

Χρήση αδρανών σκωρίας για την παραγωγή διαπερατών κυβόλιθων για επίστρωση εξωτερικών χώρων

Ελευθέριος Αναστασίου

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

Ιωάννα Παπαγιάννη

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

Μιχαήλ Παπαχριστοφόρου

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

Αλέξανδρος Λιάπης

Υποψήφιος Διδάκτωρ ΑΠΘ, aliapisk@civil.auth.gr

Εισαγωγή

Οι κυβόλιθοι είναι δομικά στοιχεία τα οποία χρησιμοποιούνται εδώ και χιλιάδες χρόνια για την κάλυψη δαπέδων. Η χρήση τους είναι ευρεία (επίστρωση πεζοδρομίων, πλατειών, ανοιχτών χώρων, χώρων στάθμευσης αλλά και σημείων οδοστρωμάτων με ειδικές απαιτήσεις) κάτι που οφείλεται στα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν έναντι εναλλακτικών τρόπων διαμόρφωσης δαπέδων: εύκολη διάστρωση και εύκολη και οικονομική συντήρηση με απλή αντικατάσταση των φθαρμένων σημείων χωρίς γενικό «ξήλωμα», προσαρμογή στις ανωμαλίες του εδαφικού υπόβαθρου, αντοχή στις εξωτερικές συνθήκες (Lilley & Clark, 1978; Ghafoori & Sukandar, 1995). Ενώ οι κυβόλιθοι στο παρελθόν κατασκευάζονταν σχεδόν αποκλειστικά από λίθο, η παραγωγή προκατασκευασμένων άοπλων στοιχείων σκυροδέματος, σε διάφορες διαστάσεις, έφερε ακόμα περισσότερα πλεονεκτήματα: χαμηλότερο κόστος από τους λίθινους, άνετη βάδιση με μη ολισθηρή επιφάνεια (Knarpton & Barber, 1979; Shackell 2003).

Για περιπτώσεις στις οποίες δεν ενδιαφέρει τόσο το οπτικό αποτέλεσμα αλλά περισσότερο η γρήγορη αποστράγγιση των επιφανειακών νερών και η μεγάλη αντοχή (όπως οδοστρώματα, χώροι στάθμευσης, δάπεδα αεροδιαδρόμων), μεγάλη εφαρμογή βρίσκει η κατασκευή δαπέδων από διαπερατό σκυρόδεμα (Pratt et al, 1995; Scholz & Grabowiecki, 2007). Η επιφάνεια παρουσιάζει ανθεκτικότητα και το υψηλό ποσοστό κενών επιτρέπει την ταχύτατη διήθηση του νερού, με αποτέλεσμα την διατήρηση του δαπέδου σε λειτουργική κατάσταση μετά από έντονα καιρικά φαινόμενα (Yang & Jiang, 2003).

Η παρούσα εργασία ασχολείται με την προσπάθεια του Εργαστηρίου Δομικών Υλικών της Πολυτεχνικής Σχολής του ΑΠΘ, να συνδυάσει τα πλεονεκτήματα και από τις δύο παραπάνω εφαρμογές, προτείνοντας την επίστρωση δαπέδων και τμημάτων οδοστρωμάτων με προκατασκευασμένους διαπερατούς κυβόλιθους. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπ' όψη τις απαιτήσεις της σύγχρονης αγοράς για περιβαλλοντικά και οικονομικά βιώσιμες λύσεις, μελετάται η αντικατάσταση πρώτων υλών για την παραγωγή των κυβόλιθων με παραπροϊόντα τα οποία προέρχονται από την βιομηχανία του χάλυβα. Τα κύρια παραπροϊόντα της βιομηχανίας χάλυβα είναι οι σκωρίες (steel slags), που παράγονται σε μεγάλες ποσότητες (10-15% της παραγωγής χάλυβα, 250.000 τόνοι ετησίως στην Ελλάδα) και σε διάφορες μορφές ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας της χαλυβουργίας (Proctor et al, 2000). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν αδρανή σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου (electric arc furnace – EAF slag), η χρήση των οποίων στο σκυρόδεμα αποτελεί αντικείμενο έρευνας τα τελευταία χρόνια (Shi, 2004; Papayianni & Anastasiou, 2010; Pellegrino & Faleschini, 2016).

Η έρευνα έγινε στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος “SLAGPROD” και αφορά τόσο την εργαστηριακή μελέτη συνθέσεων, όσο και την πιλοτική παραγωγή διαπερατών κυβόλιθων με χρήση αδρανών σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου.

Μεθοδολογία

Για τη διερεύνηση της δυνατότητας παραγωγής διαπερατών κυβόλιθων πραγματοποιήθηκαν αρχικά εργαστηριακές συνθέσεις τόσο με συμβατικά (θραυστά ασβεστολιθικά) αδρανή, όσο και με σκωριοαδρανή. Οι συνθέσεις αυτές είχαν σαν σκοπό να ελέγξουν την απαιτούμενη κοκκομετρία των αδρανών για την παραγωγή διαπερατών κυβόλιθων, να ελεγχθούν διαφορετικοί συνδυασμοί των διαθέσιμων υλικών και να ελεγχθούν οι μηχανικές αντοχές και η διαπερατότητα που επιτυγχάνεται. Στη συνέχεια, με βάση τα αποτελέσματα και με τις αναγκαίες τροποποιήσεις, μεταφέρθηκε η βέλτιστη σύνθεση στο εργοστάσιο προκειμένου να γίνει πιλοτική παραγωγή διαπερατών κυβόλιθων με σκωριοαδρανή.

Μελέτη εργαστηριακών συνθέσεων διαπερατών κυβόλιθων οδοστρωσίας

Σύμφωνα με την οδηγία που ισχύει για το διαπερατό σκυρόδεμα (ACI 522R-10) απαιτούνται θλιπτικές αντοχές σε ένα εύρος 2,8-28,0 MPa και ποσοστό κενών από 15% έως 35%. Μια σημαντική ιδιότητα του σκυροδέματος αυτού προφανώς είναι η διαπερατότητα η οποία εκφράζεται από το συντελεστή διαπερατότητας, δηλαδή το λόγο του ύψους νερού πάνω από την επιφάνεια του δοκιμίου προς τον χρόνο που κάνει αυτό το νερό να διέλθει του δοκιμίου και μετράται σε mm/sec. Η παραπάνω οδηγία για το διαπερατό σκυρόδεμα μας δίνει ένα αποδεκτό κάτω όριο για την διαπερατότητα της τάξης του 1,4-12,2 mm/s.

Αρχικά παρήχθησαν στο εργαστήριο δοκιμαστικές συνθέσεις με ασβεστολιθικά (Πίνακας 1: A1) και αδρανή σκωρίας (Σ1). Βασίστηκαν σε υπάρχουσα έρευνα του εργαστηρίου (Ιακώβου & Ιωάννου, 2012) και έγιναν με σκοπό την σύγκριση των βασικών ιδιοτήτων των δύο σκυροδεμάτων. Εφ’ όσον διαπιστώθηκε ότι το σκυρόδεμα με χρήση σκωρίας δεν υστερεί από άποψης θλιπτικής αντοχής και διαπερατότητας, έγιναν επιπλέον συνθέσεις με διαφορετικές διαβαθμίσεις των αδρανών σκωρίας (Σ2, Σ3, Σ4, Σ5) για τη βέλτιστη σχέση αντοχής – διαπερατότητας.

Σημειώνεται ότι επιλέχθηκε μεγάλο ποσοστό κενών (20-25%) και κατ’ επέκταση υψηλός συντελεστής διαπερατότητας (10-12 mm/s), κάτι που λειτουργεί αρνητικά ως προς την ανάπτυξη αντοχών. Λόγω της διαφορετικής κοκκομετρίας των υλικών, για τα ασβεστολιθικά αδρανή δε χρησιμοποιήθηκε καθόλου λεπτόκοκκο υλικό, ενώ για τις συνθέσεις με αδρανή σκωρίας ελέγχθηκαν διάφοροι συνδυασμοί, ενώ έγινε και μία σύνθεση (Σ5) με την προσθήκη λινέλαιου για να διερευνηθεί πιθανή αύξηση είτε των αντοχών, είτε του συντελεστή διαπερατότητας. Συγκεκριμένα, παρήχθησαν οι συνθέσεις Σ2 με αναλογία 60%-40% ρύζι-άμμο, Σ3 με 70%-30% ρύζι-άμμο, Σ4 με 40%-60% ρύζι-άμμο και Σ5 με αναλογία 60%-40% ρύζι-άμμο και προσθήκη λινέλαιου. Το σύνολο των εργαστηριακών συνθέσεων φαίνεται στον Πίνακα 1. Το αυξημένο βάρος των συνθέσεων με αδρανή σκωρίας οφείλεται στη φαινόμενη ειδική πυκνότητα της σκωρίας που είναι μεγαλύτερη από αυτή των ασβεστολιθικών αδρανών (3300 kg/m³ έναντι 2680 kg/m³ των ασβεστολιθικών).

Πίνακας 1. Εργαστηριακές συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος

Σύνθεση	A1	Σ1	Σ2	Σ3	Σ4	Σ5
Υλικά (Περιεκτικότητα)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)
Τσιμέντο CEM I 42,5	300,8	300,8	328	328	327,9	327,9
Νερό	105,3	90,2	124,9	124,9	107,32	124,91
Ασβεστολιθικά αδρανή 8-16 mm	392,5	-	-	-	-	-
Ασβεστολιθικά αδρανή 4-8 mm	1178	-	-	-	-	-
Αδρανή σκωρίας 5-12 mm	-	1329	1062	1239	748	1062
Άμμος σκωρία 0-5 mm	-	332	708	531	1122	708

Λινέλαιο	-	-	-	-	-	3,28
Ρευστοποιητής	1,3	0,9	-	-	-	-
Σύνολο	1978	2053	2223	2223	2305	2226
Όγκος Κενών (%)	20,67	31,08	25	25	22	25

Για τον έλεγχο των συνθέσεων παρασκευάστηκαν κυβικά δοκίμια διαστάσεων 150 x 150 x 150 mm για τον έλεγχο αντοχής σε θλίψη, κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων 150 x 300 mm για τη δοκιμή διαπερατότητας, πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 100 x 100 x 400 mm για τον έλεγχο αντοχής σε κάμψη και πλάκες διαστάσεων 100 x 400 x 450 mm για τον έλεγχο αντοχής σε απότριψη. Τα δοκίμια συμπεκνώθηκαν σε δονητική τράπεζα και συντηρήθηκαν σε σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας (20°C και 95% RH) μέχρι την ημερομηνία που έγιναν οι έλεγχοι. Η εικόνα που παρουσιάζαν τα δοκίμια διαπερατού σκυροδέματος φαίνονται στη Φωτ.1.



Φωτ.1 Εικόνα διαπερατού σκυροδέματος

Εργαστηριακοί έλεγχοι

Η εργασιμότητα στο νωπό διαπερατό σκυρόδεμα είναι δύσκολο να μετρηθεί, αλλά για όλες τις συνθέσεις η δοκιμή του κώνου Abrams (κάθιση) έδειξε μηδενικές τιμές. Έτσι, οι έλεγχοι περιορίστηκαν στο σκληρυμένο σκυρόδεμα. Πέρα από τη μέτρηση της φαινόμενης ειδικής πυκνότητας, της θλιπτικής αντοχής στα κυβικά δοκίμια και της αντοχής σε κάμψη στα πρισματικά, διενεργήθηκαν έλεγχοι για τον προσδιορισμό του συντελεστή διαπερατότητας και για την αντοχή σε απότριψη.

Ο έλεγχος για τον προσδιορισμό του συντελεστή διαπερατότητας έγινε σύμφωνα με τις απαιτήσεις της οδηγίας ACI 522R-10. Όπως φαίνεται και στη Φωτ.2, χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 150 mm και ύψους 150 mm, που προέκυψαν από την κοπή των αρχικών κυλινδρικών δοκιμίων. Το κάθε δοκίμιο αφού κόπηκε στη μέση, τυλίχτηκε με πολλές στρώσεις μεμβρανών και τελικά με ένα νάιλον το οποίο στο πάνω μέρος του διαμορφώθηκε για να δεχτεί την στήλη του νερού που θα διερχόταν του δοκιμίου (Φωτ.2). Για την αποφυγή απωλειών νερού από την επαφή των

μεμβρανών με το σκυρόδεμα, η περίμετρος του δοκιμίου καλύφθηκε είτε με παραφίνη είτε με σιλικόνη πριν την τοποθέτηση των μεμβρανών. Στη συνέχεια τοποθετήθηκε σε δοχείο με νερό για την εξισορρόπηση της στάθμης στα 19 εκατοστά πάνω από την επιφάνειά του, σύμφωνα με την αντίστοιχη οδηγία και ανασηκώθηκε απότομα ώστε να μετρηθεί ο χρόνος που έκανε το νερό για να διέλθει (Φωτ.3).



Φωτ.2 Πλευρική επικάλυψη με μεμβράνη



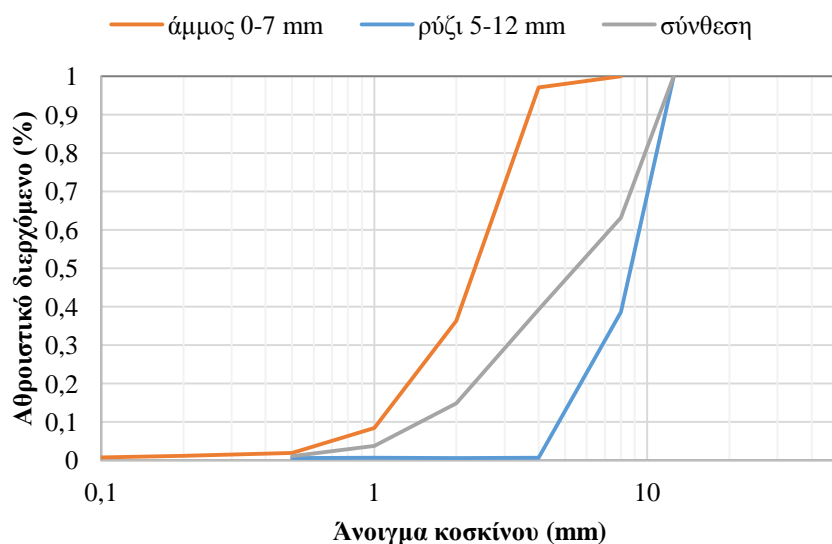
Φωτ.3 Εκτέλεση δοκιμής διαπερατότητας

Σχετικά με τον έλεγχο της αντοχής σε απότριψη, επιλέχθηκε λόγω της πιθανής χρήσης του προτεινόμενου διαπερατού σκυροδέματος για χρήση σε δάπεδα ή χώρους στάθμευσης αυτοκινήτων. Για τη μέτρηση της αντοχής σε απότριψη ακολουθήθηκε η προδιαγραφή ASTM C779-02, όπου προβλέπεται η κυκλική κίνηση μεταλλικών κυλίνδρων υπό φορτίο στην επιφάνεια του σκυροδέματος για χρονικό διάστημα 20' και στη συνέχεια η μέτρηση του βάθους αυλάκωσης.

Πιλοτική παραγωγή διαπερατών κυβόλιθων οδοστρωσίας

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών διαπερατών κυβόλιθων του Α.Π.Θ. αποφασίστηκε να γίνει μια πιλοτική παραγωγή διαπερατών κυβόλιθων οδοστρωσίας στο εργοστάσιο της TEXNOMΠΕΤON. Τα διαθέσιμα κλάσματα αδρανών σκωρίας για την πιλοτική εφαρμογή ήταν δύο: άμμος 0-7 mm και ρύζι 5-12 mm. Η κοκκομετρία τους όπως μετρήθηκε εργαστηριακά φαίνεται στο Διάγραμμα 1.

Με βάση την κοκκομετρία των κλασμάτων, η άμμος χαρακτηρίζεται χονδρόκοκκη και ο μέγιστος κόκκος των 12 mm θεωρείται επαρκής για τις διαστάσεις των παραγόμενων κυβόλιθων. Οι προηγούμενες εργαστηριακές μετρήσεις διαπερατότητας σε κυβόλιθους με διάφορες αναλογίες λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων αδρανών σκωρίας κατέδειξαν ότι για τα δύο αυτά κλάσματα αδρανών η καλύτερη αναλογία σύνθεσης είναι 40% άμμος 0-7 mm και 60% ρύζι 5-12 mm. Αυτή η αναλογία δίνει την κοκκομετρική καμπύλη της σύνθεσης (Διάγραμμα 1).



Διάγραμμα 1. Κοκκομετρία επιλεγμένων κλασμάτων αδρανών σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου και μίγματος αδρανών για τη σύνθεση σκυροδέματος (40% άμμος και 60% ρύζι)

Για λόγους αναφοράς και διαθεσιμότητας επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί τσιμέντο τύπου CEM I 42,5 N, αν και η προτεινόμενη χρήση θα επέτρεπε και τη χρήση τσιμέντου χαμηλότερης αντοχής. Ο λόγος νερού προς τσιμέντο επιλέχθηκε να είναι μικρός (0,38) μια και δεν είναι επιθυμητή η παρουσία περίσσειας υγρασίας στο μίγμα, ενώ ο τρόπος συμπύκνωσης (δονητική τράπεζα υπό φορτίο) επιτρέπει τη συμπύκνωση ύφυγων μιγμάτων. Για την αποφυγή του φαινομένου της εξίδρωσης ή της απόμιξης αποφεύχθηκε η χρήση ρευστοποιητή, ενώ ο όγκος κενών υπολογίστηκε σε 25%. Στον Πίνακα 1 φαίνονται οι αναλογίες σύνθεσης του σκυροδέματος για την παραγωγή των διαπερατών κυβόλιθων.

Τελικά επιλέχθηκε η σύνθεση Σ2 (Πίνακας 2) για την πιλοτική παραγωγή κυβόλιθων και η παραγωγή έγινε στο εργοστάσιο της TEXNOMPIETON.

Πίνακας 2. Αναλογίες σύνθεσης εργοστασιακής σύνθεσης διαπερατών κυβόλιθων

Αναλογίες υλικών	(kg/m ³)
Τσιμέντο CEM I 42,5	328
Νερό (0,38)	125
Αδρανή σκωρίας 5-12 mm (60%)	1062
Άμμος σκωρία 0-7mm (40%)	708
Σύνολο	2223
Όγκος Κενών (%)	25

Η πιλοτική σύνθεση σχεδιάστηκε για συνολικό όγκο 750 dm³ που θα έδινε ένα μεγάλο αριθμό κυβόλιθων (> 500). Τα κλάσματα αδρανών σκωρίας μεταφέρθηκαν στο εργοστάσιο προζυγισμένα για να διευκολυνθεί η διαδικασία (Φωτ.4).



Φωτ.4 Αδρανή σκωρίας 5-12 mm σε προζυγισμένο σάκο (big bag)

Οι σάκοι των αδρανών αδειάστηκαν στον κάδο της εργοστασιακής διάταξης και στη συνέχεια μεταφέρθηκαν στον κάδο ανάμιξης, όπου προστέθηκε και το απαιτούμενο τσιμέντο (Φωτ.5). Αφού μετρήθηκε η υγρασία στο μίγμα λόγω της διαθέσιμης υγρασίας των αδρανών, προστέθηκε το απαιτούμενο νερό και αναμίχθηκε το μίγμα για ικανό χρόνο.

Στη συνέχεια το μίγμα μεταφέρθηκε σε καλούπια στη δονητική τράπεζα, όπου δονήθηκε υπό φορτίο προκειμένου να συμπκνωθεί ικανοποιητικά. Αμέσως μετά τη δόνηση ανασηκώνονται τα καλούπια και οι νωποί κυβόλιθοι είναι έτοιμοι για μεταφορά στο θάλαμο συντήρησης (Φωτ.6).



Φωτ.5 Μεταφορά των υλικών στον κάδο ανάμιξης

Μετά από συντήρηση τουλάχιστον 7 ημερών στο θάλαμο και μέχρι τις 28 ημέρες σε εξωτερικό χώρο, προστατευμένοι με πλαστική μεμβράνη για την αποφυγή απώλειας υγρασίας, οι κυβόλιθοι οδοστρωσίας διαστρώθηκαν σε κατάλληλη επιφάνεια, ενώ ένας μεγάλος αριθμός από αυτούς μεταφέρθηκε στο εργαστήριο για τη διεξαγωγή ελέγχων σχετικά με τη διαπερατότητα και τις μηχανικές ιδιότητες.



Φωτ.6 Νωποί διαπερατοί κυβόλιθοι οδοστρώσας με σκωριοαδρανή

Η μέτρηση της θλιπτικής αντοχής έγινε σε ολόκληρους κυβόλιθους κατά τη φορά σκυροδέτησης, ενώ ο συντελεστής διαπερατότητας μετρήθηκε με μέθοδο παρόμοια με αυτή που ελέγχθηκαν τα κυλινδρικά δοκίμια στο εργαστήριο.

Αποτελέσματα

Όλοι οι έλεγχοι πραγματοποιήθηκαν σε τουλάχιστον τρία δοκίμια και στους σχετικούς πίνακες παρουσιάζονται οι μέσοι όροι των αποτελεσμάτων. Στις πρώτες δύο συνθέσεις πραγματοποιήθηκαν έλεγχοι εφελκυσμού (αντοχή σε διάρρηξη και κάμψη) και έλεγχος αντοχής σε απότριψη, ενώ στις υπόλοιπες τέσσερις συνθέσεις μετρήθηκε η θλιπτική αντοχή τόσο στις 7, όσο και στις 28 ημέρες. Τα αποτελέσματα των ελέγχων στις εργαστηριακές συνθέσεις φαίνονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Εργαστηριακές συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος

Σύνθεση	A1	Σ1	Σ2	Σ3	Σ4	Σ5
Φαινόμενη πυκνότητα (kg/m ³)	2000	2216	2247	2188	2403	2373
Αντοχή σε θλίψη 7 ημερών (MPa)	-	-	13,37	9,62	22,23	14,14
Αντοχή σε θλίψη 28 ημερών (MPa)	14,29	14,33	18,79	15,87	26,37	16,97
Αντοχή σε διάρρηξη 28 ημ. (MPa)	1,77	1,54	-	-	-	-
Αντοχή σε κάμψη 28 ημ. (MPa)	4,50	3,43	-	-	-	-
Απότριψη-Μέσο βάθος αυλάκωσης (mm)	4,245	0,795	-	-	-	-
Συντελεστής διαπερατότητας (mm/sec)	12,21	33,46	13,56	13,93	3,94	7,49

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 3, φαίνεται ότι με τη χρήση αδρανών σκωρίας επιτυγχάνεται αυξημένη πυκνότητα στο τελικό προϊόν, κάτι αναμενόμενο λόγω της αυξημένης πυκνότητας της σκωρίας σε σχέση με τα ασβεστολιθικά αδρανή. Ο ρυθμός της αύξησης της αντοχής δεν αλλάζει σημαντικά στις συνθέσεις Σ2-Σ5, ενώ τα επίπεδα αντοχής 28 ημερών είναι ικανοποιητικά για τη συγκεκριμένη εφαρμογή (υπενθυμίζεται ότι η οδηγία ACI522-R10 αναφέρεται σε αντοχές 2,8-28,0 MPa). Όπως φαίνεται και από τη σύνθεση Σ4, η σημαντική αύξηση των αντοχών συνεπάγεται μειωμένη διαπερατότητα. Συγκρίνοντας τις συνθέσεις A1 με ασβεστολιθικά αδρανή και Σ1, Σ2 με σκωριοαδρανή, φαίνεται ότι η αντικατάσταση των αδρανών έδωσε αρχικά ίδιες αντοχές (αν και υπάρχει μια ελαφριά μείωση των εφελκυστικών αντοχών), αλλά πολύ μεγαλύτερη διαπερατότητα, κάτι που οφείλεται στη γεωμετρία των κόκκων σκωρίας. Τροποποιώντας την κοκκομετρία της σκωρίας

(Σ2), επιτυγχάνεται πολύ καλός συντελεστής διαπερατότητας με αυξημένη θλιπτική αντοχή. Γενικά, η χρήση αδρανών σκωρίας φαίνεται να αυξάνει τη θλιπτική αντοχή σε κάποιο βαθμό, αλλά κυρίως να αυξάνει σημαντικά την αντοχή σε απότριψη, κάτι αναμενόμενο λόγω της μεγάλης σκληρότητας των κόκκων σκωρίας.

Με βάση τα παραπάνω, μεταφέρθηκε σε εργαστασιακή κλίμακα η σύνθεση Σ2, όπου παράχθηκε μεγάλος αριθμός κυβόλιθων. Τα αποτελέσματα των ελέγχων στους κυβόλιθους της Φωτ.6 φαίνονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4. Σύνθεση και ιδιότητες πιλοτικής εφαρμογής (οι έλεγχοι των ιδιοτήτων πραγματοποιήθηκαν στις 28 ημέρες)

Μετρούμενη ιδιότητα	Τιμή
Φαινόμενη πυκνότητα (kg/m ³)	2247
Αντοχή σε θλίψη (MPa)	19,83
Αντοχή σε διάρρηξη (MPa)	1,03
Αντοχή σε κάμψη (MPa)	5,32
Απότριψη-Μέσο βάθος αυλάκωσης (mm)	2,17
Συντελεστής διαπερατότητας (mm/s)*	9,68

Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν σε μεγάλο βαθμό τις τιμές από τους εργαστηριακούς ελέγχους, δεδομένου του διαφορετικού τρόπου παραγωγής και της πολύ μεγαλύτερης ικανότητας συμπίκνωσης κατά την εργαστασιακή μέθοδο. Έτσι, τα επίπεδα μηχανικών αντοχών και πυκνότητας είναι αντίστοιχα με αυτά του εργαστηρίου. Η αντοχή σε απότριψη είναι κάπως μειωμένη, αλλά αυτό ενδεχομένως οφείλεται και στις αλλαγές στη μετρητική διάταξη, ενώ σε κάθε περίπτωση είναι σημαντικά βελτιωμένη σε σχέση με τη σύνθεση με ασβεστολιθικά αδρανή. Τέλος, ο συντελεστής διαπερατότητας (9,68 mm/s) κρίνεται ικανοποιητικός, δεδομένου ότι στόχος ήταν μια τιμή μεταξύ 10-12 mm/s. Σημειώνεται ότι η διαπερατότητα συμβατικών κυβόλιθων οδοστρωσίας μετρήθηκε κοντά στα 0,07 mm/s, ενώ η οδηγία ACI 522R-10 αναφέρει τιμές μεταξύ 1,4 και 12,2 mm/s.

Συμπεράσματα

Από τη χρήση σκωριών χαλυβουργίας για την παραγωγή διαπερατών κυβόλιθων οδοστρωσίας αντί για τα συμβατικά ασβεστολιθικά αδρανή, παρατηρήθηκαν τα παρακάτω:

- Η αντοχή αυξήθηκε σε ποσοστά 10-30%.
- Το ποσοστό κενών και η διαπερατότητα αυξήθηκαν με την αντικατάσταση ασβεστολιθικών αδρανών με σκωρίες. Το ακανόνιστο σχήμα των σκωριών που παρουσιάζουν πλήθος από κοιλότητες φαίνεται ότι ευνοεί την επίτευξη ικανού ποσοστού κενών χωρίς να μειώνεται η αντοχή.
- Η εφελκυστική αντοχή φαίνεται ότι επηρεάζεται αρνητικά από τη χρήση αδρανών σκωρίας, πιθανότατα λόγω της μειωμένης επιφάνειας πάστας-αδρανών που προκύπτει από το ακανόνιστο ανάγλυφο της σκωρίας
- Η αντοχή σε απότριψη των κυβόλιθων με σκωρία παραμένει πολύ υψηλή (4πλάσια) εν σχέσει μην αντοχή σε απότριψη των συμβατικών διαπερατών κυβόλιθων

Τα παραπάνω ισχύουν για μίγματα με μεγάλο ποσοστό κενών (20-30%) και ενδέχεται να αλλάξουν όταν το ποσοστό κενών είναι μικρότερο. Φαίνεται δε, ότι οι σκωρίες προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα ως αδρανή σε διαπερατούς κυβόλιθους, δεδομένου όμως ότι έχει προηγηθεί κατάλληλη μελέτη σύνθεσης. Συνολικά, οι διαπερατοί κυβόλιθοι που παράχθηκαν είναι πολύ καλής ποιότητας και ενδιαφέρον παρουσιάζει η εκτίμηση της ανθεκτικότητάς τους σε βάθος χρόνου, αλλά και πιθανή εφαρμογή τους σε πραγματικές συνθήκες.

Βιβλιογραφία

- ACI (2010), “Report on Pervious Concrete (ACI 522R-10)”, American Concrete Institute, March 2010, Michigan, USA.
- Ghafoori, N., & Sukandar, B. M. (1995). Abrasion resistance of concrete block pavers. *ACI Materials Journal*, 92(1).
- Knapton, J., & Barber, S. D. (1979, May). The behaviour of a concrete block pavement. In *Institution of Civil Engineers, Proceedings (Vol. 66, No. Pt1)*.
- Lilley, A. A., & Clark, A. J. (1978). Concrete block paving for lightly trafficked roads and paved areas (No. Publication 46.024 Monograph).
- Papayianni, I., & Anastasiou, E. (2010). Utilization of electric arc furnace steel slags in concrete products. In *6th European Slag Conference, EUROSLAG pub (No. 5, pp. 319-34)*.
- Pellegrino, C., & Faleschini, F. (2016). Electric Arc Furnace Slag Concrete. In *Sustainability Improvements in the Concrete Industry (pp. 77-106)*. Springer International Publishing.
- Pratt, C. J., Mantle, J. D. G., & Schofield, P. A. (1995). UK research into the performance of permeable pavement, reservoir structures in controlling stormwater discharge quantity and quality. *Water science and technology*, 32(1), 63-69.
- Proctor, D. M., Fehling, K. A., Shay, E. C., Wittenborn, J. L., Green, J. J., Avent, C., ... & Zak, M. A. (2000). Physical and chemical characteristics of blast furnace, basic oxygen furnace, and electric arc furnace steel industry slags. *Environmental Science & Technology*, 34(8), 1576-1582.
- Scholz, M., & Grabowiecki, P. (2007). Review of permeable pavement systems. *Building and Environment*, 42(11), 3830-3836.
- Shackel, B. (2003). The challenges of concrete block paving as a mature technology. *Pave Africa*, 12-15.
- Yang, J., & Jiang, G. (2003). Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. *Cement and Concrete Research*, 33(3), 381-386.
- Ιακώβου Δ., Ιωάννου Σ., (2012), “Μελέτη διαπερατού σκυροδέματος”, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2012, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα