

Σύνθεση σκυροδέματος μεγάλου ειδικού βάρους με σκωρίες χαλβουργίας και ίνες χάλυβα

Ελευθέριος Αναστασίου 1

Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ., elan@civil.auth.gr

Μιχαήλ Παπαχριστοφόρου

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, papchr@civil.auth.gr

Αλέξανδρος Λιάπης

Υποψήφιος Διδάκτωρ ΑΠΘ, aliapisk@civil.auth.gr

Ιωάννα Παπαγιάννη

Καθηγήτρια Α.Π.Θ., parayian@civil.auth.gr

Εισαγωγή

Το σκυρόδεμα είναι ένα σχετικά οικονομικό δομικό υλικό που χρησιμοποιείται για την βιολογική προστασία από ακτινοβολίες και όταν υπάρχει περιορισμός χώρου, η μείωση του πάχους θωράκισης μπορεί να επιτευχθεί αν χρησιμοποιηθεί βαρύ σκυρόδεμα για την παραγωγή του οποίου απαιτούνται αδρανή μεγάλου ειδικού βάρους [1,2]. Γενικά ως βαρύ σκυρόδεμα ορίζεται το σκυρόδεμα με πυκνότητα που κυμαίνεται από 3000 έως 6000 kg/m³, ενώ στο συμβατικό σκυρόδεμα η πυκνότητα κυμαίνεται από 2200 έως 2450 kg/m³ [3]. Το βαρύ σκυρόδεμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε μη πυρηνικές εφαρμογές όπως στην κατασκευή λιμενικών έργων, ως υλικό πόντισης καλωδίων ή σταθεροποίησης υποθαλάσσιων αγωγών, σαν υλικό μείωσης κραδασμών και θορύβου ή ως αντίβαρο σε πλοία, γερανούς ή γέφυρες. Ωστόσο, η κυρία χρήση του αφορά την θωράκιση από ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Εκτός από τον τομέα της πυρηνικής ενέργειας, υπάρχουν και άλλες πηγές τεχνητής ακτινοβολίας όπως δεξαμενές αποθήκευσης ή μεταφοράς ραδιενεργών αποβλήτων, κέντρα θεραπείας καρκίνου Χ και γ-ακτινοβολίας, ερευνητικά εργαστήρια ή στη βιομηχανία σε εφαρμογές ακτινοβολιών. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις η ύπαρξη της θωράκισης είναι απαραίτητη για την προστασία από την ακτινοβολία. Όταν το σκυρόδεμα μεγάλης πυκνότητας χρησιμοποιείται για τη θωράκιση έναντι ακτινοβολίας, η πυκνότητα του και το κόστος των υλικών (κυρίως των αδρανών) που το συνθέτουν αποτελούν τους σημαντικότερους παράγοντες σχεδιασμού [4]. Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 637, τα αδρανή μεγάλου ειδικού βάρους που χρησιμοποιούνται στην παρασκευή βαρέως σκυροδέματος κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την προέλευση τους σε φυσικά και τεχνητά αδρανή [5]. Το συγκεκριμένο πρότυπο περιλαμβάνει τις προδιαγραφές για αδρανή σκυροδέματος που προορίζεται για βιολογική θωράκιση από ακτινοβολίες (ομοιόμορφη πυκνότητα, ελάχιστο ποσοστό δεσμευμένου νερού, κοκκομετρική ανάλυση, ανθεκτικότητα) ενώ το πρότυπο ASTM C 638 περιγράφει την ονοματολογία και τα συστατικά αυτών των αδρανών [6]. Τα αδρανή καταλαμβάνουν τουλάχιστον τα τρία τέταρτα του όγκου του σκυροδέματος επηρεάζοντας έτσι σημαντικά τις ιδιότητες του [7]. Για παράδειγμα, αδρανή μεγάλου ειδικού βάρους όπως ο Αιματίτης [8], ή τα μεταλλεύματα σιδήρου [9], αυξάνουν την αντοχή και την δυσθραυστότητα του σκυροδέματος σε σύγκριση με το συμβατικό. Η έρευνα των Akkurt και συν. (2010) έδειξε ότι τα αδρανή βαρύτη αυξάνουν την ικανότητα θωράκισης του σκυροδέματος έναντι ακτινοβολιών [10]. Σε διεθνές επίπεδο έχουν διεξαχθεί αρκετές έρευνες με διαφορετικά φυσικά ή τεχνητά αδρανή για την παραγωγή σκυροδέματος

μεγάλου ειδικού βάρους, ανάλογα με τα διαθεσιμότητα και την αποτελεσματικότητα των αδρανών αυτών [11,12,13].

Ιδανικές φυσικές ιδιότητες του σκυροδέματος θωράκισης είναι το υψηλό Μέτρο Ελαστικότητας, ο χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής και η χαμηλή συστολή ξήρανσης και ερπυσμού. Υψηλές τιμές της θλιπτικής αντοχής μπορεί να απαιτούνται όταν το βαρύ σκυρόδεμα πρόκειται να υποβληθεί σε υψηλά επίπεδα θερμοκρασίας και φόρτισης. Επίσης, σύμφωνα με την οδηγία ACI 349-01 (Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures), το σκυρόδεμα θωράκισης πρέπει να είναι ανθεκτικό σε παγετό, υψηλές θερμοκρασίες, προσβολή από χημικές ουσίες (θειικά, χλωροϊόντα κ.α.) και να προσφέρει επαρκή προστασία στον οπλισμό [14]. Άλλες επιθυμητές ιδιότητες του σκυροδέματος είναι η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, το χαμηλό κόστος και η ευκολία εφαρμογής και λειτουργίας. Επίσης σημαντική είναι η απαίτηση για μείωση των ρηγματώσεων οι οποίες μπορεί να επεκταθούν κάτω από συνθήκες έκθεσης υψηλών θερμοκρασιών και ακτινοβολίας. Ένας αποτελεσματικός τρόπος μείωσης των ρηγματώσεων είναι η προσθήκη ινών στο σκυρόδεμα. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε σύγκριση με το άοπλο, είναι η βελτίωση της καμπτικής πλαστιμότητας, της αντοχής σε κρούση και της αντοχής σε κόπωση, μέσω της γεφύρωσης των σχηματιζόμενων ρωγμών και της απορρόφησης ενέργειας με τη μορφή εξόλκευσης ή θραύσης της ίνας. Η πλαστιμότητα είναι ένα μέτρο της δυνατότητας απορρόφησης ενέργειας ενός υλικού μετά τη ρηγμάτωση και χαρακτηρίζει την ικανότητα του να αντιστέκεται στη θραύση από δυναμικά ή κρουστικά φορτία. Για πολλούς λόγους, η αντοχή μέχρι την δημιουργία της πρώτης ρωγμής δεν αυξάνεται, σημαντική όμως είναι η βελτίωση στην απόκριση του σκυροδέματος μετά από αυτό το στάδιο. Η βελτίωση και σε άλλα μηχανικά χαρακτηριστικά όπως στη θλιπτική ή καμπτική αντοχή μπορεί να είναι από ανεπαίσθητη έως σημαντική και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος και των ινών. Ένα από τα μεγαλύτερα οφέλη από τη χρήση ινών στο σκυρόδεμα, πέρα από την αύξηση της πλαστιμότητας, είναι η βελτίωση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος μέσω του ελέγχου των ρηγματώσεων. Οι ίνες αποτρέπουν την δημιουργία μεγάλου εύρους ρωγμών που μπορεί να επιτρέψουν στο νερό ή σε άλλες ουσίες να εισχωρήσουν και να προκαλέσουν διάβρωση του οπλισμού [15].

Τα βαριά αδρανή που απαιτούνται για την παρασκευή σκυροδέματος μεγάλης πυκνότητας συνήθως είναι δυσεύρετα και υψηλού κόστους. Η σκωρία χαλυβουργίας, ένα παραπροϊόν της μεταλλουργικής βιομηχανίας, μπορεί να αποτελεί μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική λόγω του σχετικά μεγάλου ειδικού βάρους της (3300 kg/m^3) και του χαμηλού κόστους. Προκύπτει από την τήξη σε κατάλληλο κλίβανο ακατέργαστων υλικών, τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή οικοδομικού χάλυβα. Η σκωρία χαλυβουργίας ανάλογα με το είδος του κλιβάνου που χρησιμοποιείται για την παραγωγή χάλυβα διαχωρίζεται σε σκωρία φούρνου βασικού οξυγόνου (BOF slag) και σκωρία ηλεκτροκλιβάνου (EAF slag). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε σκωρία ηλεκτροκλιβάνου. Η σκωρία αυτού του τύπου παράγεται κατά την διαδικασία παραγωγής χάλυβα σε ηλεκτροκλίβανο (electric arc furnace, EAF). Σε αυτή τη διαδικασία, ο παλαιοσιδήρος λιώνει μέσα στον κλίβανο μαζί με συλλιπάσματα (ασβεστίου, μαγνησίου κ.α.) και παράγονται χάλυβας και σκωρία σε τηγμένη μορφή σε θερμοκρασίες περίπου 1600°C . Η σκωρία, που σχηματίζεται από τα συλλιπάσματα και τα μη μεταλλικά συστατικά του παλαιοσιδήρου, είναι χαμηλότερης πυκνότητας από το χάλυβα και επιπλέει στο ανώτερο τμήμα της τηγμένης μάζας από όπου αφαιρείται και ψύχεται. Η διαδικασία αυτή παράγει περίπου 120 kg σκωρίας ηλεκτροκλιβάνου ανά τόνο παραγόμενου τηγμένου σιδήρου [16]. Ο τύπος αυτός της σκωρίας έχει πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα σε τριβή. Σε κάθε κύκλο παραγωγής (που διαρκεί περίπου 3 ώρες) παρασκευάζονται περίπου 300 τόνοι τηγμένου χάλυβα. Αρχικά, η

διαδικασία παραγωγής χάλυβα σε ηλεκτροκλίβανο ήταν μεγαλύτερου κόστους σε σύγκριση με τη παραγωγή σε φούρνο βασικού οξυγόνου και χρησιμοποιούνταν μόνο για την παραγωγή υψηλής ποιότητας χάλυβα. Ωστόσο, η αύξηση της χρήσης της τα τελευταία χρόνια έχει βελτιώσει την ανταγωνιστικότητα της. Το 55% της παραγωγής χάλυβα στις ΗΠΑ το 2006 προήλθε από τήξη παλαιοσιδήρου σε ηλεκτροκλίβανο [17], ενώ στην Ελλάδα το ποσοστό ανέρχεται σε 100%. Υπάρχει σχετικά μικρός αριθμός ερευνών που εξετάζουν την πιθανότητα χρήσης των αδρανών σκωρίας στο σκυρόδεμα. Οι Maslehuddin και συν. (2003), μελέτησαν την επίδραση του ποσοστού αντικατάστασης των ασβεστολιθικών αδρανών με σκωρία κατά 45, 50, 55, 60 και 65% και παρατήρησαν αύξηση της αντοχής με την αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης [18]. Έρευνα των Samir και συν. (2012) [19], έδειξε ότι αδρανή σκωρίας ηλεκτροκλιβάνου επηρεάζουν θετικά την αντοχή και την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος κανονικής και υψηλής αντοχής. Στον ελληνικό χώρο υπάρχει σχετική με τις σκωρίες χαλυβουργίας ερευνητική εμπειρία στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών ΑΠΘ που ασχολείται με τη χρήση τους στο σκυρόδεμα [20,21,22].

Στα πλαίσια της παρούσας έρευνας, σχεδιάστηκε σε εργαστηριακή κλίμακα σκυρόδεμα μεγάλου ειδικού βάρους (φαινόμενη πυκνότητα > 3000 kg/m³) υψηλής αντοχής, με ή χωρίς οπλισμό ινών χάλυβα. Για τη μεγιστοποίηση του ειδικού βάρους χρησιμοποιήθηκαν βαριά αδρανή (σκωρίες χαλυβουργίας με φαινόμενη πυκνότητα 3300 kg/m³) όπως και υψηλό ποσοστό ινών χάλυβα (1,5% κ.ο.). Πραγματοποιήθηκαν τέσσερις εργαστηριακές συνθέσεις με διαφορετικές περιεκτικότητες σε τσιμέντο (από 300 έως 500 kg/m³) και λόγο νερού προς τσιμέντο 0,25 ή 0,40. Σκοπός της διακύμανσης των παραμέτρων ήταν η μεγιστοποίηση της πυκνότητας του σκυροδέματος, με ικανοποιητική εργασιμότητα (τουλάχιστον S1). Στις δοκιμαστικές εργαστηριακές συνθέσεις μεταξύ άλλων εξετάστηκαν οι μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος (αντοχή σε κάμψη/ θλίψη, μέτρο ελαστικότητας, αντοχή σε κρούση, δυσθραυστότητα), συμπεριφορά του υλικού μετά από έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες καθώς και εκτίμηση της ικανότητας θωράκισης που μπορεί να προσφέρει έναντι έκθεσης σε ακτινοβολία. Με βάση τις εργαστηριακές συνθέσεις, υλοποιήθηκε και μια πιλοτική εφαρμογή σε πραγματική κλίμακα ενός ογκόλιθου βαρέως σκυροδέματος.

Το σύνολο της εργασίας αποτελεί τμήμα του προγράμματος SLAG-PROD που χρηματοδοτήθηκε από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ).

Εργαστηριακές δοκιμαστικές συνθέσεις σκυροδέματος μεγάλης πυκνότητας

Οι δοκιμαστικές συνθέσεις που περιέχουν τα διάφορα κλάσματα Σκωρίας Ηλεκτρικού Κλιβάνου (ΣΗΚ) φαίνονται στον Πίνακα 1. Στον Πίνακα 2 φαίνονται οι μετρημένες αντοχές των συνθέσεων σε διάφορες ηλικίες ωρίμανσης καθώς και η επιτευχθείσα φαινόμενη πυκνότητα μετά από συντήρηση 28 ημερών. Οι έλεγχοι πραγματοποιήθηκαν σε κυβικά δοκίμια διαστάσεων 150x150x150 mm.

Πίνακας 1. Περιεκτικότητες υλικών συνθέσεων βαρέως σκυροδέματος (kg/m^3)

Σύνθεση	1	2	3	4
Τσιμέντο Ι42.5	400	450	500	300
Νερό	100	112	125	120
Λόγος Ν/Τ	0.25	0.25	0.25	0.40
ΣΗΚ 0-2 mm (20%)	500	481	463	1245
ΣΗΚ 0-7 mm (50%)	1250	1203	1156	1245
ΣΗΚ 5-12 mm (30%)	750	722	694	-
Ίνες χάλυβα 60 mm	-	-	-	118(1.5% κατ' όγκο)
Υπερρευστοποιητής	4.0	4.5	5.0	7.5
Σύνολο	3004	2973	2943	3035

Πίνακας 2. Αντοχές των διαφόρων συνθέσεων

Συνθέσεις	1	2	3	4
Ειδικό βάρος σκληρυμένου σκυροδέματος (kg/m^3)	2865	2894	2879	2929
Θλιπτική αντοχή 3 ημερών (MPa)	53,3	71,0	62,0	-
Θλιπτική αντοχή 7 ημερών (MPa)	66,0	68,0	67,1	55,2
Θλιπτική αντοχή 28 ημερών (MPa)	74,3	74,4	70,8	67,9

Από τις παραπάνω 4 διαφορετικές συνθέσεις, επικεντρώθηκε το ενδιαφέρον στην 4^η καθώς όπως φαίνεται είναι αυτή με το μεγαλύτερο ειδικό βάρος, πλησιάζοντας αρκετά το στόχο που τέθηκε (φαινόμενη πυκνότητα > 3,0). Ακολουθούν τα αποτελέσματα για ελέγχους που πραγματοποιήθηκαν στις ιδιότητες της σύνθεσης αυτής.

Στατικό Μέτρο Ελαστικότητας

Το στατικό μέτρο ελαστικότητας μετρήθηκε σε κυλινδρικό δοκίμιο ύψους 30 cm και διαμέτρου 15 cm, και βρέθηκε ίσο με 42,6 GPa.

Αντοχή σε κάμψη-δυσθραυστότητα

Ο έλεγχος σε κάμψη πραγματοποιήθηκε σε πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 100x100x400 mm. Πριν τη δοκιμή ανοίχτηκε με τροχό ένα αυλάκι στο μέσο του δοκιμίου ώστε να εξασφαλίσουμε ότι η θραύση θα γίνει σε εκείνο το σημείο. Η τιμή της αντοχής ανέρχεται στα 16,12 MPa. Μετά τη θραύση των δοκιμίων, μετρήθηκαν οι ίνες που ήταν εμφανείς στην επιφάνεια θραύσης και υπολογίστηκε ο αριθμός των ινών προς την επιφάνεια (0,72 ίνες/ cm^2). Στη συνέχεια έγινε η εκτίμηση της δυσθραυστότητας, η οποία εκφράζει την ενέργεια που μπορεί να απορροφήσει το δοκίμιο μέχρι τη

θραύση. Αυτή η ικανότητα που αποκτά το σκυρόδεμα οφείλεται στην προσθήκη των ινών. Η εκτίμηση της δυσθραυστότητας έγινε σύμφωνα με 4 διαφορετικούς κανονισμούς, όπως παρουσιάζονται παρακάτω.

Δείκτες δυσθραυστότητας σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C1018-94b [23]

Αν θεωρήσουμε δ την παραμόρφωση κατά την οποία παρουσιάζεται η πρώτη ρωγμή και πολλαπλάσιες αυτής παραμορφώσεις 3δ , 5.5δ και 10.5δ , με τη μέθοδο αυτή βρίσκουμε τους αντίστοιχους δείκτες I_5 , I_{10} και I_{20} οι οποίοι εκφράζουν το λόγο της ενέργειας που απορροφάται για τις παραμορφώσεις 3δ , 5.5δ και 10.5δ , προς την ενέργεια που απορροφάται για την παραμόρφωση δ . Ο λόγος αυτός I είναι αδιάστατος και εκφράζει την βελτίωση που επιφέρει η προσθήκη ινών με την έννοια της ικανότητας της δοκού να παραλαμβάνει φορτία και μετά την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής. Παρακάτω βλέπουμε τις τιμές των δεικτών I αλλά και των δεικτών απομένουσας αντοχής $R_{5,10}$ και $R_{10,20}$ στα χαρακτηριστικά σημεία 3δ , 5.5δ και 10.5δ , όπως προτείνονται από το αμερικανικό πρότυπο:

$$I_5 = 4.409 \quad I_{10} = 9.234 \quad I_{20} = 20.391$$

$$R_{5,10}(\%) = 96.49 \quad R_{10,20}(\%) = 111.57$$

Δείκτες δυσθραυστότητας σύμφωνα με το πρότυπο JSCE SF-4 [24]

Εδώ σαν μέτρο δυσθραυστότητας ορίζεται η ισοδύναμη καμπτική αντοχή $f_{e,3}$:

$$f_{e,3} = \frac{T_b * L}{\delta_{tb} * b * h^2} \quad (1)$$

Όπου: $f_{e,3}$: είναι η ισοδύναμη καμπτική αντοχή σε N/mm^2 .

T_b : είναι η επιφάνεια κάτω από την καμπύλη $F-\delta$ μέχρι την παραμόρφωση $L/150$ σε $N \cdot mm$

b : είναι το πλάτος της δοκού σε mm

h : είναι το καθαρό ύψος της δοκού σε mm

L : είναι η απόσταση μεταξύ των δυο στηρίξεων της δοκού σε mm

δ_{tb} : είναι η τιμή παραμόρφωσης ίση με το $1/150$ του L σε mm

Τελικά βρίσκουμε $f_{e,3} = 9,80 \text{ MPa}$

Επίσης υπολογίζουμε και τον ισοδύναμο καμπτικό λόγο $R_{e,3}$ (%):

$$R_{e,3} = \frac{f_{e,3}}{f_{ct}} * 100 = \frac{9.80}{16.12} * 100 = 60.80 \quad (2)$$

Δείκτες δυσθραυστότητας σύμφωνα με το πρότυπο EN 14651:2005 [25]

Η μέθοδος αυτή επικεντρώνεται στη μέτρηση του φορτίου που παραλαμβάνει η δοκός και στην εξέλιξη του αυλακιού που ανοίχτηκε στο μέσο της δοκού. Υπολογίζουμε την αντοχή ορίου αναλογικότητας $f_{fct,L}$ και την απομένουσα μειωμένη αντοχή $f_{R,j}$:

$$f_{fct,L} = \frac{3 * F_L * l}{2 * b * h_{sp}^2} \quad (3)$$

$$f_{R,j} = \frac{3 * F_L * l}{2 * b * h_{sp}^2} \quad (4)$$

Όπου: $f_{fct,L}$: Μέτρο αναλογικότητας LOP (N/mm^2)

$f_{R,j}$: Μειωμένη καμπτική αντοχή στις τιμές παραμόρφωσης $CMOD = CMOD_j$ ($j=1, 2, 3$ ή 4) (N/mm^2)

F_j : Φορτίο στις τιμές παραμόρφωσης $CMOD = CMOD_j$ ($j=1, 2, 3$ ή 4) (N)

F_L : Φορτίο LOP (N)

b : Πλάτος δοκιμίου (mm)

h_{sp} : Ύψος διατομής στο σημείο της εγκοπής (mm)

l : Μήκος ανοίγματος (mm)

Τελικά βρίσκουμε $f_{ict,L} = 8,70$ και

$f_{R1} = 13.63$ MPa, $f_{R2} = 16.12$ MPa, $f_{R3} = 15.07$ MPa, $f_{R2} = 14.31$ MPa

Δείκτες δυσθραυστότητας σύμφωνα με το πρότυπο JCI-S-001-2003 [26]

Με τη μέθοδο αυτή υπολογίζουμε την ενέργεια θραύσης G_f :

$$G_f = \frac{0.75 \cdot W_0 + W_1}{A_{lig}} \quad (5)$$

$$W_0 = 0.75 * \left(\frac{S}{L} m_1 + 2m_2 \right) * g * CMOD_c \quad (6)$$

Όπου: G_f : ενέργεια θραύσης (N/mm²)

W_0 : εμβαδό κάτω από την καμπύλη φορτίου-CMOD μέχρι τη θραύση του δοκιμίου (N·mm)

W_1 : έργο λόγω του ίδιου βάρους του δοκιμίου και του εξοπλισμού που βρίσκεται πάνω σε αυτό (N·mm)

A_{lig} : ενεργός διατομή στο σημείο της εγκοπής (mm²)

m_1 : βάρος δοκιμίου (kg)

S : απόσταση μεταξύ των δυο στηρίξεων (mm)

L : συνολικό μήκος του δοκιμίου (mm)

m_2 : βάρος του εξοπλισμού που βρίσκεται πάνω στο δοκίμιο (kg)

g : επιτάχυνση της βαρύτητας (9,807m/s²)

$CMOD_c$: άνοιγμα της εγκοπής κατά την τελική θραύση του δοκιμίου (mm)

Τελικά βρίσκουμε $G_f = 30,90$ N/mm².

Αντοχή σε κρούση

Για τη δοκιμή αυτή ελέγχθηκε πρισματικό δοκίμιο διαστάσεων 100x100x400 mm χρησιμοποιώντας την ίδια διάταξη με τη δοκιμή κάμψης (κάμψη τριών σημείων). Πριν τη δοκιμή ανοίχτηκε αυλάκι στο μέσο του δοκιμίου, ομοίως με την προηγούμενη δοκιμή. Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε με ένα μεταλλικό βαρίδιο βάρους 5 kg να πέφτει από ύψος 44 cm πάνω στο μέσο του δοκιμίου. Με ειδική διάταξη διασφαλίστηκε ότι το βαρίδιο θα πέφτει πάντα στο ίδιο σημείο. Για να δημιουργηθεί μια ρωγμή στην κάτω παρειά του δοκιμίου (όπου βρισκόταν το αυλάκι) και να φτάσει μέχρι την πάνω παρειά, χρειάστηκαν 41 κτύποι. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο ίδιος έλεγχος έγινε και σε πρισματικό δοκίμιο με ασβεστολιθικά αδρανή και ίνες και χρειάστηκαν μόλις 7 κτύποι για να δημιουργηθεί ρωγμή και να φτάσει μέχρι την πάνω παρειά του δοκιμίου. Η ενέργεια που απορροφά το δοκίμιο σε κάθε κρούση θα είναι:

$$U = \frac{m \cdot V^2}{2} \quad (7)$$

Με

$$V = g * t \quad (8) \quad \text{και} \quad t = \sqrt{\frac{2 * H}{g}} \quad (9)$$

Όπου:

H είναι το ύψος από το οποίο πέφτει η μεταλλική σφαίρα σε m

t είναι ο χρόνος που κάνει η σφαίρα να πέσει πάνω στο δοκίμιο από ύψος H σε sec

g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας σε m/sec^2

V είναι η ταχύτητα της σφαίρας πριν ακουμπήσει το δοκίμιο σε m/sec

m είναι το βάρος της σφαίρας σε kg

U είναι η ενέργεια κρούσης σε J

Τελικά βρίσκουμε $U = 21,582 \text{ J}$ και πολλαπλασιάζοντας με τον αριθμό των κτύπων μέχρι τη θραύση (41) βρίσκουμε την συνολικά απορροφημένη ενέργεια για το σκυρόδεμα με σκωρία ίση με $884,86 \text{ J}$ έναντι $151,07 \text{ J}$ της σύνθεσης με ασβεστολιθικά αδρανή.

Συμπεριφορά σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες

Ελέγχθηκαν κυβικά δοκίμια διαστάσεων $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$, σε θερμοκρασία 500°C . Η θέρμανση πραγματοποιήθηκε σε φούρνο με ηλεκτρικές αντιστάσεις του Εργαστηρίου Δομικών Υλικών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ. Στα δοκίμια, πριν την τοποθέτηση τους στο φούρνο, μετρήθηκε η θλιπτική αντοχή, η ταχύτητα διέλευσης των υπερήχων με σονόμετρο και το βάρος τους. Με την επίτευξη αυτής της θερμοκρασίας ο φούρνος σταμάτησε να λειτουργεί. Τα δοκίμια αφαιρέθηκαν από το φούρνο μετά από 24 ώρες και επαναλήφθηκαν οι έλεγχοι θλιπτικής αντοχής, ταχύτητας των υπερήχων και βάρους. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3. Αποτελέσματα ελέγχου συμπεριφοράς σε υψηλές θερμοκρασίες

Έλεγχοι	Προ θέρμανσης	Μετά τη θέρμανση
Βάρος (gr)	2813	2681
Ταχύτητα διέλευσης υπερήχων (μs)	21.85	28.8
Θλιπτική αντοχή (MPa)	51.81	42.57

Έλεγχος εξασθένησης ιοντίζουσας ακτινοβολίας

Η εξασθένηση που προκαλείται σε ακτινοβολία που διέρχεται μέσω ενός υλικού μπορεί να εκφραστεί με τον γραμμικό συντελεστή εξασθένησης του υλικού. Ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα μ και η τιμή του εξαρτάται από το υλικό απορρόφησης και από την ενέργεια των φωτονίων.

Αν θεωρήσουμε παράλληλη δέσμη μονοενεργειακών φωτονίων αρχικής έντασης $I(0)$ να διαπερνά ένα υλικό πάχους x και αν $I(x)$ είναι η ένταση της δέσμης των «παρθένων» φωτονίων, δηλαδή εκείνων των φωτονίων που αφού διαπεράσουν το υλικό δεν έχουν υποστεί καμιά αλληλεπίδραση, τότε ισχύει η σχέση:

$$(10) \quad I_{(x)} = I_{(0)} \cdot e^{-\mu \cdot x}$$

Όπου μ είναι ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης του υλικού.

Οι μετρήσεις ακτινοβολίας πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΑΠΘ. Μετρήθηκε η εξασθένηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας γ η οποία διέρχεται μέσα από στοιχείο σκυροδέματος.

Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ραδιενεργή πηγή ευρωπαϊού (Eu-152) που εκπέμπει φωτόνια σε πέντε διαφορετικές ενέργειες και ανιχνευτής υπερκαθαρού γερμανίου (High Purity Germanium (HPGe) detector) απόδοσης 50%. Τα αποτελέσματα μετά την επεξεργασία των δεδομένων φαίνονται παρακάτω.

Πίνακας 4. Γραμμικός συντελεστής εξασθένησης του σκυροδέματος με σκωρία.

energy (keV)	Γραμμικός συντελεστής εξασθένησης μ (cm^{-1})
244	$0,324 \pm 0,007$
344	$0,275 \pm 0,002$
779	$0,191 \pm 0,002$
964	$0,169 \pm 0,002$
1112	$0,158 \pm 0,002$
1408	$0,161 \pm 0,001$

Μαζική παραγωγή της βέλτιστης σύνθεσης σκυροδέματος

Με βάση τις εργαστηριακές συνθέσεις αποφασίστηκε η σκυροδέτηση ενός κυλινδρικού ογκόλιθου διαμέτρου 150 εκ. και ύψους 100 εκ. με βαρύ σκυρόδεμα, το οποίο παράχθηκε και σκυροδετήθηκε στο εργοστάσιο της TEXNOMΠETON. Για την παραγωγή του σκυροδέματος επιλέχθηκε η σύνθεση του Πίνακα 4.

Πίνακας 4. Βέλτιστη σύνθεση για σκυρόδεμα μεγάλης πυκνότητας

Αναλογίες υλικών kg/m^3	(kg/m^3)
CEM I42.5	300
Νερό	135
Ρευστοποιητής	7,5
Σκωρία κλάσμα 0-2 mm (20%)	493
Σκωρία κλάσμα 0-7 mm (50%)	1233
Σκωρία κλάσμα 5-12 mm (30%)	740
Ίνες χάλυβα 60 mm (0,7%)	55
Σύνολο	2964

Η σύνθεση είναι σχεδιασμένη με χαμηλό λόγο νερού προς τσιμέντο και χαμηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο. Έτσι, μεγιστοποιείται η χρήση των σκωριών που έχουν και το μεγαλύτερο ειδικό βάρος. Η ικανοποιητική εργασιμότητα εξασφαλίζεται με τη χρήση ρευστοποιητή, ενώ χρησιμοποιείται και μεγάλο ποσοστό χαλύβδινων ινών (0,7%) για περαιτέρω αύξηση του βάρους του σκυροδέματος. Οι αναλογίες των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν δίνουν ομαλή κοκκομετρική καμπύλη κι έτσι εξασφαλίζεται η ομοιογένεια του νωπού σκυροδέματος. Ωστόσο, η εργοστασιακή διάταξη παραγωγής του σκυροδέματος καθώς και η καταρρακτώδης βροχή κατά τη διάρκεια της σκυροδέτησης δεν εξασφάλιζε πλήρη έλεγχο της ποσότητας του νερού στο μίγμα κι επομένως αυτό παρασκευάστηκε με μεγαλύτερο λόγο νερού προς τσιμέντο από τον εργαστηριακό.

Τα αδρανή μεταφέρθηκαν προζυγισμένα στις απαιτούμενες ποσότητες από την ΑΕΙΦΟΡΟ στις εγκαταστάσεις της TEXNOMΠETON με bigbag. Στη συνέχεια τα αδρανή φορτώθηκαν στον ταινιόδρομο μεταφοράς στον αναμκτήρα (Σχήμα 1).



Σχ. 1 Φόρτωση των αδρανών στον ταινιόδρομο

Στη συνέχεια αναμίχθηκαν με το προβλεπόμενο τσιμέντο, τις ίνες χάλυβα, το νερό και το ρευστοποιητή και εκφορτώθηκαν σε κυλινδροφόρο όχημα (βαρέλα) (Σχήμα 2). Από το όχημα λήφθηκε υλικό για μέτρηση της εργασιμότητας και λήψη δοκιμίων (Σχήμα 3).

Η παραγωγή στη μονάδα σκυροδέματος της TEXNOMΠETON έδωσε μίγμα καλής ποιότητας, εργασιμότητας S2, όπως φαίνεται από την εικόνα της τελικής επιφάνειας των δοκιμίων (Σχήμα 4).



Σχ. 2 Ανάμιξη και εκφόρτωση σε βαρέλα



Σχ. 3 Λήψη δοκιμίων και συμπίκνωση με ράβδο



Σχ. 4 Εικόνα τελικής επιφάνειας δοκιμίων



Σχ. 5 Καλούπι για τη σκυροδέτηση ογκόλιθου

Στη συνέχεια το νωπό σκυρόδεμα διαστρώθηκε σε καλούπι διαμέτρου 150 εκ. και ύψους 100 εκ. (Σχήμα 5) για τη δημιουργία ογκόλιθου από σκυρόδεμα. Η σκυροδέτηση έγινε σε στρώσεις και η συμπύκνωση έγινε με εσωτερικό δονητή (Σχήμα 6,7). Τέλος, για την καλύτερη συντήρηση του σκυροδέματος, το καλούπι καλύφθηκε με μεταλλικό καπάκι. Από το ανάμιγμα λήφθηκαν κυβικά δοκίμια, όπου μετρήθηκε η φαινόμενη πυκνότητα του νωπού σκυροδέματος. Στη συνέχεια τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε υγρή συντήρηση και ο έλεγχος επαναλήφθηκε στις 7 ημέρες, οπότε και μετρήθηκε και η θλιπτική αντοχή σε κυβικό δοκίμιο. Τα αποτελέσματα των δοκιμών φαίνονται στον Πίνακα 5.



Σχ. 6 Εκφόρτωση του νωπού σκυροδέματος στο καλούπι



Σχ.7 Συμπύκνωση με εσωτερική δόνηση

Πίνακας 5. Αποτελέσματα ελέγχων σκυροδέματος πιλοτικής εφαρμογής

Ιδιότητα	Τιμή
Φαινόμενη πυκνότητα ναπού	2744 kg/m ³
Φαινόμενη πυκνότητα 7 ημερών	2723 kg/m ³
Θλιπτική αντοχή κύβου 7 ημερών	25,73 MPa

Συμπεράσματα

Η χρήση σκωριών χαλυβουργίας παρουσιάζει ενδιαφέρον ως προς την κατασκευή σκυροδέματος μεγάλου ειδικού βάρους, κυρίως λόγω της αυξημένης πυκνότητας της σκωρίας (3330 kg/m³ έναντι 2650 kg/m³ των ασβεστολιθικών αδρανών). Η δυσκολία παραγωγής ομοιογενούς μίγματος μόνο με αδρανή σκωρίας μπορεί να ξεπεραστεί με τη θραύση των αδρανών σε κατάλληλα κλάσματα, ενώ η αυξημένη υδαταπορροφητικότητα μπορεί να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό και τα αδρανή να χρησιμοποιηθούν σε κορεσμένη κατάσταση. Επιπρόσθετα, ένα σημαντικό ποσοστό χαλύβδινων ινών (1%) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αυξήσει περισσότερο το βάρος του σκυροδέματος. Έτσι, τελικά επιτεύχθηκε βαρύ σκυρόδεμα με πυκνότητα μεγαλύτερη από 2900 kg/m³ (για την ακρίβεια 2929 kg/m³), πολύ κοντά στο στόχο των 3000 kg/m³.

Το σκυρόδεμα αυτό ελέγχθηκε ως προς τις μηχανικές αντοχές του, αλλά και την ανθεκτικότητα, μέσω μετρήσεων αντοχής σε κρούση και μελέτη συμπεριφοράς σε υψηλές θερμοκρασίες και φάνηκε ότι πρόκειται για καλής ποιότητας μίγμα. Ακολούθησε πιλοτική εφαρμογή, όπου εφαρμόστηκε στο έργο η βέλτιστη εργαστηριακή σύνθεσης. Από την πιλοτική εφαρμογή και τις μετρήσεις φαίνεται ότι:

- Η πυκνότητα που επιτεύχθηκε στο εργαστήριο είναι δύσκολο να επιτευχθεί σε εργοστασιακό μίγμα
- Το μίγμα που παράχθηκε χαρακτηρίζεται βαρύ εφόσον έχει ειδικό βάρος άνω των 2700 kg/m³
- Η χρήση αδρανών σκωρίας και ταυτόχρονα ινών χάλυβα φαίνεται να παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα στο βαρύ σκυρόδεμα
- Η κατηγορία αντοχής του σκυροδέματος αναμένεται να είναι τουλάχιστον C25/30, που κρίνεται ικανοποιητική δεδομένης της χαμηλής περιεκτικότητας σε τσιμέντο και του αυξημένου λόγου νερού προς τσιμέντο

Τα αποτελέσματα αυτά καταδεικνύουν ότι σε σκυροδέματα που προορίζονται για ειδικές εφαρμογές, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των αδρανών σκωρίας (μεγάλη πυκνότητα, αυξημένη αντοχή σε τριβή και κρούση, υψηλό σημείο τήξης σε θερμοκρασία 1300°C), θα μπορούσαν να λειτουργήσουν ευεργετικά ως προς την απόδοση του σκυροδέματος. Τέτοιου είδους εφαρμογές θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν εφαρμογές σκυροδέματος μεγάλου ειδικού βάρους (σκυρόδεμα θωράκισης ακτινοβολιών, λιμενικά έργα κτλ.), βιομηχανικά δάπεδα, ή σκυρόδεμα που εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες κοντά σε μεταλλουργικές διεργασίες.

Βιβλιογραφία

- [1] ACI 304R-00, Guide for Measuring, Mixing, Transporting and Placing Concrete, 2000.
- [2] Kumar Mehta, P., Monteiro, P.J.M., (2009), “Σκυρόδεμα μικροδομή, ιδιότητες και υλικά”, μετάφραση: Ιωάννα Παπαγιάννη, Κλειδάριθμος, Θεσσαλονίκη, pp. 585-587.
- [3] Nawy, E.G., (1997), “Concrete Construction Engineering Handbook”, CRC Press, Florida, pp. 1-17.
- [4] ACI304.3R-96, (1984), “Heavyweight Concrete: Measuring, Mixing, Transporting, and Placing”.
- [5] ASTM C 637, (1998), “Standard Specifications for Aggregates for Radiation-Shielding concrete”.

- [6] ASTM C 638, (2002), “Standard Descriptive Nomenclature of Constituents of Aggregates for Radiation-Shielding Concrete”.
- [7] Neville, A.M., (1996), “Properties of Concrete”, John Wiley & Sons, Inc., Malaysia, pp. 108.
- [8] Wu, K., Yan, A., Yao, W., Zhang, D., (2001), “Effect of metallic aggregate on strength and fracture properties of HPC”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, pp. 113-118.
- [9] Kana, Y.C., Pei, K.C., Changa, C.L., (2004), “Strength and fracture toughness of heavy concrete with various iron aggregate inclusions”, *Nuclear Engineering and Design* 228, pp. 119-127.
- [10] Akkurt, I., Akyildirim, H., Mavi, B., Kilincarslan, S., Basyigit, C., (2001), “Gamma-ray shielding properties of concrete including barite at different energies”, *Progress in Nuclear Energy* 52, pp. 620-623.
- [11] Bashter, I. I., “Calculation of radiation attenuation coefficients for shielding concretes”, (1997), *Ann. Nucl. Energy*, Vol. 24, No. 17, pp. 1389-1401.
- [12] Kharita, M.H., Takeyeddin, M., Alnassar, M., Yousef, S., (2008), “Development of special radiation shielding concretes using natural local materials and evaluation of their shielding characteristics”, *Progress in Nuclear Energy* 50, pp. 33-36.
- [13] Akkurt, I., Altindag, R., Gunoglu, K., Sarikaya, H., (2012), “Photon attenuation coefficients of concrete including marble aggregates”, *Annals of Nuclear Energy* 43, pp. 56-60.
- [14] ACI 349-01, (2001), «Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures»
- [15] ACI 544 1R-96, (1996), “State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete”.
- [16] World steel association, Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://www.worldsteel.org>
- [17] Yildirim, I.Z., Prezzi, M., (2011), “Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag”, Hindawi Publishing Corporation, *Advances in Civil Engineering* Volume 2011, Article ID 463638.
- [18] Maslehuddin, M., Sharif, A.M., Shameem, M., Ibrahim, M., Barry, M.S., (2003), “Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes”, *Construction and Building Materials* 17, pp.105-112.
- [19] Samir I., Abu-Eishah, Amr S., El-Dieb, Mostafa, Bedir, S., (2012), “Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region”, *Construction and Building Materials* 34, pp. 249-256.
- [20] Papayianni, I., & Anastasiou, E. (2010). Production of high-strength concrete using high volume of industrial by-products. *Construction and Building Materials*, 24(8), pp. 1412-1417.
- [21] Papayianni, I., Papachristoforou, M., (2012), “Effect of high temperatures on steel fiber reinforced concrete with EAF slag aggregates”, BEFIB2012 – 8th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete Guimarães, 19 - 21 September 2012, RILEM Publications S.A.R.L., pp. 157-158.
- [22] Παπαχριστοφόρου Μ., (2013) “Μελέτη σκυροδεμάτων με σκωριοαδρανή για θωράκιση έναντι έκθεσης σε ακτινοβολία και υψηλές θερμοκρασίες”, Διδακτορική Διατριβή, Α.Π.Θ., διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://ikee.lib.auth.gr/record/132612/files/GRI-2013-11035.pdf>
- [23] ASTM C 1018 - 97, (1998), “Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)”.
- [24] JSCE-SF4, (1984), “Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete”, JSCE Japan Soci. Civil Eng., Tokyo.
- [25] EN 14651:2005, “Test method for metallic fibered concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)”.
- [26] JCI-S-001-2003, “Method of test for fracture energy of concrete by use of notched beam, Japan Concrete Institute Standard”.