

Έλεγχος οδοστρώματος από σκυρόδεμα με σκωριοαδρανή μετά από 7 χρόνια λειτουργίας

Ι. Παπαγιάννη, Ε. Αναστασίου

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Λέξεις κλειδιά: οδόστρωμα από σκυρόδεμα, αδρανή σκωρίας, ιπτάμενη τέφρα, ανθεκτικότητα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Με βάση προηγούμενη εργαστηριακή εμπειρία του Εργαστηρίου Δομικών Υλικών πραγματοποιήθηκε πιλοτική κατασκευή οδοστρώματος από σκυρόδεμα με ιπτάμενη τέφρα και αδρανή σκωρίας. Η κατασκευή έγινε στο Κασσανδρινό Χαλκιδικής στα πλαίσια του ΠΑΕΤ/ΠΑΒΕ 99ΒΕ399 με τη συμμετοχή και ιδιωτικών φορέων. Σκοπός της πιλοτικής εφαρμογής ήταν να δοκιμαστεί στην πράξη η δυνατότητα χρήσης αδρανών σκωρίας και ιπτάμενης τέφρας στην κατασκευή οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα και η μελέτη της συμπεριφοράς του σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα οδοστρώσεως. Το τμήμα του οδοστρώματος αφέθηκε στις κλιματικές συνθήκες και στην κυκλοφορία βαρέων οχημάτων λόγω του ότι παρέχει πρόσβαση σε εργοστάσιο έτοιμου σκυροδέματος και ελέγχθηκε μετά από 7 χρόνια χρήσης. Ο έλεγχος διενεργήθηκε με οπτική και μικροσκοπική παρατήρηση, εκτίμηση μηχανικών αντοχών, καθώς και υπολογισμό φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι το οδόστρωμα με αδρανή σκωρίας και ιπτάμενη τέφρα λειτούργησε πολύ ικανοποιητικά και δεν παρουσίασε προβλήματα ανθεκτικότητας.

Testing of concrete pavement with steel slag as aggregates after 7 years of use

I. Papayianni, E. Anastasiou

Laboratory of Building Materials, Aristotle University of Thessaloniki

Keywords: concrete pavements, steel slag aggregates, high calcium fly ash, durability

ABSTRACT: A concrete pavement with fly ash and steel slag aggregates was constructed, based on previous experience of the Aristotle University of Thessaloniki Laboratory of Building Materials. The scope of this demonstration project was to test the possibility of using steel slag aggregates along with fly ash as binder for partial replacement of cement for the production of pavement concrete and also to compare its performance with ordinary pavement concrete. The pavement was constructed near Kassandrino village in Halkidiki and was used as a service road for a ready-mix concrete plant. After 7 years of service a series of tests were carried out to evaluate the concrete's performance and durability. The tests include visual inspection, microscopic observation and estimation of physical and chemical properties. From the results it can be said that the test concrete pavement with steel slag aggregates and fly ash as binder performed very well and also showed no durability problems.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ιπτάμενη τέφρα και οι σκωρίες χαλυβουργίας είναι βιομηχανικά παραπροϊόντα που παράγονται σε μεγάλες ποσότητες, τόσο στον ελληνικό χώρο όσο και σε παγκόσμια κλίμακα (Bech & Feuerborn, 2008). Τόσο για τις σκωρίες χαλυβουργίας όσο και για την ιπτάμενη τέφρα, οι ιδιότητες των υλικών και η ανάγκη αξιοποίησης στο μέγιστο δυνατό βαθμό των βιομηχανικών παραπροϊόντων ωθούν προς την αξιοποίησή τους σε εφαρμογές του κατασκευαστικού τομέα (Akimunsuru, 1991; Berry & Malhotra, 1980). Η δυνατότητα χρήσης σκωριών χαλυβουργίας σε έργα οδοστρώσας έχει διαπιστωθεί από ερευνητές στο παρελθόν (Emery 1982; Sherwood, 2001). Οι πιθανές εφαρμογές που διερευνώνται αφορούν κυρίως ασφαλτοτάπητες ή εφαρμογές χαμηλής αξίας όπως βάσεις και υποβάσεις. Αντίθετα, η ιπτάμενη τέφρα χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερο φάσμα εφαρμογών όπως η παραγωγή τσιμέντου και η χρήση της ως εναλλακτική κονία σκυροδέματος (Malhotra & Mehta, 2002, Parayianni 2001).

Στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών μελετάται τα τελευταία χρόνια η δυνατότητα χρήσης σκωρίας ως αδρανές σκυροδέματος σε συνδυασμό με ιπτάμενη τέφρα ως εναλλακτική κονία σκυροδέματος (Parayianni & Anastasiou, 2003). Από την πορεία του ερευνητικού έργου προέκυψε ότι είναι εφικτή η παραγωγή τέτοιων σκυροδεμάτων που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή δύσκαμπτων οδοστρώματων. Έτσι, αποφασίστηκε η πιλοτική κατασκευή οδοστρώματος από σκυρόδεμα για να μελετηθεί καλύτερα η δυνατότητα εφαρμογής των εργαστηριακών αποτελεσμάτων σε πραγματική κλίμακα, αλλά και η μακροχρόνια ανθεκτικότητα του έργου στη φθορά από τη χρήση και την έκθεση σε συνθήκες περιβάλλοντος (Αναστασίου & Παπαδόπουλος, 2000)..

Η περιοχή που επιλέχθηκε για την κατασκευή του δρόμου ήταν η δασική οδός που συνδέει τη Νομαρχιακή Οδό Κρυσπηγής-Κασσανδρινού Χαλκιδικής με μονάδα παραγωγής σκυροδέματος, συνολικού μήκους 240 m και πλάτους 7 m. Η πορεία εργασιών για την κατασκευή και τον ποιοτικό έλεγχο του έργου περιλάμβανε εργαστηριακούς ελέγχους σε δοκιμαστικές εργοταξιακές συνθέσεις στην περιοχή και στη συνέχεια κατασκευή του οδοστρώματος και αξιολόγηση της ποιότητας του σκυροδέματος.

2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ¹

Για την κατασκευή του οδοστρώματος επιλέχθηκαν να γίνουν δύο δοκιμαστικές συνθέσεις με βάση με βάση παλαιότερες επιτυχημένες εργαστηριακές συνθέσεις, τροποποιημένες κατάλληλα ανάλογα με τα διαθέσιμα υλικά και τις συνθήκες του εργοταξίου. Συγκεκριμένα, η 1^η σύνθεση περιείχε ιπτάμενη τέφρα σε ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου 50% και χρήση αδρανών σκωρίας στο χονδρόκοκκο κλάσμα των αδρανών, ενώ η 2^η περιείχε ιπτάμενη τέφρα σε ποσοστό αντικατάστασης 60% και αδρανή σκωρίας σε όλα τα κλάσματα των αδρανών.

Το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου CEM I42,5 και η ιπτάμενη τέφρα από την περιοχή της Πτολεμαΐδας, κατάλληλα επεξεργασμένη. Και οι δύο συνθέσεις είχαν μέγιστο κόκκο αδρανών και η κοκκομετρική σύνθεση ήταν μέσα στα όρια που προτείνει ο ΚΤΣ-97, αν και στη σύνθεση μόνο με αδρανή σκωρίας παρατηρείται μικρότερη περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκο υλικό, γεγονός που προσδίδει μειωμένη εργασιμότητα στο νωπό σκυρόδεμα (Parayianni & Anastasiou, 2005).

¹ Η κατασκευή του οδοστρώματος πραγματοποιήθηκε από την εταιρεία Σκυρόδεμα Χαλκιδικής Α.Ε. Το έργο της κατασκευής του οδοστρώματος εντάχθηκε στο πρόγραμμα ΠΑΕΤ/ΠΑΒΕ 99ΒΕ399 και τα αποτελέσματα των Πινάκων 1 και 2 περιέχονται στην τελική έκθεση του έργου με τίτλο «Αξιοποίηση βιομηχανικών καταλοίπων (σκωρίας) σε προϊόντα σκυροδέματος χαμηλής αντοχής».

Οι αναλογίες σύνθεσης και κάποιες ιδιότητες των νωπών μιγμάτων φαίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Αναλογίες σύνθεσης και ιδιότητες νωπού σκυροδέματος

Σύνθεση	1 ^η	2 ^η
Υλικά (Περιεκτικότητα)	(kg/m ³)	(kg/m ³)
Τσιμέντο CEM I42,5	140	112
Κατεργασμένη ιπτάμενη τέφρα	140	168
Άμμος ποταμού Αξιού 0-4mm	645	-
Άμμος σκωρίας 0-4mm	-	879
Αδρανή σκωρίας 4-16mm	615	628
Αδρανή σκωρίας 16-31,5mm	1034	1005
Νερό	88,4	92,6
Ρευστοποιητής (2% κ.β. της κονιάς)	2,8	2,8
Ιδιότητες νωπού μίγματος		
Εργασιμότητα (κάθιση) (cm)	1,0	0,5
Φαινόμενη πυκνότητα νωπού (kg/m ³)	2757	2983

Κατά τη σκυροδέτηση λήφθηκαν κυβικά δοκίμια ακμής 15 cm, τα οποία συντηρήθηκαν κατάλληλα και ελέγχθηκαν ως προς τη θλιπτική τους αντοχή σε ηλικία 7 και 28 ημερών. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι παράχθηκε σκυρόδεμα κατηγορίας C16/20 και C25/30 από την 1^η και τη 2^η σύνθεση, αντίστοιχα. Ο Πίνακας 2 περιέχει τα αποτελέσματα των παραπάνω ελέγχων για τις δύο συνθέσεις, καθώς και τον αριθμό των δοκιμών που υποβλήθηκαν σε κάθε δοκιμή.

Πίνακας 2. Αντοχή σε θλίψη συνθέσεων πιλοτικής εφαρμογής

Είδος δοκιμών	Ηλικία	Αριθμός δοκιμών	1 ^η Σύνθεση (MPa)	2 ^η Σύνθεση (MPa)
Κυβικό ακμής 15 cm	7 ημερών	4	23,31	31,79
Κυβικό ακμής 15 cm	28 ημερών	12	31,49	40,34

Ταυτόχρονα με την κατασκευή του πιλοτικού τμήματος του οδοστρώματος κατασκευάστηκε και τμήμα με συμβατικό σκυρόδεμα, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για σύγκριση.

3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΠΕΡΙΟΔΟ ΧΡΗΣΗΣ 7 ΕΤΩΝ

Προκειμένου να διαπιστωθεί ανθεκτικότητα και η επιτελεστικότητα του σκυροδέματος της πιλοτικής εφαρμογής αποφασίστηκε να διενεργηθεί δειγματοληψία και έλεγχος της κατάστασης του οδοστρώματος, 7 χρόνια μετά την παράδοση του έργου σε χρήση. Κατά την περίοδο αυτή το οδόστρωμα δέχτηκε σημαντική κυκλοφορία βαρέων οχημάτων λόγω της πρόσβασης που παρέχει σε μονάδα παραγωγής σκυροδέματος, ενώ παράλληλα με το πιλοτικό τμήμα του οδοστρώματος ελέγχεται και το συμβατικό σκυρόδεμα για λόγους σύγκρισης.

Ο έλεγχος της κατάστασης του οδοστρώματος έγινε με οπτική παρατήρηση, φωτογραφική τεκμηρίωση, δειγματοληψία και εργαστηριακούς ελέγχους. Η δειγματοληψία έγινε με τη λήψη πυρήνων σε διάφορες θέσεις από τα τρία μέρη της οδού. Συνολικά λήφθηκαν 14 πυρήνες, οι οποίοι μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο για τη διεξαγωγή των ελέγχων.

Το πειραματικό πρόγραμμα των ελέγχων περιλαμβάνει:

- Επιθεώρηση της γενικής κατάστασης του οδοστρώματος

- ii. *Οπτική παρατήρηση και φωτογραφική τεκμηρίωση*
- iii. *Στερεοσκοπική παρατήρηση και πορώδες πυρήνων*
- iv. *Υπολογισμός μηχανικών αντοχών πυρήνων*
- v. *Μέτρηση pH και χλωριόντων*

Τα αποτελέσματα των ελέγχων παρουσιάζονται στη συνέχεια.

3.1 Επιθεώρηση της γενικής κατάστασης του οδοστρώματος

- Ελέγχθηκαν τρία διαφορετικά είδη οδοστρωμάτων. Το πρώτο από την σύνδεση του δρόμου με την επαρχιακή οδό Κρυοπηγής-Κασσανδρινού μέχρι απόσταση 25 m (Π-1), το δεύτερο από τα 25 m μέχρι τα 60 m απόσταση (Π-2) και το τρίτο από τα 60 m μέχρι τα 90 m (Π-3).
- Τα πρώτα δύο τμήματα ελέγχου Π-1 και Π-2 είναι κατασκευασμένα με αδρανή σκωρίας (συνθέσεις Σ-1.6 και Σ-1.5, αντίστοιχα), ενώ το Π-3 με συμβατικό σκυρόδεμα με ασβεστολιθικά αδρανή.
- Το μέσο πλάτος του δρόμου είναι 6,5 m.
- Υπάρχει διαμήκης αρμός σε απόσταση 2,5 με 3,0 m από το αριστερό άκρο του δρόμου, όπως κινούμαστε από την επαρχιακή οδό προς το εργοστάσιο έτοιμου σκυροδέματος.
- Έχουν δημιουργηθεί εγκάρσιοι αρμοί ανά 4,5 με 5,5 m μήκους δρόμου.
- Η διατομή του οδοστρώματος παρουσιάζει κλίση της τάξης του 1,5%.

3.2 Οπτική παρατήρηση και φωτογραφική τεκμηρίωση

- Στο πρώτο τμήμα ελέγχου (Π-1) παρατηρούνται αποθέσεις χωμάτων και λακκούβες στην επιφάνεια του οδοστρώματος, ενώ η επιφανειακή φθορά είναι μεγαλύτερη από αυτή του τμήματος Π-2, όπως φαίνεται από το σημείο σύνδεσης των τμημάτων (Εικόνα 1).
- Στο δεύτερο τμήμα ελέγχου (Π-2) το οδόστρωμα παρουσιάζει ικανοποιητική εικόνα με κάποιες τοπικές φθορές (Εικόνα 2). Ως προς την επιπεδότητα και την παρουσία αστοχιών η κατάστασή του είναι αρκετά καλή, ενώ και η επιφανειακή φθορά είναι περιορισμένη (Εικόνα 3).
- Η γενική εικόνα του τμήματος ελέγχου με συμβατικό σκυρόδεμα (Π-3) είναι μέτρια (Εικόνα 4), με εκτεταμένες κατά τόπους φθορές (Εικόνα 5) και αστοχίες, ενώ η επιφανειακή φθορά είναι εκτεταμένη και σε αρκετές περιπτώσεις έχει παρατηρηθεί αποκόλληση αδρανών. Από το σημείο σύνδεσης των τμημάτων Π-2 και Π-3 (Εικόνα 6) είναι εμφανής οπτικά η σημαντική διαφορά στη φθορά του οδοστρώματος.



Εικόνα 1. Σύνδεση τμημάτων οδού Π-1 και Π-2. Αποθέσεις χωμάτων και λακκούβες στο τμήμα Π-1 (κάτω μέρος φωτογραφίας)



Εικόνα 2. Συνολική εικόνα τμήματος οδού Π-2



Εικόνα 3. Επιφάνεια κυκλοφορίας τμ. οδού Π-2



Εικόνα 4. Συνολική εικόνα τμήματος οδού Π-3



Εικόνα 5. Αστοχία οδοστρώματος του τμήματος Π-3



Εικόνα 6. Διαφοροποίηση εικόνας οδοστρώματος στη σύνδεση του τμήματος Π-2 (αριστερό μέρος) και Π-3 (κάτω δεξιά μέρος)

3.3 Στερεοσκοπική παρατήρηση και πορώδεις πυρήνων

Η στερεοσκοπική παρατήρηση έγινε σε τμήματα των πυρήνων που λήφθηκαν από το οδόστρωμα και μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο. Οι πυρήνες είχαν μέση διάμετρο 74 mm και ύψος ανάλογο με το πάχος της στρώσης του οδοστρώματος (180-200 mm) και ο έλεγχος έγινε τόσο σε τομή στο άνω μέρος (στρώση κυκλοφορίας), όσο και στο μέσο και το κάτω μέρος (επαφή με βάση αδρανών) και

για τα τρία υπό έλεγχο τμήματα του οδοστρώματος. Οι παρατηρήσεις που προέκυψαν παρατίθενται στον Πίνακα 3.

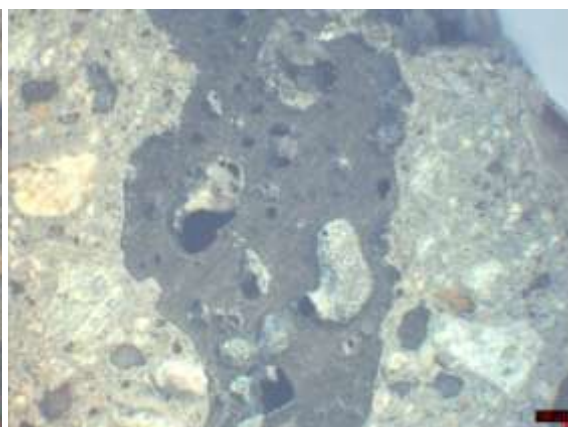
Πίνακας 3. Στερεοσκοπική παρατήρηση πυρήνων πιλοτικής εφαρμογής οδοστρώματος

Είδος δοκιμίων	Π-1	Π-2	Π-3
Λόγος κονίας/αδρανών	Χαμηλός	Χαμηλός	Χαμηλός
Λεπτόκοκκα αδρανή	Σκωρία και φυσική άμμος	Σκωρία και λίγη φυσική άμμος	Ασβεστολιθικά
Χονδρόκοκκα αδρανή	Σκωρία	Σκωρία	Ασβεστολιθικά
Άνω επιφάνεια (στρώση κυκλοφορίας)	Φθαρμένη με λείους κόκκους και βαθουλώματα της τάξης των 5mm	Φθαρμένη από την κυκλοφορία με λειασμένα αδρανή	Φθαρμένη από την κυκλοφορία με λειασμένα αδρανή και αποκολλήσεις
Κάτω επιφάνεια (επαφή με βάση)	Χαλαρή δομή λόγω κακής συμπίκνωσης	Χαλαρή δομή λόγω κακής συμπίκνωσης	Χαλαρή δομή λόγω κακής συμπίκνωσης
Πορώδες (άνω μέρος)	7-9%	7-9%	9-10%
Πορώδες (κάτω μέρος)	6-8%	5-7%	6-8%
Μέγεθος πόρων στην πάστα	2000 μm	800-1000 μm	800-1000μm
Συνάφεια πάστας/αδρανών	Ισχυρή	Ισχυρή	Συνολικά ισχυρή, κάποιες επαφές είναι προβληματικές
Παρουσία αλάτων	Μόνο στους κόκκους σκωρίας	Στα αδρανή σκωρίας και σε μικρό βαθμό στην πάστα	Σε λίγες θέσεις συνολικά
Άλλες παρατηρήσεις	Εμφανίζεται ζώνη περιμετρικά των αδρανών σκωρίας και οξείδωση σε κάποιους κόκκους	Ζώνη πάχους 10-20μm περιμετρικά λίγων αδρανών σκωρίας και μη οξειδωμένα μεταλλικά στοιχεία	Εμφάνιση μικρορωγμών και αποκολλήσεων αδρανών κατά τόπους

Από τη συνολική εικόνα των δειγμάτων διαπιστώνεται η συνολικά καλή εικόνα των συνθέσεων με αδρανή σκωρίας, ειδικά όσον αφορά στη συνάφεια αδρανών-πάστας μετά και από την φθορά λόγω κυκλοφοριακού φόρτου (Εικόνα 7). Αντίθετα, η παρουσία αλάτων στους πόρους της σκωρίας είναι αρκετά συνηθισμένη (Εικόνα 8).



Εικόνα 7. Καλή συνάφεια πάστας – αδρανών σκωρίας (στερεοσκόπιο x8)



Εικόνα 8. Εμφάνιση αλάτων σε πόρους αδρανών σκωρίας (στερεοσκόπιο x8)

3.4 Υπολογισμός μηχανικών αντοχών πυρήνων

Οι πυρήνες υποβλήθηκαν σε έλεγχο αντοχής σε θλίψη και διάρρηξη. Για τη διενέργεια του ελέγχου αντοχής σε θλίψη τα δοκίμια κόπηκαν ώστε να προκύψει λόγος ύψους προς διάμετρο ίσος με 2 και στη συνέχεια επιπεδώθηκαν με μίγμα από θειάφι και πίσσα, σύμφωνα με τον ΚΤΣ-97. Στη συνέχεια, για την αντιστοίχιση των αντοχών των πυρήνων με αντοχές κυλινδρικών δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν οι συντελεστές της προδιαγραφής ΕΛΟΤ 344. Πιο συγκεκριμένα, προβλέπεται συντελεστής L_1 , που αναφέρεται στο λόγο ύψους προς διάμετρο (H/D) των δοκιμίων, συντελεστής L_2 , που αναφέρεται στη διάμετρο των δοκιμίων και συντελεστής L_4 , που αναφέρεται στη συντήρηση και την υγρασία του σκυροδέματος. Έτσι, με τη χρήση των συντελεστών L_1 , L_2 και L_4 η αντοχή των πυρήνων ανάγεται σε ισοδύναμη αντοχή κυλίνδρου 15x30 cm. Επίσης, με τη χρήση ενός ακόμα συντελεστή (L_3), η αντοχή ανάγεται σε ισοδύναμη αντοχή κύβου 15x15x15 cm (Πίνακας 4).

Πίνακας 4. Αντιστοίχιση αντοχής πυρήνων με ισοδύναμη αντοχή κύβου 15x15x15 cm

Τμήμα ελέγχου	D (cm)	H (cm)	H:D	Αντοχή πυρήνα (MPa)	L_1	L_2	L_4	Ισ.Αντοχή κυλίνδρου (MPa)	L_3	Ισ.Αντοχή κύβου (MPa)
Π-1.1	7,42	15,00	2,02	35,08	1,002	0,94	1,03	34,0	1,157	39,4
Π-1.2	7,42	14,71	1,98	25,74	0,998	0,94	1,03	24,9	1,182	29,4
Π-2.1	7,42	14,98	2,02	33,35	1,000	0,94	1,03	32,3	1,160	37,5
Π-2.2	7,42	14,44	1,95	34,99	0,996	0,94	1,03	33,7	1,158	39,1
Π-2.3	7,42	12,55	1,69	38,44	0,975	0,94	1,03	36,3	1,149	41,7
Π-3.1	7,42	15,00	2,02	27,80	1,002	0,94	1,03	27,0	1,176	31,7
Π-3.2	7,42	15,00	2,02	28,14	1,002	0,94	1,03	27,3	1,174	32,0

Οι τελικές αντοχές των συνθέσεων του οδοστρώματος συγκρίνονται με τις αρχικές αντοχές 28 ημερών του Πίνακα 2. Στους υπόλοιπους πυρήνες μετρήθηκε η φαινόμενη πυκνότητα και στη συνέχεια υποβλήθηκαν σε έλεγχο αντοχής σε διάρρηξη. Η διαδικασία αποκοπής των πυρήνων μπορεί να προκαλέσει διατάραξη του σκυροδέματος και να επηρεάσει τις μηχανικές του ιδιότητες. Επίσης, σύμφωνα με τον EN 12504-1, οι πυρήνες διαμέτρου 100 mm δίνουν 17% υψηλότερη αντοχή σε σχέση με τους πυρήνες διαμέτρου 50 mm, οπότε κάτι ανάλογο αναμένεται να συμβαίνει

και με τους πυρήνες διαμέτρου 74 mm, που χρησιμοποιήθηκαν στη δειγματοληψία του πιλοτικού οδοστρώματος. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, τα αποτελέσματα των ελέγχων των μηχανικών ιδιοτήτων των πυρήνων φαίνονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5. Μηχανικές ιδιότητες πυρήνων σκυροδέματος οδοστρωσίας ηλικίας 7 ετών

Έλεγχος	Τμήμα ελέγχου Π-1 (1 ^η σύνθεση)	Τμήμα ελέγχου Π-2 (2 ^η σύνθεση)	Τμήμα ελέγχου Π-3 (Συμβατική σύνθεση)
Φαινόμενη πυκνότητα (kg/m ³)	2781	2665	2342
Θλιπτική αντοχή πυρήνων (MPa)	30,4	35,6	28,0
Ισοδύναμη θλιπτική αντοχή κύβου (MPa)	34,4	39,4	31,9
Αντοχή σε διάρρηξη πυρήνων (MPa)	2,21	3,02	1,44

3.5 Μέτρηση pH και χλωριόντων

Για την εκτίμηση της κατάστασης του οδοστρώματος ελέγχθηκαν η περιεκτικότητα σε χλωρίοντα, θειικά, το pH στην επιφάνεια του σκυροδέματος και σε βάθος 10 cm από αυτήν. Επίσης, το βάθος της ενανθράκωσης μετρήθηκε με τη χρήση διαλύματος φαινολοφθαλεΐνης (Πίνακας 6).

Πίνακας 6. Έλεγχοι χημικών ιδιοτήτων οδοστρώματος

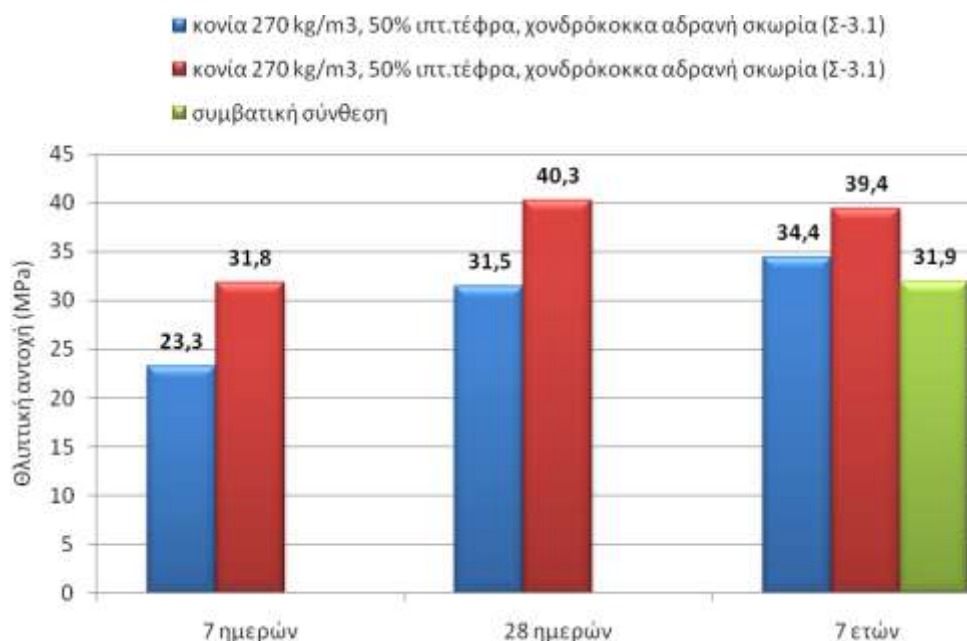
Έλεγχος	Τμήμα ελέγχου Π-1 (1 ^η σύνθεση)	Τμήμα ελέγχου Π-2 (2 ^η σύνθεση)	Τμήμα ελέγχου Π-3 (Συμβατική σύνθεση)
pH στην επιφάνεια	10,60	10,76	10,48
pH στο εσωτερικό	11,04	11,19	10,73
Cl ⁻ στην επιφάνεια (% κ.β.)	0,24	0,05	0,03
Cl ⁻ στο εσωτερικό (% κ.β.)	0,03	0,03	0,02
SO ₄ ⁻ στην επιφάνεια (% κ.β.)	0,34	0,48	0,38
SO ₄ ⁻ στο εσωτερικό (% κ.β.)	0,60	0,65	0,43
Βάθος ενανθράκωσης (cm)	0,50	0,50	0,50

Από τους ελέγχους ανθεκτικότητας φαίνεται μικρό βάθος ενανθράκωσης και ικανοποιητική προστασία του σκυροδέματος από διάβρωση.

4 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σχετικά με τις συνθέσεις που εφαρμόστηκαν στο οδόστρωμα, μετρήθηκαν οι αντοχές σε θλίψη σε ηλικία 7 και 28 ημερών, ενώ μετά από 7 έτη υπολογίστηκε η ισοδύναμη θλιπτική αντοχή κύβου από τον έλεγχο αποκοπόμενων πυρήνων, όπως και η αντίστοιχη αντοχή του συμβατικού οδοστρώματος που κατασκευάστηκε ταυτόχρονα.

Από το Διάγραμμα 1 φαίνεται ότι 7 χρόνια μετά την κατασκευή του το οδόστρωμα διατηρεί τα επίπεδα αντοχών του, τα οποία είναι υψηλότερα από τα αντίστοιχα του συμβατικού σκυροδέματος.



Διάγραμμα 1. Ανάπτυξη αντοχών συνθέσεων πιλοτικής εφαρμογής

Το σημαντικότερο, όμως, εύρημα που προέκυψε από τον έλεγχο του οδοστρώματος μετά από χρήση 7 ετών είναι ότι, παρόλη την κυκλοφορία βαρέων οχημάτων στην επιφάνειά του, διατηρήθηκε σε εξαιρετική κατάσταση και δεν παρατηρήθηκαν διογκώσεις, σε αντίθεση με το συμβατικό οδόστρωμα που εμφάνισε σημαντικές ρωγμές και αποκολλήσεις υλικών.

Μέσω της στερεοσκοπικής παρατήρησης που διενεργήθηκε σε πυρήνες από διάφορες θέσεις του οδοστρώματος διαπιστώθηκε μικρή επιφανειακή φθορά από την κυκλοφορία, πολύ μικρό βάθος ενανθράκωσης (0,5 cm), καλό πορώδες (5-7%) και ισχυρή συνάφεια πάστας/αδρανών. Επίσης, με τη μέτρηση του pH, των χλωριόντων και των θεικών, τόσο κοντά στην επιφάνεια, όσο και στο εσωτερικό του σκυροδέματος, διαπιστώνεται ότι το υπάρχει ικανοποιητική προστασία από την ενανθράκωση και άλλους διαβρωτικούς παράγοντες.

Διαπιστώνεται, λοιπόν, ότι το σκυρόδεμα με αδρανή σκωρίας και ιπτάμενη τέφρα, που αν εφαρμοστούν τα κριτήρια συμμόρφωσης του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ-97) για τις θλιπτικές αντοχές κύβου 28 ημερών, εμπίπτει στην κατηγορία C16/20 για την 1^η σύνθεση και στην κατηγορία C25/30 για τη 2^η σύνθεση, εμφανίζει πολύ καλή λειτουργικότητα και ανθεκτικότητα μετά από περίοδο χρήσης 7 ετών.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Akinmusuru, J.O. (1991). Potential beneficial uses of steel slag wastes for civil engineering purposes. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 5, pp 73-80.
- Bech, N. & Feuerborn, J. (2008). Coal ash utilization in Europe. *Proceedings of the International Conference EuroCoalAsh 2008*, 6th-8th October 2008, Warsaw, Poland, pp 9-25.
- Berry, E.E. & Malhotra, V.M. (1980). Fly ash for use in concrete – A critical review. *ACI Journal Proceedings*, Vol. 77, No. 2, pp 59-73.

Beshr, H., Almusallam, A.A. & Maslehuddin, M. (2003). Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 17, pp 97-103.

Derucher, K.N., Korfiatis, G.P. & Ezeldin, A.S. (1998). *Materials for Civil & Highway Engineers*. (4th ed.) New Jersey, USA: Prentice-Hall.

Emery, J.J. (1982). Slag Utilization in Pavement Construction. In *Extending Aggregate Resources*, by Hotaling, W.W., ASTM STP 774, pp 95-118.

Malhotra, V., & Mehta, P.K. (2002). *High Performance, High Volume Fly Ash Concrete; Materials, Mixture Proportioning, Properties, Construction Practice, and Case Histories*. Ottawa: Marquardt Printing.

Mehta, P.K. & Monteiro, P.J. (2006). *Concrete; Microstructure, Properties, and Materials* (Third ed.). New York: Mc Graw Hill.

Papadakis, V.G. & Tsimas, S. (2005). Greek supplementary cementing materials and their incorporation in concrete. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, No. 2, pp 223-230.

Papayianni, I. & Anastasiou, E. (2003). Concrete incorporating high volumes of industrial by-products. *Proceedings of the International Conference Celebrating Concrete: People and Practice*, 3rd-4th September 2003, Dundee, Scotland.

Papayianni, I. & Anastasiou, E. (2005). Heavyweight concrete with steel slag aggregates. *Proceedings of the International Conference Global Construction: Ultimate Concrete Opportunities*, 5th-7th July 2005, Dundee, Scotland.

Papayianni, I. (2001). High calcium fly ash applications in concrete construction. *Proceedings of the Seventh CANMET International Conference on fly ash, silica fume, slag, and natural pozzolans in concrete*. 22nd-27th July 2001, Chennai (Madras), India.

Sherwood, P. (2001). *Alternative materials in road construction*. (2nd ed.) London: Thomas Telford.

Αναστασίου, Ε. & Παπαγιάννη, Ι. (2005). Κανονιστικό πλαίσιο για τη χρήση σκυριών χαλυβουργίας ως αδρανών στην παραγωγή σκυροδέματος. *Πρακτικά 1ου Πανελληνίου Συνεδρίου για την Αξιοποίηση Βιομηχανικών Παραπροϊόντων στη Δόμηση*. Επιμέλεια έκδοσης Παπαγιάννη, Ι. & Τσίμας Σ., 24-26 Νοεμβρίου 2005, Θεσσαλονίκη: ΕΒΙΠΑΡ.

Αναστασίου, Ε. & Παπαδόπουλος, Α. (2000). Έλεγχος καταλληλότητας των σκυριών (αποκαμινευμάτων χαλυβουργίας) για την παραγωγή σκυροδεμάτων (RCC) ειδικών εφαρμογών. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.

Παπαγιάννη, Ι., Βασιλόπουλος, Χ., Κουτσός, Γ. & Αναστασίου, Ε. (2005). Έλεγχος πιλοτικού οδοστρώματος με τσιμέντο-τεφροσκυρόδεμα 5 χρόνια μετά την κατασκευή του. *Πρακτικά 1ου Πανελληνίου Συνεδρίου για την Αξιοποίηση Βιομηχανικών Παραπροϊόντων στη Δόμηση*. Επιμέλεια έκδοσης Παπαγιάννη, Ι. & Τσίμας Σ., 24-26 Νοεμβρίου 2005, Θεσσαλονίκη: ΕΒΙΠΑΡ, σελ 317-326.