

## **ΧΡΗΣΗ ΣΚΩΡΙΩΝ ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΥΒΟΛΙΘΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΣΙΑΣ**

**Ι. Παπαγιάννη, Ε. Αναστασίου, Ε. Χαριτάκης, Δ. Ζάμπογλου**

*Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται πειραματική έρευνα για την αντικατάσταση των συμβατικών αδρανών από αδρανή σκωρίας χαλυβουργίας στην παραγωγή κυβόλιθων. Παρουσιάζονται οι έλεγχοι καταλληλότητας των σκωριών ως αδρανή, τα κριτήρια επιλογής και οι βέλτιστες κοκκομετρικές καμπύλες και συνθέσεις σκυροδέματος. Στη συνέχεια παρουσιάζεται πιλοτική παραγωγή με αδρανή σκωρίας που έγινε στη βιομηχανική μονάδα της ΤΕΧΝΟΜΠΕΤΟΝ Α.Ε. Ένας ικανοποιητικός αριθμός κυβόλιθων με αυτά τα αδρανή υποβλήθηκε στους απαιτούμενους από τις προδιαγραφές ελέγχους και επισημάνθηκαν τα προβλήματα στην όλη διαδικασία παραγωγής. Βάσει των αποτελεσμάτων φαίνεται ότι είναι δυνατή η παραγωγή κυβόλιθων με αδρανή σκωρίας με σημαντικά πλεονεκτήματα, κυρίως όσον αφορά την αντοχή σε τριβή και την ανθεκτικότητα.

*Λέξεις κλειδιά: κυβόλιθοι, σκυρόδεμα, αδρανή σκωρίας, ανθεκτικότητα .*

# **USE OF STEEL SLAG AGGREGATES IN THE PRODUCTION OF CONCRETE PAVING BLOCKS**

**I. Papayianni, E. Anastasiou, E. Charitakis, D. Zaboglou**

*Laboratory of Building Materials, Aristotle University of Thessaloniki.*

**ABSTRACT:** In this report is presented an experimental study on the replacement of limestone aggregates with steel slag aggregates for the production of concrete paving blocks. The report consists of suitability tests for steel slags as aggregates, selection criteria, optimum granulometry curves and concrete mixtures. Following these, a demonstration factory production of concrete paving blocks took place in the facilities of TECHNOBETON S.A. A sufficient number of concrete paving blocks with steel slag aggregates was subjected to the tests prescribed in the appropriate standards and flows in the production process were identified. Based on the results, it seems possible to produce concrete paving blocks with steel slag aggregates with considerable advantages, mainly regarding abrasion resistance and durability.

*Keywords: concrete paving blocks, concrete, steel slag aggregates, durability*

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σκωρία αποτελεί προϊόν της καμίνευσης του scrap για την παραγωγή δομικού χάλυβα με τη μέθοδο Temcore. Το υλικό ψύχεται και διαβαθμίζεται σε κλάσματα αδρανών. Η παγκόσμια παραγωγή υπολογίζεται γύρω στους 100εκ. τόνους ετησίως. Στην Ευρώπη παράγονται περίπου 12 εκ. τόνοι. Στην Ελλάδα 0.5 εκ. τόνοι. Η αξιοποίηση των σκωριών ποικίλει από χώρα σε χώρα. Στη Γερμανία μόνο το 7% απορρίπτεται στο περιβάλλον. Σε άλλες χώρες το αναξιοποίητο προϊόν φτάνει το 35%.

Η χρήση των σκωριών ως αδρανών κυρίως στην οδοποιία εμφανίζεται ήδη από τα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα στην Ευρώπη και στις ΗΠΑ. Το μεγάλο φαινόμενο ειδικό βάρος και η εξαιρετική σκληρότητα και τραχύτητα των αδρανών είναι τα βασικά χαρακτηριστικά που οδήγησαν στη χρήση τους στην κατασκευή δρόμων μεγάλης αντοχής (για στρατιωτικούς σκοπούς). Στην Ελλάδα παρόλο που η παραγωγή σκωριών χρονολογείται από τη δεκαετία του 1960, σχετικά πρόσφατα άρχισε η εφαρμογή τους ως αδρανές οδοποιίας. Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η εφαρμογή των σκωριών ως αδρανών για την παραγωγή σκυροδέματος και ειδικότερα προϊόντων άοπλου σκυροδέματος όπως είναι οι κυβόλιθοι διάστρωσης δαπέδων πεζοδρομίων ή οι κυβόλιθοι οδοστρωσίας.

Στο πρώτο στάδιο της εργασίας έγινε η προκαταρκτική έρευνα στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών που αφορούσε τον έλεγχο καταλληλότητας των σκωριών ως αδρανών και την παραγωγή και έλεγχο συνθέσεων σκυροδέματος με αδρανή σκωρίας. Ως υλικό των σκωριοαδρανών χρησιμοποιήθηκαν τα αποκαμινεύματα της χαλυβουργίας ΣΙΔΕΝΟΡ που παρείχε διαβαθμισμένα η εταιρεία ΑΕΙΦΟΡΟΣ ΑΕ.

Στο δεύτερο στάδιο έγινε πιλοτική παραγωγή κυβολίθων με σκωριοαδρανή σε συνεργασία με την ΤΕΧΝΟΜΠΕΤΟΝ ΑΕ (7<sup>ο</sup> χλμ. Κοζάνης – Πτολεμαΐδας) που διέθεσε τη γραμμή παραγωγής και όλη την υποδομή της για το σκοπό αυτό. Οι κυβόλιθοι στη συνέχεια μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο όπου ελέγχθηκαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους. Συνολικά ένας αριθμός περίπου 250 δοκιμών υποβλήθηκε σε δοκιμασίες όπως θλίψη, εφελκυσμό από κάμψη, διάρρηξη, ανεκτικότητα σε απότριψη, υδαταπορροφητικότητα, προκειμένου να έχουμε όσο το δυνατόν αξιόπιστα αποτελέσματα.

Η εργασία αυτή έγινε το 2004-2005 στο πλαίσιο των στόχων της μη κερδοσκοπικής εταιρείας «ΕΒΙΠΑΡ» που εδρεύει στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών χωρίς καμιά χρηματοδότηση.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Στόχος της προκαταρκτικής έρευνας στο εργαστήριο ήταν ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών των αδρανών και η αναζήτηση της βέλτιστης σύνθεσης με τη μέγιστη δυνατή πυκνότητα όγκου αδρανών και την ελάχιστη ποσότητα τσιμέντου ανά m<sup>3</sup>. Χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο Ι 42.5, αδρανή σκωρίας που παρείχε η ΑΕΙΦΟΡΟΣ ΑΕ σε διαβαθμίσεις 0-4 mm, 5-12 mm, άμμος ποτάμια 0-4 mm, ρευστοποιητής της Rheobuilt της MAC BETON HELLAS.

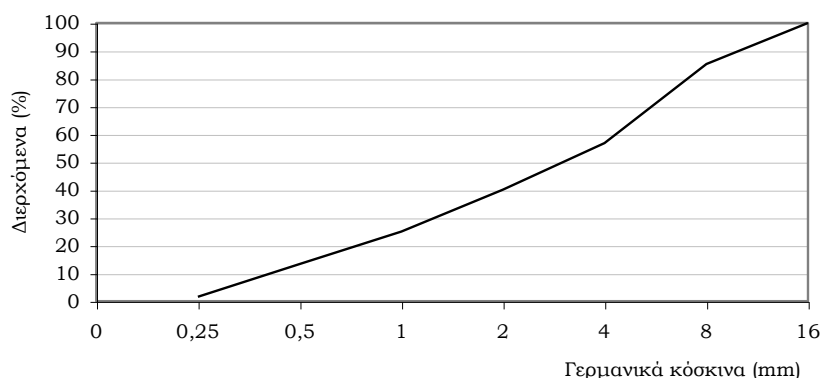
Τα χαρακτηριστικά των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν ήταν:

Φαινόμενο Ειδ. Βάρος άμμου 2.65 gr/ml - Σκωρίας 3.10 gr/ml

Υγρασία άμμου 2.7% - Σκωρίας 1.4%

Η κοκκομετρική σύνθεση των αδρανών που επιλέχθηκε αντιστοιχεί στην καμπύλη:

#### Καμπύλη προδιαγραφών



Εικόνα 1. Κοκκομετρική καμπύλη σύνθεσης εργαστηρίου Δομικών Υλικών.

Συνιστάται από 27.7% σκωρία 0-4 mm, 27.7% άμμο ποταμού 0-4 mm, και 44.6% σκωρία 5-12 mm. Τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν εμπίπτουν στις γενικές προδιαγραφές κοκκομετρικής διαβάθμισης κατά EN 12620:2002.

Οι αναλογίες σύνθεσης σκυροδέματος που δοκιμάστηκε στο εργαστήριο δίνονται παρακάτω:

Πίνακας 1. Αναλογίες σύνθεσης εργαστηριακού σκυροδέματος

Υλικό	Περιεκτικότητα στο μείγμα (kg/m <sup>3</sup> )
Τσιμέντο	270
Ρύζι σκωρίας	1023
Άμμος σκωρίας	635
Άμμος ποταμίσις	635
Ρευστοποιητής	8
Νερό	123

Ο χρόνος Vebe για τη μέτρηση εργασιμότητας ήταν 30 sec.

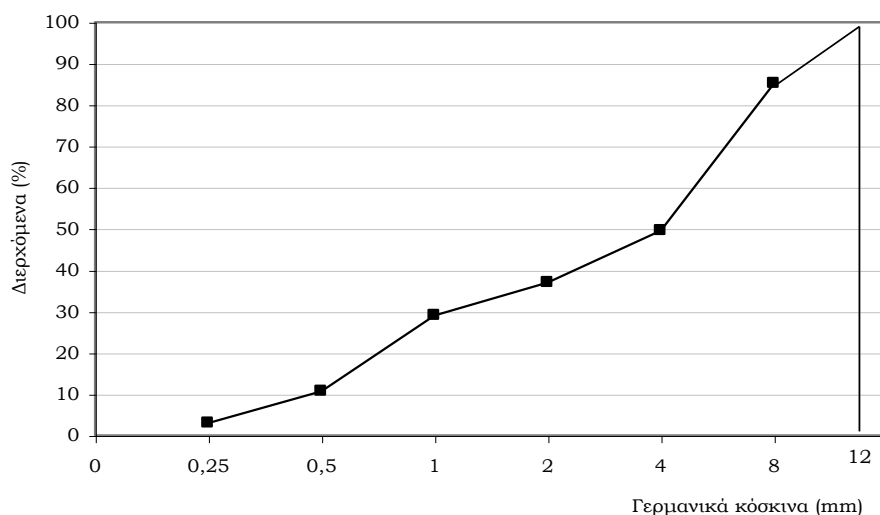
Παρήχθησαν μόνο κυβικά δοκίμια που ελέγχθηκαν σε θλίψη και διάρρηξη.

Η αντοχή σε θλίψη που επιτεύχθηκε σε 28ημ. ήταν 42 MPa και η αντοχή σε διάρρηξη κύβων (15x15x15) 3.49 MPa.

Στο δεύτερο στάδιο έγινε παραγωγή κυβολίθων με αδρανή σκωρίας στη βιομηχανική μονάδα TEXNOMPIETON AE

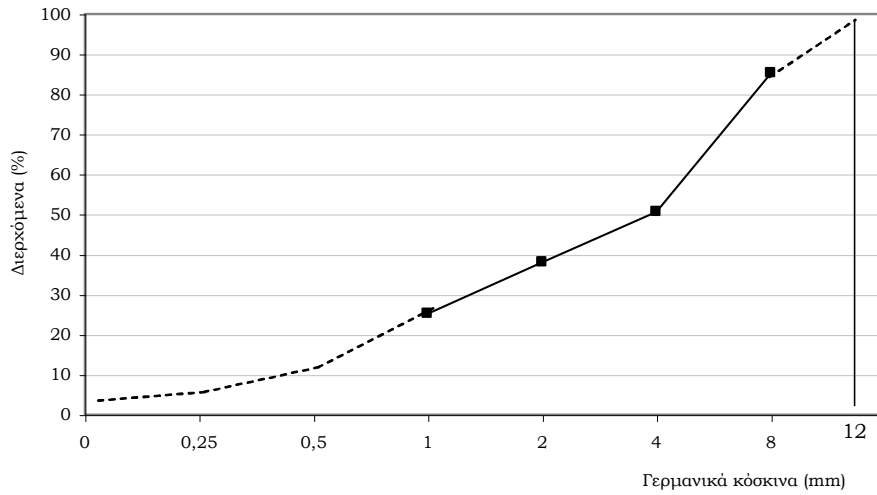
Στο εργαστήριο που διαθέτει η εταιρεία έγινε ο προσδιορισμός των υγρασιών των αδρανών και οι τροποποιήσεις των κοκκομετρικών συνθέσεων σύμφωνα με τα υπάρχοντα υλικά στη Βιομηχανική Μονάδα. Τα αδρανή σκωρίας είχαν διατεθεί από την ΑΕΙΦΟΡΟ Α.Ε. σε τέσσερα κλάσματα 0-1.5 mm, 1.5-2.5 mm, 2.5-4 mm και 5-12 mm. Διαθέσιμα υπήρχαν επίσης ασβεστολιθικά αδρανή (Αλωνάκια Κοζάνης). Μετά από τις επί μέρους κοκκομετρικές αναλύσεις προέκυψαν οι παρακάτω κοκκομετρικές συνθέσεις των αδρανών για τις συνθέσεις των κυβολίθων.

Αδρανή σκωρίας διαβάθμισης 0-1.5 mm:	228 kgr → 30%
Αδρανή σκωρίας διαβάθμισης 1.5-2.5 mm:	75.9 kgr → 10%
Αδρανή σκωρίας διαβάθμισης 2.5-4 mm:	114 kgr → 15%
Αδρανή σκωρίας διαβάθμισης 5-12 mm:	341 kgr → 45%



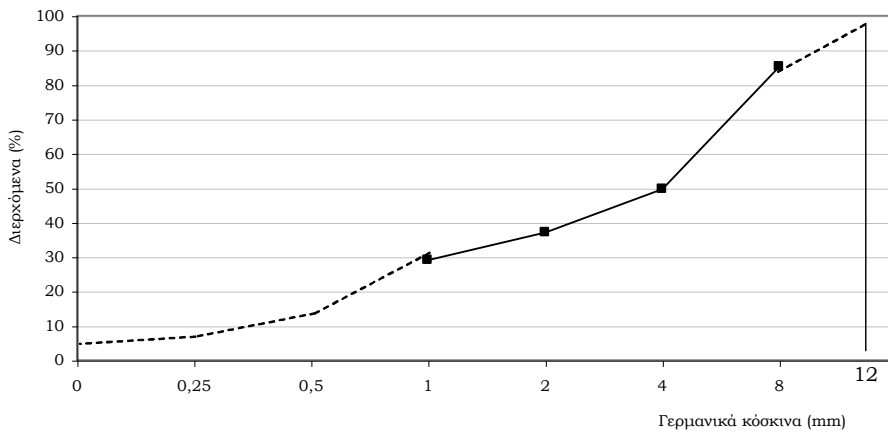
Εικόνα 2. Κοκκομετρική καμπύλη 1<sup>ης</sup> εργοστασιακής σύνθεσης

Αδρανή σκωρίας διαβάθμισης 0-1.5 mm:	190 kgr → 25%
Αδρανή σκωρίας διαβάθμισης 1.5-2.5 mm:	95 kgr → 12,5%
Αδρανή σκωρίας διαβάθμισης 2.5-4 mm:	95 kgr → 12,5%
Αδρανή σκωρίας διαβάθμισης 5-12 mm:	341 kgr → 45%
Αδρανή ασβεςτ/κής προέλευσης 0-1.5 mm:	38 kgr → 5%



Εικόνα 3. Κοκκομετρική καμπύλη 3<sup>ης</sup> εργοστασιακής σύνθεσης

- Αδρανή σκωρίας διαβάθμισης 0-1.5 mm: 107.4 kgr → 15%
- Αδρανή σκωρίας διαβάθμισης 1.5-2.5 mm: 71.6 kgr → 10%
- Αδρανή σκωρίας διαβάθμισης 2.5-4 mm: 107.4 kgr → 15%
- Αδρανή σκωρίας διαβάθμισης 5-12 mm: 322.2 kgr → 45%
- Αδρανή ασβεστολιθικής προέλευσης 0-1.5 mm: 107.4 kgr → 15%



Εικόνα 4. Κοκκομετρική καμπύλη 4<sup>ης</sup> εργοστασιακής σύνθεσης

Βάσει των τριών κοκκομετρικών καμπυλών προέκυψαν οι παρακάτω συνθέσεις

Πίνακας 2. Περιεκτικότητα υλικών στην 1<sup>η</sup> εργοστασιακή σύνθεση

Υλικό	Βάρος (kg)	Περιεκτικότητα στο μείγμα (kg/m <sup>3</sup> )
Τσιμέντο	69	230
Σκωρία 0-1.5	228	760
Σκωρία 1.5-2.5	75.9	253
Σκωρία 2.5-4	114	380
Σκωρία 5-12	341	1137
Νερό (συνολικά)	24.8	83

Πίνακας 3. Περιεκτικότητα υλικών στην 2<sup>η</sup> εργοστασιακή σύνθεση

Υλικό	Βάρος (kg)	Περιεκτικότητα στο μείγμα (kg/m <sup>3</sup> )
Τσιμέντο	25	265
Σκωρία 0-1.5	84	890
Ασβεστολιθικά 0-1.5	75	795
Σκωρία 1.5-2.5	67.2	710
Νερό (συνολικά)	9.4	100

Πίνακας 4. Περιεκτικότητα υλικών στην 3<sup>η</sup> εργοστασιακή σύνθεση

Υλικό	Βάρος (kg)	Περιεκτικότητα στο μείγμα (kg/m <sup>3</sup> )
Τσιμέντο	69.0	230
Σκωρία 0-1.5	190.0	633
Σκωρία 1.5-2.5	95.0	317
Σκωρία 2.5-4	95.0	317
Σκωρία 5-12	341.0	1137
Ασβεστολιθικά 0-1.5	38.0	127
Νερό (συνολικά)	24.8	83

Πίνακας 5. Περιεκτικότητα υλικών στην 4<sup>η</sup> εργοστασιακή σύνθεση

Υλικό	Βάρος (kg)	Περιεκτικότητα στο μείγμα (kg/m <sup>3</sup> )
Τσιμέντο	90.0	300
Σκωρία 0-1.5	107.4	358
Σκωρία 1.5-2.5	71.6	239
Σκωρία 2.5-4	107.4	358
Σκωρία 5-12	322.2	1074
Ασβεστολιθικά 0-1.5	107.4	358
Νερό (συνολικά)	32.4	108

Επιπλέον για λόγους σύγκρισης ελέγχθηκαν κυβόλιθοι με συμβατικά ασβεστολιθικά αδρανή οι οποίοι παρήχθησαν από την παρακάτω σύνθεση.

Πίνακας 6. Περιεκτικότητα υλικών στους κυβόλιθους που παράγονται χωρίς χρήση σκωρίας

Υλικό	Βάρος (kg)	Περιεκτικότητα στο μείγμα (kg/m <sup>3</sup> )
Τσιμέντο	144.0	229
Ασβεστολιθικά 0-4 mm	1440.0	2286
Νερό (συνολικά)	52.0	83

Σημειώνεται επίσης ότι οι κυβόλιθοι που έχουν κωδικό 2 έχουν παραχθεί με διπλή στρώση. Η κάτω στρώση αποτελείται από τη σύνθεση 1 και η άνω στρώση από τη σύνθεση 2.

#### ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Χρησιμοποιήθηκε το αυτοματοποιημένο σύστημα παραγωγής της μονάδας



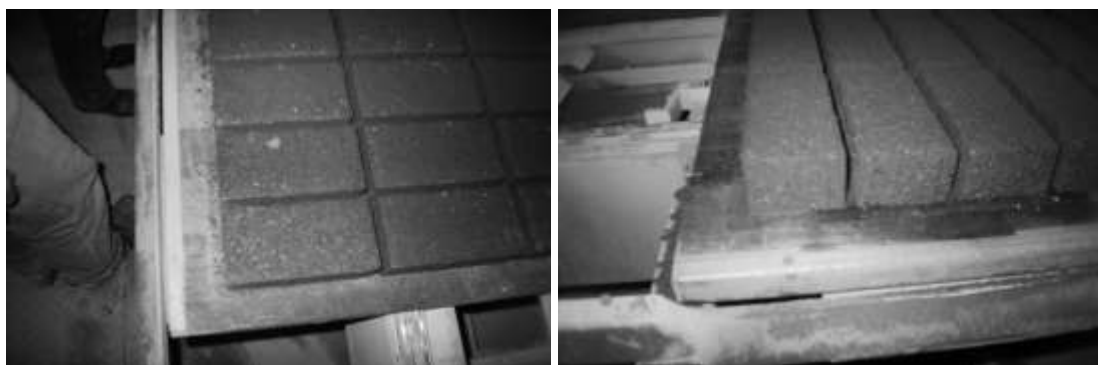
Εικόνα 5. Μηχανοποιημένο σύστημα παραγωγής Εικόνα 6. Σύστημα μορφοποίησης κυβολίθων



Και στη συνέχεια η εξαγωγή των κυβολίθων πάνω στις παλέτες και η αποθήκευση για ωρίμανση



Εικόνα 7. Στάδιο εξαγωγής κυβολίθων



Εικόνες 8, 9. Όψη κυβολίθων μονής στρώσης αμέσως μετά την παραγωγή

## ΕΛΕΓΧΟΙ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι κυβόλιθοι ελέγχθηκαν σε θλίψη κατά EN (12390-3):



Εικόνα 10. Δοκιμή θλίψης σε κυβόλιθο οδοστρώσας

Σε διάρρηξη κατά (EN1338):

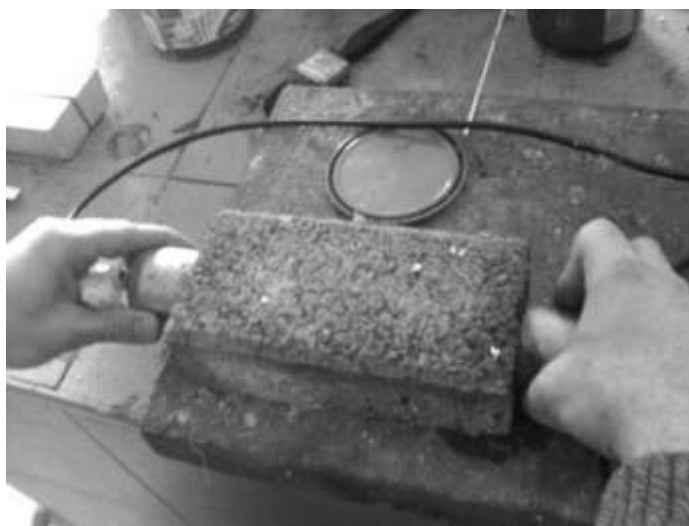


Εικόνα 11. Διάρρηξη κυβολίθων



Εικόνα 12. Δοκιμή κάμψης σε κυβόλιθο

Σε όλους τους κυβόλιθους εφαρμόστηκε σονομέτρηση:



Εικόνα 13. Διαδικασία Σονομέτρησης

Πραγματοποιήθηκε επίσης έλεγχος σε απότριψη (ASTM C779):



Εικόνα 14. Μηχανή απότριψης εν ώρα λειτουργίας



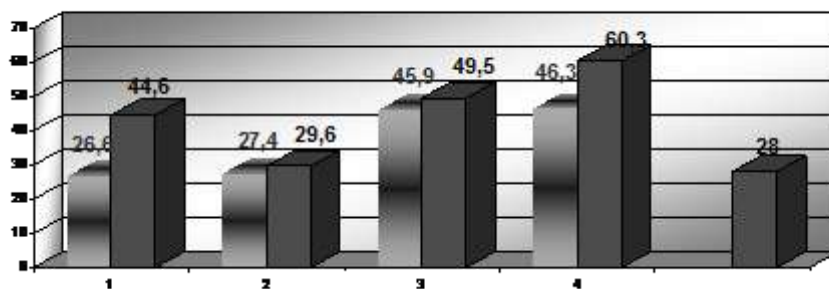
Εικόνα 15. Δοκίμιο μετά από δοκιμή απότριψης



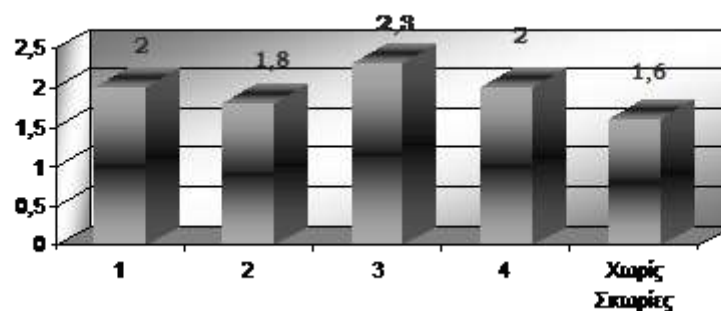
Εικόνα 16. Μέτρηση φθοράς

Και έλεγχος υδατοαπορροφητικότητας κατά EN1338.

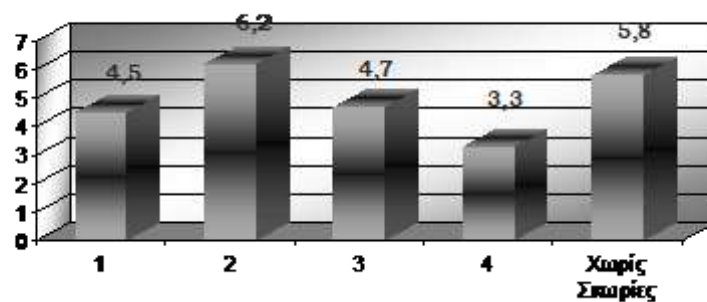
Οι μέσοι όροι των αποτελεσμάτων θραύσης των κυβολίθων δίνονται στα παρακάτω ιστογράμματα.



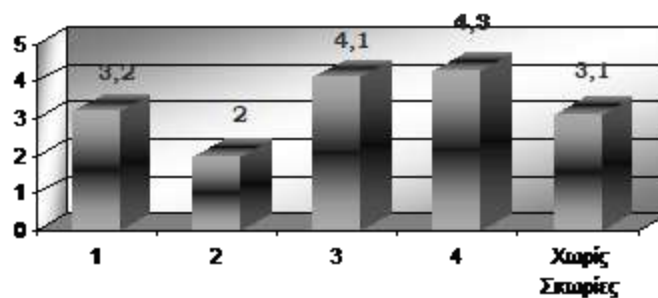
Εικόνα 17. Θλιπτική αντοχή 7 και 28 ημερών ορθογωνικών δοκιμίων



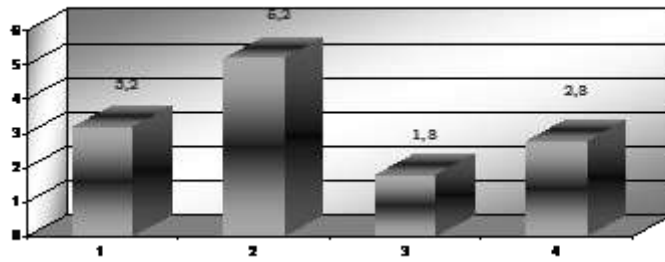
Εικόνα 18. Αντοχή σε διάρρηξη



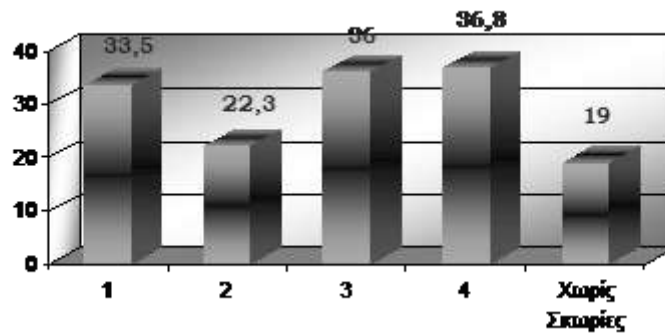
Εικόνα 19. Ποσοστό % της αντοχής σε διάρρηξη προς τη θλιπτική αντοχή



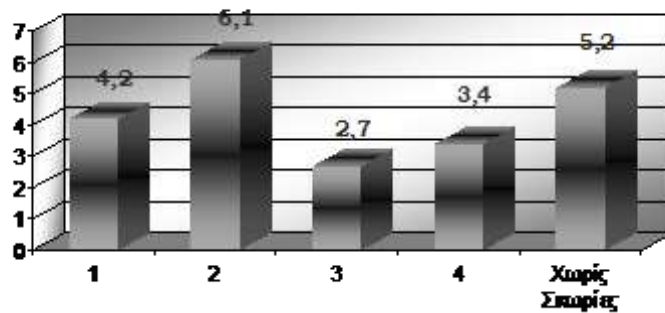
Εικόνα 20. Αντοχή σε κάμψη



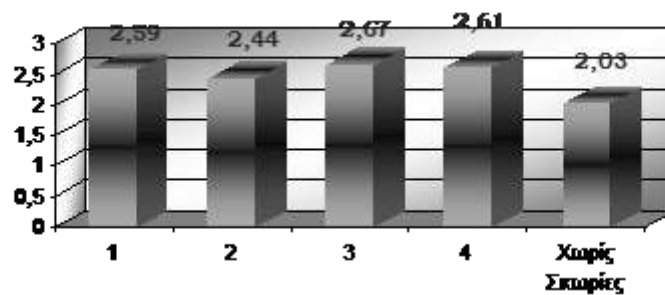
Εικόνα 21. Μέσο βάθος αλάκωσης (mm)



Εικόνα 22. Δυναμικό Μέτρο Ελαστικότητας



Εικόνα 23. Ποσοστό νερού που απορροφάται από τα δοκίμια



Εικόνα 24. Ειδικό βάρος (gr/cm³)

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Για τη παραγωγή κυβολίθων στη βιομηχανική μονάδα τροποποιήθηκαν οι συνθέσεις σκυροδέματος που ήδη χρησιμοποιούνταν στη παραγωγή κυρίως ως προς τα αδρανή. Δεν έγινε νέος σχεδιασμός συνθέσεως σκυροδέματος για την επίτευξη των απαιτήσεων σύμφωνα με τους υπάρχοντες κανονισμούς για κυβόλιθους οδοστρωσίας

Ο στόχος ήταν να γίνει η σύγκριση με τους ήδη διατιθέμενους στην αγορά κυβολίθους πεζοδρόμησης ώστε να μπορεί να μπει στην κατανάλωση ως αδρανές η σκωρία με του ίδιου επιπέδου κοστολόγιο παραγωγής.

Στη δοκιμαστική προκαταρκτική σύνθεση που έγινε στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών φάνηκε ότι είναι δυνατόν να επιτευχθούν υψηλά επίπεδα αντοχής με σχετικά χαμηλό ποσοστό τσιμέντου ( $270\text{kg/m}^3$ )

Σύμφωνα με τον ευρωπαϊκό κανονισμό EN-1338 για κυβόλιθους οδοστρωσίας σε συνδυασμό με τον Αμερικάνικο TS-2824 ορίζονται: μέγιστα μεγέθη διαστάσεων  $240 \times 160 \times 140\text{ mm}$

Αντοχή σε θλίψη: 50 MPa

Αντοχή σε διάρρηξη: 2,9 MPa

Υδατοαπορροφητικότητα < 6%

Αντοχή σε απότριψη: 6mm βάθος αυλάκωσης

Είναι προφανές ότι δεν έχει γίνει σχεδιασμός για αυτά τα επίπεδα αντοχής εφόσον οι ήδη παραγόμενοι κυβόλιθοι δεν προορίζονται για οδοστρωσία αλλά για πεζοδρόμηση.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων κυβολίθων με αδρανή ασβεστολιθικά και αδρανή σκωρίας προκύπτει ότι :

- Οι κυβόλιθοι με αδρανή σκωρίας παρουσιάζουν αισθητά υψηλότερη αντοχή σε διάρρηξη που είναι καθοριστικό μέγεθος για τους κυβόλιθους.
- Οι υψηλότερες αντοχές που προκύπτουν παρουσιάζονται στους κυβόλιθους με αδρανή σκωρίας με τσιμέντο  $300\text{ kg/m}^3$ .
- Οι κυβόλιθοι της σύνθεσης με αδρανή σκωρίας και τσιμέντο  $230\text{ kg/m}^3$  παρουσιάζουν αντοχή 50 MPa, υψηλότερη των αντιστοίχων με ασβεστολιθικά αδρανή
- Η υδατοαπορροφητικότητα είναι χαμηλή, του ίδιου επιπέδου με τους κυβόλιθους με αδρανή ασβεστολιθικά
- Στην απότριψη καλύτερη συμπεριφορά παρουσιάζουν οι κυβόλιθοι του αναμίγματος με ποσό τσιμέντου  $230\text{ kg/m}^3$

Κρίνεται σκόπιμο ότι περαιτέρω έλεγχοι ανθεκτικότητας απαιτούνται για την πλήρη τεκμηρίωση της χρήσης των σκωριών ως αδρανών στους κυβολίθους

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το Εργαστήριο Δομικών Υλικών ευχαριστεί τις βιομηχανίες ΑΕΙΦΟΡΟ Α.Ε. και ΤΕΧΝΟΜΠΕΤΟΝ για την άριστη συνεργασία και την συνεισφορά τους στην έρευνα για αυτή την εφαρμογή.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Αναστασίου Ε. - Παπαδόπουλος Λ., ‘Έλεγχος καταλληλότητας σκωριών (αποκαμινευμάτων χαλυβουργίας) για την παραγωγή σκυροδέματος (RCC) ειδικών εφαρμογών’ Διπλωματική εργασία Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη 2000.
2. Beshr H.-Almusallam A.A., ‘Effect of coarse aggregates quality on the mechanical properties of high strength concrete’, Construction and Building Materials, Volume 16, 2002, pp. 281-289.
3. Freidin K.-Erell E., ‘Bricks made of slag, cured in the open air’, Cement and Concrete Composites, Volume 17, 1995, pp.289-300.
4. Mehta Kumar P., ‘Concrete Technology for Sustainable Development’ Procc. of International Symposium on Concrete Technology for Sustainable Development, Editor: P.K. Mehta, New Delhi, 1999
5. Moltz H.-Geiseler J., ‘Products of steel slags an opportunity to save natural resources’ , Waste Management, Volume 21, 2001, pp.285-293
6. Papayianni I.-Anastasiou E., ‘Concrete incorporating high volumes of industrial by-products’.