



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ
ΕΛΑΦΡΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΕΙ ΑΔΡΑΝΗ ΑΠΟ ΑΦΡΩΔΗ
ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΗ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗ**

ΖΩΓΡΑΦΟΣ-ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΠΕΤΑΛΑΣ



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

ΒΟΛΟΣ 2022

© 2022 Πεταλάς Ζωγράφος-Νικόλαος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Χρήστος Παπακωνσταντίνου
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Λάμπρος Κούτας
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Πάνος Γουργιώτης
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Για την διεκπεραίωση της διπλωματικής εργασίας μου, οφείλω να ευχαριστήσω πρώτον από όλους τον επιβλέποντα της, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Χρήστο Παπακωνσταντίνου, αρχικά για την εμπιστοσύνη και την ευκαιρία που μου έδωσε, καθώς και για την πολύτιμη καθοδήγηση του και τις συμβουλές του. Επιπλέον θέλω να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Λάμπρο Κούτα για την βοήθεια του στην αντιμετώπιση των οποιωνδήποτε τεχνικών προβλημάτων προέκυψαν στην διάρκεια της εργασίας. Επιπρόσθετα δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τον κ. Αλέξανδρο Κουτσελίνη τόσο για την ανεκτίμητη βοήθεια του στην κατασκευή των δοκιμών και στην διεξαγωγή των πειραμάτων, όσο και για την άριστη συνεργασία μας και τις τεχνικές γνώσεις που μου προσέφερε. Έπειτα θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους μου Βάιο Σαββαΐδη, Διονύση Σίσκο και Δημήτρη Σίσκο για την ηθική και ψυχολογική τους υποστήριξη. Αυτοί όμως που έκαναν πιθανό οτιδήποτε έχω καταφέρει είναι οι γονείς μου και τους είμαι ευγνώμων για την αγάπη τους και την υποστήριξη τους που μου έχουν προσφέρει όλα αυτά τα χρόνια, καθώς και τις θυσίες που έχουν κάνει για να μου χαρίσουν όλα τα εφόδια που χρειάστηκα στο ταξίδι μου. Αυτή η εργασία λοιπόν είναι αφιερωμένη στον πατέρα μου Πεταλά Θεόδωρο και στη μητέρα μου Σταυραντώνη Αλεξάνδρα.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΕΛΑΦΡΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΕΙ ΑΔΡΑΝΗ ΑΠΟ ΑΦΡΩΔΗ ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΗ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗ

Ζωγράφος-Νικόλαος Πεταλάς

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2022

Επιβλέποντες Καθηγητές: Χρήστος Παπακωνσταντίνου, Αναπληρωτής Καθηγητής
Λάμπρος Κούτας, Επίκουρος Καθηγητής

Περίληψη

Το ελαφροσκυρόδεμα αποτελεί ένα υλικό με ιστορία χιλιάδων χρόνων. Με την πάροδο του χρόνου έχουν αναπτυχθεί πολλά είδη ελαφροσκυροδέματος τα οποία χρησιμοποιούνται σε διάφορους τομείς σε πολλαπλές εφαρμογές. Στην παρούσα διπλωματική εργασία ερευνώνται οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες ελαφροσκυροδέματος που περιέχει διογκωμένη αφρώδη πολυστερίνη. Η αφρώδης διογκωμένη πολυστερίνη αποτελεί ένα υλικό με πολύ μικρή πυκνότητα και καλές θερμομονωτικές ιδιότητες. Στα πλαίσια της εργασίας κατασκευάστηκαν τέσσερα διαφορετικά μείγματα ελαφροσκυροδέματος ονομαστικών πυκνοτήτων 300, 400, 600 και 700 kg/m³. Οι πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν και τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ακολούθησαν τα αντίστοιχα Ευρωπαϊκά Πρότυπα. Πιο συγκεκριμένα διεξήχθησαν πειράματα θλίψης, ερπυσμού, υδατοαπορροφητικότητας, φαινόμενης και δεσμευμένης πυκνότητας, συμπιεστότητας καθώς και κοκκομετρική διαβάθμιση των κόκκων διογκωμένης πολυστερίνης. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών παρατηρούμε ότι το παραχθέν ελαφροσκυρόδεμα έχει πραγματικές πυκνότητες που κυμαίνονται από 367 έως 748 kg/m³ και θλιπτικές αντοχές από 0.2 έως 0.4 MPa.

Λέξεις Κλειδιά: ελαφροσκυρόδεμα, διογκωμένη πολυστερίνη, μηχανικές ιδιότητες, πειραματικές δοκιμές, Ευρωπαϊκά Πρότυπα

EXPERIMENTAL TESTING FOR THE CHARACTERIZATION OF LIGHTWEIGHT CONCRETE CONTAINING EXPANDED POLYSTYRENE AGGREGATES

Zografos-Nikolaos Petalas

University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2022

Supervisors: Christos Papakonstantinou, Associate Professor

Lampros Koutas, Assistant Professor

Abstract

Lightweight concrete is a construction material with a history of thousands of years. Within these thousands years of its existence lots of different types of lightweight concrete have been developed with uses in various fields and multiple applications. This bachelor's thesis investigates the mechanical and physical properties of lightweight concrete containing expanded polystyrene beads. Expanded polystyrene is a thermo insulating material with very low density. For the purposes of this project four different mixtures of lightweight concrete were manufactured with nominal densities of 300, 400, 600 and 700 kg/m³. A series of specimens were fabricated and tested based on European Standards. More specifically the conducted experiments aimed at the compressive behavior, the apparent and bound density, the creep characteristics and short term water absorption by partial immersion. The results of the experiments have shown that the lightweight concrete possesses bound densities that vary from 367 to 748 kg/m³ and compressive strengths of 0.2 up to 0.4 MPa.

Keywords: *lightweight concrete, expanded polystyrene, mechanical properties, experimental tests, European Standards*

Πίνακας Περιεχομένων

1	Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	1
2	Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	5
3	Κεφάλαιο 3 Σκοπός και Μεθοδολογία Πειραματικών Δοκιμών	25
3.1	Φαινόμενη Πυκνότητα Φρέσκου Μείγματος	27
3.2	Πείραμα Θλίψης.....	27
3.3	Πείραμα Υδατοαπορροφητικότητας.....	28
3.4	Πείραμα Συμπιεστότητας.....	30
3.5	Πείραμα Δεσμευμένης Πυκνότητας	31
3.6	Πείραμα Ερπυσμού	32
3.7	Πείραμα Κοκκομετρικής Διαβάθμισης	34
4	Κεφάλαιο 4 Αποτελέσματα	35
4.1	Αποτελέσματα πειράματος φαινόμενης πυκνότητας	35
4.2	Αποτελέσματα πειράματος θλίψης	35
4.3	Αποτελέσματα πειράματος υδροαπορροφητικότητας	41
4.4	Αποτελέσματα πειράματος συμπιεστότητας	43
4.5	Αποτελέσματα Πειράματος Δεσμευμένης Πυκνότητας	43
4.6	Αποτελέσματα Πειράματος Ερπυσμού.....	44
4.7	Αποτελέσματα Πειραματικής Κοκκομετρικής Διαβάθμισης	53
5	Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα	55
6	Βιβλιογραφία.....	57

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Θλιπτική αντοχή μη ινώδων ελαφροσκυροδεμάτων διογκωμένης πολυστερίνης (Sadrohmatzi et. al., 2012).....	6
Πίνακας 2.2: Αποτελέσματα μηχανικών δοκιμών (Chen & Liu, 2013)	9
Πίνακας 2.3: Αποτελέσματα δοκιμών (Cui et. al., 2015)	10
Πίνακας 2.4: Αναλογίες μειγμάτων (Johnpaul et. al., 2020).....	12
Πίνακας 2.5: Αναλογίες μειγμάτων (Moutassem, 2020)	15
Πίνακας 2.6: Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών	17
Πίνακας 2.7: Τιμές σταθερών A και B (Moutassem, 2020).....	18
Πίνακας 2.8: Ποσότητα υλικών σε kg σε κάθε μείγμα (Adelaya & Soyemi, 2020)....	19
Πίνακας 2.9: Μέσοι όροι θλιπτικής αντοχής (Adelaya & Soyemi, 2020).....	19
Πίνακας 2.10: Αναλογίες υλικών του κάθε μείγματος (Demirboga & Kan, 2007)	22
Πίνακας 2.11: Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης και πυκνότητας (Demirboga & Kan, 2007)	23
Πίνακας 3.1: Αναλογίες μειγμάτων.....	25
Πίνακας 4.1: Φαινόμενες πυκνότητες των μειγμάτων	35
Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα Πειράματος θλίψης.....	38
Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα πειράματος υδατοαπορροφητικότητας	41
Πίνακας 4.4: Μετρήσεις πειράματος συμπίεστότητας.....	43
Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα πειράματος δεσμευμένης πυκνότητας.....	43
Πίνακας 4.6: Φορτία πειράματος ερπυσμού	45
Πίνακας 4.7: Μετρήσεις παραμόρφωσης μείγματος 300 kg/m^3	45
Πίνακας 4.8: Μετρήσεις παραμόρφωσης δοκιμίου μείγματος 400 kg/m^3	47
Πίνακας 4.9: Μετρήσεις παραμόρφωσης μείγματος 600 kg/m^3	48
Πίνακας 4.10: Μετρήσεις παραμόρφωσης μείγματος 700 kg/m^3	50
Πίνακας 4.11: Τελική τιμή του συντελεστή ερπυσμού $\phi(t, t_0)$	53
Πίνακας 4.12: Ποσοστό συγκρατούμενων κόκκων	54

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Prudential Plaza Building	1
Εικόνα 1.2: Marina City Towers	2
Εικόνα 3.1: Αναμεικτήρας που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των μειγμάτων	26
Εικόνα 3.2: Πειραματική διάταξη πειράματος θλίψης	28
Εικόνα 3.3: Παράδειγμα πειραματικής διάταξης μερικής βύθισης (EN1609, 2013).	29
Εικόνα 3.4: Δοκίμιο σε πειραματική δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας	29
Εικόνα 3.5: Δοκίμιο μετά το πέρας της πειραματικής δοκιμής υδατοαπορροφητικότητας	30
Εικόνα 3.6: Πειραματική διάταξη πειράματος συμπίεστικότητας	31
Εικόνα 3.7: Μέτρηση βάρους δοκιμίου	32
Εικόνα 3.8: Παραδείγματα πειραματικής διάταξης πειράματος ερπυσμού (EN 1606, 2013)	33
Εικόνα 3.9: Διάταξη πειραματικής δοκιμής ερπυσμού	34
Εικόνα 4.1: Δοκίμιο μετά το πέρας του πειράματος θλίψης μείγματος 700 kg/m^3 ..	39
Εικόνα 4.2: Δοκίμιο μετά το πέρας του πειράματος θλίψης μείγματος 700 kg/m^3 ..	39
Εικόνα 4.3: Δοκίμιο μετά το πέρας του πειράματος θλίψης μείγματος 600 kg/m^3 .	40
Εικόνα 4.4: Δοκίμιο μετά το πέρας του πειράματος θλίψης μείγματος 400 kg/m^3 .	40
Εικόνα 4.5: Δοκίμιο μετά το πέρας του πειράματος θλίψης μείγματος 300 kg/m^3 .	41

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης 28 ημερών (Cui et. al., 2015).....	10
Σχήμα 2.2: Διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης 60 ημερών (Cui et. al., 2015).....	11
Σχήμα 2.3: Αποτελέσματα θλιπτικών δοκιμών ελαφροσκυροδέματος (Johnpaul et. al., 2020).....	13
Σχήμα 2.4: Μέσος όρος θλιπτικών αντοχών (Adeala & Soyemi, 2020)	20
Σχήμα 2.5: Θλιπτικές αντοχές 28 ημερών (Adeala & Soyemi, 2020)	20
Σχήμα 2.6: Γραφική παράσταση εξίσωσης $y = -0.4476x + 19.543$ (Adeala & Soyemi, 2020).....	21
Σχήμα 2.7: Διάγραμμα πυκνότητας σκυροδέματος προς την αναλογία τσιμέντου προς διογκωμένη πολυστερίνη (Demirboga & Kan, 2007)	23
Σχήμα 2.8: Διάγραμμα θλιπτικής αντοχής προς το λόγο τσιμέντου (Demirboga & Kan, 2007)	24
Σχήμα 2.9: Σχέση της πυκνότητας σκληρυμένου σκυροδέματος και της θλιπτικής αντοχής (Demirboga & Kan, 2007)	24
Σχήμα 4.1: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης μείγματος 300kg/m ³	36
Σχήμα 4.2: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης μείγματος 400kg/m ³	36
Σχήμα 4.3: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης μείγματος 600 kg/m ³	37
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης μείγματος 700 kg/m ³	37
Σχήμα 4.5: Γράφημα Υδατοαπορροφητικότητας.....	42
Σχήμα 4.6: Γράφημα μέσων όρων υδατοαπορροφητικότητας	42
Σχήμα 4.7: Χρονικά εξαρτημένη συμπεριφορά διογκωμένης πολυστερίνης σε μονοαξονική συμπίεση (Horvath, 1993)	44
Σχήμα 4.8: Διάγραμμα παραμόρφωσης % προς logt δοκιμών μείγματος 300 kg/m ³	46
Σχήμα 4.9: Διάγραμμα μέσου όρου σχετικής παραμόρφωσης % προς logt δοκιμών μείγματος 300 kg/m ³	46
Σχήμα 4.10: Διάγραμμα μήκυνσης προς logt δοκιμίου μείγματος 400 kg/m ³	47
Σχήμα 4.11: Διάγραμμα σχετικής παραμόρφωσης % προς logt δοκιμίου μείγματος 400 kg/m ³	48
Σχήμα 4.12: Διάγραμμα μήκυνσης προς logt δοκιμίου μείγματος 600 kg/m ³	49

Σχήμα 4.13: Διάγραμμα σχετικής παραμόρφωσης % προς $\log t$ δοκιμίου μείγματος 600 kg/m^3	50
Σχήμα 4.14: Διάγραμμα μήκυνσης προς $\log t$ δοκιμίου μείγματος 700 kg/m^3	51
Σχήμα 4.15: Διάγραμμα σχετικής παραμόρφωσης % προς $\log t$ δοκιμίου μείγματος 700 kg/m^3	51
Σχήμα 4.16: Διάγραμμα σχετικής παραμόρφωσης % προς $\log t$	52

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

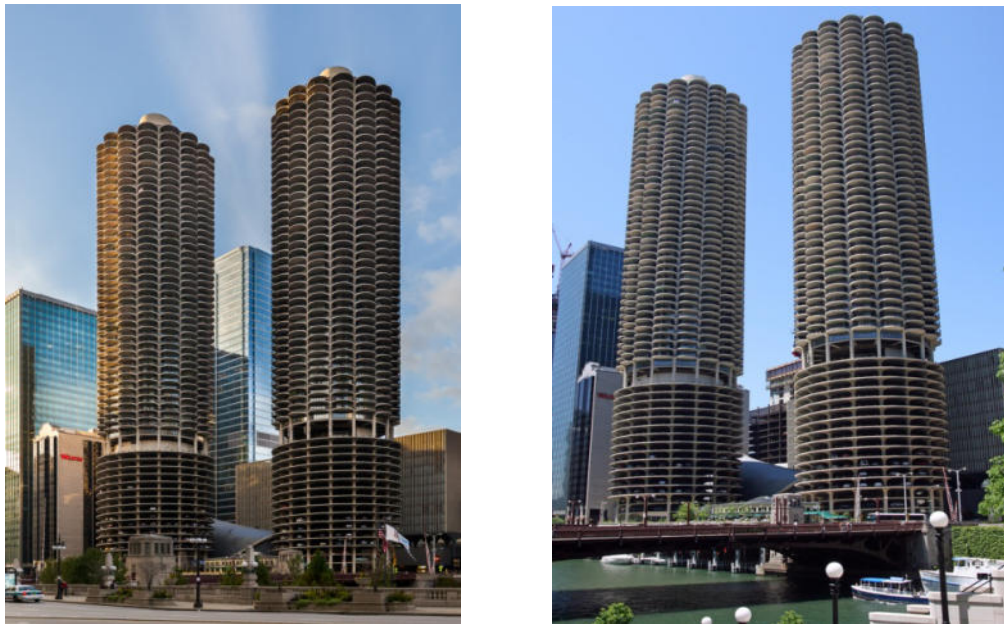
Το ελαφροσκυρόδεμα είναι ένα υλικό που έχει μακροχρόνια ιστορία και ένα πολύ μεγάλο εύρος χρήσης. Στα χιλιάδες χρόνια ύπαρξης του έχουν αναπτυχθεί αρκετά είδη τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών από την κατασκευή του Κολοσσαίου στην αρχαία Ρώμη, μέχρι τη κατασκευή κυτών πλοίων του στόλου των Η.Π.Α., που χρησιμοποιήθηκαν για τη μεταφορά φορτίων κατά τη διάρκεια του 2ου Παγκοσμίου Πολέμου. Κατά τη δεκαετία του 1920 κατασκευάστηκαν αρκετές γέφυρες από ελαφροσκυρόδεμα με διογκωμένο σχιστόλιθο και μέσα σε πενήντα χρόνια ο αριθμός των γεφυρών έφτασε τις 200 σε Η.Π.Α. και Καναδά (Beuntner, 2020) .

Ο λόγος που έχουν αναπτυχθεί πολλά είδη ελαφροσκυροδέματος και έχουν ευρεία χρήση είναι γιατί το ελαφροσκυρόδεμα είναι ένα υλικό που προσφέρει αρκετά καλές μηχανικές ιδιότητες χωρίς όμως να προσθέτει πολλά επιπρόσθετα φορτία στην κατασκευή. Είναι προφανές ότι σε μια χώρα με υψηλή σεισμική δραστηριότητα η μείωση του ιδίου βάρους μιας κατασκευής είναι ζητούμενη καθώς η σεισμική καταπόνηση είναι ευθέως ανάλογη των αδρανειακών μαζών (Krishnamurthy, 2018). Δύο παραδείγματα μερικής χρήσης ελαφροσκυροδέματος για τη μείωση του ιδίου βάρους στον κατασκευαστικό τομέα αποτελούν τα επιβλητικά κτίρια Prudential Plaza Building και το Marina City Towers στο Σικάγο. Το πρώτο είναι ένα κτίριο 41 ορόφων, ύψους 183 μέτρων κατασκευασμένο το 1955 και ήταν ο πρώτος ουρανοξύστης που κατασκευάστηκε στο Σικάγο μετά το κραχ και το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο.



Εικόνα 1.1: Prudential Plaza Building

Το δεύτερο είναι δύο ουρανοξύστες 65 ορόφων, ύψους 179 μέτρων των οποίων η κατασκευή ολοκληρώθηκε το 1968. Οι πρώτοι 19 όροφοι σχηματίζουν μια εκτεθειμένη σπειροειδή ράμπα παρκαρίσματος με 896 θέσεις.



Εικόνα 1.2: Marina City Towers

Και τα δύο μεγάλα αυτά έργα αξιοποίησαν τα οφέλη του ελαφροσκυροδέματος σε κάποια σημεία της κατασκευής ώστε να πραγματοποιηθεί η υλοποίησή τους. Παρόλα αυτά ακόμα δεν έχει αναπτυχθεί κάποιο ελαφροσκυρόδεμα το οποίο να ξεπερνάει τις μηχανικές ικανότητες ενός συμβατικού. Για τον λόγο αυτό η μελέτη και η έρευνα στον τομέα αυτό συνεχίζεται μέχρι και σήμερα με αμείωτους ρυθμούς.

Τι ορίζεται όμως με τον όρο ελαφροσκυρόδεμα; Ο όρος ελαφροσκυρόδεμα είναι μια γενική έκφραση των σκυροδεμάτων που χαρακτηρίζονται από μικρό ειδικό βάρος. Υπάρχουν δύο τρόποι να επιτευχθεί το μικρό ειδικό βάρος, ο πρώτος είναι με τη χρήση κάποιων συγκεκριμένων ειδών αδρανών, συνήθως διογκωμένων υλικών, τα οποία έχουν αρκετά μικρότερο ειδικό βάρος από τα κλασσικά είδη αδρανών όπως το χαλίκι και το γαρμπίλι. Ο δεύτερος τρόπος είναι με την εισαγωγή φουσκών αέρα στο τσιμεντοκονίαμα (Hamad & Mohammed, 2014). Με την πρώτη μέθοδο το παραγόμενο ελαφροσκυρόδεμα ονομάζεται σκυρόδεμα ελαφρών αδρανών, ενώ αυτό με τη δεύτερη μέθοδο ονομάζεται αφρώδες σκυρόδεμα.

Σε αρκετούς διεθνείς κατασκευαστικούς κανόνες το ελαφροσκυρόδεμα ορίζεται ως το σκυρόδεμα που έχει ξηρή πυκνότητα μικρότερη των 2000 kg/m^3 . Η ανάπτυξη όμως

ποικίλων ελαφροσκυροδεμάτων την τελευταία δεκαετία, με ένα εύρος πυκνοτήτων από 300 έως 2000 kg/m³ έχει οδηγήσει στην ανάγκη για την εισαγωγή δυο περιγραφικών όρων, «κατασκευαστικό ελαφροσκυρόδεμα» και το «υπερελαφρό σκυρόδεμα». Με τον όρο κατασκευαστικό ελαφροσκυρόδεμα ορίζεται σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 το σκυρόδεμα με μέση θλιπτική αντοχή κυλίνδρου μεγαλύτερη των 17 MPa και πυκνότητα μεγαλύτερη των 800 kg/m³. Με τον όρο υπερελαφρό σκυρόδεμα ονομάζεται το ελαφροσκυρόδεμα με πυκνότητα μικρότερη των 800 kg/m³ (Elshahawi, 2020).

Οι απαιτήσεις του κατασκευαστικού τομέα καθώς και η ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη έχουν οδηγήσει στην εμφάνιση ποικίλων εναλλακτικών ελαφρών αδρανών για την αντικατάσταση των κλασσικών αδρανών όπως το χαλίκι και το γαρμπίλι στο σκυρόδεμα. Αυτά τα αδρανή μπορεί να είναι είτε φυσικά είτε τεχνητά υλικά. Κάποια από αυτά τα υλικά είναι το κοκκοποιημένο κοτσάνι από το καλαμπόκι, χωρίς τα σπυριά του καλαμποκιού, ο διογκωμένος πηλός, η διογκωμένη πολυστερίνη και ο φελλός.

Όπως είναι αναμενόμενο κάποια υλικά θα προσφέρουν καλύτερες μηχανικές ή θερμομονωτικές ιδιότητες στο ελαφροσκυρόδεμα από ότι κάποια άλλα. Πριν να γίνει όμως η σύγκριση πρέπει να ληφθούν υπόψη και κάποιοι άλλοι σημαντικοί παράγοντες, όπως για παράδειγμα το κόστος παραγωγής, η διαθεσιμότητα καθώς και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που μπορεί να επιφέρει η χρήση ενός υλικού. Για παράδειγμα είναι εύκολο να αντιληφθούμε ότι σε μια χώρα με υψηλή αγροτική δραστηριότητα, η οποία παράγει εκατομμύρια τόνους καλαμποκιού ετησίως, η ανάπτυξη ενός ελαφροσκυροδέματος το οποίο αξιοποιεί το κατά τα άλλα αναξιοποίητο κομμάτι καλαμποκιού, θα σήμαινε αρχικά περισσότερα έσοδα, καθώς και φθηνότερες πρώτες ύλες. Ακόμα και αν ένα ελαφροσκυρόδεμα από καλαμπόκι παρουσίαζε μειωμένες μηχανικές ή θερμομονωτικές ιδιότητες η εύκολη διαθεσιμότητα των υλικών θα μπορούσε να το καταστήσει σαν ένα βιώσιμο δομικό υλικό.

Όμως πέρα από τα φυσικά υλικά η σύγχρονη τεχνολογία σε συνδυασμό με την αύξηση των βιομηχανικών υποδομών μας επιτρέπει την κατασκευή τεχνητών υλικών για την κάλυψη των αναγκών του κατασκευαστικού τομέα και όχι μόνο. Ένα από τα υλικά αυτά είναι και η διογκωμένη πολυστερίνη.

Η ανακάλυψη της πολυστερίνης έγινε κατά λάθος το 1839 στη Γερμανία από τον Edward Simon ο οποίος όμως δεν ήξερε τι είχε ανακαλύψει. Ογδόντα χρόνια αργότερα ο οργανικός χημικός Hermann Staudinger ήταν αυτός που αντιλήφθηκε ότι η ανακάλυψη του

Edward Simon ήταν ένα πλαστικό πολυμερές. Το 1922 ο Hermann Staudinger εξέδωσε τις θεωρίες του πάνω στα πολυμερή και η μακροχρόνια έρευνα του τον οδήγησε στην απόκτηση του βραβείου Νόμπελ της Χημείας το 1953. Το 1930 οι επιστήμονες της εταιρίας BASF βρήκαν έναν τρόπο να παράγουν εμπορικά πολυστερίνη σε μορφή σφαιριδίων και το 1950 ανέπτυξαν και παντετάρισαν τη διογκωμένη πολυστερίνη (EPS) γνωστή και ως Styropor. Ο όγκος ενός κόκκου διογκωμένης πολυστερίνης είναι 40 φορές μεγαλύτερος από αυτόν ενός κόκκου της πρωτότυπης πολυστερίνης. Από την τυχαία αυτή ανακάλυψη της πολυστερίνης το 1839 μέσα από σκληρή δουλειά και έρευνα των επιστημόνων έχει προκύψει ένα υλικό με μικρή πυκνότητα, καλές θερμομονωτικές ιδιότητες, αδρανές στη φύση του το οποίο είναι και ανθεκτικό στην απορρόφηση κραδασμών. Οι ιδιότητες αυτές έχουν καταστήσει την διογκωμένη πολυστερίνη σαν ένα «πολυεργαλείο», καθώς χρησιμοποιείται για την κατασκευή θερμομονώσεων, ως υλικό επίπλευσης για μαρίνες και σχεδίες καθώς και έως για την κατασκευή σανίδων του σερφ (Moutassem, 2020).

Όσον αφορά στην χρήση διογκωμένης πολυστερίνης στην κατασκευή του ελαφροσκυροδέματος αναμιγνύεται τσιμέντο, άμμος, νερό και χάντρες διογκωμένης πολυστερίνης. Το ελαφροσκυρόδεμα με διογκωμένη πολυστερίνη χρησιμοποιείται σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών στον κατασκευαστικό τομέα. Αυτές οι εφαρμογές περιλαμβάνουν την κατασκευή πλακών οροφών σε μικρά κτίρια με φέρουσα τοιχοποιία και τη κατασκευή ελαφρών θερμομονωτικών πάνελ τοίχων. Επιπρόσθετα αξιοποιείται σαν θερμομόνωση με τη μορφή τούβλων και μπλοκ σε επίπεδες οροφές κτιρίων από μη φέρουσα τοιχοποιία (Moon, 2020).

Όπως είναι αναμενόμενο με την εισαγωγή οποιουδήποτε νέου υλικού στην διαθέσιμη αγορά, γεννιούνται και κάποια ερωτήματα σχετικά με το υλικό αυτό. Για να χρησιμοποιηθεί με σιγουριά και ασφάλεια κάποιος θα πρέπει να ξέρει τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες, την συμπεριφορά, καθώς και την αξιοπιστία του υλικού αυτού. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να απαντηθούν τα ερωτήματα αυτά. Για την επίτευξη του στόχου αυτού πραγματοποιήθηκε μια σειρά δοκιμών και πειραμάτων που ακολούθησε τα αντίστοιχα Ευρωπαϊκά πρότυπα.

Κεφάλαιο 2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία έχουν γίνει αρκετές ερευνητικές εργασίες πάνω στη διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων διάφορων ειδών ελαφροσκυροδέματος. Οι A. Sadrmomtazi et. al. (2012) πραγματοποίησαν μια πειραματική έρευνα για τις ιδιότητες ελαφροσκυροδέματος πολλαπλών βαθμών αντοχής με αφρώδη διογκωμένη πολυστερίνη το οποίο περιέχει καπνό πυριτίου και τέφρα από φλοιό ρυζιού. Στα πλαίσια της έρευνας τους δημιούργησαν αρκετά μείγματα σκυροδέματος στα οποία αντικατέστησαν το 0%, 15%, 25%, 40% και 55% του όγκου των αδρανών με χάντρες αφρώδους διογκωμένης πολυστερίνης. Επίσης έγινε αντικατάσταση 10% τσιμέντου με καπνό πυριτίου ή 20% με τέφρα φλοιού ρυζιού. Επιπλέον για να ερευνηθεί η επιρροή των ινών πολυπροπυλενίου στις μηχανικές ιδιότητες του ελαφροσκυροδέματος, προστέθηκαν ίνες πολυπροπυλενίου στα μείγματα σε τέσσερις διαφορετικές αναλογίες 0.1%, 0.3%, 0.5% και 1% του όγκου του τσιμέντου.

Η ανάμιξη των υλικών έγινε με συγκεκριμένη σειρά, αρχικά ένα μέρος του νερού μαζί με τον υπερπλαστικοποιητή τοποθετήθηκαν στην μπετονιέρα, έπειτα προστέθηκαν οι κόκκοι αφρώδους διογκωμένης πολυστερίνης και έγινε μια διεξοδική ανάμιξη για περίπου 2 λεπτά. Έπειτα προστέθηκαν και τα υπόλοιπα υλικά καθώς το υπολειπόμενο νερό προστέθηκε σταδιακά καθώς η ανάμιξη βρίσκονταν σε εξέλιξη. Μετά από μια ικανοποιητική ανάμιξη για την επίτευξη μια ομοιόμορφης υφής και μιας καλής κατανομής των κόκκων πολυστερίνης, πάρθηκαν μετρήσεις για την πυκνότητα του φρέσκου μείγματος. Μετά τις μετρήσεις το μείγμα μπήκε στα κατάλληλα καλούπια όπου πραγματοποιήθηκε υγρή σκλήρυνση για 24 ώρες. Τέλος τα δοκίμια ξεκαλουπώθηκαν και αποθηκεύτηκαν σε μια τυπική λεκάνη έως ότου να έρθει η ώρα των δοκιμών.

Σύμφωνα με τις δοκιμές θλίψης προέκυψαν οι θλιπτικές αντοχές για τα διάφορα μείγματα σκυροδέματος. Στον Πίνακα 2.1 εμφανίζονται οι θλιπτικές αντοχές των δοκιμών χωρίς ίνες πολυπροπυλενίου στις 3, 7, 14, 28, 90 και 150 μέρες από την δημιουργία τους.

Πίνακας 2.1: Θλιπτική αντοχή μη ινώδων ελαφροσκυροδεμάτων διογκωμένης πολυστερίνης (Sadrohmatzi et. al., 2012)

Mixture identification	Compressive strength (MPa)					
	3 days	7 days	14 days	28 days	90 days	150 days
E0	24.5	26.4	35.7	43	48.8	51.2
E15	18.1	24.7	25.7	33	34.7	36
E25	8.6	10.7	13	16.7	19.6	20.5
E40	5.4	6.5	8.6	9.8	11	11.7
E55	3.1	3.4	4.4	5.4	-	-
E0SF10	26.4	31.1	42.7	47.6	58.7	63.4
E15SF10	20.4	22.1	31.1	35	36	39
E25SF10	13.4	18.2	21.4	24.4	27.2	28.7
E40SF10	5.4	6.9	8.6	10.2	-	-
E55SF10	1.5	2.2	2.4	2.9	-	-
E0RH20	15.1	20.1	25.3	29.5	45.2	48.7
E15RH20	12.4	14.8	19.5	22.4	27.4	28.4
E25RH20	5.3	7.5	8.8	10.6	20.1	21
E40RH20	3.9	4.9	6	7.1	8.3	9.1
E55RH20	1.9	2.3	3.1	3.5	-	-

Παρατηρείται πτώση στην αντοχή με την αντικατάσταση των αδρανών με κόκκους αφρώδους διογκωμένης πολυστερίνης η οποία αυξάνεται όσο αυξάνεται και το ποσοστό των αδρανών το οποίο αντικαθίσταται. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι το σκυρόδεμα που περιέχει τσιμέντο τύπου Portland και κόκκους πολυστερίνης στις 7 ημέρες αναπτύσσει το 67% της αντοχής των 28 ημερών, ενώ το κανονικό σκυρόδεμα έχει αντοχή 7 ημερών ίση με το 61% των 28 ημερών. Σύμφωνα με τους ερευνητές το φαινόμενο αυτό μπορεί να οφείλεται στην θερμική αντίσταση που προσφέρουν οι χάντρες αφρώδους διογκωμένης πολυστερίνης στο σκυρόδεμα, κάτι που οδηγεί στη συγκράτηση της θερμότητας της ενυδάτωσης και αυξάνει τις αντιδράσεις του τσιμέντου.

Στα δοκίμια που έγινε αντικατάσταση 10% του όγκου τσιμέντου με καπνό πυριτίου παρατηρήθηκε μια αύξηση στην αντοχή για τα μείγματα που περιείχαν μέχρι 25% κόκκους πολυστερίνης. Ενώ για τα μείγματα με 40% και 55% κόκκους πολυστερίνης η αντικατάσταση ενός ποσοστού του τσιμέντου με καπνό πυριτίου δεν αύξησε την αντοχή καθώς οι αντοχές ήταν ίσες ή μικρότερες με τα αντίστοιχα δοκίμια που περιείχαν μόνο τσιμέντο. Μια ακόμα αλλαγή που προκαλεί η χρήση του καπνού πυριτίου είναι η μεγαλύτερη αντοχή 7 ημερών, ίση με το 70% αυτής των 28 ημερών, κάτι που σύμφωνα με τους ερευνητές μπορεί να αποδοθεί στην υψηλή αντιδραστικότητα του καπνού πυριτίου. Αντίστοιχα στα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκε τέφρα από φλοιό ρυζιού σε αντικατάσταση του 20% του όγκου τσιμέντου παρουσιάστηκε πτώση της θλιπτικής αντοχής, ιδιαίτερα στα αρχικά στάδια, κάτι που μπορεί να σχετίζεται με την αργή αντιδραστικότητα της τέφρας.

Επιπλέον πρέπει να σημειωθεί ότι οι θλιπτικές αντοχές 90 και 150 ημερών είναι πολύ κοντά σε αυτές των δοκιμών που περιέχουν μόνο τσιμέντο, ειδικά για τα μείγματα με υψηλή περιεκτικότητα κόκκων πολυστερίνης, κάτι που επιτυγχάνεται λόγω της ποζολανικής συμπεριφοράς της τέφρας φλοιού ρυζιού. Τέλος η αντοχή 7 ημερών των δοκιμών με τέφρα είναι 69% της αντοχής των 28 ημερών (Sadrohmatzi et. al., 2012).

Μια ακόμη έρευνα πάνω στο ελαφροσκυρόδεμα που περιέχει κόκκους αφρώδους διογκωμένης πολυστερίνης πραγματοποίησαν οι Ning Liu & Bing Chen (2013). Η εργασία τους με τίτλο κατασκευή ενός καινοφανούς ελαφροσκυροδέματος και οι θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του, παρουσιάζει κάποια ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Για την διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών στα πλαίσια της έρευνας δημιουργήθηκαν δέκα διαφορετικά μείγματα πυκνότητας 400 και 800 kg/m³. Για όλα τα μείγματα χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου Portland του οποίου ένα ποσοστό αντικαταστήθηκε με τσιμέντο υψηλής αλουμίνας ώστε να επιταχυνθεί η σκλήρυνση και να συγκρατηθεί ο αφρός στη μήτρα καθώς προστέθηκε και καπνός πυριτίου. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 100 mm και διαμέτρου 100 μm για την αύξηση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος. Επιπρόσθετα εμπορικά διαθέσιμοι κόκκοι αφρώδους διογκωμένης πολυστερίνης με μέση διάμετρο του 1 mm και πυκνότητα 30 kg/m³ επιλέχθηκαν για την διεξαγωγή της έρευνας. Για τον εγκλωβισμό φυσαλίδων αέρα κατά τη διαδικασία της ανάμιξης, χρησιμοποιήθηκε μια πρωτεΐνη ζωικής προέλευσης. Τέλος για την επίτευξη ενός μείγματος με καλή εργασιμότητα έγινε χρήση ενός υπερπλαστικοποιητή με βάση τη ναφθαλίνη. Τελικά κατασκευάστηκαν πέντε μείγματα πυκνότητας 400 kg/m³ και άλλα πέντε των 800 kg/m³ με πέντε διαφορετικά ποσοστά περιεκτικότητας όγκου αφρού, 0%, 5%, 10%, 15% και 20%.

Όλα τα σκυροδέματα κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο με χρήση ενός πλανητικού αναδευτήρα χωρητικότητας 50 l. Για την παραγωγή ομογενών μιγμάτων τα υλικά προστέθηκαν με συγκεκριμένη ακολουθία. Αρχικά όλα τα υλικά σε μορφή σκόνης και οι ίνες πολυπροπυλενίου τοποθετήθηκαν στον αναδευτήρα όπου αναδεύτηκαν σε χαμηλή ταχύτητα για περίπου 3 λεπτά. Η αρχική ξηρή ανάμιξη είναι απαραίτητη για ένα σωστά ομογενοποιημένο μείγμα. Στη συνέχεια έγινε προσθήκη του νερού και του υπερπλαστικοποιητή και συνεχίστηκε η ανάμιξη μέχρι τη στιγμή που δημιουργήθηκε μια ομογενής και ρευστή μήτρα. Έπειτα για περίπου 30 δευτερόλεπτα ελαττώθηκε η ταχύτητα του αναδευτήρα ώστε να προστεθούν οι κόκκοι αφρώδους διογκωμένης πολυστερίνης

ενώ μετά την προσθήκη των κόκκων η ανάμιξη συνεχίστηκε για περίπου 2 λεπτά. Τέλος προστέθηκε ο παράγοντας αφρισμού όσο ο αναδευτήρας δούλευε σε μεγάλη ταχύτητα και μετά από περίπου 2 λεπτά τελείωσε η διαδικασία της ανάμιξης καθώς είχε δημιουργηθεί ένα ομοιόμορφο και ρευστό μείγμα. Η πυκνότητα και η εργασιμότητα των φρέσκων σκυροδεμάτων μετρήθηκε αμέσως μετά το πέρας της ανάμιξης. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στα καλούπια και έγινε συμπίεση με τα χέρια μόνο. Τα δοκίμια καλύφθηκαν με βρεγμένα τσουβάλια λινάτσας 10 ώρες μετά την τοποθέτηση τους σε καλούπια και αφαιρέθηκαν από τα καλούπια με το πέρας 24 ωρών όπου τοποθετήθηκαν σε αίθουσα ομίχλης με σχετική υγρασία περίπου 95% μέχρι να γίνουν οι δοκιμές.

Οι δοκιμές θλιπτικής αντοχής για τον χαρακτηρισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των σκυροδεμάτων, διεξήχθησαν με τη χρήση μιας MTS σερβοϋδραυλικής μηχανής δοκιμών με ικανότητα φόρτισης έως 100 kN , χρησιμοποιώντας έναν ελεγχόμενο ρυθμό παραμόρφωσης. Η πρώτη παρατήρηση που προέκυψε από τις θλιπτικές αντοχές είναι το γεγονός ότι σχεδόν όλα τα σκυροδέματα με το πέρας 7 ημερών ανέπτυξαν περίπου το 90% της αντοχής των 28 ημερών. Επιπλέον από τα αποτελέσματα των θλιπτικών δοκιμών, όπως αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2, προκύπτει ότι με την εισαγωγή αφρού στα μείγματα αυξάνεται η θλιπτική αντοχή των δοκιμών, όμως παρατηρείται και ένα σημείο καμπής στην αύξηση αυτή καθώς τα δοκίμια με περιεκτικότητα 20% αφρού παρουσιάζουν μικρότερη θλιπτική αντοχή σε σχέση με αυτά που περιέχουν 15% αφρό για τα δοκίμια πυκνότητας 400 kg/m³. Αντίστοιχα για τα δοκίμια πυκνότητας 800 kg/m³ παρατηρήθηκε η ίδια συμπεριφορά με μόνη διαφορά ότι η αύξηση της θλιπτικής αντοχής με την εισαγωγή αφρού παρουσιάζει σημείο καμπής στο 10% σε περιεκτικότητα αφρού και όχι στο 15% (Chen & Liu, 2013).

Πίνακας 2.2: Αποτελέσματα μηχανικών δοκιμών (Chen & Liu, 2013)

Mix	Compressive strength (MPa)			Splitting tensile strength (MPa)	Thermal conductivity ($W/m^{-1} K^{-1}$)
	7 day	28 day	90 day		
F ₄₀₀ -0	1.4	1.58	1.8	0.25	0.15
F ₄₀₀ -5	1.60	1.76	2.0	0.23	0.13
F ₄₀₀ -10	1.86	2.07	2.3	0.17	0.10
F ₄₀₀ -15	2.43	2.76	3.0	0.19	0.09
F ₄₀₀ -20	2.10	2.37	2.5	0.15	0.07
F ₈₀₀ -0	7.04	7.79	9.5	1.65	0.30
F ₈₀₀ -5	7.67	8.82	10.5	1.42	0.28
F ₈₀₀ -10	9.62	11.0	13.0	1.44	0.25
F ₈₀₀ -15	9.38	10.75	12.5	1.37	0.22
F ₈₀₀ -20	9.36	10.56	12.0	1.35	0.20

Συγκρίνοντας τις δύο έρευνες φαίνεται ότι οι θλιπτικές αντοχές των δοκιμίων διαφέρουν αρκετά καθώς έχουν ακολουθηθεί διαφορετικές φόρμουλες για την παραγωγή των σκυροδεμάτων. Πέρα από τις διαφορές όμως παρατηρείται μια κοινή συμπεριφορά στο γεγονός ότι και στις δύο έρευνες, τα σκυροδέματα που περιέχουν κόκκους αφρώδους διογκωμένης πολυστερίνης εμφανίζουν μεγαλύτερο λόγο θλιπτικής αντοχής 7 ημερών προς θλιπτική αντοχή 28 ημερών.

Οι μελετητές C. Cui et. al. (2015) διεξήγαγαν μια έρευνα για τη σχέση της τάσης-παραμόρφωσης στην αξονική θλίψη σκυροδέματος που περιέχει κόκκους αφρώδους διογκωμένης πολυστερίνης. Στα πλαίσια της έρευνας τους χρησιμοποίησαν σύννηθες τσιμέντο Portland και άμμο ποταμίσια. Επίσης επιλέχθηκε εμπορικά διαθέσιμη σφαιρική διογκωμένη πολυστερίνη για να αντικαταστήσει τα συνήθη χονδρά αδρανή. Η διάμετρος των κόκκων της διογκωμένης πολυστερίνης είναι κυρίως 3 mm και η χύδην πυκνότητα 16 kg/m³. Για την εξασφάλιση της κατάλληλης εργασιμότητας χρησιμοποιήθηκε ένα πρόσμικτο ναφθαλίνης που μειώνει το νερό.

Για την κατασκευή των δοκιμίων το φρέσκο σκυρόδεμα τοποθετήθηκε μέσα στα μεταλλικά καλούπια και συμπίεστηκε ελαφρώς με τα χέρια. Τα δοκίμια αφαιρέθηκαν από τα καλούπια μετά από περίπου 24 ώρες και τοποθετήθηκαν σε μια τυπική αίθουσα σκλήρυνσης σε θερμοκρασία 20 °C και υγρασία 95%. Για τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης κατασκευάστηκαν πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 100 mm x 100 mm x 300 mm καθώς και

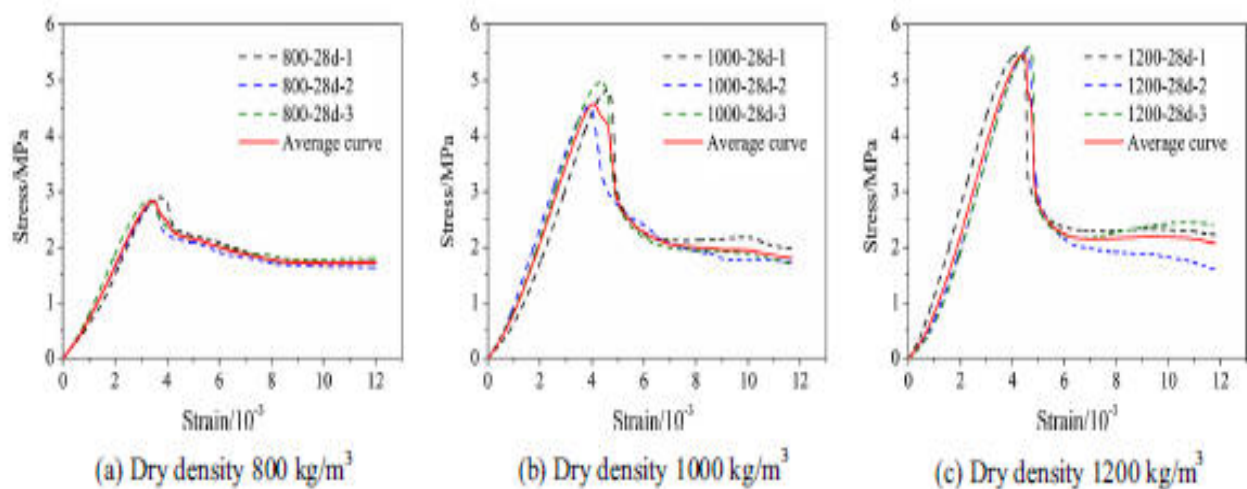
κυβικά δοκίμια με διαστάσεις 100 mm x100 mm x100 mm για να γίνει σύγκριση των διαφορών στις θλιπτικές αντοχές μεταξύ κύβων και πρισμάτων.

Η συμπεριφορά τάσης παραμόρφωσης προσδιορίστηκε με βάση τις δοκιμές πάνω στα πρισματικά δοκίμια, οι οποίες διεξήχθησαν με τη χρήση μια ηλεκτρονικής μηχανής θλίψης με ικανότητα φόρτισης έως 300 kN. Η φόρτιση ήταν ελεγχόμενη μέσω της μετατόπισης και ο ρυθμός φόρτισης ήταν σταθερός στα 0.003 mm/s.

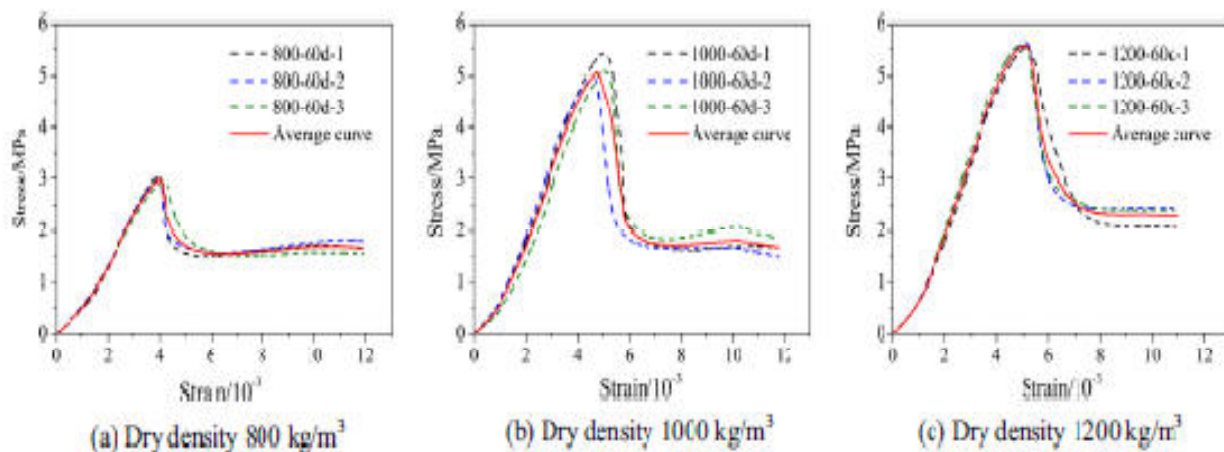
Πίνακας 2.3: Αποτελέσματα δοκιμών (Cui et. al., 2015)

Dry density (kg/m ³)	Curing age (days)	Prism compressive strength f_c (MPa)	Cube compressive strength f_{cu} (MPa)	f_d/f_{cu}	Peak strain ϵ_c (‰)
800	28	2.86	3.08	0.93	3.54
	60	3.00	3.47	0.86	4.04
1000	28	4.77	5.08	0.94	4.27
	60	5.15	5.43	0.95	4.90
1200	28	5.55	6.24	0.89	4.46
	60	5.60	6.76	0.83	5.07

Ο λόγος των θλιπτικών αντοχών των πρισματικών δοκιμών προς τις θλιπτικές αντοχές των κυβικών δοκιμών κυμαίνεται από 0.83 έως 0.95, αρκετά μεγαλύτεροι δηλαδή από αυτόν του κανονικού σκυροδέματος που ισούται με 0.76.



Σχήμα 2.1: Διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης 28 ημερών (Cui et. al., 2015)



Σχήμα 2.2: Διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης 60 ημερών (Cui et. al., 2015)

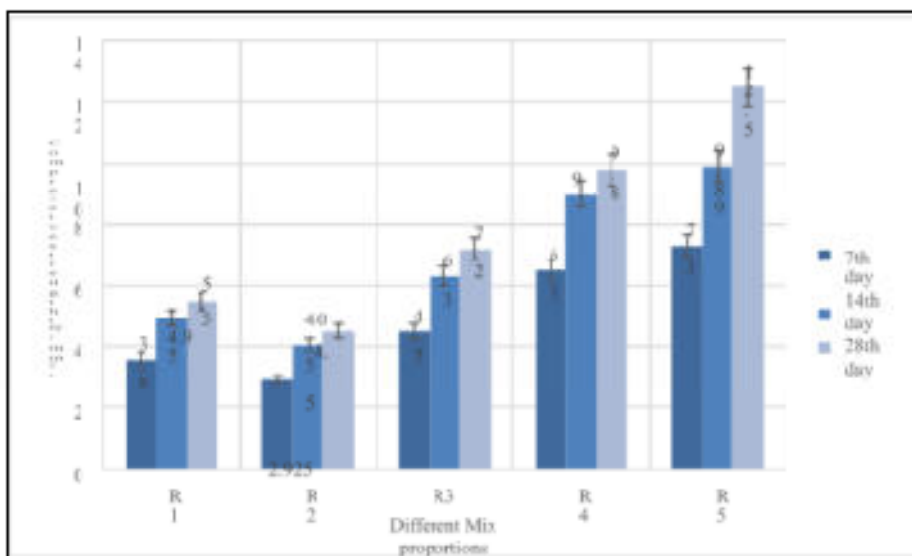
Από τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης φαίνεται ότι το σκυρόδεμα που περιέχει διογκωμένη πολυστερίνη παρουσιάζει μέγιστη τάση σε παραμόρφωση 3.5-5.1‰ ενώ το κανονικό σκυρόδεμα παρουσιάζει μέγιστη τάση σε παραμόρφωση 2‰. Επιπλέον παρατηρείται ότι τάση μειώθηκε αργά και συνέκλινε σε μια παραμένουσα αντοχή στη περιοχή της μεγαλύτερης παραμόρφωσης στον φθίνοντα κλάδο. Σαν αποτέλεσμα μπορεί να συμπεραθεί ότι το σκυρόδεμα με διογκωμένη πολυστερίνη έχει καλύτερη πλαστιμότητα και καλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας σε σχέση με το κανονικό σκυρόδεμα (Cui et. al., 2015).

Μέχρι στιγμής οι έρευνες που έχουν αναφερθεί διερευνούν τις ιδιότητες διάφορων ελαφροσκυροδεμάτων τα οποία περιέχουν διογκωμένη πολυστερίνη. Όλες οι φόρμουλες που έχουν αναπτυχθεί προς μελέτη εξετάζονται τόσο ως προς τη θλιπτική αντοχή, την πυκνότητα καθώς και την θερμική αγωγιμότητα τους. Όμως πώς συγκρίνεται η θλιπτική αντοχή των ελαφροσκυροδεμάτων που περιέχουν διογκωμένη πολυστερίνη με ελαφροσκυροδέματα που έχουν αναπτυχθεί για την επίτευξη μεγάλων θλιπτικών αντοχών χωρίς τη χρήση διογκωμένης πολυστερίνης; Για να μπορέσουμε να κάνουμε τη σύγκριση αυτή πρέπει να γίνει μια αναφορά στην έρευνα των V. Johnpaul et. al. (2020). Η έρευνα των μελετητών αυτών έγινε με σκοπό της δημιουργίας ενός ελαφροσκυροδέματος υψηλής αντοχής. Για τις διάφορες φόρμουλες που ανέπτυξαν χρησιμοποίησαν τσιμέντο τύπου Portland, άμμο, ιπτάμενη τέφρα, σκόνη λατομείου, ασβεστόλιθο και γύψο. Αναπτύχθηκαν πέντε διαφορετικές φόρμουλες οι οποίες περιέχουν διαφορετικές αναλογίες υλικών όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.4.

Πίνακας 2.4: Αναλογίες μιγμάτων (Johnpaul et. al., 2020)

Materials	Ratio 1	Ratio 2	Ratio 3	Ratio 4	Ratio 5
Cement	1	1	1	1	1
Sand	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Fly Ash	15	10	20	30	25
Quarry dust	30	25	35	30	25
Lime Stone	30	25	35	-	25
Gypsum	25	20	30	-	25

Όλα τα υλικά πρέπει να αναμιχθούν ομοιόμορφα και κανένα να μην είναι σε μέγεθος κόκκου καθώς αυτό θα οδηγήσει σε διαφορεική καθίζηση η οποία θα επηρεάσει την αντοχή του σκυροδέματος. Για το λόγο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια μηχανή αλέσματος η οποία θα σπάσει όλα τα κοκκώδη σωματίδια. Για τη ανάδευση του σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε μια μπετονιέρα στην οποία προστέθηκαν όλα τα υλικά. Ο αφρός δημιουργήθηκε ξεχωριστά, με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα και τοποθετήθηκε αργότερα μέσα στην μπετονιέρα με το υπόλοιπο μείγμα. Η ανάδευση πρέπει να είναι ομοιόμορφη και ήπια για να μην σπάσουν οι φυσαλίδες. Καθώς το σκυρόδεμα είχε υψηλή εργασιμότητα δεν υπήρχε ανάγκη για συμπύκνωση στα καλούπια, οπότε απλά τοποθετήθηκε σε αυτά. Το σκυρόδεμα περιέχει αφρό οπότε δεν κάνει να τοποθετηθεί μέσα σε νερό για να πραγματοποιηθεί η σκλήρυνση καθώς αυτό θα οδηγήσει σε μείωση της αντοχής του σκυροδέματος. Συνεπώς πραγματοποιήθηκε ξηρή σκλήρυνση 7, 14, και 28 ημερών. Τα δοκίμια που παράχθηκαν για τη διεξαγωγή των πειραμάτων έχουν διαστάσεις 150 mm x 150 mm x 150 mm (Johnpaul et. al., 2020).



Σχήμα 2.3: Αποτελέσματα θλιπτικών δοκιμών ελαφροσκυροδέματος (Johnpaul et. al., 2020)

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης προέκυψε ότι το μείγμα 5 ανέπτυξε τη μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή 28 ημερών. Οι αντοχές των ελαφροσκυροδεμάτων κυμαίνονται από 4 έως 12.5 Μpa. Σύμφωνα με τις έρευνες που έχουν αναφερθεί η αντοχή των ελαφροσκυροδεμάτων που περιέχουν διογκωμένη πολυστερίνη εξαρτάται από το ποσοστό περιεκτικότητας διογκωμένης πολυστερίνης αλλά και πολλούς άλλους παράγοντες όπως ο λόγος νερού-τσιμέντου, ο τρόπος ανάμιξης και γενικά οτιδήποτε επηρεάζει τη σύσταση και τη δομή του σκυροδέματος. Οι αντοχές των σκυροδεμάτων που αναπτύχθηκαν χρησιμοποιώντας διογκωμένη πολυστερίνη κυμαίνονται από 1.76 Μpa έως 33 Μpa. Ο λόγος που υπάρχει τόσο μεγάλη απόκλιση στις αντοχές είναι γιατί τα σκυροδέματα αυτά αναπτύχθηκαν σε 3 διαφορετικές έρευνες και κάθε έρευνα ανέπτυξε πολλές και διαφορετικές φόρμουλες με διάφορες αναλογίες υλικών. Παρατηρώντας αυτή τη μεγάλη διακύμανση από τα 1.76 ΜPa στα 33 ΜPa μπορούμε να συμπεράνουμε ότι με τη κατάλληλη αναλογία υλικών μπορεί να επιτευχθεί μια ικανοποιητική ποιότητα σκυροδέματος με τη χρήση διογκωμένης πολυστερίνης όσο αφορά τη θλιπτική αντοχή. Επιπλέον αν συγκρίνουμε τις αντοχές αυτές με τις αντοχές που μετρήθηκαν από τα ελαφροσκυροδέματα που δεν περιείχαν διογκωμένη πολυστερίνη (4-12.5 ΜPa) μπορούμε να πούμε πως η χρήση διογκωμένης πολυστερίνης οδηγεί σε καλύτερες αντοχές, όμως πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι κάποια από τα μείγματα δεν είχαν 100% αντικατάσταση αδρανών με κόκκους πολυστερίνης.

Όπως έγινε γνωστό από τις έρευνες των ιδιοτήτων των διάφορων τύπων ελαφροσκυροδέματος, η συμπεριφορά και το μοτίβο αστοχίας ενός ελαφροσκυροδέματος που περιέχει κόκκους διογκωμένης πολυστερίνης διαφέρουν από αυτά ενός τυπικού ελαφροσκυροδέματος (Moutassem, 2020). Οπότε α μοντέλα πρόβλεψης της θλιπτικής αντοχής ενός τυπικού σκυροδέματος δεν μπορούν να εφαρμοστούν για την πρόβλεψη της θλιπτικής αντοχής ενός υπερελαφρού σκυροδέματος που περιέχει διογκωμένη πολυστερίνη. Οι ιδιότητες του υπερελαφρού σκυροδέματος αυτού του τύπου εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις αναλογίες του μείγματος και της διαδικασίας ανάμιξης.

Γίνεται εμφανής λοιπόν η ανάγκη για την ανάπτυξη μιας διαδικασίας ανάμιξης που προσφέρει ποιοτικά αποτελέσματα καθώς και η ανάπτυξη καινούριων μοντέλων πρόβλεψης της θλιπτικής αντοχής. Η ακριβής πρόβλεψη της θλιπτικής αντοχής ενός μείγματος ελαφροσκυροδέματος πριν αυτό κατασκευασθεί αποτελεί βασική προϋπόθεση για τον κατάλληλο σχεδιασμό και ποιοτικό έλεγχο του μείγματος αυτού. Μια εργασία πάνω στον τομέα αυτό αποτελεί αυτή του Moutassem (2020). Στόχος της εργασίας ήταν η ανάπτυξη μιας αποτελεσματικής διαδικασίας ανάμιξης και μοντέλων πρόβλεψης της θλιπτικής αντοχής και για να επιτευχθεί κατασκευάστηκαν 30 διαφορετικά μείγματα ελαφροσκυροδέματος.

Για όλα τα μείγματα χρησιμοποιήθηκε σύννηθες τσιμέντο τύπου Portland και σε ορισμένα μείγματα έγινε χρήση συμπυκνωμένου καπνού πυριτίου θλιπτικής αντοχής 28 ημερών ίση με 56 MPa για αντικατάσταση του τσιμέντου. Επιπλέον σε όλα τα μείγματα χρησιμοποιήθηκαν εμπορικά διαθέσιμοι κόκκοι αφρώδους διογκωμένης πολυστερίνης διαμέτρου 2.5-3.5 mm και χύδην πυκνότητας 15-20 kg/m³. Για την επίτευξη αρκετά ρευστών μειγμάτων σκυροδέματος έγινε χρήση υπερρευστοποιητών υψηλής εμβέλειας πολυκαρβοξυλικής βάσης. Επιπρόσθετα τα 24 εκ των 30 μείγματα κατασκευάστηκαν περιέχοντας ένα πρόσμικτο αφρισμού ενώ τα άλλα 6 περιέχοντας ένα αερακτικό. Για την επίτευξη καλύτερου δεσμού μεταξύ του συνδετικού τσιμεντοπολτού και των κόκκων διογκωμένης πολυστερίνης χρησιμοποιήθηκε ένας συνδετικός παράγοντας με βάση το latex. Στον Πίνακα 2.5 φαίνονται οι αναλογίες του κάθε μείγματος.

Πίνακας 2.5: Αναλογίες μιγμάτων (Moutassem, 2020)

Mix #	w/c	EPS (kg/m ³)	OPC (kg/m ³)	SF (kg/m ³)	High-Range Water Reducer (kg/m ³)	Air Agent (kg/m ³)	Type
1	0.24	13.8	744	0	4.10	0.0	-
2	0.25	14.0	550	0	9.60	3.0	AA
3	0.30	14.0	500	0	5.80	3.1	FA
4	0.30	14.0	500	0	4.15	2.1	FA
5	0.30	14.0	500	0	6.00	2.0	FA
6	0.30	14.0	500	0	5.80	3.1	FA
7	0.30	14.0	450	0	3.05	3.0	FA
8	0.33	15.2	400	0	1.52	3.5	FA
9	0.30	14.8	450	0	2.65	3.5	FA
10	0.30	14.8	450	0	3.20	3.0	FA
11	0.30	14.8	450	0	2.70	3.0	FA
12	0.30	14.8	450	0	1.80	3.0	FA
13	0.30	14.8	450	0	2.50	3.5	FA
14	0.30	13.9	430	0	2.50	3.3	FA
15	0.30	13.9	430	0	1.50	3.3	FA
16	0.30	13.9	430	0	1.25	3.3	FA
17	0.30	13.9	430	0	1.25	3.3	FA
18	0.30	13.9	430	0	3.15	3.8	AA
19	0.30	13.7	407	23	5.90	7.0	AA
20	0.30	13.8	407	23	1.75	7.0	AA
21	0.30	13.7	407	23	5.00	3.0	FA
22	0.30	13.8	407	23	2.18	3.5	FA
23	0.28	14.0	407	23	2.00	7.0	AA
24	0.30	13.8	407	23	1.98	7.0	AA
25	0.30	13.8	407	23	2.18	3.0	FA
26	0.30	13.8	407	23	2.18	3.5	FA
27	0.30	13.8	407	23	2.15	2.5	FA
28	0.30	13.8	407	23	2.13	2.0	FA
29	0.32	14.9	350	0	2.20	1.5	FA
30	0.32	13.5	325	30	2.20	1.5	FA

Η ποσότητα συνδετικού παράγοντα σε όλα τα μείγματα είναι 4 kg/m³ και η ανάμιξη πραγματοποιήθηκε σε έναν οριζόντιο αναδευτήρα «ταψί». Οι ερευνητές επισήμαναν ότι το ελαφροσκυρόδεμα που περιέχει κόκκους διογκωμένης πολυστερίνης είναι επιρρεπές στο φαινόμενο του διαχωρισμού κυρίως λόγω της πολύ μικρής πυκνότητας των κόκκων διογκωμένης πολυστερίνης και της μεγάλης περιεκτικότητας τους σε όγκο μέσα στο μείγμα. Στα πλαίσια της εργασίας διερευνήθηκαν η κατάλληλη

διαδικασία και αλληλουχία ανάμιξης για να επιτευχθεί η παραγωγή υψηλής ποιότητας ομογενών μιγμάτων και η αποφυγή του φαινομένου του διαχωρισμού. Οπότε η προτεινόμενη διαδικασία ανάμιξης σύμφωνα με την εργασία έχει ως εξής. Πρώτα προστίθενται οι κόκκοι της διογκωμένης πολυστερίνης στον αναδευτήρα. Στη συνέχεια ο συνδετικός παράγοντας αναμιγνύεται με το 1/3 του νερού και προστίθεται στον αναδευτήρα και πραγματοποιείται ανάδευση για 3 λεπτά. Πρέπει να σημειωθεί ότι η διαβροχή των κόκκων διογκωμένης πολυστερίνης με το μέρος του νερού και του συνδετικού παράγοντα είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση του κατάλληλου δεσμού με τα υπόλοιπα υλικά. Επιπλέον η ζώνη διεπαφής μεταξύ του συνδετικού τσιμεντοπολτού και των κόκκων διογκωμένης πολυστερίνης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος. Έπειτα στον αναδευτήρα προστίθενται τα υλικά τσιμεντοποίησης. Ακολουθεί η προσθήκη του παράγοντα αφρισμού ή του αερακτικού στο υπόλοιπο νερό και γίνεται σχολαστική ανάμιξη για 1 λεπτό. Με το πέρας του 1 λεπτού ανάμιξης, με αργό ρυθμό γίνεται προσθήκη των υλικών στον αναδευτήρα και πραγματοποιείται ανάδευση 2 λεπτών. Στη συνέχεια τοποθετείται στον αναδευτήρα ο υπερρευστοποιητής και γίνεται ανάδευση διάρκειας 1.5 λεπτών. Τέλος γίνεται έλεγχος καθίζησης και αν είναι ικανοποιητικά τα αποτελέσματα το σκυρόδεμα είναι έτοιμο για τοποθέτηση στα καλούπια.

Στη συγκεκριμένη εργασία οι τιμές της πυκνότητας του υγρού μείγματος και της δοκιμής κάθισης λήφθηκαν κατευθείαν μετά τη διαδικασία ανάδευσης. Επίσης τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε ατσάλινα καλούπια τα οποία παρέμειναν σε θερμοκρασία δωματίου για 24 ώρες για να γίνει σκλήρυνση πριν την αφαίρεση τους από τα καλούπια. Με την αφαίρεση των δοκιμών από τα καλούπια ακολούθησε άμεση τοποθέτηση σε νερό κορεσμένο σε ασβέστη μέχρι την μέρα των δοκιμών. Για τη μέτρηση της θλιπτικής αντοχής του σκληρυμένου ελαφροσκυροδέματος που περιέχει κόκκους διογκωμένης πολυστερίνης χρησιμοποιήθηκαν κυβικά δοκίμια διαστάσεων 15 x 15 x 15 cm ηλικίας 1, 7 και 28 ημερών.

Στον Πίνακα 2.6 παρουσιάζονται οι θλιπτικές αντοχές στις 1, 7 και 28 ημέρες των μιγμάτων καθώς και πυκνότητα του κάθε φρέσκου μείγματος.

Πίνακας 2.6: Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών(Moutassem, 2020)

Mix #	Slump (mm)	Air (%)	Fresh Density (kg/m ³)	Hardened Density (kg/m ³)	$f'_{c_{1d}}$ (MPa)	$f'_{c_{28}}$ (MPa)	$f'_{c_{90d}}$ (MPa)
1	70	-	978	996	4.32	7.05	7.79
2	40	0	788	794	2.09	3.45	5.10
3	150	11	764	759	1.93	3.53	3.99
4	120	15	622	629	1.17	2.73	3.16
5	140	11	669	646	1.64	2.35	3.45
6	160	16	631	634	1.09	1.81	2.57
7	130	13	679	691	1.52	3.05	3.78
8	140	21	490	458	0.64	1.22	1.45
9	145	16	541	533	0.96	1.72	2.10
10	175	14	604	576	0.79	1.45	2.63
11	165	25	503	478	0.88	1.71	1.65
12	140	20	527	554	1.24	2.21	2.83
13	140	20	560	480	0.94	1.83	2.16
14	155	19	547	585	1.25	2.20	2.72
15	160	17	551	521	1.12	1.93	2.08
16	135	14	644	561	0.97	2.03	2.72
17	145	15	604	555	1.03	1.87	2.32
18	120	17	588	605	1.22	2.22	2.86
19	130	13	669	595	1.40	2.73	2.82
20	120	15	625	538	1.27	2.13	2.40
21	120	11	661	706	1.46	2.77	3.51
22	125	18	574	568	1.08	2.02	2.55
23	130	10	706	691	1.77	2.76	3.31
24	130	9	697	680	1.67	2.73	3.18
25	125	17	580	608	1.00	2.54	2.57
26	130	15	587	533	0.87	2.50	2.35
27	145	20	509	509	1.07	1.62	2.31
28	140	20	573	500	0.66	1.95	1.87
29	140	18	528	478	0.52	1.32	1.75
30	140	22	544	473	0.53	1.53	1.91

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.6 η μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή είναι ίση με 7.79 MPa ενώ η μικρότερη είναι 1.45 MPa. Το πρώτο θεμελιώδες μοντέλο που προτείνεται από το μελετητή της εργασίας για τη πρόβλεψη της θλιπτικής αντοχής δίνεται από την εξίσωση $f_c = A * (B)^{(w+a+eps)/cm}$ όπου οι όροι w, a, eps και cm είναι τα κλάσματα όγκου του νερού, αέρα, κόκκων διογκωμένης πολυστερίνης και των υλικών τσιμεντοποίησης στο μείγμα σκυροδέματος. Οι όροι A και B είναι σταθερές βαθμονόμησης. Η σταθερά βαθμονόμησης A εξαρτάται από τον τύπο και την αντοχή του τσιμέντου και έχει μονάδα

μέτρησης σε MPa. Η σταθερά βαθμονόμησης B είναι αδιάστατος όρος και εξαρτάται από το σχήμα των δοκιμίων και τις συνθήκες της δοκιμής. Οι τιμές των σταθερών A και B παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.7. Οι τιμές των A και B καθορίστηκαν από την ελαχιστοποίηση του τυπικού σφάλματος μεταξύ των προβλέψεων του μοντέλου και των μετρούμενων πειραματικών τιμών.

Πίνακας 2.7: Τιμές σταθερών A και B (Moutassem, 2020)

Model	A	B	σ	R^2
Compressive Strength (Function of Mixture)	25.8	0.69	0.30	0.93
Compressive Strength (Function of Density)	0.55	14.6	0.25	0.96

Σύμφωνα με έρευνες που έχουν διεξαχθεί στο παρελθόν έχει αποδειχθεί ότι η θλιπτική αντοχή ενός υπερελαφρού σκυροδέματος εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την πυκνότητα του σκυροδέματος. Συνεπώς στα πλαίσια της εργασίας ερευνήθηκε η σχέση μεταξύ της πυκνότητας και της θλιπτικής αντοχής. Το προτεινόμενο μοντέλο πρόβλεψης της θλιπτικής αντοχής ελαφροσκυροδέματος που περιέχει κόκκους διογκωμένης πολυστερίνης σαν συνάρτηση της πυκνότητας του σκληρυμένου μείγματος δίνεται από την εξίσωση $f_c = A * B^{\rho/1000}$.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών παρατηρείται ότι το συγκεκριμένο σκυρόδεμα αναπτύσσει θλιπτική αντοχή 1 μέρας ίση με το 48% αυτής των 28 ημερών, και θλιπτική αντοχή 7 ημερών ίση με το 83% αυτής των 28 ημερών. Από τις συγκεκριμένες παρατηρήσεις προκύπτει ότι το ελαφροσκυρόδεμα με κόκκους διογκωμένης πολυστερίνης έχει υψηλότερο ρυθμό ανάπτυξης της θλιπτικής αντοχής από αυτόν ενός τυπικού σκυροδέματος (Moutassem, 2020).

Μέχρι τώρα οι έρευνες που έχουν αναφερθεί αφορούν ένα μεγάλο εύρος ελαφροσκυροδεμάτων που ερευνούν κυρίως τις ιδιότητες των σκυροδεμάτων που έχουν κατασκευαστεί με μερική ή πλήρη αντικατάσταση των αδρανών με κόκκους διογκωμένης πολυστερίνης. Πέρα από την αντικατάσταση των αδρανών όμως μπορεί να κατασκευαστεί και σκυρόδεμα που αξιοποιεί τους κόκκους διογκωμένης σαν πρόσθετο υλικό και όχι σαν υλικό αντικατάστασης των αδρανών. Μια εργασία που ερευνά τις ιδιότητες ενός τέτοιου σκυροδέματος είναι αυτή των Adeala A. και Soyemi O. Στόχος της εργασίας τους ήταν η

έρευνα της επίδρασης που έχει η προσθήκη ανακυκλωμένης διογκωμένης πολυστερίνης σε ένα μείγμα σκυροδέματος (Adeala & Soyemi, 2020). Στα πλαίσια της έρευνας τους η εξασφάλιση των κόκκων διογκωμένης πολυστερίνης έγινε από τη συγκέντρωση των απορριμμάτων διογκωμένης πολυστερίνης που είχε χρησιμοποιηθεί σαν υλικό συσκευασίας. Η διάσταση των κόκκων διογκωμένης πολυστερίνης μειώθηκε χρησιμοποιώντας έναν μύλο σφυριού. Ο λόγος για τη διαδικασία αυτή ήταν για την αύξηση της επιφάνειας αυξάνοντας έτσι το ρυθμό αντίδρασης με το σκυρόδεμα. Στον Πίνακα 2.8 φαίνεται η αναλογία υλικών κάθε μείγματος.

Πίνακας 2.8: Ποσότητα υλικών σε kg σε κάθε μείγμα (Adeala & Soyemi, 2020)

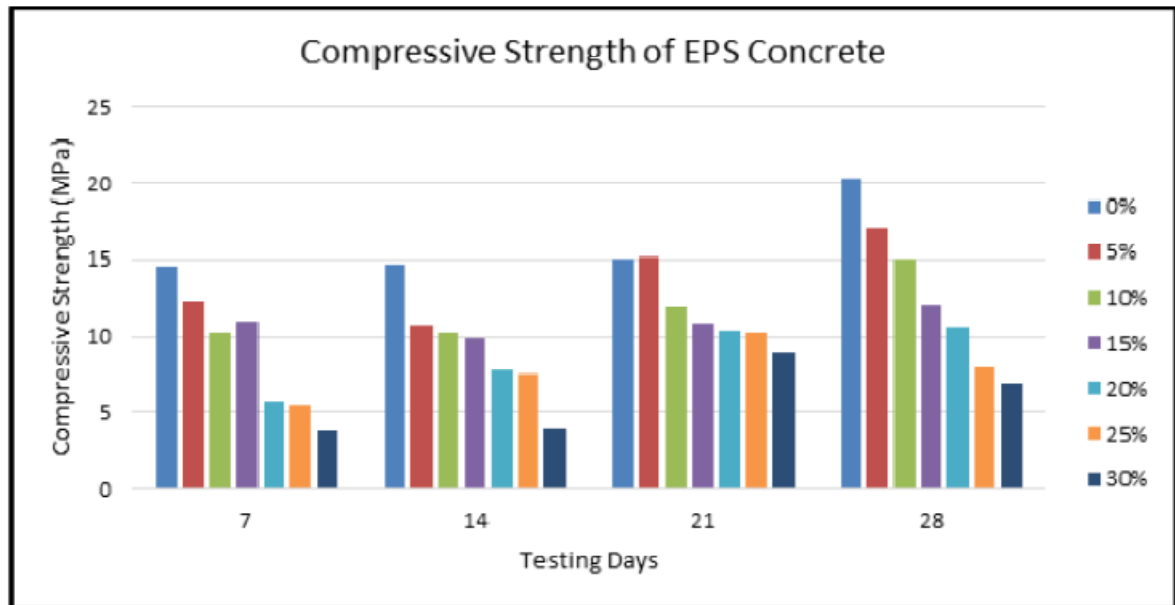
	Mix (%)						
	0	5	10	15	20	25	30
Cement	15	15	15	15	15	15	15
FA	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85
C.A	47.10	47.10	47.10	47.10	47.10	47.10	47.10
EPS	0.000	0.015	0.030	0.045	0.060	0.075	0.090
Water	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7

Οι πειραματικές δοκιμές για τον υπολογισμό της θλιπτικής, εφελκυστικής και διατμητικής αντοχής πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας κυβικά δοκίμια διαστάσεων 10 x 10 x 10 cm. Στον Πίνακα 2.9 φαίνονται οι μέσοι όροι θλιπτικής αντοχής του κάθε μείγματος.

Πίνακας 2.9: Μέσοι όροι θλιπτικής αντοχής (Adeala & Soyemi, 2020)

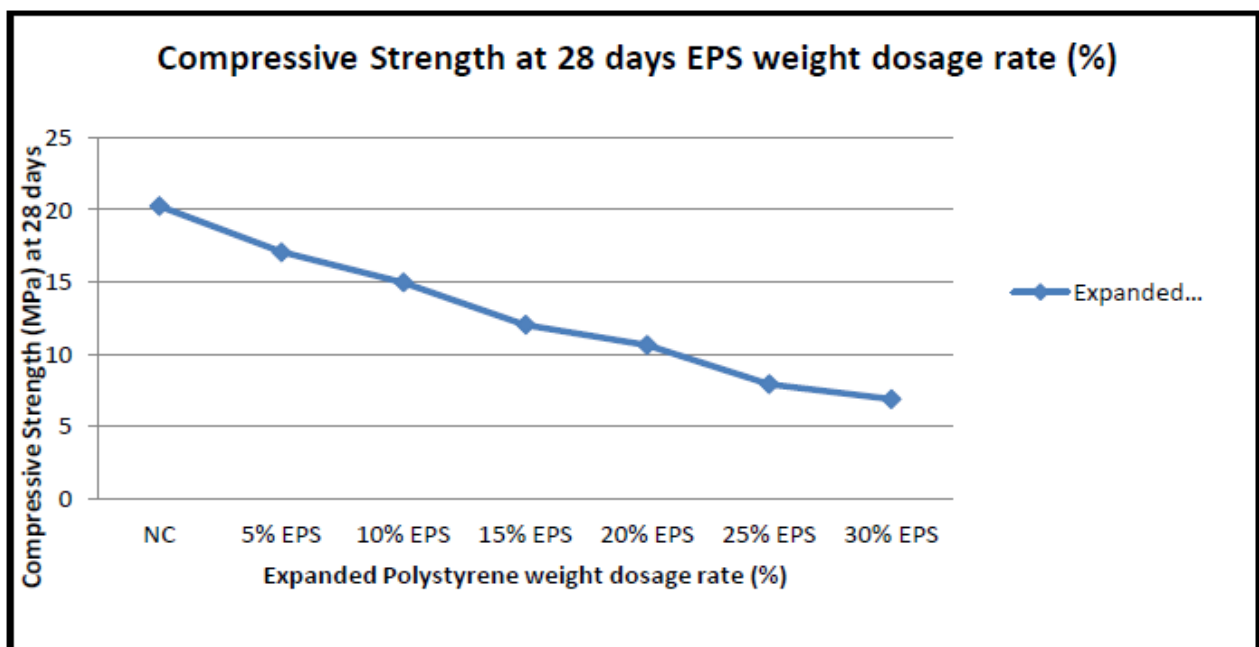
Days	0%	5% EPS	10% EPS	15% EPS	20% EPS	25% EPS	30% EPS
7	14.55	12.30	10.30	10.97	5.69	5.49	3.80
14	14.71	10.71	10.22	9.90	7.73	7.47	3.90
21	15.67	15.12	11.90	10.89	10.33	10.23	8.93
28	20.25	17.07	14.97	12.03	10.64	7.93	6.89

Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζονται οι μέσοι όροι θλιπτικής αντοχής του κάθε μείγματος για δοκίμια ηλικίας 7, 14, 21 και 28 ημερών.



Σχήμα 2.4: Μέσος όρος θλιπτικών αντοχών (Adeala & Soyemi, 2020)

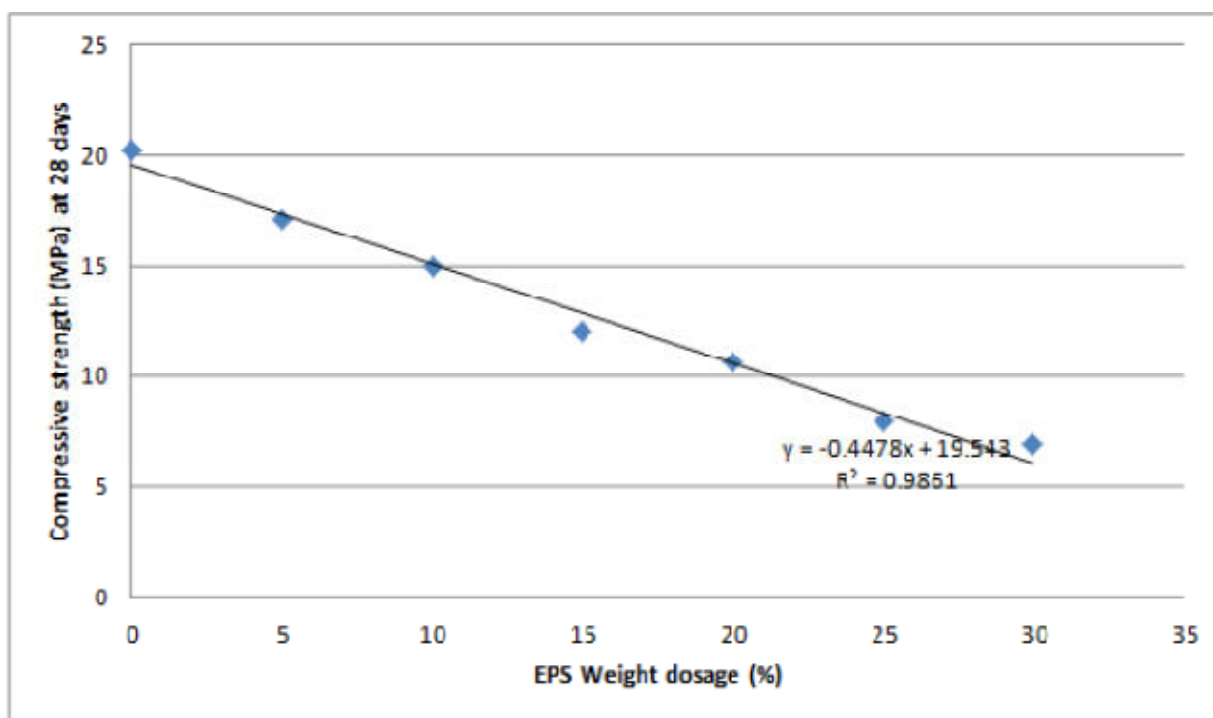
Στο Σχήμα 2.5 φαίνεται η θλιπτική αντοχή των 28 ημερών για κάθε μείγμα σκυροδέματος. Παρατηρείται ότι η αύξηση του ποσοστού κόκκων αφρώδους διογκωμένης πολυστερίνης έχει ως αποτέλεσμα την άμεση μείωση της θλιπτικής αντοχής.



Σχήμα 2.5: Θλιπτικές αντοχές 28 ημερών (Adeala & Soyemi, 2020)

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 2.5 το μείγμα σκυροδέματος που περιέχει 5 % κόκκους διογκωμένης πολυστερίνης έχει τη μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή 28 ημερών από όλα τα

σκυροδέματα που περιέχουν κόκκους διογκωμένης πολυστερίνης ίση με 17.07 MPa η οποία είναι μόλις 3.18 MPa (15.7%) μικρότερη από αυτή του κανονικού σκυροδέματος, δηλαδή αυτού που δεν περιέχει καθόλου διογκωμένη πολυστερίνη. Πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων της θλιπτικής αντοχής για τον καθορισμό της σχέσης μεταξύ της περιεκτικότητας σε κόκκους διογκωμένης πολυστερίνης και τη θλιπτική αντοχή. Από την ανάλυση αυτή προέκυψε μια γραμμική εξίσωση που περιγράφει αυτή τη σχέση, η εξίσωση αυτή είναι $y = -0.4476x + 19.543$ όπου y είναι η θλιπτική αντοχή σε MPa και x είναι η περιεκτικότητα σε κόκκους διογκωμένης πολυστερίνης %. Στο Σχήμα 2.6 φαίνεται η γραφική παράσταση της εξίσωσης αυτής. Όπως φαίνεται υπάρχει ένας μεγάλος συσχετισμός της θλιπτικής αντοχής και της περιεκτικότητας σε κόκκους διογκωμένης πολυστερίνης.



Σχήμα 2.6: Γραφική παράσταση εξίσωσης $y = -0.4476x + 19.543$ (Adeala & Soyemi, 2020)

Μια έρευνα πάνω στην επιρροή που έχει η αναλογία του όγκου τσιμέντου ως προς τον όγκο κόκκων διογκωμένης πολυστερίνης στην θλιπτική αντοχή και την πυκνότητα του σκυροδέματος πραγματοποίησαν οι Demirboga R. και Kan A. (2007). Στα πλαίσια της έρευνας τους χρησιμοποίησαν εμπορικά διαθέσιμους κόκκους διογκωμένης πολυστερίνης με μέγιστη διάμετρο 8 mm και χύδην πυκνότητα 10-20 kg/m³. Επιπλέον έγινε χρήση ενός

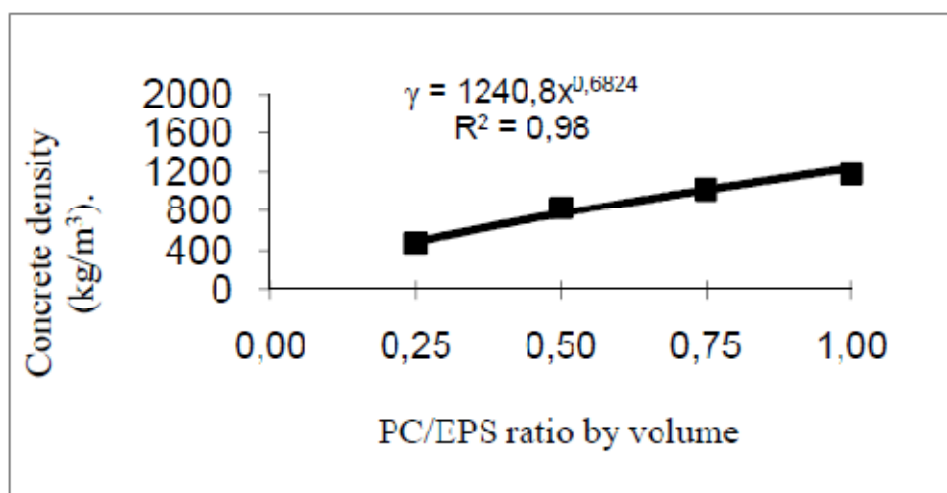
υπερπλαστικοποιητή πολυκαρβοξυλικής βάσης. Κατασκευάστηκαν μείγματα με αναλογία τσιμέντου προς κόκκους διογκωμένης πολυστερίνης κατά όγκο 1:0, 1:4, 1:2, 3:4 και 1:1. Στον Πίνακα 2.10 παρουσιάζονται οι αναλογίες του κάθε μείγματος αναλυτικά.

Πίνακας 2.10: Αναλογίες υλικών του κάθε μείγματος (Demirboga & Kan, 2007)

Mix Type	Cement Weight (kg)	Cement volume (m ³)	EPS beads volume (m ³)	PC/EPS (by volume)	water + % 0.3 SP** (l/m ³)	w/c ratio
1	39	0.0125	0.05	1/4	15	0.39
2	79	0.0250	0.05	1/2	28	0.35
3	118	0.0375	0.05	3/4	40	0.34
4	158	0.0500	0.05	1/1	49	0.31
5*	39	0.0125	-	-	15	0.39

*Control sample, ** super plasticizer

Σύμφωνα με τους ερευνητές η διαβροχή των κόκκων διογκωμένης πολυστερίνης με ένα μέρος του νερού και του υπερπλαστικοποιητή πριν την προσθήκη των υπόλοιπων υλικών είναι απαραίτητη. Ο λόγος για αυτό είναι γιατί η ζώνη διεπαφής μεταξύ του τσιμεντοπολτού και των κόκκων διογκωμένης πολυστερίνης είναι υψίστης σημασίας για τον καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος. Τα μείγματα κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας έναν ηλεκτρικό επιτραπέζιο αναδευτήρα. Οι μετρήσεις πυκνότητας φρέσκου μείγματος και της δοκιμής κάθισης λήφθηκαν αμέσως μετά την ανάδευση. Για κάθε μείγμα κατασκευάστηκαν 3 δοκίμια διαστάσεων 5 x 5 x 5 cm τα οποία παρέμειναν για 2 μέρες κάτω από βρεγμένους σάκους λινάτσας. Μετά το πέρας των 2 ημερών τα δοκίμια αφαιρέθηκαν από τα καλούπια καλύφθηκαν πλήρως από νερό κορεσμένο σε ασβέστη μέχρι την ημέρα των δοκιμών. Σε ηλικία 28 ημερών τα δοκίμια ξηράθηκαν σε φούρνο σε θερμοκρασία 60 °C μέχρι την απόκτηση μιας σταθερής μάζας. η δοκιμή της θλιπτικής αντοχής πραγματοποιήθηκε στις 28 ημέρες με τη χρήση μιας μηχανής θλίψης ικανότητας 2000 kN με ρυθμό φόρτισης 2.5 kN/s. Κάθε δοκιμή πραγματοποιήθηκε 3 φορές και λήφθηκε ο μέσος όρος για τα αποτελέσματα. Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται η επιρροή της περιεκτικότητας του όγκου διογκωμένης πολυστερίνης στην πυκνότητα του σκυροδέματος.



Σχήμα 2.7: Διάγραμμα πυκνότητας σκυροδέματος προς την αναλογία τσιμέντου προς διογκωμένη πολυστερίνη (Demirboga & Kan, 2007)

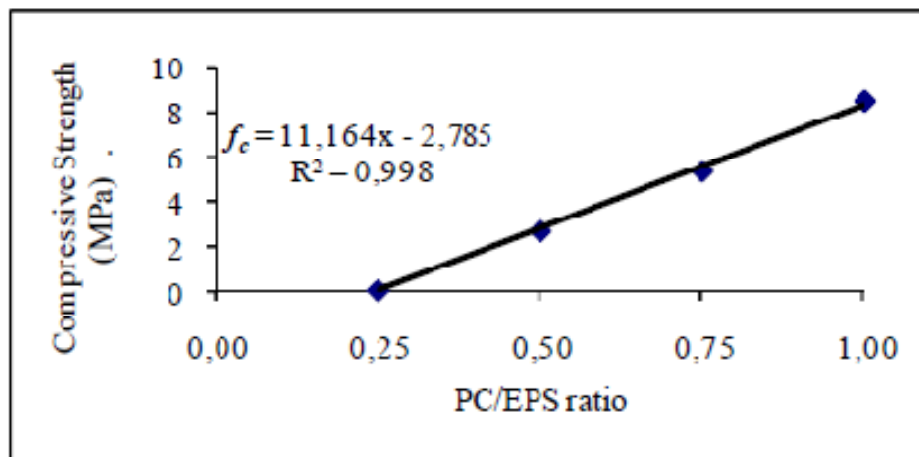
Παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση του λόγου τσιμέντου/ διογκωμένη πολυστερίνη η πυκνότητα του φρέσκου σκυροδέματος αυξήθηκε. Παρόμοια συμπεριφορά σημειώθηκε και στη σχέση της θλιπτικής αντοχής και του λόγου τσιμέντου/ διογκωμένη πολυστερίνη. Στον Πίνακα 2.11 παρουσιάζονται οι θλιπτικές αντοχές και οι πυκνότητες των μειγμάτων σκυροδέματος.

Πίνακας 2.11: Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης και πυκνότητας (Demirboga & Kan, 2007)

Mix type	Fresh concrete density (kg/m³)	Hardened concrete density (kg/m³)	Decreasing ratio of density compare with control sample (%)	28 days Compressive strength (MPa)	Decreasing ratio of compressive strength compare with control sample (%)
1	471	464	76	0.11	99.70
2	1059	832	57	2.74	92.80
3	1183	1024	47	5.39	86.00
4	1371	1192	39	8.53	77.84
5*	1952	1940	-	38.50	-

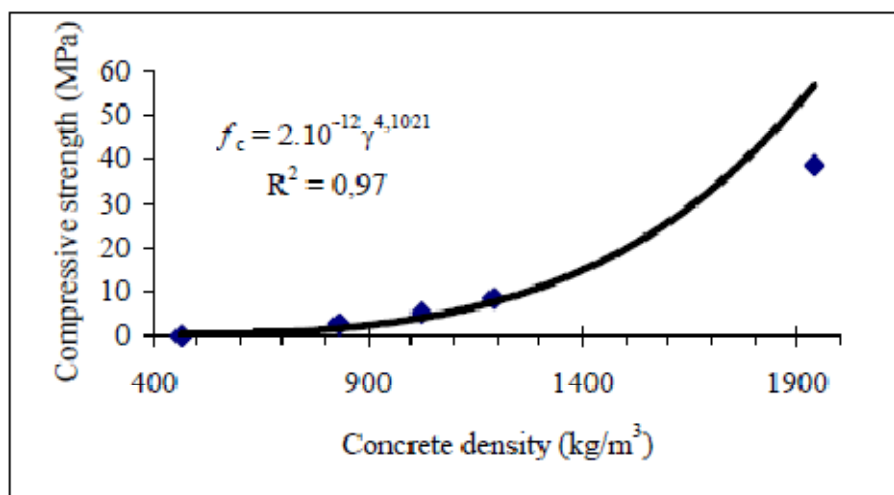
*Control sample

Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι όταν η αναλογία τσιμέντου ελατώθηκε από 1:1 σε 3:4, 1:2 και 1:4 η θλιπτική αντοχή ελατώθηκε κατά 77.84%, 86%, 92.80% και 99.70% αντίστοιχα. Σύμφωνα με τους ερευνητές αυτό το φαινόμενο μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η θλιπτική αντοχή ενός σκυροδέματος εξαρτάται κυρίως από την αντοχή των αδρανών και στην προκειμένη περίπτωση η θλιπτική αντοχή των κόκκων διογκωμένης πολυστερίνης είναι μηδαμινή. Στο Σχήμα 2.8 φαίνεται η επιρροή που έχει ο λόγος τσιμέντου προς τη διογκωμένη πολυστερίνη, στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.



Σχήμα 2.8: Διάγραμμα θλιπτικής αντοχής προς το λόγο τσιμέντου (Demirboga & Kan, 2007)

Επιπλέον στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ της πυκνότητας του σκληρυμένου σκυροδέματος και της θλιπτικής αντοχής του.



Σχήμα 2.9: Σχέση της πυκνότητας σκληρυμένου σκυροδέματος και της θλιπτικής αντοχής (Demirboga & Kan, 2007)

Όπως αναφέρθηκε από τους ερευνητές των προηγούμενων ερευνών η θλιπτική αντοχή των αδρανών επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό τη θλιπτική αντοχή του παραχθέντος σκυροδέματος. Για αυτό το λόγο πρέπει να γίνει διερεύνηση της συμπεριφοράς της διογκωμένης πολυστερίνης στο φαινόμενο ερπυσμού για να μπορεί να διερευνηθεί αν αυτή έχει επιρροή στη συμπεριφορά του σκυροδέματος στο φαινόμενο του ερπυσμού.

Κεφάλαιο 3. Σκοπός και Μεθοδολογία Πειραματικών Δοκιμών

Η χρήση του ελαφροσκυροδέματος σε μια κατασκευή αποτελεί μια βιώσιμη λύση αλλά για να μπορεί να εφαρμοστεί πρέπει να είμαστε σίγουροι για τις μηχανικές του ιδιότητες. Το ελαφροσκυρόδεμα που ερευνάται σε αυτή τη διπλωματική εργασία περιέχει ανακυκλωμένους κόκκους αφρώδους διογκωμένης πολυστερίνης. Το αντικείμενο της έρευνας αφορά στη φαινόμενη πυκνότητα του φρέσκου μείγματος, τη θλιπτική αντοχή, τη συμπίεστικότητα, τη συμπεριφορά στον ερπυσμό καθώς και την υδατοαπορροφητικότητα του σκληρυμένου ελαφροσκυροδέματος.

Σε κάθε έργο οι απαιτήσεις για μηχανικές ιδιότητες αλλάζουν αναλόγως τη χρήση για την οποία προορίζεται το ελαφροσκυρόδεμα. Οι χρήσεις του ελαφροσκυροδέματος στον κατασκευαστικό τομέα ποικίλουν από την θερμομόνωση οροφών, τη γενική μόνωση τοίχων αλλά και για την κάλυψη διάφορων αρχιτεκτονικών σκοπών και πολλές άλλες γενικές χρήσεις. Για αυτό το λόγο εξετάστηκαν τέσσερα διαφορετικά μείγματα ελαφροσκυροδέματος πυκνότητας 300, 400, 600 και 700 kg/m³ για τον έλεγχο των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων. Για τις δοκιμές που απαιτούνται για την εύρεση των αποτελεσμάτων κατασκευάστηκαν τα αντίστοιχα δοκίμια. Για την κατασκευή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρική μπετονιέρα και ξυλότυποι κατασκευασμένοι στο εργαστήριο. Για την διεξαγωγή των πειραμάτων παρήχθησαν δοκίμια διαστάσεων 20x20x7 cm, 20x20x10 cm και 50x50x7 cm, για κάθε διαφορετική φόρμουλα. Στον Πίνακα 3.1 αναφέρονται οι αναλογίες των υλικών για την κατασκευή του κάθε μείγματος.

Πίνακας 3.1: Αναλογίες μειγμάτων

Ονομασία Μείγματος	300	400	600	700
Πυκνότητα (kg/m ³)	300	400	600	700
Τσιμέντο kg	50	50	75	75
Άμμος Ποταμίσια (kg)	-	25	45	45
Νερό (lt)	25	25	30	40
EPS (lt)	200	200	200	200

Για την κατασκευή των δοκιμών τοποθετήθηκε στην μπετονιέρα η αντίστοιχη ποσότητα EPS μαζί με όλο τον όγκο του νερού και αναδεύτηκαν με διαλλείματα για 5'. Στη συνέχεια προστέθηκε η άμμος και εν τέλει σταδιακά το τσιμέντο. Εφόσον επιτεύχθηκε μια

ικανοποιητική ανάμιξη στη μπετονιέρα, το μείγμα τοποθετήθηκε στους ξυλότυπους, οι οποίοι είχαν λαδωθεί με μηχανέλαιο, όπου δονήθηκε με τη χρήση μιας σιδερένιας ράβδου ώστε να αφαιρεθεί ο αέρας και να μην σχηματιστούν κενά μέσα στα δοκίμια. Μετά από ένα διάστημα 4-7 ημερών τα δοκίμια αφαιρέθηκαν από τα καλούπια και διατηρήθηκαν σε θερμοκρασίες δωματίου για τουλάχιστον 28 ημέρες πριν τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Οι κόκκοι ανακυκλωμένης διογκωμένης πολυστερίνης διατηρήθηκαν σε σκιερό μέρος σε θερμοκρασίες δωματίου. Η άμμος που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή του ελαφροσκυροδέματος ήταν συλλεκτή συσκευασμένη σε τσουβάλια των 20 kg. Πριν από τη χρήση της άμμου στην ανάμιξη, η άμμος αφαιρέθηκε από τα τσουβάλια και τοποθετήθηκε σε μεγάλα ταψιά και έμεινε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μέχρι να εξατμιστεί η περίσσια υγρασία. Επιπρόσθετα για την αποφυγή της απότομης εξάτμισης της υγρασίας των δοκιμών, κατά το διάστημα των 4-7 ημερών που ήταν μέσα στους ξυλότυπους μέχρι να ξηρανθεί το μείγμα, τα δοκίμια ήταν σκεπασμένα με πλαστικά αδιαπερατά φύλλα.



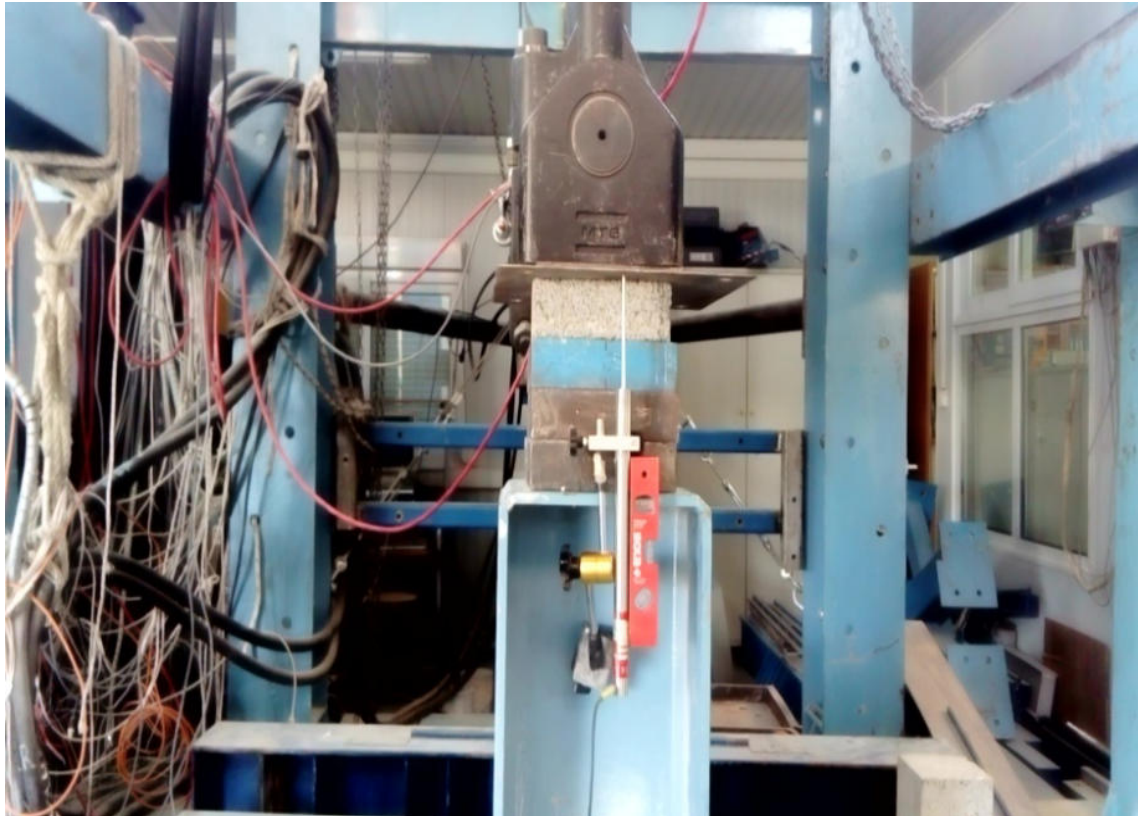
Εικόνα 3.1: Αναμεικτήρας που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των μειγμάτων

3.1 Φαινόμενη Πυκνότητα Φρέσκου Μείγματος

Οι πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν ξεκίνησαν με τις μετρήσεις της φαινόμενης πυκνότητας του φρέσκου μείγματος. Αρχικά κατά τη διαδικασία παραγωγής των δοκιμών πριν τοποθετηθεί το μείγμα στα καλούπια πάρθηκαν πέντε διαφορετικές μετρήσεις βάρους με τη χρήση του ίδιου πλαστικού δοχείου. Σε έναν πλαστικό κύλινδρο ύψους 30 εκατοστών και διαμέτρου 15 εκατοστών τοποθετήθηκαν 3 στρώσεις από το μείγμα του αναμεικτήρα και η κάθε στρώση χτυπήθηκε 15 φορές με μια ράβδο για να αφαιρεθεί ο αέρας μέχρι να γεμίσει πλήρως ο κύλινδρος. Στη συνέχεια ζυγίστηκε το βάρος του κυλίνδρου, η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε 5 φορές για κάθε μείγμα ώστε να προκύψει η φαινόμενη πυκνότητα του φρέσκου μείγματος. Για τον υπολογισμό της πυκνότητας χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση $D = (m_2 - m_1)/V$ όπου D είναι η πυκνότητα του φρέσκου μείγματος σε kg/m^3 , m_1 είναι η μάζα του πλαστικού δοχείου, m_2 είναι η μάζα του δοχείου μαζί με τη μάζα του μείγματος που περιέχεται μέσα σε αυτό σε kg και V είναι ο όγκος του δοχείου σε m^3 (EN12350, 1999).

3.2 Πείραμα Θλίψης

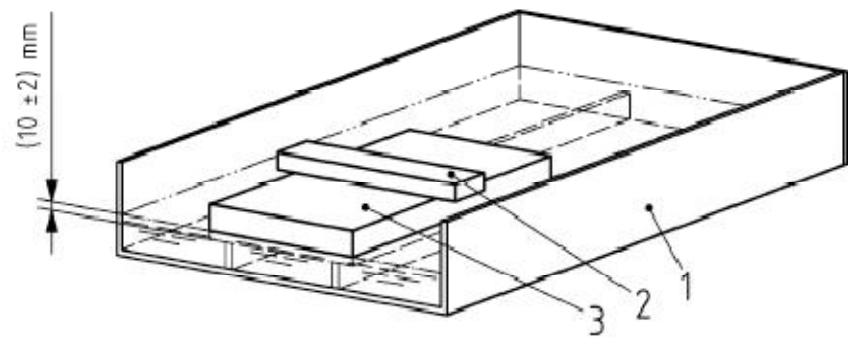
Για τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής του ελαφροσκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν 3 δοκίμια διαστάσεων $20 \times 20 \times 7$ cm. Αρχικά μετρήθηκαν οι διαστάσεις του κάθε δοκιμίου με τη χρήση χάρακα και ηλεκτρονικού παχύμετρου και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν διαδοχικά πάνω σε μια μεταλλική δοκό. Πάνω στο δοκίμιο τοποθετήθηκε ένα μεταλλικό έλασμα ώστε να γίνει πιο ομοιόμορφη κατανομή φορτίου, επίσης όμως για να παρθούν οι μετρήσεις από τα μυκηνσιόμετρα όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.2. Για την εφαρμογή του φορτίου χρησιμοποιήθηκε η πρέσσα του εργαστηρίου και για τη μέτρηση της παραμόρφωσης χρησιμοποιήθηκαν 2 ηλεκτρονικά μυκηνσιόμετρα. Το φορτίο επιβλήθηκε στο δοκίμιο από το έμβολο της πρέσσας με ρυθμό 0,7 mm ανά λεπτό. Ο ρυθμός φόρτισης καθορίστηκε από το πάχος των δοκιμών, καθώς είναι ίσος με το 10% πάχους των δοκιμών ανά λεπτό. Η διαδικασία φόρτισης διήρκεσε μέχρι την διαρροή του δοκιμίου ή μέχρι την επίτευξη παραμόρφωσης ίσης με 10% (EN826, 2013).



Εικόνα 3.2: Πειραματική διάταξη πειράματος θλίψης

3.3 Πείραμα Υδατοαπορροφητικότητας

Για το πείραμα της υδατοαπορροφητικότητας χρησιμοποιήθηκε δοκίμιο διαστάσεων 20x20x10 cm. Έγινε μέτρηση των διαστάσεων του δοκιμίου με χρήση χάρακα και ηλεκτρονικού παχύμετρου επιπλέον έγινε μέτρηση του βάρους του δοκιμίου με χρήση ηλεκτρονικής ζυγαριάς. Στη συνέχεια το δοκίμιο τοποθετήθηκε σε μια μεταλλική δεξαμενή όπου ακούμπησε πάνω σε πλαστικούς αποστάτες. Στη συνέχεια προστέθηκε νερό μέσα στη δεξαμενή μέχρι η στάθμη του νερού να καλύψει 1 cm του δοκιμίου. Το δοκίμιο παρέμεινε μέσα στο νερό για 24 ώρες, μετά το πέρας του 24ώρου το δοκίμιο αφαιρέθηκε από το νερό και τοποθετήθηκε υπό γωνία 45 μοιρών μέσα σε ένα δοχείο ώστε να στραγγίσει. Αφού στραγγίσει για δέκα λεπτά μετρήθηκε ξανά το βάρος του. Στην Εικόνα 3.2 φαίνεται ένα δοκίμιο μέσα στη μεταλλική δεξαμενή με το νερό καθώς και ένα μεταλλικό βαρίδιο το οποίο τοποθετήθηκε για να εξουδετερώσει οποιαδήποτε δύναμη άνωσης μπορεί να αναπτυχθεί (EN1609, 2013). Στην Εικόνα 3.3 φαίνεται ένα παράδειγμα πειραματικής διάταξης για τη διεξαγωγή του πειράματος υδατοαπορροφητικότητας.



Key

- 1 water tank
- 2 load to keep the test specimen in position
- 3 test specimen

Εικόνα 3.3: Παράδειγμα πειραματικής διάταξης μερικής βύθισης (EN1609, 2013)



Εικόνα 3.4: Δοκίμιο σε πειραματική δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας

Στην Εικόνα 3.5 φαίνεται ένα δοκίμιο μετά το πέρας των 24 ωρών και αφού έχει στραγγίσει για 10 λεπτά.



Εικόνα 3.5: Δοκίμιο μετά το πέρας της πειραματικής δοκιμής υδατοαπορροφητικότητας

3.4 Πείραμα Συμπιεστότητας

Για το πείραμα της συμπίεστότητας χρησιμοποιήθηκε για το κάθε μείγμα ένα δοκίμιο διαστάσεων 20x20x7 cm. Οι διαστάσεις του δοκιμίου μετρήθηκαν με τη χρήση χάρακα και ηλεκτρονικού παχύμετρου. Στη συνέχεια στο δοκίμιο εφαρμόστηκε ένα βάρος 8,150 kg, δηλαδή μια τάση των 2 kPa, για 2 λεπτά και αφαιρέθηκε ώστε να μετρηθεί το πάχος του δοκιμίου. Μετά τη μέτρηση του πάχους, στο δοκίμιο εφαρμόστηκε ένα φορτίο 203 kg, δηλαδή μια τάση των 50 kPa, για 2 λεπτά το οποίο αφαιρέθηκε και πραγματοποιήθηκε η μέτρηση του πάχους του δοκιμίου (EN12431, 2013). Τα φορτία εφαρμόστηκαν πάνω στο δοκίμιο με τη χρήση μεταλλικών βαριδιών. Στην Εικόνα 3.6 φαίνεται το δοκίμιο καθώς τοποθετείται το φορτίο με τη χρήση χειροκίνητου παλετοφόρου.



Εικόνα 3.6: Πειραματική διάταξη πειράματος συμπιεστότητας

3.5 Πείραμα Δεσμευμένης Πυκνότητας

Για την εύρεση της πυκνότητας του μείγματος αφού έχει περάσει το διάστημα των 28 ημερών χρησιμοποιήθηκε ένα δοκίμιο διαστάσεων 50x50x7 cm. Για τον υπολογισμό της πυκνότητας του μείγματος έγινε μέτρηση των γραμμικών διαστάσεων του δοκιμίου με χρήση χάρακα και ηλεκτρονικού παχύμετρου, οι μετρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του όγκου του δοκιμίου. Στη συνέχεια ζυγίστηκε το βάρος του δοκιμίου με χρήση ηλεκτρονικής ζυγαριάς (EN 1602, 2013). Στην Εικόνα 3.7 φαίνεται ένα δοκίμιο μείγματος 300 kg/m^3 πάνω στη ζυγαριά. Για τον υπολογισμό της πυκνότητας

χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση $\rho = m/V$ όπου ρ είναι η πυκνότητα σε kg/m^3 , m είναι η μάζα του δοκιμίου σε kg και V είναι ο όγκος του δοκιμίου σε m^3 .

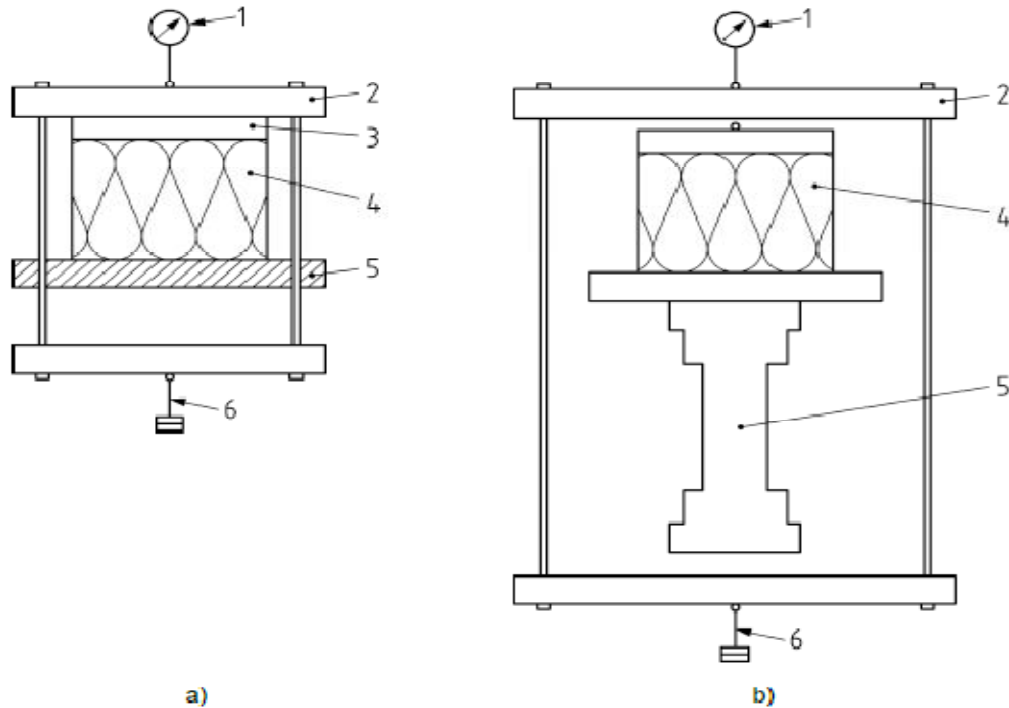


Εικόνα 3.7: Μέτρηση βάρους δοκιμίου

3.6 Πείραμα Ερπυσμού

Η διεξαγωγή του πειράματος του ερπυσμού διήρκησε 90 ημέρες και πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις οδηγίες του Ευρωπαϊκού Προτύπου (EN1606, 2013). Τα πειράματα ερπυσμού διεξήχθησαν τελευταία διότι ήταν αναγκαίο να υπολογιστεί το φορτίο φόρτισης. Ποιο συγκεκριμένα το φορτίο που εφαρμόστηκε στα δοκίμια διαστάσεων $20 \times 20 \times 7 \text{ cm}$ ήταν το 15% της θλιπτικής αντοχής, όπως αυτή υπολογίστηκε από το πείραμα της θλίψης. Για το πείραμα του ερπυσμού δύο δοκίμια του κάθε μείγματος

τοποθετήθηκαν το ένα πάνω στο άλλο με ένα μεταλλικό έλασμα ανάμεσά τους. Τα δοκίμια στηρίχτηκαν πάνω σε μία μεταλλική δοκό. Στο δοκίμιο που βρίσκονταν στην επάνω θέση τοποθετήθηκε ένα μεταλλικό έλασμα και πάνω του το φορτίο που αντιστοιχούσε σε κάθε μείγμα. Για την μέτρηση των παραμορφώσεων χρησιμοποιήθηκαν 2 αναλογικά μυκηνσιόμετρα τα οποία συνδέθηκαν με τα μεταλλικά ελάσματα.

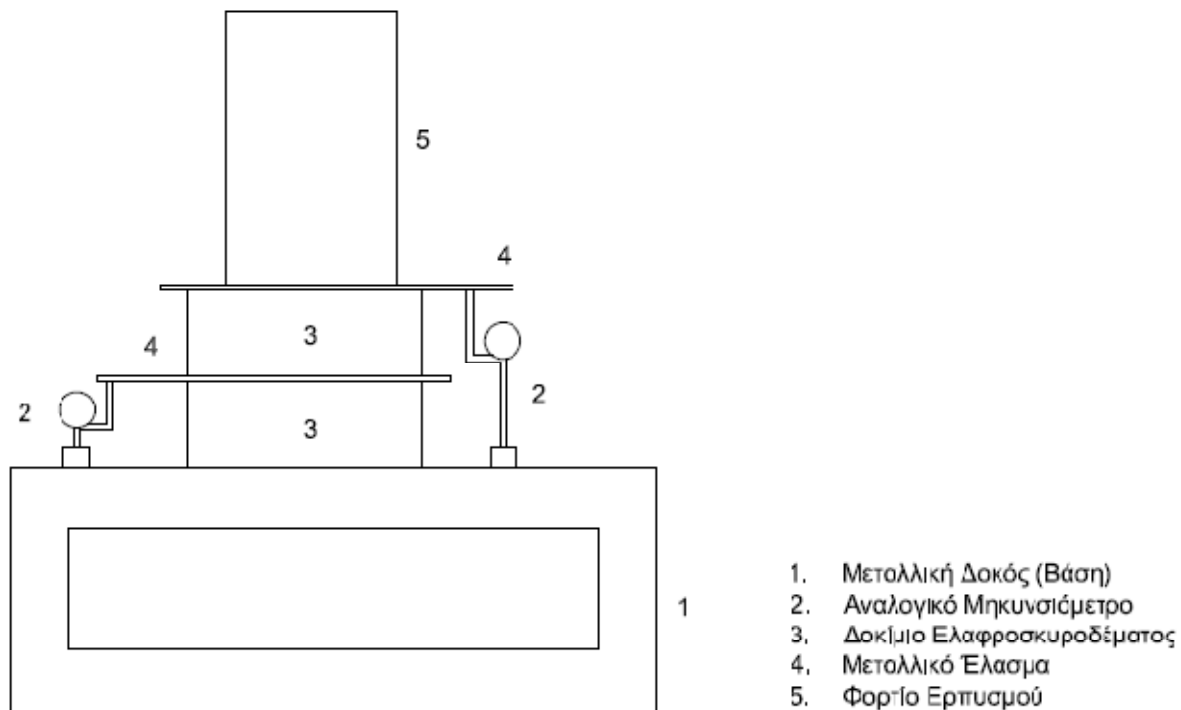


Key

- 1 displacement transducer or dial gauge
- 2 loading bridge
- 3 load distribution plate (movable, self-aligning)
- 4 test specimen
- 5 support beam
- 6 loading by weights

Εικόνα 3.8: Παραδείγματα πειραματικής διάταξης πειράματος ερπυσμού (EN 1606, 2013)

Στην Εικόνα 3.8 εμφανίζονται 2 παραδείγματα πειραματικής διάταξης για τη διεξαγωγή του πειράματος ερπυσμού ενώ στην Εικόνα 3.9 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.



Εικόνα 3.9: Διάταξη πειραματικής δοκιμής ερπυσμού

3.7 Πείραμα Κοκκομετρικής Διαβάθμισης

Η πειραματική δοκιμή της κοκκομετρικής διαβάθμισης διεξήχθη με τη χρήση ηλεκτρικής μηχανής δόνησης κοσκίνων. Στον δονητή τοποθετήθηκαν τα κόσκινα διαμέτρου 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0.5 mm, 0.25 mm, 0.125 mm, και 0.0063 mm. Αρχικά κάθε κόσκινο ζυγίστηκε σε ηλεκτρική ζυγαριά και στη συνέχεια τοποθετήθηκε στην μηχανή ανάδευσης. Έπειτα ζυγίστηκε το βάρος του όγκου 5.3 l κόκκων διογκωμένης πολυστερίνης με τη χρήση ηλεκτρονικής ζυγαριάς. Ο όγκος αυτός των κόκκων διογκωμένης πολυστερίνης προστέθηκε στη στήλη κοσκίνων και στη συνέχεια η μηχανή ενεργοποιήθηκε για 5 λεπτά ώστε να επιβεβαιωθεί η ικανοποιητική δόνηση των κοσκίνων. Με την απενεργοποίηση της μηχανής έγινε αφαίρεση του κάθε κόσκινου από τη στήλη και ακολούθησε το ζύγισμα του βάρους του καθενός με την ποσότητα της διογκωμένης πολυστερίνης που είχε συγκρατήσει (EN 933, 2012).

Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφέρονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των πειραμάτων τα οποία διεξήχθησαν όπως αναλυτικά περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 3.

4.1 Αποτελέσματα πειράματος φαινόμενης πυκνότητας

Όπως εξηγήθηκε στο κεφαλαίο 3.1 κατά τη διαδικασία της παραγωγής των δοκιμών λήφθηκαν μετρήσεις ώστε να διευκρινιστεί η φαινόμενη πυκνότητα του κάθε μείγματος. Η πειραματική δοκιμή της φαινόμενης πυκνότητας ακολούθησε το Ευρωπαϊκό Πρότυπο (EN12350, 2000). Στον Πίνακα 4.1 παρατίθενται οι τιμές των πυκνοτήτων του κάθε μείγματος.

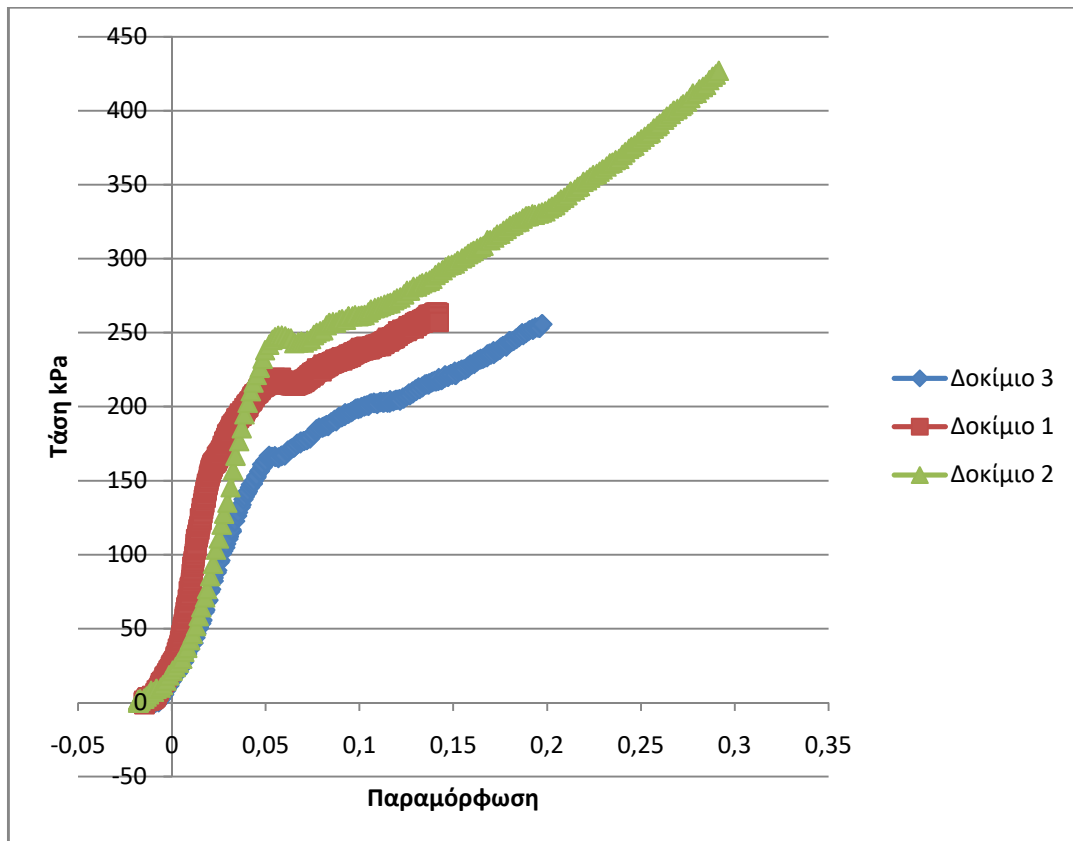
Πίνακας 4.1: Φαινόμενες πυκνότητες των μειγμάτων

Μείγμα	Βάρος kg	Όγκος lt	Πυκνότητα kg/m ³
300	1,631	5,3	419,81
400	2,768	5,3	522,32
600	3,509	5,3	662,07
700	4,386	5,3	827,54

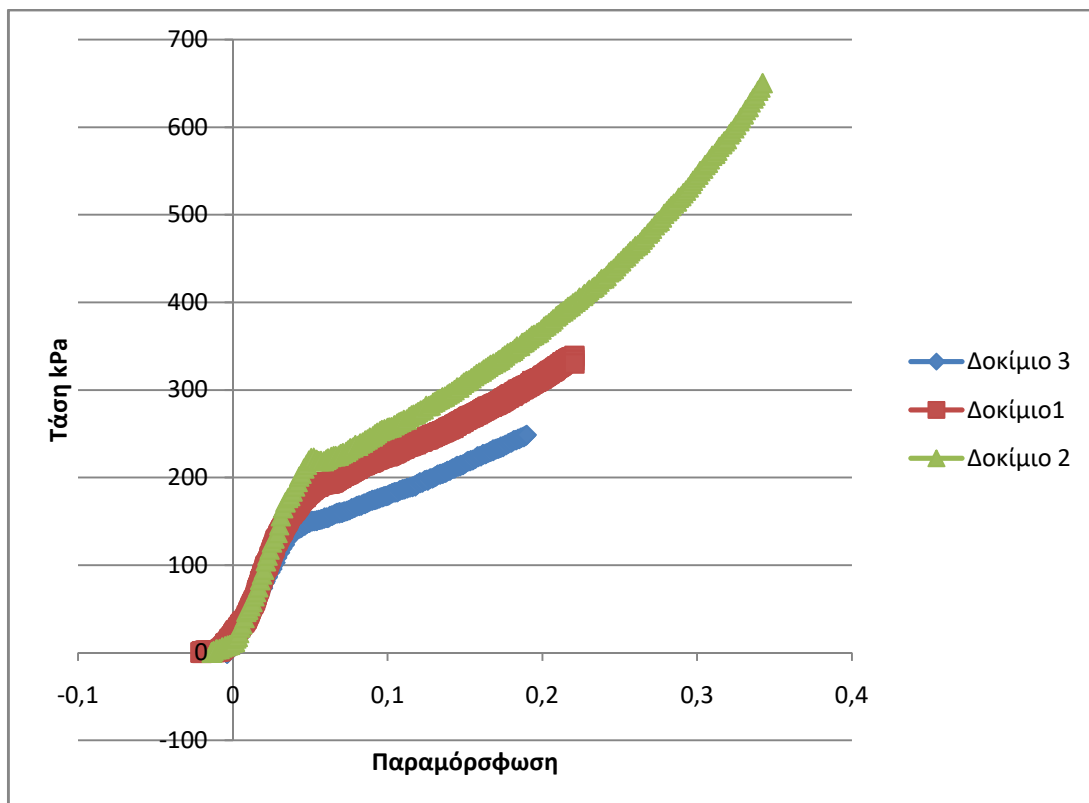
Από τα αποτελέσματα φαίνεται πως η πυκνότητα του φρέσκου μίγματος είναι αρκετά μεγαλύτερη από την ονομαστική πυκνότητα της φόρμουλας που χρησιμοποιήθηκε.

4.2 Αποτελέσματα πειράματος θλίψης

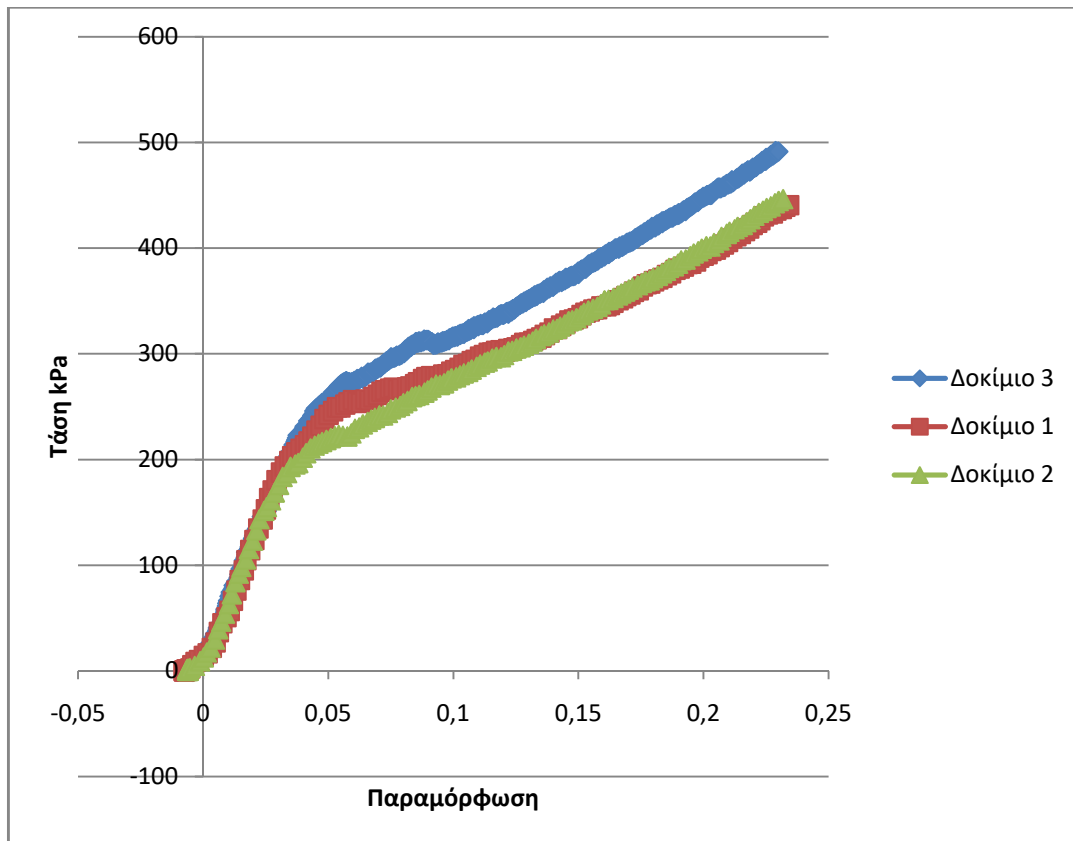
Το πείραμα της θλίψης ακολούθησε το Ευρωπαϊκό Πρότυπο (EN826, 2013). Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.2 για κάθε μείγμα χρησιμοποιήθηκαν 3 δοκίμια, η αντοχή κάθε μείγματος προέκυψε από το μέσο όρο των τριών δοκιμών. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα παραμόρφωσης-τάσεως των τριών δοκιμών του κάθε μείγματος.



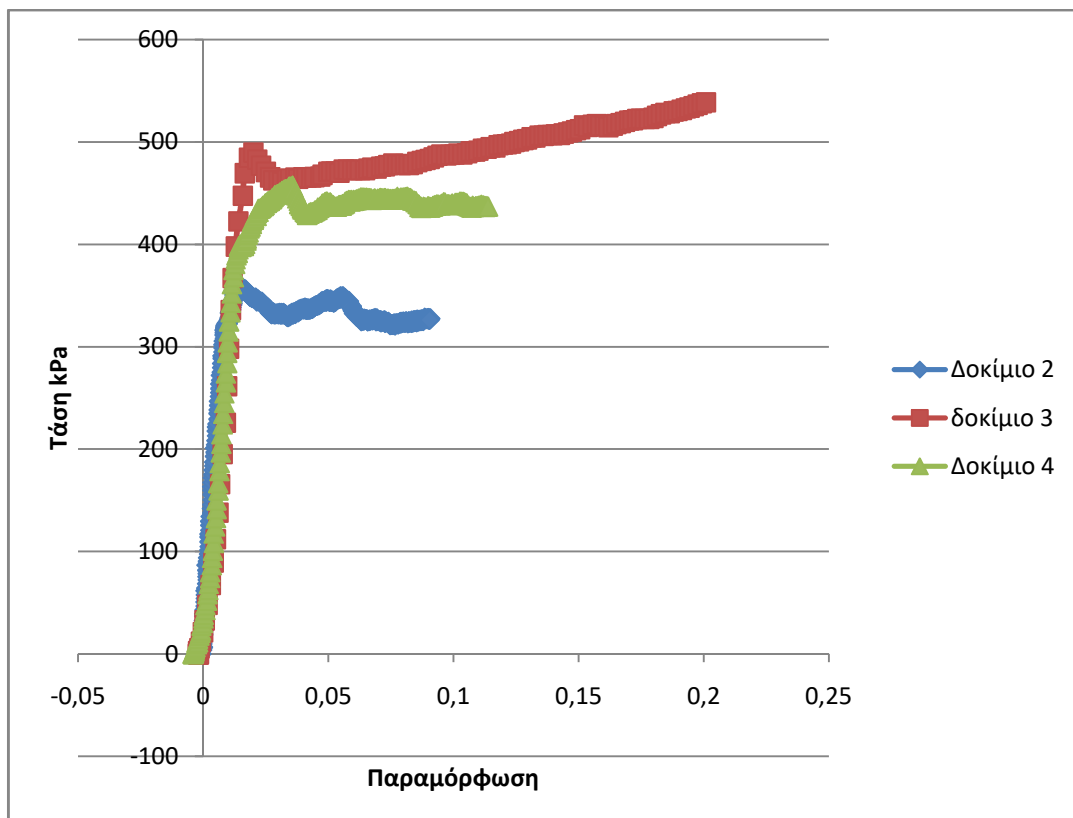
Σχήμα 4.1: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης μείγματος 300kg/m³



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης μείγματος 400kg/m³



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης μείγματος 600 kg/m³



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης μείγματος 700 kg/m³

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα Πειράματος θλίψης

Μείγμα	Μέσος Όρος θλιπτικής αντοχής kN	Μέσος όρος θλιπτικής αντοχής kPa	Μέσος όρος μέτρου Ελαστικότητας kPa
300	8,36	209,08	5448,76
400	8,34	208,48	4326,73
600	11,13	278,42	5940,86
700	16,63	415,80	32683,58

Από τα Σχήματα 4.1 έως 4.5 φαίνεται ότι υπάρχουν κάποιες μικρές αποκλίσεις από δοκίμιο σε δοκίμιο όσον αφορά στις τιμές των μέγιστων τάσεων αλλά παρατηρείται μια ομοιομορφία όσον αφορά στη συμπεριφορά των δοκιμίων, δηλαδή εμφανίζονται παρόμοιες κλίσεις και οι καμπύλες έχουν μια σχετικά ίδια μορφή.

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 4.2 η αντοχή του μείγματος των 300 kg/m³ δεν διαφέρει από αυτή των 400 kg/m³. Επίσης παρατηρείται μια συσχέτιση της αύξησης της αντοχής με την αύξηση της πυκνότητας, καθώς η αντοχή των 700 kg/m³ είναι μεγαλύτερη των 600 kg/m³ και αυτή με τη σειρά της είναι μεγαλύτερη των 300 kg/m³. Άμα συγκρίνουμε τις θλιπτικές αντοχές των τεσσάρων διαφορετικών μειγμάτων με την αντοχή ενός τυπικού σκυροδέματος παρατηρούμε μεγάλες πτώσεις. Η θλιπτική αντοχή ενός τυπικού σκυροδέματος μπορεί να κυμανθεί από 20 έως 40 MPa ενώ οι αντοχές του ελαφροσκυροδέματος που προέκυψαν κυμαίνονται από 0,2 έως 0,4 MPa, δηλαδή το 1% του τυπικού σκυροδέματος. Επίσης οι αντοχές αυτές είναι μικρότερες και από αυτές που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2 καθώς στο συγκεκριμένο ελαφροσκυρόδεμα έγινε 100% αντικατάσταση των αδρανών με κόκκους διογκωμένης πολυστερίνης.

Στις Εικόνες 4.1 με 4.5 φαίνονται κάποια από τα δοκίμια που υποβλήθηκαν στη θλιπτική φόρτιση μετά την αστοχία τους.



Εικόνα 4.1: Δοκίμιο μετά το πέρας του πειράματος θλίψης μείγματος 700 kg/m^3



Εικόνα 4.2: Δοκίμιο μετά το πέρας του πειράματος θλίψης μείγματος 700 kg/m^3



Εικόνα 4.3: Δοκίμιο μετά το πέρας του πειράματος θλίψης μείγματος 600 kg/m³



Εικόνα 4.4: Δοκίμιο μετά το πέρας του πειράματος θλίψης μείγματος 400 kg/m³



Εικόνα 4.5: Δοκίμιο μετά το πέρας του πειράματος θλίψης μείγματος 300 kg/m³

Και στα τέσσερα μείγματα παρατηρείται η ίδια μορφή αστοχίας καθώς και η ίδια εξομάλυνση των επιφανειών λόγω του φορτίου θλίψης όπως φαίνεται και στις Εικόνες 4.1-4.5.

4.3 Αποτελέσματα πειράματος υδροαπορροφητικότητας

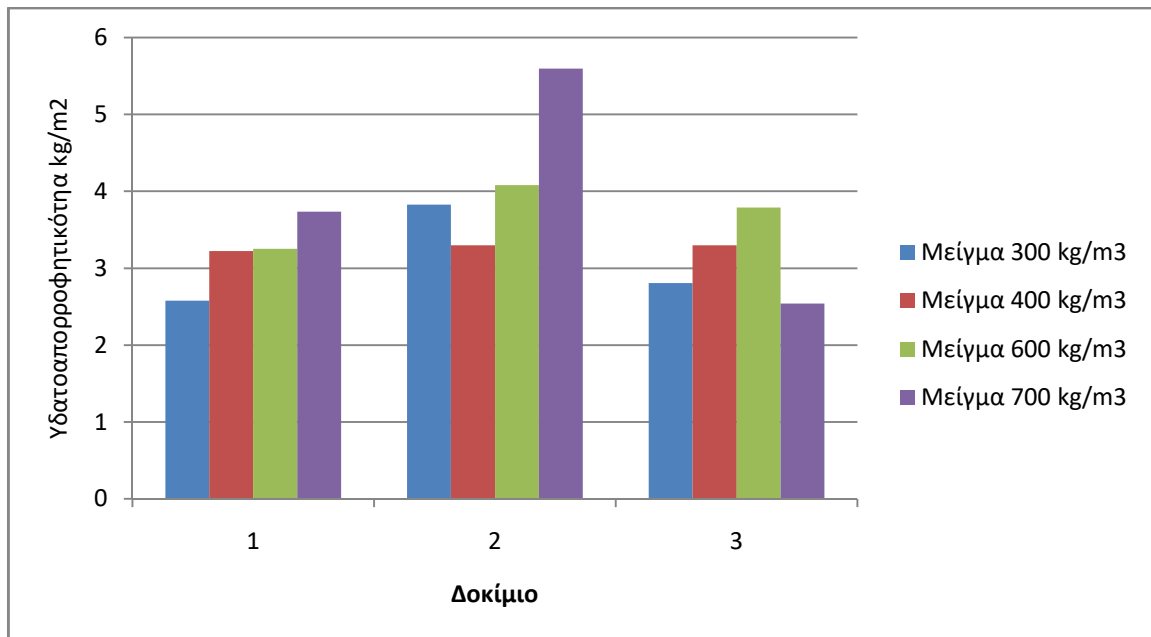
Το πείραμα της υδροαπορροφητικότητας ακολούθησε το Ευρωπαϊκό Πρότυπο (EN1609, 2013). Για την εύρεση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν τρία δοκίμια από κάθε μείγμα έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί ο μέσος όρος τους σαν το τελικό αποτέλεσμα. Στον Πίνακα 4.3 αναγράφεται ο μέσος όρος της απορροφητικότητας του κάθε μείγματος εκφρασμένης σε kg/m².

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα πειράματος υδατοαπορροφητικότητας

Μείγμα	Μέσος όρος υδροαπορροφητικότητας kg/m ²	Τυπική Απόκλιση σ
300	3,069	0,665
400	3,273	0,0452
600	3,706	0,421
700	3,957	1,541

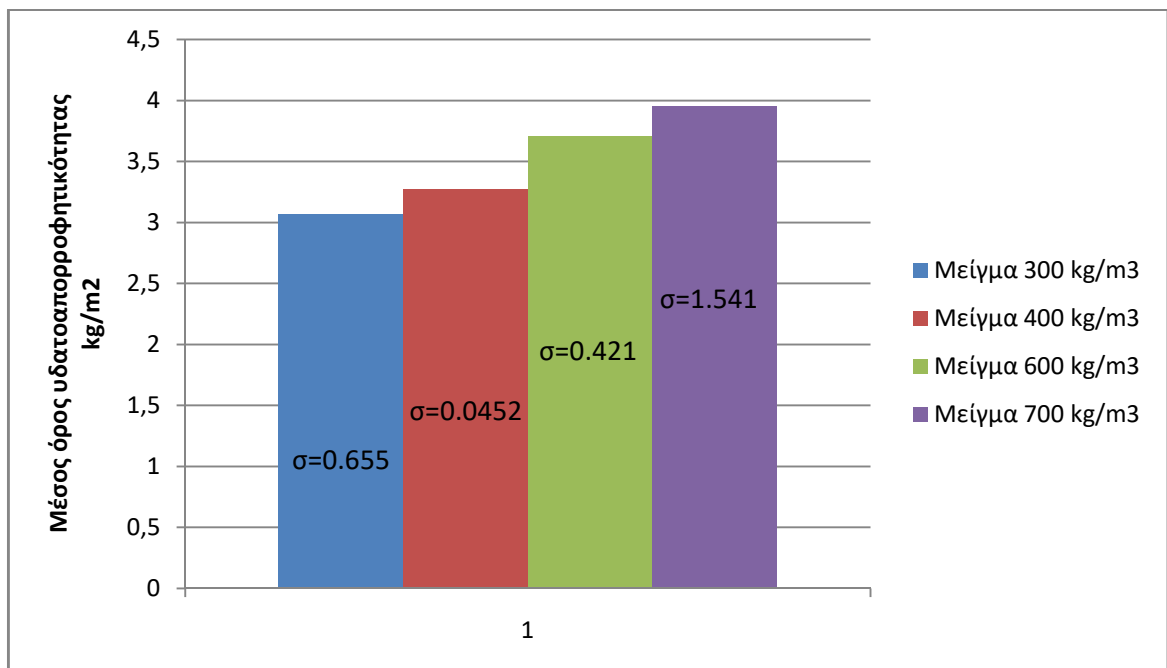
Από τα αποτελέσματα του πειράματος της υδατοαπορροφητικότητας όπως αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3 γίνεται εμφανές ότι με την αύξηση της πυκνότητας αυξάνεται η υδροαπορροφητικότητα του μείγματος. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι όσο πιο πυκνό είναι ένα μείγμα τόσο περισσότερο συνδετικό τσιμεντοπολτό

περιέχει στον ίδιο όγκο. Στον επιπρόσθετο αυτό τσιμεντοπολτό πιθανότατα να δημιουργούνται πόροι οι οποίοι με τη σειρά τους απορροφούν και συγκρατούν το νερό.



Σχήμα 4.5: Γράφημα Υδατοαπορροφητικότητας

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.5 τα δοκίμια των 700 kg/m³ παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη απόκλιση ενώ τα δοκίμια των 400 kg/m³ παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη συνέπεια στα αποτελέσματα τους.



Σχήμα 4.6: Γράφημα μέσων όρων υδατοαπορροφητικότητας

4.4 Αποτελέσματα πειράματος συμπιεστότητας

Το πείραμα της συμπιεστότητας πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις υποδείξεις του Ευρωπαϊκού Προτύπου (EN12431, 2013). Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται οι μετρήσεις του πάχους των δοκιμών μετά από φόρτιση 2 λεπτών με το φορτίο των 8,150 kg και μετά από φόρτιση 2 λεπτών με το φορτίο των 203 kg.

Πίνακας 4.4: Μετρήσεις πειράματος συμπιεστότητας

Μείγμα	Αρχικό πάχος δοκιμίου (mm)	Πάχος δοκιμίου μετά από 2' με φορτίο 8,15 kg (mm)	Πάχος δοκιμίου μετά από 2' με φορτίο 203 kg (mm)
300	69.72	69.43	69.18
400	73.28	73.27	73.15
600	70.60	70.60	70.44
700	71.28	71.15	70.99

Πρέπει να σημειωθεί ότι παρότι έγινε χρήση ηλεκτρονικού παχύμετρου και λήφθηκαν αρκετές μετρήσεις για τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια, η ιδιαίτερα ανώμαλη επιφάνεια των δοκιμών δυσκολεύει σε μεγάλο βαθμό την ακριβή και συνεπή μέτρηση των δοκιμών.

4.5 Αποτελέσματα Πειράματος Δεσμευμένης Πυκνότητας

Η διεξαγωγή της πειραματικής δοκιμής της δεσμευμένης πυκνότητας έγινε σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο (EN1602, 2013). Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζεται η δεσμευμένη πυκνότητα του κάθε μείγματος.

Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα πειράματος δεσμευμένης πυκνότητας

Μείγμα	Δεσμευμένη Πυκνότητα kg/m ³
300	367,71
400	477,43
600	623,45
700	748,69

Είναι εμφανές το γεγονός ότι η δεσμευμένη πυκνότητα είναι μικρότερη από αυτή του φρέσκου μείγματος, αυτό οφείλεται κυρίως στην υγρασία που χάνεται λόγω εξάτμισης. Επίσης παρατηρείται ότι η δεσμευμένη πυκνότητα είναι πιο κοντά στην ονομαστική του κάθε μείγματος αλλά πάλι δεν είναι ακριβώς ίδια. Το γεγονός αυτό μπορεί

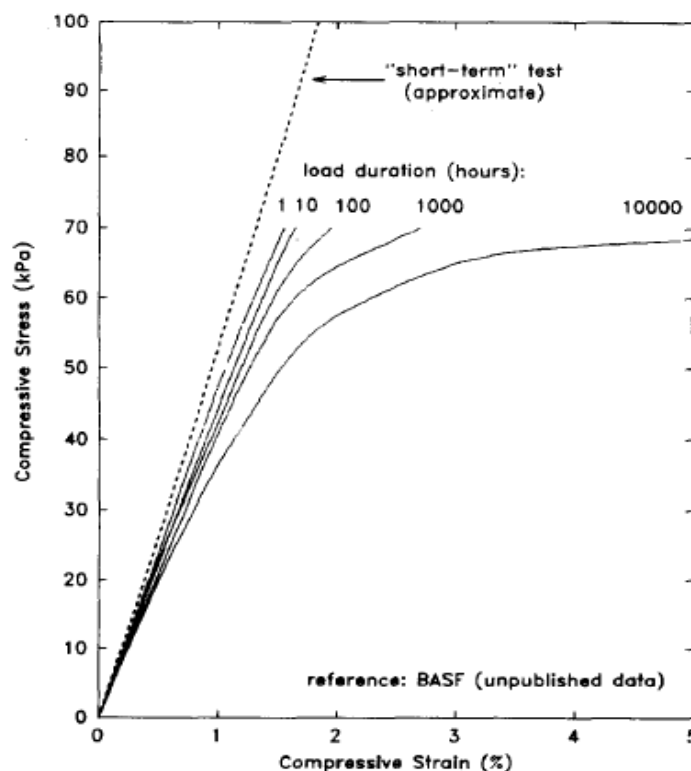
να οφείλεται στο ότι το φρέσκο μείγμα ελαφροσκυροδέματος είναι σχετικά εύκολο να συμπιεστεί. Εκτιμάται ότι οι διαφορές στις πυκνότητες που εμφανίζονται στον Πίνακα 4.5 οφείλονται σε διαφορετική συμπύκνωση των φρέσκων μειγμάτων.

4.6 Αποτελέσματα Πειράματος Ερπυσμού

Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο (EN1606, 2013) το οποίο ακολουθήθηκε για την διεξαγωγή του πειράματος ερπυσμού, το φορτίο σ_c που επιβλήθηκε στα δοκίμια του κάθε μείγματος είναι το 15% της αντοχής του κάθε μείγματος, όπως αυτή υπολογίστηκε από το πείραμα θλίψης.

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 η θλιπτική αντοχή ενός σκυροδέματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αντοχή των αδρανών. Θα μπορούσε η αντίστοιχη συσχέτιση να ισχύει για τη συμπεριφορά του σκυροδέματος στο φαινόμενο του ερπυσμού; Για να απαντηθεί αυτό το ερώτημα πρέπει να εξεταστεί η συμπεριφορά της διογκωμένης πολυστερίνης στον ερπυσμό. Μια εργασία πάνω στο θέμα αυτό διεξήχθη από τον ερευνητή Horvath J. (Horvath, 1993).

Στην εργασία αυτή περιγράφεται η συμπεριφορά της διογκωμένης πολυστερίνης πυκνότητας 23.5 kg/m^3 σε μακροπρόθεσμη δοκιμή συμπίεσης.



Σχήμα 4.7: Χρονικά εξαρτημένη συμπεριφορά διογκωμένης πολυστερίνης σε μονοαξονική συμπίεση (Horvath, 1993)

Από το Σχήμα 4.7 φαίνεται ότι η διογκωμένη πολυστερίνη για φορτίο 60 kPa σε ένα διάστημα 1000 ωρών έχει αναπτύξει παραμόρφωση περισσότερη από 1.5%. Παρατηρείται δηλαδή μια σχετικά σημαντική ερπυστική παραμόρφωση. Η έντονα ερπυστική συμπεριφορά του αφρώδους πολυστυρενίου καταδεικνύεται και από μια σειρά πειραματικών δεδομένων (Tije-Liong, 1990, Zhukov et. al., 2017).

Στον Πίνακα 4.6 παρουσιάζονται τα φορτία που επιβλήθηκαν για το πείραμα του ερπυσμού του κάθε μείγματος.

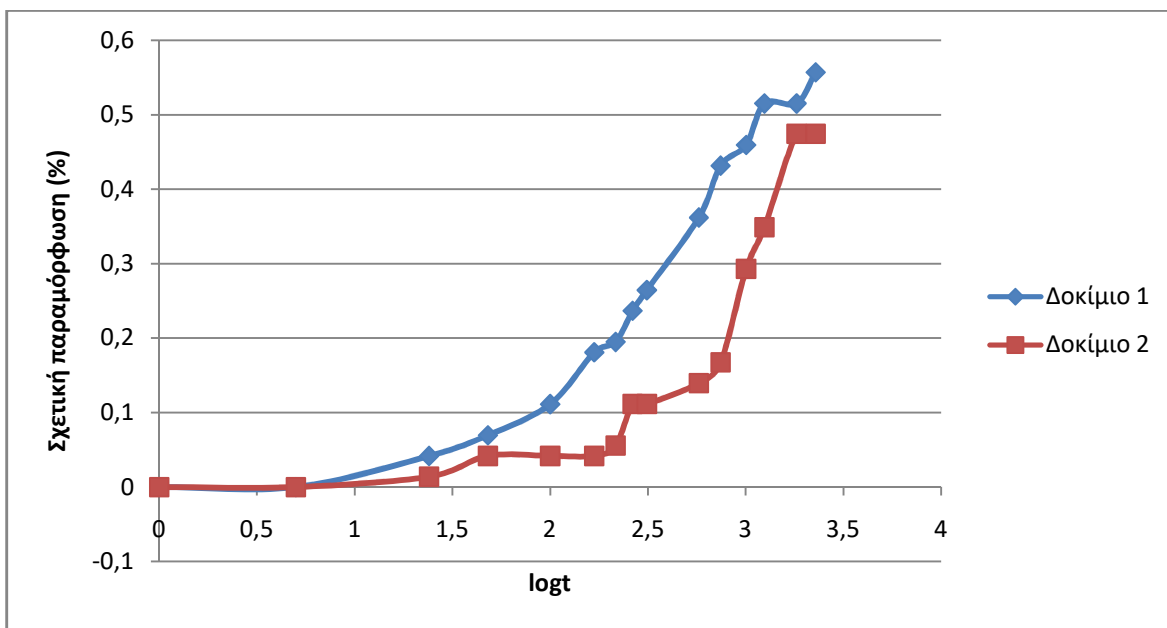
Πίνακας 4.6: Φορτία πειράματος ερπυσμού

Μείγμα	Φορτίο Ερπυσμού kPa
300	31.36
400	31.27
600	41.76
700	62.37

Στον Πίνακα 4.7 παρουσιάζονται οι μετρήσεις των παραμορφώσεων των δοκιμίων του μείγματος 300 kg/m³ καθώς και η χρονική στιγμή που λήφθηκε η κάθε μέτρηση από την αρχή της διεξαγωγής του πειράματος.

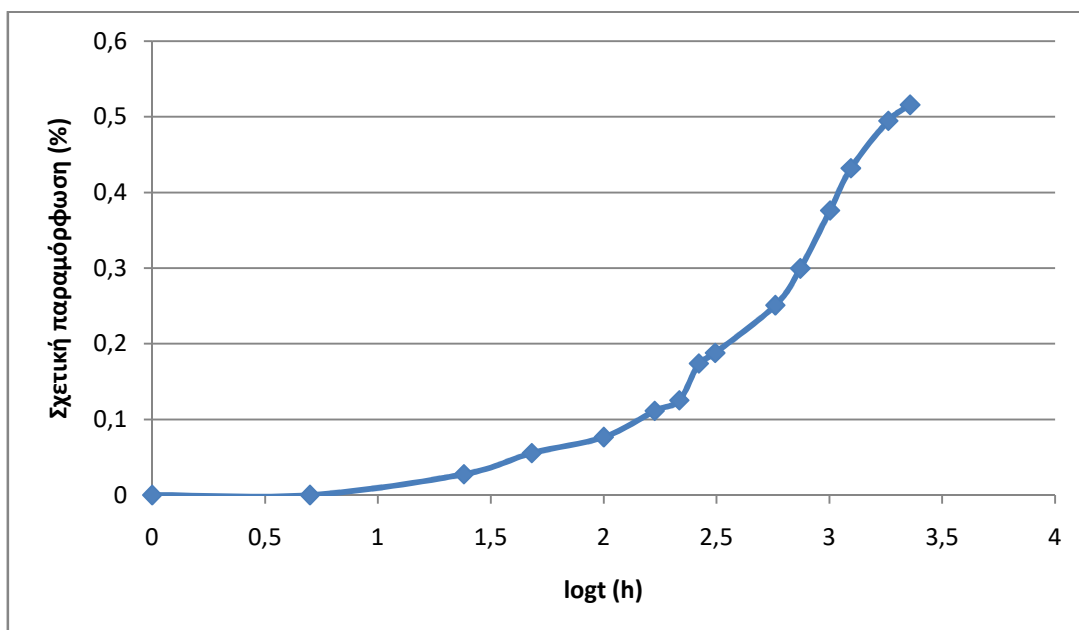
Πίνακας 4.7: Μετρήσεις μήκυνσης μείγματος 300 kg/m³

Χρόνος Μέτρησης (h)	Μήκυνση (mm) Δοκίμιο 1 Πάχος δοκιμίου d=71,82 mm	Μήκυνση (mm) Δοκίμιο 2 Πάχος δοκιμίου d=71,69 mm
5	0	0
24	0,03	0,01
48	0,05	0,03
100	0,08	0,03
168	0,13	0,03
216	0,14	0,04
264	0,17	0,08
312	0,19	0,08
576	0,26	0,1
744	0,31	0,12
1005	0,33	0,21
1246	0,37	0,25
1822	0,37	0,34
2279	0,4	0,34



Σχήμα 4.8: Διάγραμμα παραμόρφωσης % προς logt δοκιμών μείγματος 300 kg/m³

Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζεται η μήκυνση των δοκιμών του μείγματος 300 kg/m³ ως προς το χρόνο σε λογαριθμική κλίμακα και στο Σχήμα 4.9 ο μέσος όρος των παραμορφώσεων αυτών.

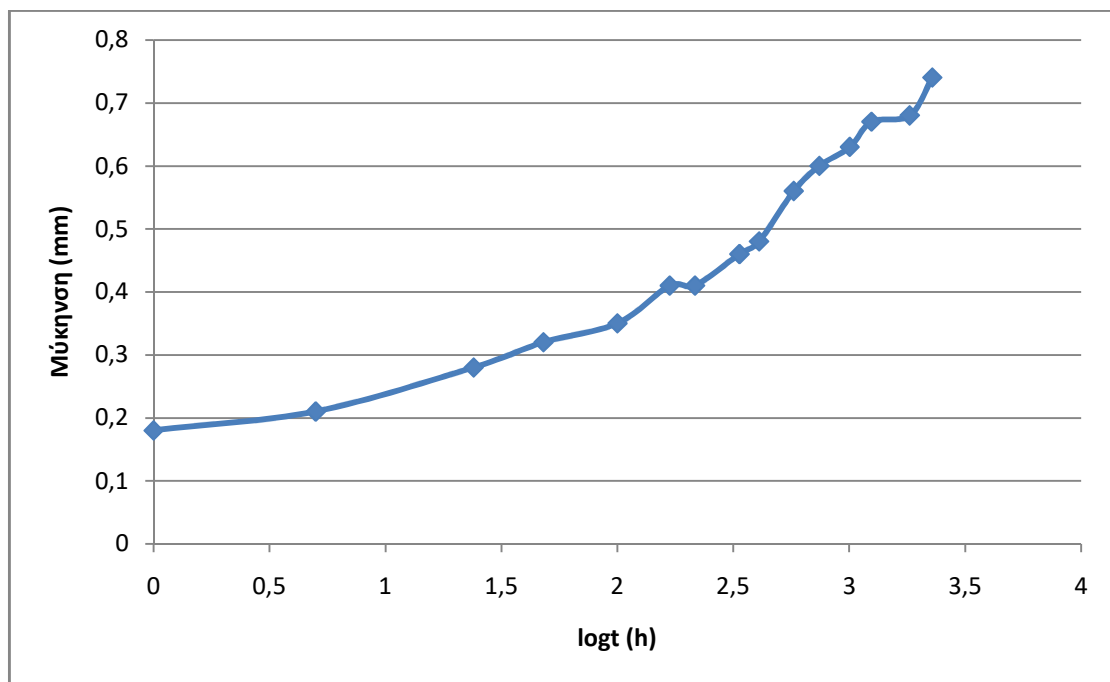


Σχήμα 4.9: Διάγραμμα μέσου όρου σχετικής παραμόρφωσης % προς logt δοκιμών μείγματος 300 kg/m³

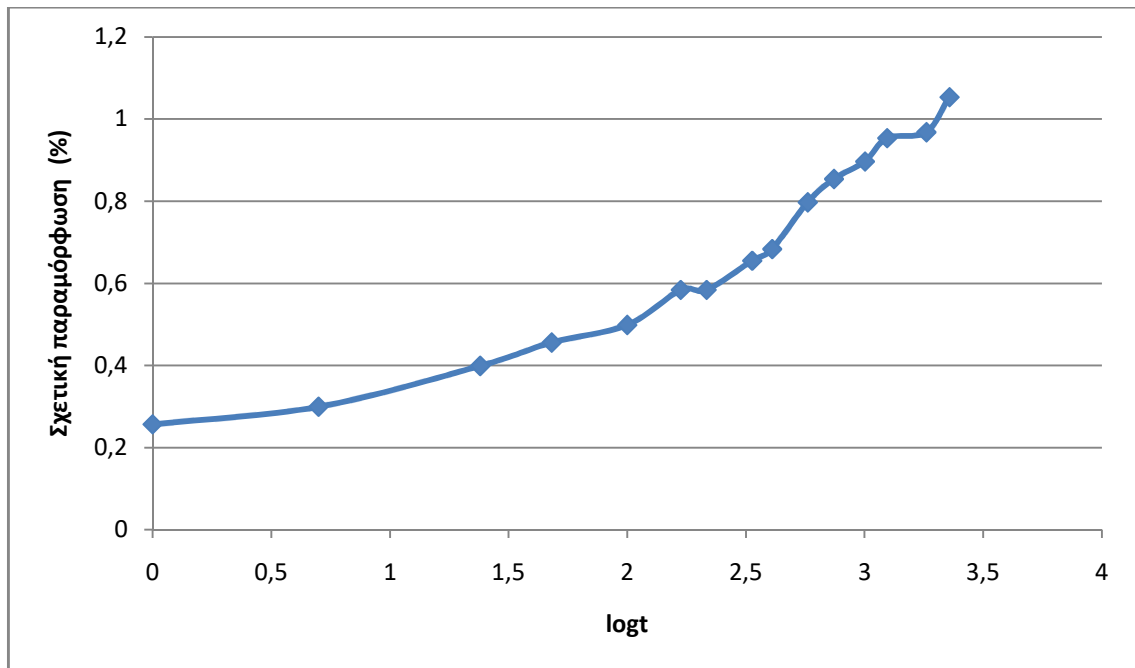
Πίνακας 4.8: Μετρήσεις μήκυνση δοκιμίου μείγματος 400 kg/m^3

Χρόνος Μέτρησης (h)	Μήκυνση (mm) Δοκίμιο 2 Πάχος Δοκιμίου $d=70.29 \text{ mm}$
0	0
0.05	0.07
1	0.18
5	0.21
24	0.28
48	0.32
100	0.35
168	0.41
216	0.41
336	0.46
408	0.48
576	0.56
743	0.6
1004	0.63
1245	0.67
1821	0.68
2278	0.74

Στον Πίνακα 4.8 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της μήκυνσης του δοκιμίου του μείγματος 400 kg/m^3 και η χρονική στιγμή που λήφθηκε η κάθε μέτρηση από την αρχή της διεξαγωγής του πειράματος.

**Σχήμα 4.10:** Διάγραμμα μήκυνσης προς $\log t$ δοκιμίου μείγματος 400 kg/m^3

Στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζεται η μήκυνση σε mm, του δοκιμίου του μείγματος 400 kg/m³ ως προς το χρόνο εκφρασμένο σε λογαριθμική κλίμακα και στο Σχήμα 4.11 παρουσιάζεται η σχετική παραμόρφωση % του δοκιμίου ως προς το χρόνο σε λογαριθμική κλίμακα.

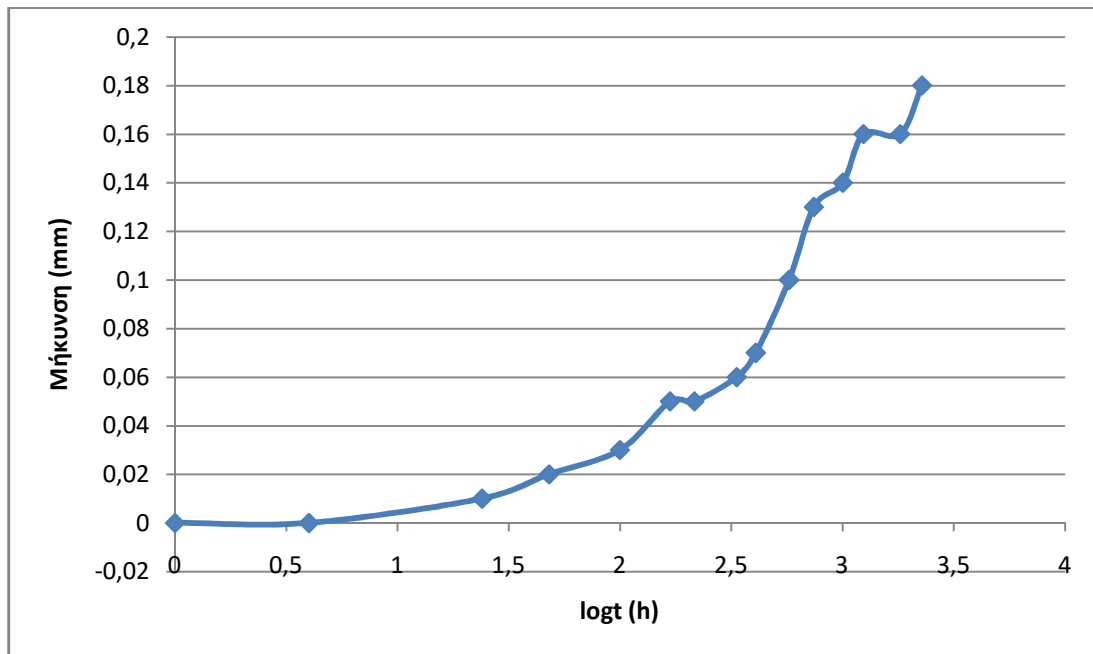


Σχήμα 4.11: Διάγραμμα σχετικής παραμόρφωσης % προς logt δοκιμίου μείγματος 400 kg/m³

Πίνακας 4.9: Μετρήσεις μήκυνσης μείγματος 600 kg/m³

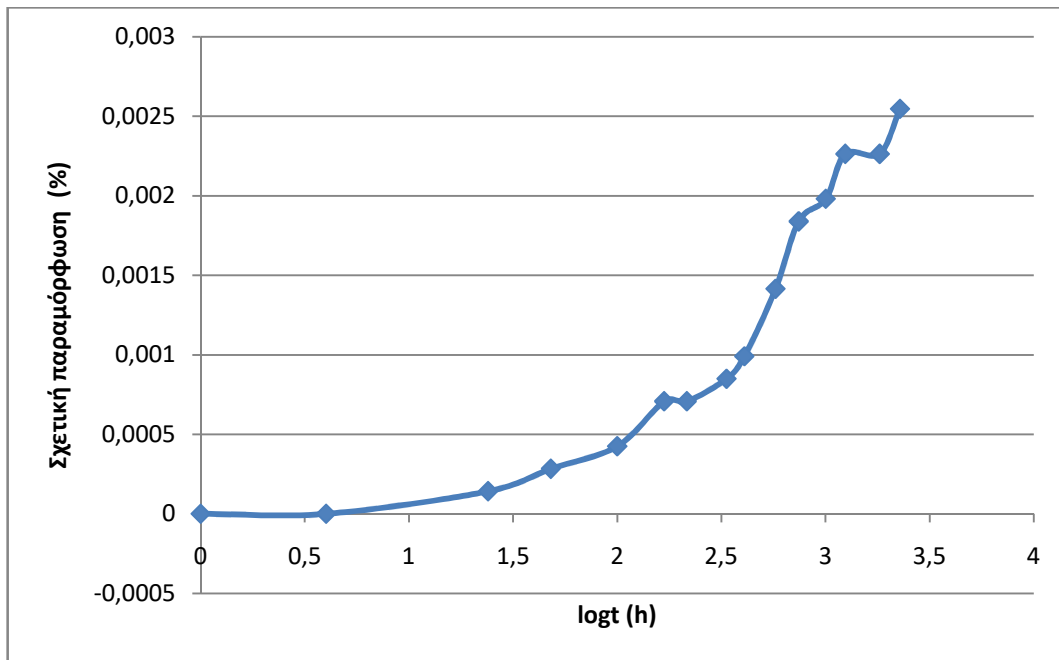
Χρόνος μέτρησης (h)	Μήκυνση (mm) Δοκίμιο 1 Πάχος δοκιμίου d= 70.7 mm
1	0
4	0
24	0,01
48	0,02
100	0,03
168	0,05
216	0,05
335	0,06
408	0,07
576	0,1
744	0,13
1004	0,14
1245	0,16
1821	0,16
2279	0.18

Στον Πίνακα 4.9 εμφανίζονται οι μετρήσεις μήκυνσης του δοκιμίου μείγματος 600 kg/m³ όπως αυτές λήφθηκαν την αντίστοιχη χρονική στιγμή από την αρχή διεξαγωγής του πειράματος.



Σχήμα 4.12: Διάγραμμα μήκυνσης προς logt δοκιμίου μείγματος 600 kg/m³

Στα Σχήματα 4.12 και 4.13 φαίνεται η μήκυνση και σχετική παραμόρφωση αντίστοιχα του δοκιμίου του μείγματος 600 kg/m³.

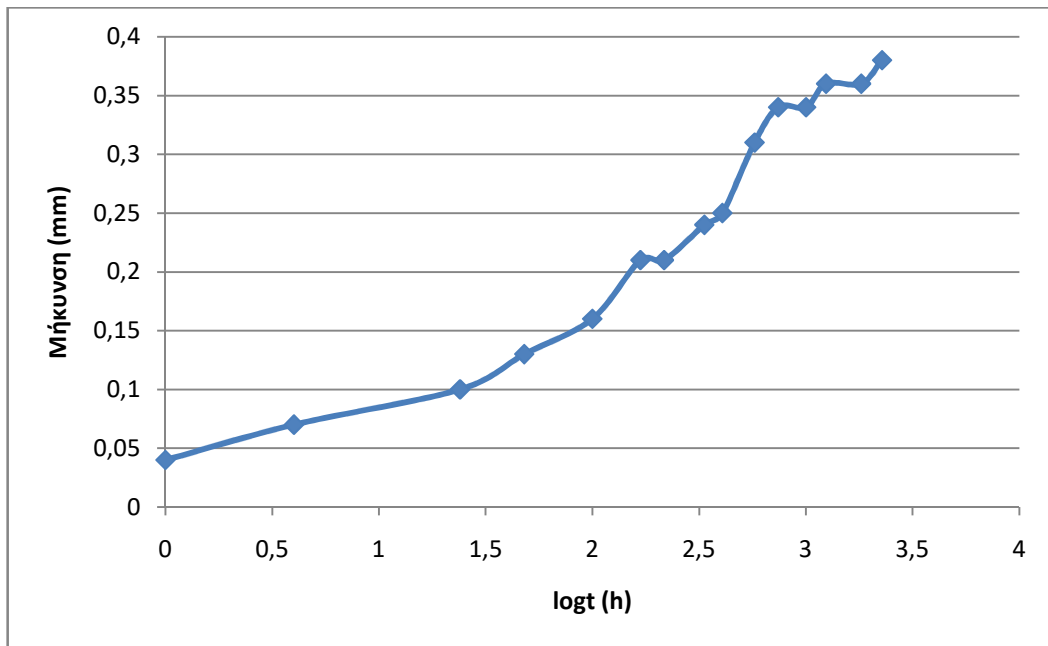


Σχήμα 4.13: Διάγραμμα σχετικής παραμόρφωσης % προς logt δοκιμίου μείγματος 600 kg/m³

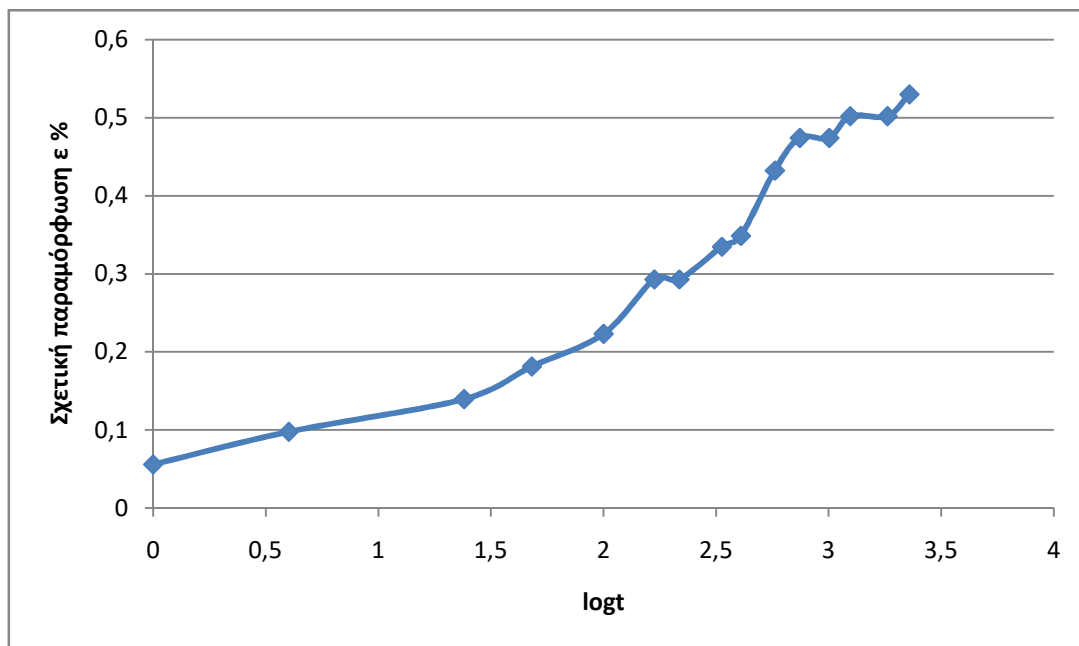
Πίνακας 4.10: Μετρήσεις μήκυνσης μείγματος 700 kg/m³

Χρόνος μέτρησης (h)	Μήκυνση (mm) Δοκίμιο 2 Πάχος δοκιμίου d=71.73 mm
0	0
0.083	0
1	0.04
4	0.07
24	0.1
48	0.13
100	0.16
168	0.21
217	0.21
335	0.24
407	0.25
576	0.31
743	0.34
1004	0.34
1245	0.36
1821	0.36
2278	0.38

Στον Πίνακα 4.10 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της μήκυνσης του δοκιμίου του μείγματος 700 kg/m³ τη χρονική στιγμή που λήφθηκαν από την αρχή της διεξαγωγής του πειράματος.

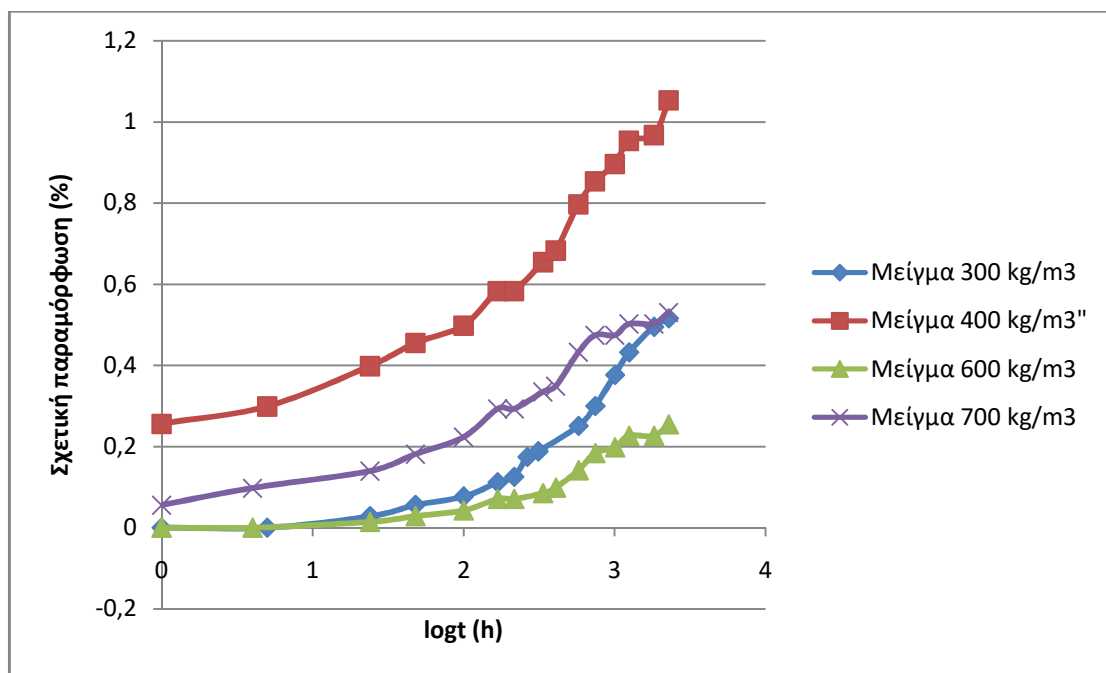


Σχήμα 4.14: Διάγραμμα μήκυνσης προς logt δοκιμίου μείγματος 700 kg/m³



Σχήμα 4.15: Διάγραμμα σχετικής παραμόρφωσης % προς logt δοκιμίου μείγματος 700 kg/m³

Στο Σχήμα 4.14 και 4.15 παρουσιάζονται οι τιμές της απόλυτης και της σχετικής παραμόρφωσης αντίστοιχα ως προς το χρόνο εκφρασμένο σε λογαριθμική κλίμακα του δοκιμίου του μείγματος 700 kg/m³.



Σχήμα 4.16: Διάγραμμα σχετικής παραμόρφωσης % προς logt

Από το Σχήμα 4.16 παρατηρείται ότι το μείγμα 400 kg/m³ παρουσιάζει τη μεγαλύτερη παραμόρφωση ενώ το μείγμα των 600 kg/m³ τη μικρότερη. Επίσης η καμπύλη του μείγματος 400 kg/m³ παρουσιάζει αναλογικά μεγάλη απόκλιση από τις καμπύλες των υπόλοιπων μειγμάτων. Είναι πιθανόν η απόκλιση αυτή να οφείλεται σε λανθασμένη μέτρηση της παραμόρφωσης του ενός δοκιμίου που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση των ερπυστικών παραμορφώσεων.

Σύμφωνα με τις παραμορφώσεις που παρατηρήθηκαν από το πείραμα του ερπυσμού τα δοκίμια των τεσσάρων μειγμάτων παρουσίασαν μέγιστες παραμορφώσεις από 0.15% έως 0.6% σε διάστημα 94 ημερών. Οι παραμορφώσεις προέκυψαν από φορτίο ίσο με το 15% της θλιπτικής αντοχής του κάθε μείγματος όπως αυτή υπολογίστηκε από το πείραμα θλίψης. Σύμφωνα με τον ΕΚΟΣ για συνήθη σκυροδέματα και μέση συνεκτικότητα οι παραμορφώσεις ερπυσμού μπορούν να υπολογιστούν με βάση την εξίσωση $\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \sigma_{c0} * \varphi(t, t_0) / E_{c28}$ όπου ο συντελεστής $\varphi(t, t_0)$ δίνεται από τον ΕΚΟΣ όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.11

Πίνακας 4.11: Τελική τιμή του συντελεστή ερπυσμού $\phi(t, t_0)$

$\phi(t, t_0)$						
Ιδιότητα t_0 τη στιγμή της φόρτισης (ημέρες)	Ιδεατό μέγεθος $2 \cdot A_c / u$ σε mm					
	50	150	600	50	150	600
	Ξηρές ατμοσφαιρικές συνθήκες εσωτερικού χώρου (RH=50%)			Υγρές ατμοσφαιρικές συνθήκες υπαίθρου (RH=80%)		
1	5.50	4.60	3.70	3.60	3.20	2.90
7	3.90	3.10	2.60	2.60	2.30	2.00
28	3.00	2.50	2.00	1.90	1.70	1.50
90	2.40	2.00	1.60	1.50	1.40	1.20
365	1.80	1.50	1.20	1.10	1.00	1.00

Όπου A_c είναι το εμβαδό της διατομής του στοιχείου και u είναι περίμετρος σε επαφή με την ατμόσφαιρα. Σύμφωνα με τη γεωμετρία των δοκιμών μας ο συντελεστής ερπυσμού $\phi(t, t_0)$ 2.2. Οπότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση $ecc(t, t_0) = sc_0 * \phi(t, t_0) / Ec_{28}$ για να υπολογίσουμε την παραμόρφωση ενός δοκιμίου σκυροδέματος C20/25 ώστε να συγκρίνουμε τις τιμές των παραμορφώσεων. Για σκυρόδεμα C20/25 η τιμή της παραμόρφωσης 90 ημερών για στοιχείο διαστάσεων 20 x 20 cm και φορτίο ίσο με το 15% της αντοχής $P=6.6$ MPa υπολογίζεται σε 0.05%. Παρατηρούμε ότι η παραμόρφωση του ελαφροσκυροδέματος είναι 3 έως 12 φορές πολλαπλάσια αυτής του σκυροδέματος C20/25. Άρα όπως ήταν αναμενόμενο από τη μικρότερη θλιπτική αντοχή παρατηρούμε ότι το ελαφροσκυρόδεμα είναι πιο εύκολα παραμορφώσιμο σε σχέση με ένα τυπικό σκυρόδεμα. Λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα της εργασίας του Horvath J. (Horvath, 1993) ίσως μπορεί να δημιουργηθεί ένας συσχετισμός των αρκετά μεγαλύτερων παραμορφώσεων ερπυσμού του ελαφροσκυροδέματος που περιέχει κόκκους διογκωμένης πολυστερίνης, σε σχέση με ένα τυπικό σκυρόδεμα, και της συμπεριφοράς της διογκωμένης πολυστερίνης στο φαινόμενο του ερπυσμού.

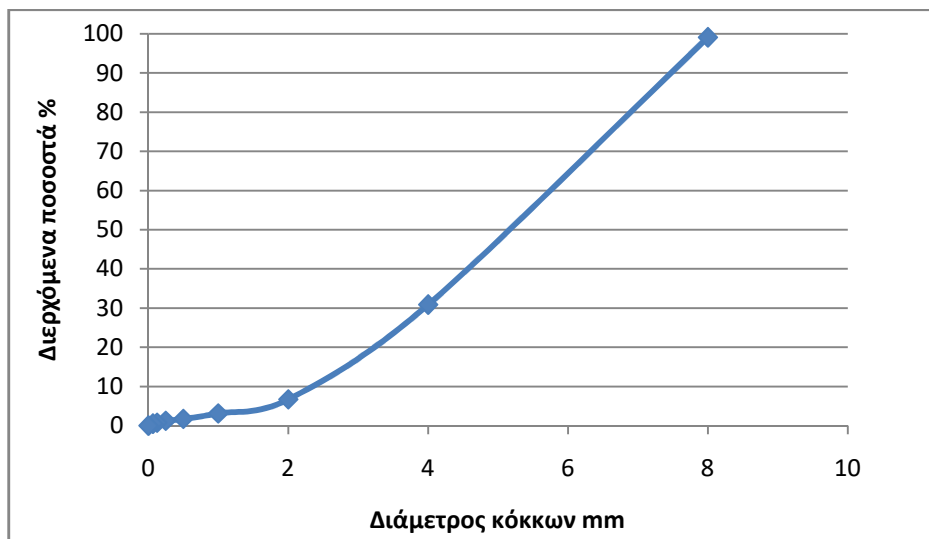
4.7 Αποτελέσματα Πειραματικής Κοκκομετρικής Διαβάθμισης

Η πειραματική δοκιμή της κοκκομετρικής διαβάθμισης πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο (EN933:2012). Στον Πίνακα 4.12 παρουσιάζονται τα συγκρατούμενα βάρη της αφρώδους διογκωμένης πολυστερίνης σε κάθε κόσκινο. Στην τρίτη στήλη του Πίνακα 4.12 παρουσιάζονται τα ποσοστά του συνολικά συγκρατούμενου βάρους ενώ στην

τελευταία στήλη παρουσιάζονται τα συνολικά διερχόμενα ποσοστά των αδρανών. Τα τελευταία παρουσιάζονται και στο Σχήμα 4.16 όπου είναι εμφανές ότι οι περισσότεροι κόκκοι της διογκωμένης πολυστερίνης είχαν διάμετρο από 2 έως 4 mm.

Πίνακας 4.12: Ποσοστό συγκρατούμενων κόκκων

Κόσκινο mm	Συγκρατούμενο βάρος g	Συγκρατούμενο Βάρος %	Συνολικό Συγκρατούμενο Βάρος %	Συνολικό Διερχόμενο Βάρος %
16	0	0	0	100
8	0,6	0,94	0,94	99,06
4	43,5	68,18	69,12	30,88
2	15,4	24,14	93,26	6,74
1	2,3	3,60	96,86	3,14
0,5	0,9	1,41	98,27	1,72
0,25	0,3	0,47	98,74	1,26
0,125	0,3	0,47	99,21	0,79
0,063	0,2	0,31	99,52	0,48
Pan	0,3	0,47	100	0
Σύνολο	63,8			0



Σχήμα 4.16: Διάγραμμα καμπύλης κοκκομετρικής ανάλυσης

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών μπορούμε να συμπεράνουμε ότι τα συγκεκριμένα μείγματα ελαφροσκυροδέματος οδηγούν στην κατασκευή ενός υλικού που παρουσιάζει κάποια ιδιαίτερα ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά.

Αρχικά η δεσμευμένη πυκνότητα των τεσσάρων μιγμάτων κυμαίνεται από τα 367-748 kg/m³ δηλαδή η δεσμευμένη πυκνότητα του ελαφροσκυροδέματος είναι μεταξύ του 15-32% αυτής του τυπικού σκυροδέματος. Αυτό σημαίνει ότι η χρήση του ελαφροσκυροδέματος σε μια κατασκευή θα μειώσει ραγδαία το βάρος της. Όμως παρατηρείται ότι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος είναι μόλις το 1% αυτής του τυπικού σκυροδέματος, καθώς κυμαίνεται από τα 0,2-0,4 MPa αναλόγως το μείγμα. Η αντοχή αυτή το καθιστά πρακτικά μη ικανό για χρήση κατασκευής ενός φέροντα οργανισμού σε μια κατασκευή. Εξαρχής όμως δεν ήταν αυτός ο στόχος ανάπτυξης αυτού του ελαφροσκυροδέματος. Μπορούμε με ευκολία να πούμε ότι τα τέσσερα μείγματα ελαφροσκυροδέματος που αναπτύχθηκαν ανήκουν στην κατηγορία του υπέρ-ελαφρού σκυροδέματος καθώς έχουν πυκνότητα μικρότερη των 800 kg/m³. Τέτοιου τύπου σκυροδέματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ειδικές κατασκευές που το χαμηλός βάρος και ενδεχομένως οι θερμομονωτικές ιδιότητες να είναι σημαντικές.

Εφόσον το ελαφροσκυρόδεμα αναγνωρίστηκε σαν υπέρ-ελαφρό σκυρόδεμα και δεν μπορεί να αξιοποιηθεί στον κατασκευαστικό τομέα στις ίδιες χρήσεις που αξιοποιείται το τυπικό σκυρόδεμα, προκύπτει το ερώτημα, που και πώς μπορεί να αξιοποιηθεί; Μια γενική χρήση αποτελεί η λειτουργία σα σκυρόδεμα «καθαριότητας». Για να μπορεί να αξιοποιηθεί σαν σκυρόδεμα καθαριότητας πρέπει να μελετήσουμε τα αποτελέσματα ερπυσμού και αυτά της συμπίεσότητας για να συμπεράνουμε αν η συμπεριφορά του ελαφροσκυροδέματος το καθιστά ασφαλές. Από τα αποτελέσματα του πειράματος συμπίεσότητας παρατηρούμε ότι τα δοκίμια και των τεσσάρων μιγμάτων παρουσιάζουν πολύ μικρές παραμορφώσεις με την εφαρμογή του φορτίου των 50 kPa. Οι αλλαγές στο πάχος των δοκιμίων είναι της τάξης των δεκάτων του χιλιοστού, που σημαίνει ότι μετά την σκλήρυνση του ελαφροσκυροδέματος μπορεί να τοποθετηθεί φορτίο χωρίς να υπάρχει φόβος ότι θα προκληθεί ζημιά στο ελαφροσκυρόδεμα, ή στην περίπτωση που χρησιμοποιείται το ελαφροσκυρόδεμα σαν μετό καθαριότητας δεν θα προκληθεί ζημιά σε κάποιο από τα υλικά που μπορεί να τοποθετηθούν πάνω από αυτό, όπως πχ. πλακάκια.

Η έρευνα αυτής της διπλωματικής εργασίας ανοίγει το δρόμο για κάποιες άλλες μελλοντικές έρευνες πάνω σε κάποιες πιθανές χρήσεις του ελαφροσκυροδέματος που περιέχει διογκωμένη πολυστερίνη.

Όπως προαναφέρθηκε, οι κύριες ιδιότητες του ελαφροσκυροδέματος που το καθιστούν τόσο ευέλικτο στις χρήσεις του είναι η χαμηλή πυκνότητα και οι καλές θερμομονωτικές ιδιότητες. Θα αποτελούσε ένα πολύ ενδιαφέρον αντικείμενο έρευνας να είναι η πιθανή χρήση κάποιου τύπου ελαφροσκυροδέματος για την αντικατάσταση της τοιχοποιίας από οπτόπλινθους. Στον σύγχρονο κατασκευαστικό κλάδο είναι συνήθης πρακτική η χρήση οπτόπλινθων για την κατασκευή της τοιχοποιίας μαζί με την χρήση διογκωμένης πολυστερίνης για την μόνωση της. Οπότε γεννάται το ερώτημα, εφόσον χρησιμοποιείται ήδη διογκωμένη πολυστερίνη για την μόνωση, μήπως η χρήση ενός ελαφροσκυροδέματος που περιέχει διογκωμένη πολυστερίνη είναι πιο αποδοτική λύση; Οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του ελαφροσκυροδέματος που διερευνήθηκαν στην παρούσα εργασία μπορούν να αποτελέσουν μια βάση πάνω στην οποία μπορούν να εξεταστούν περισσότερα μείγματα και να διερευνηθούν θερμομονωτικές ιδιότητες.

Βιβλιογραφία

Abiraami R., Balasundaram N., Sindhu R., Solai Mathi S., Johnpaul V., (2020), High Strength Lightweight Foam Concrete, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1006 012013

Adeala A. and Soyemi O., (2020), Structural Use of Expanded Polysterene Concrete, International Journal of Innovative Science and Research Technology, doi: 10.38124/IJISRTJUN849

Beutner N., Haller T. and Thienel K., (2020), Lightweight Concrete-From Basics to Innovations, Materials 2020, 13, 1120

Bhojar D., Kowale S., Moon A., Patle A., Selokar L., Quaz S., (2020), LIGHT WEIGHT CONCRETE BY USING EPS BEADS, International Research Journal of Engineering and Technology, p-ISSN: 2395-0072

British Standards institution, (1999), BS EN 12350-6:1999: *Testing fresh concrete- Part 6: Density*

British Standards Institution, (2012), BS EN 933-1:2012: *Tests for geometrical properties of aggregates Part 1: Determination of particle size distribution- Sieving method*

British Standards Institution, (2013), BS EN 12431:2013: *Thermal insulating products for building applications- determination of thickness for floating floor insulating products*

British Standards Institution, (2013), BS EN 1602:2013: *Thermal insulating products for building applications- Determination of the apparent density*

British Standards institution, (2013), BS EN 1606:2013: *Thermal insulating products for building applications- Determinations of compressive creep*

British Standards institution, (2013), BS EN 1609:2013: *Thermal insulating products for building applications- determination of short term water absorption by partial immersion*

British Standards Institution, (2013), BS EN 826:2013: *Thermal insulating products for building applications- determination of compression behavior*

Chen B. and Liu N., (2013), A novel lightweight concrete fabrication and its thermal and mechanical properties, Construction and Building Materials 44, pp. 691-698

Cui C., Huang Q., Li D., Li H., Quan C., (2015), Stress-strain relationship in axial compression for EPS concrete, *Construction and Building materials* 105, pp. 377-383

Cunha V., Jacinto C., Paiva A., Pereira H., Pereira S., Pinto J., Varum H., Vieira B., Vilela P., (2012), Corn cob lightweight concrete for non-structural applications, *Construction and Building Materials* 34, pp. 346-351

Demiboga R. and Kan A., (2007), Effect of cement and EPS beads ratios on compressive strength and density of lightweight concrete, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 14, pp. 158-162

Elshahawi M., Hückler A., Schlaich M., (2020), Infra lightweight concrete: A decade of investigation (a review), *Structural Concrete*. 2021;2022 (Suppl. 1) E152-E168

Grip I., Semenov V., Vaitkus S., Zhukov A., (2017), The investigation of expanded polystyrene creep behavior, *Matec Web of Conferences* 117, 00184

Hamad A. and Mohammed J., (2014), Materials, properties and application review of Lightweight concrete, *Rev. Tec. Univ. Zulia*. 37(2), pp. 10-15

Horvath J., (1993), Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam: An Introduction to Material behavior, *Geotextiles and Geomembranes*, 13, pp. 263-280

Krishnamurthy M. and Vandanapu S., (2018), Seismic performance of Lightweight Concrete Structures, *Advances in Civil Engineering*, 2105784

Mirgozar M.A., Nazimi M., Sadrmomtazi A., Sobhani J., (2012), Properties of multi-strength grade EPS concrete containing silica fume and rice husk ash, *Construction and building materials* 35, pp. 211-219

Moutassem F., (2020), Ultra-Lightweight EPS Concrete: Mixing Procedure and Predictive Models for Compressive Strength, *Civil Engineering and Architecture* 8(5), pp. 963-972

Tije-Liong G., (1990, November 19-21), *Expanded Polystyrene for Road Embankment on Soft Clay*, 4th Indonesian Annual Conference on Road Engineering, Jakarta