



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ Ι: ΧΗΜΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΟΡΓΑΝΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ

ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΦΥΣΙΚΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΥΡΙΑΚΟΥ ΘΩΜΑΪΔΗ

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:

Σ. Τσίμας

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Ιούλιος 2013

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	ix
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	xi
ABSTRACT.....	xii
A. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	1
1. Τσιμέντο.....	3
1.1 Ορισμός του τσιμέντου.....	3
1.2 Σύσταση του τσιμέντου.....	4
1.3 Ιδιότητες του τσιμέντου.....	5
1.4 Κατηγορίες τσιμέντου.....	8
2. Σκυρόδεμα.....	11
2.1 Ορισμός του σκυροδέματος.....	11
2.2 Πρώτες ύλες του σκυροδέματος.....	11
2.2.1 Αδρανή υλικά.....	11
2.2.1.1 Κοκκομετρική σύνθεση ή διαβάθμιση αδρανών.....	13
2.2.1.2 Καθορισμός της κοκκομετρικής διαβάθμισης.....	14
2.2.1.3 Μέγιστος κόκκος.....	15
2.2.1.4 Όρια κοκκομετρικών διαβαθμίσεων.....	15
2.2.1.5 Εναλλακτικά αδρανή.....	20
A. Σκωρία χάλυβα.....	21
A1 Εισαγωγή.....	21
A2 Παραγωγή των σκωριών ηλεκτρικού κλιβάνου.....	22
A3 Επεξεργασία της σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου.....	23
A4 Ιδιότητες των αδρανών σκωρίας.....	23
A5 Χρήσεις σκωριών.....	26
A6 Σύγκριση σκυροδέματος με χρήση σκωρίας έναντι φυσικών αδρανών.....	27
A7 Περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη.....	28
B. Οικοδομικά απόβλητα.....	29
B1 Εισαγωγή.....	29
B2 Ιδιότητες των αδρανών οικοδομικών αποβλήτων.....	30
B3 Ιδιότητες σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή.....	31
2.2.2 Νερό ανάμιξης.....	33
2.2.3 Βελτιωτικά ή χημικά πρόσμικτα (admixtures).....	34
2.2.4 Πρόσθετα συστατικά (additions).....	35
2.2.4.1 Ιδιότητες πυριτικής παιπάλης.....	35
2.2.4.2 Πλεονεκτήματα της χρήσης πυριτικής παιπάλης.....	36
2.2.4.3 Εφαρμογές της πυριτικής παιπάλης.....	36

2.3 Βασικές ιδιότητες του σκυροδέματος.....	38
2.3.1 Εργασιμότητα.....	38
2.3.2 Αντοχές.....	38
2.3.3 Ερπυσμός.....	39
2.3.4 Πορώδες.....	40
2.3.5 Διαπερατότητα.....	41
2.4 Όροι χημείας και τεχνολογίας σκυροδέματος.....	43
2.5 Ταξινόμηση σκυροδεμάτων.....	43
3. Πορώδες σκυρόδεμα.....	47
3.1 Ορισμός του πορώδους σκυροδέματος.....	47
3.2 Σύσταση πορώδους σκυροδέματος.....	48
3.3 Ιδιότητες πορώδους σκυροδέματος.....	50
3.3.1 Θλιπτικές αντοχές.....	51
3.3.2 Ποσοστό κενών χώρων / ειδικό βάρος.....	51
3.3.3 Ανθεκτικότητα.....	52
3.3.4 Ακουστική απορρόφηση.....	52
3.4 Εφαρμογές πορώδους σκυροδέματος.....	53
3.4.1 Εφαρμογές οδοποιίας.....	54
3.4.2 Άλλες εφαρμογές.....	55
3.4.3 Οικονομικά οφέλη.....	55
3.5 Τοποθέτηση πορώδους σκυροδέματος.....	57
3.5.1 Υδρολογικές μελέτες σχεδιασμού.....	57
3.5.2 Κατασκευή οδοστρώματος πορώδους σκυροδέματος.....	58
3.5.2.1 Προετοιμασία υποστρώματος.....	59
3.5.2.2 Νερό ανάμιξης.....	60
3.5.2.3 Διάστρωση-Συμπύκνωση-Φινίρισμα.....	60
3.5.2.4 Ωρίμανση.....	61
3.5.3 Συντήρηση.....	63
B. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	65
4. Τοποθέτηση θέματος.....	67
5. Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας.....	69
5.1 Έλεγχος κάθισης.....	70
5.2 Αντοχή σε θλίψη.....	71
5.3 Αντοχή σε εφελκυσμό.....	71
5.4 Αντοχή σε συνθήκες τρίψης-απότριψης.....	72
5.5 Έλεγχος υδατοπερατότητας.....	73

5.6 Υπολογισμός όγκου κενών χώρων (πορώδες).....	76
5.7 Αξιολόγηση εσωτερικού πορώδους.....	76
6. Συλλογή και χαρακτηρισμός πρώτων υλών.....	79
6.1 Πρώτες ύλες και τόπος προέλευσής.....	79
6.2 Χημική ανάλυση πρώτων υλών.....	81
6.3 Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών υλικών.....	83
6.4 Ειδικά βάρη και υδατοαπορροφητικότητα αδρανών υλικών.....	84
6.5 Ειδική επιφάνεια - πορώδες αδρανών υλικών.....	84
7. Δοκιμαστικές συνθέσεις πορώδους σκυροδέματος.....	85
8. Υποκατάσταση με εναλλακτικά αδρανή.....	103
Γ. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	107
I. ΑΝΤΟΧΕΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ.....	109
II. ΑΝΤΟΧΕΣ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ.....	112
III. ΤΡΙΨΗ - ΑΠΟΤΡΙΨΗ.....	112
IV. ΥΔΑΤΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ.....	116
V. ΟΓΚΟΣ ΚΕΝΩΝ ΧΩΡΩΝ (ΠΟΡΩΔΕΣ).....	118
Σχέση υδατοπερατότητας – πορώδους.....	121
VI. ΟΠΤΙΚΗ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ – ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΠΟΡΩΔΟΥΣ.....	122
Δ. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	129
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	133

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της υποχρεωτικής εκπόνησής της κατά το δέκατο εξάμηνο της πενταετούς φοίτησής μου στη σχολή Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο της εργασίας ήταν η παρασκευή πορώδους σκυροδέματος και ο έλεγχος των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων του. Οι πειραματικές διαδικασίες έγιναν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας και Σκυροδέματος της ΤΙΤΑΝ ΑΕ στο Καμάρι Αττικής καθώς και στο εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας του τομέα Χημικών Επιστημών του ΕΜΠ.

Από αυτή τη θέση θα ήθελα να ευχαριστήσω:

- Τον κύριο Τσίμα Σταμάτιο, καθηγητή της σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ, που μου ανέθεσε και μου εμπιστεύθηκε την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας, καθώς και για την παραπάνω από άψογη συνεργασία που είχαμε όλο αυτό το χρονικό διάστημα.
- Τη Βαρδάκα Γεωργία, υποψήφια διδάκτορα της Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ, για την ουσιαστική συμπαράσταση, τη μεγάλη υπομονή και τη πολύτιμη βοήθεια του κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας και όχι μόνο.
- Τον κύριο Λεπτοκαρίδη Χρήστο, επικεφαλής της ομάδας του Εργαστηρίου Τεχνολογίας Σκυροδέματος της ΤΙΤΑΝ ΑΕ στο Καμάρι Αττικής, καθώς και όλη την υπόλοιπη ομάδα για τη σημαντική συμβολή τους κατά το σχεδιασμό των πειραμάτων
- Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω και τους υπόλοιπους υποψήφιους διδάκτορες του εργαστηρίου Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας του τομέα Χημικών Επιστημών του ΕΜΠ, για το κλίμα φιλίας, συνεργασίας και συμπαράστασης στο οποίο με περιέβαλαν.
- Τέλος, θα ήθελα να μνημονεύσω την ηθική συμπαράσταση, την στήριξη τόσων χρόνων, την κατανόηση και το ενδιαφέρον που επέδειξαν, καθώς και τη βοήθεια που προσέφεραν η οικογένεια μου και όλοι οι φίλοι μου, ειδικότερα κατά το διάστημα της στρατιωτικής μου θητείας, χωρίς τα οποία η συγγραφή της παρούσας εργασίας θα ήταν σημαντικά δυσκολότερη.

Αθήνα, Ιούλιος 2013

Κυριάκος Θωμαΐδης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτέλεσε μία προσπάθεια παρασκευής πορώδους σκυροδέματος με ασβεστολιθικά αδρανή, καθώς και υποκατάστασή τους με εναλλακτικού τύπου στα πλαίσια της αειφόρου ανάπτυξης και της προστασίας του περιβάλλοντος. Πιο συγκεκριμένα, διερευνήθηκε μέσω δοκιμαστικών συνθέσεων η δημιουργία πορώδους σκυροδέματος με τη χρήση ασβεστόλιθου, καλύπτοντας τις απαιτήσεις των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων όπως αυτές παρουσιάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία. Στη συνέχεια, η τελική σύνθεση που προέκυψε υποκαταστάθηκε με αδρανή του παραπροϊόντος της σκωρίας χάλυβα και με αδρανή ανακυκλωμένου σκυροδέματος (οικοδομικά απόβλητα), σε διάφορα ποσοστά και μίγματα. Οι συνθέσεις υποκατάστασης που προέκυψαν αξιολογήθηκαν εκ νέου και συγκρίθηκαν μεταξύ τους βάσει των εξής ιδιοτήτων: αντοχές σε θλίψη και εφελκυσμό σε διάφορες ηλικίες, αντοχές σε συνθήκες τρίψης - απότριψης, έλεγχος υδατοπερατότητας, υπολογισμός κενών χώρων (πορώδες) και οπτική επιθεώρηση. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις πειραματικές μεθόδους, η δημιουργία πορώδους σκυροδέματος με ικανοποιητικές ιδιότητες είναι εφικτή τόσο με τη χρήση ασβεστολιθικών όσο και εναλλακτικών αδρανών. Η σκωρία χάλυβα έδειξε να βοηθάει το συγκεκριμένου τύπου σκυρόδεμα σε όλους τους τομείς, ενώ το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα 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, όχι όμως τόσο και μεταξύ τους, εκτός της περίπτωσης παρουσίας των τελευταίων στη σύνθεση. Επίσης, η ποσότητα του τσιμέντου πρέπει να είναι η ελάχιστη δυνατή στη σύνθεση και μία μικρή ποσότητα λεπτόκοκκων αδρανών (άμμος) δείχνει να βοηθάει στη συνοχή του πορώδους σκυροδέματος. Τέλος, η καλή αλλά όχι υπερβολική συμπύκνωση στο σκυρόδεμα αυτού του τύπου είναι καίριας σημασίας για τις τελικές του ιδιότητες και κυρίως για τη δημιουργία μίας σωστής και συνεχούς πορώδους δομής.

ABSTRACT

This diploma thesis, entitled “Production and Investigation of Physicomechanical Properties of Pervious Concrete” was an attempt to produce pervious concrete with limestone aggregates and their substitution by alternative ones in the context of sustainable development and environmental protection. Specifically, through pilot compositions investigated the production of pervious concrete using limestone aggregates, by covering demands of physicomechanical properties as presented in the international bibliography. Thereafter, the final composition was substituted with aggregates of the byproduct of steel slag and aggregates of recycled concrete (demolition wastes), in several percentages and mixtures. The compositions of substitution obtained was re-evaluated and compared to each other based on the following attributes: compression and tensile strength at various ages, abrasion behavior, water permeability, percentage of void content (porosity) and visual inspection. According to the results by the experimental methods, the production of porous concrete with satisfactory properties is possible with both the use of limestone and alternative aggregates. The use of steel slag showed better behavior in this type of concrete, while the recycled concrete showed better behavior mainly in abrasion but not so much in water permeability due to the large degree of compaction. Both these alternative aggregates appear to cooperate well with the conventional limestone aggregates, but not so much together, except in the case of presence of the latter in the composition. Also, the amount of cement in the mixture must be the minimum possible and a small amount of fine aggregates (sand) indicates to assist in bonding of pervious concrete. Finally, proper compaction is a very important factor for the final properties of this type of concrete, especially for the creation of a good and continuous porous structure.

Α. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. ΤΣΙΜΕΝΤΟ

1.1 Ορισμός του τσιμέντου

Σύμφωνα με το νέο πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1, που έχει τεθεί σε ισχύ στην Ελλάδα από το 2001, έχουμε τον ακόλουθο ορισμό για το τσιμέντο (CEM):

Τσιμέντο είναι μια υδραυλική κονία, δηλαδή ένα λεπτοαλεσμένο ανόργανο υλικό, το οποίο όταν αναμειχθεί με νερό σχηματίζει μια πάστα που λόγω των αντιδράσεων ενυδάτωσης πήζει και σκληρύνεται, έχοντας έκτοτε την ικανότητα να διατηρεί τις αντοχές της και τη σταθερότητά της κάτω από το νερό.

Το τσιμέντο που καλύπτεται από το πρότυπο EN 197-1 και ονομάζεται CEM μπορεί, όταν αναμειχθεί με κατάλληλη αναλογία νερού και αδρανών, να δώσει σκυρόδεμα ή κονίαμα που διατηρεί την εργασιμότητά του για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και στη συνέχεια αποκτά συγκεκριμένα επίπεδα αντοχών σε συνάρτηση με το χρόνο, ενώ παράλληλα έχει αενάως σταθερότητα όγκου.

Προβλέπονται οι εξής πέντε τύποι κοινών τσιμέντων με πολλές υποδιαιρέσεις βάσει του προτύπου αυτού:

A)CEM I - τσιμέντα Portland

B)CEM II - σύνθετα τσιμέντα Portland

Γ)CEM III - σκωριοτσιμέντα

Δ)CEM IV - ποζολανικά τσιμέντα και

E)CEM V - σύνθετα τσιμέντα.

Στο πρότυπο αυτό κάθε χώρα συμπεριλαμβάνει εκτός του κλίνκερ, τα δικά της κύρια συστατικά τα οποία είναι υποπροϊόντα βασικών βιομηχανικών δραστηριοτήτων της ή αποτελούν μέρος του ορυκτού της πλούτου και τα οποία «συνεργάζονται» με το τσιμέντο, βελτιώνοντας κατά περίπτωση ορισμένες από τις ιδιότητες του.

Εν αντιθέσει, ο Ελληνικός κανονισμός τσιμέντου που ίσχυε με σχετικό Προεδρικό Διάταγμα από το 1980 έως το 2002 προβλέπει τις εξής κατηγορίες τσιμέντου:

A) Το τύπου I τσιμέντο (Πόρτλαντ)

B) Το τύπου II (Πόρτλαντ με έως 20% τεχνητή ή φυσική ποζολάνη)

Γ) Το τύπου III (Ποζολανικό τσιμέντο Πόρτλαντ) με ποσοστό ποζολάνης που κυμαίνεται από 20 έως 40% και τέλος

Δ) Το τύπου IV που περιλαμβάνει τα τσιμέντα που είναι ανθεκτικά στην επίδραση των θεικών αλάτων.

Εκτός από τα κοινά τσιμέντα που καλύπτονται από το Ευρωπαϊκό και Ελληνικό πρότυπο, στο εμπόριο κυκλοφορούν διάφοροι τύποι τσιμέντου που δε συμμορφώνονται με αυτά, που έχουν εξειδικευμένες ιδιότητες, διαφοροποιημένη παραγωγή και καλύπτουν απαιτήσεις που δεν προδιαγράφονται στα κοινά τσιμέντα. [1]

1.2 Σύσταση του τσιμέντου

Το τσιμέντο συνίσταται από τα κύρια συστατικά του (main constituents), τα δευτερεύοντα συστατικά του (minor additional components - mac), το θεικό ασβέστιο και τα πρόσθετα (additives).

Κύρια συστατικά είναι ειδικά επιλεγμένα ανόργανα υλικά που προστίθενται σε κάποια φάση της παραγωγικής του διαδικασίας στο τσιμέντο (συνήθως κατά την άλεση), σε αναλογία που ξεπερνά το 5% κατά βάρος της συνολικής ποσότητας κυρίων και δευτερευόντων συστατικών. Στα κύρια συστατικά περιλαμβάνεται: το κλίνκερ του τσιμέντου Portland (K), το οποίο έχει και τον κυρίαρχο ρόλο, η κοκκοποιημένη σκωρία υψικαμίνων (S), διάφορα ποζολανικά υλικά φυσικά (P) ή τεχνητά (Q), διάφορες τέφρες πυριτικές (V) ή ασβεστούχες (W), burnt shale (ψημένος σχιστόλιθος) (T), ασβεστόλιθος (L,LL) και silica fume (πυριτική παιπάλη) (D).

Δευτερεύοντα συστατικά είναι ειδικά επιλεγμένα ανόργανα υλικά που προστίθενται σε κάποια φάση της παραγωγικής του διαδικασίας στο τσιμέντο (συνήθως κατά την τελική άλεση), σε αναλογία που δεν ξεπερνά το 5% κατά βάρος της συνολικής ποσότητας κυρίων και δευτερευόντων συστατικών. Ωστόσο, πολλές χώρες κρατούν το ποσοστό αυτό στο 3%. Ως mac κυρίως χρησιμοποιείται ένα από τα συστατικά, η προσθήκη των οποίων γίνεται σε υψηλότερο ποσοστό στους αντίστοιχους τύπους τσιμέντου, όπως σκωρία υψικαμίνων, φυσική ποζολάνη ηφαιστειογενούς προέλευσης, βιομηχανική ποζολάνη, ιπτάμενες τέφρες, ασβεστόλιθοι, burnt shale, silica fume και φίλλερ. Ας σημειωθεί, ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δευτερεύον το κύριο συστατικό που θα προσδιορίσει και το τύπο του τσιμέντου.

Τα γεμιστικά (fillers) είναι ειδικά επιλεγμένα λεπτόκκοκα ανόργανα υλικά, αδρανή ή μη, που στοχεύουν στη βελτίωση των φυσικών ιδιοτήτων του τσιμέντου.

Το θειικό ασβέστιο προστίθεται στα άλλα συστατικά του τσιμέντου κατά την τελική άλεση του κλίνκερ με σκοπό να ρυθμίσει την πήξη του τσιμέντου. Το ακριβές ποσοστό προσθήκης εξαρτάται από την περιεκτικότητα των κύριων συστατικών σε SO_3 καθώς και από τα θειικά του καυσίμου, συνήθως όμως κυμαίνεται μεταξύ 4-5% του βάρους του κλίνκερ. Μπορεί να προστεθεί, επίσης, ως γύψος ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) που είναι και η περισσότερο συνηθισμένη μορφή, καθώς επίσης και ως ημιϋδρική ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) ή ως ανυδρίτης (CaSO_4) που πολλές φορές υπάρχει ως παραπροϊόν διαφόρων βιομηχανικών διαδικασιών.

Πρόσθετα νοούνται τα συστατικά που προστίθενται σε μικρά ποσοστά (συνήθως μικρότερα από 1%) και τα οποία έχουν σκοπό να βελτιώσουν είτε την παραγωγική διαδικασία είτε τις ιδιότητες του τσιμέντου. Η ποσότητα των προσθέτων δεν πρέπει να υπερβαίνει σε ξηρή βάση το 1% κ.β. του τσιμέντου για ανόργανα πρόσθετα (εκτός από πιγμέντα) ή το 0.5% για οργανικά πρόσθετα. Τα πρόσθετα αυτά δεν πρέπει να προκαλούν διάβρωση του οπλισμού ή να επιβαρύνουν τις ιδιότητες του τσιμέντου καθώς και των σκυροδεμάτων ή των κονιαμάτων που προκύπτουν από αυτό. [1,2]

1.3 Ιδιότητες του τσιμέντου

Οι ιδιότητες ή απαιτήσεις του τσιμέντου διαχωρίζονται στις εξής κατηγορίες: *φυσικές, χημικές και μηχανικές.*

Σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες, το πρότυπο EN 197-1 προσδιορίζει τις ακόλουθες τιμές για τις θλιπτικές αντοχές (compressive strength) του τσιμέντου: 32.5 N/mm², 42.5 N/mm², και 52.5 N/mm². Για τις πρώιμες αντοχές το πρότυπο ορίζει δύο κατηγορίες: τις κανονικές πρώιμες και τις υψηλές πρώιμες αντοχές που χαρακτηρίζονται από το γράμμα R και οι οποίες είναι τουλάχιστον 10 N/mm² μεγαλύτερες από κανονικές. Η αύξηση των ορίων των πρώιμων αντοχών που παρατηρείται στο συγκεκριμένο πρότυπο, σε σχέση κυρίως με το ΠΔ, πηγάζει από τις κατασκευαστικές ανάγκες για αυξημένες πρώιμες αντοχές.

Όσον αφορά τις φυσικές ιδιότητες, μετριέται και ελέγχεται η σταθερότητα του όγκου (μέσω της διόγκωσης του τσιμέντου), ο χρόνος έναρξης της πήξης του τσιμέντου (και χρόνος πήξης μόνο στο ΠΔ), ενώ πλέον δεν προβλέπεται κανένας έλεγχος λεπτότητας, όπως συνέβαινε στο ΠΔ. Αυτό συμβαίνει στο νέο πρότυπο, καθότι θεωρείται περιττός ο τελικός έλεγχος λεπτότητας του τσιμέντου, τη στιγμή που η ποιότητά του ελέγχεται άμεσα από τις αντοχές του που είναι και η βασική απαίτηση ποιότητας. Βέβαια, προφανώς και οι βιομηχανίες τσιμέντου εξακολουθούν να ελέγχουν και να ρυθμίζουν την παραγωγική τους διαδικασία με

διάφορες μετρήσεις λεπτότητας, καθώς η τελευταία επηρεάζει άμεσα την ανάπτυξη των αντοχών.

Ως προς τις χημικές ιδιότητες τέλος, ελέγχονται μόνο η απώλεια πύρωσης, το αδιάλυτο υπόλειμμα, τα SO₃, τα χλωριόντα και η ποζολανικότητα. Ο έλεγχος του MgO που γινόταν στο τσιμέντο σύμφωνα με το ΠΔ-με όριο 6%, πλέον με το νέο κανονισμό μεταφέρεται στο κλίνκερ που πλέον δεν πρέπει να ξεπερνάει το 5%. [1,2]

Στους παρακάτω πίνακες 1.1 και 1.2 φαίνονται οι απαιτήσεις για τις ιδιότητες του τσιμέντου όπως ορίζονται από το πρότυπο EN 197-1:

Πίνακας 1.1 Μηχανικές και φυσικές απαιτήσεις τσιμέντου (prEN 197-1)

Κατηγορία αντοχών	Αντοχή σε θλίψη (N/mm ²)			Αρχή πήξης (min)	Διόγκωση (mm)
	2 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες		
32,5N	-	≥16	32,5-52,5	≥75	≤10
32,5R	≥10	-	32,5-52,5		
42,5N	≥10	-	42,5-62,5	≥60	
42,5R	≥20	-	42,5-62,5		
52,5N	≥20	-	≥52,5	≥45	
52,5R	≥30	-	≥52,5		

Πίνακας 1.2 Χημικές απαιτήσεις τσιμέντου (prEN 197-1)

<i>Ιδιότητα</i>	<i>Πρότυπο</i>	<i>Τύπος τσιμέντου</i>	<i>Κατηγορία αντοχών</i>	<i>Απαίτηση % w/w</i>
Απώλεια πύρωσης	EN 196-2	CEM I CEM II	Όλες	≤5,0%
Αδιάλυτο υπόλειμμα	EN 196-2	CEM I CEM II	Όλες	≤5,0%
Θειικά (SO ₃)	EN 196-2	CEM I	32,5N	≤3,5%
		CEM II (2)	32,5R	
		CEM IV	42,5N	
		CEM V	42,5R	≤4,0%
			52,5N 52,5R	
	CEM III (3)	Όλες		
Χλωριόντα	EN 196-21	Όλοι οι τύποι (4)	Όλες	≤0,10%
Ποζολανικότητα	EN 196-5	CEM IV	Όλες	Πρέπει να ικανοποιεί τη δοκιμή ποζολανικότητας

(1) Οι απαιτήσεις δίνονται % w/w

(2) Το CEM II/B-T μπορεί να περιέχει έως 4.5% SO₃

(3) Το CEM III/C μπορεί να περιέχει έως 4.5% SO₃

(4) Το CEM III μπορεί να περιέχει χλωριόντα πάνω από 0.10%

1.4 Κατηγορίες τσιμέντου

Τα τελευταία χρόνια και στα πλαίσια της έκδοσης κοινών Ευρωπαϊκών κανονισμών για όλες τις χώρες της CEN (Committee Europeenne de Normalisation) στην οποία μετέχει και η Ελλάδα, έχουν διαμορφωθεί σειρές προτύπων που αφορούν το τσιμέντο και το σκυρόδεμα.

Στο σχετικό πρότυπο EN 197-1 που αναφέρεται στην ενοποίηση των επιμέρους τύπων τσιμέντου που παράγονται στις διάφορες χώρες την Ευρώπης, προβλέπονται οι πέντε τύποι και οι πολλές υποδιαιρέσεις που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Ως τσιμέντα Portland, ορίζονται αυτά των δύο πρώτων τύπων I και II, όπου το κλίνκερ συμμετέχει σε ποσοστό μεγαλύτερο του 65%.

Το πρότυπο EN 197-1 ορίζει επίσης τις φυσικές, χημικές και μηχανικές απαιτήσεις για τα τσιμέντα (τόσο για τα κοινά όσο και για τα σύνθετα), όπως αναφέρθηκαν παραπάνω. Φαίνεται ότι ο τύπος τσιμέντου που θα επικρατήσει σταδιακά στην Ευρώπη είναι τα σύνθετα τσιμέντα Portland.

Στον Πίνακα 1.3 δίνονται τα 27 προϊόντα στην οικογένεια των κοινών τσιμέντων, όπως αυτά προδιαγράφονται από το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1. [1,2]

Πίνακας 1.3 Τα 27 προϊόντα στην οικογένεια των κοινών τσιμεντών

Κύριοι τύποι	Ονομασία των 27 προϊόντων (τύποι κοινών τσιμεντών)		Σύνθεση (επι της % κατά μάζα) ^{α)}										Δευτερεύοντα στατικά			
			Κύρια συστατικά													
			Κλίνκερ K	Σκορία υφικα- μίνου S	Πυριτική παιπάλη β) D	Ποζολάνη Φυσική P Φυσική ψημένη Q		Ιπτάμενες τέφρες Πυριτι V Ασβε- στούχος W		Ψημένος σχιστόλιθος T	Ασβεστό- λιθος L LL					
CEM I	Τσιμέντο Πόρτλαντ	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5		
CEM II	Τσιμέντο Πόρτλαντ με	CEM II/A-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5		
		CEM II/B-S	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5		
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με πυριτική παιπάλη	CEM II/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5		
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με ποζολάνη	CEM II/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	0-5		
		CEM II/B-P	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	0-5		
		CEM II/A-Q	80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	0-5		
		CEM II/B-Q	65-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	0-5		
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με ιπτάμενη τέφρα	CEM II/A-V	80-94	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0-5		
		CEM II/B-V	65-79	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0-5		
		CEM II/A-W	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0-5		
		CEM II/B-W	65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	0-5		
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με ψημένο σχιστόλιθο	CEM II/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	0-5		
		CEM II/B-T	65-79	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	0-5		
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με ασβεστόλιθο	CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5		
		CEM II/B-L	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	0-5		
		CEM II/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	0-5		
		CEM II/B-LL	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	0-5		
	Τσιμέντο Πόρτλαντ- σύνθετο ^{γ)}	CEM II/A-M	80-94	<-----6-20----->										0-5		
CEM II/B-M		65-79	<-----21-35----->										0-5			
CEM III	Σκοριοτσιμέντο	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5		
		CEM III/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5		
		CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5		
CEM IV	Ποζολανικό τσιμέντο ^{γ)}	CEM IV/A	65-89	—	<-----11-35----->										0-5	
		CEM IV/B	45-64	—	<-----36-55----->										0-5	
CEM V	Σύνθετο τσιμέντο ^{γ)}	CEM V/A	40-64	18-30	—	<-----18-30----->										0-5
		CEM V/B	20-39	31-50	—	<-----31-50----->										0-5

α) Οι τιμές του πίνακα αναφέρονται στο σύνολο των κορίων και δευτερευόντων συστατικών
β) Το ποσοστό της πυριτικής παιπάλης περιορίζεται στο 10%
γ) Στα τσιμεντά Πόρτλαντ-σύνθετα CEM II/A-M και CEM II/B-M, στα ποζολανικά τσιμεντά CEM IV/A και CEM IV/B και στα σύνθετα τσιμεντά CEM V/A και CEM V/B τα κύρια συστατικά πλην του κλίνκερ πρέπει να δηλώνονται στην ονομασία του τσιμεντού (για παράδειγμα βλ. κεφάλαιο 8).

2. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

2.1 Ορισμός του σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα είναι ένα τεχνητό δομικό υλικό το οποίο παρασκευάζεται με την ανάμιξη τσιμέντου, αδρανών και νερού και το οποίο στερεοποιείται με τη χημική ένωση του νερού με το τσιμέντο (ενυδάτωση), εγκλωβίζοντας μέσα στη μάζα του τα αδρανή υλικά.

Με τον όρο αδρανή περιλαμβάνονται γενικά η άμμος, το γαρμπίλι και τα σκύρα (χαλίκια). Εκτός από τα υλικά αυτά, με το νέο Ευρωπαϊκό πρότυπο (EN 206), προβλέπεται η προσθήκη και άλλων συστατικών (βελτιωτικά πρόσθετα - admixtures και πρόσθετα συστατικά - additions), με τη χρήση των οποίων τροποποιούνται συγκεκριμένες ιδιότητες του σκυροδέματος.

Για την παρασκευή σκυροδέματος καλής ποιότητας, απαιτείται η καλή διαλογή και σύνθεση των συστατικών του καθώς επίσης και η παρασκευή, διάστρωση και συντήρηση αυτού σύμφωνα με τις ισχύουσες προδιαγραφές. Στην Ελλάδα, σχετικές οδηγίες υπάρχουν στον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ-97), όπου επίσης δίνονται πολλές πληροφορίες για τον έλεγχο της ποιότητας του σκυροδέματος. [2,3,4]

2.2 Πρώτες ύλες του σκυροδέματος

Εκτός από το τσιμέντο (βλ. Κεφάλαιο 1) στις πρώτες ύλες περιλαμβάνονται, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα αδρανή, το νερό ανάμιξης και τα πρόσθετα ή πρόσμικτα, που χωρίζονται στα βελτιωτικά ή χημικά πρόσθετα και στα πρόσθετα συστατικά.

2.2.1 Αδρανή υλικά

Τα αδρανή υλικά (aggregates) συνίστανται από άθραυστες ή θραυστές φυσικές ή τεχνητές ορυκτές ύλες κατάλληλες για χρήση στο σκυρόδεμα. Διακρίνονται, βάσει του προτύπου EN 197-6, σε κανονικού βάρους με πυκνότητα σωματιδίων μεταξύ 2000-3000 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.

Οι κόκκοι 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. [2,3,4,5]

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 κόκκων 30-70 mm [6]

2.2.1.1 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 τσιμεντοπολτό, με αποτέλεσμα την μείωση του κόστους και αύξηση της ογκοσταθερότητας του σκυροδέματος. Επιπλέον δοσμένη 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 και από τον Ν.Κ.Τ.Σ. είναι η γερμανική σειρά των DIN 4187 και 4188 και η αμερικανική σειρά κόσκινων της προδιαγραφής ASTM E 11. [6]

Πίνακας 2.1 Πρότυπα γερμανικά κόσκινα

Κόσκινα	
Όνομασία	Άνοιγμα
0,25	250 μm
1	1 mm
2	2 mm
4	4 mm
8	8 mm
16	16 mm
31,5 (32)	31,5 (32) mm
63 (64)	63 (64) mm

Πίνακας 2.2 Πρότυπα αμερικάνικα κόσκινα

Κόσκινα	
Όνομασία	Άνοιγμα
0,25*	250 μm
No 50	300 μm
No 30	600 μm
No 16	1,18 mm
No 8	2,36 mm
No4	4,75 mm
3/8"	9,5 mm
1/8"	12,5 mm
3/4"	19,0 mm
1"	25,0 mm
1½"	37,5 mm
2"	50 mm

* Το κόσκινο αυτό ανήκει στη σειρά των πρότυπων γερμανικών κοσκίνων

2.2.1.2 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 να αποφευχθεί η απόμειξη του μείγματος(δηλ. διαχωρισμός των κόκκων μιας διάστασης από το υπόλοιπο μείγμα), πρέπει η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών να είναι συνεχής. [6]

2.2.1.3 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 τσιμεντοπολτό, καθόσον χρειάζεται να διαβραχεί μικρότερη επιφάνεια αδρανών, και επομένως τόσο φθηνότερο είναι το σκυρόδεμα.

Εντούτοις η οικονομία σε τσιμέντο 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. [6]

2.2.1.4 Όρια κοκκομετρικών διαβαθμίσεων

Οι προδιαγραφές των διαφόρων χωρών καθορίζουν περιοχές κοκκομετρικών διαβαθμίσεων μέσα στις οποίες συνιστάται ή όχι να βρίσκονται κοκκομετρικές καμπύλες. Ο Ν.Κ.Τ.Σ ορίζει με βάση ξένες προδιαγραφές και με την μακρόχρονη εμπειρία με τα ελληνικά αδρανή τις περιοχές ή υποζώνες των πινάκων 2.3-2.9 και των διαγραμμάτων 2.1-2.4, και απαιτεί για οπλισμένο σκυρόδεμα η κοκκομετρική καμπύλη να βρίσκεται στην υποζώνη Δ. [6]

Πίνακας 2.3 Όρια κοκκομετρικής διαβαθμίσεως μίγματος θραυστών αδρανών μέγιστου κόκκου 63 mm, για τη σειρά των Γερμανικών Κοσκίνων DIN 4188 και DIN 4187.

Κόσκινα		Διερχόμενα %	
Όνομασία	Άνοιγμα	Υποζώνη Δ	Υποζώνη Ε
0,25	250 μm	2-11	11-16
1	1 mm	6-26	26-39
2	2 mm	11-34	34-49
4	4 mm	19-42	42-59
8	8 mm	30-56	56-71
16	16 mm	46-71	71-84
31,5	31,5 mm	72-90	90-96
63	63 mm	100	100

Πίνακας 2.4 Όρια κοκκομετρικής διαβαθμίσεως μίγματος θραυστών αδρανών μέγιστου κόκκου 31,5 mm, για τη σειρά των Γερμανικών Κοσκίνων DIN 4188 και DIN 4187.

Κόσκινα		Διερχόμενα %		
Όνομασία	Άνοιγμα	Υποζώνη Δ	Υποζώνη Ε	Υποζώνη Ζ
0,25	250 μm	2-13	13-17	17-23
1	1 mm	10-30	30-44	44-58
2	2 mm	18-40	40-55	55-67
4	4 mm	30-52	52-67	67-76
8	8 mm	45-68	68-80	80-86
16	16 mm	70-87	87-93	93-96
31,5	31,5 mm	100	100	100

Πίνακας 2.5 Όρια κοκκομετρικής διαβαθμίσεως μίγματος θραυστών αδρανών μέγιστου κόκκου 16 mm, για τη σειρά των Γερμανικών Κοσκίνων DIN 4188 και DIN 4187.

Κόσκινα		Διερχόμενα %	
Όνομασία	Άνοιγμα	Υποζώνη Δ	Υποζώνη Ε
0,25	250 μm	2-13	13-18
1	1 mm	12-32	32-49
2	2 mm	21-42	42-62
4	4 mm	36-63	63-80
8	8 mm	60-85	85-94
16	16 mm	100	100

Πίνακας 2.6 Όρια κοκκομετρικής διαβαθμίσεως μίγματος θραυστών αδρανών μέγιστου κόκκου 8 mm, για τη σειρά των Γερμανικών Κοσκίνων DIN 4188 και DIN 4187.

Κόσκινα		Διερχόμενα %	
Όνομασία	Άνοιγμα	Υποζώνη Δ	Υποζώνη Ε
0,25	250 μm	5-11	11-21
1	1 mm	21-42	42-57
2	2 mm	36-57	57-71
4	4 mm	61-74	74-85
8	8 mm	95-100	100

Πίνακας 2.7 Όρια κοκκομετρικής διαβαθμίσεως μίγματος θραυστών αδρανών μέγιστου κόκκου 1.5'', για τη σειρά των Αμερικανικών Κοσκίνων ASTM E 11.

Κόσκινα		Διερχόμενα %	
Όνομασία	Άνοιγμα	Υποζώνη Δ	Υποζώνη Ε
0,25*	250 μm	2-11	11-16
No 50	300 μm	3-13	13-19
No 30	600 μm	4-20	20-30
No 16	1,18 mm	7-29	29-42
No 8	2,36 mm	12-36	36-51
No 4	4,75 mm	21-45	45-62
3/8''	9,5 mm	34-60	60-74
1/2''	12,5 mm	41-66	66-80
3/4''	19,0 mm	57-75	75-87
1''	25,0 mm	60-84	84-93
1½''	37,5 mm	95-100	100
2''	50,0 mm	100	100

* Το κόσκινο αυτό ανήκει στη σειρά των πρότυπων γερμανικών κοσκίνων

Πίνακας 2.8 Όρια κοκκομετρικής διαβαθμίσεως μίγματος θραυστών αδρανών μέγιστου κόκκου 1'', για τη σειρά των Αμερικανικών Κοσκίνων ASTM E 11.

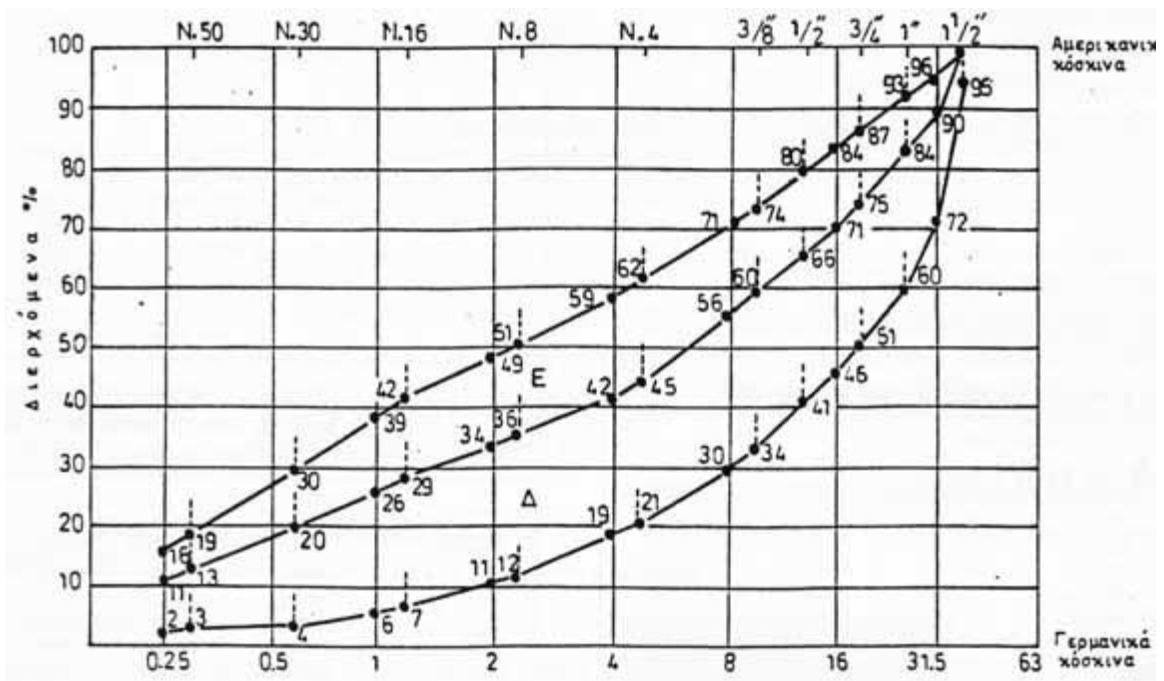
Κόσκινα		Διερχόμενα %		
Όνομασία	Άνοιγμα	Υποζώνη Δ	Υποζώνη Ε	Υποζώνη Ζ
0,25*	250 μm	2-13	13-17	17-23
No 50	300 μm	3-14	14-20	20-27
No 30	600 μm	6-23	23-34	34-44
No 16	1,18 mm	12-32	32-47	47-60
No 8	2,36 mm	21-43	43-58	58-69
No 4	4,75 mm	33-56	56-70	70-78
3/8''	9,5 mm	51-73	73-84	84-89
1/2''	12,5 mm	61-80	80-89	89-93
1''	25,0 mm	95-100	100	100
1½''	37,5 mm	100	100	100

* Το κόσκινο αυτό ανήκει στη σειρά των πρότυπων γερμανικών κοσκίνων

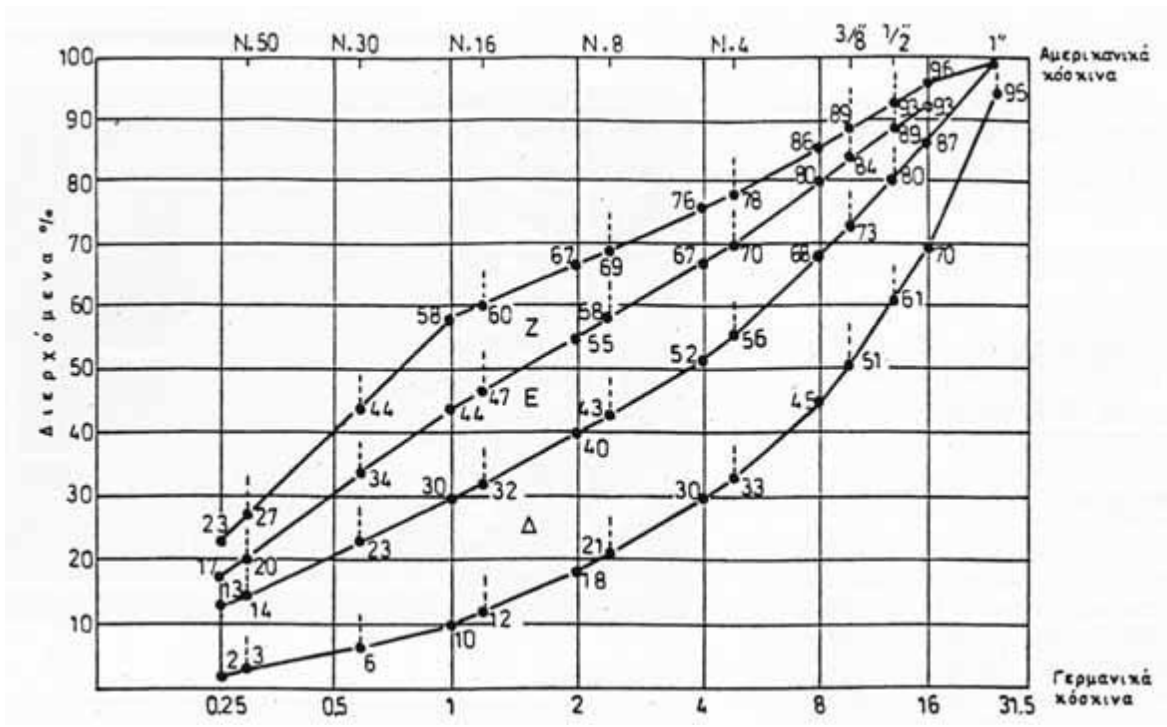
Πίνακας 2.9 Όρια κοκκομετρικής διαβαθμίσεως μίγματος θραυστών αδρανών μέγιστου κόκκου 3/8", για τη σειρά των Αμερικανικών Κοσκίνων ASTM E 11.

Κόσκινα		Διερχόμενα %	
Όνομασία	Άνοιγμα	Υποζώνη Δ	Υποζώνη Ε
0,25*	250 μm	5-11	11-21
No 50	300 μm	7-15	15-26
No 30	600 μm	15-30	30-43
No 16	1,18 mm	25-45	45-60
No 8	2,36 mm	42-61	61-74
No 4	4,75 mm	69-80	80-88
3/8"	9,5 mm	100	100

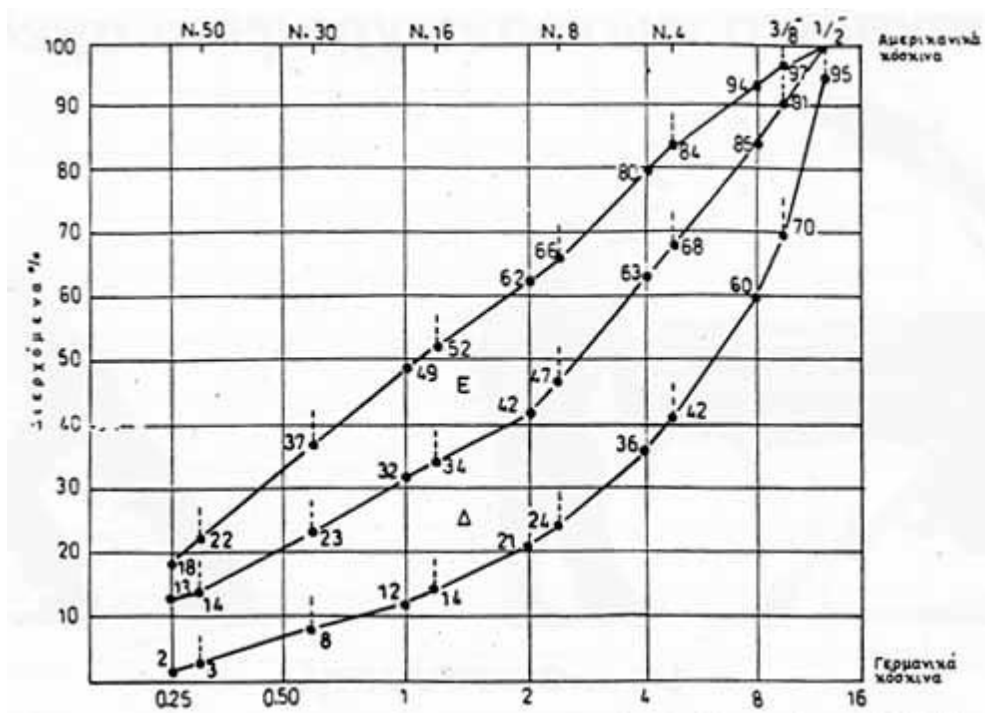
* Το κόσκινο αυτό ανήκει στη σειρά των πρότυπων γερμανικών κοσκίνων



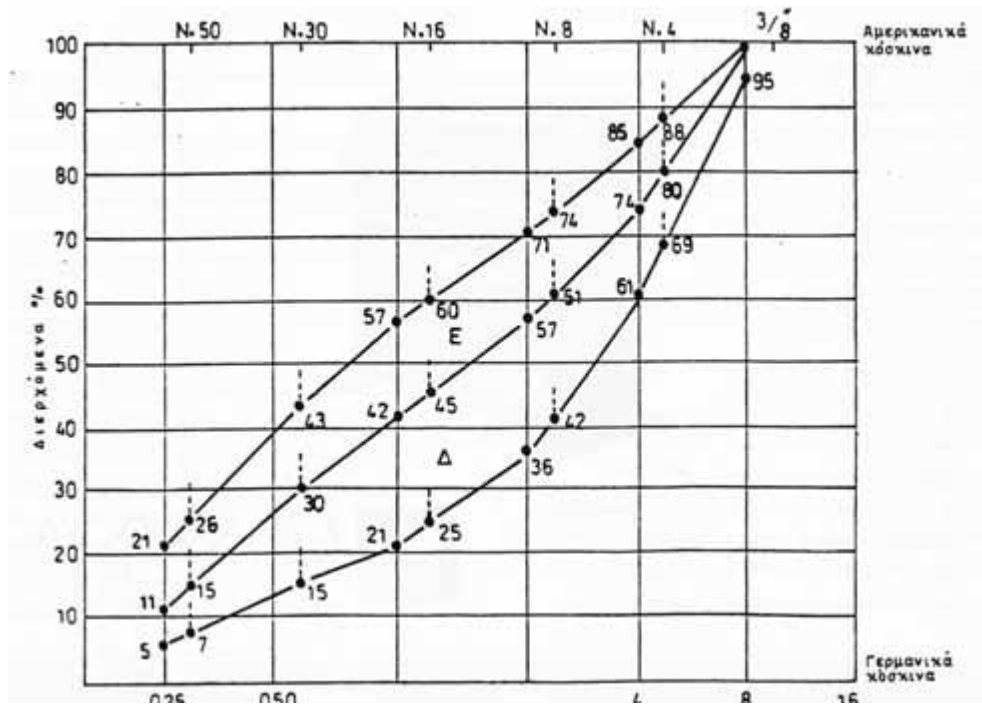
Διάγραμμα 2.1 Όρια κοκκομετρικής διαβαθμίσεως μίγματος αδρανών μέγιστου κόκκου 63 mm ή 1 1/2".



Διάγραμμα 2.2 Όρια κοκκομετρικής διαβαθμίσεως μίγματος αδρανών μέγιστου κόκκου 31,5 mm ή 1''.



Διάγραμμα 2.3 Όρια κοκκομετρικής διαβαθμίσεως μίγματος αδρανών μέγιστου κόκκου 16 mm ή 1/2''.



Διάγραμμα 2.4 Όρια κοκκομετρικής διαβαθμίσεως μίγματος αδρανών μέγιστου κόκκου 8 mm ή 3/8''.

2.2.1.5 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 αυτά που προέρχονται από τη σκωρία χάλυβα και τα οικοδομικά απόβλητα, παρουσιάζονται συνοπτικά στις επόμενες παραγράφους.

A. Σκωρία χάλυβα

A1 Εισαγωγή

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 American Society for Testing Materials (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. [8]

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 σε ΑΤΤΙΚΗ Οδό, Εγνατία Οδό, ΠΑΘΕ με πιο πρόσφατη την ολοκλήρωση του έργου στο Πέταλο του Μαλιακού.

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) και 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. [7]

A2 Παραγωγή 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 άλεσης (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 κλιβάνου από όπου και απομακρύνονται. Για την επίτευξη του διαχωρισμού απαιτείται συνεχής ανάδευση του υλικού με την προσθήκη οξυγόνου από το κάτω μέρος του κλιβάνου. 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 συγκρατούν την αποδιοργανωμένη τους άμορφη δομή και παραμένουν σε ένα χημικά σταθερό, άμορφο και υαλώδες στάδιο, έχοντας υπολανθάνουσες υδραυλικές ιδιότητες. Η απότομη ψύξη των σκωριών είναι επιβεβλημένη για να αποκτήσει η σκωρία την υαλοειδή δομή. [8]

A3 Επεξεργασία της σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου

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

Η παραγωγική διαδικασία αποτελείται από σειρά μηχανικών διεργασιών εν ξηρώ, 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). [8]

A4 Ιδιότητες των αδρανών σκωρίας

i. 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. [8]

Πίνακας 2.10 Φυσικές Ιδιότητες Σκωρίας Ηλεκτρικού Κλιβάνου

Ιδιότητα	Τιμή
Ειδικό βάρος	3,2 - 3,6
Μονάδα βάρους	1600 - 1920 kg/m ³
Απορροφητικότητα	3%

ii. Χημικές ιδιότητες

Από χημικής άποψης η σκωρία είναι ένα μίγμα άσβεστου, 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. [8]

Πίνακας 2.11 Χημική Σύσταση Σκωρίας Ηλεκτρικού Κλιβάνου

Στοιχείο	Σύσταση (%)
CaO	40 - 52
SiO ₂	10 - 19
FeO	10 - 40
MgO	5 - 10
Al ₂ O ₃	1 - 3
S	0,5 - 1
Metallic Fe	0,5 - 10

iii. 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. [8]

Πίνακας 2.12 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 Επιμηκών	EI=10

iv. Θερμικές ιδιότητες

Τα αδρανή σκωρίας είναι καλοί αγωγοί της θερμότητας και διατηρούν την θερμότητα για σημαντικά μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε σύγκριση με τα συμβατικά φυσικά αδρανή. Η ιδιότητα τους αυτή τα καθιστά καταλληλότερα για επισκευή ασφαλικών μιγμάτων θερμής ανάμιξης σε χαμηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος. [8]

v. 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. [8]

A5 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. [8]

A6 Σύγκριση σκυροδέματος με χρήση σκωρίας έναντι φυσικών αδρανών

Έρευνες έχουν καταδείξει την 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. [9]
- 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. [10]
- 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. [9]
- Ένα σημαντικό μειονέκτημα των αδρανών σκωρίας, όμως, είναι το υψηλό τους πορώδες που αποτελεί εμπόδιο για την κατασκευή σκυροδέματος ανθεκτικό σε συνθήκες ψύξης (ψυχρά κλίματα). Ενδεχόμενη βελτίωση της στον τομέα αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί με την προσθήκη ειδικών προσμίξεων (αερακτικοί παράγοντες). [12] Βελτίωση αυτού του προβλήματος μπορεί επίσης να συμβεί με την αποθήκευση και “ωρίμανση” 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 ενυδάτωση της και να σταθεροποιηθεί χημικά και φυσικά, γεγονότα απαραίτητα για την ασφαλή χρήση στην παραγωγή σκυροδέματος. [11]

A7 Περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη

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

- Η εξοικονόμηση ενέργειας.
- Η μη μορφολογική επιβάρυνση του φυσικού τοπίου από την εξόρυξη 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 θέση η ευρωπαϊκή κοινότητα. Γενικά όλα τα στερεά προϊόντα της επεξεργασίας είναι εκμεταλλεύσιμα, καθώς η επεξεργασία αποτελείται ουσιαστικά από θραύση και διαχωρισμό-διαβάθμιση των αδρανών. [8]

B. Οικοδομικά απόβλητα

Τα απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων (Construction & Demolition wastes) αποτελούν σημαντικό μέρος της συνολικής παραγωγής στερεών αποβλήτων στον κόσμο και το μεγαλύτερο μέρος τους καταλήγει στις χωματερές. 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). [13] 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. [14]

Τα ανακυκλωμένα αδρανή υλικά σκυροδέματος (Recycled Construction Aggregates) παράγονται με την ελάττωση του μεγέθους του κατεδαφισμένου σκυροδέματος. Τα RCA διαφέρουν από τα φυσικά αδρανή υλικά, λόγω της τσιμεντόπαστας που είναι συνδεδεμένη με την επιφάνεια των αρχικών αδρανών, μετά τη διαδικασία της ανακύκλωσης. Αυτή η εξαιρετικά πορώδης πάστα τσιμέντου και άλλες μολύνσεις συμβάλλουν στη χαμηλότερη πυκνότητα των σωματιδίων και στο μεγαλύτερο πορώδες, στη διακύμανση της ποιότητας των RCA και στη μεγαλύτερη απορρόφηση του νερού. [15]

B1 Εισαγωγή

Η προστασία του περιβάλλοντος και η διατήρηση των ραγδαία μειούμενων φυσικών πόρων θα πρέπει να είναι η ουσία της αειφόρου ανάπτυξης. Η συνεχής βιομηχανική ανάπτυξη δημιουργεί σοβαρά προβλήματα διάθεσης των αποβλήτων κατασκευών και κατεδαφίσεων. Ενώ, από τη μια πλευρά, υπάρχει σημαντική έλλειψη φυσικών αδρανών για την παραγωγή νέου σκυροδέματος, από την άλλη τα τεράστια ποσά κατεδαφισμένου σκυροδέματος που παράγεται από παρωχημένες κατασκευές δημιουργεί σοβαρή οικολογικό και περιβαλλοντικό πρόβλημα. Ένας από τους τρόπους να λυθεί αυτό το πρόβλημα είναι να χρησιμοποιηθούν αυτά τα «απόβλητα» ως αδρανή σκυροδέματος. Αυτή η «ανακύκλωση» συνολικά θα μπορούσε επίσης να είναι μια αξιόπιστη εναλλακτική λύση στη χρησιμοποίηση φυσικών αδρανών σε κατασκευές σκυροδέματος. Επίσης, σε κάποιες χώρες, υπάρχουν περιπτώσεις επιβολής εισφοράς για τη διάθεση αυτών των αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής.

Αρχικά, η ανακύκλωση των αποβλήτων κατεδάφισης πρώτες πραγματοποιήθηκε μετά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο στη Γερμανία. Από τότε, η ερευνητική εργασία που πραγματοποιήθηκε σε διάφορες χώρες έχει αποδείξει επαρκή υπόσχεση για την ανάπτυξη

της χρήσης των αποβλήτων από κατασκευές ως συστατικό νέου σκυροδέματος. Απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων θα μπορούσαν να είναι σπασμένο σκυρόδεμα, τούβλα από κτίρια, ή σπασμένο πεζοδρόμιο. Έτσι, Ανακυκλωμένα Αδρανή [Recycled Aggregates (RA)] θα μπορούσαν να προέλθουν από την κατεδάφιση κτιρίων, υποστηριγμάτων γεφυρών, διαδρόμους αεροδρομίων, και υποστρωμάτων δρόμου. Σκυρόδεμα που παρασκευάζεται με τη χρήση τέτοιων αδρανών υλικών αναφέρεται ως σκυρόδεμα ανακυκλωμένων αδρανών [recycled aggregate concrete (RAC)]. [13]

B2 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. [13]

i. 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 προσμείξεων. 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 χαλάσματα σε κομμάτια περίπου 50 χιλιοστών και στο δεύτερο θραυστήρα, ηλεκτρομαγνήτες χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση τυχόν ξένων προσμείξεων μετάλλων στο υλικό. Ο δεύτερος θραυστήρας χρησιμοποιείται στη συνέχεια για να μειώσει περαιτέρω το υλικό σε μέγεθος σωματιδίων περίπου 14-20 mm. Πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα κατά τη θραύση υλικών από τούβλα, επειδή περισσότερα λεπτόκοκκα παράγονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας θραύσης τους από ό, τι κατά τη διάρκεια της θραύσης του σκυροδέματος ή των πρωτογενών αδρανών υλικών. [13]

ii. 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 στα αρχικά αδρανή. Αυτό, στην πραγματικότητα, επηρεάζει επίσης την εργασιμότητα και άλλες ιδιότητες του νέου σκυροδέματος. [13]

iii. Αντοχή στην τριβή

Πολύ περιορισμένη βιβλιογραφία είναι διαθέσιμη σχετικά με την αντοχή στην τριβή των ανακυκλωμένων αδρανών (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. [13]

B3 Ιδιότητες σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή

Μίγματα σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή (RAC) 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 του RAC 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 βάση μίας συγκεκριμένης απαίτησης αντοχής.
- Όταν χονδρόκοκκα ανακυκλωμένα αδρανή συνδυάζονται με φυσική άμμο, μπορεί να υποθεθεί 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 σκυρόδεματα.

- Για να επιτευχθεί σε ένα μίγμα με ανακυκλωμένα αδρανή η ίδια κάθιση με το συμβατικό σκυρόδεμα, η ελεύθερη περιεκτικότητα σε νερό θα πρέπει να είναι περίπου 5% περισσότερη από ό,τι για τα συμβατικά σκυρόδεμα.
- Η άμμος σε συνολικό ποσοστό για τα RAC είναι η ίδια όπως όταν χρησιμοποιούνται φυσικά αδρανή (NA).
- Η δημιουργία δοκιμαστικών μιγμάτων είναι υποχρεωτική και οι κατάλληλες προσαρμογές ανάλογα με την πηγή και τις ιδιότητες των ανακυκλωμένων αδρανών (RA) θα πρέπει να γίνονται για να αποκτήσουν τα τελευταία την απαιτούμενη εργασιμότητα, τον κατάλληλο λόγο w/c και τις κατάλληλες αντοχές για το τελικό RAC. [13]

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 (RILEM, 1994), 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 σκυρόδεμα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για γενικούς εφαρμογές, εκτός από υδατοφράκτες. Επίσης, στην Ιαπωνία, η JIS συνέταξε τεχνική έκθεση, TRA 0006 "ανακυκλωμένο σκυρόδεμα 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. [13]

2.2.2 Νερό ανάμιξης

Το νερό συνιστά ένα από τα δύο ενεργά συστατικά του σκυροδέματος. Μαζί με το τσιμέντο παίρνει μέρος σε σειρά χημικών αντιδράσεων που οδηγούν, με τη δημιουργία ένυδρων κρυστάλλων, στην πήξη και την σκλήρυνση του μίγματος. Η βασική απαίτηση σύστασης του νερού είναι να μην περιέχει συστατικά που μπορούν να βλάψουν ή να επηρεάσουν τις αντιδράσεις ενυδάτωσης.

Για το νερό που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του σκυροδέματος μπορούμε γενικά να είμαστε περισσότερο ανεκτικοί παρά για τα νερά που δρουν εξωτερικά και μόνιμα. Αφενός γιατί η ποσοστιαία αναλογία του νερού αναμίξεως, και συνεπώς και κάθε ξένης ουσίας μέσα σε αυτό, είναι μικρή και αφετέρου γιατί οι ουσίες αυτές δρουν ώσπου να εξαντληθούν. Στην περίπτωση όμως εξωτερικών νερών, όπως το θαλασσινό ή τα νερά των αποχετεύσεων, η δράση τους είναι μόνιμη και προσθετική καθώς και η ποσότητα των επιβλαβών ουσιών ανεξάντλητη, αφού τα νερά αυτά ανανεώνονται συνεχώς.

Οι κυριότερες από τις χημικές ουσίες που έχουν δυσμενή επίδραση στην εξέλιξη των χημικών αντιδράσεων, με αποτέλεσμα είτε τη μείωση της τελικής αντοχής είτε/και την καθυστέρηση της πήξης είναι οι εξής:

- Η ζάχαρη. Ο τρόπος με τον οποίο δρα η ζάχαρη δεν είναι απόλυτα γνωστός, θεωρείται πάντως μία από τις πιο επιβλαβείς ουσίες, γιατί ανακόπτει τελείως τη χημική αντίδραση ανάμεσα στο τσιμέντο και το νερό και επομένως εμποδίζει την πήξη του σκυροδέματος.
- Τα οξέα (π.χ. H_2CO_3 ή άλλα οργανικής προέλευσης)
Τα οξέα δεσμεύουν το ασβέστιο που είναι απαραίτητο για την πήξη. Η βλαπτικότητα τους γίνεται περισσότερο αισθητή σε τσιμέντα με μικρή περιεκτικότητα σε ασβέστιο.
- Τα λάδια και τα λίπη, τα οποία δρουν μηχανικά περιβάλλοντας τους κόκκους του τσιμέντου και παρεμποδίζοντας με αυτό τον τρόπο την επαφή τους με τα μόρια του νερού.
- Οι οργανικές ουσίες, που γενικά επηρεάζουν ανασταλτικά την πήξη.

Το χρησιμοποιούμενο νερό πρέπει να ανταποκρίνεται στην προδιαγραφή EN 1008, ενώ αν γίνεται χρήση νερού από ανακύκλωση, αυτή πρέπει να υπακούει στο παράρτημα Α της ίδιας προδιαγραφής. [2,3]

2.2.3 Βελτιωτικά ή χημικά πρόσμικτα (*admixtures*)

Τα υλικά αυτά προστίθενται, σε μικρές ποσότητες σε σχέση με τη μάζα του τσιμέντου, κατά τη διάρκεια της ανάμιξης του σκυροδέματος, με σκοπό την τροποποίηση των ιδιοτήτων κυρίως του νωπού αλλά και του σκληρυμένου σκυροδέματος.

Βάσει τη κυρίας δράσης τους τα πρόσμικτα κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες:

- Ρευστοποιητικά, τα οποία αυξάνουν τη ρευστότητα του σκυροδέματος μειώνοντας την επιφανειακή τάση του νερού και τις δυνάμεις συνοχής μεταξύ των κόκκων του τσιμέντου.
- Αερακτικά, τα οποία αυξάνουν τον περιεχόμενο αέρα του σκυροδέματος και την ρευστότητα αυτού.
- Επιβραδυντικά, τα οποία απομονώνουν τις ταχύπηκτες αργλικές ενώσεις και κυρίως το C₃A.
- Επιταχυντικά, τα οποία διευκολύνουν την ενυδάτωση του C₃A ή/και των πυριτικών ενώσεων.
- Στεγανωτικά

Εκτός από τα παραπάνω, υπάρχουν και άλλα πρόσμικτα, όπως αντιπαγετικά, διογκωτικά και αντιδιαβρωτικά. [2,3,5]

2.2.4 Πρόσθετα συστατικά (*additions*)

Τα συγκεκριμένα υλικά είναι λεπτομερώς διαμερισμένα ανόργανα υλικά, τα οποία χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα με απώτερο σκοπό είτε στη βελτίωση κάποιων ιδιοτήτων του είτε στην επίτευξη συγκεκριμένων ιδιοτήτων.

Σύμφωνα με το EN 206 διακρίνονται δύο κατηγορίες προσθέτων:

- Τα σχεδόν αδρανή πρόσθετα (τύπου I, όπου υπάγονται τα φύλλερ αδρανών με προδιαγραφές σύμφωνες με το EN 12620 και τα χρώματα)
- Τα πρόσθετα που έχουν ποζολανικές ή λανθάνουσες υδραυλικές ιδιότητες (τύπου II) Σε αυτά περιλαμβάνονται οι ιπτάμενες τέφρες, σύμφωνα με το EN 450, και η πυριτική παιπάλη, κατά EN 13263. [2,3,5]

Ειδικότερα για την **πυριτική παιπάλη (Silica Fume)**, η οποία είναι ένα παραπροϊόν της πυριτικής και σιδηροπυριτικής βιομηχανίας, είναι πολύ αποτελεσματική στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη υψηλής αντοχής και υψηλής απόδοσης σκυροδέματος. [16]

Η πυριτική παιπάλη, είναι μία πολύ ενεργή ποζολάνη σε μορφή σκόνης. Ένα σκυρόδεμα το οποίο περιέχει πυριτική παιπάλη σε προμελετημένη δοσολογία, με σωστή διάστρωση και αγωγή, θα παρουσιάζει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα και πυκνότητα από ένα κοινό σκυρόδεμα. Το σκυρόδεμα αυτό, θα παρουσιάζει αυξημένη αντοχή σε θειικά, χλωριόντα, οξέα, παγοπληξία, απότριψη και τη καταστροφική αντίδραση αλκαλίων – πυριτικών.

Εναλλακτικά η πυριτική παιπάλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίτευξη υψηλών αντοχών αντικαθιστώντας το τσιμέντο. [17]

2.2.4.1 Ιδιότητες πυριτικής παιπάλης

i. Φυσικές ιδιότητες

Περισσότερο από το 95% των σωματιδίων της πυριτικής παιπάλης είναι λεπτότερα από 1 μm. Οι συνήθεις φυσικές ιδιότητες δίνονται στον Πίνακα 2.11. [16]

Πίνακας 2.13 Τυπικές φυσικές ιδιότητες της πυριτικής παιπάλης (Silica Fume and Association, 2005).

Ιδιότητα	Τιμή
Μέγεθος σωματιδίων (τυπικό)	<1 μm
Μέση πυκνότητα (χύμα)	480–720 kg/m ³
Ειδικό βάρος	2.22
Ειδική επιφάνεια (BET)	13,000–30,000 m ² /kg

ii. Χημική σύνθεση

Η πυριτική παιπάλη έχει μια πολύ υψηλή περιεκτικότητα σε άμορφο διοξείδιο του πυριτίου και αποτελείται από πολύ λεπτά σφαιρικά σωματίδια. Μικρές ποσότητες σιδήρου, μαγνησίου, και αλκαλικών οξειδίων μπορούν να βρεθούν στη σύστασή της. [16] (Πίνακας 2.14). [17]

Πίνακας 2.14 Τυπική χημική σύσταση πυριτικής παιπάλης (BASF Silica Fume RWRC)

Οξείδια	Ποσοστό %	Όρια EN 13263-1 (min / max)
SiO ₂	96.40	85.00
Ελεύθερο πυρίτιο	0.31	0.40
CaO	0.35	1.00
SO ₃	0.049	2.00
Cl	0.007	0.30
L.O.I. (1000 °C)	3.01	4.00
Al ₂ O ₃	0.75	-
F ₂ O ₃	0.56	-
K ₂ O	0.43	-
Na ₂ O	0.04	-
LOI	max 3.5	-

2.2.4.2 Πλεονεκτήματα της χρήσης πυριτικής παιπάλης

- Υψηλή πρώιμη αντοχή σε θλίψη
- Υψηλή αντοχή, αντοχή στην κάμψη, και μέτρο ελαστικότητας
- Αυξημένη ανθεκτικότητα
- Υψηλή δύναμη συγκόλλησης
- Βελτιωμένη ανθεκτικότητα
- Πολύ χαμηλή διαπερατότητα στην εισβολή νερού και χλωρίου
- Αυξημένη αντοχή στην τριβή
- Υψηλή αντοχή σε χημική προσβολή από χλωρίδια, οξέα, νιτρικά και θειικά, κλπ.
- Υψηλή ηλεκτρική αντίσταση και χαμηλή διαπερατότητα [16]

2.2.4.3 Εφαρμογές της πυριτικής παιπάλης

- Υψηλής απόδοσης σκυρόδεμα (High performance concrete - HPC) για χρήση σε αυτοκινητόδρομους, γέφυρες, χώρους στάθμευσης, θαλάσσιες κατασκευές και επιστρώσεις καταστρωμάτων.
- Υψηλής αντοχής σκυρόδεμα ενισχυμένο με πυριτική παιπάλη για μεγαλύτερη ευελιξία στο σχεδιασμό

- Φυσητό σκυρόδεμα (Shotcrete) για χρήσεις όπως σταθεροποίηση βράχων, εσωτερική επένδυση σηράγγων ορυχείων, και αποκατάσταση της αλλοίωσης γεφυρών και θαλάσσιων κολώνων.
- Ενέσεις τσιμεντοκονιάματος.
- Επισκευαστικά προϊόντα– η πυριτική παιπάλη χρησιμοποιείται σε μια ποικιλία από τσιμεντοειδή προϊόντα επισκευής. [16]

Διαφόρων ειδών μελέτες γύρω από την πυριτική παιπάλη έχουν οδηγήσει στα εξής συμπεράσματα:

- Η προσθήκη πυριτικής παιπάλης (5-10%) στο σκυρόδεμα οδηγεί σε αυξημένες θλιπτικές και καμπτικές αντοχές, κυρίως στις 28 ημέρες, ανεξαρτήτως της χρήσης ή μη αερακτικών προσθέτων. Ακόμη και σε πολύ υψηλά ποσοστά βελτιώθηκαν σημαντικά οι αντοχές. Επίσης, όπως διαπιστώθηκε υπάρχει μια σταθερή αύξηση της αντοχής σε κάμψη με αύξηση του ποσοστού υποκατάστασης του τσιμέντου σε πυριτική παιπάλη. [16,18]
- Η πυριτική παιπάλη δεν έχει σημαντική επιρροή στην ελαστική αντοχή του σκυροδέματος. Όμως, η επίδρασή της στο στατικό μέτρο ελαστικότητας δεν έχει πλήρως κατανοηθεί, αλλά η αύξηση του επιπέδου υποκατάστασης σε πυριτική παιπάλη το αυξάνει. [16,18]
- Η συμμετοχή της πυριτικής παιπάλης σε υψηλά επίπεδα υποκατάστασης αυξάνει σημαντικά την αυτογενή συρρίκνωση του σκυροδέματος λόγω του εξευγενισμού του μεγέθους και της κατανομής των πόρων, γεγονός που οδηγεί σε περαιτέρω αύξηση της έντασης των τριχοειδών φαινομένων και τελικά σε μεγαλύτερη συρρίκνωση της τσιμεντόπαστας. Όμως σε υψηλά ποσοστά δείχνει το φαινόμενο να αντιστρέφεται και να υπάρχει μία αύξηση του πορώδους. [16]
- Αυξημένα ποσοστά πυριτικής παιπάλης δυσκολεύουν τη συμπύκνωση του σκυροδέματος. [16]
- Η πυριτική παιπάλη μειώνει το φαινόμενο του ερπυσμού σε σύγκριση με το απλό σκυρόδεμα. [16]
- Η έκθεση σε 210 κύκλους ψύξης-απόψυξης οδηγεί σε μειώσεις της τάξης του 10-20% στις θλιπτικές και καμπτικές αντοχές του σκυροδέματος. Η μεγαλύτερη όμως μείωση παρατηρείται σε σκυροδέματα που περιέχουν πυριτική παιπάλη. [18]

2.3 Βασικές ιδιότητες του σκυροδέματος

2.3.1 Εργασιμότητα

Με τον όρο εργασιμότητα (workability) χαρακτηρίζεται γενικά η ευκολία με την οποία είναι δυνατόν να μεταφερθεί, να διαστρωθεί και να συμπυκνωθεί το σκυρόδεμα. Σύμφωνα με άλλον ορισμό, η εργασιμότητα ορίζεται ως το έργο που απαιτείται για να υπερνικηθούν οι εσωτερικές τριβές και να επιτευχθεί πλήρης συμπύκνωση του σκυροδέματος.

Η εργασιμότητα είναι μία πολύ χρήσιμη πρακτική έννοια, καθότι αποδίδει επακριβώς αυτό που ενδιαφέρει τον κατασκευαστή κατά το χρόνο σκυροδέτησης, είναι όμως μια ιδιότητα σύνθετη που συνδέεται με άλλες ρεολογικές ιδιότητες και που δύσκολα μπορεί να αποδοθεί ποσοτικά. Τέτοιες ιδιότητες είναι οι ακόλουθες :

- η ρευστότητα, που αποδίδει την ευκολία ροής ενός υλικού. Η ρευστότητα εξαρτάται κυρίως από την ποσότητα του νερού ανάμιξης.
- Η πλαστικότητα, που αποδίδει την ικανότητα του υλικού να παραμορφώνεται χωρίς διακοπή της συνέχειάς του.
- Η συνοχή, η οποία είναι το αποτέλεσμα των δυνάμεων που έλκουν τα μόρια του υλικού μεταξύ τους και επομένως είναι μία από τις ιδιότητες που συντελούν στην πλαστικότητα.
- Η συμπυκνωσιμότητα, δηλαδή η δυνατότητα του υλικού να συμπυκνωθεί και που εξαρτάται από τα περιεχόμενα κενά και από τον αρχικό βαθμό συμπύκνωσης.

Η εργασιμότητα δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα. Για το σκοπό αυτό έχουν προταθεί μέθοδοι με τις οποίες μετριέται μία ή περισσότερες από τις παραπάνω ιδιότητες. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρέως είναι αυτή της κάθισης (slump). [2]

2.3.2 Αντοχές

Η αντοχή (strength) του σκυροδέματος σε μηχανική καταπόνηση θεωρείται ως η σημαντικότερη ιδιότητά του και αντιπροσωπεύει ουσιαστικά την ποιότητα του σκυροδέματος, καθώς συνδέεται άμεσα με τη δομή της ενυδατωμένης τσιμεντόπαστας.

Αντοχή ονομάζουμε γενικά τη μέγιστη τιμή της δύναμης που μπορεί να παραληφθεί και να μεταβιβαστεί από ένα στοιχειώδες τμήμα του υλικού σε γειτονικά του, χωρίς καταστροφή ή επικίνδυνη παραμόρφωσή του.

Η αντοχή είναι αποτέλεσμα της ενυδάτωσης του τσιμέντου και της δημιουργίας ένυδρων κρυστάλλων. Η ανάπτυξη της αντοχής είναι διαφορετική για καθένα από τα συστατικά του σκυροδέματος και για αυτό η χρονική της εξέλιξη, ιδιαίτερα στις μικρές ηλικίες, εξαρτάται από τη σύνθεση του τσιμέντου. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή είναι ο βαθμός άλεσης, δηλαδή το μέγεθος των κόκκων του καθώς και οι θερμοκρασιακές και υγρομετρικές συνθήκες του περιβάλλοντος.

Η αντοχή του σκυροδέματος σε συγκεκριμένη ηλικία, συντήρηση και θερμοκρασία θεωρείται ότι εξαρτάται κατά βάση από δύο παράγοντες: το λόγο νερού προς τσιμέντο (w/c) και το βαθμό συμπίκνωσης (degree of compaction). Και οι δύο αυτοί παράγοντες επιδρούν στο πορώδες του σκυροδέματος και σε καλά συμπτυκνωμένα σκυροδέματα το ποσοστό των κενών μειώνεται σημαντικά. Επομένως, η αντοχή του σκυροδέματος είναι συνάρτηση και του όγκου των κενών του χώρων (voids). [2,4]

2.3.3 Ερπυσμός

Ως ερπυσμός χαρακτηρίζεται η χρόνια παραμόρφωση του σκυροδέματος που προέρχεται λόγω της επίδρασης εξωτερικής δύναμης. Ονομάζεται έτσι, επειδή το υλικό μοιάζει σαν να έρπει. Συνοπτικά αναφέρουμε για τον ερπυσμό τα ακόλουθα χαρακτηριστικά :

- Το μέγεθος του ερπυσμού είναι αντιστρόφως ανάλογο προς την ποιότητα του σκυροδέματος.
- Μπορεί να φτάσει τελικά σε τιμή πολλαπλάσια της χρόνιας συστολής. Η διάρκεια του φαινομένου είναι 1 έως 10 χρόνια, αλλά συνήθως ολοκληρώνεται μετά 1 έως 2 χρόνια.
- Αυξάνεται όσο ελαττώνονται οι διαστάσεις του στοιχείου.
- Εμφανίζεται μικρότερος για τσιμέντα υψηλής αντοχής ή γρήγορης ανάπτυξης της αντοχής.
- Εξαρτάται από το είδος των αδρανών και ειδικότερα από το μέτρο ελαστικότητας αυτών. Ελαττώνεται όσο πιο χονδρόκοκκα είναι τα αδρανή.
- Εξαρτάται από τις υγρομετρικές συνθήκες του περιβάλλοντος . Αυξάνεται όσο ελαττώνεται η σχετική υγρασία.
- Ελαττώνεται όσο μεγαλύτερη είναι η ηλικία του σκυροδέματος κατά τη διάρκεια επιβολής του φορτίου. [4]

2.3.4 Πορώδες

Το σκυρόδεμα, όπως και οι φυσικοί λίθοι, δεν είναι υλικό απόλυτα συμπαγές και πλήρες, αλλά περιέχει πλήθος από μικροσκοπικές και μακροσκοπικές εσωτερικές κοιλότητες. Οι κοιλότητες αυτές είναι κενές από στερεό υλικό και ονομάζονται πόροι ή κενά και το σύνολό τους αποτελεί το πορώδες του σκυροδέματος. Οι κοιλότητες αυτές μπορεί να περιέχουν αέρα ή να είναι γεμάτες με νερό.

Το ολικό πορώδες, που χαρακτηρίζει την έκταση του πορώδους, εκφράζει το % ποσοστό ή το κλάσμα του όγκου ενός υλικού που καταλαμβάνουν οι πόροι του και δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$p = \frac{V_k}{V} = \frac{\rho - \rho_\phi}{\rho}, \text{ όπου } V_k = V - V_s$$

όπου: p : ολικό πορώδες του υλικού,

V_k : ο όγκος των πόρων (κενών),

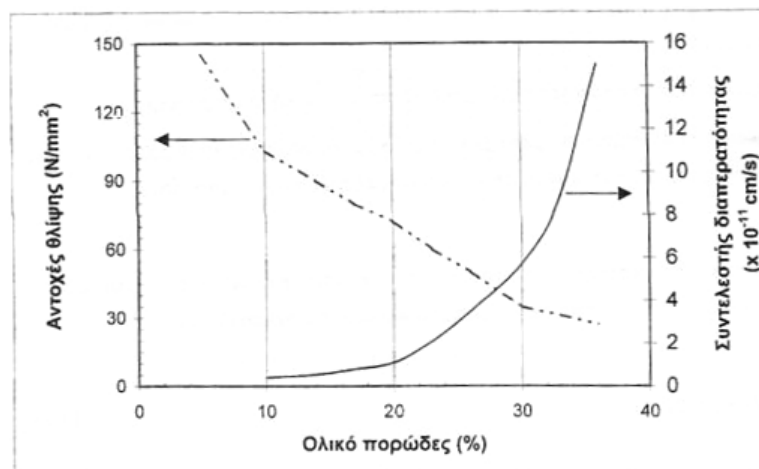
V : ο ολικός, δηλαδή ο φαινόμενος όγκος του υλικού,

V_s : ο απόλυτος όγκος του υλικού

ρ_ϕ : το φαινόμενο ειδικό βάρος του υλικού,

ρ : το απόλυτο ειδικό βάρος του υλικού.

Το πορώδες του σκυροδέματος επηρεάζει τις ιδιότητές του, κυρίως επιδρώντας στις αντοχές και στη διαπερατότητα αυτού. Η επίδραση αυτή φαίνεται στο διάγραμμα 2.5, που ακολουθεί.



Διάγραμμα 2.5 Συσχέτιση αντοχών θλίψης και διαπερατότητας με το πορώδες.

Επιπλέον, το πορώδες επηρεάζει τη χρόνια συστολή, τον ερπυσμό, την υδατοαπορροφητικότητα, την υδατοστεγανότητα, καθώς και την ανθεκτικότητα του υλικού στον παγετό.

Οι περισσότερες από τις ιδιότητες του σκυροδέματος βελτιώνονται όταν, για το ίδιο ολικό πορώδες, το μέγεθος των πόρων είναι μικρότερο (επομένως το πλήθος των πόρων, για τον ίδιο όγκο, είναι μεγαλύτερο), είναι περισσότερο ομοιόμορφα κατανομημένοι μέσα στο υλικό και το σχήμα τους πλησιάζει το σφαιρικό. [2]

2.3.5 Διαπερατότητα

Η διαπερατότητα του σκυροδέματος επηρεάζεται από την σύσταση του τσιμέντου, από την τιμή του λόγου w/c, από το βαθμό συμπίκνωσης, από την συντήρηση και από την ύπαρξη ρωγμών. Αναλυτικότερα για τον κάθε έναν από αυτούς τους παράγοντες μπορούν να αναφερθούν τα εξής:

Όταν η σύσταση του τσιμέντου στο σκυρόδεμα είναι μεγαλύτερη από 300 kg/m^3 , ο λόγος w/c είναι μικρός και έχει γίνει προσεκτική συντήρηση, τότε το σκυρόδεμα θα έχει μικρή διαπερατότητα. Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται η επίδραση διαφόρων τύπων τσιμέντου στη διαπερατότητα, για διάφορους χρόνους συντήρησης.



Διάγραμμα 2.6 Επίδραση της ποιότητας του τσιμέντου στη διαπερατότητα του σκυροδέματος.

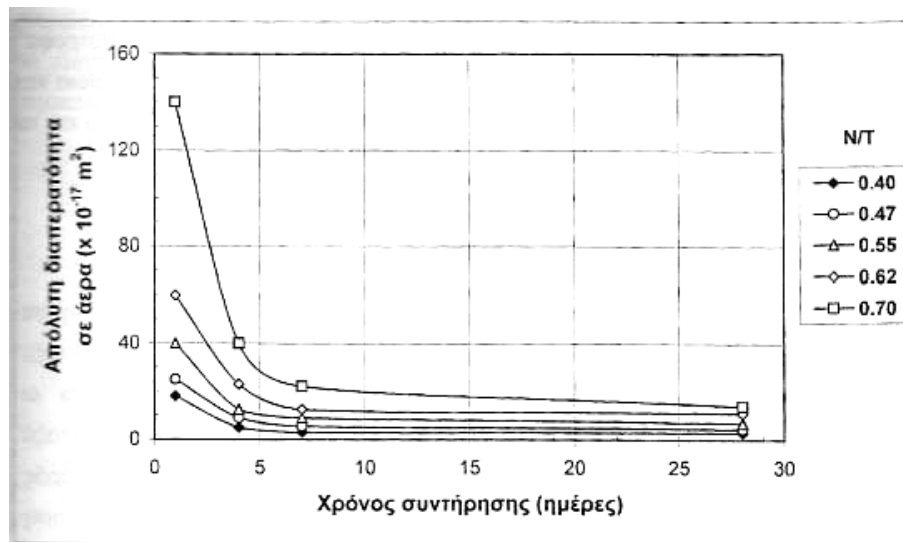
Όταν ο λόγος w/c υπερβεί την τιμή 0,6, τότε υπάρχει δυσανάλογη αύξηση της διαπερατότητας, επειδή αυξάνεται το μέγεθος και ο αριθμός των τριχοειδών.

Το πορώδες (μέγεθος και κατανομή των πόρων) καθώς και η ποσότητα νερού που περιέχεται στους πόρους, επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη διαπερατότητα του σκυροδέματος. Συνήθως, η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος σε φυσικές και χημικές επιδράσεις μειώνεται όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε τριχοειδείς πόρους.

Με τη συμπύκνωση γίνεται προσπάθεια μείωσης των κενών του αέρα στο σκυρόδεμα σε περιεκτικότητα μικρότερη από 1%. Για την επίτευξη της συμπύκνωσης εφαρμόζεται δόνηση κατά τη χύτευση.

Η συντήρηση του σκυροδέματος συνίσταται στη διατήρηση ευνοϊκών συνθηκών υγρασίας και θερμοκρασίας, ώστε να προχωρήσουν οι αντιδράσεις ενυδάτωσης. Η συντήρηση γίνεται με σκοπό αφενός για να συγκρατήσει το σκυρόδεμα τη σωστή υγρασία, ώστε να γίνει η ενυδάτωση του τσιμέντου και αφετέρου για να προστατευθεί το σκυρόδεμα από τις απότομες αλλαγές θερμοκρασίας.

Στο επόμενο διάγραμμα 2.7 φαίνεται ενδεικτικά η επίδραση που έχει η διάρκεια συντήρησης στη διαπερατότητα, συναρτήσει του λόγου w/c.



Διάγραμμα 2.7 Επίδραση της διάρκειας συντήρησης στη διαπερατότητα.

Η ύπαρξη ρωγμών διευκολύνει τη διείσδυση βλαβερών ουσιών στο εσωτερικό της κατασκευής και προς τον σπλισμό του σκυροδέματος (αν υπάρχει). Οι ρωγμές μπορούν να δημιουργηθούν από διάφορες αιτίες, όπως φυσικές, χημικές, θερμικές και κατασκευαστικές. [2]

2.4 Όροι χημείας και τεχνολογίας σκυροδέματος

Σκυρόδεμα είναι το υλικό που σχηματίζεται από την ανάμιξη τσιμέντου, χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων αδρανών και νερού (με ή χωρίς την ενσωμάτωση των υλικών που χαρακτηρίζονται πρόσθετα και βελτιωτικά), το οποίο αναπτύσσει τις ιδιότητές του με την σκλήρυνση της πάστας του τσιμέντου.

Φρέσκο σκυρόδεμα (fresh concrete) είναι το σκυρόδεμα που μόλις έχει παρασκευασθεί περιέχοντας όλα τα συστατικά του και το οποίο είναι ακόμα σε πλαστική κατάσταση δυνάμενο να συμπυκνωθεί και να μορφοποιηθεί στα καλούπια.

Σκληρυμένο σκυρόδεμα (hardened concrete) είναι αυτό που βρίσκεται σε στερεά κατάσταση και έχει ήδη αναπτύξει αντοχές.

Κανονικού βάρους σκυρόδεμα είναι αυτό που έχει πυκνότητα μεταξύ 2100 και 2600 kg/m³, ενώ ελαφροβαρές είναι το σκυρόδεμα με πυκνότητα μεταξύ 800 και 2100 kg/m³, που προκύπτει από τη χρησιμοποίηση ελαφροβαρών αδρανών και βαρύ σκυρόδεμα όταν η πυκνότητά του είναι μεγαλύτερη των 2600 kg/m³.

Δραστικό περιεχόμενο νερό είναι αυτό που προκύπτει από τη διαφορά μεταξύ του συνολικού νερού, που υπάρχει στο φρέσκο σκυρόδεμα, και του νερού που απορροφάται από τα αδρανή. Ως συνολικό νερό θεωρείται το άθροισμα εκείνου που προστίθεται με τη φυσική υγρασία των αδρανών και των πάσης φύσεως προσθέτων καθώς και εκείνο που εισέρχεται με τα πρόσθετα εάν αυτά χρησιμοποιούνται με τη μορφή πολτού.

Αναλογία νερού προς τσιμέντο (w/c ratio) είναι η κατά βάρος αναλογία του δραστικού νερού προς το τσιμέντο στο φρέσκο σκυρόδεμα.

Χαρακτηριστική αντοχή σκυροδέματος, θεωρείται εκείνη η τιμή αντοχής κάτω της οποίας υπάρχει 5% πιθανότητα να βρεθεί η τιμή αντοχής ενός τυχαίου δοκιμίου. [2]

2.5 Ταξινόμηση σκυροδεμάτων

Τα σκυροδέματα ταξινομούνται βάσει του κριτηρίου των αντοχών θλίψης 28 ημερών για τα σκληρυμένα σκυροδέματα και του κριτηρίου της κατηγορίας κάθισης για τα νωπά σκυροδέματα. Η ταξινόμηση των σκυροδεμάτων βάσει των ανωτέρω κριτηρίων παρουσιάζεται στους δύο πίνακες που ακολουθούν.

Πίνακας 2.15 Κατηγορίες θλιπτικής αντοχής για κανονικού βάρους και βαρύ σκυρόδεμα σύμφωνα με τον Κ.Τ.Σ.-97

Κατηγορία σκυροδέματος	Ελάχιστη χαρακτηριστική αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου (N/mm²)	Ελάχιστη χαρακτηριστική αντοχή κυβικού δοκιμίου (N/mm²)
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C70/85	70	85
C80/95	80	95
C90/105	90	105
C100/115	100	115

Πίνακας 2.16 Προβλεπόμενες κατηγορίες κάθισης

Κατηγορία κάθισης	Κάθιση (mm)
S1	10-40
S2	50-90
S3	100-150
S4	160-210
S5	≥ 220

Η μετάβαση από τη μια κατηγορία στην ανώτερή της προϋποθέτει αύξηση της ποσότητας του περιεχόμενου τσιμέντου, που εκφράζεται σε kg τσιμέντου ανά m^3 σκυροδέματος.

Επίσης, τα σκυροδέματα διακρίνονται, ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε έργου και τις περιβαλλοντικές συνθήκες, στις εξής κατηγορίες:

- Σκυρόδεμα χωρίς ειδικές απαιτήσεις
- Σκυρόδεμα ανθεκτικό σε επιφανειακή φθορά
- Σκυρόδεμα μειωμένης υδατοπερατότητας
- Σκυρόδεμα μέσα σε νερό (όχι διαβρωτικό)
- Σκυρόδεμα στη θάλασσα
- Σκυρόδεμα εκτεθειμένο σε αέρα κορεσμένο με θαλάσσια άλατα (παραθαλάσσιο περιβάλλον)
- Σκυρόδεμα ανθεκτικό σε χημικές προσβολές.

Ανάλογα με το βάρος τους τα σκυροδέματα κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες :

- Στα κοινά σκυροδέματα με ειδικό βάρος στην περιοχή $20,0-25,0 \text{ kN/m}^3$
- Στα ελαφρά σκυροδέματα με ειδικό βάρος $3,0-20,0 \text{ kN/m}^3$
- Στα βαριά σκυροδέματα με ειδικό βάρος $30,0-50,0 \text{ kN/m}^3$

Τα κοινά σκυροδέματα αποτελούν το πρώτο ιστορικά και το πιο διαδεδομένο μέχρι σήμερα είδος σκυροδέματος, ενώ τα άλλα δύο αποτελούν νεώτερες εξελίξεις που αποκτούν καθένα στον τομέα του όλο και μεγαλύτερο πεδίο εφαρμογής. [2,3,4,5]

Το σκυρόδεμα που παρουσιάζεται στη συνέχεια και αποτελεί και το θέμα της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, δεν ανήκει σε καμία από τις προαναφερθείσες κατηγορίες, καθότι δεν είναι ένα συμβατικού τύπου σκυρόδεμα, αλλά ανήκει στα σκυροδέματα ειδικού τύπου και συγκεκριμένα αποτελεί ένα εναλλακτικού τύπου αντιπλημμυρικό μέτρο προστασίας.

3. ΠΟΡΩΔΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ



Φωτογραφία 3.1 Πορώδες σκυρόδεμα

3.1 Ορισμός του πορώδους σκυροδέματος

Το πορώδες σκυρόδεμα είναι ένα μίγμα χονδρόκοκκων αδρανών, τσιμέντου, νερού, λίγης ή καθόλου άμμου και ίσως και προσμίκτων. Είναι ένας τύπος σκυροδέματος όπου το πορώδες δε βρίσκεται στα αδρανή (σε αντίθεση με τα ελαφρο-σκυροδέματα) αλλά μέσα στον ίδιο τον ιστό του σκυροδέματος. [19] Ο όρος αυτός συνήθως περιγράφει ένα σκυρόδεμα «ανοικτού τύπου» και μηδενικής κάθισης (zero slump). [20] Είναι επίσης γνωστό ως «μη λεπτόκοκκο» ή διαπερατό σκυρόδεμα όπως επίσης και σκυρόδεμα ενισχυμένου πορώδους (Enhanced Porosity Concrete – EPC). [21]

Το πορώδες ή διαπερατό σκυρόδεμα είναι ουσιαστικά ένα μακροπορώδες σκυρόδεμα με συνεχή κενά, τα οποία ενσωματώνονται σκοπίμως στο σκυρόδεμα. [22] Ο σχεδιασμός του με τη χρήση ελάχιστης ποσότητας τσιμεντόπαστας, τόση που να επαρκεί για την επικάλυψη των χονδρόκοκκων αδρανών, διευκολύνει τη διαμόρφωση αυτού του διασυνδεδεμένου δικτύου πόρων στο υλικό. Το συγκεκριμένο δίκτυο πόρων επιτρέπει τη διέλευση του νερού σε ένα πολύ υψηλότερο ποσοστό από ό, τι τα συμβατικά σκυροδέματα. [23] Το πορώδες σκυρόδεμα ανήκει σε μια εντελώς διαφορετική κατηγορία από τα τελευταία και ως εκ τούτου, τα φυσικά χαρακτηριστικά του διαφέρουν σημαντικά από εκείνα των γνωστών σκυροδεμάτων. [22]

Ο λόγος που ώθησε την παραγωγή του πορώδους σκυροδέματος είναι η ανάγκη της διαχείρισης των όμβριων υδάτων, η αποφυγή των πλημμυρικών απορροών καθώς και η διαφύλαξη και αποφυγή της μόλυνσης των φυσικών υδάτινων πόρων. [24] Η διαπερατότητα του πορώδους σκυροδέματος-που αποτελεί και την κυριότερη ιδιότητά του-επιτρέπει τη διήθηση μεγάλων ποσοτήτων νερού εντός του ιστού του, παράλληλα φιλτράροντάς το, οδηγώντας το τελικά στο υπέδαφος και αναπληρώνοντας άμεσα τα διαθέσιμα αποθέματα του υδροφόρου ορίζοντα. [25]

Ουσιαστικά, το πορώδες 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.

3.2 Σύσταση πορώδους 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 κατ'όγκο αναλογία και το μέγεθος των χονδρόκοκκων αδρανών καθώς και των αντοχών του πορώδους σκυροδέματος έχουν μελετηθεί αρκετά, οι ιδανικές συνθήκες και η βέλτιστη αναλογία των υλικών για την παραγωγή καλής ποιότητας πορώδους σκυροδέματος δεν έχουν ακόμη τεκμηριωθεί.

Η ανάγκη μελέτης της σύνθεσης, της μεθόδου ανάμιξης και συμπύκνωσης για την παραγωγή πορώδους σκυροδέματος με δυνητικά υψηλότερες αντοχές σε συγκεκριμένο λόγο κενών εξακολουθούν να υφίστανται. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι το πορώδες σκυρόδεμα είναι ένα ειδικού τύπου σκυρόδεμα, που απαιτεί εκτεταμένη 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. [22] 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.

Μια τυπική μελέτη σύνθεσης σύμφωνα με το NRMCA (National Ready Mix Assosiation) 2004 είναι η ακόλουθη:

Πίνακας 3.1 Τυπική σύνθεση πορώδους σκυροδέματος

Υλικά	Συνιστώμενη Ποσότητα(kg/m ³)
Περιεκτικότητα σε τσιμέντο	178 - 376
Χονδρόκοκκα αδρανή	1426 - 1604
Λεπτόκοκκα αδρανή	0
Λόγος νερού προς τσιμέντο (w/c)	0.27 - 0.43

Τα χονδρόκοκκα αδρανή μπορούν να είναι είτε ποταμίσια είτε θραυστά με μέγεθος κόκκων από το συγκρατούμενο στο Νο 4 μέχρι το κόσκινο $\frac{3}{4}$, με αδρανή 1 ίντσας να χρησιμοποιούνται σε κάποιες περιπτώσεις. 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 τσιμέντου 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 σε ένα μηδενικής κάθισης σκυρόδεμα είναι εμφανής η διαφορά του τελείως ύφυγρου από το εξαιρετικά υδαρές νωπό σκυρόδεμα. [24]

3.3 Ιδιότητες πορώδους 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 μέσα από τη μάζα του. Στο πορώδες σκυροδέμα, 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. [24] Βέβαια οι τιμές αυτές είναι οι ακραίες δυνατές που έχουν αναφερθεί, ενώ σε ένα τυπικό παράδειγμα πορώδους σκυροδέματος με ικανοποιητικές αντοχές, το ποσοστό των κενών χώρων κυμαίνεται σε ποσοστό 15-25%, ενώ η διαπερατότητα περί τα 200 lt/min/m². [26]

Ο σχεδιασμός του σκυροδέματος αυτού δεν γίνεται τόσο βάσει της αντοχής, αλλά κυρίως του όγκου κενών και της υδατοπερατότητας, καθότι η τελευταία αποτελεί και τη σημαντικότερη ιδιότητά του. Το ποσοστό κενών πρέπει να είναι μεγαλύτερο του 15% για να υπάρξει ικανοποιητική διήθηση του νερού εντός του ιστού των αδρανών και του συνδετικού μέσου.

Στον ακόλουθο πίνακα φαίνεται η κατηγοριοποίηση των εδαφών ανάλογα με την τιμή διαπερατότητας k . Η επιθυμητή διαπερατότητα είναι της τάξης του 10^{-3} έως 10^2 cm/sec σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 3.2. [24]

Πίνακας 3.2 Συγκριτική διαπερατότητα σε εδάφη

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ

k (cm/s)	10^2	10^1	10^0	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				
Ασυμύκνωτη άμμος και χαλίκι	Καλά διαβαθμισμένο χαλίκι		Καλά διαβαθμισμένη άμμος ή αμμοχάλικο		Πολύ λεπτή άμμος - ιλύς								
Ασυμύκνωτη 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	

3.3.1 Θλιπτικές αντοχές

Η αντοχή σε θλίψη του πορώδους σκυροδέματος επηρεάζεται έντονα από την το λόγο w/c και τον τρόπο συμπύκνωσης κατά τη διάρκεια της τοποθέτησης.

Ο λόγος w/c στο πορώδες σκυρόδεμα είναι πολύ πιο σημαντικό 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 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 σαν αποτέλεσμα τη μείωση της επικάλυψης των αδρανών με τσιμεντόπαστα, οδηγώντας σε μειωμένες θλιπτικές αντοχές. Η βέλτιστη ποσότητα σε τσιμεντοειδές υλικό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κοκκομετρική διαβάθμιση και το μέγεθος των αδρανών. [20]

3.3.2 Ποσοστό κενών χώρων / ειδικό βάρος

Το ποσοστό των κενών χώρων σχετίζεται άμεσα με το ειδικό βάρος ενός δεδομένου μείγματος πορώδους σκυροδέματος. Το ποσοστό των κενών χώρων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από διάφορους παράγοντες: κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών, ποσότητα τσιμεντοειδούς υλικού, λόγο w/c και τρόπο συμπύκνωσης. Ο τρόπος συμπύκνωσης έχει μια επιρροή στο περιεχόμενο ποσοστό των κενών αέρα (και του ειδικού βάρους) μιας δεδομένης σύνθεσης. Σε μία σειρά εργαστηριακών δοκιμών (Meininger 1988), μία συγκεκριμένη σύνθεση πορώδους σκυροδέματος, συμπυκνούμενο σε οκτώ διαφορετικά επίπεδα, παρήγαγε ειδικά βάρη που κυμαίνονταν από 1680 - 1920 kg/m³). [20]

3.3.3 Ανθεκτικότητα

Ο όρος ανθεκτικότητα αναφέρεται στο χρόνο ζωής του πορώδους σκυροδέματος υπό δεδομένες συνθήκες περιβάλλοντος. Τα φυσικά αίτια που μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος αυτού, περιλαμβάνουν την έκθεση σε ακραίες θερμοκρασίες και σε χημικές ουσίες, όπως θειικά και όξινα. Καμία έρευνα δεν έχει διεξαχθεί σχετικά με την αντοχή του πορώδους σκυροδέματος στην επιθετική προσβολή των θεικών ή του όξινου νερού. Η ανθεκτικότητα σε συνθήκες ψύξης-απόψυξης επίσης δεν είναι καλά τεκμηριωμένη. Περιορισμένες δοκιμές σε αυτόν τον τομέα υποδεικνύουν κακή αντοχή, αν ολόκληρος ο χώρος των κενών γεμίσει με νερό (NRMCA 2004). Άλλες δοκιμές, ωστόσο, έχουν δείξει πως το συγκεκριμένο γεγονός έχει μερική, αλλά όχι πλήρη, συσχέτιση με τα συνολικά αποτελέσματα. Μια αργή διαδικασία ψύξης (ένας κύκλος ανά ημέρα σε σύγκριση με πέντε ή έξι σύμφωνα με το ASTM C 666, διαδικασία A) μπορεί να επιτρέψει στο νερό να στραγγίξει από το πορώδες σκυρόδεμα, βελτιώνοντας την ανθεκτικότητα. Μικρό πεδίο δεδομένων επίσης υπάρχει για την μακροχρόνια αντοχή του σε χρήση σε βόρεια κλίματα. Προσοχή όμως πρέπει να δίνεται κατά τη χρήση του σε καταστάσεις όπου πλήρης κορεσμός σε νερό πριν από ένα έντονο παγετό μπορεί να συμβεί. Τέλος, Οι δοκιμές δείχνουν ότι παρεμβάλλοντας αέρα στην τσιμεντόμαστα -με τη χρήση αερακτικών- μπορεί να βελτιώσει την αντοχή σε συνθήκες ψύξης-απόψυξης. [20]

3.3.4 Ακουστική απορρόφηση

Λόγω της παρουσίας μεγάλου όγκου αλλά και σημαντικού μεγέθους διασυνδεδεμένων πόρων στο υλικό, το πορώδες 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 πορώδες σκυρόδεμα μεταβάλλουν την παραγωγή θορύβου, ελαχιστοποιώντας το “τρομπάρισμα” του αέρα μεταξύ του ελαστικού και του οδοστρώματος. Επιπλέον, οι πόροι απορροφούν τον ήχο μέσω εσωτερικής τριβής μεταξύ των κινούμενων μορίων του αέρα και των πορωδών τοιχωμάτων. [20]

Μία ακόμη πολύ σημαντική ιδιότητα του πορώδους σκυροδέματος είναι η ικανότητά του να φιλτράρει το νερό που διέρχεται από τη δομή του. Σύμφωνα με την Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών (EPA), η απορροή των όμβριων υδάτων μπορεί να στείλει έως και το 90% των ρύπων- όπως το πετρέλαιο, λάδια και άλλοι υγροί υδρογονάνθρακες που βρίσκονται στην επιφάνεια των παραδοσιακών χώρων

στάθμευσης- άμεσα σε ποτάμια και ρέματα. Γι' αυτό το λόγο απαιτεί από κρατικές και τοπικές κυβερνήσεις να εφαρμόσουν μέτρα για τη μείωση και τη βελτίωση της συνολικής ποιότητας των όμβριων που απορρέουν, σε μια προσπάθεια για την αντιμετώπιση αυτού του σημαντικού προβλήματος ρύπανσης. Το πορώδες σκυρόδεμα έχει αναγνωριστεί από την ΕΡΑ ως η βέλτιστη πρακτική διαχείρισης (BMP) για να αντιμετωπίσει αυτήν την περιβαλλοντική ανησυχία. Η ανοιχτή δομή του ιστού του συγκρατεί αυτούς τους ρύπους και παρέχει ένα μέσο για τα αερόβια βακτήρια που διασπούν πολλούς από αυτούς που διαρρέουν από σταθμευμένα αυτοκίνητα. [19]

Ο ήλιος επίσης εξατμίζει πτητικά συστατικά που έχουν συγκρατηθεί στην εσωτερική δομή του και ο εναπομείναντας άνθρακας στη συνέχεια απορροφάται από το υπέδαφος, όπου αφομοιώνεται τελικά από φυτά, μύκητες ή μικροοργανισμούς.

Ακόμη τα δέντρα σχεδόν πάντοτε ευδοκούν με την παρουσία του πορώδους σκυροδέματος. 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. [25]

3.4 Εφαρμογές πορώδους σκυροδέματος

Το πορώδες 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. [19]

Ενώ πάντως το πορώδες σκυρόδεμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για έναν εκπληκτικό αριθμό εφαρμογών, η κύρια χρήση του είναι στο οδόστρωμα. [26]

3.4.1 Εφαρμογές οδοποιίας

Τα πλεονεκτήματα των οδοστρωμάτων από πορώδες σκυρόδεμα σε σχέση με τα συμβατικού_τύπου οδοστρώματα περιλαμβάνουν:

- Έλεγχος της ρύπανσης των όμβριων υδάτων στην πηγή τους
- Η αύξηση των εγκαταστάσεων για στάθμευση, εξαλείφοντας την ανάγκη για περιοχές συγκράτησης του νερού
- Έλεγχος της απορροής των όμβριων υδάτων
- Μείωση υδρολίσθησης στην επιφάνεια των δρόμων και των αυτοκινητόδρομων
- Δημιουργία πρόσθετης ανύψωσης στα αεροσκάφη κατά την απογείωση, λόγω του φαινομένου της ψύξης
- 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
- Ελευθερία στον αέρα και το νερό να φτάσουν τις ρίζες των δέντρων, ακόμα και με το οδόστρωμα να παρεμβάλλεται στη γραμμή ενστάλαξης. [20]

Τέλος, σε σχέση με την ποιότητα του αέρα, η χρήση οποιουδήποτε οδοστρώματος με χρήση σκυροδέματος 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 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. [27]

Οι μηχανικοί χρησιμοποιούν το πορώδες σκυρόδεμα στο οδόστρωμα ως:

- Επιφάνεια κίνησης
- Διαπερατή βάση με επιπλέον χρήση του στην άκρη του οδοστρώματος για στράγγιση και
- Βοηθητικό οδόστρωμα δίπλα στο πρωτεύον [20]

3.4.2 Άλλες εφαρμογές

- Αποχετευτικοί αγωγοί – Σταθμοί παραγωγής ρεύματος και ύδατος χρησιμοποιούν πορώδες σκυρόδεμα για την κατασκευή διαπερατών αποστραγγιστικών πλακών καθώς και αγωγών κάτω από υδραυλικά έργα. Οι αγωγοί αυτοί ανακουφίζουν την ανύψωση της πίεσης και επιτρέπουν στα υπόγεια ύδατα να στραγγίζουν κάτω από τις σωλήνες αποχέτευσης.
- Θερμοκήπια - Η χρήση του ως σύστημα θερμικής αποθήκευσης στους ορόφους του θερμοκηπίου έχει διερευνηθεί από ερευνητές (Monahan 1981, Herod 1981). Ο όροφος χρησίμευε ως αποθηκευτικός χώρος, όπως ένας εναλλάκτης θερμότητας για την ηλιακή θέρμανση του θερμοκηπίου. Το πορώδες σκυρόδεμα έχει επίσης χρησιμοποιηθεί ως πλακόστρωτο στους ορόφους του θερμοκηπίου για να αποτρέψει το νερό από το να λιμνάσει και να εξαλείψει την ανάπτυξη των ζιζανίων, καθώς παράλληλα παρέχει μια ανθεκτική, σκληρή επιφάνεια για τη μετακίνηση του εξοπλισμού.
- Γήπεδα τένις – Πορώδες 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 χαλικιού στις άκρες της πλάκας. Ιπτάμενη τέφρα συμπεριλαμβάνεται σε κάποια από αυτά τα μίγματα για να αυξηθεί η εργασιμότητα.
- Φραγμοί θορύβου και οικοδομικά τείχη - Οι θόρυβοι από διάφορες πηγές κυκλοφορίας ή τους ενοίκους ενός κτιρίου μπορεί να καταστούν προβληματικοί. Ηχοπετάσματα από πορώδες σκυρόδεμα και εσωτερικοί τοίχοι μερικές φορές κατασκευάζονται έτσι ώστε να μειωθεί ο θόρυβος. Η ανοιχτού τύπου δομή του τείνει να απορροφήσει και να ελαττώσει τον ήχο στο υλικό του αντί να το ανακλάσει αλλού. [20]

3.4.3 Οικονομικά οφέλη

- Εναλλακτική λύση σε δαπανηρές μεθόδους διαχείρισης όμβριων υδάτων. Ιδιοκτήτες χώρων στάθμευσης που χρησιμοποιούν πορώδες 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 αντικτύπου ομβρίων

Πολλοί κυβερνητικοί οργανισμοί εφαρμόζουν πλέον τέλη αντικτύπου ομβρίων για όλες τις στεγανές περιοχές. Καθώς οι κανονισμοί για την απορροή ομβρίων 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 πορώδες σκυροδέματος 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 πορώδους σκυροδέματος στηρίζονται οι τοπικές οικονομίες, καθώς χρησιμοποιούνται οι ντόπιες εταιρείες για τη μεταφορά και την τοποθέτηση, αλλά και κάνοντας χρήση των γηγενών υλικών.

- Χαμηλού κόστους κύκλος ζωής

Τα οδοστρώματα από σκυρόδεμα έχουν ένα σημαντικά χαμηλότερο κόστος κύκλου ζωής από τις εναλλακτικές λύσεις, όπως είναι η ασφαλτος. Αν και το αρχικό κόστος της εγκατάστασης πορώδους μπορεί να είναι ελαφρώς υψηλότερο, το σκυρόδεμα εξοικονομεί χρήματα μακροπρόθεσμα λόγω ανώτερης αντοχής και ανθεκτικότητας. Απαιτεί λιγότερες επισκευές από την ασφαλτο, 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 πορώδες σκυρόδεμα αναγνωρίζεται ευρέως ως η χαμηλότερου κόστους κύκλου ζωής επιλογή για τη διάστρωση εδάφους. [26]



Φωτογραφία 3.2 Σύγκριση ασφάλτου και πορώδους σκυροδέματος

3.5 Τοποθέτηση πορώδους σκυροδέματος

3.5.1 Υδρολογικές μελέτες σχεδιασμού

Για το σχεδιασμό οδοστρώματος πορώδους 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 ελέγχων υδρολογικός παράγοντας στο σχεδιασμό ενός συστήματος πορώδους 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 (αποθήκευση κατάθλιψης), ένα άλλο διεισδύει στο έδαφος, και ένα ποσοστό αναχαιτίζεται από την κάλυψη του εδάφους (πχ φυτική βλάστηση). Η απορροή είναι επίσης συνάρτηση των ιδιοτήτων του εδάφους, ιδιαίτερα του ποσοστού διήθησης - αμμώδη, ξηρά εδάφη θα δεχτούν ταχύτατα το νερό, ενώ σκληροί άργιλοι μπορεί να μην απορροφήσουν σχεδόν καθόλου νερό κατά τη διάρκεια του ενδιαφέροντος για τον περιορισμό της απορροής των όμβριων υδάτων. Επιπλέον, 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 να καθίσταται εξαιρετικά σημαντική.

Σε πολλές περιπτώσεις, το πορώδες σκυρόδεμα αντικαθιστά απλά μια αδιαπέραστη επιφάνεια. Σε άλλες περιπτώσεις, οι πορώδεις αυτές διαστρώσεις πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε να μπορούν να διαχειριστούν πολύ περισσότερες βροχοπτώσεις από ό,τι θα πέσουν στο καθεαυτό οδόστρωμα. Αυτές οι δύο εφαρμογές μπορούν να χαρακτηριστούν ως «παθητικός» και «ενεργός» μετριασμός απορροής, αντίστοιχα. Ένα παθητικό σύστημα μετριασμού μπορεί να συλλάβει πολλά, αν όχι όλα, από το “πρώτο τράβηγμα”, αλλά δεν προορίζεται να αντισταθμίσει το πλεόνασμα απορροής από τις παρακείμενες αδιαπέραστες επιφάνειες. Ένα ενεργό σύστημα μετριασμού από την άλλη είναι σχεδιασμένο για να διατηρεί την απορροή σε μια περιοχή σε συγκεκριμένα επίπεδα. Πορώδες σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται σε ένα ενεργό σύστημα μετριασμού πρέπει να μπορεί να αντιμετωπίζει την απορροή και από άλλα χαρακτηριστικά του χώρου επίσης, όπως κτίρια, περιοχές διαστρωμένες με συμβατικό αδιαπέραστο σκυρόδεμα, καθώς και ζώνες προστασίας οι οποίες μπορεί ή μπορεί και να μην έχουν φυτευτεί. Όταν χρησιμοποιείται ένα ενεργό σύστημα μετριασμού, κράσπεδα, υδρορροές, παροχετεύσεις θέσης και κάλυψη του εδάφους θα πρέπει να εξασφαλίζουν ότι η ροή του νερού σε ένα τέτοιο σύστημα δεν φέρει ιζήματα και χώμα που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε απόφραξή του. Μια μελέτη σκοπιμότητας κατέδειξε ότι με τη χρήση πορώδους σκυροδέματος σε ένα χώρο στάθμευσης μίας αστικής περιοχής κατά προσέγγιση όσο το μέγεθος ενός γηπέδου ποδοσφαίρου, περίπου 9 στρέμματα, θα λειτουργούσε υδρολογικά σαν να ήταν γρασίδι. [26]

3.5.2 Κατασκευή οδοστρώματος πορώδους σκυροδέματος

Όπως προαναφέρθηκε, η κατασκευή ενός πορώδους οδοστρώματος είναι αρκετά διαφορετική από ότι ενός συμβατικού. 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.
4. Επαρκής ωρίμανση – η ωρίμανση θα πρέπει να πραγματοποιείται εγκαίρως και να είναι επαρκούς διάρκειας. [28]

3.5.2.1 Προετοιμασία υποστρώματος

Η ομοιομορφία του υπεδάφους στήριξης αποτελεί βασικό κριτήριο για τη διάστρωση οδοστρώματος με πορώδες σκυρόδεμα. Όπως και στους άλλους τύπους διάστρωσης, οι λακκούβες και άλλες δυσμορφίες πρέπει να εξομαλύνονται και να συμπιέζονται πριν από την τοποθέτηση. Η συμπύκνωση σε ποσοστά πυκνότητας τουλάχιστον 90% με 95% της θεωρητικής πυκνότητας συνιστάται συχνά για τη συνεπή υποστήριξη του υπεδάφους. [26]

Ακριβώς όπως και σε κάθε άλλο σύστημα οδοστρώματος, η ομοιόμορφη συμπύκνωση του υποστρώματος (υπεδάφους) είναι κρίσιμης σημασίας για ένα επιτυχημένο πορώδες οδόστρωμα. Επιπλέον, όμως, είναι σημαντικό να μη συμπυκνώνονται πέρα από κάποιο όριο το υπέδαφος. Ένα βασικό χαρακτηριστικό του σχεδιασμού ενός τέτοιου πορώδους οδοστρώματος είναι η διαπερατότητά του και αυτή του υπεδάφους μειώνεται γραμμικά με την αύξηση της συμπύκνωσής του. Έτσι, αν το τελευταίο συμπυκνωθεί πέρα από τα όρια του σχεδιασμού του, τότε το ποσοστό διήθησης του εδάφους θα μειωθεί και το οδόστρωμα δεν θα στραγγίξει το επιθυμητό ποσοστό 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 ληφθεί, σε αυτήν την κατάσταση, να μην υπερσυμπυκνώνεται ένα έδαφος που έχει πιθανότητες διόγκωσης. [28] Η χρησιμοποίηση τοπικών γεωτεχνικών μηχανικών ίσως είναι η καλύτερη πηγή γνώσεων σχετικά με τις ιδιότητες του εκάστοτε εδάφους. [26]

Επίσης, επειδή το πορώδες σκυρόδεμα περιέχει ελάχιστο νερό και έχει υψηλό πορώδες, πρέπει να ληφθεί μέριμνα για να εξασφαλιστεί ότι το οδόστρωμα δεν θα στεγνώσει πρόωρα. Το υπέδαφος πρέπει να είναι υγρό, χωρίς όμως λιμνάζοντα ύδατα, πριν από την τοποθέτηση, προκειμένου να αποτρέψει το νερό από το να απομακρυνθεί από το κατώτερο τμήμα της διάστρωσης πάρα πολύ σύντομα. Αυτή είναι η συνιστώμενη πρακτική για οδοποιίες συμβατικού τύπου σκυροδέματος εάν επικρατούν συνθήκες υψηλών ποσοστών εξάτμισης, αλλά είναι ακόμη πιο σημαντικό σε διαστρώσεις πορώδους σκυροδέματος επειδή το υψηλό ποσοστό κενών μπορεί να επιτρέψει την ταχύτερη ξήρανση, με επακόλουθη μείωση των αντοχών και της ανθεκτικότητας, ακόμη και κάτω από λιγότερο ακραίες συνθήκες. [26]

3.5.2.2 Νερό ανάμιξης

Η πιο περίπλοκη δεξιότητα για έναν κατασκευαστή να αποκτήσει είναι η κρίση σχετικά με την κατάλληλη ποσότητα του νερού ανάμιξης στο φρέσκο πορώδες σκυρόδεμα. 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 σκυρόδεμα είναι κρίσιμη, διότι πάρα πολύ νερό προκαλεί τους πόρους να καταρρεύσουν, και 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. Βασικά χαρακτηριστικά που πρέπει να δίνεται προσοχή είναι η παρουσία ανοιχτών κενών χώρων στο συμπακνωμένο σκυρόδεμα και μία ελαφρά γυαλάδα από το ελεύθερο νερό στο σκυρόδεμα.

3.5.2.3 Διάστρωση-Συμπύκνωση-Φινίρισμα

Ένα πορώδες οδόστρωμα μπορεί να τοποθετηθεί είτε με χρήση καλουπιών είτε με ασφαλτοστρωτήρα. Παρ'όλα αυτά, η απλούστερη προσέγγιση για την τοποθέτηση του πορώδους 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 συμπακνώνεται 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 πορώδες 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 πορώδες σκυρόδεμα μπορεί επίσης να δουλευτεί. Μια στρογγυλευμένη άκρη μπορεί να είναι επιθυμητή, για παράδειγμα, δίπλα σε ένα πεζοδρόμιο.

3.5.2.4 Ωρίμανση

Η σωστή ωρίμανση είναι απαραίτητη για τη δομική ακεραιότητα του πορώδους σκυροδέματος. Η ωρίμανση εξασφαλίζει επαρκή ενυδάτωση της τσιμεντόπαστας έτσι ώστε να παρέχει τις απαραίτητες αντοχές στο οδόστρωμα. Από την άλλη, 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. Θα πρέπει να ασφαλίζονται με ενισχυτικά ή ξύλα, έτσι ώστε να παραμείνουν στη θέση τους για μία περίοδο ωρίμανσης τουλάχιστον 7 ημερών, σε όλες τις καιρικές συνθήκες. [28] Επίσης, η ανοιχτή δομή και η σχετικά ανώμαλη επιφάνεια του πορώδους 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 πορώδες σκυρόδεμα και γι' αυτό το λόγο πρέπει προστατευτεί αμέσως. Σε ορισμένες περιοχές, είναι σύνηθες να εφαρμόζονται επιβραδυντές εξάτμισης πριν τη συμπύκνωση για την ελαχιστοποίηση κάθε ενδεχομένου απώλειας των επιφανειακών υδάτων.[26]

Στις φωτογραφίες 3.3 – 3.6 που ακολουθούν παρουσιάζεται η διάστρωση εδάφους με χρήση πορώδους σκυροδέματος σε χώρο στάθμευσης του εργοστασίου TITAN στην Ελευσίνα Αττικής το Φεβρουάριο του 2012.



Φωτογραφία 3.3 Τοποθέτηση πορώδους σκυροδέματος



Φωτογραφία 3.4 Διαδικασία συμπίκνωσης πορώδους σκυροδέματος



Φωτογραφία 3.5 Τελική μορφή επιφάνειας πορώδους σκυροδέματος

3.5.3 Συντήρηση

Η πλειοψηφία των οδοστρωμάτων πορώδους σκυροδέματος λειτουργούν καλά με λίγη ή και καθόλου συντήρηση. [26]

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 πορώδες 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.[28] Το πλύσιμο με πίεση ενός φραγμένου πορώδους οδοστρώματος μπορεί να αποκατασταθεί το 80% έως 90% της διαπερατότητας σε ορισμένες περιπτώσεις.[26] Το σκούπισμα με δυνατή ηλεκτρική σκούπα αφαιρεί τους ρύπους εξάγοντάς τους από τα κενά του οδοστρώματος.[28] Η εφαρμογή του ετησίως ή και πιο συχνά μπορεί να είναι απαραίτητη για την αφαίρεση χώματος, πετρών, φύλλων και άλλων υπολειμμάτων από την επιφάνεια του οδοστρώματος.[26] Το πιο αποτελεσματικό σύστημα, όμως, είναι να συνδυαστούν οι δύο αυτές τεχνικές με τη δύναμη της απορρόφησης της σκούπας μετά το πλύσιμο με πίεση.[28] Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι οι πρακτικές συντήρησης των πορωδών οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα εξακολουθούν να αναπτύσσονται.[26]

Β. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

4. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΘΕΜΑΤΟΣ

Τις τελευταίες δεκαετίες, παγκοσμίως - και κυρίως στις ΗΠΑ - παρατηρείται μία ολοένα και αυξανόμενη δημοτικότητα στη χρήση πορώδους σκυροδέματος, λόγω των ιδιοτήτων της διαχείρισης των υδάτων όπως παρουσιάστηκε στο κεφ.3, του πλήθους των εφαρμογών που βρίσκει σε διαφόρων τύπου κατασκευές, καθώς και των τεχνικοοικονομικών και περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων που συνεπάγεται η εφαρμογή αυτή. Ωστόσο για τα ελληνικά δεδομένα είναι ένα σχετικά άγνωστο ακόμη προϊόν, με λίγες ερευνητικές δραστηριότητες και εφαρμογές στην πράξη αυτού του ειδικού τύπου σκυροδέματος.

Η διεθνής βιβλιογραφία αναφέρει ένα μεγάλο εύρος τιμών σχετικά τόσο με την υδατοπερατότητα και το πορώδες, όσο και με τις αντοχές του πορώδους σκυροδέματος. Ωστόσο σε ένα τυπικό παράδειγμα τέτοιου σκυροδέματος με ικανοποιητικές αντοχές σε θλίψη της τάξης των 7-15 MPa, το πορώδες κυμαίνεται σε ποσοστό 15-25% και ο συντελεστής υδατοπερατότητας k στην περιοχή 10^{-1} - 10^2 cm/s.

Αντικείμενο και απώτερος σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η παρασκευή υδατοπερατού σκυροδέματος με τις κατάλληλες - απαραίτητες φυσικομηχανικές ιδιότητες, όπως αυτές προσδιορίζονται ανωτέρω. Η προσπάθεια αυτή έγινε με τη χρησιμοποίηση φυσικών θραυστών αδρανών για το σκυρόδεμα, όπως είναι τα ασβεστολιθικά, καθώς και με εναλλακτικά αδρανή, όπως είναι το βιομηχανικό παραπροϊόν της σκωρίας χάλυβα και τα οικοδομικά απόβλητα. Η επιλογή των εναλλακτικών αυτών αδρανών έγινε στα πλαίσια της αιεφόρου ανάπτυξης και της προστασίας του περιβάλλοντος. Βάσει προηγούμενων ερευνητικών αναφορών, στο άοπλο σκυρόδεμα η υποκατάσταση των ασβεστολιθικών αδρανών με αδρανή σκωρίας χάλυβα δύναται να βελτιώσει τις τελικές αντοχές του σκυροδέματος. Από την άλλη, η χρήση οικοδομικών αποβλήτων, λόγω του αυξημένου πορώδους τους, μπορεί να αυξήσει το ενεργό πορώδες του προϊόντος, με αρνητικό ίσως παράγοντα αυτόν της τελικής μείωσης των αντοχών του.

Πιο συγκεκριμένα, πρώτα πραγματοποιήθηκε μελέτη διαφόρων συνθέσεων και επιλέχτηκε η βέλτιστη σύνθεση πορώδους σκυροδέματος με τη χρήση αμιγώς ασβεστολιθικών υλικών, με τον έλεγχο των κάτωθι ιδιοτήτων στα παρασκευασθέντα δοκίμια: έλεγχος υδατοπερατότητας, αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό, έλεγχος σε συνθήκες τρίψης-απότριψης, υπολογισμός του όγκου των κενών πόρων και οπτική αξιολόγηση του εσωτερικού πορώδους με διάνοιξη του δοκιμίου. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε υποκατάσταση στη σύνθεση αυτή σε διάφορα ποσοστά με τα εναλλακτικά αδρανή, καθώς και με όλα τα δυνατά μίγματά τους (διμερή-τριμερές). Οι τελικές αυτές συνθέσεις αξιολογήθηκαν εκ νέου για τις προηγούμενες ιδιότητες.

5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Στη συγκεκριμένη εργασία δημιουργήθηκαν πειραματικά δοκίμια διαφόρων συνθέσεων και διαφορετικών διαστάσεων, αρχικώς με αμιγώς ασβεστολιθικά αδρανή, με σκοπό να δημιουργηθεί μία σύνθεση πορώδους σκυροδέματος που θα πληροί τις προδιαγραφές που αναφέρονται στην παγκόσμια βιβλιογραφία. 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 αρκετοί πειραματισμοί κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, όπως λόγου χάρη η χρησιμοποίηση πυριτικής παιπάλης για αύξηση της συνάφειας μεταξύ αδρανών και τσιμεντόπαστας. Από τις εξεταζόμενες συνθέσεις, η τελική σύνθεση ασβεστολιθικών αδρανών υποκαταστάθηκε με ποσοστά με τη χρήση αδρανών σκωρίας χάλυβα ή/και ανακυκλωμένου σκυροδέματος και έγινε παραβολή των εναλλακτικών αυτών συνθέσεων με την τελική ασβεστολιθική για την εξαγωγή συγκριτικών αποτελεσμάτων. Η δημιουργία 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 ΤΙΤΑΝ 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(sec) με την ταυτόχρονη επιβολή φορτίου στην ελεύθερη επιφάνεια της μήτρας, κατά το πρότυπο ACI 522R-06. Σε κάποιες συνθέσεις όμως προς το τέλος των δοκιμαστικών έγινε πειραματισμός και με τη χρήση ηλεκτρόσφυρας για τη συμπύκνωση, όμως στις τελικές συνθέσεις υποκατάστασης η μέθοδος αυτή εγκαταλείφτηκε. Ο λόγος ήταν ότι παρότι βελτίωνε τις αντοχές του σκυροδέματος αυξάνοντας το βαθμό συμπύκνωσης, αυτό είχε αρνητικό αντίκτυπο στη διαπερατότητά του.

Οι φυσικομηχανικές ιδιότητες που μελετήθηκαν επεξηγούνται στη συνέχεια.



Εικόνα 5.1 Παρασκευή σύνθεσης πορώδους σκυροδέματος

5.1 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 και ASTM C143 καθώς και από τον ΚΤΣ 97, παράγραφος 3.20.

Στη συγκεκριμένη εργασία όσες συνθέσεις και αν εξετάστηκαν δεν έδειξαν κάποια απώλεια ύψους της στήλης, με αποτέλεσμα το μέτρο της κάθισης για το παραγόμενο πορώδες σκυρόδεμα να είναι μηδέν (0).

Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Σκυροδέματος της TITAN ΑΕ στο Καμάρι Αττικής.



Εικόνα 5.2 Έλεγχος κάθισης νωπού μίγματος

5.2 Αντοχή σε θλίψη

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

Η μονοαξονική αντοχή σε αξονική 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 λάθος μετρήσεων, 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 πίεζε η πρέσα. Αυτό έγινε γιατί μπορούσε να αποκολληθεί κάποιο αδρανές λόγω της πίεσης και το μηχάνημα να σταμάταγε πρόωρα και πριν θλιβεί το δοκίμιο, έχοντας σαν αποτέλεσμα την παραλαβή μικρότερης τιμής αντοχών.

Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Σκυροδέματος της TITAN AE στο Καμάρι Αττικής.

5.3 Αντοχή σε εφελκυσμό

Για τη διαδικασία εφελκυσμού παρασκευάστηκαν κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων μήκους 300mm και διαμέτρου 150mm. Στη διαδικασία εφελκυσμού δοκιμάστηκαν τα τελικά δοκίμια σε χρονικό διάστημα 3,7 και 28 ημερών.

Ο όρος εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος αναφέρεται στη μέγιστη τάση την οποία μπορεί να παραλάβει το (άοπλο) σκυρόδεμα, όταν υποβάλλεται σε μονοαξονικό εφελκυσμό μέχρι ρηγματώσεως. Ορίζεται από το πρότυπο ASTM C496-96, συμβολίζεται ως S_c και εκφράζεται σε MPa. Η τιμή του είναι σημαντικά μικρότερη από την αντίστοιχη θλιπτική αντοχή.

Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Σκυροδέματος της TITAN AE στο Καμάρι Αττικής.

5.4 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 πάχους του εκάστοτε δοκιμίου. Η συγκεκριμένη τεχνική όπως αποδείχτηκε παρέδωσε συγκρίσιμα αποτελέσματα μεταξύ των συνθέσεων.

Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας του τομέα Χημικών Επιστημών του ΕΜΠ.



Εικόνα 5.3 Διαδικασία τρίψης-απότριψης

5.5 Έλεγχος υδατοπερατότητας

Η διαπερατότητα και πιο συγκεκριμένα η μοναδική του δυνατότητα να επιτρέπει στο νερό να διέρχεται μέσα από το δίκτυο των πόρων του, αποτελεί και τη σημαντικότερη ιδιότητα του πορώδους σκυροδέματος. Εκφράζεται σε $lt/min/m^2$. Για τη διαδικασία μέτρησής της στο πορώδες σκυρόδεμα, ελλείπει πάλι κάποιου προτύπου στα ευρωπαϊκά ή αμερικάνικα στάνταρντ για αυτό το είδος του σκυροδέματος, κινηθήκαμε εξεταστικά. Στην αρχή χρησιμοποιήθηκε η συσκευή μέτρησης της υδατοπερατότητας για το συμβατικού τύπου σκυρόδεμα με την εφαρμογή κυβικού δοκιμίου 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 εξάλειψη των απωλειών, όμως ο χρόνος διέλευσης του νερού ήταν ακαριαίως μη δίνοντας τη δυνατότητα για παραλαβή μέτρησης, καθώς το πορώδες σκυρόδεμα παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερες τιμές υδατοπερατότητας σε σχέση με το απλό σκυρόδεμα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την απόρριψη της μεθόδου. Κατόπιν, δημιουργήθηκε μία ιδιοκατασκευή στην οποία τοποθετούνταν δοκίμιο σε σχήμα ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου, διαστάσεων ΜxΠxΥ: 300x250x100mm, το οποίο περιβρεχόταν υπό τη μορφή ντους σε όλη την επιφάνειά του με μετρούμενη ποσότητα νερού, χρησιμοποιώντας ροόμετρο με σπείρωμα στην εξαγωγή του σωλήνα. Όμως και αυτή η μέθοδος αποδείχτηκε μη ικανοποιητική καθώς δεν έδινε ουσιαστικές διαφορές στις μετρήσεις μεταξύ των δοκιμών, ακόμη και με τη χρήση μέγιστης παροχής νερού και έτσι εγκαταλείφθηκε. Για τον λόγο αυτόν υιοθετήθηκε 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 πορώδους 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 δείγματος, σε (cm)

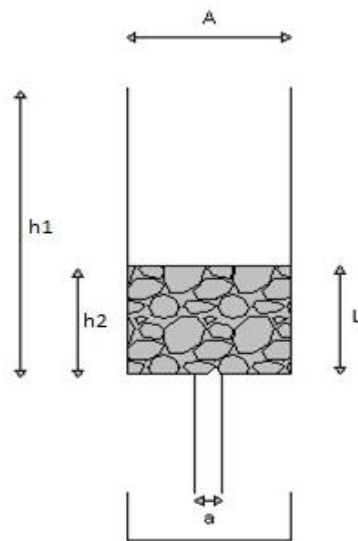
A : επιφάνεια της εγκάρσιας διατομής του δείγματος, σε (cm²)

t : ο χρόνος που απαιτείται για να πέσει 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)

Το παρακάτω σχεδιάγραμμα αποτυπώνει τη συσκευή η οποία χρησιμοποιήθηκε.



Σχεδιάγραμμα 5.1

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 όπου πάταγαν, εμποδίζοντας έτσι την πλευρική διαφυγή του νερού που θα επηρέαζε τη μέτρηση. Ακόμη, στο κάθε δοκίμιο πρώτα διήλθε νερό με ανοιχτή 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.

Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο της TITAN ΑΕ στο Καμάρι Αττικής.

Η φωτογραφίες που ακολουθούν παρουσιάζουν την ιδιοκατασκευή που στη διάρκεια της μελέτης εγκαταλείφθηκε καθώς και τη συσκευή που χρησιμοποιήθηκε εν συνεχεία και μέχρι τέλους κατά τον έλεγχο της υδατοπερατότητας.



Εικόνα 5.4 Ιδιοκατασκευή υδατοπερατότητας



Εικόνα 5.5 Συσκευή Υδατοπερατότητας

5.6 Υπολογισμός όγκου κενών χώρων (πορώδες)

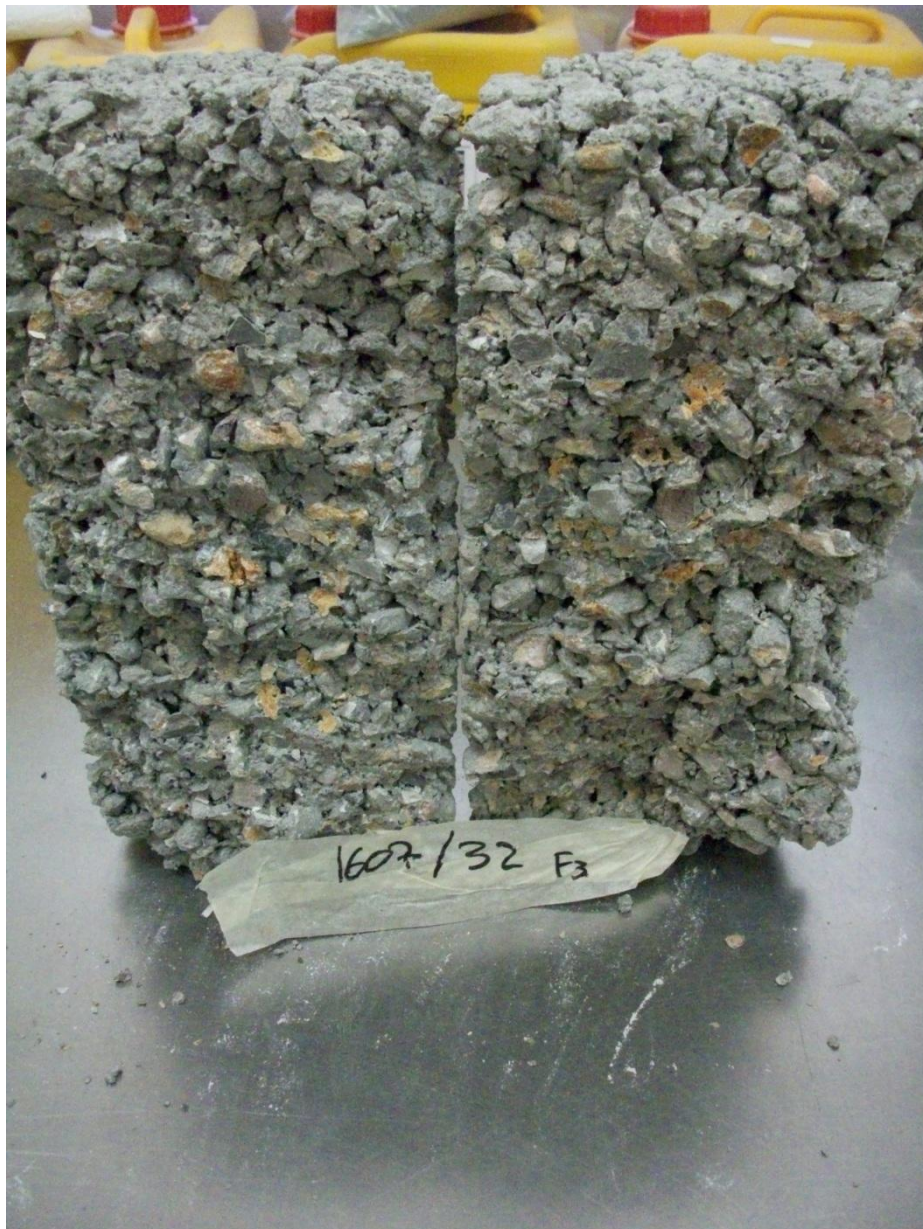
Ο όγκος των κενών χώρων αποτελεί έννοια άμεσα συνυφασμένη με την τιμή της υδατοπερατότητας του πορώδους σκυροδέματος. Η διαδικασία υπολογισμού της τιμής του πραγματοποιήθηκε στην ίδια συσκευή της υδατοπερατότητας, με τη χρήση κυλινδρικών δοκιμίων. Τα δοκίμια αφέθηκαν σε συνθήκες ελάχιστης έως μηδενικής υγρασίας μέχρι να είναι εντελώς στεγνά και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν στη συσκευή της υδατοπερατότητας. Προηγουμένως, η συσκευή όντας κενή δοκιμίου πληρώθηκε με νερό και η μάζα αυτή του νερού καταμετρήθηκε. Θεωρώντας το ειδικό βάρος του νερού ίσο με 1 g/cm^3 , η μάζα αυτή ισούται με τον όγκο V_W . Στη συνέχεια, με το δοκίμιο τοποθετημένο πληρώθηκε εκ νέου και ο νέος όγκος νερού καταγράφηκε επίσης (V_{W1}). Αν το δοκίμιο ήταν συμπαγές, βάσει των διαστάσεων του, ο όγκος του νερού που απαιτήθηκε για να πληρωθεί η συσκευή, θα έπρεπε να ήταν σταθερός (V_{W2}) και ίσος με τη διαφορά του όγκου του νερού με άδεια τη συσκευή (V_W) μείον του όγκου του δοκιμίου (V_T). Δηλαδή $V_{W2} = V_W - V_T$. Όμως, αυτός ο όγκος δεν είναι σταθερός αλλά διαφέρει από δοκίμιο σε δοκίμιο και πάντα είναι μεγαλύτερος από ότι αν ήταν συμπαγές το δοκίμιο, λόγω της ύπαρξης των κενών χώρων που επιτρέπουν στο νερό να τους πληρώσει (V_{W1}). Η τελική αυτή διαφορά του όγκου που μετρήθηκε μείον τη θεωρητική διαφορά του όγκου αν το δοκίμιο ήταν συμπαγές, αποτελεί και τον όγκο των κενών χώρων. $V_V = V_{W1} - V_{W2}$.

Το πορώδες ή αλλιώς το ποσοστό των κενών χώρων στη μάζα του δοκιμίου εκφράζεται με την εξίσωση (2)

$$P(\%) = [V_V / V_T] * 100 \quad (2)$$

5.7 Αξιολόγηση εσωτερικού πορώδους

Μέσω της οπτικής επιθεώρησης διαπιστώνεται η ύπαρξη των κενών χώρων στο σώμα του πορώδους σκυροδέματος. Πραγματοποιήθηκε διάνοιξη της μάζας των δοκιμίων όπως φαίνεται στην εικόνα 5.6 που ακολουθεί και δόθηκε μία εκτίμηση του κατά πόσο τα κενά αυτά είναι συνεχή μεταξύ τους, αποτελώντας ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο πόρων, γεγονός απαραίτητο για την αύξηση της διαπερατότητας του υλικού.



Εικόνα 5.6 Οπτική επιθεώρηση εσωτερικού πορώδους δοκιμίου

6.ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ

6.1 Πρώτες ύλες και τόπος προέλευσής

Ως υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των δοκιμών στην παρούσα εργασία είναι τα εξής:

- Τσιμέντο Portland CEMII 32.5 και CEMII 42.5 TITAN
- Ασβεστολιθική άμμος
- Ασβεστολιθικά αδρανή (Χαλίκι-Γαρμπίλι)
- Αδρανή σκωρίας χάλυβα (2 τύποι κοκκομετρικής κατανομής)
- Αδρανή ανακυκλωμένου σκυροδέματος
- Πυριτική παιπάλη (Silica Fume)

Τα ασβεστολιθικά αδρανή και η άμμος προήλθαν από την TITAN ΑΕ και πιο συγκεκριμένα από το λατομείο της στο Καμάρι Αττικής. Τα δύο είδη τσιμέντου Portland επίσης προήλθαν από την TITAN ΑΕ. Οι δύο τύποι σκωρίας χάλυβα προήλθαν από την εταιρεία επεξεργασίας μετάλλων ΑΕΙΦΟΡΟΣ ΑΕ και τα αδρανή ανακυκλωμένου σκυροδέματος ήταν από τη Ανακύκλωση Αδρανών Μακεδονίας ΑΕ και συγκεκριμένα από κατεδάφιση στην παραλία της Θεσσαλονίκης. Τέλος η πυριτική παιπάλη που χρησιμοποιήθηκε ήταν της εταιρείας BASF ΕΛΛΑΣ.

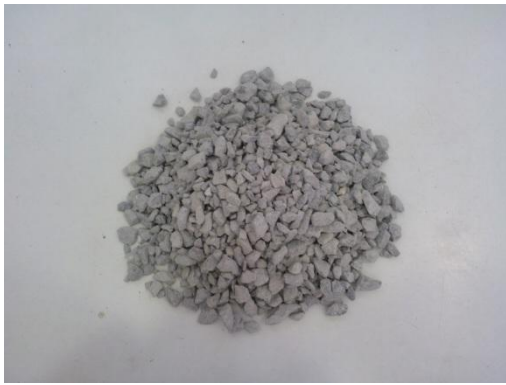
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.



Εικόνα 6.1 Ασβεστολιθική άμμος



Εικόνα 6.2 Ασβεστολιθικό χαλίκι



Εικόνα 6.3 Ασβεστολιθικό γαρμπίλι



Εικόνα 6.4 Σκωρία χάλυβα



Εικόνα 6.5 Ανακυκλωμένο σκυρόδεμα

Στη συνέχεια δίνεται η χημική ανάλυση των ανωτέρω. Επίσης δίνονται, όπως προέκυψαν από πειραματικές μελέτες, για όλα τα αδρανή και την άμμο η κοκκομετρική κατανομή τους, καθώς και τα ειδικά τους βάρη και η υδατοαπορροφητικότητα τους. Επίσης για τα αδρανή, παρουσιάζεται το πορώδες και η ειδική τους επιφάνεια, που πάρθηκαν με τη χρήση μεθόδου ποροσιμετρίας N_2 .

6.2 Χημική ανάλυση πρώτων υλών

Η χημική ανάλυση της σύστασης των υλικών πραγματοποιήθηκε μέσω της μεθόδου ανάλυσης XRF και παρουσιάζεται στους πίνακες 6-1A και 6-1B που ακολουθούν.

Πίνακας 6.1A Χημική σύσταση αδρανών

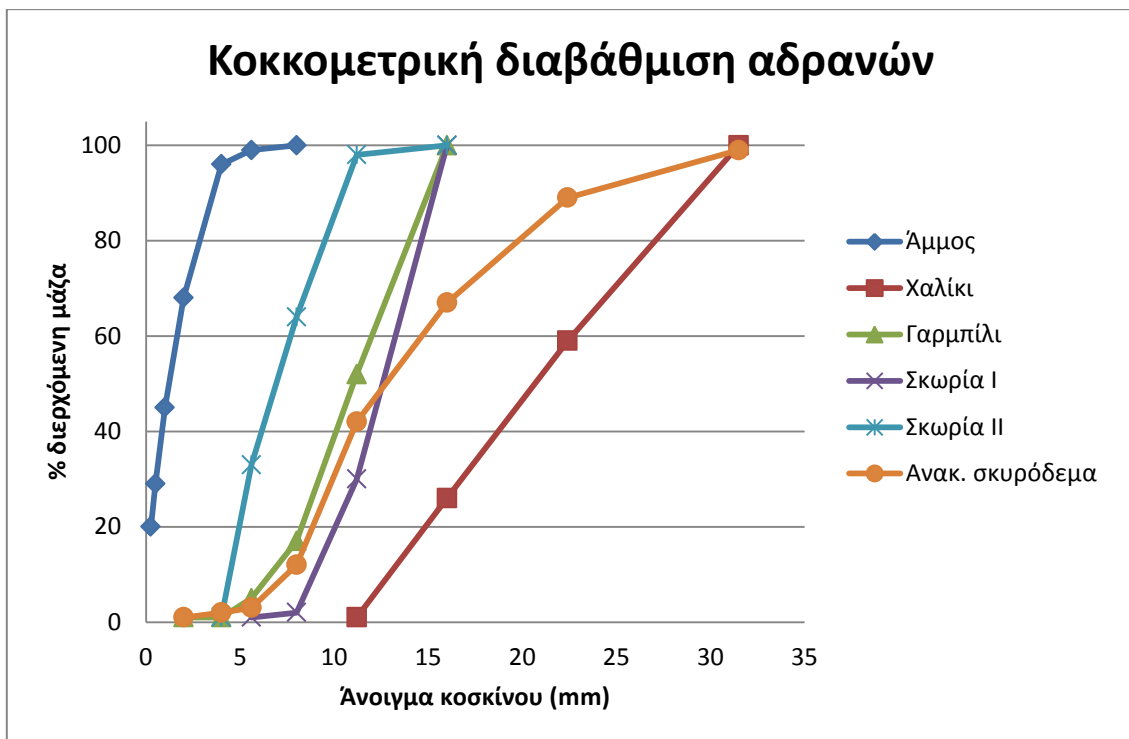
Συστατικό %	Ασβεστόλιθος	Σκωρία χάλυβα	Ανακυκλωμένο σκυρόδεμα
<i>CaO</i>	52.8	41.33	44.7
<i>SiO₂</i>	1.16	14.92	20.1
<i>MgO</i>	0.893	3.08	0.692
<i>Al₂O₃</i>	0.665	7.22	4.72
<i>Fe₂O₃</i>	0.333	22.62	1.79
<i>K₂O</i>	0.094	0.019	0.501
<i>TiO₂</i>	0.026	0	0.26
<i>SO₃</i>	0.020	0.509	0.29
<i>P₂O₅</i>	0.019	0.441	0.045
<i>SrO</i>	0.015	0.044	0.034
<i>MnO</i>	0.012	4.27	0.032
<i>Cr₂O₃</i>	0.0065	1.29	0.024
<i>NiO</i>	0.004	0.0063	0.0032
<i>Cl</i>	0.0008	0.01	0.18
<i>ZnO</i>	-	0.021	0.0041
<i>ZrO₂</i>	-	0.021	0.0038
<i>V₂O₅</i>	-	0.064	0.0038
<i>Na₂O</i>	-	0.19	0.403
<i>As₂O₃</i>	-	-	0.022
<i>BaO</i>	-	0.197	-
<i>CuO</i>	-	0.031	-
<i>Na₂O</i>	-	0.027	-
<i>WO₃</i>	-	0.026	-
<i>Nb₂O₅</i>	-	0.010	-
<i>LOI (wet)</i>	43.93	-	26.23
Σύνολο	99.978	96.3463	100.0379

Πίνακας 6.1B Χημική σύσταση τσιμέντου και πυριτικής παιπάλης

Συστατικό %	Portland CEM II 32.5	Portland CEM II 42.5	Πυριτική παιπάλη
<i>CaO</i>	53.40	55.38	0.35
<i>SiO₂</i>	23.00	24.86	96.40
<i>Ελεύθερο πυρίτιο</i>	-	-	0.31
<i>Al₂O₃</i>	6.00	5.13	0.75
<i>Fe₂O₃</i>	3.80	3.32	0.56
<i>MgO</i>	3.00	3.19	-
<i>K₂O</i>	0.75	0.88	0.43
<i>TiO₂</i>	-	0.21	-
<i>SO₃</i>	2.80	1.94	0.049
<i>P₂O₅</i>	-	0.11	-
<i>Cr₂O₃</i>	-	-	-
<i>Cl</i>	0.01	0.01	0.007
<i>Na₂O</i>	0.30	0.28	0.04
<i>LOI (wet)</i>	7.00	3.90	3.01 (max 3.5)
Σύνολο	100.06	99.20	101.906

6.3 Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών υλικών

Στο διάγραμμα 6.1 που ακολουθεί δίνεται η κοκκομετρική ανάλυση κατά EN 933-1 της άμμου, των ασβεστολιθικών αδρανών, των αδρανών σκωρίας χάλυβα και των αδρανών ανακυκλωμένου σκυροδέματος, όπως προέκυψαν από κοκκομετρήσεις στο εργαστήριο της ΤΙΤΑΝ ΑΕ στο Καμάρι Αττικής.



Διάγραμμα 6.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών

6.4 Ειδικά βάρη και υδατοαπορροφητικότητα αδρανών υλικών

Τα ειδικά βάρη και η υδατοαπορροφητικότητα των αδρανών υλικών προήλθαν από μετρήσεις του εργαστηρίου της TITAN ΑΕ στο Καμάρι Αττικής και δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.2 Ειδικό βάρος και υδατοαπορροφητικότητα αδρανών

	Άμμος	Ασβεστολιθικά (χαλίκι- γαρμπίλι)	Σκωρία χάλυβα	Ανακυκλωμένο σκυρόδεμα
Μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος εν κορεσμού (N/m^3)	2.62	2.68	3.30	2.32
Υδατοαπορροφητικότητα (%)	2.12	0.89	2.25	4.80

6.5 Ειδική επιφάνεια - πορώδες αδρανών υλικών

Στον πίνακα 6.3 που ακολουθεί δίνονται η ειδική επιφάνεια, ο όγκος των πόρων και η μέση διάμετρος των πόρων των αδρανών, όπως προκύπτουν από τα αποτελέσματα του ποροσίμετρου N_2 .

Πίνακας 6.3 Αποτελέσματα Ποροσίμετρου N_2

	ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΑ	ΟΙΚΟΔΟΜΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ	ΣΚΩΡΙΑ ΧΑΛΥΒΑ
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
Μέση διάμετρος πόρων d_P (Å)	98.522	107.216	103.356

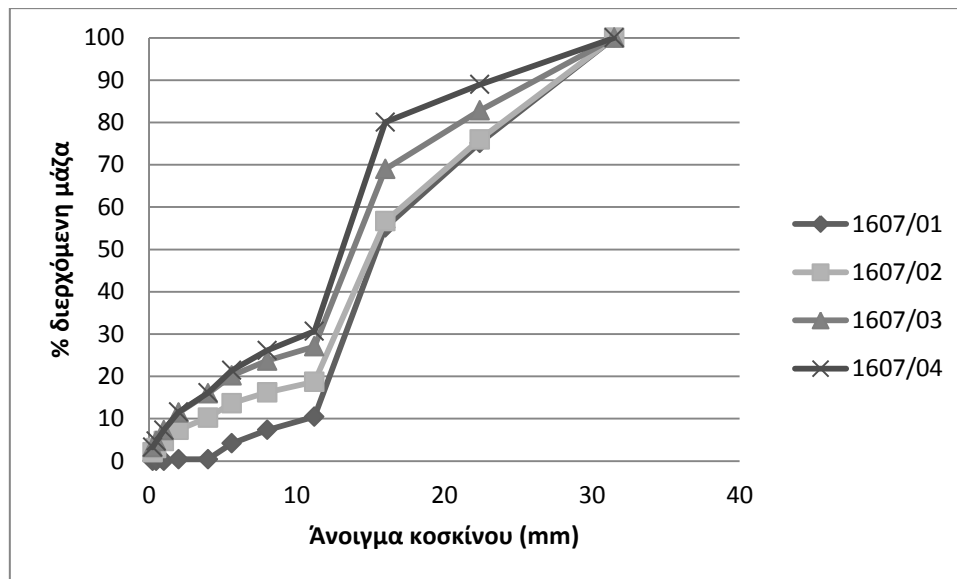
7. ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Η μελέτη για τη δημιουργία πορώδους 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 στις θλιπτικές αντοχές καθώς και στην υδατοπερατότητα που παρουσίαζαν τα δοκίμια, γι' αυτό το λόγο και η μελέτη της τρίψης - απότριψης ξεκίνησε από τη σύνθεση 1607/16 όπου είχαν εξαχθεί κάποια πρώτα συμπεράσματα. Η κωδική ονομασία όλων των δοκιμαστικών συνθέσεων είναι η 1607/_ _ , ξεκινώντας από την 1607/01 και καταλήγοντας στην 1607/32, που αποτέλεσε και την βέλτιστη σύνθεση πορώδους σκυροδέματος με τη χρήση αμιγώς ασβεστολιθικών αδρανών.

Οι τέσσερις πρώτες συνθέσεις που παρασκευάστηκαν, με τις ποσότητες των πρώτων υλών και τις τιμές των ιδιοτήτων τους, δίνονται στον παρακάτω πίνακα 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 7.1 Αναλογίες πρώτων υλών και ιδιότητες συνθέσεων 1607/01 – 1607/04

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/m ² /min)	209,6			209,5			208			208,8		



Διάγραμμα 7.1 Κοκκομετρική κατανομή συνθέσεων 1607/01 – 1607/04

Οι τέσσερις πρώτες συνθέσεις έδωσαν χρήσιμα συμπεράσματα, όπως:

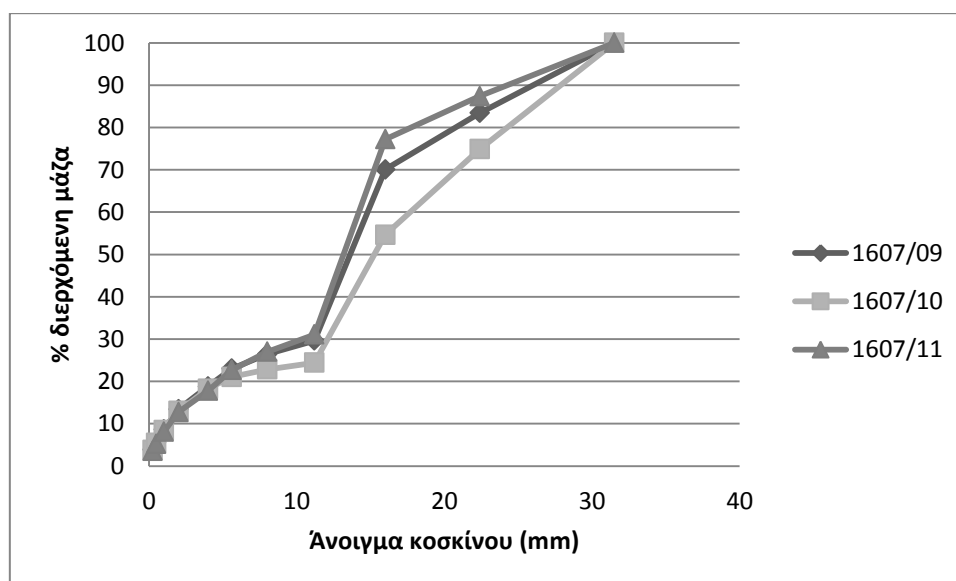
- Η χρήση μικρής σχετικά ποσότητας άμμου δείχνει να δίνει καλύτερη συνοχή στο σκυρόδεμα απ' ό,τι με τη χρήση αποκλειστικά χονδρόκοκκων αδρανών, χωρίς να επηρεάζει ουσιαστικά την τιμή της υδατοπερατότητας του πορώδους σκυροδέματος. Για τον λόγο αυτό ορισμένη ποσότητα άμμου χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις επόμενες συνθέσεις.
- Αρκετή τσιμεντόπαστα είχε κατακαθίσει στις πλευρές των δοκιμίων, με αποτέλεσμα να φράζεται το πορώδες του σκυροδέματος και να μην εμφανίζεται υψηλή υδατοπερατότητα.
- Οι θλιπτικές αντοχές των δοκιμίων ήταν ιδιαίτερος αυξημένες.

Για τους δύο τελευταίους λόγους, οι επόμενες τρεις συνθέσεις (1607/09 – 1607/11) δημιουργήθηκαν με αρκετά χαμηλότερη, αλλά σταθερή για λόγους σύγκρισης, ποσότητα τσιμέντου Portland CEM II 32.5, σταθερή και μεγαλύτερη από πριν ποσότητα άμμου και διαφορές στις αναλογίες χαλκίου-γαρμπιλιού. Παρακάτω παρατίθενται ο πίνακας 7.2 καθώς και το διάγραμμα 7.2 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 παραλληλεπίεδου για την τοποθέτησή του στην ιδιοκατασκευή μέτρησης της υδατοπερατότητας, όπως αυτή παρουσιάζεται στην παράγραφο 5.5 της πειραματικής διαδικασίας. Οι τιμές της υδατοπερατότητας παρουσιάστηκαν στον παραπάνω πίνακα 7.1.

Πίνακας 7.2 Αναλογίες πρώτων υλών και ιδιότητες συνθέσεων 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		
Γαρμπίλι (%)	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/m²/min)	199,6			210			205,6		



Διάγραμμα 7.2 Κοκκομετρική κατανομή συνθέσεων 1607/09 – 1607/11

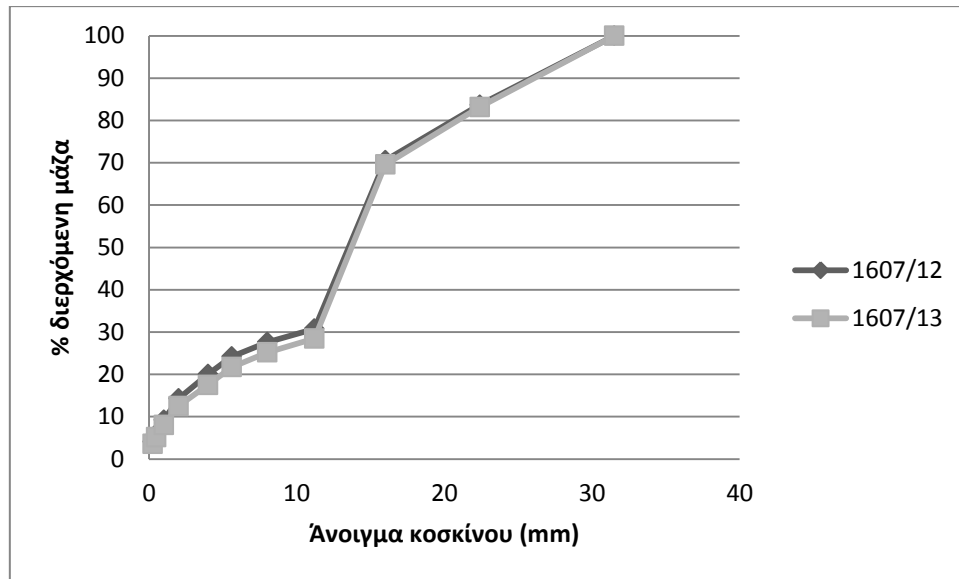
Οι τρεις αυτές συνθέσεις έδωσαν τα εξής συμπεράσματα:

- Η ποσότητα της άμμου που αυξήθηκε σε σχέση με τις πρώτες συνθέσεις, έδειξε να βοηθάει περαιτέρω στην δομική συνοχή του σκυροδέματος, καθώς 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 ίση αναλογία χαλικιού-γαρμπιλιού, ενώ η θλιπτικές αντοχές καλύτερες με αυξημένη αναλογία χαλικιού.
- Η ποσότητα του τσιμέντου φάνηκε να είναι οριακή, καθώς οι αντοχές μειώθηκαν αισθητά σε σχέση με τις τέσσερις πρώτες συνθέσεις.

Για τους παραπάνω λόγους, στις δύο συνθέσεις που ακολουθούν κρατήθηκε σταθερή η αναλογία 1:1 χαλικιού-γαρμπιλιού και η παράμετρος πλέον ήταν η ποσότητα του τσιμέντου. Στην πρώτη, 1607/12, η ποσότητα του τσιμέντου μειώθηκε κατά 30 kg/m^3 σε σχέση με τις προηγούμενες συνθέσεις δίνοντας τη θέση του στην άμμο, ενώ στη δεύτερη, 1607/13, η ποσότητα αυτή αυξήθηκε κατά 30 kg/m^3 μειώνοντας κατά το ίδιο ποσοστό την άμμο. Οι συνθέσεις αυτές παρουσιάζονται παρακάτω.

Πίνακας 7.3 Αναλογίες πρώτων υλών και ιδιότητες συνθέσεων 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 ($\text{l/m}^2/\text{min}$)	202			204,8		



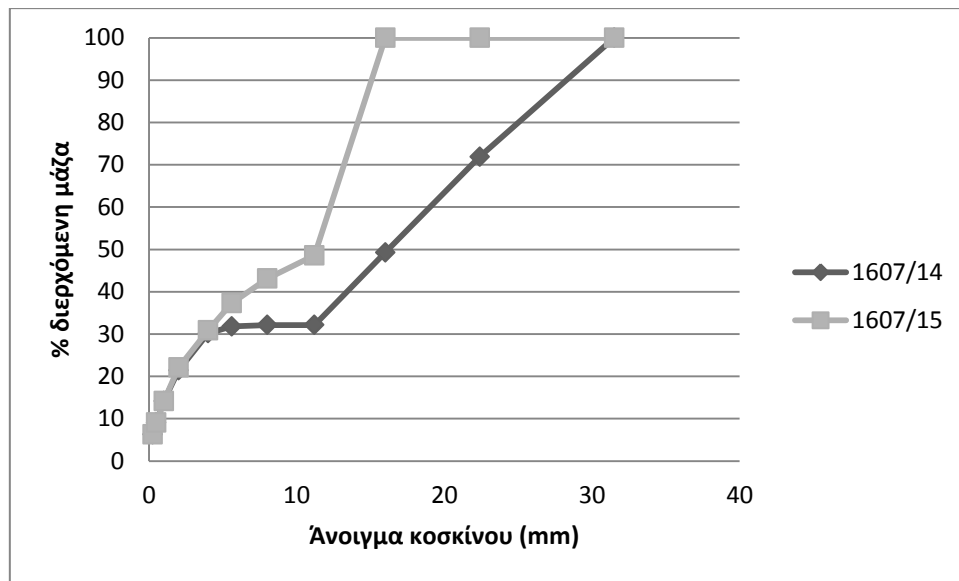
Διάγραμμα 7.3 Κοκκομετρική κατανομή συνθέσεων 1607/12 – 1607/13

Οι συγκεκριμένες συνθέσεις κατέστησαν σαφές ότι ποσότητα τσιμέντου μικρότερη των 150 kg/m^3 δεν ενδείκνυται για τις τελικές αντοχές του πορώδους σκυροδέματος.

Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν 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 υλικά διαφορετικών κοκκομετρικών διαβαθμίσεων, το καθένα μόνο του χωρίς την παρουσία του άλλου.

Πίνακας 7.4 Αναλογίες πρώτων υλών και ιδιότητες συνθέσεων 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 ($\text{l/m}^2/\text{min}$)	207,6			206,4		



Διάγραμμα 7.4 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 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 δοκιμών και δεν ήταν ομοιόμορφα κατανεμημένη στη μάζα τους. Αυτό συνέβη επειδή το χαλίκι έχει πολύ τραχιά και γωνιώδη επιφάνεια δυσκολεύοντας την εργασιμότητα κατά την παρασκευή, με αποτέλεσμα στις πλευρές των δοκιμών είχε κατακαθίσει η τσιμεντόπαστα, μειώνοντας το πορώδες και την υδατοπερατότητά τους.

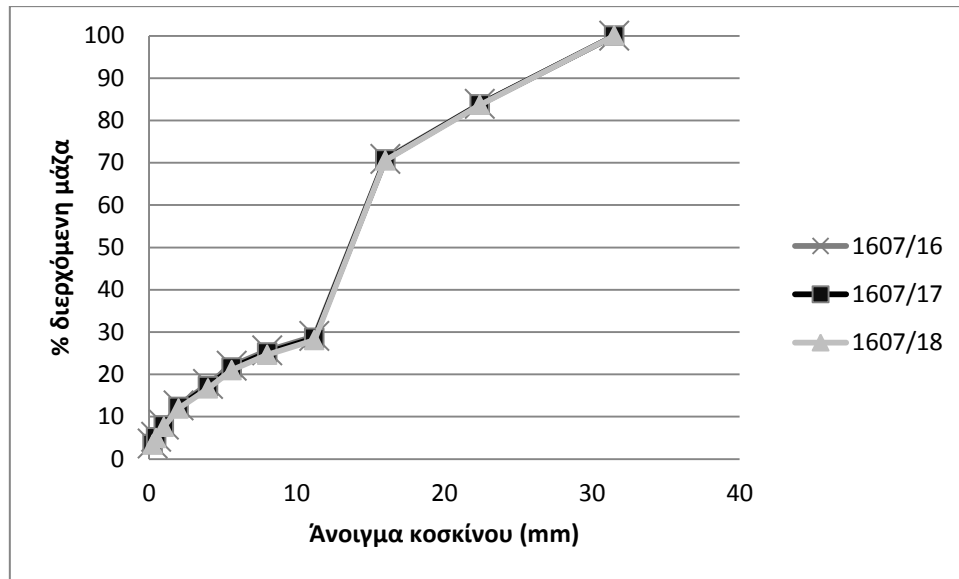
Τα τελευταία αποτελέσματα μας οδήγησαν σε ένα πείραμα για τη σχέση των κοκκομετρικών κατανομών χαλικιού και γαρμπιλιού και τη συνάφεια που παρουσιάζουν μεταξύ τους. Κατά πόσο δηλαδή τα γαρμπίλια γεμίζουν τα κενά που αφήνουν μεταξύ τους τα χαλίκια. Σε ένα προζυγισμένο δοχείο σταθερού όγκου, τοποθετήθηκε στην αρχή σκέτο χαλίκι μέχρι πλήρωσης και στη συνέχεια αφαιρούνταν κάθε φορά ένα ποσοστό 10% κ.β. και αντικαθιστούσαν 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' ότι 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 τα αδρανή υποκαταστάθηκαν κατά ένα μέρος από πυριτική παυπάλη (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 χρήση επιπλέον νερού. Επίσης, από τις συνθέσεις αυτές ξεκίνησε και η μελέτη της τρίψης – απότριψης που θα μας απασχολήσει στη συνέχεια. Τα αποτελέσματα και οι κοκκομετρική κατανομή των τριών συνθέσεων φαίνονται στον πίνακα 7.5 και στο σχεδιάγραμμα 7.5.

Πίνακας 7.5 Αναλογίες πρώτων υλών και ιδιότητες συνθέσεων 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 7.5 Κοκκομετρική κατανομή συνθέσεων 1607/16 – 1607/18

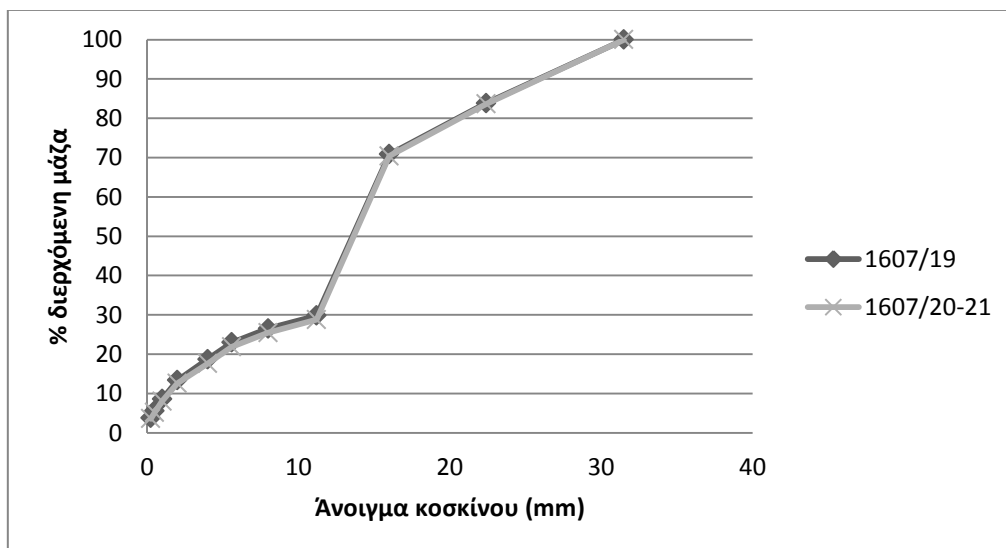
Τα αποτελέσματα των τριών παραπάνω συνθέσεων, αν εξαιρεθεί το γεγονός πως καταδείχτηκε ότι όντως η πυριτική παιπάλη όσο αυξάνεται κατ' αναλογία βελτιώνονται και οι τελικές αντοχές του σκυροδέματος, μειώνοντας παράλληλα ελαφρά τις πρώιμες, δεν ήταν ουσιαστικά. Έτσι, σαν αποτέλεσμα ήταν αφενός οι πολύ χαμηλές τιμές αντοχών αφετέρου η αδυναμία πρόσληψης μετρήσεων υδατοπερατότητας λόγω του “σφραγίσματος” που δημιουργήσε η τσιμεντόπαστα.

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. Επίσης η πυριτική παιπάλη αντικατέστησε αυτή τη φορά αναλογικά σε ποσότητα το τσιμέντο. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 7.6 και η κοκκομετρική τους κατανομή στο διάγραμμα 7.6.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ : Από τις συνθέσεις αυτές και πλέον χρησιμοποιήθηκε η νέα συσκευή υδατοπερατότητας, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 5.5, και δίνεται ο συντελεστής υδατοπερατότητας k των συνθέσεων.

Πίνακας 7.6 Αναλογίες πρώτων υλών και ιδιότητες συνθέσεων 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 7.6 Κοκκομετρική κατανομή συνθέσεων 1607/19 – 1607/21

Οι τρεις παραπάνω συνθέσεις έδειξαν τα εξής:

- 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.
- Οι τιμές της υδατοπερατότητας ήταν ιδιαίτερος υψηλές, οι θλιπτικές αντοχές όμως των συνθέσεων αυτών ήταν σε πολύ χαμηλά επίπεδα, γεγονός που καταδείκνυε την ανάγκη αύξησης της ποσότητας του τσιμέντου στις συνθέσεις.

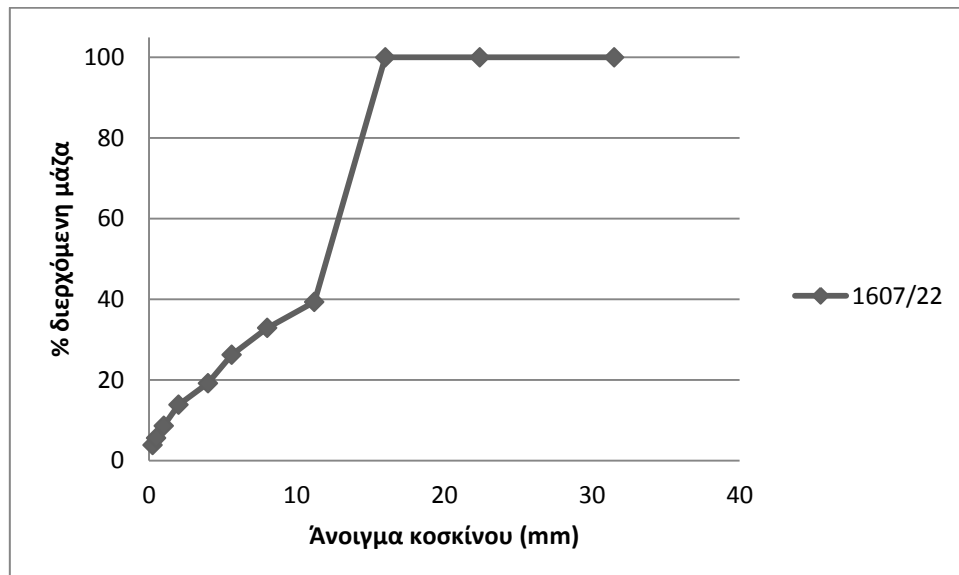
Στο σημείο αυτό της έρευνας, αποφασίστηκε η μη χρησιμοποίηση πλέον χαλικιού στις συνθέσεις. Ο λόγος ήταν ότι όπως παρατηρήθηκε και στη σύνθεση 1607/14 το ασβεστολιθικό χαλίκι έχει πολύ τραχιά επιφάνεια και γωνιώδεις άκρες, με αποτέλεσμα εκτός του ότι δυσκολεύει την εργασιμότητα σε σχέση με το γαρμπίλι καθιστώντας την τσιμεντόπαστα πολλές φορές ανομοιόμορφα κατανεμημένη, να αποτελεί και ένα ανασταλτικό παράγοντα για τη χρησιμοποίησή του, ακόμη και σε μικρά ποσοστά, σε πορώδες σκυρόδεμα που θα χρησιμοποιούνταν σε επιφάνεια οδοστρωμάτων. Επειδή η ποσότητα του τσιμέντου στο σκυρόδεμα αυτού του τύπου είναι αρκετά περιορισμένη, τα αδρανή είναι πλήρως εμφανή σε όλη τη μάζα του. Έτσι η χρησιμοποίηση του χαλικιού στις συνθέσεις προκαλούσε μία αρκετά τραχιά επιφάνεια στα δοκίμια, με αποτέλεσμα την 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 7.7 Αναλογίες πρώτων υλών και ιδιότητες συνθέσεων 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 7.7 Κοκκομετρική κατανομή σύνθεσης 1607/22

Η σύνθεση 1607/22 ήταν δοκιμαστική για τη χρήση μόνο γαρμπιλιού ως χονδρόκοκκο αδρανές στο σκυρόδεμα καθώς και τη δοκιμασία της ηλεκτρόσφυρας ως μέσο 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 .

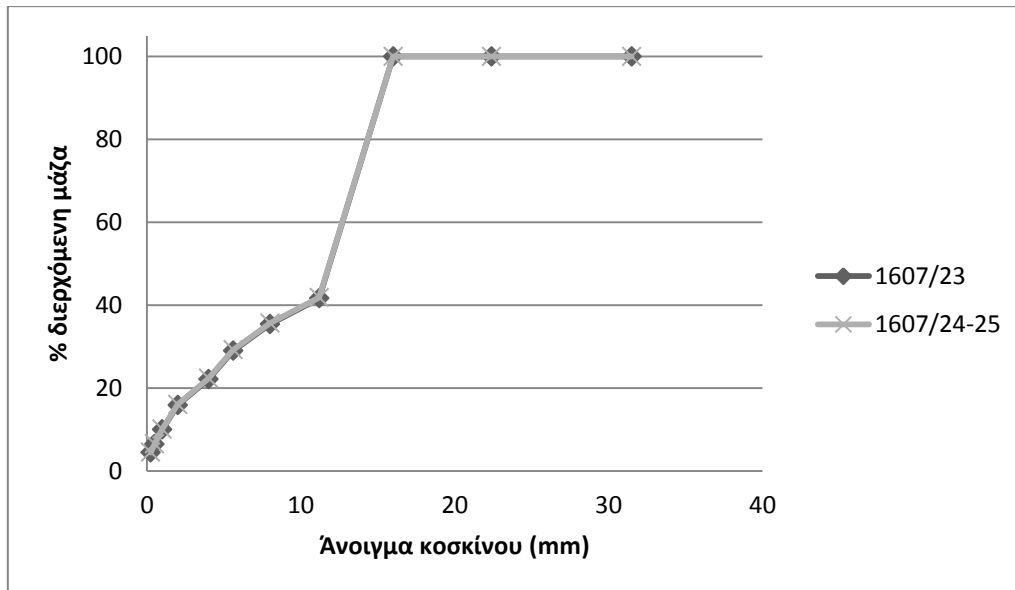
Η συγκεκριμένη σύνθεση έδωσε πολύ υποσχόμενες θλιπτικές αντοχές, αλλά το νωπό σκυρόδεμα ήταν αρκετά υδαρό και έδειξε πως ο λόγος w/c έπρεπε να μειωθεί. Σε συνδυασμό με το γεγονός αυτό η χρήση της άμμου ίσως ήταν λίγο περιορισμένη, οπότε αποφασίστηκε να αυξηθεί στις επόμενες συνθέσεις, με μικρή μείωση του γαρμπιλιού.

Οι επόμενες τρεις συνθέσεις δημιουργήθηκαν με το σκεπτικό των παραπάνω παρατηρήσεων και με τη χρήση υποκατάστασης 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, γι' αυτό αυτά τα τρία υλικά διαφέρουν λίγο στις ποσότητες τους με τις επόμενες δύο συνθέσεις. Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 7.8 και στο διάγραμμα 7.8 που ακολουθούν.

Επίσης πλέον δίνεται και το % ποσοστό του πορώδους των συνθέσεων με τη χρησιμοποίηση της νέας συσκευής υδατοπερατότητας (βλ. περιγραφή πειραματικής διαδικασίας).

Πίνακας 7.8 Αναλογίες πρώτων υλών και ιδιότητες συνθέσεων 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		
ΠΟΡΩΔΕΣ (%)	14			14			14		
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 7.8 Κοκκομετρική κατανομή συνθέσεων 1607/23 – 1607/25

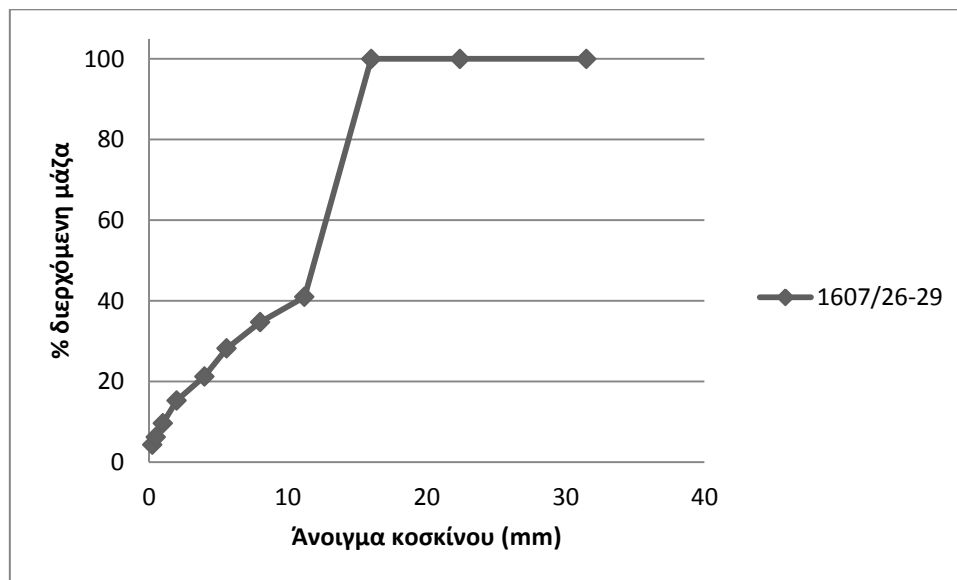
Οι τρεις παραπάνω συνθέσεις έδειξαν τα εξής:

- Οι αντοχές έχουν αυξηθεί σε σχέση με προηγούμενες συνθέσεις, όμως ο συντελεστής υδατοπερατότητας έχει μειωθεί αισθητά. Το γεγονός αυτό μάλλον οφείλεται περισσότερο 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 πρώιμες 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 7.9 και στο διάγραμμα 7.9 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 7.9 Αναλογίες πρώτων υλών και ιδιότητες συνθέσεων 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		
ΠΟΡΩΔΕΣ (%)	16,9			13,5			12,9			12,3		
ΤΡΙΨΗ – ΑΠΟΤΡΙΨΗ	1 λεπτό	2 λεπτά		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		0,35	0,5	
% ΑΠΩΛΕΙΑ ΠΑΧΟΥΣ	0,74	1,19		1,44	1,73		0,73	0,88		2,92	4,02	



Διάγραμμα 7.9 Κοκκομετρική κατανομή συνθέσεων 1607/26 – 1607/29

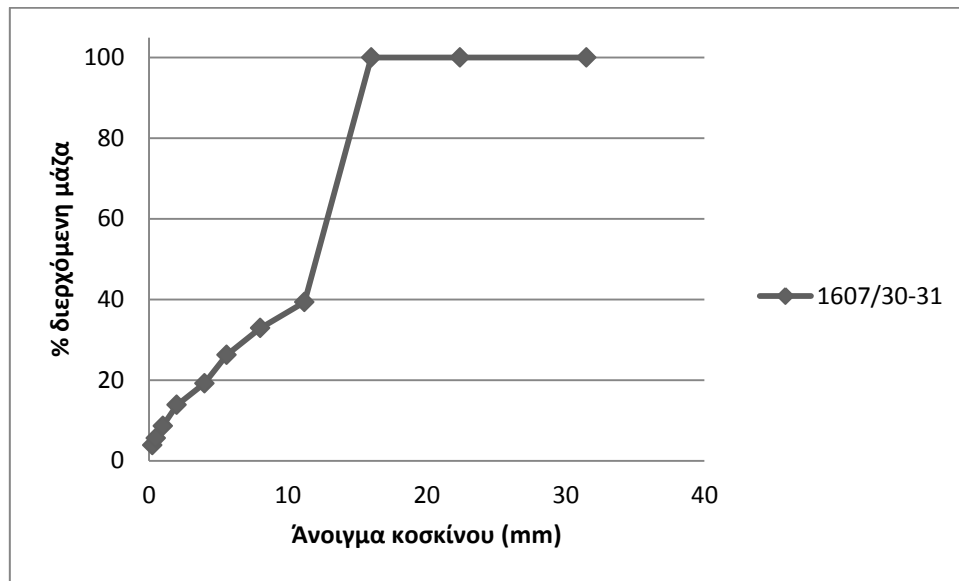
Τα αποτελέσματα των παραπάνω συνθέσεων είναι τα εξής:

- 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 ελάχιστο το κέρδος στις αντοχές ενώ οι απώλειες στην τιμή της υδατοπερατότητας αρκετά μεγαλύτερες, φτάνοντας μέχρι και τη μισή τιμή σε σχέση με τη σύνθεση χωρίς χρήση πυριτικής παιπάλης. Μόνο στην τρίψη - απότριψη σημειώθηκε κάποια βελτίωση των τιμών.
- Τα δοκίμια ακόμη έδειχναν να έχουν παραπάνω ποσότητα άμμου απ' ότι χρειαζόταν.

Έτσι στις επόμενες δύο συνθέσεις μειώθηκε λίγο η ποσότητα της άμμου και αυξήθηκε αυτή του γαρμπιού και συγκρίθηκαν ξανά τα δύο είδη τσιμέντου Portland.

Πίνακας 7.10 Αναλογίες πρώτων υλών και ιδιότητες συνθέσεων 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		
ΠΟΡΩΔΕΣ (%)	16,89			12,3		
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 7.9 Κοκκομετρική κατανομή συνθέσεων 1607/30 – 1607/31

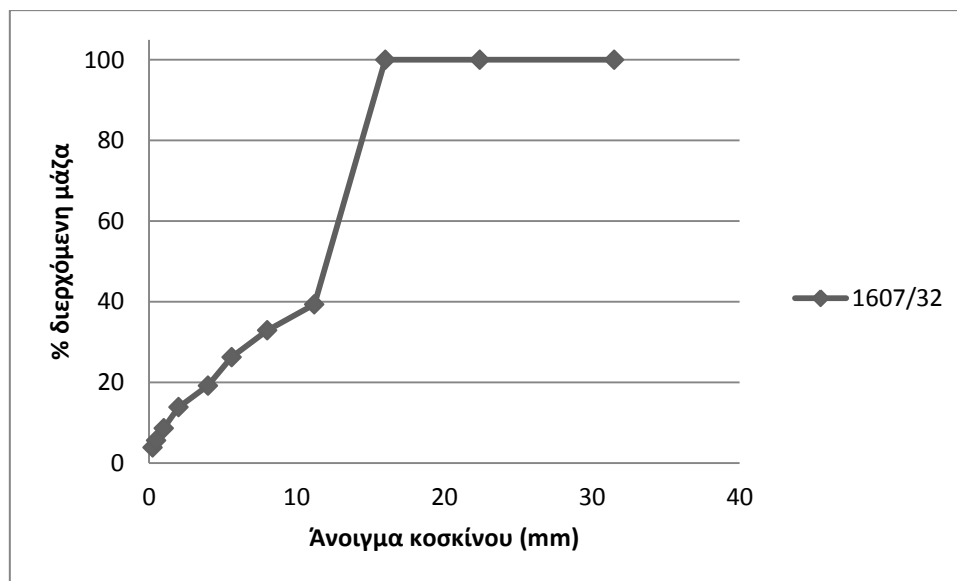
Οι δύο αυτές συνθέσεις έδειξαν και πάλι τις καλύτερες αντοχές που παρουσιάζει το CEM II 42.5 έναντι του CEM II 32.5. Όμως και πάλι ενώ το δεύτερο εμφάνισε μικρότερο πορώδες, είχε καλύτερη υδατοπερατότητα από το πρώτο. Το γεγονός αυτό μπορεί να σημαίνει ότι οι πόροι στη σύνθεση με το CEM II 42.5 ενώ είναι περισσότεροι σε σχέση με τη σύνθεση με το CEM II 32.5, το δίκτυό τους ίσως είναι πιο πολύπλοκο και δαιδαλώδες, με συνέπεια την αύξηση του χρόνου που απαιτείται για να διέλθει το νερό από τη μάζα του. Η διαφορά τους σε συνθήκες τρίψης – απότριψης δεν εμφάνισε ιδιαίτερες διαφορές.

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

Η σύνθεση 1607/32 παρουσιάζεται στον πίνακα 7.11 και η κοκκομετρική της κατανομή στο σχεδιάγραμμα 7.11.

Πίνακας 7.11 Αναλογίες πρώτων υλών και ιδιότητες σύνθεσης 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		
ΠΟΡΩΔΕΣ (%)	15,41		
ΤΡΙΨΗ – ΑΠΟΤΡΙΨΗ	1 λεπτό	2 λεπτά	
% ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ	1,91	3,38	
% ΑΠΩΛΕΙΑ ΠΑΧΟΥΣ	3,64	4,09	



Διάγραμμα 7.9 Κοκκομετρική κατανομή σύνθεσης 1607/32

Η τελική σύνθεση έδειξε τα εξής:

- Οι αντοχές μειώθηκαν σε ανεκτά όμως επίπεδα.
- Το σημαντικότερο όμως ήταν το γεγονός πως αν και το πορώδες μειώθηκε, η υδατοπερατότητα αυξήθηκε όπως και ήταν επιθυμητό.
- Οι αντοχές στην τρίψη – απότριψη έπεσαν, 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.

8. ΥΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΕ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΑΔΡΑΝΗ

Η σύνθεση 1607/32 αποτέλεσε και το πέρας της έρευνας για τη δημιουργία πορώδους σκυροδέματος με αμιγώς ασβεστολιθικά αδρανή. Η σύνθεση αυτή ονομάστηκε LP (Limestone Pervious). Στη συνέχεια, στην παραπάνω σύνθεση τα ασβεστολιθικά αδρανή (γαρμπίλι) υποκαταστάθηκαν με ποσοστά σκωρίας χάλυβα ή/και ανακυκλωμένου σκυροδέματος σε διάφορες αναλογίες και προέκυψαν οι συνθέσεις που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Η ονοματολογία προκύπτει από τη χρήση της αγγλικής ονομασίας των αδρανών. Η σκωρία χάλυβα ονομάζεται steel Slag και το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα (ή οικοδομικά απόβλητα) Construction & Demolition wastes. Το P στο τέλος των συνθέσεων δηλώνει το πορώδες σκυρόδεμα ή αλλιώς Pervious concrete. Οι συνθέσεις που δημιουργήθηκαν με τα ποσοστά των αδρανών που συμμετέχουν στην εκάστοτε σύνθεση και η ονομασία τους φαίνονται στον πίνακα 8.1.

Πίνακας 8.1 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% ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	CDP
50% ΑΣΒΕΣΤ. ΓΑΡΜΠΙΛΙ-50% ΣΚΩΡΙΑ	LSP
50% ΑΣΒΕΣΤ. ΓΑΡΜΠΙΛΙ-50% ΑΝΑΚ. ΣΚΥΡΟΔ.	LCDP
50% ΣΚΩΡΙΑ-50% ΑΝΑΚ. ΣΚΥΡΟΔ.	SCDP
50% ΑΣΒΕΣΤ. ΓΑΡΜΠΙΛΙ-25% ΣΚΩΡΙΑ-25% ΑΝΑΚ. ΣΚΥΡΟΔ.	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 αλλαγών ως προς τη συμπεριφορά μεταξύ τους. Σε όλες τις συνθέσεις υποκατάστασης χρησιμοποιήθηκε μόνο η σκωρία χάλυβα 1 καθαρά για λόγους σύγκρισης.

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 6.3. 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 απέμενε 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, κάποιες συνθέσεις χρειάστηκαν επιπλέον ποσότητα νερού για να καταστούν εργάσιμες και να αποκτήσουν την επιθυμητή ελαφρά υδαρή εμφάνισή στη νωπή τους μορφή. Το γεγονός αυτό ίσως οφείλεται στη διαφορετική φύση μεταξύ των υλικών και πως αυτά συνεργάζονται μεταξύ τους, καθώς και στη διαφορετική κοκκομετρική κατανομή που παρουσίαζε η κάθε σύνθεση.

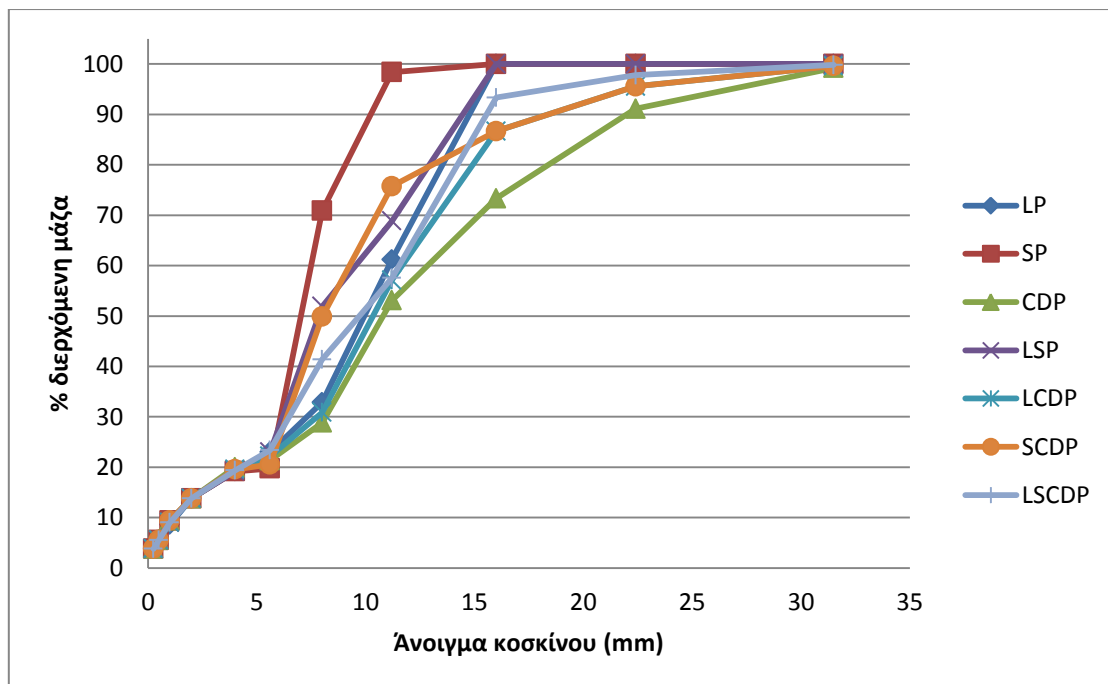
Όλα τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν στις συγκεκριμένες υποκαταστάσεις, πλην αυτών του ανακυκλωμένου σκυροδέματος είχαν προηγουμένως υποβληθεί σε διαδικασία ξήρανσης, καθότι βρίσκονταν τοποθετημένα για μεγάλο χρονικό διάστημα σε εκτεθειμένο περιβάλλον και το ενδεχόμενο ποσοστό υγρασίας τους θα παραποιούσε 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 πληρωθούν. 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 6.3 που ουσιαστικά αποτελεί ένα σταθμικό μέσο όρο. Έτσι, με την τεχνική αυτή το συγκεκριμένο εμπόδιο προσπεράστηκε, αφού πλέον η υδατοαπορροφητικότητα των συγκεκριμένων αδρανών δε θα επηρέαζε τις συνθέσεις αφού δε θα συμμετείχε στον υπολογισμό του προστιθέμενου νερού.

Στον πίνακα 8.2 που ακολουθεί δίνονται όλες οι συνθέσεις υποκατάστασης με τις ποσοότητες των πρώτων υλών που χρησιμοποιήθηκαν.

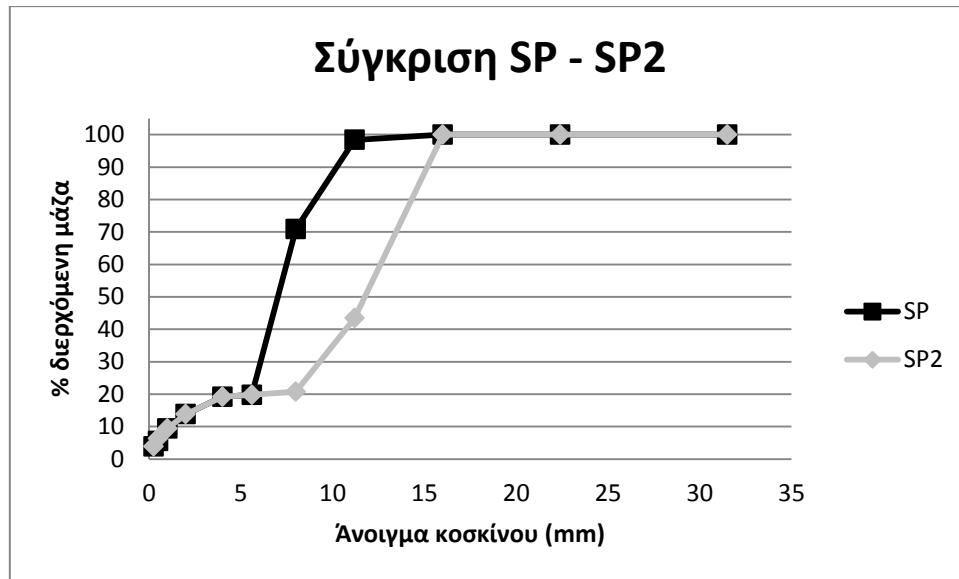
Πίνακας 8.2 Ποσότητες πρώτων υλών συνθέσεων υποκατάστασης

ΟΝΟΜΑ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ						w/c
	CEM II 42.5 (kg/m ³)	Άμμος (kg/m ³)	Ασβεστολιθικό γαρμπίλι (%)	Σκωρία χάλυβα I (%)	Σκωρία χάλυβα 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 δίνεται η κοκκομετρική κατανομή όλων των παραπάνω συνθέσεων, πλην της SP2 που παρατίθεται συγκριτικά με την SP στο διάγραμμα 8.2.



Διάγραμμα 8.1 Συγκριτική κοκκομετρική κατανομή συνθέσεων υποκατάστασης



Διάγραμμα 8.2 Συγκριτική κοκκομετρική κατανομή συνθέσεων SP και SP2

Στη συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων των συνθέσεων υποκατάστασης όπως αυτές περιγράφηκαν στην παράγραφο της πειραματικής διαδικασίας και γίνεται μία προσπάθεια συγκριτικής μελέτης των αποτελεσμάτων.

**Γ. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ -
ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ**

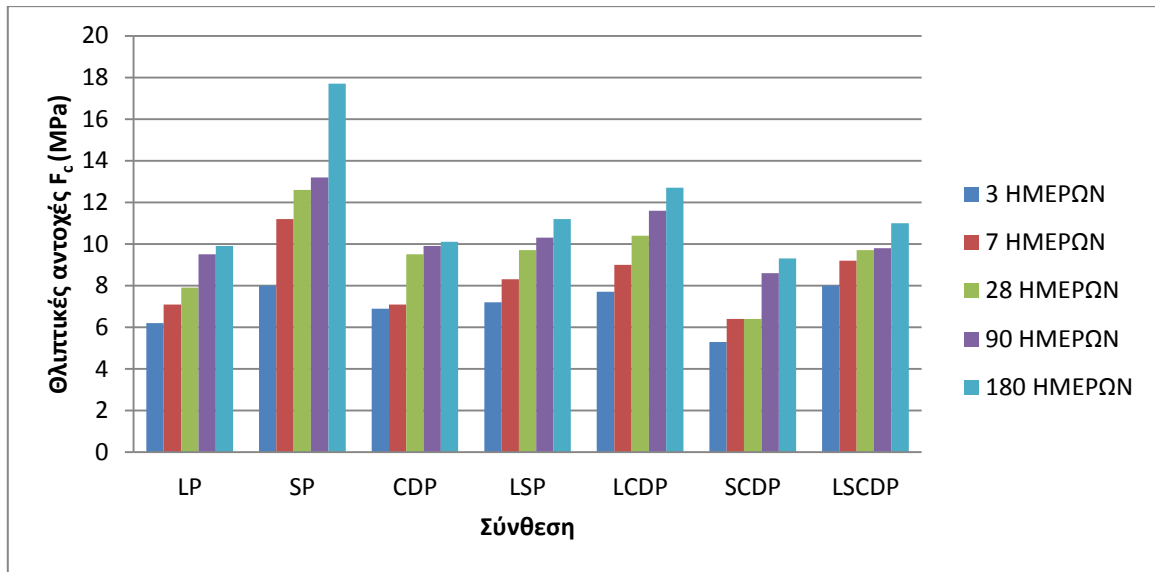
I. ΑΝΤΟΧΕΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ

Οι θλιπτικές αντοχές όλων των συνθέσεων δίνονται στον πίνακα Γ.1 που ακολουθεί.

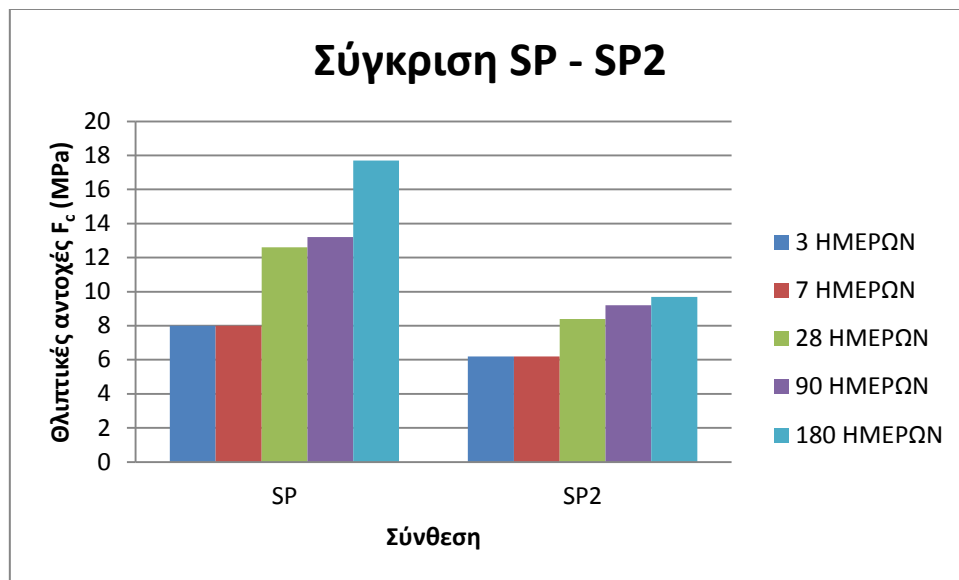
Πίνακας Γ.1 Θλιπτικές αντοχές συνθέσεων υποκατάστασης

ΟΝΟΜΑ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	ΘΛΙΠΤΙΚΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ F_c (MPa)				
	3 ημερών	7 ημερών	28 ημερών	90 ημερών	180 ημερών
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 8.3, ενώ οι δύο συνθέσεις με τους διαφορετικούς τύπους σκωρίας χάλυβα συγκρίνονται μεταξύ τους στο διάγραμμα 8.4.



Διάγραμμα Γ.1 Σύγκριση θλιπτικών αντοχών συνθέσεων υποκατάστασης



Διάγραμμα Γ.2 Σύγκριση θλιπτικών αντοχών συνθέσεων SP και SP2

Συζήτηση αποτελεσμάτων

- Όλες οι συνθέσεις αποκτούν ικανοποιητικές αντοχές για το πεδίο εφαρμογών τους.
- Η σκωρία χάλυβα (SP), όπως ήταν αναμενόμενο λόγω της σκληρότητας της, εμφανίζει αυξημένες αντοχές σε σχέση με τα άλλα αδρανή.
- Το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα (CDP) δείχνει να αποκτά λίγο καλύτερες αντοχές σε σχέση με τα ασβεστολιθικά αδρανή (LP), γεγονός που ίσως οφείλεται στη διαφορετική του κοκκομετρική κατανομή (πιο χονδρόκοκκα αδρανή) και στην αυξημένη τιμή συμπύκνωσης που εμφάνισε κατά την παραγωγική διαδικασία.
- Οι διμερείς συνθέσεις ασβεστολιθικών αδρανών - αδρανών σκωρίας χάλυβα (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 επέδειξε την ίδια συνοχή κατά την παρασκευή του, με 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 στην ποικιλία κοκκομετρικής κατανομής που εμφανίζουν τα τρία είδη αδρανών που βοήθησε όπως παρατηρήθηκε σε ένα αρκετά ομοιογενές μίγμα με ομοιόμορφη συμπύκνωση κατά την παραγωγή του.
- Η σύγκριση μεταξύ των δύο διαφορετικής κοκκομετρικής κατανομής σκωριών χάλυβα έδειξε την καλύτερη απόδοση αντοχών της λεπτόκοκκης σκωρίας (SP) έναντι της χονδρόκοκκης (SP2). Το γεγονός οφείλεται στη φύση του υλικού που έχει μεγάλο δείκτη σκληρότητας, με αποτέλεσμα η λεπτόκοκκη σκωρία να μπορεί να συμπυκνωθεί περαιτέρω κατά της παραγωγική διαδικασία, έναντι της χονδρόκοκκης η οποία εμφάνισε μεγάλη δυσκολία όπως παρατηρήθηκε.

II. ΑΝΤΟΧΕΣ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ

Οι τιμές στη δοκιμασία εφελκυσμού των δοκιμίων κυμάνθηκαν από 0,7 έως 2,1 MPa για όλες τις αναλογίες και τις ηλικίες, οι οποίες τιμές εμπίπτουν στο σφάλμα του οργάνου, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να εξαχθεί κάποιο γενικότερο συμπέρασμα για την αντοχή των συγκεκριμένων συνθέσεων σε εφελκυσμό.

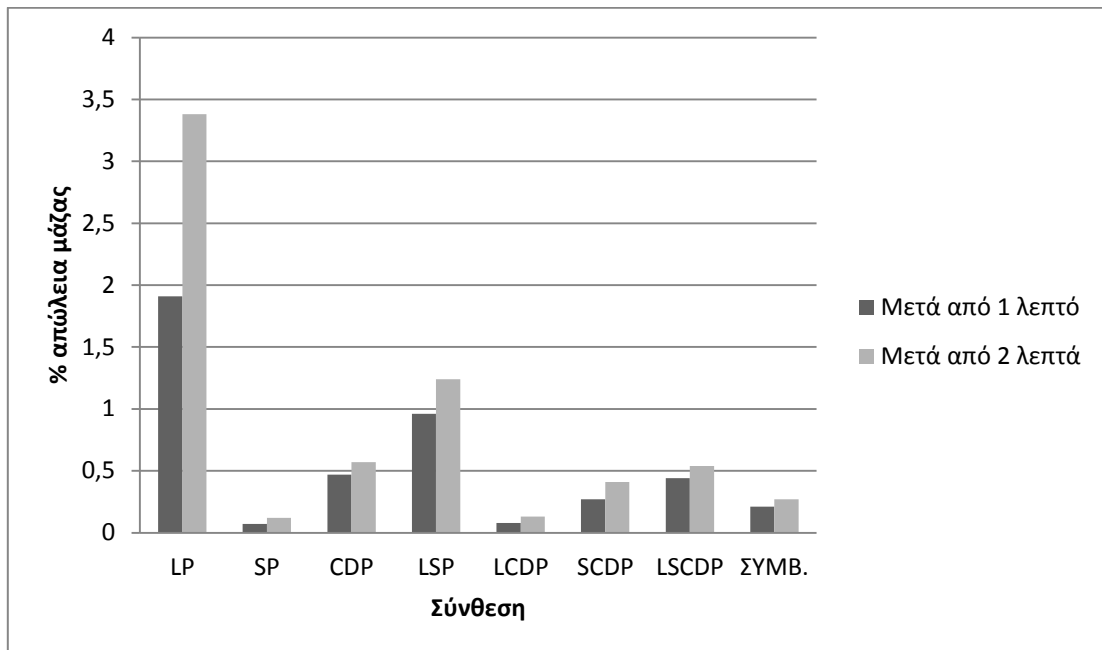
III. ΤΡΙΨΗ - ΑΠΟΤΡΙΨΗ

Τα αποτελέσματα των αντοχών σε συνθήκες τρίψης – απότριψης όλων των συνθέσεων δίνονται στον πίνακα 8.5 που ακολουθεί. Γίνεται επίσης σύγκριση και με τις απώλειες ενός συμβατικού τύπου σκυροδέματος.

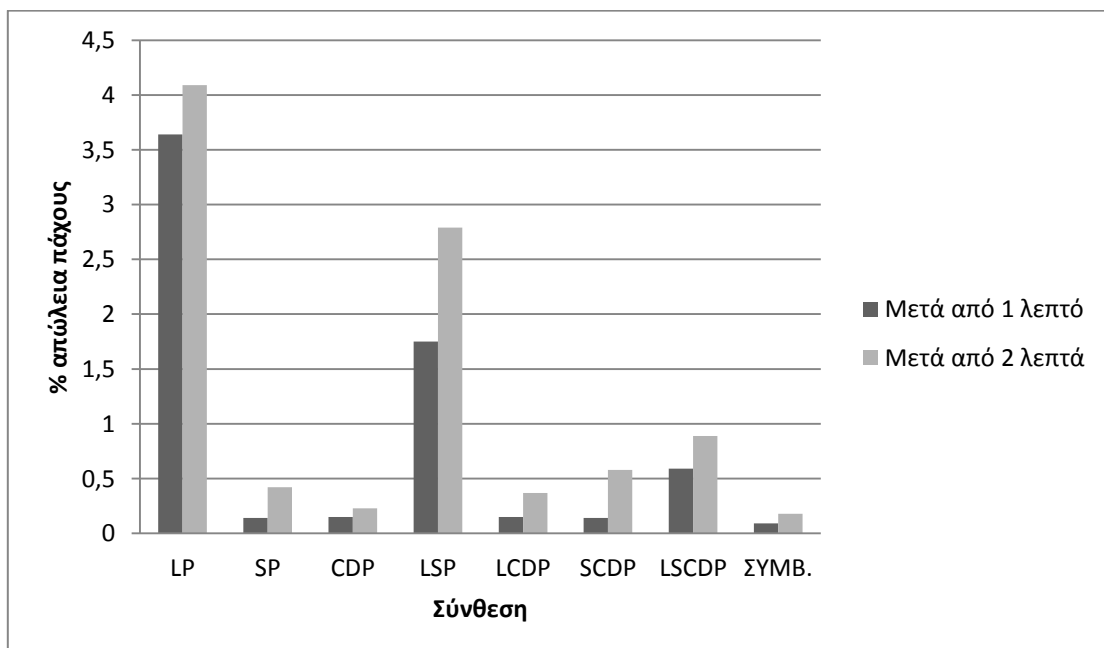
Πίνακας Γ.3 Αντοχές τρίψης - απότριψης συνθέσεων υποκατάστασης

	ΤΡΙΨΗ - ΑΠΟΤΡΙΨΗ			
	% ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ		% ΑΠΩΛΕΙΑ ΠΑΧΟΥΣ	
ΟΝΟΜΑ ΣΥΝΘΕΣΗΣ	<i>1 λεπτό</i>	<i>2 λεπτά</i>	<i>1 λεπτό</i>	<i>2 λεπτά</i>
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

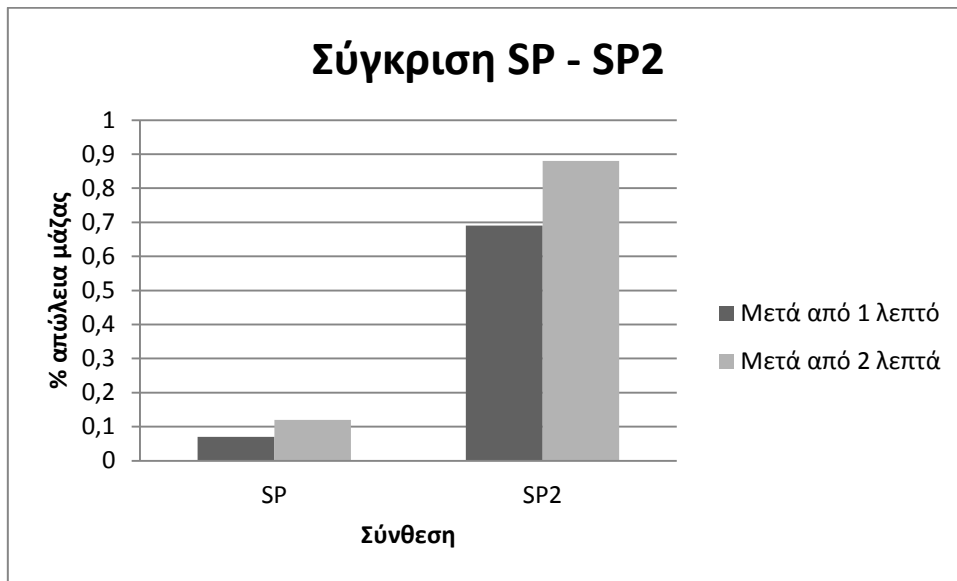
Και σε μορφή συγκριτικού διαγράμματος στα διαγράμματα 8.7 και 8.8, ενώ οι συνθέσεις με τους διαφορετικούς τύπους σκυριάς χάλυβα συγκρίνονται μεταξύ τους στα διαγράμματα 8.9 και 8.10.



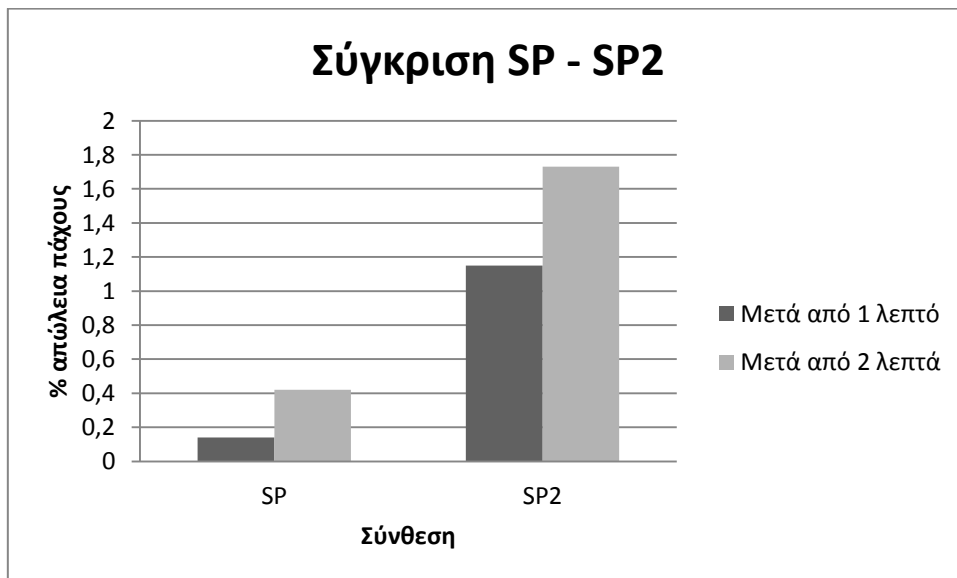
Διάγραμμα Γ.5 Σύγκριση απώλειας μάζας συνθέσεων υποκατάστασης



Διάγραμμα Γ.6 Σύγκριση απώλειας πάχους συνθέσεων υποκατάστασης



Διάγραμμα Γ.7 Σύγκριση απώλειας μάζας συνθέσεων SP και SP2



Διάγραμμα Γ.8 Σύγκριση απώλειας πάχους 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 πάχος, 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 ίσως εξαίρεση η σύνθεση ασβεστολιθικών – ανακυκλωμένου σκυροδέματος (LCDP) η οποία παρουσίασε απρόσμενα χαμηλές απώλειες, τόσο σε μάζα όσο και σε πάχος, η οποία δείχνει μια καλή συνεργασία των δύο τύπων αδρανών στη συγκεκριμένη διαδικασία καταπόνησης.
- Η σκωρία χάλυβα (SP) όπως αναμενόταν παρουσίασε τις μικρότερες απώλειες από τα τρία είδη αδρανών, λόγω της αυξημένης σκληρότητας που τη διακρίνει. Παρ' όλα αυτά η σύνθεση με τη χονδρόκοκκη σκωρία (SP2) έδειξε απρόσμενα να έχει αρκετά μεγαλύτερες απώλειες, τόσο μάζας όσο και πάχους. 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 που δεν παρατηρήθηκε κάτι τέτοιο, που έδειξε να έχει καλύτερη συνοχή λόγω της μικρότερης κοκκομετρικής κατανομής των αδρανών της.
- Τα εναλλακτικά αδρανή δείχνουν να βελτιώνουν τη συμπεριφορά του πορώδους σκυροδέματος σε επίπεδα κοντά σε συμβατικού τύπου σκυρόδεμα.
- Επίσης, σε όποιες συνθέσεις χρησιμοποιήθηκαν αδρανή σκωρίας – LSP, SCDP και LSCDP – εμφανίστηκε μία μείωση του ποσοστού απωλειών απ' ότι τα άλλα δύο υλικά εμφάνιζαν.

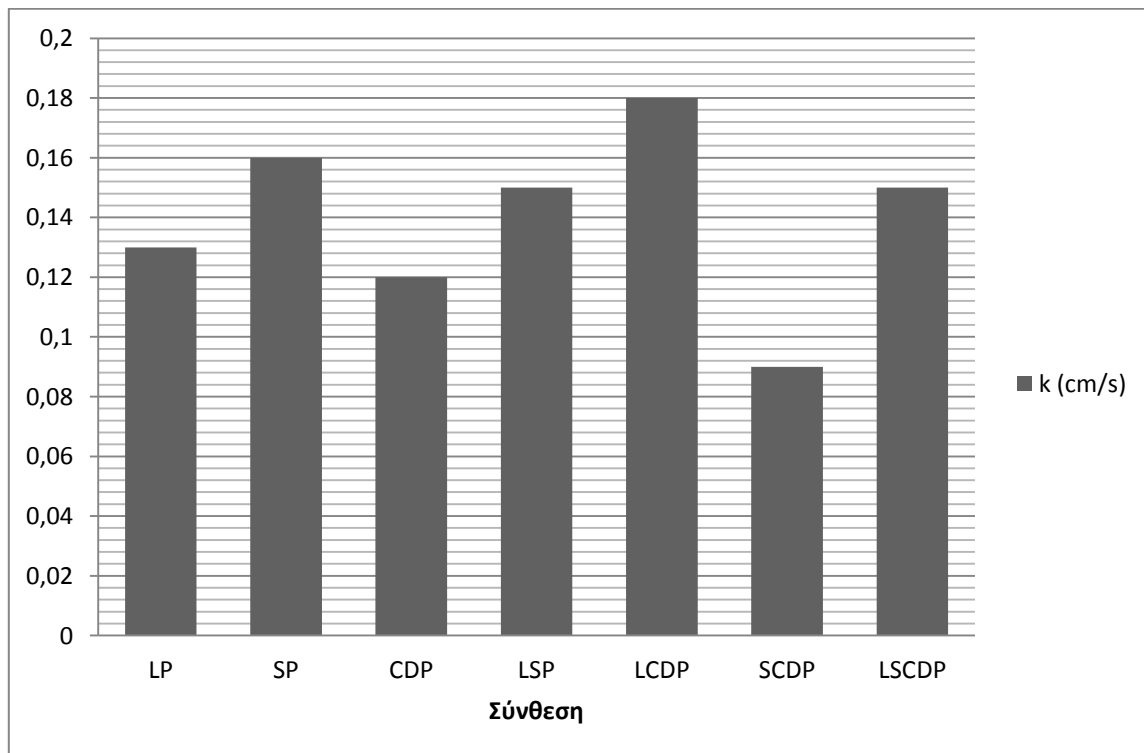
IV. ΥΔΑΤΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ

Η τιμές του συντελεστή υδατοπερατότητας k όλων των συνθέσεων δίνονται στον πίνακα 8.6 που ακολουθεί.

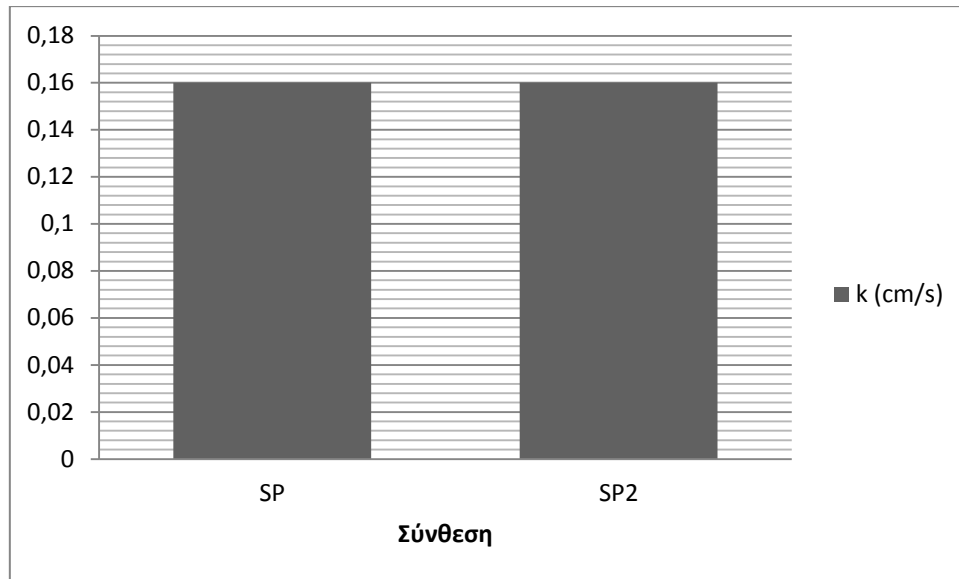
Πίνακας Γ.4 Συντελεστής υδατοπερατότητας k συνθέσεων υποκατάστασης

	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 8.11, ενώ οι δύο συνθέσεις με τους διαφορετικούς τύπους σκωρίας χάλυβα συγκρίνονται μεταξύ τους στο διάγραμμα 8.12.



Διάγραμμα Γ.9 Σύγκριση συντελεστή υδατοπερατότητας k συνθέσεων υποκατάστασης



Διάγραμμα Γ.10 Σύγκριση συντελεστή υδατοπερατότητας k συνθέσεων SP και SP2

Συζήτηση αποτελεσμάτων

- Και οι τρεις συνθέσεις με διαφορετικού τύπου αδρανή – LP, SP και CDP – έδωσαν καλές τιμές του συντελεστή υδατοπερατότητας k , εντός της περιοχής $10^{-1} - 10^2$ cm/s που ορίζει ο πίνακας 3.2 ως περατή.
- Η σύνθεση με τη σκωρία χάλυβα SP εμφάνισε τη μεγαλύτερη τιμή, λόγω τη σχετική δυσκολίας στη συμπύκνωσή της που άφησε μεγαλύτερο ποσοστό κενών χώρων όπως θα φανεί στην επόμενη παράγραφο, αφού άλλωστε οι έννοιες της διαπερατότητας και του πορώδους είναι άρρηκτα συνδεδεμένες.
- Από την άλλη, η σύνθεση με το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα CDP εμφάνισε τη μικρότερη τιμή, λόγω της μεγαλύτερης τιμής συμπύκνωσης που επέτρεψε κατά την παραγωγική διαδικασία.
- 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.

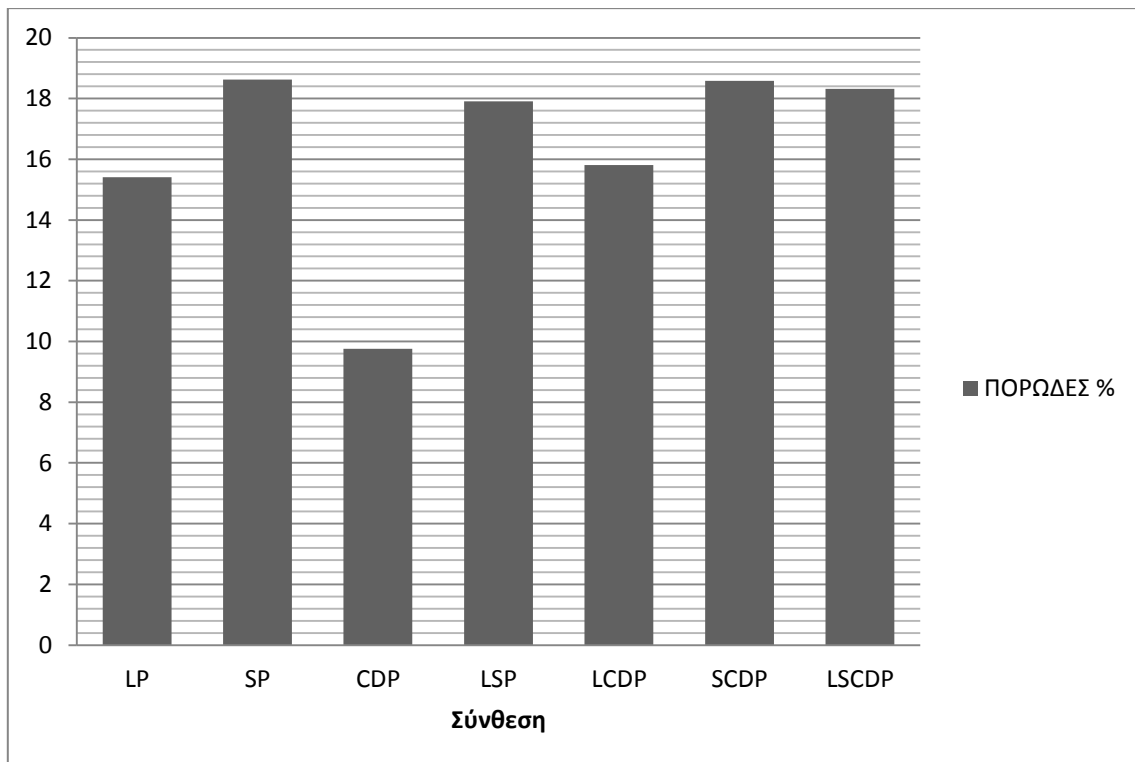
V. ΟΓΚΟΣ ΚΕΝΩΝ ΧΩΡΩΝ (ΠΟΡΩΔΕΣ)

Η τιμές του ποσοστού του όγκου των κενών χώρων ή αλλιώς του πορώδους όλων των συνθέσεων δίνονται στον πίνακα 8.6 που ακολουθεί.

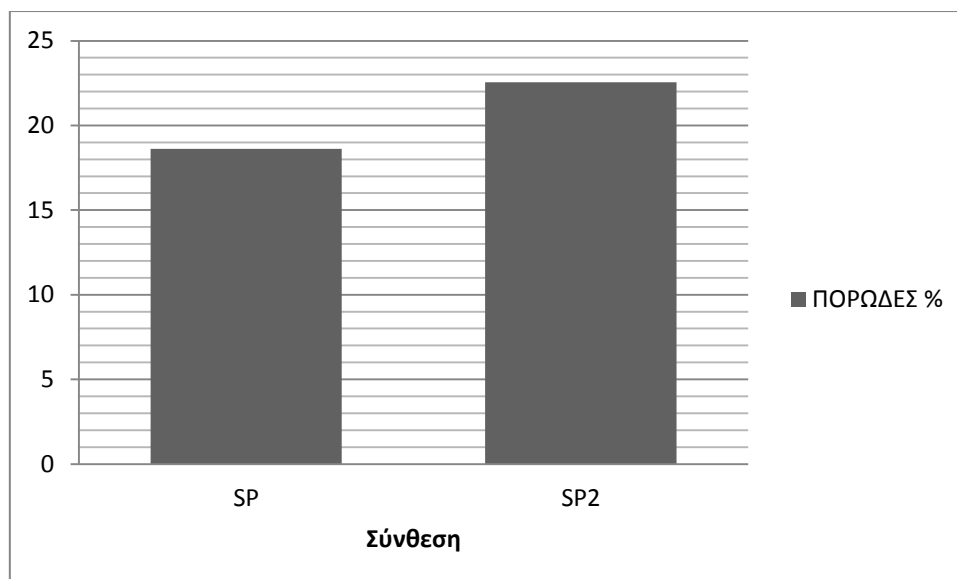
Πίνακας Γ.5 Πορώδες συνθέσεων υποκατάστασης

	ΟΝΟΜΑ ΣΥΝΘΕΣΗΣ							
	LP	SP	SP2	CDP	LSP	LCDP	SCDP	LSCDP
Πορώδες %	15,41	18,62	22,56	9,76	17,91	15,81	18,58	18,32

Και σε μορφή συγκριτικού γραφήματος στο διάγραμμα 8.13, ενώ οι δύο συνθέσεις με τους διαφορετικούς τύπους σκωρίας χάλυβα συγκρίνονται μεταξύ τους στο διάγραμμα 8.14.



Διάγραμμα Γ.11 Σύγκριση πορώδους συνθέσεων υποκατάστασης



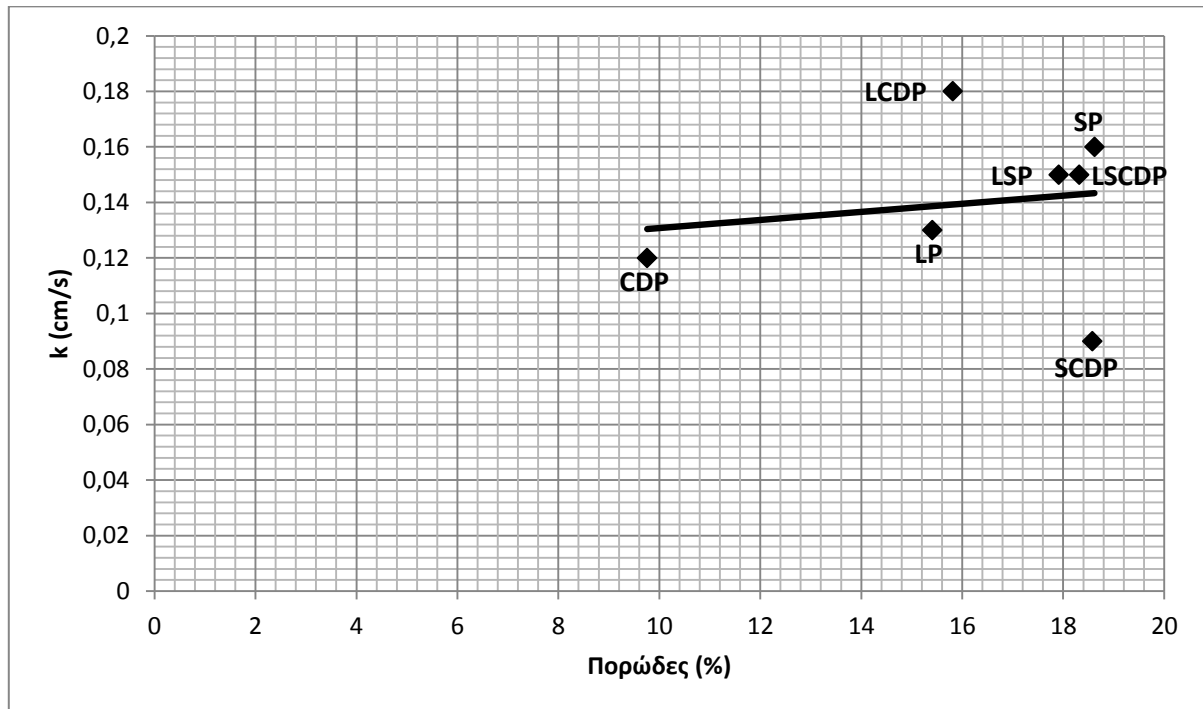
Διάγραμμα Γ.12 Σύγκριση πορώδους συνθέσεων SP και SP2

Συζήτηση αποτελεσμάτων

- Το ποσοστό του πορώδους στις μονομερείς συνθέσεις - LP, SP και CDP - έδειξε τη σύνδεση του με τη διαπερατότητα. Οι τιμές του ήταν αρκετά καλές και ανάλογες με αυτές της υδατοπερατότητας και φάνηκε ότι η σκωρία χάλυβα λόγω της δυσκολίας συμπύκνωσης και τα ανακυκλωμένα αδρανή λόγω της ευκολίας τους, δίνουν μεγαλύτερη και μικρότερη τιμή πορώδους αντίστοιχα.
- Επίσης όλες οι διμερείς συνθέσεις (LSP, LCDP, SCDP) όπως και η τριμερής (LSCDP) δίνουν αρκετά ικανοποιητικό ποσοστό πορώδους, δείχνοντας να συνεργάζονται σε επίπεδο κοκκομετρίας.
- Παρ' όλα αυτά η σύνθεση σκωρίας – ανακυκλωμένου σκυροδέματος (SCDP) όπως φάνηκε στη μέτρηση της υδατοπερατότητας δεν τα πηγαίνει τόσο καλά όσο οι υπόλοιπες συνθέσεις υποκατάστασης. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το πορώδες της συγκεκριμένης σύνθεσης δεν πρέπει να είναι συνεχές, πιθανότατα αφήνοντας αρκετούς κενούς χώρους «τυφλούς» χωρίς διέξοδο από τη μάζα του. Το ποσοστό δηλαδή του ενεργού πορώδους της σύνθεσης είναι σχετικά μικρό.
- Τα δύο είδη σκωρίας χάλυβα - SP και SP2 - έδειξαν μια διαφορά ως προς το ποσοστό του πορώδους με αυξημένο στην χονδρόκοκκη σκωρία (SP2), γεγονός που οφείλεται στη μεγαλύτερη δυσκολία συμπύκνωσης που εμφάνισε σε σχέση με τη λεπτόκοκκη. Όμως οι τιμές της υδατοπερατότητας ήταν ίσες μεταξύ των δύο αυτών συνθέσεων, δείχνοντας πως το πορώδες της χονδρόκοκκης σκωρίας πρέπει να μην είναι συνεχές στο ίδιο ποσοστό με τη λεπτόκοκκη.

Σχέση υδατοπερατότητας - πορώδους

Η σχέση των δύο ιδιοτήτων φαίνεται στο διάγραμμα 8.15 που ακολουθεί.



Διάγραμμα 8.15 Σχέση συντελεστή υδατοπερατότητας – πορώδους
συνθέσεων υποκατάστασης

Συζήτηση αποτελεσμάτων

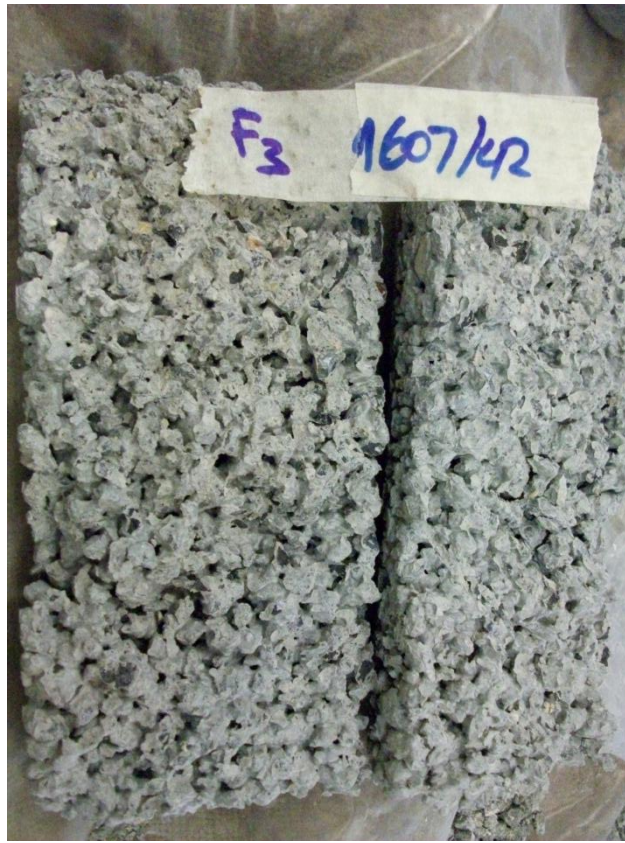
- Όπως αναμενόταν φαίνεται να υπάρχει μία σχετική γραμμικότητα μεταξύ των τιμών του πορώδους και του συντελεστή υδατοπερατότητας, δείχνοντας ότι τα δύο αυτά μεγέθη (πορώδες και υδατοπερατότητα) εμφανίζουν μία αναλογία μεταξύ τους.
- Δύο συνθέσεις ξεχώρισαν από την παραπάνω σχέση των ιδιοτήτων, η σύνθεση με ασβεστόλιθο και ανακυκλωμένο σκυρόδεμα (LCDP) και εκείνη με σκωρία χάλυβα και ανακυκλωμένο σκυρόδεμα (SCDP). Η πρώτη εμφάνισε υψηλότερη τιμή συντελεστή υδατοπερατότητας σε σχέση με το πορώδες της, ενώ η δεύτερη το αντίθετο. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το ενεργό πορώδες είναι μεγαλύτερο από το αναμενόμενο για την LCDP και αντιστοίχως μικρότερο για την SCDP.

VI. ΟΠΤΙΚΗ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ – ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΠΟΡΩΔΟΥΣ

Στην παράγραφο αυτή γίνεται μία προσπάθεια επιβεβαίωσης των συμπερασμάτων των προηγούμενων ενοτήτων, επεξεργάζοντας οπτικά την εσωτερική διάταξη των υλικών στο σώμα των δοκιμίων όλων των συνθέσεων, έπειτα από διάνοιξη που υπέστησαν. Κυρίως εξετάζεται κατά πόσο τα δοκίμια έχουν μία ικανοποιητική συνοχή ως προς τη δομή τους και κατά πόσο οι κενοί τους χώροι (πορώδες) είναι συνεχόμενοι και ομοιόμορφα κατανομημένοι στο βάθος τους, δίνοντας ίσως εξήγηση στα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν προηγουμένως.



Εικόνα Γ.1 Σύνθεση LP



Εικόνα Γ.2 Σύνθεση SP



Εικόνα Γ.3 Σύνθεση SP2



Εικόνα Γ.4 Σύνθεση CDP



Εικόνα Γ.5 Σύνθεση LSP



Εικόνα Γ.6 Σύνθεση LCDP



Εικόνα Γ.7 Σύνθεση SCDP



Εικόνα Γ.8 Σύνθεση LSCDP

Συζήτηση αποτελεσμάτων

- Η σύνθεση με τη σκωρία (SP) φαίνεται να έχει μεγαλύτερο ποσοστό πορώδους από τις μονομερείς (LP, SP και CDP) ενώ αυτή με το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα το μικρότερο. Είναι εμφανές στην τελευταία ο αυξημένος βαθμός συνοχής των υλικών λόγω συμπύκνωσης, γεγονός που δικαιολογεί και τις καλές θλιπτικές αντοχές παρότι τα συγκεκριμένα αδρανή ίσως είναι τα λιγότερα σκληρά εκ των τριών.
- Επίσης, από τις μονομερείς συνθέσεις την καλύτερη ομοιομορφία στο πορώδες δείχνει να έχει αυτή με τη λεπτόκοκκη σκωρία (SP). Η χονδρόκοκκη από την άλλη (SP2) ενώ φαίνεται να έχει αρκετό ποσοστό κενών χώρων, αυτοί οι χώροι μάλλον δεν είναι συνεχείς παρά «τυφλοί», εξηγώντας έτσι την κοινή τιμή υδατοπερατότητας με τη λεπτόκοκκη.
- Από τις διμερείς (LSP, LCDP και SCDP) τα περισσότερα κενά φαίνεται να τα έχουν οι συνθέσεις ασβεστόλιθου – σκωρίας (LSP) και σκωρίας – ανακυκλωμένου

σκυροδέματος (SCDP). Όμως η SCDP δείχνει πως τα κενά της έχουν μικρή συνέχεια μεταξύ τους, γεγονός που δικαιολογεί τη μειωμένη υδατοπερατότητά της. Η LSP από την άλλη δείχνει μία καλύτερη διασύνδεση των πόρων που της επιτρέπει να έχει αρκετά καλή τιμή υδατοπερατότητας, όπως και πιο ομοιόμορφη συνοχή της μάζας της που της προσδίδει καλύτερες αντοχές από την SCDP.

- Το δοκίμιο της σύνθεσης αδρανών ασβεστόλιθου – ανακυκλωμένου σκυροδέματος (LCDP) παρουσιάζει μία πολύ καλή συνοχή καθ' όλη τη μάζα του και μία μεγάλη ομοιομορφία των κενών χώρων. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει την καλή συνάφεια αυτών των δύο υλικών και αποδίδεται άμεσα στις πολύ καλές τιμές τόσο της υδατοπερατότητας και του πορώδους όσο και των αντοχών.
- Τέλος, η σύνθεση και από τα τρία είδη των αδρανών (LSCDP) δείχνει ικανοποιητικά πορώδης και παρουσιάζει και αυτή μία αρκετά καλή ομοιομορφία και συμπαγή δομή, άρα και συνάφεια των τριών υλικών μεταξύ τους και σε επίπεδο κοκκομετρικής κατανομής. Το γεγονός αυτό της προσέδωσε καλές αντοχές τόσο θλίψης όσο και εφελκυσμού. Επίσης, το δίκτυο των πόρων της φαίνεται καλά συνδεδεμένο και αυτό αποτυπώνεται στην πολύ καλή τιμή υδατοπερατότητας και ποσοστού πορώδους που εμφάνισε η εν λόγω σύνθεση.

Δ. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τις πειραματικές μετρήσεις και από τα αποτελέσματα που προέκυψαν, μπορούν να συνοψιστούν στα παρακάτω σημεία:

- Η δημιουργία πορώδους σκυροδέματος με ασβεστόλιθο είναι εφικτή τόσο με τη χρησιμοποίηση χονδρόκοκκων όσο και λεπτόκοκκων αδρανών, καθώς και μίγματά τους. Η χρησιμοποίηση των πρώτων προσδίδει καλύτερες αντοχές στο σκυρόδεμα όμως μειώνει την εργασιμότητα σε σχέση με τα δεύτερα που δημιουργούν και μία πιο ομαλή διαστρωμένη επιφάνεια.
- Η ποσότητα του τσιμέντου πρέπει να είναι επαρκής- ούτε λιγότερη ούτε περισσότερη – ενώ μικρή ποσότητα λεπτόκοκκων αδρανών (άμμου) βοηθάει στη συνοχή και τις ιδιότητες του συγκεκριμένου τύπου σκυροδέματος.
- Η καλή αλλά όχι υπερβολική συμπύκνωση είναι καίριας σημασίας για τις ιδιότητες του πορώδους σκυροδέματος, κυρίως για τη δημιουργία μιας καλής και συνεχούς πορώδους δομής στη μάζα του που θα εξασφαλίζει τη σωστή αποστράγγιση του νερού.
- 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.
- Η υποκατάσταση των ασβεστολιθικών αδρανών με εναλλακτικού τύπου αδρανή είναι εφικτή και δημιουργεί πορώδες σκυρόδεμα με ικανοποιητικές και εντός ορίων ιδιότητες.
- Και τα δύο εναλλακτικού τύπου αδρανή έδειξαν ότι βοηθούν το σκυρόδεμα στην διαδικασία της τρίψης – απότριψης σε σχέση με τα ασβεστολιθικά.

- Το παραπροϊόν της σκωρίας χάλυβα λόγω της σκληρότητάς του αυξάνει τις αντοχές του πορώδους σκυροδέματος καθώς και την υδατοπερατότητα και το πορώδες του, ενώ το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα από την άλλη επιτρέπει μεγάλο βαθμό συμπίκνωσης και ελαττώνει το πορώδες και την υδατοπερατότητα.
- Τα δύο εναλλακτικά αδρανή έδειξαν να συνεργάζονται καλά με τα ασβεστολιθικά, βοηθώντας στις τιμές των ιδιοτήτων του πορώδους σκυροδέματος, όχι όμως και μεταξύ τους.
- Η παρουσία και των τριών τύπου αδρανών στο σκυρόδεμα όμως λειτουργεί αρκετά καλά, δείχνοντας να συνεργάζονται και να δίνουν μία πολύ συμπαγή μορφή με καλές ιδιότητες σε όλους τους τομείς.
- Η σχέση μεταξύ υδατοπερατότητας και πορώδους στο συγκεκριμένου τύπου σκυρόδεμα έδειξε να είναι σχετικά αναλογική, επιβεβαιώνοντας ότι οι δύο αυτές ιδιότητες είναι συνυφασμένες.
- Περαιτέρω μελέτη στη δημιουργία πορώδους σκυροδέματος από ασβεστολιθικά αδρανή όσο και εναλλακτικά αδρανή διαφορετικών κοκκομετρικών κατανομών, καθώς και στη συμπεριφορά μεγαλύτερου εύρους ποσοστών υποκατάστασης συμβατικού ασβεστόλιθου από τα τελευταία, είναι εφικτή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ΕΛΟΤ EN 197-1, Τσιμέντο – Μέρος 1: Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για τα κοινά τσιμέντα, ΕΛΟΤ, Αθήνα, 2000.
2. Σ. Τσίμας, Σ. Τσιβιλής, Επιστήμη και Τεχνολογία Τσιμέντου, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2004.
3. Σ. Τσίμας, Δομικά Υλικά (Τσιμέντο – Ασβέστης – Σκυρόδεμα - Κονιάματα), Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2001.
4. Χ.Μ. Οικονόμου, Τεχνολογία του Σκυροδέματος, Τρίτη Έκδοση, Αναθεωρημένη σύμφωνα με τους νέους ελληνικούς και ευρωπαϊκούς κανονισμούς, 2003.
5. EN 206-1, Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity, CEN, Brussels, 2000.
6. Παναγιώτης Α. Μιχάλης, Σωτήρης Χ. Δημητρίου, ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ, ΑΤΕΙ Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη 2007.
7. ΤΕΧΝΗΤΑ ΑΔΡΑΝΗ: Η ΑΠΟΔΟΤΙΚΗ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΓΙΑ ΑΣΦΑΛΕΣΤΕΡΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ, Ιωάννης Λιάπης, Π, ΒEng, MSc, DIC, Υποψήφιος Διδάκτωρ Α.Π.Θ., ΑΕΙΦΟΡΟΣ Εταιρία Επεξεργασίας Μετάλλων ΑΕ.
8. ΑΕΙΦΟΡΟΣ Α.Ε. Η πρόδος στην ανακύκλωση βιομηχανικών παραπροϊόντων, Ι. Λιάπης, Χ. Στρατής.
9. Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate Concretes, M. Maslehuddin*, Alfarabi M. Sharif, M. Shameem, M. Ibrahim, M.S. Barry, Center for Engineering Research, Research Institute, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran 31261, Saudi Arabia.
10. Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates, M. Etxeberria a,* , C. Pacheco b, J.M. Meneses b, I. Berridi a, a Department of Construction Engineering, Polytechnic University of Catalonia, Spain
b Instituto Tecnológico De Rocas Ornamentales Y Materiales De Construcción (INTROMAC), Campus University of Extremadura, Cáceres, Spain.

11. Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slag as aggregate, Carlo Pellegrino *, Vittorio Gaddo, Department of Structural and Transportation Engineering, University of Padova, Via Marzolo 9, 35131 Padova, Italy.
12. Durability of concrete made with EAF slag as aggregate, Juan M. Manso a,*, Juan A. Polanco b, Milagros Losan˜ez c, Javier J. Gonz´alez d, a Civil Engineering Department, Escuela Polite´cnica Superior, University of Burgos, Calle Villadiego s/n, 09001 Burgos, Spain, b Materials Science and Engineering Department, ETSICCP, University of Cantabria, Avda. de los Castros s/n, 39005 Santander, Spain, c Fundacio´ n Eraiker, Casa Nao No 3. Barrio Alza. Apartado (Postal Box) 4022, 20080 San Sebastia´ n, Spain, d Mining and Metallurgical Engineering Department, ETSIB, University of Basque Country, Alameda de Urquijo s/n, 48013 Bilbao, Spain.
13. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete, Akash Raoa, Kumar N. Jha b, Sudhir Misra a,* , a Department of CE, IIT Kanpur, Kanpur 208016, India b Department of CE, IIT Delhi, New Delhi 110016, India.
14. Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks, C.S. Poon*, S.C. Kou, L. Lam, Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, PR China.
15. Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete, Sumeda Paravithana a, Abbas Mohajerani b,* , a VicRoads, Australia b School of Civil & Chemical Engineering, RMIT University, GPO Box 2476V, Melbourne 3001, Australia.
16. Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties, Rafat Siddique*, Thapar University, Patiala (Punjab) 147004, India.
17. Silica Fume RWRC, Άμορφη πυριτική παιπάλη, BASF HELLAS SA.
18. Mechanical Properties and Frost Resistance of Silica Fume Concrete, B. B. Sabir, School of the Built Environment, The University of Glamorgan, Pontypridd, Mid Glamorgan CF37 IDL, UK.
19. Pervious Concrete. When it Rains, it Drains. www.concret parking.org
20. Pervious Concrete, Reported by ACI Committee 522.

21. Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction, Narayanan Neithalath¹, Milani S. Sumanasooriya, Omkar Deo, Department of Civil and Environmental Engineering, Clarkson University, Potsdam, NY 13699, USA.
22. Cement paste characteristics and porous concrete properties, P. Chindaprasirt a,^{*}, S. Hatanaka b, T. Chareerat a, N. Mishima b, Y. Yuasa c, a Department of Civil Engineering, Khon Kaen University, 123 Friendship Hwy., Muang District, Khon Kaen 40002, Thailand, b Department of Architecture, Faculty of Engineering, Mie University, Japan, c Industrial Research Division, Mie Prefecture Science and Technology Promotion Center, Japan.
23. Predicting the Permeability of Pervious Concrete (Enhanced Porosity Concrete) from Non-Destructive Electrical Measurements, N. Neithalath¹, J. Weiss², and J. Olek³, 1 Clarkson University, Department of Civil and Environmental Engineering, 2 Purdue University, School of Civil Engineering, 3 Purdue University, School of Civil Engineering.
24. Διαπερατό Σκυρόδεμα, Σπυράγγελος Λυκούδης, προϊστάμενος εργαστηρίου ΠΥΘ (Περιφερειακή Υπηρεσία Θεσσαλονίκης) της Εγνατίας Οδού Α.Ε.
25. The Construction Specifier magazine, Precast Bridges the Innovation Gap, December 2005.
26. Using Pervious Concrete to Achieve LEED Points, Erin Ashley, PhD Director of Codes and Sustainability, NRMCA, Concrete InFocus, Winter 2008.
27. Why Pervious Concrete? , Alan Sparkman, Tennessee Concrete magazine, Winter 2001.
28. Producing Pervious Pavements, Hints for the engineer, contractor on placement of pervious concrete, by Matthew Offenber, Concrete International magazine, March 2005.