



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

**ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΕΛΑΦΡΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΕΙ
ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΗ ΑΦΡΩΔΗ ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΗ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗ**

Βασίλειος Μπουσκολίτης



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

Βόλος, 2024

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: Χρήστος Παπακωνσταντίνου, Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

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

Τρίτος Εξεταστής: Δημήτριος Σοφιανόπουλος, Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οφείλω να εκφράσω τις ειλικρινέστερες ευχαριστίες μου σε όσους με υποστήριξαν κατά την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας μου. Καταρχάς, είμαι εξαιρετικά ευγνώμων προς τον σύμβουλό μου και επιβλέποντα, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Χρήστο Παπακωνσταντίνου, του οποίου η καθοδήγηση και η εμπειρία ήταν ανεκτίμητες. Η διαρκής υποστήριξή του και οι έξυπνες παρατηρήσεις του συντέλεσαν σημαντικά στη συνολική διαμόρφωση της έρευνάς μου. Θα ήθελα επίσης να εκφράσω την εκτίμησή μου προς τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Λάμπρο Κούτα για την πολύτιμη συμβολή του στην εξέλιξη της έρευνας. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Αλέξανδρο Κουτσελίνη τόσο για την ανεκτίμητη βοήθεια του στην κατασκευή των δοκιμίων και στην διεξαγωγή των πειραμάτων, όσο και για την άριστη συνεργασία μας και τις τεχνικές γνώσεις που μου προσέφερε. Τέλος, οφείλω μια μεγάλη ευγνωμοσύνη στους «αφανείς ήρωες» αυτής της διπλωματικής εργασίας, την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την κατανόηση τους και τη συνεχόμενη υποστήριξη τους. Η πίστη σας σε εμένα ήταν η μεγαλύτερη κινητήρια μου δύναμη. Σας ευχαριστώ όλους για τη συμβολή σας σε αυτό το σημαντικό ορόσημο του ακαδημαϊκού μου ταξιδιού.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΕΛΑΦΡΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΕΙ ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΗ ΑΦΡΩΔΗ ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΗ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗ

Βασίλειος Μπουσκολίτης
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2023

Επιβλέπων καθηγητής: Χρήστος Παπακωνσταντίνου, Αναπληρωτής Καθηγητής

Π Ε Ρ Ι Λ Η Ψ Η

Το ελαφροσκυρόδεμα είναι ένα προϊόν παραγόμενο από ελαφρά αδρανή που χρησιμοποιείται ποικιλοτρόπως στις κατασκευές εδώ και πολλά χρόνια. Η παρούσα διπλωματική εργασία ερευνά τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες μιγμάτων ελαφροσκυροδέματος, στο οποίο χρησιμοποιείται ανακυκλωμένη αφρώδη διογκωμένη πολυστερίνη ως αδρανές, προκειμένου να χαρακτηριστεί οι φυσικές και μηχανικές του ιδιότητες. Η αφρώδης διογκωμένη πολυστερίνη είναι ένα τεχνητό υλικό, χαμηλής πυκνότητας, ανακυκλώσιμο και με εξαιρετικές μονωτικές ιδιότητες. Η εργασία αυτή αποτελείται από ένα σημαντικό πειραματικό σκέλος. Για τις ανάγκες της εργασίας κατασκευάστηκαν δοκίμια ελαφροσκυροδέματος τεσσάρων διαφορετικών συνθέσεων με διαφορετικές πυκνότητες. Τα δοκίμια δοκιμάστηκαν σε πειράματα ερπυσμού, υδατοαπορροφητικότητας, θλίψης, δεσμευμένης και φαινόμενης πυκνότητας και ακολούθησαν πιστά τα αντίστοιχα Ευρωπαϊκά Πρότυπα. Το συμπέρασμα αυτής της εργασίας αυτής είναι ότι το ελαφροσκυρόδεμα που παράχθηκε με χρήση ανακυκλωμένων κόκκων διογκωμένης πολυστερίνης διαθέτει ιδιότητες αντίστοιχες άλλων τύπων ελαφροσκυροδέματος και κατά συνέπεια θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως δομικό υλικό αντικαθιστώντας κάποια από αυτά.

Λέξεις- κλειδιά: ελαφροσκυρόδεμα, πολυστερίνη, πείραμα, πυκνότητα, αντοχή

CHARACTERIZATION OF LIGHTWEIGHT CONCRETE CONTAINING RECYCLED EXPANDED POLYSTYRENE BEADS

AGGREGATES

Vasileios Bouskolitis

University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2023

Supervisor: Christos Papakonstantinou, Associate Professor

ABSTRACT

Lightweight concrete is a product made of lightweight aggregates that has been used in construction in various ways for many years. This thesis investigates the physical and mechanical properties of lightweight concrete mixtures composed of recycled expanded polystyrene in order to characterize the material and, consequently, its utilization. Expanded polystyrene is an artificial material with low density, recyclability, and excellent insulating properties. This thesis presents the results of an experimental study, and for its purposes, lightweight concrete specimens of four different densities have been fabricated. These specific specimens were tested in experiments related to compression, water absorption, fresh and apparent density, following the respective European Standards. This study has shown that lightweight concrete based on recycled expanded polystyrene aggregate has similar properties to conventional lightweight concrete, and thus it could be used in many construction applications.

Keywords: lightweight concrete, polystyrene, experiment, density, strength

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	7
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	8
3. Σκοπός και Μεθοδολογία Πειραματικών Δοκιμών	35
3.1 Πείραμα Φαινόμενης Πυκνότητας Φρέσκου Μείγματος	37
3.2 Πείραμα Δεσμευμένης Πυκνότητας	38
3.3 Πείραμα Θλίψης	39
3.4 Πείραμα Υδατοαπορροφητικότητας	40
3.5 Πείραμα Ερπυσμού	42
4. Αποτελέσματα	44
4.1 Αποτελέσματα Πειράματος Φαινόμενης Πυκνότητας	44
4.2 Αποτελέσματα Πειράματος Δεσμευμένης Πυκνότητας	44
4.3 Αποτελέσματα Πειράματος Θλίψης	45
4.4 Αποτελέσματα Πειράματος Υδατοαπορροφητικότητας	49
4.5 Αποτελέσματα Πειράματος Ερπυσμού	50
5.Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα	56
Βιβλιογραφία	57

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το ελαφροσκυρόδεμα ή αλλιώς LWC (Lightweight Concrete) είναι ένα προϊόν με μακροχρόνια και ευρεία χρήση εφαρμογών. Πρόκειται για ένα μίγμα το οποίο, σύμφωνα με τον ορισμό του, έχει χαμηλότερη πυκνότητα από το σύνηθες σκυρόδεμα. Η χαμηλότερη πυκνότητα του προκύπτει από την αντικατάσταση των αδρανών που χρησιμοποιούνται στο συμβατικό σκυρόδεμα με άλλα μικρότερου ειδικού βάρους, γεγονός που συμβάλλει και στη μικρότερη αντοχή του συγκριτικά με το σκυρόδεμα.

Ανάλογα με τα αδρανή που περιέχονται στο μίγμα, καθώς και τον τρόπο παρασκευής τους, τα κονιάματα LWC κατηγοριοποιούνται σε 3 είδη:

1. στα σκυροδέματα με ελαφρά αδρανή ή ελαφροσκυροδέματα
2. στα σκυροδέματα με εγκλωβισμένο αέρα στο μίγμα ή αφροσκυροδέματα
3. στα σκυροδέματα με μόνο χονδρόκοκκα αδρανή

Το ελαφροσκυρόδεμα έχει ένα εύρος πυκνοτήτων μεταξύ 300-2000 kg/m³. Για το λόγο αυτό, ο Ευρωκώδικας 2 έχει ξεχωρίσει τα διάφορες ποικιλίες κονιαμάτων ως εξής: Σκυρόδεμα με μέση θλιπτική αντοχή 17 MPa και ξηρή πυκνότητα από 800-2000 kg/m³ χαρακτηρίζεται ως κατασκευαστικό ελαφροσκυρόδεμα. Αντίστοιχα, σκυρόδεμα με πυκνότητα μικρότερη από 800 kg/m³ χαρακτηρίζεται ως υπερελαφρό σκυρόδεμα.

Η προϊστορία έχει δείξει ότι το ελαφροσκυρόδεμα δεν αποτελεί σύγχρονη έμπνευση των κατασκευαστών και των μελετητών. Ήδη από την αρχαιότητα, κτίρια όπως το Πάνθεον και το Κολοσσαίο κατασκευάστηκαν από υλικά που σήμερα χρησιμοποιούνται ως αδρανή στα κονιάματα LWC, π.χ. η κίσηρη. Η πρώτη, ωστόσο, φορά που συναντάμε στη βιβλιογραφία κατασκευές με μερική ή και ολική χρήση ελαφροσκυροδέματος είναι το 1919, όταν η ανάγκη των ανθρώπων για εξοικονόμηση του χάλυβα οδήγησε το μηχανικό Stephen Hayde να φτιάξει το πρώτο πλοίο από ελαφροσκυρόδεμα. Προχωρώντας στα χρόνια, το ελαφροσκυρόδεμα απέκτησε ιδιαίτερη αναγνωρισιμότητα ως προϊόν, καθώς αξιοποιήθηκε σε κτίρια όπως το Park Plaza Hotel, το Southwestern Bell Telephone και το Prudential Life Building.

Η διαδικασία παραγωγής ελαφροσκυροδέματος είναι σχεδόν ίδια με αυτή των συμβατικών σκυροδεμάτων. Η ειδοποιός διαφορά έγκειται στην αντικατάσταση ενός μέρους του συνόλου ή και ολόκληρου του συνόλου των συνήθων αδρανών (χαλίκι, γαρμπίλι) από άλλα με αυξημένο πορώδες και μικρότερη πυκνότητα. Τα αδρανή αυτά μπορεί να είναι φυσικά υλικά όπως η κίσηρη, η σκωρία, ο διογκωμένος πηλός κ.α. Υπάρχουν, όμως και τεχνητά υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο μίγμα ελαφροσκυροδέματος και τα οποία έχουν αξιόπιστες μηχανικές ιδιότητες. Ένα από αυτά τα υλικά είναι και η διογκωμένη πολυστερίνη.

Η διογκωμένη πολυστερίνη ή EPS (Expanded Polystyrene) είναι ένα αφρώδες πλαστικό υλικό με κύρια χαρακτηριστικά το μικρό ειδικό βάρος και την ακαμψία του. Παράγεται από συμπιεγείς σταγόνες πολυστυρολίου αποτελείται σχεδόν εξ' ολοκλήρου από αέρα. Χρησιμοποιείται κυρίως ως θερμομονωτικό υλικό σε κτιριακές κατασκευές και το πλεονέκτημα του, όπως κάθε παράγωγο πλαστικού, είναι η ανθεκτικότητά του στο χρόνο με διάρκεια εργάσιμης ζωής τα 100 χρόνια.

Τα παραπάνω πλεονεκτήματα οδήγησαν τους ερευνητές στην αξιοποίηση της διογκωμένης πολυστερίνης για την παραγωγή ελαφροσκυροδέματος. Ένα μίγμα ελαφροσκυροδέματος με EPS αποτελείται από τσιμέντο, νερό, κόκκους διογκωμένης πολυστερίνης και σε συγκεκριμένες περιπτώσεις άμμο. Από την πρόσμιξη αυτών των αδρανών παράγεται ένα προϊόν αξιόπιστο σε εφαρμογές μόνωσης, διαμόρφωσης κλίσεων, τοποθέτησης δαπέδων καθώς και την κατασκευή πλακών σε κτίρια με φέρουσα τοιχοποιία.

Στη σύγχρονη εποχή είναι επιτακτική η ανάγκη να εστιάσουμε την προσοχή μας στο περιβάλλον, καθώς οι πράξεις μας έχουν αντίκτυπο σε αυτό. Συγκεκριμένα στον κατασκευαστικό κλάδο, θα πρέπει τα υλικά που χρησιμοποιούνται να αξιοποιούνται στο μέγιστο βαθμό για την αποφυγή της “φύρας” και επίσης να χρησιμοποιούνται τεχνικές βελτιστοποίησης για τη μείωση των αποβλήτων. Μια αξιόπιστη λύση είναι η ανακύκλωση ορισμένων υλικών.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η διογκωμένη πολυστερίνη είναι ένα υλικό ανθεκτικό στο χρόνο, γεγονός που του προσφέρει τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του. Μια πιθανή λύση θα ήταν η αντικατάσταση των κόκκων EPS του εμπορίου με ανακυκλωμένους στα μίγματα του ελαφροσκυροδέματος με στόχο τη μείωση της κατανάλωσης πόρων στις κατασκευές. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, θα διερευνήσουμε τις μηχανικές ιδιότητες δοκιμών ελαφροσκυροδέματος με ανακυκλωμένο EPS σε μίγματα τεσσάρων διαφορετικών πυκνοτήτων: 300 kg/m³, 400 kg/m³, 600 kg/m³ και 800 kg/m³. Τα παραπάνω δοκίμια εξετάστηκαν σε μια σειρά πειραματικών δοκιμών, σύμφωνα με τα αντίστοιχα Ευρωπαϊκά πρότυπα, προκειμένου να διερευνηθεί η συμπεριφορά τους και να αξιολογηθεί η αξιοπιστία του και η δυνατότητα αξιοποίησης του στις κατασκευές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Με βάση τη βιβλιογραφία, έχουν γίνει εκτενείς έρευνες σχετικές με την εξέταση της συμπεριφοράς δοκιμών ελαφροσκυροδέματος με διαφορετικά αδρανή. Στην εργασία των Akcaozoglu και Atis (2009), διερευνήθηκε η χρησιμότητα των κόκκων από τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο ή αλλιώς PET ως ελαφρύ αδρανές στη μίξη κονιαμάτων σκυροδέματος. Στόχος της έρευνας ήταν να εξεταστεί το κατά πόσο είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί ως δομικό υλικό, μίγμα ελαφροσκυροδέματος από αδρανή κόκκων πλαστικών αποβλήτων, άμμου και σκωρίας από υψικάμινο.

Για τις ανάγκες των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου Πόρτλαντ, ειδικού βάρους 3,09 g/cm³. Η σκόνη σκωρίας από υψικάμινο (GBFS) προήλθε από εργοστάσιο σιδήρου- χάλυβα στη Ν. Τουρκία, η χημική σύνθεση του οποίου φαίνεται στον πίνακα 2.1. Τα θρυμματισμένα κομμάτια πλαστικού χρησιμοποιήθηκαν ως ασβεστόλιθος. Προέρχονταν από τη συλλογή ανακυκλωμένων πλαστικών μπουκαλιών και στη συνέχεια ανακυκλώθηκαν σε κοκκομετρία με μηχανές. Το μέγιστο μέγεθος του ασβεστόλιθου από PET ήταν 4 mm και η πυκνότητα του 1,27 gr/ cm³. Η ταξινόμηση του παρουσιάζεται στον πιν. 2. Τέλος, εφαρμόστηκε αχτύπητη φυσική άμμος με μέγιστο μέγεθος 4 mm. Η απορροφητικότητα της άμμου ήταν 0,83% και η σχετική πυκνότητα σε κορεσμένη επιφάνεια ξηρής κατάστασης ήταν 2,66 gr/ cm³. Η κατανομή της άμμου μετρήθηκε σύμφωνα με το TS 706 EN 1620 (2003) και παρουσιάζεται

στους πίνακες 2.2 και 2.3 με τις προδιαγραφές. Από αυτούς τους πίνακες φαίνεται ότι η τρέχουσα άμμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή κονιαμάτων.

Πίνακας. 2.1. Χημική σύνθεση του NPC και του GBFS

Oxide (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
NPC	20.23	5.78	4.07	61.95	2.94	2.66	0.87	0.11	0.72
GBFS	36.70	14.21	0.98	32.61	10.12	0.99	0.76	0.42	–

Πίνακας 2.2. Διαβάθμιση αδρανών από PET και της άμμου.

particle size range (mm)		PET (%)	Sand (%)
d_{max}	d_{min}		
4	2	15	27.3
2	1	67	19
1	0.5	16	17.3
0.5	0.25	2	28.4
0.25	0	0	8
		100	100

Πίνακας 2.3. Διαβάθμιση άμμου με τυπικό όριο.

Sieve size (mm)	Passed			
	TS 706 lower limit	TS 706 medium limit	TS 706 upper limit	Sand used
4	100	100	100	100
2	59	75	84	72.7
1	33	57	66	53.7
0.5	20	36	47	36.4
0.25	8	14	25	8

Για τη μελέτη χρησιμοποιήθηκε λόγος αναλογίας PET/συνδετικού 0,5 και νερού/συνδετικού 0,45 με NPC και GBFS ως συνδετικά. Το GBFS αντικατέστησε το 50% του τσιμέντου. Τα μίγματα κονιαμάτων M1 και M2 ετοιμάστηκαν μόνο με κόκκους PET , ενώ τα δοκίμια M3 και M4 περιείχαν και άμμο. Όλα τα δοκίμια δοκιμάστηκαν για αντοχή σε συμπίεση, υδατοαπορροφητικότητα, σε ζύγισμα βάρους μονάδας, βάθος ανθρακοποίησης και συστολή ξήρανσης. Τα πειράματα αντοχής και υδατοαπορροφητικότητας διεξήχθησαν σύμφωνα με τον κανονισμό 3453. Όλα τα πειράματα έγιναν σε 3 δοκίμια και έπειτα υπολογίστηκε ο μέσος όρος για την ανάλυση.

Δοκιμές για την αντοχή και άλλες ιδιότητες των δοκιμίων διενεργήθηκαν με βάση τα πρότυπα TS EN 1015-11 (2000) και TS EN 3624 (1981). Οι μετρήσεις της εφελκυστικής τάσης και της θλιπτικής αντοχής πραγματοποιήθηκαν σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα μέχρι τις 180 ημέρες. Οι τιμές συρρίκνωσης κατά την ξήρανση προσδιορίστηκαν

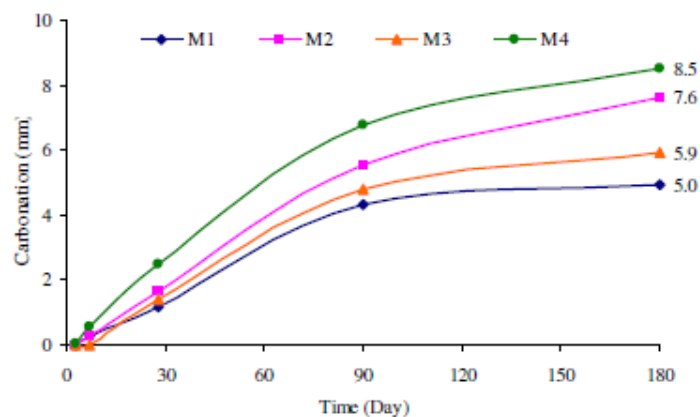
χρησιμοποιώντας πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 25*25*285 mm τα οποία τοποθετήθηκαν σε ειδικό θάλαμο θερμοκρασίας 22 ± 2 °C και υγρασίας 65%. Σύμφωνα με την επιτροπή ACI, το δομικό ελαφροσκυρόδεμα πρέπει να έχει συμπίεστική αντοχή μεγαλύτερη από 15-17 MPa. Οι τέσσερις αναμιγνυόμενες ύλες που παρουσιάζονται στον πίνακα 2.4 συμμορφώνονται με αυτές τις απαιτήσεις. Οι τιμές θλιπτικής αντοχής των κονιαμάτων ήταν μεγαλύτερες από 17 MPa στις 28 ημέρες. Οι αναμιγνυόμενες ύλες που περιείχαν άμμο και πλαστικό μαζί είχαν υψηλότερη θλιπτική αντοχή από το πλαστικό μόνο του. Το ελεγχόμενο τσιμεντοκονίαμα είχε θλιπτική αντοχή 37,3 MPa, 46,3 MPa και 48,9 MPa στις 7, 28 και 90 ημέρες αντίστοιχα. Τα κονιάματα που περιείχαν αδρανή από πλαστικό είχαν 50% μικρότερη αντοχή των κονιαμάτων κανονικού βάρους. Οι εφελκυστικές αντοχές των κονιαμάτων με PET ήταν κοντά σε αυτές των κονιαμάτων που περιείχαν PET και άμμο. Η θλιπτική αντοχή αναπτύχθηκε γρήγορα μέχρι και τις 28 ημέρες, έπειτα όμως επιβραδύνθηκε. Τα δοκίμια με GBFS ξεπέρασαν τα δοκίμια τσιμέντου στις 28 ημέρες. Η αντικατάσταση του τσιμέντου με GBFS προκάλεσε αύξηση στη θλιπτική αντοχή. Οι καμπτικές τάσεις ήταν ίσες με τα δοκίμια τσιμέντου.

Πίνακας 2.4 Φρέσκο και ξηρό ειδικό βάρος των κονιαμάτων.

Mixture name	Fresh unit weight	Dry unit weight		
		3 days	28 days	180 days
M1	1679	1578	1561	1556
M2	1694	1576	1552	1533
M3	1942	1848	1840	1828
M4	1937	1795	1789	1781

Όσον αφορά τη μέτρηση της υδατοαπορροφητικότητας διαπιστώθηκε πως το ελαφροσκυρόδεμα απορροφά περισσότερο νερό από το κανονικό. Τα δείγματα με μόνο PET είχαν απορρόφηση νερού εντός ορίων του ελαφροσκυροδέματος. Στις 28 ημέρες, τα τροποποιημένα με GBFS δοκίμια είχαν υψηλότερα ποσοστά υδατοαπορροφητικότητας και πυκνότητας από τα κονιάματα τσιμέντου. Τα δοκίμια M3 και M4 (πλαστικό και άμμος) είχαν χαμηλότερα ποσοστά απορροφητικότητας από τα M1 και M2 αλλά υψηλότερες πυκνότητες.

Για τη μέτρηση του βάθους ανθρακοποίησης των σκυροδεμάτων χρησιμοποιήθηκαν διαλύματα φαινολοφθαλείνης. Οι μη ανθρακοποιημένες περιοχές έγιναν μωβ, ενώ οι ανθρακοποιημένες περιοχές παρέμειναν χρωματιστές. Τα αποτελέσματα (Πιν. 2.5) έδειξαν ότι το βάθος ανθρακοποίησης αυξήθηκε με τον χρόνο καθώς το διοξείδιο του άνθρακα εισχωρούσε στα δείγματα. Τα σκυροδέματα με ανακυκλωμένο PET και άμμο ήταν πιο πορώδη, επιτρέποντας έτσι τη διείσδυση μεγαλύτερης ποσότητας CO₂.

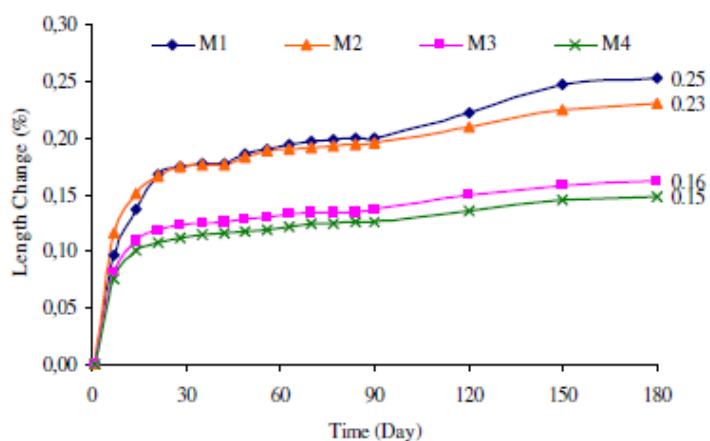


Σχήμα 2.1. Διάγραμμα βάθους ανθρακοποίησης

Πίνακας 2.5. Τιμές βάθους ανθρακοποίησης δοκιμίων.

Mixture	3 days	7 days	28 days	90 days	180 days
M1	0	0.3	1.2	4.3	5.0
M2	0	0.3	1.7	5.5	7.6
M3	0	0	1.4	4.8	5.9
M4	0	0.6	2.5	6.8	8.5

Ο πίνακας 2.6 και το σχήμα 2.2 δείχνουν τις τιμές της συστολής ξήρανσης των κονιαμάτων με διαφορετικά αδρανή. Η χρήση PET και δοσολογίας τσιμέντου αύξησε τη συρρίκνωση, όπως φαίνεται στους συνδυασμούς M1 και M2. Ωστόσο, η προσθήκη άμμου στα αδρανή από PET στα δοκίμια M3 και M4 οδήγησε σε χαμηλότερες τιμές συρρίκνωσης λόγω της μείωσης της δοσολογίας τσιμέντου και της αποφυγής συρρίκνωσης του τσιμεντοπολτού.. Η χρήση GBFS στη θέση του τσιμέντου μείωσε επίσης τη συρρίκνωση σε όλα τα είδη αδρανών.



Σχήμα 2.2. Διάγραμμα συστολής ξήρανσης

Πίνακας 2.6. Τιμές συστολής ξήρανσης των δοκιμίων

Mixture	Days															
	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	90	120	150	180
M1	0.10	0.14	0.17	0.17	0.18	0.18	0.19	0.19	0.19	0.20	0.20	0.20	0.20	0.22	0.25	0.25
M2	0.12	0.15	0.17	0.17	0.18	0.18	0.18	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.21	0.23	0.23
M3	0.08	0.11	0.12	0.12	0.12	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.14	0.15	0.16	0.16
M4	0.08	0.10	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.13	0.14	0.15	0.15

Από αυτήν την έρευνα στο εργαστήριο, εξήχθησαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

1. Τα κονιάματα που περιείχαν μόνο ανακυκλωμένο PET, τα κονιάματα που περιείχαν ανακυκλωμένο PET και άμμο και τα κονιάματα με τη σκωρία ως αντικαταστάτη του τσιμέντου κατατάσσονται στην κατηγορία ελαφροσκυροδέματος.
2. Οι τιμές απορρόφησης νερού των κονιαμάτων που παράχθηκαν σε αυτήν τη μελέτη βρίσκονταν εντός των ορίων της τιμής απορρόφησης ελαφροσκυροδέματος.
3. Οι τιμές συρρίκνωσης των μιγμάτων που περιείχαν ανακυκλωμένα PET ήταν υψηλότερες από τις τιμές συρρίκνωσης των μιγμάτων που περιείχαν ανακυκλωμένα PET και άμμο.
4. Η χρήση GBFS μείωσε το βάρος των δειγμάτων και τη συρρίκνωση τους. Αυτό αύξησε την συμπίεστική αντοχή και το βάθος ανθρακοποίησης των δειγμάτων.
5. Το βάρος μονάδας και οι τιμές συμπίεσης και επιμήκυνσης-έλλειψης αντοχής και τα βάθη ανθρακοποίησης των κονιαμάτων που περιέχουν ανακυκλωμένο PET και άμμο μαζί ήταν υψηλότερα από τα κονιάματα που περιέχουν μόνο ανακυκλωμένο PET. Οι τιμές συρρίκνωσης και αναλογίες απορρόφησης νερού των κονιορτών που περιέχουν ανακυκλωμένο PET και άμμο μαζί ήταν χαμηλότερες από τους κονιορτούς που δεν περιείχαν άμμο.
6. Η χρήση θρυμματισμένων αποβλήτων PET και GBFS σε κονίαμα θα ήταν χρήσιμη για το περιβαλλοντικό ζήτημα.

Η έρευνα των Chen και Liu, η οποία εκπονήθηκε το 2013, εξέτασε τη χρήση αφρού για τη μερική αντικατάσταση των σφαιριδίων πολυστερίνης με αποτέλεσμα μια αφρόσκινη EPS που είναι εξαιρετικά ελαφριά. Επίσης προστέθηκε σιλικόνη και επαναδιασπειρόμενη σκόνη latex στο τσιμέντο για τη βελτίωση της αντοχής της σύνδεσης. Εξετάστηκαν οι ιδιότητες της αφρόσκινης EPS, συμπεριλαμβανομένης της εργασιμότητας, της θλιπτικής αντοχής, των καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης και της θερμικής αγωγιμότητας.

Οι μίξεις κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας τσιμέντο Portland τύπου Ι ASTM με θλιπτική αντοχή 28 ημερών ίση με 72,5 MPa. Το υψηλής αλουμίνας τσιμέντο (HAC) χρησιμοποιήθηκε ως μερική αντικατάσταση του OPC και έγινε προσθήκη ατμού πυριτίου για τη βελτίωση της αντοχής στη συγκόλληση. Ίνες πολυπροπυλενίου προστέθηκαν για τη βελτίωση της εφελκυστικής αντοχής, και εμπορικά διαθέσιμοι σφαιρικοί κόκκοι EPS

χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία ελαφρού σκυροδέματος. Ένας υπερπλαστικοποιητής βασισμένος σε ναφθαλίνη και ένας παράγοντας αφρού βασισμένος σε πρωτεΐνη ζώων χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία εργάσιμων μιγμάτων και παγιδευμένων αέριων φυσαλίδων. Προστέθηκε επίσης επαναδιασπειρόμενη σκόνη latex για τη βελτίωση της συγκόλλησης μεταξύ των κόκκων EPS και του τσιμεντοπολτού. Οι αναλογίες των μιγμάτων της βασικής μήτρας περιλαμβάνονται στον πίνακα 2.7.

Πίνακας 2.7. Αναλογίες μιγμάτων βασικής μήτρας σκυροδέματος.

Mix component	Proportion (kg/m ³)
Cement	1230.0
Silica fume	123.0
High alumina cement	73.8
Polymer latex	61.5
Superplasticizer	1.14
PP fiber	0.30
Water	371.0
Matrix density (kg/m ³)	1860

Για να μελετήσουμε την επίδραση του περιεχομένου αφρού στις ιδιότητες του αφροσκληρυμένου σκυροδέματος EPS, παρασκευάστηκαν μίγματα με πυκνότητες 400 kg/m³ και 800 kg/m³ με διαφορετικά ποσοστά όγκου αφρού. Οι 10 σχεδιασμοί μίγματος παρουσιάζονται στους πίνακες 4 και 5. Η ανάμιξη του αφροσκληρυμένου σκυροδέματος έγινε σε αναδευτήρα χωρητικότητας 50 dm³ χρησιμοποιώντας μια συγκεκριμένη ακολουθία: ανάμιξη σκόνης και ίνας προπυλενίου, προσθήκη νερού και υπερπλαστικοποιητή μέχρι να επιτευχθεί μια ομοιόμορφη και ρευστή μήτρα, προσθήκη κόκκων EPS και ανάμιξη, προσθήκη παράγοντα αφρού για να δημιουργηθεί αφρός ενώ ο αναδευτήρας έτρεχε σε υψηλότερη ταχύτητα και, τέλος, η λειτουργία του αναδευτήρα σε υψηλή ταχύτητα για περίπου 2 λεπτά για να δημιουργηθεί ένα ομοιόμορφο και ρευστό μίγμα. Η πυκνότητα και η εργασιμότητα κάθε φρέσκου σκυροδέματος μετρήθηκε αμέσως μετά την ανάμιξη. Τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν, καλύφθηκαν με υγρές σακούλες 10 ώρες μετά την κατασκευή, απομακρύνθηκαν από το καλούπι μετά από 24 ώρες και αποθηκεύτηκαν σε δωμάτιο υγρασίας (95 ± 3% σχετική υγρασία, 22 ± 2 C) μέχρι τη δοκιμή.

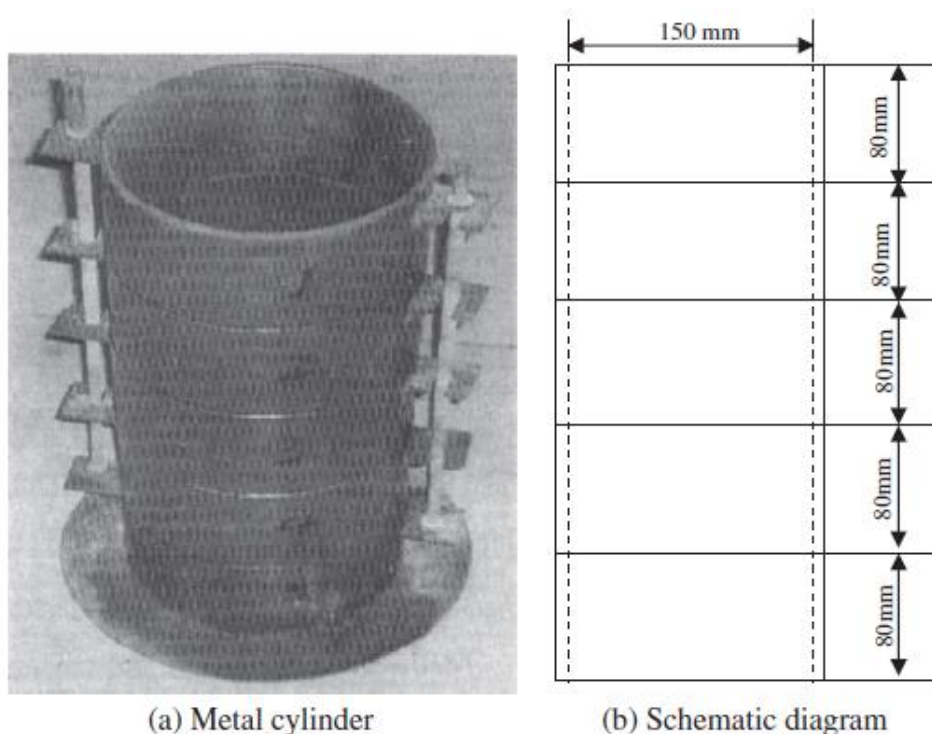
Πίνακας 2.8. Μίγμα πυκνότητας 400kg/m³

Mix	F ₄₀₀₋₀	F ₄₀₀₋₅	F ₄₀₀₋₁₀	F ₄₀₀₋₁₅	F ₄₀₀₋₂₀
Cement	264.0	264.0	264.0	264.0	264.0
Silica fume	26.4	26.4	26.4	26.4	26.4
High alumina cement	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8
Polymer latex	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2
Superplasticizer	0.245	0.245	0.245	0.245	0.245
PP fiber	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Water	79.8	79.8	79.8	79.8	79.8
EPS beads	23.5	22.0	20.5	19.0	17.6
P _{EPS} ^a (%)	78.5	73.5	68.5	63.5	58.5
Foaming agent	0	0.85	0.90	0.93	0.98
P _{foam} ^a (%)	0	5	10	15	20

Πίνακας 2.9. Μίγμα πυκνότητας 800kg/m³

Mix	F ₈₀₀₋₀	F ₈₀₀₋₅	F ₈₀₀₋₁₀	F ₈₀₀₋₁₅	F ₈₀₀₋₂₀
Cement	529.0	529.0	529.0	529.0	529.0
Silica fume	52.9	52.9	52.9	52.9	52.9
High alumina cement	31.7	31.7	31.7	31.7	31.7
Polymer latex	26.4	26.4	26.4	26.4	26.4
Superplasticizer	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49
PP fiber	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Water	160.0	160.0	160.0	160.0	160.0
EPS beads	17.1	15.6	14.1	12.6	11.1
P _{EPS} ^a (%)	57.0	52.0	47.0	42.0	37.0
Foaming agent	0	0.85	0.90	0.93	0.98
P _{foam} ^a (%)	0	5	10	15	20

Για να αξιολογηθεί η ομοιογένεια του σκυροδέματος κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης, χρησιμοποιήθηκε ένας μεταλλικός κύλινδρος με πέντε στρώματα. Ο κύλινδρος είχε εσωτερική διάμετρο 150 mm και κάθε στρώμα είχε ύψος 80 mm. Το φρέσκο μίγμα σκυροδέματος χυνόταν στον κύλινδρο και στη συνέχεια, ο κύλινδρος δονούνταν σε ένα τραπέζι δονήσεων για 25 δευτερόλεπτα. Μετά τη δόνηση, ζυγίστηκε η μάζα του σκυροδέματος σε κάθε στρώμα και υπολογίστηκε η φρέσκια πυκνότητά του. Με τη σύγκριση της φρέσκιας πυκνότητας του σκυροδέματος σε διαφορετικά στρώματα, αξιολογήθηκε η ομοιογένειά του.



Σχήμα 2.3. Σχηματική απεικόνιση μεταλλικού κυλίνδρου.

Η θερμική αγωγιμότητα μετρήθηκε σε ξηρά ημικυβικά δοκίμια χρησιμοποιώντας μη σταθερή μέθοδο με ένα στοιχείο Εφήμερης Πηγής Θερμότητας (TPS), πηγή ισχύος, σταθμό απόκτησης ισχύος και ένα μικροϋπολογιστή για έλεγχο και επεξεργασία δεδομένων. Δύο

χαλύβδινες πλάκες εισήχθησαν μεταξύ του TPS αισθητήρα και των μπλοκ του ίδιου υλικού για προστασία και διανομή ροής σε μια αντιπροσωπευτική επιφάνεια. Η θερμική αγωγιμότητα υπολογίστηκε άμεσα από υπολογιστή. Οι δοκιμές συμπίεσης διενεργήθηκαν σε μηχανήμα υδραυλικής συμπίεσης (MTS) χρησιμοποιώντας ελεγχόμενο ρυθμό παραμόρφωσης. Φορτία και παραμορφώσεις μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια των δοκιμών χρησιμοποιώντας αισθητήρες μετατόπισης και μετρητές παραμόρφωσης.

Η θεωρητική ανάλυση έδειξε ότι οι πόροι δεν μπορούν να υπερβούν το 74,05% του όγκου της μήτρας λόγω περιορισμών στο μέγεθος των πόρων. Ωστόσο, η συμπίεση και η σύνδεση των δομών των πόρων, μικρές διαφορές στις διαμέτρους των κόκκων EPS και οι συνεισφορές των αέριων πόρων μπορούν να επιτρέψουν την υπέρβαση αυτού του ορίου. Ένας παράγοντας αφρού χρησιμοποιείται για να μειώσει την πυκνότητα της μήτρας και να αποτρέψει τους κόκκους EPS από το να επιπλέουν κατά την ανάμιξη και την πήξη, να επεκτείνει τον όγκο του μίγματος για να καλύψει όλους τους κόκκους EPS και να δημιουργήσει δομή μικροπόρων κενών ανάμεσα στους κόκκους EPS.

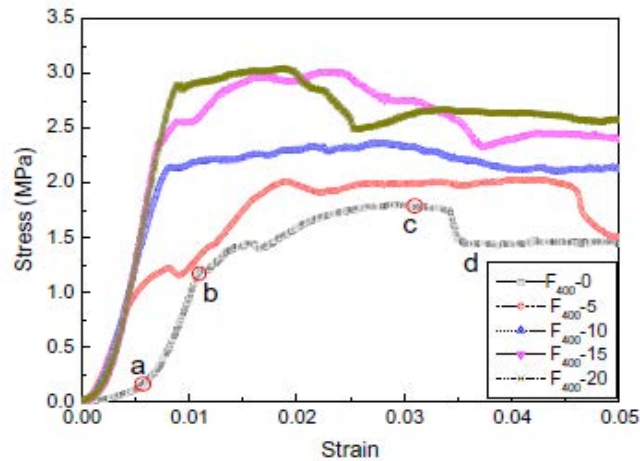
Η εργασιμότητα του φρέσκου σκυροδέματος από EPS αξιολογήθηκε χρησιμοποιώντας ως μέτρο την καθίζηση. Η προσθήκη αφρού αύξησε την καθίζηση από 10 mm σε 50 mm, επιτρέποντας στις μικρές φυσαλίδες να λιπαίνουν τον πολτό και να αυξάνουν την καθίζηση. Ωστόσο, καθώς ο αφρός αυξανόταν στο 15%, η αύξηση της καθίζησης έγινε λιγότερο εμφανής λόγω του μεγάλου αριθμού ελαφρών κόκκων EPS στον πολτό. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν στο μίγμα σκυροδέματος με πυκνότητα 800 kg/m³.

Η μελέτη αξιολόγησε το διαχωρισμό του σκυροδέματος από EPS με τη σύγκριση της πυκνότητας των διαφορετικών στρωμάτων. Ο διαχωρισμός παρατηρήθηκε στο σκυρόδεμα χωρίς αφρό, αλλά μειώθηκε με την αύξηση του περιεχομένου αφρού. Στο μίγμα με περιεχόμενο αφρού 15%, δεν παρατηρήθηκε διαχωρισμός, αλλά υπερβολικό περιεχόμενο αφρού (20%) οδήγησε σε αύξηση του διαχωρισμού και καταπόνηση της επιφάνειας. Για σκυρόδεμα με πυκνότητα 800 kg/m³, ο διαχωρισμός ήταν μεγαλύτερος λόγω της υψηλότερης περιεκτικότητας τσιμεντοπολτού, αλλά η προσθήκη αφρού μείωσε το διαχωρισμό. Η βέλτιστη περιεκτικότητα αφρού ήταν το 10% για τη μείωση του διαχωρισμού, με τον αφρό να παίζει ζωτικό ρόλο στην παραγωγή ομογενούς σκυροδέματος από EPS.

Εξετάζοντας τη θλιπτική αντοχή σε όλα τα δοκίμια, παρατηρήθηκε ότι στα δοκίμια με πυκνότητα 400 kg/m³, το 90% της θλιπτικής αντοχής των 28 ημερών αναπτύχθηκε σε 7 μόλις ημέρες, εκτός από το δοκίμιο F400-0. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην υψηλή περιεκτικότητα του HAC στο μίγμα, καθώς και στη χαμηλότερη θερμική χωρητικότητα του σκυροδέματος από EPS. Τα δοκίμια των 800 kg/m³ ανέπτυξαν το 80% της μέγιστης θλιπτικής αντοχής τους στις 7 ημέρες εξαιτίας της χαμηλότερης θερμικής αγωγιμότητάς του. Η αύξηση του περιεχομένου αφρού EPS οδήγησε σε μια μικρή αύξηση της αντοχής μετά από 7 ημέρες, υποδεικνύοντας ότι η θερμική αγωγιμότητα επηρεάζει σημαντικά την αρχική ενίσχυση.

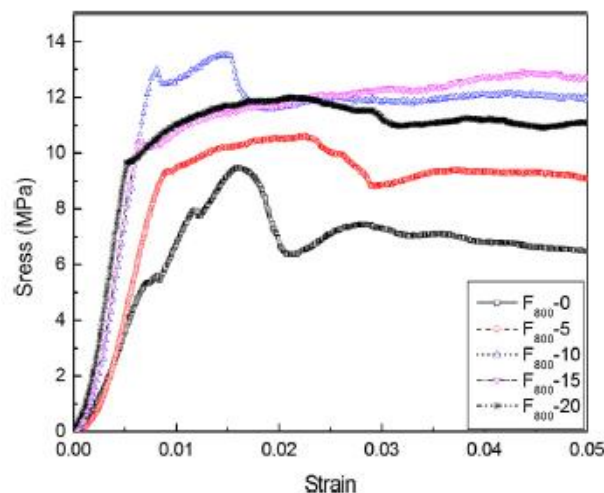
Η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης χρησιμοποιείται για να περιγράψει τα χαρακτηριστικά του υλικού του σκυροδέματος. Οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν την καμπύλη είναι η μέγιστη τάση, η ελαστικότητα, η τελική παραμόρφωση και η απόλυτη τελική παραμόρφωση. Σε αυτήν τη μελέτη, ήταν δύσκολο να καθοριστεί η απόλυτη τελική παραμόρφωση λόγω της έλλειψης καθοδηγητικού σταδίου. Οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για το αφρό-σκυρόδεμα από EPS ήταν αρκετά διαφορετικές από αυτές του

κανονικού και ελαφρο-σκυροδέματος. Η καμπύλη μπορεί να διαχωριστεί σε τέσσερις περιοχές: αργή αύξηση της τάσης (ελαστική περιοχή), γραμμική αύξηση της παραμόρφωσης με την τάση (ελαστικό στάδιο), αλληλεπίδραση της παραμόρφωσης και της τάσης (περιοχή διαρροής) και καθοδικό στάδιο της καμπύλης.



Σχήμα 2.4. Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για το δοκίμιο των 400 kg/m³

Η παραμόρφωση (ϵ) για τη μέγιστη τάση για το αφρό-σκυρόδεμα EPS στη μελέτη αυτή κυμαινόταν από 0,01 έως 0,03, ενώ για το ελαφροσκυρόδεμα (LWAC) και το απλό σκυρόδεμα κανονικής αντοχής (NWC), η τιμή ϵ είναι στο εύρος των 0,0024-0,003 και 0,0015-0,002 αντίστοιχα. Το αφρό-σκυρόδεμα EPS έδειξε βελτιωμένη αντοχή στη ρηγμάτωση λόγω περιορισμένων αλλαγών μήκους και επέδειξε υψηλή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας υπό συμπίεση. Η σταδιακή αστοχία του αφρό-σκυροδέματος EPS αποδίδεται στην καλής ποιότητας απορρόφηση ενέργειας των κόκκων EPS, καθιστώντας το πιο πλαστικό από το κανονικό σκυρόδεμα και άλλα ελαφριά σκυροδέματα που έχουν μελετηθεί στο παρελθόν.



Σχήμα 2.5. Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για το δοκίμιο των 800 kg/m³

Το αφρο-σκυρόδεμα EPS έχει μικρότερη θερμική αγωγιμότητα από προηγούμενα ελαφρά σκυροδέματα με παρόμοια πυκνότητα ή αντοχή και η θερμική αγωγιμότητα του μειώνεται με την αύξηση του περιεχομένου αφρού. Είναι κατάλληλο υλικό για κατασκευή των μπλοκ ή διαχωριστικών τοίχων λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας, του χαμηλού βάρους, της σχετικά υψηλής αντοχής και της δυνατότητας να μορφωθεί σε οποιοδήποτε σχήμα. Οι κλειστοί πόροι του αέρα στο πορώδες του σκυροδέματος μειώνουν τη θερμική αγωγιμότητά του, λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας του αέρα.

Καταλήγοντας, μέσα από αυτή την έρευνα προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

1. Το βέλτιστο περιεχόμενο αφρού για το αφρο-σκυρόδεμα EPS είναι 10% έως 15% του όγκου, το οποίο βελτιώνει τη δυνατότητα εργασιμότητας και μειώνει την ανύψωση των σφαιριδίων EPS στην επιφάνεια.
2. Η χρήση αφρού με διάμετρο 25-100 μm βελτιώνει τη θλιπτική αντοχή, με μια ποσότητα αφρού 15% να οδηγεί στο διπλάσιο αποτέλεσμα σε σχέση με το σκυρόδεμα EPS χωρίς αφρό.
3. Το αφρο-σκυρόδεμα EPS έχει μια μοναδική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης με υψηλή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.
4. Η ενσωμάτωση αφρού μειώνει σημαντικά τη θερμική αγωγιμότητα στα μίγματα των σκυροδεμάτων EPS και, τέλος, τα δοκίμια από σκυρόδεμα EPS με πυκνότητες 400 kg/m^3 και 800 kg/m^3 που δημιουργήθηκαν, είναι κατάλληλα για χρήση στην κατασκευαστική βιομηχανία.

Μία ακόμη έρευνα που έχει ενδιαφέρον είναι αυτή των Tittarelli, Giosue, Mobili κ.α. οι οποίοι εργάστηκαν πάνω σε δοκίμια ελαφροσκυροδέματος με ανακυκλωμένο EPS και τα συγκρίναν με αντίστοιχα που είχαν πρωτογενές EPS. Για την έρευνα τους αυτή, κατασκεύασαν δοκίμια δομικού ελαφροσκυροδέματος με πυκνότητες από 1400-2000 kg/m^3 και θλιπτική αντοχή μεγαλύτερη από 18 MPa, δοκίμια απλού ελαφροσκυροδέματος με πυκνότητες από 800-1400 kg/m^3 και θλιπτική αντοχή 7-18 MPa και δοκίμια ελαφροσκυροδέματος θερμομόνωσης με πυκνότητες 300-800 kg/m^3 και θλιπτικής αντοχής 0.5-7 MPa. Για κάθε κατηγορία πυκνοτήτων χρησιμοποιήθηκε η ίδια ποσότητα παραγόμενου και ανακυκλωμένου EPS, το οποίο αντικατέστησε το 33% , το 66% και το 100% της περιεχομένου όγκου άμμου στο μίγμα.

Για την παρασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου Portland με λόγο νερού προς τσιμέντο ίσο 0,55 κατά βάρος και αντίστοιχο λόγο αδρανών προς τσιμέντο ίσο με 6 κατ' όγκο. Για την πρόσμιξη χρησιμοποιήθηκε φυσική ασβεστώδης άμμος και σφαιρίδια από EPS του εμπορίου με ειδικό βάρος 0,018 g/cm^3 που αφορούν την πρώτη κατηγορία δοκιμίων και κόκκοι ανακυκλωμένου EPS με ίδιο ειδικό βάρος, οι οποίοι συλλέχθηκαν από τοπική βιομηχανία συσκευασίας φαγητού. Στον πίνακα 2.10 φαίνονται οι ονομασίες των δοκιμίων με

τις αντίστοιχες προσμίξεις και τις προκύπτουσες πυκνότητες. Τα δοκίμια με το γράμμα V αναφέρονται στα μίγματα από πρωτογενές (Virgin) EPS, τα R στα αντίστοιχα από ανακυκλωμένο EPS (Recycled), ενώ υπάρχει και μια τρίτη κατηγορία HR (Hydrophobic Recycled) που αφορά δοκίμια με ένα επιπλέον πρόσμικτο ένα υδρόφοβο υλικό.

Πίνακας 2.10. Μίξεις δοκιμών και φρέσκια πυκνότητα.

	Cement	Water	Sand	Virgin EPS	Recycled EPS	Slump (mm)	Density (kg/m ³)
V33	357	196	1224	4.10	-	120	1812
V66	357	196	621	8.19	-	116	930
V100	357	196	-	12.41	-	110	290
R33	357	196	1224	-	4.10	120	1900
R66	357	196	621	-	8.19	118	1370
R100	357	196	-	-	12.41	115	600
HR33	357	196	1224	-	4.10	125	1770
HR66	357	196	621	-	8.19	120	1320
HR100	357	196	-	-	12.41	118	680

Οι πειραματικές διαδικασίες που διενεργήθηκαν στα πλαίσια της έρευνας και της σύγκρισης των δοκιμών αφορούσαν την εργασιμότητα, τις μηχανικές ιδιότητες και τη θερμική αγωγιμότητα τους. Συγκεκριμένα, διεξήχθησαν πειράματα μέτρησης της ρευστής πυκνότητας, της θλιπτικής και καμπτικής αντοχής καθώς και του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας, της υδατοαπορροφητικότητας, της διαπερατότητας των ατμών και, τέλος, της θερμικής αγωγιμότητας. Όλα τα πειράματα ακολούθησαν τα αντίστοιχα ευρωπαϊκά πρότυπα.

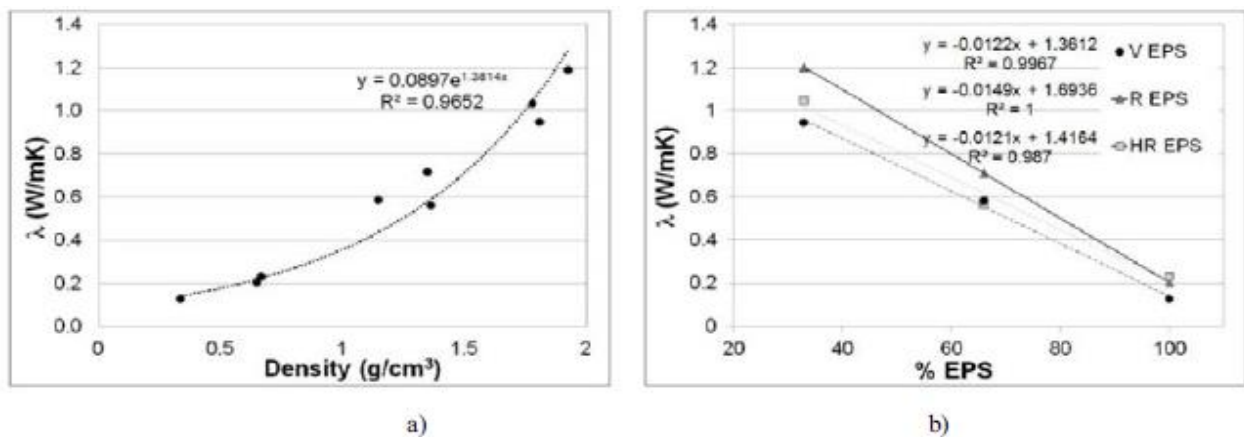
Εξετάζοντας την εργασιμότητα ανάμεσα στις δύο βασικές κατηγορίες δοκιμών (Virgin και Recycled EPS) δεν παρατηρήθηκε κάποια ουσιαστική διαφορά στα μίγματα που παρασκευάστηκαν. Για την ίδια δοσολογία στον όγκο των δοκιμών, το ανακυκλωμένο EPS έχει μεγαλύτερη πυκνότητα από το αντίστοιχο παραγόμενο. Η τραχιά επιφάνεια σε συνδυασμό με την καλύτερη διανομή των κόκκων του ανακυκλωμένου EPS συντέλεσαν στην κατασκευή πιο συμπαγών και ανθεκτικών κονιαμάτων. Στα δομικά κονιάματα (HR33), η πρόσμιξη υδρόφοβου υλικού μειώνει ελαφρώς την πυκνότητα αυξάνοντας το πορώδες. Ωστόσο, αυτή η τάση δεν είναι εμφανής όταν προστίθενται υψηλές δοσολογίες EPS (HR66-HR 100%), αφού υπάρχει λιγότερη πάστα τσιμέντου. Επιπλέον, ο αρνητικός αντίκτυπος της πρόσμιξης σιλανίου στο πορώδες αντισταθμίζεται εν μέρει από το θετικό αποτέλεσμα στη μακροπόρωση, χάρη στην δράση πλαστικοποίησης που παρέχει το σιλάνιο.

Η αντικατάσταση της άμμου με το EPS οδήγησε σε μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμών λόγω της μηδενικής αντοχής του EPS και της χαμηλής συγκολλητικής δύναμης μεταξύ του τσιμεντοπολτού και της λείας επιφάνειας του EPS. Ωστόσο, για την ίδια ποσότητα αντικατάστασης άμμου με EPS, η θλιπτική αντοχή εμφανίστηκε τέσσερις φορές υψηλότερη σε σύγκριση με τα αντίστοιχα δοκίμια πρωτογενούς EPS. Η προσθήκη του υδρόφοβου προσμίκτου συνέβαλε σε μια μικρή μείωση της θλιπτικής αντοχής στα ελαφριά κονιάματα καθώς και στα κονιάματα μέτριας αντοχής. Η προσθήκη σιλανούχου προσμίκτου σε

θερμομονωτικά κονιάματα αυξάνει το τριχοειδές πορώδες αλλά μειώνει το μακρο-πορώδες. Η πρώιμη αύξηση της μηχανικής αντοχής βελτιώνεται με αυξημένη δοσολογία του EPS, όπως φαίνεται και σε μελέτες τροποποιημένων αποβλήτων EPS. Ωστόσο, η παρουσία σιλανούχου προσμίκτου καθυστερεί την ανάπτυξη της μηχανικής αντοχής. Η χρήση ανακυκλωμένου EPS αντί για πρωτογενούς EPS ενισχύει ελαφρώς την πρώιμη θλιπτική αντοχή. Ακόμη και με ανακυκλωμένο EPS, η σχέση μεταξύ θλιπτικής αντοχής και πυκνότητας ακολουθεί εκθετικό μοτίβο, παρόμοιο με το μίγμα από κόκκους EPS με ιπτάμενη τέφρα. Το σιλανούχο πρόσμικτο και το ανακυκλωμένο EPS επηρεάζουν επίσης τη δυναμική ελαστική αντίσταση με παρόμοιο τρόπο με τη συμπίεστική αντοχή.

Η απορρόφηση νερού είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας των κατασκευαστικών υλικών καθώς επηρεάζει τις μονωτικές ιδιότητες τους. Ο συντελεστής τριχοειδούς υδατοαπορροφητικότητας (CA) μειώνεται με αυξανόμενη δοσολογία του EPS λόγω της υδρόφοβης φύσης του. Σε ποσοστό 33% δοσολογίας EPS, το μίγμα με ανακυκλωμένο EPS έχει μικρότερη υδατοαπορροφητικότητα από το πρωτογενές EPS λόγω του ανεπίπεδου σχήματος του ανακυκλωμένου EPS. Ωστόσο, σε υψηλότερα επίπεδα EPS, η τάση αντιστρέφεται λόγω της παρουσίας υψηλότερου μακροπορώδους στο μίγμα από πρωτογενές EPS λόγω του σφαιρικού του σχήματος. Το υδρόφοβο πρόσμικτο μειώνει σημαντικά το συντελεστή υδατοαπορροφητικότητας (CA) κατά τουλάχιστον 50% για όλες τις δοσολογίες του EPS, ενισχύοντας την ανθεκτικότητα του κονιάματος. Η προσθήκη του EPS ως αργίλιο δεν έχει σημαντική επίδραση στη διαπερατότητα του ατμού. Η αντικατάσταση του πρωτογενούς EPS με το ανακυκλωμένο EPS δεν επηρεάζει σημαντικά την αντίσταση των υδρατμών, εκτός από το μίγμα V100 με υψηλό μακροπορώδες. Το υδρόφοβο πρόσμικτο μειώνει ελαφρώς την μεταβλητή μ (μέτρο αντίστασης ατμών) αυξάνοντας το μακροπορώδες της πάστας τσιμέντου.

Μελετώντας την επίδραση του EPS στη θερμομόνωση, παρατηρήθηκε ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό του EPS, η θερμική αγωγιμότητα του κονιαμάτος μειώνεται εκθετικά με την πυκνότητα (Σχήμα). Η χρήση ανακυκλωμένου EPS μειώνει την θερμομονωτική απόδοση σε σύγκριση με το πρωτογενές EPS, αλλά το υδρόφοβο πρόσμικτο αναπληρώνει εν μέρει αυτό το αποτέλεσμα αυξάνοντας το πορώδες της πάστας τσιμέντου. Παρατηρείται μια ισχυρή γραμμική συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (λ) και του ποσοστού του EPS (Σχήμα), που βοηθά στον προσδιορισμό του κατάλληλου ποσοστού του πρωτογενούς ή ανακυκλωμένου EPS για να επιτευχθεί μια επιθυμητή τιμή θερμικής αγωγιμότητας. Για παράδειγμα, για να παραχθεί ένα κονίαμα με θερμική αγωγιμότητα 0,04 W/mK, θα πρέπει να προστεθούν αντίστοιχα 78% και 85% ποσοστό πρωτογενούς ή ανακυκλωμένου EPS αντί άμμου, βάσει της γραμμής τάσης που παρουσιάζεται. Η χρήση ανακυκλωμένου EPS αντί για πρωτογενές EPS μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση έως και 15%, λαμβάνοντας υπόψη τη διαφορά κόστους των περίπου 25 €.



Σχήμα 2.6. (α) Εκθετική σχέση μεταξύ θερμικής αγωγιμότητας και πυκνότητας.
(β) Γραμμική σχέση μεταξύ θερμικής αγωγιμότητας και ποσοστού EPS.

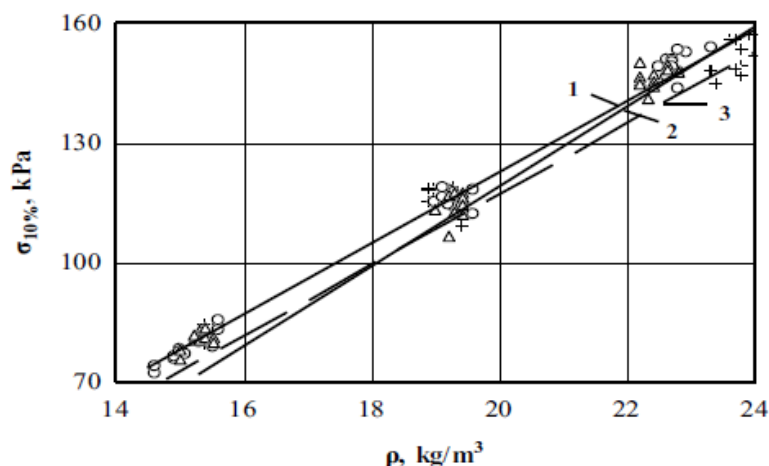
Καταλήγοντας, μέσα από τη συγκεκριμένη έρευνα διεξήχθησαν τα εξής συμπεράσματα:

Για την ίδια δοσολογία, η χρήση ανακυκλωμένου EPS αντί για πρωτογενές σε μίγματα σκυροδέματος επηρεάζει την εργασιμότητα αυξάνοντας την πυκνότητα και τις μηχανικές ιδιότητες των κονιαμάτων, αυξάνει την υδατοαπορροφητικότητα σε θερμομονωτικά κονιάματα (100% EPS ανά μονάδα άμμου), που μπορεί να μειωθεί με τη χρήση υδρόφοβου προσμίκτη. Η διαπερατότητα των ατμών δεν αλλάζει σημαντικά και η θερμική αγωγιμότητα μειώνεται. Ωστόσο, αυτό το μειονέκτημα μπορεί να αντισταθμιστεί αυξάνοντας τη δοσολογία του EPS. Για την επίτευξη ενός κονιάματος με συγκεκριμένη θερμομονωτική ικανότητα, η χρήση ανακυκλωμένου EPS επιτρέπει οικονομική εξοικονόμηση άνω του 25%.

Η έρευνα που ακολουθεί παρακάτω αφορά αποκλειστικά τη διογκωμένη πολυστερίνη ως υλικό. Διεξήχθη από τους Aleksey Zhukov, Vyacheslav Semenov, Ivan Gnir και Saulus Vaitkus και εξετάζει τη συμπεριφορά του EPS υπό καθεστώς μόνιμου φορτίου για αρκετό χρονικό διάστημα. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν μακροπρόθεσμες δοκιμές σε πλάκες από EPS με πυκνότητα 15 έως 24 kg/m³ υπό σταθερή συμπίεση. Η παραμόρφωση λόγω ερπυσμού μετρήθηκε χρησιμοποιώντας ειδικούς μετρητές για μια διάρκεια 122 ημερών. Οι δοκιμές ακολούθησαν τα πρότυπα EN 1606 με μια τάση σταθερή και ίση με το 0,35*σ10%. Τα σφάλματα μέτρησης για την παραμόρφωση λόγω τάσης και ερπυσμού ήταν ελάχιστα. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (23±2)°C και σχετική υγρασία (50±5)%. Ένα μαθηματικό μοντέλο που λαμβάνει υπόψη το πάχος του δείγματος χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της βύθισης λόγω ερπυσμού και της πρόβλεψης των παραμορφώσεων για 10 χρόνια. Τα μοντέλα παρέχουν πρακτικές εκτιμήσεις για τις ερπυστικές παραμορφώσεις στις 122 ημέρες καθώς και για διάστημα 10 ετών.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για τις πειραματικές δοκιμές ήταν τετράγωνα πλάκες από σφαιρίδια διογκωμένης πολυστερίνης πλάτους 10 cm και πάχους 5, 7.5 και 10 cm αντίστοιχα. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε σταθερή φόρτιση τάσης $\sigma = 0,35 \cdot \sigma_{10\%}$ (όπου η

θλιπτική τάση $\sigma_{10\%}$ δίνεται ανάλογα με την πυκνότητα κάθε δοκιμίου, σύμφωνα με το EN 826:2013). Τα δεδομένα που αποκτήθηκαν από τις δοκιμές των δειγμάτων EPS υπό απλή συμπίεση επέτρεψαν τον προσδιορισμό της γραμμής παλινδρόμησης (Σχήμα 2.7) για τη λήψη της τάσης $\sigma_{10\%}$, αντίστοιχη για κάθε τιμή πυκνότητας σύμφωνα με το EN 13163.



Σχήμα 2.7. Γραμμή παλινδρόμησης μεταξύ τάσης $\sigma_{10\%}$ -πυκνότητας.

Στην ανάλυση των πειραματικών δεδομένων για δοκίμια υπό μακροπρόθεσμη συμπίεση ($t_n=122$ ημέρες), λήφθηκαν υπόψη τρία αποτελέσματα ($I_c(t_n)$, $ε_c(t_n)$, $ε_c(T)$) και δύο ελεγχόμενες μεταβλητές (πυκνότητα EPS ρ , πάχος δοκιμίου d). Τα δείγματα με πυκνότητες από 15 έως 24 kg/m^3 δοκιμάστηκαν με χρήση πλήρους πειραματικής σχεδίασης τύπου $N=32$ δοκιμών. Οι κωδικοποιημένοι παράγοντες διατηρήθηκαν σε σταθερά επίπεδα σύμφωνα με τον σχεδιασμό. Προσδιορίστηκαν τα χαρακτηριστικά του EPS υπό σταθερή συμπίεση, συμπεριλαμβανομένης της υποχωρητικότητας λόγω ερπυσμού (y_1), της παραμόρφωσης λόγω ερπυσμού (y_2) και της προβλεπόμενης παραμόρφωσης (y_3) για 10 χρόνια. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε ένα τετραγωνικό μοντέλο για την περιγραφή της σχέσης μεταξύ των παραγόντων και των αποτελεσμάτων. Στους πίνακες 2.11 και 2.12 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των δοκιμών και τα δεδομένα των πειραμάτων αντίστοιχα.

Πίνακας 2.11. Βασικά χαρακτηριστικά των δοκιμών

Characteristic	Density of EPS specimens, x_1 , kg/m^3	Thickness of EPS specimens, x_2 , mm
Basic level	19.3	75
Interval of variation	4.0	25
Upper level	23.3	100
Lower level	15.3	50

Πίνακας 2.12. Πίνακας στατιστικών αποτελεσμάτων.

Number of experiments	x_1	x_2	y_1, MPa^{-1}		$y_2, \%$		$y_3, \%$
			$\bar{y}_1^*$	S_{y_1}	$\bar{y}_2^*$	S_{y_2}	$\bar{y}_3^{pred.}$
1	-1	-1	0.3564	0.0077	1.0239	0.0220	2.163
2	0	-1	0.2019	0.0153	0.8206	0.0622	2.203
3	+1	-1	0.0842	0.0117	0.4426	0.0618	1.074
4	-1	0	0.3117	0.0248	0.8652	0.0772	2.420
5	0	0	0.1792	0.0053	0.7263	0.0214	2.055
6	+1	0	0.0760	0.0072	0.3980	0.0374	0.927
7	-1	+1	0.3138	0.0180	0.8920	0.0524	2.065
8	0	+1	0.1847	0.0095	0.7421	0.0324	2.262
9	+1	+1	0.0719	0.0019	0.3689	0.0102	0.873

Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές και οι γραμμές παλινδρόμησης για τη θλιπτική τάση στο 10% βάσει της πυκνότητας ρ των δειγμάτων και της παλινδρόμησης από το πρότυπο EN 13163 (γραμμή 2). Η γραμμική εξάρτηση από το πρότυπο EN 13163 προσεγγίζεται από την εξίσωση παλινδρόμησης (γραμμή 1). Οι ελάχιστες εκτιμήσεις πρόβλεψης δίνουν εύρος τιμών για $\sigma_{10\%} = 8.9\text{-}59.7 \text{ kPa}$. Αυτά τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να περιγράψουν τις πλάκες EPS τύπων EPS 80, EPS 100, EPS 120 και EPS 150.

Συνεχίζοντας με τα υπόλοιπα αποτελέσματα, στον πίνακα 2.13 περιέχονται πειραματικά δεδομένα καθώς και η εξίσωση παλινδρόμησης των σχετικών παραμορφώσεων για τα δείγματα EPS με διάρκεια $t_n=122$ ημερών. Στη στήλη με τον εκθέτη (α) παρουσιάζεται η ανάλυση γραμμικής εξάρτησης που χρησιμοποιήθηκε, με αρχικές τιμές παραμόρφωσης για διάρκεια $t=24 \text{ h}$. Στη στήλη με τον εκθέτη (β) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και των 12 δοκιμών για την επιλογή μεταβλητών για ερπυσμό. Η στήλη με τον εκθέτη (c) περιέχει τις μέσες τιμές της πυκνότητας ρ , του πάχους d , της τάσης ερπυσμού, της αρχικής παραμόρφωσης ϵ_0 και της τελικής παραμόρφωσης ϵ_t . Στη στήλη (d) βρίσκονται τα αθροίσματα των τυπικών αποκλίσεων για 18 παρατηρήσεις. Στην τελευταία στήλη (e) περιέχονται οι τιμές πρόβλεψης για περίοδο $T=10$ χρόνια.

Πίνακας 2.13. Πίνακας πειραματικών και στατιστικών αποτελεσμάτων.

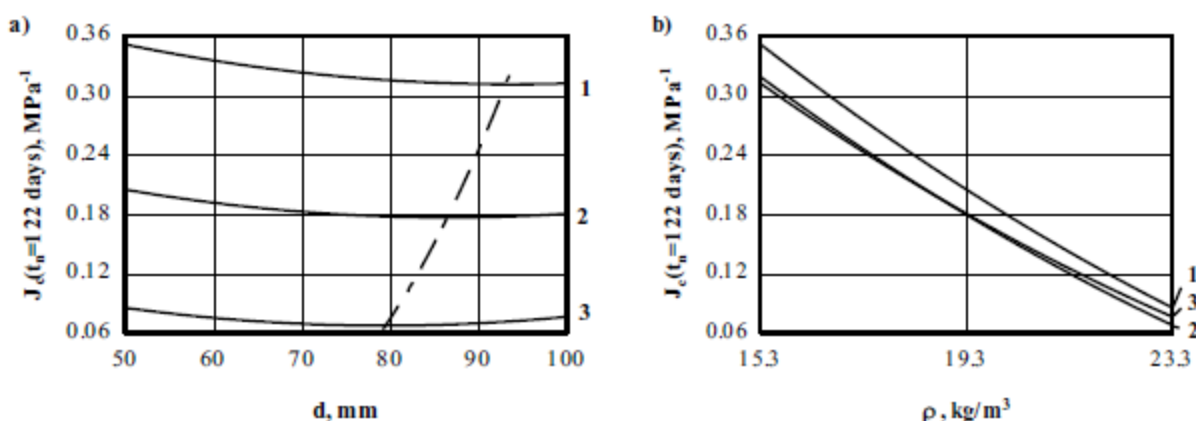
Number of test series	The test data for specimens under compressive stress								Regression analysis data ^a			The predicted point values of creep strain $\bar{\epsilon}_c(T=10\text{years})^e$, %
	Shor-term ^b		Long-term ^c						Constant coefficients in Eq. (5)		$\sum_{i=1}^n (y_{3(i)} - \bar{y}_{3(i)})^2$, % ^d	
ρ , kg/m ³	$\sigma_{10\%}$, kPa	ρ , kg/m ³	d_s , mm	σ_c , kPa	ϵ_0 , %	$\epsilon_c(t_n)$, %	b_0	b_1				
1	15.4	82.1	15.3	48.0	28.7	1.374	1.0239	0.1520	0.2333	0.01329	2.163	
2	19.3	116	19.2	49.4	40.6	1.155	0.8206	0.0738	0.2984	0.00426	2.203	
3	23.8	152	23.6	48.6	52.6	1.277	0.4426	0.0333	0.3222	0.00071	1.074	
4	15.1	78.5	15.3	72.8	27.7	1.145	0.8652	0.0989	0.2809	0.01100	2.420	
5	19.3	116	19.3	74.4	40.5	0.951	0.7263	0.0582	0.3132	0.00253	2.055	
6	23.0	150	23.0	73.3	52.4	1.005	0.3980	0.0533	0.2511	0.00022	0.927	
7	15.3	81.1	15.3	98.2	28.4	0.985	0.8920	0.0814	0.2841	0.00833	2.065	
8	19.3	115	19.3	99.5	40.2	0.767	0.7421	0.0490	0.3367	0.00496	2.262	
9	23.0	147	23.0	98.0	51.3	0.932	0.3689	0.0427	0.2652	0.00137	0.873	

Επίσης τονίζεται στην εργασία ότι οι συντελεστές στις εξισώσεις δείχνουν ότι δεν επηρεάζουν όλοι οι παράγοντες εξίσου τα τελικά αποτελέσματα. Οι μεγαλύτεροι συντελεστές υποδεικνύουν μεγαλύτερη επίδραση του παράγοντα, ενώ το πρόσημο των συντελεστών υποδεικνύει την ένταση της επίδρασης του παράγοντα, όπως φαίνεται και στον πίνακα 2.14.

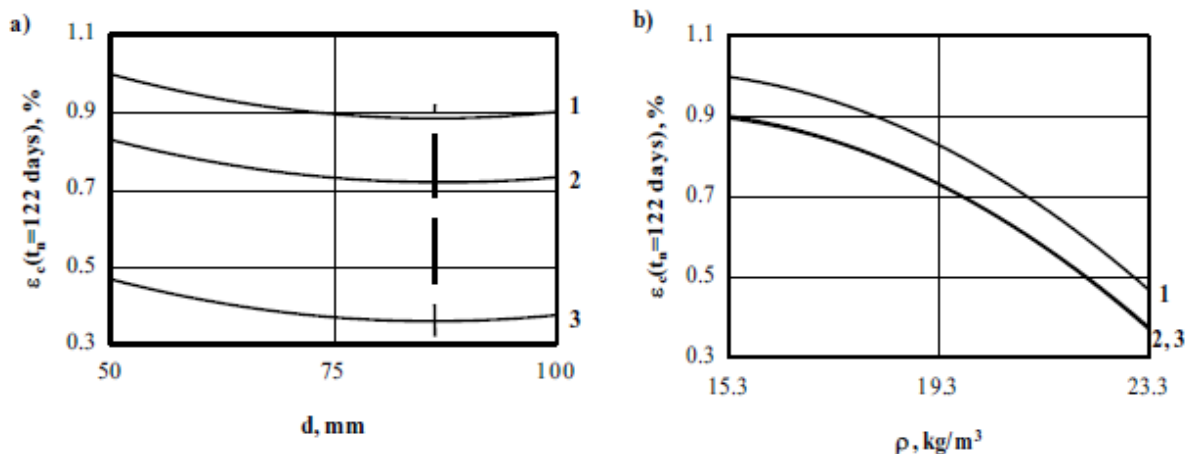
Πίνακας 2.14. Τιμές συντελεστών εξισώσεων παλινδρόμησης με βάση κωδικοποιημένες μεταβλητές.

value for equations	b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}
y_1	0.1798	-0.1250	-0.0120	0.00758	0.0137	0.0132
y_2	0.7284	-0.2619	-0.0474	-	-0.0979	0.0518
y_3	2.1916	-0.6290	-0.0400	-0.0257	-0.5863	-0.0273

Οι εξισώσεις των μεταβλητών y_1 , y_2 και y_3 αναλύθηκαν για να βρεθούν τα ακρότατα στα διαστήματα [79-94] mm και [68÷45] mm για το x_1 (πυκνότητα EPS) και στο $x_2=86$ mm για το y_2 (πάχος δείγματος). Στα σχήματα 2.8(a) και 2.9(a) παρουσιάζονται οι σχέσεις μεταξύ του I_c και του ϵ_c για το x_2 (πάχος δείγματος), δείχνοντας την ύπαρξη μιας σχεδόν σταθερής περιοχής που αντιστοιχεί σε αυτόν τον παράγοντα. Τα σχήματα 2.8(b) και 2.9(b) επιδεικνύουν τις εξαρτήσεις του I_c και του ϵ_c από το x_1 (πυκνότητα EPS) με το x_2 σταθερό σε τρία επίπεδα. Στην περιοχή πυκνότητας EPS 15.3-23.3 kg/m³, οι τιμές του I_c για δείγματα με πάχος 50 mm είναι 15% υψηλότερες από αυτές για δείγματα με πάχος 75 και 100 mm (οι τιμές του I_c για δείγματα με πάχος 75 και 100 mm είναι πρακτικά ίδιες).



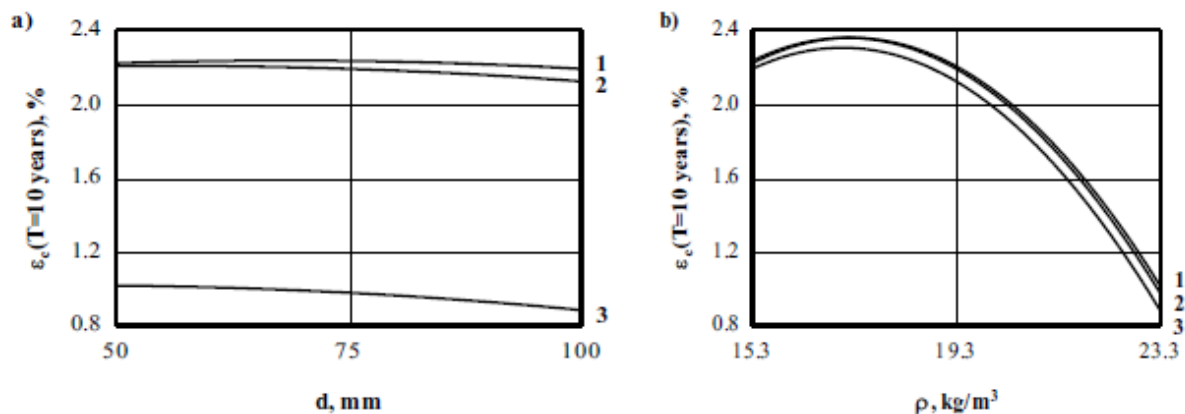
Σχήμα 2.8. α) Γραφική σχέση μεταξύ I_c - d . β) Γραφική σχέση μεταξύ I_c - ρ .



Σχήμα 2.9. α) Γραφική σχέση μεταξύ ϵ_c -d. β) Γραφική σχέση μεταξύ ϵ_c - ρ .

Η παραμόρφωση λόγω ερπυσμού (ϵ_c) για τιμές πυκνότητας EPS μεταξύ 15.3-23.3 kg/m³, όταν το πάχος του δείγματος ποικίλει από 50 σε 75 και 100 mm, μειώνεται περίπου κατά 11% και 26% σε σχέση με την πυκνότητά του.

Στο σχήμα 2.10(b) παρουσιάζεται η εξάρτηση της παραμόρφωσης λόγω ερπυσμού ϵ_c ($T=10$ έτη) από το x_1 (πυκνότητα EPS) με το x_2 σταθερό σε τρία επίπεδα. Για πυκνότητα EPS 15.3-23.3 kg/m³ και δείγματα με πάχος 50 και 75 mm, οι εκτιμήσεις του ϵ_c ($T=10$ έτη), υπολογισμένες ανάλογα με την πυκνότητα τους, είναι κατά 2-13% σχετικά μεγαλύτερες από αυτές που βρέθηκαν για δείγματα με πάχος 100 mm.



Σχήμα 2.10. α) Γραφική σχέση μεταξύ d- ϵ_c . β) Γραφική σχέση μεταξύ ρ - ϵ_c ($T=10$ χρόνια)

Συμπερασματικά, αναφέρεται ότι τα μαθηματικά μοντέλα για τον προσδιορισμό των $I_c(t=122 \text{ ημέρες})$, $\epsilon_c(t=122 \text{ ημέρες})$ και $\epsilon(T=10 \text{ έτη})$ των δειγμάτων EPS υπό σταθερή θλιπτική τάση $\sigma_c=0.35\sigma_{10\%}$ έχουν κατασκευαστεί, χρησιμοποιώντας μια μέθοδο πειραματικού σχεδιασμού.

Οι πειραματικές εξισώσεις για τον προσδιορισμό των εκτιμήσεων του $I_c(t=122 \text{ ημέρες})$, των παραμορφώσεων $\epsilon_c(t=122 \text{ ημέρες})$ και $\epsilon(T=10 \text{ έτη})$, έχουν προκύψει για δείγματα EPS με πυκνότητα $15.3\text{-}23.3 \text{ kg/m}^3$.

Στο διάστημα πυκνότητας $15.3\text{-}23.3 \text{ kg/m}^3$ και κάτω από τη μεταβολή του πάχους του δείγματος από 50 σε 75 και 100 mm, η πειραματική τιμή του $\epsilon_c(t=122 \text{ ημέρες})$ μειώνεται κατά περίπου 11% και 26% σε σχέση με την πυκνότητά του. Η επίδραση του πάχους του δείγματος στις προβλέψεις των παραμορφώσεων λόγω του ερπυσμού για την περίοδο των 10 ετών είναι ασήμαντη. Στο ίδιο διάστημα, οι τιμές της παραμόρφωσης $\epsilon_c(T=10 \text{ έτη})$, που υπολογίζονται από τα πειραματικά δεδομένα που έχουν ληφθεί για δείγματα με πάχος 50 και 75 mm, είναι κατά 2-13% μεγαλύτερες σε σύγκριση με τα δείγματα πάχους 100 mm.

Σε ένα παγκόσμιο πλαίσιο όπου η ζήτηση για ποιοτική κατοικία αυξάνεται λόγω της βελτίωσης του βιοτικού επιπέδου και της πληθυσμιακής αύξησης, η υπερβολική χρήση φυσικών πόρων ως υλικών κατασκευής εξελίσσεται σε ένα σημαντικό πρόβλημα. Η έρευνα των Fernando & Jayasinghe αντιμετωπίζει αυτό το ζήτημα εξετάζοντας τον μετασχηματισμό των μη βιοδιασπώμενων αποβλήτων σε υλικά κατασκευής υψηλής ποιότητας. Συγκεκριμένα, η μελέτη αξιολογεί την πειραματική χρήση μηχανικά ανακυκλωμένου Διογκωμένου Πολυστυρενίου (EPS), που αποτελεί το 50% του συνολικού EPS, σε ένα σύνθετο πάνελ αφρο-σκυροδέματος.

Ο κύριος στόχος αυτής της έρευνας είναι να εξετάσει τις δομικές ιδιότητες και τη δυνατότητα εφαρμογής ενός ελαφρού πάνελ τοίχου που χρησιμοποιεί μηχανικά ανακυκλωμένο EPS ως έναν από τους πρώτες ύλες μαζί με τσιμεντοσανίδες και από τις δύο πλευρές.

Για την ανάπτυξη του συγκεκριμένου πάνελ, αναπτύχθηκε πειραματικά ένα μίγμα αφρο-σκυροδέματος που περιέχει EPS προκειμένου να επιτευχθεί χαμηλότερη πυκνότητα, διατηρώντας παράλληλα επαρκή αντοχή. Το μίγμα επίσης περιλάμβανε τσιμέντο, άμμο, σκόνη ιπτάμενης τέφρας και EPS. Ακολούθησε σύγκριση ενός μίγματος που περιέχει μη ανακυκλωμένο EPS όσον αφορά την πυκνότητα και ενός μίγματος που περιέχει 50% ανακυκλωμένου μηχανικά EPS, διατηρώντας τις ίδιες αναλογίες του μίγματος. Για τον έλεγχο του βάρους του πάνελ, απαιτούταν αφρο-σκυρόδεμα με πυκνότητα $600\text{--}700 \text{ kg/m}^3$. Ο πίνακας 2.15 παρουσιάζει ένα μίγμα με αναλογίες βάσει του βάρους, με αποτέλεσμα μια υγρή πυκνότητα 918 kg/m^3 . Η εξάτμιση του νερού θα πέτυχε την επιθυμητή ξηρή πυκνότητα των $650\text{--}750 \text{ kg/m}^3$ σε 2–3 εβδομάδες.

Πίνακας 2.15. Αναλογίες συστατικών για το μίγμα.

Materials	Content (kg/m^3)	By weight
Cement	380	41.4%
Sand	136	14.8%
Water	282	30.7%
EPS	22	2.4%
Fly ash	98	10.7%

Παρά το γεγονός ότι το EPS αντιστοιχούσε μόνο σε 2,4% του βάρους, η χαμηλή του πυκνότητα (25–30 kg/m³) κατέλαβε σημαντικό όγκο. Ένα πείραμα με κυβικά δοκίμια αξιολόγησε τον αντίκτυπο των μηχανικά ανακυκλωμένων κόκκων EPS. Δοκιμάστηκαν δύο τύποι κύβων: Το δείγμα 1 με μη ανακυκλωμένο EPS και το δείγμα 2 με 50% ανακυκλωμένο EPS, με τον Πίνακα 2.16 να παρουσιάζει τιμές μέσης πυκνότητας.

Πίνακας 2.16. Μέση πυκνότητα δειγμάτων.

Sample number	Average density (kg/m ³)
Sample 1	738
Sample 2	629

Το δείγμα 2 που περιείχε ανακυκλωμένο EPS οδήγησε σε χαμηλότερη πυκνότητα σε σχέση με το δείγμα 1, λόγω του σχήματος και του μεγαλύτερου μεγέθους του (περίπου 5 mm), σε αντίθεση με το σφαιρικό σχήμα του παραγόμενου EPS. Αυτές οι διαφορές μπορεί να προκαλέσουν διακυμάνσεις στη συμπίεση, οδηγώντας σε διακριτικές τιμές πυκνότητας, με πιθανή επίδραση σε σημαντικές παραμέτρους όπως η αντοχή συνάφειας. Για να αξιολογηθούν οι ιδιότητες αντοχής με το ανακυκλωμένο EPS, διενεργήθηκαν δοκιμές χρησιμοποιώντας ένα μίγμα με 50% ανακυκλωμένο EPS.

Για την αξιολόγηση των ιδιοτήτων αντοχής των πάνελ τοίχου, χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι. Τα πάνελ τύπου 1 τοποθετήθηκαν μεταξύ δύο τσιμεντοσανίδων. Επιπλέον, τα πάνελ τύπου 2 παράχθηκαν χωρίς να πλαισιωθούν από τσιμεντοσανίδες για σύγκριση ως προς τα χαρακτηριστικά συμπεριφοράς. Τα πάνελ μπορούσαν να ετοιμαστούν σε καλούπια με πάχη 75, 100 ή 150 mm. Για αυτήν τη μελέτη, επιλέχθηκε πάχος 100 mm, κατάλληλο για διάφορες εφαρμογές.

Με στόχο την καλύτερη δυνατή διαπίστωση των μηχανικών ιδιοτήτων του αφρο-σκυροδέματος, διεξήχθησαν δύο πειράματα θλίψης. Το πρώτο πείραμα αφορούσε πάνελ τοίχου με ύψος 60 cm και το δεύτερο πείραμα εφαρμόστηκε στο πλήρες ύψος των καλουπιών, στα 2,40 m. Για την πρώτη φάση των πειραμάτων, τα πάνελ τύπου 1 και τύπου 2, και τα δύο ύψους 60 cm με πάχος 10 cm, υποβλήθηκαν σε σταδιακά φορτία 0,5 τόνων χρησιμοποιώντας μια μηχανή συμπίεσης. Για την καταγραφή των παραμορφώσεων εφαρμόστηκαν ηλεκτρονικά μηχανοσκόπια. Όλα τα πάνελ εμφάνισαν αστοχία στο πάνω ή κάτω μέρος, με εκείνα που περιλάμβαναν τσιμεντοσανίδες να δείχνουν ικανοποιητική σύνθετη δράση χωρίς διάσπαση μέχρι την αστοχία.

Ο πίνακας 2.17 δείχνει ότι οι τσιμεντοσανίδες ενισχύουν την ικανότητα απορρόφησης θλιπτικού φορτίου, ίσως λόγω των επιπτώσεων περιορισμού ή των συνεισφορών στη μεταφορά φορτίου. Παρά τον αυξημένο κόστος, η περίληψή τους θεωρείται επωφελής.

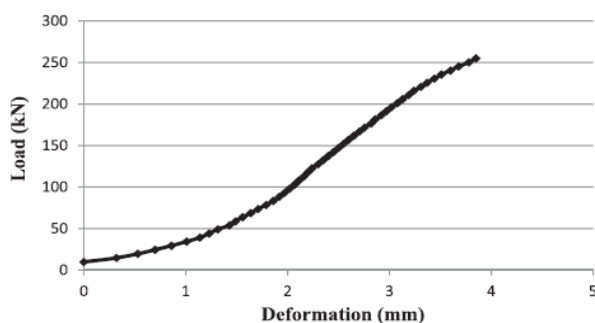
Το Σχήμα 2.11β επιτρέπει τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας για το πάνελ Τύπου 1, υποθέτοντας σταθερή διατομή 600 mm x 100 mm. Το σχήμα δείχνει ότι με την αύξηση του φορτίου από 100 kN σε 200 kN, το πάνελ συστέλλεται κατά 1 mm, με αποτέλεσμα ένα μέτρο ελαστικότητας των 1,15 kN/mm². Λαμβάνοντας υπόψη το σχετικά χαμηλό μέτρο ελαστικότητας, χρειάζεται αξιολόγηση το πώς επηρεάζει την παραμόρφωση κάτω από τις

θλιπτικές τάσεις. Η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για το πάνελ Τύπου 2 (Σχήμα 2.12α και 2.12β) αποκαλύπτει συστολή περίπου 1 mm καθώς το φορτίο αυξάνεται από 50 kN σε 115 kN, με αποτέλεσμα ένα ελαστικό μέτρο 0,75 kN/mm². Η παρουσία των τσιμεντοσανίδων του Τύπου 1 ενισχύει τη στιβαρότητα του πάνελ, συνεισφέροντας σε ένα υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας.

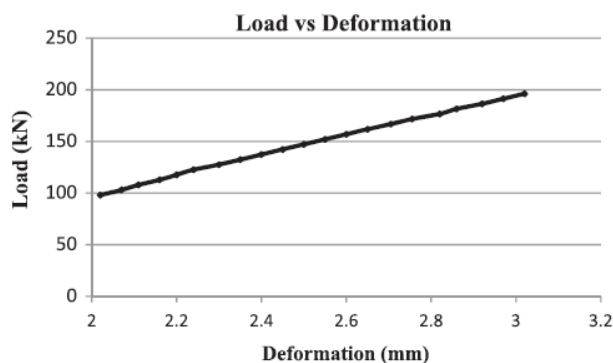
Πίνακας 2.17. Τιμές αποτελεσμάτων πειράματος θλίψης (ύψος τοίχων 60 cm).

Panel	Panel identification number	Failure load (kN)	Failure stress (N/mm ²)	Average strength (N/mm ²)
Panels with board (Type 1)	1	237.4	3.89	4.06
	2	247.2	4.05	
	3	258.9	4.25	
Panels without board (Type 2)	1	142.4	2.33	2.13
	2	112.8	1.84	
	3	135.4	2.22	

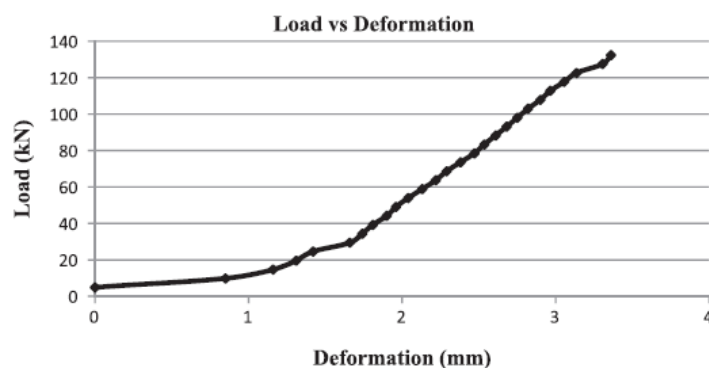
Καθώς το ύψος του πάνελ αυξάνεται, αυξάνεται και ο λόγος λεπτότητας, μεγιστοποιώντας τον κίνδυνο αποτυχίας λόγω κάμψης. Με ύψος 2,40 m, τα αποτελέσματα του πειράματος θλίψης των δοκιμών παρουσιάζονται στον πίνακα 4, δείχνοντας μικρότερο φορτίο αστοχίας από τα πιο μικρά πάνελ λόγω συνδυασμού κάμψης και θλίψης.



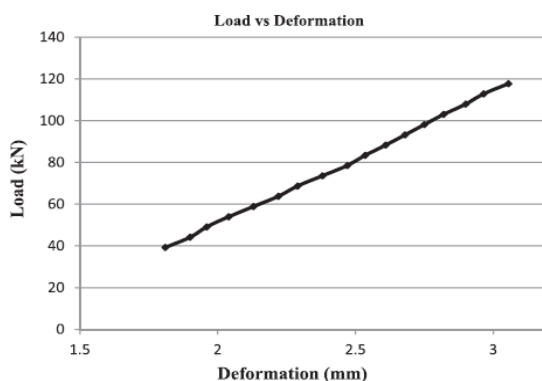
Σχήμα 2.11α. Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης (Τύπος 1)



Σχήμα 2.11β. Γραμμικό τμήμα διαγράμματος τάσης παραμόρφωσης (Τύπος 1)



Σχήμα 2.12α. Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης (Τύπος 2).



Σχήμα 2.12β. Γραμμικό τμήμα διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης (Τύπος 2).

Για τον προσδιορισμό της αντίστασης στις πλευρικές φορτίσεις, τα πάνελ υποβλήθηκαν σε δοκιμές κάμψης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13, τα πάνελ τοίχου τοποθετήθηκαν οριζόντια και δοκιμάστηκαν για την αντοχή τους σε κάμψη σύμφωνα με το ASTM C78 - απλή δοκός με φόρτιση τρίτου σημείου.

Παρατηρήθηκε προσεκτικά η αρχική θέση αστοχίας και διαπιστώθηκε ότι η θέση αστοχίας όλων των πάνελ ήταν ενδιάμεσα των τριών σημείων. Επομένως, η εξίσωση (1), που βρίσκεται στο ASTM C78 για απλή δοκό με φόρτιση τρίτου σημείου, χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του τάσης στη θέση αστοχίας.

Η εξίσωση είναι:

$$R = P / bd^2 \quad (1)$$

Όπου: R= ορθή τάση λόγω κάμψης (MPa)

P= μέγιστο φορτίο καταπόνησης (N)

l, b, d= μήκος, πλάτος, πάχος δοκιμίου (mm)

Όλα τα πάνελ εμφάνισαν ψαθυρή αστοχία, με εκείνα χωρίς τσιμεντοσανίδες να εμφανίζουν πολύ χαμηλότερη αντοχή σε σύγκριση με αυτά με τις τσιμεντοσανίδες. Τα συνοπτικά αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στον πίνακα 2.18.



Σχήμα 2.13. Διάταξη πειράματος κάμψης.

Πίνακας 2.18. Τιμές αποτελεσμάτων πειράματος κάμψης.

Panel	Failure Location	Failure load (kN)	Failure stress(N/mm ²)
Type 1	Within middle third	4.3	1.64
Type 2	Within middle third	0.8	0.31

Ο πίνακας 2.18 δείχνει ότι η καμπτική αντοχή του τύπου 2 ήταν σημαντικά χαμηλότερη από εκείνη του τύπου 1. Η καμπτική αντοχή των πάνελ τύπου 1 (1,64 N/mm²) είναι συγκρίσιμη με εκείνη των τοίχων από τούβλο και άλλων εναλλακτικών υλικών για τοίχους. Η παρουσία των τσιμεντοσανίδων από και στις δύο πλευρές επιτρέπει τελείωμα χωρίς σοβά, απαιτώντας μόνο ένα λεπτό πλέγμα στις συνδέσεις για καθαρό αποτέλεσμα. Επίσης δεν απαιτείται μεγάλος αριθμός εργατών για την τοποθέτηση του λόγω του χαμηλού του βάρους.

Η έρευνα καταλήγει στα εξής συμπεράσματα:

- Τα πάνελ αφρο-σκυροδέματος βασισμένα σε EPS είναι ευέλικτα και χρησιμοποιούνται σε διαμερίσματα, ξενοδοχεία, εμπορικά κτίρια και διάφορα άλλα κτίρια που χρειάζονται διαχωριστικά.
- Ανθεκτικά στη υγρασία, αυτά τα πάνελ από αφροσκυρόδεμα κερδίζουν ακόμη περισσότερη αντοχή όταν υπάρχει υγρασία, επιτρέποντας λιγότερο περιοριστική χρήση.

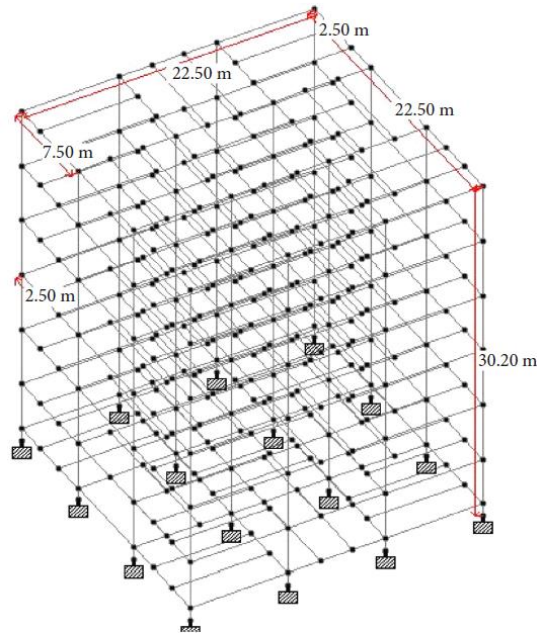
- Σε ψηλά κτίρια, η επαναλαμβανόμενη χρήση ελαφρών διαχωριστικών μειώνει το βάρος κάθε επιπέδου, προσφέροντας σημαντικό πλεονέκτημα στον σχεδιασμό του θεμελίου.
- Το αφρο-σκυρόδεμα με 50% ανακυκλωμένο EPS δημιουργεί ανθεκτικά τοιχοποιητικά πάνελ ανάμεσα σε φύλλα τσιμεντοσανίδων, επιδεικνύοντας ικανή αντοχή σε συντήρηση.
- Τα πάνελ, κατάλληλα τόσο για διαχωριστικούς τοίχους σε πολυώροφα κτίρια όσο και για φέρουσα τοιχοποιία σε μονώροφα κτίρια, έχουν μέτρο ελαστικότητας περίπου 1 kN/mm^2 .

Επιδεικνύοντας ανθεκτικότητα, ειδικά για διαχωριστικούς τοίχους, το αφρο-σκυρόδεμα που εμπεριέχεται ανάμεσα στα φύλλα τσιμεντοσανίδων εμφανίζει υψηλή αντοχή σε κάμψη. Με φύλλα τσιμεντένιων ινοσανίδων και αρθρωτές συνδέσεις, αυτά τα πάνελ επιτρέπουν γρήγορη κατασκευή με ποιοτικό φινίρισμα, εξαλείφοντας την ανάγκη για σοβά. Με ενσωμάτωση έως 50% ανακυκλωμένου EPS, παρέχουν σημαντικά οικολογικά οφέλη.

Η τελευταία και ιδιαίτερα σημαντική έρευνα που παρατίθεται σε αυτό το κεφάλαιο αφορά την ανθεκτικότητα του ελαφροσκυροδέματος απέναντι στο σεισμό. Οι κατασκευές από σκυρόδεμα είναι ευάλωτες στα σεισμικά φαινόμενα λόγω της μάζας τους. Ο κύριος σκοπός του δομικού ελαφροσκυροδέματος (SLWC) είναι η μείωση του μόνιμου φορτίου, επιτρέποντας στον δομικό σχεδιαστή να μειώσει το μέγεθος των δομικών στοιχείων όπως δοκοί, υποστυλώματα και συνάμα τις δυνάμεις σεισμού στην κατασκευή. Η εργασία των Swamy Nadh Vandanapu & Muthumanı Krishnamurthy έχει ως στόχο την πρόβλεψη της σεισμικής απόκρισης ενός εξώροφου πλαισίου από οπλισμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιώντας ελαφροσκυρόδεμα. Γίνεται μελέτη ενός καλά σχεδιασμένου παραδείγματος εξώροφης κατασκευής, το οποίο μοντελοποιείται με κανονικό σκυρόδεμα (NWC) και ελαφροσκυρόδεμα (LWC) και εκτελείται ανάλυση, σύμφωνα με τα αντίστοιχα Κανονιστικά Πλαίσια.

Ειδικότερα, ένας σκελετός 6 ορόφων από οπλισμένο σκυρόδεμα μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας το λογισμικό STAAD PRO. Το δομικό μοντέλο περιλαμβάνει δοκούς και υποστυλώματα που έχουν διαταχθεί για να διατηρήσουν τη σταθερότητα, με κάθε δοκό να έχει μήκος 7,5m και δευτερεύουσες δοκούς σε διαστήματα 2,5m. Οι διαστάσεις του κτιρίου είναι 22,5m πλάτος σε κάθε πλευρά και 30,2m ύψος, με διαφορετικά υψόμετρα σε κάθε όροφο, όπως φαίνεται στον πίνακα 2.19. Δύο υλικά χρησιμοποιούνται στο μοντέλο: ελαφροσκυρόδεμα και κανονικό σκυρόδεμα. Η πυκνότητα του ελαφρού σκυροδέματος στο μοντέλο είναι 1800 kg/m^3 , και του κανονικού σκυροδέματος είναι 2500 kg/m^3 . Το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται σύμφωνα με το ACI 213 για πυκνότητες που κυμαίνονται από 1400 έως 2480 kg/m^3 .

Η δομή μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας αδειοδοτημένο λογισμικό, ακολουθώντας πρότυπα από τη βιβλιογραφία, με τα φορτία που προέρχονται από την ίδια πηγή (Πίνακας 2.19). Οι πυκνότητες για κάθε όροφο από ελαφροσκυρόδεμα (LWC) και κανονικό σκυρόδεμα (NWC) υπολογίζονται και εφαρμόζονται στο λογισμικό. Τα δεδομένα σχεδιασμού και τα φορτία για κάθε δομή παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.20. Οι συνδυασμοί φορτίων, λαμβάνοντας υπόψη τις πλευρικές ορθογώνιες κατευθύνσεις X και Z, προέρχονται από το 1893 έως το 2016.



Σχήμα 2.14. Μοντέλο πλαισίου από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Πίνακας 2.19. Δεδομένα για το σχεδιασμό.

Live load	4.0 kN/m ² at typical floor 1.5 kN/m ² on terrace
Floor finish	1.0 kN/m ²
Water proofing	2.0 kN/m ²
Location	Vadodara city
Depth of foundation below ground	2.5 m
Type of soil	Type II, medium as per IS: 1893
Storey height	Typical floor 5 m, ground floor: 3.4 m
Floor	GF + 5 upper floors
Plinth level	0.6 m
Walls	230 mm thick masonry walls

Πίνακας 2.20. Τιμές μόνιμων φορτίων για τα δύο μοντέλα.

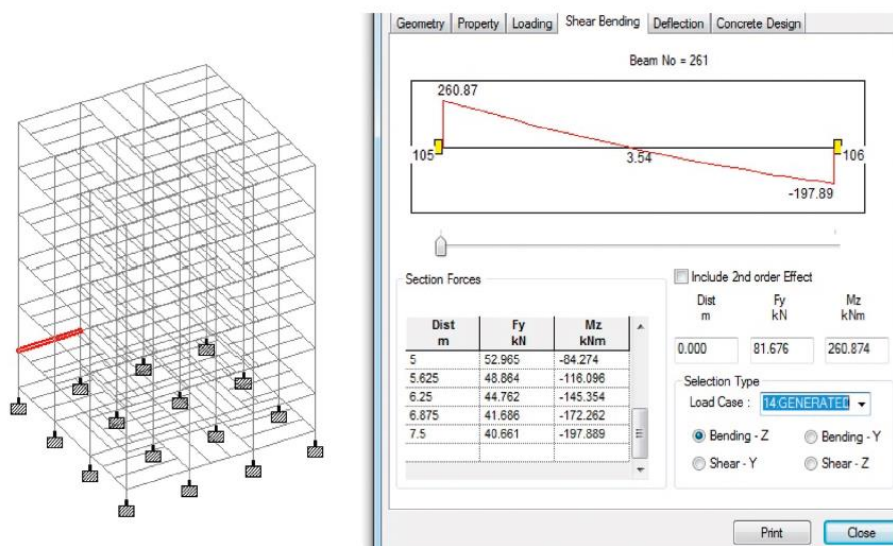
Members	Dimensions (mm)	Normal weight density (25 kN/m ³)	Lightweight density (18 kN/m ³)
Columns	500*500	6.3 kN/m (for top floor) 9.0 kN/m (rest of the floors)	4.5 kN/m (for top floor) 6.48 kN/m (rest of the floors)
Beams	300*600	4.5 kN/m	3.24 kN/m
Slab	100	2.5 kN/m ² 4.9 kN/m ²	1.8 kN/m ² 4.9 kN/m ²
Brick wall	230	21.6 kN/m (height 4.4 m) 17.2 kN/m (height 3.5 m) 3.5 kN/m (height 0.7) 4.9 kN/m (height 1.0)	21.6 kN/m (height 4.4 m) 17.2 kN/m (height 3.5 m) 3.5 kN/m (height 0.7) 4.9 kN/m (height 1.0)

Το μοντέλο αναλύθηκε για 25 περιπτώσεις φόρτισης. Οι ροπές κάμψης και διατμητικές δυνάμεις συγκρίνονται για όλα τα μέλη με βάση τα αποτελέσματα του αναλυτικού μοντέλου,

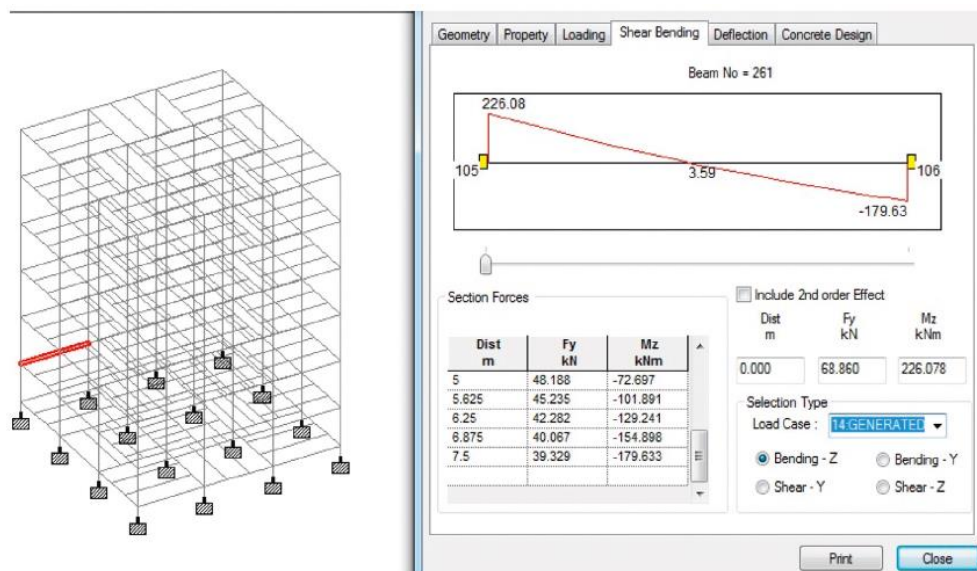
παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.21 (Σχήμα 2.15 για το NWC και Σχήμα 2.16 για το LWC). Παρά το ίδιο ωφέλιμο φορτίο, τα μικρότερα μόνιμα φορτία μαζί με τα αντίστοιχα σεισμικά οδηγούν σε μείωση 22% στις τιμές των ροπών κάμψης και 18% στις τιμές των διατμητικών δυνάμεων για το ελαφροσκυρόδεμα σε σύγκριση με το κανονικό σκυρόδεμα.

Πίνακας 2.21. Ροπές κάμψης και διατμητικές δυνάμεις.

Beam no.	Bending moment for LWC (kNm)	Bending moment for NWC (kNm)	Shear force for LWC (kN)	Shear force for NWC (kN)
261 (COMB 16) (COMB 18)	-223	-258	79	83
	226	260	-45	-49
391 (COMB 16) (COMB 18)	-258	-322	83	99
	260	328	-49	-67
521(COMB 16) (COMB 18)	-270	-313	84	97
	276	320	-58	-64
651(COMB 16) (COMB 18)	-226	-265	-46	-51
	231	272	75	86
781(COMB 16) (COMB 18)	-159	-191	-29	-32
	167	201	61	71



Σχήμα 2.15. Ροπή κάμψης για επιλεγμένη δοκό (NWC).

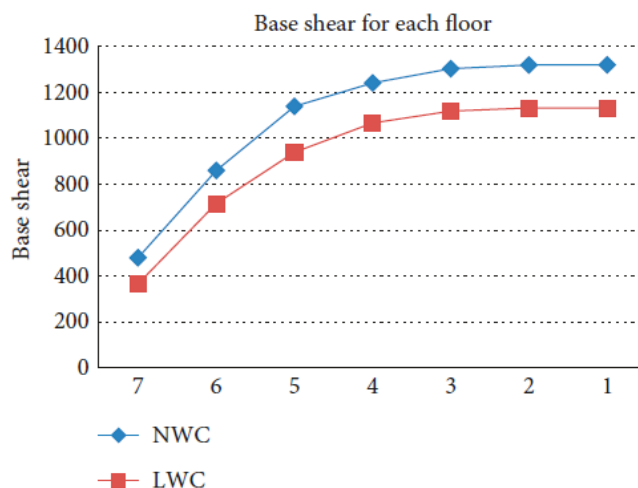


Σχήμα 2.16. Ροπή κάμψης για επιλεγμένη δοκό (LWC).

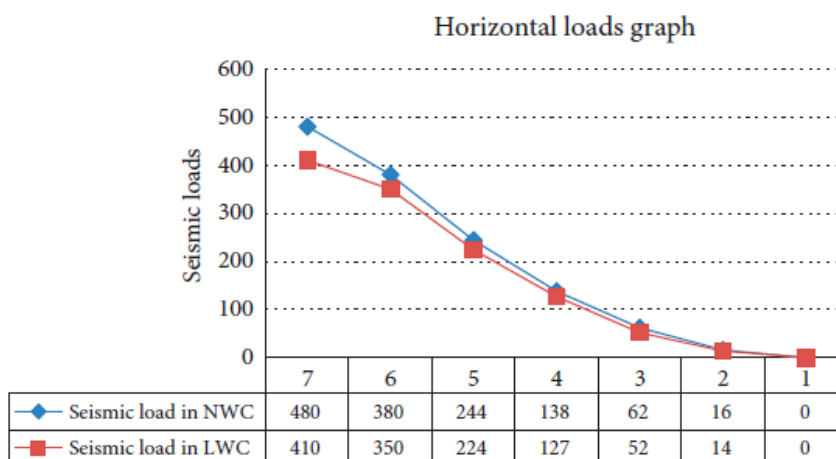
Η φυσική ιδιοπερίοδος (T_a) για το κτίριο υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την εμπειρική έκφραση του IS 1893-2016. Το πρόγραμμα λογισμικού αναλύει τη σεισμική απόκριση και τα κύρια σχήματα, επαληθεύοντας τη συνεχή φυσική περίοδο λόγω έλλειψης αλλαγής στο ύψος της κατασκευής. Το μέτρο ελαστικότητας (E) στο ελαφροσκυρόδεμα (LWC) εμφανίζει αμελητέα χρονικά διαστήματα σε σύγκριση με το κανονικό σκυρόδεμα (NWC). Σύμφωνα με την παρ. 6.4 του IS 1893-2016, η τιμή S_a/g καθορίζεται ως $1,36/T_a$. Οι υπολογισμένες τιμές S_a/g κυμαίνονται από 0,72 έως 1,4, αλλά η παρ. 7.8.2 απαιτεί να ληφθεί η υψηλότερη δύναμη (1,402) για τον υπολογισμό των σεισμικών δυνάμεων. Ο πίνακας 2.22, τα σχήματα 2.17 και 2.18 εμφανίζουν οριζόντια φορτία και τιμές βάσης τέμνουσας για LWC και NWC σε διάφορα επίπεδα δαπέδου, με τις δυνάμεις στο κτίριο LWC να είναι 14% λιγότερες από το NWC.

Πίνακας 2.22. Διανομή οριζόντιων δυνάμεων σε κάθε όροφο.

Storey	H (m)	W (kN)	Q (kN)	V (kN)	W (kN)	Q (kN)	V (kN)
		NWC	NWC	NWC	LWC	LWC	LWC
7	30.2	5597	480	480	4100	366	366
6	25.2	6381	380	860	5611	350	716
5	20.2	6381	244	1140	5611	224	940
4	15.2	6381	138	1242	5611	127	1067
3	10.2	6381	62	1304	5611	52	1119
2	5.2	6138	16	1320	5400	14	1133
1	1.1	2027	0	1320	1884	0	1133
Total	—	—	1320	—	—	1133	—



Σχήμα 2.18. Τιμές τέμνουσας βάσης των κτιρίων για κάθε όροφο.



Σχήμα 2.19. Οριζόντια φορτία των κτιρίων για κάθε όροφο.

Οι μετατοπίσεις των ορόφων υπολογίζονται σύμφωνα με τον Κανονισμό IS 1893:2016, Άρθρο 7.8, τόσο για το NWC όσο και για το LWC χρησιμοποιώντας τη μέθοδο φάσματος απόκρισης. Πραγματοποιείται δυναμική ανάλυση για και τα δύο υλικά, και η τέμνουσα βάσης σχεδιασμού συγκρίνεται με την αντίστοιχη υπολογισμένη χρησιμοποιώντας την θεμελιώδη περίοδο. Τα σύμφωνα με το Άρθρο 7.11.1 του IS 1893 (Μέρος 1):2016. Η μετατόπιση οποιουδήποτε ορόφου δεν πρέπει να υπερβαίνει 0.004 φορές το ύψος του ορόφου, με επιτρεπόμενη μετατόπιση 20 mm για ένα τυπικό κτίριο έξι ορόφων. Οι Πίνακες 2.23 και 2.24 παρουσιάζουν τις μετατοπίσεις των ορόφων τόσο για το LWC όσο και για το NWC. Το LWC υπόκειται σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις λόγω του χαμηλότερου μέτρου ελαστικότητας του, με αποτέλεσμα μειωμένη στιβαρότητα. Ωστόσο, οι υπολογισμένες μετατοπίσεις που φαίνονται στον πίνακα 2.24 βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων.

Πίνακας 2.23. Μετατοπίσεις ορόφων (NWC).

Storey	Displacement (mm)	Storey drift (mm)
7	56.1	3.6
6	52.4	7.1
5	45.27	10.1
4	35.1	12.7
3	22.4	14.1
2	8.2	7.9
1	0.35	0.35
0	0	0

Πίνακας 2.24. Μετατοπίσεις ορόφων (LWC).

Storey	Displacements (mm)	Storey drift (mm)
7	61.05	3.6
6	57.4	7.6
5	49.7	11.0
4	38.7	13.9
3	24.8	15.6
2	9.1	8.7
1	0.39	0.39
0	0	0

Η σεισμική ανάλυση της δομής, επηρεαζόμενη από το μόνιμο βάρος και τις δυνάμεις του σεισμού, αποκαλύπτει ότι το μοντέλο από ελαφροσκυρόδεμα έχει χαμηλότερες αντοχές σε κάμψη και διατμητικά φορτία. Αυτό επιτρέπει ενδεχομένως μειώσεις στα διαγράμματα των διατομών ή στο περιεχόμενο του χάλυβα. Ενώ τα φορτία του σεισμού αλλάζουν ελάχιστα στη δομή των έξι ορόφων, οι μετατοπίσεις παραμένουν σταθερές, με αποτέλεσμα μια εξοικονόμηση χάλυβα στο LWC της τάξης του 10% σε σύγκριση με το κανονικό σκυρόδεμα. Τα αποτελέσματα της δυναμικής ανάλυσης με τη μέθοδο φάσματος απόκρισης δείχνουν καλή δομική ασφάλεια, παρά την έλλειψη βελτίωσης στη φυσική ιδιοπερίοδο για λόγους σχεδιασμού. Αυτές οι αλλαγές αποδίδονται στη μειωμένη ελαστικότητα του ελαφροσκυροδέματος. Ερευνητικές εργασίες υποδηλώνουν τη δυνατότητα επίτευξης υψηλότερης ελαστικότητας με τις ίδιες παραμέτρους αντοχής μέσω κατάλληλων τροποποιήσεων στον σχεδιασμό του μείγματος σκυροδέματος, προσφέροντας πιθανά περισσότερα οικονομικά οφέλη καθώς αυξάνεται η ύψος των ορόφων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Όπως είναι αναμενόμενο με την εισαγωγή οποιουδήποτε νέου υλικού στη διαθέσιμη αγορά, γεννιούνται και κάποια ερωτήματα σχετικά με το υλικό αυτό. Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί με εγγύηση και ασφάλεια κάποιος θα πρέπει να ξέρει τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες, τη συμπεριφορά, καθώς και την αξιοπιστία του υλικού αυτού. Ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι να διερευνηθούν και να απαντηθούν τα προηγούμενα ερωτήματα, ώστε να μπορέσει να αποσαφηνιστεί αν το κονίαμα τσιμέντου με ανακυκλωμένο EPS είναι μια βιώσιμη λύση για τις κατασκευές. Για την επίτευξη του στόχου αυτού πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραματικών δοκιμών που ακολούθησε τα αντίστοιχα πρότυπα που ορίζουν οι Ευρωπαϊκοί Κανονισμοί. Συγκεκριμένα, τα δοκίμια που εξετάστηκαν υποβλήθηκαν σε δοκιμές που αφορούν τη φαινόμενη πυκνότητα του φρέσκου μείγματος, τη θλιπτική αντοχή, τη δεσμευμένη πυκνότητα του, τη συμπεριφορά στον ερπυσμό καθώς και την υδατοαπορροφητικότητα του σκληρυμένου ελαφροσκυροδέματος.

Για κάθε πείραμα εξετάστηκαν τέσσερα διαφορετικά μίγματα ελαφροσκυροδέματος πυκνότητας 300, 400, 600 και 800 kg/m³ για τον έλεγχο των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων. Επίσης για κάθε πείραμα χρησιμοποιήθηκαν και τα αντίστοιχα δοκίμια, τηρώντας αυστηρά τα Ευρωπαϊκά κριτήρια. Όλα τα πειράματα διεξήχθησαν στο εργαστήριο τεχνολογίας σκυροδέματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Για την κατασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρικός αναδευτήρας τσιμέντου (μπετονιέρα) και ξύλινα καλούπια, κατασκευασμένα στο εργαστήριο. Για την διεξαγωγή των πειραμάτων κατασκευάστηκαν 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 μίγματος.

Πίνακας 3.1. Αναλογίες συστατικών για παραγωγή μιγμάτων.

ΔΟΣΗ ΓΙΑ ΕΝΑ ΣΑΚΟ ISOLBETON (200 LT)			
ΠΥΚΝΟΤΗΣ kg/m ³	ΤΣΙΜΕΝΤΟ (kg)	ΑΜΜΟΣ ΠΟΤΑΜΙΣΙΑ (kg)	ΝΕΡΟ (lt)
300	50	-	25
400	50	25	25
600	75	45	30
800	75	75	40

Για την κατασκευή των δοκιμίων τοποθετήθηκε στην μπετονιέρα η αντίστοιχη ποσότητα EPS μαζί με όλο τον όγκο του νερού και αναμιχθήκαν με διαλείμματα των 5'. Στη συνέχεια προστέθηκε η άμμος και εν τέλει σταδιακά το τσιμέντο. Λίγα λεπτά αργότερα και αφού το τελικό μίγμα είχε φτάσει στο επιθυμητό επίπεδο ανάμιξης, τοποθετήθηκε στους αυτοσχέδιους ξυλοτύπους, οι οποίοι είχαν λαδωθεί με μηχανέλαιο. Το μίγμα δονήθηκε με τη χρήση μιας σιδερένιας ράβδου ώστε να αφαιρεθεί ο αέρας και να μην σχηματιστούν κενά μέσα στα δοκίμια. Μετά από ένα διάστημα 7 ημερών τα δοκίμια αφαιρέθηκαν από τα καλούπια και διατηρήθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου για τουλάχιστον 28 ημέρες πριν τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Οι κόκκοι ανακυκλωμένης διογκωμένης πολυστερίνης διατηρήθηκαν σε σκιερό μέρος επίσης σε θερμοκρασία δωματίου. Η άμμος που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή του ελαφροσκυροδέματος ήταν συσκευασμένη σε τσουβάλια των 20 kg. Πριν από τη χρήση της στην ανάμιξη, η άμμος αφαιρέθηκε από τα τσουβάλια και τοποθετήθηκε σε μεγάλα ταψιά και έμεινε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μέχρι να εξατμιστεί η περίσσεια υγρασία. Επιπρόσθετα για την αποφυγή της απότομης εξάτμισης της υγρασίας των δοκιμίων, κατά το διάστημα των 7 ημερών που ήταν μέσα στους ξυλότυπους μέχρι να ξηρανθεί το μίγμα, τα δοκίμια ήταν σκεπασμένα με πλαστικές μεμβράνες.



Εικόνα 3.1. Ηλεκτρικός αναδευτήρας σκυροδέματος

3.1 ΠΕΙΡΑΜΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΦΡΕΣΚΟΥ ΜΙΓΜΑΤΟΣ

Το πρώτο από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν αφορούσε τη φαινόμενη πυκνότητα φρέσκου μίγματος (fresh density). Αρχικά, κατά τη διαδικασία παραγωγής των δοκιμίων, πριν τοποθετηθεί το μίγμα στα καλούπια συλλέχθηκαν οχτώ διαφορετικές μετρήσεις βάρους με τη χρήση του ίδιου πλαστικού δοχείου. Σε έναν πλαστικό κύλινδρο ύψους 30 εκατοστών και διαμέτρου 15 εκατοστών (όγκος 5,3 λίτρα) 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 μίγματος. Για τον υπολογισμό της πυκνότητας χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση $D = (m_2 - m_1)/V$ όπου D είναι η πυκνότητα του φρέσκου μίγματος σε kg/m^3 , m_1 είναι η μάζα του πλαστικού δοχείου, m_2 είναι η μάζα του δοχείου μαζί με τη μάζα του μίγματος που περιέχεται μέσα σε αυτό σε kg και V είναι ο όγκος του δοχείου σε m^3 (EN12350, 1999). Για κάθε αναλογία μίγματος, χρησιμοποιήθηκαν οι δοσολογίες του Πίνακα 3.1, με αντιστοιχία 1:6,67 καθώς χρειαζόμασταν μικρότερες δόσεις για το μίγμα που θα έμπαινε στον κύλινδρο. Για παράδειγμα, για το δοκίμιο πυκνότητας 800 kg/m^3 , χρησιμοποιήθηκαν 11,25 kg τσιμέντου, 6 λίτρα νερού, 11,25 kg άμμου και 30 λίτρα ανακυκλωμένου EPS.



Εικόνα 3.2. Πρώτη φάση ανάμιξης κονιάματος.

3.2 ΠΕΙΡΑΜΑ ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ

Για την εύρεση της πυκνότητας του μίγματος, αφού έχει περάσει το διάστημα των 28 ημερών, χρησιμοποιήθηκε ένα δοκίμιο διαστάσεων 50x50x7 cm. Για τον υπολογισμό της πυκνότητας του μίγματος έγινε μέτρηση των γραμμικών διαστάσεων του δοκιμίου με χρήση χάρακα και ηλεκτρονικού παχυμέτρου. 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 3.3 φαίνεται ένα δοκίμιο μίγματος 300 kg/m³ πάνω στη ζυγαριά. Για τον υπολογισμό της πυκνότητας χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση $\rho = m/V$ όπου ρ είναι η πυκνότητα σε kg/m³, m είναι η μάζα του δοκιμίου σε kg και V είναι ο όγκος του δοκιμίου σε m³.



Εικόνα 3.3. Πλάκα 300 kg/m³ επάνω στην ηλεκτρονική ζυγαριά.

3.3 ΠΕΙΡΑΜΑ ΘΛΙΨΗΣ

Το συγκεκριμένο πείραμα αφορά τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής του ελαφροσκυροδέματος, για τον οποίο χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια διαστάσεων 20x20x7 cm από κάθε κατηγορία πυκνότητας. Αρχικά μετρήθηκαν οι διαστάσεις του κάθε δοκιμίου με τη χρήση χάρακα και ηλεκτρονικού παχυμέτρου και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν διαδοχικά πάνω σε μια μεταλλική δοκό. Πάνω στο δοκίμιο τοποθετήθηκε ένα μεταλλικό έλασμα ώστε να γίνει πιο ομοιόμορφη η κατανομή της πίεσης, καθώς και για να ακουμπήσουν οι μετρητές μήκους που θα συλλέξουν τις αντίστοιχες παραμορφώσεις. Για την εφαρμογή του φορτίου χρησιμοποιήθηκε η υδραυλική πρέσα του εργαστηρίου και για τη μέτρηση της παραμόρφωσης χρησιμοποιήθηκαν 2 ηλεκτρονικά μηκυνσιόμετρα. Η επιβολή του φορτίου στο δοκίμιο από το έμβολο της πρέσας έγινε με ρυθμό 0,7 mm ανά λεπτό. Ο ρυθμός φόρτισης καθορίστηκε από το πάχος των δοκιμίων, καθώς είναι ίσος με το 10% πάχους των δοκιμίων ανά λεπτό. Η διαδικασία φόρτισης διήρκεσε μέχρι την διαρροή του δοκιμίου ή μέχρι την επίτευξη παραμόρφωσης ίσης με 10% (EN 826, 2013). Στην εικόνα 3.4 φαίνεται η πειραματική διάταξη με την υδραυλική πρέσα, το δοκίμιο και τα ηλεκτρονικά μηκυνσιόμετρα.



Εικόνα 3.4. Πειραματική διάταξη για δοκιμή σε θλίψη.

3.4 ΠΕΙΡΑΜΑ ΥΔΑΤΟΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Η υδατοαπορροφητικότητα ορίζεται ως η ιδιότητα των υλικών να απορροφούν και να συγκρατούν το νερό και εξαρτάται από το πορώδες τους. Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης έρευνας εξετάστηκε ο βαθμός απορρόφησης νερού από τα δοκίμια ελαφροσκυροδέματος καθώς ο βαθμός συγκράτησης του νερού έπεται από 24 ώρες.

Ειδικότερα, για το συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια διαστάσεων 20x20x10 cm. Όλα τα δοκίμια μετρήθηκαν και ζυγίστηκαν με τα αντίστοιχα όργανα μέτρησης και ζύγισης. Έπειτα, το κάθε δοκίμιο ξεχωριστά τοποθετήθηκε σε μια μεταλλική δεξαμενή και ακούμπησε πάνω σε μεταλλικές βέργες διατομής 8 mm, που χρησιμοποιήθηκαν ως αποστάτες (εικόνα 3.5). Πάνω από κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκε ένα βαρίδιο προκειμένου να αποτρέψει οποιαδήποτε δύναμη άνωσης (EN 1609, 2013). Στη συνέχεια προστέθηκε νερό μέσα στη δεξαμενή μέχρι η στάθμη του νερού να καλύψει 1 cm των δοκιμίων. Τα δοκίμια παρέμειναν μέσα στο νερό για 24 ώρες. Με το πέρας του 24ώρου τα δοκίμια αφαιρέθηκαν από το νερό και στηρίχθηκαν υπό γωνία 45 μοιρών μέσα σε ένα δοχείο ώστε να στραγγίσουν. Η διαδικασία της αποστράγγισης διήρκεσε δέκα λεπτά και ύστερα τα δοκίμια ζυγίστηκαν ξανά (εικόνα 3.7). Στην εικόνα 3.6 φαίνεται η πειραματική διάταξη του τεστ της υδατοαπορροφητικότητας.



Εικόνα 3.5. Μεταλλικοί αποστάτες διατομής 8mm.



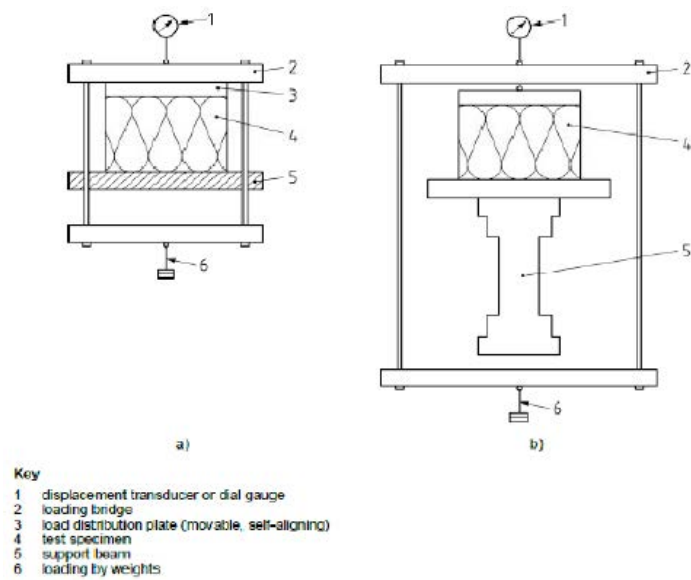
Εικόνα 3.6. Πειραματική διάταξη υδατοαπορροφητικότητας.



Εικόνα 3.7. Ζύγιση δοκιμίου μετά την αποστράγγιση

3.5 ΠΕΙΡΑΜΑ ΕΡΠΥΣΜΟΥ

Ως ερπυσμό ορίζουμε το φαινόμενο το οποίο προκαλείται όταν σε ένα στερεό σώμα ασκήσουμε σταθερή δύναμη και εκείνο υποβληθεί σε αργή και σταθερή παραμόρφωση, παρότι η τάση η οποία το καταπονεί είναι μικρότερη από το όριο διαρροής του υλικού. Όσον αφορά το μίγμα ελαφροσκυροδέματος το οποίο εξετάζεται, είναι σημαντικό να μελετηθεί η συμπεριφορά του υπό σταθερό φορτίο πίεσης. Για το λόγο αυτό η διεξαγωγή του πειράματος του ερπυσμού διήρκεσε 90 ημέρες και πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις οδηγίες του Ευρωπαϊκού Προτύπου (EN 1606, 2013). Τα πειράματα ερπυσμού διεξήχθησαν έπειτα από τα πειράματα θλίψης διότι ήταν αναγκαίο να υπολογιστεί το φορτίο πίεσης που θα ασκούνταν σε κάθε δοκίμιο. Αναλυτικότερα, το φορτίο που ασκήθηκε στις πλάκες ελαφροσκυροδέματος, διαστάσεων 20x20x7 cm αντιστοιχούσε στο 15% της αντίστοιχης θλιπτικής τους αντοχής, όπως αυτή υπολογίστηκε από το πείραμα της θλίψης. Για παράδειγμα, τα δοκίμια με ονομαστική πυκνότητα 800 kg/m³ έχουν μέση θλιπτική αντοχή 1,16 MPa. Άρα για το 15% της τιμής αυτής θα πρέπει στα συγκεκριμένα δοκίμια να επιβληθεί ένα φορτίο μάζας 680 kg. Σχετικά με την πειραματική διάταξη, για κάθε κατηγορία πυκνότητας χρησιμοποιήθηκαν δύο δοκίμια από κάθε μίγμα, έχοντας ένα μεταλλικό έλασμα ανάμεσα από το δοκίμιο και το φορτίο που θα ασκούνταν. Για τη μέτρηση των παραμορφώσεων χρησιμοποιήθηκαν 2 αναλογικά μηκυνσιόμετρα (ρολόγια γράφτη) τα οποία συνδέθηκαν με τα μεταλλικά ελάσματα. 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 3.8. Παράδειγμα διάταξης πειράματος ερπυσμού.



Εικόνα 3.9. Πραγματική πειραματική διάταξη ερπυσμού

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο αναφέρονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών που προαναφέρθηκαν, τα οποία παρουσιάζονται με τη μορφή πινάκων και διαγραμμάτων.

4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ

Όπως εξηγήθηκε στο κεφάλαιο 3.1 κατά τη διαδικασία της παραγωγής των δοκιμών λήφθηκαν μετρήσεις ώστε να διευκρινιστεί η φαινόμενη πυκνότητα του κάθε μίγματος. Η πειραματική δοκιμή της φαινόμενης πυκνότητας ακολούθησε το Ευρωπαϊκό Πρότυπο (EN 12350, 2000). Στον Πίνακα 4.1 παρατίθεται ο μέσος όρος των τιμών των πυκνοτήτων του κάθε μίγματος για οχτώ δοκιμές.

Πίνακας 4.1. Μέσες φαινόμενες πυκνότητες μιγμάτων.

Μίγμα	Βάρος (kg)	Όγκος (l)	Πυκνότητα (kg/m ³)
300	2,289	5,3	432,07
400	2,768	5,3	522,32
600	3,509	5,3	662,07
800	5,075	5,3	957,54

Είναι εύκολα παρατηρήσιμο ότι οι πραγματικές πυκνότητες που μετρήθηκαν έχουν μια απόκλιση των 100 kg/m³ τουλάχιστον σε σχέση με τις ονομαστικές πυκνότητες των μιγμάτων, γεγονός που πιθανόν να οφείλεται στη δεσμευμένη υγρασία που υπάρχει μέσα στο κονίαμα και δεν έχει προλάβει να εξατμιστεί.

4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ

Η διεξαγωγή της πειραματικής δοκιμής της δεσμευμένης πυκνότητας έγινε σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο (EN 1602, 2013). Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζεται η δεσμευμένη πυκνότητα του κάθε μίγματος.

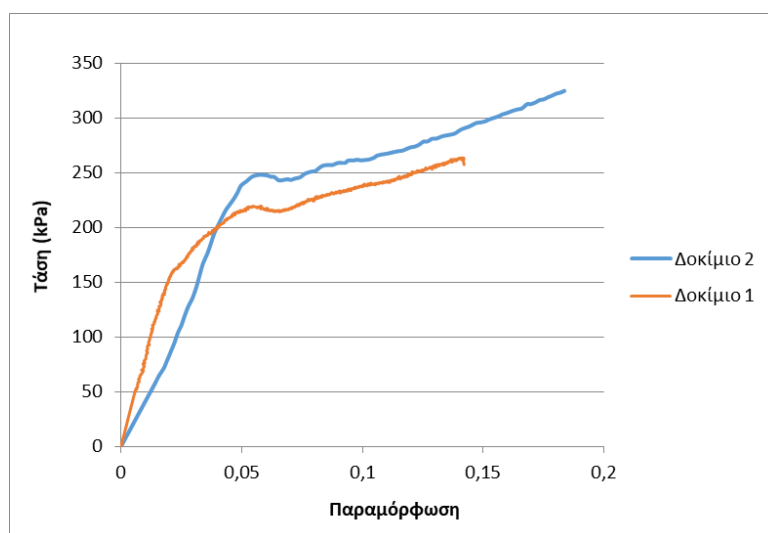
Πίνακας 4.2. Τιμές Δεσμευμένης Πυκνότητας

Μίγμα	Δεσμευμένη Πυκνότητα (kg/m ³)
300	367,71
400	477,43
600	623,45
800	855,14

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.2, οι τιμές των δεσμευμένων πυκνοτήτων είναι αισθητά μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές των φαινόμενων πυκνοτήτων, γεγονός που ενισχύει τον ισχυρισμό για την περίσσεια παρουσία υγρασίας που υπήρχε στα φρέσκα μίγματα και η οποία εξατμίστηκε στα καλούπια με την πάροδο των 28 ημερών. Θα μπορούσε να εξεταστεί και η πυκνότητα των δοκιμών έπειτα από 40 ημέρες στα καλούπια προκειμένου να διαπιστωθεί αν θα προέκυπτε μικρότερη απόκλιση μεταξύ ονομαστικής και πραγματικής πυκνότητας.

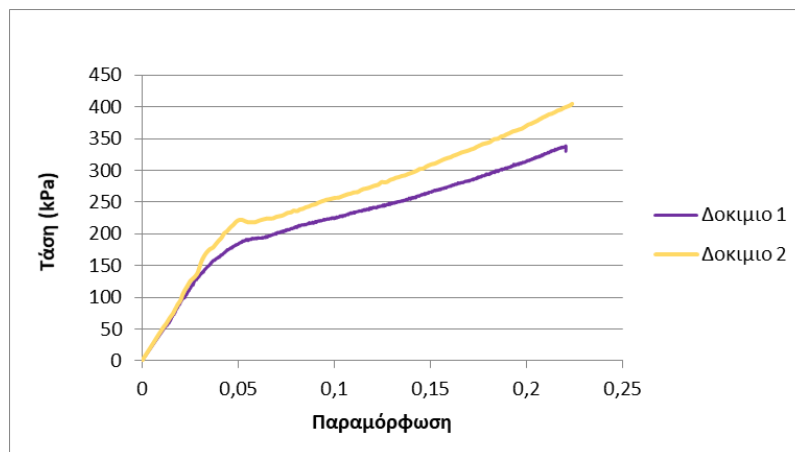
4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΘΛΙΨΗΣ

Για το πείραμα της θλίψης δοκιμάστηκαν 2 πλάκες ελαφροσκυροδέματος από κάθε κατηγορία πυκνότητας, όπως ορίζει και το Ευρωπαϊκό Πρότυπο (EN 826, 2013). Η μέση θλιπτική αντοχή της εκάστοτε ονομαστικής πυκνότητας υπολογίστηκε από το μέσο όρο των αντίστοιχων θλιπτικών αντοχών των δοκιμών. Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης (σ - ϵ) για κάθε ονομαστική πυκνότητα ξεχωριστά.

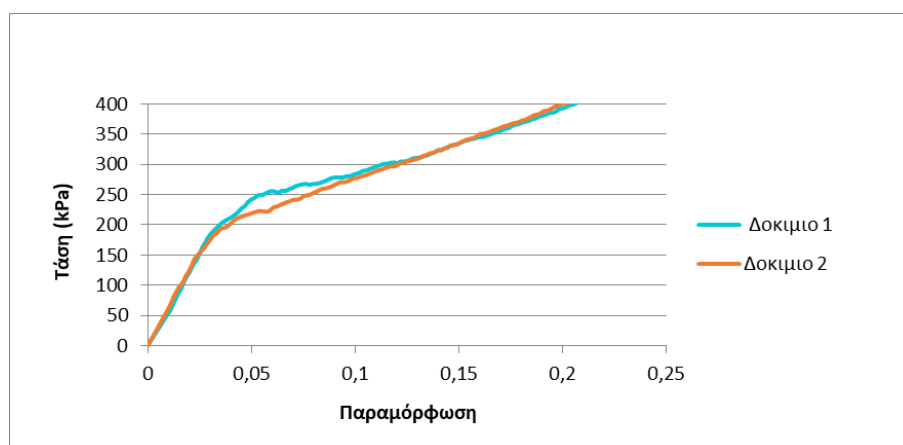


Σχήμα 4.1. Συγκεντρωτικό διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης μίγματος 300 kg/m^3

Στο Σχήμα 4.1, όπου παρουσιάζονται οι καμπύλες των τάσεων και των παραμορφώσεων για τα δοκίμια των 300 kg/m^3 , παρατηρούμε ομαλή κλίση των καμπυλών με το όριο διαρροής να φτάνει την τιμή των $217,67 \text{ kPa}$ για το 1^ο δοκίμιο, ενώ για το 2^ο η τιμή αγγίζει τα $247,93 \text{ kPa}$.

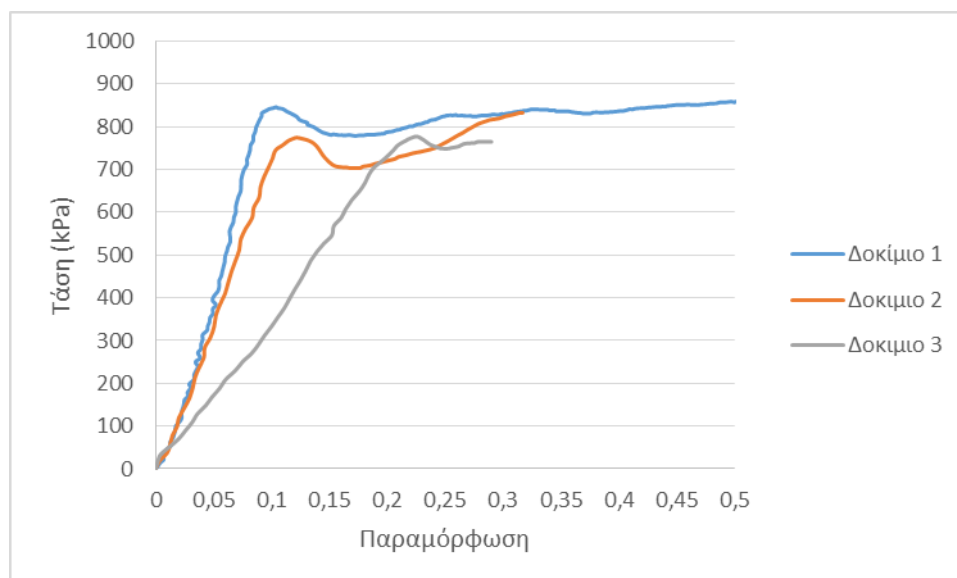


Σχήμα 4.2. Συγκεντρωτικό διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης μίγματος 400 kg/m³



Σχήμα 4.3. Συγκεντρωτικό διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης μίγματος 600 kg/m³

Στα Σχήματα 4.2 και 4.3 οι καμπύλες παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα στις κλίσεις τους, με πιο έντονη την ομοιότητα των καμπυλών για τα δοκίμια των 600 kg/m³.



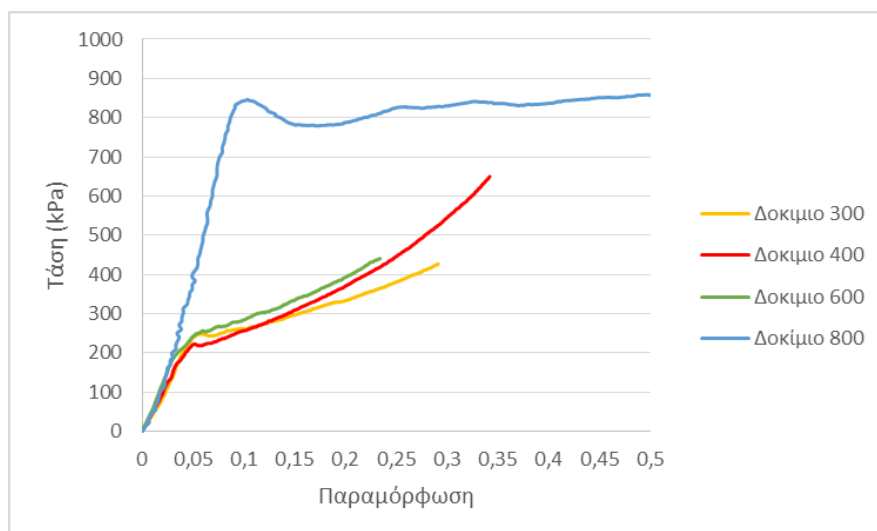
Σχήμα 4.4. Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης μίγματος 800 kg/m³

Το Σχήμα 4.4 διαφέρει σχηματικά από τα προηγούμενα. Παρατηρούμε μια πιο ήπια κλίση στην καμπύλη η οποία κορυφώνεται στην τιμή των 838,36 kPa. Η τιμή αυτή είναι περίπου 3 φορές υψηλότερη από την τιμή των 600 kg/m³, που είναι 254,12 kPa. Ο Πίνακας 4.3 δίνει συγκεντρωτικά τις τιμές των μέσων όρων θλιπτικής τάσης ανά κατηγορία μίγματος.

Πίνακας 4.3. Πίνακας αποτελεσμάτων πειράματος θλίψης.

Μίγμα	Μέσος όρος θλιπτικής δύναμης (kN)	Μέσος όρος θλιπτικής τάσης (kPa)
300	8,36	235,08
400	8,34	208,48
600	11,13	243,42
800	46,49	796,85

Λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές του Πίν. 4.3, παρατηρούμε ότι το τσιμέντο συμβάλει σημαντικά στην αύξηση της θλιπτικής αντοχής. Τα συγκεκριμένα δοκίμια, λόγω της χαμηλής τους πυκνότητας, δεν έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε τσιμέντο, γεγονός που οδηγεί σε πολύ χαμηλότερες τιμές τάσεων από αυτές ενός τυπικού σκυροδέματος (20-40 MPa).



Σχήμα 4.5. Συγκεντρωτικό διάγραμμα δοκιμών τάσης-παραμόρφωσης.

Στο Σχήμα 4.5 έχουμε συγκεντρώσει τις πιο χαρακτηριστικές καμπύλες σε ένα διάγραμμα, προκειμένου να συγκρίνουμε τις κλίσεις τους και τα μέτρα ελαστικότητας τους. Η μορφή της καμπύλης των «800» απέχει αρκετά, σχηματικά, από τις υπόλοιπες καμπύλες, καθώς επιδέχεται και μεγαλύτερες παραμορφώσεις και υψηλότερες τάσεις μέχρι το σημείο διαρροής του. Στον Πίνακα 4.4 που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα μέτρα ελαστικότητας που προέκυψαν από τις συγκεκριμένες καμπύλες.

Πίνακας 4.4. Τιμές μέτρων ελαστικότητας ανά κατηγορία.

Μίγμα	Μέτρο ελαστικότητας (Mpa)
300	5,26
400	4,67
600	6,02
800	8,71

Από τον Πίν.4.4, η μεγαλύτερη τιμή του μέτρου ελαστικότητας ανήκει στο μίγμα των «800», ενώ αντίστοιχα η μικρότερη στο μίγμα των «400». Η αύξηση της ποσότητας τσιμέντου συνήθως οδηγεί σε αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος, καθώς το τσιμέντο δρα ως συνδετικό υλικό που ενισχύει τη συνοχή του μίγματος. Με τη βελτίωση της αντοχής του σκυροδέματος, αυξάνεται και το μέτρο ελαστικότητας του, κάνοντάς το πιο ανθεκτικό σε παραμορφώσεις. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, παρατηρούμε η αύξηση του τσιμέντου στο μίγμα των «400» δε μεταφράζεται και σε αύξηση του μέτρου ελαστικότητας, γεγονός που παρατηρήθηκε και στον Πιν.4.3 με τις τιμές των θλιπτικών τάσεων.

Τέλος, στις εικόνες που ακολουθούν, φαίνονται οι τελικές μορφές ορισμένων δοκιμών μετά το πέρας του πειράματος θλίψης.



Εικόνα 4.1. Δοκίμιο των 800 kg/m³ έπειτα από θλίψη



Εικόνα 4.2. Δοκίμιο των 400 kg/m³ έπειτα από θλίψη.

4.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΥΔΑΤΟΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Το πείραμα της υδατοαπορροφητικότητας ακολούθησε το Ευρωπαϊκό Πρότυπο (EN 1609, 2013). Για την εύρεση των αποτελεσμάτων δοκιμάστηκαν τρεις πλάκες 20x20x10 cm από κάθε μίγμα έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί ο μέσος όρος τους σαν το τελικό αποτέλεσμα. Για τη μέτρηση της υδατοαπορροφητικότητας εφαρμόστηκε η εξίσωση $W_p = (M_2 - M_1) / A$, όπου W_p το μέτρο της υδατοαπορροφητικότητας σε kg/m², M_1 η μάζα του δοκιμίου πριν το πείραμα, M_2 η μάζα του δοκιμίου μετά το πείραμα και A η επιφάνεια του δοκιμίου σε m². Στον Πίνακα 4.5 αναγράφεται ο μέσος όρος της απορροφητικότητας του κάθε μίγματος εκφρασμένης σε kg/m².

Πίνακας 4.5. Πίνακας αποτελεσμάτων πειράματος υδατοαπορροφητικότητας.

Μίγμα	Wp (kg/m ²)	Τυπική απόκλιση σ
300	4,542	0,315
400	4,292	0,144
600	4,375	0,76
800	3,083	0,416

Από τα αποτελέσματα του πειράματος της υδατοαπορροφητικότητας όπως αυτά παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 4.5 γίνεται εμφανές ότι με την αύξηση της πυκνότητας μειώνεται η υδροαπορροφητικότητα του μίγματος. Μια πιθανή εξήγηση θα μπορούσε να είναι ότι με την αύξηση του τσιμεντοπολτού στο μίγμα και κατ' επέκταση με την αύξηση της συνολικής πυκνότητας, μειώνονται τα κενά που δημιουργούνται μεταξύ των κόκκων του EPS αποτρέποντας με αυτό τον τρόπο την εισχώρηση και τη συγκράτηση του νερού στους πόρους του δοκιμίου.

4.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΕΡΠΥΣΜΟΥ

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3.5, για το πείραμα του ερπυσμού επιβλήθηκαν φορτία στα δοκίμια τα οποία αντιστοιχούσαν στο 15% της θλιπτικής τους αντοχής, σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά πρότυπα (EN 1606, 2013). Το πείραμα διήρκεσε συνολικά 90 ημέρες και στον πίνακα 4.6 παρουσιάζονται τα χρονικά διαστήματα μεταξύ των μετρήσεων των παραμορφώσεων.

Πίνακας 4.6. Παράδειγμα των χρονικών διαστημάτων μεταξύ των μετρήσεων.

Μέρα	Διάρκεια σε ώρες
0	0
0	0,017
0	1
0	5
1	24
2	48
4	100
7	168
9	216
11	264
14	336
18	432
24	576
32	768
42	1008
53	1272
65	1560
80	1920
90	2160

Ακολουθεί ο Πίνακας 4.7 με τα επιβληθέντα φορτία σε κάθε κατηγορία μιγμάτων.

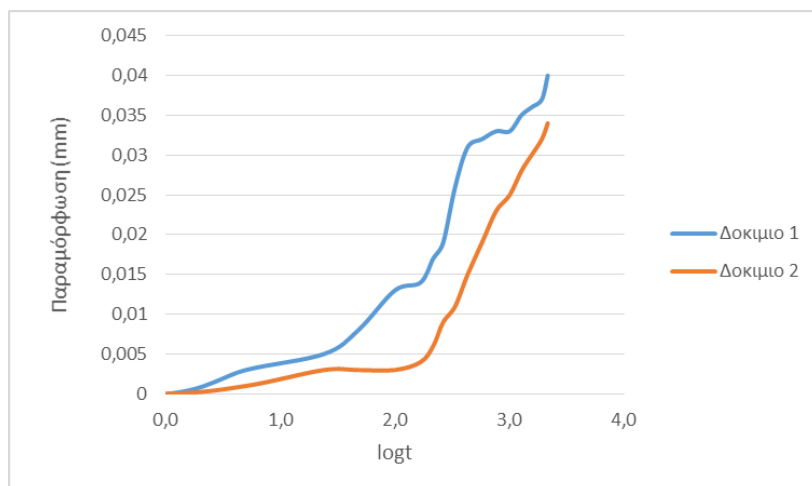
Πίνακας 4.7. Αντιστοιχία μιγμάτων με φορτία επιβολής τάσης.

Μίγμα	Φορτίο (kPa)
300	31,26
400	31,27
600	41,75
800	166,75

Τα αποτελέσματα του πειράματος του ερπυσμού δίνονται υπό τη μορφή πινάκων και διαγραμμάτων. Πιο αναλυτικά, για κάθε κατηγορία μίγματος δίνεται ένας πίνακας με τις αναγραφόμενες χρονικές στιγμές και τις αντίστοιχες μετρήσεις παραμόρφωσης, καθώς και τον μέσο όρο αυτών και ένα γράφημα παραμόρφωσης-logt.

Πίνακας 4.8. Μετρήσεις παραμόρφωσης μίγματος 300 kg/m³

Χρόνος μέτρησης (h)	Παραμόρφωση Δοκ(300),1(mm)	Παραμόρφωση Δοκ(300),2(mm)	Μ.Ο Παραμορφώσεων
0	0	0	0
0,017	0	0	0
1	0,003	0,001	0,002
5	0,005	0,003	0,004
24	0,008	0,003	0,0055
48	0,013	0,003	0,008
100	0,014	0,004	0,009
168	0,017	0,006	0,0115
216	0,019	0,009	0,014
264	0,026	0,011	0,0185
336	0,031	0,015	0,023
432	0,032	0,019	0,0255
576	0,033	0,023	0,028
768	0,033	0,025	0,029
1008	0,035	0,028	0,0315
1272	0,036	0,03	0,033
1560	0,037	0,032	0,0345
1920	0,04	0,034	0,037
2160	0,04	0,034	0,037

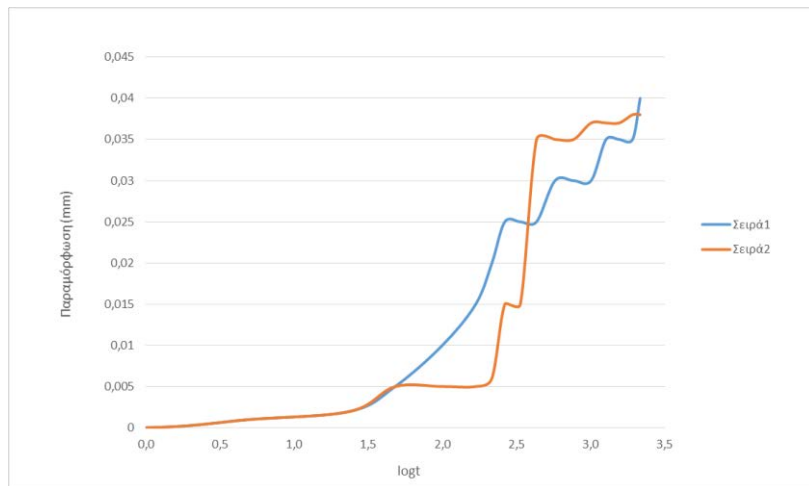


Σχήμα 4.6. Διάγραμμα παραμόρφωσης-logt μίγματος 300kg/m³.

Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται το διάγραμμα παραμορφώσεων των δοκιμίων του μίγματος 300 kg/m³ ως προς το χρόνο σε λογαριθμική κλίμακα. Παρατηρούμε ότι και τα δύο δοκίμια έχουν παρόμοια μορφή και κλίση. Συγκεκριμένα και τα δύο δοκίμια υφίστανται εντονότερες παραμορφώσεις μετά την τιμή «2,0» στη λογαριθμική κλίμακα του χρόνου έως και την τιμή «3,0» όπου σταματάνε οι καταγραφές. Από τον Πίν.4.8 αλλά και από το διάγραμμα διακρίνουμε ότι το 1^ο δοκίμιο έχει υψηλότερη τιμή παραμόρφωσης από το 2^ο.

Πίνακας 4.9. Μετρήσεις παραμόρφωσης μίγματος 400 kg/m³

Χρόνος μέτρησης (h)	Παραμόρφωση Δοκ(400).1(mm)	Παραμόρφωση Δοκ(400).2(mm)	Μ.Ο Παραμορφώσεων
0	0	0	0
0,017	0,001	0,001	0,001
1	0,002	0,002	0,002
5	0,005	0,005	0,005
24	0,01	0,005	0,0075
48	0,015	0,005	0,01
100	0,02	0,006	0,013
168	0,025	0,015	0,02
216	0,025	0,015	0,02
264	0,025	0,035	0,03
336	0,03	0,035	0,0325
432	0,03	0,035	0,0325
576	0,03	0,037	0,0335
768	0,035	0,037	0,036
1008	0,035	0,037	0,036
1272	0,035	0,038	0,0365
1560	0,04	0,038	0,039
1920	0,04	0,038	0,039
2160	0,04	0,038	0,039



Σχήμα 4.7. Διάγραμμα παραμόρφωσης-logt μίγματος 400kg/m³.

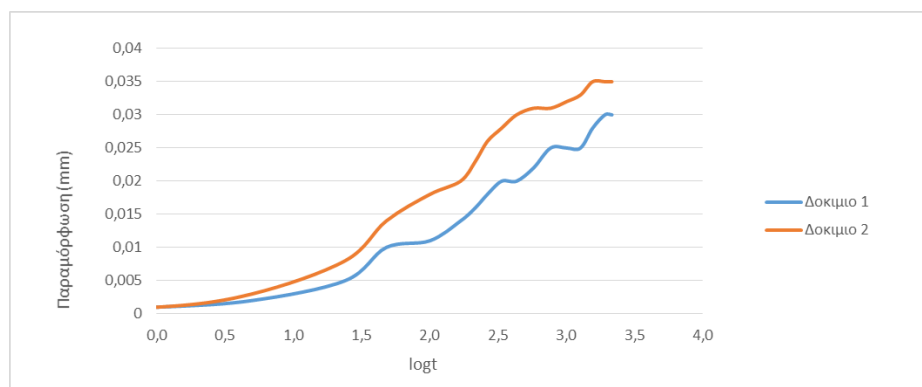
Το Σχήμα 4.7 παρουσιάζει τη συμπεριφορά των δοκιμών των 400 kg/m³ σε ερπυστική παραμόρφωση. Η ιδιομορφία των καμπυλών, με τις απότομες αλλαγές κλίσης μας δείχνει ότι υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις στις παραμορφώσεις από την προηγούμενη έως την επόμενη καταμέτρηση. Σε αυτή την περίπτωση θα ήταν πιο ωφέλιμο να γινόταν συχνότερη καταγραφή μετρήσεων από την προτεινόμενη με στόχο την καλύτερη γραφική απεικόνιση της συμπεριφοράς των δοκιμών.

Πίνακας 4.10. Μετρήσεις παραμόρφωσης μίγματος 600 kg/m³

Χρόνος μέτρησης (h)	Παραμόρφωση Δοκ(600),1(mm)	Παραμόρφωση Δοκ(600),2(mm)	Μ.Ο Παραμορφώσεων
0	0	0	0
0,017	0,001	0,001	0,001
1	0,002	0,003	0,0025
5	0,005	0,008	0,0065
24	0,01	0,014	0,012
48	0,011	0,018	0,0145
100	0,014	0,02	0,017
168	0,016	0,023	0,0195
216	0,018	0,026	0,022
264	0,02	0,028	0,024
336	0,02	0,03	0,025
432	0,022	0,031	0,0265
576	0,025	0,031	0,028
768	0,025	0,032	0,0285
1008	0,025	0,033	0,029
1272	0,028	0,035	0,0315
1560	0,03	0,035	0,0325
1920	0,03	0,035	0,0325
2160	0,03	0,035	0,0325

Στον Πίνακα 4.10, όπου παρατίθενται οι τιμές των παραμορφώσεων των δοκιμών με πυκνότητα 600 kg/m³, παρατηρούμε ότι η μέγιστη παραμόρφωση, κατά μέσο όρο, έχει

μικρότερη τιμή από τις προηγούμενες κατηγορίες πυκνοτήτων, όπως θα περιμέναμε εξάλλου λόγω της αύξησης της πυκνότητας. Στο Σχήμα 4.8 διακρίνουμε μια ομαλή κλίση στα διαγράμματα, με λιγότερο έντονες αυξομειώσεις και παρόμοια μορφή. Το συμπέρασμα στο οποίο οδηγούμαστε είναι ότι πραγματοποιήθηκε καλύτερη συλλογή των μετρήσεων και πιθανόν καλύτερη ισορρόπηση των φορτίων πάνω στο δοκίμιο η οποία συνέβαλλε σε πιο ακριβείς καταγραφές των αναλογικών μηχανομετρών.



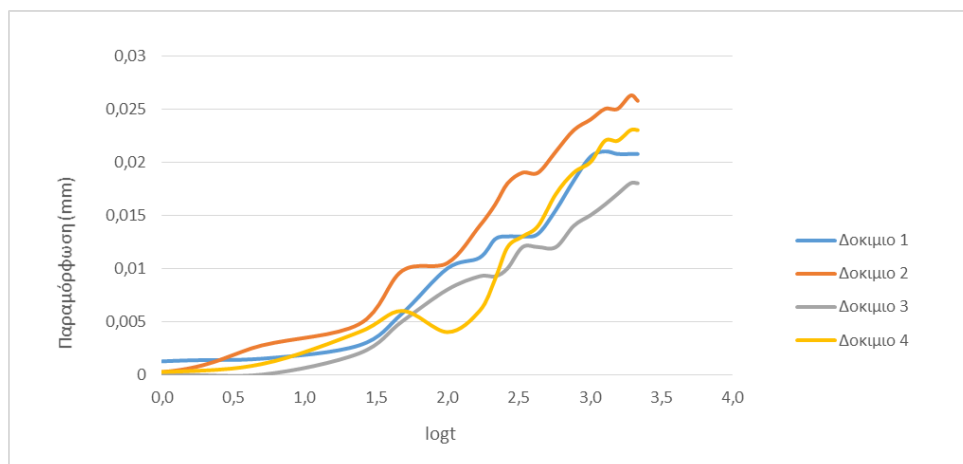
Σχήμα 4.8. Διάγραμμα μέσου όρου παραμόρφωσης-logt μίγματος 600kg/m³.

Από τον Πιν. 4.11 που δίνει τις τιμές παραμορφώσεων για τα δοκίμια των «800», συμπεραίνουμε ότι τα συγκεκριμένα δοκίμια υφίσταντο και τη μικρότερη ερπυστική παραμόρφωση σε σύγκριση με τα άλλα, γεγονός που δε μας προκαλεί έκπληξη καθώς ήδη από το πείραμα θλίψης είδαμε ότι η αύξηση της πυκνότητας και ειδικότερα η αύξηση της ποσότητας του τσιμέντου προκαλεί αύξηση της αντοχής σε συμπίεση.

Πίνακας 4.11. Μετρήσεις παραμόρφωσης μίγματος 800 kg/m³

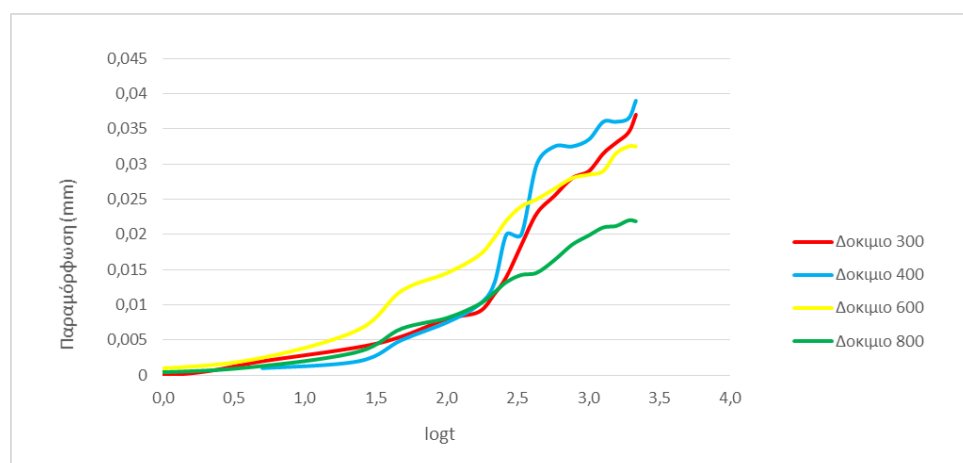
Χρόνος μέτρησης (h)	Παραμόρφωση Δοκ(800),1(mm)	Παραμόρφωση Δοκ(800),2(mm)	Παραμόρφωση Δοκ(800),3(mm)	Παραμόρφωση Δοκ(800),4(mm)	Μ.Ο Παραμορφώσεων
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,017	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,002	0,003	0,000	0,001	0,001
5	0,003	0,005	0,002	0,004	0,003
24	0,006	0,010	0,005	0,006	0,007
48	0,010	0,011	0,008	0,004	0,008
100	0,011	0,014	0,009	0,006	0,010
168	0,013	0,016	0,009	0,009	0,012
216	0,013	0,018	0,010	0,012	0,013
264	0,013	0,019	0,012	0,013	0,014
336	0,013	0,019	0,012	0,014	0,015
432	0,016	0,021	0,012	0,017	0,016
576	0,018	0,023	0,014	0,019	0,019
768	0,021	0,024	0,015	0,020	0,020
1008	0,021	0,025	0,016	0,022	0,021
1272	0,021	0,025	0,017	0,022	0,021
1560	0,021	0,026	0,018	0,023	0,022
1920	0,021	0,026	0,018	0,023	0,022
2160	0,021	0,026	0,018	0,023	0,022

Προχωρώντας στο Σχήμα 4.9, αντιλαμβανόμαστε σχηματικά τα δεδομένα που μας δίνει ο Πιν.4.11 μέσω των τεσσάρων καμπυλών για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά. Οι κλίσεις σε αυτό το σχήμα είναι ακόμα πιο ήπιες, κυρίως στην αρχή μέχρι τη χρονική τιμή «1,5» του άξονα $\log t$, ενώ οι τελικές παραμορφώσεις κυμαίνονται στο διάστημα τιμών από 0,015-0,025 mm.



Σχήμα 4.9. Διάγραμμα μέσου όρου παραμόρφωσης- $\log t$ μίγματος 800kg/m³.

Τέλος, στο Σχήμα 4.10 ακολουθεί ένα ιδιαίτερα χρήσιμο διάγραμμα στο οποίο εμπεριέχονται οι μέσοι όροι των παραμορφώσεων των δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε ερπυσμό ανά κατηγορία πυκνότητας. Το συγκεντρωτικό αυτό διάγραμμα μας βοηθά να διαπιστώσουμε οπτικά τις διαφορές στη συμπεριφορά των εκάστοτε δοκιμίων και να συγκρίνουμε τη μορφή τους, τις μέγιστες τιμές των μέσων όρων, τις αλλαγές στην κλίση και τις διακυμάνσεις στις τιμές ανά χρονική στιγμή. Εδώ επιβεβαιώνουμε ξανά ότι οι πλάκες ελαφροσκυροδέματος που εξετάστηκαν στον ερπυσμό, υφίστανται τις πιο έντονες παραμορφώσεις στο διάστημα χρονικών περιόδων από «1,5-2,5» της λογαριθμικής κλίμακας του χρόνου.



Σχήμα 4.10. Συγκεντρωτικό διάγραμμα μέσων όρων παραμόρφωσης- $\log t$ όλων των κατηγοριών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κλείνοντας την παραπάνω έρευνα, εφόσον εξετάστηκαν τα ερωτήματα που τέθηκαν στην εισαγωγή, καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

- Αρχικά, η δεσμευμένη πυκνότητα των τεσσάρων μιγμάτων κυμαίνεται από τα 432-958 kg/m³ δηλαδή η δεσμευμένη πυκνότητα του ελαφροσκυροδέματος είναι μεταξύ του 15-35% αυτής του τυπικού σκυροδέματος. Συνεπώς μια κατασκευή που θα περιείχε ελαφροσκυρόδεμα σε μέλη που αυτό θα μπορούσε να αντικαταστήσει το τυπικό σκυρόδεμα, θα μείωνε σημαντικά το βάρος της.
- Η θλιπτική αντοχή του LWC, όμως, δε θα του επέτρεπε να αξιοποιηθεί ως φέρων οργανισμός σε μια κατασκευή, διότι στα δοκίμια που εξετάστηκαν η θλιπτική αντοχή κυμαίνεται μεταξύ 0,2-0,4 MPa, αποτελώντας το 1% της αντοχής ενός συμβατικού σκυροδέματος
- Μπορούμε με ευκολία να πούμε ότι τα τέσσερα μείγματα ελαφροσκυροδέματος που αναπτύχθηκαν ανήκουν στην κατηγορία του υπέρ-ελαφρού σκυροδέματος καθώς η πυκνότητα οριακά ξεπερνά τα 800 kg/m³. Τέτοιου τύπου σκυροδέματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ειδικές κατασκευές που το χαμηλός βάρος και ενδεχομένως οι θερμομονωτικές ιδιότητες να είναι σημαντικές.
- Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα του πειράματος ερπυσμού, παρατηρούμε ότι οι παραμορφώσεις στα εξεταζόμενα δοκίμια είναι της τάξης των δεκάτων του χιλιοστού. Επομένως, διαπιστώνεται ότι μια ενδεχόμενη χρήση του συγκεκριμένου κονιάματος θα μπορούσε να είναι η τοποθέτηση του ως σκυρόδεμα καθαριότητας ή ως εξισωτική πλάκα για την τοποθέτηση πλακιδίων, ενδοδαπέδιας θέρμανσης, προετοιμασίας δαπέδων κ.α.
- Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πειράματος υδατοαπορροφητικότητας, συμπεραίνουμε ότι με την αύξηση της πυκνότητας του μίγματος μειώνεται η υδατοαπορροφητικότητα. Σε μια ενδεχόμενη έρευνα για τις θερμομονωτικές ιδιότητες των κονιαμάτων αυτών, θα μπορούσε να εξεταστεί κατά πόσο θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν ως τοιχοποιία, αντικαθιστώντας τους οπτόπλινθους.

Εν κατακλείδι, το ελαφροσκυρόδεμα από αδρανή ανακυκλωμένου EPS αποτελεί ένα προϊόν το οποίο σε υψηλότερες πυκνότητες θα μπορούσε να χαρακτηριστεί και ως δομικό υλικό με δυνατότητα συμμετοχής του στο φέροντα οργανισμό μιας κατασκευής, ωστόσο στις πυκνότητες που ήδη εξετάστηκε πρόκειται για ένα μονωτικό υλικό εξαιρετικής απόδοσης, φιλικό προς το περιβάλλον και ευρέως διαθέσιμο. Θα μπορούσε αυτή η έρευνα να αποτελέσει προπομπό για μεταγενέστερες έρευνες πάνω σε άλλες ιδιότητες του υλικού αυτού, προκειμένου να προκύψουν και περισσότερες εφαρμογές του.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

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

Akcaozoglu S., Akcaozoglu K. and Atis C., (2009), An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete, Waste Management 30,pp. 285-290

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

Bhoyar D., Kowale S., Moon A., Patle A., Selokar L., Quaz S., (2020), lightweight 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

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

Fernando P., Jayasinghe M. and Jayasinghe C., (2017), Structural feasibility of EPS based lightweight concrete sandwich wall panels, *Construction and Building Materials* 139, pp.45-51

Gawale R., Mishra S., Sambare H., Kothari J. and Patil M., (2016), Lightweight concrete by using EPS beads, *International Journal of Innovative Research in Science and Engineering* Vol. 2, Issue 03

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

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

Petalas Z., (2022), Experimental testing for the characterization of lightweight concrete containing expanded polystyrene aggregates, *University of Thessaly (Thesis)*

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

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

Tittarelli F., Giosue C., Mobili A. and Monosi S., (2016), Effect of using recycled instead of virgin EPS in lightweight mortars, *Procedia Engineering* 161, pp. 660-665

Vandanapu S. and Muthumani K., (2018), Seismic performance of lightweight concrete structures, *Advances in Civil Engineering* vol.18, ID 2105784