

## ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΚΥΚΛΟΥΣ ΨΥΞΗΣ- ΑΠΟΨΥΞΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ ΚΑΙ ΟΙΚΟΔΟΜΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ

Γ. Βαρδάκα<sup>1</sup>, Χ. Μπαϊράμης<sup>1</sup>, Χ. Λεπτοκαρίδης<sup>2</sup>, Σ. Τσίμας<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, Ηρώων  
Πολυτεχνείου 9, 157 73 Ζωγράφου Αθήνα.

<sup>2</sup>Εργαστήριο Τεχνολογίας Σκυροδέματος Ομίλου TITAN

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το διαπερατό σκυρόδεμα κυρίως χρησιμοποιείται ως ένα εναλλακτικό αντιπλημμυρικό μέτρο προστασίας με πρωτεύον χαρακτηριστικό το υψηλό του πορώδες, το οποίο επιτρέπει στο νερό της βροχής να διέρχεται μέσα από τη μάζα του. Στην παρούσα εργασία μελετάται η συμπεριφορά διαπερατού σκυροδέματος σε έντονες θερμοκρασιακές αλλαγές- συνθήκες ψύξης/απόψυξης. Οι συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος που μελετώνται περιέχουν τρία διαφορετικά είδη αδρανών (ασβεστολιθικά αδρανή, οικοδομικά απόβλητα και σκωρία χάλυβα) σε διάφορα ποσοστά συμμετοχής. Οι μεταβολές των ιδιοτήτων των παραγόμενων δοκιμίων αξιολογούνται μετά από συνεχείς κύκλους ψύξης-απόψυξης.

Λέξεις κλειδιά: διαπερατό σκυρόδεμα, πορώδες, ψύξη-απόψυξη, οικοδομικά απόβλητα, σκωρία χάλυβα



Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) - Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος II . Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.

## STUDY OF THE DURABILITY OF PERVIOUS CONCRETE WITH BY-PRODUCTS AND C&D WASTES IN FREEZE AND THAW CYCLES

G.Vardaka<sup>1</sup>, C. Bairamis<sup>1</sup>, C. Leptokaridis<sup>2</sup> and S.Tsimas<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Inorganic and Analytical Chemistry, School of Chemical Engineers NTUA, 9  
Iroon Polytechniou str. 157 73 Athens

<sup>2</sup>Concrete Technology Laboratory TITAN Cement Company

### ABSTRACT

Pervious concrete is mainly used as an alternative flood protection measure. Its main characteristic lies on its high porosity, which allows rainwater to pass through its mass. This paper is focusing on the study of the effect caused to pervious concrete samples by the intense temperature changes- freeze/thaw conditions. The compositions of pervious concrete, which are studied, contain three different types of aggregates (limestone aggregates, construction and demolition wastes and steel slag) at different percentage of participation. The changes in the properties of the produced samples are evaluated after their continuous cycles of freeze and thaw.

Key words: pervious concrete, porosity, freeze-thaw, C&D Wastes, steel slag



This research has been co-financed by the European Union (European Social Fund – ESF) and Greek national funds through the Operational Program "Education and Lifelong Learning" of the National Strategic Reference Framework (NSRF) - Research Funding Program: Heracleitus II. Investing in knowledge society through the European Social Fund.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τάση που επικρατεί στις σύγχρονες ερευνητικές προσπάθειες έχει ως κεντρικό άξονα την προστασία του περιβάλλοντος και ταυτόχρονα την αντιμετώπιση των προβλημάτων που έχουν προκύψει από την ανθρώπινη δραστηριότητα. Αυτό διαφαίνεται έντονα από την στροφή των ερευνών, ακόμα και της βιομηχανίας σκυροδέματος, στην ανάπτυξη συστημάτων ορθολογικότερης διαχείρισης των όμβριων υδάτων. Η αρχή των προσπαθειών αυτών εντοπίζεται την τελευταία δεκαετία στις ΗΠΑ με τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη του διαπερατού σκυροδέματος (perVIOUS concrete), ενός νέου τύπου προϊόντος το οποίο έχει μεγάλο πορώδες και επιτρέπει στο νερό της βροχής να διέρχεται μέσα από τη μάζα του. Ελάχιστες είναι οι αναφορές του συγκεκριμένου προϊόντος στην Ευρώπη.

Η βασική πρόκληση για την βιομηχανία σκυροδέματος είναι ότι καλείται να σχεδιάσει και να συνθέσει ένα κατ' εξοχή πορώδες υλικό που να είναι υδατοπερατό σε αντίθεση με το μέχρι τώρα βασικό θέσφατο του χώρου που στόχευε στην μείωση της υδατοπερατότητας μέσω του δραστικού περιορισμού των πόρων που διευκολύνουν την διόδο επιβλαβών για το σκυρόδεμα συστατικών τα οποία δυνητικά θα αποτελέσουν απαρχή διάβρωσης. (Βαρδάκα Γ. 2009)

Το διαπερατό σκυρόδεμα είναι ουσιαστικά ένα μακροπορώδες σκυρόδεμα με συνεχή κενά, τα οποία ενσωματώνονται σκοπίμως στο σκυρόδεμα. Ο σχεδιασμός του με τη χρήση ελάχιστης ποσότητας τσιμεντόπαστας για την επικάλυψη των χονδρόκοκκων αδρανών, διευκολύνει τη διαμόρφωση αυτού του διασυνδεδεμένου δικτύου πόρων στο υλικό, γεγονός που επιτρέπει τη διέλευση του νερού σε πολύ υψηλότερο ποσοστό από ότι στα συμβατικά σκυροδέματα. (Vardaka G., Thomaidis K., Leptokaridis C. and Tsimas S., 2011)

Το διαπερατό σκυρόδεμα ανήκει σε μια εντελώς διαφορετική κατηγορία από τα συμβατικά σκυροδέματα και ως εκ τούτου, τα φυσικά χαρακτηριστικά του διαφέρουν σημαντικά από εκείνα των γνωστών σκυροδεμάτων. Συνίσταται από τσιμέντο Πόρτλαντ, χονδρόκοκκα αδρανή, λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα αδρανή, πρόσμικτα και νερό, η βέλτιστη αναλογία των οποίων διερευνάται ανάλογα με την φύση των αδρανών που χρησιμοποιούνται και τις επιμέρους απαιτήσεις εφαρμογής του σκυροδέματος. Τελικώς ο συνδυασμός αυτών των συστατικών οδηγεί στην παραγωγή ενός σκληρυμένου προϊόντος με πόρους που συνδέονται μεταξύ τους και κυμαίνονται σε μέγεθος από 2 έως 8 mm, γεγονός που επιτρέπει στο νερό να διαπερνά εύκολα το σκυρόδεμα. Οι κενοί χώροι του κυμαίνονται μεταξύ 18 και 35% και οι τυπικές θλιπτικές αντοχές που επιτυγχάνονται είναι της τάξης του 2,8 έως 28 MPa. Το διαπερατό σκυρόδεμα είναι ένας τύπος σκυροδέματος όπου το πορώδες δε βρίσκεται στα αδρανή (σε αντίθεση με τα ελαφρο-σκυροδέματα ) αλλά μέσα στον ίδιο τον ιστό του σκυροδέματος. Ο όρος «διαπερατό σκυρόδεμα» περιγράφει ένα σκυρόδεμα «ανοικτού τύπου» και μηδενικής κάθισης. Το ποσοστό αποστράγγισης ενός πεζοδρομίου που έχει κατασκευασθεί με διαπερατό σκυρόδεμα ποικίλλει ανάλογα με το μέγεθος των αδρανών και την πυκνότητα του μείγματος, αλλά γενικά θα κυμαίνεται από 81 έως 730 L/min/m<sup>2</sup>. (ACI Committee 2008) (Liv Haselbach and Robert Freeman 2006) (Dale P. Bentz, 2008) (Βαρδάκα Γ. 2009).

Αν και, όπως είναι προφανές, το υψηλό πορώδες του διαπερατού σκυροδέματος, το οδηγεί αναπόφευκτα σε μειωμένες αντοχές, εν τούτοις βρίσκει μεγάλο όγκο ειδικών εφαρμογών όπως: σε χώρους στάθμευσης, στις υπαίθριες πλατείες των εμπορικών κέντρων ως άκαμπτα στρώματα αποστράγγισης, στα δάπεδα των θερμοκηπίων προκειμένου να παραμείνουν αυτά στεγνά από στάσιμα νερά, σε ελαφροβαρείς δομικούς τοίχους με απαίτηση καλύτερης θερμομόνωσης, σε πεζοδρόμια, τοίχους, δάπεδα και όπου είναι επιθυμητή καλύτερη ηχομόνωση, ως βάση τόσο για τους αστικούς όσο και για τους επαρχιακούς δρόμους όπως επίσης στις εθνικές οδούς, και στα αεροδρόμια, ως επιφανειακό στρώμα χώρων στάθμευσης, γηπέδων τένις, δαπέδων ζωολογικών κήπων και στάβλων, σε αναχώματα γεφυρών, σε χώρους απόθεσης της λάσπης στις μονάδες επεξεργασίας λυμάτων, σε συστήματα

αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας και για την επένδυση τοιχωμάτων φρεάτων γεωτρήσεων. Συνήθως το διαπερατό σκυρόδεμα, λόγω του υψηλού κινδύνου διάβρωσης του οπλισμού του χάλυβα μέσω των ανοιχτών πόρων στη δομή του χρησιμοποιείται σε όλες αυτές τις εφαρμογές που απαιτούν μη οπλισμένο σκυρόδεμα. (ACI Committee 2006, ACI Committee 2008).

## ΠΡΩΤΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ-ΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ

Στην παρούσα εργασία μελετώνται συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος που περιέχουν τρία διαφορετικά είδη αδρανών (ασβεστολιθικά αδρανή, οικοδομικά απόβλητα και σκωρία χάλυβα) σε διάφορα ποσοστά συμμετοχής. Η υποκατάσταση των φυσικών αδρανών με οικοδομικά απόβλητα και με σκωρία χάλυβα έχει ως στόχους αφενός τη διαχείριση και επαναχρησιμοποίηση των τεράστιων ποσοτήτων αυτών των υλικών που συσσωρεύονται κάθε χρόνο αφετέρου τη μείωση των εξορυσσόμενων φυσικών πρώτων υλών και την προστασία του φυσικού τοπίου. Πλούσιο ερευνητικό έργο έχει σημειωθεί αναφορικά με την αξιοποίηση των οικοδομικών αποβλήτων όσο και της σκωρίας ως αδρανών υλικών για την παραγωγή νέου συμβατικού σκυροδέματος.

Το χαρακτηριστικό που εμφανίζουν τα οικοδομικά ως προς τη συγκεκριμένη μορφή αξιοποίησής τους, είναι το υψηλό πορώδες τους το οποίο, για την παραγωγή ενός συμβατικού τύπου σκυροδέματος, αποτελεί μειονέκτημα, όμως για την παραγωγή του διαπερατού σκυροδέματος αποτελεί τη βασικότερη επιθυμητή ιδιότητα. Το υψηλό πορώδες των ανακυκλωμένων αδρανών υλικών (οικοδομικά απόβλητα) κυμαίνεται στην περιοχή του 3-12%, τη στιγμή που το αντίστοιχο εύρος για τα φυσικά αδρανή υλικά είναι 0.5-1%. (Katz A., 2003) (Ryu J.S., 2002a) (Ryu J.S., 2002b), (Gocke A., Nagataki A., Saeki T. and Hisada M., 2004) Ο λόγος αυτής της διαφοροποίησης αποδίδεται στην διεπιφάνεια που υπάρχει μεταξύ των ανακυκλωμένων αδρανών και της προσκολλημένης παλιάς τσιμεντοκονίας. Η τσιμεντόπαστα που παραμένει στην διεπιφάνεια των ανακυκλωμένων αδρανών δίνει αδύνατα σημεία στα ανακυκλωμένα σκυροδέματα, αφού αποτελείται από πολύ μικρούς πόρους και ρωγμές, οι οποίοι απορροφούν νερό. Στο υψηλό πορώδες των ανακυκλωμένων αδρανών συνεισφέρει και η ενανθράκωση που έχει υποστεί η τσιμεντόπαστα με την πάροδο του χρόνου. (Tam V.W.Y., Gao X.F. and Tam C.M., 2005) (Otsuki N, Miyazato S. and Yodsudjai W., 2003), (Zaharieva R., Francois B.-B. and Eric W., 2004). Δεν υπάρχουν αναφορές για χρήση των οικοδομικών αποβλήτων σε διαπερατά σκυροδέματα, ούτε καν στην Αμερική που το συγκεκριμένο προϊόν παράγεται την τελευταία δεκαετία.

Επίσης έρευνες έχουν καταδείξει τη ικανοποιητική δυνατότητα αντικατάστασης των φυσικών ασβεστολιθικών αδρανών με χρήση σκωρίας χάλυβα, στη σύνθεση σκυροδεμάτων υψηλής ποιότητας, με ίδια ή και ακόμη καλύτερα αποτελέσματα τελικών επιθυμητών ιδιοτήτων. Μάλιστα όταν πρόκειται για την παραγωγή αόπλου σκυροδέματος η χρήση της σκωρίας οδηγεί στην αύξηση των τελικών αντοχών του συγκεκριμένου σκυροδέματος. Παρά ταύτα η χρήση σκωρίας εμφανίζει κάποιες ιδιαιτερότητες όπως: α) Το ειδικό βάρος των σκυροδεμάτων που παράγονται με τη χρήση σκωρίας χάλυβα είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των σκυροδεμάτων με χρήση ασβεστολιθικών αδρανών, γεγονός που οφείλεται στο αυξημένο ειδικό βάρος της σκωρίας σε σχέση με αυτό των φυσικών αδρανών. β) Η εργασιμότητα του μίγματος με τα αδρανή σκωρίας είναι δυσκολότερη σε σχέση με τα “τυπικά” σκυροδέματα, για ίδιου διαμέτρου αδρανή, καθότι η σκωρία είναι από τη φύση της πιο σκληρό υλικό. Το γεγονός αυτό μπορεί να μειωθεί αισθητά με την υποκατάσταση μέρους των αδρανών της σκωρίας με ασβεστολιθικά. γ) Το υψηλό πορώδες της σκωρίας τη στιγμή που τα φυσικά αδρανή έχουν πολύ μικρότερο. (Vardaka G., Thomaidis K., Leptokaridis C. and Tsimas S., 2011)

Στις παραγόμενες συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος μελετάται η ανθεκτικότητα σε έντονες θερμοκρασιακές αλλαγές- συνθήκες ψύξης/απόψυξης. Οι μεταβολές των ιδιοτήτων των παραγόμενων δοκιμίων αξιολογούνται κατά την πορεία των κύκλων ψύξης-απόψυξης.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ-ΑΠΟΤΕΣΜΑΤΑ

Κρίνεται σκόπιμο πριν την παράθεση των αποτελεσμάτων από τη μελέτη ψύξης-απόψυξης να προταθούν στοιχεία που αναφέρονται τόσο στο χαρακτηρισμό των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν όσο και στα μηχανικά χαρακτηριστικά των υπό εξέταση συνθέσεων.

### Χημική Ανάλυση Α' Υλών

Για την παρασκευή των συνθέσεων του διαπερατού σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά είδη αδρανών (ασβεστολιθικά αδρανή, οικοδομικά απόβλητα και σκωρία χάλυβα). Η χημική τους ανάλυση φαίνεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1 Χημική Ανάλυση Αδρανών

Χημική Ένωση	Ασβεστολιθικά Αδρανή	Οικοδομικά Απόβλητα	Σκωρία Χάλυβα
CaO	52,8	44,7	36,58
SiO <sub>2</sub>	1,16	20,1	12,75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,67	4,72	38,48
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,33	1,79	29,56
SO <sub>3</sub>	<0,01	0,04	0,29
MgO	0,89	0,69	2,4
K <sub>2</sub> O	<0,01	0,5	0,02
Na <sub>2</sub> O	0	0,4	0,10
Cl <sup>-</sup>	<0,01	0,18	0,01
TiO <sub>2</sub>	<0,01	0,26	0,39
LOI	43,93	26,23	-

Σύμφωνα με τη χημική ανάλυση τα παραπάνω υλικά ικανοποιούν τις προδιαγραφές του προτύπου EN12620 και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αδρανή.

### Ποροσιμετρία N<sub>2</sub> Αδρανών

Στον Πίνακα 2 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μετρήσεις ποροσιμετρίας N<sub>2</sub> των αδρανών με χρήση της συσκευής NOVA 2200e.

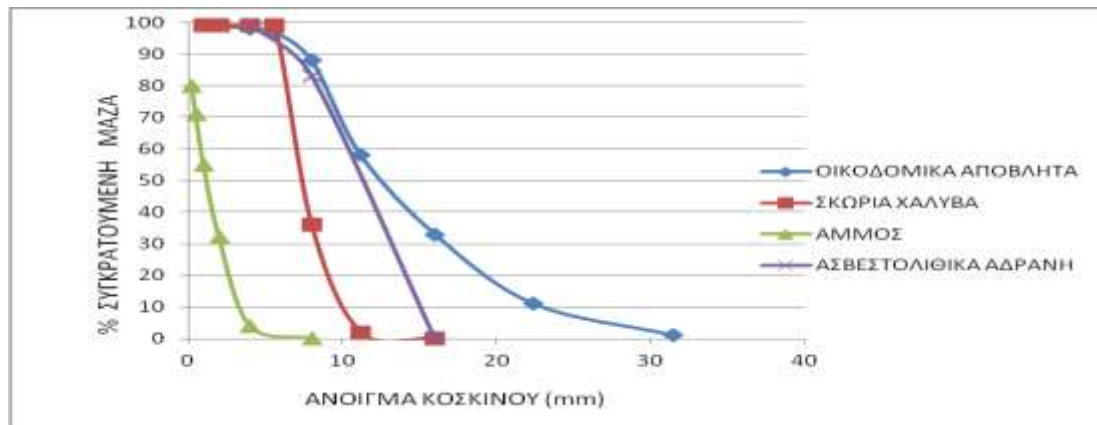
Πίνακας 2 Ειδική επιφάνεια και μέγεθος πόρων

	Ασβεστολιθικά Αδρανή	Οικοδομικά Απόβλητα	Σκωρία Χάλυβα
Ειδική Επιφάνεια S <sub>BET</sub> (m <sup>2</sup> /g)	0,406	4,850	0,724
Όγκος Πόρων V <sub>p</sub> (cm <sup>3</sup> /g)	0,001	0,013	0,003

Από τον Πίνακα 2 φαίνεται ότι τόσο τα οικοδομικά απόβλητα όσο και η σκωρία χάλυβα εμφανίζουν υψηλότερο πορώδες σε σχέση με τα συμβατικά ασβεστολιθικά αδρανή. Συγκεκριμένα τα οικοδομικά απόβλητα έχουν τον 13πλάσιο όγκο πόρων σε σχέση με τα ασβεστολιθικά ενώ αντίστοιχα η σκωρία εμφανίζει 3πλάσιο όγκο.

## Κοκκομετρική Κατανομή Αδρανών

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται οι καμπύλες της κοκκομετρικής κατανομή των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των συνθέσεων.



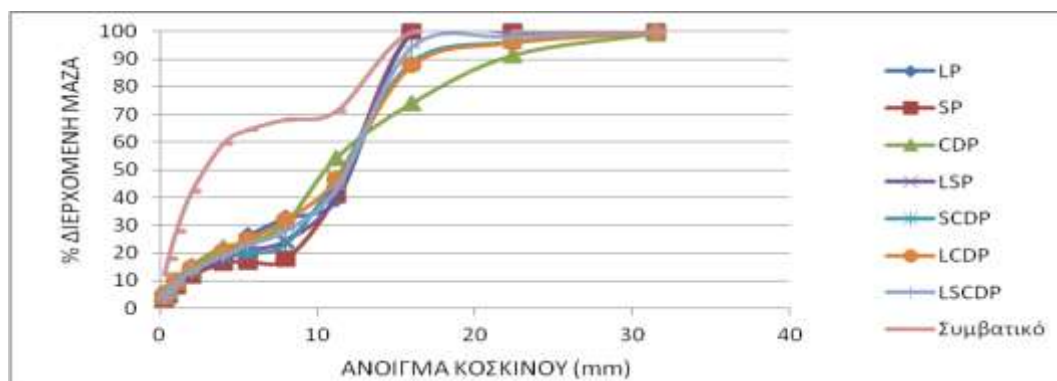
Σχήμα 1 Κοκκομετρική κατανομή αδρανών

## Συνθέσεις

Για την παρασκευή των συνθέσεων χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου CEMII 42,5 και ασβεστολιθική άμμος σε σταθερές ποσότητες ( τσιμέντο:  $171 \text{ kg/m}^3$  και άμμος:  $315 \text{ kg/m}^3$ ). Πιο συγκεκριμένα παρασκευάστηκαν επτά τελικές συνθέσεις: Η πρώτη αποτελούνταν από 100% ασβεστολιθικά αδρανή με w/c: 0,47 (LP: Limestone Pervious). Η δεύτερη αποτελούνταν από 100% σκωρία χάλυβα με w/c: 0,58 (SP: Steel slag Pervious). Η τρίτη αποτελούνταν από 100% οικοδομικά απόβλητα με w/c: 0,41 (CDP\*: Construction & Demolition Pervious). Η τέταρτη είχε 50% ασβεστολιθικά αδρανή και 50% σκωρία χάλυβα με w/c: 0,53 (LSP: Limestone and Steel slag Pervious). Η πέμπτη είχε 50% σκωρία χάλυβα and 50% οικοδομικά απόβλητα με w/c: 0,65 (SCDP\*: Steel slag and Construction and Demolition Pervious). Η έκτη είχε 50% ασβεστολιθικά αδρανή και 50% οικοδομικά απόβλητα με w/c: 0,44 (LCDP\*: Limestone and Construction & Demolition Pervious). Ενώ τέλος η έβδομη και τελευταία σύνθεση περιείχε και τα τρία διαφορετικά αδρανή στα ακόλουθα ποσοστά συμμετοχής: 50% ασβεστολιθικά, 25% σκωρία and 25% οικοδομικά απόβλητα με w/c: 0,56 (LSCDP\*: Limestone, Steel slag and Construction and Demolition Pervious). Για την σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων παρασκευάστηκε και μια σύνθεση σκυροδέματος συμβατικού τύπου με τσιμέντο CEM II 42,5:  $200 \text{ kg/m}^3$ , w/c: 1,09 και η οποία αποτελούνταν από 100% ασβεστολιθικά αδρανή.

Το Σχήμα 2 παρουσιάζει τις κοκκομετρικές κατανομές των συνθέσεων.

\* Τα οικοδομικά απόβλητα χρησιμοποιήθηκαν αφού είχαν διαβρεχτεί με νερό



Σχήμα 2 Κοκκομετρικές κατανομές συνθέσεων

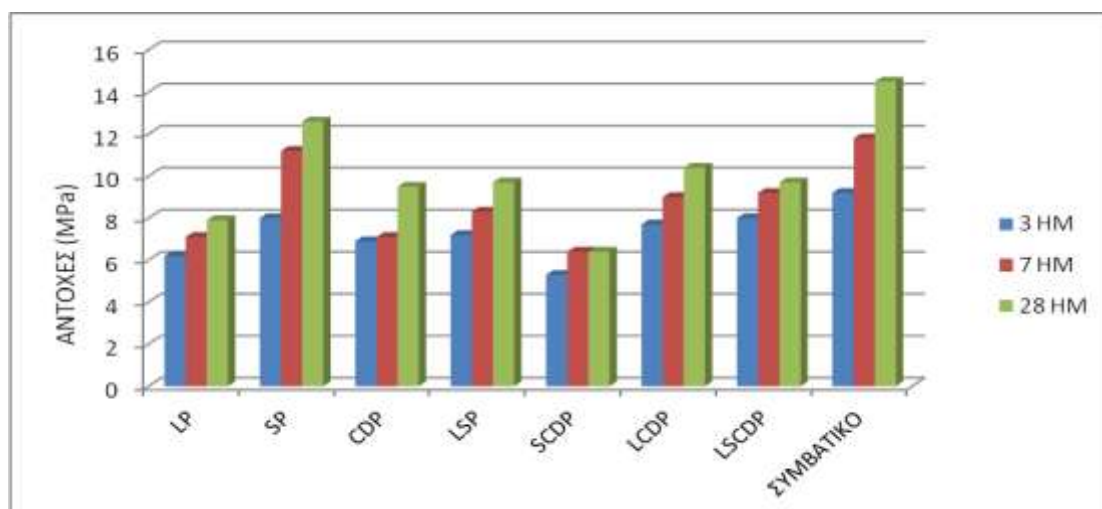
## Φυσικομηχανικά Χαρακτηριστικά Συνθέσεων

### Αντοχές σε θλίψη

Τα παραγόμενα δοκίμια εξετάστηκαν για μέτρηση της αντοχής τους σε θλίψη σύμφωνα με το EN12390 και οι μετρήσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 3 και στο Σχήμα 3.

Πίνακας 3 Αντοχές σε θλίψη (MPa)

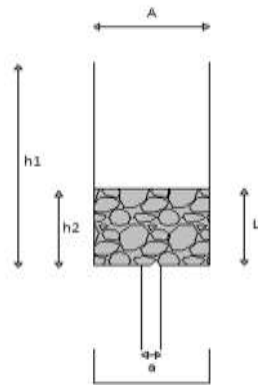
	LP	SP	CDP	LSP	SCDP	LCDP	LSCDP	ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ
3 HM	6,2	8	6,9	7,2	5,3	7,7	8	9,2
7 HM	7,1	11,2	7,1	8,3	6,4	9	9,2	11,8
28 HM	7,9	12,6	9,5	9,7	6,4	10,4	9,7	14,5



Σχήμα 3 Αντοχές σε θλίψη (MPa)

### Υδατοπερατότητα

Η υδατοπερατότητα, ως η μοναδική ιδιότητα του νερού να διεισδύει μέσα το διαπερατό σκυρόδεμα, εκφράστηκε σε εκατοστά ανά δευτερόλεπτο (cm/s). Γενικά το διαπερατό σκυρόδεμα διαθέτει πολύ υψηλές τιμές υδατοπερατότητας σε σύγκριση με τα συμβατικού τύπου-αδιαπέρατα σκυροδέματα. Για αυτόν τον λόγο και η μέθοδος δοκιμών υδατοπερατότητας για τα συμβατικού τύπου σκυροδέματα κατά EN12390-8 δεν είναι κατάλληλη για τον έλεγχο διαπερατού σκυροδέματος. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει Ελληνικό, Ευρωπαϊκό ή αμερικάνικο πρότυπο για αυτή τη δοκιμή, η μέθοδος ελέγχου η οποία εφαρμόστηκε προσδιορίζει την υδατοπερατότητα με υδατοπερατόμετρο μεταβαλλόμενου ύψους (Σχήμα 4) που ικανοποιεί τις προδιαγραφές του πρότυπου εδαφομηχανικής E 105-86.



Σχήμα 4 Υδατοπερατόμετρο

Ο συντελεστής υδατοπερατότητας ( $k$ ) του διαπερατού σκυροδέματος δίνεται από την εξίσωση (1)

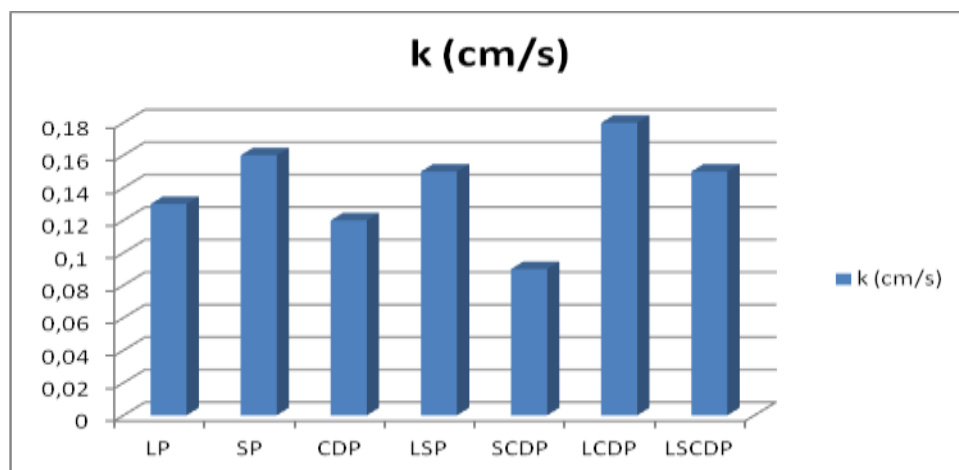
$$k = \frac{a * L}{A * t} * \ln\left(\frac{h1}{h2}\right) \quad (1)$$

όπου  $k$  είναι ο συντελεστής διαπερατότητας (cm/s),  $a$  είναι η εγκάρσια τομή του κυλινδρικού σωλήνα (cm<sup>2</sup>),  $A$  είναι η εγκάρσια τομή του δείγματος (cm<sup>2</sup>),  $L$  είναι το μήκος του δείγματος (cm),  $t$  είναι ο χρόνος που απαιτείται για να πέσει το νερό από το ύψος  $h1$  στο ύψος  $h2$ .

Οι μετρήσεις για τις συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 4 και Σχήμα 4 που ακολουθούν.

Πίνακας 4 Συντελεστής Υδατοπερατότητας  $k$  (cm/s)

	LP	SP	CDP	LSP	SCDP	LCDP	LSCDP
$k$ (cm/s)	0,13	0,16	0,12	0,15	0,09	0,18	0,15



Σχήμα 4 Συντελεστής Υδατοπερατότητας ( $k$ )

## Μελέτη Ψύξης-Απόψυξης

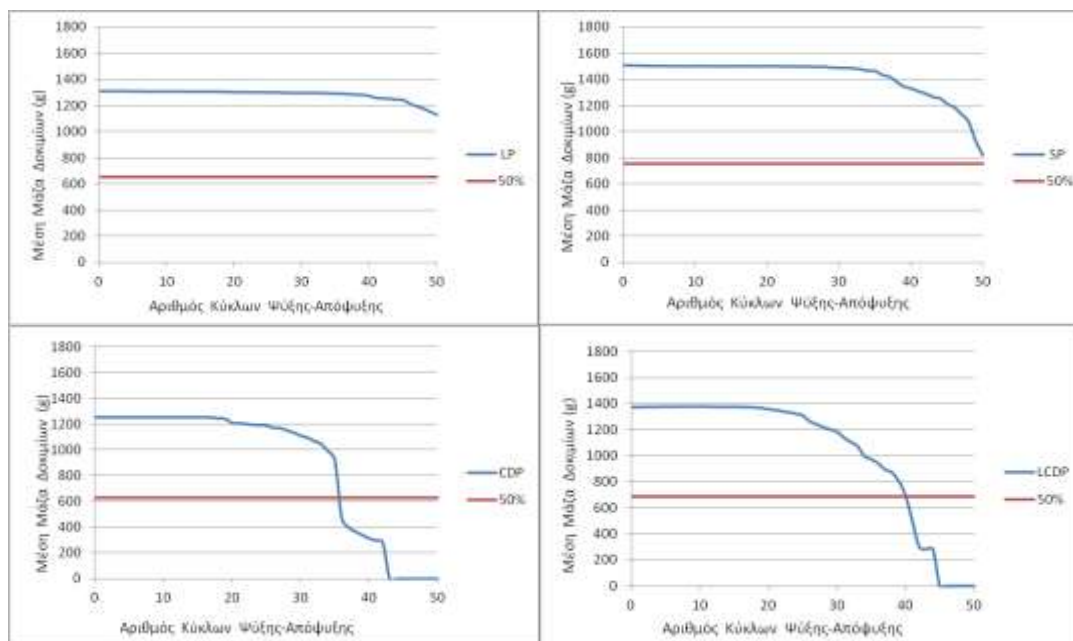
Οι δοκιμές ψύξης-απόψυξης πραγματοποιήθηκαν με παραλλαγή του προτύπου ASTM C-666 το οποίο προβλέπει ότι αν δεν υπάρχει αυτοματοποιημένο σύστημα ψύξης-απόψυξης και οι λειτουργίες γίνονται χειροκίνητα, τα δοκίμια πρέπει να αποθηκεύονται μέχρι την έναρξη του επόμενου κύκλου ψύξης-απόψυξης σε συνθήκες ψύξης. Σύμφωνα με το πρότυπο η θερμοκρασία ψύξης προσέγγιζε τους  $-18^{\circ}\text{C}$  και η θερμοκρασία απόψυξης τους  $+4^{\circ}\text{C}$ .

Από κάθε σύνθεση χρησιμοποιήθηκαν 2 δοκίμια. Η ψύξη των δοκιμίων λάμβανε χώρα σε ξηρό περιβάλλον ενώ η απόψυξη σε υγρό περιβάλλον. Η απόψυξη διαρκούσε 6h, χρόνος που θεωρήθηκε επαρκής για την πλήρη απόψυξη των δοκιμίων δεδομένων των διαστάσεών τους. Σε κάθε διακοπή των κύκλων, λόγω χρονικών περιορισμών, τα δοκίμια παρέμεναν σε κατάσταση ψύξης, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C-666/C.

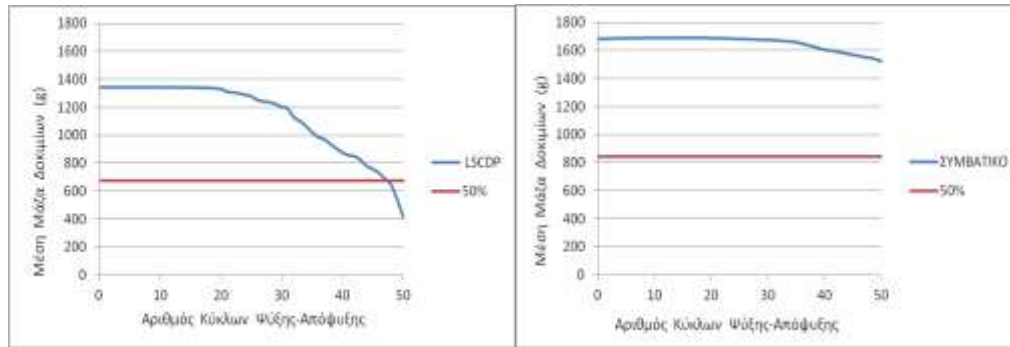
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής:

1. Μέτρηση αρχικών μαζών και αρχικών υψών των δοκιμίων
2. Τοποθέτηση τους σε απιονισμένο νερό για 2 μέρες μέχρι τα δοκίμια να είναι κορεσμένα σε νερό
3. Νέα ζύγιση των δοκιμίων και μέτρηση των υψών τους.
4. Έναρξη των κύκλων

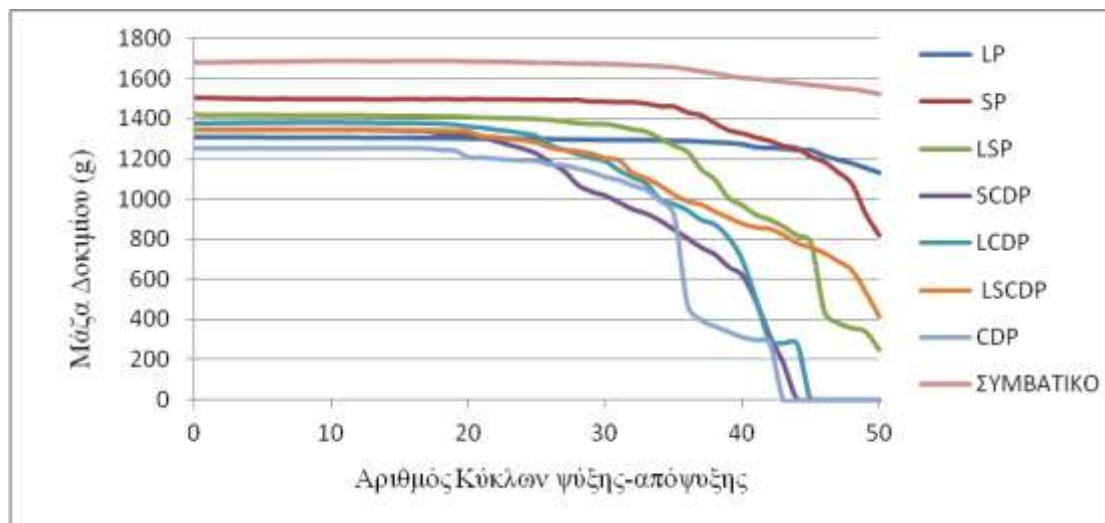
Οι μετρήσεις της μάζας και των υψών των δοκιμίων γινόταν πάντα στο στάδιο της απόψυξης, συγκεκριμένα τα δοκίμια ζυγίζονταν μετά το πέρας κάθε κύκλου ενώ οι μετρήσεις των διαστάσεων τους πραγματοποιούνταν κάθε 5 κύκλους. Η όλη διαδικασία ψύξης-απόψυξης πραγματοποιήθηκε συνολικά για 50 κύκλους. Οι μετρήσεις απώλειας μάζας παρουσιάζονται στα σχήματα 10-11. Συγκεκριμένα στο σχήμα 10 παρουσιάζεται διαγραμματικά η μείωση της μέσης μάζας των υπό εξέταση δοκιμίων ανά σύνθεση κατά την πορεία της ψύξης-απόψυξης. Η οριζόντια κόκκινη γραμμή (50%) αποτελεί το κριτήριο με το οποίο εξετάστηκε η συμπεριφορά των δοκιμίων, δηλαδή σε ποιον κύκλο ψύξης-απόψυξης η κάθε σύνθεση παρουσίασε απώλεια μάζας της τάξης του 50% της αρχικής τιμής της. Στο Σχήμα 11 παρουσιάζεται συγκεντρωτικά η πορεία της % μεταβολής της μάζας όλων των συνθέσεων.







Σχήμα 10 Διαγραμματική απεικόνιση της μείωσης της μάζας του δοκιμίου κατά την πορεία της ψύξης-απόψυξης.



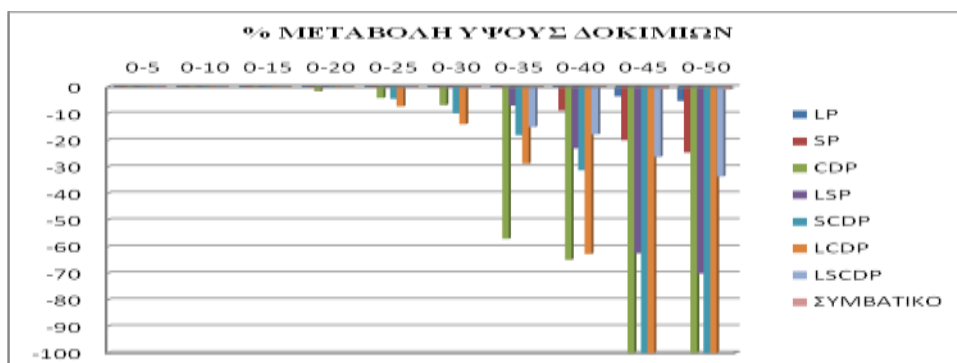
Σχήμα 11 Συγκεντρωτικό Διαγράμμα της συμπεριφοράς των διαφορετικών συνθέσεων σε συνθήκες ψύξης-απόψυξης.

Ακολουθεί ο πίνακας 7 που κατατάσει τις συνθέσεις κατά αύξουσα-καλύτερη συμπεριφορά των δοκιμίων λαμβάνοντας ως κριτήριο την απώλεια του 50% της μάζας τους.

Πίνακας 7 Κατάταξη Συμπεριφοράς Συνθέσεων κατά τη διάρκεια ψύξης-απόψυξης

Δοκίμιο	Κύκλος εμφάνισης απώλειας Μάζας 50%
CDP	38
SCDP	39
LCDP	41
LSP	46
LSCDP	47
SP	>50
LP	>50
SYMBATIKO	>50

Παρατίθεται στο Σχήμα 12 και η % μεταβολή του ύψους των υπό εξέταση δοκιμίων . Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί πως υπάρχει μια σχετικότητα στις μετρήσεις ύψους των δοκιμίων καθώς οι τιμές επηρεάζονται από την αποκόλληση κάποιου αδρανούς από την επιφάνεια των δοκιμίων.



Σχήμα 12 Ποσοστιαία Μεταβολή του πάχους των δοκιμίων σε συνθήκες ψύξης-απόψυξης.

Οι τιμές της % μεταβολής του ύψους των δοκιμίων συνάδουν και με τη % μεταβολή της μάζας αυτών των συνθέσεων. Συγκεκριμένα ήδη από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται πως από τον 35<sup>ο</sup> κύκλο οι συνθέσεις CDP και LCDP εμφανίζουν έντονη απώλεια ύψους. Ενώ στον 45<sup>ο</sup> κύκλο παρατηρείται η αποσάθρωση των συνθέσεων CDP, LCDP και SCDP.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Κατά την μελέτη ψύξης-απόψυξης παρατηρούμε πως οι συνθέσεις αμιγών ασβεστολιθικών (LP), αμιγούς σκωρίας (SP) καθώς και του συμβατικού σκυροδέματος εμφανίζουν πολύ καλή συμπεριφορά αφού δεν παρουσίασαν μείωση 50% της αρχικής τους μάζας μέχρι και τους 50 κύκλους που ολοκληρώθηκε η μελέτη.
- Οι συνθέσεις που περιέχουν μίγματα ασβεστολιθικών και σκωρίας (LSP) καθώς και το τριμερές μίγμα (LSCDP) παρουσιάζουν μια σχετικά καλή συμπεριφορά καθώς η απώλεια μάζας 50% εμφανίζεται προς το τέλος της μελέτης ψύξης-απόψυξης (στους κύκλους 46 και 47 αντίστοιχα).
- Ενώ οι συνθέσεις αμιγών οικοδομικών αποβλήτων (CDP), το μίγμα σκωρίας και οικοδομικών αποβλήτων (SCDP) καθώς και το μίγμα ασβεστολιθικών και οικοδομικών αποβλήτων (LCDP) εμφανίζουν μια όχι και τόσο καλή συμπεριφορά καθώς από τον 38<sup>ο</sup> κύκλο παρουσιάζεται απώλεια μάζας της τάξης του 50%.
- Οι όχι και τόσο καλές συμπεριφορές των συνθέσεων CDP, LSP, LCDP, SCDP και LSCDP μπορούν να αποδοθούν στο υψηλό πορώδες των μη φυσικών αδρανών (της σκωρίας και των οικοδομικών αποβλήτων). Συγκεκριμένα, κατά την ψύξη και απόψυξη εγκλωβίζουν μέσα πάγο που με τις συνεχείς διαστολές και συστολές, λόγω των θερμοκρασιακών μεταβολών, προκαλούν ρηγματώσεις και, εν τέλει, αποσάθρωση του δοκιμίου με την πάροδο του χρόνου.
- Συμπερασματικά, οι συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιοχές με έντονες θερμοκρασιακές αλλαγές. Συγκεκριμένα στη Βόρεια Ελλάδα, όπου υπάρχει πληθώρα φυσικών αδρανών (ποταμίσις αλλά και θραυστά ασβεστολιθικά) και όπου παρατηρούνται έντονες θερμοκρασιακές μεταβολές, προτείνουμε συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος με φυσικά αδρανή και όχι με παραπροϊόντα. Όμως σε περιοχές της Κεντρικής και Νότιας Ελλάδος μπορούν να ενσωματωθούν στις συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος παραπροϊόντα καθώς και οικοδομικά απόβλητα για εξοικονόμηση των φυσικών πρώτων υλών, αφού γενικότερα η συχνότητα εμφάνισης των ακραίων καιρικών φαινομένων είναι πολύ

μικρή και το διαπερατό μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις αυτών των θερμοκρασιακών μεταβολών.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος ΙΙ . Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Βαρδάκα Γ., 2009, : «Διερεύνηση της προσθήκης οικοδομικών αποβλήτων σε διαπερατά σκυροδέματα. Πρώτη προσέγγιση» 2<sup>ο</sup> Συνέδριο ΕΒΠΠΑΡ, Αιανή Κοζάνης, 1-3 Ιουνίου 2009
- ACI Committee, 2006, 522R-06: Pervious Concrete, *Technical Documents*.
- ACI Committee, 2008, 522.1-08: Specification for Pervious Concrete Pavement, *Technical Documents*.
- Dale P. Bentz, 2008, Virtual Pervious Concrete: Microstructure, Percolation, and Permeability, *Materials Journal*, Volume 105, Issue 3, pages 297-301.
- Gocke A., Nagataki A., Saeki T. and Hisada M.,2004, Freezing and thawing resistance of air – entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp. 799-806.
- Katz A.,2003, Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 703-711.
- Liv Haselbach and Robert Freeman, 2006, Vertical Porosity Distributions in Pervious Concrete Pavement», *Materials Journal*, Volume 103, Issue 6, pages 452-458.
- Otsuki N, Miyazato S. and Yodsudjai W.,2003, Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete, *ASCE J. Mater. Civil Eng.*
- Ryu J.S.,2002a, Improvement on strength and impermeability of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate, *Materials Science Letter*, Vol. 21, pp. 1565-1567
- Ryu J.S.,2002b, An experimental study on the effect of recycled aggregate concrete properties, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 54, pp. 7-12.
- Tam V.W.Y., Gao X.F. and Tam C.M.,2005, Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two – stage mixing approach, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp. 1195-1203.
- Zaharieva R., Francois B.-B. and Eric W.,2004, Frost resistance of recycled aggregate concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp. 1277-1322.
- Vardaka G., Thomaidis K., Leptokaridis C. and Tsimas S.,( 25-29 September 2011): “Use of Steel Slag as Coarse Aggregate for the production of Pervious Concrete” 6th SDEWES Conference, Dubrovnik, Croatia.