα από αναγωγή των παραπάνω σε όγκο 12 γραμμικών δοκιμίων (δοκών) και 6 κυβικών προκύπτουν οι παρακάτω συνθέσεις:

ΑΜΜΟΣ	ΧΑΛΙΚΙ	ΓΑΡΜΠΙΛΙ	ΤΣΙΜΕΝΤΟ	ΝΕΡΟ
49.61 kg	29.13 kg	8.19 kg	12.28 kg	8.64 kg

Σύνθεση 1 (συμβατικά δοκίμια)

Οι ποσότητες αυτές χρησιμοποιήθηκαν για την σκυροδέτηση των 3 συμβατικών γραμμικών οπλισμένων δοκιμίων (δοκών) καθώς και 3 συμβατικών κυβικών δοκιμίων.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η σύνθεση που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των εννέα (9) πειραματικών δοκών και των 3 πειραματικών κυβικών δοκιμίων καθώς και η ποσότητα κίσσης που προστέθηκε:

ΑΜΜΟΣ	ΧΑΛΙΚΙ	ΓΑΡΜΠΙΛΙ	ΤΣΙΜΕΝΤΟ	ΝΕΡΟ	ΚΙΣΣΗΡΗ
49,61 kg	14,56 kg	8,19 kg	12,28 kg	8,64	14,66 kg

Σύνθεση 2 (δοκίμια κίσσης)

5.3 Δοκίμια

Οι διαστάσεις των δοκιμίων (δοκοί) του πειράματος είναι: μήκος: 95cm, πλάτος: 10cm, ύψος: 19-21cm ανάλογα το κάθε δοκίμιο.

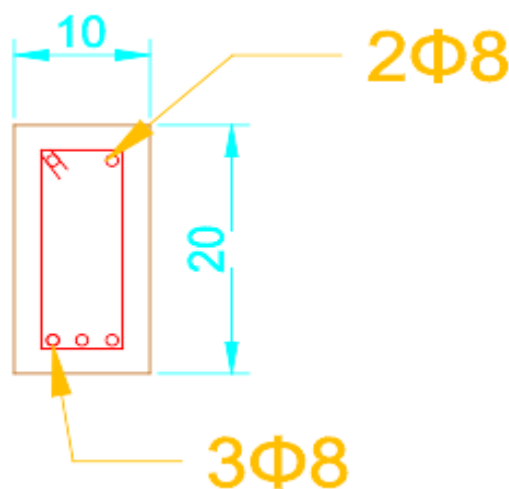
Χαρακτηριστικά δοκών:

Διαστάσεις : 0,10 (πλάτος) X 0,20 (ύψος)X 0,95(μήκος) (m)

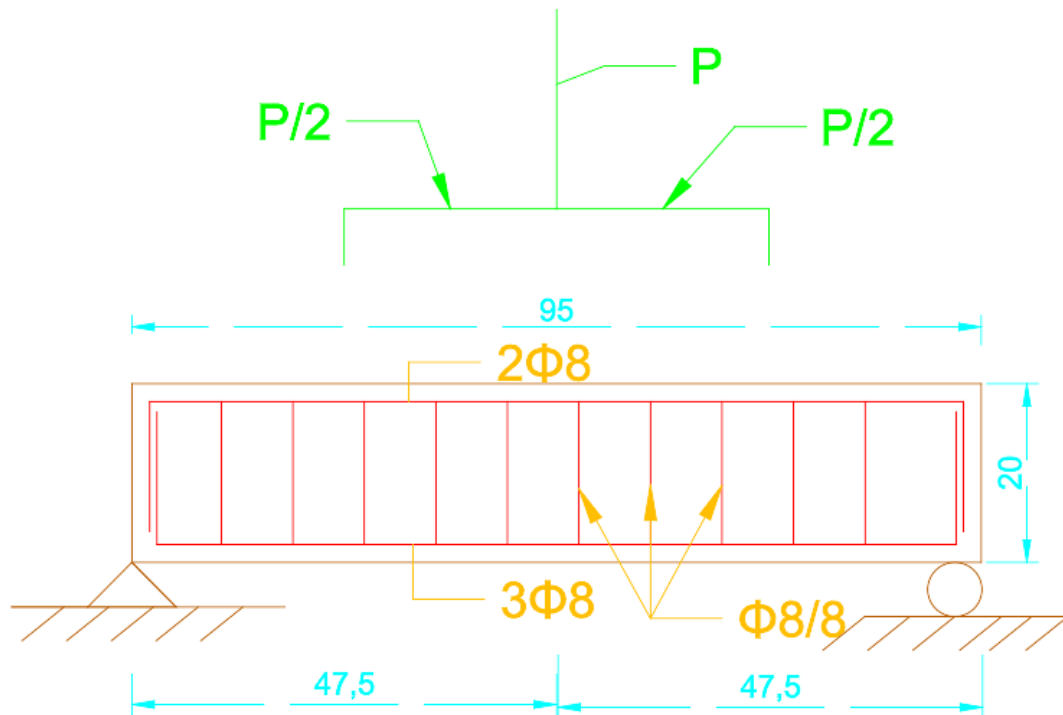
Στατικό ύψος: 19-21cm ανάλογα το κάθε δοκίμιο.

Οπλισμός : B500C σε αναλογία 2Φ8 άνω παρειά , 3Φ8 κάτω παρειά με συνδετήρες Φ8/8 .

Σχηματική απεικόνιση των γραμμικών δοκιμίων στις εικόνες 9 και 10.



Εικόνα 9. Τομή γραμμικού δοκιμίου(δοκού)



Εικόνα 10. Κάτοψη γραμμικού δοκιμίου(δοκού)

Τα κυβικά δοκίμια που παρασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος για το πείραμα υποβλήθηκαν σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός της θλιπτικής τους αντοχής F_c . Τα κυβικά δοκίμια διαστάσεων 150 mm x 150 mm x 150 mm αρχικά ζυγίστηκαν για τον υπολογισμό του βάρους τους πριν υποβληθούν σε μονοαξονική θλίψη.



Εικόνα 11. Μήτρες κυβικών δοκιμίων



Εικόνα 12. Ξυλότυπος γραμμικού δοκιμίου και οπλισμός

Στις εικόνες 12 και 13 παρουσιάζεται ο ξυλότυπος των γραμμικών δοκιμίων (δοκών) καθώς και ο οπλισμός που χρησιμοποιήθηκε. Για την επικάλυψη του οπλισμού χρησιμοποιήθηκαν αποστάτες.



Εικόνα 13. Ξυλότυπος γραμμικού δοκιμίου και οπλισμός.



Εικόνα 14. Ανάμιξη μείγματος σκυροδέματος σε ηλεκτρική μπετονιέρα, διάστρωση και συντήρηση δοκιμίων στο νερό

Στις εικόνες 14 και 15 παρουσιάζονται κομμάτια από τις διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν προκειμένου να κατασκευαστούν οι δοκοί.

- Πραγματοποιήθηκε ανάμιξη των υλικών σε ηλεκτρικό αναμεικτήρα.
- Διαστρώθηκαν οι δοκοί και τα κυβικά δοκίμια.
- Πραγματοποιήθηκε συντήρηση όλων των δοκιμίων γραμμικών και κυβικών στην δεξαμενή του εργαστηρίου οπλισμένου σκυροδέματος προκειμένου να αναπτυχθούν αντοχές.

Διερεύνηση μεταβολής αντοχών δοκών οπλισμένου σκυροδέματος παρασκευασμένες με προσθήκη κίσης στην σύνθεση και μείωση του χονδρόκοκκου αδρανούς, 2022



Εικόνα 15.



Εικόνα 16. Ζυγαριά Μέτρησης βάρους & διαστάσεις κυβικού δοκιμίου

5.4 Μέτρηση Θλιπτικής αντοχής

Η αντοχή σε θλίψη δίνεται από τον τύπο: $f_c = P_{max} / (bd)$

όπου:

f_c : η θλιπτική αντοχή σε MPa (N/mm²)

P_{max} : το μέγιστο φορτίο που ασκείται μέχρι την αστοχία του δοκιμίου σε N

bd : το εμβαδόν του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με την πλάκα φόρτισης σε mm²,
εδώ $b = d = 150$ mm



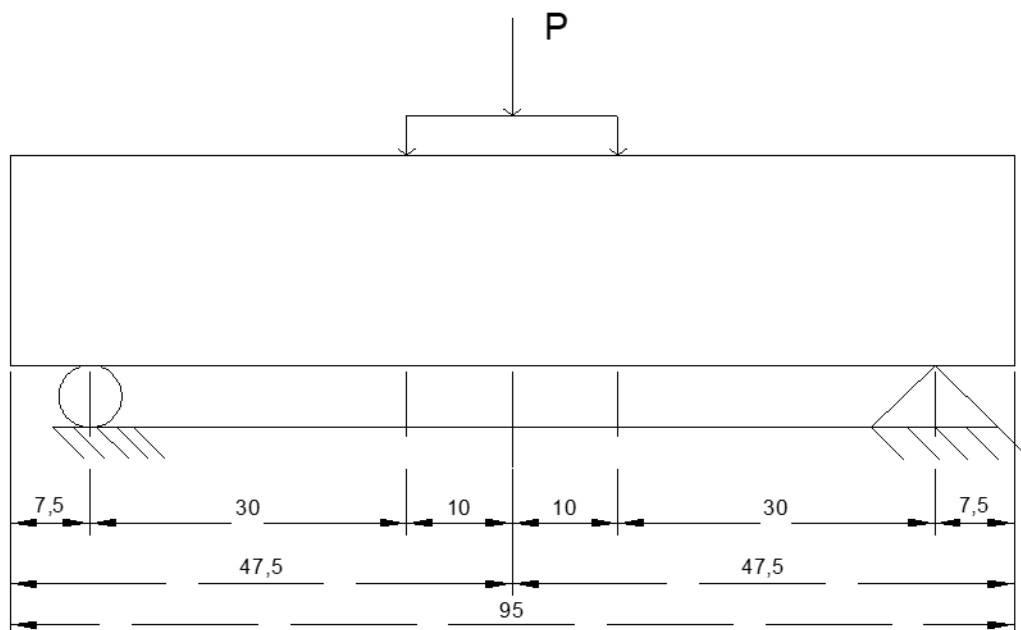
Εικόνα 17. Διάταξη μηχανής μονοαξονικής κάμψης στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του Π.Α.Δ.Α



Εικόνα 18. Παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό κυβικό δοκίμιο μετά το πέρας της δοκιμής σε μονοαξονική θλίψη και παρατηρείται η σχετική «ρηγμάτωση»του.

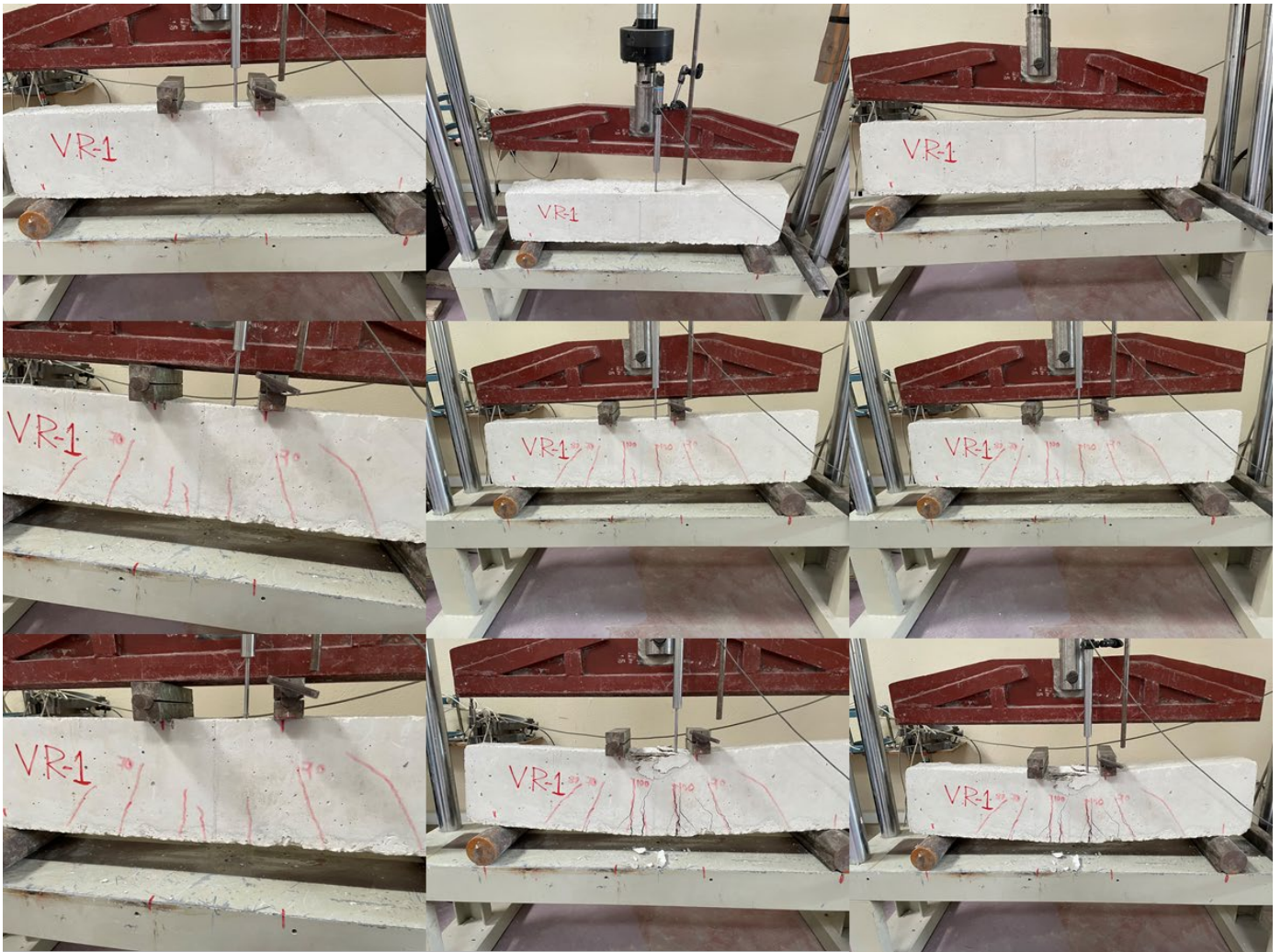
5.5 Δοκιμή Κάμψης -Μέτρηση Αντοχών

Σε αυτό το σημείο θα αναλυθεί η πειραματική διαδικασία για την μέτρηση της αντοχής των γραμμικών δοκιμίων (δοκών) που κατασκευάστηκαν. Η πειραματική διάταξη παρουσιάζεται στην εικόνα 19 που δείχνει τον τρόπο άσκησης πίεσης από το έμβολο, στην δοκό. Στην αρχή, μετρήσεις πάρθηκαν για τα δοκίμια χωρίς προσθήκη κίσηρης. Συνολικά, τρία συμβατικά δοκίμια εξετάστηκαν και συγκρίθηκαν οι αντοχές τους με εννέα πειραματικά που είχαν προσθήκη κίσηρης.



Εικόνα 19. Πειραματική διάταξη δοκιμίου και σχεδιάγραμμα φόρτισης

Η φόρτιση ασκήθηκε στο μέσο και διαιρέθηκε σε 2 διαδοχικά φορτία τα οποία απείχαν από το κέντρο της δοκού 10cm το καθένα. Οι στηρίξεις απείχαν από τα άκρα της δοκού 7,5cm η κάθε μια. Τέλος το μηκυσιόμετρο που χρησιμοποιήθηκε για να μετράει τις παραμορφώσεις τοποθετήθηκε κάθετα στην επιφάνεια του εκάστοτε δοκιμίου η οποία είχε λειανθεί για να μην υπάρχει αλλοίωση στις μετρήσεις λόγω κάποιας ανομοιομορφίας στην επιφάνεια.



Εικόνα 20. Συμβατικό δοκίμιο 1.

Οι εικόνες 20-22 παρουσιάζουν εικονικά τα αποτελέσματα από την σταδιακή αύξηση του φορτίου στα δοκίμια και παρατηρείται η σταδιακή παραμόρφωση των δοκών μέχρι το σημείο της θραύσης. Παρατηρείται η αναγραφή των σημείων αυξανόμενης αναφοράς της δύναμης στα δοκίμια (50 KN , 60 KN , 80 KN κλπ). Επίσης γίνεται σκιαγράφηση της σταδιακής «ρηγμάτωσης» των δοκών μέχρι το τελικό «σπάσιμο» .



Εικόνα 21. Συμβατικό δοκίμιο 2.

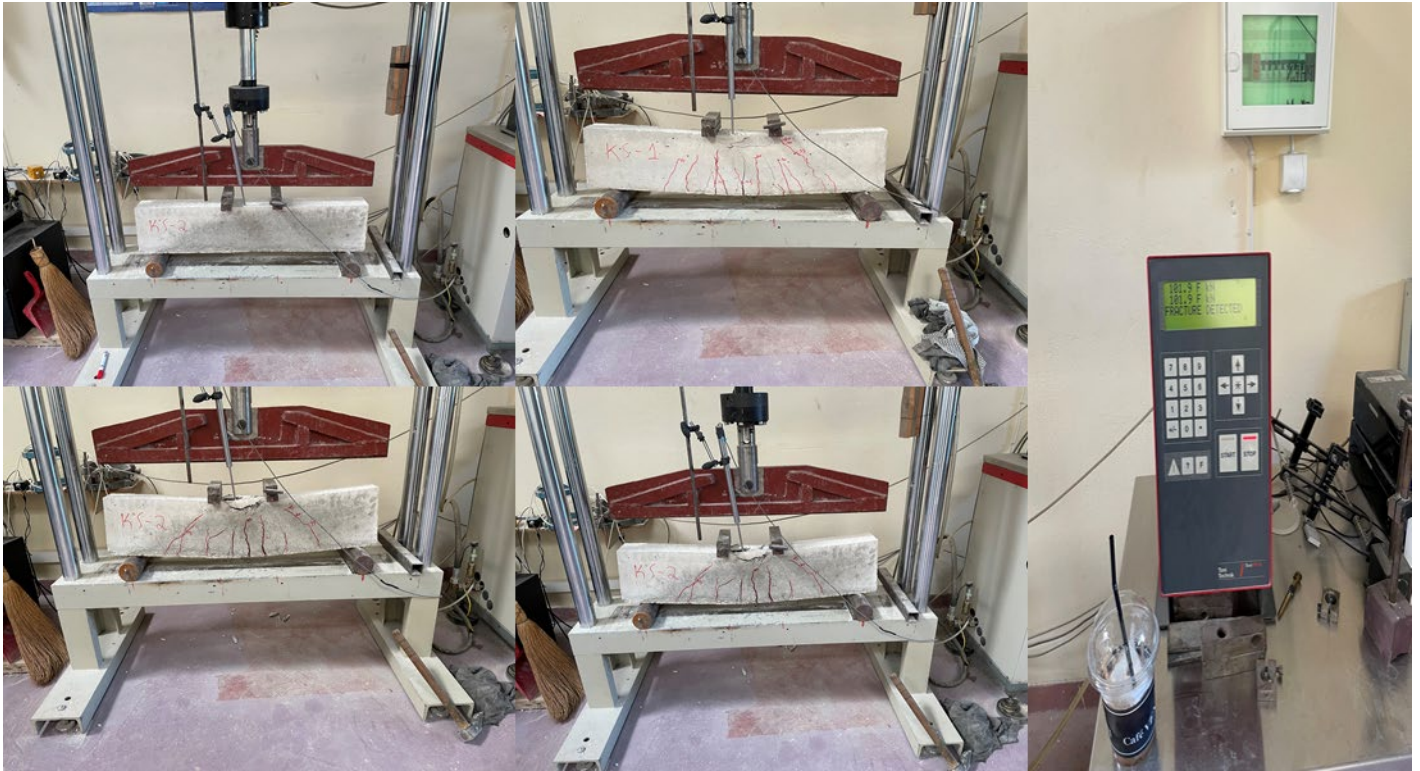


Εικόνα 22. Συμβατικό δοκίμιο 3.

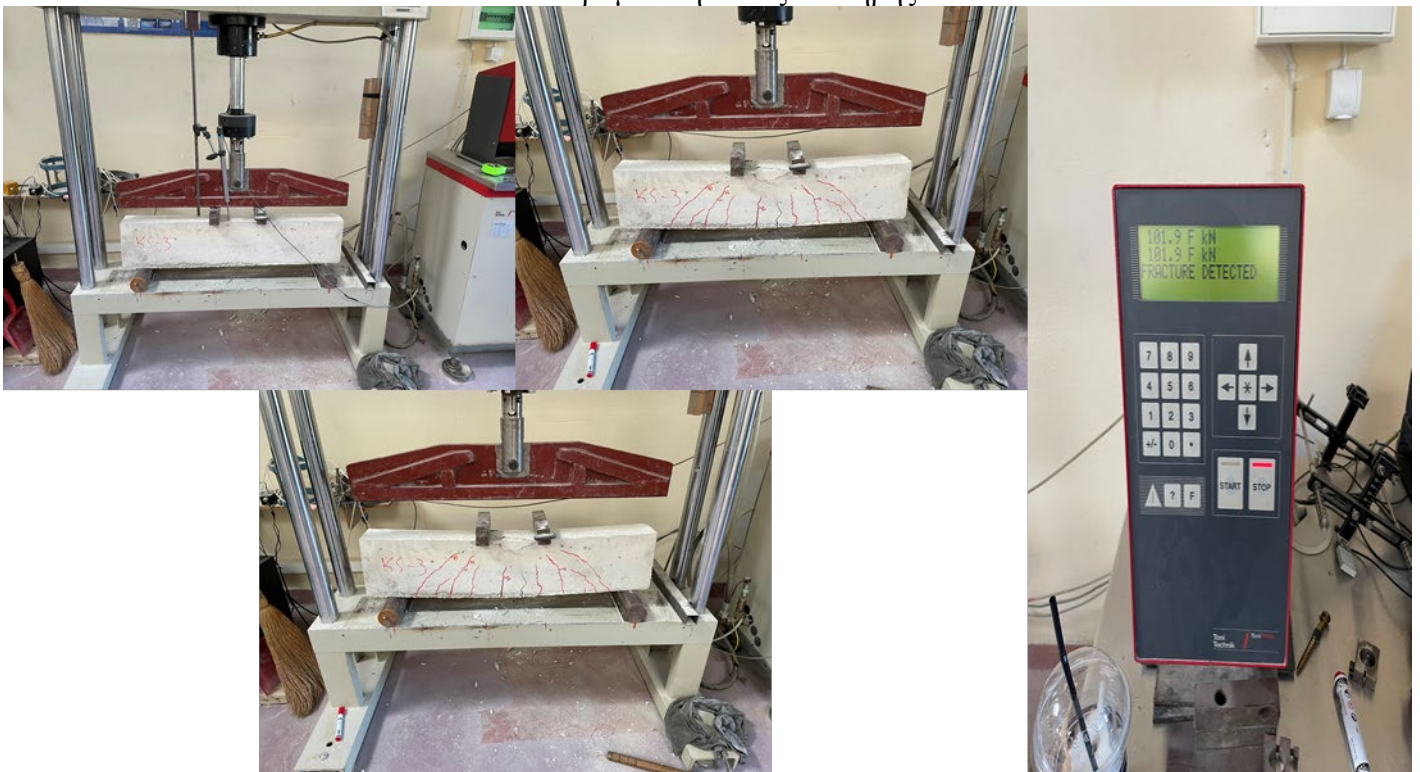


Εικόνα 23. Πειραματική δοκός κίσης 1.

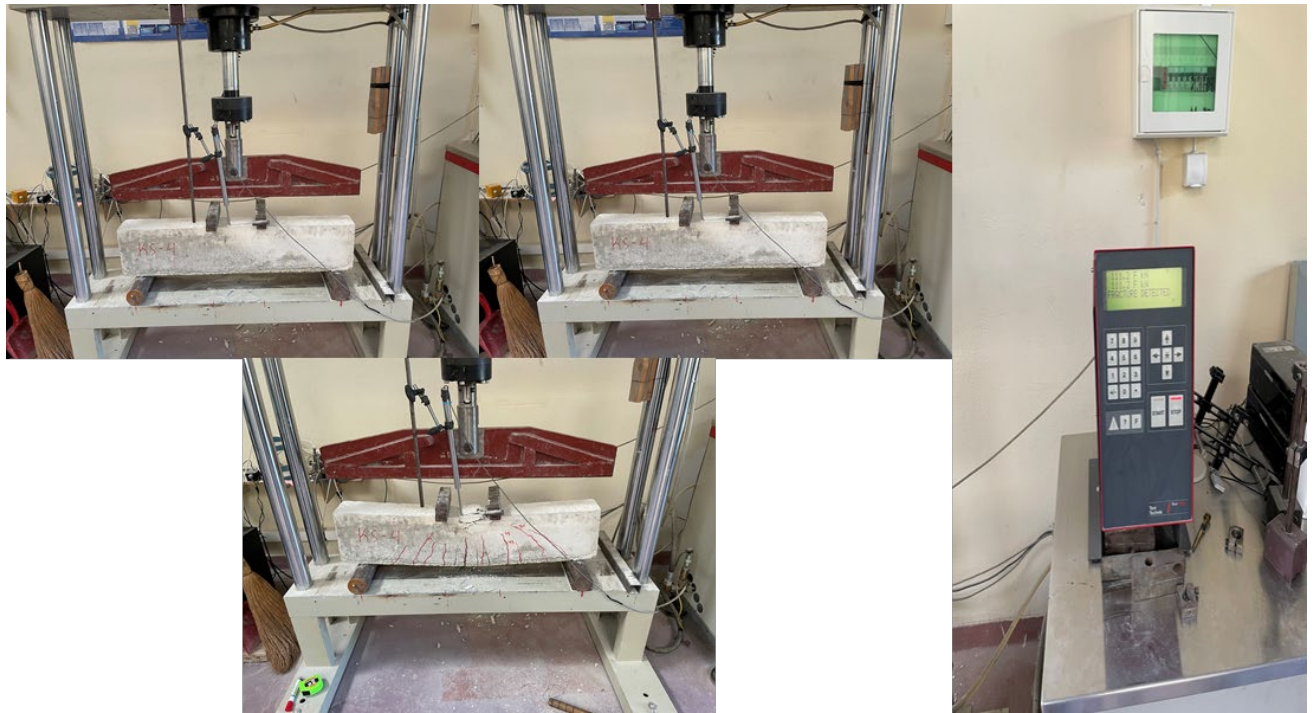
Έπειτα από την δοκιμή σε κάμψη των συμβατικών δοκών που χρησιμοποιήθηκαν ως αναφορά, η ίδια δοκιμή πραγματοποιήθηκε με την ίδια πειραματική διάταξη, σε δοκούς με την προσθήκη κίσης. Παρατηρήθηκε σταδιακή θραύση όλων των δοκιμών συμβατικών καθώς και κίσης στην κρίσιμη περιοχή λόγω εφελκυσμού της κάτω παρειάς των δοκών. Οι εικόνες 23 με 29 βοηθούν στην παρατήρηση των ρηγμάτων των δοκών.



Εικόνα 24. Πειραματική δοκός κίσηρης 2



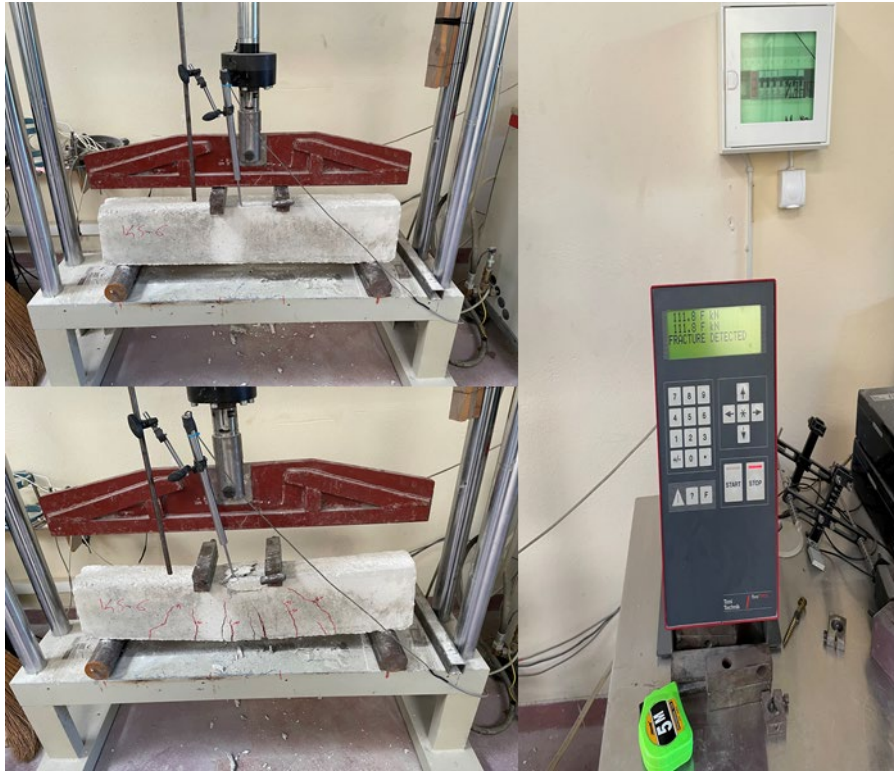
Εικόνα 25. Πειραματική δοκός κίσηρης 3.



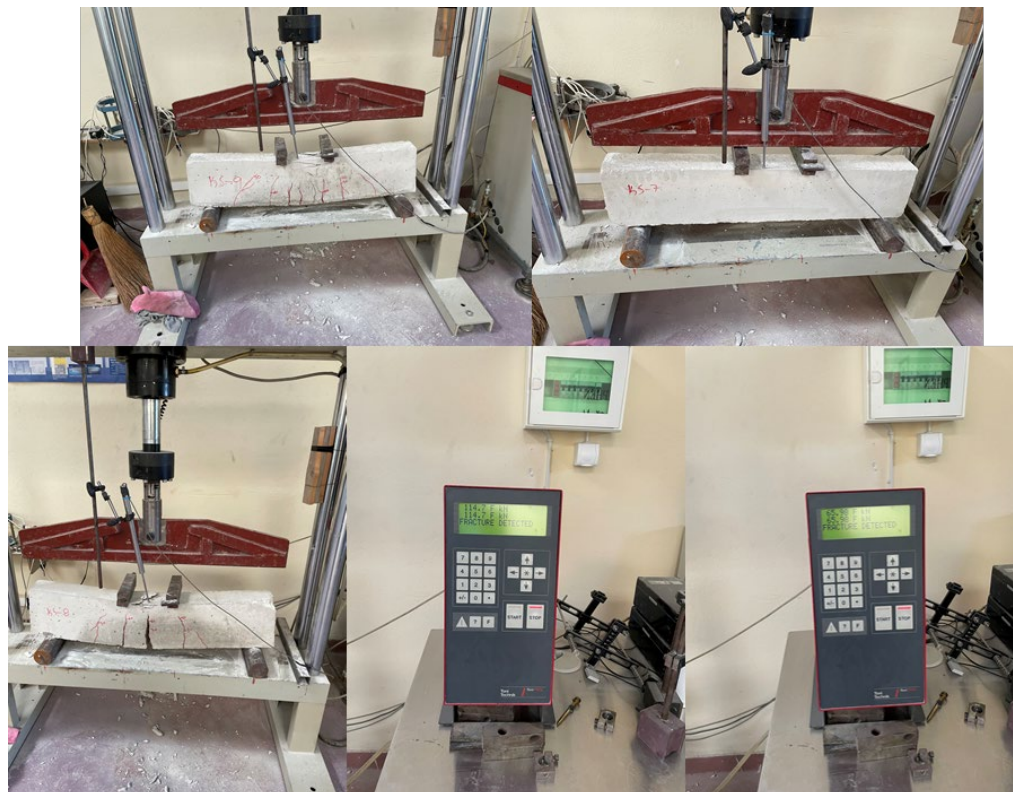
Εικόνα 26. Πειραματική δοκός κίσηρης 4.



Εικόνα 27. Πειραματική δοκός κίσηρης 5.



Εικόνα 28. Πειραματική δοκός κίσσης 6.



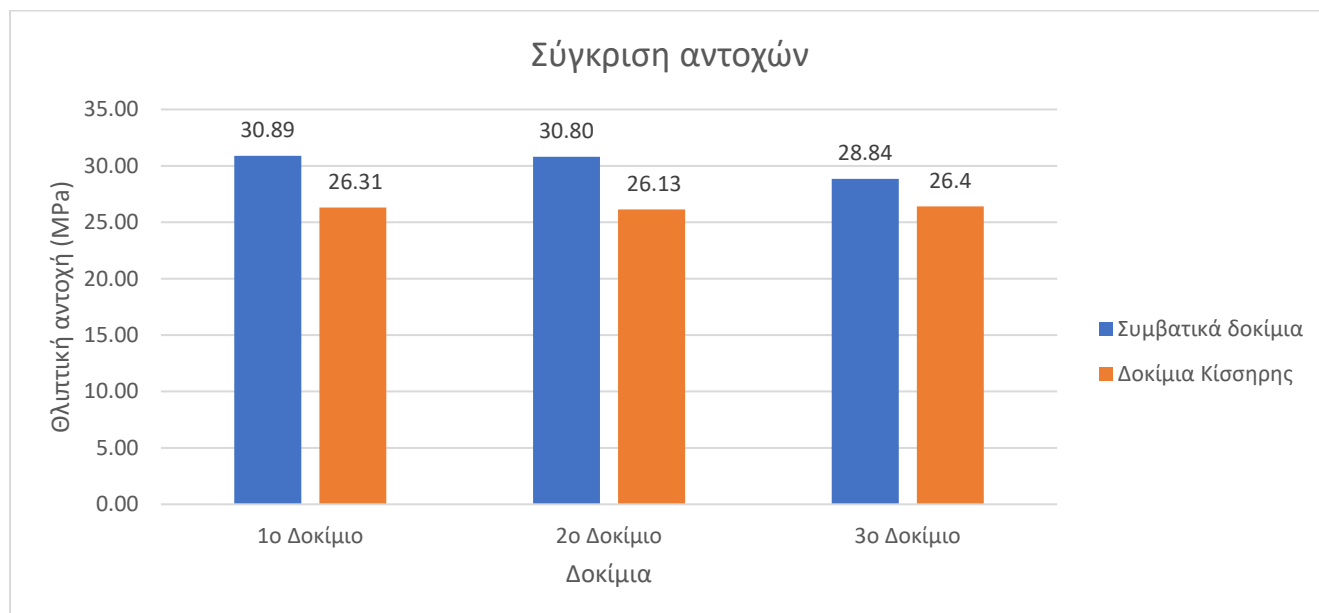
Εικόνα 29. Πειραματική δοκός κίσσης 7, 8 και 9.

5.6 Πειραματικά Αποτελέσματα

5.6.1 Κυβικά Δοκίμια

Α/Α	ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΚΥΒΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΑ			ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΚΙΣΣΗΡΗΣ			ΜΕΤΑΒΟΛΗ	
	Βάρος (KG)	F (KN)	σ (MPa)	Βάρος (KG)	F (KN)	σ (MPa)	Αντοχής(%)	Βάρους(%)
1ο Δοκίμιο	7,972	695	30.89	7,154	592	26.31	-15%	-10%
2ο Δοκίμιο	7,770	693	30.80	7,283	588	26.13	-15%	-6%
3ο Δοκίμιο	7,956	649	28.84	7,406	594	26.4	-8%	-7%
Μέσος Όρος	7,899	679	30.18	7,281	591	26.28	-13%	-8%

Πίνακας 11. Διερεύνηση της μεταβολής της θλιπτικής αντοχής και του βάρους των 3 δοκιμίων, συμβατικών και με δοκίμια με προσθήκη κίσηςρης



Εικόνα 30. Σύγκριση αντοχών κυβικών δοκιμίων

5.6.2 Γραμμικά Δοκίμια (Δοκοί)

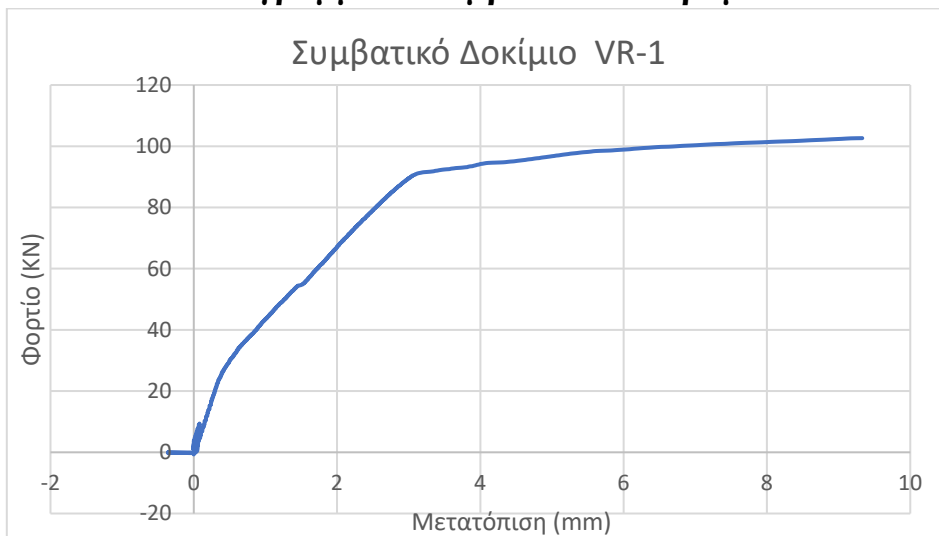
Α/Α	ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΙ ΔΟΚΟΙ	
	ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ (KN)	ΣΤΑΤΙΚΟ ΥΨΟΣ (CM)
ΔΟΚΟΣ VR-1	102,64	20
ΔΟΚΟΣ VR-2	107,4	20
ΔΟΚΟΣ VR-3	104,5	20

Πίνακας 12. Φορτία και ύψη συμβατικών γραμμικών δοκιμίων.

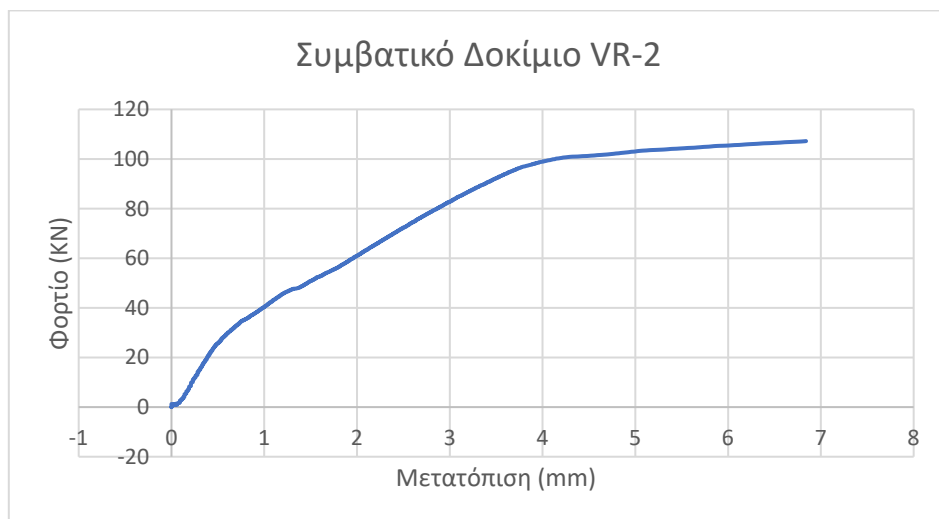
Α/Α	ΔΟΚΟΙ ΜΕ ΚΙΣΣΗΡΗ	
	ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ (KN)	ΣΤΑΤΙΚΟ ΥΨΟΣ (CM)
ΔΟΚΟΣ KS-1	99,4	20
ΔΟΚΟΣ KS-2	101,7	20
ΔΟΚΟΣ KS-3	110	21
ΔΟΚΟΣ KS-4	111,6	21
ΔΟΚΟΣ KS-5	101,1	20
ΔΟΚΟΣ KS-6	112,12	21
ΔΟΚΟΣ KS-7	115,26	20,8
ΔΟΚΟΣ KS-8	68,32	20
ΔΟΚΟΣ KS-9	115,7	20,7

Πίνακας 13. Φορτία και στατικά ύψη πειραματικών γραμμικών δοκιμίων.

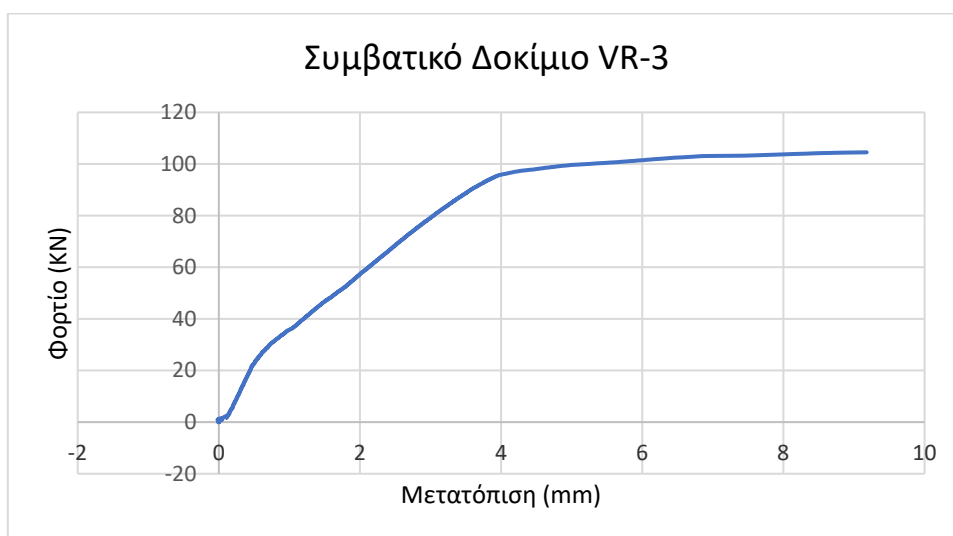
5.6.3 Διαγράμματα συμβατικών-πειραματικών δοκών



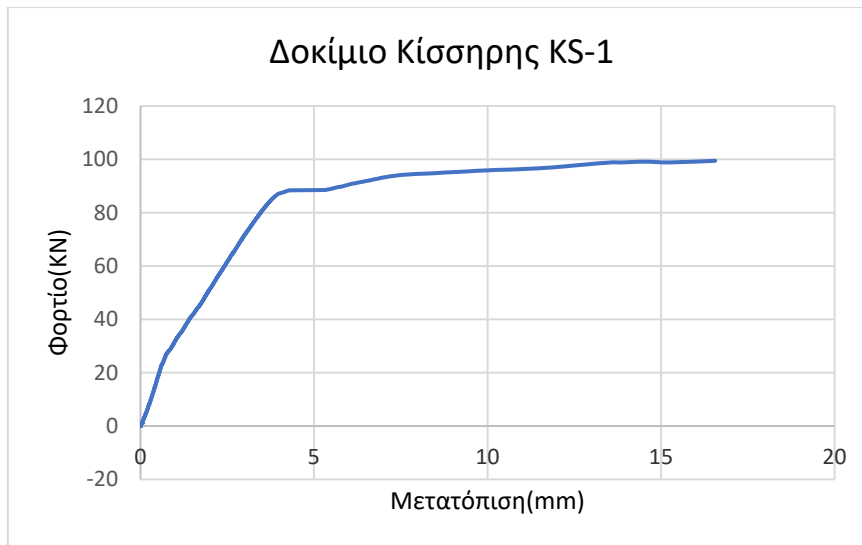
Εικόνα 31. Διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης Δοκιμίου 1



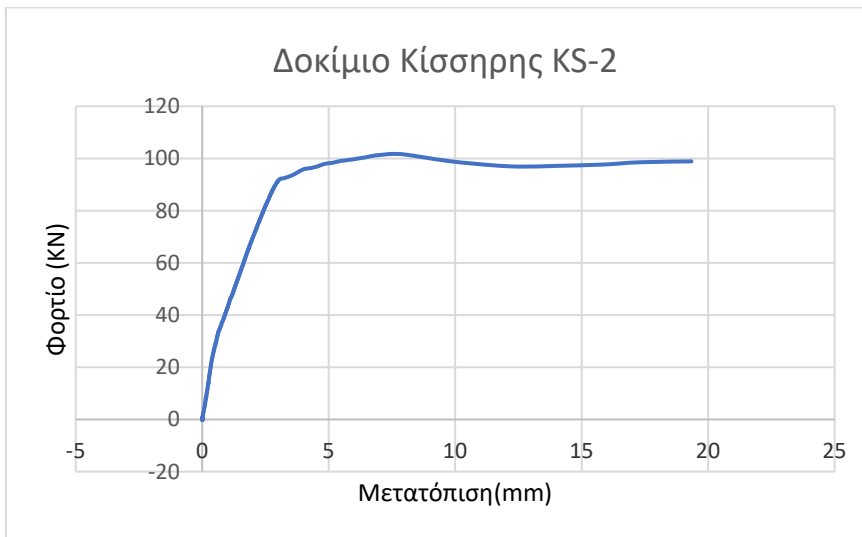
Εικόνα 32. Διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης Δοκιμίου 2



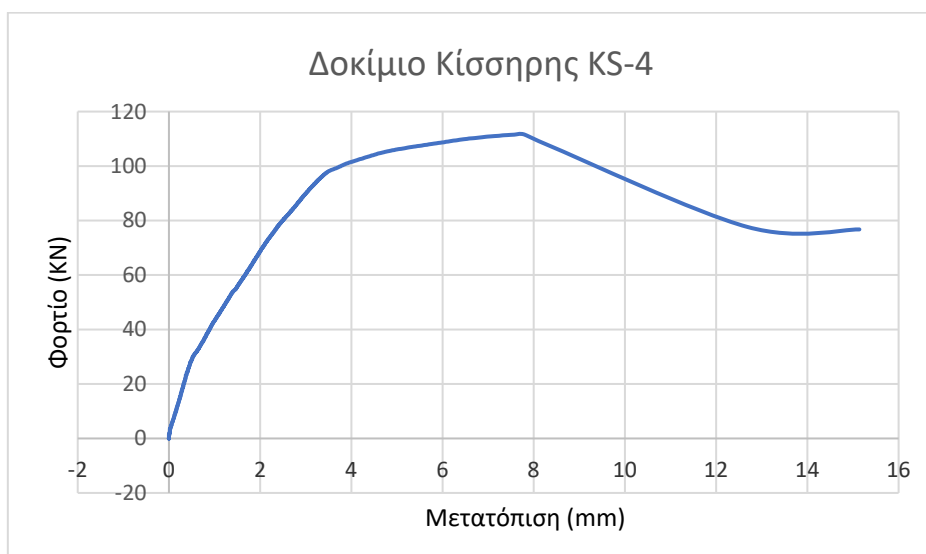
Εικόνα 33. Διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης Δοκιμίου 3



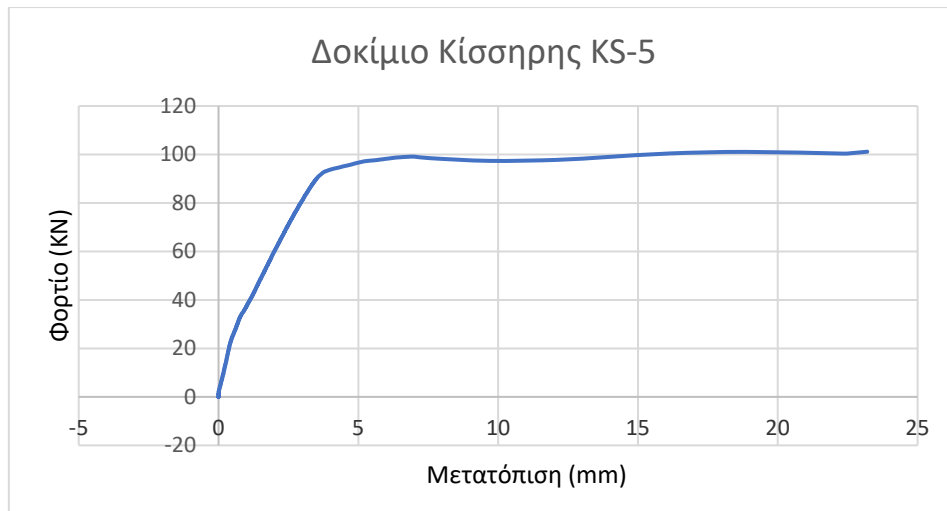
Εικόνα 34. Διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης Δοκιμίου κίσηρης 1



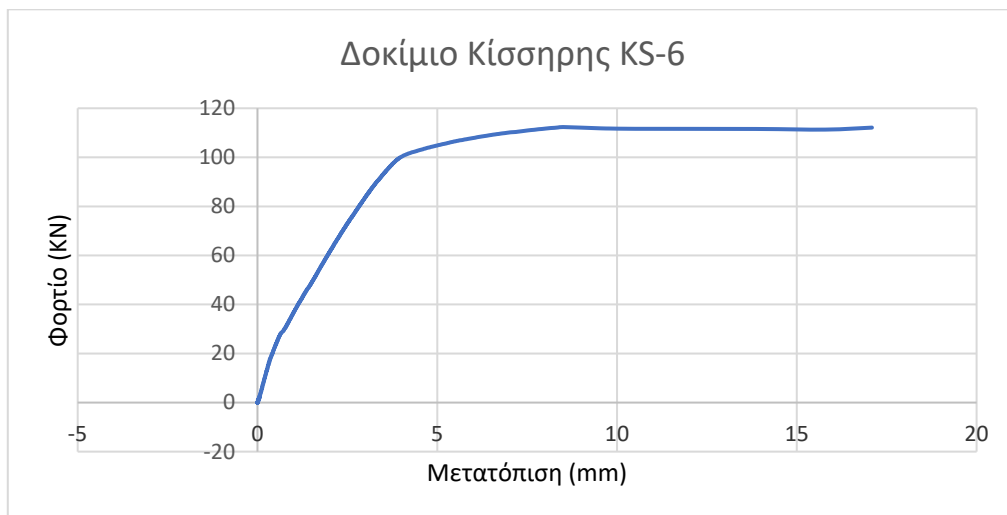
Εικόνα 35. Διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης Δοκιμίου κίσηρης 2



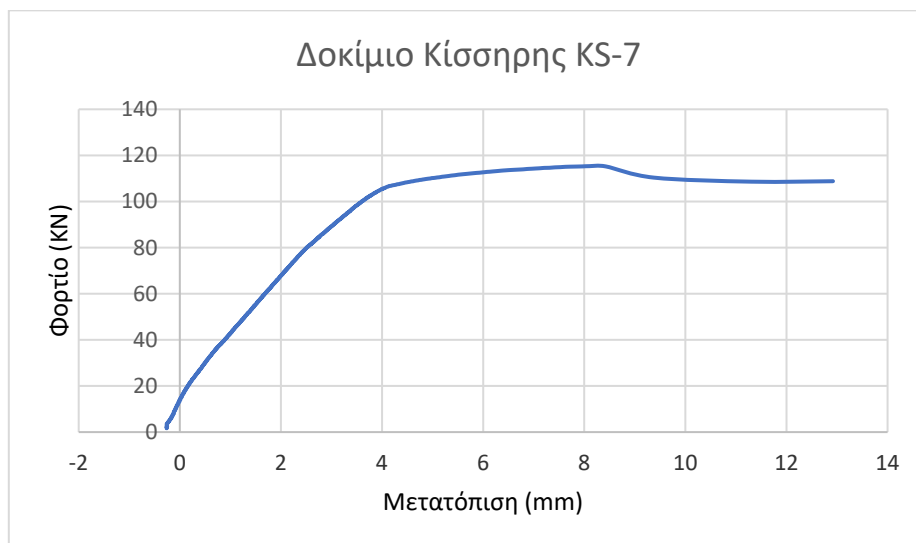
Εικόνα 36. Διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης Δοκιμίου κίσηρης 4



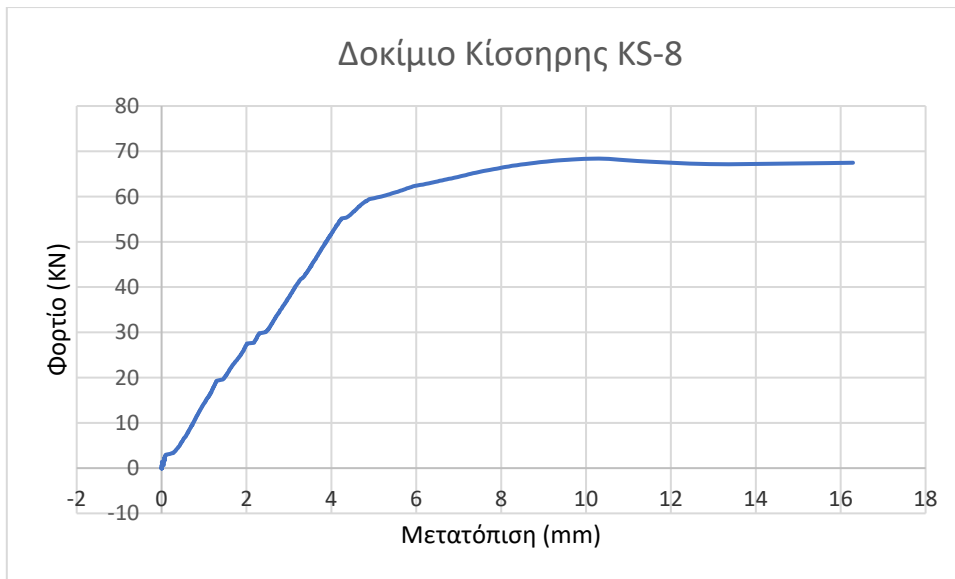
Εικόνα 37. Διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης Δοκιμίου κίσηρης 5



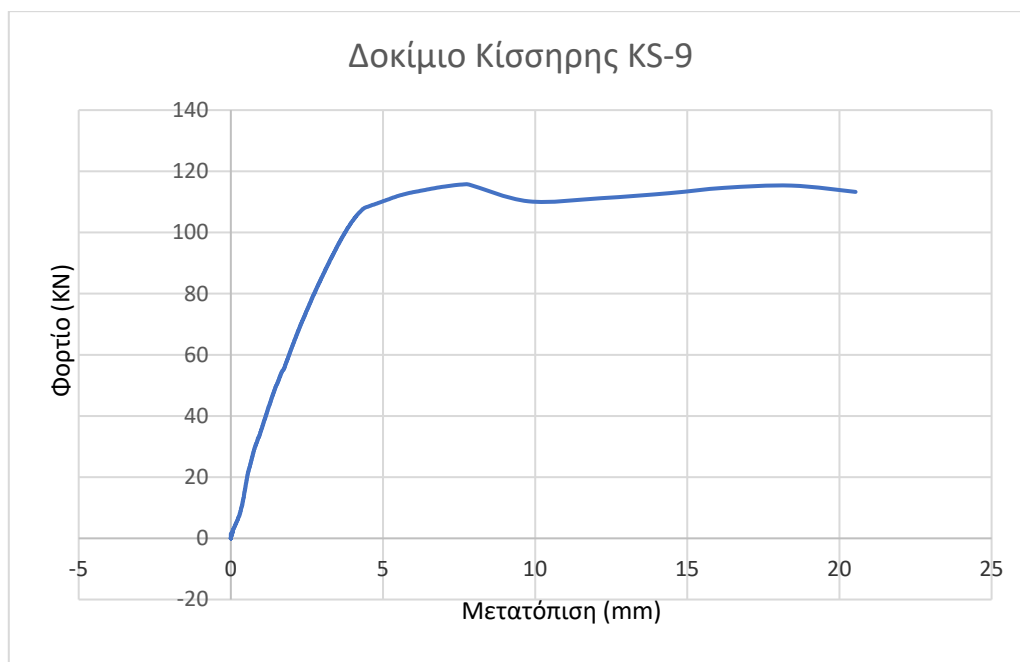
Εικόνα 38. Διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης Δοκιμίου κίσηρης 6



Εικόνα 39. Διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης Δοκιμίου κίσηρης 7



Εικόνα 40. Διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης Δοκιμίου κίσηρης 8

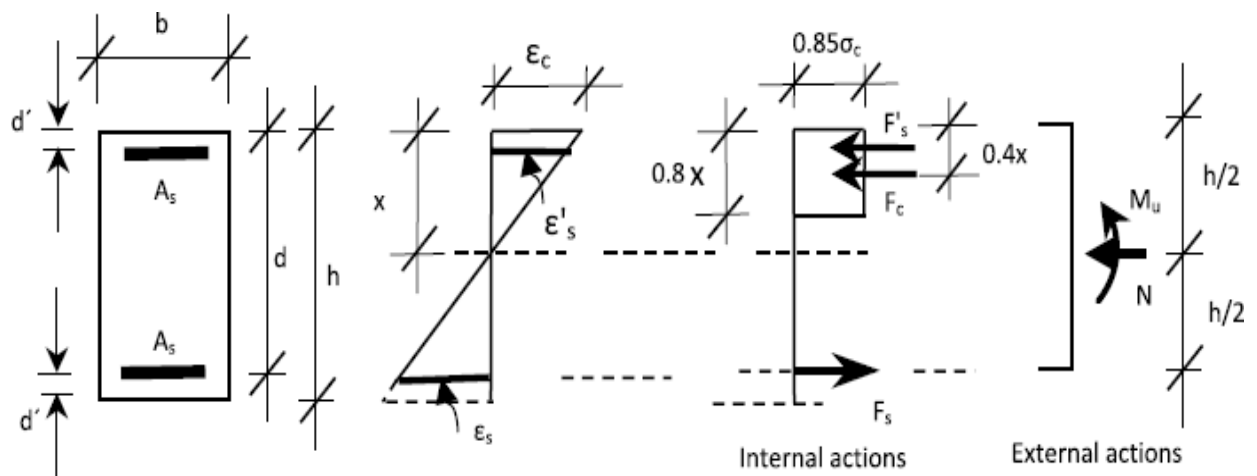


Εικόνα 41. Διάγραμμα τάσης- παραμόρφωσης Δοκιμίου κίσηρης 9

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο -ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Κατά την πειραματική διαδικασία, στην σκυροδέτηση των δοκών υπήρξε μεταβολή στο στατικό ύψος του κάθε γραμμικού δοκιμίου. Το στατικό ύψος των δοκιμίων έχει εύρος [19-21cm]. Λόγω της παραπάνω μεταβολής του στατικού ύψους η σύγκριση και η ανάλυση των αποτελεσμάτων των δοκών θα γίνει όχι με βάση το μέγιστο φορτίο που παρατηρήθηκε στην κάθε δοκό αλλά με βάση την μέγιστη ροπή αντοχής του κάθε δοκιμίου η οποία υπολογίστηκε με βάση τα παρακάτω.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ



ΣΧΕΣΕΙΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΡΟΠΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Οι σχέσεις υπολογισμού για την εύρεση της ροπής αντοχής της διατομής και κατ' επέκταση του οριακού φορτίου θραύσης είναι οι εξής:

$$F_c = 0,85 * f_c * 0,8 * x * b$$

$$F_s = A_s * f_y$$

$$\epsilon_s' = \epsilon_c * (x - d') / x$$

$$F_s' = A_s' * \epsilon_s' * E_s$$

$$\epsilon_y = f_y / E_s$$

6.1 Συμβατικά γραμμικά δοκίμια

6.1.1 Δοκός VR-1

Στο συγκεκριμένο δοκίμιο, το οποίο υποβλήθηκε σε κάμψη τεσσάρων σημείων, εφαρμόστηκε μια διαρκώς αυξανόμενη μετατόπιση έως τη μέγιστη τιμή των 15,71 mm. Το μέγιστο φορτίο το οποίο αναπτύχθηκε κατά τη διεξαγωγή του πειράματος ήταν $P_{max} = 102.64$ kN και εμφανίστηκε για μετατόπιση $\delta = 9.33$ mm. Η μέγιστη ροπή αντοχής η οποία αναπτύχθηκε είναι: 12,54 kNm. Η αστοχία επήλθε λόγω των κεκλιμένων καμπτοδιατμητικών ρωγμών που εμφανίζονται κοντά στην περιοχή της επιβολής του φορτίου και προς το κέντρο της δοκού προκαλώντας σταδιακά πλάστιμη συμπεριφορά.

6.1.2 Δοκός VR-2

Στο συγκεκριμένο δοκίμιο, το οποίο υποβλήθηκε σε κάμψη τεσσάρων σημείων, εφαρμόστηκε μια διαρκώς αυξανόμενη μετατόπιση έως τη μέγιστη τιμή των 18,98 mm. Το μέγιστο φορτίο το οποίο αναπτύχθηκε κατά τη διεξαγωγή του πειράματος ήταν $P_{max} = 107.4$ kN και εμφανίστηκε για μετατόπιση $\delta = 9.84$ mm. Η μέγιστη ροπή αντοχής η οποία αναπτύχθηκε είναι: 12,54 kNm. Η αστοχία επήλθε λόγω των κεκλιμένων καμπτοδιατμητικών ρωγμών που εμφανίζονται κοντά στην περιοχή της επιβολής του φορτίου και προς την αριστερή στήριξη της δοκού προκαλώντας σταδιακά ψαθυρή συμπεριφορά.

6.1.3 Δοκός VR-3

Στο συγκεκριμένο δοκίμιο, το οποίο υποβλήθηκε σε κάμψη τεσσάρων σημείων, εφαρμόστηκε μια διαρκώς αυξανόμενη μετατόπιση έως τη μέγιστη τιμή των 17,03 mm. Το μέγιστο φορτίο το οποίο αναπτύχθηκε κατά τη διεξαγωγή του πειράματος ήταν $P_{max} = 104.5$ kN και εμφανίστηκε για μετατόπιση $\delta = 9.18$ mm. Η μέγιστη ροπή αντοχής η οποία αναπτύχθηκε είναι: 12,54 kNm. Η αστοχία επήλθε λόγω των κεκλιμένων καμπτοδιατμητικών ρωγμών που εμφανίζονται κοντά στην περιοχή της επιβολής του φορτίου και προς το κέντρο της δοκού προκαλώντας σταδιακά πλάστιμη συμπεριφορά.

6.2 Πειραματικά γραμμικά δοκίμια

6.2.1 Πειραματική Δοκός KS-1

Στο συγκεκριμένο δοκίμιο, το οποίο υποβλήθηκε σε κάμψη τεσσάρων σημείων, εφαρμόστηκε μια διαρκώς αυξανόμενη μετατόπιση έως τη μέγιστη τιμή των 16,56 mm. Το μέγιστο φορτίο το οποίο αναπτύχθηκε κατά τη διεξαγωγή του πειράματος ήταν $P_{max} = 99.4$ kN και εμφανίστηκε για μετατόπιση $\delta = 16.56$ mm. Η μέγιστη ροπή αντοχής η οποία αναπτύχθηκε είναι: 12,45 kNm. Η αστοχία επήλθε λόγω των κεκλιμένων καμπτοδιατμητικών ρωγμών που εμφανίζονται κοντά στην περιοχή της επιβολής του φορτίου και προς το κέντρο της δοκού προκαλώντας σταδιακά πλάστιμη συμπεριφορά.

6.2.2 Πειραματική Δοκός KS-2

Στο συγκεκριμένο δοκίμιο, το οποίο υποβλήθηκε σε κάμψη τεσσάρων σημείων, εφαρμόστηκε μια διαρκώς αυξανόμενη μετατόπιση έως τη μέγιστη τιμή των 19,34 mm. Το μέγιστο φορτίο το οποίο αναπτύχθηκε κατά τη διεξαγωγή του πειράματος ήταν $P_{max} = 101.7$ kN και εμφανίστηκε για μετατόπιση $\delta = 7,51$ mm. Η μέγιστη ροπή αντοχής η οποία αναπτύχθηκε είναι: 12,45 kNm. Η αστοχία επήλθε λόγω των κεκλιμένων καμπτοδιατμητικών ρωγμών που εμφανίζονται κοντά στην περιοχή της επιβολής του φορτίου και προς το κέντρο της δοκού προκαλώντας σταδιακά πλάστιμη συμπεριφορά.

6.2.3 Πειραματική Δοκός KS-3

Στο συγκεκριμένο δοκίμιο, το οποίο υποβλήθηκε σε κάμψη τεσσάρων σημείων, παρουσιάστηκε «αποκόλληση» του βελόμετρου κατά την διαδικασία εφαρμογής του σταδιακού φορτίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι μετρήσεις του συγκεκριμένου δοκιμίου να είναι αναξιόπιστες και το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων να έχει λάθος μορφή. Για τον παραπάνω λόγο το δοκίμιο KS-3 εξαιρείται της ανάλυσης και της σύγκρισης των αποτελεσμάτων του.

6.2.4 Πειραματική Δοκός KS-4

Στο συγκεκριμένο δοκίμιο, το οποίο υποβλήθηκε σε κάμψη τεσσάρων σημείων, εφαρμόστηκε μια διαρκώς αυξανόμενη μετατόπιση έως τη μέγιστη τιμή των 21,99 mm. Το μέγιστο φορτίο το οποίο αναπτύχθηκε κατά τη διεξαγωγή του πειράματος ήταν $P_{max} = 111.6$ kN και εμφανίστηκε για μετατόπιση $\delta = 7,79$ mm. Η μέγιστη ροπή αντοχής η οποία αναπτύχθηκε είναι: 13,23 kNm. Η αστοχία επήλθε λόγω των κεκλιμένων καμπτοδιατμητικών ρωγμών που εμφανίζονται κοντά στην περιοχή της επιβολής του φορτίου και προς το κέντρο της δοκού προκαλώντας σταδιακά πλάστιμη συμπεριφορά.

6.2.5 Πειραματική Δοκός KS-5

Στο συγκεκριμένο δοκίμιο, το οποίο υποβλήθηκε σε κάμψη τεσσάρων σημείων, εφαρμόστηκε μια διαρκώς αυξανόμενη μετατόπιση έως τη μέγιστη τιμή των 24,19 mm. Το μέγιστο φορτίο το οποίο αναπτύχθηκε κατά τη διεξαγωγή του πειράματος ήταν $P_{max} = 101.1$ kN και εμφανίστηκε για μετατόπιση $\delta = 18,84$ mm. Η μέγιστη ροπή αντοχής η οποία αναπτύχθηκε είναι: 12,45 kNm. Η αστοχία επήλθε λόγω των κεκλιμένων καμπτοδιατμητικών ρωγμών που εμφανίζονται κοντά στην περιοχή της επιβολής του φορτίου και προς το κέντρο της δοκού προκαλώντας σταδιακά πλάστιμη συμπεριφορά.

6.2.6 Πειραματική Δοκός KS-6

Στο συγκεκριμένο δοκίμιο, το οποίο υποβλήθηκε σε κάμψη τεσσάρων σημείων, εφαρμόστηκε μια διαρκώς αυξανόμενη μετατόπιση έως τη μέγιστη τιμή των 23,19 mm. Το μέγιστο φορτίο το οποίο αναπτύχθηκε κατά τη διεξαγωγή του πειράματος ήταν $P_{max} = 112.12$ kN και εμφανίστηκε για μετατόπιση $\delta = 17,09$ mm. Η μέγιστη ροπή αντοχής η οποία αναπτύχθηκε είναι: 13,23 kNm. Η αστοχία επήλθε λόγω των κεκλιμένων καμπτοδιατμητικών ρωγμών που εμφανίζονται κοντά στην περιοχή της επιβολής του φορτίου και προς το κέντρο της δοκού προκαλώντας σταδιακά πλάστιμη συμπεριφορά.

6.2.7 Πειραματική Δοκός KS-7

Στο συγκεκριμένο δοκίμιο, το οποίο υποβλήθηκε σε κάμψη τεσσάρων σημείων, εφαρμόστηκε μια διαρκώς αυξανόμενη μετατόπιση έως τη μέγιστη τιμή των 16,60 mm. Το μέγιστο φορτίο το οποίο αναπτύχθηκε κατά τη διεξαγωγή του πειράματος ήταν $P_{max} = 115.26$ kN και εμφανίστηκε για μετατόπιση $\delta = 8,42$ mm. Η μέγιστη ροπή αντοχής η οποία αναπτύχθηκε είναι: 13,1 kNm. Η αστοχία επήλθε λόγω των κεκλιμένων καμπτοδιατμητικών ρωγμών που εμφανίζονται κοντά στην περιοχή της επιβολής του φορτίου και προς το κέντρο της δοκού προκαλώντας σταδιακά πλάστιμη συμπεριφορά.

6.2.8 Πειραματική Δοκός KS-8

Στο συγκεκριμένο δοκίμιο, το οποίο υποβλήθηκε σε κάμψη τεσσάρων σημείων, εφαρμόστηκε μια διαρκώς αυξανόμενη μετατόπιση έως τη μέγιστη τιμή των 25,83 mm. Το μέγιστο φορτίο το οποίο αναπτύχθηκε κατά τη διεξαγωγή του πειράματος ήταν $P_{max} = 68.32$ kN και εμφανίστηκε για μετατόπιση $\delta = 10,54$ mm. Η μέγιστη ροπή αντοχής η οποία αναπτύχθηκε είναι: 12,45 kNm. Η αστοχία επήλθε λόγω των κεκλιμένων καμπτοδιατμητικών ρωγμών που εμφανίζονται κοντά στην περιοχή της επιβολής του φορτίου και προς το κέντρο της δοκού προκαλώντας σταδιακά πλάστιμη συμπεριφορά.

6.2.9 Πειραματική Δοκός KS-9

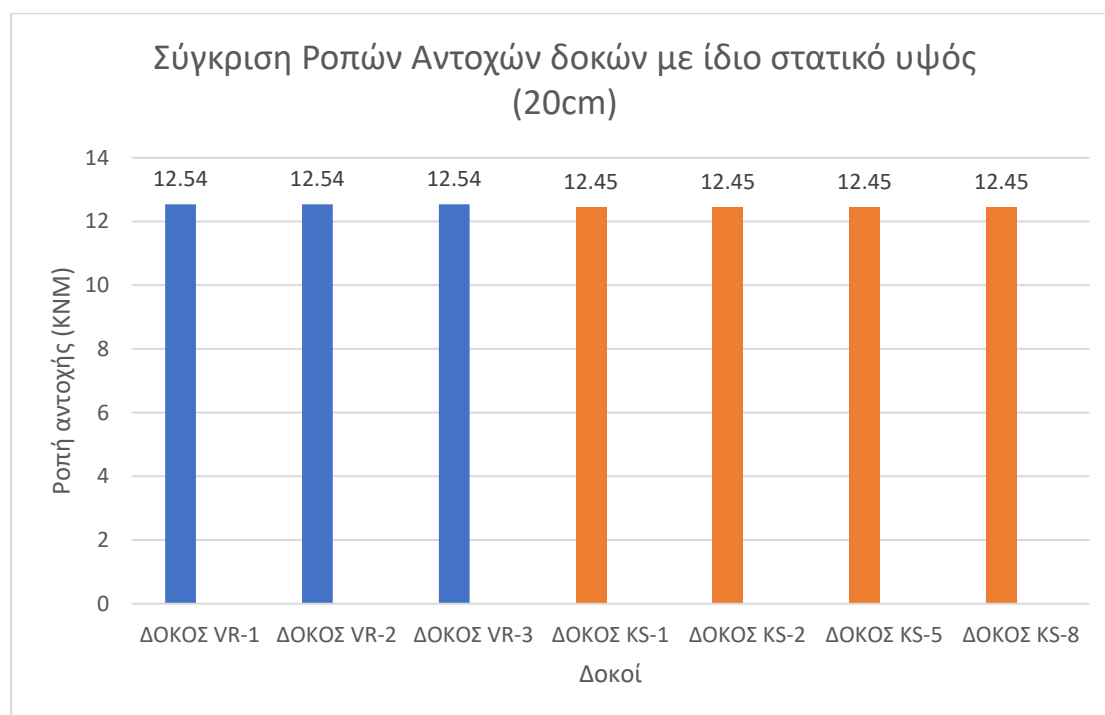
Στο συγκεκριμένο δοκίμιο, το οποίο υποβλήθηκε σε κάμψη τεσσάρων σημείων, εφαρμόστηκε μια διαρκώς αυξανόμενη μετατόπιση έως τη μέγιστη τιμή των 20,56 mm. Το μέγιστο φορτίο το οποίο αναπτύχθηκε κατά τη διεξαγωγή του πειράματος ήταν $P_{max} = 115.7$ kN και εμφανίστηκε για μετατόπιση $\delta = 7,83$ mm. Η μέγιστη ροπή αντοχής η οποία αναπτύχθηκε είναι: 13 kNm. Η αστοχία επήλθε λόγω των κεκλιμένων καμπτοδιατμητικών ρωγμών που εμφανίζονται κοντά στην περιοχή της επιβολής του φορτίου και προς το κέντρο της δοκού προκαλώντας σταδιακά πλάστιμη συμπεριφορά.

Α/Α	ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΙ ΔΟΚΟΙ
	ΡΟΠΗ ΑΝΤΟΧΗΣ (KNm)
ΔΟΚΟΣ VR-1	12,54
ΔΟΚΟΣ VR-2	12,54
ΔΟΚΟΣ VR-3	12,54

Πίνακας 14 . Μέγιστες ροπές αντοχής συμβατικών δοκιμίων

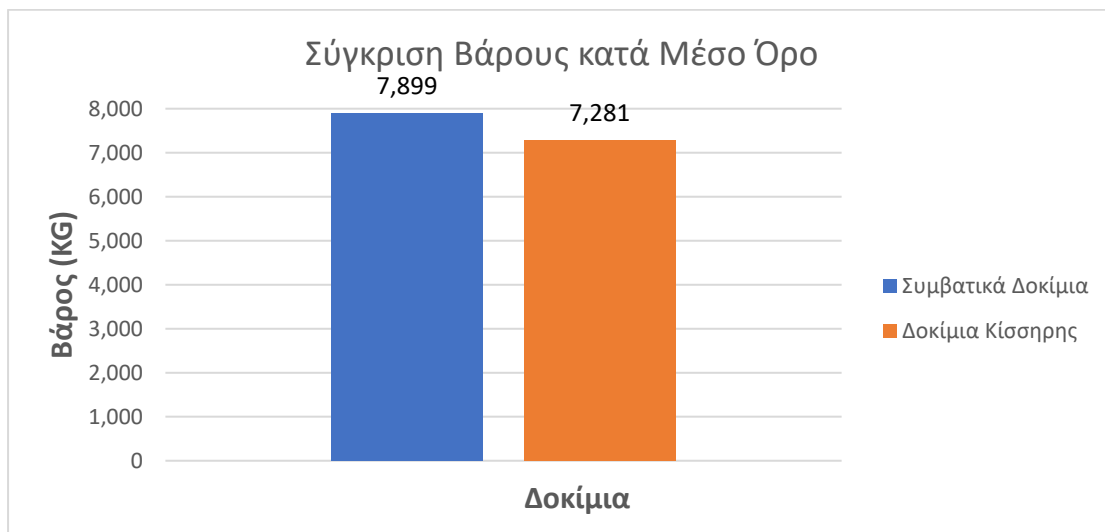
Α/Α	ΔΟΚΟΙ ΜΕ ΚΙΣΣΗΡΗ
	ΡΟΠΗ ΑΝΤΟΧΗΣ (KNm)
ΔΟΚΟΣ KS-1	12,45
ΔΟΚΟΣ KS-2	12,45
ΔΟΚΟΣ KS-3	13,23
ΔΟΚΟΣ KS-4	13,23
ΔΟΚΟΣ KS-5	12,45
ΔΟΚΟΣ KS-6	13,23
ΔΟΚΟΣ KS-7	13,1
ΔΟΚΟΣ KS-8	12,45
ΔΟΚΟΣ KS-9	13

Πίνακας 15 . Μέγιστες ροπές αντοχής Δοκών με κίσσηρη

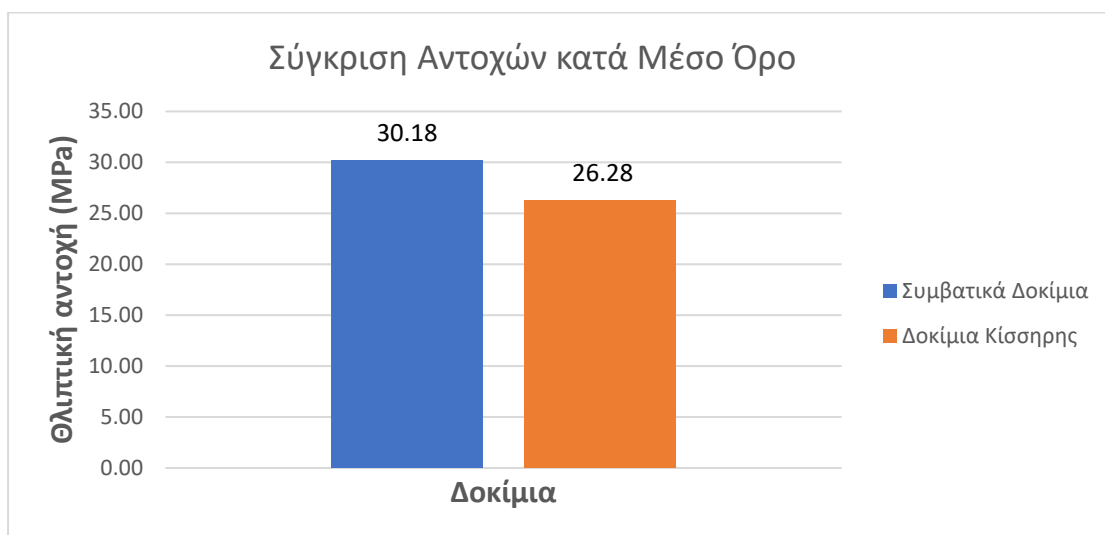


Εικόνα 42. Σύγκριση αντοχών δοκών με ίδιο στατικό ύψος

Η σύγκριση αντοχών πραγματοποιήθηκε με βάση τις μέγιστες ροπές αντοχής που ανέπτυξε η κάθε δοκός, συγκρίθηκαν μόνο οι δοκοί που είχαν ίδιο στατικό ύψος. Με βάση τα παραπάνω (Εικόνα 42) παρατηρήθηκε μείωση της αντοχής περίπου στο 1,5% κατά μέσο όρο μεταξύ των συμβατικών και των πειραματικών δοκών με στατικό ύψος 20cm.



Εικόνα 43. Σύγκριση μέσου όρου βάρους κυβικών δοκιμίων



Εικόνα 44. Σύγκριση μέσου όρου αντοχής κυβικών δοκιμίων

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία στα δοκίμια κίσηρης παρατηρήθηκε μείωση της θλιπτικής αντοχής (Εικόνα 44), κατά 15% μέσο όρο. Επιπλέον τα δοκίμια κίσηρης παρουσιάζουν ελαφρότερο βάρος σε σύγκριση με τα συμβατικά κατά περίπου 8% κατά μέσο όρο (Εικόνα 43). Αυτό δικαιολογείται από την αντικατάσταση του χαλικιού που είναι προϊόν με μεγαλύτερη πυκνότητα από την κίσηρης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα κύρια συμπεράσματα που εξάγονται με βάση την παρούσα διπλωματική εργασία είναι τα ακόλουθα:

- Οι σύγχρονες απαιτήσεις για ελαφριές κατασκευές, μειώνοντας έτσι το βάρος ενώ ταυτόχρονα είναι ευκολότερο και ταχύτερο στην κατασκευή, καθιστούν το οπλισμένο κίσηρόδεμα (ελαφροσκυρόδεμα) ένα πολύ ανταγωνιστικό δομικό υλικό.
- Παρατηρήθηκε μείωση βάρους με βάση τα κυβικά δοκίμια της τάξεως του 8% και μείωση θλιπτικής αντοχής περίπου 15%, είναι αποδεκτές τιμές για το κίσηρόδεμα προς χρήση σε δευτερεύοντα δομικά στοιχεία.
- Παρατηρήθηκε μείωση της αντοχής ελαφροσκυροδέματος με βάση τις μέγιστες ροπές αντοχής περίπου στο 1,5% μεταξύ των συμβατικών και των πειραματικών δοκών.
- Η χρήση κίσηρης αντί για χονδρόκοκκα αδρανή υλικά μπορεί να μειώσει σημαντικά το κόστος κατασκευής, τόσο λόγω της χαμηλής τιμής της κίσηρης όσο και κυρίως λόγω της σημαντικής μείωσης του βάρους κατασκευής που έχει ως αποτέλεσμα.
- Όλα τα δοκίμια μετά το πέρας της δοκιμής κάμψης που υποβλήθηκαν παρουσίασαν πλάστιμη συμπεριφορά και η αστοχία σε όλα τα δοκίμια προκλήθηκε λόγω αστοχίας της καμπτόμενης ζώνης.
- Μετά το πέρας των δοκιμών παρατηρήθηκε ότι κάποιες από τις πειραματικές δοκούς είχαν μεγαλύτερες ροπές αστοχίας από τις δοκούς συμβατικού σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα οι δοκοί:KS-3,KS-4,KS-6,KS-7,KS-9. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα στατικά ύψη των δοκών αυτών ήταν μεγαλύτερα από εκείνα των συμβατικών δοκών μεγάλωνοντας έτσι τις ροπές αστοχίας τους.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] <http://www.hcia.gr/el/cement-concrete/cement/codes-standards/>
- [2] Lane, R O, and Best, J F. Properties and use of fly ash in Portland cement concrete. United States: N. p., 1982. Web.
- [3] Santos, A.D., Moraes, J.C.S., Araújo, E.B., Yukimitu, K. and Valério Filho, W.V. (2005), Physico-chemical properties of MTA and a novel experimental cement. International Endodontic Journal, 38: 443-447. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2005.00963.x>
- [4] Fregert, S., and B. Gruvberger. "Chemical properties of cement." Berufsdermatosen 20.5 (1972): 238-248.
- [5] Bohner, M., et al. "Effect of several additives and their admixtures on the physico-chemical properties of a calcium phosphate cement." Journal of Materials Science: Materials in Medicine 11.2 (2000): 111-116.
- [6] ΟΔΟΠΟΪΑ, ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ-ΥΛΙΚΑ, ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ, ΑΘ. Νικολαΐδης, 1η Έκδοση, Θεσσαλονίκη 1996
- [7] Εισαγωγή εις τον εμπλουτισμό των μεταλλευμάτων και των βιομηχανικών ορυκτών, Α. Φραγκίσκου, Σ. Κατράκη, Β' Έκδοση, ΤΕΕ
- [8] Τεχνικά κριτήρια για την μελέτη και κατασκευή οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα για τον αυτοκινητόδρομο (TEM), Β. Ευμολίδη, Σ. Κόλια, Ν. Μαρσέλλου, Απ. Γιώτη, Αθήνα 1986
- [9] Andrzejuk W, Barnat-Hunek D, Góra J. Physical Properties of Mineral and Recycled Aggregates Used to Mineral-Asphalt Mixtures. Materials (Basel). 2019;12(20):3437. Published 2019 Oct 21. doi:10.3390/ma12203437
- [10] Sprung, S. (2008). Cement. In Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, (Ed.). https://doi.org/10.1002/14356007.a05_489.pub2
- [11] Ludwig, Horst-Michael, and Wensheng Zhang. "Research review of cement clinker chemistry." Cement and Concrete Research 78 (2015): 24-37.
- [12] Herfort, Duncan, et al. "The chemistry of Portland cement clinker." Advances in Cement Research 22.4 (2010): 187-194.
- [13] Gartner, Ellis, and Tongbo Sui. "Alternative cement clinkers." cement and concrete research 114 (2018): 27-39.
- [14] ΝΕΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΧΑΛΥΒΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΤΧ 2008 (ΦΕΚ 1416/Β/17-07-2008 και ΦΕΚ 2113/Β/13-10-2008)
- [15] Ελληνικός Κανονισμός Οπλισμένου Σκυροδέματος 2000, (ΕΚΩΣ 2000, ΟΑΣΠ-ΣΠΜΕ)
- [16] Gale, W. K. V. "The Bessemer steelmaking process." Transactions of the Newcomen Society 46.1 (1973): 17-26.

- [17] Fruehan, R. J. "Overview of steelmaking processes and their development." The Making, Shaping and Treating of Steel: Steelmaking and Refining volume, (1998): 2-3.
- [18] Job Thomas and Ananth Ramaswamy, Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, Volume 19 Issue 5 - May 2007, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:5\(385\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:5(385))
- [19] Song, P. S., and S. Hwang. "Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete." Construction and Building Materials 18.9 (2004): 669-673.
- [20] Carnavas, P., Page, N. Elastic properties of compacted metal powders. Journal of Materials Science 33, 4647–4655 (1998). <https://doi.org/10.1023/A:1004445527430>
- [21] Ελληνικός Κανονισμός Οπλισμένου Σκυροδέματος, 2000, Σύλλογος Πολιτικών Μηχανικών Ελλάδος
- [22] Γεωργία Αγναντιάρη, Εισαγωγή στα νέα Πρότυπα για τους Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος: ΕΛΟΤ EN 10080, ΕΛΟΤ 1421-2 και 1421-3 Αθήνα 23-1-2008
- [24] Mikulcic, H.; Vujanovic, M.; Markovska, N.; Filkoski, R.V.; Ban, M.; Duic, N. CO2 emission reduction in the cement industry. Chem. Eng. Trans. 2013, 35, 703–708.
- [25] Ali, M.B.; Saidur, R.; Hossain, M.S. A review on emission analysis in cement industries. Renew. Sustain. Energy Rev. 2011, 15, 2252–2261
- [26] Golewski GL. Energy Savings Associated with the Use of Fly Ash and Nanoadditives in the Cement Composition. Energies. 2020; 13(9):2184. <https://doi.org/10.3390/en13092184>
- [27] Ali, M.B.; Saidur, R.; Hossain, M.S. A review on emission analysis in cement industries. Renew. Sustain. Energy Rev. 2011, 15, 2252–2261.
- [28] Madloul, N.A.; Saidur, R.; Hossain, M.S.; Rahim, N.A. A critical review on energy use and savings in the cement industries. Renew. Sustain. Energy Rev. 2011, 15, 2042–2060.
- [29] Papadakis, V. G. (1999). Experimental investigation and theoretical modeling of silica fume activity in concrete. Cement and Concrete Research, 29(1), 79-86.
- [30] Song, H. W., & Saraswathy, V. (2006). Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag—An overview. Journal of Hazardous materials, 138(2), 226-233.
- [31] E. G. Badogiannis, I. P. Sfikas, D. V. Voukia, K. G. Trezos, S. G. Tsivilis (2015): Durability of metakaolin Self-Compacting Concrete, Journal of Construction and Building Materials, Vol. 82, pp. 133-141. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat
- [32] ΣΑΧΛΙΚΙΔΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ, ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΦΙΛΙΚΟ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟ ΜΕ ΥΛΙΚΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΕΔΑΦΙΣΕΩΝ, ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2021.

[33] Hossain, K. M. A. (2004). Properties of volcanic pumice-based cement and lightweight concrete. *Cement and concrete research*, 34(2), 283-291.

[34] Nihat Kabay, M. Mansur Tufekci, Ahmet B. Kizilkanat, Didem Oktay, Properties of concrete with pumice powder and fly ash as cement replacement materials, *Construction and Building Materials*, Volume 85, 2015, Pages 1-8, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.026>

[35] Μη καταστροφικός έλεγχος σκυροδέματος και σύσταση. Αγγέλης Δημήτριος. Διδακτορική διατριβή, Παν. Πατρών 2004

[36] M. I. Valic, Hydration of cementitious materials by pulse echo USWR Method, apparatus and application examples, *Cem Con Res* 2000; 30: 1633-1640

[37] Kaplan, M. F. (1958). The effects of the properties of coarse aggregates on the workability of concrete. *Magazine of Concrete Research*, 10(29), 63-74.

[38] Λιβανός, Δ., & Στάμος, Κ. (2016). Πειραματική διερεύνηση των χαρακτηριστικών του υλικού και της ανακυκλιζόμενης συμπεριφοράς δοκών από φέρον ελαφροσκυρόδεμα.

[39] Du, L., & Folliard, K. J. (2005). Mechanisms of air entrainment in concrete. *Cement and concrete research*, 35(8), 1463-1471.

[40] Μεταπτυχιακή Εργασία , Μελέτη σύνθεσης ελαφροσκυροδέματος με κίσηρη και εφαρμογή του στον αντισεισμικό σχεδιασμό , Γεωργία Θ. Τασούλα , ΕΜΠ, 2013

[41] Πτυχιακή Εργασία, Πειραματική διερεύνηση της θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος, παρασκευασμένου με προσθήκη κίσης (ελαφρόπετρας) σε μερική αντικατάσταση του χονδρόκοκκου αδρανούς. , Γ.Ανδρίτσος , Κ.Πάτσου , ΑΕΙ Πειραιά Τ.Τ 2020

[43] www.lafarge.gr