

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΧΗΜΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ



ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΔΙΑΠΕΡΑΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ: ΑΝΑΠΤΥΞΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΜΕΛΕΤΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΟΦΕΛΗ

Γεωργία Βαρδάκα

Χημικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.



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.

Αθήνα 2013

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΧΗΜΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ



ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΔΙΑΠΕΡΑΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ: ΑΝΑΠΤΥΞΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΜΕΛΕΤΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΟΦΕΛΗ

Γεωργία Βαρδάκα

Χημικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Επιβλέπων

**Σταμάτης Τσίμας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.**



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.

Αθήνα 2013

ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Σ. Τσίμας, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Α. Μουτσάτσου – Τσίμα, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Σ. Τσιβιλής, Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Γ. Κακάλη, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Α. Μοροπούλου, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Α. Μουτσάτσου – Τσίμα, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Κ. Τσακαλάκης, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Σ. Τσιβιλής, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Σ. Τσίμας, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Ε. Αναστασίου, Λέκτορας Α.Π.Θ

<<Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανωτάτη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν δηλώνει και αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932,Άρθρο202)>>

*Αφιερώνεται στους γονείς
και στον αδελφό μου*

Πρόλογος

Η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματοποιήθηκε στη Σχολή Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ, στο Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας του Τομέα Χημικών Επιστημών (Τομέας Ι).

Αντικείμενο της διατριβής είναι η ανάπτυξη και ο σχεδιασμός ενός φθηνού εναλλακτικού αντιπλημμυρικού μέτρου προστασίας: του διαπερατού σκυροδέματος. Η παρασκευή του συγκεκριμένου τύπου σκυροδέματος έγινε τόσο με φυσικές πρώτες ύλες όσο και με εναλλακτικά αδρανή (βιομηχανικά παραπροϊόντα, οικοδομικά απόβλητα) και ελέγχθηκαν οι φυσικομηχανικές του ιδιότητες καθώς και τα περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση του.

Η διδακτορική διατριβή απαρτίζεται από τα εξής μέρη:

Το Θεωρητικό Μέρος (Κεφάλαια 1-2) όπου πραγματοποιείται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με το διαπερατό σκυροδέμα (σύσταση, ιδιότητες, εφαρμογές κ.α.) [Κεφάλαιο 1]. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται τα αδρανή που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή σκυροδεμάτων τόσο τα φυσικά-ασβεστολιθικά όσο και τα εναλλακτικά (σκωρία χάλυβα, οικοδομικά απόβλητα). Την Τοποθέτηση του Θέματος της διατριβής (Κεφάλαιο 3). Την Συνοπτική Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας (Κεφάλαιο 4) όπου περιγράφονται όλες οι πειραματικές διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων. Τα Κεφάλαια 5 έως και 12 όπου περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων, η ερμηνεία και τα σχόλια που αφορούν την παρασκευή συνθέσεων διαπερατού σκυροδέματος τον έλεγχο των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων τους, την ανθεκτικότητα τους σε έντονες συνθήκες (τρίψης-απότριψης, ψύξης-απόψυξης κ.α.), τον έλεγχο κατακράτησης τους σε ρύπους (ανόργανους και οργανικούς) καθώς και τον έλεγχο πιλοτικής διάστρωσης σε χώρο στάθμευσης εργοστασίου. Η παρούσα διατριβή ολοκληρώνεται με την παράθεση των τελικών συμπερασμάτων (κεφάλαιο 13), της βιβλιογραφίας και του παραρτήματος.

Με την ολοκλήρωση αυτής της διατριβής κλείνει ένας μεγάλος κύκλος σπουδών που δεν θα ήταν εφικτός χωρίς τη βοήθεια αρκετών ανθρώπων. Φτάνοντας στην περάτωση της διδακτορικής διατριβής, τότε μόνο συνειδητοποιείς την συνολική πορεία και τους ανθρώπους που την επηρέασαν. Σε αυτούς τους ανθρώπους θέλω να αναφερθώ και να τους ευχαριστήσω θερμά για την σημαντική βοήθεια που μου προσέφεραν στα διάφορα στάδια αυτής της πορείας.

Αρχικά οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον κ. Σταμάτη Τσίμα, Καθηγητή Ε.Μ.Π., για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Η καθοδήγησή του και η συνολική του βοήθεια από την αρχή μέχρι και το τελευταίο στάδιο της διατριβής υπήρξε ουσιαστική για την ολοκλήρωσή της και συνέβαλε αποφασιστικά στο να κατορθώσω να επιτύχω τον πιο σημαντικό ως τώρα στόχο μου.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω στην κ. Αγγελική Μουτσάτσου-Τσίμα, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π., για την παροχή των άμεσων και πολύτιμων συμβουλών της που ήταν καθοριστικές για την πορεία και την εξέλιξη της διατριβής. Επίσης ευχαριστώ πολύ τον κ. Σωτήρη Τσιβιλή, Καθηγητή Ε.Μ.Π., για την εξίσου ουσιαστική βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης του διδακτορικού.

Θέλω επίσης να σταθώ στην τιμή που μου έκαναν οι κ.κ. Αντωνία Μοροπούλου, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π., Γλυκερία Κακάλη, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π., Κωνσταντίνος Τσακαλάκης, Καθηγητής Ε.Μ.Π. και Ελευθέριος Αναστασίου, Λέκτορας Α.Π.Θ., να συμμετάσχουν στην επιταμελή εξεταστική επιτροπή.

Τις θερμές μου ευχαριστίες οφείλω στο επιστημονικό, τεχνικό και βοηθητικό προσωπικό του Εργαστηρίου Τεχνολογίας Σκυροδέματος της Ανωύμου Εταιρίας Τσιμέντων TITAN, για την διευκόλυνση που μου παρείχε στη χρήση του εξοπλισμού του ερευνητικού εργαστηρίου της εταιρίας καθώς και για τη συνολικότερη βοήθεια τους. Ιδιαίτερος, ευχαριστώ τους κ. Μανώλη Χανιωτάκη και Χρήστο Λεπτοκαρίδη για τις χρήσιμες επιστημονικές και τεχνικές συζητήσεις κατά την εκπόνηση της διατριβής. Επίσης ευχαριστώ τον κ. Στέλιο Αντίοχο για την γενικότερη συνεισφορά του, καθώς και τους κ. Παντελή Αντωνιάδη, Γιώργο Κυπριώτη, Παναγιώτη Μπολοβίνο, Δημήτρη Κουρή, Θανάση Αγαθή και Μιχάλη Γουλιά για την ουσιαστική βοήθειά τους κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων.

Ευχαριστώ επίσης τις εταιρίες «Ανακύκλωση Αδρανών Μακεδονίας Α.Ε.», «Αειφόρος Α.Ε.», «BASF Hellas», «Βιομηχανία Λιπαντικών ELDON'S S.A.», για την παροχή υλικών για τη διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στους συναδέλφους Υποψήφιους Διδάκτορες του Εργαστηρίου Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας της σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. για την άπογη συνεργασία και το φιλικό κλίμα στο χώρο του εργαστηρίου. Ευχαριστώ τους Μόνικα Ζερβάκη, Ηλία Μασαβέτα, Χριστίνα-Αμαλία Δρόσου, Σοφία Φαρμάκη, Ελένη Κατσίκια, Αφροδίτη Ντζιούνη, Αλέξανδρο Τσιώλη κ.α. Καθώς και τους Διδάκτορες πλέον Όλγα Καρακάση, Γεώργιο Λεοντοκιανάκο, Αλέξανδρο Τσιτούρα, Μανώλη Τσίμα και Γρηγόρη Ίσκο, οι οποίοι με βοήθησαν σημαντικά με τις προτάσεις και τις συμβουλές τους. Επίσης θα ήταν άδικο να παραλείψω την ουσιαστική συνεισφορά του Δρ. Χρίστου-Τριαντάφυλλου Γκαλμπένη, ο οποίος, παρά τη γεωγραφική απόσταση, παρέμεινε -έστω και τηλεφωνικά- παρών και μου μετέφερε απλόχερα τις γνώσεις και τις εμπειρίες του κατά την εκπόνηση αυτής της διατριβής.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζω στους άμεσους συνεργάτες μου με τους οποίους είχα την χαρά να συνεργαστώ στα πλαίσια των διπλωματικών και μεταπτυχιακών τους εργασιών. Η αναφορά γίνεται στους κ.κ. Δημήτρη Μπότσιο, Κυριάκο Θωμαΐδη, Δανάη Αλαμάνου και Χαράλαμπο Μπαϊράμη.

Οφείλω επίσης να αναφέρω στη λίστα των ευχαριστιών το οικογενειακό και φιλικό μου περιβάλλον που βρίσκονται συνεχώς δίπλα μου σ' όλες τις φάσεις της ζωής μου και με στηρίζουν με την αγάπη τους. Ειδικότερα στην περίπτωση των γονιών μου, Ιωάννη και Μαρίας-Ελένης, καθώς και του αδελφού μου,

Κωνσταντίνου, αναγνωρίζω την ουσιαστική και ανιδιοτελή συμπαράστασή τους κατά τα χρόνια των σπουδών μου καθώς και σε όλα τα βήματα της ζωής μου. Ως ελάχιστη ανταπόδοση τους αφιερώνω την παρούσα διατριβή έχοντας την προσδοκία ότι το παρόν σύγγραμμα τους καθιστά περήφανους.

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.

Αθήνα, Οκτώβριος 2013,

Βαρδάκα Γεωργία

Περιεχόμενα

<u>Περίληψη</u>	σελ 15-17
<u>Abstract</u>	σελ 19-20
<u>Κεφάλαιο 1: ΔΙΑΠΕΡΑΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ</u>	σελ 21-38
1.1 Εισαγωγή	σελ 21-23
1.2 Ορισμός του διαπερατού σκυροδέματος	σελ 23
1.3 Σύσταση διαπερατού σκυροδέματος	σελ 23-24
1.4 Ιδιότητες διαπερατού σκυροδέματος	σελ 24-31
1.4.1 Υδατοπερατότητα	σελ 24-25
1.4.2 Θλιπτικές αντοχές	σελ 25-26
1.4.3 Ποσοστό κενών χώρων/ Ειδικό βάρος	σελ 26
1.4.4 Ανθεκτικότητα σε ψύξη απόψυξη	σελ 26-30
1.4.5 Ηχομόνωση	σελ 30
1.4.6 Περιβαλλοντικά Οφέλη	σελ 31
1.5 Εφαρμογές διαπερατού σκυροδέματος	σελ 31-33
1.5.1 Εφαρμογές οδοποιίας	σελ 31-32
1.5.2 Άλλες εφαρμογές	σελ 32-33
1.6 Οικονομικά οφέλη	σελ 33-34
1.7 Τοποθέτηση διαπερατού σκυροδέματος	σελ 34-38
1.7.1 Υδρολογικές μελέτες σχεδιασμού	σελ 34-35
1.7.2 Κατασκευή οδοστρώματος διαπερατού σκυροδέματος	σελ 35-37
1.8 Συντήρηση	σελ 37-38
<u>Κεφάλαιο 2: ΑΔΡΑΝΗ ΥΛΙΚΑ</u>	σελ 39-56
2.1 Φυσικά αδρανή	σελ 39-44
2.1.1 Κοκκομετρική σύνθεση ή διαβάθμιση αδρανών	σελ 40
2.1.2 Καθορισμός της κοκκομετρικής διαβάθμισης	σελ 40-41
2.1.3 Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών	σελ 41-42
2.1.4 Μέγιστος κόκκος	σελ 42-43
2.1.5 Ιδιότητες των αδρανών υλικών	σελ 43-44
2.2 Εναλλακτικά Αδρανή	σελ 44-56
2.2.1 Σκωρία κάλυβα	σελ 44-45
2.2.1.1 Παραγωγή και επεξεργασία των σκωριών ηλεκτρικού κλιβάνου	σελ 45-46
2.2.1.2 Ιδιότητες των αδρανών σκωρίας	σελ 46-47
2.2.1.3 Περιβαλλοντικοί έλεγχοι	σελ 48
2.2.1.4 Χρήσεις σκωριών	σελ 48
2.2.1.5 Σύγκριση σκυροδέματος με χρήση σκωρίας έναντι φυσικών αδρανών	σελ 48-49
2.2.1.6 Περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη	σελ 49-50
2.2.2 Απόβλητα από Εκκαφές, Κατασκευές και Κατεδαφίσεις (ΑΕΚΚ)	σελ 50-56
Οικοδομικά απόβλητα	σελ 50-56
2.2.2.1 Οικοδομικά Απόβλητα	σελ 52-54
2.2.2.2 Ιδιότητες των αδρανών οικοδομικών αποβλήτων	σελ 54-55
2.2.2.3 Ιδιότητες σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή	σελ 55-56
<u>Κεφάλαιο 3: ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΘΕΜΑΤΟΣ</u>	σελ 57-59
<u>Κεφάλαιο 4: ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ</u>	σελ 61-63
<u>Κεφάλαιο 5: ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ Α' ΥΛΩΝ</u>	σελ 65-68
5.1 Πρώτες ύλες και τόπος προέλευσης	σελ 65-68
5.1.1 Αδρανή Υλικά	σελ 65-67
5.1.2 Τσιμέντο-Πυριτική Παιπάλη	σελ 68

<u>Κεφάλαιο 6: ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ</u>	σελ 69-90
6.1 Παρασκευή και συντήρηση δοκιμίων	σελ 70-77
6.1.1 Προετοιμασία μητρών	σελ 70-71
6.1.2 Ανάμειξη πρώτων υλών	σελ 71-72
6.1.3 Έλεγχος κάθισης	σελ 72-73
6.1.4 Καλούπωμα	σελ 73-74
6.1.5 Ωρίμανση	σελ 74
6.1.6 Αντοχή σε θλίψη	σελ 74
6.1.7 Αντοχή σε συνθήκες τρίψης-απότριψης	σελ 74-75
6.1.8 Έλεγχος υδατοπερατότητας	σελ 75-77
6.2 Δοκιμαστικές συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος	σελ 77-90
6.3 Παρασκευή σύνθεσης συμβατικού τύπου σκυροδέματος παρόμοιων μηχανικών αντοχών	σελ 90
<u>Κεφάλαιο 7: ΥΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΕ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΑΔΡΑΝΗ</u>	σελ 91-101
7.1 Αντοχή σε θλίψη	σελ 94-96
7.2 Αντοχή σε εφελκυσμό	σελ 96
7.3 Τρίψη – απότριψη	σελ 96-99
7.4 Υδατοπερατότητα	σελ 99-100
7.5 Υδατοαπορροφητικότητα	σελ 100-101
7.6 Συμπερασματικά	σελ 101
<u>Κεφάλαιο 8: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕΣΩ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ</u>	σελ 103-138
8.1 Πειραματική διαδικασία αξονικής τομογραφίας	σελ 103-104
8.2 Αποτελέσματα Αξονικής Τομογραφίας	σελ 104-109
<u>Κεφάλαιο 9: ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ</u>	σελ 111-138
9.1 Μελέτη ψύξης-απόψυξης	σελ 111-134
9.2 Μελέτη επίδρασης «τεχνητού» θαλάσσιου περιβάλλοντος	σελ 134-135
9.3 Μελέτη της ανθεκτικότητας σε έντονες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας-Επιταχυνόμενη Γήρανση	σελ 135-138
<u>Κεφάλαιο 10: ΜΕΛΕΤΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ</u>	σελ 139-149
<u>Κεφάλαιο 11: ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΤΑΚΡΑΤΗΣΗΣ ΡΥΠΩΝ (ΑΝΟΡΓΑΝΩΝ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ)</u>	σελ 151-162
11.1 Έλεγχος κατακράτησης ανόργανων ρύπων	σελ 151-158
11.1.1 Έλεγχος κατακράτησης θειικών ιόντων	σελ 151-153
11.1.2 Έλεγχος κατακράτησης νιτρικών ιόντων	σελ 153-156
11.1.3 Επίδραση διερχόμενων Όξινων Ρύπων στην Ανθεκτικότητα του Διαπερατού Σκυροδέματος – Λοιπά Παρασυρόμενα Βαρέα Μέταλλα.	σελ 156-158
11.2 Έλεγχος Κατακράτησης Οργανικών Ρύπων	σελ 158-162
<u>Κεφάλαιο 12: ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ</u>	σελ 163-170
12.1 Κοκκομετρική Κατανομή Αδρανών	σελ 163-164
12.2 Συνθέσεις που μελετήθηκαν	σελ 164-165
12.3 Διάστρωση εξωτερικού χώρου με διαπερατό σκυρόδεμα	σελ 165-166
12.4 Αντοχές σε θλίψη	σελ 166-168
12.5 Υδατοπερατότητα	σελ 168-169
<u>Κεφάλαιο 13: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</u>	σελ 171-175
<u>Κεφάλαιο 14: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>	σελ 175-183
<u>Παράρτημα</u>	σελ 183-186

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η ανάπτυξη, ο σχεδιασμός και η μελέτη ιδιοτήτων διαπερατού σκυροδέματος που συντίθεται τόσο με συμβατικά ασβεστολιθικά, όσο και με εναλλακτικά, αδρανή. Στα τελευταία περιλαμβάνονται υλικά, όπως είναι η σκωρία από παραγωγή χάλυβα και τα οικοδομικά απόβλητα, η χρησιμοποίηση των οποίων θα συντείνει αφενός μεν στην εξοικονόμηση φυσικών πόρων αφετέρου στην αποφυγή ρύπανσης του περιβάλλοντος που θα προέλθει από την ανεξέλεγκτη απόθεση τους. Πέραν αυτών οι οικολογικές προεκτάσεις της διατριβής διαφαίνονται και από το γεγονός ότι το διαπερατό σκυρόδεμα αποτελεί ένα εναλλακτικό αντιπλημμυρικό μέτρο προστασίας. Η βασική του ιδιαιτερότητα έγκειται στο υψηλό του πορώδες το οποίο επιτρέπει στο νερό της βροχής να διέρχεται μέσα από τη μάζα του. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνονται: η σωστή διαχείριση των όμβριων υδάτων, η αποφυγή των πλημμυρών καθώς και ο εμπλουτισμός του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα.

Κατά τη φάση του σχεδιασμού του διαπερατού σκυροδέματος και στο πλαίσιο πολυπαραμετρικής ανάλυσης διερευνήθηκε διεξοδικά η επίδραση της ποσότητας και του μεγέθους των αδρανών (και ιδιαίτερα η σχέση χαλικιού, γαρμπιλιού και άμμου) σε σχέση με την ποσότητα και τον τύπο του τσιμέντου καθώς και την χρησιμοποίηση ή όχι πυριτικής παιπάλης. Οι φυσικομηχανικές ιδιότητες καθώς και οι βασικές ιδιότητες ανθεκτικότητας του σκυροδέματος μελετήθηκαν σε σειρά δοκιμών διαπερατού σκυροδέματος τα οποία προς τούτο παρασκευάστηκαν. Εκτός από τις αντοχές των δοκιμών σε θλίψη και εφελκυσμό πραγματοποιήθηκε έλεγχος της ανθεκτικότητας τους σε συνθήκες τρίψης-απότριψης. Με γνώμονα την εύρεση της καταλληλότερης σύνθεσης που να καλύπτει τις ως άνω (αντοχές, υδατοπερατότητα και τρίψη απότριψη) βασικές ιδιότητες, προέκυψε τελικώς ότι παράλληλα με την ελάχιστη απαιτούμενη ποσότητα τσιμέντου στη σύνθεση, μία μικρή ποσότητα λεπτόκοκκων αδρανών (άμμος) δείχνει να βοηθάει στην συνάφεια των αδρανών. Από τα αποτελέσματα φάνηκε πως ο τύπος του τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκε (Portland CEM II τόσο 42.5 όσο και 32.5) δεν προσδίδει ιδιαίτερες διαφορές στις φυσικομηχανικές ιδιότητες των παραγόμενων δοκιμών σκυροδέματος, ενώ μία μικρή υποκατάστασή του από πυριτική παιπάλη συμβάλλει κυρίως στις θλιπτικές αντοχές αλλά και σε αυτές της τρίψης - απότριψης. Η χρησιμοποίηση χονδρόκοκκων κλασμάτων προσέδωσε καλύτερες αντοχές στο σκυρόδεμα, όμως μείωσε την εργασιμότητα του χαρμανιού. Συγκεκριμένα τα δοκίμια εμφάνισαν μειωμένη υδατοπερατότητα καθώς ποσότητα τσιμεντόπαστας κατακαθόταν στη βάση των δοκιμών με αποτέλεσμα να τα φράζει. Παράλληλα η ανομοιομορφία των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των χαλικίων δημιούργησε μία μη ομαλή διαστρωμένη επιφάνεια η οποία αποτελεί μειονέκτημα για τα διερχόμενα οχήματα.

Τέλος η καλή αλλά όχι υπερβολική συμπύκνωση καταδείχθηκε ότι είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν τις τελικές ιδιότητες του σκυροδέματος μέσω της δημιουργίας μίας σωστής και συνεχούς πορώδους δομής.

Στο πλαίσιο της διερεύνησης της χρησιμοποίησης εναλλακτικών αδρανών και μέσα από σειρά προκαταρκτικών μετρήσεων επελέγησαν τελικώς επτά συνθέσεις στις οποίες επιπροσθέτως πραγματοποιήθηκαν: i) έλεγχος ψύξης-απόψυξης, ii)

έλεγχος του φαινομένου ενανθράκωσης σε διαφορετικούς ως προς την επιβάρυνσή τους σε CO₂ χώρους, iii) έλεγχος του συντελεστή υδατοπερατότητάς τους, iv) έλεγχος της υδατοαπορροφητικότητας του σκυροδέματος καθώς και v) έλεγχος της επίδρασης ακραίων συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας στα δοκίμια διαπερατού σκυροδέματος με τη χρήση αυτοκλείστου. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, προέκυψε ότι η δημιουργία διαπερατού σκυροδέματος με περιβαλλοντικά οφέλη και ικανοποιητικές ιδιότητες για το πεδίο εφαρμογών του είναι εφικτή τόσο με τη χρήση ασβεστολιθικών όσο και εναλλακτικών αδρανών. Η σκωρία κάλυβα έδειξε να βοηθάει το συγκεκριμένου τύπου σκυρόδεμα σε όλους τους τομείς. Το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα έχει θετική συνεισφορά κυρίως στα αποτελέσματα της τρίψης - απότριψης αλλά όχι τόσο στην υδατοπερατότητα λόγω μεγάλου βαθμού συμπύκνωσης. Και τα δύο αυτά εναλλακτικά αδρανή φαίνονται να συνεργάζονται καλά με τα ασβεστολιθικά στη δημιουργία του εσωτερικού πορώδους ιστού διμερών και τριμερούς συνθέσεων των δοκιμίων, όχι όμως τόσο και μεταξύ τους.

Ταυτόχρονα, μέσω απεικονίσεων αξονικής τομογραφίας, ελέγχθηκε το εσωτερικό πορώδες των παραγόμενων δοκιμίων (διαστάσεις πόρων καθώς και μορφολογία τους) με τη χρήση εικόνων-τομών που παραλήφθηκαν από αξονικό τομογράφο με στόχο την καλύτερη κατανόηση της εσωτερικής δομής των κενών τους χώρων καθώς και την σύνδεση του εσωτερικού πορώδους με την υδατοπερατότητα που αποτελεί βασική ιδιότητα του διαπερατού σκυροδέματος. Συμπερασματικά προέκυψε ότι στις συνθέσεις που χρησιμοποιήθηκαν χονδρόκοκκα αδρανή όπως τα οικοδομικά απόβλητα το πορώδες εμφάνισε μεγαλύτερες τιμές.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα του ελέγχου ψύξης απόψυξης, όλες οι συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος που μελετήθηκαν εμφάνισαν αρκετά καλή συμπεριφορά με προβάδισμα τις συνθέσεις αμιγών ασβεστολιθικών και αμιγούς σκωρίας ενώ λιγότερο καλή συμπεριφορά εμφάνισαν οι συνθέσεις αμιγών οικοδομικών αποβλήτων, το μίγμα σκωρίας και οικοδομικών αποβλήτων καθώς και το μίγμα ασβεστολιθικών και οικοδομικών αποβλήτων το οποίο οφείλεται στο υψηλό πορώδες των εναλλακτικών αδρανών.

Συμπερασματικά οι μελετηθείσες συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικά, όσον αφορά τις θερμοκρασιακές αλλαγές, πεδία εφαρμογής στην Ελλάδα. Συγκεκριμένα στη Βόρεια Ελλάδα, όπου υπάρχει πληθώρα φυσικών αδρανών (ποταμίσια αλλά και θραυστά ασβεστολιθικά) και όπου παρατηρούνται έντονες θερμοκρασιακές μεταβολές, προτείνονται 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.

Επιπροσθέτως στο πλαίσιο της διατριβής και με στόχο τις περιβαλλοντικές εφαρμογές έγινε συστηματική μελέτη της κατακράτησης του συγκεκριμένου τύπου σκυροδέματος σε ρύπους όπως τα νιτρικά και θειικά ιόντα καθώς και σε οργανικά κατάλοιπα των αυτοκινήτων με στόχο την αξιολόγηση της χρήσης του συγκεκριμένου προϊόντος ως φίλτρου για τον καθαρισμό των όμβριων υδάτων και κατά συνέπεια την προστασία του υδροφόρου ορίζοντα. Από την μελέτη

αυτή προέκυψε ότι παρατηρείται κατακράτηση των νιτρικών ιόντων ενώ δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα σχετικά με την κατακράτηση των θειικών ιόντων. Όσον αφορά τους οργανικούς ρύπους το διαπερατό σκυρόδεμα έχει την τάση να τους εγκλωβίζει στο εσωτερικό του πορώδους του αποτρέποντας τους, πρακτικά, να διέλθουν από τη μάζα του ώστε να μην καταλήξουν στον υδροφόρο ορίζοντα. Η ποσότητα των οργανικών ρυπαντών που εγκλωβίζεται στους πόρους, ακόμα και αν το σκυρόδεμα εκπλυθεί με νερό, παρασύρεται σταδιακά πολύ δύσκολα και σε πολύ μικρές ποσότητες μη ικανές να μολύνουν τον υδροφόρο ορίζοντα. Το ποσοστό οργανικού ρύπου που δεν παρασύρεται και παραμένει εσωτερικά εγκλωβισμένο στη δομή του πορώδους σκυροδέματος μπορεί να αποτελέσει τροφή για τους μικροοργανισμούς που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια διαπερατού σκυροδέματος και του υποστρώματος.

Τέλος στο πλαίσιο της υλοποίησης των συμπερασμάτων της έρευνας πραγματοποιήθηκε πιλοτική διάστρωση με συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος σε εργοστασιακό χώρο στάθμευσης μιας τσιμεντοβιομηχανίας. Με αυτόν τον τρόπο ελέγχθηκαν και οι ιδιότητες του διαπερατού σκυροδέματος σε πραγματικές συνθήκες (*in situ*). Οι συνθέσεις που περιείχαν ποσοστά χαλικιού παρουσίασαν δυσκολία κατά τη διάστρωση τους σε σχέση με τις συνθέσεις που περιείχαν γαρμπίλι. Ταυτόχρονα όλες οι συνθέσεις που χρησιμοποιήθηκαν παρουσίασαν ικανοποιητικές μετρήσεις αντοχών και υδατοπερατότητας για το πεδίο εφαρμογών τους. Οι συγκεκριμένες τιμές δεν διέφεραν πολύ μεταξύ των δοκιμών που παρασκευάστηκαν σε εργαστηριακή κλίμακα με τα «καρότα» που παρελήφθησαν από την πιλοτική εφαρμογή.

Abstract

The subject of the present PhD thesis is the development, the production and the study of the properties of pervious concrete by using either conventional limestone or alternative aggregates. The use of these alternative materials (like steel slag, construction and demolition wastes) will contribute, firstly, to conserve natural resources and, secondly, to prevent environmental pollution which arises from the landing of these materials. Pervious concrete is currently an alternative flood prevention measurement. Its main characteristic lies on its high porosity, which allows rain water to pass through its mass.

During the phase of the mix design, there was a thorough investigation on the effect of the amount and the size of the aggregates (particularly the relationship of coarse aggregates and sand) according to the amount and the type of cement and the use or no of silica fume. The produced pervious concrete samples were studied for their physicomaterial properties and their basic durability properties. The samples were tested for their compressive strength, tensile strength and abrasion behavior. The seven final produced mix designs were tested for: i) the freeze and thaw effect, ii) the study of the carbonization phenomenon in different environments as far as the concentration of CO₂ is concerned, iii) their water permeability coefficient, iv) their water absorption and v) their behavior in extreme conditions of pressure and temperatures by using an autoclave. Also, the internal porosity of the produced samples was measured by using CT Scan, the dimensions of the pores as well as their morphology were examined by using images received through the tomographer. The aim of this test is the better understanding of the internal structure and of the connecting internal porosity of the samples. Additionally, the environmental benefits of the use of pervious concrete were examined by the retention of inorganic and organic pollutants. The final scope is the evaluation of the use of pervious concrete as a filter for cleaning rainwater and, therefore, as a protection measurement for the underground water supplies.

According to the conclusions of the thesis, the production of pervious concrete with satisfactory properties and environmental benefits is possible with the use of limestone and alternative aggregates. The steel slag showed that it helps the particular type of concrete in all sectors. On the contrary, the recycled concrete mainly helps with the results of abrasion behavior but not with the water permeability due to the large compaction of the samples. Both these alternative aggregates seemed to pack well with the limestone ones in creating the internal porous structure. But the packing of these two alternative aggregates was not a very good match. The exception is the mix design of the three aggregates, which had very good behavior. The quantity of cement in the mix design must be the minimum possible while a small quantity of fine aggregates (sand) shows that it helps with the bonding of the aggregates. Finally, an important parameter is the good but not excessive compaction as it constitutes one of the key factors behind the final properties of concrete and also it creates a correct and continuous porous structure.

In this research, the active porosity of different pervious concrete mix designs has been evaluated by using porosity profiles produced from X-ray CT Scan. The conclusions showed that the size of aggregates plays an important role in the internal structure of pervious concrete. More specifically, the compositions which contain coarse aggregates (construction & demolition wastes) showed higher values of porosity. According to the results of freeze and thaw, all pervious concrete samples showed really good behavior (LP and SP samples) while the compositions (CDP, SCDP and LCDP) showed a slightly worse behavior which must be attributed to the high porosity of the alternative aggregates. In conclusion, pervious concrete compositions can be used in areas with high temperature changes. Particularly in Northern Greece, where there can be found plenty of natural aggregates (river and crushed limestone) and where there are strong temperature changes, we recommend compositions of pervious concrete with natural aggregates. On the contrary, in parts of central and southern Greece alternative aggregates in pervious concrete compositions can be incorporated.

In order to evaluate the use of pervious concrete as a filter for cleaning rainwater and thus protect the underground water supplies, the thesis also focused on the retention of pollutants by this type of concrete such as nitrate and sulfate ions as well as organic residues of cars. The study has shown that there can't be a safe conclusion on the retention of sulfates, unlike the retention of nitrate which can be observed. Regarding organic pollutants, pervious concrete tends to entrap these pollutants within its porous structure and therefore prevent them from passing through its mass and ending up into water supplies. The quantity of organic which remains trapped in the pores of pervious samples, even if the concrete is washed by water, can hardly be dissolved and in very small amounts. Therefore, the organic remains of the cars are incapable of gradually contaminating the underground waters. The percentage of the organic pollutants which remain entrapped in the internal structure of the pervious concrete can feed the microorganisms.

Finally, to evaluate the properties of pervious concrete in actual conditions (in situ) a pilot laying with different mix designs has taken place on a factory parking lot. According to these results the compositions which contain gravel showed difficulty during the placement. Also, all the compositions had satisfactory values of strength and of water permeability for field applications. These values do not differ much between the samples prepared in laboratory scale and the carrots received by the field.

Κεφάλαιο 1

Κεφάλαιο 1: ΔΙΑΠΕΡΑΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

1.1 Εισαγωγή

Το διαπερατό σκυρόδεμα συνιστά μία βασική κατηγορία υδατοπερατού τάπητα και όπως θα αναπτυχθεί στη συνέχεια, είναι ένα μίγμα χονδρόκοκκων αδρανών, τσιμέντου και νερού. Με τον όρο υδατοπερατός τάπητας εννοείται μια διαστρωμένη επιφάνεια με υψηλό πορώδες που εξασφαλίζει τη γρήγορη απομάκρυνση του νερού από το οδόστρωμα με σκοπό την αποφυγή του φαινομένου της υδρολίστεσης (1).

Ένας υδατοδιαπερατός τάπητας κατασκευάζεται από μία υδατοδιαπερατή επιφανειακή στρώση από διάφορα υλικά, η οποία τοποθετείται επάνω σε υποκείμενες στρώσεις από θραυστά υλικά με διαφορετική κοκκομετρική διαβάθμιση, οι οποίες προσδίδουν και τα βασικά αποστραγγιστικά χαρακτηριστικά στο τελικό προϊόν. Η χρήση των υδατοπερατών ταπήτων κυρίως προορίζεται για αντιπλημμυρικά μέτρα προστασίας προκειμένου να αντικαταστήσουν τα παραδοσιακά. Τα τελευταία χρόνια είναι εκτενής η κατασκευή και η χρήση εναλλακτικών αντιπλημμυρικών μέτρων προστασίας όπως το διαπερατό σκυρόδεμα (1).

Αν και θα παρουσιαστούν εκτενώς στην συνέχεια του Κεφαλαίου, τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα τέτοιων δαπέδων είναι η επίτευξη ενός πιο ασφαλούς οδοστρώματος λόγω της γρήγορης απορροής των όμβριων υδάτων, η μείωση κόστους κατασκευής του δικτύου όμβριων λόγω παραλαβής μικρότερων φορτίων, ο καθαρισμός του νερού λόγω της διήθησης, η εξασφάλιση του εμπλουτισμού του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, καθώς και η δυνατότητα διαχείρισης του ύδατος που παροχετεύεται. Οι υδατοδιαπερατοί τάπητες μπορούν να εφαρμοστούν ακόμη και τμηματικά σε επιφάνειες, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε συνδυασμό με σχάρες για τη γρήγορη απομάκρυνση του νερού σε περίπτωση υψηλής βροχόπτωσης (1).

Τα βασικά κριτήρια για την επιλογή του συγκεκριμένου τύπου εναλλακτικής αντιπλημμυρικής προστασίας συνοψίζονται στον πίνακα 1. Η τελική επιφάνεια ενός υδατοδιαπερατού τάπητα μπορεί να είναι το διαπερατό-πορώδες σκυρόδεμα, η πορώδης άσφαλτος ή οι κυβόλιθοι σκυροδέματος με διάκενα, με ή χωρίς φυτική γη. Τα βασικά χαρακτηριστικά των υδατοδιαπερατών ταπήτων συνοψίζονται στον πίνακα 2 (1).

Πίνακας 1. Βασικά Κριτήρια Επιλογής Υδατοδιαπερατών Ταπήτων

Κριτήριο Σχεδιασμού	Οδηγίες
Τοποθεσία-Εδαφος	Θα πρέπει να ελέγχεται το πορώδες και η διαπερατότητα του εδάφους, το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα και το βάθος του βραχώδους υποστρώματος.
	Αυτά τα δάπεδα δεν συνιστώνται σε εδάφη με κλίσεις μεγαλύτερες του 5%, ενώ λειτουργούν καλύτερα για εδάφη με μηδενικές ή πολύ μικρές κλίσεις (έως 2%)
	Ελάχιστος ρυθμός διήθησης 1,3 cm/h σε βάθος 1 m από τον πυθμένα της βάσης του δαπέδου.
	Ελάχιστο βάθος μέχρι το βραχώδες υπόστρωμα ή μέγιστο ύψος του υδροφόρου ορίζοντα ίσο με 1,2 m
	Ελάχιστη απόσταση από θεμελιώσεις κτιρίων 3-30 m, ανάλογα με την κλίση του εδάφους
	Η επιφάνεια αποστράγγισης θα πρέπει να είναι μικρότερη από 60 στρέμματα
	Ελάχιστη απόσταση από πηγές ύδρευσης ίση με 30 m
	Δεν συνιστώνται σε τοποθεσίες στις οποίες επικρατούν ισχυροί ανέμοι, που μεταφέρουν φερτά υλικά και μειώνουν το πορώδες των ταπήτων.
	Δεν συνιστώνται επίσης σε αμμώδη εδάφη, σε αργιλικά τα οποία χάνουν την σταθερότητά τους μόλις έρθουν σε επαφή με το νερό, και σε εδάφη με υδατοαπορροφητικότητα μικρότερη των 0,36 mm/h.
Συνθήκες Κυκλοφορίας	Κατάλληλα για χώρους στάθμευσης και οδούς με χαμηλό κυκλοφοριακό φορτίο (κυρίως σε αστικές οδούς)
	Δεν ενδείκνυται για οδούς με μεγάλο κυκλοφοριακό φορτίο ή με κίνηση βαρέων οχημάτων
	Οι εργασίες αποχιονισμού και η χρήση αντιπαγωτικών μέσων και μέτρων θα πρέπει να εκτελούνται με προσοχή. Γι'αυτό τέτοια δάπεδα θα πρέπει να σηματοδοτούνται κατάλληλα.

Πίνακας 2. Βασικά χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων υδατοδιαπερατών ταπήτων

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΠΟΡΩΔΗΣ ΑΣΦΑΛΤΟΣ	ΔΙΑΠΕΡΑΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	ΚΥΒΟΛΙΘΟΙ
Χρώμα-Αισθητική	Μαύρο ή σκούρα φαιά απόχρωση	Ανοιχτό γκρι και περιορισμένη ποικιλία χρωμάτων	Διάφορα χρώματα με ενσωμάτωση πιγμέντων και διάφορα σχέδια
Κατασκευαστική ευκολία	Η θερμοκρασία κατά την εφαρμογή στο εργοτάξιο είναι κρίσιμη για τη διάρκεια ζωής. Η κυκλοφορία αποκαθίσταται 24 ώρες μετά την εφαρμογή	Απαιτεί την κατασκευή καλουπιών. Κρίσιμος είναι ο λόγος w/c για τη διάρκεια ζωής. Η κυκλοφορία αποκαθίσταται 7 μέρες μετά την εφαρμογή.	Πολύ καλή ποιότητα λόγω της προκατασκευής. Δεν απαιτείται η χρήση καλουπιών. Μπορεί να τοποθετηθεί οποιαδήποτε εποχή του χρόνου.
Ανθεκτικότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες	Απαιτείται λιγότερη ποσότητα αντιπαγωτικών μέσων. Το χιόνι λιώνει και αμέσως απομακρύνεται στην υπόβαση. Το πάγωμα μπορεί να προκαλέσει φθορές στη μάζα της ασφάλτου	Δεν συνιστώνται χημικά αντιπαγωτικά. Αποχιονισμός με απλά μέσα. Το χιόνι λιώνει αμέσως και απομακρύνεται στην υπόβαση. Το πάγωμα μπορεί να προκαλέσει φθορές στη μάζα του σκυροδέματος.	Απαιτείται γενικά λιγότερη ποσότητα αντιπαγωτικών μέσων. Αποχιονισμός με απλά μέσα. Το χιόνι λιώνει αμέσως και απομακρύνεται στην υπόβαση. Η ύπαρξη πάγου δεν προκαλεί φθορές στην τελική επιφάνεια.
Καθαρισμός επιφάνειας	Ο καθαρισμός πραγματοποιείται με σκούπες, με χρήση ατμού ή με υγρό καθάρισμα. Καθίσταται δύσκολος ο καθαρισμός ταπήτων των οποίων το πορώδες έχει μειωθεί σημαντικά και σε μεγάλο βάθος.	Ο καθαρισμός πραγματοποιείται με σκούπες, με χρήση ατμού ή με υγρό καθάρισμα. Καθίσταται δύσκολος ο καθαρισμός ταπήτων των οποίων το πορώδες έχει μειωθεί σημαντικά και σε μεγάλο βάθος.	Ο καθαρισμός πραγματοποιείται με σκούπες, με χρήση ατμού. Τα αδρανή στα διάκενα μπορούν να απομακρυνθούν εύκολα και να αντικατασταθούν εφόσον μειώνουν την περατότητα της επιφάνειας.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή μελετάται το διαπερατό σκυρόδεμα το οποίο και παρουσιάζεται στη συνέχεια.

1.2 Ορισμός του διαπερατού σκυροδέματος

Το διαπερατό σκυρόδεμα είναι ένα μίγμα χονδρόκοκκων αδρανών, τσιμέντου, νερού, το οποίο περιέχει ελάχιστη ως μηδενική ποσότητα λεπτόκοκκων αδρανών και ίσως και διάφορα πρόσμικτα. Είναι ένας τύπος σκυροδέματος όπου το πορώδες δε βρίσκεται στα αδρανή (σε αντίθεση με τα ελαφροσκυροδέματα) αλλά μέσα στον ίδιο τον ιστό του σκυροδέματος (2). Ο όρος αυτός συνήθως περιγράφει ένα σκυρόδεμα «ανοικτού τύπου» και μηδενικής κάθισης (zero slump) (3). Είναι επίσης γνωστό ως πορώδες, ή "μη λεπτόκοκκο" ή διαπερατό σκυρόδεμα όπως επίσης και σκυρόδεμα ενισχυμένου διαπερατού (Enhanced Porosity Concrete – EPC) (4).

Το διαπερατό σκυρόδεμα είναι ουσιαστικά ένα μακροπορώδες σκυρόδεμα με συνεχή κενά, τα οποία ενσωματώνονται σκοπίμως στο σκυρόδεμα (5). Ο σχεδιασμός του με τη χρήση συγκεκριμένης ποσότητας τσιμεντόπαστας, ελάχιστης με σκοπό την επικάλυψη των χονδρόκοκκων αδρανών, διευκολύνει τη διαμόρφωση αυτού του διασυνδεδεμένου δικτύου πόρων στο υλικό, γεγονός που επιτρέπει τη διέλευση του νερού σε ένα πολύ υψηλότερο ποσοστό από ότι τα συμβατικά σκυροδέματα (6). Το διαπερατό σκυρόδεμα λοιπόν ανήκει σε μια εντελώς διαφορετική κατηγορία από τα συμβατικά σκυροδέματα και ως εκ τούτου, τα φυσικά χαρακτηριστικά του διαφέρουν σημαντικά από εκείνα των τελευταίων (5).

Ο λόγος που οδήγησε στην παραγωγή του διαπερατού σκυροδέματος είναι η ανάγκη της διαχείρισης των ομβρίων υδάτων, η αποφυγή των πλημμυρικών απορροών καθώς και η διαφύλαξη και αποφυγή της μόλυνσης των φυσικών υδάτινων πόρων (7). Η διαπερατότητα του διαπερατού σκυροδέματος-που αποτελεί και την κυριότερη ιδιότητά του-επιτρέπει τη διήθηση μεγάλων ποσοτήτων νερού εντός του ιστού του οδηγώντας το τελικά στο υπέδαφος και αναπληρώνοντας άμεσα τα διαθέσιμα αποθέματα του υδροφόρου ορίζοντα (8).

Ουσιαστικά, το διαπερατό σκυρόδεμα αποτελεί μία πολύ καλή και συνάμα εξαιρετικά χαμηλού κόστους λύση πράσινης ανάπτυξης, στην προσπάθεια διαχείρισης των υδάτινων πόρων καθώς και της προστασίας του φυσικού περιβάλλοντος.

1.3 Σύσταση διαπερατού σκυροδέματος

Παρά το γεγονός ότι οι κρίσιμες πληροφορίες σχετικά με την επιρροή του ποσοστού των κενών χώρων, του λόγου w/c, τα χαρακτηριστικά της τσιμεντόπαστας, την και 'όγκο αναλογία και το μέγεθος των χονδρόκοκκων αδρανών καθώς και των αντοχών του διαπερατού σκυροδέματος μελετώνται διεξοδικά τα τελευταία χρόνια, κυρίως στην Αμερική, οι ιδανικές συνθήκες και η βέλτιστη αναλογία των υλικών για την παραγωγή καλής ποιότητας διαπερατού σκυροδέματος δεν έχουν ακόμη επαρκώς τεκμηριωθεί.

Η μελέτη της σύνθεσης, η μέθοδος ανάμιξης και η συμπύκνωση για την παραγωγή διαπερατού σκυροδέματος με δυναμικά υψηλότερες αντοχές σε συγκεκριμένο λόγο κενών εξακολουθούν να αποτελούν σημαντική παράμετρο έρευνας. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι το διαπερατό σκυρόδεμα είναι ένα ειδικού τύπου σκυρόδεμα, που απαιτεί ειδική μελέτη σύνθεσης και συμπύκνωσης, έτσι ώστε να επιτραπεί κατά τη φάση της τοποθέτησης η δημιουργία όσο το δυνατόν περισσότερων συνεχόμενων κενών χώρων (κανάλια), σε αναλογία πάντοτε με την καλή συμπεριφορά του σε αντοχή και θλίψη (5). Υπάρχει δηλαδή μία συνεχής πρόκληση στην αναζήτηση της χρυσής τομής στην εξισορρόπηση μεταξύ του ποσοστού των κενών (άρα και της διαπερατότητας) και των αντοχών, καθότι ως μεγέθη αυτά τα δύο είναι αντιστρόφως ανάλογα.

Τα χονδρόκοκκα αδρανή μπορούν να είναι είτε ποταμίσια είτε θραυστά. Η ανοικτή δομή του σκυροδέματος αυξάνει την έκθεση της ειδικής επιφάνειας, γι' αυτό απαιτείται κάποιες φορές η χρήση επιβραδυντών για να αυξηθεί ο χρόνος εργασιμότητας και να διευκολυνθεί η εύκολη διάστρωση. Ο λόγος νερού προς τοιμέντου κινείται σε χαμηλά πλαίσια (0.27 – 0.43) για να επιτευχθεί μια ουσιαστικά μηδενική κάθιση. Σε ψυχρό περιβάλλον ενδείκνυται η χρήση αερακτικών για να βελτιωθεί η ανθεκτικότητα σε ψύξη-απόψυξη, με τιμές αέρα που προτείνει η NRMCA 4-8%.

Σημειώνεται ότι η εργασιμότητα είναι ένας κρίσιμος παράγοντας στο σχεδιασμό, γιατί περίσσεια νερού οδηγεί σε δραματική μείωση των κενών, άρα και της διαπερατότητας. Ακόμα και στο Μηδενικής Κάθισης Σκυρόδεμα είναι εμφανής η διαφορά του τελειώς ύφυγρου από το εξαιρετικά υδαρές σκυρόδεμα (7)

1.4 Ιδιότητες διαπερατού σκυροδέματος

Όπως προαναφέρθηκε, η σύνθεση των παραπάνω υλικών παράγει ένα μίγμα με συγκεκριμένο πορώδες (διαστάσεων περίπου 2-8 mm), το οποίο επιτρέπει στο νερό να διέρχεται εύκολα. Στο διαπερατό σκυρόδεμα, το ποσοστό των κενών είναι απευθείας ανάλογο με τη διαπερατότητα και κυμαίνεται περίπου από 15-50% , ενώ οι αντοχές -ανάλογα με τη χρήση – μπορούν να κυμανθούν από 2,8-28 MPa. Η διαπερατότητά του σύμφωνα με το ACI 522R-06 κυμαίνεται από 80-730 lt/min/m² (7). Βέβαια οι τιμές αυτές είναι οι ακραίες δυνατές που έχουν αναφερθεί, ενώ σε ένα τυπικό παράδειγμα διαπερατού σκυροδέματος με ικανοποιητικές αντοχές, το ποσοστό των κενών χώρων κυμαίνεται σε ποσοστό 15-25%, ενώ η διαπερατότητα περί τα 200 lt/min/m² (9)

Στο πλαίσιο αυτής της παραγράφου μελετώνται διεξοδικότερα οι φυσικομηχανικές ιδιότητες του διαπερατού σκυροδέματος όπως είναι η υδατοπερατότητα, οι αντοχές σε θλίψη, η ανθεκτικότητα του σε συνθήκες ψύξης απόψυξης κ.τ.λ.

1.4.1 Υδατοπερατότητα

Ο σχεδιασμός του σκυροδέματος αυτού δεν γίνεται τόσο βάσει της αντοχής, αλλά βάσει κυρίως του όγκου κενών και της υδατοπερατότητας, καθότι η

τελευταία αποτελεί και τη σημαντικότερη ιδιότητά του. Το ποσοστό κενών πρέπει να είναι μεγαλύτερο του 10% για να υπάρξει ικανοποιητική διήθηση του νερού εντός του ιστού των αδρανών και του συνδετικού μέσου.

Η υδατοπερατότητα αυτού του τύπου σκυροδέματος πρέπει να συμβαδίζει με την απορροφητικότητα του εδάφους που βρίσκεται ως υπόστρωμα έτσι ώστε ο συνδυασμός αυτών των δυο υλικών να λειτουργεί αρμονικά στην σωστή διαχείριση των όμβριων υδάτων. Στον ακόλουθο πίνακα φαίνεται η κατηγοριοποίηση των εδαφών ανάλογα με την διαπερατότητα του (k).

Η επιθυμητή διαπερατότητα είναι της τάξης του 10^{-3} έως 10^2 cm/sec σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 3 (7).

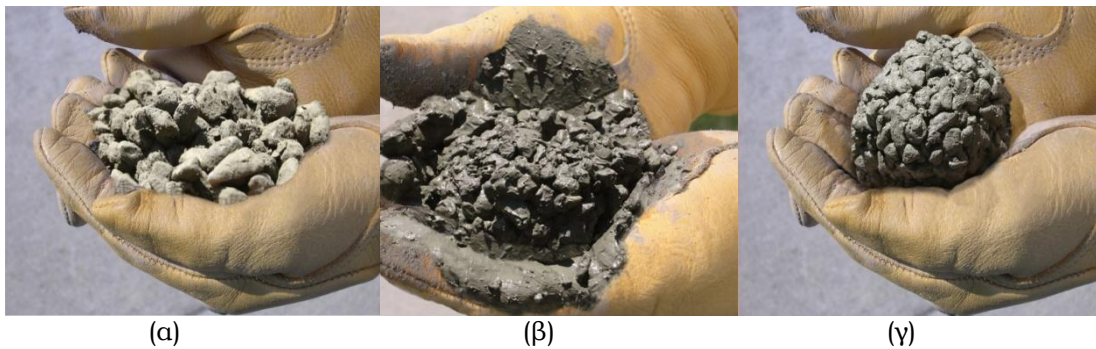
Πίνακας 3. Συγκριτική διαπερατότητα σε εδάφη

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ														
K (cm/s)	10²	10¹	10⁰	10⁻¹	10⁻²	10⁻³	10⁻⁴	10⁻⁵	10⁻⁶	10⁻⁷	10⁻⁸	10⁻⁹	10⁻¹⁰	
Σχετική διαπερατότητα	Περατό			Ημιπερατό				Αδιαπέρατο						
Υδροφορία	Καλή				Μέτρια				Καμία					
Ασυμπύκνωτη άμμος και χαλίκι	Καλά διαβαθμισμένο χαλίκι	Καλά διαβαθμισμένη άμμος ή αμμοχάλικο			Πολύ λεπτή άμμος - ιλύς									
Ασυμπύκνωτη άργιλος-οργανικά					τύρφη	Στρωματώδης άργιλος			Μη αποσαθρωμένη άργιλος					
Συνεκτικά πετρώματα	Υψηλός βαθμός διάρρηξης πετρωμάτων				Πετρώματα με ικανότητα αποθήκευσης πετρελαίου			Υγιής ψαμμίτης	Υγιής ασβεστόλιθος - δολομίτης		Υγιής γρανίτης			

1.4.2 Θλιπτικές αντοχές

Η αντοχή σε θλίψη του διαπερατού σκυροδέματος επηρεάζεται έντονα από το λόγο w/c και τον τρόπο συμπύκνωσης κατά τη διάρκεια της τοποθέτησης. Ο λόγος w/c στο διαπερατό σκυρόδεμα είναι πολύ πιο σημαντικός για την ανάπτυξη των θλιπτικών αντοχών του σε σχέση με τον αντίστοιχο λόγο σε ένα συμβατικού τύπου σκυρόδεμα. Ένας υψηλός λόγος w/c μπορεί να οδηγήσει σε πολύ ρευστή τσιμεντόπαστα που θα γεμίσει τα κενά της δομής του. Αντίθετα, ένας χαμηλός λόγος w/c οδηγεί σε μειωμένη εργασιμότητα και προβλήματα κατά την τοποθέτηση. Η εμπειρία έχει δείξει ότι ένας λόγος w/c από 0,26 έως 0,45 παρέχει καλή επικάλυψη των αδρανών και σταθερότητα στην επικόλληση της πάστας με τα τελευταία. Επίσης, η συνολική περιεκτικότητα σε τσιμέντο είναι εξίσου σημαντική για την ανάπτυξη των θλιπτικών αντοχών και των κενών χώρων. Ένα υψηλό περιεχόμενο σε τσιμεντόπαστα θα οδηγήσει σε ένα “γέμισμα” των κενών χώρων και, κατά συνέπεια, το πορώδες θα μειωθεί, ενώ μία ανεπαρκής ποσότητα τσιμέντου μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της επικάλυψης των αδρανών με τσιμεντόπαστα και εν τέλει μειωμένες θλιπτικές αντοχές. Η βέλτιστη ποσότητα σε τσιμεντόπαστα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κοκκομετρική διαβάθμιση και το μέγεθος των αδρανών (3). Στην

εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζονται τρεις διαφορετικές περιπτώσεις λόγων w/c για την ίδια υπό μελέτη σύνθεση.



Εικόνα 1. Διαφορετικές περιπτώσεις λόγου w/c

Από την παραπάνω εικόνα γίνεται αντιληπτό πως τα προκύπτοντα αναμείγματα (α) και (β) -χαμηλός και υψηλός λόγος w/c αντίστοιχα- απορρίπτονται διότι στην πρώτη περίπτωση το προκύπτον διαπερατό σκυρόδεμα θα αποσαθρώνεται ενώ στην δεύτερη περίπτωση θα μειωθεί το ποσοστό των κενών στη δομή του. Αποδεκτή θεωρείται η (γ) εκδοχή.

1.4.3 Ποσοστό κενών χώρων/ Ειδικό βάρος

Ο ανθρώπινος παράγοντας διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη σκυροδέτηση του διαπερατού σκυροδέματος και πρέπει πάντοτε να λαμβάνεται υπόψη. Η σωστή συμπύκνωση είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας. Αν το διαπερατό σκυρόδεμα υπερσυμπυκνωθεί τότε η τσιμεντόπαστα κατακάθεται στη βάση των δοκιμίων με αποτέλεσμα να τα φράζει και το νερό της βροχής δεν βρίσκει δίοδο να αποστραγγιστεί. Αντίθετα αν το διαπερατό σκυρόδεμα δεν συμπυκνωθεί αρκετά τότε εμφανίζει χαμηλές αντοχές καθώς και αποκόλληση αδρανών από την επιφάνεια του. Σύμφωνα με τα τελευταία ερευνητικά αποτελέσματα της Αμερικής η συμπύκνωση κατά τη χύτευση δοκιμίων διαπερατού σκυροδέματος πρέπει να γίνεται σύμφωνα με τις προδιαγραφές του ACI 522R-06 (10).

Το ποσοστό των κενών χώρων σχετίζεται άμεσα με το ειδικό βάρος ενός δεδομένου μείγματος διαπερατού σκυροδέματος. Το ποσοστό των κενών χώρων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από διάφορους παράγοντες όπως: η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών, η ποσότητα του τσιμέντου, ο λόγος w/c και ο τρόπος συμπύκνωσης. Ο τρόπος συμπύκνωσης έχει μια επιρροή στο περιεχόμενο ποσοστό των κενών αέρα (και του ειδικού βάρους) μιας δεδομένης σύνθεσης (3).

1.4.4 Ανθεκτικότητα σε ψύξη απόψυξη

Ο όρος ανθεκτικότητα αναφέρεται στο χρόνο ζωής του διαπερατού σκυροδέματος υπό δεδομένες συνθήκες περιβάλλοντος. Δεδομένου ότι το διαπερατό σκυρόδεμα είναι ένα άοπλο σκυρόδεμα, το φαινόμενο της ενανθράκωσης καθώς και η επίδραση των χλωριόντων δεν αποτελούν τους βασικούς παράγοντες επίδρασης της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος. Η ιδιαιτερότητα του συγκεκριμένου τύπου σκυροδέματος, που είναι το μεγάλο του

πορώδες, διαμορφώνει και τα αίτια που μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος αυτού, όπως π.χ. την έκθεση σε ακραίες θερμοκρασίες και σε χημικές ουσίες, όπως θειικά και όξινα. Δεν υπάρχει σαφής βιβλιογραφική παραπομπή σε πρότερη έρευνα σχετικά με την αντοχή του διαπερατού σκυροδέματος στην επιθετική προσβολή των θεικών ή του όξινου νερού.

Το μεγάλο πορώδες του διαπερατού σκυροδέματος δημιουργεί ανησυχίες για την συμπεριφορά του σε ψυχρές περιοχές και στην αντοχή του σε φαινόμενα ψύξης/απόψυξης. Το διαπερατό σκυρόδεμα αποτελείται από διασυνδεδεμένους πόρους που μπορούν να αποθηκεύσουν και να μεταφέρουν νερό και κατά συνέπεια στη διάρκεια εκδήλωσης φαινομένων όπως οι χιονοπτώσεις μπορεί να συγκρατήσει εσωτερικά της δομής του χιόνι το οποίο κατά την ψύξη-απόψυξη να επιφέρει ζημιές στον ιστό του σκυροδέματος (9).

Τα αδρανή στο διαπερατό σκυρόδεμα περιβάλλονται από ένα πολύ λεπτό (~1mm) στρώμα πάστας τσιμέντου που μπορεί να κορεστεί σχετικά γρήγορα, καθώς το νερό περνά μέσα από τη δομή του σκυροδέματος. Ενώ στα ψυχρά κλίματα αποβλέπουν στην πρόληψη της αποθήκευσης νερού στο διαπερατό σκυρόδεμα, η πάστα μπορεί να κορεστεί από το νερό όταν αυτό κινείται μέσα στη μάζα του, παγιδεύοντας την υγρασία στο εσωτερικό των χονδρόκοκκων αδρανών. Αντίθετα από το συμβατικό σκυρόδεμα, το διαπερατό σκυρόδεμα επιτρέπει μεγάλες ποσότητες νερού να διαπεράσουν τη δομή του, και έτσι υπάρχει η δυνατότητα ανάπτυξης μεγάλων υδραυλικών πιέσεων κατά την κατάψυξη. Ως εκ τούτου, δεδομένου ότι το νερό διαστέλλεται 9% κατά την ψύξη, η ανθεκτικότητα του πορώδους σκυροδέματος σε περιβάλλον ψύξης/απόψυξης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το βαθμό κορεσμού του νερού στον οποίον έχει υποβληθεί το σκυρόδεμα. Αντίθετα από τα συμβατικά σκυροδέματα, το πορώδες σκυρόδεμα δεν πρέπει ποτέ να βρεθεί σε πλήρη κορεσμό νερού· αν σχεδιάζεται και συντηρείται σωστά, θα πρέπει πάντα να αποστραγγίζεται (11,12). Παρ' όλα αυτά, η προσθήκη αερακτικών και κατά συνέπεια η ύπαρξη εγκλωβισμένου αέρα έχει αποδειχθεί ότι μειώνει τις βλάβες που προκαλούνται κατά τους κύκλους της ψύξης/απόψυξης στο διαπερατό σκυρόδεμα με τον ίδιο τρόπο όπως και στο συμβατικό σκυρόδεμα (12, 13).

Οι πρώτες τεκμηριωμένες έρευνες για την αντοχή σε ψύξη/απόψυξη του διαπερατού σκυροδέματος με τσιμέντο Portland (PCPC, Portland Cement Pervious Concrete) έγιναν στο Βέλγιο και την Ιαπωνία. Στην Ιαπωνία (30), αναπτύχθηκε ένα ρητινούχο διαπερατό σκυρόδεμα για οδοστρώματα σε αυτοκινητόδρομους. Το μείγμα με τις καλύτερες επιδόσεις περιείχε λόγο πολυμερούς προς τσιμέντο 15, φτάνοντας την αντοχή σε θλίψη τα 32MPa (4650 psi), και 5,7 MPa (825 psi) αντοχή σε κάμψη έχοντας πορώδες 25%. Σημαντικές βελτιώσεις στην αντοχή σε ψύξη/απόψυξη και αντίσταση σε αποπάγωση εμφανίστηκε σε λόγο πολυμερούς προς τσιμέντο γύρω στο 10, λόγω της δημιουργίας συνεχόμενου φιλμ πολυμερούς (14). Κατά τους Tamai και Yoshida η αντίσταση σε ψύξη/απόψυξη ήταν ανάλογη με το ποσό του συνδετικού υλικού. Επίσης, η πυριτική παιπάλη και τα αερακτικά πρόσθετα βελτιώνουν την ανθεκτικότητα του PCPC σε ψύξη/απόψυξη (15).

Η Εθνική Ένωση Ετοιμού Σκυροδέματος των ΗΠΑ (National Ready-Mixed Concrete Association - NRMCA) (16) απέδειξε ότι το PCPC είχε κακή αντίσταση στην ψύξη/απόψυξη όταν είναι πλήρως κορεσμένο και υποστήριξε ότι η διαδικασία δοκιμής ASTM C666A (17) ήταν υπερβολικά αυστηρή και δεν ήταν ενδεικτική των πραγματικών συνθηκών. Το έγγραφο παρέχει μια αντιπροσωπευτική λίστα εφαρμογών του πορώδους σκυροδέματος στις ΗΠΑ, συμπεριλαμβανομένων και ορισμένων σε υγρές και παγωμένες περιοχές που είχαν εγκατασταθεί ήδη από το 1985. Η NRMCA κατέληξε, πως πρέπει να δίνεται προσοχή κατά τη διάστρωση του διαπερατού σκυροδέματος συγκεκριμένα σε συνθήκες ψύξης/απόψυξης, λόγω της περιορισμένης εμπειρίας.

Οι Yang Z., Brown H., και Cheney A. (18) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η κατάσταση κορεσμού έπαιξε σημαντικό ρόλο στην αντοχή ψύξης/απόψυξης και οι κορεσμένοι κενοί χώροι των δοκιμίων διαπερατού σκυροδέματος (vacuum saturated pervious concrete samples) εμφανίζουν καλύτερη αντίσταση σε ψύξη/απόψυξη από παρόμοια κατασκευασμένα συμβατικού σκυροδέματος. Μερικώς κορεσμένα PCPC κατεψυγμένα και αποψυγμένα σε αέρα για την προσομοίωση σε πραγματικές συνθήκες έδειξαν υψηλή αντοχή, ενώ η μεγαλύτερη φθορά λόγω ψύξης/απόψυξης παρατηρήθηκε στην πάστα του τσιμέντου. Η Ένωση Ετοιμού Σκυροδέματος του Οχάιο παρουσίασε μια σύνοψη των εφαρμογών του διαπερατού σκυροδέματος στα βορειοανατολικά των ΗΠΑ, που χαρακτηρίζεται από συνθήκες υγρές και κρύες. Και πάλι, οι περισσότερες εγκαταστάσεις είχαν μόνο ένα με δύο χρόνια παλαιότητας, και καμία δεν είχε αλλοιωθεί από την ψύξη/απόψυξη (19).

Πιο πρόσφατα, η Επιτροπή Διαχείρισης Κινδύνων Έρευνας & Εκπαίδευσης (RMC Research & Education Foundation) δημοσίευσε μια έκθεση για τις εφαρμογές του PCPC σε παρκινγκ και οδοστρώματα αυτοκινητοδρόμων, η οποία αναφέρει τις επιτόπιες παρατηρήσεις και τα αποτελέσματα μη καταστρεπτικών δοκιμών από εφαρμογές διαπερατού σκυροδέματος στο Οχάιο, Κεντάκι, Κολοράντο, Ιντιάνα, και Πενσυλβανία. Οι εφαρμογές είχαν κατασκευαστεί στις περιοχές το πολύ τέσσερα χρόνια πριν και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι εγκαταστάσεις είχαν καλές αποδόσεις σε φαινόμενα ψύξης/απόψυξης με μικρή απόφραξη και την απαιτούμενη συντήρηση. Οποιαδήποτε ζητήματα αντοχής συνδέθηκαν με μηχανική καταπόνηση (structural overload) (20).

Ξεκινώντας στα τέλη του 2004, το πανεπιστήμιο της Αϊόβα (Iowa State University – ISU, άρχισε να ερευνά την πιθανή εφαρμογή του διαπερατού σκυροδέματος σε ψυχρά κλίματα. Ο στόχος ήταν να αξιολογηθούν ήδη χρησιμοποιούμενα μείγματα μέσω της δοκιμής ASTM C666A, με διαδικασία πλήρους κορεσμού σε ψύξη/απόψυξη, και να αναπτυχθούν μείγματα κατάλληλα για χρήση σε βόρεια κλίματα. Τα αποτελέσματα της αρχικής μελέτης παρουσιάζονται στους Kevern et al. (21), Schaefer et al. (13), και Kevern (22,23). Η απώλεια μάζας της τάξεως του 15% χρησιμοποιήθηκε για να αντιπροσωπεύουν ένα επίπεδο λειτουργικότητας όπως προσδιορίζεται από οπτική ανάλυση. Μείγματα που περιείχαν άμμο, λατέξ, ή και τα δύο είχαν καλύτερη αντίσταση στην φθορά λόγω ψύξης/απόψυξης από τα μείγματα που

περιείχαν μόνο ένα μέγεθος αδρανών (single-sized aggregates). Επίσης, τα μείγματα που περιείχαν αδρανή και άμμο παρουσίασαν την καλύτερη συμπεριφορά, ενώ τα μείγματα που περιείχαν και αερακτικά πρόσθετα παρουσίασαν ελάχιστη απώλεια μάζας της τάξης του 2% μετά από 300 κύκλους.

Ερευνητές στο πανεπιστήμιο της Αϊόβα ανέπτυξαν PCPC για εφαρμογές με αυτοκινούμενο μηχάνημα με ολισθαίνοντα σιδηρότυπο (slip form paver) για τον μετριασμό του θορύβου. Οι Kevern et al. (24) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η άμμος και οι μικρές ίνες πολυπροπυλενίου βελτίωσαν σημαντικά την αντοχή σε ψύξη/απόψυξη. Μία άλλη έρευνα χρησιμοποιώντας μια αυτοματοποιημένη συσκευή ελέγχου του αέρα κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ο εγκλωβισμός του αέρα απαντάται στο διαπερατό σκυρόδεμα και ο αυξημένος εγκλωβισμός του βελτιώνει την συμπύκνωση και την αντοχή σε ψύξη/απόψυξη (25).

Ακόμη μία μελέτη που αφορά στην σύνθεση σε πειράματα ψύξης/απόψυξης στο πανεπιστήμιο της Αϊόβα δημοσιεύτηκε από τους Kevern et al. (26). Η ανθεκτικότητα βελτιώθηκε με τη βελτιστοποίηση της αναλογίας του τσιμέντου προς τα αδρανή για συγκεκριμένες κοκκομετρικές διαβαθμίσεις αδρανών υλικών, και επιπρόσθετων λεπτόκοκκων αδρανών και ινών. Η αντοχή σε ψύξη/απόψυξη αυξήθηκε με την αύξηση της πυκνότητας για τις ίδιες αναλογίες των μειγμάτων. Αυξημένη αναλογία νερού προς τσιμέντο βελτίωσε την εργασιμότητα και, κατά συνέπεια, την πυκνότητα, βελτιώνοντας την αντοχή σε ψύξη/απόψυξη για τα μείγματα, χωρίς την προσθήκη άμμου. Διμερή μείγματα που συμπεριλάμβαναν διάφορα ποσοστά αναπλήρωσης της ιπτάμενης τέφρας και της πυριτικής παιπάλης έδειξαν μειωμένη αντοχή σε ψύξη/απόψυξη, ενώ τριμερή μείγματα, συμπεριλαμβανομένης της σκωρίας έδειξαν βελτιωμένη αντοχή σε εφελκυσμό και ανθεκτικότητα. Πρόσθετα με βάση το λατέξ βελτίωσαν την εργασιμότητα και την αντοχή, αλλά είχαν μικρή αντοχή σε ψύξη/απόψυξη σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C666A. Η αντοχή σε ψύξη/απόψυξη βελτιώθηκε με την ξήρανση των δοκιμών ολοκληρωτικά μετά την ωρίμανση και μετά τον επανακορεσμό πριν από τη δοκιμή για να επιτραπεί ο σχηματισμός του πολυμερικού φιλμ (26).

Το κυριότερο εμπόδιο για την εφαρμογή του πορώδους σκυροδέματος με τσιμέντο Portland στις ψυχρές περιοχές των ΗΠΑ είναι η έλλειψη των δεδομένων και των σωστών εργαστηριακών μεθόδων για την επαλήθευση της ανθεκτικότητας του συγκεκριμένου τύπου σκυροδέματος σε περιβάλλον ψύξης/απόψυξης (16). Υπάρχει μια σειρά μεθόδων κατά τις οποίες το δοκίμιο σκυροδέματος υπόκειται σε κύκλους ψύξης και απόψυξης. Η συχνότερα εφαρμοζόμενη μέθοδος αφορά στη διαδικασία ψύξης ενός δοκιμίου σε ξηρό περιβάλλον και στην απόψυξή του σε κορεσμένες συνθήκες (ASTM C666B) (17) ή κάτω από πιο ακραίες συνθήκες καταψύχοντας και αποψύχοντας το δοκίμιο σε πλήρως κορεσμένο περιβάλλον (ASTM C666A) (17). Αυτές οι τυποποιημένες μέθοδοι για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας σε ψύξη/απόψυξη συμπεριλαμβάνουν την μεταβολή του μήκους στο δοκίμιο καθώς και της δυναμικής συχνότητας (ASTM C215-08) (27). Είναι δύσκολο να εφαρμοστούν αυτές οι τεχνικές στο διαπερατό σκυρόδεμα, αφού σχεδιάστηκαν

για το συμβατικό σκυρόδεμα, και να παραχθούν σταθερά αποτελέσματα. Για παράδειγμα, η δομή του διαπερατού σκυροδέματος με τσιμέντο Portland (PCPC) προκαλεί ασαφή προσδιορισμό της θεμελιώδους συχνότητας (6). Για το PCPC, η απώλεια μάζας έχει χρησιμοποιηθεί ως ένδειξη της ανθεκτικότητας σε ψύξη/ απόψυξη. Οι Yang and Jiang (28) ανέφεραν μια απώλεια μάζας του 0,25% μετά από 25 κύκλους σε δοκίμια που περιείχαν πυριτική παιπάλη και υπερρευστοποιητές σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C666 (Διαδικασία Β). Τα μείγματα Βελγίου που περιείχαν λατέξ εξετάστηκαν για 14 κύκλους με ASTM C666 - Διαδικασία Α και παρήγαγαν μια σχετική αντοχή σε εφελκυσμό μεταξύ 10% και 26%, η οποία μετρήθηκε με άμεση δοκιμή εφελκυσμού (29).

Ο ρυθμός των κύκλων ψύξης/απόψυξης επηρεάζει επίσης την συμπεριφορά του PCPC. Αποτελέσματα δείχνουν ότι τα δείγματα που εναλλάσσονται σε πέντε ή έξι κύκλους την ημέρα επιδεινώνονται πολύ γρηγορότερα από τα δείγματα που υποβάλλονται σε ένα μόνο κύκλο ανά ημέρα. Σε 80 κύκλους ψύξης/απόψυξης, τα δείγματα που υποβλήθηκαν σε ταχύτερο ρυθμό ψύξης/απόψυξης είχαν σχετική δυναμική συχνότητα μικρότερη από 40%, ενώ στον βραδύτερο ρυθμό είχαν σχετική δυναμική συχνότητα μεγαλύτερη από 90% (6).

Το 2008 δημοσιεύτηκε έρευνα από την ένωση τσιμέντου Portland (24). Τα αποτελέσματα των δοκιμών ψύξης/απόψυξης φαίνονται στον πίνακα 1.5. Ως αρχικά όρια δοκιμών ελήφθησαν είτε το 60% του αρχικού μέτρου ελαστικότητας (RDM) ή το 85% της απομένουσας μάζας, ενώ επίσης καθορίστηκαν παράγοντες ανθεκτικότητας (DF) για 95%, 97% και 99% της εναπομένουσας μάζας. Τα δείγματα με γρανίτη είχαν την καλύτερη αντοχή σε ψύξη/απόψυξη με τα τέσσερα δοκίμια με γρανίτη να επιτυγχάνουν μεγαλύτερο από 60% DF (RDM) και 85% DF (μάζα). Οι χαμηλότερες ανταποκρίσεις σε ψύξη/απόψυξη εμφανίστηκαν σε δείγματα με χαλίκι ποταμού από την Ινδιάνα, το οποίο δεν αναμενόταν καθώς τα δείγματα είχαν αποδεκτές αντοχές θλίψης και εφελκυσμού, 20,4 MPa και 2,95 MPa, αντίστοιχα. Σε γενικές γραμμές τα δείγματα με υψηλότερη αντοχή παρουσίασαν μεγαλύτερη αντοχή σε ψύξη/απόψυξη, ενώ συγκρίνοντας τα δείγματα με ίδιες αναλογίες μείγματος αναφέρθηκε ότι και άλλοι παράγοντες έχουν επιπτώσεις στην αντοχή σε έντονες θερμοκρασιακές μεταβολές.

1.4.5 Ηχομόνωση

Λόγω της παρουσίας μεγάλου όγκου αλλά και σημαντικού μεγέθους διασυνδεδεμένων πόρων στο υλικό, το διαπερατό σκυρόδεμα είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό στον τομέα της ακουστικής απορρόφησης. Η μείωση του θορύβου που παρατηρείται κατά τη χρήση του, οφείλεται στο συνδυασμό της μείωσης του παραγόμενου θορύβου και της καλύτερης απορρόφησης του ήχου. Τα οδοστρώματα με διαπερατό σκυρόδεμα μεταβάλλουν την παραγωγή θορύβου, ελαχιστοποιώντας την “άντληση” του αέρα μεταξύ του ελαστικού και του οδοστρώματος. Επιπλέον, οι πόροι απορροφούν τον ήχο μέσω των εσωτερικών τριβών μεταξύ των κινούμενων μορίων του αέρα και των πορωδών τοίχων (3).

1.4.6 Περιβαλλοντικά Οφέλη

Τα δέντρα σχεδόν πάντοτε ευδοκιμούν με την παρουσία του διαπερατού σκυροδέματος, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2. Η φυσική διαδικασία διήθησης επιτρέπει τόσο στην υγρασία όσο και στο οξυγόνο να φτάσει στις ρίζες των δέντρων με τρόπο που συνήθως περιορίζεται από τα συμβατικά οδοστρώματα, γεγονός που μπορεί να αποδειχτεί ιδιαίτερος χρήσιμο σε ξηρές περιοχές όπου υπάρχει έντονη η επιθυμία για την καλύτερη αξιοποίηση του νερού λόγω λειψυδρίας (8). Τα δέντρα που φυτεύονται στα μέρη χώρων στάθμευσης και στα πεζοδρόμια πόλεων προσφέρουν σκιά καθώς και καλύτερες συνθήκες διαβίωσης, μειώνοντας περαιτέρω το μέγεθος των νησίδων θερμότητας. Το διαπερατό σκυρόδεμα είναι ιδανικό για την προστασία των δέντρων. Σε ένα συμβατά πλακοστρωμένο περιβάλλον όπως προαναφέρθηκε, ο αέρας και το νερό έχουν τη δυσκολία να φτάνουν στις ρίζες. Τα δάπεδα από διαπερατό σκυρόδεμα επιτρέπουν στα παρακείμενα δέντρα να λάβουν περισσότερο αέρα και νερό και να επιτρέψουν ακόμα περισσότερη χρήση της επιφάνειας του πορώδους δαπέδου. Το διαπερατό σκυρόδεμα παρέχει μια λύση για τους αρχιτέκτονες, που επιθυμούν να χρησιμοποιήσουν περισσότερη πρασινάδα στα μέρη χώρων στάθμευσης και τις πλακοστρωμένες αστικές περιοχές.



Εικόνα 2. Πάρκα διαστρωμένα με διαπερατό σκυρόδεμα

1.5 Εφαρμογές διαπερατού σκυροδέματος

Το διαπερατό σκυρόδεμα έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για χαμηλής κυκλοφορίας δρόμους, αυτοκινητόδρομους, πεζοδρόμια, υπαίθρια παρκινγκ, διαδρόμους γηπέδων γκολφ, τοίχων αντιστήριξης, προστασία πλαγιών και αποχετευτικά συστήματα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια ποικιλία εφαρμογών οδοποιίας χωρίς ουσιαστικά να αλλάζει την υδρολογία του εδάφους (2,30,31,32).

Ενώ, όπως προαναφέρθηκε, οι εφαρμογές του διαπερατού σκυροδέματος είναι πάρα πολλές, η κύρια χρήση του είναι στα οδοστρώματα.

1.5.1 Εφαρμογές οδοποιίας

Τα πλεονεκτήματα των οδοστρωμάτων από διαπερατό σκυρόδεμα σε σχέση με τα συμβατικού τύπου οδοστρώματα περιλαμβάνουν:

- Έλεγχο της ρύπανσης των όμβριων υδάτων στην πηγή τους

- Αύξηση των εγκαταστάσεων για στάθμευση, εξαλείφοντας την ανάγκη για περιοχές συγκράτησης του νερού
- Έλεγχο της απορροής των όμβριων υδάτων
- Μείωση υδρολίσθησης στην επιφάνεια των δρόμων και των αυτοκινητόδρομων
- Μείωση της αντανάκλασης στο οδόστρωμα σε μεγάλο βαθμό, ιδιαίτερα όταν είναι βρεγμένο το βράδυ
- Μείωση του θορύβου από την αλληλεπίδραση μεταξύ του ελαστικού και του οδοστρώματος
- Εξάλειψη ή μείωση του μεγέθους του αποχετευτικού δικτύου και
- Ανάπτυξη της βλάστησης (3,9,33,34,35).

Τέλος, σε σχέση με την ποιότητα του αέρα, η χρήση οποιουδήποτε σκυροδετημένου οδοστρώματος προσδίδει έναν πολύ υψηλότερο δείκτη ανάκλασης απ' ό,τι η πιο σκούρα επιφάνεια της ασφάλτου. Με αυτόν τον τρόπο εμφανίζονται χαμηλότερες θερμοκρασίες εδάφους και έτσι ο αντίκτυπος στη θέρμανση της ατμόσφαιρας (the Urban Heat Island Effect) είναι πολύ μικρότερος, μειώνοντας την πιθανότητα παραγωγής όζοντος. Αυτή η υψηλή ανακλαστικότητα καθιστά το οδόστρωμα από σκυρόδεμα αισθητά πιο εύκολο να φωτιστεί κατά τις νυχτερινές ώρες, συνεισφέροντας στην εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους φωτισμού, τόσο αρχικά όσο και κατά τη διάρκεια της ζωής του (11).

Οι μηχανικοί χρησιμοποιούν το διαπερατό σκυρόδεμα στο οδόστρωμα ως:

- Επιφάνεια κίνησης
- Διαπερατή βάση με επιπλέον χρήση του στην άκρη του οδοστρώματος για στράγγιση και
- Βοηθητικό οδόστρωμα δίπλα στο πρωτεύον (3).

1.5.2 Άλλες εφαρμογές

Επιπροσθέτως συμπληρωματικά εκτός από τις κύριες εφαρμογές χρησιμοποιείται και ως:

- ✓ Αποχετευτικός αγωγός – Σταθμοί παραγωγής ρεύματος και ύδατος χρησιμοποιούν διαπερατό σκυρόδεμα για την κατασκευή διαπερατών αποστραγγιστικών πλακών καθώς και αγωγών κάτω από υδραυλικά έργα. Οι αγωγοί αυτοί βοηθούν την ανύψωση της πίεσης και επιτρέπουν στα υπόγεια ύδατα να στραγγίζουν κάτω από τις σωλήνες αποχέτευσης.
- ✓ Θερμομονωτικό Υλικό - Η χρήση του ως σύστημα θερμικής αποθήκευσης στους ορόφους του θερμοκηπίου έχει διερευνηθεί από ερευνητές. Ο όροφος χρησίμευε ως αποθηκευτικός χώρος, όπως ένας εναλλάκτης θερμότητας για την ηλιακή θέρμανση του θερμοκηπίου. Το διαπερατό σκυρόδεμα έχει επίσης χρησιμοποιηθεί ως πλακόστρωτο στους ορόφους του θερμοκηπίου για να αποτρέψει το νερό να λιμνάσει και να εξαλείψει την ανάπτυξη των ζιζανίων, καθώς παράλληλα παρέχει μια ανθεκτική, σκληρή επιφάνεια για τη μετακίνηση του εξοπλισμού.
- ✓ Τάπητας σε γήπεδα τένις – Διαπερατό σκυρόδεμα έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς για την κατασκευή γηπέδων τένις στην Ευρώπη, καθώς επιτρέπει στο νερό να διεισδύσει και στη συνέχεια να στραγγίξει μέσω μιας βάσης

καλκίου στις άκρες της πλάκας. Ιπτάμενη τέφρα συμπεριλαμβάνεται σε κάποια από αυτά τα μίγματα για να αυξηθεί η εργασιμότητα.

- ✓ Ηχομονωτικό Υλικό - Οι θόρυβοι από διάφορες πηγές κυκλοφορίας ή τους ενοίκους ενός κτιρίου μπορεί να καταστούν προβληματικοί. Ηχοπετάσματα από διαπερατό σκυρόδεμα και εσωτερικοί τοίχοι μερικές φορές κατασκευάζονται έτσι ώστε να μειωθεί ο θόρυβος. Η ανοικτού τύπου δομή του τείνει να απορροφήσει και να ελαττώσει τον ήχο στο υλικό του αντί να το ανακλάσει αλλού (3,36,37,38,39).

1.6 Οικονομικά οφέλη

Η ανάγκη παρασκευής του διαπερατού σκυροδέματος ξεκίνησε από την Αμερική, γιατί η εκεί περιβαλλοντική νομοθεσία υποχρεώνει τους γαιοκτήμονες αν θέλουν να οικοδομήσουν τη γη τους να εξασφαλίζουν ότι από τα 2/3 αυτής της εκτάσεως το νερό της βροχής αποστραγγίζεται. Με τελικό λοιπόν στόχο την αύξηση της οικοδομήσιμης επιφάνειας της γης παρασκευάσθηκε αυτό το ειδικού τύπου σκυρόδεμα που η δομή του περιέχει υψηλό πορώδες και εξασφαλίζει την διέλευση των όμβριων υδάτων. Γενικά τα οικονομικά οφέλη που εξασφαλίζονται με τη χρήση διαπερατού σκυροδέματος συνοψίζονται παρακάτω:

- ✓ Εναλλακτική λύση σε δαπανηρές μεθόδους διαχείρισης όμβριων υδάτων. Ιδιοκτήτες χώρων στάθμευσης που χρησιμοποιούν διαπερατό σκυρόδεμα θα δαπανήσουν λιγότερο για την εργασία, την κατασκευή και τη συντήρηση δεξαμενών κράτησης, αντλίες, σωλήνες αποχέτευσης, και άλλα συστήματα διαχείρισης όμβριων. Ακριβά αρδευτικά συστήματα μπορούν επίσης να ελαχιστοποιηθούν ή να εξαλειφθούν. Με τη μείωση των απορροών από τις πλακόστρωτες περιοχές, μειώνεται η ανάγκη για ξεχωριστές λίμνες διατήρησης όμβριων υδάτων και έτσι επιτρέπεται η χρήση μικρότερης χωρητικότητας αποχετευτικών αγωγών. Αυτό επιτρέπει στους ιδιοκτήτες ακινήτων να αναπτύξουν μια ευρύτερα διαθέσιμη ακίνητη περιοχή σε χαμηλότερο κόστος.
- ✓ Τέλη αντίκτυπου όμβριων
Πολλοί κυβερνητικοί οργανισμοί στο εξωτερικό εφαρμόζουν πλέον τέλη αντίκτυπου όμβριων για όλες τις στεγανές περιοχές. Καθώς οι κανονισμοί για την απορροή όμβριων γίνονται όλο και αυστηρότεροι, καθίσταται όλο και πιο ασύμφορο για τους ιδιώτες να αποκτήσουν ακίνητη περιουσία, λόγω του μεγέθους και των εξόδων των απαραίτητων συστημάτων αποχέτευσης. Το διαπερατό σκυρόδεμα μπορεί να μειώσει τα έξοδα για τον ιδιοκτήτη του ακινήτου, συμβάλλοντας στην ελαχιστοποίηση των απαιτήσεων για αποχετευτικά συστήματα.
- ✓ Υποστήριξη τοπικών οικονομιών
Οι συνθέσεις του σκυροδέματος είναι προσαρμόσιμες στις διάφορες περιοχές, καθώς μπορούν να κάνουν χρήση των διαθέσιμων υλικών για τα αδρανή και τα άλλα συστατικά. Το σκυρόδεμα απαιτεί, επίσης, ένα σχετικά μικρό χρόνο μεταφοράς, προκειμένου να αποφευχθεί η στερεοποίηση. Ως εκ τούτου, η χρήση της στην κατασκευή ελαχιστοποιεί το κόστος μεταφοράς και τη συναφή κατανάλωση ενέργειας. Με την επιλογή λοιπόν του διαπερατού σκυροδέματος στηρίζονται οι τοπικές

οικονομίες, καθώς χρησιμοποιούνται τοπικά υλικά καθώς και εταιρείες που βρίσκονται κοντά στην περιοχή διαστρώσεως.

✓ Χαμηλού κόστους κύκλος ζωής

Τα οδοστρώματα από σκυρόδεμα έχουν ένα σημαντικά χαμηλότερο κόστος κύκλου ζωής από τις εναλλακτικές λύσεις, όπως είναι η άσφαλτος. Αν και το αρχικό κόστος της εγκατάστασης διαπερατού μπορεί να είναι ελαφρώς υψηλότερο, το σκυρόδεμα εξοικονομεί χρήματα μακροπρόθεσμα λόγω ανώτερης αντοχής και ανθεκτικότητας. Απαιτεί λιγότερες επισκευές από την άσφαλτο, και έχει επιπλέον μεγαλύτερη συνολικά διάρκεια ζωής. Είναι επίσης οικονομικό, δεδομένου ότι ελαχιστοποιεί την ανάγκη για σταθεροποιητές των απορροών, μειώνοντας τελικά το κόστος ιδιοκτησίας. Χρειάζεται πολύ λίγη πλεονάζουσα παραγωγή αφού παράγεται απευθείας στο χώρο και ανάλογα με τις ανάγκες, και μπορεί να ανακυκλωθεί μόλις φτάσει στο τέλος του κύκλου ζωής του. Έτσι, το διαπερατό σκυρόδεμα αναγνωρίζεται ευρέως ως η χαμηλότερου κόστους κύκλου ζωής επιλογή για πλακόστρωση (9,40,41,42,43).

1.7 Τοποθέτηση διαπερατού σκυροδέματος

1.7.1 Υδρολογικές μελέτες σχεδιασμού

Για το σχεδιασμό οδοστρώματος διαπερατού σκυροδέματος πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλοί παράγοντες. Οι τρεις αρχικές μέριμνες είναι το ύψος των αναμενόμενων βροχοπτώσεων, τα χαρακτηριστικά του οδοστρώματος και οι βασικές ιδιότητες του εδάφους. Ωστόσο, ο βασικός υδρολογικός παράγοντας στο σχεδιασμό συνθέσεως διαπερατού σκυροδέματος είναι το ποσοστό της επιφανειακής απορροής που μπορεί να γίνει ανεκτή. Η ποσότητα της απορροής είναι μικρότερη από το συνολικό ύψος βροχόπτωσης, διότι ένα τμήμα της βροχής συγκρατείται σε μικρές κοιλότητες στο έδαφος, ένα άλλο διεισδύει σε αυτό, ενώ τέλος ένα ποσοστό αναχαιτίζεται από την κάλυψη του εδάφους (πχ φυτική βλάστηση). Η απορροή είναι επίσης συνάρτηση των ιδιοτήτων του εδάφους, ιδιαίτερα του ποσοστού διήθησης των όμβριων υδάτων, συγκεκριμένα τα αμμώδη και τα ξηρά εδάφη θα δεχτούν ταχύτατα το νερό, ενώ οι σκληροί άργιλοι μπορεί να μην απορροφήσουν σχεδόν καθόλου νερό κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης. Επιπλέον η απορροή επηρεάζεται από τη φύση της ίδιας της καταιγίδας, διαφορετικού μεγέθους καταιγίδες θα οδηγήσουν σε διαφορετικές ποσότητες απορροής ύδατος, έτσι ώστε η επιλογή ενός κατάλληλου σχεδιασμού συνθέσεως διαπερατού σκυροδέματος να καθίσταται εξαιρετικά σημαντική.

Σε πολλές περιπτώσεις, το διαπερατό σκυρόδεμα αντικαθιστά απλά μια μη περατή επιφάνεια. Σε άλλες περιπτώσεις, οι πορώδεις αυτές διαστρώσεις πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε να μπορούν να διαχειριστούν πολύ περισσότερες βροχοπτώσεις από αυτές θα πέσουν στο καθεαυτό οδόστρωμα. Αυτές οι δύο εφαρμογές μπορούν να χαρακτηριστούν ως «παθητικός» και «ενεργός» μετριασμός απορροής, αντίστοιχα. Ένα παθητικό σύστημα μετριασμού όμβριων υδάτων μπορεί να συλλάβει πολλά, αν όχι όλα, από την «πρώτη αποστράγγιση», αλλά δεν προορίζεται να αντισταθμίσει το πλεόνασμα απορροής από τις παρακείμενες αδιαπέραστες επιφάνειες. Από την άλλη μεριά ένα ενεργό

σύστημα μετριασμού είναι σχεδιασμένο για να διατηρεί την απορροή σε μια περιοχή σε συγκεκριμένα επίπεδα. Το διαπερατό σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται σε ένα ενεργό σύστημα μετριασμού πρέπει να μπορεί να αντιμετωπίζει την απορροή και από άλλα χαρακτηριστικά του χώρου, όπως κτίρια, περιοχές διαστρωμένες με συμβατικού τύπου σκυρόδεμα, καθώς και ζώνες προστασίας οι οποίες μπορεί είτε να έχουν είτε να μην έχουν βλάστηση. Τα κράσπεδα, οι υδρορροές, οι παροχετεύσεις θέσης και η κάλυψη του εδάφους θα πρέπει να εξασφαλίζουν ότι η ροή του νερού σε ένα ενεργό σύστημα μετριασμού των βροχοπτώσεων δεν φέρει ιζήματα και χώμα που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε απόφραξη του (9,44,45,46,49,50,51).

1.7.2 Κατασκευή οδοστρώματος διαπερατού σκυροδέματος

Όπως προαναφέρθηκε, η κατασκευή ενός διαπερατού οδοστρώματος είναι αρκετά διαφορετική από ότι με συμβατικό σκυρόδεμα.

Υπάρχουν τέσσερα βασικά στοιχεία για την επιτυχία ενός οδοστρώματος με πορώδη επιφάνεια:

1. Προετοιμασία υποστρώματος - η προετοιμασία του υποστρώματος θα πρέπει να είναι ομοιογενής και με κατάλληλη συμπύκνωση
2. Νερό ανάμιξης - το σκυρόδεμα θα πρέπει να έχει τη σωστή ποσότητα νερού
3. Συμπύκνωση και φινίρισμα - το σκυρόδεμα πρέπει να συμπυκνωθεί και να φινιριστεί χωρίς υπερβολική προσπάθεια και
4. Επαρκής ωρίμανση - η ωρίμανση θα πρέπει να πραγματοποιείται εγκαίρως και να είναι επαρκούς διάρκειας (12).

Ακριβώς όπως και σε κάθε άλλο σύστημα οδοστρώματος, η ομοιόμορφη συμπύκνωση του υποστρώματος (υπέδαφος) είναι κρίσιμης σημασίας για ένα επιτυχημένο διαπερατό οδόστρωμα. Επιπλέον, όμως, είναι σημαντικό να μη συμπυκνώνονται πέρα από κάποιο όριο το υπέδαφος. Ένα βασικό χαρακτηριστικό του σχεδιασμού ενός τέτοιου διαπερατού οδοστρώματος είναι η εύρεση της βέλτιστης συμπύκνωσης σε σχέση με τη διαπερατότητα του εδάφους. Έτσι, αν το διαπερατό σκυρόδεμα συμπυκνωθεί πέρα από τα όρια του σχεδιασμού του, τότε το ποσοστό αποστράγγισης του εδάφους θα μειωθεί και το οδόστρωμα δεν θα στραγγίξει το επιθυμητό ποσό των απορροών. Σε περίπτωση πάλι που αυτό μπορεί να φαίνεται αρκετά μαλακό μετά από τις τυπικές προσπάθειες συμπύκνωσης, το κλειδί είναι η ομοιομορφία. Για πηλώδη ή αργιλώδη εδάφη, το επίπεδο της συμπύκνωσης θα εξαρτηθεί από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του σχεδιασμού του οδοστρώματος. Επιπλέον, προσοχή θα πρέπει να δοθεί, σε αυτήν την κατάσταση, να μην υπερσυμπυκνώνεται ένα έδαφος που έχει πιθανότητες διόγκωσης. Όπως και με κάθε οδόστρωμα το υπέδαφος θα πρέπει να υγρανθεί πριν τη σκυροδέτηση, και τα αυλάκια που δημιουργούνται από τους τροχούς των οχημάτων σκυροδέτησης θα πρέπει να καθαρίζονται και να συμπυκνώνονται ξανά.

Ο κατασκευαστής θα πρέπει να δώσει ιδιαίτερη προσοχή στην εύρεση της κατάλληλης ποσότητας νερού ανάμιξης. Το υλικό αυτό είναι ευαίσθητο σε μικρές αλλαγές στην περιεκτικότητα σε νερό, έτσι η προσαρμογή στον νωπό μίγμα είναι σχεδόν πάντοτε απαραίτητη. Η σωστή ποσότητα του νερού στο διαπερατό σκυρόδεμα είναι κρίσιμη, διότι πάρα πολύ νερό προκαλεί

κατάρρευση του δικτύου των πόρων που υπάρχουν στην εσωτερική δομή του ενώ πολύ λίγο νερό αποτρέπει την σωστή σκλήρυνση του σκυροδέματος, η οποία θα οδηγήσει σε πρόωρη αποτυχία της επιφάνειας. Οι διορθωτικές ενέργειες για οποιοδήποτε από αυτά τα σενάρια είναι ουσιαστικά η αφαίρεση και αντικατάσταση του σκυροδέματος. Οι έμπειροι κατασκευαστές μαθαίνουν να εκτιμούν τη σωστή περιεκτικότητα σε νερό στο νωπό σκυρόδεμα με οπτικό έλεγχο. Από τα βασικά χαρακτηριστικά που απαιτούν προσοχή είναι η παρουσία ανοιχτών κενών χώρων στο συμπυκνωμένο σκυρόδεμα καθώς και μία ελαφριά γυαλάδα στην εξωτερική επιφάνεια της τσιμεντόπαστας από την ύπαρξη της επαρκούς ποσότητας νερού που απαιτείται για την σωστή σκλήρυνση και ωρίμανση της συνθέσεως.

Ένα διαπερατό οδόστρωμα μπορεί να τοποθετηθεί είτε με χρήση καλουπιών είτε με ασφαλτοστρωτήρα. Παρ' όλα αυτά, η απλούστερη προσέγγιση για την τοποθέτηση του διαπερατού σκυροδέματος είναι να πέσει σε καλούπια που έχουν μια μετώπη ανύψωσης στην κορυφή του κάθε καλουπιού, έτσι ώστε η συσκευή διάστρωσης να είναι στην πραγματικότητα 10 έως 13 mm πάνω από το τελικό ύψος του οδοστρώματος. Καθώς το σκυρόδεμα αφήνει το φορτηγό, θα πρέπει να "χτενίζεται" σε ένα κατά προσέγγιση υψόμετρο. Η διάστρωση μπορεί στη συνέχεια να πραγματοποιηθεί από αντηρίδες διάστρωσης, ρολό διάστρωσης, ή μπάρες διάστρωσης χειρός (για μικρές περιοχές). Μετά τη διάστρωση του σκυροδέματος, οι μετώπες ανύψωσης αφαιρούνται και το σκυρόδεμα συμπυκνώνεται με κύλινδρο στο σωστό υψόμετρο.

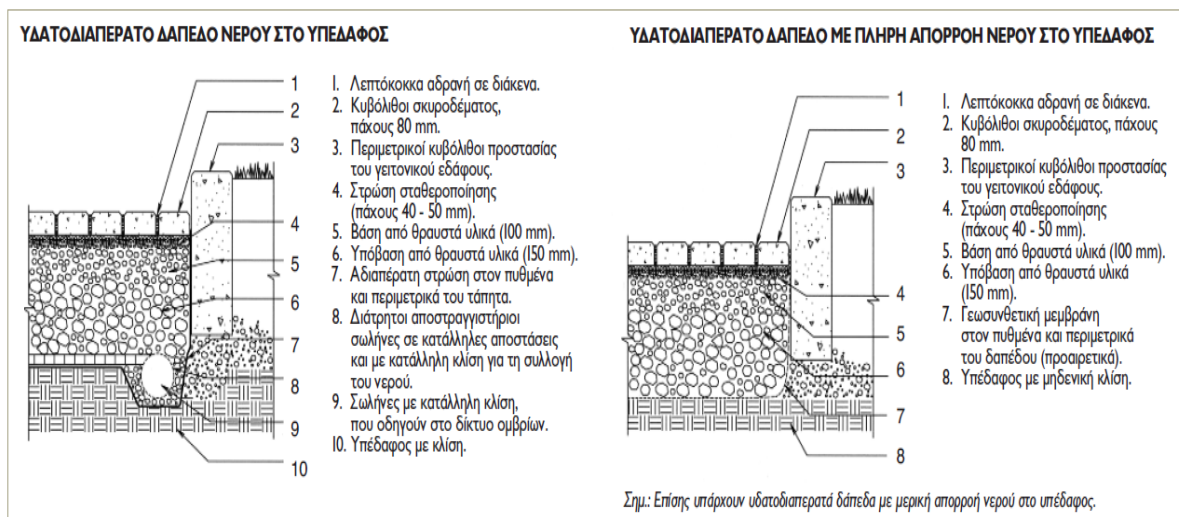
Η κυλιόμενη συμπύκνωση του νωπού σκυροδέματος παρέχει μία ισχυρή ζεύξη μεταξύ της πάστας και των αδρανών υλικών, δημιουργώντας μια λεία επιφάνεια στην οδήγηση. Προσοχή όμως πρέπει να επιδεικνύεται ώστε να αποφευχθεί η υπερβολική δύναμη, η οποία θα μπορούσε να προκαλέσει τα κενά να καταρρεύσουν.

Περιστασιακά, επιπλέον μέτρα είναι αναγκαία για να παρασχεθεί το επιθυμητό φινίρισμα στο διαπερατό σκυρόδεμα. Καθώς η ποιότητα κύλισης είναι ένα θέμα, το νωπό σκυρόδεμα πρέπει να διαστρώνεται περνώντας ο κύλινδρος πολλές φορές, έτσι ώστε να εξομαλυνθούν τυχόν αποκλίσεις από την επίπεδη δομή. Επιπλέον, μπορεί να είναι απαραίτητο να διαστρωθούν οι άκρες του σκυροδέματος. Πολλές φορές οι κύλινδροι δεν ασκούν επαρκή συμπίεση στις άκρες, έτσι το σκυρόδεμα εκεί διαστρώνεται με το χέρι ώστε να διασφαλιστεί πλήρως η ποιότητα του. Το διαπερατό σκυρόδεμα μπορεί επίσης να δουλευτεί. Μια στρογγυλευμένη άκρη μπορεί να είναι επιθυμητή, για παράδειγμα, δίπλα σε ένα πεζοδρόμιο.

Η σωστή ωρίμανση είναι απαραίτητη για τη δομική ακεραιότητα του διαπερατού σκυροδέματος. Η ωρίμανση εξασφαλίζει επαρκή ενυδάτωση της τσιμεντόπαστας έτσι ώστε να παρέχει την απαραίτητη δύναμη στο οδόστρωμα. Περαιτέρω, η ανεπαρκής σκλήρυνση θα προκαλέσει την επιφάνεια να εξυφανθεί, και σε ακραίες περιπτώσεις ακόμη και στο πλήρες βάθος του οδοστρώματος. Ως εκ τούτου, η ωρίμανση θα πρέπει να αρχίσει μέσα σε 20 λεπτά από την τοποθέτηση του σκυροδέματος. Πλαστικά καλύμματα χρησιμοποιούνται συνήθως για να διατηρηθεί η υγρασία στη μάζα του

οδοστρώματος για τη διαδικασία της σκλήρυνσης και πρέπει να ασφαλιζονται με ενισχυτικά ή ξύλα, έτσι ώστε να παραμείνουν στη θέση τους για την πλήρη περίοδο ωρίμανσης 7-ημερών, σε όλες τις καιρικές συνθήκες. Επίσης, Η ανοικτή δομή και η σχετικά ανώμαλη επιφάνεια του διαπερατού σκυροδέματος εκθέτει μεγαλύτερη επιφάνεια της τσιμεντόπαστας στην εξάτμιση, κάνοντας την ωρίμανση, ακόμη πιο ουσιαστική σε σχέση με τα συμβατικά σκυροδέματα. Το νερό χρειάζεται για τις χημικές αντιδράσεις του τσιμέντου, και είναι ζωτικής σημασίας για το διαπερατό σκυρόδεμα πρέπει προστατευτεί αμέσως. Σε ορισμένες περιοχές, είναι σύνηθες να εφαρμόζονται επιβραδυντές εξάτμισης πριν τη συμπύκνωση για την ελαχιστοποίηση κάθε ενδεχομένου απώλειας των επιφανειακών υδάτων (9,47,48,49,50,51).

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζονται σχηματικά κάθετες τομές διαστρωμένων επιφανειών με διαπερατά σκυροδέματα.



Εικόνα 3. Κάθετη τομή σε διαπερατά δάπεδα (1)

1.8 Συντήρηση

Η πλειοψηφία των οδοστρωμάτων διαπερατού σκυροδέματος λειτουργούν καλά με λίγη ή και καθόλου συντήρηση (9).

Οι δύο κοινά αποδεκτές μέθοδοι συντήρησης είναι το πλύσιμο με πίεση και το σκούπισμα με δυνατή ηλεκτρική σκούπα. Η πίεση της πλύσης σπρώχνει τους ρύπους προς τα κάτω από την επιφάνεια του οδοστρώματος. Αυτό είναι αποτελεσματικό, αλλά πρέπει να ληφθεί μέριμνα ώστε να μην χρησιμοποιείτε πολύ μεγάλη πίεση, δεδομένου ότι αυτό θα βλάψει το διαπερατό σκυρόδεμα. Ένα μικρό τμήμα του οδοστρώματος θα πρέπει να πλένεται με πίεση, χρησιμοποιώντας ποικίλες πιέσεις νερού για να καθοριστεί η κατάλληλη για το συγκεκριμένο οδόστρωμα (12). Το πλύσιμο με πίεση ενός φραγμένου διαπερατού οδοστρώματος μπορεί να αποκαταστήσει το 80% έως 90% της διαπερατότητας σε ορισμένες περιπτώσεις (9). Το σκούπισμα με δυνατή ηλεκτρική σκούπα αφαιρεί τους ρύπους εξάγοντάς τους από τα κενά του οδοστρώματος (12). Το σκούπισμα ετησίως ή πιο συχνά μπορεί να είναι απαραίτητο για να αφαιρεθούν συντρίμια από την επιφάνεια των

οδοστρωμάτων (9). Το πιο αποτελεσματικό σύστημα, όμως, είναι να συνδυαστούν οι δύο αυτές τεχνικές πρώτα η απορρόφηση με σκούπα και μετά το πλύσιμο με πίεση (12). Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι οι πρακτικές συντήρησης των διαπερατών οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα εξακολουθούν να αναπτύσσονται (9).

Κεφάλαιο 2

Κεφάλαιο 2: ΑΔΡΑΝΗ ΥΛΙΚΑ

2.1 Φυσικά αδρανή

Τα αδρανή υλικά (aggregates) συνίστανται από μη θραυσμένες ή θραυστές φυσικές ή τεχνητές ορυκτές ύλες κατάλληλες για χρήση στο σκυρόδεμα. Διακρίνονται, σε κανονικού βάρους με πυκνότητα σωματιδίων μεταξύ 2000 και 3000 kg/m³, σε ελαφροβαρή αδρανή όταν η πυκνότητα είναι μικρότερη των 2000 kg/m³ και σε βαρέα αδρανή όταν η πυκνότητα είναι μεγαλύτερη των 3000 kg/m³.

Το σκυρόδεμα αποτελείται από αδρανή υλικά και κονία που χρησιμεύει ως συνδετική ύλη αυτών. Η ονομασία των αδρανών υλικών οφείλεται στο γεγονός ότι παραμένουν χημικά αδρανή, αντιθέτως με το τσιμέντο και το νερό, στη χημική δράση των οποίων οφείλεται η σκλήρυνση του σκυροδέματος. Τα αδρανή υλικά συνδέονται και συγκολλούνται μεταξύ τους και συμβάλλουν, μηχανικά μόνο, στην αντοχή του τελικού προϊόντος.

Ως αδρανή υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν, θεωρητικά, οποιαδήποτε υλικά συγκεντρώνουν τις τρεις βασικές απαιτήσεις: επαρκή αντοχή, επαρκή πρόσφυση και χημική ανεκτικότητα με την τσιμεντοκονία.

Το συγγενέστερο προς την τσιμεντοκονία υλικό είναι τα πετρώματα και γι αυτό κατά κανόνα ως αδρανή υλικά για την παρασκευή του κοινού τύπου σκυροδέματος χρησιμοποιούνται συντρίμια διάφορων πετρωμάτων. Τα πετρώματα είτε θραύονται τεχνητά (θραυστά), είτε συλλέγονται όπως βρίσκονται στη φύση (συλλεκτά). Τα καταλληλότερα πετρώματα είναι τα ασβεστολιθικά και τα πυριτικά (Φυσικά Αδρανή – Natural Aggregates). Αδρανή διαφορετικής προέλευσης χρησιμοποιούνται για ειδικά σκυροδέματα, όπως τα ελαφρά ή τα βαριά σκυροδέματα ή σκυροδέματα για ειδικούς σκοπούς.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των αδρανών, που επηρεάζουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος είναι: η *αντοχή* τους (αντοχή του μητρικού πετρώματος), η *καθαρότητα* (η ύπαρξη δηλαδή ή όχι πρόσμικτων ουσιών οι κυριότερες εκ των οποίων είναι η παιπάλη, οι οργανικές προσμίξεις και οι θειούχες ενώσεις), η *πρόσφυση* με την κονία, η *χημική συμπεριφορά* τους με άλλα συστατικά του

σκυροδέματος, η *κοκκομετρική τους διαβάθμιση* (σχήμα και μέγεθος των κόκκων) κ.α.

Τα τεμάχια μπορεί να είναι στρογγυλοί, κυβόμορφοι, γωνιώδεις, πλακόμορφοι ή επιμήκεις. Από πλευράς εργασιμότητας καλύτεροι είναι οι στρογγυλοί ή κυβόμορφοι κόκκοι ενώ από πλευράς μηχανικής αντοχής του σκυροδέματος, οι κόκκοι με ανώμαλη επιφάνεια. Δηλαδή συνολικά καλύτερα είναι τα θραυστά αδρανή με κόκκους που δεν είναι επιμήκεις και πλακοειδείς (52,53,54,55,56,57,58).

Τα αδρανή υλικά ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες:

α) Άμμος με μέγεθος κόκκων μέχρι 2,5 mm.

β) Λεπτόκοκκα σκύρα με μέγεθος κόκκων από 2,5 mm μέχρι 30 mm. Συγκεκριμένα:

-ριζάκι 2,5-7 mm

-γαρμπίλι 7-14 mm

-σκύρα 14-30 mm

γ) Χονδρόκοκκα σκύρα με μέγεθος 30-70 mm (54,55).

2.1.1 Κοκκομετρική σύνθεση ή διαβάθμιση αδρανών

Τα αδρανή είναι συνήθως μείγμα κόκκων διαφορετικού μεγέθους. Η κοκκομετρική τους σύνθεση παίζει σημαντικό ρόλο στη μελέτη σύνθεσης του σκυροδέματος. Καλά διαβαθμισμένα αδρανή με διαστάσεις κόκκων που καλύπτουν ολόκληρο το φάσμα, έχουν λιγότερα κενά από αυτά που είναι λιγότερο διαβαθμισμένα, δηλαδή έχουν κόκκους ομοιόμορφων διαστάσεων. Η μείωση του όγκου των κενών μειώνει τον απαιτούμενο τιμμεντοπολτό, με αποτέλεσμα την μείωση του κόστους και αύξηση της ογκοσταθερότητας του σκυροδέματος. Με δεδομένη ποσότητα νερού ανά μονάδα όγκου, η εργασιμότητα και η συνοχή του μείγματος βελτιώνονται με την χρήση καλά διαβαθμισμένων αδρανών και με την παρουσία κάποιας ελάχιστης ποσότητας λεπτόκοκκου υλικού.

Η κοκκομετρική διαβάθμιση καθορίζεται με σειρά πρότυπων κόσκινων. Οι σειρές κόσκινων που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα και υιοθετούνται από το πρότυπο ΕΛΟΤ-408 (59) και από τον Ν.Κ.Τ.Σ. (60) είναι η γερμανική σειρά των DIN 4187 και 4188 και η αμερικανική σειρά κόσκινων της προδιαγραφής ASTM 11 (58).

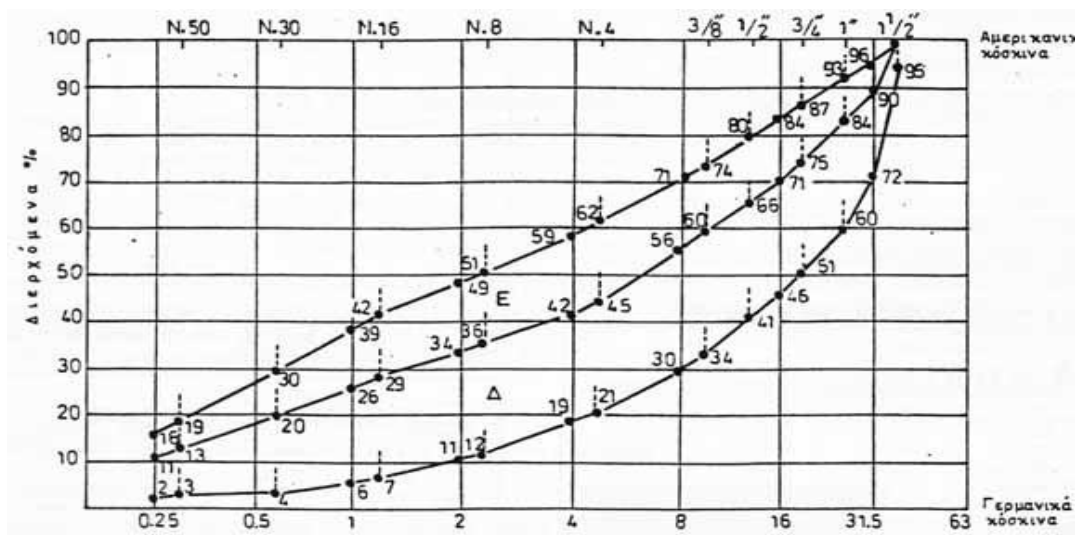
2.1.2 Καθορισμός της κοκκομετρικής διαβάθμισης

Η κοκκομετρική διαβάθμιση καθορίζεται ως εξής: από τα ποσοστά κατά βάρος που συγκρατούνται σε κάθε κόσκινο, υπολογίζεται το ποσοστό που περνάει, δηλαδή το λεπτότερο από κάθε κόσκινο. Κατόπιν σχεδιάζεται η κοκκομετρική καμπύλη, με τις διαμέτρους των κόσκινων στον οριζόντιο λογαριθμικό άξονα και το ποσοστό που περνάει από κάθε κόσκινο, στον κατακόρυφο αριθμητικό άξονα. Ενώ ο προσδιορισμός της κοκκομετρικής συνθέσεως του υλικού και η χάραξη της αντίστοιχης καμπύλης δεν παρουσιάζουν καμιά δυσκολία, πολύ δυσκολότερη είναι η αξιολόγηση και η εκτίμηση της καμπύλης αυτής και η

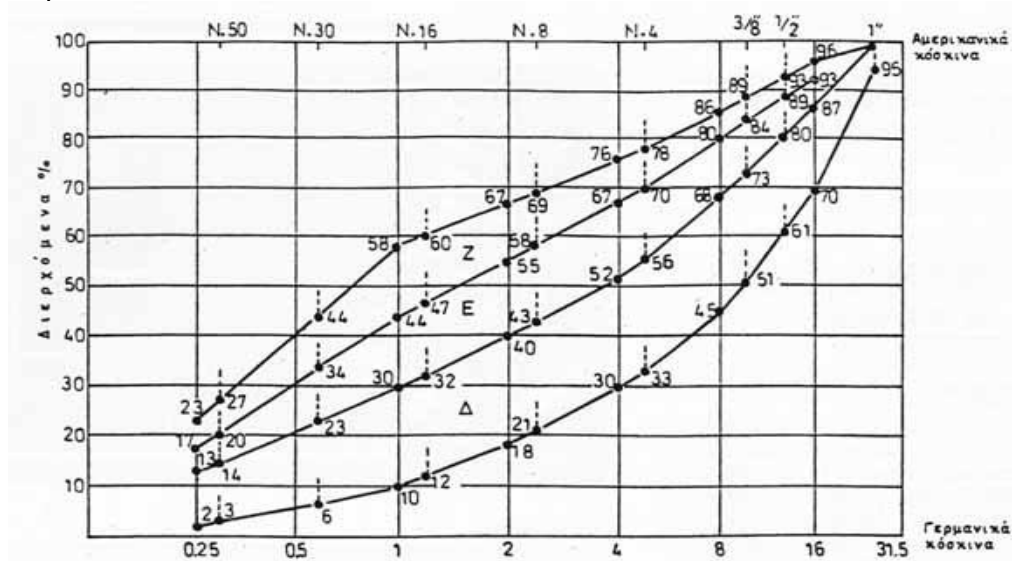
εκλογή της καταλληλότερης, για κάθε περίπτωση, από άποψη ιδιοτήτων του σκυροδέματος. Για να ελαχιστοποιηθούν τα κενά στο μείγμα των αδρανών και αποφευχθεί η απόμειξη του μείγματος(δηλ. διαχωρισμός των κόκκων μιας διάστασης από το υπόλοιπο μείγμα), πρέπει η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών να είναι συνεχής (58).

2.1.3 Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών

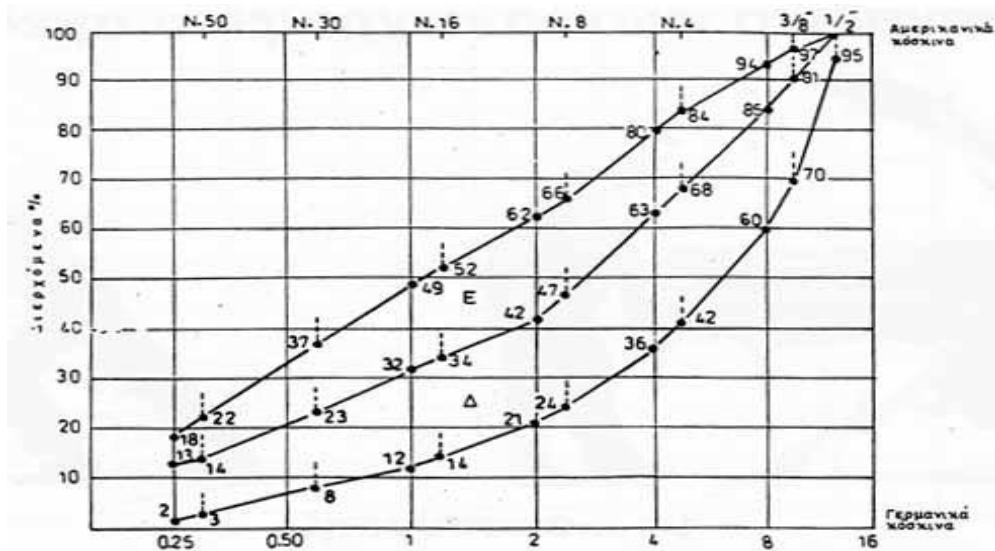
Οι προδιαγραφές των διαφόρων χωρών καθορίζουν περιοχές κοκκομετρικών διαβαθμίσεων μέσα στις οποίες συνιστάται ή όχι να βρίσκονται κοκκομετρικές καμπύλες. Ο Ν.Κ.Τ.Σ (60) ορίζει με βάση ξένες προδιαγραφές και με την μακρόχρονη εμπειρία με τα ελληνικά αδρανή τις περιοχές ή υποζώνες των διαγραμμάτων 1-4, και απαιτεί για οπλισμένο σκυρόδεμα η κοκκομετρική καμπύλη να βρίσκεται στην υποζώνη Δ (62).



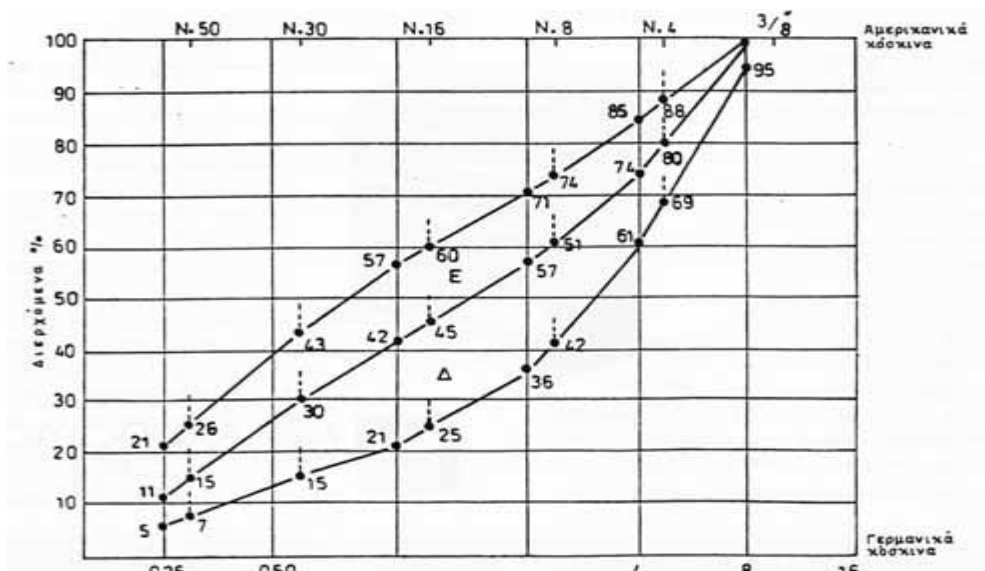
Διάγραμμα 1. Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος αδρανών μέγιστου κόκκου 63 mm ή 1 1/2''.



Διάγραμμα 2. Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος αδρανών μέγιστου κόκκου 31,5 mm ή 1''.



Διάγραμμα 3. Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος αδρανών μέγιστου κόκκου 16 mm ή 1/2''.



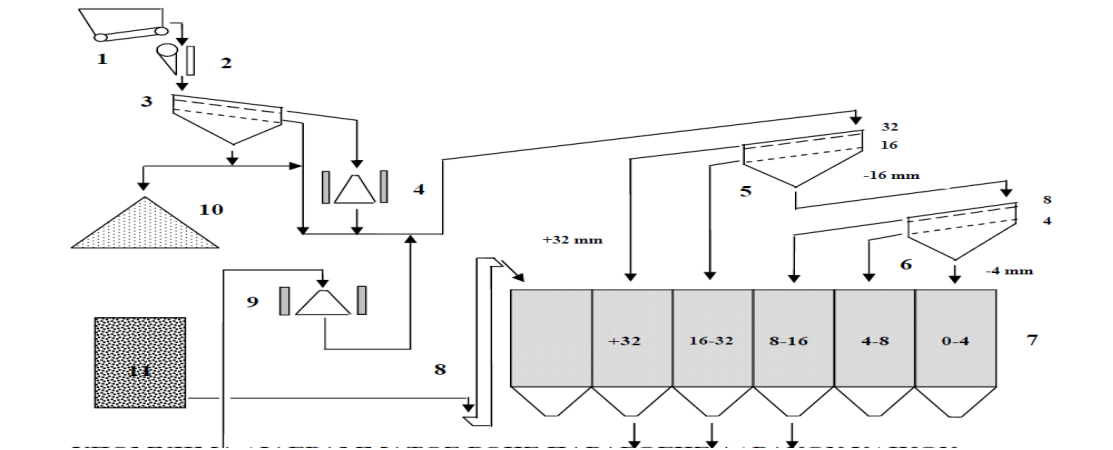
Διάγραμμα 4. Κοκκομετρική διαβάθμιση μίγματος αδρανών μέγιστου κόκκου 8 mm ή 3/8''.

2.1.4 Μέγιστος κόκκος

Το μέγεθος του μέγιστου κόκκου είναι η διάσταση του μικρότερου από την σειρά των κόσκινων από τη οποία περνάει το 95% τουλάχιστον της ποσότητας των αδρανών. Όσο μεγαλύτερος είναι ο μέγιστος κόκκος, τόσο μικρότερες είναι οι απαιτήσεις του σκυροδέματος σε τιμεντοπολιτό, καθόσον χρειάζεται να διαβραχεί μικρότερη επιφάνεια αδρανών, και επομένως τόσο φθηνότερο είναι το σκυρόδεμα.

Εντούτοις η οικονομία σε τιμέντο γίνεται ασήμαντη για μέγιστο κόκκο μεγαλύτερο από 75 mm, ενώ δυσκολεύεται σημαντικά η μεταφορά, η διάστρωση και η συμπύκνωση του σκυροδέματος. Για ογκώδη στοιχεία άοπλου σκυροδέματος συμφέρει η χρήση αδρανών με μεγάλο μέγιστο μέγεθος κόκκων, αλλά για συνηθισμένα μέλη πρέπει το μέγιστο μέγεθος κόκκου να είναι

μικρότερο από το 1/3 της μικρότερης διάστασης του στοιχείου σε ισχνά σε τσιμέντο σκυροδέματα, η αντοχή αυξάνεται όταν ο μέγιστος κόκκος μεγαλώνει, ενώ το αντίθετο ισχύει για πλούσια σε τσιμέντο σκυροδέματα. Ανάλογα με το μέγιστο κόκκο των αδρανών ορίζονται και οι ζώνες Δ, Ε και Ζ των κοκκομετρικών διαβαθμίσεων. Στην Ελλάδα ο μέγιστος κόκκος θραυστών αδρανών είναι συνήθως 31,5 mm. Παρουσιάζεται στην Εικόνα 3 το διάγραμμα παραγωγής αδρανών σκυροδέματος κατά Svedala Arbra (53,58).



ΥΠΟΜΝΗΜΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΡΟΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΔΡΑΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ
Α/Α ΜΗΧΑΝΗΜΑ

- 1 Τροφοδότης
- 2 Θραυστήρας σιαγόνων απλής ενέργειας
- 3 Κόσκινο (scalp screen)
- 4 Γυροσκοπικός θραυστήρας
- 5 Κόσκινο διπλού καταστρώματος (32 mm και 16 mm)
- 6 Κόσκινο διπλού καταστρώματος (8 mm και 4 mm)
- 7 Αποθήκες προϊόντων (silos)
- 8 Αναβατήριο
- 9 Κωνικός θραυστήρας
- 10 Σωρός υλικού 3Α (συνήθως υλικό οδοστρωσίας)
- 11 Λεπτομερές υλικό φίλτρων

Εικόνα 4. Διάγραμμα ροής μονάδας παραγωγής αδρανών σκυροδέματος (κατά Svedala Arbra).

2.1.5 Ιδιότητες των αδρανών υλικών

Όλα τα αδρανή είναι προϊόντα ελάττωσης μεγέθους από μεγαλύτερα τεμάχια μητρικού πετρώματος μέσω διαφόρων φυσικών (π.χ. αποσάθρωση, απόξεση, απολέπιση) ή τεχνητών μεθόδων (π.χ. θραύση ή κατάτμηση πετρωμάτων και ταξινόμηση κατά μέγεθος). Ως εκ τούτου, οι ιδιότητες των αδρανών εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τις ιδιότητες του μητρικού πετρώματος δηλαδή από:

1. Χημική και ορυκτολογική σύσταση
2. Πετρολογική προέλευση, που εκφράζεται με την πετρογραφική περιγραφή του
3. Ειδικό βάρος
4. Σκληρότητα
5. Αντοχή
6. Φυσικοχημική σταθερότητα (συμπεριφορά)
7. Πορώδες
8. Χρώμα κ.λπ.

Τα μεγέθη των τεμαχίων των αδρανών σκυροδέματος, όπως προαναφέρθηκε, κυμαίνονται από μερικές δεκάδες mm μέχρι μεγεθών περίπου 1/10 mm. Το μέγιστο μέγεθος αδρανών που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές από σκυρόδεμα ποικίλει και εξαρτάται από την κατασκευή στην οποία θα χρησιμοποιηθούν. Σ' ένα μίγμα τεμαχίων (σύνθεση διαφορετικών μεγεθών) αδρανών, η ποσοστιαία % κατά βάρος κατανομή μεγέθους των τεμαχίων αναφέρεται ως “διαβάθμιση” (grading) και περιλαμβάνει επίσης ιδιότητες που δεν έχουν άμεση σχέση με το μητρικό πέτρωμα όπως:

1. Μέγεθος και σχήμα τεμαχίων
2. Επιφανειακή δομή (υφή)
3. Απορροφητικότητα (πορώδες αδρανών)
4. Κατάσταση κορεσμού των τεμαχίων (61).

2.2 Εναλλακτικά Αδρανή

Τα τελευταία χρόνια, πολλοί λόγοι, με κυριότερους την προστασία του περιβάλλοντος και την αειφόρο ανάπτυξη, έχουν αναδείξει τη χρήση και εναλλακτικών αδρανών προϊόντων στην θέση των παραδοσιακών φυσικών ασβεστολιθικών, είτε ως μέρος υποκατάστασης των τελευταίων είτε και ως εξ' ολοκλήρου εναλλακτικών αυτών. Δύο τέτοια χαρακτηριστικά παραδείγματα εναλλακτικών αδρανών, όπως είναι η σκωρία χάλυβα και τα οικοδομικά απόβλητα που χρησιμοποιήθηκαν και στο πειραματικό μέρος της παρούσας διατριβή, παρουσιάζονται συνοπτικά στις επόμενες παραγράφους.

2.2.1 Σκωρία χάλυβα

Η βιομηχανία κατεργασίας χάλυβα θεωρείται από τις πιο ρυπογόνες βιομηχανίες στον κόσμο, όχι μόνο από την άποψη της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας αλλά κυρίως από τα βιομηχανικά παραπροϊόντα που απορρέουν από τις γραμμές παραγωγής. Παρόλα αυτά οι καινοτόμες τεχνολογίες δε μείωσαν δραστικά μόνο τις ενεργοβόρες δραστηριότητες και τους ρύπους αλλά παράλληλα έδωσαν λύση σε ένα οξύ περιβαλλοντικό πρόβλημα μετατρέποντας τη σκωρία σε προϊόν υψηλών προδιαγραφών.

Η σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου είναι ένα παραπροϊόν της μεταλλουργικής βιομηχανίας. Προκύπτει από την τήξη σε ηλεκτρικό κλίβανο (Electric Arc Furnace - EAF) παλαιοσιδήρου (ferrous scrap), το οποίο αποτελεί την πρώτη ύλη για την παραγωγή οικοδομικού χάλυβα. Η σκωρία του ηλεκτρικού κλιβάνου είναι ένα βιομηχανικά ληφθέν τεχνητό πέτρωμα, του οποίου η χημική σύνθεση, η ορυκτολογική σύσταση και οι μηχανικές ιδιότητες είναι ανάλογες των μαγματικών πετρωμάτων (π.χ. Βασάλτης ή γρανίτης). Σύμφωνα με την (ASTM), η σκωρία ορίζεται ως ένα μη μεταλλικό προϊόν που αποτελείται κυρίως από πυριτικές ενώσεις του ασβεστίου ενωμένες με τηγμένα οξειδία σιδήρου, αλουμινίου, ασβεστίου και μαγνησίου και παράγεται ταυτόχρονα με τον χάλυβα μέσα σε κλίβανο. Διακρίνεται όμως από τις τέφρες, που αποτελούν κατάλοιπα καύσης.

Η ποσότητα που παράγεται στα χαλυβουργεία, ως παραπροϊόν της παραγωγικής διαδικασίας, αποτελεί ποσοστό περίπου 7% - 12% επί της

συνολικής ποσότητας τροφοδοσίας του κλιβάνου με αποτέλεσμα οι μεταλλουργικές σκωρίες να είναι ένα από τα μεγαλύτερα σε ποσότητα βιομηχανικά παραπροϊόντα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι κατά το έτος 2000 η συνολική παραχθείσα ποσότητα σκωριών στην Γερμανία, συμπεριλαμβανομένων και των σκωριών υψικαμίνων, ήταν περίπου πέντε εκατομμύρια τόνοι, ενώ η υπολογίζεται ότι η συνολική ποσότητα στην Ελλάδα είναι περίπου 400.000 τόνοι (63).

Εν αντιθέσει με τα συνήθως γραφόμενα η Ελλάδα δεν μπορεί να θεωρηθεί ουραγός στην ανακύκλωση σκωριών. Αντιθέτως η συγκεκριμένη ανακύκλωση βρίσκει ιδιαίτερη ανταπόκριση στην Ελλάδα σε σύγκριση με λοιπές ευρωπαϊκές χώρες (Ισπανία, Ιταλία, Γερμανία) και μάλιστα σε προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας. Το κύριο πλεονέκτημα της σωστά επεξεργασμένης σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου είναι οι άριστες μηχανικές ιδιότητες που ικανοποιούν πλήρως τις εγχώριες προδιαγραφές αδρανών για την κατασκευή επιφανειακών επιστρώσεων και συγκεκριμένα αντιολισθηρών ταπήτων. Η χρήση των συγκεκριμένων αδρανών στην οδοποιία και δη σε οδούς ταχείας κυκλοφορίας, αυτοκινητόδρομους και γενικότερα σε οδούς με μεγάλες απαιτήσεις αντίστασης σε ολίσθηση συντελεί στην αναβάθμιση του οδικού δικτύου στον τομέα της ασφάλειας. Η ποιότητα δε των οδοστρωμάτων αυτών είναι εφάμιλλη ποιοτικά των δικτύων αυτοκινητοδρόμων στις υπόλοιπες ευρωπαϊκές χώρες.

Τα αδρανή σκωρίας έχουν χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία σε όλους τους τύπους. Κατεξοχήν παραδείγματα αποτελούν οι εφαρμογές στην Αττική Οδό και στην Εγνατία Οδό.

Σε κάθε χαλυβουργείο στην Ελλάδα παράγονται τρία είδη σκωριών, η σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου (electric arc furnace slag), η σκωρία κάδων (ladle slag) και η σιδηρούχα σκωρία (mill scale). Ένα είδος σκωρίας, η σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου (EAF slag), κατόπιν ειδικής επεξεργασίας δύναται να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη για την παραγωγή ποιοτικών αδρανών, κατάλληλων για χρήση σε σκυρόδεμα, ποιοτικά ανώτερων των φυσικών σκληρών αδρανών (63,78).

2.2.1.1 Παραγωγή και επεξεργασία των σκωριών ηλεκτρικού κλιβάνου

Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του χάλυβα προέρχονται από την ανακύκλωση υλικών. Το υλικό αυτό ονομάζεται scrap ή παλαιοσίδηρος και προέρχεται τόσο από την εγχώρια αγορά όσο και από εισαγωγές από άλλα κράτη όπως η Ρωσία, η Κύπρος, ο Λίβανος κ.ά. Στη συνέχεια, οδηγείται σε μονάδα μείωσης μεγέθους (shredder) όπου διαχωρίζεται σε σιδηρούχα και μη σιδηρούχα μέρη. Τα μη-σιδηρούχα μέρη οδηγούνται για περαιτέρω επεξεργασία και ανάκτηση πολύτιμων μετάλλων όπως ο χαλκός και το αλουμίνιο. Οι σιδηρούχες ύλες προωθούνται στον ηλεκτρικό κλίβανο για τήξη. Εκεί προστίθενται μικρές ποσότητες ασβέστου και σιδηροκραμάτων που βοηθούν στην ανάπτυξη υψηλότερων θερμοκρασιών, προκαλούν αφρισμό του σιδήρου και δημιουργείται σκωρία.

Στον κλίβανο τρία μεγάλα ηλεκτρόδια δημιουργούν βολταϊκό τόξο ανεβάζοντας τη θερμοκρασία στους 1640-1670 °C προκαλώντας την τήξη του παλαιοσιδήρου. Στη θερμοκρασία αυτή με τη βοήθεια των πρόσθετων και λόγω του ειδικού τους βάρους τα ανεπιθύμητα προϊόντα ανεβαίνουν στα υψηλότερα στρώματα του κλίβανου από όπου και απομακρύνονται. Για την επίτευξη του διαχωρισμού απαιτείται συνεχής ανάδευση του υλικού με την προσθήκη οξυγόνου από το κάτω μέρος του κλίβανου. Οι σκωρίες που παράγονται σε αυτή τη φάση ονομάζονται σκωρίες ηλεκτρικού κλιβάνου και παράγονται σε ποσοστό 80-110 κιλά ανά τόνο χάλυβα. Μετά την απομάκρυνση των παραπροϊόντων του πρώτου σταδίου συνεχίζεται η επεξεργασία του περιεχομένου του κλιβάνου για την παρασκευή χάλυβα. Κατά τα υπόλοιπα στάδια της επεξεργασίας παράγονται και άλλες σκωρίες (σκωρία κάδων, καλαμίνα, λάσπη αντλιοστασίου).

Η αργή ψύξη της λιωμένης σκωρίας έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό κρυσταλλικών ανόργανων μειγμάτων τα οποία την καθιστούν υλικό μικρής τιμμεντοειδούς αξίας. Αν όμως η ψύξη είναι ταχεία, όπως στις σκωρίες ηλεκτρικού κλιβάνου, οι κοκκοποιημένες σκωρίες παραμένουν σε ένα χημικά σταθερό, άμορφο και υαλώδες στάδιο, έχοντας λανθάνουσες υδραυλικές ιδιότητες. Η απότομη ψύξη των σκωριών είναι επιβεβλημένη για να αποκτήσει η σκωρία την υαλοειδή δομή (63,78).

Μετά την πρώτη φάση της ψύξης του υλικού, ακολουθεί φόρτωση και μεταφορά για περαιτέρω επεξεργασία. Σε αυτό το σημείο η σκωρία παύει να είναι παραπροϊόν και υλικό των καλυβουργείων και αποτελεί πρώτη ύλη.

Η παραγωγική διαδικασία αποτελείται από σειρά μηχανικών διεργασιών, όπως διαλογή για την απομάκρυνση μεγάλων τεμαχίων, αποσιδήρωση, πρωτογενή θραύση, δευτερογενή θραύση και τελικά παραγωγή των τελικών προϊόντων από διαδοχικές κοσκινίσεις. Τα αδρανή που παράγονται ταξινομούνται σε διάφορα κλάσματα και αποθηκεύονται σε σωρούς στις πλατείες τελικών προϊόντων. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι για την διαχείριση και την συνολική επεξεργασία της σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου έχει υιοθετηθεί και εφαρμόζεται πλήρως η οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης που αφορά στις Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές (BAT) (63,78).

2.2.1.2 Ιδιότητες των αδρανών σκωρίας

Φυσικές ιδιότητες

Τα αδρανή σκωρίας είναι αρκετά γωνιώδη και έχουν τραχεία επιφανειακή υφή. Επίσης διαθέτουν υψηλή πυκνότητα μονάδας όγκου και παρουσιάζουν περιορισμένη απορροφητικότητα, μεγαλύτερη όμως των φυσικών ασβεστολιθικών αδρανών (63,78).

Πίνακας 4. Φυσικές Ιδιότητες Σκωρίας Ηλεκτρικού Κλιβάνου

Ιδιότητα	Τιμή
Ειδικό βάρος	3,2 - 3,6 g/cm ³
Φαινόμενη Πυκνότητα	1600 - 1920 kg/m ³
Απορροφητικότητα	3%

Χημικές ιδιότητες

Από χημικής άποψης η σκωρία είναι ένα μίγμα ασβεστίου, πυριτίου και αλουμίνας, δηλαδή τα ίδια οξείδια που αποτελούν το τσιμέντο Πόρτλαντ, αλλά με διαφορετικές αναλογίες. Όπως αναφέρθηκε οι σκωρίες διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους ανάλογα με τη διαδικασία παραγωγής και τη μέθοδο ψύξης τους. Στον Πίνακα 5 παρουσιάζεται μια τυπική χημική ανάλυση σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου (63,78).

Πίνακας 5. Χημική Ανάλυση Σκωρίας Ηλεκτρικού Κλιβάνου

	Σύσταση (%)
CaO	40 - 52
SiO₂	10 - 19
FeO	10 - 40
MgO	5 - 10
Al₂O₃	1 - 3
S	0,5 - 1
Fe	0,5 - 10

Μηχανικές ιδιότητες

Στατικά, δυναμικά φορτία και περιβαλλοντικές επιδράσεις όπως βροχή, ζέστη και συστολοδιαστολές απαιτούν μακρόχρονη ανθεκτικότητα από τις σύγχρονες κατασκευές. Γι' αυτό το λόγο τα μηχανικά χαρακτηριστικά των αδρανών που χρησιμοποιούνται για τις κατασκευές αυτές είναι εξαιρετικής σημασίας. Η επεξεργασμένη σκωρία έχει ευνοϊκές μηχανικές ιδιότητες για χρήση ως αδρανές όπως καλή αντοχή σε τριβή και κρούση, σταθερότητα, καλά ακουστικά χαρακτηριστικά, υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα. Οι προδιαγραφές της σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα (63,78).

Πίνακας 6. Προδιαγραφές Σκωρίας Ηλεκτρικού Κλιβάνου

Ιδιότητα	Τιμή
Δείκτης Στίλβωσης	PSV=64
Συντελεστής Los Angeles	LA=15
Δείκτης Απότριψης	AAV=3
Δείκτης Υγείας	SD=6
Αντοχή σε Θραύση	ACV=9
Αντοχή σε συντριβή	AIV=4
Δείκτης Σχήματος	SI=5
Δείκτης Πλακοειδών	FI=5
Δείκτης Επιμήκων	EI=10

Θερμικές ιδιότητες

Τα αδρανή σκωρίας είναι καλοί αγωγοί της θερμότητας και έχουν μεγάλη θερμοχωρητικότητα σε σύγκριση με τα συμβατικά φυσικά αδρανή. Η ιδιότητα τους αυτή τα καθιστά καταλληλότερα για επισκευή ασφαλικών μιγμάτων θερμής ανάμιξης σε χαμηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος (63,78).

2.2.1.3 Περιβαλλοντικοί έλεγχοι

Στα πλαίσια της εφαρμογής της νέας ευρωπαϊκής νομοθεσίας REACH για την καταχώρηση και τον έλεγχο όλων των χημικών ουσιών, πραγματοποιούνται όλοι οι απαραίτητοι έλεγχοι που ενισχύουν την περιβαλλοντική καταλληλότητα της σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου. Το 2006 αναγνωρίστηκε η συμβολή των αδρανών από σκωρία στην αειφόρο ανάπτυξη (63,78).

2.2.1.4 Χρήσεις σκωριών

Στο χώρο των έργων και των κατασκευών, οι σκωρίες χρησιμοποιούνται υπό δυο διαφορετικές και διακριτές ιδιότητες που καθορίζουν αντίστοιχα και τον ρόλο τους, ως υλικών, στη δομική βιομηχανία και επακόλουθα σε εφαρμογές δομικών έργων.

Ορισμένα είδη σκωριών συνήθως υπό μορφή λεπτόκοκκου κλάσματος χρησιμοποιούνται ως πρόσθετα υλικά στο τσιμέντο, στο σκυρόδεμα καθώς και σε μίγματα με αργιλικά και πηλώδη υλικά με στόχο τη βελτίωση των χαρακτηριστικών του πρωτογενούς υλικού. Παράλληλα, στην οδοποιία χονδρόκοκκα αδρανή σκωρίας είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν λόγω της σκληρότητάς τους και της σημαντικής αντοχής τους σε φθορά έναντι τριβής και κρούσης. Για τον ίδιο λόγο, αδρανή σκωρίας χρησιμοποιούνται για την παρασκευή σκυροδέματος υψηλής αντοχής.

Σε χώρες με γενικευμένη έλλειψη αδρανών, όπως το Βέλγιο, η Ολλανδία αλλά και σε περιοχές της Γερμανίας, της Γαλλίας, της Δανίας η χρήση αδρανών σκωρίας αποτελεί μια ικανοποιητική λύση για πολλές εφαρμογές. Ακόμη σε χώρες όπου τα φυσικά σκληρά αδρανή είναι σπάνια (Η.Π.Α.), οι σκωρίες χρησιμοποιούνται σε αντιολισθηρούς τάπητες. Εντυπωσιακό είναι το παράδειγμα της Μεγάλης Βρετανίας, μιας χώρας με αφθονία σκληρών αδρανών, όπου η χρήση των αδρανών σκωρίας σε αντιολισθηρούς τάπητες αποτελεί κοινή πρακτική.

Στην Ελλάδα τεχνικοί, οικονομικοί και οικολογικοί λόγοι έχουν προκαλέσει ένα αυξημένο ενδιαφέρον για εφαρμογή των σκωριών σε διάφορα έργα. Το ζήτημα της χρήσης των αδρανών σκωρίας σε αντιολισθηρούς τάπητες, που είναι μια από τις συνηθέστερες εφαρμογές, συνιστά ένα θέμα ξεχωριστής σημασίας για την Ελλάδα, όπου βρίσκεται σε εξέλιξη το πρόγραμμα υλοποίησης οδικών αξόνων (63,78).

2.2.1.5 Σύγκριση σκυροδέματος με χρήση σκωρίας έναντι φυσικών αδρανών

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. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν ορισμένες διαφορές μεταξύ αυτών των δύο τύπων σκυροδέματος: 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 (64). 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 (65). Επίσης, αν και η αντοχή σε θλίψη των σκυροδεμάτων με χρήση σκωρίας είναι οριακά καλύτερη από εκείνη των σκυροδεμάτων με ασβεστόλιθο, συνολικά, δεν υπάρχει σημαντική βελτίωση στις αντοχές σε κάμψη και εφελκυσμό (64).

Ένα σημαντικό μειονέκτημα των αδρανών σκωρίας, όμως, είναι το υψηλό τους πορώδες που αποτελεί εμπόδιο για την κατασκευή σκυροδέματος ανθεκτικού σε συνθήκες ψύξης (ψυχρά κλίματα). Ενδεχόμενη βελτίωση της στον τομέα αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί με την προσθήκη ειδικών προσμίξεων (αερακτικοί παράγοντες) (66). Βελτίωση αυτού του προβλήματος μπορεί επίσης να συμβεί με την αποθήκευση της σκωρίας σε εξωτερικούς χώρους εκ των προτέρων και η έκθεσή της στη φυσική υγρασία ή ακόμη και σε εξαναγκαστική με ψεκασμό για αρκετές εβδομάδες, έτσι ώστε να επιτραπεί η απαραίτητη ενυδάτωσή της και να σταθεροποιηθεί χημικά και φυσικά, προϋποθέσεις απαραίτητες για την ασφαλή χρήση στην παραγωγή σκυροδέματος (67).

Πίνακας 7. Σύγκριση χαρακτηριστικών ιδιοτήτων σκωρίας σε σχέση με φυσικό σκληρό αδρανές (63)

Δείκτης	Σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου	Φυσικό σκληρό αδρανές	Όρια Τ.Σ.Υ.
Επιμήκων	7.9	13-18	<20
Πλακοειδών	9.2	15-20	<30
PSV	64	52-58	>62
LA	13	17-22	<22
AAV	2.3	3-5	<6
ACV	13	-	-

2.2.1.6 Περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη

Οι θετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη χρήση αδρανών οδοποιίας από σκωρίες ηλεκτρικού κλιβάνου είναι:

- Η εξοικονόμηση ενέργειας.
- Η διατήρηση της μορφολογίας του φυσικού τοπίου από τη μείωση της εξόρυξης φυσικών αδρανών.
- Η θετική επίπτωση λόγω εξουδετέρωσης της όξινης αντίδρασης σε αντιδιαστολή με τα φυσικά αδρανή.
- Η εξοικονόμηση φυσικών πόρων μέσω της ανακύκλωσης των παραπροϊόντων των χαλυβουργιών.
- Η κατασκευή ασφαλέστερου οδικού δικτύου.

Εξασφαλίζοντας χρήσεις για το σύνολο των παραγόμενων σκωριών, που μέχρι πρότινος θεωρούνταν παραπροϊόντα της χαλυβουργίας ελαττώνεται η ανάγκη για χρήση φυσικών πόρων. Επομένως δεν απαιτείται επιπρόσθετη κατανάλωση ενέργειας για την παραγωγή πρώτων υλών με εξόρυξη φυσικών πετρωμάτων. Όσον αφορά την παραγωγική διαδικασία για την μετατροπή της πρώτης ύλης σε

τελικά προϊόντα, απαιτεί την ίδια κατανάλωση ενέργειας με την αντίστοιχη διαδικασία στα λατομεία.

Χαρακτηριστικό της παραγωγικής διαδικασίας αποτελεί το γεγονός ότι δεν παράγονται νέα απόβλητα, αφού γίνεται εκμετάλλευση του συνόλου της παραγόμενης ποσότητας. Επίσης, η επεξεργασία σε όλα τα στάδια γίνεται εν ξηρώ και οι εκπομπές στην ατμόσφαιρα είναι εντός των ορίων που έχει θέσει η ευρωπαϊκή κοινότητα. Γενικά όλα τα στερεά προϊόντα της επεξεργασίας είναι εκμεταλλεύσιμα, καθώς η επεξεργασία αποτελείται ουσιαστικά από θραύση και διαχωρισμό-διαβάθμιση των αδρανών (63).

Πίνακας 8. Συνοπτικά οφέλη από τη χρήση σκωρίας κάλυβα σε σχέση με φυσικά αδρανή

	Σκωρία Ηλεκτρικού Κλιβάνου	Φυσικό σκληρό αδρανές
Αλλοίωση Φυσικού Τοπίου	Όχι	Ναι
Ανάλωση Φυσικών Πόρων	Όχι	Ναι
Ανακύκλωση	Ναι	Όχι
Εξοικονόμηση ενέργειας (χρήση εκρηκτικών, εξόρυξη, μηχανική εξόρυξη κτλ.)	Ναι	Όχι
Εκπομπές στον αέρα (σωματίδια λόγω θραύσης)	Όχι	Ναι
Εκπομπές στο νερό	Όχι	Όχι
Εκπομπές στο έδαφος	Όχι	Όχι
Μηχανικές Ιδιότητες	Υψηλές	Χαμηλές
Σταθερότητα ποιότητας	Ναι	Όχι
Ποσοστό ασφάλτου κ.β. ασφαλτομίγματος	Μικρό	Μεγάλο
Συμβολή στο χρόνο ζωής ασφαλοτάτητα πριν την συντήρηση	5+ έτη	2-4 έτη
Συμβολή στην οδική ασφάλεια	Ναι	Ναι

Το έναυσμα για τη χρήση σκωρίας κάλυβα σε διαπερατά σκυροδέματα αποτελεί αφενός η ανάγκη για την επαναχρησιμοποίηση αυτού του παραπροϊόντος και την εξοικονόμηση με αυτόν τον τρόπο φυσικών αδρανών, αφετέρου η δυνατότητα βελτίωσης των τελικών αντοχών του διαπερατού σκυροδέματος καθότι πρόκειται για άοπλο σκυρόδεμα.

2.2.2 Απόβλητα από Εκσκαφές, Κατασκευές και Κατεδαφίσεις (ΑΕΚΚ) Οικοδομικά απόβλητα

Ο όρος Απόβλητα από Εκσκαφές, Κατασκευές και Κατεδαφίσεις (ΑΕΚΚ) αναφέρεται σε ένα ευρύ φάσμα υλικών, τα οποία υπάγονται στο κεφάλαιο 17 του Ευρωπαϊκού Καταλόγου Αποβλήτων, σύμφωνα με την Απόφαση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής 2001/118/ΕΚ της 16ης Ιανουαρίου 2001 (68).

Οι πιο συνηθισμένες πηγές παραγωγής των ΑΕΚΚ μπορούν να θεωρηθούν οι ακόλουθες (69):

- ✓ Οικοδομικές εργασίες κάθε είδους, όπως: ανεγέρσεις, κατεδαφίσεις, ανακαινίσεις, επισκευές, περιφράξεις κατοικιών, επαγγελματικών χώρων και γενικότερα κτιριακών συγκροτημάτων.
- ✓ Έργα τεχνικών υποδομών, όπως: κατεδαφίσεις, κατασκευές ή και επιδιορθώσεις δρόμων, γεφυρών, σηράγγων, αποχετευτικών δικτύων, πεζοδρομίων καθώς και αναπλάσεις χώρων κ.α.
- ✓ Φυσικές ή τεχνολογικές καταστροφές, όπως: σεισμοί, πλημμύρες, κατολισθήσεις, και γενικότερα δυσμενείς κλιματολογικές συνθήκες.

Σε έκθεση που συντάχθηκε για λογαριασμό της Ευρωπαϊκής Ένωσης τα ΑΕΚΚ ταξινομούνται σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα με την προέλευση τους (70). Οι κατηγορίες αυτές περιγράφονται αναλυτικά στην συνέχεια ώστε να γίνει κατανοητή η σύσταση των υλικών - αποβλήτων που προκύπτει από κάθε κατηγορία:

1. Απόβλητα που προκύπτουν από ολική ή μερική κατεδάφιση κτιρίων ή και άλλων δομικών κατασκευών

Η κατηγορία αυτή συνίσταται από υλικά όπως σκυρόδεμα (άοπλο ή οπλισμένο), τούβλα, επιχρίσματα, κεραμικά, πλακάκια, ξύλο, γυαλί, πλαστικό, δομικά υλικά με βάση τη γύψο, χώμα, άμμος, χαλίκι, σκύρα κλπ. Τα υλικά των κατεδαφίσεων μπορεί επίσης να περιέχουν μέταλλα, αμιάντο, χρώματα, κόλλες, ρητίνες, μονωτικά υλικά, διαλύτες, κλπ. Τα υλικά κατεδαφίσεων χαρακτηρίζονται από μεγάλη ανομοιογένεια και προκύπτουν από την ολοκληρωτική ή επιλεκτική κατεδάφιση των κατασκευών. Η σύσταση των υλικών αυτών ποικίλλει ανάλογα με το είδος, την παλαιότητα, τη μορφή, τη χρήση, το μέγεθος και το κυρίαρχο υλικό της κατασκευής. Τέλος, σημαντικό ρόλο στη μερική ή ολική κατεδάφιση ενός κτιρίου παίζει η ιστορική, πολιτιστική και οικονομική αξία της κατασκευής.

2. Εργοταξιακά απόβλητα

Τα απόβλητα αυτής της κατηγορίας περιέχουν υλικά όπως ξύλο, πλαστικό, χαρτί/χαρτόνι, γυαλί, μέταλλα, καλώδια, χρώματα, βερνίκια, κόλλες, στοιχεία επικαλύψεων, προσόψεων και γενικά όλα τα απορρίμματα που προέρχονται από τη λειτουργία των εργοταξίων κατασκευής, επισκευής, ενίσχυσης, προσθήκης, επέκτασης και ανακαίνισης κτιρίων ή και άλλων δομικών κατασκευών. Πρέπει να σημειωθεί ότι συνήθη απορρίμματα αυτής της κατηγορίας είναι και τα υλικά συσκευασίας οικοδομικών υλικών.

3. Απόβλητα που προκύπτουν από εργασίες εκσκαφών και θεμελιώσεων

Στην κατηγορία αυτή συναντώνται υλικά όπως χώματα εκσκαφών, άμμος, χαλίκι, σκύρα, αργιλικά πετρώματα και ιλύς, καθώς και οποιαδήποτε άλλα υλικά που μπορεί να προκύψουν από εργασίες εκσκαφών. Τα απορριπτόμενα υλικά εκσκαφών παράγονται σχεδόν σε κάθε κατασκευαστική δραστηριότητα ενώ μεγάλες ποσότητες προκύπτουν στις υπόγειες κατασκευές και σε έργα της γεωτεχνικής μηχανικής. Συγκριτικά με τις υπόλοιπες κατηγορίες, αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος των ΑΕΚΚ. Πέραν των ανωτέρω δραστηριοτήτων, η συγκεκριμένη κατηγορία αποβλήτων προέρχεται και από φυσικά φαινόμενα, όπως υπερχειλίσεις χειμάρρων, σεισμούς, πλημμύρες, κατολισθήσεις σε δρόμους, υλικά από το πέρασμα χιονοστιβάδων κλπ. Η σύσταση των υλικών εκσκαφών εξαρτάται σημαντικά από τα τοπικά γεωλογικά δεδομένα και από το είδος της κατασκευής.

4. Απόβλητα που προκύπτουν από εργασίες κατασκευής και συντήρησης οδικών έργων

Στα απόβλητα αυτής της κατηγορίας ανήκουν η άσφαλτος (με ή χωρίς πίσσα) και τα υλικά βάσεων και υποβάσεων όπως άμμος, χαλίκι και σκύρα. Τα απορριπτόμενα υλικά οδοποιίας δύναται επίσης να προκύψουν και από τις υπόγειες υδραυλικές και ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πόλεων καθώς και από έργα επιδιόρθωσης αυτών.

Ανάλογα με το είδος των αποβλήτων που παράγονται, τα ΑΕΚΚ μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο ευρείες κατηγορίες, τα αδρανή και επικίνδυνα απόβλητα (70,71,72):

Αδρανή θεωρούνται τα απόβλητα τα οποία δεν υφίστανται καμία σημαντική φυσική, χημική ή βιολογική μετατροπή, δεν διαλύονται, δεν καίγονται ούτε συμμετέχουν σε άλλες φυσικές ή χημικές αντιδράσεις, δεν διασπώνται βιολογικά ούτε επιδρούν δυσμενώς σε άλλα υλικά με τα οποία έρχονται σε επαφή κατά τρόπο ικανό να προκαλέσουν ρύπανση του περιβάλλοντος ή να βλάψουν την υγεία του ανθρώπου. Αν τα απόβλητα αυτά αποπλυθούν δίνουν αμελητέα περιεκτικότητα σε ρύπους και τοξικά υλικά, ενώ δεν πρέπει να τίθεται σε κίνδυνο η ποιότητα των επιφανειακών ή υπογείων υδάτων.

Η πλειοψηφία των ΑΕΚΚ διακρίνονται για τον αδρανή χαρακτήρα τους ενώ μικρές ποσότητες επικίνδυνων αποβλήτων είναι δυνατό να περιέχονται στο συγκεκριμένο ρεύμα αποβλήτων (70,71,72). Επίσης, υπάρχουν περιπτώσεις όπου αδρανή υλικά έχουν αναμιχθεί με επικίνδυνα απόβλητα. Στη περίπτωση αυτή τα απόβλητα στο σύνολο τους θεωρούνται επικίνδυνα. Για παράδειγμα αν με τα απόβλητα κατεδάφισης μίας κατασκευής αναμιχθούν προϊόντα αμιάντου, τα απόβλητα στο σύνολο τους πρέπει να αντιμετωπισθούν ως επικίνδυνα.

2.2.2.1 Οικοδομικά Απόβλητα

Τα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων (C & D wastes) αποτελούν σημαντικό μέρος της συνολικής παραγωγής στερεών αποβλήτων στον κόσμο και το μεγαλύτερο μέρος τους καταλήγει στις χωματερές.

Η ανάγκη για ανακύκλωση των αδρανών αποβλήτων υπαγορεύεται από το γεγονός ότι α) η πλειονότητα των αποβλήτων αποτελεί εν δυνάμει χρήσιμο υλικό που μπορεί να εξοικονομήσει τις αντίστοιχες φυσικές πρώτες ύλες και β) η διάθεση αδρανών σε ΧΥΤΑ οικιακών απαγορεύεται πλέον.

Διάφορες έρευνες από μηχανικούς σκυροδέματος έχουν σαφώς προτείνει τη δυνατότητα κατάλληλης διαχείρισης και επαναχρησιμοποίησης των εν λόγω αποβλήτων ως αδρανή σε νέο σκυρόδεμα, ειδικά σε εφαρμογές χαμηλότερου επιπέδου (low level applications) (73). Η περιορισμένη χρήση αυτών των ανακυκλωμένων αδρανών σε δομικού τύπου σκυρόδεμα- μόνο σε ορισμένου τύπου δομικά τούβλα- οφείλεται στην εγγενή έλλειψη αυτού του τύπου των υλικών. Σε σύγκριση με τα φυσιολογικού βάρους φυσικά αδρανή υλικά, τα ανακυκλωμένα αδρανή έχουν σχετικά χαμηλότερες αντοχές, είναι πιο πορώδη και άρα έχουν χαμηλότερη πυκνότητα και υψηλότερες τιμές απορρόφησης του νερού (74).

Τα ανακυκλωμένα αδρανή υλικά σκυροδέματος (RCA: Recycled Concrete Aggregates) παράγονται με την ελάττωση του μεγέθους του κατεδαφισμένου σκυροδέματος. Τα RCA διαφέρουν από τα φρέσκα αδρανή υλικά, λόγω της τιμηντόπαστας που είναι συνδεδεμένη με την επιφάνεια των αρχικών αδρανών, μετά τη διαδικασία της ανακύκλωσης. Αυτή η εξαιρετικά πορώδης πάστα τιμέντου συμβάλλει στη χαμηλότερη πυκνότητα των σωματιδίων και στο μεγαλύτερο πορώδες, στη διακύμανση της ποιότητας των RCA και στη μεγαλύτερη απορρόφηση του νερού (75).

Ο πυρήνας όλων των τεχνολογιών ανακύκλωσης των αδρανών αποβλήτων βασίζεται στις διεργασίες θραύσης-κοσκίνισης. Δεδομένου ότι το εισερχόμενο ρεύμα είναι ιδιαίτερα ετερογενές, η διεργασία συνδυάζεται συχνά με κάποιο σύστημα διαχωρισμού. Οι διαθέσιμες τεχνολογίες ανακύκλωσης πρακτικά χωρίζονται σε τρία επίπεδα.

Το πρώτο επίπεδο αναφέρεται κυρίως σε μονάδες φορητές, μικρής δυναμικότητας, οι οποίες είτε εγκαθίστανται επί τόπου του έργου για την απευθείας ανακύκλωση των υλικών είτε εγκαθίστανται σε σταθερή βάση σε ΧΥΤΑ. Το τελικό προϊόν περιέχει αρκετές προσμίξεις και είναι χαμηλών προδιαγραφών. Το επίπεδο αυτό ανταποκρίνεται κυρίως στις μεσογειακές χώρες, στις οποίες το τέλος ταφής είναι ακόμα χαμηλό (76).

Το δεύτερο επίπεδο αποτελεί μια ενδιάμεση κατάσταση και αναφέρεται σε μονάδες με ελαφρώς πιο πολύπλοκο εξοπλισμό χωρίς ιδιαίτερα μεγάλη αύξηση στο κόστος, ο οποίος επιτυγχάνει και κάποιο βασικό διαχωρισμό (π.χ. μαγνητικός διαχωρισμός, απομάκρυνση ανεπιθύμητων προσμίξεων). Η βιωσιμότητα των μονάδων σχετίζεται κυρίως με τα κόστη διάθεσης, μεταφοράς και πρώτων υλών.

Τέλος το τρίτο επίπεδο εφαρμόζεται σε κράτη, τα οποία έχουν απαγορεύσει τη διάθεση των αδρανών προς ταφή ή τα τέλη είναι σχεδόν απαγορευτικά, με αποτέλεσμα η ανακύκλωση να αποτελεί τη βασική οδό διαχείρισης. Η αγορά περιλαμβάνει μονάδες επεξεργασίας μεγάλης κλίμακας με εξεζητημένα συστήματα διαχωρισμού, όπως αεροδιαχωριστές. Υπάρχουν ακόμα συστήματα διαλογής στην πηγή, στα οποία χρήσιμα υλικά απομακρύνονται και ταξινομούνται σε σωρούς πριν την κατεδάφιση. Με αυτό τον τρόπο, παράγονται υλικά υψηλής προστιθέμενης αξίας και κάποιες χώρες (Αυστρία, Γερμανία και Ολλανδία) έχουν αυξήσει τα ποσοστά ανακύκλωσης που φτάνουν μέχρι 85-90% (76).

Τα προϊόντα που εξάγονται από την επεξεργασία των αδρανών απορριμμάτων μπορούν να αξιοποιηθούν με αντίστοιχη εξοικονόμηση πρώτων υλών σε διάφορες κατηγορίες τεχνικών έργων, όπως αυτοκινητόδρομοι, πεζοδρόμια και παρόμοια έργα. Το ενδιαφέρον εστιάζεται στο ορυκτής προέλευσης κλάσμα (mineral materials), που είναι και το μεγαλύτερο. Από προχωρημένες διεργασίες διαχωρισμού μπορούν να προκύψουν προϊόντα για ένα εύρος εφαρμογών, ως ακολούθως:

- Δευτερογενής άσφαλτος για ανάμιξη
- Μίγμα για την παραγωγή τούβλων
- Μίγμα για την παραγωγή κλίνκερ τσιμέντου
- Μίγμα για την παραγωγή σκυροδέματος (έως C20-25)
- Υλικό υποστρώματος οδών
- Υλικό στεγάνωσης ή επικάλυψης ΧΥΤΑ
- Γενικά οπουδήποτε απαιτούνται αδρανή υλικά και άμμος (76)

2.2.2.2 Ιδιότητες των αδρανών οικοδομικών αποβλήτων

Τα αδρανή μπορεί να έχουν μολυνθεί με τούβλα, άλατα, κεραμίδια, άμμο και σκόνη, ξυλεία, πλαστικά, χαρτόνι και χαρτί, και μέταλλα. Έχει αποδειχθεί ότι τα μολυσμένα αδρανή μετά το χωρισμό από τα άλλα απόβλητα, και κοσκίνισμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υποκατάστατο για τα φυσικά χονδρά αδρανή του σκυροδέματος. Όπως και με τα φυσικά αδρανή, η ποιότητα των ανακυκλωμένων αδρανών, από την άποψη της κατανομής του μεγέθους, της απορρόφησης, της τριβής, κ.λπ. πρέπει επίσης να αξιολογηθεί πριν από την τελική τους χρήση. Μερικές από τις πιο σημαντικές ιδιότητες αυτών των ανακυκλωμένων αδρανών συζητούνται στις επόμενες παραγράφους (73,77).

Κατανομή μεγέθους

Είναι πλέον γενικά αποδεκτό ότι, τα ανακυκλωμένα αδρανή, είτε λεπτόκοκκα είτε χονδροειδή, μπορούν να ληφθούν από πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια θραύση και την επακόλουθη αφαίρεση των προσμειξών. Σε γενικές γραμμές, μια σειρά διαδοχικών θραυστήρων χρησιμοποιούνται, με υπερμεγέθη σωματίδια που επιστρέφουν στον αντίστοιχο θραυστήρα για την επίτευξη επιθυμητής ταξινόμησης. Το καλύτερο σχήμα κατανομής των σωματιδίων συνήθως επιτυγχάνεται με την πρώτη θραύση και στη συνέχεια με τη δευτερογενή θραύση, αλλά από οικονομικής απόψεως, μία μόνο διαδικασία θραύσης είναι συνήθως η πιο αποτελεσματική. Η πρωτοβάθμια θραύση συνήθως μειώνει τα C & D χαλάσματα σε κομμάτια περίπου 50 χιλιοστών και στο δρόμο για το δεύτερο θραυστήρα, ηλεκτρομαγνήτες χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση τυχόν ξένων προσμειξών μετάλλων στο υλικό. Ο δεύτερος θραυστήρας χρησιμοποιείται στη συνέχεια για να μειώσει περαιτέρω το υλικό σε μέγεθος περίπου 14-20 mm. Πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα κατά τη θραύση υλικών από τούβλα, επειδή περισσότερα λεπτόκοκκα παράγονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας θραύσης από ό, τι κατά τη διάρκεια της θραύσης του σκυροδέματος ή των πρωτογενών αδρανών υλικών (71,77).

Απορρόφηση

Η απορρόφηση του νερού στα ανακυκλωμένα αδρανή κυμαίνεται από 3 έως 12% για τα χονδρόκοκκα και τα λεπτόκοκκα κλάσματα με την πραγματική τιμή να εξαρτάται τον τύπο του σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των αδρανών. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτή η τιμή είναι πολύ υψηλότερη από αυτή του φυσικών αδρανών υλικών των οποίων η απορρόφηση είναι περίπου 0,5-1%. Το υψηλό πορώδες των ανακυκλωμένων αδρανών υλικών μπορεί κυρίως να αποδοθεί στην κατάλοιπα κονιάματος που είναι

προσκολλημένα στο αρχικό αδρανές. Αυτό, στην πραγματικότητα, επηρεάζει επίσης την εργασιμότητα και άλλες ιδιότητες του νέου σκυροδέματος (71,77).

Αντοχή στην τριβή

Πολύ περιορισμένη βιβλιογραφία είναι διαθέσιμη σχετικά με την αντοχή στην τριβή των RA. Ωστόσο, μελέτες σχετικά με τη χρήση αυτών των αδρανών ως υπόστρωμα σε εύκαμπτα οδοστρώματα δείχνουν ελπιδοφόρα αποτελέσματα. Τα ανακυκλωμένα αδρανή υλικά έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία σκυροδέματος που χρησιμοποιείται περαιτέρω σε άκαμπτα πεζοδρόμια, σε χώρες όπως οι ΗΠΑ και το Ηνωμένο Βασίλειο (71,77).

2.2.2.3 Ιδιότητες σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή

Μίγματα σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή μπορούν να σχεδιαστούν με τον ίδιο τρόπο όπως και αυτά που χρησιμοποιούν φυσικά αδρανή, υπό τον όρο ότι η επιπλέον απορρόφηση νερού λαμβάνεται κατάλληλα υπόψη κατά τον καθορισμό του περιεχομένου νερού στο ανάμιγμα. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των RCA δίνονται παρακάτω:

- Κατά το σχεδιασμό αναμίγματος σκυροδέματος με χρήση ανακυκλωμένων αδρανών μεταβλητής ποιότητας, ένα υψηλότερο πρότυπο απόκλισης πρέπει να υιοθετηθεί προκειμένου να επιτευχθεί ένας στόχος αντοχών βάσει μίας συγκεκριμένης απαιτήσης αντοχής.
- Όταν χοντρόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή συνδυάζονται με φυσική άμμο, μπορεί να υποτεθεί στο στάδιο του σχεδιασμού, ότι η ελεύθερη w/c αναλογία για μια συγκεκριμένη αντοχή θλίψης θα είναι περίπου η ίδια για τόσο για τα RAC όσο και για τα συμβατικά σκυροδέματα.
- Για να επιτευχθεί σε ένα μίγμα με ανακυκλωμένα αδρανή η ίδια κάθιση με το συμβατικό σκυροδέμα, η ελεύθερη περιεκτικότητα σε νερό θα πρέπει να είναι περίπου 5% περισσότερη από ό, τι για τα συμβατικά σκυροδέματα.
- Η άμμος σε συνολικό ποσοστό για τα RAC είναι η ίδια όπως όταν χρησιμοποιούνται φυσικά αδρανή.
- Δοκιμαστικά μίγματα είναι υποχρεωτικά και οι κατάλληλες προσαρμογές ανάλογα με την πηγή και τις ιδιότητες των RA θα πρέπει να γίνονται για να αποκτήσουν την απαιτούμενη εργασιμότητα, τον κατάλληλο λόγο w/c και τις κατάλληλες αντοχές για το τελικό RAC (71).

Δυστυχώς, όμως, επικρατεί ακόμη έλλειψη των κατάλληλων προτύπων και προδιαγραφών ανά την υφήλιο σχετικά με τη χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών υλικών, εκτός από τις προδιαγραφές των RILEM, JIS και εκείνων που χρησιμοποιούνται στο Χονγκ Κονγκ. Συγκεκριμένα, η χρήση του σκυροδέματος με 100% ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα αδρανή για χαμηλότερου επιπέδου εφαρμογές επιτρέπεται στο Χονγκ Κονγκ, αν και για εφαρμογές υψηλότερου επιπέδου, μόνο 20% αντικατάσταση επιτρέπεται, και το σκυροδέμα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για γενικούς εφαρμογές, εκτός από υδατοφράκτες. Επίσης, στην Ιαπωνία, η JIS συνέταξε τεχνική έκθεση, TRA 0006 "ανακυκλωμένο σκυροδέμα χρησιμοποιώντας ανακυκλωμένο αδρανή" για την προώθηση της χρήσης σκυροδέματος από ανακυκλωμένα αδρανή. Ανάπτυξη

σχετικών προτύπων για τα ανακυκλωμένα αδρανή θα παρείχαν τους παραγωγούς με τους στόχους και τους χρήστες τη διασφάλιση της ποιότητας του προϊόντος. Τα πρότυπα λοιπόν που διατυπώνονται στις παραπάνω χώρες μπορεί να είναι μια κατευθυντήρια γραμμή για την ανάπτυξη αυτών των προδιαγραφών (71,77).

Στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής, πραγματοποιείται μελέτη στην προσθήκη οικοδομικών αποβλήτων ως υποκαταστάτων των χονδρόκοκκων αδρανών στο διαπερατό σκυρόδεμα. Η χρήση των συγκεκριμένων θα βελτιώσει το περιβάλλον και θα αποτελεί μία ακόμα εναλλακτική λύση για τα 500 εκ. τόνους το χρόνο των κατασκευαστικών αποβλήτων της Ευρώπης, και όσον αφορά το μερίδιο της Ελλάδας, για τα 5 εκατομμύρια τόνους που παράγονται ετησίως (σύμφωνα με αναφορές του 2003).

Κεφάλαιο 3

Κεφάλαιο 3: ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΘΕΜΑΤΟΣ

Σκοπός Διδακτορικής Διατριβής

Ο σκοπός της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής είναι η ανάπτυξη και ο σχεδιασμός ενός φθηνού εναλλακτικού αντιπλημμυρικού μέτρου προστασίας του διαπερατού σκυροδέματος. Η παρασκευή του συγκεκριμένου τύπου σκυροδέματος έγινε τόσο με φυσικές πρώτες ύλες όσο και με εναλλακτικά αδρανή (βιομηχανικά παραπροϊόντα, οικοδομικά απόβλητα) και ελέγχθηκαν οι φυσικομηχανικές του ιδιότητες καθώς και τα περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση του.

Τοποθέτηση Θέματος

Στο σύνολο των ερευνητικών προσπαθειών, η προστασία του περιβάλλοντος και ταυτόχρονα η αντιμετώπιση των προβλημάτων που έχουν προκύψει από την ανθρώπινη δραστηριότητα αποτελούν κρίσιμη συνιστώσα που λαμβάνεται πάντα υπόψιν στο πλαίσιο της αειφόρου ανάπτυξης. Η συνεχής οικοδόμηση και η εξάπλωση του αστικού ιστού τις περισσότερες φορές αυθαίρετα, με «εξάντληση» των δικτύων υποδομής έχουν επιβαρύνει πολύ τη φύση. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα περιβαλλοντικής επίπτωσης είναι η μείωση της αποστραγγιστικής ικανότητας του εδάφους λόγω της άναρχης δόμησης με τελικό αποτέλεσμα την ανεπαρκή αντιπλημμυρική προστασία, και την αδυναμία εξασφάλισης νερού ανθρώπινης κατανάλωσης. Οι πλημμυρές είναι φυσικά φαινόμενα τα οποία δεν μπορούν να προληφθούν. Εντούτοις, η ανθρώπινη δραστηριότητα συμβάλλει στην αύξηση της πιθανότητας και στις αρνητικές επιπτώσεις των μεγάλων πλημμυρών.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση αναγνωρίζοντας την σοβαρότητα αυτής της απειλής καθώς και τους κινδύνους που κρύβει, έχει ήδη ξεκινήσει ένα πρόγραμμα για την λήψη μέτρων προστασίας κατά των πλημμυρών. Η Οδηγία-Πλαίσιο (2007/60/ΕΚ) [79] του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης 23ης Οκτωβρίου 2000 για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων έχει θέσει ως στόχο τη βελτίωση της κατάστασης των υδάτων σε όλα τα κράτη μέλη της, τόσο από άποψη ποσότητας όσο και από άποψη ποιότητας. Η Ελλάδα ενσωμάτωσε στο

εθνικό δίκαιο την Οδηγία - Πλαίσιο 2007/60 για τα νερά με τον Ν.3199/2003 [85] και το Π.Δ. 51/2007 να επιβάλλουν τη διασφάλιση της αειφορίας των υδάτων μέσα από τη διαχείριση και την προστασία τους, ορίζοντας μάλιστα και χρονικό όριο για την επίτευξη των στόχων τους, το 2015. Ήδη έχει ενεργοποιηθεί το « Εθνικό πρόγραμμα διαχείρισης και προστασίας των υδατικών πόρων», το οποίο μεταξύ άλλων προβλέπει και την χρηματοδότηση και τον σχεδιασμό αντιπλημμυρικών έργων με πρώτη προτεραιότητα τις περιοχές αυξημένης επικινδυνότητας (π.χ. Αττική, μεγάλες πόλεις, Έβρος). Ο σχεδιασμός θα περιλαμβάνει απαραίτητα αντιπλημμυρικά έργα, χάρτες επικινδυνότητας, σχέδια διαχείρισης εκτάκτων αναγκών και άλλα μέτρα.

Ένα ιδιαίτερο χρήσιμο εργαλείο στο πλαίσιο λήψης των αντιπλημμυρικών μέτρων είναι το διαπερατό σκυρόδεμα οι βασικές αρχές και η φιλοσοφία του οποίου έχει σταδιακά αναπτυχθεί τις τελευταίες δεκαετίες στις ΗΠΑ. Η διερεύνηση των βέλτιστων συνθηκών καθώς και των παραμέτρων ανθεκτικότητας του διαπερατού σκυροδέματος θα ενισχύσει τις προσπάθειες για την αντιμετώπιση των πλημμύρων καθώς θα αποτελεί ένα ακόμα μέτρο προστασίας του οποίου το κόστος είναι κατά πολύ μικρότερο σε σχέση με το κόστος των πολύπλοκων τεχνολογικών κατασκευών αντιπλημμυρικών συστημάτων.

Σε μια συνδυαστική προσέγγιση μεταξύ ιδιοτήτων του διαπερατού σκυροδέματος και αειφορίας, η διερεύνηση της μερικής αντικατάστασης των χονδρόκοκκων αδρανών (που εξασφαλίζουν το πορώδες) θα μπορούσε να συμβάλει θετικά στην αξιοποίηση ορισμένων παραπροϊόντων καθώς και αποβλήτων. Επιπροσθέτως το διαπερατό σκυρόδεμα μπορεί να δώσει μια λύση στο έντονο και πολύ σημαντικό πρόβλημα της λειψυδρίας και ξηρασίας που πλήττει τα νησιά της χώρας μας και έχουν αναδείξει σε θέμα προτεραιότητας την συλλογή των όμβριων υδάτων. Η διαχείριση των ταμιευτήρων και της ζήτησης αλλά και η λήψη γενναίων αποφάσεων για τη μείωση των απωλειών των πόρων αποτελεί πλέον αδήριτη ανάγκη. Εν όψει της κλιματικής αλλαγής είναι ιδιαίτερα σημαντικό να υπάρξει δραστική παρέμβαση και στο σύστημα διαχείρισης των ταμιευτήρων και στη διευθέτηση της ζήτησης για να μην υπάρξουν προβλήματα υδροδότησης κατά την επόμενη δεκαετία. Το διαπερατό σκυρόδεμα μπορεί να αποτελέσει ένα διαχειριστικό εργαλείο των όμβριων υδάτων καθώς μέσω ειδικών κατασκευών του, θα μπορούσε μεγάλο μέρος από τα όμβρια ύδατα να συλλέγεται και να χρησιμοποιείται για άρδευση ή ύδρευση.

Πρωτοτυπία Διδακτορικής Διατριβής

Στη διατριβή αυτή διερευνώνται για πρώτη φορά εναλλακτικές συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος και αξιολογούνται τα αποτελέσματά τους στο σύνολο σχεδόν των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων καθώς και των βασικών ιδιοτήτων ανθεκτικότητας του σκυροδέματος. Πέρα λοιπόν από τις αντοχές των δοκιμίων σε θλίψη και εφελκυσμό πραγματοποιείται έλεγχος της ανθεκτικότητας τους σε συνθήκες τριψής-απότριψης, έλεγχος ψύξης-απόψυξης (μέσω της παραλλαγής του προτύπου ASTM C666), έλεγχος του φαινομένου ενανθράκωσης σε διαφορετικούς ως προς την επιβάρυνσή τους σε CO₂ χώρους, έλεγχος του

συντελεστή υδατοπερατότητάς τους (πρότυπο εδαφομηχανικής E105-86), της υδατοαπορροφητικότητας του σκυροδέματος (μέθοδος BS 1881-122:1983) καθώς και έλεγχος της επίδρασης ακραίων συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας στα δοκίμια διαπερατού σκυροδέματος με τη χρήση αυτοκλείστου. Στο πλαίσιο των διαφόρων συνθέσεων μελετάται ιδιαίτερα η χρησιμοποίηση υλικών, πέραν των φυσικών θραυστών ασβεστολιθικών αδρανών, που χαρακτηρίζονται ως απόβλητα ή παραπροϊόντα όπως τα οικοδομικά απόβλητα ή η σκωρία χάλυβα. Ταυτόχρονα μέσω απεικονίσεων αξονικής τομογραφίας ελέγχθηκε το εσωτερικό πορώδες των παραγόμενων δοκιμίων (διαστάσεις πόρων καθώς και μορφολογία τους) με τη χρήση εικόνων-τομών που παραλήφθηκαν από αξονικό τομογράφο με στόχο την καλύτερη κατανόηση της εσωτερικής δομής των κενών τους χώρων καθώς και την σύνδεση του εσωτερικού πορώδους με την υδατοπερατότητα που αποτελεί βασική ιδιότητα του διαπερατού σκυροδέματος.

Επιπροσθέτως στο πλαίσιο της διατριβής και με στόχο τις περιβαλλοντικές εφαρμογές έγινε συστηματική μελέτη της κατακράτησης του συγκεκριμένου τύπου σκυροδέματος σε ρύπους όπως τα νιτρικά και θειικά ιόντα καθώς και σε οργανικά κατάλοιπα των αυτοκινήτων με στόχο την αξιολόγηση της χρήσης του συγκεκριμένου προϊόντος ως φίλτρου για τον καθαρισμό των όμβριων υδάτων και κατά συνέπεια την προστασία του υδροφόρου ορίζοντα. Τέλος στο πλαίσιο της υλοποίησης των συμπερασμάτων της έρευνας πραγματοποιήθηκε πιλοτική διάστρωση με συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος σε εργοστασιακό χώρο στάθμευσης μιας τσιμεντοβιομηχανίας. Με αυτόν τον τρόπο ελέγχθηκαν και οι ιδιότητες του διαπερατού σκυροδέματος σε πραγματικές συνθήκες (in situ).

Κεφάλαιο 4

Κεφάλαιο 4: ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Συλλέχθηκαν αδρανή σκυροδέματος τόσο φυσικής προέλευσης (θραυστά ασβεστολιθικά αδρανή και άμμος) όσο και βιομηχανικά παραπροϊόντα (σκωρία χάλυβα) καθώς και οικοδομικά απόβλητα (ανακυκλωμένο σκυρόδεμα). Ο χαρακτηρισμός των αδρανών έγινε βάσει των προδιαγραφών του προτύπου ΕΛΟΤ EN 12620 (80) και εξετάστηκε η κοκκομετρία τους, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους, το πορώδες τους καθώς και η χημική τους σύσταση. (Κεφάλαιο 5)

Σε ένα προκαταρκτικό στάδιο δοκιμών, παρασκευάστηκαν δοκιμαστικές συνθέσεις δοκιμίων διαπερατού σκυροδέματος με φυσικά ασβεστολιθικά αδρανή και ως παράμετροι εξετάστηκαν οι κοκκομετρικές κατανομές των αδρανών, οι αναλογίες ανάμιξης των πρώτων υλών, οι διαφορετικοί τύποι τοιμέντου (CEMII 32,5 και CEMII 42,5) καθώς και η χρήση πυριτικής παιπάλης. Τα δοκίμια αυτά ελέγχθηκαν ως προς τις αντοχές τους σε θλίψη για ηλικίες 3, 7 και 28 ημερών και διαπιστώθηκε ότι εμφάνισαν ικανοποιητικές τιμές αντοχών για το πεδίο εφαρμογών τους. Σε ορισμένες από αυτές τις συνθέσεις εξετάστηκαν οι αντοχές σε θλίψη και για τις ηλικίες 1 και 2 ημερών. (Κεφάλαιο 6)

Ταυτόχρονα ελέγχθηκε η υδατοπερατότητα των δοκιμίων με τρεις εναλλακτικές μεθόδους προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη που να ανταποκρίνεται στα δοκίμια διαπερατού σκυροδέματος που παρασκευάστηκαν:

- 1) Με χρήση ειδικής διάταξης που λειτουργεί βάσει του προτύπου EN 12390-8:2000 (81),
- 2) Με χρήση ιδιοκατασκευής που σχεδιάστηκε με σκοπό τον έλεγχο της υδατοπερατότητας του συγκεκριμένου τύπου σκυροδέματος.
- 3) Τέλος για την ορθότερη μέτρηση της συγκεκριμένης ιδιότητας κατασκευάστηκε μια επιπλέον ιδιοκατασκευή μέτρησης του συντελεστή περατότητας k (cm/s) βάσει του προτύπου εδαφομηχανικής E 105-86 (82) (Κεφάλαιο 3).

Επιπροσθέτως παράχθηκαν συνθέσεις με διάφορα ποσοστά υποκατάστασης των φυσικών ασβεστολιθικών αδρανών με οικοδομικά απόβλητα και σκωρία χάλυβα οι οποίες μαζί με μία σύνθεση αμιγών ασβεστολιθικών αδρανών αποτελούν τις 7 τελικές συνθέσεις όπου πραγματοποιηθήκαν οι περαιτέρω έλεγχοι. (Κεφάλαιο 7)

Συγκεκριμένα αφού ολοκληρώθηκαν οι έλεγχοι υδατοπερατότητας και αντοχών του σκυροδέματος σε θλίψη, εφελκυσμό, έγινε έλεγχος των αντοχών του σκυροδέματος σε τρίψη-απότριψη μέσω ειδικής συσκευής (τριβείο) η οποία περιέχει μια περιστρεφόμενη ταινία ειδικής τραχύτητας. Η αντοχή των δοκιμίων σε τρίψη-απότριψη ελέγχθηκε τόσο από την απώλεια μάζας του εκάστοτε δοκιμίου κατόπιν της τριβής όσο και από την απώλεια ύψους του. Επίσης πραγματοποιήθηκε και έλεγχος της υδατοαπορροφητικότητας του σκυροδέματος βάσει της μεθόδου BS 1881-122:1983 (83) (Κεφάλαιο 7).

Στο πλαίσιο της εκτενέστερης αξιολόγησης του εσωτερικού πορώδους των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση εικόνων-τομών που παραλήφθηκαν από αξονικό τομογράφο και κατόπιν επεξεργάστηκαν με ειδικό πρόγραμμα Image Pro Analysis (Κεφάλαιο 8).

Επίσης πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος της επίδρασης των έντονων θερμοκρασιακών μεταβολών (ψύξη-απόψυξη) μέσω της παραλλαγής του προτύπου ASTM C666 (17). Βάσει αυτών των αποτελεσμάτων αξιολογήθηκε η χρήση του διαπερατού σκυροδέματος σε πιο βόρειες περιοχές με ακραία καιρικά φαινόμενα. (Κεφάλαιο 9,1). Παράλληλα παρασκευάσθηκαν διαλύματα θαλασσινού νερού 3,5% w/w NaCl στα οποία εμβαπτίστηκαν δοκίμια σκυροδέματος με σκοπό τον έλεγχο της επίδρασης των χλωριόντων στα υπό εξέταση δοκίμια μετά την πάροδο των προβλεπόμενων χρονικών διαστημάτων. (Κεφάλαιο 9,2). Επιπλέον με τη χρήση αυτόκλειστου μελετήθηκε η επίδραση ακραίων συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας στα δοκίμια διαπερατού σκυροδέματος (Κεφάλαιο 9,3).

Ακολουθώς ελέγχθηκε η ενανθράκωση κατά την οποία δοκίμια διαπερατού σκυροδέματος τοποθετήθηκαν σε διαφορετικούς, ως προς την επιβάρυνση τους με CO₂, χώρους και μετά την πάροδο των προβλεπόμενων χρονικών διαστημάτων θα μετρηθεί το ποσοστό ενανθράκωσης τους (Κεφάλαιο 10).

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η μελέτη σχετικά με την κατακράτηση ανόργανων και οργανικών ρύπων από τα δοκίμια. Οι ανόργανοι ρύποι αναφέρονται κυρίως σε διαλύματα θεικών και νιτρικών ιόντων στο πλαίσιο ελέγχου των ενδεχόμενων περιβαλλοντικών οφελών του διαπερατού σκυροδέματος συνεχίστηκαν οι δοκιμές σχετικά με την κατακράτηση θεικών και νιτρικών ιόντων σε επιλεγμένα δοκίμια του. Παρασκευάσθηκαν αντίστοιχα υδατικά διαλύματα συγκεντρώσεων 1M, 0,1 M 0,01 M και διηθηθήκαν μέσα από τα δοκίμια του σκυροδέματος αφού αυτά συμπλήρωσαν την ηλικία των 28 ημερών. Στο νερό διηθήσεως που συλλέχθηκε μετρήθηκε το ποσοστό των θεικών ιόντων με το πρότυπο ASTM D516-68 (84) ενώ των νιτρικών με τη χρήση φασματοφωτόμετρου (συσκευή Spectrophotometer HACH DR/2010). Επίσης πραγματοποιήθηκε και ο έλεγχος της κατακράτησης οργανικών ρύπων από το διαπερατό σκυροδέμα. Συγκεκριμένα ελέγχθηκε κατά πόσον ο συγκεκριμένος τύπος σκυροδέματος μπορεί να συγκρατήσει οργανικά κατάλοιπα των αυτοκινήτων καθώς και πετρέλαιο κίνησης. Στα ίδια δοκίμια στη συνέχεια αφού διήλθε ικανοποιητική ποσότητα νερού, τα εκλούσματα τους δόθηκαν για μέτρηση TOC (Κεφάλαιο 11).

Τέλος στο πλαίσιο της υλοποίησης των συμπερασμάτων της έρευνας πραγματοποιήθηκε μια πρώτη πιλοτική διάστρωση με συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος σε εργοστασιακό χώρο στάθμευσης μιας τσιμεντοβιομηχανίας. Με αυτόν τον τρόπο ελέγχθηκαν η συμπεριφορά και οι ιδιότητες του διαπερατού σκυροδέματος σε πραγματικές συνθήκες (in situ) (Κεφάλαιο 12).

Κεφάλαιο 5

Κεφάλαιο 5: ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ Α' ΥΛΩΝ

5.1 Πρώτες ύλες και τόπος προέλευσης

Σε αυτό το Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι χημικές αναλύσεις, οι κοκκομετρικές κατανομές καθώς και διάφορα φυσικά χαρακτηριστικά των πρώτων υλών που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των συνθέσεων διαπερατού σκυροδέματος.

5.1.1 Αδρανή Υλικά

Για την παρασκευή των δοκιμών διαπερατού σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν θραυστά ασβεστολιθικά αδρανή σε τρεις κοκκομετρικές κατανομές (χαλίκι, γαρμπίλι, άμμος) που προήλθαν από το λατομείο της Εταιρίας Τσιμέντων ΤΙΤΑΝ Α.Ε. στο Καμάρι Αττικής.

Με γενικότερο στόχο την επαναχρησιμοποίηση υλικών και τη διασφάλιση της αειφόρου ανάπτυξης, παραπροϊόντα της μεταλλουργίας (σκωρία χάλυβα) καθώς και οικοδομικά απόβλητα (συγκεκριμένα ανακυκλωμένο σκυρόδεμα) χρησιμοποιήθηκαν ως υποκατάστατα των φυσικών αδρανών. Η σκωρία χάλυβα προήλθε από την ΑΕΙΦΟΡΟΣ Α.Ε. ενώ τα οικοδομικά απόβλητα από την ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΑΔΡΑΝΩΝ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ Α.Ε..

Στην εικόνα 5, παρουσιάζονται οι επιμέρους φωτογραφίες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν ως αδρανή στο πλαίσιο του διδακτορικού.



Χαλίκι



Γαρμπίλι



Άμμος



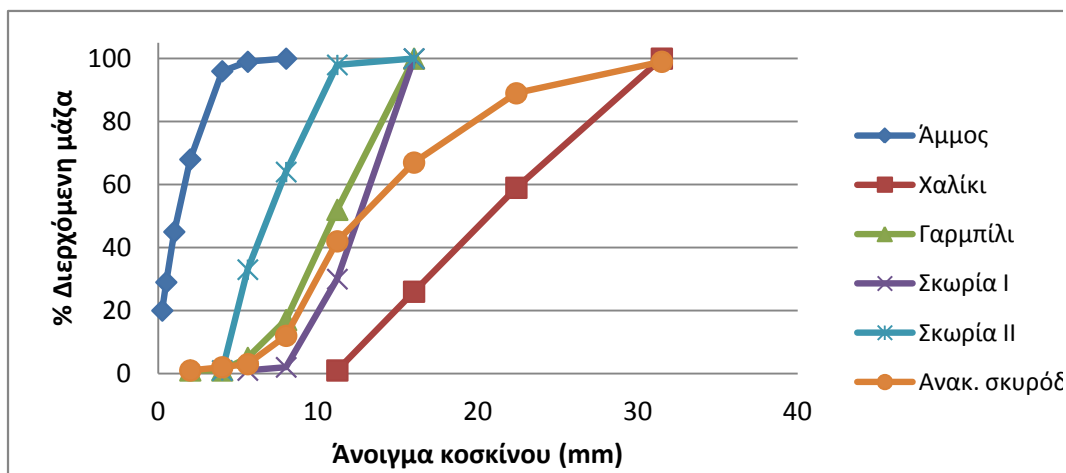
Σκωρία Χάλυβα



Οικοδομικά Απόβλητα

Εικόνα 5. Τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν

Στη συνέχεια στο διάγραμμα 5 παρατίθεται η κοκκομετρική κατανομή των αδρανών. Πρέπει να σημειωθεί πως τα αδρανή χρησιμοποιήθηκαν στην κοκκομετρία που παραλήφθηκαν από τις εταιρίες χωρίς περαιτέρω ελάττωση του μεγέθους των. Να σημειωθεί ότι παραλήφθησαν δύο κοκκομετρικές κατανομές της σκωρίας χάλυβα με σκοπό, όπως φαίνεται στο επόμενο Κεφάλαιο, την σύγκριση των ιδιοτήτων των παραγόμενων συνθέσεων.



Διάγραμμα 5. Κοκκομετρική κατανομή αδρανών

Στον Πίνακα 9 ακολουθεί η χημική ανάλυση των αδρανών.

Πίνακας 9. Χημική Ανάλυση Αδρανών

Χημική Ένωση	Ασβεστολιθικά Αδρανή	Οικοδομικά Απόβλητα	Σκωρία Χάλυβα
CaO	52,8	44,7	41,33
SiO ₂	1,16	20,1	14,92
Al ₂ O ₃	0,67	4,72	7,22
Fe ₂ O ₃	0,33	1,79	22,62
SO ₃	<0,01	0,04	0,29
MgO	0,89	0,69	1,91
K ₂ O	<0,01	0,5	0,01
Na ₂ O	0	0,4	0,19
Cl ⁻	<0,01	0,18	0,01
TiO ₂	<0,01	0,26	0
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. Τα οικοδομικά απόβλητα εμφανίζουν σχετικά υψηλότερο ποσοστό οξειδίου πυριτίου καθώς προέρχονται από την Θεσσαλονίκη και εκεί τα αδρανή που χρησιμοποιούνται είναι κατά κύριο λόγο ποταμίσιμα με υψηλά ποσοστά πυριτίου. Τόσο τα ασβεστολιθικά αδρανή όσο και τα δυο εναλλακτικά αδρανή εμφανίζουν ικανοποιητικά υψηλά επίπεδα οξειδίου του ασβεστίου. Τέλος η σκωρία χάλυβα περιέχει το αναμενόμενο υψηλό ποσοστό οξειδίου του σιδήρου.

Στον Πίνακα 10 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μετρήσεις ποροσιμετρίας N₂ των αδρανών με χρήση της συσκευής NOVA 2200e.

Πίνακας 10. Ειδική επιφάνεια και μέγεθος πόρων

	Ασβεστολιθικά Αδρανή	Οικοδομικά Απόβλητα	Σκωρία Χάλυβα
Ειδική Επιφάνεια $S_{BET} (m^2/g)$	0,406	4,850	0,724
Όγκος Πόρων $V_p (cm^3/g)$	0,001	0,013	0,003

Από τον Πίνακα 10 φαίνεται ότι ειδικότερα τα οικοδομικά απόβλητα αλλά και, σε μικρότερο βαθμό, 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 πόρων. Η διαφορά αυτή στο πορώδες των αδρανών αποτελεί σημαντική παράμετρο που επηρεάζει την συμπεριφορά των συνθέσεων όπως θα δούμε και στα επόμενα Κεφάλαια τόσο στην ανθεκτικότητα τους σε συνθήκες ψύξης-απόψυξης, ακραίων συνθηκών καθώς και στην κατακράτηση ρύπων.

Ακολουθεί ο Πίνακας 11 που παρουσιάζει το ειδικό βάρος και την υδατοαπορροφητικότητα των αδρανών.

Πίνακας 11. Ειδικό βάρος και υδατοαπορροφητικότητα αδρανών

	Άμμος	Χαλίκι-Γαρμπίλι	Σκωρία χάλυβα	Οικοδομικά Απόβλητα
Μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος σε κορεσμό (kg/m^3)	2.62	2.68	3.30	2.32
Υδατοαπορροφητικότητα (%)	2.12	0.89	2.25	4.80

Παρατηρείται ότι τόσο η άμμος όσο και τα κονδρόκοκκα αδρανή παρουσιάζουν παρόμοιο ειδικό βάρος γεγονός αναμενόμενο λόγω της ασβεστολιθικής τους σύνθεσης. Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ειδικό βάρος έχει η σκωρία χάλυβα το οποίο είναι λογικό λόγω της φύσεως του υλικού ενώ το μικρότερο τα οικοδομικά απόβλητα. Τα οικοδομικά απόβλητα εμφανίζουν τα υψηλότερα ποσοστά υδατοαπορροφητικότητας γεγονός που αιτιολογείται τόσο από το υψηλό πορώδες του υλικού όσο και από την ενανθράκωση καθώς και τις ρωγμές που αυτά έχουν υποστεί με το πέρασμα των χρόνων.

5.1.2 Τσιμέντο-Πυριτική Παιπάλη

Για την παρασκευή των συνθέσεων και με στόχο την εύρεση βέλτιστης αναλογίας τσιμέντου και αδρανών χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι τσιμέντου CEM II 32,5 και CEM II 42,5. Ταυτόχρονα σε κάποιες από τις δοκιμαστικές συνθέσεις και με στόχο την αύξηση της συνάφειας των αδρανών καθώς και των τελικών αντοχών των συνθέσεων χρησιμοποιήθηκε και πυριτική παιπάλη (silica fume) που προήλθε από την εταιρεία BASF Hellas. Ακολουθεί ο Πίνακας 12 με την χημική ανάλυση αυτών των υλικών.

Πίνακας 12. Χημική σύσταση τσιμέντου και πυριτικής παιπάλης

Συστατικό %	Portland CEM II 32.5	Portland CEM II 42.5	Πυριτική παιπάλη
CaO	53.40	55.38	0.35
SiO₂	23.00	24.86	96.40
Al₂O₃	6.00	5.13	0.75
Fe₂O₃	3.80	3.32	0.56
MgO	3.00	3.19	-
K₂O	0.75	0.88	0.43
TiO₂	-	0.21	-
SO₃	2.80	1.94	0.05
P₂O₅	-	0.11	-
Cr₂O₃	-	-	-
Cl	0.01	0.01	0.01
Na₂O	0.30	0.28	0.04
LOI	7.00	3.90	3.5

Κεφάλαιο 6

Κεφάλαιο 6: ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Σε αυτό το Κεφάλαιο παρουσιάζονται συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος για τις οποίες ελέγχονται οι βασικές φυσικομηχανικές ιδιότητες (αντοχές σε θλίψη, υδατοπερατότητα καθώς και σε επιλεγμένες συνθέσεις η τρίψη-απότριψη). Οι συνθέσεις που μελετήθηκαν είχαν διαφορετικά είδη και ποσοστά συμμετοχής τόσο των πρώτων υλών (ασβεστολιθικών αδρανών: χαλίκι και γαρμπίλι, άμμος) όσο και του τσιμέντου (δύο διαφορετικών τύπων CEMII 32,5 και CEMII 42,5).

Για την εκπόνηση των προγραμματισμένων μελετών όπως παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4 (Πειραματική Διαδικασία) χυτεύθηκαν δοκίμια διαφόρων συνθέσεων και διαφορετικών διαστάσεων, αρχικώς με αμιγώς ασβεστολιθικά αδρανή, με σκοπό να δημιουργηθεί μία σύνθεση διαπερατού σκυροδέματος που θα ικανοποιεί τις προδιαγραφές του συγκεκριμένου τύπου σκυροδέματος. Η εύρεση αυτής της συνθέσεως πραγματοποιήθηκε με τη μελέτη των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων της εκάστοτε σύνθεσης, κυρίως των θλιπτικών αντοχών και της υδατοπερατότητας, τα αποτελέσματα των οποίων αποτελούσαν κριτήριο για τις αλλαγές των παραμέτρων από τη μία σύνθεση στην επόμενη. Επίσης πραγματοποιήθηκαν και αρκετές δοκιμές, όπως λόγου χάρη η προσθήκη πυριτικής παιπάλης για διερεύνηση της επίπτωσης της τόσο στις τελικές αντοχές όσο και στη συνάφεια μεταξύ αδρανών και τσιμεντόπαστας.

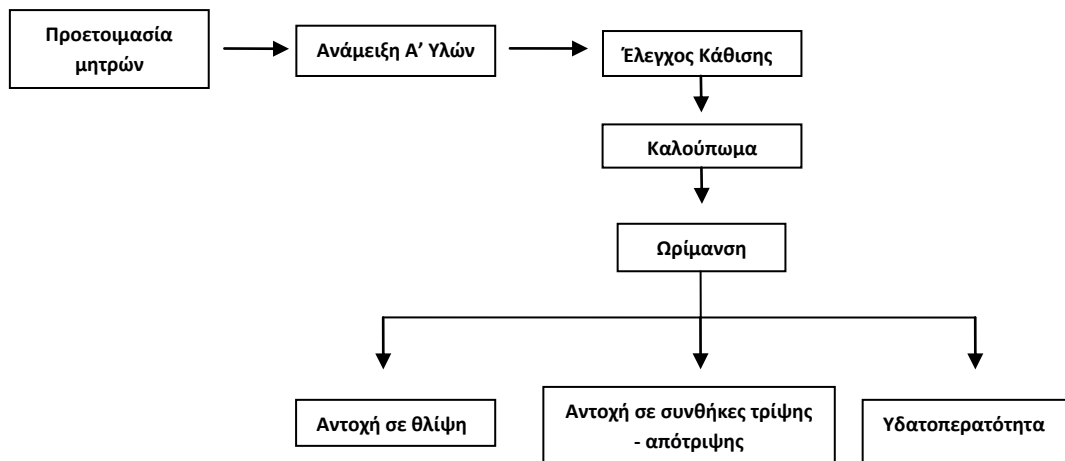
Από τις εξεταζόμενες συνθέσεις, η τελική σύνθεση ασβεστολιθικών αδρανών αντικαταστάθηκε με ποσοστά αδρανών σκωρίας χάλυβα ή/και ανακυκλωμένου σκυροδέματος και έγινε σύγκριση των εναλλακτικών αυτών συνθέσεων με την τελική ασβεστολιθική για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Η παρασκευή όλων των συνθέσεων, από τη διαδικασία της ανάμιξης των πρώτων υλών, μέχρι το καλούπωμα-ξεκαλούπωμα και την τελική ωρίμανσή τους, πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Σκυροδέματος της TITAN ΑΕ στο Καμάρι Αττικής.

Η διαδικασία της συμπύκνωσης που πραγματοποιήθηκε κατά την τοποθέτηση του νωπού σκυροδέματος στις κατάλληλες μήτρες, ήταν η δόνηση σε τράπεζα για 15 δευτερόλεπτα (s) με την ταυτόχρονη επιβολή φορτίου στην ελεύθερη επιφάνεια της μήτρας, κατά το πρότυπο ACI 522R-06: «Pervious Concrete». Σε ορισμένες από τις δοκιμαστικές συνθέσεις έγινε χρήση ηλεκτρόσφυρας για τη

συμπύκνωση, στις τελικές όμως συνθέσεις υποκατάστασης η μέθοδος αυτή εγκαταλείφτηκε. Ο λόγος ήταν ότι παρότι βελτιώνει τις αντοχές του σκυροδέματος αυξάνοντας το βαθμό συμπύκνωσης, (όπως ήταν και αναμενόμενο), είχε αρνητικό αντίκτυπο στη διαπερατότητά του.

6.1 Παρασκευή και συντήρηση δοκιμίων

Στην Εικόνα 6 που ακολουθεί παρουσιάζονται διαγραμματικά τα στάδια που ακολουθήθηκαν κατά τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας.



Εικόνα 6. Διάγραμμα Ροής

6.1.1 Προετοιμασία μητρών

Πριν από την ανάμειξη των πρώτων υλών έγινε η προετοιμασία των μητρών ώστε να δεχθούν το νωπό σκυρόδεμα. Αρχικά έγινε επάλειψη της εσωτερικής επιφάνειάς τους με ορυκτέλαιο ώστε να είναι εύκολη η απομάκρυνση του σκληρυμένου σκυροδέματος. Ειδικότερα για την παρασκευή κυλινδρικών δοκιμίων με διαστάσεις (100 mm) x (100 mm) κατασκευάστηκαν ειδικές μήτρες από PVC όπως φαίνεται και στις φωτογραφίες (εικόνα 7) που ακολουθεί.



Εικόνα 7. Μήτρες PVC για τη σκυροδέτηση κυλινδρικών δοκιμίων διαστάσεων (100mm)x(100mm)

6.1.2 Ανάμειξη πρώτων υλών

Για την ανάμειξη των πρώτων υλών χρησιμοποιήθηκε ο ηλεκτροκίνητος αναμεικτήρας τύπου SCHWELM Zyklus χωρητικότητας 150 λίτρων του Εργαστηρίου Τεχνολογίας Σκυροδέματος της Εταιρίας TITAN Α.Ε.(εικόνα 8).



Εικόνα 8. Ηλεκτροκίνητος αναμεικτήρας χωρητικότητας 150L.

Αρχικά, έγινε ανάδευση των αδρανών, για 30sec, με μέρος από το απαιτούμενο για την εκάστοτε σύνθεση νερό, έτσι ώστε να επιτευχθεί μερικός κορεσμός και να αποφευχθεί μεγάλη απορρόφηση νερού από τα τριχοειδή των αδρανών αργότερα. Στη συνέχεια έγινε η προσθήκη της άμμου και επαναλήφθηκε ανάδευση για μερικά δευτερόλεπτα επιπλέον. Στο τελικό στάδιο έγινε προσθήκη της απαιτούμενης για κάθε σύνθεση ποσότητας τσιμέντου και ανάμειξη για 2min με ταυτόχρονη προσθήκη του υπολειπόμενου νερού. Σύμφωνα με τον νέο Κ.Τ.Σ. «Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος (’97)» ο χρόνος αναμείξεως μετριέται μετά την εισαγωγή όλων των υλικών στον αναμεικτήρα και πρέπει να είναι εκείνος που αναγράφεται στις προδιαγραφές του αναμεικτήρα.

Οποσδήποτε όμως δεν πρέπει να είναι μικρότερος από 1 min. Ο χρόνος των 2 min κρίθηκε, κατόπιν ορισμένων προκαταρκτικών αναμειξεων, ικανοποιητικός για την πλήρη ανάμειξη και ομογενοποίηση των υπό μελέτη συνθέσεων διαπερατού σκυροδέματος.

Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται το έτοιμο μείγμα νωπού σκυροδέματος.



Εικόνα 9. Παρασκευή σύνθεσης διαπερατού σκυροδέματος

6.1.3 Έλεγχος κάθισης

Με το πέρας της παρασκευής του μίγματος και πριν αυτό τοποθετηθεί στα καλούπια, μια κωνική μήτρα (κώνος κάθισης) πληρώνεται με ένα δείγμα του νωπού σκυροδέματος. Κατόπιν, η μήτρα μορφοποίησης ανασύρεται και μετριέται η απώλεια ύψους της στήλης σε cm, η οποία εκφράζει και το μέτρο της εργασιμότητας του σκυροδέματος. Ο συγκεκριμένος τρόπος ελέγχου της κάθισης ορίζεται από τα πρότυπα EN 12350-2 «Testing fresh concrete. Part 2: Slump-test» και ASTM C143 «Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete» καθώς και από τον ΚΤΣ «Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος ('97)», παράγραφος 3.20.

Στη συγκεκριμένη εργασία όλες οι συνθέσεις που εξετάστηκαν δεν έδειξαν όπως αναμενόταν απώλεια ύψους της στήλης, με αποτέλεσμα το μέτρο της κάθισης για τις συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος να είναι μηδέν (0), ενώ η σύνθεση του συμβατικού σκυροδέματος που παρασκευάστηκε για συγκριτική μελέτη παρουσίασε κάθιση 12,5cm (αντίστοιχα εικόνες 10 και 11).



Εικόνα 10.
Έλεγχος κάθισης
διαπερατού σκυροδέματος



Εικόνα 11.
Έλεγχος κάθισης
συμβατικού τύπου σκυροδέματος

6.1.4 Καλούπωμα

Μετά το πέρας της ανάμειξης ακολούθησε η διαδικασία του καλούπωματος. Οι μήτρες τοποθετήθηκαν στη δονούμενη τράπεζα, γεμίστηκαν με δύο στρώματα σκυροδέματος ανά μήτρα και ακολούθησε δόνησή τους για 15sec με ταυτόχρονη επιβολή φορτίου. Τέλος, μετά τη μορφοποίηση της άνω πλευράς τους, τα καλούπωμένα δοκίμια νωπού σκυροδέματος τοποθετήθηκαν για σκλήρυνση. Η διαδικασία της σκλήρυνσης πρέπει να γίνει στη σκιά, μέσα στις μήτρες, χωρίς κτυπήματα, δονήσεις, ξήρανση τουλάχιστον 20 ώρες και όχι πάνω από 32 ώρες. (Εικόνες 12,13 (α), (β)).



(α)



(β)

Εικόνα 12. Καλούπωμα δοκιμίων (α) γέμισμα μητρών και (β) συμπίκνωση με δόνηση.



(α)



(β)

Εικόνα 13. (α), (β): Έτοιμα δοκίμια.

Στη συνέχεια, αποσπάστηκαν τα δοκίμια από τις μήτρες και ακολούθησε σήμανση τους με τους κωδικούς της σύνθεσης. Τέλος, πραγματοποιήθηκε ο καθαρισμός των μητρών και η προετοιμασία τους για την παρασκευή των δοκιμίων της επόμενης σύνθεσης.



(α) (β)
Εικόνα 14. (α), (β): Ξεκαλούπωμα δοκιμίων.

6.1.5 Ωρίμανση

Η ωρίμανση των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε σε θάλαμο συντήρησης για 28 μέρες. Η εισαγωγή στον θάλαμο συντήρησης (θερμοκρασία $20 \pm 1^\circ\text{C}$) αποσκοπεί στη δημιουργία συνθηκών θερμοκρασίας και υγρασίας που θα επιτρέψουν να ενυδατωθεί το μεγαλύτερο ποσοστό τσιμέντου του μείγματος.

6.1.6 Αντοχή σε θλίψη

Τα κυβικά δοκίμια διαπερατού σκυροδέματος που παρασκευάστηκαν, διάστασης 150mm, δοκιμάστηκαν σε διαδικασία θλιπτικής αντοχής σε ηλικίες 3,7 και 28 ημερών. Τα τελικά δοκίμια εξετάστηκαν επιπλέον και στις 90 και 180 ημέρες.

Η μονοαξονική αντοχή σε θλίψη υπολογίζεται με βάση το μετρούμενο φορτίο θραύσης του δοκιμίου, σύμφωνα με τα οριζόμενα στο πρότυπο EN 12390, συμβολίζεται ως F_c και εκφράζεται σε MPa.

Για την αποφυγή σφαλμάτων κατά τη διαδικασία της μέτρησης, λόγω της ιδιαίτερης και μη ομαλής τους επιφάνειας, τα δοκίμια υποβλήθηκαν στη διαδικασία “καπελώματος” με ειδικού τύπου κονίαμα στην άνω επιφάνεια και τη βάση τους, στις δύο πλευρές δηλαδή που θα πιέζε η πρέσα, όπως άλλωστε ορίζει και το πρότυπο ACI 522R-06. Αυτό έγινε γιατί μπορούσε να αποκολληθεί κάποιο αδρανές λόγω της πίεσης και το μηχάνημα να σταματούσε πρόωρα και πριν θραυστεί το δοκίμιο, με αποτέλεσμα τη διαπίστωση μικρότερης τιμής αντοχών.

6.1.7 Αντοχή σε συνθήκες τρίψης-απότριψης

Για τη διαδικασία τρίψης-απότριψης, ακολουθήθηκε ο τρόπος που περιγράφεται παρακάτω. Παρασκευάστηκαν κυβικά δοκίμια διάστασης 75mm.

Όταν κατέστησαν πλήρως ώριμα, δηλαδή μετά το πέρας τουλάχιστον 28 ημερών, τοποθετήθηκαν σε ταινιολειαντήρα για ένα (1) και δύο (2) λεπτά αντίστοιχα και μετρήθηκε το ποσοστό απώλειας μάζας και ύψους του εκάστοτε δοκιμίου. Κατά την διεξαγωγή της συγκεκριμένης μέτρησης τα δοκίμια απλά τοποθετούνταν στον ταινιολειαντήρα και ασκούσαν μόνο η απαιτούμενη πίεση ώστε αυτά να συνεχίζουν να ισορροπούν και να πραγματοποιείται η τριβή με την ταινία. Η συγκεκριμένη τεχνική όπως αποδείχτηκε έδωσε συγκρίσιμα αποτελέσματα μεταξύ των συνθέσεων.



Εικόνα 15. Διαδικασία τρίψης-απότριψης

6.1.8 Έλεγχος υδατοπερατότητας

Η διαπερατότητα και πιο συγκεκριμένα η δυνατότητα να επιτρέπει στο νερό να διέρχεται μέσα από το δίκτυο των πόρων του, αποτελεί και τη σημαντικότερη ιδιότητα του πορώδους σκυροδέματος. Εκφράζεται σε $L/min/m^2$. Για τη διαδικασία μέτρησής της στο διαπερατό σκυρόδεμα, όταν ξεκίνησε η διδακτορική διατριβή δεν υπήρχε κάποιο πρότυπο (ευρωπαϊκό ή αμερικάνικο) για τα συγκεκριμένα σκυροδέματα.

Αρχικά χρησιμοποιήθηκε ειδική διάταξη που λειτουργεί βάσει του προτύπου υδατοπερατότητας για συμβατικού τύπου σκυροδέματα EN 12390-8:2000: «Testing hardened concrete, part 8: depth of penetration of water under pressure», η οποία όμως αποδείχθηκε μη εφαρμόσιμη για το πολύ μεγάλο πορώδες των δοκιμίων μας. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν κυβικά δοκίμια διαπερατού σκυροδέματος των 150 mm, όμως παρουσιαζόταν μεγάλη απώλεια ύδατος από τις πλευρικές επιφάνειές του. Στη συνέχεια οι πλευρικές επιφάνειες μονώθηκαν με τη χρήση ειδικής μεμβράνης όπως και κονιάματος, πετυχαίνοντας αυτή τη φορά την ελαχιστοποίηση των απωλειών, όμως ο χρόνος διέλευσης του νερού ήταν ακαριαίος μη μετρήσιμος, καθώς το διαπερατό σκυρόδεμα επιδιώκεται να παρουσιάσει πολύ μεγαλύτερες τιμές υδατοπερατότητας σε σχέση με το απλό σκυρόδεμα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την απόρριψη αυτής της μεθόδου.

Σε τρίτη προσέγγιση, χρησιμοποιήθηκε μία ιδιοκατασκευή στην οποία τοποθετούνταν δοκίμιο σε σχήμα ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου, διαστάσεων $M \times \Pi \times Y$: 300x250x100mm, το οποίο διαβρεχόταν σε όλη την επιφάνειά του με μετρούμενη ποσότητα νερού, χρησιμοποιώντας ροόμετρο με σπείρωμα στην εξαγωγή του σωλήνα. Για τη χρήση της συγκεκριμένης ιδιοκατασκευής, κατασκευάστηκαν καλούπια ειδικών διαστάσεων από plexiglass στα οποία

χυτεύθηκαν τα δοκίμια του διαπερατού σκυροδέματος. Όμως, όπως αποδείχθηκε με σειρά πειραμάτων, λόγω της φύσης του υλικού, η μέτρηση με αυτόν τον τρόπο δεν εμφάνιζε ικανοποιητικές και μετρήσιμες διαφορές μεταξύ των συνθέσεων και δεν υιοθετήθηκε.



Εικόνα 16. Ιδιοκατασκευή για την μέτρηση της υδατοπερατότητας

Για τον λόγο αυτόν ακολουθήθηκε μία μέθοδος παρόμοια με τη μέτρηση της διαπερατότητας του εδάφους (falling head test method) από τις «Ελληνικές Προδιαγραφές Εργαστηριακών Δοκιμών Εδαφομηχανικής Ε 105-86».

Η υδατοπερατότητα του διαπερατού σκυροδέματος προσδιορίζεται από την εξίσωση (1)

$$k = \frac{a * L}{A * t} * \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (1)$$

όπου,

k : συντελεστής διαπερατότητας, σε (cm/s)

a : η επιφάνεια της εγκάρσιας διατομής του σωλήνα, σε (cm²)

L : το μήκος του δοκιμίου, σε (cm)

A : επιφάνεια της εγκάρσιας διατομής του δείγματος, σε (cm²)

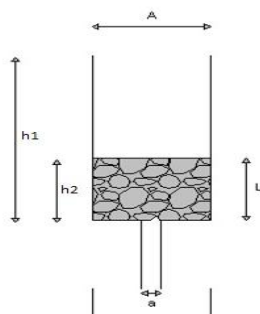
t : ο χρόνος που απαιτείται για να «κατέβει» το νερό από το ύψος h_1

στο ύψος h_2 εντός του σωλήνα, σε (s)

h_1 : η αρχική στάθμη του νερού, σε (cm)

h_2 : η τελική στάθμη του νερού, σε (cm)

Η παρακάτω εικόνα εμφανίζει τη συσκευή η οποία χρησιμοποιήθηκε.



Εικόνα 17. Συσκευή Υδατοπερατότητας

Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν για τη διαδικασία μέτρησης της υδατοπερατότητας ήταν ίδιων διαστάσεων με αυτά του εφελκυσμού, δηλαδή κυλινδρικά διαστάσεων 300mm σε μήκος και διαμέτρου 150mm. Επίσης η μέτρηση πραγματοποιήθηκε σε χρόνο όπου τα δοκίμια κατέστησαν ώριμα, μετά το πέρας τουλάχιστον 28 ημερών. Για την πλήρη εφαρμογή των δοκιμίων στη συσκευή, τοποθετήθηκε χοντρό φύλλο λάστιχου μεταξύ της πλευρικής τους επιφάνειας και της βάσης της συσκευής, εμποδίζοντας έτσι την πλευρική διαφυγή του νερού που θα επηρέαζε τη μέτρηση. Ακόμη, στο κάθε δοκίμιο πρώτα διήλθε νερό με ανοικτή τη βάνα για να φύγει με τη ροή ο περιεχόμενος αέρας και στη συνέχεια με κλειστή τη βάνα πληρώθηκε όλη η συσκευή για να ξεκινήσει η μέτρηση. Τέλος ανοίχτηκε ακαριαία η βάνα και μετρήθηκε ο χρόνος για την πτώση στάθμης του νερού από h_1 σε h_2 . Η κάθε μέτρηση πραγματοποιήθηκε δύο φορές για επιβεβαίωση και αποφυγή λάθους. Πλέον και το πρότυπο ACI 522R-06 για την μέτρηση της υδατοπερατότητας υιοθετεί αυτήν την διαδικασία που μόλις περιγράφηκε.

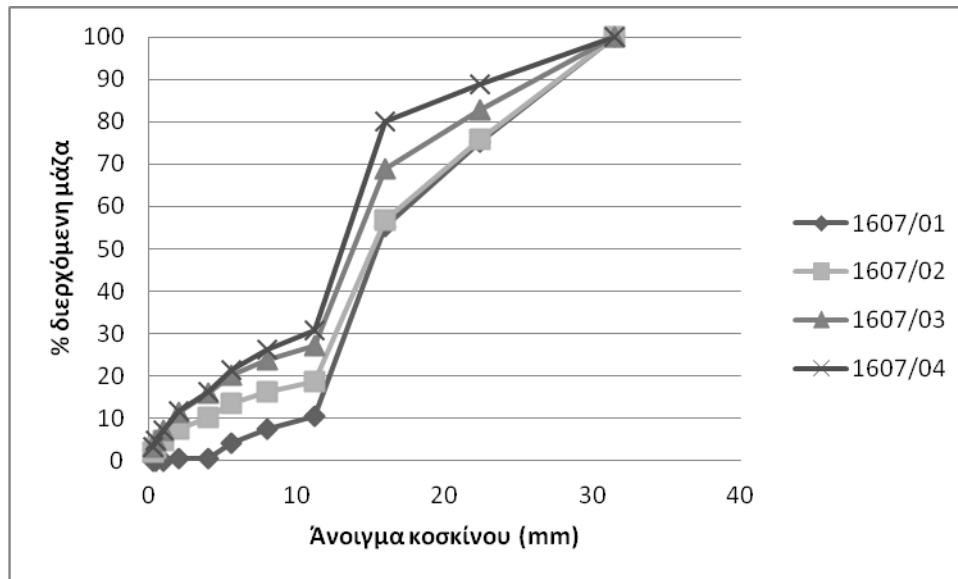
6.2 Δοκιμαστικές συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος

Η μελέτη για τη παρασκευή διαπερατού σκυροδέματος ξεκίνησε με την παρασκευή συνθέσεων διαφόρων αναλογιών σε πρώτες ύλες, οι ιδιότητες των οποίων οδηγούσαν στις αλλαγές των παραμέτρων και εν τέλει στη τελική σύνθεση. Στην αρχή η μελέτη επικεντρώθηκε στη συγκριτική αξιολόγηση των θλιπτικών αντοχών καθώς και της υδατοπερατότητας που παρουσίαζαν τα δοκίμια, γι' αυτό το λόγο, η μελέτη της τρίψης - απότριψης ξεκίνησε από τη σύνθεση 1607/16 όπου είχαν εξαχθεί κάποια πρώτα συμπεράσματα. Η κωδική ονομασία όλων των δοκιμαστικών συνθέσεων, με βάση τους κωδικούς του εργαστηρίου σκυροδέματος, είναι η 1607/_ _ , ξεκινώντας από την 1607/01 και καταλήγοντας στην 1607/32.

Οι τέσσερις πρώτες συνθέσεις που παρασκευάστηκαν, με τις ποσότητες των πρώτων υλών και τις τιμές των ιδιοτήτων τους, δίνονται στον παρακάτω πίνακα 13 και στο αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται η κοκκομετρική κατανομή τους. Σε όλες χρησιμοποιήθηκε ίδια ποσότητα τσιμέντου Portland CEM II 32.5 και διαφορετικές αναλογίες χαλικιού και γαρμπιλιού, καθώς και άμμος πλην της πρώτης.

Πίνακας 13. 1607/01 – 1607/04 : Αναλογίες πρώτων υλών και αποτελέσματα αντοχών και υδατοπερατότητας

ΥΛΙΚΑ	ΣΥΝΘΕΣΗ											
	1607/01			1607/02			1607/03			1607/04		
CEM II 32.5 (kg/m ³)	230			230			230			230		
Χαλίκι (%)	61			59			42			27		
Γαρμπίλι (%)	19			31			42			57		
Άμμος (%)	-			10			16			16		
w/c	0,52			0,52			0,44			0,52		
ΘΛΙΠΤΙΚΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ (MPa)	3ημ.	7ημ.	28ημ.	3ημ.	7ημ.	28ημ.	3ημ.	7ημ.	28ημ.	3ημ.	7ημ.	28ημ.
	4,3	9,7	12,5	9,7	15,3	28,6	7,8	14,7	27,2	6,2	12,3	19,5
ΥΔΑΤΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ (l/m²/min)	209,6			209,5			208			208,8		



Διάγραμμα 6. Κοκκομετρική κατανομή συνθέσεων 1607/01 – 1607/04

Οι τέσσερις πρώτες συνθέσεις έδωσαν χρήσιμα συμπεράσματα, όπως:

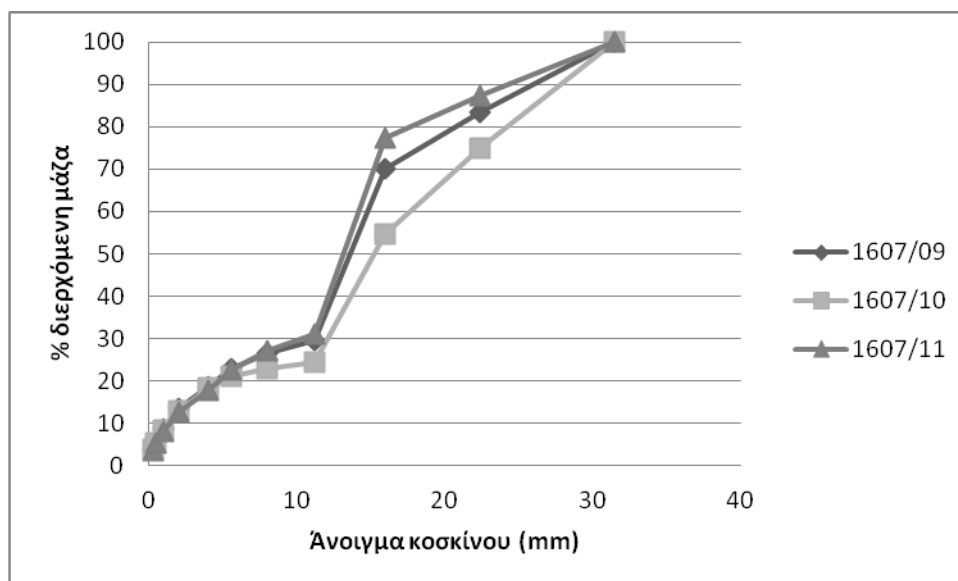
- Η χρήση μικρής σχετικά ποσότητας άμμου δείχνει να δίνει καλύτερη συνοχή στο σκυρόδεμα απ' ό,τι με τη χρήση αποκλειστικά χονδρόκοκκων αδρανών, χωρίς να επηρεάζει ουσιαστικά την τιμή της υδατοπερατότητας του διαπερατού σκυροδέματος. Για τον λόγο αυτό ορισμένη ποσότητα άμμου χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις επόμενες συνθέσεις.
- Αρκετή τιμεντόπαστα είχε οδηγηθεί στις πλευρές των δοκιμίων, με αποτέλεσμα να μειώνεται το πορώδες του σκυροδέματος και να μην εμφανίζεται υψηλή υδατοπερατότητα.
- Οι θλιπτικές αντοχές των δοκιμίων ήταν ιδιαίτερος αυξημένες.
- Οι κοκκομετρικές καμπύλες των συνθέσεων παρουσιάζουν παρόμοια κλίση και δεν εμφανίζουν ιδιαίτερες αποκλίσεις

Για τους δύο τελευταίους λόγους, οι επόμενες τρεις συνθέσεις (1607/09 – 1607/11) δημιουργήθηκαν με αρκετά μικρότερη, αλλά σταθερή για λόγους σύγκρισης, ποσότητα τιμεντού Portland CEM II 32.5, σταθερή και μεγαλύτερη από πριν ποσότητα άμμου και διαφορές στις αναλογίες χαλικιού-γαρμπιλιού. Παρακάτω παρατίθενται ο πίνακας 14 καθώς και το διάγραμμα 7 που αφορούν τις συνθέσεις αυτές.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Οι συνθέσεις 1607/05 – 1607/08 δεν παρουσιάζονται στην εργασία, καθότι αποτέλεσαν μία επανάληψη των τεσσάρων πρώτων συνθέσεων (1607/01 – 1607/04). Ο λόγος ήταν η δημιουργία δοκιμίου σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου για την τοποθέτησή του στην ιδιοκατασκευή μέτρησης της υδατοπερατότητας, όπως αυτή παρουσιάζεται στην παράγραφο 5.5 της πειραματικής διαδικασίας (Εικόνα 16). Οι τιμές αυτών των μετρήσεων ήταν αυτές που παρουσιάστηκαν στον παραπάνω πίνακα 13.

Πίνακας 14. Αναλογίες πρώτων υλών και αποτελέσματα αντοχών και υδατοπερατότητας 1607/09 – 1607/11

ΥΛΙΚΑ	ΣΥΝΘΕΣΗ								
	1607/09			1607/10			1607/11		
CEM II 32.5 (kg/m ³)	150			150			150		
Χαλίκι (%)	40,5			61			31		
Γαρμπιλί (%)	40,5			20			51		
Άμμος (%)	19			19			18		
w/c	0,68			0,68			0,68		
ΘΛΙΠΤΙΚΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ (MPa)	3ημ.	7ημ.	28ημ.	3ημ.	7ημ.	28ημ.	3ημ.	7ημ.	28ημ.
	4,8	7,6	8,1	5,5	8,2	9,5	3,2	5,6	6,9
ΥΔΑΤΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ (l/m ² /min)	199,6			210			205,6		



Διάγραμμα 7. Κοκκομετρική κατανομή συνθέσεων 1607/09 – 1607/11

Οι τρεις αυτές νέες συνθέσεις οδηγούν στα εξής συμπεράσματα:

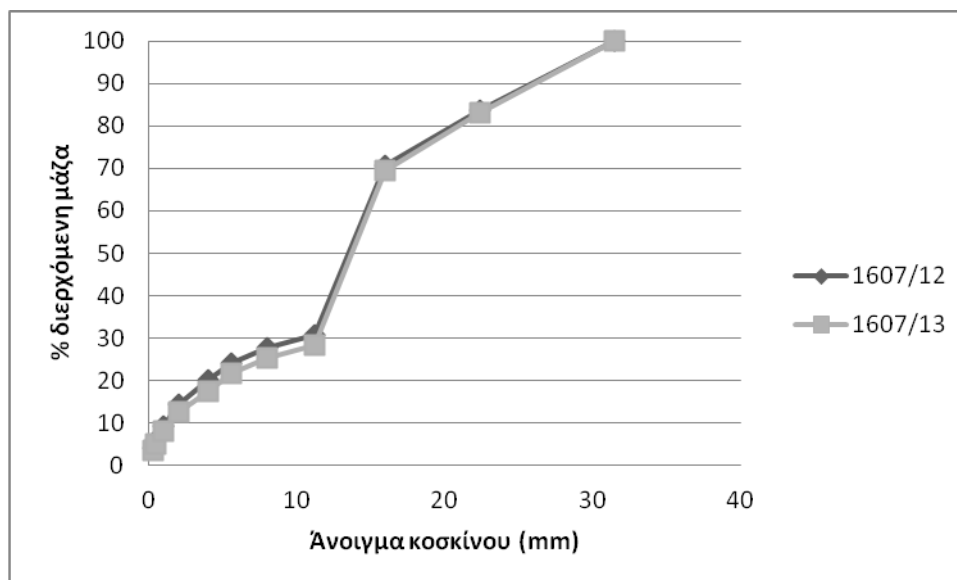
- Η ποσότητα της άμμου που αυξήθηκε σε σχέση με τις πρώτες συνθέσεις, έδειξε να βοηθάει περαιτέρω στην δομική συνοχή του σκυροδέματος, καθότι η σύνθεση 1607/11 δημιουργήθηκε και με μειωμένη ποσότητα άμμου (της τάξης του 13%), μειώνοντας τις αντοχές της συγκεκριμένης σύνθεσης.
- Η τιμή της υδατοπερατότητας έδειξε να είναι μεγαλύτερη χρησιμοποιώντας μεγαλύτερη αναλογία γαρμπιλιού, ενώ οι θλιπτικές αντοχές καλύτερες με αυξημένη αναλογία χαλικιού.
- Η ποσότητα του τσιμέντου φάνηκε να είναι οριακή, καθότι οι αντοχές μειώθηκαν αισθητά σε σχέση με τις τέσσερις πρώτες συνθέσεις.

Για τους παραπάνω λόγους, στις δύο συνθέσεις που ακολούθουν κρατήθηκε σταθερή η αναλογία 1:1 χαλικιού-γαρμπιλιού και η παράμετρος προς αξιολόγηση ήταν πλέον η ποσότητα του τσιμέντου. Στην πρώτη, 1607/12, η ποσότητα του τσιμέντου μειώθηκε κατά 30 kg/m³ σε σχέση με τις προηγούμενες συνθέσεις δίνοντας τη θέση του στην άμμο, ενώ στη δεύτερη,

1607/13, η ποσότητα αυτή αυξήθηκε κατά 30 kg/m³ μειώνοντας κατά το ίδιο ποσοστό την άμμο. Οι συνθέσεις αυτές παρουσιάζονται παρακάτω.

Πίνακας 15. Αναλογίες πρώτων υλών και αποτελέσματα αντοχών και υδατοπερατότητας 1607/12 – 1607/13

ΥΛΙΚΑ	ΣΥΝΘΕΣΗ					
	1607/12			1607/13		
CEM II 32.5 (kg/m ³)	120			180		
Χαλίκι (%)	40			41		
Γαρμπίλι (%)	40			41		
Άμμος (%)	20			18		
w/c	0,66			0,66		
ΘΛΙΠΤΙΚΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ (MPa)	3ημ.	7ημ.	28ημ.	3ημ.	7ημ.	28ημ.
	3,1	3,2	4,2	4,9	6,6	11,2
ΥΔΑΤΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ (l/m²/min)	202			204,8		



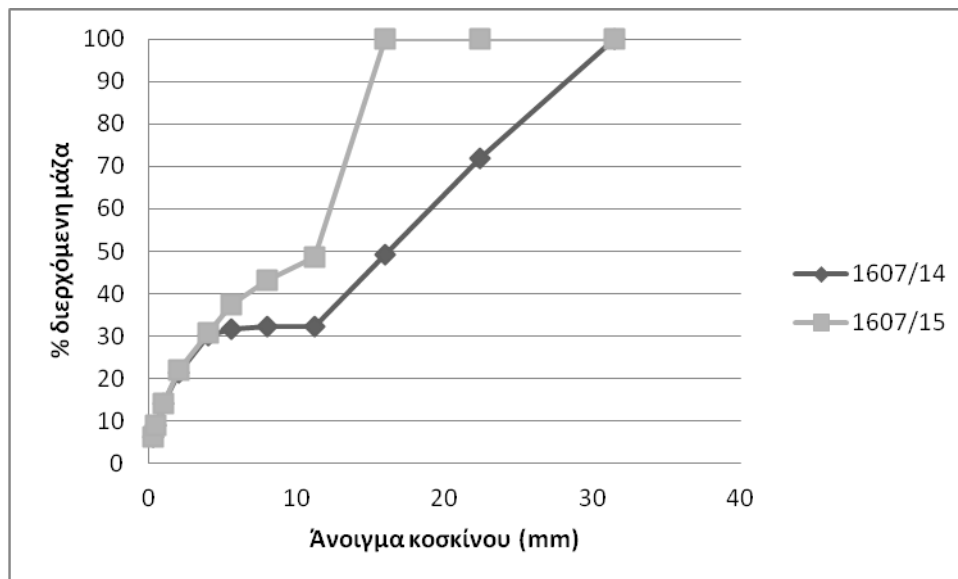
Διάγραμμα 8. Κοκκομετρική κατανομή συνθέσεων 1607/12 – 1607/13

Οι συγκεκριμένες συνθέσεις κατέστησαν σαφές ότι ποσότητα τσιμέντου μικρότερη των 150 kg/m³ δεν ενδείκνυται για τις τελικές αντοχές του διαπερατού σκυροδέματος.

Στη συνέχεια παρασκευάστηκαν δύο συνθέσεις με ίδια ποσότητα τσιμέντου, η μία με αμιγώς χαλίκι και αυξημένη ποσότητα άμμου για λόγους συνοχής και η άλλη με μόνο γαρμπίλι και την ίδια ποσότητα άμμου. Ο λόγος ήταν για να διαπιστωθεί πως συμπεριφέρονται τα χονδρόκοκκα αδρανή διαφορετικών κοκκομετρικών διαβαθμίσεων, το καθένα μόνο του χωρίς την παρουσία του άλλου.

Πίνακας 16. Αναλογίες πρώτων υλών και αποτελέσματα αντοχών και υδατοπερατότητας 1607/14 – 1607/15

ΥΛΙΚΑ	ΣΥΝΘΕΣΗ					
	1607/14			1607/15		
CEM II 32.5 (kg/m ³)	150			150		
Χαλίκι (%)	69			-		
Γαρμπίλι (%)	-			69		
Άμμος (%)	31			31		
w/c	0,67			0,67		
ΘΛΙΠΤΙΚΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ (MPa)	3ημ.	7ημ.	28ημ.	3ημ.	7ημ.	28ημ.
	6,5	6,5	8,1	3,3	4,1	5,1
ΥΔΑΤΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ (l/m ² /min)	207,6			206,4		



Διάγραμμα 9. Κοκκομετρική κατανομή συνθέσεων 1607/14 – 1607/15

- Η σύνθεση με το χονδρόκοκκο χαλίκι (1607/14) έδειξε να παρουσιάζει μεγαλύτερη συνοχή απ' ότι η σύνθεση με το λεπτόκοκκο γαρμπίλι (1607/15), γεγονός που καταδεικνύεται, εκτός από την μακροσκοπική παρατήρηση και από τις καλύτερες θλιπτικές αντοχές που μετρήθηκαν.
- Η τιμή της υδατοπερατότητας των δύο συνθέσεων ήταν παραπλήσια, όμως η σύνθεση 1607/14 με το χαλίκι παρουσίασε το αρνητικό γεγονός ότι μέρος της τσιμεντόπαστας συσσωρεύτηκε στη βάση των δοκιμίων και δεν ήταν ομοιόμορφα κατανομημένη στη μάζα των δοκιμίων. Αυτό συνέβη επειδή το χαλίκι έχει πολύ τραχιά και γωνιώδη επιφάνεια, όπως φάνηκε στην Εικόνα 5 του Κεφαλαίου 5, δυσκολεύοντας την εργασιμότητα κατά την χύτευση και συμπύκνωση, με αποτέλεσμα στις πλευρές των δοκιμίων να παρατηρείται η συσσώρευση τσιμεντόπαστας, μειώνοντας το πορώδες και την υδατοπερατότητά τους.

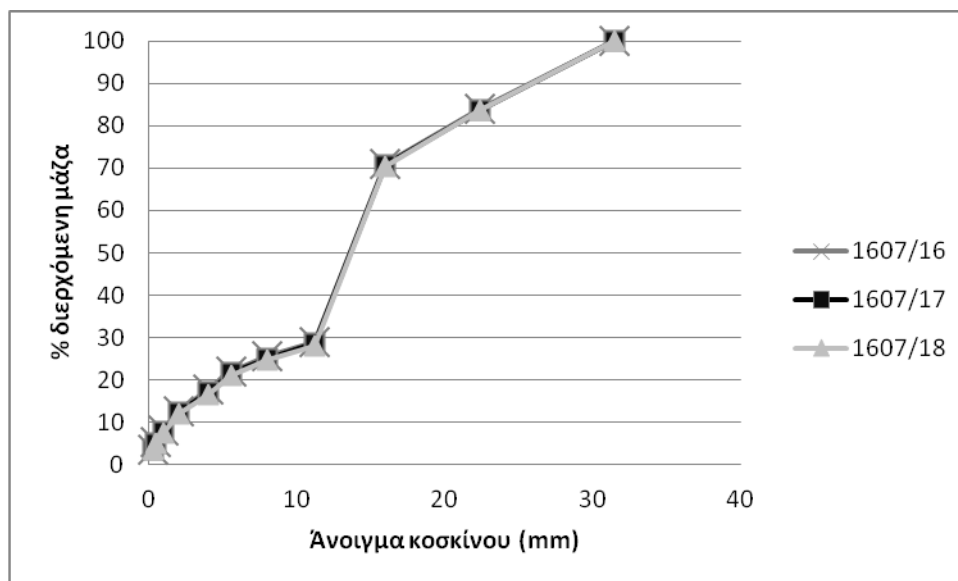
Ακολουθώντας με σκοπό την συσχέτιση των κοκκομετρικών κατανομών χαλικιού και γαρμπιλιού και τη συνάφεια που παρουσιάζουν μεταξύ τους (κατά πόσο δηλαδή το γαρμπίλι γεμίζει τα κενά που αφήνουν μεταξύ τους τα χαλίκια) διεξήχθη το παρακάτω πείραμα. Σε ένα προζυγισμένο δοχείο σταθερού όγκου,

τοποθετήθηκε στην αρχή σκέτο χαλίκι μέχρι πλήρωσης και στη συνέχεια αφαιρούνταν κάθε φορά ένα ποσοστό 10% κ.β. και αντικαθιστούταν με γαρμπίλι, μέχρι το δοχείο να αποτελείται μόνο από γαρμπίλι. Σε κάθε βήμα της διαδικασίας, το καθαρό βάρος του δοχείου ζυγίζονταν. Το αποτέλεσμα έδειξε ότι μεγαλύτερη ποσότητα υλικού λόγω βάρους και άρα μεγαλύτερη συνάφεια και πλήρωση των κενών μεταξύ χαλικιού και γαρμπιλιού παρουσιαζόταν στην περιοχή αναλογίας 1:1 και 4:6 υπέρ του γαρμπιλιού. Επίσης το πείραμα επιβεβαίωσε το συμπέρασμα των δύο προηγούμενων συνθέσεων, ότι το χαλίκι μόνο του παρουσιάζει μεγαλύτερη συνοχή απ' ό,τι το γαρμπίλι.

Τα συμπεράσματα αυτά οδήγησαν στις επόμενες τρεις συνθέσεις, όπου το γαρμπίλι είναι σε λίγο μεγαλύτερη αναλογία από το χαλίκι. Επίσης το τσιμέντο για πρώτη φορά είναι Portland CEM II 42.5 και χρησιμοποιήθηκε πυριτική παμπάλη (Silica Fume), για βρεθεί πως επηρεάζει η χρήση της τις τελικές ιδιότητες του σκυροδέματος. Φυσικά η ποσότητα του νερού με τη χρήση SF αυξήθηκε, καθώς είναι ένα πολύ λεπτόκοκκο υλικό και για την επίτευξη δεδομένης εργασιμότητας στο μίγμα απαιτεί τη προσθήκη επιπλέον νερού. Επίσης, από τις συνθέσεις αυτές ξεκίνησε και η μελέτη της τρίψης – απότριψης που θα απασχολήσει στη συνέχεια. Τα αποτελέσματα και η κοκκομετρική κατανομή των τριών συνθέσεων φαίνονται στον πίνακα 17 και στο διάγραμμα 10.

Πίνακας 17. Αναλογίες πρώτων υλών και αποτελέσματα αντοχών και υδατοπερατότητας 1607/16 – 1607/18

ΥΛΙΚΑ	ΣΥΝΘΕΣΗ								
	1607/16			1607/17			1607/18		
CEM II 42.5 (kg/m ³)	200			200			200		
Χαλίκι (%)	39%			39,5			39		
Γαρμπίλι (%)	43%			42,5			42		
Άμμος (%)	18%			16,5			16		
Silica Fume (%)	-			1,5			3		
w/c	0,66			0,70			0,73		
ΘΛΙΠΤΙΚΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ (MPa)	3ημ.	7ημ.	28ημ.	3ημ.	7ημ.	28ημ.	3ημ.	7ημ.	28ημ.
	6,8	8,6	9,8	6,1	8,8	13,1	5,8	7,2	18,9
ΥΔΑΤΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ (l/m²/min)	-			-			-		
ΤΡΙΨΗ – ΑΠΟΤΡΙΨΗ	1 λεπτό	2 λεπτά		1 λεπτό	2 λεπτά		1 λεπτό	2 λεπτά	
% ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ	0,85	1,35		0,89	1,43		1,1	1,76	
% ΑΠΩΛΕΙΑ ΠΑΧΟΥΣ	5,23	6,97		6,7	6,99		6,5	6,64	



Διάγραμμα 10. Κοκκομετρική κατανομή συνθέσεων 1607/16 – 1607/18

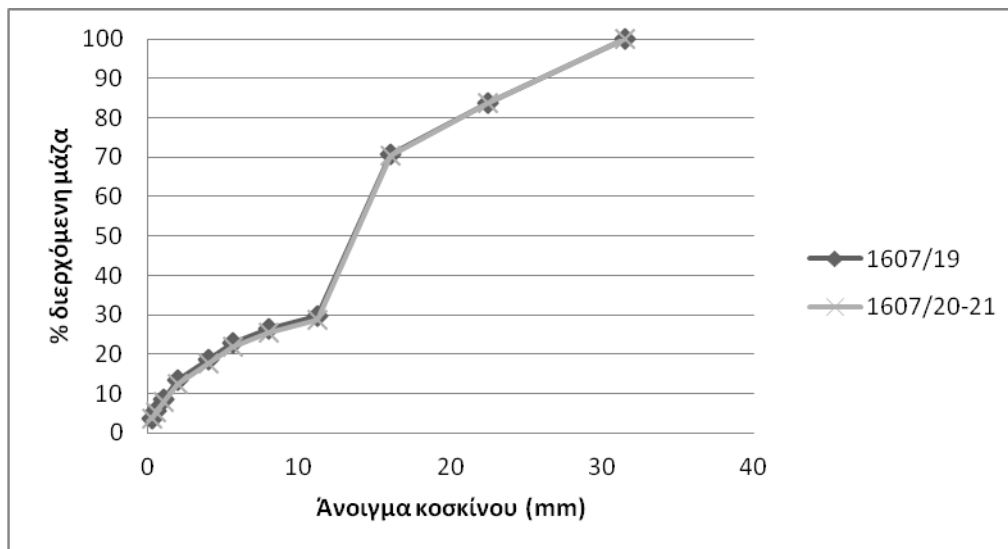
Όπως ήταν αναμενόμενο, η πυριτική παιπάλη όσο αυξάνεται κατ' αναλογία βελτιώνονται και οι τελικές αντοχές του σκυροδέματος, μειώνοντας παράλληλα ελαφρά τις πρώιμες. Το πρόβλημα που παρουσιάστηκε σε αυτές τις συνθέσεις ήταν πως συσσωρεύτηκε υπερβολική ποσότητα τσιμεντόπαστας στη βάση των δοκιμών κάνοντας αδύνατη την μέτρηση της υδατοπερατότητας.

Στις επόμενες τρεις συνθέσεις, η ποσότητα του τσιμέντου ελαττώθηκε και αυξήθηκε ελάχιστα η ποσότητα των αδρανών, διατηρώντας πάντοτε την αναλογία κοντά στο 1:1 με λίγη παραπάνω ποσότητα γαρμπιλιού. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 18 και η κοκκομετρική τους κατανομή στο διάγραμμα 11.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Από τις συνθέσεις αυτές και πλέον χρησιμοποιήθηκε η νέα συσκευή υδατοπερατότητας, όπως περιγράφεται στην αρχή αυτού του Κεφαλαίου, και δίνεται ο συντελεστής υδατοπερατότητας **k** των συνθέσεων.

Πίνακας 18. Αναλογίες πρώτων υλών και αποτελέσματα αντοχών και υδατοπερατότητας 1607/19 – 1607/21

ΥΛΙΚΑ	ΣΥΝΘΕΣΗ								
	1607/19			1607/20			1607/21		
CEM II 42.5 (kg/m ³)	150			135			142,5		
Χαλίκι (%)	39			40			40		
Γαρμπίλι (%)	42			42			42		
Άμμος (%)	19			18			18		
Silica Fume (%)	-			10			5		
w/c	0,67			0,82			0,74		
ΘΛΙΠΤΙΚΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ (MPa)	3ημ	7ημ	28ημ	3ημ	7ημ	28ημ	3ημ	7ημ	28ημ
	3,1	4,5	4,9	3,8	4,2	5,8	1,7	4,5	5,3
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΥΔΑΤΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ k (cm/s)	0,33			0,20			0,25		
ΤΡΙΨΗ - ΑΠΟΤΡΙΨΗ	1 λεπτό	2 λεπτά	1 λεπτό	2 λεπτά	1 λεπτό	2 λεπτά			
% ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ	0,23	0,37	0,14	0,22	0,19	0,29			
% ΑΠΩΛΕΙΑ ΠΑΧΟΥΣ	0,59	0,74	0,29	0,43	0,15	0,3			



Διάγραμμα 11. Κοκκομετρική κατανομή συνθέσεων 1607/19 – 1607/21

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των τριών παραπάνω συνθέσεων:

- Η πυριτική παιπάλη μπόρεσε να αντικαταστήσει ικανοποιητικά μέρος της ποσότητας του τσιμέντου, βελτιώνοντας παράλληλα τις θλιπτικές αντοχές του σκυροδέματος. Ο λόγος είναι η αύξηση της συνάφειας μεταξύ των αδρανών και της τσιμεντόπαστας που επιτυγχάνεται με τη χρήση της. Όσο όμως αυξανόταν η υποκατάσταση του τσιμέντου από SF η υδατοπερατότητα μειωνόταν αντιστοίχως, καθότι αυξανόταν η πυκνότητα του σκυροδέματος και αντίστοιχα μειωνόταν το πορώδες του.
- Η πυριτική παιπάλη έδειξε επίσης να βελτιώνει τις αντοχές του σκυροδέματος σε συνθήκες τρίψης – απότριψης και μάλιστα σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό. Φυσικά όμως αυξάνει κατά πολύ το κόστος παραγωγής της σύνθεσης καθότι είναι ένα σχετικά ακριβό πρόσθετο.
- Οι τιμές της υδατοπερατότητας ήταν ιδιαίτερος υψηλές, οι θλιπτικές αντοχές όμως των συνθέσεων αυτών ήταν σε πολύ χαμηλά επίπεδα, γεγονός που καταδεικνυε την ανάγκη αύξησης της ποσότητας του τσιμέντου στις συνθέσεις.

Στο σημείο αυτό της έρευνας, αποφασίστηκε η μη χρησιμοποίηση πλέον χαλικιού στις συνθέσεις. Ο λόγος ήταν ότι, όπως παρατηρήθηκε και στη σύνθεση 1607/14, το ασβεστολιθικό χαλίκι έχει πολύ τραχιά επιφάνεια και γωνιώδεις άκρες, με αποτέλεσμα εκτός του ότι δυσκολεύει την εργασιμότητα σε σχέση με το γαρμπίλι καθιστώντας την τσιμεντόπαστα πολλές φορές ανομοιόμορφα κατανεμημένη, να αποτελεί και ένα ανασταλτικό παράγοντα για τη χρησιμοποίησή του, ακόμη και σε μικρά ποσοστά, σε συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος που θα χρησιμοποιούνταν σε επιφάνεια οδοστρωμάτων. Η τελική τραχιά επιφάνεια στα δοκίμια με χαλίκι οδήγησε στην τελική απόρριψη χρησιμοποίησης του εφεξής και την αποκλειστική πραγματοποίηση συνθέσεων με τη χρήση γαρμπιλιού.

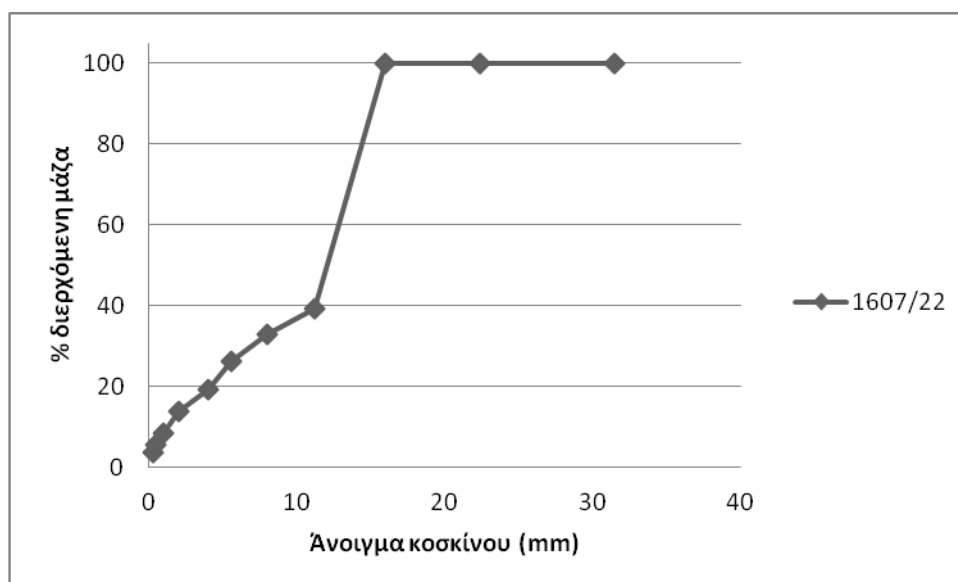
Η σύνθεση που ακολουθεί αποτέλεσε την πρώτη δοκιμαστική με τη χρησιμοποίηση μόνο γαρμπιλιού ως χονδρόκοκκο αδρανές.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Οι συνθέσεις που ακολουθούν μέχρι και την 1607/31 συμπυκνώθηκαν με τη χρήση ηλεκτρόσφυρας όπως αναφέρθηκε στην περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας. Αυτό

έγινε με σκοπό τη βελτίωση της συνάφειας και τελικά των αντοχών που προσφέρει ο αυξημένος βαθμός συμπύκνωσης, λόγω των αποτελεσμάτων των συνθέσεων 1607/14 και 1607/15 με τη χρήση αδρανών μίας μόνο κοκκομετρικής κατανομής που έδειξαν το γαρμπίλι να υστερεί έναντι του χαλικιού.

Πίνακας 19. Αναλογίες πρώτων υλών και αποτελέσματα αντοχών και υδατοπερατότητας 1607/22

ΥΛΙΚΑ	ΣΥΝΘΕΣΗ		
	1607/22		
CEM II 42.5 (kg/m ³)	210		
Γαρμπίλι (%)	81		
Άμμος (%)	19		
w/c	0,67		
ΘΛΙΠΤΙΚΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ (MPa)	3ημ.	7ημ.	28ημ.
	4,8	8,5	14,5



Διάγραμμα 12. Κοκκομετρική κατανομή σύνθεσης 1607/22

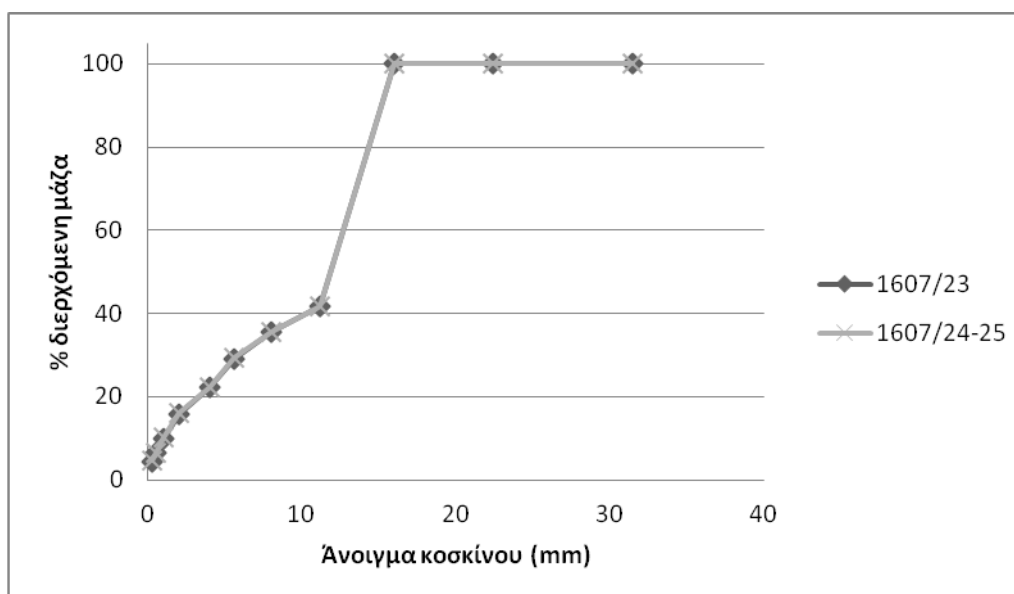
Η σύνθεση 1607/22 ήταν δοκιμαστική για τη χρήση μόνο γαρμπιλιού ως χονδρόκοκκου αδρανούς στο σκυρόδεμα καθώς και τη δοκιμασία της ηλεκτρόσφυρας ως τρόπου συμπύκνωσης. Έτσι πραγματοποιήθηκε έλεγχος μόνο των αντοχών για να βρεθούν τα πλαίσια στα οποία κινούνται και αν αυτά είναι αποδεκτά για τη συνέχεια των πειραμάτων. Η συγκεκριμένη σύνθεση έδωσε πολύ υποσχόμενες θλιπτικές αντοχές, αλλά το νωπό σκυρόδεμα ήταν αρκετά υδαρό και έδειξε πως ο λόγος w/c έπρεπε να μειωθεί. Σε συνδυασμό με το γεγονός αυτό η χρήση της άμμου ίσως ήταν λίγο περιορισμένη, οπότε αποφασίστηκε να αυξηθεί στις επόμενες συνθέσεις, με μικρή μείωση του γαρμπιλιού.

Οι επόμενες τρεις συνθέσεις παρασκευάστηκαν με το σκεπτικό των παραπάνω παρατηρήσεων και με υποκατάσταση του τσιμέντου με πυριτική παιπάλη για λόγους σύγκρισης σε ποσοστά περίπου 5% και 10% σε σχέση με το τσιμέντο. Η πρώτη από τις τρεις συνθέσεις ήταν πειραματική περισσότερο για να καθοριστούν οι αλλαγές στις ποσότητες του γαρμπιλιού, της άμμου και του

νερού, για τον λόγο αυτό τα τρία υλικά διαφέρουν λίγο στις ποσότητες τους με τις επόμενες δύο συνθέσεις. Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 20 και στο διάγραμμα 13 που ακολουθούν.

Πίνακας 20. Αναλογίες πρώτων υλών και αποτελέσματα αντοχών και υδατοπερατότητας 1607/23 – 1607/25

ΥΛΙΚΑ	ΣΥΝΘΕΣΗ								
	1607/23			1607/24			1607/25		
CEM II 42.5 (kg/m ³)	210			180,5			171		
Γαρμπίλι (%)	78			78			78		
Άμμος (%)	22			22			22		
Silica Fume (%)	-			5			10		
w/c	0,48			0,47			0,49		
ΘΛΙΠΤΙΚΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ (MPa)	3ημ	7ημ	28ημ	3ημ	7ημ	28ημ	3ημ	7ημ	28ημ
	9,6	13,6	16,7	6,8	7,3	9,9	5,6	7,2	11,9
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΥΔΑΤΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ k (cm/s)	0,1			0,1			0,1		
ΤΡΙΨΗ - ΑΠΟΤΡΙΨΗ	1 λεπτό	2 λεπτά		1 λεπτό	2 λεπτά		1 λεπτό	2 λεπτά	
% ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ	0,4	0,57		0,36	0,69		0,33	0,44	
% ΑΠΩΛΕΙΑ ΠΑΧΟΥΣ	0,4	0,6		0,62	1,14		0,9	1,43	



Διάγραμμα 13. Κοκκομετρική κατανομή συνθέσεων 1607/23 – 1607/25

Οι τρεις παραπάνω συνθέσεις έδειξαν τα εξής:

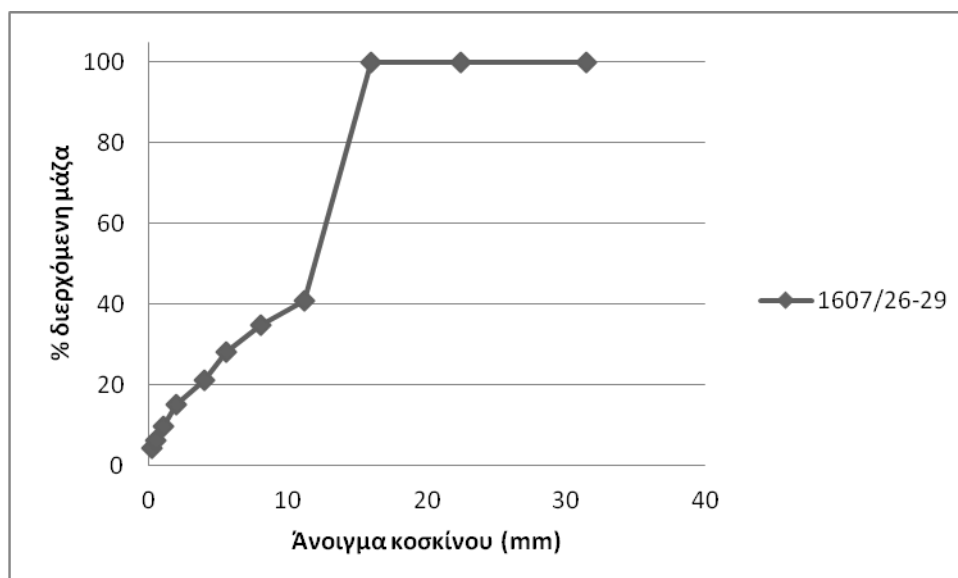
- Οι αντοχές έχουν αυξηθεί σε σχέση με προηγούμενες συνθέσεις, όμως ο συντελεστής υδατοπερατότητας έχει μειωθεί αισθητά. Το γεγονός αυτό πιθανότατα οφείλεται κυρίως στην αύξηση της ποσότητας του τσιμέντου και την αλλαγή στον τρόπο συμπύκνωσης, παρά στη χρησιμοποίηση αδρανούς μίας κοκκομετρικής κατανομής (γαρμπίλι) αντί μίγματος (χαλίκι- γαρμπίλι).
- Η πυριτική παιπάλη μπόρεσε και πάλι να αντικαταστήσει μέρος της ποσότητας του τσιμέντου, βελτιώνοντας τις θλιπτικές του αντοχές, εκτός από τις πρώτες καθώς και ελαφρά τις αντοχές στην τρίψη - απότριψη. Επίσης, αυτή τη φορά δεν έδειξε να επηρεάζει ιδιαίτερα το πορώδες και την υδατοπερατότητα του σκυροδέματος.

- Η επιπλέον ποσότητα άμμου κατέστησε τα δοκίμια πιο ψαθυρά σε σχέση με πριν.

Για τους παραπάνω λόγους, στις τέσσερις συνθέσεις που ακολουθούν στον πίνακα 21 και στο διάγραμμα 14 μειώθηκε η ποσότητα του τσιμέντου και της άμμου και αυξήθηκε λίγο αυτή του γαρμπιλιού. Επίσης, το τσιμέντο CEM II 42.5 συγκρίθηκε στην ίδια σύνθεση με το CEM II 32.5 για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Τέλος, υποκαταστάθηκε το CEM II 32.5 αυτή τη φορά με ποσοστά πυριτικής παιπάλης για σύγκριση της επιρροής της και σε αυτού του τύπου το τσιμέντο Portland.

Πίνακας 21. Αναλογίες πρώτων υλών και αποτελέσματα αντοχών και υδατοπερατότητας 1607/26 – 1607/29

ΥΛΙΚΑ	ΣΥΝΘΕΣΗ											
	1607/26			1607/27			1607/28			1607/29		
CEM II 42.5 (kg/m ³)	190			-			-			-		
CEM II 32.5 (kg/m ³)	-			190			180,5			171		
Γαρμπίλι (%)	79			79			79			79		
Άμμος (%)	21			21			21			21		
Silica Fume (%)	-			-			5			10		
w/c	0,47			0,47			0,50			0,53		
ΘΛΙΠΤΙΚΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ (MPa)	3ημ.	7ημ.	28ημ.	3ημ.	7ημ.	28ημ.	3ημ.	7ημ.	28ημ.	3ημ.	7ημ.	28ημ.
	10,3	11,4	11,9	7	9,3	10,4	6,6	7,1	10,1	6,5	8,6	10,5
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΥΔΑΤΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ k (cm/s)	0,11			0,14			0,1			0,07		
ΤΡΙΨΗ – ΑΠΟΤΡΙΨΗ	1 λεπτό		2 λεπτά		1 λεπτό		2 λεπτά		1 λεπτό		2 λεπτά	
% ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ	0,58		0,91		0,29		1,77		0,29		0,39	
% ΑΠΩΛΕΙΑ ΠΑΧΟΥΣ	0,74		1,19		1,44		1,73		0,73		0,88	
	2,92		4,02									



Διάγραμμα 14. Κοκκομετρική κατανομή συνθέσεων 1607/26 – 1607/29

Τα συμπεράσματα από τις παραπάνω συνθέσεις είναι τα εξής:

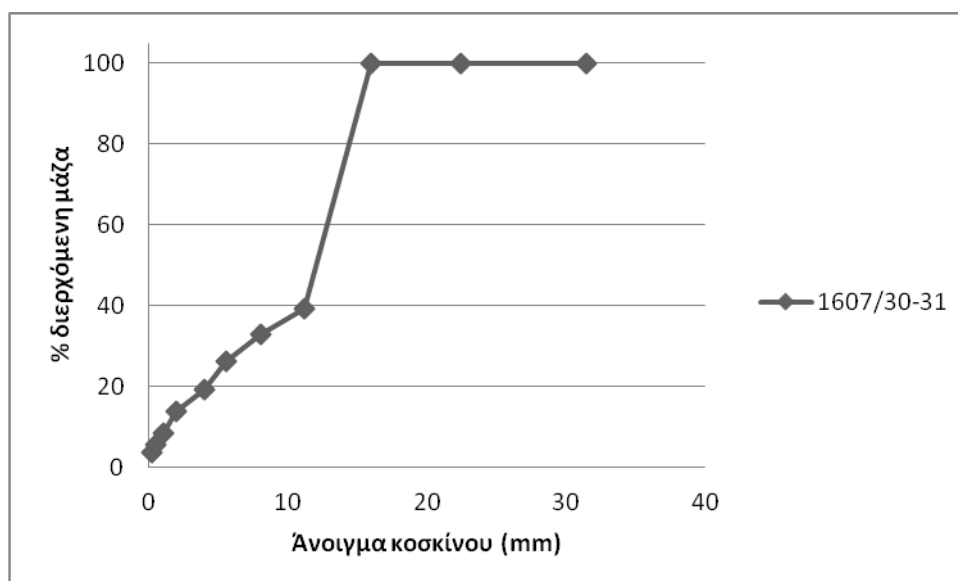
- Με μικρότερη ποσότητα τσιμέντου οι αντοχές κατάφεραν να κρατηθούν στα ίδια περίπου επίπεδα με πριν, ενώ η υδατοπερατότητα αυξήθηκε.

- Το CEM II 42.5 όπως αναμενόταν έδωσε καλύτερες αντοχές σε σχέση με το CEM II 32.5. Από την άλλη όμως το CEM II 32.5 εμφάνισε μεγαλύτερη υδατοπερατότητα αν και με μικρότερο πορώδες.
- Η υποκατάσταση του CEM II 32.5 με πυριτική παιπάλη δεν έδειξε να λειτουργεί τόσο καλά όπως με το CEM II 42.5. Συγκεκριμένα, ήταν ελάχιστη η αύξηση στις αντοχές ενώ η μείωση στην τιμή της υδατοπερατότητας αρκετά μεγαλύτερη, φτάνοντας μέχρι και τη μισή τιμή σε σχέση με τη σύνθεση χωρίς χρήση πυριτικής παιπάλης. Μόνο στην τρίψη - αποτίριψη σημειώθηκε μικρή βελτίωση των τιμών.
- Τα δοκίμια ακόμη έδειχναν να έχουν παραπάνω ποσότητα άμμου απ' ότι χρειαζόταν.

Έτσι στις επόμενες δύο συνθέσεις, δεν χρησιμοποιήθηκε silica fume, μειώθηκε λίγο η ποσότητα της άμμου και αυξήθηκε αυτή του γαρμπιλιού και συγκρίθηκαν ξανά τα δύο είδη τσιμέντου Portland.

Πίνακας 22. Αναλογίες πρώτων υλών και αποτελέσματα αντοχών και υδατοπερατότητας 1607/30 – 1607/31

ΥΛΙΚΑ	ΣΥΝΘΕΣΗ						
	1607/30			1607/31			
CEM II 42.5 (kg/m ³)	190			-			
CEM II 32.5 (kg/m ³)	-			190			
Γαρμπίλι (%)	81			81			
Άμμος (%)	19			19			
w/c	0,47			0,47			
ΘΛΙΠΤΙΚΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ (MPa)	3ημ	7ημ	28ημ	3ημ	7ημ	28ημ	
	10,9	11,2	14,3	7,5	7,7	12,1	
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΥΔΑΤΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ k (cm/s)	0,1			0,14			
ΤΡΙΨΗ – ΑΠΟΤΡΙΨΗ	1 λεπτό		2 λεπτά		1 λεπτό		2 λεπτά
% ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ	0,17		0,29		0,16		0,25
% ΑΠΩΛΕΙΑ ΠΑΧΟΥΣ	1		1,87		0,15		0,3



Διάγραμμα 15. Κοκκομετρική κατανομή συνθέσεων 1607/30 – 1607/31

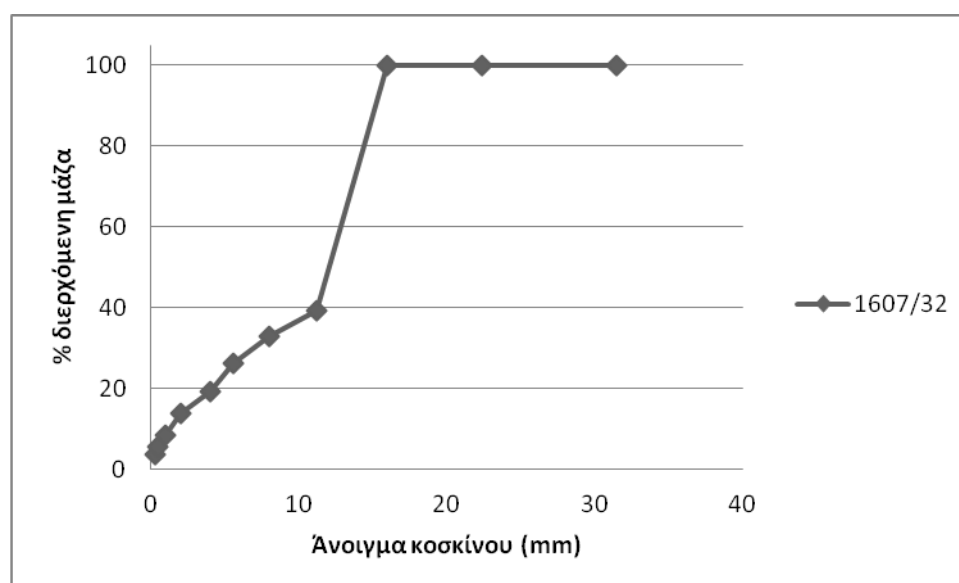
Οι δύο αυτές συνθέσεις έδειξαν και πάλι τις καλύτερες αντοχές που παρουσιάζει το CEM II 42.5 έναντι του CEM II 32.5. Ταυτόχρονα δεν εμφανίσαν ιδιαίτερες διαφορές στις συνθήκες τρίψης – απότριψης.

Η εμφάνιση και οι τιμές των ιδιοτήτων των δοκιμίων πλέον ήταν αρκετά καλές, γεγονός που μας οδήγησε στην σύνθεση που θα αποτελούσε και την τελευταία της σειράς των δοκιμαστικών. Συγκεκριμένα κρατήθηκαν οι προηγούμενες ποσότητες των πρώτων υλών και επιλέχτηκε το τοιμέντο CEM II 42.5, με σκοπό τις καλές αντοχές που παρουσίαζε. Όμως για να βελτιωθεί η τιμή της υδατοπερατότητας, αποφασίστηκε να σταματήσει η χρήση της ηλεκτρόσφυρας και η επιστροφή στον «κλασικό» τρόπο συμπύκνωσης με δόνηση και επιβολή φορτίου, ο οποίος συμπύκνωνε λιγότερο τα δοκίμια.

Η σύνθεση 1607/32 παρουσιάζεται στον πίνακα 23 και η κοκκομετρική της κατανομή στο διάγραμμα 16.

Πίνακας 23. Αναλογίες πρώτων υλών και αποτελέσματα αντοχών και υδατοπερατότητας 1607/32

ΥΛΙΚΑ	ΣΥΝΘΕΣΗ		
	1607/32		
CEM II 42.5 (kg/m ³)	190		
Γαρμπίλι (%)	81		
Άμμος (%)	19		
w/c	0,47		
ΘΛΙΠΤΙΚΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ (MPa)	3ημ.	7ημ.	28ημ.
	6,2	7,1	7,9
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΥΔΑΤΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ k (cm/s)	0,13		
ΤΡΙΨΗ - ΑΠΟΤΡΙΨΗ	1 λεπτό		2 λεπτά
% ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ	1,91		3,38
% ΑΠΩΛΕΙΑ ΠΑΧΟΥΣ	3,64		4,09



Διάγραμμα 16. Κοκκομετρική κατανομή σύνθεσης 1607/32

Η τελική σύνθεση έδειξε τα εξής:

- Εμφάνισε ικανοποιητικές τιμές αντοχών και υδατοπερατότητας για τον συγκεκριμένο τύπο σκυροδέματος.
- Οι αντοχές στην τρίψη – απότριψη παρουσίασαν μια μείωση, γεγονός που πρέπει να οφείλεται στα μικρότερα επίπεδα συμπύκνωσης, καθότι κατά την υποβολή των δοκιμών στη διαδικασία μέρος των αδρανών αποκολλήθηκε από την επιφάνειά τους.

6.3 Παρασκευή σύνθεσης συμβατικού τύπου σκυροδέματος παρόμοιων μηχανικών αντοχών

Τέλος όπως παρουσιάζεται και στα ακόλουθα κεφάλαια για λόγους σύγκρισης των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων των συνθέσεων διαπερατού σκυροδέματος παρασκευάστηκε και μία σύνθεση συμβατικού τύπου σκυροδέματος παρόμοιων μηχανικών αντοχών. Η σύνθεση αυτή παρασκευάστηκε με τσιμέντο CEM II 42,5: 200kg/m³, w/c: 1,09 και η οποία αποτελούνταν από 100% αβεστολιθικά αδρανή κοκκομετρίας γαρμπιλιού.

Πίνακας 24. Αντοχές Συνθέσεως Συμβατικού σε θλίψη (MPa)

	Αντοχές σε θλίψη (MPa)
3 HM	9,2
7 HM	11,8
28 HM	14,5

Η τελική σύνθεση διαπερατού σκυροδέματος 1607/32 που επιλέχθηκε για περαιτέρω μελέτη στο επόμενο Κεφάλαιο παρουσιάζεται ως LP. Οι λόγοι της επιλογής της συγκεκριμένης σύνθεσης συνοψίζονται τόσο στην καλή εργασιμότητα που αυτή παρουσιάζει καθώς και στο γεγονός ότι εμφανίζει ικανοποιητικές τιμές υδατοπερατότητας και αντοχών, σε θλίψη όσο και σε τρίψη-απότριψη, για το πεδίο εφαρμογών του συγκεκριμένου σκυροδέματος.

Κεφάλαιο 7

Κεφάλαιο 7: ΥΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΕ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΑΔΡΑΝΗ

Αντικείμενο του Κεφαλαίου είναι η μελέτη συνθέσεων διαπερατού σκυροδέματος με διαφορετικά ποσοστά συμμετοχής εναλλακτικών αδρανών και συγκεκριμένα σκωρίας χάλυβα και οικοδομικών αποβλήτων. Ταυτόχρονα πραγματοποιείται η σύγκριση των βασικών φυσικομηχανικών ιδιοτήτων τους όπως (αντοχές σε θλίψη, αντοχές σε εφελκυσμό, αντοχές σε τρίψη-απότριψη, υδατοπερατότητα και υδατοαπορροφητικότητα.

Η σύνθεση 1607/32 αποτέλεσε και το πέρας της έρευνας για τη δημιουργία συνθέσεων διαπερατού σκυροδέματος με αμιγώς ασβεστολιθικά αδρανή. Η σύνθεση αυτή ονομάστηκε LP (Limestone PerVIOUS). Στη συνέχεια, με βάση την παραπάνω σύνθεση υποκαταστάθηκαν κατ'όγκον τα ασβεστολιθικά αδρανή με ποσοστά σκωρίας χάλυβα ή/και ανακυκλωμένου σκυροδέματος σε διάφορες αναλογίες (που να καλύπτουν όλα τα δυνητικά ποσοστά αντικατάστασης) και προέκυψαν οι τελικές συνθέσεις που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 25. Οι κωδικοί που ακολουθήθηκαν προκύπτουν από τη χρήση της αγγλικής ονομασίας των αδρανών. Η σκωρία χάλυβα (Steel Slag) συμβολίζεται με S και το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα (Construction & Demolition Wastes) συμβολίζεται με CD. Το P στο τέλος των συνθέσεων δηλώνει το διαπερατό σκυρόδεμα (PerVIOUS concrete). Οι συνθέσεις που δημιουργήθηκαν με τα ποσοστά των αδρανών που συμμετέχουν στην εκάστοτε σύνθεση και η ονομασία τους φαίνονται στον πίνακα 25.

Πίνακας 25. Ποσοστά υποκατάστασης αδρανών και ονοματολογία συνθέσεων

ΠΟΣΟΣΤΑ ΑΔΡΑΝΩΝ	ΟΝΟΜΑ ΣΥΝΘΕΣΗΣ
100% ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΟ ΓΑΡΜΠΙΛΙ	LP
100% ΣΚΩΡΙΑ ΧΑΛΥΒΑ 1	SP
100% ΣΚΩΡΙΑ ΧΑΛΥΒΑ 2	SP2*
100% ΟΙΚΟΔΟΜΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ	CDP
50% ΑΣΒΕΣΤ. ΓΑΡΜΠΙΛΙ-50% ΣΚΩΡΙΑ	LSP
50% ΑΣΒΕΣΤ. ΓΑΡΜΠΙΛΙ-50% ΟΙΚΟΔ. ΑΠΟΒΛΗΤΑ	LCDP
50% ΣΚΩΡΙΑ-50% ΟΙΚΟΔ. ΑΠΟΒΛΗΤΑ	SCDP
50% ΑΣΒΕΣΤ. ΓΑΡΜΠΙΛΙ-25% ΣΚΩΡΙΑ-25% ΟΙΚΟΔ. ΑΠΟΒΛΗΤΑ	LSCDP

*ΣΗΜΕΙΩΣΗ

Η σκωρία χάλυβα 2 που διαφέρει μόνο ως προς την κοκκομετρική της κατανομή σε σχέση με την σκωρία χάλυβα 1 χρησιμοποιήθηκε για λόγους αντιπαραβολής με την τελευταία για τη

διαπίστωση της επίδρασης της κοκκομετρίας ως προς τις ιδιότητες των τελικών συνθέσεων. Σε όλες τις συνθέσεις υποκατάστασης χρησιμοποιήθηκε μόνο η σκωρία κάλυβα 1.

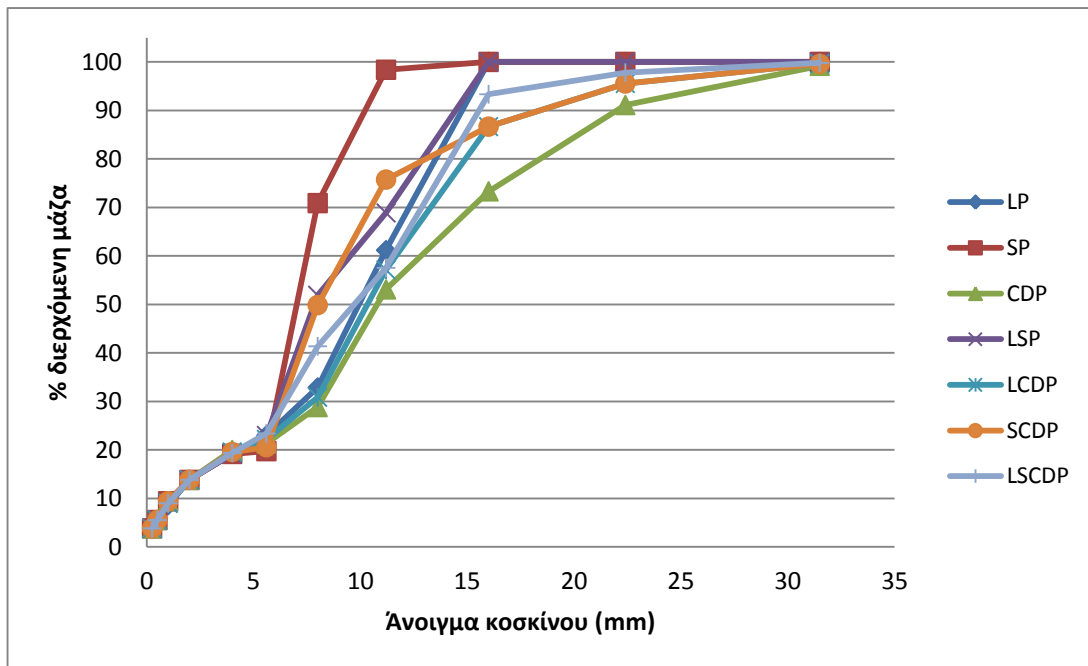
Για τον υπολογισμό της ποσότητας του νερού στις συνθέσεις υποκατάστασης, λόγω της διαφοράς υδατοαπορροφητικότητας του κάθε αδρανούς, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές τους όπως παρουσιάζονται στον πίνακα 11 του κεφαλαίου 5. Πιο συγκεκριμένα, από την σύνθεση-οδηγό LP αφαιρέθηκε η ποσότητα νερού λόγω απορρόφησης από το ασβεστολιθικό γαρμπίλι καθώς και αυτή από την άμμο. Το ποσοστό που απέμεινε αποτέλεσε το νερό για την ενεργοποίηση του τσιμέντου (active water) το οποίο και παρέμεινε σταθερό σε όλες τις συνθέσεις. Σταθερό έμεινε και το ποσοστό νερού που απορροφούσε η άμμος αφού το ποσοστό της δεν άλλαζε ανά σύνθεση. Επομένως, αυτό που πρακτικά άλλαζε ήταν το ποσοστό νερού λόγω απορρόφησης από το εκάστοτε αδρανές, το οποίο ήταν ανάλογο των ποσοτήτων των αδρανών στην κάθε σύνθεση. Παρ' όλα αυτά, μερικές συνθέσεις χρειάστηκαν επιπλέον ποσότητα νερού για να καταστούν εργάσιμες και να αποκτήσουν την επιθυμητή εμφάνιση στη νωπή τους μορφή. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη διαφορετική φύση μεταξύ των υλικών και πως αυτά συνεργάζονταν μεταξύ τους, καθώς και στη διαφορετική κοκκομετρική κατανομή που παρουσίαζε η κάθε σύνθεση.

Όλα τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν στις συγκεκριμένες υποκαταστάσεις, πλην αυτών του ανακυκλωμένου σκυροδέματος είχαν προηγουμένως υποβληθεί σε διαδικασία ξήρανσης, καθότι βρισκόνταν τοποθετημένα για μεγάλο χρονικό διάστημα σε εκτεθειμένο περιβάλλον και το ενδεχόμενο ποσοστό υγρασίας τους θα παραποιούσε τη μελέτη συνθέσεως ως προς το απαιτούμενο νερό. Τα αδρανή ανακυκλωμένου σκυροδέματος συγκεκριμένα, πριν από τη χρησιμοποίησή τους σε οποιαδήποτε σύνθεση εμβαπτίστηκαν σε νερό από την προηγούμενη ημέρα έτσι ώστε να κορεστούν. Αυτό συνέβη γιατί η τιμή της υδατοαπορροφητικότητας τους δεν ήταν σταθερή σε κάθε δείγμα, χαρακτηριστικό της ιδιαίτερης ποικιλομορφίας του υλικού, γεγονός που θα οδηγούσε σε σφάλμα της μελέτης συνθέσεως αν χρησιμοποιούνταν σε όλες η σταθερή τιμή του πίνακα 11 του κεφαλαίου 5 που ουσιαστικά αποτελεί ένα σταθμικό μέσο όρο. Έτσι, με την τεχνική αυτή το συγκεκριμένο εμπόδιο αντιμετωπίστηκε, αφού πλέον η υδατοαπορροφητικότητα των συγκεκριμένων αδρανών δε θα επηρέαζε τις συνθέσεις αφού δε θα συμμετείχε στον υπολογισμό του προστιθέμενου νερού. Στον πίνακα 26 που ακολουθεί παρουσιάζονται όλες οι συνθέσεις που θα μελετηθούν στην συνέχεια.

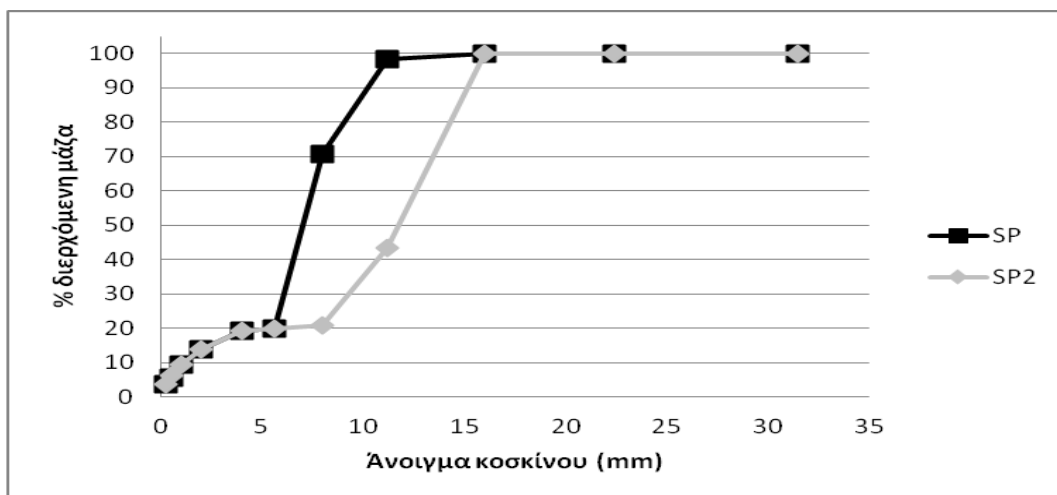
Πίνακας 26. Ποσοστά πρώτων υλών συνθέσεων υποκατάστασης

ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	ΠΟΣΟΣΤΑ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ						w/c
	CEM II 42.5 (kg/m ³)	Άμμος (kg/m ³)	Ασβεστολιθικό γαρμπίλι (%)	Σκωρία κάλυβα I (%)	Σκωρία κάλυβα II (%)	Ανακυκλωμένο σκυρόδεμα (%)	
LP	190	350	100	0	0	0	0,47
SP	190	350	0	100	0	0	0,58
SP2	190	350	0	0	100	0	0,58
CDP	190	350	0	0	0	100	0,41
LSP	190	350	50	50	0	0	0,53
LCDP	190	350	50	0	0	50	0,44
SCDP	190	350	0	50	0	50	0,65
LSCDP	190	350	50	25	0	25	0,56

Στο παρακάτω διάγραμμα 17 δίνεται η κοκκομετρική κατανομή όλων των παραπάνω συνθέσεων, πλην της SP2 που παρατίθεται συγκριτικά με την SP στο διάγραμμα 18.



Διάγραμμα 17. Συγκριτική κοκκομετρική κατανομή συνθέσεων υποκατάστασης



Διάγραμμα 18. Συγκριτική κοκκομετρική κατανομή συνθέσεων SP και SP2

Στη συνέχεια (παράγραφοι 7.1-7.5) παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων των συνθέσεων υποκατάστασης, όπως αυτές περιγράφηκαν στην παράγραφο της πειραματικής διαδικασίας.

7.1 Αντοχή σε θλίψη

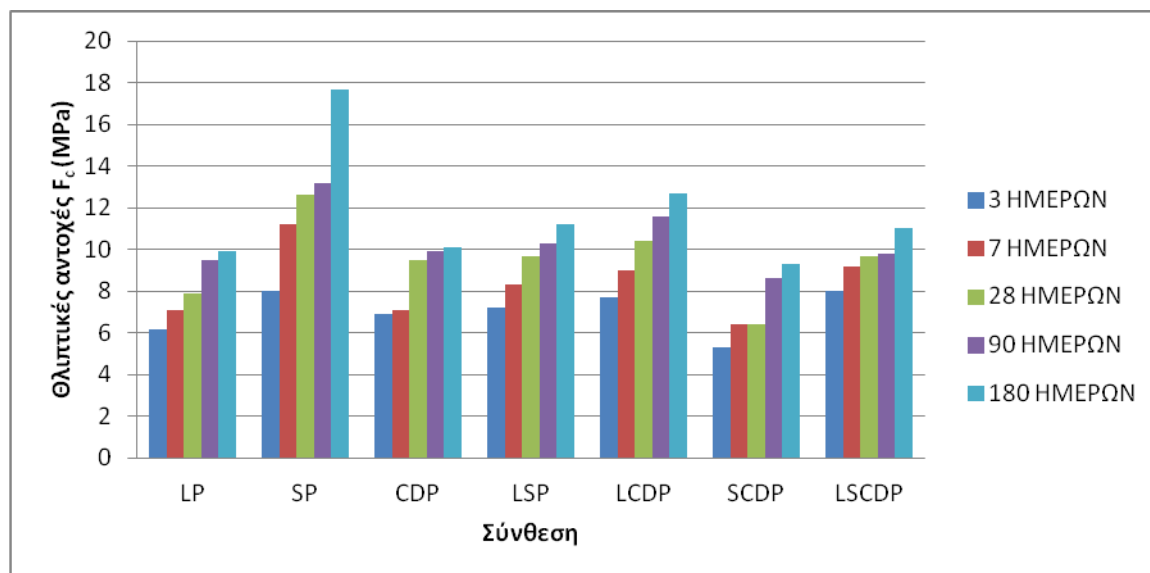
Η αντοχή σε θλίψη υπολογίζεται με βάση το μετρούμενο φορτίο θραύσης του δοκιμίου, σύμφωνα με τα οριζόμενα στο πρότυπο EN 12390, συμβολίζεται ως F_c και εκφράζεται σε MPa.

Οι θλιπτικές αντοχές όλων των συνθέσεων δίνονται στον πίνακα 27 που ακολουθεί.

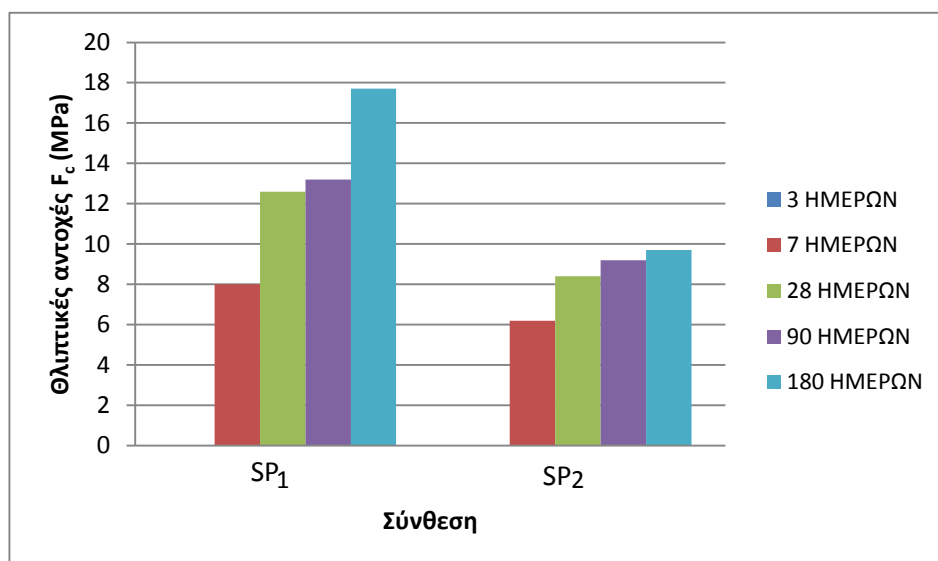
Πίνακας 27. Θλιπτικές αντοχές συνθέσεων υποκατάστασης

ΟΝΟΜΑ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	ΘΛΙΠΤΙΚΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ F_c (MPa)				
	3 ημ	7 ημ	28 ημ	90 ημ	180 ημ
LP	6,2	7,1	7,9	9,5	9,9
SP	8	11,2	12,6	13,2	17,7
SP2	6,2	7	8,4	9,2	9,7
CDP	6,9	7,1	9,5	9,9	10,1
LSP	7,2	8,3	9,7	10,3	11,2
LCDP	7,7	9	10,4	11,6	12,7
SCDP	5,3	6,4	6,4	8,6	9,3
LSCDP	8	9,2	9,7	9,8	11

Και σε μορφή συγκριτικού γραφήματος στο διάγραμμα 19, ενώ οι δύο συνθέσεις με τους διαφορετικούς τύπους σκωρίας κάλυβα συγκρίνονται μεταξύ τους στο διάγραμμα 20.



Διάγραμμα 19. Σύγκριση θλιπτικών αντοχών συνθέσεων υποκατάστασης



Διάγραμμα 20. Σύγκριση θλιπτικών αντοχών συνθέσεων SP και SP2

Συζήτηση αποτελεσμάτων

- Όλες οι συνθέσεις εμφανίζουν ικανοποιητικές αντοχές για το πεδίο εφαρμογών τους.
- Η σύνθεση που περιέχει σκωρία κάλυβα (SP), όπως ήταν αναμενόμενο επειδή χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή άοπλου σκυροδέματος, εμφανίζει αυξημένες αντοχές σε σχέση με τα άλλα αδρανή.
- Η σύνθεση με ανακυκλωμένο σκυρόδεμα (CDP) δείχνει να αποκτά ελαφρώς καλύτερες αντοχές σε σχέση με τα ασβεστολιθικά αδρανή (LP), γεγονός που οφείλεται στη διαφορετική του κοκκομετρική κατανομή (πιο χονδρόκοκκα και μεγαλύτερων αντοχών αδρανή) καθώς και στην καλύτερη συμπύκνωση του κατά την χύτευση των δοκιμίων.
- Οι διμερείς συνθέσεις ασβεστολιθικών αδρανών - αδρανών σκωρίας κάλυβα (LSP) όπως και ασβεστολιθικών αδρανών - αδρανών ανακυκλωμένου σκυροδέματος (LCDP) δείχνουν πως τα εναλλακτικά αδρανή συνεργάζονται ικανοποιητικά με τα ασβεστολιθικά και πως ίσως μπορούν να τα υποκαταστήσουν επαρκώς. Από την άλλη η μίξη αδρανών σκωρίας και ανακυκλωμένου σκυροδέματος (SCDP) δεν έδειξε την ίδια συνοχή κατά την παρασκευή του, εμφανίζοντας και δυσκολία στη διαδικασία συμπύκνωσης, γεγονός που αποτυπώνεται στις σχετικά μειωμένες θλιπτικές αντοχές.
- Η τριμερής σύνθεση όλων των αδρανών (LSCDP) εμφάνισε πολύ καλές θλιπτικές αντοχές, δείχνοντας ότι η συνεργασία μεταξύ τους φαίνεται να μπορεί να αποδώσει σε καλό βαθμό. Αυτό ίσως να οφείλεται και τις διαφορετικές κοκκομετρικές κατανομές που εμφανίζουν τα τρία είδη αδρανών γεγονός που οδήγησε, όπως παρατηρήθηκε, σε ένα αρκετά ομοιογενές μίγμα με ομοιόμορφη συμπύκνωση κατά την παραγωγή του.
- Η σύγκριση μεταξύ των δύο διαφορετικής κοκκομετρικής κατανομής σκωριών κάλυβα έδειξε την καλύτερη απόδοση αντοχών της λεπτόκοκκης σκωρίας (SP) έναντι της χονδρόκοκκης (SP2). Το γεγονός αυτό οφείλεται στη φύση του υλικού που έχει μεγάλο δείκτη σκληρότητας με τιμές που κυμαίνονται 6-7 της κλίμακας Mohs, με

αποτέλεσμα η λεπτόκοκκη σκωρία να μπορεί να συμπυκνωθεί περαιτέρω κατά της παραγωγική διαδικασία, έναντι της χονδρόκοκκης η όποια, όπως παρατηρήθηκε, εμφάνισε μεγάλη δυσκολία.

7.2 Αντοχή σε εφελκυσμό

Η αντοχή των δοκιμίων σε εφελκυσμό μετρήθηκε βάσει του προτύπου ASTM C496-96 « Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens». Οι τιμές στη δοκιμασία εφελκυσμού των δοκιμίων κυμάνθηκαν από 0,7 έως 2,1 MPa για όλες τις αναλογίες και τις ηλικίες. Οι τιμές αυτές εμπίπτουν στο σφάλμα του οργάνου, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να εξαχθεί κάποιο ασφαλές γενικότερο συμπέρασμα για την αντοχή και τις διαφοροποιήσεις των συγκεκριμένων συνθέσεων μεταξύ των σε εφελκυσμό.

7.3 Τρίψη - απότριψη

Για τη διαδικασία τρίψης-απότριψης, ακολουθήθηκε ο τρόπος που περιγράφεται παρακάτω. Παρασκευάστηκαν κυβικά δοκίμια διάστασης 75mm. Όταν κατέστησαν πλήρως ώριμα, δηλαδή μετά το πέρας τουλάχιστον 28 ημερών, τοποθετήθηκαν σε ταινιολειαντήρα για ένα (1) και δύο(2) λεπτά με αντίστοιχα και μετρήθηκε το ποσοστό απώλειας μάζας και ύψους του εκάστοτε δοκιμίου. Οι χρόνοι αυτοί επελέγησαν με σκοπό να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα απώλειας μάζας και ύψους που παρατηρείται από την αποκόλληση αδρανών από την επιφάνεια των δοκιμίων κατά τη διάρκεια του πρώτου λεπτού τρίψης λόγω της ανομοιόμορφης επιφάνειας τους. Η συγκεκριμένη τεχνική, όπως αποδείχτηκε, έδωσε συγκρίσιμα αποτελέσματα μεταξύ των συνθέσεων.

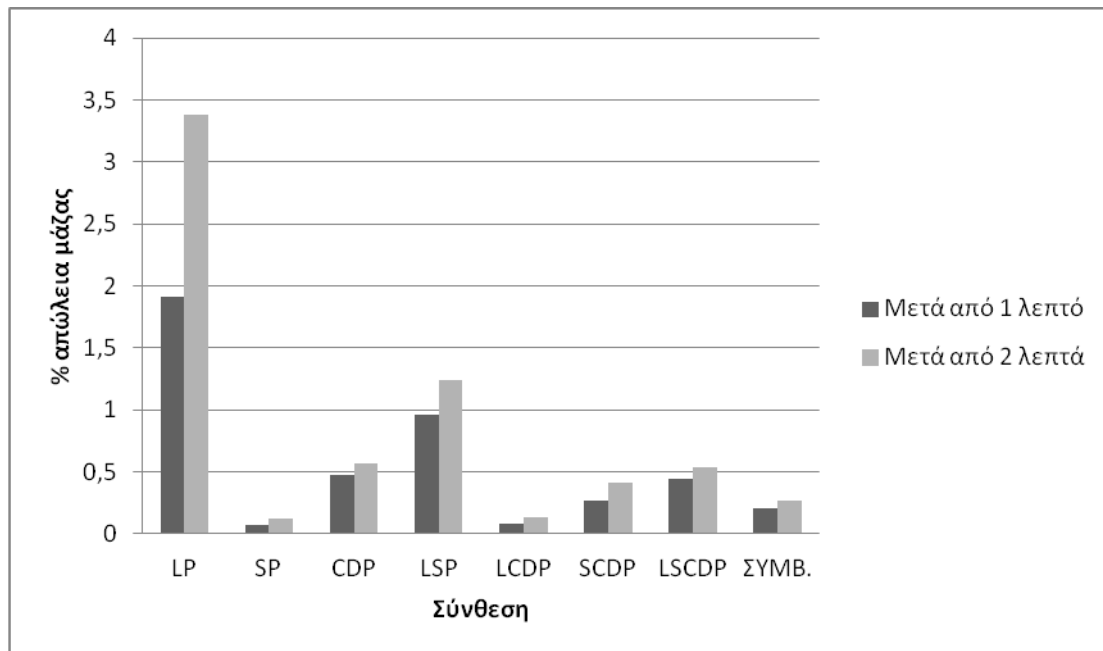
Τα αποτελέσματα των αντοχών σε συνθήκες τρίψης - απότριψης όλων των συνθέσεων δίνονται στον πίνακα 28 που ακολουθεί. Γίνεται επίσης σύγκριση και με τις απώλειες ενός συμβατικού τύπου σκυροδέματος.

Πίνακας 28. Αντοχές τρίψης - απότριψης συνθέσεων υποκατάστασης

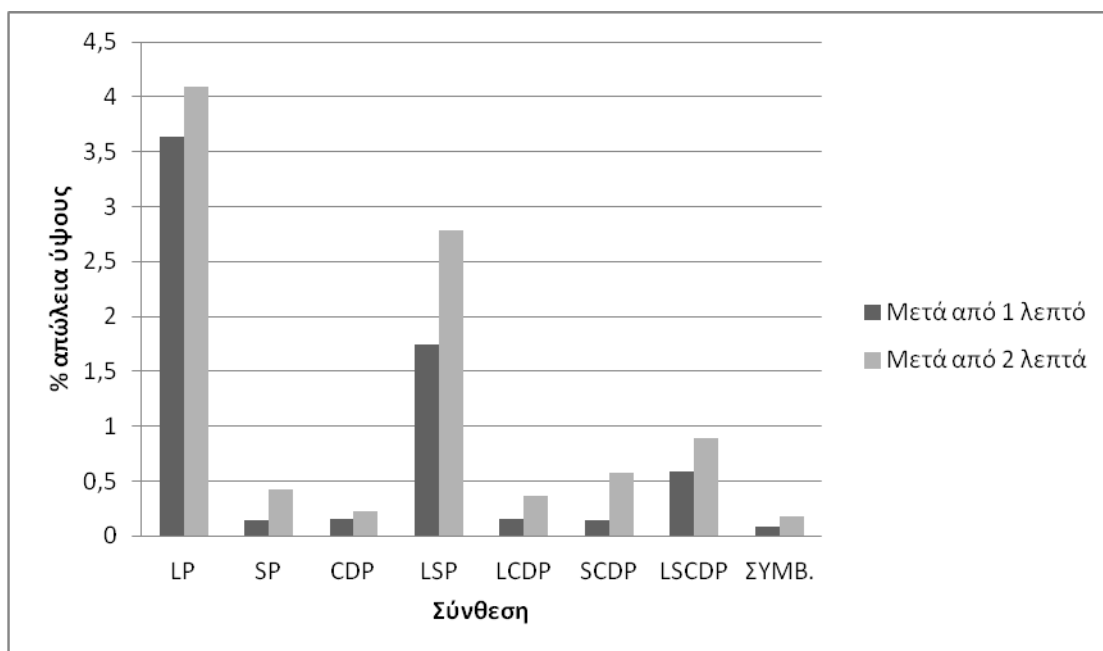
ΟΝΟΜΑ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	ΤΡΙΨΗ - ΑΠΟΤΡΙΨΗ			
	% ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ		% ΑΠΩΛΕΙΑ ΥΨΟΥΣ	
	1 λεπτό	2 λεπτά	1 λεπτό	2 λεπτά
LP	1,91	3,38	3,64	4,09
SP	0,07	0,12	0,14	0,42
SP2	0,69	0,88	1,15	1,73
CDP	0,47	0,57	0,15	0,23
LSP	0,96	1,24	1,75	2,79
LCDP	0,08	0,13	0,15	0,37
SCDP	0,27	0,41	0,14	0,58
LSCDP	0,44	0,54	0,59	0,89
ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ	0,21	0,27	0,09	0,18

Σε μορφή συγκριτικού διαγράμματος τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στα διαγράμματα 21 και 22, ενώ οι συνθέσεις με τους

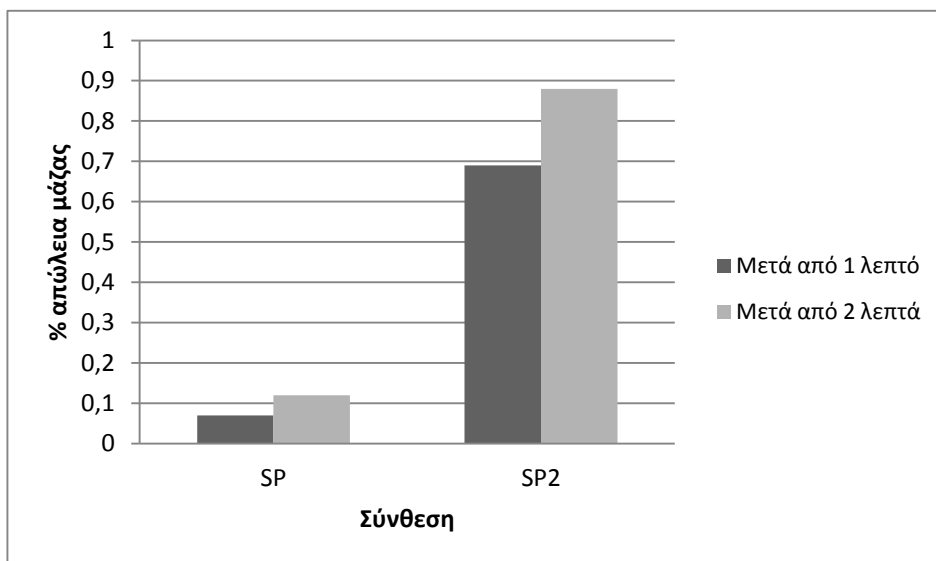
διαφορετικούς τύπους σκωρίας χάλυβα συγκρίνονται μεταξύ τους στα διαγράμματα 23 και 24.



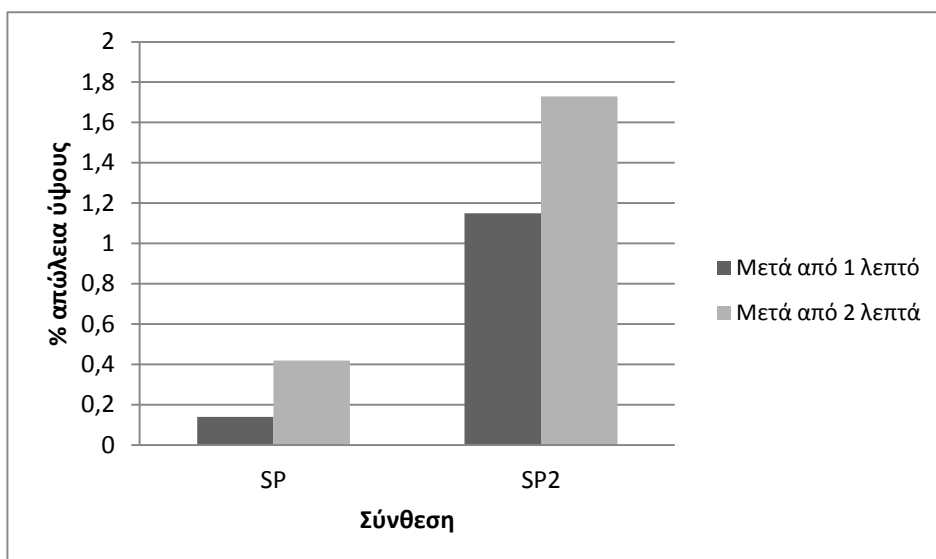
Διάγραμμα 21. Σύγκριση απώλειας μάζας συνθέσεων υποκατάστασης



Διάγραμμα 22. Σύγκριση απώλειας ύψους συνθέσεων υποκατάστασης



Διάγραμμα 23. Σύγκριση απώλειας μάζας συνθέσεων SP και SP2



Διάγραμμα 24. Σύγκριση απώλειας ύψους συνθέσεων SP και SP2

Συζήτηση αποτελεσμάτων

- Μεταξύ των συνθέσεων υπήρχαν αξιοσημείωτες διαφορές. Τα δοκίμια με τα αμιγώς ασβεστολιθικά αδρανή (LP) παρουσίασαν τις μεγαλύτερες απώλειες, τόσο σε μάζα όσο και σε ύψος, σε σχέση με τα δοκίμια των εναλλακτικών αδρανών - (SP) και (CDP). Αυτό συνέβη λόγω αποκόλλησης αδρανών από την επιφάνεια τριβής κατά τη διαδικασία. Αυξημένες απώλειες παρουσίασαν και οι συνθέσεις που είχαν ποσοστό ασβεστολιθικών αδρανών, όπως οι LSP και LSCDP.
- Μοναδική εξαιρεση αποτέλεσε η σύνθεση ασβεστολιθικών - ανακυκλωμένου σκυροδέματος (LCDP) η οποία παρουσίασε χαμηλές απώλειες, τόσο σε μάζα όσο και σε ύψος, η οποία δείχνει μια καλή συνεργασία (packing) των δύο τύπων αδρανών στη συγκεκριμένη διαδικασία καταπόνησης.

- Η σκωρία χάλυβα (SP) όπως αναμενόταν παρουσίασε τις μικρότερες απώλειες από τα τρία είδη αδρανών, κυρίως λόγω της υψηλής της σκληρότητας. Παρ' όλα αυτά η σύνθεση με τη κονδρόκοκκη σκωρία (SP2) έδειξε να έχει αρκετά μεγαλύτερες απώλειες, τόσο μάζας όσο και ύψους. Αυτό όμως εξηγείται επειδή κατά τη διαδικασία τρίψης η σύνθεση SP2 εμφάνισε αποκόλληση ορισμένων αδρανών λόγω της σκληρότητάς τους από τη μάζα της σε σχέση με την SP όπου δεν παρατηρήθηκε κάτι τέτοιο, και το οποίο έδειξε να έχει καλύτερη συνοχή λόγω της μικρότερης κοκκομετρικής κατανομής των αδρανών της.
- Τα εναλλακτικά αδρανή δείχνουν να βελτιώνουν τη συμπεριφορά του διαπερατού σκυροδέματος σε επίπεδα κοντά σε σχέση με το συμβατικού τύπου σκυρόδεμα καθώς μειώνονται αισθητά οι απώλειες σε σχέση με το LP όπως φαίνεται και στον Πίνακα 28.
- Επίσης, σε όποιες συνθέσεις χρησιμοποιήθηκαν αδρανή σκωρίας – LSP, SCDP και LSCDP – εμφανίστηκε μία μείωση του ποσοστού απωλειών απ' ότι τα άλλα δύο υλικά εμφάνιζαν.

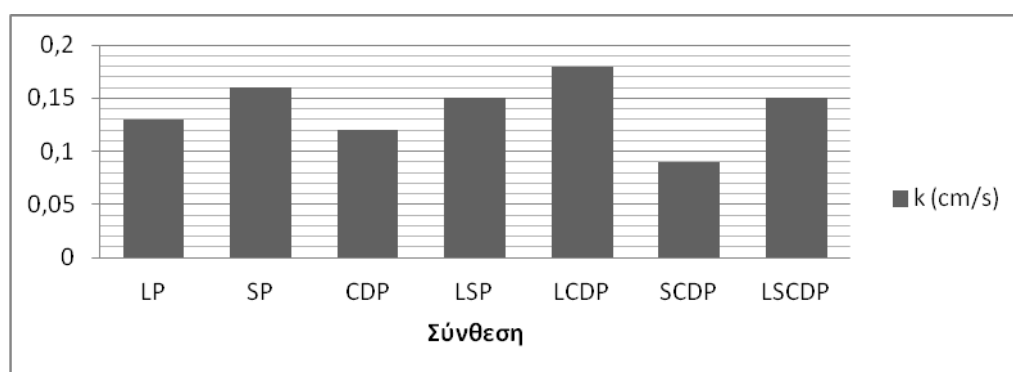
7.4 Υδατοπερατότητα

Η υδατοπερατότητα όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 6 μετρήθηκε βάσει της παραλλαγής του προτύπου «Ελληνικές Προδιαγραφές Εργαστηριακών Δοκιμών Εδαφομηχανικής Ε105-86». Οι τιμές του συντελεστή υδατοπερατότητας **k** όλων των συνθέσεων δίνονται στον πίνακα 29 που ακολουθεί. Η σύνθεση του Συμβατικού σκυροδέματος εμφανίζει συντελεστή υδατοπερατότητας 0 (cm/s) σύμφωνα με αυτήν την μέθοδο.

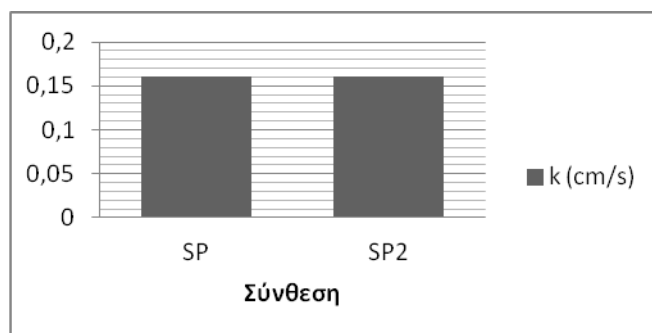
Πίνακας 29. Συντελεστής υδατοπερατότητας **k** συνθέσεων

	ΟΝΟΜΑ ΣΥΝΘΕΣΗΣ							
	LP	SP	SP2	CDP	LSP	LCDP	SCDP	LSCDP
Συντελεστής υδατοπερατότητας k (cm/s)	0,13	0,16	0,16	0,12	0,15	0,18	0,09	0,15

Και σε μορφή συγκριτικού γραφήματος στο διάγραμμα 25, ενώ οι δύο συνθέσεις με τους διαφορετικούς τύπους σκωρίας χάλυβα συγκρίνονται μεταξύ τους στο διάγραμμα 26.



Διάγραμμα 25. Σύγκριση συντελεστή υδατοπερατότητας **k** συνθέσεων υποκατάστασης



Διάγραμμα 26. Σύγκριση συντελεστή υδατοπερατότητας k συνθέσεων SP και SP2

Συζήτηση αποτελεσμάτων

- Όλες οι συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος εμφανίζουν ικανοποιητικό συντελεστή υδατοπερατότητας σύμφωνα με το πεδίο εφαρμογών τους, οι διαφορές των τιμών τους όμως είναι αξιολογήσιμες.
- Η σύνθεση με τη σκωρία χάλυβα SP εμφάνισε τη μεγαλύτερη τιμή, η οποία αιτιολογείται και από την σχετική δυσκολία κατά την συμπύκνωσή της με αποτελέσματα το εσωτερικό διασυνδεδεμένο δίκτυο πόρων στα δοκίμια να είναι αρκετά μεγάλο άρα διευκολυνόταν η διέλευση του νερού.
- Από την άλλη, η σύνθεση με το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα CDP εμφάνισε τη μικρότερη τιμή, λόγω της μεγαλύτερης τιμής συμπύκνωσης που εμφάνισε κατά την παρασκευή των συνθέσεων.
- Στα μίγματα των αδρανών, πολύ καλή τιμή παρουσίασε η σύνθεση LCDP με τα αδρανή ασβεστολίθου και ανακυκλωμένου σκυροδέματος να δείχνουν πως συνεργάζονται αρκετά καλά, όπως και δευτερευόντως οι συνθέσεις ασβεστολίθου – σκωρίας (LSP) και η τριμερής (LSCDP).
- Όμως η σύνθεση σκωρίας – ανακυκλωμένου σκυροδέματος (SCDP) εμφάνισε μειωμένη τιμή του συντελεστή, δείχνοντας πως ίσως αυτά τα δύο υλικά δε συνεργάζονται τόσο καλά ως προς τη διαμόρφωση συνεχούς πορώδους και άρα καλής υδατοπερατότητας.
- Μεταξύ των συνθέσεων των δύο σκωριών – SP και SP2 – δεν παρατηρήθηκε διαφορά στο συντελεστή υδατοπερατότητας, γεγονός που δείχνει πως οι δύο διαφορετικές κοκκομετρικές κατανομές του υλικού δίνουν εξίσου καλά αποτελέσματα στην τιμή της.

7.5 Υδατοαπορροφητικότητα

Πέραν από την τιμή της υδατοπερατότητας που είναι μια βασική ιδιότητα των διαπερατών σκυροδεμάτων εξίσου σημαντική είναι και η υδατοαπορροφητικότητα. Η απορροφητικότητα σε νερό έγινε βάσει του προτύπου BS 1881-122:2011 “Testing concrete, Part 122: Method for determination of water absorption”. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 30. Υδατοαπορροφητικότητα δοκιμών κατά BS 1881-122:2011

	ΟΝΟΜΑ ΣΥΝΘΕΣΗΣ							
	LP	SP	SP2	CDP	LSP	LCDP	SCDP	LSCDP
% Υδατο-απορροφητικότητα	3,58	3,65	3,86	5,56	3,41	4,28	4,95	3,81

Παρατηρούμε πως όλες οι συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος εμφανίζουν μικρές τιμές υδατοαπορροφητικότητας κάτω από 5,6%. Με την σύνθεση CDP να εμφανίζει την μεγαλύτερη τιμή (5,56%) γεγονός αναμενόμενο λόγω του υψηλού πορώδους των οικοδομικών αποβλήτων καθώς και των διαφόρων ρωγμών που εμφανίζουν τα συγκεκριμένα αδρανή την επιφάνεια τους. Για συγκριτικούς λόγους αξίζει να σημειωθεί πως η σύνθεση συμβατικού τύπου σκυροδέματος που προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 6 εμφανίζει υδατοαπορροφητικότητα της τάξης του 5,90%, ποσοστό μεγαλύτερο σε σύγκριση με τις συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος και το οποίο οφείλεται στο κατά πολύ μεγαλύτερο ποσοστό τιμμεντόπαστς του σε σχέση με τις συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος.

7.6 Συμπερασματικά

Στον Πίνακα 31 που ακολουθεί συγκεντρωτικά παρουσιάζεται η συμπεριφορά της κάθε σύνθεσης διαπερατού σκυροδέματος στις ιδιότητες που παρουσιάστηκαν σε αυτό το Κεφάλαιο. Όσο περισσότερους σταυρούς περιέχει μια σύνθεση τόσο καλύτερη συμπεριφορά είχε στην εκάστοτε ιδιότητα.

Πίνακας 31. Συγκεντρωτικός Πίνακας συμπεριφοράς των συνθέσεων διαπερατού σκυροδέματος στην εκάστοτε ιδιότητα.

ΣΥΝΘΕΣΗ	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ	ΤΡΙΨΗ-ΑΠΟΤΡΙΨΗ	ΥΔΑΤΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ	ΥΔΑΤΟΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑ
LP	+	+	++	+++
SP	+++	+++	+++	+++
CDP	++	++	++	+
LSP	++	++	+++	+++
LCDP	+++	+++	+++	++
SCDP	+	+++	+	+
LSCDP	++	++	+++	++

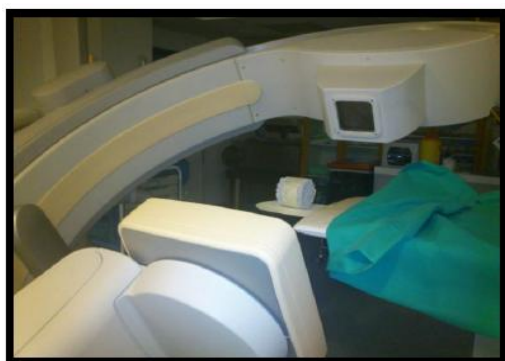
Κεφάλαιο 8

Κεφάλαιο 8: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕΣΩ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

Με σκοπό την αξιολόγηση της εσωτερικής πορώδους δομής των επτά τελικών συνθέσεων διαπερατού σκυροδέματος όπως αυτές παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 7 (Πίνακας 25), τα δοκίμια οδηγήθηκαν προς αξονική τομογραφία και οι τομές X Ray CT αξιολογούνται μέσω του προγράμματος επεξεργασίας Image Analysis Pro.

8.1 Πειραματική διαδικασία αξονικής τομογραφίας

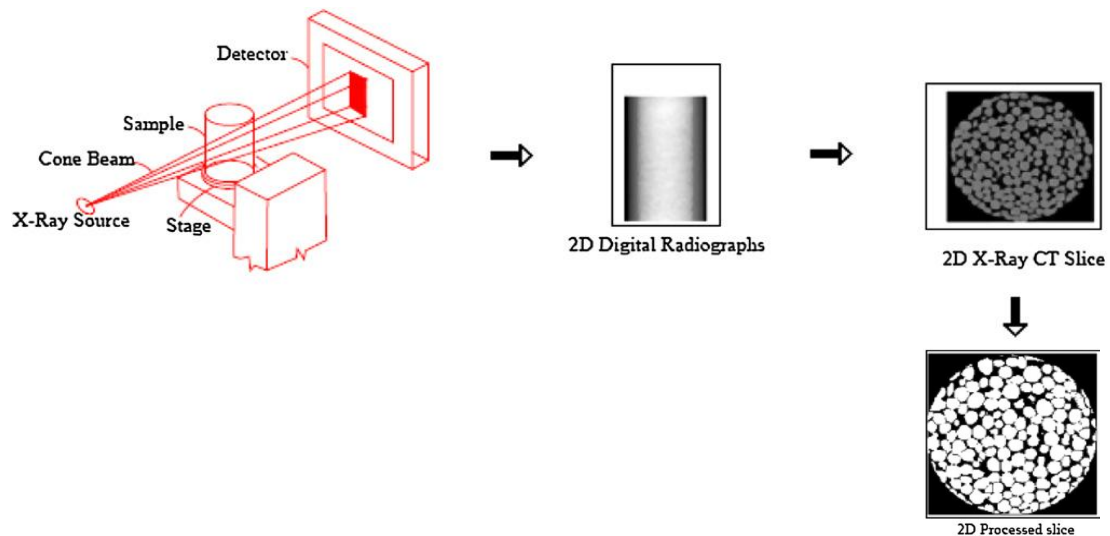
Κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων 10*10 από κάθε μελετώμενη σύνθεση υποβλήθηκαν σε αξονική τομογραφία με σκοπό να αποκτηθεί μια εικόνα για την εσωτερική δομή και κατανομή των πόρων των δοκιμίων διαπερατού σκυροδέματος. Όπως φαίνεται στην εικόνα 18 (α,β) το δοκίμιο τοποθετήθηκε σε απόσταση μισού μέτρου ενώ στην εικόνα 18 (γ) φαίνεται σχηματικά η πορεία των ακτινών μέσα από το δείγμα και ο τρόπος καταγραφής του αποτελέσματος.



(α)



(β)



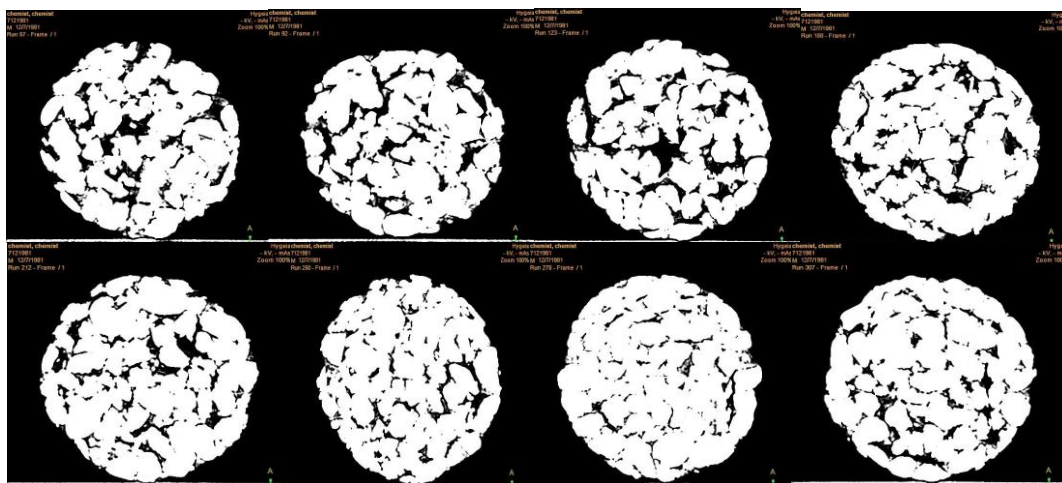
(γ)

Εικόνα 18. (α), (β), (γ): Τοποθέτηση του δοκιμίου στην τράπεζα λήψης φωτογραφιών, πίνακας ελέγχου οργάνου

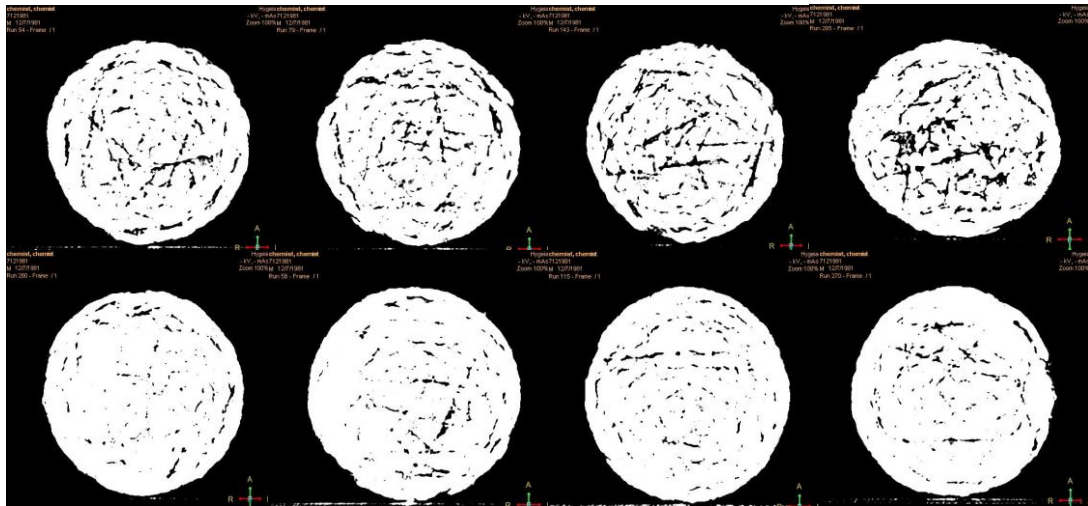
8.2 Αποτελέσματα Αξονικής Τομογραφίας

Οι εικόνες που ελήφθησαν από τον αξονικό τομογράφο αποτελούσαν τομές των δοκιμίων ανά περίπου 5 χιλιοστά. Η προβολή και επεξεργασία των εικόνων έγινε με χρήση του προγράμματος DICOM Viewer, ενώ ο υπολογισμός του ενεργού πορώδους έγινε με χρήση του προγράμματος Image Analysis Pro.

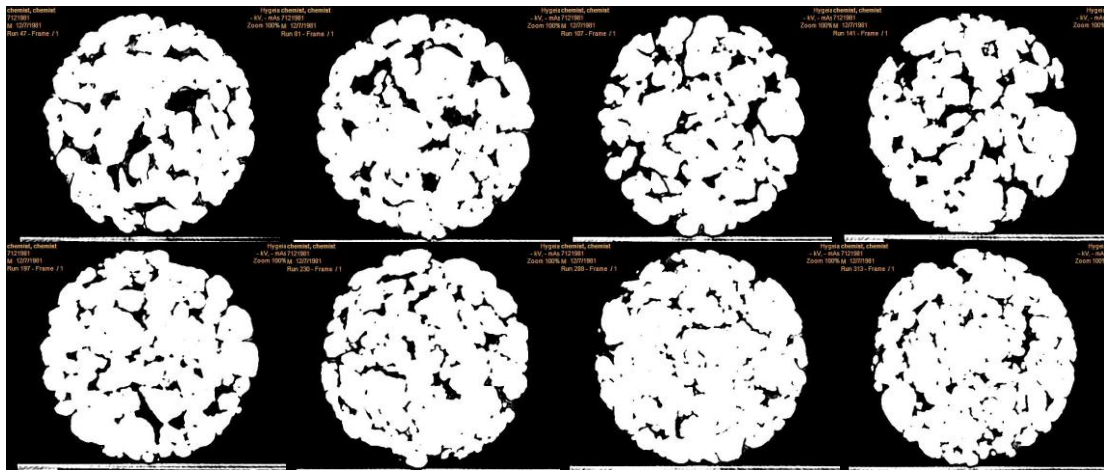
Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται οι τομές που έλαβε ο αξονικός τομογράφος από τα δοκίμια των υπό μελέτη συνθέσεων. Το μαύρο χρώμα αντιπροσωπεύει τα κενά ενώ το λευκό την τσιμεντόπαστα και τα αδρανή. Το ποσοστό των κενών χώρων υπολογίστηκε, όπως προαναφέρθηκε, με χρήση του προγράμματος “Image Analysis Pro”.



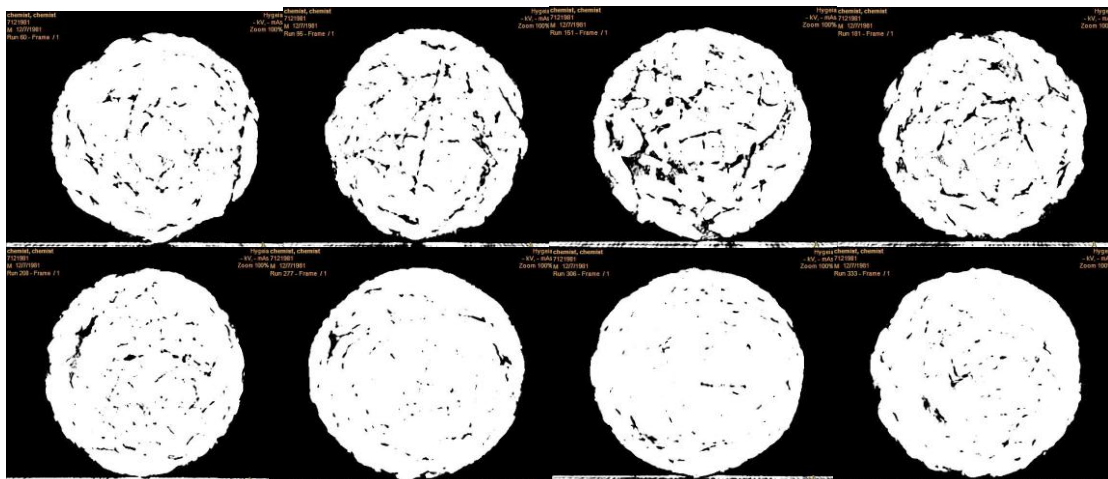
Εικόνα 19. 2D Τομή XRay CT της σύνθεσης LP



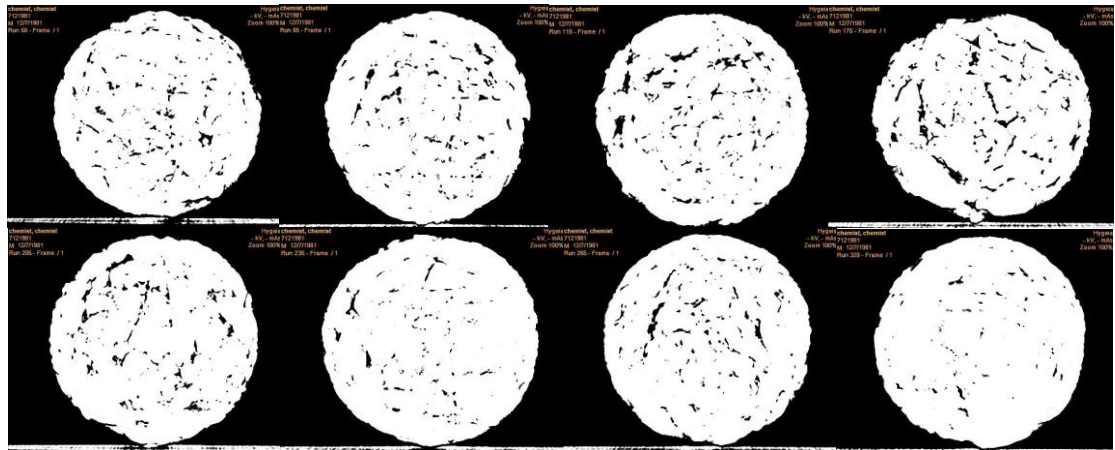
Εικόνα 20. 2D Τομή XRay CT της σύνθεσης SP



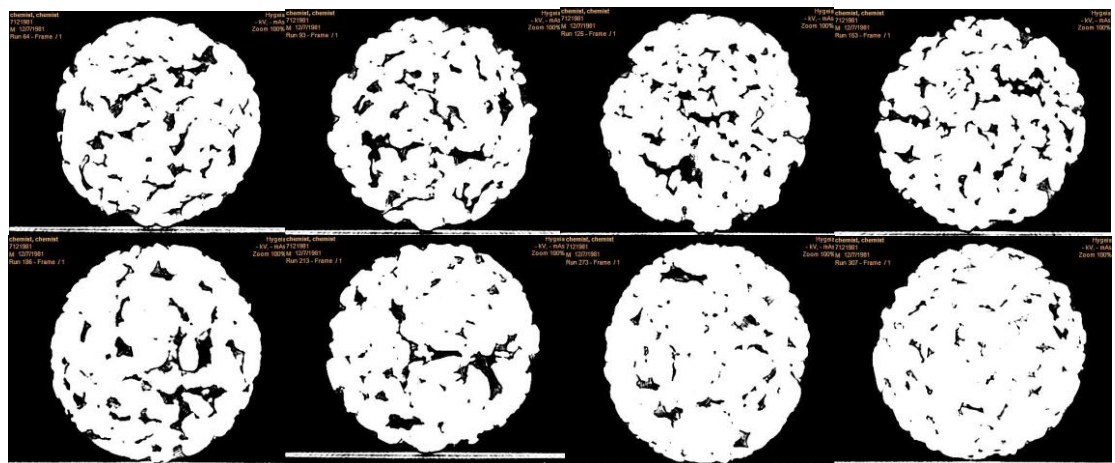
Εικόνα 21. 2D Τομή XRay CT της σύνθεσης CDP



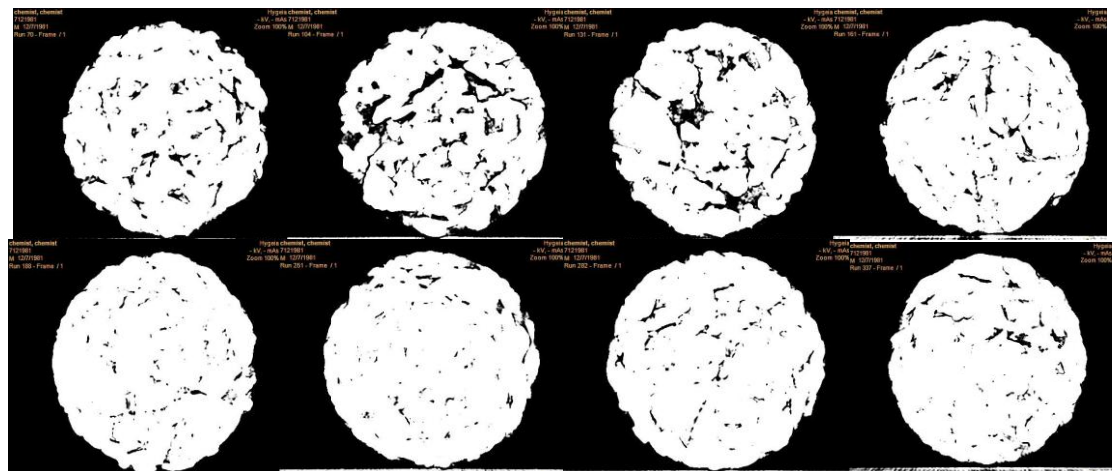
Εικόνα 22. 2D Τομή XRay CT της σύνθεσης LSP



Εικόνα 23. 2D Τομή XRay CT της σύνθεσης SCDP



Εικόνα 24. 2D Τομή XRay CT της σύνθεσης LCDP



Εικόνα 25. 2D Τομή XRay CT της σύνθεσης LSCDP

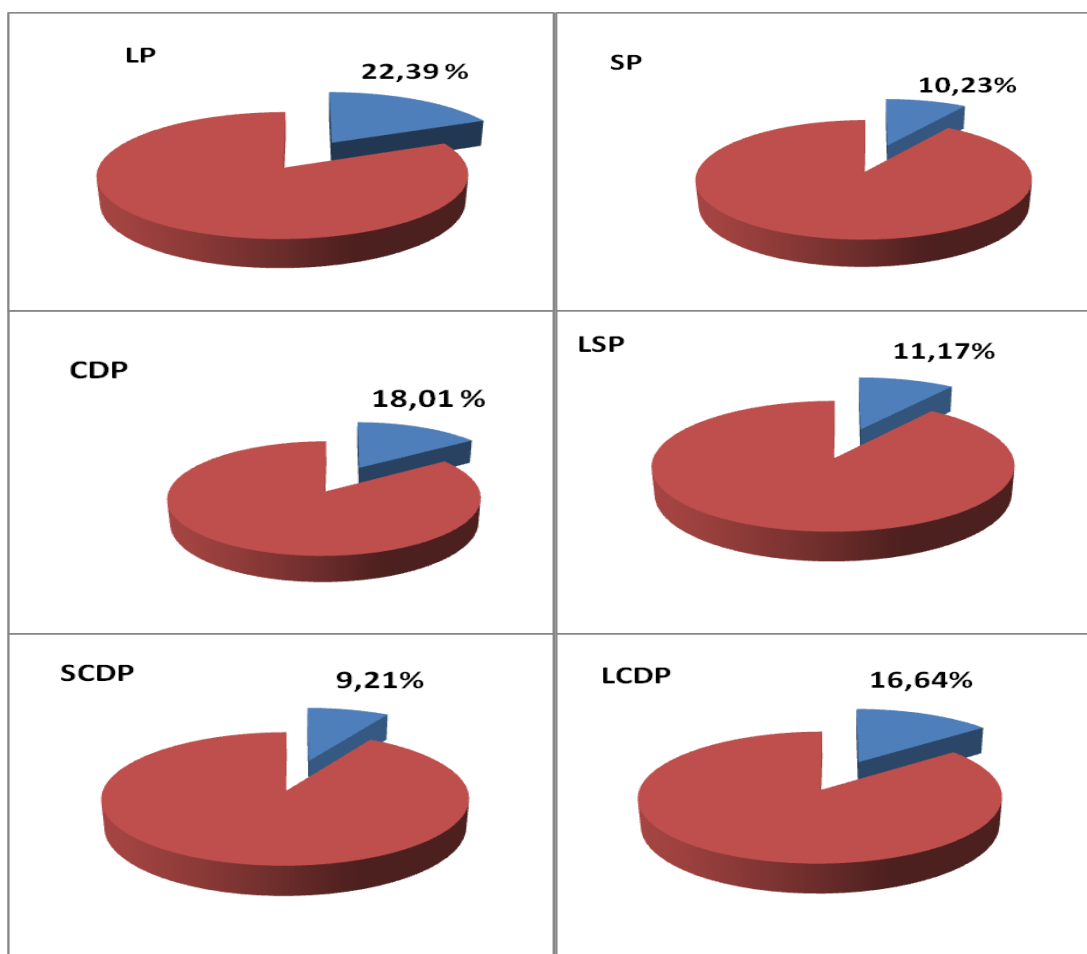
Ένα πρώτο συμπέρασμα από την μελέτη των εικόνων είναι ότι οι διαστάσεις καθώς και η κατανομή των πόρων διαφέρουν σε κάθε σύνθεση. Αυτό οφείλεται τόσο στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά όσο και στην κοκκομετρική κατανομή των αδρανών που επηρεάζει την συμπακνωσή τους κατά την παρασκευή των συνθέσεων και εν τέλει την δημιουργία του εσωτερικού διασυνδεδεμένου δικτύου. Παρατηρούμε

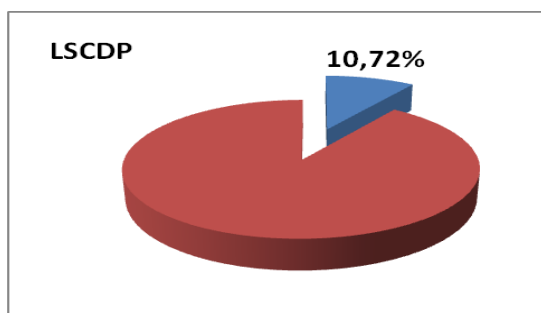
επίσης ότι οι συνθέσεις που περιέχουν σκωρία φαίνεται να έχουν πολύ μικρό ποσοστό κενών χώρων από τις υπόλοιπες συνθέσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως λόγω της ομοιομορφίας των αδρανών της σκωρίας (πιο σφαιρικά αδρανή) καθώς και της μεταξύ τους συμπύκνωσης το δίκτυο των πόρων είναι ναί μεν πιο μικρό σε διάμετρο όμως είναι εξίσου πυκνό σε όλη την επιφάνεια των δοκιμίων, γεγονός που επαληθεύεται και από τον υψηλό συντελεστή υδατοπερατότητας της συγκεκριμένης σύνθεσης.

Στον πίνακα 32 και στο διάγραμμα 27 που ακολουθούν φαίνονται οι μέσοι όροι που προέκυψαν για το πορώδες κάθε μίας από τις υπό μελέτη συνθέσεις.

Πίνακας 32. Μέσο Ποσοστό Πορώδους

% Κενοί Χώροι	
LP	22,39
SP	10,23
CDP	18,01
LSP	11,17
SCDP	9,21
LCDP	16,64
LSCDP	10,72





Διάγραμμα 27. Μέσο ποσοστό κενών χώρων συνθέσεων διαπερατού σκυροδέματος

Για την καλύτερη κατανόηση της εσωτερικής δομής των πόρων του διαπερατού σκυροδέματος κρίθηκε απαραίτητο να εξεταστεί και η κατανομή του πορώδους των διαπερατών σκυροδεμάτων κατά μήκος του δοκιμίου. Οι αξονικές λοιπόν τομές που λήφθηκαν για κάθε δοκίμιο χωρίστηκαν σε τρεις κατηγορίες: ανώτερο, μεσαίο και κατώτερο στρώμα. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα 33.

Πίνακας 33. Μέσο Πορώδες υπό μελέτη συνθέσεων ανά περιοχή.

	% Πορώδες (Ανώτερη Περιοχή)	% Πορώδες (Μέση Περιοχή)	% Πορώδες (Κατώτερη Περιοχή)
LP	24,79	22,39	19,98
SP	12,57	9,34	8,78
CDP	19,47	18,45	16,12
LSP	12,99	11,89	8,62
SCDP	10,12	9,12	8,4
LCDP	19,72	16,54	13,67
LSCDP	13,97	10,08	8,12

Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 32, το μέγεθος των αδρανών παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του πορώδους. Συγκεκριμένα στις συνθέσεις που χρησιμοποιούνται χονδρόκοκκα αδρανή το πορώδες εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές. Οι συνθέσεις με οικοδομικά απόβλητα και ασβεστολιθικά αδρανή παρουσιάζουν μεγαλύτερους πόρους, αλλά λόγω της έλλειψης ομοιομορφίας αυτών των αδρανών η μορφολογία των πόρων αυτών είναι ακανόνιστη. Όσον αφορά τη σύνθεση SP που περιέχει 100% σκωρία κάλυβα παρατηρούμε ότι εμφανίζει τις χαμηλότερες τιμές πορώδους, αυτό μπορεί να εξηγηθεί από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά καθώς και την κοκκομετρική κατανομή αυτών των αδρανών καθώς αυτά οδηγούν στη δημιουργία μιας πιο πυκνής δομής και βοηθούν την τιμμεντόπαστα να δέσει πιο εύκολα. Αντίθετα η χρήση χονδρόκοκκων αδρανών (για παράδειγμα οικοδομικά απόβλητα) δημιουργεί μια πιο πορώδη δομή στα εξεταζόμενα δοκίμια. Η εσωτερική δομή των δοκιμίων με οικοδομικά απόβλητα καθώς και με ασβεστολιθικά αδρανή αποτελείται από δαιδαλώδεις διαδρομούς στους οποίους βρίσκουν διέξοδο και αποστραγγίζονται τα όμβρια ύδατα.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 33 κατά τη μετακίνηση προς την κατώτερη επιφάνεια των δοκιμίων παρατηρείται γενικά μείωση του ποσοστού των κενών χώρων. Η παρατήρηση αυτή συνάδει απόλυτα με το γεγονός ότι κατά την σκυροδέτηση η τσιμεντόπαστα αλλά και, σε μικρότερο βαθμό, τα αδρανή κατακάθονται στην κατώτερη επιφάνεια μειώνοντας έτσι το πορώδες στις κατώτερες περιοχές των δοκιμίων. Αυτό συναρτάται και με τον τρόπο με τον οποίο τα δοκίμια συμπυκνώθηκαν. Η σωστή συμπύκνωση είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας και κατά την συγκριτική αξιολόγηση ο ανθρώπινος παράγοντας διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη σκυροδέτηση του πορώδους σκυροδέματος. Αν το διαπερατό σκυρόδεμα υπερσυμπυκνωθεί τότε η τσιμεντόπαστα κατακάθεται στη βάση των δοκιμίων με αποτέλεσμα να τα φράζει και το νερό της βροχής δεν βρίσκει δίοδο να αποστραγγιστεί. Αντίθετα αν το διαπερατό σκυρόδεμα δεν συμπυκνωθεί αρκετά τότε εμφανίζει χαμηλές αντοχές καθώς και αποκόλληση αδρανών από την επιφάνεια του. Γενικά όπως έχει προαναφερθεί η συμπύκνωση πρέπει να γίνεται βάσει των προδιαγραφών του ACI 522R-06.

Κεφάλαιο 9

Κεφάλαιο 9: ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Η μεγαλύτερη έκταση του κεφαλαίου τούτου αφορά στη μελέτη της ψύξης απόψυξης (§ 9.1), ενώ επίσης στην παράγραφο 9.2 αναφέρονται τα αποτελέσματα από την μελέτη της επίδρασης του θαλάσσιου περιβάλλοντος και στην § 9.3 αναφέρονται τα αποτελέσματα από την μελέτη της ανθεκτικότητας σε έντονες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Η μελέτη της ενανθράκωσης κρίθηκε σκόπιμο να αναφερθεί σε ξεχωριστό κεφάλαιο (Κεφάλαιο 10).

9.1 Μελέτη ψύξης-απόψυξης

Όπως προαναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 7, εξετάστηκαν επτά συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος και μία σύνθεση συμβατικού τύπου σκυροδέματος ισοδύναμων αντοχών.

Το έναυσμα για την μελέτη της παραμέτρου της ψύξης/απόψυξης αποτέλεσε η ίδια η δομή του διαπερατού σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, το υψηλό ενεργό πορώδες του μπορεί να εγκλωβίσει εσωτερικά ποσότητες νερού που κατά τις έντονες θερμοκρασιακές αλλαγές και κατά συνέπεια την θερμική διαστολή-συστολή του εγκλωβισμένου νερού, είναι πιθανό να προκαλέσουν την αποσάθρωση της δομής του. Όσον αφορά σε αυτήν την παράμετρο, οι συνθέσεις που περιείχαν εναλλακτικά αδρανή αναμένεται να παρουσιάσουν μία όχι και τόσο καλή συμπεριφορά όσο η σύνθεση με φυσικά ασβεστολιθικά αδρανή, και αυτό λόγω του ότι ήδη από βιβλιογραφικές μελέτες του φαινομένου της ψύξης/απόψυξης σε συμβατικού τύπου σκυροδέματα είχε αποδειχθεί ότι η χρήση παραπροϊόντων μειώνει την ανθεκτικότητά του σε ακραίες θερμοκρασιακές μεταβολές.

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°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 κορεστούν με 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.

Για κάθε ένα από τα επτά δείγματα ακολουθούν χαρακτηριστικές εικόνες της αρχικής μορφής τους (και στις δύο επιφάνειες τους), μιας ενδιάμεσης κατάστασης και της εικόνας που παρουσίαζαν μετά τον κρίσιμο κύκλο της κατάρρευσης (καταστροφής) τους. Ο κύκλος αυτός προφανώς είναι διαφορετικός για κάθε ένα από τα δεκαέξι δοκίμια.

Πορεία δοκιμίου LP1



Όψη

Επιφάνεια 1

Επιφάνεια 2

Εικόνα 26. 15^{ος} κύκλος ψύξης-απόψυξης LP1



Όψη Επιφάνεια 1 Επιφάνεια 2
 Εικόνα 30. 30^{ος} κύκλος ψύξης-απόψυξης LP2



Όψη Επιφάνεια 1 Επιφάνεια 2
 Εικόνα 31. 50^{ος} κύκλος ψύξης-απόψυξης LP2

Από τις παραπάνω φωτογραφίες παρατηρείται απομάκρυνση της τσιμεντόπαστας και κατ' επέκταση απογύμνωση μέρους των αδρανών στον 30ο κύκλο, ενώ εμφανής μείωση του ύψους και αποσάθρωση δοκιμίου μορφής D (D-cracking) δεν παρουσιάστηκε μέχρι τον 50ο κύκλο ψύξης/απόψυξης. Γενικά το δοκίμιο LP2 παρουσιάζει μια καλή συμπεριφορά τόσο στην απώλεια μάζας όσο και στην απώλεια ύψους.

Πορεία δοκιμίου SP1



Όψη Επιφάνεια 1 Επιφάνεια 2
 Εικόνα 32. 15^{ος} κύκλος ψύξης-απόψυξης SP1



Όψη

Επιφάνεια 1

Επιφάνεια 2

Εικόνα 36. 35^{ος} κύκλος ψύξης-απόψυξης SP2



Όψη

Εικόνα 37. 50^{ος} κύκλος ψύξης-απόψυξης SP2

Κατά τον οπτικό έλεγχο του δοκιμίου ισχύουν οι ίδιες παρατηρήσεις που προαναφέρθηκαν για το δοκίμιο SP1. Υπάρχει εμφανής μείωση του ύψους και αποσάθρωση δοκιμίου μορφής D (D-cracking) μετά τον 35ο κύκλο ψύξης/απόψυξης. Γενικά το δοκίμιο SP2 παρουσιάζει μια οριακά αποδεκτή συμπεριφορά τόσο στην απώλεια μάζας όσο και στην απώλεια ύψους.

Πορεία δοκιμίου CDP1



Όψη

Επιφάνεια 1

Επιφάνεια 2

Εικόνα 38. 15^{ος} κύκλος ψύξης-απόψυξης CDP1

ήταν η μείωση της προσροφητικής τους ικανότητας, η οποία συντέλεσε στην πρόωρη απομάκρυνση της τσιμεντόπαστας. Γενικά το δοκίμιο CDP1 παρουσιάζει μια οριακά επαρκή συμπεριφορά τόσο στην απώλεια μάζας όσο και στην απώλεια ύψους.

Πορεία δοκιμίου CDP2



Όψη

Επιφάνεια 1

Επιφάνεια 2

Εικόνα 42. 15^{ος} κύκλος ψύξης-απόψυξης CDP2



Όψη

Επιφάνεια 1

Επιφάνεια 2

Εικόνα 43. 25^{ος} κύκλος ψύξης-απόψυξης CDP2



Τελική αστοχία δοκιμίου

Εικόνα 44. 36^{ος} κύκλος ψύξης-απόψυξης CDP2

Από τις παραπάνω φωτογραφίες παρατηρείται μια μικρής τάξεως απομάκρυνση της τσιμεντόπαστας και κατ' επέκταση απογύμνωση της επιφάνειας μέρους των αδρανών από τον 15ο κύκλο, ενώ εμφανής μείωση του ύψους και αποσάθρωση δοκιμίου μορφής D (D-cracking) παρουσιάστηκε μετά τον 25ο κύκλο ψύξης/απόψυξης. Γενικά το δοκίμιο CDP2 παρουσιάζει μια οριακά επαρκή συμπεριφορά τόσο στην απώλεια μάζας όσο και στην απώλεια ύψους.

Από τις παραπάνω φωτογραφίες παρατηρείται εμφανής μείωση του ύψους και αποσάθρωση δοκιμίου μορφής D (D-cracking) παρουσιάστηκε μετά τον 25ο κύκλο ψύξης/απόψυξης. Γενικά το δοκίμιο LSP2 παρουσιάζει μια οριακά αποδεκτή συμπεριφορά τόσο στην απώλεια μάζας όσο και στην απώλεια ύψους.

Πορεία δοκιμίου SCDP1



Όψη Επιφάνεια 1 Επιφάνεια 2
Εικόνα 52. 15^{ος} κύκλος ψύξης-απόψυξης SCDP1



Όψη Επιφάνεια 1 Επιφάνεια 2
Εικόνα 53. 30^{ος} κύκλος ψύξης-απόψυξης SCDP1



Όψη Επιφάνεια 1 Επιφάνεια 2
Εικόνα 54. 40^{ος} κύκλος ψύξης-απόψυξης SCDP1



Τελική αστοχία δοκιμίου
Εικόνα 55. 44^{ος} κύκλος ψύξης-απόψυξης SCDP1



Όψη
Εικόνα 79. 35^{ος} κύκλος ψύξης-απόψυξης ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ1



Όψη
Εικόνα 80. 50^{ος} κύκλος ψύξης-απόψυξης ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ1

Βάσει των ανωτέρω παρατηρείται η απομάκρυνση της τσιμεντόπαστας μετά τον 25ο κύκλο, ενώ μείωση του ύψους και αποσάθρωση του δοκιμίου μορφής D (D-cracking) παρουσιάστηκε μετά τον 35ο κύκλο ψύξης/απόψυξης. Γενικά το δοκίμιο ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ1 παρουσιάζει μια καλή συμπεριφορά τόσο στην απώλεια μάζας όσο και στην απώλεια ύψους.

Πορεία δοκιμίου ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ2



Όψη
Εικόνα 81. 15^{ος} κύκλος ψύξης-απόψυξης ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ2



Όψη
Εικόνα 82. 20^{ος} κύκλος ψύξης-απόψυξης ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ2



Όψη
Επιφάνεια 1
Επιφάνεια 2
Εικόνα 83. 25^{ος} κύκλος ψύξης-απόψυξης ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ2

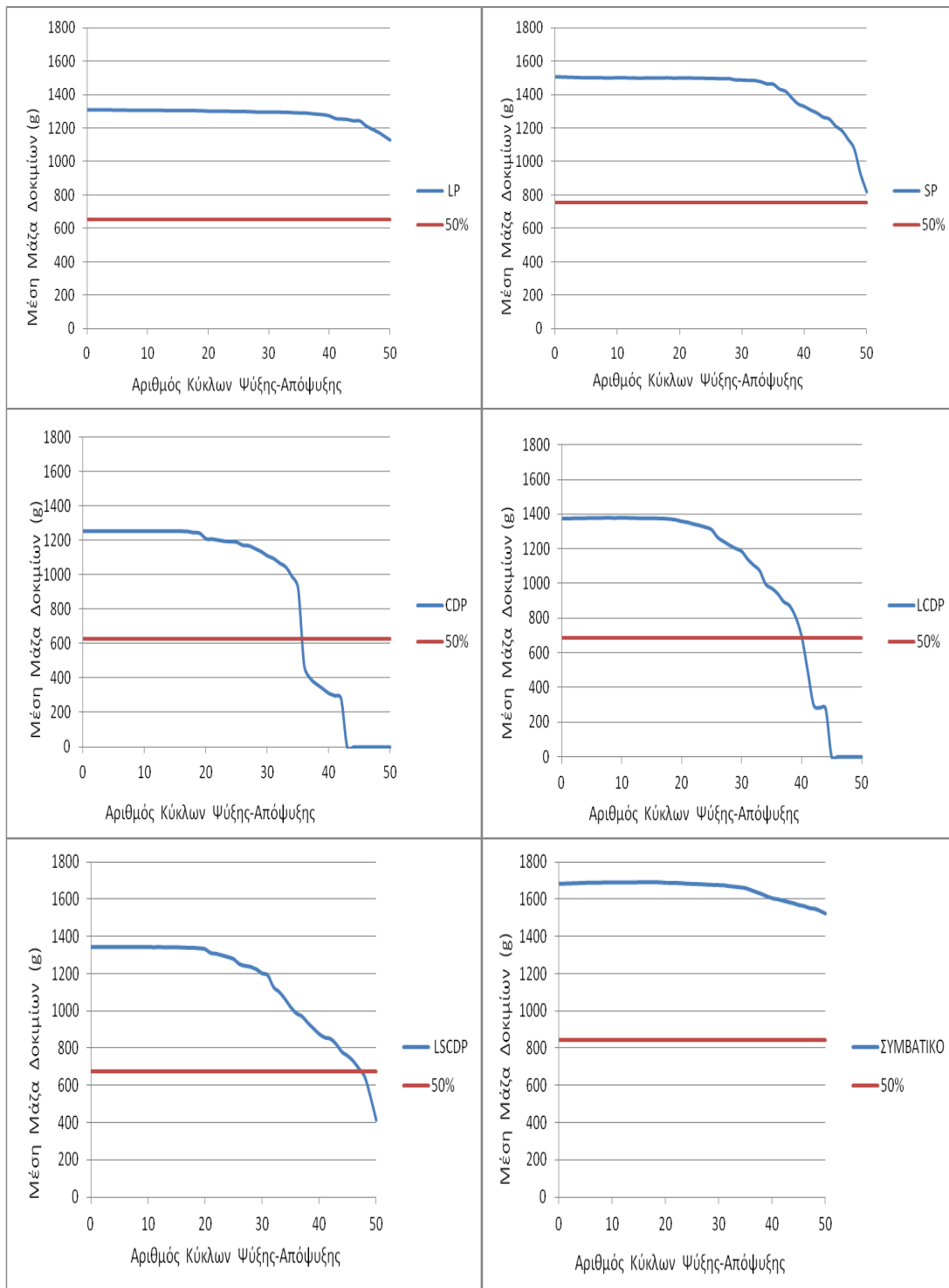


Όψη
Επιφάνεια 1
Επιφάνεια 2
Εικόνα 84. 50^{ος} κύκλος ψύξης-απόψυξης ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ2

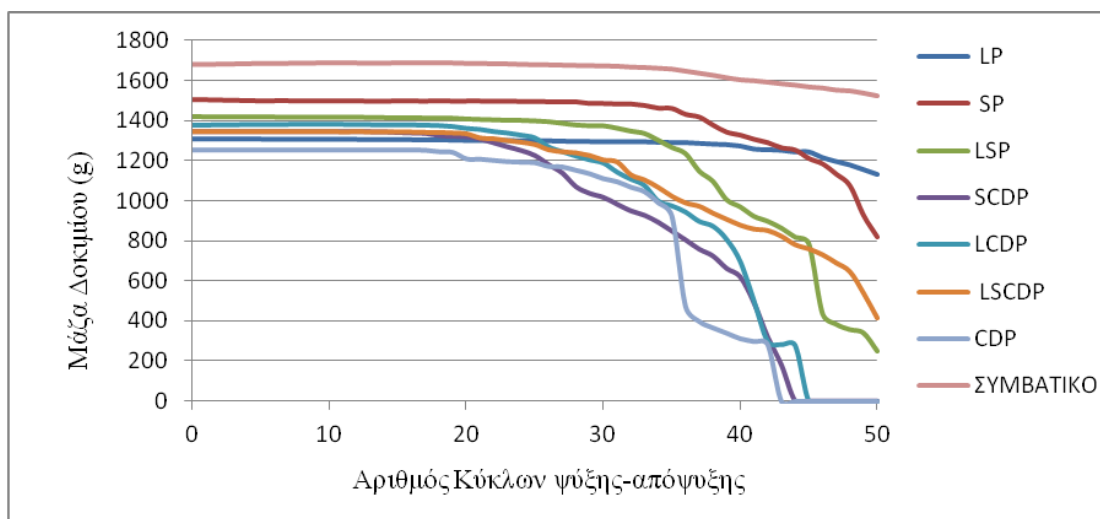
Από τις παραπάνω φωτογραφίες παρατηρείται η απομάκρυνση της τσιμεντόπαστας στον 20ο κύκλο, ενώ μείωση του ύψους και αποσάθρωση του δοκιμίου μορφής D (D-cracking) παρουσιάστηκε μετά τον 25ο κύκλο ψύξης/απόψυξης. Γενικά το δοκίμιο ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ2 παρουσιάζει μια καλή συμπεριφορά τόσο στην απώλεια μάζας όσο και στην απώλεια ύψους.

Μετρήσεις-Αποτελέσματα

Οι μετρήσεις απώλειας μάζας συγκεντρωτικά παρουσιάζονται στα διαγράμματα 28-29. Συγκεκριμένα στο διάγραμμα 28 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 διάγραμμα 29 παρουσιάζεται συγκεντρωτικά η πορεία της % μεταβολής της μάζας όλων των συνθέσεων.



Διάγραμμα 28. Απεικόνιση της μείωσης της μάζας του δοκιμίου κατά την πορεία της ψύξης-απόψυξης.



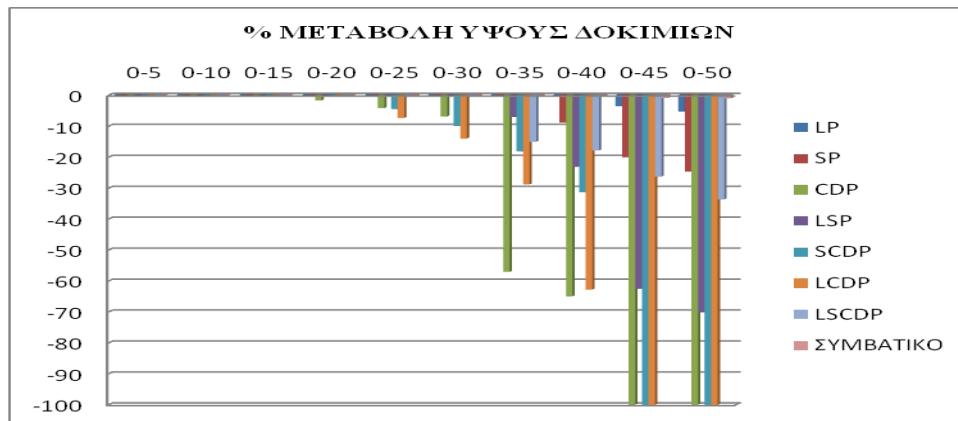
Διάγραμμα 29. Συγκεντρωτικό Διαγράμμα της συμπεριφοράς των διαφορετικών συνθέσεων σε συνθήκες ψύξης-απόψυξης.

Ακολουθεί ο πίνακας 34 που κατατάσει τις συνθέσεις κατά αύξουσα-καλύτερη συμπεριφορά των δοκιμίων λαμβάνοντας ως κριτήριο την απώλεια του 50% της μάζας τους.

Πίνακας 34. 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
ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ	>50

Παρατίθεται στο διάγραμμα 30 και η % μεταβολή του ύψους των υπό εξέταση δοκιμίων. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί πως υπάρχει μια σχετική ακρίβεια στις μετρήσεις ύψους των δοκιμίων καθώς οι τιμές επηρεάζονται από ενδεχόμενη αποκόλληση αδρανούς μικρότερων ή μεγαλύτερων διαστάσεων από την επιφάνεια των δοκιμίων.



Διάγραμμα 30. Ποσοστιαία Μεταβολή του ύψους 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^ο κύκλο οι συνθέσεις CDP και LCDP εμφανίζουν έντονη απώλεια ύψους. Ενώ στον 45^ο κύκλο παρατηρείται η αποσάθρωση των συνθέσεων CDP, LCDP και SCDP.

Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

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.

Συγκεκριμένα για την σύνθεση LP παρατηρήθηκε αύξηση της μάζας του κατά τη διάρκεια των 26 πρώτων κύκλων ψύξης/απόψυξης, γεγονός το οποίο δικαιολογείται από το φαινόμενο της απορρόφησης νερού τόσο από τη μάζα της τσιμεντόπαστας όσο και από τη μάζα των ασβεστολιθικών αδρανών (Richardson et al., 2010) [86].

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^ο 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 συνέχεις 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 (ποταμίσια 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.

9.2 Μελέτη επίδρασης «τεχνητού» θαλασσίου περιβάλλοντος

Προκειμένου να αξιολογηθεί η πιθανότητα χρήσης του διαπερατού σκυροδέματος σε παραθαλάσσιες περιοχές κρίθηκε αναγκαίο να μετρηθεί η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος στην επίδραση των χλωριόντων. Προς τούτο σκυροδετήθηκαν συνολικά 16 δοκίμια σκυροδέματος τα οποία εμβάπτιστηκαν σε “τεχνητό” θαλασσινό νερό (3,5% w/w NaCl). Συγκεκριμένα, σκυροδετήθηκαν 2 δοκίμια από καθεμία από τις επτά γνωστές συνθέσεις.

Η μελέτη έλαβε χώρα στο εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας της σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Αρχικά, καταγράφηκαν η αρχική μάζα του κάθε δοκιμίου πριν την έναρξη του χρόνου παραμονής στο διάλυμα NaCl. Στην συνέχεια τοποθετήθηκαν σε λεκάνες με νερό σε θερμοκρασία δωματίου όπου και παρέμειναν με σκοπό τον πλήρη κορεσμό τους για 2 μέρες. Ακολούθησε η αφαίρεση των δοκιμίων από τις λεκάνες και η καταγραφή των κορεσμένων μαζών των δοκιμίων. Αφού αφαιρέθηκαν ένα - ένα τα δοκίμια, αφέθηκαν σε σχάρα για να αποβάλλουν την περίσσεια του νερού για 40 sec (εικόνα 85) και στη συνέχεια τοποθετήθηκε το κάθε δοκίμιο πριν από την ζύγισή του σε απορροφητικό πανί έτσι ώστε να μην υπάρχουν οι παραμικρές απώλειες κατά τη μεταφορά του στον ζυγό. Στη συνέχεια, εμβάπτιστηκαν τα δοκίμια στο διάλυμα “τεχνητού” θαλασσινού νερού και καταγράφηκε η μέρα της εμβάπτισης ως η μέρα έναρξης του πειράματος. Οι μετρήσεις μάζας και ύψους πραγματοποιήθηκαν σε 3, 7, 28, και 90 μέρες από την μέρα εμβάπτισης. Παράλληλα, σταδιακά, πραγματοποιήθηκε και οπτικός έλεγχος για την παρατήρηση τυχόν αλλοίωσης της εξωτερικής επιφάνειας των δοκιμίων.



Εικόνα 85. Αποβολή περίσσειας νερού δοκιμίων

Στον πίνακα που ακολουθεί (πίνακας 35) παρουσιάζεται η ποσοστιαία μεταβολή της μάζας των υπό εξέταση συνθέσεων.

Πίνακας 35: Μέση ποσοστιαία μεταβολή μάζας συνθέσεων

Σύνθεση	%Δm			
	3 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες	90 ημέρες
LP	0,23%	0,32%	0,54%	0,65%
SP	0,29%	0,37%	0,41%	0,45%
CDP	0,23%	0,27%	0,48%	0,55%
LSP	0,16%	0,24%	0,34%	0,34%
SCDP	0,19%	0,19%	0,40%	0,49%
LCDP	0,23%	0,24%	0,34%	0,52%
LSCDP	0,06%	0,16%	0,17%	0,56%
ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ	0,13%	0,19%	0,30%	0,46%

Από τον οπτικό έλεγχο της εξωτερικής επιφάνειας των δοκιμίων δεν παρατηρήθηκε αλλοίωση αλλά ούτε και αποκόλληση αδρανούς. Ταυτόχρονα πρέπει να σημειωθεί πως τα συγκεκριμένα δοκίμια εξετάστηκαν ως προς την αντοχή τους σε θλίψη και οι μετρήσεις που ελήφθησαν δε διέφεραν από τις αντίστοιχες μετρήσεις που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 7.

Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Βάσει των προαναφερθεισών μετρήσεων παρατηρούμε ότι, καίτοι με την πάροδο του χρόνου υπάρχει μία αυξητική τάση, η συνολική ποσοστιαία μεταβολή της μάζας των εμβαπτισμένων δοκιμίων είναι πολύ μικρή και δεν ξεπερνά σε όλες τις περιπτώσεις το 0,65%. Δεν παρατηρείται λοιπόν κάποια σημαντική απώλεια της μάζας των δοκιμίων διαπερατού σκυροδέματος ή κάποια διόγκωση τους κατά την παραμονή τους σε περιβάλλον θαλασσινού νερού, και η συμπεριφορά τους είναι αντίστοιχη με αυτή του συμβατικού. Συμπερασματικά, δεν υπάρχουν ενδείξεις ότι το διαπερατό σκυρόδεμα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε παραθαλάσσιες περιοχές ως αποστραγγιστικό μέσο.

9.3 Μελέτη της ανθεκτικότητας σε έντονες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας-Επιταχυνόμενη Γήρανση

Με τον όρο γήρανση των υλικών νοούνται οι διάφορες μεταβολές που υφίστανται τα δομικά υλικά από την επίδραση περιβαλλοντικών παραγόντων και οι οποίες είναι ανεξάρτητες από τις μηχανικές καταπονήσεις που δέχονται. Οι παράγοντες οι οποίοι προκαλούν τη

γήρανση των υλικών είναι πολλοί όπως: η υγρασία, ο παγετός, οι έντονες θερμοκρασιακές μεταβολές, τα άλατα κ.α. Ο έλεγχος ως προς τη γήρανση των υλικών παρουσιάζει μεγάλες δυσχέρειες, οι οποίες οφείλονται κυρίως στη μεγάλη ποικιλία συνθηκών κάτω από τις οποίες είναι δυνατόν να βρεθούν τα υλικά και στο μεγάλο χρονικό διάστημα, το οποίο απαιτείται για την εκδήλωση της γήρανσης. Επειδή υπάρχουν σχεδόν αξεπέραστες δυσκολίες στην προσομοίωση του φυσικού περιβάλλοντος στις εργαστηριακές συνθήκες, οι δοκιμές γήρανσης για τα διάφορα υλικά δίνουν συγκριτικά αποτελέσματα. Οι εργαστηριακές μέθοδοι γήρανσης αναπαριστούν της πραγματικές συνθήκες σε έντονο ρυθμό με στόχο να αντισταθμιστεί το μεγάλο χρονικό διάστημα, το οποίο απαιτείται για τη γήρανση των υλικών στο φυσικό περιβάλλον. Οι σχετικοί έλεγχοι ονομάζονται «έλεγχοι επιταχυνόμενης γήρανσης». Οι έλεγχοι αυτοί ποικίλουν και περιλαμβάνουν δοκιμασίες έντονων θερμοκρασιακών μεταβολών και πιέσεων. Βάσει διαφόρων προηγούμενων ερευνών οι δοκιμασίες ποικίλουν τόσο ως προς τα θερμοκρασιακά εύρη (22-160°C), όσο και από τη διάρκεια του πειράματος (1 ώρα-180 μέρες) (87,88,89,90,91).

Με σκοπό τη μελέτη της ανθεκτικότητας του διαπερατού σκυροδέματος στην πάροδο του χρόνου, χρησιμοποιήθηκε αυτόκλειστο (εικόνα 86) που εξασφαλίζει ειδικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (πίεση 295 psi (20 atm) και θερμοκρασία 150 °C).



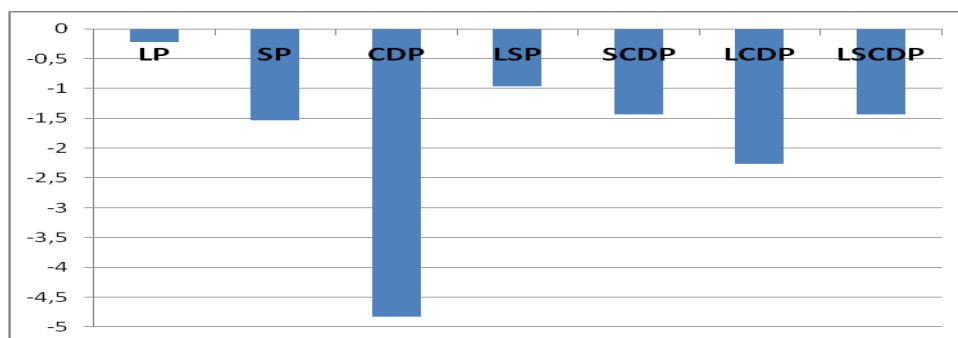
Εικόνα 86. Αυτόκλειστο

Τα δοκίμια των 7 συνθέσεων διαπερατού σκυροδέματος τοποθετήθηκαν στο αυτόκλειστο, στο οποίο επικρατούσαν οι έντονες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που προαναφέρθηκαν, για 3 ώρες. Κατόπιν αφαιρέθηκαν από το αυτόκλειστο και τοποθετήθηκαν σε ξηρό μέρος με θερμοκρασία δωματίου (25 °C) έως ότου κρυώσουν. Στη συνέχεια η % απώλεια μάζας

τους καθώς και η % απώλεια του ύψους τους μετρήθηκαν και παρουσιάζονται στους Πίνακες 36-37 και στα Διαγράμματα 31-32.

Πίνακας 36. % Απώλεια Μάζας των συνθέσεων διαπερατού σκυροδέματος

	LP	SP	CDP	LSP	SCDP	LCDP	LSCDP
% Απώλεια Μάζας	0,22	1,53	4,83	0,97	1,44	2,26	1,43

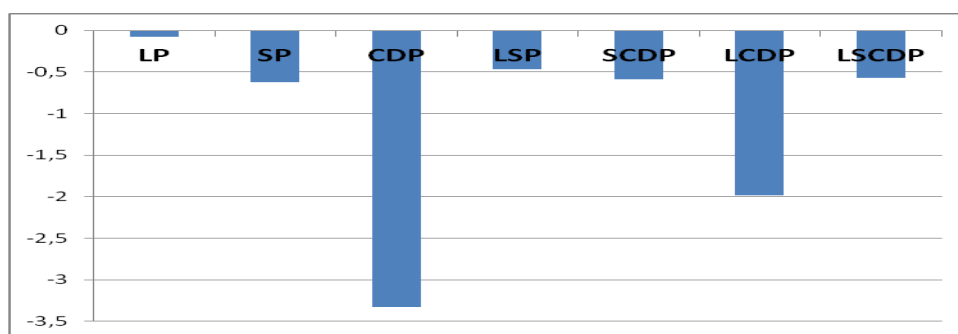


Διάγραμμα 31. % Μεταβολή Μάζας

Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάζει και η απώλεια ύψους στον Πίνακα 37 και Διάγραμμα 32.

Πίνακας 37. % Απώλεια Ύψους των συνθέσεων διαπερατού σκυροδέματος

	LP	SP	CDP	LSP	SCDP	LCDP	LSCDP
% Απώλεια Ύψους	0,08	0,62	3,33	0,47	0,59	1,98	0,57



Διάγραμμα 32. % Μεταβολή Ύψους

Ταυτόχρονα πρέπει να σημειωθεί πως τα συγκεκριμένα δοκίμια εξετάστηκαν ως προς την αντοχή τους σε θλίψη και οι μετρήσεις που ελήφθησαν δε διέφεραν από τις αντίστοιχες μετρήσεις που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 7.

Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα όλες οι συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος εμφανίζουν ικανοποιητική συμπεριφορά μετά την έκθεση

τους σε ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Αυτό αποτελεί έναν πολλά υποσχόμενο παράγοντα για την αντοχή και τη μακροχρόνια χρήση αυτού του τύπου σκυροδέματος. Τόσο τα ποσοστά απώλειας μάζας όσο και τα ποσοστά απώλειας ύψους είναι πολύ χαμηλά με τα μεν πρώτα να κινούνται κάτω από 5% ενώ τα δεύτερα κάτω από 3,5%. Τα δείγματα LP παρουσιάζουν την καλύτερη συμπεριφορά συγκριτικά με τις άλλες συνθέσεις. Παρατηρείται πως η ενσωμάτωση της σκωρίας και των οικοδομικών αποβλήτων στις συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος επηρεάζει τη συμπεριφορά τους. Αυτό αιτιολογείται από το υψηλό πορώδες αυτών των αδρανών υλικών καθώς και τον διαφορετικό τρόπο συμπύκνωσης τους. Λόγω των γεωμετρικών και μορφολογικών χαρακτηριστικών αυτών των αδρανών κατά την χύτευση των δοκιμίων δημιουργείται μια εσωτερική δομή με ανομοιομορφους πόρους καθώς και δαιδαλώδεις διαδρόμους. Επιπλέον και βάσει της παραγράφου 6,1 (ψύξη-απόψυξη) παρατηρήθηκε πως οι συνθέσεις διαπερατών σκυροδεμάτων με οικοδομικά απόβλητα παρουσιάζουν λιγότερη καλή συμπεριφορά σε ακραίες συνθήκες σε σχέση με την σύνθεση LP.

Κεφάλαιο 10

Κεφάλαιο 10: ΜΕΛΕΤΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ

Το έναυσμα για τη μελέτη του φαινομένου της ενανθράκωσης στις συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος ήταν η ίδια η φύση του υλικού καθώς παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον η εισχώρηση του CO₂ σε σκυροδέματα με υψηλό πορώδες και διαφορετική εσωτερική δομή. Εξάλλου επειδή το διαπερατό σκυρόδεμα είναι ένα άοπλο σκυρόδεμα η εξέλιξη του συγκεκριμένου φαινομένου δεν επηρεάζει την ανθεκτικότητά του, αντίθετα λόγω του σχηματισμού ενώσεων ανθρακικού ασβεστίου η ανθεκτικότητά των άοπλων σκυροδεμάτων σχετικά αυξάνεται.

Με σκοπό να ελεγχθεί η συμπεριφορά του διαπερατού σκυροδέματος στο φαινόμενο της ενανθράκωσης επιλέχθηκαν τρεις διαφορετικοί ως προς την συγκέντρωση του CO₂ χώροι στους οποίους τοποθετήθηκαν τα δοκίμια διαπερατού σκυροδέματος των τελικών συνθέσεων καθώς και της σύνθεσης συμβατικού τύπου σκυροδέματος ισοδύναμων αντοκών. Οι τρεις αυτοί χώροι παρουσιάζονται ακολούθως:

1. Το πρώτο σημείο αντιπροσώπευε τις περιοχές όπου παρατηρούνται χαμηλές συγκεντρώσεις CO₂ και ήταν στο Εργαστήριο Κονιαμάτων στην σχολή Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. (εικόνα 87), όπου επικρατούσαν συνθήκες δωματίου και ο χώρος ήταν ανεπηρέαστος από μηχανήματα εκπομπής CO₂.



Εικόνα 87. Εργαστήριο κονιαμάτων

2. Το δεύτερο σημείο αντιπροσώπευε τις μεσαίες/υψηλές εκπομπές CO₂ και ήταν σε υπόγειο χώρο στάθμευσης στην περιοχή Γουδή στην Αθήνα (Μ. Ασίας 70) (εικόνα 88). Όσον αφορά στο δεύτερο σημείο, αποφασίστηκε η τοποθέτηση των δοκιμών ως εξής: το ένα δοκίμιο κάθε υπό εξέταση σύνθεσης, τοποθετήθηκε στον πρώτο όροφο κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και το δεύτερο, δύο ορόφους κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Με αυτόν τον τρόπο και δεδομένου ότι όσο πιο κάτω είναι ο όροφος τόσο μεγαλύτερη αναμένεται η συγκέντρωση του CO₂ μελετήθηκε το φαινόμενο σε διαφορετικά επίπεδα σε ένα υπόγειο χώρο στάθμευσης.



Εικόνα 88. Δεύτερο επίπεδο υπόγειου χώρου στάθμευσης

3. Το τρίτο σημείο αφορούσε στη μελέτη των ακραίων-υψηλότερων συνθηκών συγκέντρωσης CO₂, και ήταν σε έναν θάλαμο ιδιοκατασκευής που τοποθετήθηκε στο εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π.. Ο θάλαμος κατασκευάστηκε ως εξής: σε ένα καλά μονωμένο για την αποφυγή διαρροών μεγάλο πλαστικό κουτί (εικόνα 89 (α)) δημιουργήθηκαν δύο οπές. Η μία αποτελούσε την είσοδο παροχής CO₂ από φιάλη υπό πίεση (εικόνα 89 (β)) ενώ η άλλη οπή αποτελούσε την εκτόνωση του αερίου μέσα από το κουτί. Με αυτόν τον τρόπο πραγματοποιήθηκε η πλήρωση του εσωτερικού χώρου του θαλάμου με CO₂ για μεγάλο χρονικό διάστημα.



(α)

(β)

Εικόνα 89 (α), (β). (α) Θάλαμος ιδιοκατασκευής υψηλών συγκεντρώσεων CO₂, (β) Οπή εισόδου CO₂.

Όπως προαναφέρθηκε, για την πραγματοποίηση της μελέτης της ανθεκτικότητας στην ενανθράκωση μελετήθηκαν οι 7 γνωστές συνθέσεις πορώδους σκυροδέματος και μία σύνθεση συμβατικού σκυροδέματος. Τα δοκίμια ήταν κυλινδρικής μορφής ύψους 100mm και διαμέτρου 100mm. Η κωδικοποίηση των δοκιμίων έγινε ως εξής: ο πρώτος όρος αναφέρεται στην τοποθεσία μελέτης (LA – Laboratory, L1 – Level 1 Parking, L2 – Level 2 Parking, και τέλος B – Box with CO₂). Ο δεύτερος όρος αναφέρεται στην μελετούμενη σύνθεση, ο τρίτος στον αύξοντα αριθμό του δοκιμίου, ενώ ο τελευταίος όρος αναφέρεται στον αριθμό των ημερών που συμπληρώθηκαν πριν την κοπή και τον χαρακτηρισμό των δοκιμίων. Για παράδειγμα, το δοκίμιο B-LP-90 αφορά στο δοκίμιο που μελετήθηκε για την σύνθεση LP το οποίο βρισκόταν στον θάλαμο και χαρακτηρίστηκε στις 90 μέρες.

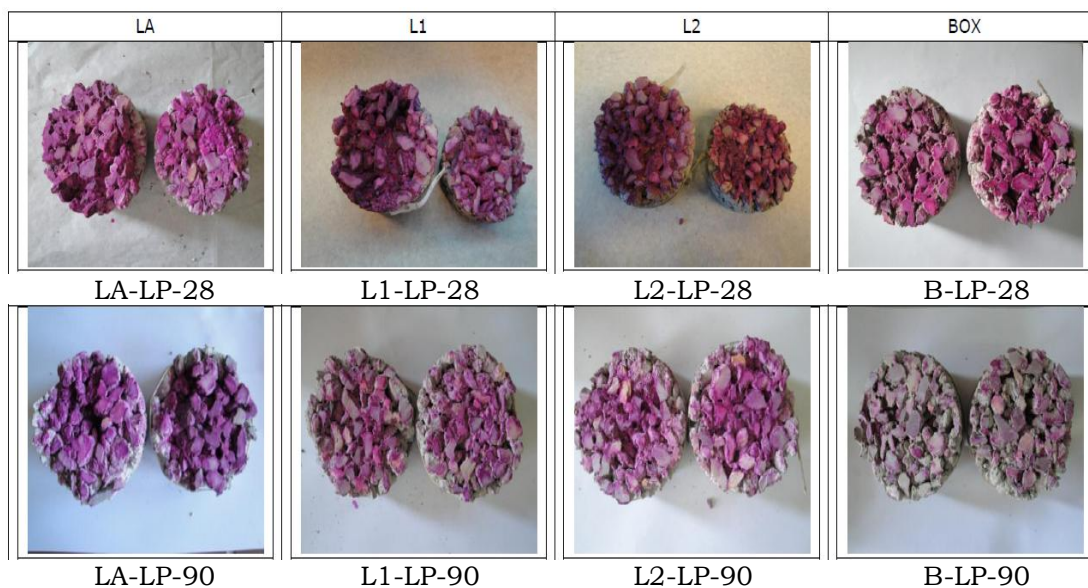
Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στα σημεία που αναφέρθηκαν (εργαστήριο, υπόγειος χώρος στάθμευσης, θάλαμος). Όταν συμπληρώθηκαν οι ηλικίες των 28 και 90 ημερών μεταφέρθηκαν στο Ε.Μ.Π. για τη μελέτη του φαινομένου της ενανθράκωσης. Κάθε δοκίμιο κόπηκε εγκάρσια με τη βοήθεια ηλεκτροκίνητου τροχού (εικόνα 90) και στην συνέχεια με τη χρήση του δείκτη φαινολοφθαλεΐνης προσδιορίστηκε το βάθος ενανθράκωσης. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Τάσιος, Αλιγιζάκη, Αθήνα 1993) [92] το βάθος ενανθράκωσης μετράται με επάλειψη δείκτη φαινολοφθαλεΐνη πάνω σε φρεσκοθραυσμένη επιφάνεια σκυροδέματος. Η φαινολοφθαλεΐνη είναι ένας δείκτης που χρωματίζεται με μωβ χρώμα σε αλκαλικό περιβάλλον ($pH > 9$), δηλαδή όταν έρθει σε επαφή με μη ενανθρακωμένο σκυρόδεμα, ενώ παραμένει γκρι η ενανθρακωμένη επιφάνεια. Τέλος φωτογραφήθηκαν τα δοκίμια για την οπτική απεικόνιση της ενανθράκωσης καθώς στα δοκίμια διαπερατού σκυροδέματος η αξιολόγηση του βάθους ενανθράκωσης δεν δύναται να πραγματοποιηθεί επιτυχώς με μέτρηση όπως στα συμβατικού τύπου σκυροδέματα.



Εικόνα 90. Ηλεκτροκίνητος τροχός

Παρακάτω παρουσιάζονται οι φωτογραφίες των δοκιμίων για την αξιολόγηση του φαινομένου της ενανθράκωσης.

Σύνθεση LP



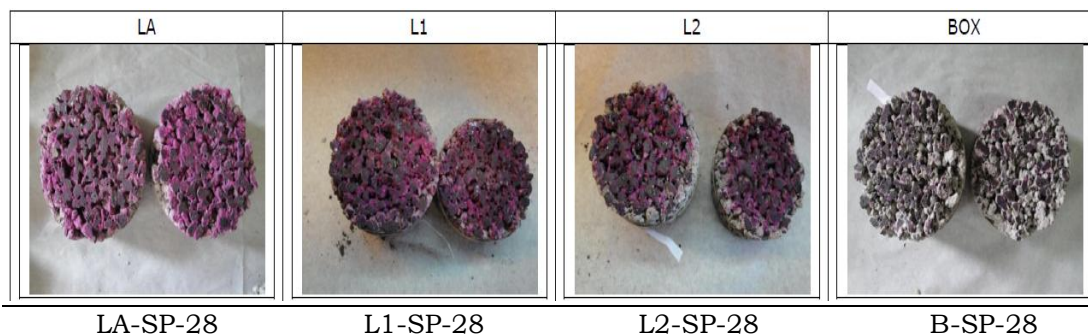
Εικόνα 91. Φωτογραφίες των τομών των δοκιμών της σύνθεσης LP για μελέτη του φαινομένου εναθράκωσης

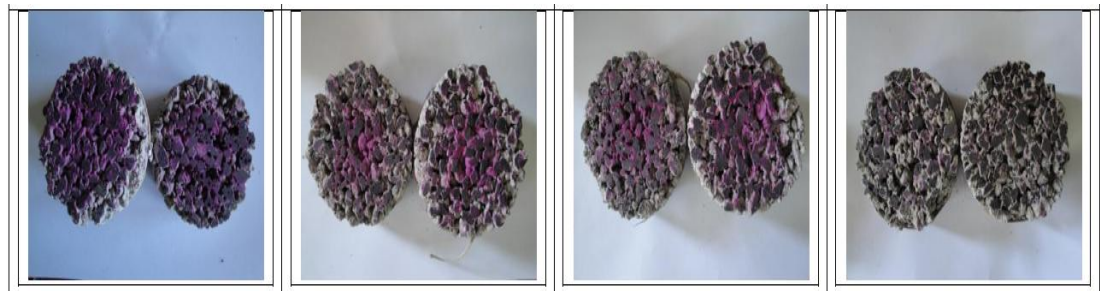
Σύνθεση LP

- 28 ημέρες: δεν παρατηρήθηκε το φαινόμενο της εναθράκωσης
- 90 ημέρες:
 - ✂ Εργαστήριο: μηδενική εναθράκωση
 - ✂ Υπόγειος χώρος στάθμευσης: μηδενική εναθράκωση
 - ✂ Θάλαμος: εμφανής εναθράκωση

Όλα τα δοκίμια πλην του B-LP-90 δεν έχουν εναθρακωθεί

Σύνθεση SP





LA-SP-90

L1-SP-90

L2-SP-90

B-SP-90

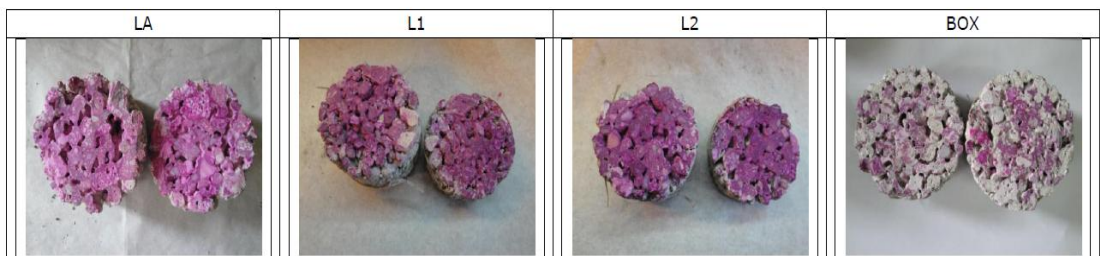
Εικόνα 92. Φωτογραφίες των τομών των δοκιμίων της σύνθεσης SP για μελέτη του φαινομένου ενανθράκωσης

Σύνθεση SP

- 28 ημέρες: δεν παρατηρήθηκε το φαινόμενο της ενανθράκωσης (εκτός από τον αυτοσχέδιο θάλαμο)
- 90 ημέρες:
 - ✘ Εργαστήριο: μηδενική ενανθράκωση
 - ✘ Υπόγειος χώρος στάθμευσης: παρόμοιες εικόνες στους δύο ορόφους, το CO₂ έχει αρχίσει και εισχωρεί στο εσωτερικό του δοκιμίου (δημιουργία δακτυλίου)
 - ✘ Θάλαμος: πλήρης ενανθράκωση

Όλα τα δοκίμια πλην των B-SP-28, B-SP-90, L1-SP-90, L2-SP-90 δεν έχουν εμφανή σημάδια ενανθράκωσης.

Σύνθεση CDP



LA-CDP-28

L1-CDP-28

L2-CDP-28

B-CDP-28



LA-CDP-90

L1-CDP-90

L2-CDP-90

B-CDP-90

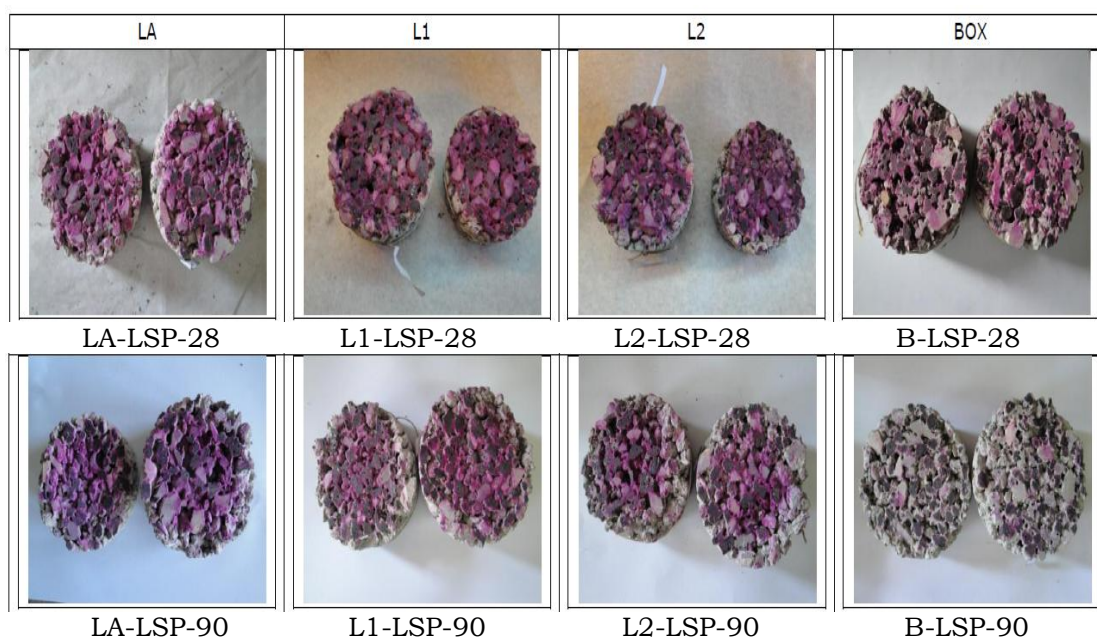
Εικόνα 93. Φωτογραφίες των τομών των δοκιμίων της σύνθεσης CDP για μελέτη του φαινομένου ενανθράκωσης

Σύνθεση CDP

- 28 ημέρες:
 - ✗ δεν παρατηρήθηκε το φαινόμενο της ενανθράκωσης (εκτός από τον αυτοσχέδιο θάλαμο)
- 90 ημέρες:
 - ✗ Εργαστήριο: μηδενική ενανθράκωση
 - ✗ Υπόγειος χώρος στάθμευσης: παρόμοιες εικόνες στους δύο ορόφους, δεν υπάρχουν έντονα σημάδια ενανθράκωσης
 - ✗ Θάλαμος: έντονη ενανθράκωση

Όλα τα δοκίμια πλην των B-CDP-28, B-CDP-90 δεν έχουν έντονα σημάδια ενανθράκωσης.

Σύνθεση LSP



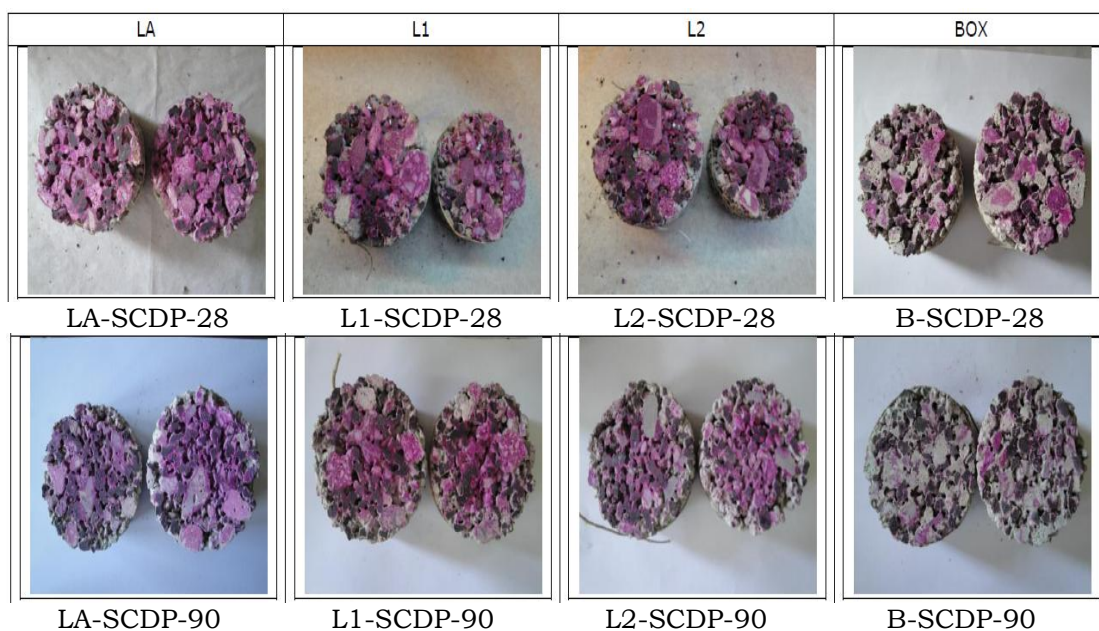
Εικόνα 94. Φωτογραφίες των τομών των δοκιμίων της σύνθεσης LSP για μελέτη του φαινομένου ενανθράκωσης

Σύνθεση LSP

- 28 ημέρες: δεν παρατηρήθηκε το φαινόμενο της ενανθράκωσης
- 90 ημέρες:
 - ✗ Εργαστήριο: μηδενική ενανθράκωση
 - ✗ Υπόγειος χώρος στάθμευσης: εντονότερη ενανθράκωση στον δεύτερο όροφο, μηδενική ενανθράκωση στον πρώτο όροφο
 - ✗ Θάλαμος: πλήρης ενανθράκωση

Όλα τα δοκίμια πλην του B-LSP-90 δεν έχουν έντονα σημάδια ενανθράκωσης.

Σύνθεση SCDP



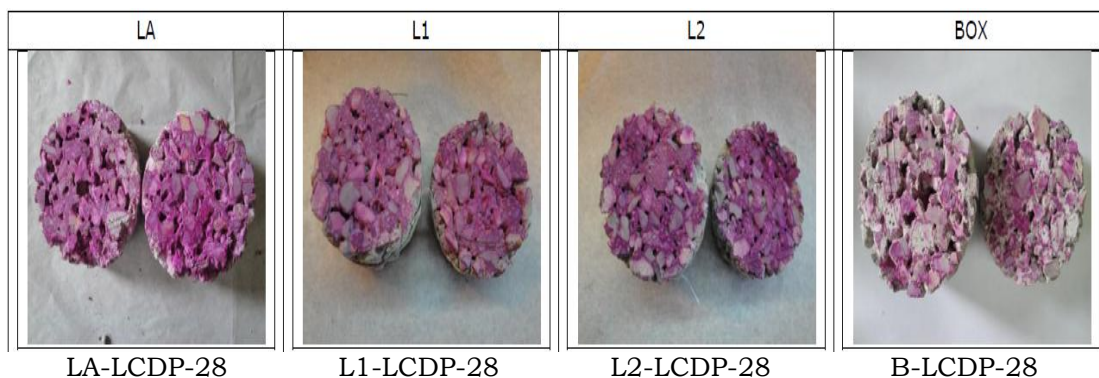
Εικόνα 95. Φωτογραφίες των τομών των δοκιμίων της σύνθεσης SCDP για μελέτη του φαινομένου ενανθράκωσης

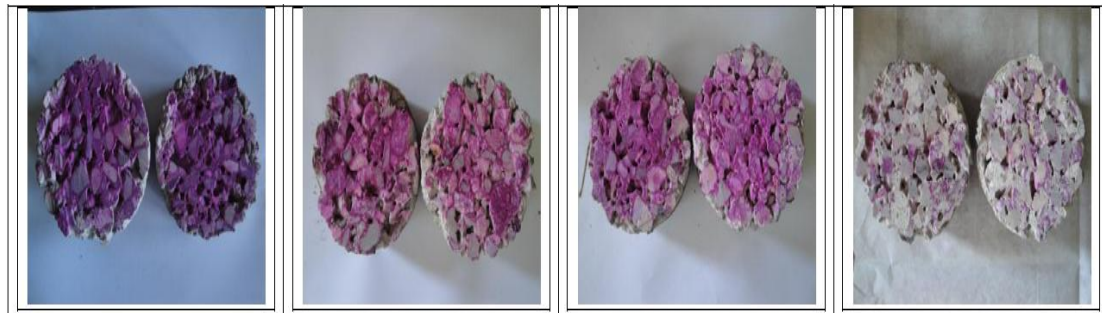
Σύνθεση SCDP

- 28 ημέρες:
 - ✗ δεν παρατηρήθηκε το φαινόμενο της ενανθράκωσης (εκτός από τον αυτοσχέδιο θάλαμο)
- 90 ημέρες:
 - ✗ Εργαστήριο: μηδενική ενανθράκωση
 - ✗ Υπόγειος χώρος στάθμευσης: παρόμοιες εικόνες στους δύο ορόφους, δεν υπάρχουν έντονα σημάδια ενανθράκωσης
 - ✗ Θάλαμος: πλήρης ενανθράκωση

Όλα τα δοκίμια πλην των B-SCDP-28, B-SCDP-90 δεν έχουν έντονα σημάδια ενανθράκωσης.

Σύνθεση LCDP





LA-LCPD-90

L1-LCPD-90

L2-LCPD-90

B-LCPD-90

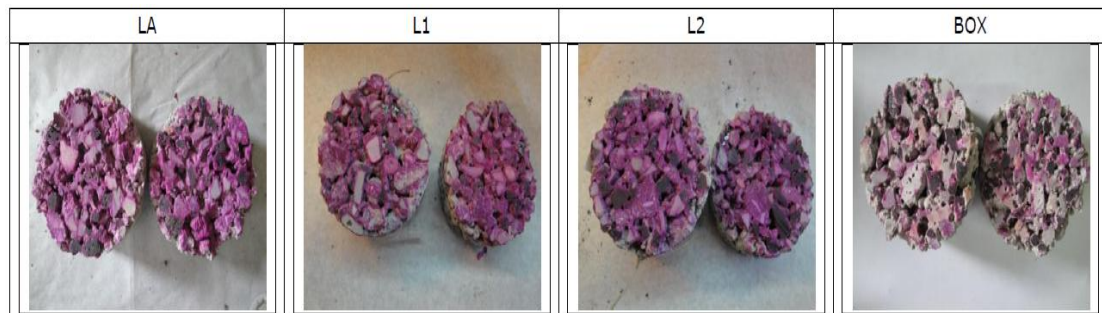
Εικόνα 96. Φωτογραφίες των τομών των δοκιμίων της σύνθεσης LCPD για μελέτη του φαινομένου ενανθράκωσης

Σύνθεση LCPD

- 28 ημέρες:
 - ✗ δεν παρατηρήθηκε το φαινόμενο της ενανθράκωσης (εκτός από τον αυτοσχέδιο θάλαμο)
- 90 ημέρες:
 - ✗ Εργαστήριο: μηδενική ενανθράκωση
 - ✗ Υπόγειος χώρος στάθμευσης: παρόμοιες εικόνες στους δύο ορόφους, δεν υπάρχουν έντονα σημάδια ενανθράκωσης
 - ✗ Θάλαμος: πλήρης ενανθράκωση

Όλα τα δοκίμια πλην των B-LCPD-28, B-LCPD-90 δεν έχουν έντονα σημάδια ενανθράκωσης.

Σύνθεση LSCDP

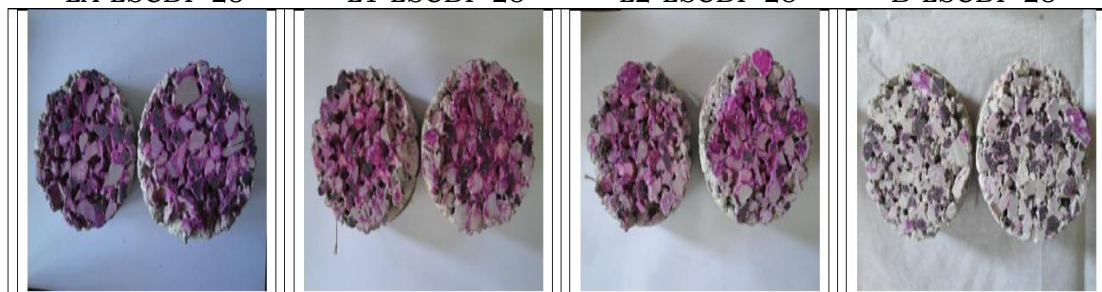


LA-LSCDP-28

L1-LSCDP-28

L2-LSCDP-28

B-LSCDP-28



LA-LSCDP-90

L1-LSCDP-90

L2-LSCDP-90

B-LSCDP-90

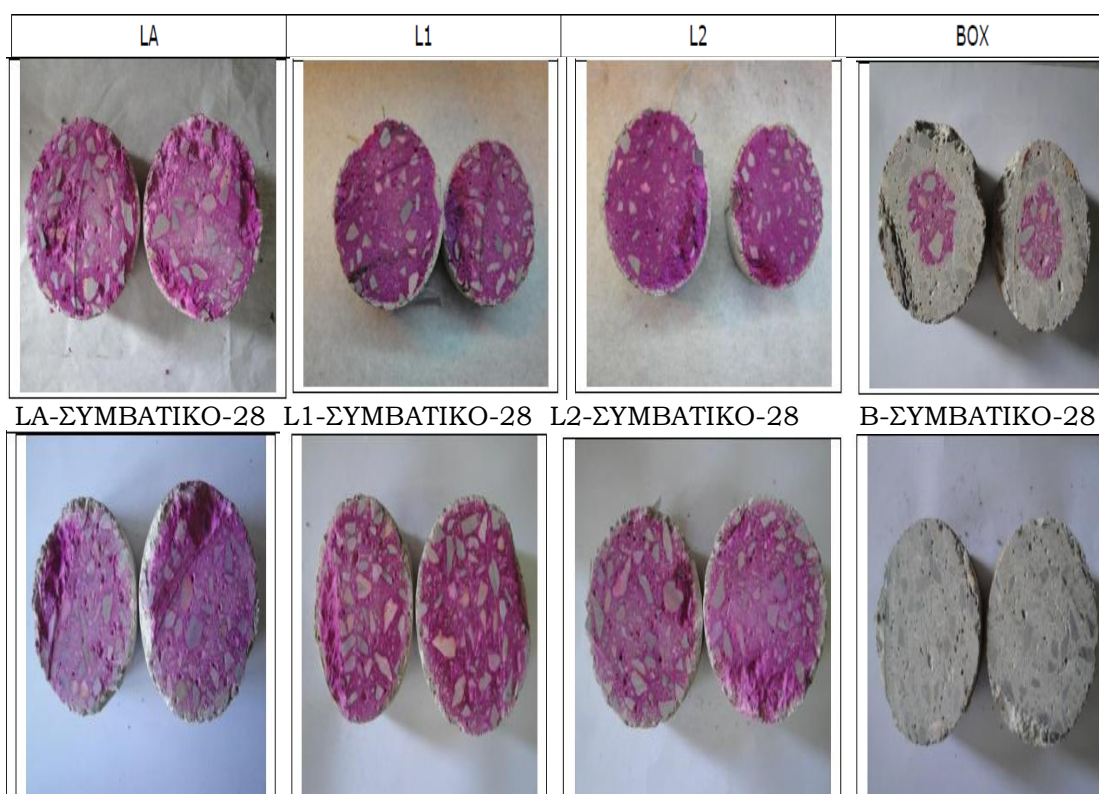
Εικόνα 97. Φωτογραφίες των τομών των δοκιμίων της σύνθεσης LSCDP για μελέτη του φαινομένου ενανθράκωσης

Σύνθεση LSCDP

- 28 ημέρες:
 - ✗ δεν παρατηρήθηκε το φαινόμενο της ενανθράκωσης (εκτός από τον αυτοσχέδιο θάλαμο)
- 90 ημέρες:
 - ✗ Εργαστήριο: μηδενική ενανθράκωση
 - ✗ Υπόγειος χώρος στάθμευσης: μηδενική ενανθράκωση
 - ✗ Θάλαμος: εμφανής ενανθράκωση

Όλα τα δοκίμια πλην του B-LSCDP-90 δεν έχουν ενανθρακωθεί.

Σύνθεση συμβατικού τύπου σκυροδέματος



Εικόνα 98. Φωτογραφίες των τομών των δοκιμίων της σύνθεσης συμβατικού τύπου σκυροδέματος για μελέτη του φαινομένου ενανθράκωσης

Πίνακας 38. Βάθος ενανθράκωσης συμβατικού σκυροδέματος

Βάθος Ενανθράκωσης (mm)	LA	L1	L2	BOX
28 ημέρες	0,38	2,80	3,68	24,2
90 ημέρες	2,11	3,05	3,70	50,0

Σύνθεση Συμβατικού Τύπου Σκυροδέματος

- 28 ημέρες:
 - ✗ δεν παρατηρήθηκε το φαινόμενο της ενανθράκωσης (εκτός από τον θάλαμο με την εμφάνιση δακτυλίου)

- ✎ 90 ημέρες:
- ✎ Εργαστήριο: μηδενική ενανθράκωση
- ✎ Υπόγειος χώρος στάθμευσης: παρόμοιες εικόνες στους δύο ορόφους, το CO₂ έχει αρχίσει και εισχωρεί στο εσωτερικό του δοκιμίου. Ο πίνακας 38 παρουσιάζει το βάθος ενανθράκωσης στο συμβατικό σκυρόδεμα. Φαίνεται ότι στο δεύτερο επίπεδο του υπόγειου υπόγειος χώρος στάθμευσης το φαινόμενο της ενανθράκωσης είναι εντονότερο σε σχέση με το πρώτο επίπεδο.
- ✎ Θάλαμος: πλήρης ενανθράκωση σε όλη την τομή

Όλα τα δοκίμια πλην των Β-ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ-28, Β-ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ-90, L1-ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ-90, L2-ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ-90 δεν έχουν εμφανή σημάδια ενανθράκωσης.

Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Όπως προαναφέρθηκε το βάθος ενανθράκωσης προσδιορίζεται με την χρήση δείκτη φαινολοφθαλεΐνης, όπου οι ενανθρακωμένες επιφάνειες μέσω της οπτικής παρατήρησης παρουσιάζουν γκρι χρώμα. Είναι γνωστό ότι η πρόοδος της ενανθράκωσης εμφανίζεται με τον βαθμιαίο αποχρωματισμό των δοκιμίων (από μωβ σε γκρι).

1. Στο συμβατικό σκυρόδεμα το βάθος ενανθράκωσης επηρεάζεται τόσο από το χρονικό διάστημα έκθεσης στο CO₂ όσο και από την συγκέντρωση του CO₂ στον περιβάλλοντα χώρο.

2. Τα δοκίμια συμβατικού σκυροδέματος που τοποθετήθηκαν σε δύο διαφορετικά επίπεδα του υπόγειου χώρου στάθμευσης είχαν διαφορετικό βάθος ενανθράκωσης. Συγκεκριμένα, το δοκίμιο που βρισκόταν ένα επίπεδο κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ενανθρακώθηκε λιγότερο από το δοκίμιο που βρισκόταν δύο επίπεδα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Αυτό οφείλεται στο ειδικό βάρος του CO₂. Το ειδικό βάρος του CO₂ είναι μεγαλύτερο από το ειδικό βάρος του αέρα με αποτέλεσμα το CO₂ να τείνει να καταλαμβάνει τα χαμηλότερα στρώματα. Έτσι, το δοκίμιο που βρισκόταν δύο επίπεδα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους βρισκόταν σε περιβάλλον με μεγαλύτερες συγκεντρώσεις CO₂.

3. Δεν μπορεί να διασαφηνιστεί με ακρίβεια μέσω οπτικής παρακολούθησης η έκταση του φαινομένου της ενανθράκωσης της τσιμεντόπαστας στα διαπερατά σκυροδέματα, καθώς η μάζα της καλύπτει επιφανειακά τα αδρανή. Έτσι, η μέγιστη ενανθράκωση της τσιμεντόπαστας αφορά στα λίγα χιλιοστά της επικάλυψης των αδρανών.

4. Στις συνθέσεις του διαπερατού σκυροδέματος που μελετήθηκαν το μέγεθος των αδρανών είναι αυτό που καθορίζει το βάθος της ενανθράκωσης (οπτική παρακολούθηση). Συγκεκριμένα, τα αδρανή με το μικρότερο μέγεθος και κατ' επέκταση μεγαλύτερη επιφάνεια ανά μονάδα όγκου επικαλύπτονται με μεγαλύτερη ποσότητα τσιμεντόπαστας. Καθώς το φαινόμενο της ενανθράκωσης είναι ένα φαινόμενο που αφορά

την τσιμεντόπαστα, δοκίμια με λεπτόκοκκα αδρανή αποκτούν μεγαλύτερα βάθη ενανθράκωσης με την πάροδο του χρόνου αλλά και από την έκθεσή τους σε υψηλές συγκεντρώσεις CO₂. Αντίθετα, τα χονδρόκοκκα αδρανή όπως τα ασβεστολιθικά ή τα οικοδομικά απόβλητα επικαλύπτονται με μικρότερη ποσότητα τσιμεντόπαστας ανά μονάδα όγκου και έτσι το φαινόμενο της ενανθράκωσης δεν είναι τόσο ευδιάκριτο.

5. Όσον αφορά τις μεικτές συνθέσεις (τρεις διμερείς και μία τριμερή), η ενανθράκωση επηρεάζεται από τα αδρανή όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Συνθέσεις που περιέχουν τόσο λεπτόκοκκα όσο και χονδρόκοκκα αδρανή επηρεάζονται από την διάταξη των αδρανών στον όγκο του δοκιμίου και την αναλογική κάλυψή τους από την τσιμεντόπαστα. Όπως προαναφέρθηκε, συνθέσεις με χονδρόκοκκα αδρανή όπως τα ασβεστολιθικά ή τα οικοδομικά απόβλητα εμφανίζουν μικρότερη έκταση του φαινομένου της ενανθράκωσης λόγω μικρότερης ποσότητας τσιμεντόπαστας στην επιφάνεια τους σε σχέση με τις συνθέσεις που έχουν λεπτόκοκκα αδρανή (μεγέθους γαρμπιλιού) όπως την σκωρία χάλυβα.

Κεφάλαιο 11

Κεφάλαιο 11: ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΤΑΚΡΑΤΗΣΗΣ ΡΥΠΩΝ (ΑΝΟΡΓΑΝΩΝ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ)

Στο συγκεκριμένο Κεφάλαιο εξετάζεται η ικανότητα του διαπερατού σκυροδέματος στην κατακράτηση ρύπων τόσο ανόργανων (νιτρικά και θειικά ιόντα) όσο και οργανικών. Δεδομένης της συμπεριφοράς αυτού του τύπου σκυροδέματος δημιουργείται η ανάγκη για τον συστηματικό έλεγχο της κατακράτησης αντιπροσωπευτικών ρύπων που παρασύρονται από τα όμβρια ύδατα με τελικό στόχο την, κατά το δυνατόν, αποφυγή της κατάληξης τους στον υδροφόρο ορίζοντα.

11.1 Έλεγχος κατακράτησης ανόργανών ρύπων

11.1.1 Έλεγχος κατακράτησης θεικών ιόντων

Στόχος της διαδικασίας που ακολουθήθηκε είναι η μελέτη της κατακράτησης θεικών ιόντων από το διαπερατό σκυρόδεμα. Λόγω της ρύπανσης της ατμόσφαιρας κυρίως στις αστικές περιοχές είναι πιθανή η εμφάνιση φαινομένων όξινης βροχής που αυξάνουν τον κίνδυνο μόλυνσης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Λαμβάνοντας υπόψη τη λειτουργία του διαπερατού σκυροδέματος, κρίνεται αναγκαία η αξιολόγηση της δράσης του συγκεκριμένου τύπου ως προς την κατακράτηση ρύπων που παρασύρονται από το νερό της βροχής.

Για την διεξαγωγή της συγκεκριμένης μελέτης παρασκευάστηκαν διαλύματα H_2SO_4 , διαφορετικών συγκεντρώσεων (0.01 M, 0.1 M, 1M), τα οποία διήλθαν από κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων 300mm (ύψος) x 150mm (διάμετρος), συγκεκριμένων συνθέσεων χρησιμοποιώντας την συσκευή υδατοπερατότητας (εικόνα 17 Κεφάλαιο 6).

Για την διεξαγωγή της συγκεκριμένης μέτρησης κάθε δοκίμιο περιβάλλεται από ειδικά διαμορφωμένα περιβλήματα κατασκευασμένα από καουτσούκ ώστε να εφαρμόζει υδατοστεγώς στο κάτω τμήμα κυλίνδρου κατασκευασμένου από plexiglass. Ο κύλινδρος μαζί με το

δοκίμιο τοποθετείται στη βάση της συσκευής υδατοπερατότητας. Αφού επιβεβαιωθεί ότι η βάνα στο κάτω τμήμα της συσκευής είναι κλειστή, προστίθεται το διάλυμα θειικού οξέος και μετά την ολοκλήρωση της προσθήκης ανοιγόνταν η βάνα ώστε το διάλυμα περνώντας από το δοκίμιο να καταλήξει στο δοχείο συλλογής. Το διήθημα συλλέγεται και οδηγείται προς ανάλυση της περιεκτικότητάς του σε θειικά ιόντα (βάσει του προτύπου ASTM D516-68 (1974)).

Στον πίνακα που ακολουθεί και στον οποίο ακολουθείται η κωδικοποίηση των κεφαλαίων 6 και 7, γίνεται συγκεντρωτική απεικόνιση των συνθέσεων που χρησιμοποιήθηκαν και των συγκεντρώσεων H₂SO₄ που διηθήθηκε σε κάθε μία από αυτές. Ας σημειωθεί ότι μετά τους προκαταρκτικούς ελέγχους που πραγματοποιηθήκαν παρατηρήθηκε πως οι υπό μελέτη συνθέσεις δεν μπορούν να κατακρατήσουν θειικά ιόντα. Με σκοπό λοιπόν να αυξηθεί η πιθανότητα κατακράτησης των συγκεκριμένων ιόντων επιλέχθησαν υψηλές συγκεντρώσεις (0,01 M, 0,1 M όπως και 1 M) παρόλο που είναι πολύ υψηλότερες από αυτές που μπορούν να βρεθούν στη φύση (πχ σε περιπτώσεις όξινης βροχής).

Πίνακας 39. Συνθέσεις που μελετήθηκαν για κατακράτηση θεικών ιόντων και συγκεντρώσεις διαλυμάτων H₂SO₄

Σύνθεση	Περιεκτικότητα Διαλύματος H ₂ SO ₄		
	1 M	0,1 M	0,01 M
1607-30	√		
1607-31			√
LP			√
SP			√
CDP			√
LSP			√
LCDP			√
SCDP			√
LSCDP			√
1607-29		√	
1607-27		√	

Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D516-68 (1974) η τελική περιεκτικότητα του διαλύματος σε θειικά εκφραζόμενη σε ppm (mg/L) δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$c = \Delta m * 1000 * (96/233) * 20$$

Οι συγκεντρώσεις των διαλυμάτων θειικού οξέος που επιλέχθηκαν για τη διεξαγωγή των πειραμάτων αντιπροσωπεύουν, την ακραία περίπτωση (περίπου 1M), επί παραδείγματι την απώλεια υγρών μπαταρίας αυτοκινήτου σε χώρο στάθμευσης διαστρωμένο με διαπερατό σκυρόδεμα, μια ενδιάμεση περίπτωση (περίπου 0,1M) και μια περίπτωση προσβολής από μικρής συγκέντρωσης διάλυμα (περίπου 0,01M) το οποίο έχει αρκετά πυκνότερη σύσταση από αυτή της όξινης βροχής. Πρέπει να σημειωθεί πως κατά την διέλευση του διαλύματος 1M παρατηρήθηκε σχετική διάλυση της τσιμεντόπαστας των δοκιμίων καθώς το διήθημα που παραλήφθηκε δεν ήταν διαυγές όπως τα διηθήματα των άλλων περιπτώσεων, γι'αυτό άλλωστε και η συγκεκριμένη συγκέντρωση διαλύματος απορρίφθηκε.

Τα αποτελέσματα που παρελήφθησαν μετά τη διαδικασία μέτρησης φαίνονται συγκεντρωτικά στον πίνακα που ακολουθεί. Οι αρνητικές τιμές σημαίνουν κατακράτηση ενώ οι θετικές ότι έχει αυξηθεί η συγκέντρωση του διηθήματος.

Πίνακας 40. Κατακράτηση θειικών ιόντων

Σύνθεση	mg θειικών ιόντων που κατακρατήθηκαν/kg σκυροδέματος
1607-30	9,62
1607-31	19,47
LP	-4,37
SP	-5,21
CDP	-2,37
LSP	-1,19
LCDP	-3,70
SCDP	-5,23
LSCDP	-3,97
1607-29	-0,64
1607-27	-6,95

Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Όπως φαίνεται στον πίνακα 40, δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα σχετικά με την κατακράτηση των θειικών ιόντων από τις συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος που μελετήθηκαν διότι τόσο η περίπτωση στην οποία φαίνεται μείωση στην περιεκτικότητα σε θειικά όσο και η περίπτωση που παρουσιάζεται αύξηση, είναι της τάξεως που εμπίπτει στο σφάλμα της διαδικασίας της μέτρησης.

11.1.2 Έλεγχος κατακράτησης νιτρικών ιόντων

Για τη διεξαγωγή του πειράματος επιλέχθηκε η παρασκευή διαλυμάτων νιτρικού οξέος διαφόρων συγκεντρώσεων (0.01 M, 0.1 M, 1M), τα οποία διήλθαν από συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος με χρήση της συσκευής υδατοπερατότητας ακολουθώντας την ίδια διαδικασία όπως

περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα (έλεγχος κατακράτησης θεικών ιόντων). Τα διηθήματα που συλλέχθηκαν οδηγήθηκαν προς ανάλυση της περιεκτικότητάς τους σε νιτρικά ιόντα.

Η μέτρηση νιτρικών ιόντων από τα διηθήματα που συλλέγονται γίνεται σε φασματοφωτόμετρο και με αυτό τον τρόπο αξιολογείται εάν είναι δυνατό τα δοκίμια να κατακρατούν ποσοστό των ιόντων αυτών.

Το φασματοφωτόμετρο που χρησιμοποιήθηκε είναι τύπου DR/2010 της εταιρείας Hach και είναι απλής δέσμης.



Εικόνα 99. Συσκευή HACH DR 2010

Πριν την επιλογή της συγκέντρωσης του διαλύματος νιτρικού οξέος που θα χρησιμοποιείτο για την τελική μελέτη, έγιναν προκαταρκτικές διελεύσεις διαλυμάτων διαφόρων συγκεντρώσεων από δοκίμια σκυροδέματος διαφόρων συνθέσεων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν διαλύματα συγκεντρώσεων όπως παρουσιάζονται παρακάτω. Οι κωδικοί των συνθέσεων που παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες υπάρχουν στα κεφάλαια 6 και 7.

Πίνακας 41. Συνθέσεις που μελετήθηκαν για κατακράτηση NO_x και συγκεντρώσεις διαλυμάτων νιτρικού οξέος.

Σύνθεση	Περιεκτικότητα Διαλύματος Νιτρικού Οξέος		
	1 M	0,1 M	0,01 M
1607-23			✓
1607-27			✓
1607-24		✓	
1607-25		✓	
1607-26	✓		
1607-28	✓		
1607-30			✓
1607-31			✓
1607-29		✓	
1607-27		✓	

Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι από τα δοκίμια δύο συνθέσεων έγινε διέλευση διαλύματος δύο φορές. Τα πρώτα διηθήματα από τις συνθέσεις 1607-27 και 1607-29 οδηγήθηκαν για δεύτερη διέλευση ώστε να δοθεί

μια ένδειξη για τη περιεκτικότητα του διηθήματος σε νιτρικά που προέρχεται από επανάληψη διέλευσης. Ακολουθώντας, τα δύο παραπάνω δοκίμια υποβλήθηκαν σε έκπλυση με απιονισμένο νερό ώστε να μελετηθεί η τάση συγκράτησης ή μη, νιτρικών ιόντων από τα υπό εξέταση δοκίμια. Για τη μελέτη της κατακράτησης νιτρικών ιόντων από τις τελικές συνθέσεις επιλέχθηκε να διέλθει από αυτές διάλυμα νιτρικού οξέος συγκέντρωσης 0,1 M. Οι λόγοι που οδήγησαν στην επιλογή της συγκεκριμένης συγκέντρωσης θα αναλυθούν στην επόμενη παράγραφο.

Από τις προκαταρκτικές μετρήσεις συμπεραίνεται ότι γενικά επικρατεί η τάση να συγκρατεί το διαπερατό σκυρόδεμα τα νιτρικά ιόντα, έναν ανόργανο ρύπο που παρασυρόμενος από το νερό της βροχής δύναται να φτάσει στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα προκαλώντας μόλυνση των υδάτων. Το ποσοστό κατακράτησης, κυμαίνεται ανάλογα με τη σύσταση της χρησιμοποιούμενης σύνθεσης. Για πολύ μικρές συγκεντρώσεις νιτρικού οξέος, της τάξεως του 0,01M τα αποτελέσματα δείχνουν μικρή αύξηση που εμπίπτει όμως στα όρια του πειραματικού σφάλματος.

Όπως προαναφέρθηκε, από τα δοκίμια των συνθέσεων με κωδικούς 1607-27 και 1607-29 έγινε εκ νέου διήθηση του πρώτου διηθήματος που παραλήφθηκε. Μετά από τη δεύτερη διέλευση δεν παρατηρήθηκε εκ νέου μείωση της περιεκτικότητας του πρώτου διηθήματος σε νιτρικά ιόντα. Οι διαφορές που προέκυψαν για τα δύο αυτά δείγματα εμπίπτουν στο σφάλμα της μέτρησης (πίνακας 42). Από τα δοκίμια των τελικών συνθέσεων επιλέχθηκε να γίνει διήθηση διαλύματος νιτρικού οξέος συγκεντρώσεως 0,1 M. Οι προκαταρκτικές μετρήσεις με τη διήθηση διαλυμάτων συγκεντρώσεων 1M έδειξαν ότι συγκεντρώσεις αυτής της τάξεως προκαλούν σχετική διάλυση της τσιμεντόπαστας. Στους πίνακες 42 και 43 που ακολουθούν φαίνονται τα αποτελέσματα της κατακράτησης νιτρικών ιόντων ανά μελετώμενη σύνθεση μετά από διήθηση του επιλεγμένου διαλύματος νιτρικού οξέος.

Πίνακας 42. Κατακράτηση νιτρικών ιόντων

Σύνθεση	mg νιτρικών ιόντων που κατακρατήθηκαν/kg σκυροδέματος
1607-23	-3,69
1607-27	-5,23
1607-24	-43
1607-25	-77,72
1607-26	-843,76
1607-28	-590,51
1607-30	1,96
1607-31	1,72
1607-27 1η Διήθηση	-64,09
1607-27 2η Διήθηση	-23,90
1607-29 1η Διήθηση	-104,68
1607-29 2η Διήθηση	57,49

Πίνακας 43. Κατακράτηση νιτρικών ιόντων από τις τελικές συνθέσεις

Σύνθεση	mg νιτρικών ιόντων που κατακρατήθηκαν/kg σκυροδέματος
LP	-116,41
SP	-127,65
CDP	-193,38
LSP	-78,55
LCDP	-160,37
SCDP	-180,36
LSCDP	-165,97

Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Η κατακράτηση νιτρικών ιόντων γίνεται με φυσική ή χημική προσρόφηση. Στην περίπτωση της φυσικής προσρόφησης, βασικός μηχανισμός είναι η ανάπτυξη των δυνάμεων διασποράς μεταξύ των NO_x και του υποστρώματος. Λόγω του αρνητικού τους φορτίου, τα NO₃ δύνανται με ηλεκτροστατικής φύσης δυνάμεις να κατακρατηθούν στην επιφάνεια του σκυροδέματος ή ακόμη καλύτερα και εντός των πόρων αυτού. Η φυσική αυτή προσρόφηση, δεν περιλαμβάνει μεταφορά ηλεκτρονίων ούτε διάσπαση των προσροφημένων ουσιών. Στην περίπτωση χημικής κατακράτησης δύναται να σχηματιστεί κάποιο νιτρικό άλας από την αντίδραση του νιτρικού οξέος με τα συστατικά του σκυροδέματος. Όπως όμως είναι γνωστό, τα νιτρικά άλατα, που θα προκύψουν, είναι ευδιάλυτα στο νερό και έτσι θα παρασυρθούν στο διήθημα. Από τα παραπάνω συνάγεται ότι δεν είναι εφικτός ο καθορισμός με βεβαιότητα του μηχανισμού κατακράτησης. Το ποσοστό των νιτρικών ιόντων που απομειώθηκε σε επαφή με το δοκίμιο μπορεί να έχει υποστεί και τους δύο μηχανισμούς.

Μετά το πέρας των παραπάνω δοκιμών ακολούθησε έκπλυση με απιονισμένο νερό των προσβεβλημένων με νιτρικό οξύ δοκιμίων των συνθέσεων CDP και LCPD και βρέθηκε ότι μια πολύ μικρή ποσότητα νιτρικών ιόντων εκπλένεται από αυτά. Η συμπεριφορά του διαπερατού σκυροδέματος σε πολλαπλές εκπλύσεις αποτελεί ένα αρκετά ενδιαφέρον αντικείμενο για τη διερεύνηση των χρονικών ορίων που απαιτούνται για τον κορεσμό του σε ρυπαντές και προτείνεται ως μελλοντική έρευνα.

11.1.3 Επίδραση διερχόμενων Όξινων Ρύπων στην Ανθεκτικότητα του Διαπερατού Σκυροδέματος – Λοιπά Παρασυρόμενα Βαρέα Μέταλλα.

Τα διηθήματα που παρελήφθησαν από τη διέλευση διαλυμάτων θεικών και νιτρικών ιόντων από τα δοκίμια των υπό μελέτη συνθέσεων πορώδους σκυροδέματος, υποβλήθηκαν σε ανάλυση με φασματομετρία ατομικής απορρόφησης για την εξακρίβωση της ποσότητας μετάλλων που

παρασύρθηκαν από το υλικό στο διήθημα. Κάθε διήθημα εξετάστηκε για περιεκτικότητα σε Σίδηρο (Fe), Μαγγάνιο (Mn), Ασβέστιο (Ca), Νικέλιο (Ni), Χρώμιο (Cr) και Ψευδάργυρο (Zn).

Η σημασία της παραπάνω διερεύνησης είναι διττή. Αφενός, μελετήθηκε η πιθανότητα διάβρωσης του διαπερατού σκυροδέματος μετά από διέλευση από τη μάζα του ακραίων συγκεντρώσεων όξινων διαλυμάτων και αφετέρου έγινε προσπάθεια καθορισμού της ποσότητας μετάλλων που παρασυρόμενα από τα όξινα διαλύματα θα μπορούσαν να καταλήξουν στα υπόγεια ύδατα.

Συνολικά, επιλέχθηκε να μετρηθούν με φασματομετρία ατομικής απορρόφησης πέντε διηθήματα από συνθέσεις με ποσοστά σκωρίας και ασβεστολιθικών αδρανών από τα οποία είχε διέλθει διάλυμα θειικού οξέος και έξι διηθήματα με ποσοστά σκωρίας, ασβεστολιθικών αδρανών και οικοδομικών αποβλήτων από τα οποία είχαν διέλθει διαλύματα νιτρικού οξέος.

Από την πειραματική διαδικασία της μέτρησης μετάλλων στα επιλεγμένα διηθήματα της παραπάνω παραγράφου εξήχθησαν τα ακόλουθα αποτελέσματα.

Πίνακας 44. Μέτρηση μετάλλων με φασματομετρία ατομικής απορρόφησης

Σύνθεση	Περιεκτικότητα σε Μέταλλα					
	Fe (mg/L)	Ca (mg/L)	Mn (mg/L)	Ni (mg/L)	Zn (mg/L)	Cr (mg/L)
blank	0,02	0,33	0,01	0,05	0	0,02
SP1 (θειικά)	1,28	912	0,08	0,12	2,00	0,07
LSP (θειικά)	1,63	617	0,04	0,53	3,5	0,05
SCDP(θειικά)	1,75	681	0,03	0,26	1,00	0,03
SP2(θειικά)	1,67	619	0,03	0,43	1,50	0,02
LSCDP(θειικά)	2,05	2255	0,03	0,55	2,50	0,01
LSCDP(νιτρικά)	1,38	540	0,04	0,53	0,30	<0,02
SP (νιτρικά)	1,30	545	0,04	14,25	5,50	<0,02
CDP (νιτρικά)	1,06	3280	0,3	0,73	14,00	0,09
SCDP1 (νιτρικά)	9,72	3425	0,3	0,67	8,50	0,11
SCDP2 (νιτρικά)	12	2660	0,24	0,87	19,50	0,09
LSCDP2(νιτρικά)	11,77	1040	0,18	1,05	16,00	0,07

Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Αν και οι ποσότητες των παρασυρόμενων μετάλλων σιδήρου και ασβεστίου φαίνονται σημαντικές, εντούτοις, δε μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα ότι υπάρχει αποσάθρωση- διάβρωση του υπό μελέτη πορώδους σκυροδέματος λόγω της διέλευσης από τον όγκο του όξινων διαλυμάτων.

Παράλληλα πρέπει να σημειωθεί πως σε όλα τα δοκίμια στα οποία διηθήθηκαν τα διαλύματα οξέων οδηγήθηκαν μετά την ξήρανση τους σε μέτρηση αντοχών και δεν παρατηρήθηκε ουσιαστική μεταβολή σε σχέση με τα αποτελέσματα αντοχών που έδωσαν δοκίμια blank αυτών των συνθέσεων. Γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα πως η διήθηση όξινων

διαλυμάτων δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις αντοχές αυτού του τύπου σκυροδέματος.

11.2 Έλεγχος Κατακράτησης Οργανικών Ρύπων

Μετά τη μελέτη κατακράτησης ανόργανων ρυπαντών από το διαπερατό σκυρόδεμα ακολούθησε η διερεύνηση της κατακράτησης οργανικών ρύπων, συγκεκριμένα λάδι μηχανής και diesel κίνησης. Η διάσπρωση διαπερατού σκυροδέματος σε χώρους στάθμευσης, πρατήρια υγρών καυσίμων, στα ρείθρα εθνικών οδών και γενικά σε σημεία όπου υπάρχει συχνή διέλευση οχημάτων καθιστά τη μελέτη κατακράτησης οργανικών ρύπων πολύ σημαντική αφού η πιθανότητα εμφάνισης τέτοιου τύπου ρυπαντών στους χώρους αυτούς είναι μεγάλη.

Ενδεικτική παράμετρος για τη μελέτη κατακράτησης οργανικών ρύπων είναι ο Ολικός Οργανικός Άνθρακας (Total Organic Carbon – TOC) που συνιστά την άμεση μέτρηση του συνολικού οργανικού άνθρακα που περιέχεται στα ύδατα και τα απόβλητα, ανεξάρτητα από το είδος αυτών των ενώσεων. Ως εκ τούτου παρέχει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα και το επίπεδο ρύπανσης των υδάτων από την παρουσία οργανικών καταλοίπων.

Για τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας παρασκευάστηκαν από τις μελετώμενες συνθέσεις κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων 100mm (διάμετρος) επί 100mm (ύψος) και χρησιμοποιήθηκαν δύο δοκίμια ανά σύνθεση από τα οποία διήλθαν οργανικοί ρύποι διαφορετικού ιξώδους όπως είναι το χρησιμοποιημένο λιπαντικό μηχανής καθώς και το diesel κίνησης. Πραγματοποιήθηκε δοκιμές με διέλευση των υλικών αυτών με σκοπό την προσομοίωση πραγματικών συνθηκών απώλειας λαδιών και diesel κίνησης από όχημα σε χώρο διαστρωμένο με διαπερατό σκυρόδεμα. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των υπό εξέταση οργανικών καταλοίπων (λιπαντικά και diesel) που προέκυψαν κατά την ανάλυση αυτών.

Πίνακας 45. Τεχνικά χαρακτηριστικά των υπό εξέταση οργανικών καταλοίπων

ΤΥΠΟΣ ΥΓΡΟΥ	ΙΞΩΔΕΣ (40°C) (cSt)	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (15°C) (g/cm³)	ΔΕΙΚΤΗΣ ΙΞΩΔΟΥΣ
Χρησιμοποιημένο λιπαντικό μηχανής (Elf evolution SXR 5W/30)	61.21	0,875	144
Diesel Κίνησης	3.06	0,845	-

Οι ποσότητες λιπαντικού μηχανής και diesel κίνησης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 25ml ανά δοκίμιο. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 100).



Εικόνα 100. Πειραματική διάταξη για τη διέλευση οργανικών ρυπαντών.

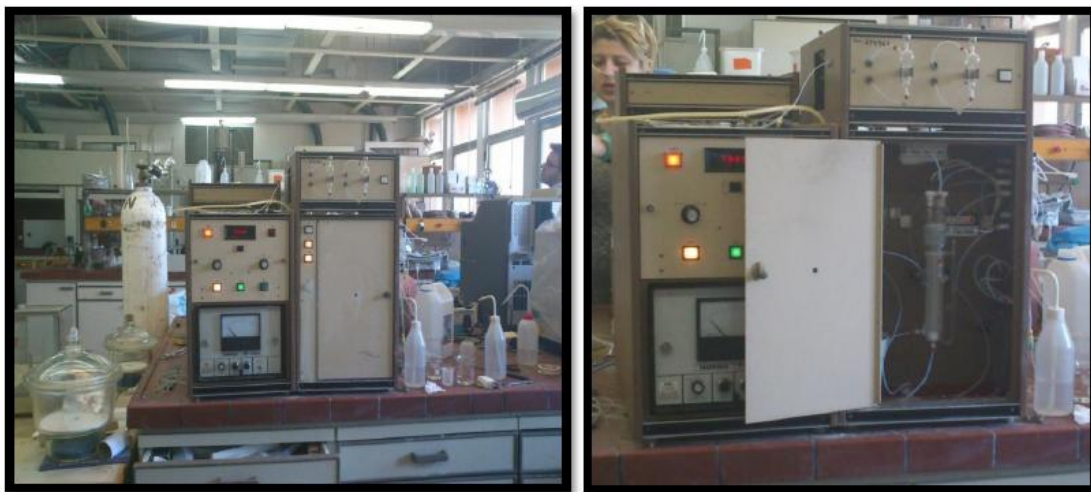
Αρχικά μετρήθηκαν οι μάζες των υπό εξέταση δοκιμίων. Μετά την έναρξη της απόχυσης λιπαντικού/diesel στην πάνω επιφάνεια κάθε δοκιμίου ακολουθούσε αναμονή περίπου 5 ωρών χρόνος που κρίθηκε ως επαρκής για την διέλευση της ποσότητας των οργανικών καταλοίπων καθώς μετά το πέρας αυτού του χρόνου παρατηρήθηκε ότι έπαυε η εκροή λιπαντικού/diesel από τη βάση του. Η λήξη της διαδικασίας γινόταν μία ώρα μετά την τελευταία σταγόνα από τη βάση του δοκιμίου. Κατόπιν τα δοκίμια ζυγίζονταν εκ νέου για να διαπιστωθεί η ποσότητα των οργανικών καταλοίπων που παρέμειναν «εγκλωβισμένα» εσωτερικά στη δομή του διαπερατού σκυροδέματος.

Έπειτα, ακολούθησε διέλευση επαρκούς ποσότητας απιονισμένου νερού (στην συγκεκριμένη περίπτωση 75mL) από κάθε δοκίμιο με σκοπό να εκπλυθεί η ποσότητα οργανικών ρύπων που είχε εγκλωβιστεί στο δοκίμιο. Το διηθήμα συλλέχθηκε και ογκομετρήθηκε. Επίσης, επιλέχθηκαν δύο από τις συνολικά 7 μελετώμενες συνθέσεις – πιο συγκεκριμένα εκείνες που παρουσίασαν μεγαλύτερη κατακράτηση λιπαντικού μηχανής ή diesel κίνησης – και υποβλήθηκαν σε δύο ακόμα διελεύσεις 75mL απιονισμένου νερού από τη μάζα τους. Τα διηθήματα που συλλέχθηκαν, χωρίστηκαν σε τρία τμήματα και υποβλήθηκαν σε έλεγχο ολικού οργανικού άνθρακα TOC (*Total Organic Carbon*) με εφαρμογή τριών διαδικασιών. Τα πρώτο τμήμα, υποβλήθηκε σε φυγοκέντρηση για επίτευξη διαχωρισμού φάσεων νερού και οργανικού ρύπου. Στο δεύτερο τμήμα, έγινε εφαρμογή της διαδικασίας προσδιορισμού λιπών με εκχύλιση εξανίου. Στα διηθήματα του τμήματος αυτού προστέθηκε ποσότητα 450mL εξανίου και έγινε έντονη ανάδευση για 2 λεπτά. Ακολούθησε, επίτευξη κορεσμού του εξανίου σε λίπη (έλαια) και αφού έγινε διαχωρισμός των φάσεων, η ποσότητα κορεσμένου σε έλαια εξανίου οδηγήθηκε σε ξηραμένη και προζυγισμένη φιάλη περιστροφικού εξατμιστήρα (rotary evaporator) προς εξάτμιση. Μετά την

εξάτμιση του εξανίου η φιάλη ξηράνθηκε σε πυριατήριο για 24 ώρες. Η ποσότητα λιπαντικού που παραλήφθηκε υπολογίστηκε από την σχέση:

$$\text{g Λιπών/L} = [(\text{Φιάλη Μετά} - \text{Φιάλη Πριν}) * 1000] / \text{mL Δείγματος}$$

Τα διηθήματα του τρίτου τμήματος, οδηγήθηκαν προς έλεγχο TOC με χρήση της συσκευής DOHRMANN CARBON ANALYSER (εικόνα 101 (α), (β)) του εργαστηρίου Οργανικής Χημικής Τεχνολογίας της Σχολής Χημικών Μηχανικών.



Εικόνα 101 (α), (β). Συσκευή μέτρησης TOC.

Αποτελέσματα ελέγχου κατακράτησης οργανικών ρύπων

Όπως προαναφέρθηκε, κάθε δοκίμιο ανάλογα με τη σύνθεση του συμπεριφέρεται διαφορετικά όσον αφορά στην κατακράτηση ποσοτήτων του υπό διήθηση υγρού. Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται οι ποσότητες χρησιμοποιημένου λιπαντικού μηχανής και diesel κίνησης που κατακρατήθηκαν από κάθε μια από τις μελετώμενες συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος. Είναι επίσης αναγκαίο να σημειωθεί, ότι κατά την παραμονή των δοκιμίων σε κατάσταση αδράνειας μετά το πέρας της πειραματικής διαδικασίας και για περίπου 20 ημέρες παρατηρήθηκε μικρή απώλεια λιπαντικού από τη βάση τους η οποία ήταν ίση με 1,35g για τα δοκίμια από τα οποία είχε διηθηθεί λιπαντικό και εξάτμιση diesel η οποία αντιστοιχούσε με 2,53g για τα δοκίμια από τα οποία είχε διηθηθεί diesel κίνησης.

Στον ακόλουθο πίνακα φαίνεται η μεταβολή στη μάζα των δοκιμίων λόγω συγκράτησης υγρού καθώς και η διορθωμένη μάζα των δοκιμίων λαμβανομένων υπόψη των απωλειών μετά από 20 ημέρες. Ως απώλειες νοούνται αυτές που προέκυψαν επειδή αφήσαμε το δοκίμιο να παραμείνει μετά τη διέλευση του λαδιού κτλ και να στραγγίξει από το υπόλοιπο λάδι.

Πίνακας 46. Μεταβολή μάζας δοκιμίων

Τύπος Οργανικού Ρύπου	ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	Μάζα υγρού που κατακρατήθηκε (g)	Διορθωμένη μάζα υγρού που κατακρατήθηκε (g)	% κατακράτηση υγρού σε σχέση με την προστιθέμενη ποσότητα
Χρησιμοποιημένο λιπαντικό μηχανής	LP	13,46	12,11	62,11
	SP	14,81	13,46	68,66
	LSP	16,41	15,06	73,81
	SCDP	16,92	15,57	85,20
	LCDP	12,57	11,22	62,94
	LSCDP	15,28	13,93	76,28
	CDP	12,29	10,94	59,25
Diesel κίνησης	LP	11,29	9,94	51,64
	SP	11,38	10,03	51,34
	LSP	11,99	10,64	55,36
	SCDP	15,66	14,31	74,32
	LCDP	12,18	10,83	56,10
	LSCDP	11,79	10,44	53,72
	CDP	9,19	7,84	41,12

Φυγοκέντρηση

Η υποβολή σε φυγοκέντρηση των δειγμάτων δεν είχε αποτέλεσμα αφού δεν παρατηρήθηκε ο διαχωρισμός του υπό εξέταση υγρού σε δύο διακριτές φάσεις (οργανική φάση και νερό).

Εκχύλιση με εξάνιο

Δεν παρατηρήθηκε υπόλειμμα μετά την εκχύλιση των δειγμάτων με εξάνιο και επιπροσθέτως δεν υπήρξε και μεταβολή στη μάζα της φιάλης του περιστροφικού εξατμιστήρα. Άρα στα υπό εξέταση διαλύματα δεν υπήρχαν λίπη τα οποία είχαν παρασυρθεί κατά τη διήθηση τους από τα δοκίμια διαπερατού σκυροδέματος.

Ανάλυση TOC

Από την ανάλυση TOC με τη συσκευή DOHRMANN CARBON ANALYSER προέκυψαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν.

Πίνακας 47. Αποτελέσματα ανάλυσης TOC στα διηθήματα που προέκυψαν από διέλευση νερού από τη μάζα των προσβεβλημένων με χρησιμοποιημένο λιπαντικό μηχανής

ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	% ΟΡΓΑΝΙΚΟΙ ΡΥΠΟΙ ΠΟΥ ΠΑΡΑΣΥΡΘΗΚΑΝ
LP	0,078
SP	0,080
LSP	0,102
SCDP	0,022
LCDP	0,070
LSCDP	0,081
CDP	0,052

Πίνακας 48. Αποτελέσματα ανάλυσης TOC στα διηθήματα που προέκυψαν από διέλευση νερού από τη μάζα των προσβεβλημένων με diesel κίνησης.

ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	% ΟΡΓΑΝΙΚΟΙ ΡΥΠΟΙ ΠΟΥ ΠΑΡΑΣΥΡΘΗΚΑΝ
LP	0,107
SP	0,086
LSP	0,080
SCDP	0,065
LCDP	0,054
LSCDP	0,085
CDP	0,051

Πίνακας 49. Αποτελέσματα ανάλυσης TOC στα διηθήματα που προέκυψαν από τη δεύτερη και τρίτη διέλευση νερού από τις επιλεγμένες συνθέσεις σκυροδέματος.

ΟΡΓΑΝΙΚΟΣ ΡΥΠΟΣ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	% ΟΡΓΑΝΙΚΟΙ ΡΥΠΟΙ ΠΟΥ ΠΑΡΑΣΥΡΘΗΚΑΝ
Λιπαντικό μηχανής	LSP 2η διέλευση	0,094
	LSP 3η διέλευση	0,543
	SCDP 2η διέλευση	0,062
	SCDP 3η διέλευση	0,183
Diesel κίνησης	SP 2η διέλευση	0,026
	SP 3η διέλευση	0,061
	SCDP 2η διέλευση	0,027
	SCDP 3η διέλευση	0,099

Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Αξιολογώντας τα ανωτέρω αποτελέσματα, του ελέγχου της συμπεριφοράς των υπό εξέταση συνθέσεων διαπερατού σκυροδέματος κατά τη διέλευση από τη μάζα τους χρησιμοποιημένου λιπαντικού μηχανής και diesel κίνησης, συμπεραίνεται ότι το διαπερατό σκυρόδεμα έχει την τάση να εγκλωβίζει στο εσωτερικό του πορώδους του οργανικούς ρύπους αποτρέποντας τους, πρακτικά, να διέλθουν από τη μάζα του ώστε να μην καταλήγουν στον υδροφόρο ορίζοντα. Η ποσότητα των οργανικών ρυπαντών που εγκλωβίζεται στους πόρους, ακόμα και αν το σκυρόδεμα εκπλυθεί από νερό – επί παραδείγματι κατά τη διάρκεια βροχής -, παρασύρεται πολύ δύσκολα και σε πολύ μικρές ποσότητες σταδιακά μη ικανές να μολύνουν τον υδροφόρο ορίζοντα. Το ποσοστό οργανικού ρύπου που δεν παρασύρεται και παραμένει εσωτερικά εγκλωβισμένο στη δομή του πορώδους σκυροδέματος μπορεί να αποτελέσει τροφή για τους μικροοργανισμούς που, όπως έχει παρατηρηθεί από τη βιβλιογραφία, αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια διαπερατού σκυροδέματος και του υποστρώματος. Ο ήλιος επίσης εξατμίζει πτητικά συστατικά που έχουν συγκρατηθεί στην εσωτερική δομή του και το υπόλοιπο οργανικό φορτίο στη συνέχεια απορροφάται από το υπέδαφος, όπου αφομοιώνεται τελικά από φυτά, μύκητες ή μικροοργανισμούς.

Κεφάλαιο 12

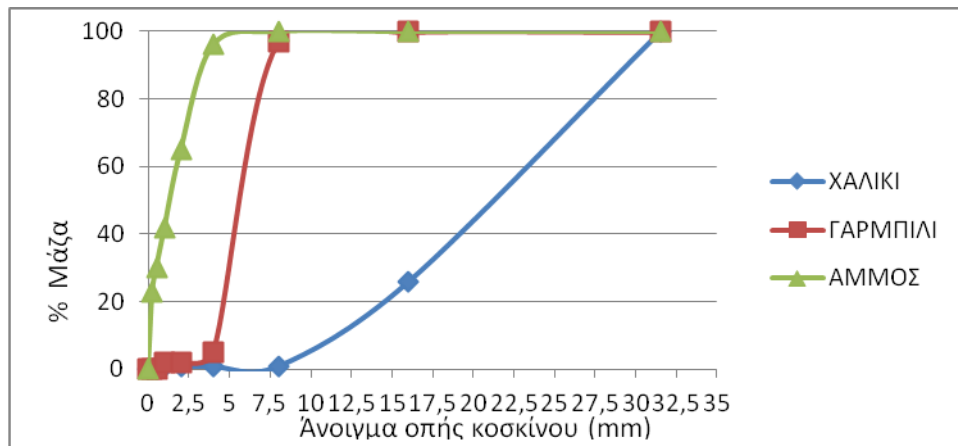
Κεφάλαιο 12: ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Με σκοπό τον έλεγχο και τη μελέτη των ιδιοτήτων του διαπερατού σκυροδέματος σε πραγματικές συνθήκες (in situ) για τέσσερις συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος με θραυστά ασβεστολιθικά αδρανή διαφορετικής κοκκομετρίας πραγματοποιήθηκε διάστρωση σε εργοστασιακό χώρο της εταιρίας τσιμέντων TITAN Α.Ε. στην Ελευσίνα. Συγκεκριμένα για αυτές τις συνθέσεις παρασκευάστηκαν δοκίμια στο εργαστήριο τα οποία μετά την συμπλήρωση των προβλεπόμενων ηλικιών εξετάστηκαν ως προς την υδατοπερατότητά τους καθώς και τις θλιπτικές τους αντοχές. Κατά τη διάρκεια της διαστρώσεως χυτεύθηκαν επί τόπου δοκίμια τα οποία οδηγήθηκαν για συγκριτική μελέτη με τα αποτελέσματα των μετρήσεων τόσο της εργαστηριακής κλίμακας όσο και των «καρότων» που παραλήφθηκαν από τη διαστρωμένη επιφάνεια. Οι μεταβολές των ιδιοτήτων των παραγόμενων δοκιμίων αξιολογούνται και εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με τις διαφορές καθώς και τα προβλήματα που παρουσιάζονται κατά τη διάστρωση μιας εκτάσεως με σύνθεση διαπερατού σκυροδέματος.

Για την παρασκευή των συνθέσεων του διαπερατού σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν ασβεστολιθικά αδρανή διαφορετικής κοκκομετρίας (χαλίκι, γαρμπίλι και άμμος) σε διαφορετικά ποσοστά συμμετοχής ανάλογα με την εκάστοτε σύνθεση καθώς και δύο διαφορετικά είδη τσιμέντου CEM II 32,5 και CEM II 42,5.

12.1 Κοκκομετρική Κατανομή Αδρανών

Στο διάγραμμα 33 παρουσιάζονται οι καμπύλες της κοκκομετρικής κατανομής των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των συνθέσεων



Διάγραμμα 33. Κοκκομετρική κατανομή αδρανών

12.2 Συνθέσεις που μελετήθηκαν

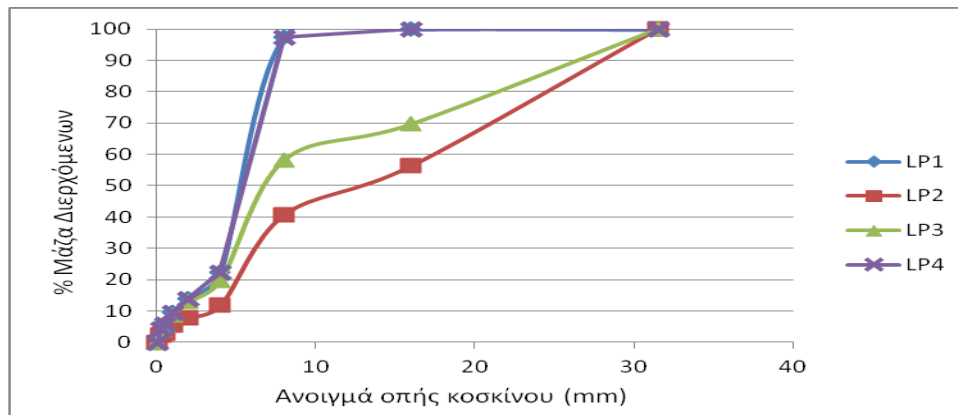
Όπως προαναφέρθηκε παρασκευάστηκαν τέσσερις συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος. Για να μελετηθεί η συμπεριφορά των συνθέσεων σε συνθήκες *in situ* κατά τη διάστρωση της πιλοτικής εφαρμογής, επιλέχθηκε να εξεταστούν δυο διαφορετικά είδη χονδρόκοκκων αδρανών (γαρμπίλι και χαλίκι) καθώς και δυο είδη τσιμέντου CEM II 32,5 και CEM II 42,5. Οι συνθέσεις LP1 και LP4 περιέχουν ακριβώς την ίδια αναλογία αδρανών (με πλήρη απουσία χαλικιού) και διαφέρουν ως προς το είδος του τσιμέντου. Η σύνθεση LP2 περιέχει μεγαλύτερο ποσοστό χαλικιού με τελικό στόχο να διαπιστωθεί η εργασιμότητα καθώς και οι τελικές ιδιότητες μιας σύνθεσης που αποτελείται ως επί το πλείστον από πολύ χονδρόκοκκα αδρανή. Ενώ η σύνθεση LP3 αποτελείται από ίσα ποσοστά χαλικιού και γαρμπιλιού και χαμηλότερο ποσοστό τσιμέντου με σκοπό να μελετηθεί και κατά τη διαδικασία της διάστρωσης πως «συνεργάζονται» αυτά τα δυο υλικά. Τέλος στις συνθέσεις LP2 και LP3 χρησιμοποιήθηκε CEM II 32,5 για να ελεγχθεί αν μπορεί να αποδώσει ικανοποιητικές αντοχές μειώνοντας ταυτόχρονα και το κόστος της σύνθεσως.

Οι συνθέσεις παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 50. Συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος

	CEM II 42,5 (kg/m ³)	CEM II 32,5 (kg/m ³)	% ΑΜΜΟΣ	% ΓΑΡΜΠΙΛΙ	% ΧΑΛΙΚΙ	w/c
LP1	190	0	19	81	0	0,47
LP2	0	230	10	31	59	0,52
LP3	0	180	18	41	41	0,56
LP4	0	190	19	81	0	0,47

Το διάγραμμα 34 παρουσιάζει την κοκκομετρική κατανομή των συνθέσεων.



Διάγραμμα 34. Κοκκομετρική κατανομή συνθέσεων

12.3 Διάστρωση εξωτερικού χώρου με διαπερατό σκυρόδεμα

Αφού επιλέχθηκε ο χώρος διάστρωσης, χρησιμοποιήθηκε ως βάση υπόστρωμα 3Α το οποίο συμπυκνώθηκε ομοιόμορφα. Είναι σημαντικό να μη συμπυκνώνεται πέρα από κάποιο όριο το υπέδαφος. Ένα βασικό χαρακτηριστικό του σχεδιασμού διαστρώσεως με διαπερατό σκυρόδεμα είναι η φροντίδα ώστε η διαπερατότητά του τελευταίου καθώς και αυτή του υπεδάφους να μειώνονται γραμμικά με την αύξηση της συμπύκνωσής τους. Έτσι, αν το υπόστρωμα συμπυκνωθεί πέρα από τα όρια του σχεδιασμού του, τότε το ποσοστό διαπερατότητας του εδάφους θα μειωθεί και η επιφάνεια δεν θα αποστραγγίζει το επιθυμητό ποσό των απορροών.

Διαστρώθηκαν τέσσερις λωρίδες περίπου 50 m² η καθεμία. Αφού η μπετονιέρα έριξε επαρκή ποσότητα υλικού, μία μεταλλική ράβδος πέρασε από την επιφάνεια έτσι ώστε να γίνει ομοιόμορφη χωρίς να προεξέχουν διάφορα κομμάτια αδρανών. Κατόπιν η συμπύκνωση γίνεται με μεταλλικό κύλινδρο.

Η κυλιόμενη συμπύκνωση του νωπού σκυροδέματος παρέχει μία ισχυρή ζεύξη μεταξύ της πάστας και των αδρανών υλικών, δημιουργώντας μια λεία επιφάνεια στην οδήγηση. Προσοχή όμως πρέπει να επιδεικνύεται ώστε να αποφευχθεί η άσκηση υπερβολικής πίεσης καθώς μπορεί να προκαλέσει την κατάρρευση του εσωτερικού πορώδους των συνθέσεων. Στις ακόλουθες φωτογραφίες παρουσιάζονται τα στάδια που περιγράφηκαν.



Εικόνα 102. Στάδια διάστρωσης διαπερατού σκυροδέματος

Όπως προαναφέρθηκε κατά τη διάρκεια της διαστρώσεως χυτεύθηκαν επί τόπου σε μήτρες δοκίμια χωρίς την άσκηση κάποιας μορφής πίεσεως για την επίτευξη συμπύκνωσης. Τα δοκίμια αυτά οδηγήθηκαν για συγκριτική μελέτη με τα αποτελέσματα των μετρήσεων τόσο των παραγόμενων δοκιμίων εργαστηριακής κλίμακας όσο και των «καρότων» που παραλήφθηκαν από τη διαστρωμένη επιφάνεια. Η συμπύκνωση στα δοκίμια εργαστηριακής κλίμακας έγινε με δονούμενη τράπεζα για 15 sec με ταυτόχρονη επιβολή φορτίου.

Ακολουθούν οι εικόνες 103, 104 που δείχνουν την έκταση η οποία διαστρώθηκε καθώς και τον τρόπο λήψης των «καρότων» από την διαστρωμένη έκταση.



(α)



(β)

Εικόνα 103. Η έκταση που διαστρώθηκε πριν (α)- μετά (β) με διαπερατό σκυρόδεμα σε εργοστασιακό χώρο στην Ελευσίνα.



(α)



(β)

Εικόνα 104. (α) Δειγματοληψία «καρότων», (β) Αντιπροσωπευτικό δείγμα «καρότου».

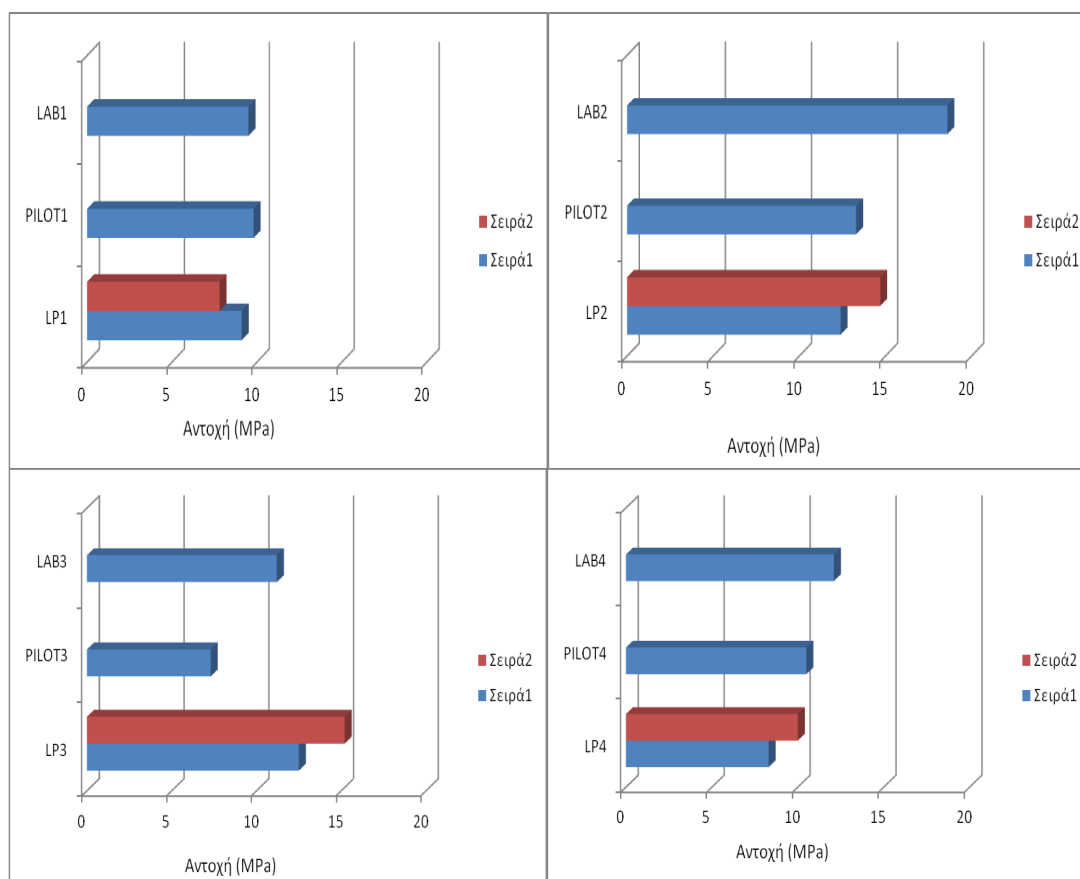
12.4 Αντοχές σε θλίψη

Από την διαστρωμένη επιφάνεια παρελήφθησαν 2 «καρότα» μετά το πέρας ενός εξαμήνου. Τα παραγόμενα δοκίμια εξετάστηκαν για μέτρηση της αντοχής τους σε θλίψη σύμφωνα με το EN12390 και οι μετρήσεις

παρουσιάζονται στον Πίνακα 51 και στα ακόλουθα διαγράμματα. Οι μετρήσεις με την ένδειξη LP αναφέρονται στα «καρότα», ενώ οι μετρήσεις με την ένδειξη PILOT στα δοκίμια που χυτεύθηκαν επί τόπου σε μήτρες στην πιλοτική εφαρμογή. Τέλος οι μετρήσεις με την ένδειξη LAB αναφέρονται στα δοκίμια ίδιων διαστάσεων με PILOT που παρασκευάστηκαν σε εργαστηριακή κλίμακα.

Πίνακας 51. Αντοχές σε θλίψη (MPa)

LP1	LP2	LP3	LP4
9,1	12,4	12,5	8,3
7,8	14,7	15,2	10
PILOT1	PILOT2	PILOT3	PILOT4
9,8	13,3	7,3	10,5
LAB1	LAB2	LAB3	LAB4
9,5	18,6	11,2	12,1



Διάγραμμα 35. Αντοχές δοκιμίων (MPa)

Όλες οι συνθέσεις εμφανίζουν ικανοποιητικές αντοχές για το πεδίο εφαρμογών τους. Οι διαφορές μεταξύ των αντοχών των δοκιμίων PILOT σε σχέση με τα άλλα δοκίμια οφείλονται στο γεγονός ότι κατά την διάρκεια της χύτευσης των δοκιμίων PILOT σε μήτρες δεν πραγματοποιήθηκε κάποιας μορφής συμπίκνωση. Οι συνθέσεις 2 και 3 εμφανίζουν καλύτερα αποτελέσματα αντοχών και αυτό οφείλεται στην παρουσία του χαλκίου. Γενικά σύμφωνα με βιβλιογραφικές έρευνες, η τάση που επικρατεί όσον αφορά τις αντοχές των διαπερατών

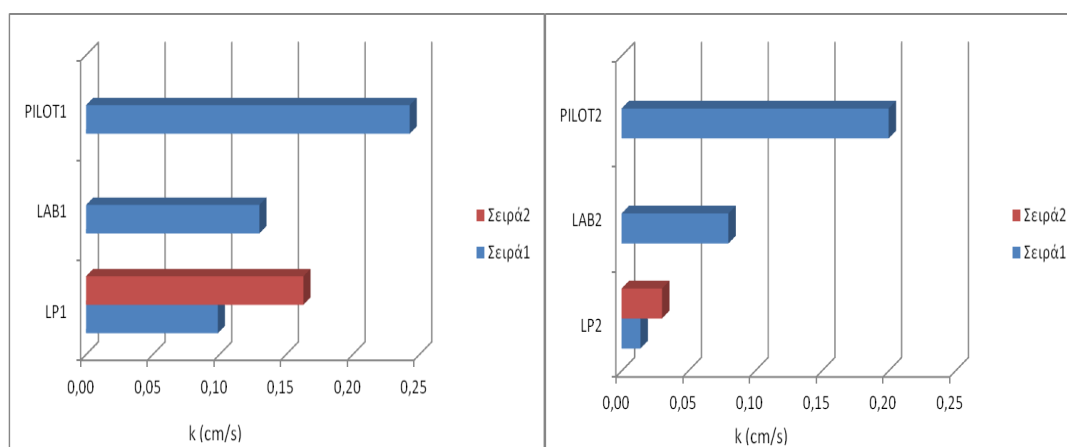
σκυροδεμάτων συνοψίζεται στο γεγονός ότι η χρήση χονδρόκοκκων αδρανών αυξάνει τις αντοχές των τελικών δοκιμίων. Σε αυτό το σημείο όμως πρέπει να τονιστεί η δυσκολία που εμφανίστηκε κατά τη διάστρωση των λωρίδων με τις συνθέσεις που περιείχαν χαλίκι και κυρίως για την σύνθεση 2. Αρχικά η μπετονιέρα δεν μπορούσε να αναμίξει ομοιογενώς το χαρμάνι ενώ επιπροσθέτως παρατηρήθηκε και δυσκολία στην εργασιμότητα των συγκεκριμένων συνθέσεων. Αυτό οφείλεται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και την τραχύτητα που παρουσιάζει το χαλίκι. Όπως έχει προαναφερθεί και στο θεωρητικό μέρος η ποσότητα τιμεντόπου που χρησιμοποιείται για την παρασκευή των συνθέσεων είναι η ελάχιστη δυνατή που χρειάζεται ώστε να ενωθούν τα αδρανή έτσι λοιπόν αυτή η λίγη ποσότητα τιμεντόπαστας δεν διευκολύνει την ανάμειξη του χαρμανιού στην μπετονιέρα.

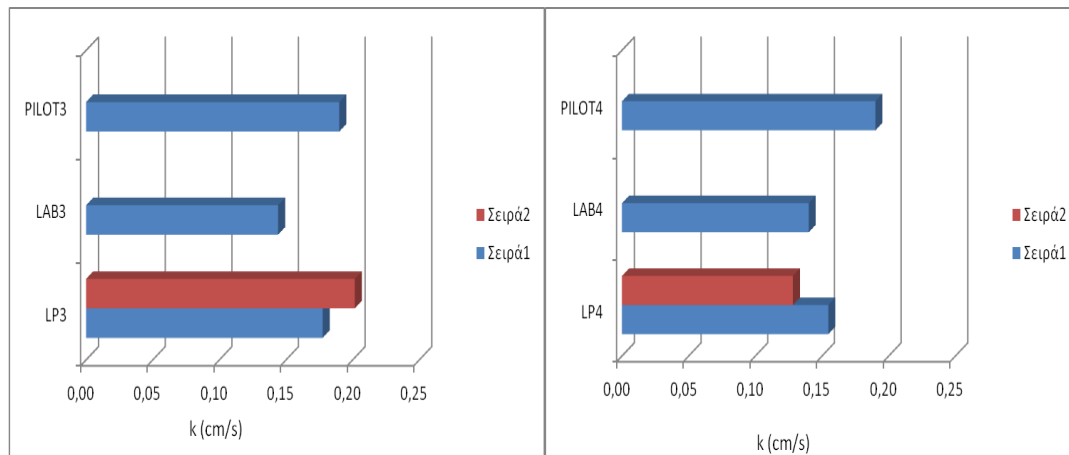
12.5 Υδατοπερατότητα

Η υδατοπερατότητα, όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 6 μετρήθηκε βάσει του προτύπου εδαφομηχανικής Ε105-86. Οι μετρήσεις για τις συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 52 και Διάγραμμα 36 που ακολουθούν.

Πίνακας 52. Συντελεστής Υδατοπερατότητας k (cm/s)

LP1	LP2	LP3	LP4
0.10	0.01	0.18	0.15
0.16	0.03	0.20	0.13
PILOT1	PILOT2	PILOT3	PILOT4
0.24	0.2	0.19	0.19
LAB1	LAB2	LAB3	LAB4
0.13	0.08	0.14	0.14





Διάγραμμα 36. Συντελεστής Υδατοπερατότητας k (cm/s)

Μία γενική παρατήρηση είναι ότι και για τις μετρήσεις της υδατοπερατότητας ισχύει ό,τι προαναφέρθηκε για τις μετρήσεις των αντοχών των συνθέσεων. Όλες οι συνθέσεις εμφανίζουν ικανοποιητικές τιμές υδατοπερατότητας για το πεδίο εφαρμογών τους. Παρατηρείται ότι υψηλότερες τιμές υδατοπερατότητας εμφανίζουν οι συνθέσεις PILOT και αυτό οφείλεται στο υψηλό πορώδες της εσωτερικής δομής των δοκιμίων PILOT που δημιουργήθηκε κατά τη χύτευση τους σε μήτρες καθώς δεν πραγματοποιήθηκε κάποια μορφής συμπύκνωσης. Η χαμηλή τιμή υδατοπερατότητας συγκεκριμένα της σύνθεσης 2 οφείλεται, όπως προαναφέρθηκε, στη δυσκολία επίτευξης ομοιογένειας κατά τη διάρκεια της διαστρώσεως καθώς και της χαμηλής εργασιμότητας λόγω του υλικού. Επίσης ένας άλλος λόγος για τις χαμηλές τιμές υδατοπερατότητας της συγκεκριμένης σύνθεσης είναι η δημιουργία λεπτού στρώματος τσιμεντόπαστας στην κάτω επιφάνεια των εκάστοτε «καρότων» το οποίο παρατηρήθηκε κατά την λήψη τους. Η δημιουργία αυτού του στρώματος τσιμεντόπαστας πιθανότατα οφείλεται στο υψηλό ποσοστό τσιμέντου για την συγκεκριμένη σύνθεση καθώς και στην ανομοιογένεια κατά τη διάρκεια ανάμειξης και διάστρωσης της λωρίδας.

Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Συμπερασματικά όλες οι συνθέσεις που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζουν ικανοποιητικές μετρήσεις αντοχών και υδατοπερατότητας για το πεδίο εφαρμογών τους. Οι συγκεκριμένες τιμές δεν διαφέρουν πολύ μεταξύ των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν σε εργαστηριακή κλίμακα με τα «καρότα» που παρελήφθησαν από την πιλοτική εφαρμογή. Οι μόνες τιμές που διαφέρουν σε μεγαλύτερο ποσοστό είναι αυτές των δοκιμίων PILOT το οποίο αιτιολογείται από το γεγονός ότι κατά την χύτευση των συγκεκριμένων δοκιμίων δεν πραγματοποιήθηκε συμπύκνωση. Συγκριτικά με όλες τις συνθέσεις, αυτή που δεν εμφανίζει τόσο καλή συμπεριφορά είναι η σύνθεση 2 η οποία λόγω της υψηλής περιεκτικότητας χαλικιού είχε χαμηλή εργασιμότητα καθώς και δυσκολία στην ανάμειξη του χαρμανιού στην μπετονιέρα. Ταυτόχρονα η αιτία για τις χαμηλές τιμές υδατοπερατότητας της συγκεκριμένης σύνθεσης είναι η δημιουργία λεπτού στρώματος τσιμεντόπαστας στην

κάτω επιφάνεια των εκάστοτε «καρότων» το οποίο παρατηρήθηκε κατά την λήψη τους.

Επιπροσθέτως, όσον αφορά το σχεδιασμό διαστρώσεως επιφανειών με διαπερατό σκυρόδεμα, σημαντικό παράγοντα αποτελεί η φροντίδα ώστε η διαπερατότητά του σκυροδέματος καθώς και αυτή του υπεδάφους να μειώνονται γραμμικά με την αύξηση της συμπύκνωσής τους. Για αυτόν τον λόγο πρέπει να αποφευχθεί η συμπύκνωση του υποστρώματος πέρα από τα όρια του σχεδιασμού του, έτσι ώστε το ποσοστό διαπερατότητας του εδάφους να διατηρηθεί σταθερό και η επιφάνεια να αποστραγγίζει το επιθυμητό ποσό των απορροών. Τέλος όσον αφορά την εργασιμότητα καθώς και την ευκολία διάστρωσης κατά τη διάρκεια της πιλοτικής εφαρμογής παρατηρήθηκε πως οι συνθέσεις που περιείχαν ποσοστά χαλκίου παρουσίασαν δυσκολία κατά τη διάστρωση τους σε σχέση με τις συνθέσεις που περιείχαν γαρυπίλι.

Κεφάλαιο 13

Κεφάλαιο 13: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή διερευνήθηκαν συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος τόσο με ασβεστολιθικά όσο και με εναλλακτικά αδρανή και αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα τους στο σύνολο σχεδόν των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων καθώς και των βασικών ιδιοτήτων ανθεκτικότητας του σκυροδέματος. Επιπροσθέτως, έχοντας ως στόχο τις περιβαλλοντικές εφαρμογές έγινε συστηματική μελέτη της κατακράτησης του συγκεκριμένου τύπου σκυροδέματος σε ρύπους όπως τα νιτρικά και θειικά ιόντα καθώς και σε οργανικά κατάλοιπα των αυτοκινήτων με στόχο την αξιολόγηση της χρήσης του συγκεκριμένου προϊόντος ως φίλτρου για τον καθαρισμό των όμβριων υδάτων και κατά συνέπεια την προστασία του υδροφόρου ορίζοντα. Τέλος στο πλαίσιο της επιβεβαίωσης των συμπερασμάτων της έρευνας πραγματοποιήθηκε πιλοτική διάσπρωση με συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος σε εργοστασιακό χώρο στάθμευσης μιας τσιμεντοβιομηχανίας. Με αυτόν τον τρόπο ελέγχθηκαν και οι ιδιότητες του διαπερατού σκυροδέματος σε πραγματικές συνθήκες (in situ).

Τα κυριότερα συμπεράσματα που εξάγονται από την εκτέλεση της ανωτέρω πειραματικής διαδικασίας παρουσιάζονται ακολούθως:

- ✎ Η παρασκευή συνθέσεων διαπερατού σκυροδέματος με ασβεστολιθικά αδρανή είναι εφικτή τόσο με τη χρησιμοποίηση χονδρόκοκκων όσο και λεπτόκοκκων κλασμάτων, καθώς και μιγμάτων τους. Η χρησιμοποίηση χονδρόκοκκων κλασμάτων προσδίδει καλύτερες αντοχές στο σκυρόδεμα, όμως μειώνει την εργασιμότητα της σύνθεσης. Συγκεκριμένα τα δοκίμια εμφανίζουν μειωμένη υδατοπερατότητα καθώς ποσότητα τσιμεντόπαστας κατακάθεται στη βάση των δοκιμίων με αποτέλεσμα να τα φράζει. Επίσης, η ανομοιομορφία των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των χαλικιών δημιουργεί μία μη ομαλή διαστρωμένη επιφάνεια η οποία αποτελεί μειονέκτημα για τα διερχόμενα οχήματα. Η χρησιμοποίηση άμμου βοηθάει στη συνοχή και τις ιδιότητες του συγκεκριμένου τύπου σκυροδέματος.

- ✘ Η ποσότητα του τσιμέντου εξαρτάται από την εκάστοτε υπό μελέτη σύνθεση και πρέπει να είναι ελάχιστη και επαρκής ώστε να συνδεθούν τα αδρανή μεταξύ τους και να δημιουργήσουν το εσωτερικό δίκτυο των πόρων. Για τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της διατριβής είναι 120 kg/m^3 .
- ✘ Μπορεί να χρησιμοποιηθεί τσιμέντο Portland CEM II τόσο 42.5 όσο και 32.5 στο σκυρόδεμα χωρίς ιδιαίτερες διαφορές στις ιδιότητες, ενώ μία μικρή και προσεκτική υποκατάστασή του από πυριτική παιπάλη μπορεί να βοηθήσει κυρίως στις θλιπτικές αντοχές του και σε αυτές της τρίψης - απότριψης. Με γνώμονα όμως την υδατοπερατότητα όσο αυξανόταν η υποκατάσταση του τσιμέντου από την πυριτική παιπάλη, η υδατοπερατότητα μειωνόταν αντιστοίχως, καθότι αυξανόταν η πυκνότητα του σκυροδέματος και αντίστοιχα μειωνόταν το πορώδες του.
- ✘ Η καλή αλλά όχι υπερβολική συμπύκνωση είναι καίριας σημασίας για τις ιδιότητες του διαπερατού σκυροδέματος, κυρίως για τη δημιουργία μιας καλής και συνεχούς πορώδους δομής στη μάζα του που θα εξασφαλίζει τη σωστή αποστράγγιση του νερού. Γενικά η συμπύκνωση πρέπει να γίνεται βάσει του ACI 522R-06.
- ✘ Η υποκατάσταση των ασβεστολιθικών αδρανών με εναλλακτικού τύπου αδρανή είναι εφικτή και οδηγεί στην παρασκευή διαπερατού σκυροδέματος με ικανοποιητικές και εντός ορίων ιδιότητες, ενώ παράλληλα συμβάλλει στη μείωση του κόστους. Επιπλέον, η χρήση εναλλακτικών αδρανών εξασφαλίζει και περιβαλλοντικά οφέλη που συνοψίζονται στην ανακύκλωση και ορθότερη διαχείριση αυτών των υλικών καθώς και στην εξασφάλιση των φυσικών πρώτων υλών.
- ✘ Το παραπροϊόν της σκωρίας χάλυβα λόγω της σκληρότητάς του αυξάνει τις αντοχές του διαπερατού σκυροδέματος καθώς και την υδατοπερατότητα, ενώ το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα από την άλλη επιτρέπει μεγάλο βαθμό συμπύκνωσης και ελαττώνει την υδατοπερατότητα.
- ✘ Τα δύο εναλλακτικά αδρανή έδειξαν να συνεργάζονται καλά με τα ασβεστολιθικά, βοηθώντας στις τιμές των ιδιοτήτων του διαπερατού σκυροδέματος, όχι όμως και μεταξύ τους. Αυτό οφείλεται στη φύση και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτών των υλικών, τα οποία κατά την παρασκευή των δοκιμίων και την συμπύκνωσή τους δεν συνεργάζονται καλά (δεν έχουν καλό «packing») στη δημιουργία του εσωτερικού πορώδους δικτύου.
- ✘ Η παρουσία και των τριών τύπων αδρανών στο σκυρόδεμα όμως λειτουργεί αρκετά καλά, δείχνοντας να συνεργάζονται και να δίνουν μία πολύ συμπαγή μορφή με καλές ιδιότητες σε όλους τους τομείς.

- ✘ Και τα δύο εναλλακτικού τύπου αδρανή έδειξαν ότι βοηθούν το σκυρόδεμα στην διαδικασία της τρίψης – απότριψης σε σχέση με τα ασβεστολιθικά.
- ✘ Το μέγεθος των αδρανών παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της εσωτερικής δομής του πορώδους των σκυροδεμάτων. Συγκεκριμένα στις συνθέσεις που χρησιμοποιούνται χονδρόκοκκα αδρανή, όπως τα οικοδομικά απόβλητα, το πορώδες της σύνθεσης εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές. Οι συνθέσεις με σκωρία χάλυβα εμφανίζουν τις χαμηλότερες τιμές πορώδους γεγονός το οποίο αιτιολογείται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά καθώς και την κοκκομετρική κατανομή αυτών των αδρανών καθώς αυτά οδηγούν στη δημιουργία μιας πιο πυκνής δομής και βοηθούν την τσιμεντόπαστα να «δέσει» πιο εύκολα.
- ✘ Κατά τη μετάβαση προς την κατώτερη επιφάνεια των δοκιμών παρατηρείται γενικά μείωση του ποσοστού των κενών χώρων. Η παρατήρηση αυτή συνάδει απόλυτα με το γεγονός ότι κατά την σκυροδέτηση η τσιμεντόπαστα αλλά και, σε μικρότερο βαθμό, τα αδρανή κατακάθονται στην κατώτερη επιφάνεια μειώνοντας έτσι το πορώδες στις κατώτερες περιοχές των δοκιμών.
- ✘ Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του ελέγχου ψύξης-απόψυξης οι συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιοχές με έντονες θερμοκρασιακές αλλαγές. Συγκεκριμένα στη Βόρεια Ελλάδα, όπου υπάρχει πληθώρα φυσικών αδρανών (ποταμίσια 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 σκυρόδεμα μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις αυτών των θερμοκρασιακών μεταβολών.
- ✘ Το διαπερατό σκυρόδεμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε παραθαλάσσιες περιοχές ως αποστραγγιστικό μέσο καθώς δεν παρατηρείται κάποια σημαντική απώλεια της μάζας των δοκιμών ή κάποια διόγκωση τους κατά την παραμονή τους σε περιβάλλον θαλασσινού νερού.
- ✘ Όλες οι συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος εμφανίζουν ικανοποιητική συμπεριφορά μετά την έκθεση τους σε ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Αυτό αποτελεί έναν πολλά υποσχόμενο παράγοντα για την αντοχή και τη μακροχρόνια χρήση αυτού του τύπου σκυροδέματος.

- ✘ Δεν μπορεί να διασαφηνιστεί με ακρίβεια μέσω οπτικής εξέτασης η έκταση του φαινομένου της ενανθράκωσης της τσιμεντόπαστας στα διαπερατά σκυροδέματα, καθώς η μάζα της καλύπτει επιφανειακά τα αδρανή. Έτσι, η μέγιστη ενανθράκωση της τσιμεντόπαστας αφορά στα λίγα χιλιοστά της επικάλυψης των αδρανών.
- ✘ Στις συνθέσεις του διαπερατού σκυροδέματος που μελετήθηκαν το μέγεθος των αδρανών είναι αυτό που καθορίζει το βάθος της ενανθράκωσης (οπτική παρακολούθηση). Συγκεκριμένα, τα αδρανή με το μικρότερο μέγεθος και κατ' επέκταση μεγαλύτερη επιφάνεια ανά μονάδα όγκου επικαλύπτονται με μεγαλύτερη ποσότητα τσιμεντόπαστας. Καθώς το φαινόμενο της ενανθράκωσης είναι ένα φαινόμενο που αφορά την τσιμεντόπαστα, δοκίμια με λεπτόκοκκα αδρανή αποκτούν μεγαλύτερα βάθη ενανθράκωσης με την πάροδο του χρόνου αλλά και από την έκθεσή τους σε υψηλές συγκεντρώσεις CO₂. Αντίθετα, τα χονδρόκοκκα αδρανή όπως τα ασβεστολιθικά ή τα οικοδομικά απόβλητα επικαλύπτονται με μικρότερη ποσότητα τσιμεντόπαστας ανά μονάδα όγκου και έτσι το φαινόμενο της ενανθράκωσης δεν είναι τόσο ευδιάκριτο.
- ✘ Όσον αφορά την κατακράτηση ανόργανων ρύπων από το διαπερατό σκυρόδεμα στην περίπτωση των θεικών ιόντων δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα σχετικά με την κατακράτησή τους. Τόσο στην περίπτωση που φαίνεται μείωση στην περιεκτικότητα σε θειικά όσο και στην περίπτωση που παρουσιάζεται αύξηση, είναι της τάξεως που εμπίπτει στο σφάλμα της διαδικασίας της μέτρησης. Όσον αφορά την περίπτωση των νιτρικών ιόντων παρατηρήθηκε πως κατακρατούνται από τις συνθέσεις διαπερατού σκυροδέματος. Το ποσοστό των νιτρικών ιόντων που απομειώθηκε σε επαφή με το δοκίμιο μπορεί να έχει υποστεί και τους δύο μηχανισμούς κατακράτησης (φυσική ή χημική προσρόφηση) αλλά δεν είναι εφικτός ο καθορισμός με βεβαιότητα του μηχανισμού κατακράτησης όπως αιτιολογήθηκε και στο Κεφάλαιο 11.
- ✘ Σχετικά με τους οργανικούς ρύπους το διαπερατό σκυρόδεμα έχει την τάση να τους εγκλωβίζει στο εσωτερικό του πορώδους του αποτρέποντας τους, πρακτικά, να διέλθουν από τη μάζα του ώστε να μην καταλήξουν στον υδροφόρο ορίζοντα. Η ποσότητα των οργανικών ρυπαντών που εγκλωβίζεται στους πόρους, ακόμα και αν το σκυρόδεμα εκπλυθεί από νερό – επί παραδείγματι κατά τη διάρκεια βροχής -, παρασύρεται πολύ δύσκολα και σε πολύ μικρές ποσότητες σταδιακά μη ικανές να μολύνουν τον υδροφόρο ορίζοντα. Το ποσοστό οργανικού ρύπου που δεν παρασύρεται και παραμένει εσωτερικά εγκλωβισμένο στη δομή του πορώδους σκυροδέματος μπορεί να αποτελέσει τροφή για τους μικροοργανισμούς που, όπως έχει παρατηρηθεί από τη βιβλιογραφία, αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια διαπερατού σκυροδέματος και του υποστρώματος.

- ✎ Κατά την πιλοτική διάστρωση εργοστασιακού χώρου στάθμευσης με διαπερατό σκυρόδεμα παρατηρήθηκε πως οι συνθέσεις που περιείχαν ποσοστά χαλικιού παρουσίασαν δυσκολία κατά τη διάστρωση τους σε σχέση με τις συνθέσεις που περιείχαν γαρμπίλι. Ταυτόχρονα όλες οι συνθέσεις που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζουν ικανοποιητικές τιμές αντοχών και υδατοπερατότητας για το πεδίο εφαρμογών τους. Οι συγκεκριμένες τιμές δεν διαφέρουν πολύ μεταξύ των δοκιμών που παρασκευάστηκαν σε εργαστηριακή κλίμακα με τα «καρότα» που παρελήφθησαν από την πιλοτική εφαρμογή.
- ✎ Περαιτέρω μελέτη στην παρασκευή συνθέσεων διαπερατού σκυροδέματος από ασβεστολιθικά αδρανή όσο και από εναλλακτικά αδρανή διαφορετικών κοκκομετρικών κατανομών, καθώς και μεγαλύτερου εύρους ποσοστών υποκατάστασης συμβατικού ασβεστόλιθου από τα τελευταία, είναι εφικτή.

Κεφάλαιο 14

Κεφάλαιο 14: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Πρεφτίση Γ. Φωτεινή «Υδατοδιαπερατοί τάπητες και δάπεδα: Τύποι και Εφαρμογές» Περιοδικό Κτίριο- Τεχνικές Σελίδες 101-106, Τεύχος 10/2010.
2. National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA), «Pervious Concrete –When it rains it drains», 2011. (πηγή:<http://www.nrmca.org/aboutconcrete/when-it-rains-it-drains.pdf>).
3. Pervious Concrete, Reported by ACI Committee 522.1-08.
4. Neithalath N., Sumanasooriya M., Deo O., «Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction», Department of Civil and Environmental Engineering, Clarkson University, Potsdam, USA.
5. Chindaprasirt P., Hatanaka S., Chareerat T., Mishima N., Yuasa Y., «Cement paste characteristics and porous concrete properties», Department of Civil Engineering, Khon Kaen University, Japan.
6. Neithalath N., Weiss J., and Olek J., «Predicting the Permeability of Pervious Concrete (Enhanced Porosity Concrete) from Non-Destructive Electrical Measurements», Clarkson University, Department of Civil and Environmental Engineering.
7. Λυκούδης Σ., «Διαπερατό Σκυρόδεμα», Περιοδικό Εργοταξιακά Θέματα Μάιος 2008 σελ 26-30.
8. The Construction Specifier magazine, Precast Bridges the Innovation Gap, December 2005.
9. Pervious Concrete: The Pavement that Drinks. Mississippi Concrete Industries Association. Ridgeland, Accessed January 17, 2007.
10. ACI Committee: ACI 522R-06: Pervious Concrete, 25 pages.

11. Tennis, P.D., Leming, M.L., and Akers, D.J. (2004). Pervious Concrete Pavements, EB302, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland.
12. Olek, J., and Weiss, W. J., (2003). Development of Quiet and Durable Porous Portland Cement Concrete Paving Materials. Final Report SQDH 2003-5 Center for Advanced Cement Based Materials, Purdue University, West Lafayette, IN.
13. Schaefer V.R., Wang K., Suleiman M.T., Kevern J., «Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates», National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University, Ames, Iowa, USA, 2006.
14. Beeldens, A., «Behavior of Porous PCC Under Freeze-Thaw Cycling», Paper presented at the Tenth International Congress on Polymers in Concrete, Honolulu, Hawaii, USA, 2001.
15. Tamai M., Yoshida M., «Durability of Porous Concrete», Sixth International Conference on Durability of Concrete, Thessaloniki, Greece, 2003.
16. NRMCA, Freeze-Thaw Resistance of Pervious Concrete, National Ready Mix Concrete Association, Silver Spring, Maryland, 2004, 17 pages.
17. ASTM C666 Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing.
18. Yang Z., Brown H., Cheney A., «Influence of Moisture Conditions on the Freeze-Thaw Durability of Portland Cement Pervious Concrete», CD-ROM. Proceedings of the 2006 NRMCA Concrete Technology Forum – Focus on Pervious Concrete, Silver Spring, Maryland, USA, 2006.
19. Bass W., «Pervious Concrete Pavement Surface Durability in a Freeze-Thaw Environment where Rain, Snow, and Ice Storms are Common Occurrences», CD-ROM, NRMCA, Proceedings of the 2006 NRMCA Concrete Technology Forum – Focus on Pervious Concrete, Silver Springs, Maryland, USA, 2006.
20. Delatte, N.; Miller, D., Mrkajic, M., «Portland Cement Pervious Concrete: Field Performance Investigation on Parking Lot and Roadway Pavements», Final Report of the RMC Research and Education Foundation, Silver Springs, Maryland, USA, 2007.
21. Kevern, J., Wang K., Suleiman M., Schaefer, V., «Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather», Proceeding of the 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa, USA, CD-ROM, 2005.
22. Kevern J.T., «Mix Design Determination for Freeze-Thaw Resistant Portland Cement Pervious Concrete», Master's Thesis, Iowa State University, Ames, Iowa, USA, 2006.
23. Kevern J. T., «Mix Design Development for Portland Cement Pervious Concrete in Cold Weather Climates», Master's Thesis, Iowa State University, 2006a, Ames, Iowa, 2006.

24. Kevern J. T., Schaefer V. R., Wang K., Suleiman M. T., «Mix Development to Improve Pervious Concrete Durability», *Journal of ASTM International*, Vol. 5, No. 2, DOI:10.1520/JAI101320, Feb, 2008a, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 2008.
25. Kevern J. T., Wang K., Schaefer V. R., «A Novel Approach to Determine Entrained Air Content in Pervious Concrete», *Journal of ASTM International*, Vol. 5, No. 2, Feb, 2008b, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 2008.
26. Kevern J.T., «Advancement of Pervious Concrete Durability», Ph.D. Dissertation, Iowa State University, Ames, Iowa, USA, 2008c.
27. ASTM C215-08: «Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens».
28. Yang J., Jiang G., «Experimental study of properties on pervious concrete pavement materials» *Cement and Concrete Research* Vol.33 pp. 381-386.
29. Beeldens A., Van Gemert D., De Winne, E., Caestecker C., Van Messern M., «Development of porous polymer cement concrete for highway pavements in Belgium», *Proceedings of the 2nd East Asia symposium on polymers in concrete EASPIC*, Koriyama, Japan, May 1997, pages 121-129.
30. Hodson H., «Method of producing and distributing a pervious concrete product», 1980.
31. Hein, M. F. and Schindler, A. K., *Learning Pervious Concrete Collaboration on a University Campus* Auburn University.
32. Amekuedi, G. «Case Study of a 10 Year-Old Subdivision with 200 Pervious Pavement Driveways» , Ready Mixed Concrete Company.
33. Crouch, L., Pitt, J., and Hewitt, R. (2007). «Aggregate Effects on Pervious Portland Cement Concrete Static Modulus of Elasticity.» *J. Mater. Civ. Eng.*, 19(7), 561-568. Technical Papers.
34. Yen, P. T., Sundaram, P. N., and Godwin, W. A., *Pumped-in-Place Permeable Grout Systems*, Permeation Grouting Bechtel Corporation, Technical Grant, pp. 1-44, 2002.
35. ACPA, *Cement-Treated Permeable Base for Heavy-Traffic Concrete Pavements*, IS404, American Concrete Pavement.
36. Tennis, P. D., Leming, M. L., and Akers, D. J., *PCA and NRMCA Pervious Concrete Pavements On Slope*, 2004 Pages 13-14.
37. Ghafoori, N. and Dutta, S. *Building and Nonpavement Applications of No-Fines Concrete - Journal of Materials in Civil Engineering*, Volume 7, Number 4, November 1995b, pages 286-289.

38. Onstenk, E., Aguado, A., Eickschen, E., and Josa, A. Laboratory Study of Porous Concrete for its Use as Top Layer of Concrete Pavements.
39. Proceedings of the Fifth International Conference on Concrete Pavement and Rehabilitation, Purdue University, Indiana, USA, 1993, Vol.2, pp. 125-139.
40. Field, R., Masters, H. and Singer, M. An Overview of Porous Pavement Research - Water Resources Bulletin. Vol. 18 no. 2, pp. 265-270, (1982a).
41. Field, R., Masters, H. and Singer M., «Status of Porous Pavement Research»- Water Research Vol. 16 no. 6 pp. 849-858 June 1982, (1982b).
42. Morrison, C. L. Pervious Concrete: «The Smart Stormwater Solution».
43. Erickson, J. UNI Project Uses New Pervious Concrete – Courier, October 15, 2007.
44. Rapp, C. A. «Permeable Concrete for Drainable Pavement Bases».
45. Kevern, J., Wang, K., Suleimen, M. T., and Schaefer, V. R., Iowa State «Pervious Concrete Construction: Methods and Quality Control».
46. L. K. Crouch, J. P. Hendrix, A. Sparkman, and D. Badoe «Variability of Fresh and Hardened Voids of Pervious Concrete».
47. Youngs, A., «Pervious Concrete—The California Experience», California Nevada Cement Promotion Council.
48. Paine, J. «Portland Cement Pervious Pavement Construction» - Concrete Construction, Vol. 37 no. 9, 4p, (1992).
49. Wolfersberger, C., Member ICC and Certified Green Builder Proper Installation of Pervious Concrete - 2008 Charger Enterprises Inc.
50. Wolfersberger, C., «Soil and Base Preparation of pervious concrete» - 2008 Charger Enterprises Inc.
51. Wolfersberger, C., «Placement, Curing, Contractors» - 2008 Charger Enterprises Inc.
52. Mehta P., Monteiro P., «Σκυρόδεμα: Μικροδομή, Ιδιότητες και Υλικά» Εκδόσεις Κλειδάριθμος, σελ 291-317.
53. Τσακαλάκης Κ. «Τεχνολογία Παραγωγής Τσιμέντου και Σκυροδέματος» Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μεταλλειολόγων και Μεταλλουργών, Αθήνα, Μαΐος 2010.
54. Τσίμας Σ., Τσιβιλής Σ., Επιστήμη και Τεχνολογία Τσιμέντου, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2004.
55. Τσίμας Σ., Δομικά Υλικά (Τσιμέντο – Ασβέστης – Σκυρόδεμα - Κονιάματα), Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2001.
56. Οικονόμου Χ.Μ., Τεχνολογία του Σκυροδέματος, Τρίτη Έκδοση, Αναθεωρημένη σύμφωνα με τους νέους ελληνικούς και ευρωπαϊκούς κανονισμούς, 2003.
57. EN 206-1, Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity, CEN, Brussels, 2000.

58. Μιχάλης Π., Δημητρίου Σ., ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ, ΑΤΕΙ Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη 2007.
59. ΕΛΟΤ 408:1979. Δοκιμές των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των αδρανών.
60. ΝΚΤΣ-97: Νέος Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος.
61. Λιάπης Ι., ΤΕΧΝΗΤΑ ΑΔΡΑΝΗ: Η ΑΠΟΔΟΤΙΚΗ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΓΙΑ ΑΣΦΑΛΕΣΤΕΡΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ, ΑΕΙΦΟΡΟΣ Εταιρία Επεξεργασίας Μετάλλων ΑΕ.
62. Μιχάλης Π., Δημητρίου Σ., ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ, ΑΤΕΙ Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη 2007.
63. Λιάπης Ι., Στρατής Χ., Η πρόοδος στην ανακύκλωση βιομηχανικών παραπροϊόντων, ΑΕΙΦΟΡΟΣ Α.Ε.
64. Maslehuddin M., Sharif A., Shameem M., Ibrahim M., Barry M.S., «Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate», Center for Engineering Research, Research Institute, King Fahd University of Petroleum and Minerals.
65. Etzeberria M., Pacheco C., Meneses J.M., Berridi I., «Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates», Department of Construction Engineering, Polytechnic University of Catalonia, Spain.
66. Manso J., Polanco J., Losanez M., Gonzalez J., «Durability of concrete made with EAF slag as aggregate», Civil Engineering Department, Escuela Politecnica Superior, University of Burgos, Spain.
67. Pellegrino C., Gaddo V., «Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slag as aggregate», Department of Structural and Transportation Engineering, University of Padova, Italy.
68. Commission Decision 2001/118/EC of 16 January 2001 amending Decision 2000/532/EC as regards the list of wastes.
69. Γκαλιμπένης Χ.-Τ. και Τσίμας Σ., «Διαχείριση οικοδομικών απορριμμάτων – Η παρούσα κατάσταση στην Ελλάδα», Πρακτικού 1ου συνεδρίου για την αξιοποίηση βιομηχανικών παραπροϊόντων στη δόμηση (ΕΒΙΠΑΡ), σελ. 367-374, Θεσσαλονίκη, 2005.
70. Symonds Group Ltd, ARGUS, Consulting Engineers and Planners and PRC Bouwcentrum, «Report to DGXI: Construction and Demolition Management Practices and their Economic Impacts», Brussels, Belgium, 1999.
71. Αβραμίκος Η., «Διαχείριση των αποβλήτων που προέρχονται από κατασκευές και κατεδαφίσεις – Ανάλυση της υφιστάμενης κατάστασης στην Ελλάδα», Διπλωματική Εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, 2002.
72. Κουτάντου Π., «Διαχείριση – ανακύκλωση δομικών αδρανών αποβλήτων από την κατασκευή και κατεδάφιση οικοδομικών και τεχνικών έργων. Η περίπτωση της Ελλάδας», Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., 2004.

73. Akash R., Kumar N. J., Sudhir M., «Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete», Department of CE, IIT Kanpur, India.
74. Poon C.S., Kou S.C., Lam L., «Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks», Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong.
75. Paravithana S., Mohajerani A., «Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete», School of Civil & Chemical Engineering, RMIT University, Melbourne, Australia.
76. Πασχάλη-Μάνου Κ., Τσομπανίδης Χ., Λουκά Γ., Ταβουλάρης Γ., Χατζηαυγουστής Θ. «Αδρανή απόβλητα, ανακύκλωση και διάθεση: η εφαρμογή στη διαχειριστική μελέτη στερεών απόβλητων στη ν. Λέσβο», Heleco '05, ΤΕΕ, Αθήνα, 3-6 Φεβρουαρίου 2005.
77. Γκαλμπένης Χ.Τ., «Διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησης οικοδομικών απορριμμάτων στην παραγωγή κλίνκερ τσιμέντου», Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ 2008.
78. <http://www.euroslag.com>.
79. ΟΔΗΓΙΑ 2007/60/ΕΚ του ευρωπαϊκού κοινοβουλίου και του συμβουλίου, 23ης Οκτωβρίου 2007.
80. EN 12620:2013 «Aggregates for concrete».
81. BS EN 12390-8:2000: «Testing hardened concrete. Depth of penetration of water under pressure».
82. Ε 105-86: «Προδιαγραφές Εργαστηριακών Δοκιμών Εδαφομηχανικής», δημοσιευμένες στο Φύλλο της Εφημερίδας της Κυβερνήσεως Φ.Ε.Κ. αρ. 955/31-12-86, τεύχος δεύτερο.
83. BS 1881-122:2011 «Testing concrete, Part 122: Method for determination of water absorption».
84. ASTM D 516-68 (1974): Tests for Sulfate Ion in Water and Wastewater.
85. Νόμος 3199/2003 «Προστασία και διαχείριση των υδάτων - Εναρμόνιση με την Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2000». (ΦΕΚ Α' 280/9.12.2003).
86. Richardson A., Coventry K., Bacon J., «Freeze/thaw durability of concrete with recycled demolition aggregate compared to virgin aggregate concrete», School of the Built Environment at University of Northumbria, Newcastle upon Tyne, UK, 2010.
87. Κορωνάιος Αιμ., Πουλάκος Γ., «Τεχνικά Υλικά Τόμος 3», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2005.
88. Νικολάου Ι., Μαυροειδής Π., Παναγιωτούλας Ι., Κόντης Π., «Επίδραση κάμψης και επανευθυγράμμισης στην συμπεριφορά συγκολλημένων ράβδων καλύβων οπλισμού σκυροδέματος», 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, 21-23/10/ 2009, Πάφος, Κύπρος.

89. Bansa, H. (1992). Accelerated aging tests in conservation research: Some ideas for a future method. *Restaurator* 13.3, 114-137.
90. Bégin, P. L. & Kaminska, E. (2002). Thermal accelerated ageing test method development. *Restaurator* 23, 89-105.
91. Batterham, I & Rai, R. (2008). A comparison of artificial ageing with 27 years of natural ageing. 2008 AICCM Book, Paper and Photographic Materials Symposium, 81-89.
92. Τάσιος Θ., Αλιγιζάκη Κ., «Ανθεκτικότητα οπλισμένου σκυροδέματος», Αθήνα 1993.

Παράρτημα

ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Προσωπικά Στοιχεία

Όνοματεπώνυμο: Γεωργία Βαρδάκα

Ημερομηνία Γεννήσεως: 20 Νοεμβρίου 1984

Διεύθυνση Κατοικίας: Πιερίας 11, Τ.Κ. 12136, Περιστέρι, Αθήνα

Αριθμός Τηλεφώνου: 6979473139

e-mail: georgiavar@gmail.com

Εκπαίδευση-Σεμινάρια

Σπουδές :

2003 – 2008

Σχολή Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π (βαθμός πτυχίου Λίαν Καλώς)

2008-σήμερα

Σχολή Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π, Τομέας Χημικών Επιστημών
Εκπόνηση Διδακτορικής Διατριβής με υποτροφία από πρόγραμμα του ΕΣΠΑ (Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος II)

Θέμα διδακτορικής διατριβής: “ Διαπερατό Σκυρόδεμα: Ανάπτυξη, Σχεδιασμός, Μελέτη Ιδιοτήτων και Περιβαλλοντικά Οφέλη ”
Επιβλέπων: Σ. Τσίμας Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Διπλωματική Εργασία

«Χρήση Ιπτάμενων Τεφρών Ως Πρώτων Υλών Στην Σύνθεση Φαρίνας Τσιμέντου», Σχολή Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π, Αθήνα 2008 (βαθμός: 10/10)

Επαγγελματική Εμπειρία

- * 29/10/2007-30/11/2007: Πρακτική Άσκηση στον Εθνικό Οργανισμό Φαρμάκων
- * Μάρτιος 2008-σήμερα: Χημικές αναλύσεις και ποιοτικός έλεγχος υλικών Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας Ε.Μ.Π.

Εκπαιδευτική Εμπειρία

- * Μάρτιος 2008- σήμερα: Σχολή Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π, Τομέας Χημικών Επιστημών
Επικουρική διδασκαλία και εποπτεία στα εργαστήρια των προπτυχιακών φοιτητών στο πεδίο της «Ανόργανης και Αναλυτικής

Χημείας», «Προχωρημένη Ανόργανη Χημεία» καθώς και στο μάθημα «Τεχνική Ανόργανων και Ηλεκτροχημικών Βιομηχανιών».

- * Μάρτιος 2008- σήμερα: Σχολή Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π, Τομέας Χημικών Επιστημών
Επίβλεψη Διπλωματικών εργασιών

Ξένες Γλώσσες

- * Αγγλικά : επιπέδου Proficiency
- * Γαλλικά : επιπέδου Sorbonne 2

Ειδικές Γνώσεις

- * E.C.D.L. core
- * Χρήση αναλυτικών - ειδικών οργάνων (Θερμοζυγός - DTA/TG, DSC, Περιθλασίμετρο Ακτίνων Χ -XRD, Φασματοφωτόμετρο Φθορισμού Ακτίνων Χ - XRF, Φασματοσκόπιο Ατομικής Απορρόφησης - AAS, Φούρνοι Υψηλών Θερμοκρασιών, Κοκκομετρικός Αναλυτής (συσκευή Malvern), Συσκευή Blaine, Οπτικό Μικροσκόπιο, Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο)

Δημοσιεύσεις-Ανακοινώσεις

1. S.Tsimas, G.Vardaka and M.Zervaki, "Composing cement raw mix by using fly and bottom high calcium ashes" EUROCOALASH conference 5- 9 October 2008 in Warsaw, Poland.
2. S.Tsimas, G.Vardaka and M.Zervaki, "The preselection of high calcium fly ashes as the first step for their further evaluation" EUROCOALASH conference 5- 9 October 2008 in Warsaw, Poland.
3. Γ. Βαρδάκα, Μ.Ζερβάκη, Μ. Δαρδαβίλα, Σ. Αντίοχος, Χ.Τ. Γκαλμπένης και Σ. Τσίμας "Μεγιστοποίηση της χρήσης ιπτάμενων και υγρών λιγνιτικών τεφρών στην βιομηχανία τσιμέντου" Συνέδριο Χημικής Μηχανικής, Πάτρα 3-5 Ιουνίου 2009.
4. Γ. Βαρδάκα "Διερεύνηση της προσθήκης οικοδομικών αποβλήτων σε διαπερατά σκυροδέματα. Πρώτη προσέγγιση". 1-3 Ιουνίου 2009, Συνέδριο ΕΒΙΠΑΡ Αιανή Κοζάνης.
5. Γ. Βαρδάκα, Μ. Ζερβάκη, Μ. Δαρδαβίλα, Δ. Μπότσιος, Σ. Αντίοχος, Χ-Τ. Γκαλμπένης και Σ. Τσίμας, " Χρήση Ιπτάμενων και Υγρών Λιγνιτικών Τεφρών στην Βιομηχανία Τσιμέντου. " 1-3 Ιουνίου 2009, Συνέδριο ΕΒΙΠΑΡ Αιανή Κοζάνης.
6. Σ. Τσίμας, Χ-Τ Γκαλμπένης, Γ. Βαρδάκα, Μ. Ζερβάκη " Διαχείριση αποβλήτων δομικών υλικών με στόχο την αειφορία. Σχεδιασμός νέων δομικών υλικών και ανάπτυξη νέων μεθόδων." Τιμητική Έκδοση για τον καθηγητή Ε.Μ.Π. Νικόλαο Σπυρέλλη (2009).

- 7.** G.Vardaka, C-T. Galbenis and S.Tsimas, “Evaluation of Construction and Demolition Wastes as Aggregates in Pervious Concrete.” Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies 28 – 30 June 2010, Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italy.
- 8.** G.Vardaka, K. Thomaidis, C. Leptokaridis and S.Tsimas, “Use of Steel Slag as Coarse Aggregate for the production of Pervious Concrete” 6th SDEWES Conference 25-29 September 2011, Dubrovnik Croatia.
- 9.** Vardaka G., Leptokaridis C. AND Tsimas S., “Study of Pervious Concrete Mix Design”, Cimento Beton Dunyasi / Cement and Concrete World No. 97, May/June 2012, pp. 72-77.
- 10.** Γ. Βαρδάκα, Χ. Μπαϊράμης, Χ. Λεπτοκαρίδης, Σ. Τσίμας, «Μελέτη της ανθεκτικότητας σε κύκλους ψύξης-απόψυξης διαπερατού σκυροδέματος με παραπροϊόντα και οικοδομικά απόβλητα», 3^ο Συνέδριο ΕΒΙΠΑΡ Θεσσαλονίκη, 24-25 Σεπτεμβρίου 2012.
- 11.** Tsimas Stamatis, Moutsatsou Angeliki, Zervaki Monika, Drosou Christina Amalia, Karakasi Olga, Papadopoulos Achilleas, Masavetas Ilias, Tsimas Emmanouil, Vardaka Georgia, Karamberi Alexandra, Vavyloni Katerina “Statistical analysis as a key for the selection of suitable fractions of lignite fly ashes towards their further exploitation” Proc. of 3rd EuroCoalAsh Conference, 26-27 September 2012, Thessaloniki Greece
- 12.** G. Vardaka, C. Leptokaridis, S. Tsimas, “Production of Pervious Concrete by using Construction and Demolition Wastes” Third International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, Vienna, Austria, 3-6 October 2012
- 13.** Vardaka G. , Alamanou D., Leptokaridis C. and Tsimas S. “Study of the Porosity of Different Pervious Concrete Mix Designs” ”, Cimento Beton Dunyasi / Cement and Concrete World, No. 101, January/ February 2013, pp. 51-63
- 14.** Vardaka G. , Leptokaridis C., Vlysidis A. and Tsimas S. “Study of the behaviour of pervious concrete in extreme conditions” Innovations in Concrete Construction” 5-12/3/2013 Jalandhar, Punjab India.
- 15.** Γ. Βαρδάκα, Χ. Λεπτοκαρύδης και Σ. Τσίμας, «Μελέτη Συνθέσεων Διαπερατού Σκυροδέματος : από την εργαστηριακή κλίμακα στην πιλοτική εφαρμογή» 9ο Πανελλήνιο Επιστημονικό Συνέδριο Χημικής Μηχανικής, 23 - 25 Μαΐου 2013.
- 16.** G.Vardaka, K. Thomaidis, C. Leptokaridis and S.Tsimas, “Use of Steel Slag as Coarse Aggregate for the production of Pervious Concrete”, Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (in press)

Λοιπό συγγραφικό έργο

Συλλογική Έκδοση, ΟΔΗΓΟΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΑΣΚΗΣΕΩΝ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ, Συντονισμός Έκδοσης: Α. Μουτσάτσου, Κ. Κορδάτος, Ε.Μ.Π., Σχολή Χημικών Μηχανικών, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2011 (διανέμεται στο μάθημα « Ανόργανη Χημεία » 1ου Εξαμήνου της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.)

Προσωπικά Ενδιαφέροντα

- * Κινηματογράφος
- * Μουσική
- * Ταξίδια
- * Ανάγνωση λογοτεχνικών βιβλίων
- * Σκάκι