



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ



**ΜΕΛΕΤΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ
ΑΝΑΚΥΚΛΩΜΕΝΑ ΑΔΡΑΝΗ
ΚΑΙ ΜΕΤΑΚΑΟΛΙΝΗ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Της

Αθανασία Χ. Καρανάσιου

Επιβλέπων:

Ευστράτιος Γ. Μπαδογιάννης | Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2024

ΕΟΣ ΔΕ 2024/01

Καρανάσιου Α.Χ. (2024).
Μελέτη Ιδιοτήτων και Χαρακτηριστικών Σκυροδέματος με Ανακυκλωμένα Αδρανή και
Μετακαολίνη
Διπλωματική Εργασία ΕΟΣ ΔΕ 2024/01

Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Karanasiou A.Ch. (2024).
Study of Properties and Characteristics of Recycled Aggregate Concrete with Metakaolin
Diploma Thesis ΕΟΣ ΔΕ 2024/01

Laboratory of Reinforced Concrete, National Technical University of Athens, Greece

Πίνακας Περιεχομένων

Πρόλογος.....	ix
1 Σκυρόδεμα.....	1
1.1 Συστατικά.....	4
1.1.1 Αδρανή.....	4
1.1.2 Τσιμέντο.....	5
1.1.3 Τσιμεντοειδή Πρόσθετα Σκυροδέματος.....	5
1.1.4 Νερό και Ρευστοποιητές.....	6
2 Ανακυκλωμένα αδρανή.....	8
2.1 Προέλευση – Είδη – Κατηγορίες.....	8
2.2 Χαρακτηριστικά και Ιδιότητες Ανακυκλωμένων Αδρανών.....	13
3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση στην εφαρμογή ανακυκλωμένων αδρανών και πρόσθετων στο σκυρόδεμα.....	16
3.1 Εισαγωγή.....	16
3.2 Αντοχή σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή.....	16
3.3 Ανθεκτικότητα και περιβαλλοντικό αποτύπωμα.....	19
4 Πειραματικό μέρος.....	24
4.1 Εισαγωγή.....	24
4.2 Υλικά και συνθέσεις.....	24
4.3 Πειραματικές Μέθοδοι.....	29
4.3.1 Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος.....	29
4.3.2 Αντοχή.....	31
4.3.3 Δοκιμές Ανθεκτικότητας.....	34
5 Αποτελέσματα.....	41
5.1 Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος.....	41
5.2 Αντοχή.....	42
5.3 Ανθεκτικότητα.....	45
5.3.1 Υδατοαπορροφητικότητα – Ανοικτό Πορώδες OP%.....	45
5.3.2 Τριχοειδής αναρρόφηση.....	47
5.3.3 Δοκιμή επιταχυνόμενης διείδυσης χλωριόντων.....	49
5.4 Οικονομική αποτίμηση των συνθέσεων.....	51
6 Συμπεράσματα.....	52
Βιβλιογραφία.....	54
Παράρτημα.....	57

Περιεχόμενα Σχημάτων

Σχήμα 2.1 Παραγωγή απορριμμάτων ανά οικονομική δραστηριότητα και νοικοκυριά, ΕΕ, 2020 (% επί του συνόλου των απορριμμάτων)	8
Σχήμα 2.2 Επεξεργασία απορριμμάτων, ΕΕ, 2004-2020	9
Σχήμα 2.3 Επεξεργασία απορριμμάτων ανά είδος ανάκτησης και απόρριψης, 2020 (% της συνολικής επεξεργασίας)	9
Σχήμα 3.1 [Πηγή: (Gebremariam et al., 2023) [7]]	17
Σχήμα 3.2 Αποτελέσματα δοκιμών θλιπτικής αντοχής συγκριτικά με το ποσοστό ανακυκλωμένων αδρανών και προσθήκης νανομετακαολίνης ανά σύνθεση [Πηγή: (Xie et al. 2020) [15]]	19
Σχήμα 3.3 [Πηγή: (Abdellatief et al. 2023) [1]]	21
Σχήμα 3.4 [Πηγή: (Abdellatief et al. 2023) [1]]	22
Σχήμα 3.5 Μηχανισμός διείσδυσης χλωριόντων [Πηγή: (Gao et al. 2022) [6]]	23
Σχήμα 4.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν στις συνθέσεις	26
Σχήμα 4.2 Κοκκομετρική διαβάθμιση των μειγμάτων ανά ομάδα σύνθεσης	27
Σχήμα 4.3 Διαδικασία δοκιμής κάθισης κατά EN 206	29
Σχήμα 4.4 Συσκευή μέτρησης περιεχόμενου αέρα με τη μέθοδο της εξισορρόπησης της πίεσης κατά EN 12350-7	31
Σχήμα 4.5 Κυλινδρικό δοκίμιο σκυροδέματος επάνω σε μεταλλική σχάρα	35
Σχήμα 5.1 Μέση τιμή θλιπτικής αντοχή των συνθέσεων στις 28 και στις 105 ημέρες αντίστοιχα	44
Σχήμα 5.2 Υδατοαπορροφητικότητα – Ανοικτό Πορώδες OP% για κάθε σύνθεση στις 28 ημέρες	47
Σχήμα 5.3 Συντελεστής τριχοειδούς αναρρόφησης S ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$) για κάθε σύνθεση στις 28 ημέρες	48
Σχήμα 5.4 Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων D_{nssm} ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) για κάθε σύνθεση στις 28 και στις 105 ημέρες αντίστοιχα	50

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά των επιμέρους αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν στις συνθέσεις	25
Πίνακας 4.2 Κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν στις συνθέσεις	25
Πίνακας 4.3 Κοκκομετρική διαβάθμιση των μειγμάτων ανά ομάδα σύνθεσης	26
Πίνακας 4.4 Αναλογία των υλικών των επιμέρους συνθέσεων (kg/m ³).....	27
Πίνακας 4.5 Κατηγορίες κάθισης ΕΛΟΤ EN 206	29
Πίνακας 4.6 Κατηγοριοποίηση της αντίστασης του σκυροδέματος στην διείσδυση των χλωριόντων με βάση την τιμή του συντελεστή διείσδυσης D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	39
Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα δοκιμών σε νωπή φάση ανά σύνθεση.....	41
Πίνακας 5.2 Μέσος όρος θλιπτικών αντοχών (Mpa) για κάθε σύνθεση στις 28 και στις 105 ημέρες αντίστοιχα.....	42
Πίνακας 5.3 Αποτελέσματα δοκιμής ανοικτού πορώδους OP% για κάθε σύνθεση στις 28 ημέρες.....	45
Πίνακας 5.4 Αποτελέσματα δοκιμής τριχοειδούς αναρρόφησης S (mm/min ^{0.5}) για κάθε σύνθεση στις 28 ημέρες (Μ.Ο. δύο δοκιμίων ανά σύνθεση)	47
Πίνακας 5.5 Αποτελέσματα δοκιμής επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων για κάθε σύνθεση στις 28 και στις 105 ημέρες αντίστοιχα.....	49
Πίνακας 5.6 Αναλυτικά το κόστος των επιμέρους υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις συνθέσεις	51

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1.1 Upcycle Studios by Lendager Group, Ørestad - Copenhagen, Denmark	2
Εικόνα 1.2 Upcycle Studios by Lendager Group, Ørestad - Copenhagen, Denmark	2
Εικόνα 1.3 Tubohotel by T3arc - Tepoztlán, México	2
Εικόνα 1.4 Hanil Visitors Center & Guest House by BCHO Architects - Chungcheongbuk-do, South Korea	2
Εικόνα 1.5 Kunsthau Zurich by David Chipperfield - Zurich, Switzerland	3
Εικόνα 1.6 Kunsthau Zurich by David Chipperfield - Zurich, Switzerland	3
Εικόνα 1.7 SOS Children's Villages Lavezzorio Community Center by Studio Gang Architects - Illinois, Chicago	3
Εικόνα 1.8 SOS Children's Villages Lavezzorio Community Center by Studio Gang Architects - Illinois, Chicago	3
Εικόνα 1.9 Ανακυκλωμένα αδρανή (αριστερά), φυσικά ασβεστολιθικά αδρανή (κέντρο), άμμος (δεξιά).....	4
Εικόνα 4.1 Μετακαολίνης (αριστερά) και ανακυκλωμένα αδρανή (δεξιά)	25
Εικόνα 4.2 Τσιμέντο Portland CEM I 42,5 N (αριστερά) και μετακαολίνης (δεξιά) ...	25
Εικόνα 4.3 Χαλύβδινες μήτρες δοκιμίων σκυροδέματος πληρωμένες με νωπό σκυρόδεμα.....	28
Εικόνα 4.4 Δοκίμιο σκυροδέματος στην πρέσα κατά την διάρκεια της δοκιμής θλίψης	32
Εικόνα 4.5 Κυβικά δοκίμια σκυροδέματος πριν την δοκιμή θλίψης.....	32
Εικόνα 4.6 Κυβικό δοκίμιο σκυροδέματος σε κατάσταση αστοχίας μετά την δοκιμή θλίψης.....	32
Εικόνα 4.7 Αποδεκτή μορφή δοκιμίων μετά την δοκιμή θλίψης.....	33
Εικόνα 4.8 Μη αποδεκτή μορφή δοκιμίων μετά την δοκιμή θλίψης	33
Εικόνα 4.9 Δοκίμια μέσα στον ξηραντήρα.....	36
Εικόνα 4.10 Δοκίμια επάνω σε μεταλλική σχάρα κατά την διάρκεια της δοκιμής τριχοειδούς αναρρόφησης.....	36
Εικόνα 4.11 Δοκίμια τυλιγμένα πλευρικά με μονωτική ταινία κατά την διάρκεια της δοκιμής τριχοειδούς αναρρόφησης	36
Εικόνα 4.12 Κυλινδρικά δοκίμια τοποθετημένα μέσα σε σωλήνες από καουτσούκ κατά την διάρκεια της δοκιμής διείσδυσης χλωριόντων.....	38
Εικόνα 4.13 Δεξιά οι σωλήνες με τα δοκίμια που βρίσκονται πάνω σε μεταλλικές βάσεις μέσα στην λεκάνη με το αλατόνερο, και αριστερά το τροφοδοτικό που συνδέεται με ηλεκτρόδια με τα άκρα των μεταλλικών βάσεων	38
Εικόνα 4.14 Μέτρηση με χάρακα και καταγραφή του βάθους διείσδυσης χλωριόντων στο δοκίμιο σκυροδέματος.....	39
Εικόνα 4.15 Μέτρηση με χάρακα και καταγραφή του βάθους διείσδυσης χλωριόντων στο δοκίμιο σκυροδέματος.....	39
Εικόνα 4.16 Δοκίμια μετά την διάρρηξή τους και τον ψεκασμό τους με διάλυμα νιτρικού αργύρου (AgNO ₃) 0.1 M κατά την διαδικασία της χρωματογραφικής μεθόδου προσδιορισμού του βάθους διείσδυσης χλωριόντων. Η ανοιχτόχρωμη επιφάνεια απεικονίζει το βάθος διείσδυσης.	40

Μελέτη Ιδιοτήτων και Χαρακτηριστικών Σκυροδέματος με Ανακυκλωμένα Αδρανή και Μετακαολίνη

Καρανάσιου Α.Χ. (Επιβλέπων: Μπαδογιάννης Ε.)

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των ιδιοτήτων και των χαρακτηριστικών του σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή και μετακαολίνη. Το ανακυκλωμένο σκυρόδεμα είναι τύπος σκυροδέματος που έχει παρόμοιες ιδιότητες με εκείνες του συμβατικού σκυροδέματος. Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή του είναι προϊόντα ανακύκλωσης, γεγονός που κάνει το σκυρόδεμα αυτό ένα βιώσιμο υλικό για τις κατασκευές και ταυτόχρονα φιλικό προς το περιβάλλον. Η χρήση του μετακαολίνη ως τσιμεντοειδές πρόσθετο υλικό, βοηθά στην μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που προέρχονται από την τσιμεντοβιομηχανία, ενώ παράλληλα ενισχύει τις ιδιότητες του ανακυκλωμένου σκυροδέματος. Μετά την παρουσίαση του θεωρητικού υπόβαθρου για τα χαρακτηριστικά, την προέλευση και την εφαρμογή ανακυκλωμένων αδρανών και πρόσθετων στο σκυρόδεμα, περιγράφονται οι πειραματικές διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας. Παρασκευάστηκαν δέκα διαφορετικές συνθέσεις, μια σύνθεση αναφοράς και τρεις ομάδες συνθέσεων στις οποίες έγινε σταδιακή αντικατάσταση του ασβεστολιθικού γαρμπιλιού από ανακυκλωμένο σε ποσοστό 30%, 60% και 90% κ.β.. Παράλληλα και στις τρεις ομάδες συνθέσεων αντικαταστάθηκε εναλλάξ το τσιμέντο και η άμμος από μετακαολίνη σε ποσοστό 10% κ.β.. Προσδιορίστηκαν μέσω δοκιμών οι ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος, ενώ σε σκληρυμένο σκυρόδεμα μετρήθηκε η θλιπτική αντοχή και διενεργήθηκαν δοκιμές ανθεκτικότητας. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι η αντικατάσταση ασβεστολιθικού γαρμπιλιού από ανακυκλωμένο δεν επηρέασε αρνητικά τις ιδιότητες του σκυροδέματος. Το ανοικτό πορώδες είχε μικρή διακύμανση συγκριτικά με την σύνθεση αναφοράς, και ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρόφησης δεν επηρεάστηκε αρνητικά. Επιπλέον, η προσθήκη μετακαολίνη αντί τσιμέντου βελτίωσε αισθητά την ανθεκτικότητα σε όλες τις συνθέσεις. Η αντικατάσταση της άμμου από μετακαολίνη δεν επηρέασε με τον ίδιο τρόπο όλες τις ιδιότητες. Για παράδειγμα, η σύνθεση με 90% ανακυκλωμένο γαρμπίλι και 10% μετακαολίνη παρουσίασε ταυτόχρονα την μικρότερη τιμή πορώδους και την μεγαλύτερη αντίσταση στην διείσδυση χλωριόντων. Η θλιπτική αντοχή και η αντίσταση στην διείσδυση χλωριόντων βελτιώθηκαν σε όλες τις συνθέσεις στην ηλικία των 105 ημερών. Στο νωπό σκυρόδεμα η πυκνότητα μειώθηκε με την χρήση ανακυκλωμένων αδρανών, ενώ η κάθιση παρουσίασε σχετική ομοιομορφία με την κατάλληλη ποσότητα ρευστοποιητή. Ωστόσο η αύξηση της ποσότητας ρευστοποιητή οδήγησε σε αύξηση του ποσοστού περιεκτικότητας σε αέρα στις συνθέσεις. Όλες οι συνθέσεις παρουσίασαν αποδεκτές και ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες.

Λέξεις κλειδιά: ανακυκλωμένο σκυρόδεμα, ανακυκλωμένα αδρανή, μετακαολίνης, θλιπτική αντοχή, ανθεκτικότητα.

Study of Properties and Characteristics of Recycled Aggregate Concrete with Metakaolin

Karanasiou A.Ch. (supervised by Badogiannis E.)

Abstract

The aim of this thesis is to study the properties and characteristics of recycled aggregate concrete with metakaolin. Recycled aggregate concrete is a type of concrete that has similar properties to those of conventional concrete. The raw materials used for its production are recycled products, which make this type of concrete a sustainable material for the construction. The use of metakaolin as a supplementary cementitious material helps reduce carbon dioxide emissions from the cement industry, while enhancing the properties of recycled aggregate concrete. After presenting theoretically the origin, characteristics and application of recycled aggregates and supplementary cementitious material in concrete, laboratory concrete tests were performed. Ten different concrete mixtures were composed, one reference mixture and three groups of mixtures in which natural aggregates were gradually replaced with recycled aggregates at 30%, 60% and 90% w/w. Simultaneously, in all three groups of mixtures, cement and sand were alternately replaced with metakaolin at 10% w/w. The properties of fresh concrete were determined, while in hardened concrete the compressive strength was measured and durability tests were performed. The results of the tests proved that replacing limestone aggregates with recycled aggregates did not adversely affect the properties of the concrete. Open porosity test results slightly varied compared to the reference mixture, while the capillary absorption coefficient was not negatively affected. Furthermore, the replacement of cement by metakaolin significantly improved the durability in all mixtures. Replacing sand with metakaolin did not affect all the properties in the same way. For instance, concrete mixtures with 90% recycled aggregates and 10% MK has simultaneously the lowest porosity value and the highest resistance to chloride migration. The compressive strength and the resistance to chloride migration improved in all mixtures at the age of 105 days. The density of fresh concrete was reduced by using recycled aggregates, while the slump demonstrated relative uniformity with the appropriate amount of superplasticizer. However, increasing the amount of superplasticizer led to an increase in the percentage of air content in the mixtures. All concrete mixtures exhibited acceptable and satisfactory mechanical properties.

Keywords: recycled concrete, recycled aggregates, metakaolin, compressive strength, durability.

Ευχαριστίες

Με την παρούσα διπλωματική εργασία που εκπονήθηκε στο Εργαστήριο του Οπλισμένου Σκυροδέματος της Σχολής των Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου ολοκλήρωσα τις προπτυχιακές μου σπουδές.

Νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν και βοήθησαν έμπρακτα στο να εκπονήσω την διπλωματική μου. Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Ευστράτιο Μπαδογιάννη Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ για την καθοδήγηση, την υποστήριξη και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε. Ευχαριστώ εξίσου τον κύριο Ε. Βουγιούκα Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ και τον κύριο Μ. Φραγκιαδάκη Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ για την συμμετοχή στην επιτροπή εξέτασης της διπλωματικής μου εργασίας.

Κατόπιν θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Κ. Τσιβόλα για την αμέριστη βοήθεια που είχα από εκείνον στο πειραματικό μέρος της εργασίας, τον υποψήφιο διδάκτορα Α. Κουνάδη, και την υποψήφια διδάκτορα Μ. Στρατουρά.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τους γονείς μου Χρήστο και Μαρία που πίστευαν πάντα σε μένα και με στήριζαν ανιδιοτελώς καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου, αλλά και τους φίλους και συμφοιτητές μου που με στήριζαν εξίσου με την αγάπη και την αφοσίωσή τους.

1 Σκυρόδεμα

Το κατεξοχήν υλικό των έργων υποδομής τα οποία καθορίζουν την οικονομική ανάπτυξη ενός τόπου, είναι το σκυρόδεμα. Σε παγκόσμια κλίμακα, η μεγαλύτερη παραγωγή δομικού υλικού (μετρούμενη σε όγκο) είναι αυτή του σκυροδέματος. Η ραγδαία αύξηση της κατανάλωσης σκυροδέματος τα τελευταία 40 χρόνια, το καθιστά αναγκαίο υλικό για την ανθρωπότητα, ειδικά εάν ληφθεί υπόψη ότι ο άνθρωπος δεν καταναλώνει κανένα άλλο υλικό εκτός από το νερό σε ανάλογες ποσότητες. (Mehta et al., 2009) [10]

Το σκυρόδεμα ορίζεται ως ένας τεχνητός λίθος, ο οποίος προκύπτει μετά την σκλήρυνση ενός μίγματος από αδρανή, τσιμέντο (που λειτουργεί ως συνδετικός παράγοντας) και νερό. Κατά την ανάμειξη των προαναφερθέντων συστατικών μπορούν να προστεθούν σε μικρότερες ποσότητες ορισμένα φυσικής ή χημικής προέλευσης συστατικά για την ενίσχυση των επιθυμητών ιδιοτήτων του παραγόμενου σκυροδέματος.

Οι κατασκευές από σκυρόδεμα είναι το κλειδί για ένα δομημένο περιβάλλον καθώς αποτελούν θεμελιώδες μέρος των υποδομών στέγασης, μεταφορών, παραγωγής ενέργειας όπως και άλλων βασικών κατασκευών της σύγχρονης ζωής. Η ευρεία χρήση του σκυροδέματος οφείλεται κυρίως στις καλές μηχανικές επιδόσεις του, στη δυνατότητα παραγωγής του με τοπικά διαθέσιμα υλικά και στο σχετικά χαμηλό κόστος του. Ωστόσο, για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις που τίθενται για τον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής, είναι απαραίτητο να μειωθούν οι εκπομπές CO₂ από την βιομηχανία τσιμέντου και σκυροδέματος. (Cordoba et al., 2022) [4]

Σύμφωνα με την παγκόσμια ένωση τσιμέντου και σκυροδέματος (GCCA), με την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των κατασκευών από σκυρόδεμα, δύναται να μειωθεί τόσο το κόστος παραγωγής σκυροδέματος, όσο και οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂ emissions) από την παραγωγή του, σε ποσοστό της τάξης του 22%. Ταυτόχρονα αυξάνοντας τις ποσότητες επεξεργασμένων και ανακυκλωμένων υλικών στην παραγωγή σκυροδέματος, μειώνεται ουσιαστικά η ζήτηση των παραγόμενων πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται ως τώρα, και επιτυγχάνεται σε βάθος χρόνου παράταση της διάρκειας ζωής των έργων. Όλα τα παραπάνω συμβάλλουν στην επίτευξη του στόχου για κατασκευές από σκυρόδεμα με μηδενικό αποτύπωμα άνθρακα ως το 2050.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται εκτενώς η χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών.

Ακολουθούν εικόνες κτιρίων κατασκευασμένων από ανακυκλωμένο σκυρόδεμα (<https://www.re-thinkingthefuture.com/materials-construction/a4311-10-examples-of-recycled-concrete/>) [19]:



Εικόνα 1.1 Upcycle Studios by Lendager Group, Ørestad - Copenhagen, Denmark



Εικόνα 1.2 Upcycle Studios by Lendager Group, Ørestad - Copenhagen, Denmark



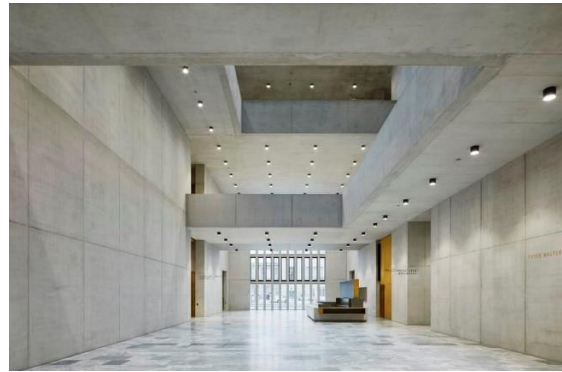
Εικόνα 1.3 Tubohotel by T3arc - Tepoztlán, México



Εικόνα 1.4 Hanil Visitors Center & Guest House by BCHO Architects - Chungcheongbuk-do, South Korea



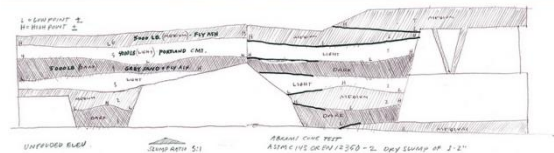
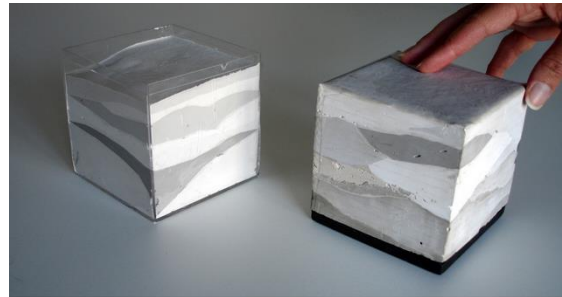
Εικόνα 1.5 Kunsthaus Zurich by David Chipperfield - Zurich, Switzerland



Εικόνα 1.6 Kunsthaus Zurich by David Chipperfield - Zurich, Switzerland



Εικόνα 1.7 SOS Children's Villages Lavezzorio Community Center by Studio Gang Architects - Illinois, Chicago



Εικόνα 1.8 SOS Children's Villages Lavezzorio Community Center by Studio Gang Architects - Illinois, Chicago

1.1 Συστατικά

Στην παρούσα διπλωματική εργασία τα συστατικά που χρησιμοποιήθηκαν για την σκυροδέτηση των δοκιμίων είναι ασβεστολιθικά αδρανή, ανακυκλωμένα αδρανή, άμμος, τσιμέντο Portland, μετακαολίνη, ρευστοποιητής και νερό.

Γενικότερα, η κατάλληλη επιλογή των υλικών κι αναλογιών ανάμειξης είναι βασικοί παράγοντες για την παραγωγή ενός σκυροδέματος που να πληροί τις απαιτήσεις αντοχής κι ανθεκτικότητας ενός δομικού έργου.

1.1.1 Αδρανή

Αδρανή είναι όλα τα κοκκώδη υλικά, όπως η άμμος, οι χάλικες (gravel), το γαρμπίλι, η σκωρία υψικαμίνων ή τα απορρίμματα εκσκαφών κατασκευών και κατεδαφίσεων (A.E.K.K. - C&D waste), που χρησιμοποιούνται μαζί με κάποιο συνδετικό υλικό (binder) για την παραγωγή σκυροδέματος. Τα αδρανή υλικά συγκολλούνται μεταξύ τους και συμβάλλουν μηχανικά στην αντοχή του σκυροδέματος. Η ονομασία τους προέρχεται από το γεγονός ότι τα υλικά αυτά δεν συμμετέχουν ενεργά στην διαδικασία πήξης και σκλήρυνσης του σκυροδέματος, σε αντίθεση με το συνδετικό υλικό (όπως το τσιμέντο) και το νερό, στη χημική δράση των οποίων οφείλεται η σκλήρυνση του σκυροδέματος. Μετά το στάδιο της εξόρυξής τους τα αδρανή διέρχονται από ειδικούς σπαστήρες (θραυστά αδρανή), όπου μειώνεται το μέγεθός τους και στην πορεία διέρχονται από σειρά κοσκίνων όπου και διαχωρίζονται σε χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα, ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων τους. (Αδρανή Υλικά) [16]

Το κλάσμα των αδρανών υλικών σε μια σύνθεση σκυροδέματος καταλαμβάνει το 75% του συνολικού όγκου του μείγματος, για αυτό και διαδραματίζει ζωτικής σημασίας ρόλο στην συνολική μηχανική απόδοση του σκυροδέματος. (Brito et al., 2013) [3]

Αναλυτικότερα, στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα κλάσματα αδρανών:

- Γαρμπίλι (8 – 16 mm): χονδρόκοκκο θραυστό ασβεστολιθικό αδρανές
- Γαρμπίλι RA (8 – 16 mm): χονδρόκοκκο ανακυκλωμένο ασβεστολιθικό αδρανές που προέρχεται από απορρίμματα κατασκευών και κατεδαφίσεων κτιρίων έχοντας υποστεί κατάλληλη επεξεργασία με σκοπό την επαναχρησιμοποίησή του.
- Άμμος (0 – 4 mm): λεπτόκοκκο αδρανές



Εικόνα 1.9 Ανακυκλωμένα αδρανή (αριστερά), φυσικά ασβεστολιθικά αδρανή (κέντρο), άμμος (δεξιά)

1.1.2 Τσιμέντο

Το σκυρόδεμα χρησιμοποιείται ως υλικό για κατασκευές εδώ και αιώνες. Το τσιμέντο είχε χρησιμοποιηθεί σε μια πρώιμη μορφή στην αρχαιότητα από τους Αιγύπτιους και τους Ρωμαίους, και χρησιμοποιήθηκε ξανά ως ανακάλυψη στις αρχές του 19ου αιώνα. Συγκεκριμένα το έτος 1824 θεωρείται ότι σηματοδοτεί την προέλευση των σύγχρονων τσιμέντων Portland, όταν το όνομα “Portland” χρησιμοποιήθηκε σε μια πατέντα από τον Joseph Aspdin για να τονίσει την ομοιότητα του σκυροδέματος που παρασκευάζεται με αυτό το τσιμέντο με τον ασβεστόλιθο Portland, που ήταν ένα ευρέως διαδεδομένο δομικό υλικό εκείνης της εποχής. Έως και την δεκαετία του 1860 η βιομηχανία του τσιμέντου Portland ανθούσε στο Ηνωμένο Βασίλειο αλλά και στην Ευρώπη, όμως στις ΗΠΑ η πρώτη πατέντα εκδόθηκε το 1870 από τον David Saylor. (Young, 2001) [11]

Στατιστικά εν έτη 2023 παράγονται περίπου 93 εκατομμύρια τόνοι τσιμέντου στις ΗΠΑ, ο υψηλότερος όγκος παραγωγής που καταγράφηκε κατά την περίοδο των ετών 2010-2023. Την ίδια χρονιά παρήχθησαν παγκοσμίως 4,1 δισεκατομμύρια τόνοι τσιμέντου. (www.statista.com) [20]

Το τσιμέντο είναι ένα υδραυλικό συνδετικό υλικό και βασικό συστατικό του σκυροδέματος. «Το άνυδρο τσιμέντο Portland είναι μια γκρίζα σκόνη που αποτελείται από γωνιώδεις κόκκους κλίνκερ μεγέθους από 1 έως 50μm. Παράγεται από την άλεση κλίνκερ με μικρή ποσότητα θεικού ασβεστίου, ενώ το κλίνκερ είναι ένα ετερογενές μείγμα αρκετών ενώσεων που παράγονται από τις σε υψηλές θερμοκρασίες αντιδράσεις μεταξύ των οξειδίων του ασβεστίου, με οξείδια του πυριτίου, του αργιλίου και του σιδήρου. Η χημική σύνθεση των κυριότερων ενώσεων του κλίνκερ αντιστοιχεί περίπου στις ενώσεις C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF. Στο σύννηθες τσιμέντο Portland, η αναλογία των ενώσεων αυτών κυμαίνεται μεταξύ 45 – 60 %, 15 – 30 %, 6 – 12 %, και 8 – 16 % της μάζας του τσιμέντου.» (Mehta et al., 2009, para. 2.5) [10]

Το άνυδρο τσιμέντο Portland δεν μπορεί να συνδέσει μεταξύ τους τα διάφορα κλάσματα των αδρανών. Αποκτά την συνδετική του ικανότητα, κατόπιν της ενυδάτωσής του με νερό. Τα προϊόντα της ενυδάτωσης του τσιμέντου είναι εκείνα που συγκολλούν μεταξύ τους τα κλάσματα των αδρανών και τα υπόλοιπα συστατικά του σκυροδέματος. (Mehta et al., 2009) [10]

Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο τσιμέντο είναι το τύπου Portland, το οποίο χρησιμοποιείται και σε όλα τα μείγματα στην παρούσα διπλωματική.

1.1.3 Τσιμεντοειδή Πρόσθετα Σκυροδέματος

Η χρήση τσιμεντοειδών πρόσθετων υλικών (Supplementary Cementitious Materials - SCMs) στο σκυρόδεμα έχει υιοθετηθεί ευρέως από την τσιμεντοβιομηχανία. Παρέχει σκυροδέματα με καλή μηχανική απόδοση και ανθεκτικότητα, ενώ ταυτόχρονα μειώνει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG) από την παραγωγή τσιμέντου. Οι τεχνητές ποζολάνες (ανόργανα υλικά) έχουν παραπλήσιες ιδιότητες με αυτές του τσιμέντου, συνεπώς η χρήση τους ως SCMs συμβάλλει ενεργά στην μείωση διαπερατότητας του σκυροδέματος. Τεχνητές ποζολάνες είναι η σκωρία υψικαμίνου (granulated blast furnace slag), η ιπτάμενη τέφρα (fly ash), η πυριτική παιπάλη (silica fume) και ο μετακαολίνης (metakaolin). Στην παρούσα διπλωματική εργασία το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ως ποζολανικό πρόσθετο του τσιμέντου είναι ο μετακαολίνης.

Ο μετακαολίνης είναι ένα διαδεδομένο ορυκτό πρόσμικτο που χρησιμοποιείται τελευταία για την παραγωγή σκυροδέματος. Η χρήση του ως ποζολανικό πρόσθετο στο

τσιμέντο, συμβάλλει ενεργά στην μείωση διαπερατότητας της τσιμεντόπαστας. Σε αντίθεση με άλλες ποζολάνες είναι πρωτογενές προϊόν, ούτε δευτερογενές ούτε υποπροϊόν, που παράγεται με ελεγχόμενη θερμική επεξεργασία (έψηση) του καολίνης. (Badogiannis et al., 2009) [2]

Ο μετακαολίνης (MK) αποτελεί ποζολανικό υλικό που αυξάνει την κατανάλωση $\text{Ca}(\text{OH})_2$ με την πάροδο του χρόνου. (Μπαδογιάννης, 2002) [17]

Η ποζολανική αντίδραση των πυρωμένων αργίλων (μετακαολίνης) μειώνει την διαθεσιμότητα του υδροξειδίου του ασβεστίου $\text{Ca}(\text{OH})_2$ στην τσιμεντόπαστα και αυξάνει τον όγκο των ενυδατωμένων φάσεων (C-S-H, C-A-S-H, AFm). Η συντομογραφία C-S-H αναφέρεται στην φάση των ένυδρων ασβεστοπυριτικών ενώσεων που σχηματίζουν περίπου το 50% έως το 60% του όγκου των στερεών στην πλήρως ενυδατωμένη τσιμεντόπαστα. Επομένως η C-S-H είναι η πιο καθοριστική φάση που προσδιορίζει τις ιδιότητες της τσιμεντόπαστας. (Mehta et al., 2009) [10]

Συνεπώς, η μερική αντικατάσταση του τσιμέντου Portland από μετακαολίνη μειώνει το συνολικό πορώδες της τσιμεντόπαστας, ενώ η ποζολανική του δράση οδηγεί σε βελτίωση της μικροδομής. Συνδυαστικά, η αύξηση του όγκου των ενυδατωμένων φάσεων και η βελτίωση του μεγέθους των πόρων, ενισχύει την αντίσταση στην εισροή χλωριόντων στο σώμα του σκυροδέματος.

Ταυτόχρονα, στα αρνητικά συγκαταλέγεται ότι η μείωση του διαθέσιμου υδροξειδίου του ασβεστίου μετά την προσθήκη MK, διευκολύνει την ενανθράκωση της τσιμεντόπαστας και συμβάλλει στην μείωση της χημικής αντίστασης του σκυροδέματος, κάτι όμως που αντισταθμίζεται σημαντικά από τη μείωση του πορώδους της τσιμεντόπαστας. (Cordoba et al. 2022) [4]

1.1.4 Νερό και Ρευστοποιητές

Η παραγωγή σκυροδέματος χρειάζεται τεράστιες ποσότητες πόσιμου νερού. Το νερό είναι περίπου το 15-18% του συνολικού όγκου του μείγματος δομικού σκυροδέματος. Η βιομηχανία σκυροδέματος χρησιμοποιεί περίπου 1 τρισεκατομμύριο γαλόνια νερού ετησίως σε παγκόσμια κλίμακα. (Meyer, 2005) [18]

Η πρόσφατη λειψυδρία σε πολλά μέρη του κόσμου απαιτεί την βιώσιμη χρήση του νερού στην παραγωγή σκυροδέματος. Ως εκ τούτου, η αναζήτηση εναλλακτικών πηγών νερού ανάμιξης σκυροδέματος κρίνεται πλέον απαραίτητη για την βιώσιμη ανάπτυξη της βιομηχανίας σκυροδέματος. Το ανακυκλωμένο νερό που προέρχεται από παραγόμενα λύματα μετά από οικιακή, γεωργική και βιομηχανική χρήση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως νερό ανάμιξης, αρκεί να πληρούνται ορισμένα κριτήρια όσων αφορά τις συγκεντρώσεις επιβλαβών συστατικών. Επίσης, τα παραγόμενα λύματα κατά την διαδικασία παραγωγής σκυροδέματος, δύναται να ανακυκλωθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν, έτσι ώστε οι μονάδες παραγωγής σκυροδέματος να γίνουν πλήρως βιώσιμες με net zero waste. Επιπλέον, η βελτιστοποίηση των συνθέσεων σκυροδέματος ώστε να χρειάζονται λιγότερο νερό ανάμιξης, συνδυαστικά με την χρήση καινοτόμων συστατικών, όπως είναι οι υπερρευστοποιητές (water reducing admixtures), βοηθούν στην επίτευξη της βιωσιμότητας. Η προσθήκη υπερρευστοποιητή στα μείγματα μπορεί να μειώσει έως και 20% την χρήση νερού στο σκυρόδεμα. (Brito et al., 2013) [3]

Η ρευστότητα του σκυροδέματος με δεδομένη θλιπτική αντοχή επιτυγχάνεται με την προσθήκη υπερρευστοποιητή.

Ο υπερρευστοποιητής CHEMIUM NT 2 της DOMYLCO που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, είναι ένα υδατικό διάλυμα τροποποιημένων πολυμερών έτοιμο για χρήση, πολύ μεγάλης απόδοσης τόσο σε ρευστότητα όσο και σε διάρκεια

ρευστότητας, ενώ πληροί και την προδιαγραφή EN 934-2. Ο ρευστοποιητής αυτός είναι ιδανικό πρόσθετο για σκυροδέματα μεγάλων απαιτήσεων (π.χ. με πολύ χαμηλό λόγο N/T). Χρησιμοποιείται στην παραγωγή βιομηχανικού σκυροδέματος επιτυγχάνοντας πολύ υψηλή πρώιμη και τελική αντοχή και υψηλή πυκνότητα σκυροδέματος. Προσδίδει ρευστότητα μεγάλης διάρκειας στο σκυρόδεμα (1-2 ώρες στους 20°C) και για αυτό τον λόγο προστίθεται αποκλειστικά στον αναμεικτήρα της μονάδας παραγωγής. [21]

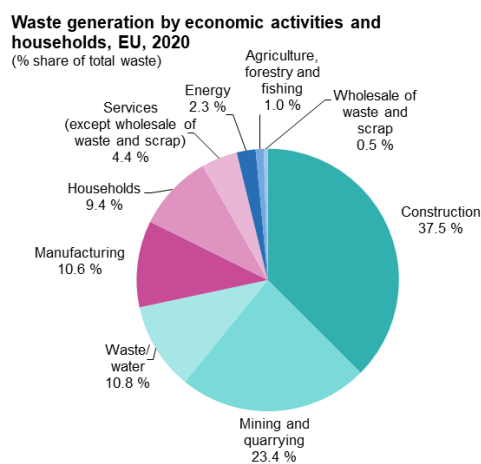
Ο λόγος του ενεργού νερού προς συνδετικό υλικό (W/B) παρέμεινε σταθερός και ίσος με 0,5 σε όλα τα αναμείγματα στην παρούσα διπλωματική εργασία.

2 Ανακυκλωμένα αδρανή

2.1 Προέλευση – Είδη – Κατηγορίες

Η παραγωγή απορριμμάτων είναι ένα αναπόφευκτο στάδιο όλων των βιομηχανικών και ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Αυτά τα απορρίμματα δημιουργούν πλέον μεγάλα περιβαλλοντικά και οικονομικά προβλήματα σε παγκόσμιο επίπεδο. Η διαχείριση και επεξεργασία των βιομηχανικών στερεών αποβλήτων είναι ένα από τα φλέγοντα ζητήματα του 21^{ου} αιώνα.

Αναφορικά, το 2020 τα συνολικά απόβλητα που παράχθηκαν στην ΕΕ από όλες τις οικονομικές δραστηριότητες και τα νοικοκυριά ανήλθαν σε 2.135 εκατομμύρια τόνους ή 4.815 kg κατά κεφαλήν. Αναλυτικότερα, ο κατασκευαστικός κλάδος συνέειφερε το 32,5% του συνόλου το 2020, και ακολούθησαν τα ορυχεία και τα λατομεία με ποσοστό 23,4%. Σχεδόν τα δύο τρίτα (64% ή 3,1 τόνοι ανά κάτοικο) των συνολικών απορριμμάτων ήταν κυρίως εξορυκτικά απόβλητα (major mineral waste). Αξίζει να αναφερθεί ότι στα κράτη μέλη που δραστηριοποιούνται σε εξορύξεις και λατομεία (Φινλανδία, Σουηδία, Βουλγαρία), ή κατασκευές και κατεδαφίσεις (Λουξεμβούργο) παρατηρήθηκε το υψηλότερο ποσοστό κύριων εξορυκτικών αποβλήτων (major mineral waste), της τάξης του 84% - 89% του συνόλου των απορριμμάτων. Στο **Σχήμα 2.1** φαίνονται τα ποσοστά των απορριμμάτων ανά κατηγορία, και η συνολική παραγωγή. (Eurostat, 2023) [5]



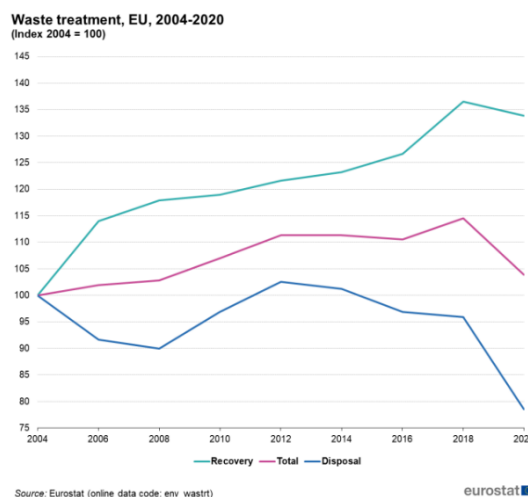
Source: Eurostat (online data code: env_wasgen)

eurostat

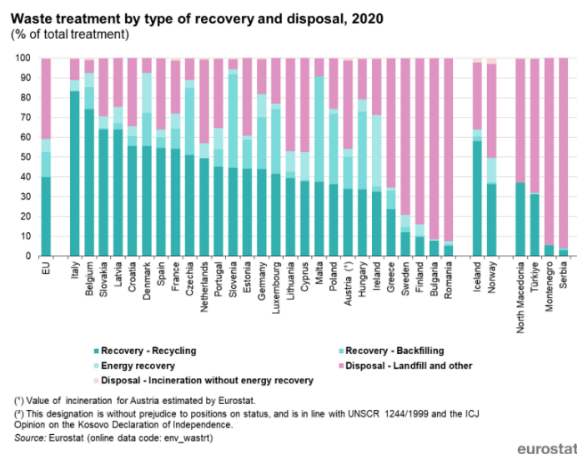
Σχήμα 2.1 Παραγωγή απορριμμάτων ανά οικονομική δραστηριότητα και νοικοκυριά, ΕΕ, 2020 (% επί του συνόλου των απορριμμάτων)

Από το σύνολο των απορριμμάτων στην ΕΕ, πάνω από το μισό (59,1%) υποβλήθηκε σε επεξεργασία ή σε εργασίες ανάκτησης. Ανακυκλώθηκε το 39,9% του συνόλου των επεξεργασμένων απορριμμάτων, για επιχώσεις χρησιμοποιήθηκε το 12,7%, και το 6,5%

έγινε ανάκτηση ενέργειας(energy recovery). Από το 40,9 % του συνόλου των απορριμμάτων, το 32,2% κατέληξε σε χώρους υγειονομικής ταφής, το 0,5% αποτεφρώθηκε χωρίς ανάκτηση ενέργειας, και το 8,2% διατέθηκε διαφορετικά. Ορισμένα κράτη μέλη της ΕΕ είχαν πολύ υψηλά ποσοστά ανακύκλωσης (Ιταλία, Βέλγιο, Σλοβακία, Λετονία) ενώ σε άλλα κράτη μέλη η επικρατούσα κατηγορία επεξεργασίας είναι η υγειονομική ταφή (Ρουμανία, Βουλγαρία, Φινλανδία, Σουηδία και Ελλάδα) βλ. **Σχήμα 2.2** και **Σχήμα 2.3**. (Eurostat, 2023) [5]



Σχήμα 2.2 Επεξεργασία απορριμμάτων, ΕΕ, 2004-2020



Σχήμα 2.3 Επεξεργασία απορριμμάτων ανά είδος ανάκτησης και απόρριψης, 2020 (% της συνολικής επεξεργασίας)

Ανάλογες ενέργειες διαχείρισης απορριμμάτων έχουν γίνει σε διάφορες χώρες του κόσμου, όπου έχει υιοθετηθεί η ανακύκλωση των στέρεων αποβλήτων.

Η χρήση ανακυκλωμένων αδρανών στο σκυρόδεμα έχει αρχίσει να αυξάνεται με την πάροδο των τελευταίων δεκαετιών ως μέρος της προσπάθειας για την βελτίωση της βιωσιμότητας των δομικών υλικών και τη μείωση των αποβλήτων. Πρόκειται για μια συνεχώς αναπτυσσόμενη πρακτική η οποία διαφέρει ανάλογα με την τοποθεσία, τις ειδικές απαιτήσεις κάθε περιοχής, την διαθέσιμη τεχνολογία και τις κατευθυντήριες γραμμές. Η πρακτική αυτή αναπτύσσεται περαιτέρω, καθώς αυξάνεται η ευαισθητοποίηση σχετικά με τα ζητήματα της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας και αειφορίας. Η επαναχρησιμοποίηση των υλικών αυτών, μπορεί να προσφέρει οφέλη όπως η μείωση της χρήσης πρώτων υλών για την παραγωγή σκυροδέματος (τσιμεντοβιομηχανία και λατομεία), μείωση των αποβλήτων καθαυτών, και κατ' επέκταση μείωση του αντικτύπου στο περιβάλλον μέσω της μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂ emissions).

Η προέλευση των ανακυκλωμένων αδρανών υλικών σύμφωνα το είδος των απορριμμάτων ποικίλει. Κυμαίνονται από σχετικά αδρανή, γυάλινες φιάλες, απορρίμματα κατασκευών, κατεδαφίσεων και χώμα εκσκαφών, επικίνδυνα απόβλητα με υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων και τοξικών οργανικών ενώσεων, ακόμη και ανακυκλωμένους κόκκους καφέ μετά από πυρόλυση (Roychand et al. 2023) [12].

Ανάλογα με την προέλευσή τους τα απορρίμματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: σε αυτά που προέρχονται άμεσα από την βιομηχανία ως βιομηχανικά υποπροϊόντα και σε αυτά που χαρακτηρίζονται ως ανακυκλωμένα απορρίμματα. Ο πρώτος τύπος περιλαμβάνει, τέφρα άνθρακα, σκωρίες από την βιομηχανία μετάλλων, βιομηχανική ιλύ, εξορυκτικά απόβλητα, απορρίμματα χαρτοβιομηχανίας και χαρτοπολτού, απορρίμματα δέρματος, απόβλητα από την γεωργία και την βιομηχανία τροφίμων. Ο δεύτερος τύπος περιλαμβάνει διάφορα απορρίμματα πλαστικών και καουτσούκ από ελαστικά οχημάτων. (Brito et al., 2013) [3]

Διαχωρισμός των απορριμμάτων γίνεται ανάλογα και με την χημική σύστασή τους, αν είναι οργανικά, ανόργανα ή αν περιέχουν συνδυαστικά οργανικά και ανόργανα συστατικά. Μια ακόμη ταξινόμηση των αδρανών υλικών από απορρίμματα γίνεται με βάση το βάρος τους. Ορισμένα είναι από την φύση τους ελαφρά (π.χ. τέφρα άνθρακα), ωστόσο οι περισσότερες βιομηχανικές σκωρίες είναι βαρύτερες από τα συμβατικά αδρανή.

Αναφορικά οι τύποι των βιομηχανικών απορριμμάτων που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα σύμφωνα με τους (Brito et al., 2013) [3] είναι:

- Τέφρες άνθρακα (π.χ. ιπτάμενη τέφρα)
- Βιομηχανικές σιδηρούχες και μη σιδηρούχες σκωρίες (π.χ. σκωρία υψικαμίνου, σκωρία χαλκού)
- Απόβλητα από την βιομηχανία τροφίμων και την γεωργία
- Βιομηχανική ιλύς
- Εξορυκτικά απόβλητα
- Κεραμικά απόβλητα
- Πλαστικά απόβλητα
- Απορρίμματα καουτσούκ από ελαστικά οχημάτων

Ανάλογα με τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες, κάποια αδρανή είναι κατάλληλα για χρήση ως πρόσθετα τσιμεντοειδή υλικά, (ιπτάμενη τέφρα, σκωρία υψικαμίνου, κεραμικά απόβλητα, κ.α.), ενώ κάποια άλλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ελαφρά αδρανή (πλαστικά απόβλητα, καουτσούκ από ελαστικά οχημάτων, τέφρα πυθμένα, κ.α.).

Το σκυρόδεμα με ανακυκλωμένα αδρανή προβλέπεται να είναι το υλικό που θα επικρατήσει τα επόμενα χρόνια στην βιομηχανία των κατασκευών παγκοσμίως. Τα ανακυκλωμένα αδρανή που προέρχονται από απόβλητα εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων ορίζονται ως Α.Ε.Κ.Κ – CDW: construction and demolition waste. Τα Α.Ε.Κ.Κ ανήκουν στην κατηγορία των συμβατικών αποβλήτων, ενώ ο όρος θεωρείται γενικός καθώς περιλαμβάνει μεγάλο φάσμα υλικών. Με την κατάλληλη επεξεργασία, στο στάδιο που αυτά χαρακτηρίζονται ως απορρίμματα, μπορούν να ανακυκλωθούν και εντέλει να αποδίδουν την αντοχή που απαιτείται για ένα ανθεκτικό σκυρόδεμα.

Οι κατηγορίες των ΑΕΚΚ σύμφωνα με την πηγή <https://anaekk.gr> [22], είναι:

1. Απόβλητα προερχόμενα από εξολοκλήρου ή επιμέρους κατεδάφιση κατασκευών. Αυτά τα υλικά παρουσιάζουν μεγάλη ανομοιογένεια, ενώ η σύστασή τους ποικίλει ανάλογα με το είδος, την ηλικία τη μορφή, τη χρήση και το μέγεθος του εκάστοτε κτιρίου. Τα υλικά αυτά περιλαμβάνουν χώματα, χαλίκια, κομμάτια ή

- στοιχεία σκυροδέματος, επιχρίσματα, πλίνθους (τούβλα), πλάκες επιστρώσεων, γύψο, άμμο, λαξευμένες πέτρες, θρύμματα ειδών υγιεινής, κ.λπ.
2. Απόβλητα που παράγονται στο στάδιο της ανέγερσης των κατασκευών. Τα υλικά αυτά περιλαμβάνουν ξύλο, πλαστικό, χαρτί, γυαλί, μέταλλα, καλώδια, χρώματα, βερνίκια, στοιχεία επικαλύψεων προσόψεων, κόλλες και γενικά όλα τα υλικά που προέρχονται την λειτουργία εργοταξίων κατασκευής κατά το στάδιο εκτέλεσης εργασιών πάσης φύσεως. Τα υλικά συσκευασίας οικοδομικών υλικών αποτελούν ένα μεγάλο μέρος των απορριμμάτων στα εργοτάξια.
 3. Απόβλητα εκσκαφών. Τα υλικά εκσκαφών υπάρχουν σε όλες τις κατασκευαστικές δραστηριότητες και ειδικά στις υπόγειες κατασκευές. Τα υλικά αυτά συνηθέστερα είναι μητρικά χόματα εκσκαφών, άμμος, χαλίκι, πέτρες, άργιλος κ.λπ., ενώ η σύστασή τους εξαρτάται σημαντικά από τα γεωλογικά δεδομένα. Τα φυσικά φαινόμενα (υπερχειλίσσεις χειμάρρων, κατολισθήσεις, κ.α.) πολλές φορές οδηγούν στην εμφάνιση τέτοιων υλικών.
 4. Απόβλητα από την οδοποιία και την συντήρηση οδών. Σε αυτά τα υλικά ανήκουν η ασφαλτος και όλα τα υλικά οδοστρωσίας, υλικά βάσεων και υποβάσεων, όπως χαλίκι, άμμος, σκύρα. Τα απορρίμματα υλικών οδοποιίας προκύπτουν από την αποξήλωση και την συντήρηση δρόμων καθώς και από τις υπόγειες υδραυλικές και ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πόλεων ή και από έργα επιδιόρθωσης αυτών.

Αναλυτικότερα, η προέλευση των Α.Ε.Κ.Κ., εντοπίζεται στα τρία στάδια του κύκλου ζωής των κατασκευών σύμφωνα με τους (Torgal et al., 2013, para. 3) [13]. Το πρώτο στάδιο που είναι ο προγραμματισμός του έργου όπου καθορίζονται οι διαστάσεις της κατασκευής, τα δομικά υλικά και οι διαδικασίες που απαιτούνται για την ανέγερση. Μια λανθασμένη εκτίμηση του μελετητή για την ποσότητα των πόρων που απαιτούνται για να κατασκευαστεί το εκάστοτε έργο, μπορεί να είναι αναπόφευκτα αιτία παραγωγής σημαντικής ποσότητας απορριμμάτων. Το δεύτερο στάδιο της ανέγερσης όπου γίνεται η προμήθεια των οικοδομικών υλικών και το έργο υλοποιείται σύμφωνα με το σκοπό του. Βασικό ρόλο εδώ για την αποφυγή της διάβρωσης των υλικών, που θα οδηγούσε αναπόφευκτα σε δημιουργία απορριμμάτων, είναι η κατάλληλη αποθήκευση για την προστασία τους από τα καιρικά φαινόμενα. Στο στάδιο της εκτέλεσης του έργου, οι εκσκαφές χωματουργικών, υπολείμματα οικοδομικών υλικών, τμήματα υλικών που προκύπτουν από τις διάφορες εργασίες κατά την κατασκευή, ξυλότυποι, ανακατασκευές και κατεδαφίσεις λόγω εσφαλμένης εκτέλεσης, αλλαγές στον σχεδιασμό, ή αλλαγή των απαιτήσεων του κυρίου του έργου, παράγουν εξίσου σημαντική ποσότητα απορριμμάτων. Τέλος, στο στάδιο της κατεδάφισης του έργου, τα απορρίμματα που θα προκύψουν εξαρτώνται κυρίως από το είδος του έργου (π.χ. βιομηχανική εγκατάσταση ή κτίριο κατοικίας), τα κριτήρια αποσυναρμολόγησης που υιοθετήθηκαν κατά τον σχεδιασμό του έργου (π.χ. σύστημα ξηρής αγκύρωσης), τις κατασκευαστικές διεργασίες και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στον φέροντα οργανισμό του κτιρίου (π.χ. σκυρόδεμα, ξύλινος ή μεταλλικός σκελετός) και τέλος τις τεχνικές κατεδάφισης που χρησιμοποιήθηκαν (π.χ. επιλεκτική κατεδάφιση έναντι παραδοσιακής κατεδάφισης).

Ως προς την κατηγοριοποίηση των Α.Ε.Κ.Κ., υπάρχει μια λίστα ταξινόμησης αποβλήτων της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (European waste list – EWL) που διαχωρίζει τα απορρίμματα σε δύο κατηγορίες, τόσο ως προς την σύνθεσή τους όσο και ως προς την ποσοτικοποίησή τους. (Torgal et al., 2013, para. 3) [13]

Σε ό,τι αφορά την σύνθεση, κατατάσσει τα απορρίμματα σύμφωνα με τον τύπο τους, σε αυτά που προκύπτουν κατά την διαδικασία της κατασκευής και σε αυτά που προέρχονται από κατεδάφιση. Ένας ακόμη τύπος απορριμμάτων σύμφωνα με τη σύνθεσή τους, είναι και τα επικίνδυνα απόβλητα, τα οποία όμως δεν χρησιμοποιούνται σε τελικό στάδιο ως ανακυκλωμένα αδρανή στο σκυρόδεμα. Σε ό,τι αφορά την ποσοτικοποίηση, διαχωρίζει τα απορρίμματα ανάλογα με την ποσότητα που προκύπτει σε κάθε περίπτωση. Πιο συγκεκριμένα, κατηγοριοποιούνται στην κλίμακα του ενός έργου ή σε κλίμακα ροής απορριμμάτων εντός μιας μεγάλης αστικής περιοχής.

Ενδεικτικά στην Ισπανία, τα απορρίμματα του κατασκευαστικού κλάδου που προκύπτουν σε ένα μεγάλο εύρος αναλόγως του είδους τους και της αντίστοιχης ποσότητας, είναι τα εξής:

- Σκυρόδεμα: 80 tons
- Τούβλα, πλακάκια και κεραμικά: 40 tons
- Μέταλλο: 2 tons
- Ξύλο: 1 tons
- Γυαλί: 1 tons
- Πλαστικό: 0,5 tons
- Χαρτί και χαρτόνια: 0,5 tons

Μελέτες έχουν διεξαχθεί σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας απορριμμάτων για τον προσδιορισμό και την σύνθεση των Α.Ε.Κ.Κ.. Στην Ισπανία, η σύνθεση των υλικών κατεδάφισης στους ΧΥΤΑ της Αυτόνομης Κοινότητας της Μαδρίτης, των οποίων ο όγκος τους εκτιμήθηκε με βάσει τις απαντήσεις σε ένα ερωτηματολόγιο (Spanish Government - Ministry of the Environment 2001, 2007), έχουν ως εξής:

- Τούβλα, πλακάκια και άλλα κεραμικά: 54%
- Σκυρόδεμα: 12%
- Σκουπίδια: 7%
- Πέτρες: 5%
- Ασφαλτος: 5%
- Άμμος, χαλίκι και άλλα αδρανή: 4%
- Ξύλο: 4%
- Μέταλλα: 2,5%
- Πλαστικό: 1,5%
- Γυαλί: 0,5%
- Χαρτί: 0,3%
- Γύψος: 0,2%
- Άλλα: 4%

Η ποσότητα των απορριμμάτων που παράγονται στην πηγή εξαρτάται κυρίως από: τις τεχνικές κατασκευής, τον σχεδιασμό των εξαρτημάτων, τα υπάρχοντα κριτήρια μείωσης των απορριμμάτων, την τεκμηρίωση και τεχνική ποιότητα του έργου, την εκπαίδευση και τις δεξιότητες των εργαζομένων του έργου, την ποιότητα διαδικασιών υλοποίησης και τέλος την βελτιστοποίηση των παρεχόμενων υλικών (δοχεία, συσκευασίες, προϊόντα, δομικά υλικά, κ.λπ.).

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι οι εκτιμήσεις των τύπων και των ποσοτήτων των απορριμμάτων των κτιρίων (Α.Ε.Κ.Κ.) έχουν τους εξής στόχους: αποτελεσματικό σχεδιασμό της διαχείρισης των Α.Ε.Κ.Κ επιτόπου, αυξημένη ευαισθητοποίηση και προώθηση της μείωσης, της ανακύκλωσης και της ανάκτησης των Α.Ε.Κ.Κ επιτόπου, και τέλος εκτίμηση του οικονομικού και περιβαλλοντικού κόστους της διαχείρισης των Α.Ε.Κ.Κ. (Torgal et al., 2013, para. 3.5) [13]

2.2 Χαρακτηριστικά και Ιδιότητες Ανακυκλωμένων Αδρανών

Τα ανακυκλωμένα αδρανή διαφέρουν από τα φυσικά ασβεστολιθικά αδρανή κυρίως ως προς την σύστασή τους καθώς συνυπάρχουν δύο διαφορετικά υλικά στο σώμα των κόκκων, το φυσικό αδρανές και η επικολλημένη κονία (τσιμεντοκονία) στην επιφάνεια των κόκκων. Η επικολλημένη τσιμεντοκονία είναι πηγή/αιτία για τα αρνητικά χαρακτηριστικά (ή τις ιδιότητες) των ανακυκλωμένων αδρανών, επηρεάζοντας άμεσα την πυκνότητα, την απορρόφηση σε νερό, την αντίσταση στη φθορά και την περιεκτικότητα σε θειικά άλατα, συνεπώς και την ποιότητα του παραγόμενου σκυροδέματος. Οι ιδιότητες αυτές των ανακυκλωμένων αδρανών επιδρούν αρνητικά στις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος όπως το μέτρο ελαστικότητας, τη συρρίκνωση και τον ερπυσμό, ενώ επηρεάζουν αντίστοιχα την ανθεκτικότητα και σε μικρότερο βαθμό την αντοχή. Η διεπιφανειακή μεταβατική ζώνη (ITZs) επιδρά καθοριστικά στις ιδιότητες του σκυροδέματος. Θεωρείται ο ασθενέστερος κρίκος της αλυσίδας, ουσιαστικά είναι η φάση που καθορίζει την αντοχή του σκυροδέματος. Στα ανακυκλωμένα αδρανή αυτή η φάση είναι που μελετάται εκτενώς.

Σύμφωνα και με την μελέτη των (Juan et al., 2009) [8] , μόνο εάν επιλεχθούν ανακυκλωμένα αδρανή με ποσοστό επικολλημένης τσιμεντοκονίας μικρότερο του 44% μπορούν να χρησιμοποιηθούν επαρκώς στο σκυρόδεμα που προορίζεται για δομοστατικές εφαρμογές. Μαζί με το παραπάνω κριτήριο λαμβάνονται υπόψιν και τα εξής χαρακτηριστικά των αδρανών, φαινόμενη πυκνότητα μεγαλύτερη από 2160 kg/m³, απορρόφηση νερού μικρότερη από 8%, και απώλεια τριβής κατά τη δοκιμή Los Angeles μικρότερη από 40%. Γενικότερα στην ίδια μελέτη, εξετάζονται τρόποι βελτίωσης των ιδιοτήτων ανακυκλωμένων αδρανών κατά την διαδικασία της ανακύκλωσής τους στις ειδικές μονάδες, που αφορούν την μείωση της προσκολλημένης τσιμεντοκονίας στους κόκκους αυτών. Ταυτόχρονα, είναι αναγκαίο να θεσπιστούν απαιτήσεις ώστε να καθοριστεί το όριο της επικολλημένης τσιμεντοκονίας στην επιφάνεια των κόκκων, που πέραν αυτού επηρεάζονται τόσο οι ιδιότητες των αδρανών όσο και η ποιότητά τους.

Για να διαχωρίσουν τα αδρανή που είναι καταλληλότερα για χρήση, οι (Juan et al., 2009) [8] πραγματοποίησαν περιοδικό έλεγχο κατά την διάρκεια ενός έτους σε 15 δείγματα (c&d waste) που προέρχονται από μια σταθερή μονάδα ανακύκλωσης στην Μαδρίτη (TEC REC Tecnología y Reciclado). Η διαδικασία της ανακύκλωσης στο εργοστάσιο έχει ως εξής, γίνεται διπλή σύνθλιψη και διαχωρισμός των αδρανών με δονούμενα κόσκινα. Κατόπιν τα μεταλλικά στοιχεία, που συνυπάρχουν μαζί με τα αδρανή, απομακρύνονται με μαγνητικό ιμάντα μεταφοράς, ενώ πλαστικά, χαρτί και γυαλί αφαιρούνται με το χέρι. Οι παρτίδες των δειγμάτων που προέκυψαν, διαβαθμίστηκαν στο εργαστήριο σε κλάσμα 4/16mm πριν από τις δοκιμές, και εν συνεχεία διαχωρίστηκαν σε κλάσματα 4/8mm και 8/16mm, προκειμένου να διαπιστωθεί η επίδραση του μεγέθους των κόκκων στις ιδιότητες των ανακυκλωμένων αδρανών. Παρακάτω αναφέρονται τρεις διαφορετικές μέθοδοι διαχωρισμού τσιμεντοκονίας από την επιφάνεια των αδρανών.

Πρώτη μέθοδος είναι η βύθιση των αδρανών σε διάλυμα υδροχλωρικού οξέος, το οποίο διαλύει το επιφανειακό στρώμα της τσιμεντοκονίας στους κόκκους. Πάραυτα η μέθοδος αυτή κρίθηκε ακατάλληλη για ασβεστολιθικά αδρανή, καθώς διαβρώνει και το σώμα του ίδιου του αδρανούς.

Επόμενη μέθοδος είναι η παραγωγή σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή και χρωματισμένο τσιμέντο, έτσι ώστε η επιφάνεια της προσκολλημένης τσιμεντοκονίας να είναι εύκολα ορατή σε ένα κομμάτι δοκιμίου, μέσω της οπτικής παρατήρησης του διαφορετικού χρώματος που παρεμβάλλεται μεταξύ των ανακυκλωμένων αδρανών και του νέου κονιάματος.

Τέλος, η θερμική επεξεργασία είναι μια μέθοδος που περιλαμβάνει πολλούς κύκλους εμποτισμού σε νερό και θέρμανση των αδρανών, ενώ η εναλλαγή θερμοκρασίας από θερμό σε ψυχρό δημιουργεί ρωγμές στην επικολλημένη τσιμεντοκονία άρα κάνει την αφαίρεσή της εύκολη από το σώμα των κόκκων. Εν συνεχεία, η υπολειπόμενη τσιμεντοκονία αφαιρείται με μηχανική τριβή. Η μέθοδος αυτή επιλέχθηκε στην παρούσα μελέτη γιατί μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όλα τα αδρανή υλικά, συμπεριλαμβανομένου και του ασβεστόλιθου, ενώ είναι και ευκολότερη στην πράξη συγκριτικά με τις δύο προηγούμενες.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την θερμική επεξεργασία είναι:

- 4/8mm κλάσμα αδρανών με εναπομένουσα επικολλημένη τσιμεντοκονία σε ποσοστό 33% – 55%
- 8/16mm κλάσμα αδρανών με εναπομένουσα επικολλημένη τσιμεντοκονία σε ποσοστό 23% – 44%

Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, προτιμότερο μέγεθος κόκκων αδρανών, εάν αυτά προέχονται από ανακύκλωση, είναι το κλάσμα των 8/16mm, καθώς η προσκολλημένη τσιμεντοκονία σε υψηλότερο ποσοστό επηρεάζει αρνητικά τις ιδιότητες των αδρανών. Εφόσον το κονίαμα είναι ένα πορώδες υλικό, όσο περισσότερο βρίσκεται στην επιφάνεια των κόκκων, τόσο συμβάλλει στην απορρόφηση νερού στα ανακυκλωμένα αδρανή. Συνεπώς για να επιτευχθεί ο στόχος του ποσοστού 5% απορρόφησης νερού που ορίζεται για τα κατάλληλα αδρανή του σκυροδέματος, πρέπει η εναπομένουσα επικολλημένη τσιμεντοκονία να είναι λιγότερη από 26% (39% βιβλιογραφικά) μετά από θερμική επεξεργασία.

Οι (Wang et al. 2017) [14] ανέπτυξαν μια μέθοδο φιλική προς το περιβάλλον και ταυτόχρονα οικονομικά αποδοτική, για την βελτίωση της ποιότητας των ανακυκλωμένων αδρανών. Με αυτή τη μέθοδο τα ανακυκλωμένα αδρανή εμποτίζονται πρώτα σε διάλυμα ακετικού οξέος, το οποίο αντιδρά με τα προϊόντα ενυδάτωσης του τσιμέντου που είναι προσκολλημένα στην επιφάνεια των κόκκων των ανακυκλωμένων αδρανών. Η αντίδραση με το ακετικό οξύ αποδυναμώνει την προσκολλημένη τσιμεντοκονία, η οποία απομακρύνεται εύκολα σε δεύτερη φάση με μηχανική τριβή. Έτσι, τα επεξεργασμένα αδρανή αποκτούν τις απαιτούμενες ιδιότητες, δηλαδή χαμηλότερη απορρόφηση νερού και λιγότερο ποσοστό επικολλημένης τσιμεντοκονίας.

Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου είναι ασφαλής και καθαρή, καθώς δεν χρησιμοποιείται κανένα επικίνδυνο χημικό και παράλληλα δεν εισάγονται επιβλαβή χημικά στα επεξεργασμένα αδρανή. Το σημαντικότερο όμως είναι ότι παράγεται μηδενικό διάλυμα επικίνδυνων αποβλήτων, καθώς το διάλυμα αποβλήτων της επεξεργασίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας, την μόνιμη αποθήκευση CO₂ και την παραγωγή εκ νέου ακετικού

οξέος. Για παράδειγμα στην μελέτη αυτή, το διάλυμα αποβλήτων της επεξεργασίας των ανακυκλωμένων αδρανών χρησιμοποιήθηκε ως πρόσμικτο για το νέο σκυρόδεμα, το οποίο και βελτίωσε την αντοχή του κατά 14%.

3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση στην εφαρμογή ανακυκλωμένων αδρανών και πρόσθετων στο σκυρόδεμα

3.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια η ανάγκη για μείωση των εκπομπών CO₂ από την βιομηχανία τσιμέντου και σκυροδέματος οδήγησε τους ερευνητές στην μελέτη της βιωσιμότητας των υλικών που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή σκυροδέματος. Οι μελέτες στρέφονται στην διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων και της ανθεκτικότητας των οικολογικών αυτών υλικών που διαδίδονται ευρέως σε παγκόσμια κλίμακα καθώς διανύεται ο 21^{ος} αιώνας.

Στις επόμενες παραγράφους παρατίθενται ερευνητικό υλικό των μελετών που έχουν πραγματοποιηθεί έως και σήμερα για την χρήση των ανακυκλωμένων αδρανών στο σκυρόδεμα και τα πλεονεκτήματά τους συγκριτικά με τα φυσικά αδρανή, όπως επίσης και την συμβολή του μετακαολίνη στην αντοχή και την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος.

Οι μελέτες που αναφέρονται παρακάτω ακολουθούν παρεμφερείς πειραματικές μεθόδους με αυτές που διενεργήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

3.2 Αντοχή σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή

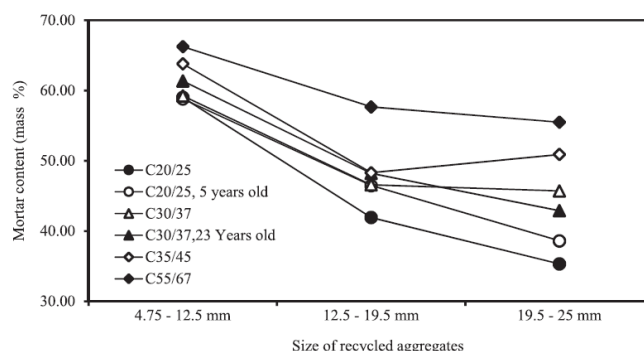
Οι (Gebremariam et al., 2023) [7] διερεύνησαν την επίδραση της αντοχής του μητρικού σκυροδέματος στην ποιότητα των ανακυκλωμένων αδρανών (RCA). Διεξήγαγαν εκ νέου δοκιμές για τον προσδιορισμό των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των ανακυκλωμένων αδρανών που προέρχονται από εργαστηριακό μητρικό σκυρόδεμα με διάφορες χαρακτηριστικές αντοχές, όπως και υπολειμμάτων σκυροδέματος από κατεδαφισμένα κτίρια στην Αιθιοπία.

Ο σχεδιασμός των μιγμάτων έγινε σύμφωνα με την American Concrete Institute, Committee 211. 1977 (ACI 211.1–91). Για τα νέα μητρικά σκυροδέματα, οι συνθέσεις είχαν μέγιστο μέγεθος χονδροειδών αδρανών (βασάλτη) 37mm, λεπτά αδρανή (άμμο ποταμού) με μέτρο λεπτότητας 2,85, Dangote OPC 42,5 R με ειδικό βάρος τσιμέντου 3.1, και νερό βρύσης. Παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο τέσσερα σετ κυβικών δοκιμίων μητρικού σκυροδέματος των 150mm με αντοχές θλίψης 20/25 MPa, 30/37 MPa, 35/45 MPa και 55/67 MPa. Τα δοκίμια από τις κατεδαφίσεις είναι τα εξής, το πρώτο δοκίμιο είναι από τριώροφο κατεδαφισμένο κτίριο ηλικίας 5 ετών και χαρακτηριστικής αντοχής μητρικού σκυροδέματος 25 MPa, ενώ το δεύτερο δοκίμιο προέρχεται από κατεδάφιση πεζογέφυρας ηλικίας 23 ετών και χαρακτηριστικής αντοχής μητρικού σκυροδέματος 30 MPa.

Κατόπιν, τα δοκίμια των έξι ομάδων μητρικού σκυροδέματος υποβλήθηκαν σε διαδικασία σύνθλιψης χρησιμοποιώντας μια μονάδα θραύσης αδρανών Sam Young, που βρέθηκε στην Αρχή οδών της πόλης Αντίς Αμπέμπα, ώστε να παραχθεί ένα σωστό κλάσμα ποιότητας και μεγέθους που συμμορφώνεται με τα ASTM C136 και ASTM C33, με εύρος μεγέθους κόκκων 4,75–25mm. Μετά την σύνθλιψη όλων των κυβικών δοκιμίων σε θραυστήρα σιαγόνων, προέκυψαν ανακυκλωμένα αδρανή (RCA) σε εργαστηριακό περιβάλλον. Τα δείγματα RCA κάθε κατηγορίας αναλύθηκαν σε 3 κλάσματα μεγέθους:

4,75–12,5mm, 12,5–19mm και 19–25mm. Στη συνέχεια συλλέχθηκαν δείγματα από κάθε κλάσμα μεγέθους σύμφωνα με την μεθοδολογία δειγματοληψίας ASTM C702. Ακολούθησαν δοκιμές στα δείγματα των ανακυκλωμένων αδρανών για τον προσδιορισμό της απορρόφησης νερού και του ειδικού βάρους (water absorption and specific gravity), τη δοκιμή Los Angeles (resistance to abrasion), αντίσταση σε θραύση (crushing value), αντίσταση σε κρούση (impact value), και τέλος την εκτίμηση της προσκολλημένης τσιμεντοκονίας στα ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα αδρανή με υδροχλωρικό οξύ και μηχανικό διαχωρισμό.

Παρά τα αντιφατικά αποτελέσματα στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, στην παρούσα έρευνα προέκυψε ότι η βελτίωση στην ποιότητα των RCA ήταν αποτέλεσμα του μειωμένου πορώδους και της ανθεκτικότητας της επικολλημένης τσιμεντοκονίας, που συνδέεται στενά με την αυξημένη αντοχή του μητρικού σκυροδέματος. Συγκεκριμένα όσο πιο αυξημένη αντοχή είχε το μητρικό σκυροδέμα, τόσο βελτιώθηκαν η πυκνότητα, το ειδικό βάρος, η συνάφεια (bond strength), και μειώθηκε παράλληλα η απορρόφηση νερού. Επίσης η υψηλή αντοχή του μητρικού σκυροδέματος, επηρέασε θετικά και την αντίσταση σε τριβή (resistance to abrasion). Στα μητρικά σκυροδέματα χαμηλής αντοχής, η απώλεια τριβής των RCA ήταν σημαντική λόγω της κακής συνάφειας και σύνδεσης (poor adhesion and connection) της τσιμεντοκονίας, ενώ οι αυξημένες τιμές σύνθλιψης και κρούσης των RCA, υποδηλώνουν ότι διασπώνται εύκολα από εξωτερικά φορτία κατά την χρήση. Παρατηρήθηκε επίσης ότι η ποσότητα του κονιάματος που προσκολλάται στα RCA, ποικίλει ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων και την ποιότητα του μητρικού σκυροδέματος. Καθώς μικραίνει το μέγεθος των κόκκων, η περιεκτικότητα σε κονίαμα αυξάνεται. Κατά συνέπεια προτείνεται η χρήση μεγαλύτερων κλασμάτων RCA. Συμπερασματικά, προτείνεται η χρήση RCA που προέρχονται από μητρικό σκυροδέμα υψηλής αντοχής.



Mechanical characterization of recycled concrete (quantification of mortar attached to aggregates).

Σχήμα 3.1 [Πηγή: (Gebremariam et al., 2023) [7]]

Από τους (Xie et al. 2020) [15] έγινε η ακόλουθη μελέτη με σκοπό να επιλυθεί το πρόβλημα της διαχείρισης των Α.Ε.Κ.Κ.. Μελέτησαν την επίδραση του νανομετακαολίνη ως τσιμεντοειδές πρόσθετο υλικό, και του ποσοστού αντικατάστασης των φυσικών χονδρόκοκκων αδρανών από ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα αδρανή, στις μηχανικές ιδιότητες του παραγόμενου σκυροδέματος. Για τον σκοπό αυτό

παρασκεύασαν στο εργαστήριο 16 διαφορετικές συνθέσεις σκυροδέματος, χωρισμένες σε τέσσερις ομάδες συνθέσεων, στις οποίες αντικαθιστούσαν σταδιακά το τσιμέντο με νανομετακαολίνη σε ποσοστό κατά βάρος 0%, 3%, 5% και 7%, ενώ παράλληλα αύξαναν και το ποσοστό αντικατάστασης κατά βάρος των ανακυκλωμένων αδρανών ξεκινώντας από 0%, 30%, 50% και τέλος 100%. Όλες οι συνθέσεις περιείχαν τσιμέντο Portland Jinfu P.O. 42,5, ενώ ο λόγος ενεργού νερού/τσιμέντο παρέμεινε σταθερός στο 0,55.

Στο πειραματικό μέρος, για την δοκιμή της θλιπτικής αντοχής που έγινε στην πρέσα WHY-2000 με τον έλεγχο υπολογιστή και σύμφωνα με τα πρότυπα δοκιμών του συμβατικού σκυροδέματος, χρησιμοποιήθηκαν 6 κυβικά δοκίμια ακμής 100mm και ηλικίας 28 ημερών από κάθε σύνθεση. Επιπλέον για τον προσδιορισμό της ειδικής επιφάνειας (the specific surface area) και του συνολικού όγκου των πόρων (total pore volume) του παραγόμενου σκυροδέματος, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος πολλαπλών σημείων BET (BET multi-point method) και η μέθοδος BJH, ενώ αναλύθηκαν και τα χαρακτηριστικά της κατανομής του μεγέθους των πόρων (pore size distribution).

Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι για σταθερό ποσοστό αντικατάστασης ανακυκλωμένων αδρανών στις συνθέσεις, η θλιπτική αντοχή στις 28 ημέρες αυξήθηκε όσο αυξανόταν αντίστοιχα και το ποσοστό περιεκτικότητας του νανομετακαολίνη στο τσιμέντο. Για τις συνθέσεις με ποσοστό αντικατάστασης ανακυκλωμένων αδρανών 30% και 50%, και περιεκτικότητα σε νανομετακαολίνη 5%, παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη αύξηση της θλιπτικής αντοχής, της τάξης του 17,0% και 8,0% αντίστοιχα. Η αύξηση της θλιπτικής αντοχής επιβραδύνθηκε σταδιακά όσο μεγάλωνε το ποσοστό αντικατάστασης ανακυκλωμένων αδρανών, όμως για την σύνθεση που είχε εξολοκλήρου ανακυκλωμένα αδρανή και 7% περιεκτικότητα σε νανομετακαολίνη, η αντοχή θλίψης αυξήθηκε κατά 27,1%.

Για την παρατήρηση των πόρων και της μικροδομής χρησιμοποιήθηκε μικροσκόπιο SEM. Στο ανακυκλωμένο σκυρόδεμα υπήρχαν κυρίως πόροι με μέγεθος 3,5 – 4nm. Το συνολικό πορώδες του ανακυκλωμένου σκυροδέματος μειώθηκε μετά την προσθήκη νανομετακαολίνη, ενώ αντίστοιχα βελτιώθηκε και η μικροδομή δηλαδή έγινε πιο συμπαγές το πορώδες της τσιμεντόπαστας. Συγκεκριμένα, για την σύνθεση με 30% ποσοστό αντικατάστασης ανακυκλωμένων αδρανών και προσθήκη 5% νανομετακαολίνη, βελτιώθηκε η μικροδομή (micropore) του σκυροδέματος, αλλά και η μικρορωγμή του ίδιου του ανακυκλωμένου αδρανούς (microcrack of recycled aggregate itself). Στην ίδια σύνθεση βελτιώθηκε η διεπιφάνεια επαφής (interface transition area) του νέου και του επικολλημένου κονιάματος, ενώ ταυτόχρονα πληρώθηκαν και οι μικροπόροι του νέου κονιάματος, σε βαθμό που η θλιπτική αντοχή του ανακυκλωμένου σκυροδέματος ξεπέρασε την αντοχή της σύνθεσης αναφοράς με συμβατικό σκυρόδεμα.

Η επίδραση του ποσοστού αντικατάστασης ανακυκλωμένων αδρανών και του ποσοστού προσθήκης νανομετακαολίνης στις συνθέσεις, συγκριτικά με τα αποτελέσματα των δοκιμών της θλιπτικής αντοχής φαίνονται στο **Σχήμα 3.2**.

Table 6
Experimental results of compressive strength of nano-recycled concrete.

Numbers of sample	Contents of NMK (%)	Substitution rates of coarse aggregate (%)	Compressive strength in 28 days (MPa)
NC1	0	0	47.4
RC2	0	30	45.2
RC3	0	50	46.3
RC4	0	100	36.1
NC5	3	0	52.2
NRC6	3	30	49.0
NRC7	3	50	47.1
NRC8	3	100	42.9
NC9	5	0	53.2
NRC10	5	30	52.9
NRC11	5	50	48.4
NRC12	5	100	44.8
NC13	7	0	54.1
NRC14	7	30	51.5
NRC15	7	50	46.2
NRC16	7	100	45.9

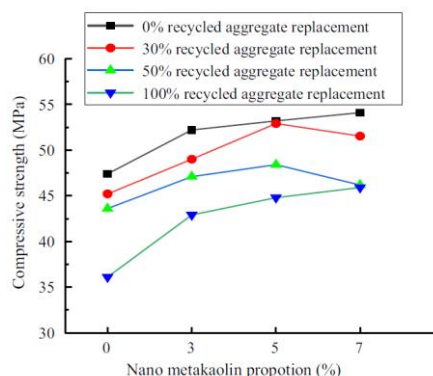


Fig. 2. The relationship between compressive strength and replacement rate of recycled aggregate and proportion of nano metakaolin.

Σχήμα 3.2 Αποτελέσματα δοκιμών θλιπτικής αντοχής συγκριτικά με το ποσοστό ανακυκλωμένων αδρανών και προσθήκης νανομετακαολίνης ανά σύνθεση [Πηγή: (Xie et al. 2020) [15]]

3.3 Ανθεκτικότητα και περιβαλλοντικό αποτύπωμα

Οι (Cordoba et al. 2022) [4] μελέτησαν την επίδραση του πορώδους και των μηχανισμών μεταφοράς νερού κατά την διείσδυση των χλωριόντων στο σκυρόδεμα, καθώς και κατά την διαδικασία της φυσικής ενανθράκωσης, δηλαδή διεργασίες που μπορούν να συντελέσουν στη διάβρωση των ράβδων του οπλισμού. Για αυτές τις δοκιμές παρασκεύασαν τρεις συνθέσεις σκυροδέματος στο εργαστήριο. Η σύνθεση αναφοράς περιείχε συμβατικό τσιμέντο Portland CEM 1 42,5N σε ποσοστό 100% (αναφέρεται ως OPC). Οι επόμενες δύο συνθέσεις περιείχαν ως αντικατάσταση του τσιμέντου Portland εναλλάξ, ψημένο πηλό οπτοπλίνθων, που περιέχει ιλλίτη ως κύριο ορυκτό (και αναφέρεται ως BC) σε ποσοστό 100% στην μία σύνθεση, και μετακαολίνη χαμηλής καθαρότητας (KC) σε ποσοστό 100% στην δεύτερη σύνθεση. Ο λόγος W/OPC, W/BC και W/KC παρέμεινε σταθερός στο 0,5 και στις τρεις συνθέσεις.

Οι πειραματικές δοκιμές που διενεργήθηκαν είναι οι ακόλουθες. Ο χαρακτηρισμός του σκυροδέματος, για όλες τις συνθέσεις, πραγματοποιήθηκε μέσω της θλιπτικής αντοχής κατά EN 12390–3:2020 σε δοκίμια ηλικίας 7, 28 και 90 ημερών. Η κατανομή του μεγέθους των πόρων, στις τρεις συγκρίσιμες πάστες, προσδιορίστηκε χρησιμοποιώντας πορομετρία υδραργύρου (Thermo Scientific Pascal 140 and 440, Waltham, Massachusetts) που συμμορφώνεται με το DIN 66133, σε δοκίμια ηλικίας 28 και 90 ημερών. Η υδατοαπορροφητικότητα των συνθέσεων μελετήθηκε μέσω της απορρόφησης νερού και του όγκου των διαπερατών κενών κατά ASTM C 642. Ο ρυθμός τριχοειδούς αναρρόφησης νερού προσδιορίστηκε με χρήση κυλινδρικών δοκιμίων ηλικίας 7, 28 και 90 ημερών, κατά το πρότυπο ASTM C 1585. Η δοκιμή επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων έγινε σε κυλινδρικά δοκίμια ηλικίας 28 και 90 ημερών, κατά το πρότυπο NT Build 492. Η φυσική ενανθράκωση μετρήθηκε μετά από 3, 6, 12 και 36 μήνες έκθεσης, με πρισματικά δοκίμια ηλικίας 7 και 28 ημερών, σε αγροτική περιοχή (συγκέντρωση CO₂ 350 - 400 ppm).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δοκιμών, η ορυκτολογική σύσταση των ψημένων αργίλων επιδρά σημαντικά στον μηχανισμό απορρόφησης νερού και στην αντοχή του σκυροδέματος. Η θλιπτική αντοχή παρουσιάζει αύξηση στις 28 και στις 90 ημέρες με την προσθήκη μετακαολίνης. Το μέγεθος των πόρων βελτιώνεται σε ηλικία 28 ημερών για τον μετακαολίνη, ενώ για τον ψημένο πηλό βελτιώνεται σημαντικά στις 90 ημέρες. Συνεπώς,

η απορρόφηση νερού και ο όγκος των διαπερατών κενών είναι υψηλότερα στις δύο συνθέσεις που περιέχουν ψημένες αργίλους συγκριτικά με το τσιμέντο Portland. Η σύνθεση που περιέχει ψημένο πηλό παρουσιάζει τον υψηλότερο όγκο διαπερατών κενών.

Γενικότερα, η υδατοαπορροφητικότητα, ο ρυθμός τριχοειδούς αναρρόφησης νερού και η αντίσταση στην διείσδυση χλωριόντων σχετίζονται στενά με το ανοικτό πορώδες και επηρεάζονται από την ποζολανική αντίδραση των ψημένων αργίλων. Λόγω αυτού, η σύνθεση με τον ψημένο πηλό έχει μειωμένη υδατοαπορροφητικότητα στις 28 μέρες, ενώ η σύνθεση με τον μετακαολίνη νωρίτερα. Διαπιστώθηκε επίσης ότι ο μετακαολίνης παρουσιάζει πολύ χαμηλότερο συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων συγκριτικά με το τσιμέντο Portland σε σκυρόδεμα ηλικίας 28 ημερών, ενώ για τα δείγματα με ψημένο πηλό απαιτείται σκυρόδεμα ηλικίας 90 ημερών για να επιτευχθεί χαμηλότερος συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων από εκείνον του τσιμέντου.

Σε ό,τι αφορά την ενανθράκωση, ο μετακαολίνης και ο ψημένος πηλός παρουσιάζουν μεγαλύτερα βάθη ενανθράκωσης από το τσιμέντο Portland, λόγω του υψηλότερου συνολικού πορώδους, της χαμηλότερης περιεκτικότητας σε CH και των τροποποιήσεων στα προϊόντα ενυδάτωσης της πάστας. Ωστόσο σε μεγαλύτερες ηλικίες ωρίμανσης μπορεί να μειωθεί το βάθος ενανθράκωσης. Λόγω της μεταγενέστερης ηλικίας στην οποία λαμβάνει χώρα η ποζολανική αντίδραση, το σκυρόδεμα με ψημένο πηλό απαιτεί παρατεταμένο χρόνο ωρίμανσης για να βελτιώσει τις παραμέτρους που σχετίζονται με την ανθεκτικότητα, συγκριτικά με το σκυρόδεμα με συμβατικό τσιμέντο Portland.

Η μελέτη των (Abdellatif et al. 2023) [1] επικεντρώνεται κυρίως στην χρήση βιομηχανικών απόβλητων ως τσιμεντοειδών πρόσθετων υλικών (SCM) που υποκαθιστούν το τσιμέντο, για την παραγωγή ενός φιλικού προς το περιβάλλον και εξαιρετικά υψηλής απόδοσης σκυροδέματος (UHPC), διατηρώντας παράλληλα τα μηχανικά του χαρακτηριστικά. Για τον σκοπό αυτό παρασκευάσαν στο εργαστήριο τρεις διαφορετικές ομάδες συνθέσεων σκυροδέματος και μία σύνθεση αναφοράς. Η σύνθεση αναφοράς περιείχε μόνο τσιμέντο Portland (PC) CEM I 52,5 N που αντικαταστάθηκε κατά βάρος σε ποσοστό 15% από πυριτική παιπάλη (SF). Στην πρώτη ομάδα συνθέσεων το τσιμέντο Portland (PC) αντικαταστάθηκε κατά βάρος με σκωρία υψικαμίνου (GGBS) σε ποσοστά 30%, 40% και 50%. Στην δεύτερη ομάδα έγινε αντίστοιχα αντικατάσταση κατά βάρος του τσιμέντου Portland από ιπτάμενη τέφρα (FA) σε ποσοστά 20%, 25% και 30%. Στην τελευταία ομάδα συνθέσεων το τσιμέντο αντικαταστάθηκε κατά βάρος από μετακαολίνη (MK) σε ποσοστά 15%, 20% και 25%. Σε όλες τις συνθέσεις αντικαταστάθηκε σταθερό ποσοστό 15% κατά βάρος τσιμέντου από πυριτική παιπάλη. Επίσης, σε όλες τις συνθέσεις ο λόγος νερού προς συνδετικό υλικό (W/B) ήταν 0,16 και η αναλογία λεπτόκοκκων αδρανών προς συνδετικό υλικό ήταν 0,71. Συμπεριλήφθηκαν επίσης ίνες χάλυβα στα μείγματα με αναλογία 2% κατ' όγκο. Ο υπερρευστοποιητής (SP) προστέθηκε σε κατάλληλες αναλογίες για να διατηρηθεί η εργασιμότητα των μειγμάτων εντός αποδεκτών ορίων.

Οι πειραματικές δοκιμές είχαν ως εξής, για την αξιολόγηση της εργασιμότητας σε νωπό σκυρόδεμα έγινε η δοκιμή κάθισης σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C143/C143M-15a. Για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια ηλικίας 3, 7, 28 και 90 ημερών. Για την αξιολόγηση της αντοχής σε κάμψη χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος κάμψης τριών σημείων σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C1609/C1609M-12. Υπολογίστηκε η θλιπτική αντοχή κατά το πρότυπο ASTM C39/C39M-17. Τέλος η εφελκυστική αντοχή υπολογίστηκε έμμεσα με διάρρηξη (Brazilian test) κατά το πρότυπο ASTM C496/C496M-17. Για τον προσδιορισμό της ανθεκτικότητας στο σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια ηλικίας 28 ημερών. Πραγματοποιήθηκε η δοκιμή τριχοειδούς αναρρόφησης (Sorptivity test) σύμφωνα με το

πρότυπο το ASTM C1585–13. Τέλος, πραγματοποιήθηκε δοκιμή επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων (RCTP), σύμφωνα με το ASTM C1202–12.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι η εργασιμότητα μειώθηκε με την προσθήκη μετακαολίνη και σκωρίας υψικαμίνου, ενώ βελτιώθηκε με την προσθήκη ιπτάμενης τέφρας. Οι θλιπτική, η καμπτική και η εφελκυστική αντοχή της σύνθεσης που περιείχε 15% μετακαολίνη είναι μεγαλύτερη στις 90 ημέρες συγκριτικά με εκείνη της σύνθεσης αναφοράς. Τα SCM βελτιώνουν την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, καθώς η σύνθεση που περιείχε 15% μετακαολίνη και η σύνθεση με 30% ιπτάμενη τέφρα παρουσίασαν την μεγαλύτερη αντίσταση στην διείσδυση χλωριόντων. Ωστόσο η σύνθεση με 50% περιεκτικότητα σε σκωρία υψικαμίνου είχε την υψηλότερη διείσδυση χλωριόντων.

Τα βιομηχανικά απόβλητα (ιπτάμενη τέφρα, πυριτική παιπάλη, σκωρία υψικαμίνου) και ο μετακαολίνης είναι απαραίτητα συστατικά για την παραγωγή εξαιρετικά υψηλής απόδοσης σκυροδέματος (UHPC) και ταυτόχρονα χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Χρησιμοποιώντας μόνο 35-65% τσιμέντο στο τριμερές μείγμα του συνδετικού υλικού (ternary binder system) δεν διακυβεύεται η μηχανική απόδοση του σκυροδέματος. Με την προσέγγιση αυτή, το τσιμέντο αξιοποιείται αποτελεσματικά και η παραγωγή UHPC επιτυγχάνει ισορροπία μεταξύ απόδοσης και περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Ανεξάρτητα από τον τύπο των τσιμεντοειδών πρόσθετων υλικών που επιλέγονται στις συνθέσεις, καθώς αυξάνεται η θλιπτική αντοχή των UHPC που περιέχουν SCM, παρατηρείται σταδιακή μείωση του δείκτη e-CO₂ του UHPC, ενώ η τιμή της ενσωματωμένης ενέργειας και του δείκτη κόστους αυξάνεται σταδιακά. Συνεπώς το παραγόμενο τριμερές μείγμα του συνδετικού υλικού σε αυτή την μελέτη, προμηνύει καλές προοπτικές για την δημιουργία πράσινου και οικονομικά αποδοτικού UHPC, υπό τις κατάλληλες συνθήκες ωρίμανσης (under normal curing) βλ. **Σχήμα 3.3**.

Τέλος τα αποτελέσματα της περιβαλλοντικής αξιολόγησης καταδεικνύουν περαιτέρω πως το τσιμέντο μπορεί να αντικατασταθεί αποτελεσματικά από τσιμεντοειδή πρόσθετα υλικά (SCMs), ώστε να διασφαλιστεί η βελτιωμένη απόδοση του UHPC με ταυτόχρονη μείωση των εκπομπών CO₂ ανά μονάδα όγκου βλ. **Σχήμα 3.4**. Κρίνεται εύλογη λοιπόν η αντικατάσταση του τσιμέντου από SCMs, με απώτερο σκοπό την δημιουργία ενός φιλικού προς το περιβάλλον UHPC παρέχοντας μια νέα ιδέα για την παραγωγή καθαρών προϊόντων στο μέλλον.

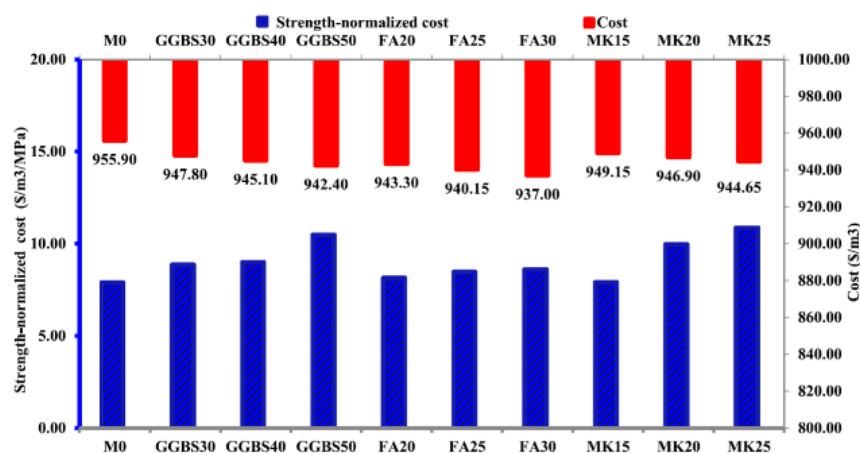


Fig. 15. Unit cost and ST-C of the ternary mixes.

Σχήμα 3.3 [Πηγή: (Abdellatief et al. 2023) [1]]

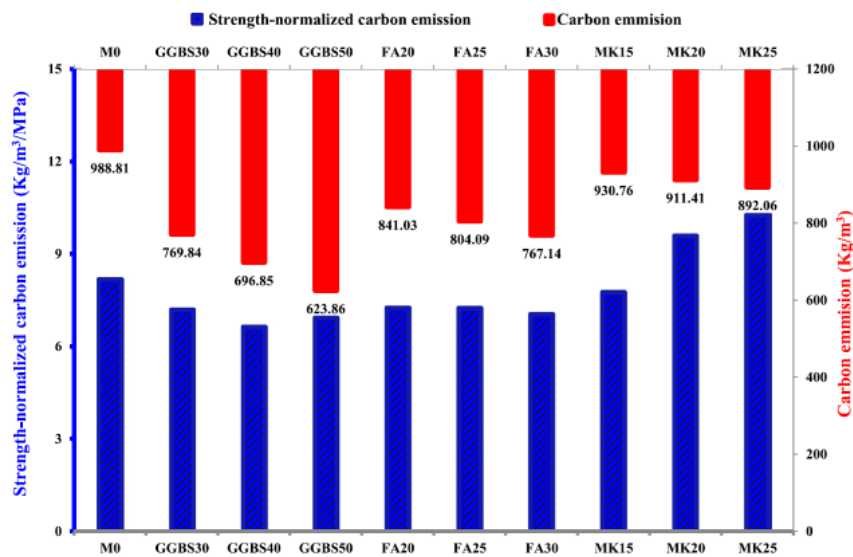


Fig. 13. Unit CF and ST-CF of the UHPC samples.

Σχήμα 3.4 [Πηγή: (Abdellatif et al. 2023) [1]]

Η εργασία των (Gao et al. 2022) [6] στόχευσε στην διερεύνηση της συμπεριφοράς της διείσδυσης και διάχυσης των ιόντων χλωρίου στην διεπιφανειακή μεταβατική ζώνη (ITZs) σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή (RAC). Για τον σκοπό της έρευνας παρασκευάστηκαν κυβικά δοκίμια RAC των 100mm που περιείχαν ανακυκλωμένα χονδρόκοκκα αδρανή (RCA) κοκκομετρίας 4,75 – 26,5mm, εμποτισμένα σε nano-SiO₂ και ενανθρακωμένα (CO₂), αντοχής C30 και C60, τα οποία εμβαπτίστηκαν σε διάλυμα NaCl 3,5% για 45 και 90 ημέρες. Στις συνθέσεις χρησιμοποιήθηκε συμβατικό τσιμέντο Portland P.O. 42,5, άμμος ποταμού με μέτρο λεπτότητας 2,5, πολυκαρβοξυλικός υπερρευστοποιητής με ποσοστό μείωσης νερού 25% κατά βάρος, και νερό βρύσης. Σύμφωνα με τις διαφορετικές μεθόδους της έρευνας, τα δοκίμια χαρακτηρίστηκαν ως S-RAC30, S-RAC60, C-RAC30, C-RAC60, Si-RAC30 και Si-RAC60.

Μετά την τυπική ωρίμανση των 28 ημερών και σύμφωνα με το πρότυπο (GB/T50081-2019) προσδιορίστηκε η αντοχή θλίψης για όλες τις συνθέσεις. Κατόπιν τα δοκίμια RAC ξηράθηκαν σε φούρνο έως την σταθεροποίηση του βάρους τους. Για να πραγματοποιηθεί η δοκιμή free chloride ion content test, οι πέντε πλευρές των κυβικών δοκιμίων RAC σφραγίστηκαν με κερί παραφίνης για να εξασφαλιστεί η διείσδυση των χλωριόντων στο σκυρόδεμα μόνο από μία επιφάνεια, και μετά τα δοκίμια βυθίστηκαν σε διάλυμα NaCl 3,5% το οποίο αντικαθίσταται εκ νέου κάθε 15 μέρες για να εξασφαλιστεί σταθερή συγκέντρωση ιόντων. Στη συνέχεια έγινε ο χαρακτηρισμός των προϊόντων ενυδάτωσης στην επιφάνεια των επεξεργασμένων RCA. Λήφθηκαν δείγματα από την προϋπάρχουσα επικολημένη τσιμεντοκονία τα οποία εξετάστηκαν με περίθλαση ακτίνων-X. Ακολούθησε ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων της διεπιφανειακής μεταβατικής ζώνης (ITZs) των RCA, προσδιορίστηκε η μικροσκληρότητα (microhardness) των τριών τύπων της ITZs, (το αδρανές – η παλαιά επικολημένη τσιμεντοκονία - η νέα τσιμεντοκονία) με σάρωση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου (SEM). Επίσης, χρησιμοποιήθηκε EDS σάρωση

για την ανάλυση της ITZs στην διεπιφάνεια από το αδρανές ως και την παλαιά επικολλημένη τσιμεντοκονία.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι τα χλωριόντα διεισδύουν σε πρώτη φάση στη διεπιφάνεια της ITZs των RAC, και σε δεύτερη φάση εισχωρούν στο σώμα της τσιμεντοκονίας και στα αδρανή μέσω των πόρων και των ρωγμών. Η ενίσχυση των αδρανών βοηθάει την αντίσταση στην διείσδυση χλωριόντων των RAC, αλλά σε μικρότερο βαθμό από την επίδραση του βαθμού συμπύκνωσης του παλαιού κονιάματος. Η ενίσχυση επηρεάζει κυρίως την διεπιφάνεια του παλαιού αδρανούς και της παλαιάς επικολλημένης τσιμεντοκονίας, ενώ επηρεάζει λιγότερο τις άλλες δύο διεπιφάνειες της ITZs. Οι υψηλότερες τιμές μικροσκληρότητας και το χαμηλότερο πάχος της διεπιφάνειας ITZs αδρανούς - παλαιού κονιάματος, παρατηρήθηκαν στην σύνθεση Si-RAC που παρασκευάστηκε με εμπότισμό των RCA με nano-SiO₂. Καθώς αυξανόταν η ηλικία προσβολής από χλωριόντα, η αντίσταση στην διείσδυση χλωριόντων βελτιωνόταν σημαντικά. Η χρήση της ενανθράκωσης και του εμπότισμού με nano-SiO₂ στα RCA, μείωσε τα άλατα Friedel στα RAC. Τέλος, τα χλωριόντα δεν διαχέονται μόνο στην διεπιφάνεια της ITZs, διαχέονται εξίσου και στην τσιμεντοκονία του RAC που παρασκευάστηκε με RCA χαμηλής αντοχής. Αντιθέτως, η περιοχή με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση χλωριόντων περιορίζεται εντός της μεταβατικής ζώνης, για τα RAC που παρασκευάστηκαν με RCA υψηλής αντοχής, λόγω της περισσότερο συμπαγούς εσωτερικής δομής και του μικρότερου πλάτους της ITZs αδρανούς - παλαιού κονιάματος.

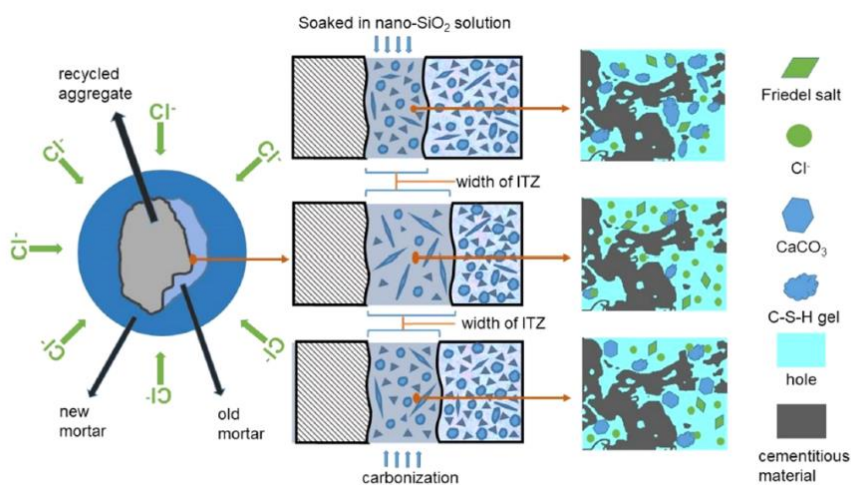


Fig. 18. Chloride ion erosion mechanism.

Σχήμα 3.5 Μηχανισμός διείσδυσης χλωριόντων [Πηγή: (Gao et al. 2022) [6]]

4 Πειραματικό μέρος

4.1 Εισαγωγή

Για τις ανάγκες του πειραματικού μέρους της παρούσας διπλωματικής εργασίας, παράχθηκαν και μελετήθηκαν τρεις (3) διαφορετικές ομάδες συνθέσεων σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή και μία (1) σύνθεση αναφοράς συμβατικού σκυροδέματος. Για τη διερεύνηση της επάρκειας των επιμέρους συνθέσεων του ανακυκλωμένου σκυροδέματος ώστε να είναι κατάλληλο για δομοστατικές εφαρμογές, καθώς και για τη μελέτη της ανθεκτικότητας του, πραγματοποιήθηκαν οι εξής πειραματικές δοκιμές:

- Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης σε κυβικά δοκίμια
- Δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας – προσδιορισμός ανοιχτού πορώδους ΟΡ%
- Δοκιμή προσδιορισμού συντελεστή τριχοειδούς αναρρόφησης
- Δοκιμή επιταχυνόμενης διείδυσης χλωριόντων κατά EN 12390-18

Στα επόμενα κεφάλαια γίνεται λεπτομερής περιγραφή των παραπάνω δοκιμών και των αποτελεσμάτων τους. Η παρασκευή όλων των συνθέσεων, η συντήρηση των δοκιμίων, η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης στις 28 και στις 105 μέρες αντίστοιχα για την κάθε σύνθεση, καθώς και όλες οι δοκιμές ανθεκτικότητας πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

4.2 Υλικά και συνθέσεις

Στις τρεις (3) διαφορετικές ομάδες συνθέσεων που παράχθηκαν και μελετήθηκαν πραγματοποιήθηκε σταδιακή αύξηση των ανακυκλωμένων αδρανών ως ποσοστό που αντικατέστησε τα φυσικά (ασβεστολιθικά) αδρανή (γαρμπίλι), στην πρώτη ομάδα κατά 30%, στην δεύτερη κατά 60% και στην τρίτη ομάδα συνθέσεων κατά 90%. Ταυτόχρονα αντικαταστάθηκε από μετακαολίνη εναλλάξ το τσιμέντο και η άμμος κατά βάρος, σε ποσοστό 10% και στις τρεις (3) διαφορετικές ομάδες συνθέσεων. Παρακάτω στον **Πίνακα 4.4**, παρατίθενται αναλυτικά και οι εννέα (9) επιμέρους συνθέσεις που προέκυψαν από τους παραπάνω συνδυασμούς, όπως και μία (1) σύνθεση αναφοράς με τον κωδικό REF. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στις συνθέσεις αναφορικά είναι τα εξής:

- Τσιμέντο Portland CEM I 42,5 N
- Άμμος
- Γαρμπίλι
- Γαρμπίλι RA
- Μετακαολίνης
- Νερό
- Υπερρευστοποιητής

Το χημικό πρόσμικτο που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις συνθέσεις είναι ο υπερρευστοποιητής CHEMIUM NT2 της Domylo [21]. Τα παραγόμενα αναμείγματα ανά σύνθεση ήταν της τάξης των 12 L το καθένα.



Εικόνα 4.1 Μετακαολίνης (αριστερά) και ανακυκλωμένα αδρανή (δεξιά)



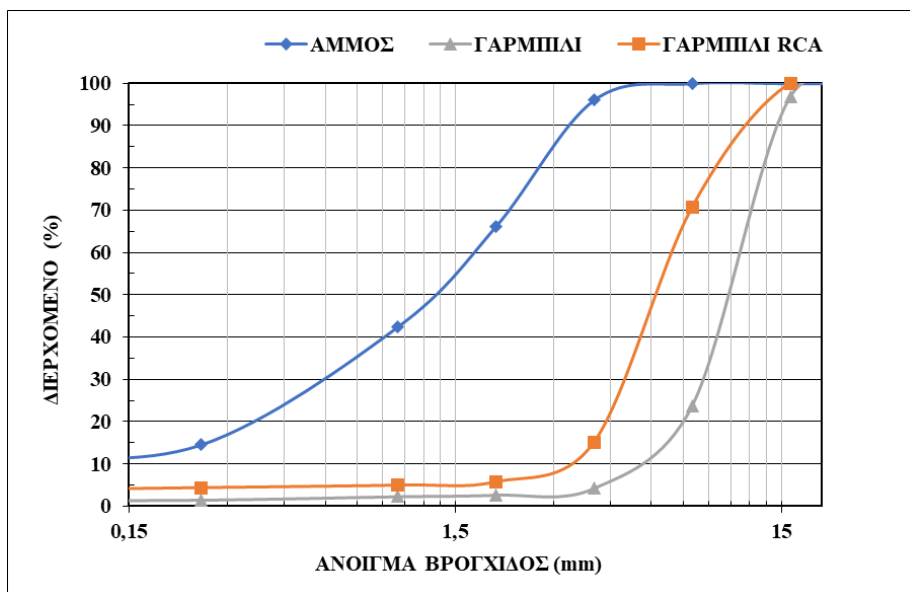
Εικόνα 4.2 Τσιμέντο Portland CEM I 42,5 N (αριστερά) και μετακαολίνης (δεξιά)

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά των επιμέρους αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν στις συνθέσεις

	ΑΜΜΟΣ	ΓΑΡΜΠΙΛΙ	ΓΑΡΜΠΙΛΙ RCA
Απορροφητικότητα %	1,61	0,73	1,78
Φαινόμενο ειδικό βάρος (t/m^3)	2,70	2,71	2,70
Μικτό φαινόμενο ειδικό βάρος εν κορεσμού (t/m^3)	2,67	2,61	

Πίνακας 4.2 Κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν στις συνθέσεις

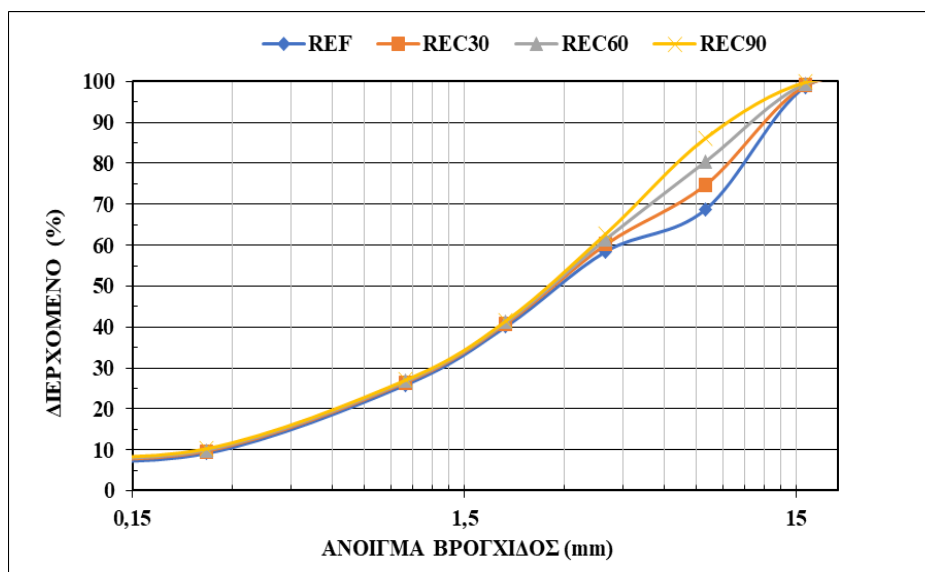
Sieve Analysis			
Sieve No	ΑΜΜΟΣ	ΓΑΡΜΠΙΛΙ	ΓΑΡΜΠΙΛΙ RCA
31,5	100,0	100,0	100,0
16	100,0	96,9	100,0
8	100,0	23,8	70,7
4	96,1	4,2	15,1
2	66,1	2,7	5,7
1	42,4	2,3	4,9
0,25	14,5	1,5	4,3
0,063	11,1	1,3	3,7



Σχήμα 4.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν στις συνθέσεις

Πίνακας 4.3 Κοκκομετρική διαβάθμιση των μειγμάτων ανά ομάδα σύνθεσης

ΜΕΙΓΜΑΤΑ ΑΔΡΑΝΩΝ				
Sieve No	REF	REC30	REC60	REC90
31,5	100,00	100,00	100,00	100,00
16	98,71	99,11	99,49	99,87
8	68,74	74,82	80,53	86,24
4	58,42	60,19	61,51	62,83
2	40,11	40,78	41,16	41,53
1	25,92	26,44	26,76	27,08
0,25	9,15	9,56	9,90	10,25
0,063	7,05	7,39	7,68	7,98



Σχήμα 4.2 Κοκκομετρική διαβάθμιση των μειγμάτων ανά ομάδα σύνθεσης

Πίνακας 4.4 Αναλογία των υλικών των επιμέρους συνθέσεων (kg/m³)

ΥΛΙΚΑ (kg/m ³)	REF	REC30	REC30 MK10	REC30 MK10 SR	REC60	REC60 MK10	REC60 MK10 SR	REC90	REC90 MK10	REC90 MK10 SR
Λόγος W/B	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Τσιμέντο	330	330	297	330	330	297	330	330	297	330
Μετακαολίνη	0	0	33	33	0	33	33	0	33	33
Άμμος	1135	1135	1135	1102	1135	1135	1102	1135	1135	1102
Γαρμπίλι	773	541	541	541	309	309	309	77	77	77
Γαρμπίλι RA	-	232	232	232	464	464	464	696	696	696
Ενεργό νερό	165	165	165	181,5	165	165	181,5	165	165	181,5
Συνολικό νερό	187	187	187	203	188	188	204	190	190	206
Υπερρευστο- ποιητής	0,60	0,79	1,02	1,01	1,21	1,28	1,04	0,80	1,38	1,22

Η κωδικοποίηση των συνθέσεων έγινε με βάση το ποσοστό των ανακυκλωμένων αδρανών και το ποσοστό του μετακαολίνης στην κάθε σύνθεση. Πιο αναλυτικά, για την ομάδα των συνθέσεων με ανακυκλωμένα αδρανή σε ποσοστό αντικατάστασης 30%, η κωδική ονομασία είναι η εξής: REC30 όπου “REC” είναι τα αρχικά από το recycled και “30” το ποσοστό των ανακυκλωμένων αδρανών στη συγκεκριμένη σύνθεση. Αντίστοιχα για τη σύνθεση με κωδικό REC30MK10 προστέθηκε η ένδειξη “MK10” που σημαίνει

αντικατάσταση του τσιμέντου κατά βάρος με μετακαολίνη σε ποσοστό 10%. Τέλος για τη σύνθεση με κωδικό REC30MK10SR το “SR” είναι τα αρχικά από το sand replacement και σημαίνει ό,τι αντίστοιχα με την προηγούμενη σύνθεση έγινε αντικατάσταση της άμμου κατά βάρος σε ποσοστό 10% με μετακαολίνη. Αυτή η κωδικοποίηση ακολουθήθηκε και στις υπόλοιπες δύο (2) ομάδες συνθέσεων, ενώ η σύνθεση αναφοράς έχει τον κωδικό REF από τα αρχικά του reference.

Για την παραγωγή όλων των μειγμάτων ο λόγος ενεργού νερού προς συνδετικό υλικό (W/B) ήταν σταθερός στο 0,50. Όλα τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν είχαν προξηρανθεί στους 105°C σε φούρνο. Η σύνθεση αναφοράς REF δεν περιέχει ανακυκλωμένα αδρανή ούτε και μετακαολίνη. Κατά τη διαδικασία της παρασκευής των μιγμάτων στον αναδευτήρα, τα ξηρά υλικά προστίθενται με σειρά κοκκομετρίας από τα πιο χονδρόκοκκα (γαρμπίλι, γαρμπίλι RA) στα πιο λεπτόκοκκα αδρανή (άμμος) και αναμειγνύονται για 1' λεπτό με ταυτόχρονη χρήση του νερού απορρόφησης. Κατόπιν προστίθενται το τσιμέντο, το ενεργό νερό ενώ γίνεται η ανάμειξη, και ακολούθως ο μετακαολίνης που πρέπει να διαχέεται ομοιόμορφα πάνω στο μίγμα. Στο τέλος προστίθεται στο μίγμα ο υπερρευστοποιητής κατά την διάρκεια της ανάμειξης, η οποία πραγματοποιείται για διάρκεια 3' λεπτών.

Σε αυτό το στάδιο ακολουθούν οι δοκιμές του νωπού σκυροδέματος που περιγράφονται αναλυτικά σε επόμενη παράγραφο. Κατόπιν το νωπό σκυροδέμα χυτεύεται σε χαλύβδινες μήτρες. Κατά την διαδικασία της χύτευσης, οι μήτρες πληρώνονται σε δύο στρώσεις ενώ η κάθε στρώση συμπυκνώνεται σε δονητική τράπεζα. Μετά το πέρα 24 ωρών, τα δοκίμια αφαιρούνται από της μήτρες και συντηρούνται σε δεξαμενές νερού θερμοκρασίας 20°C έως και την διεξαγωγή των πειραμάτων.

Για κάθε σύνθεση λαμβάνονται συνολικά 8 δοκίμια. Τα 6 κυβικά δοκίμια είναι διαστάσεων 100×100 mm και προορίζονται για την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, ενώ τα 2 κυλινδρικά είναι διαστάσεων $\varnothing 100 \times 200$ και προορίζονται για τη δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας και τον προσδιορισμό ανοιχτού πορώδους OP%, για τη δοκιμή προσδιορισμού του συντελεστή τριχοειδούς αναρρόφησης, και τέλος για την δοκιμή επιταχυνόμενης διείδυσης χλωριόντων.



Εικόνα 4.3 Χαλύβδινες μήτρες δοκιμίων σκυροδέματος πληρωμένες με νωπό σκυροδέμα

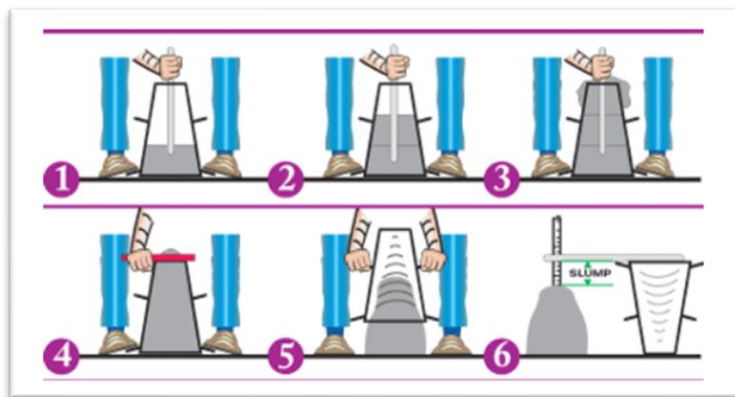
4.3 Πειραματικές Μέθοδοι

4.3.1 Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος

- Δοκιμή κάθισης

Για τον προσδιορισμό της εργασιμότητας (workability) και την παρατήρηση της συνεκτικότητας των συνθέσεων πραγματοποιήθηκε η δοκιμή κάθισης (Slump Test) σε νωπό σκυρόδεμα σύμφωνα με το πρότυπο EN 12350-2 [25].

Το νωπό σκυρόδεμα διαστρώνεται μέσα στον ειδικό μεταλλικό κώνο κάθισης (Abrams cone) σε τρεις όμοιες στρώσεις και η κάθε στρώση συμπυκνώνεται με την ειδική μεταλλική ράβδο με στρογγυλεμένα άκρα διαμέτρου $\varnothing 16$ cm και μήκους 60 cm. Για να συμπυκνωθεί επαρκώς το σκυρόδεμα γίνονται 25 χτυπήματα ανά στρώση με την μεταλλική ράβδο, ομοιόμορφα τόσο στο κέντρο όσο και στην περιφέρεια του κώνου. Μετά το τέλος της συμπύκνωσης κι ενώ ο κώνος έχει πληρωθεί από σκυρόδεμα, η επιφάνειά του επιπεδώνεται ελαφρά με μυστρί και καθαρίζονται όσα υπολείμματα υλικού βρίσκονται περιμετρικά εκτός του κώνου. Κατόπιν ο κώνος αναστρέφεται κατακόρυφα με σταθερή κίνηση των χεριών και τοποθετείται ανεστραμμένος δίπλα στο σκυρόδεμα. Η μεταλλική ράβδος στερεώνεται επάνω στον κώνο οριζοντίως και μετριέται η απόσταση του υψηλότερου σημείου της επιφάνειας του σκυροδέματος από το κάτω μέρος της ράβδου. Αυτή η απόσταση ορίζεται ως κάθιση (σε cm) και μετριέται με χρήση μέτρου όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.3** [23], [24].



Σχήμα 4.3 Διαδικασία δοκιμής κάθισης κατά EN 206

Πίνακας 4.5 Κατηγορίες κάθισης ΕΛΟΤ EN 206

Κατηγορία	Ονομασία	Κάθιση, mm
S1	Ελάχιστα Πλαστικό	10 – 40
S2	Μέτρια Πλαστικό	50 – 90
S3	Πλαστικό	100 – 150
S4	Ημίρρευστο	160 – 210
S5	Ρευστό	> 220

Η μετρούμενη κάθιση θα στρογγυλεύεται στα πλησιέστερα 10mm

- **Δοκιμή προσδιορισμού πυκνότητας**

Για να προσδιοριστεί η πυκνότητα του νωπού σκυροδέματος χρησιμοποιείται κυλινδρικό μεταλλικό δοχείο όγκου 8 L, το οποίο πληρώνεται σε δύο όμοιες στρώσεις και η κάθε στρώση συμπυκνώνεται σε δονητική τράπεζα. Αμέσως μετά τη συμπύκνωση το δοχείο ζυγίζεται και καταγράφεται το βάρος του. Η πυκνότητα υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (4.1)$$

όπου:

D : η πυκνότητα του νωπού σκυροδέματος (kg/m³)

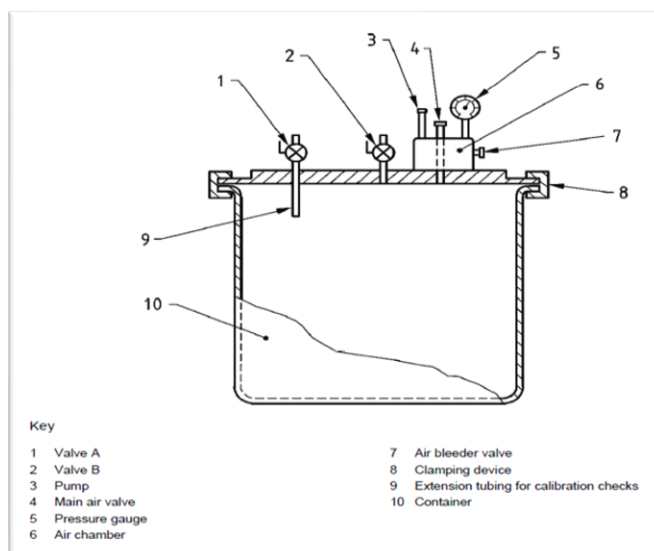
m₂: η μάζα του δοχείου πληρωμένη με σκυρόδεμα (kg/m³)

m₁: η μάζα του άδειου δοχείου (kg/m³)

V : ο όγκος του δοχείου (m³)

- **Δοκιμή προσδιορισμού περιεχόμενου αέρα**

Για να προσδιορισθεί ο περιεχόμενος αέρας στο νωπό σκυρόδεμα ακολουθείται η μέθοδος εξισορρόπησης της πίεσης κατά EN 12350-7 [26]. Το κυλινδρικό μεταλλικό δοχείο όγκου 8 L, πληρώνεται με σκυρόδεμα σε δύο όμοιες στρώσεις, κάθε μια εκ των οποίων συμπυκνώνεται σε δονητική τράπεζα. Μετά τη συμπύκνωση, το δοχείο κρούεται με πλαστικό σφυρί στο πλάι ώστε να κλείσουν τα κενά του υλικού, καθαρίζεται με ένα πανί στην επιφάνειά του, και σφραγίζεται αεροστεγώς. Στη συνέχεια γίνεται η εξισορρόπηση της πίεσης του αέρα στο δοχείο χειροκίνητα με την αντλία πίεσης και με την χρήση των βαλβίδων (Σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.4 Συσκευή μέτρησης περιεχόμενου αέρα με τη μέθοδο της εξισορρόπησης της πίεσης κατά EN 12350-7

4.3.2 Αντοχή

Για τη μέτρηση της θλιπτικής αντοχής στο σκληρυμένο σκυρόδεμα πραγματοποιήθηκε η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης σύμφωνα με το πρότυπο EN 12390-3 [27]. Όταν τα κυβικά δοκίμια της κάθε σύνθεσης έφταναν την ηλικία των 28 ημερών, τρία (3) από αυτά απομακρύνονταν από τη δεξαμενή νερού όπου συντηρούνταν, ζυγίζονταν σε κατάσταση κορεσμού και κατόπιν τοποθετούνταν στην πρέσα για την επιβολή φόρτισης με σταθερό ρυθμό έως ότου να αστοχήσουν έναντι θλίψης. Η ίδια διαδικασία ακολουθούνταν αντίστοιχα για τρία (3) κυβικά δοκίμια ηλικίας 105 ημερών από την κάθε σύνθεση. Η θλιπτική αντοχή υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (4.2)$$

όπου:

f_c : η θλιπτική αντοχή (Μρα)

F : το μέγιστο φορτίο (N)

A_c : το εμβαδόν του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με την πλάκα φόρτισης (mm)



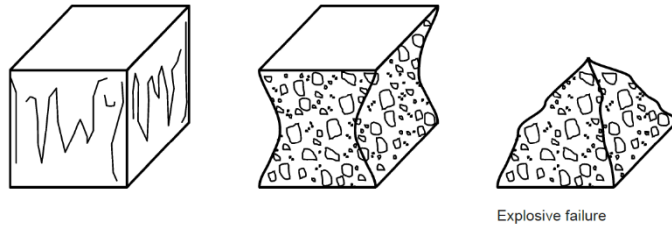
Εικόνα 4.4 Δοκίμιο σκυροδέματος στην πρέσα κατά την διάρκεια της δοκιμής θλίψης



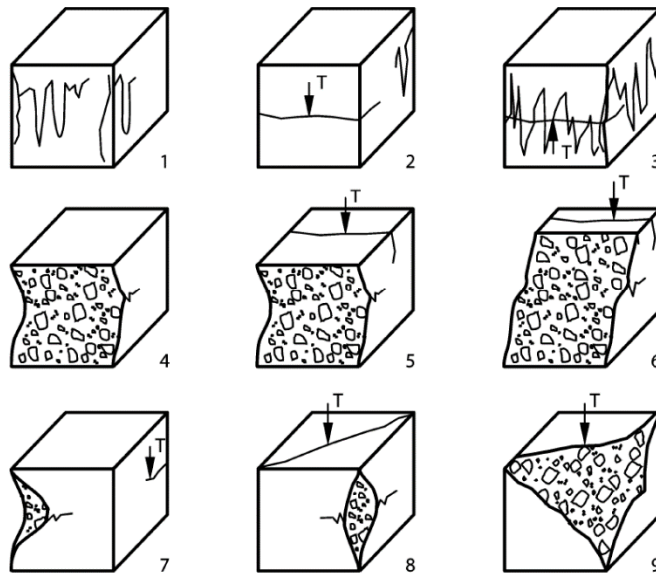
Εικόνα 4.5 Κυβικά δοκίμια σκυροδέματος πριν την δοκιμή θλίψης



Εικόνα 4.6 Κυβικό δοκίμιο σκυροδέματος σε κατάσταση αστοχίας μετά την δοκιμή θλίψης



Εικόνα 4.7 Αποδεκτή μορφή δοκιμίων μετά την δοκιμή θλίψης



Εικόνα 4.8 Μη αποδεκτή μορφή δοκιμίων μετά την δοκιμή θλίψης

4.3.3 Δοκιμές Ανθεκτικότητας

4.3.3.1 Υδατοαπορροφητικότητα – Ανοικτό Πορώδες OP%

Για την δοκιμή προσδιορισμού του ανοιχτού πορώδους (open porosity) OP%, ως παραμέτρου υδατοαπορροφητικότητας του σκυροδέματος, χρησιμοποιήθηκαν δύο (2) κυλινδρικά δοκίμια ανά σύνθεση, διαστάσεων Φ100 και πάχους 3 cm. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια ηλικίας τουλάχιστον 28 ημερών, κατά το πρότυπο του ASTM C642-97 [28].

Η πειραματική διαδικασία έχει ως εξής, τα δοκίμια παρέμεναν στη δεξαμενή νερού όπου και συντηρούνταν με σκοπό να βρίσκονται σε κατάσταση πλήρως κορεσμού. Όταν έφταναν την ηλικία των 28 ημερών ζυγίζονταν τόσο σε αέρα (μάζα κορεσμένου δοκιμίου) όσο και σε νερό υπό άνωση (μάζα υπό άνωση). Κατόπιν των ζυγίσεων τα δοκίμια τοποθετούνταν στο πυριαντήριο (φούρνος ξηράσεως), υπό σταθερή θερμοκρασία 105°C έως ότου να σταθεροποιηθεί το βάρος τους. Η σταθεροποίηση του βάρους τους επαληθεύτηκε με διαδοχικές ζυγίσεις σε αέρα (μάζα ξηρού δοκιμίου) ανά 24ωρο για διάρκεια 7 ημερών περίπου, μέχρι η απόκλιση των τιμών να φτάσει το 0,1%. Μετά την ξήρανσή τους στο φούρνο κι εφόσον είχαν σταθερό βάρος, τα δοκίμια τοποθετούνταν στον ξηραντήρα έως και την ημερομηνία διεξαγωγής του επόμενου πειράματος.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του ανοιχτού πορώδους είναι οι ακόλουθες:

$$\text{Ανοικτό πορώδες: } OP\% = \frac{g_2 - g_1}{g_2} \times 100 \quad (4.3)$$

$$\text{Πυκνότητα επί ξηρό: } g_1 = \frac{A}{B-D} \times \rho \quad (4.4)$$

$$\text{Φαινόμενη πυκνότητα: } g_2 = \frac{A}{A-D} \times \rho \quad (4.5)$$

$$\text{Απορρόφηση μετά την εμφύσηση επί ξηρό \% : } \frac{B-A}{A} \times 100 \quad (4.6)$$

όπου:

A: μάζα δοκιμίου επί ξηρό (g)

B: μάζα δοκιμίου πλήρως κορεσμένο επιφανειακά στεγνό (g)

D: φαινόμενη μάζα του δοκιμίου επί ξηρό (g)

g₁: πυκνότητα δοκιμίου επί ξηρό (Mg/m³)

g₂: φαινόμενη πυκνότητα (Mg/m³)

ρ : το ειδικό βάρος του νερού λαμβάνεται ίσο με 1000 kg/m³

4.3.3.2 Τριχοειδής αναρρόφηση

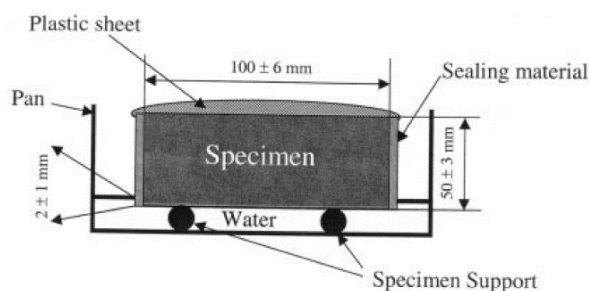
Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί το ποσοστό απορρόφησης νερού από το σκυροδέμα με τη μέτρηση της αύξησης της μάζας ενός ξηρού δοκιμίου σκυροδέματος όταν αυτό εμβαπτίζεται σε νερό, συναρτήσει του χρόνου απορρόφησής του. Η τριχοειδής αναρρόφηση συντελείται κατά την διάρκεια που το ξηρό δοκίμιο σκυροδέματος έρχεται σε επαφή με το νερό επιφανειακά και μόνον στην κάτω πλευρά του, δια μέσου των τριχοειδών πόρων του.

Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με τη χρήση δύο (2) κυλινδρικών δοκιμίων ανά σύνθεση διαστάσεων $\Phi 100$, πάχους 3 cm και ηλικίας τουλάχιστον 28 ημερών. Για τις ανάγκες του πειράματος, τα δοκίμια βρίσκονταν σε ξηρή κατάσταση ενώ συντηρούνταν στον ξηραντήρα μετά την διαδικασία που ακολουθήθηκε και περιγράφεται αναλυτικά στην **παράγραφο 4.3.3.1**.

Ακριβώς πριν την έναρξη του πειράματος τυλίγονταν με μονωτική ταινία στην περίμετρό τους (για την αποφυγή πλευρικής εισροής νερού κατά την μέτρηση) ενώ ζυγίζονταν πριν την τοποθέτηση της ταινίας καθώς και μετά την τοποθέτηση (W_0).

Με την έναρξη του πειράματος τα ξηρά δοκίμια, τυλιγμένα με την μονωτική ταινία, τοποθετούνταν πάνω σε μεταλλική σχάρα η οποία ήταν στερεωμένη μέσα σε λεκάνη με νερό, ώστε να διαβρέχονται οριακά (έως 5 mm) στην κάτω επιφάνειά τους μόνο. Ενώ συντελούνταν η απορρόφηση του νερού, τα δοκίμια απομακρύνονταν σε προκαθορισμένους χρόνους διαδοχικά από τη λεκάνη που ήταν εμβαπτισμένα, στραγγίζονταν επιφανειακά με ένα πανί, ζυγίζονταν και κατόπιν επανατοποθετούνταν στη λεκάνη με το νερό.

Αυτή η κυκλική διαδικασία από την έναρξη του πειράματος είχε διάρκεια 4 ώρες και 16' λεπτά. Στη συνέχεια τα δοκίμια παρέμεναν εμβαπτισμένα στη λεκάνη με το νερό για διάρκεια 24 ωρών από την έναρξη του πειράματος. Με το πέρας των 24 ωρών τα δοκίμια ζυγίζονταν ξανά με και χωρίς την μονωτική ταινία. Η δοκιμή έγινε με βάση την οδηγία RILEM TC 116 [30] και το πρότυπο ASTM C1585-04 [29]. Τα αποτελέσματα της δοκιμής εκφράζονται μέσω του συντελεστή τριχοειδούς αναρρόφησης S ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$).



Σχήμα 4.5 Κυλινδρικό δοκίμιο σκυροδέματος επάνω σε μεταλλική σχάρα



Εικόνα 4.9 Δοκίμια μέσα στον ξηραντήρα



Εικόνα 4.10 Δοκίμια επάνω σε μεταλλική σχάρα κατά την διάρκεια της δοκιμής τριχοειδούς αναρρόφησης



Εικόνα 4.11 Δοκίμια τυλιγμένα πλευρικά με μονωτική ταινία κατά την διάρκεια της δοκιμής τριχοειδούς αναρρόφησης

4.3.3.3 Δοκιμή επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων

Η δοκιμή της διείσδυσης χλωριόντων έγινε σύμφωνα με το πρότυπο EN 12390-18 [31]. Με τη δοκιμή αυτή πραγματοποιείται επιτάχυνση της διαδικασίας διείσδυσης των χλωριόντων στο σκυρόδεμα με τη βοήθεια ενός εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Ο ρυθμός διείσδυσης των χλωριόντων εξαρτάται από το πορώδες του σκυροδέματος, από τα συστατικά της σύνθεσης, και από την ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με τη χρήση έξι (6) κυλινδρικών δοκιμίων ανά σύνθεση, διαστάσεων Φ100 και πάχους 5 cm, ηλικίας 28 και 105 ημερών αντίστοιχα. Τα δοκίμια συντηρούνταν σε δεξαμενή νερού έως και την ημερομηνία διεξαγωγής των πειραμάτων. Πριν από την έναρξη του πειράματος, τρία (3) δοκίμια αντίστοιχης ηλικίας από κάθε σύνθεση, τοποθετούνταν για 48 ώρες σε διάλυμα υδροξειδίου του ασβεστίου ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

Κατά την έναρξη της δοκιμής μετρίεται το πάχος του κάθε δοκιμίου με το παχύμετρο σε τρία διαφορετικά σημεία. Εν συνέχεια τα δοκίμια τυλίγονται με μονωτική ταινία (Teflon) στην περίμετρο τους και τοποθετούνται, το καθένα ξεχωριστά με την επιφάνεια χύτευσης προς τα κάτω, μέσα σε κυλινδρικούς σωλήνες από καουτσούκ, ίσης εσωτερικής διαμέτρου με αυτή των δοκιμίων. Εξωτερικά των σωλήνων τοποθετούνται δύο μεταλλικοί σφιγκτήρες ώστε να εξασφαλιστεί ότι τα δοκίμια θα παραμείνουν στη θέση τους και ταυτόχρονα δεν θα υπάρχει διαρροή του διαλύματος της ανόδου, που βρίσκεται μέσα στους σωλήνες, στη λεκάνη με το διάλυμα της καθόδου.

Το διάλυμα της ανόδου παρασκευάζεται με 1200 ml απιονισμένο νερό και 14,4 gr υδροξείδιο του νατρίου ($\text{Na}(\text{OH})$). Σε κάθε σωλήνα αναλογούν 400 ml διαλύματος ανόδου. Το διάλυμα της καθόδου παρασκευάζεται με 10 lt νερό βρύσης και 1111,11 gr μαγειρικό αλάτι (NaCl).

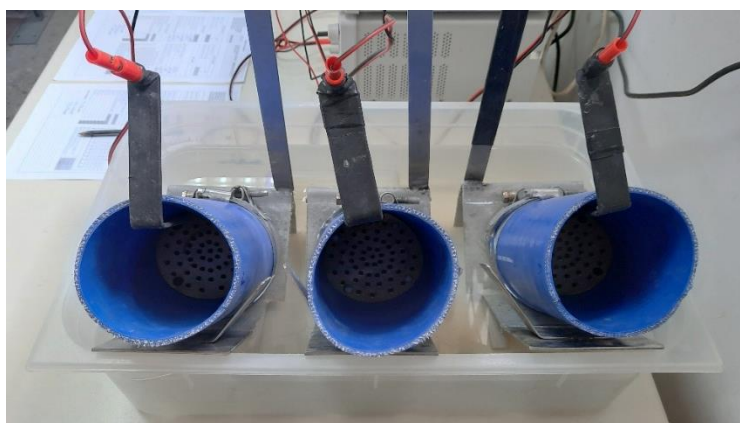
Μετά την παρασκευή των διαλυμάτων, οι σωλήνες με τα δοκίμια τοποθετούνται πάνω σε κατάλληλες μεταλλικές βάσεις που βρίσκονται μέσα στη λεκάνη με το διάλυμα της καθόδου (αλατόνερο). Σε κάθε σωλήνα τοποθετείται εσωτερικά μια μεταλλική βάση που εφάπτεται με το δοκίμιο, η οποία συνδέεται από το άκρο της με τα ηλεκτρόδια του τροφοδοτικού. Σε αυτό το στάδιο περιχύνεται το διάλυμα της ανόδου μέσα στους σωλήνες και αμέσως μετά γίνεται η συνδεσμολογία του κυκλώματος με τους πόλους των δύο τροφοδοτικών.

Με την έναρξη του πειράματος επιλέγεται μια δοκιμαστική τάση ίση με 30 V DC. Ακολουθώντας τις οδηγίες του προτύπου, γίνεται η επιλογή της διάρκειας της δοκιμής (συνήθως 24 ή 48 ώρες) και της διαφοράς δυναμικού (από 20 έως 30 V DC). Στην τεχνική αναφορά καταγράφονται:

- η ημερομηνία και η ακριβής ώρα έναρξης του πειράματος
- η δοκιμαστική τάση (V) και η δοκιμαστική ένταση (A) του ρεύματος
- η επιλεγόμενη αρχική τάση (V) και η αρχική ένταση (A) του ρεύματος
- η αρχική θερμοκρασία του διαλύματος ανόδου ($^{\circ}\text{C}$)

Με τη λήξη του πειράματος καταγράφονται αντίστοιχα:

- η ημερομηνία και η ακριβής ώρα λήξης του πειράματος
- η τελική τάση (V) και η τελική ένταση (A) του ρεύματος
- η τελική θερμοκρασία του διαλύματος της ανόδου ($^{\circ}\text{C}$)



Εικόνα 4.12 Κυλινδρικά δοκίμια τοποθετημένα μέσα σε σωλήνες από καουτσούκ κατά την διάρκεια της δοκιμής διείδυσης χλωριόντων



Εικόνα 4.13 Δεξιά οι σωλήνες με τα δοκίμια που βρίσκονται πάνω σε μεταλλικές βάσεις μέσα στην λεκάνη με το αλατόνερο, και αριστερά το τροφοδοτικό που συνδέεται με ηλεκτρόδια με τα άκρα των μεταλλικών βάσεων

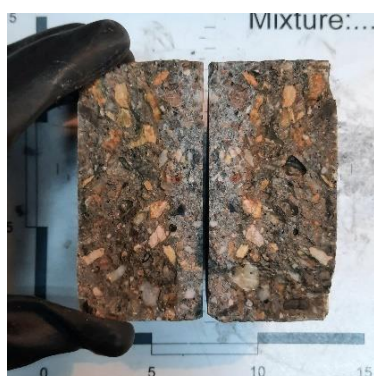
Εν συνεχεία τα δοκίμια αφαιρούνται από τους κυλινδρικούς σωλήνες, ξεπλένονται με νερό και υποβάλλονται σε δοκιμή διάρρηξης για να διαχωριστούν αξονικά, ενώ καταγράφεται το φορτίο θραύσης (kN).

Ακολουθεί η χρωματογραφική μέθοδος προσδιορισμού του βάθους διείδυσης των χλωριόντων. Τα δοκίμια τοποθετούνται υπό γωνία 45° και ψεκάζονται στην θραυσμένη επιφάνεια τους με διάλυμα νιτρικού αργύρου (AgNO_3) 0.1 M ώστε να γίνει εμφανές χρωματικά το βάθος διείδυσης των χλωριόντων. Μετά από περίπου 10' λεπτά κι έχοντας ολοκληρωθεί η χημική αντίδραση του νιτρικού αργύρου με τα ελεύθερα χλωριόντα, γίνεται η μέτρηση με χάρακα και η καταγραφή του βάθους διείδυσης των χλωριόντων, σε επτά σημεία που απέχουν 1 cm μεταξύ τους, ξεκινώντας από το κέντρο του άξονα του δοκιμίου μετρώντας προς τα επάνω και προς τα κάτω, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4.15**.

Συγκεντρώνοντας τα δεδομένα της μέτρησης, υπολογίζεται ο συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων D_{nssm} (m^2/s). Σύμφωνα με τους (Lim et al. 2011) [9] γίνεται η κατηγοριοποίηση της αντίστασης του σκυροδέματος στην διείσδυση των χλωριόντων με βάση την τιμή του συντελεστή διείσδυσης D_{nssm} ($\times 10^{-12} m^2/s$), όπως αναφέρεται στον Πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.6 Κατηγοριοποίηση της αντίστασης του σκυροδέματος στην διείσδυση των χλωριόντων με βάση την τιμή του συντελεστή διείσδυσης D_{nssm} ($\times 10^{-12} m^2/s$)

Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων D_{nssm} ($\times 10^{-12} m^2/s$)	Αντίσταση στην διείσδυση χλωριόντων	
>15	Χαμηλή	Low
10-15	Μέτρια	Moderate
5-10	Υψηλή	High
2,5-5	Πολύ Υψηλή	Very High
< 2,5	Εξαιρετικά Υψηλή	Extremely High



Εικόνα 4.14 Μέτρηση με χάρακα και καταγραφή του βάθους διείσδυσης χλωριόντων στο δοκίμιο σκυροδέματος



Εικόνα 4.15 Μέτρηση με χάρακα και καταγραφή του βάθους διείσδυσης χλωριόντων στο δοκίμιο σκυροδέματος



Εικόνα 4.16 Δοκίμια μετά την διάρρηξή τους και τον ψεκασμό τους με διάλυμα νιτρικού αργύρου (AgNO_3) 0.1 M κατά την διαδικασία της χρωματογραφικής μεθόδου προσδιορισμού του βάθους διείσδυσης χλωριόντων. Η ανοιχτόχρωμη επιφάνεια απεικονίζει το βάθος διείσδυσης.

5 Αποτελέσματα

5.1 Ιδιότητες νοπού σκυροδέματος

Αμέσως μετά τη φάση της παρασκευής των μειγμάτων στον αναδευτήρα, ακολουθούν οι δοκιμές του νοπού σκυροδέματος οι οποίες είχαν στόχο τον χαρακτηρισμό των μειγμάτων ως προς την κατηγορία κάθισης και τη μέτρηση της πυκνότητας και της περιεκτικότητας σε αέρα της κάθε σύνθεσης.

Παρακάτω στον **Πίνακα 5.1** παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών του νοπού σκυροδέματος ανά σύνθεση όπως και η ποσότητα του ρευστοποιητή που καταναλώθηκε εκφρασμένη ως % κ.β. συνδετικής κονιάς (τσιμέντου και ΜΚ που προστέθηκε).

Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα δοκιμών σε νοπή φάση ανά σύνθεση

Κωδικός Σύνθεσης	Ρευστ/τής (%)	Κάθιση (mm)	Πυκνότητα (Kg/m ³)	Περιεκτικότητα σε αέρα (%)
REF	0,60	210	2408	1,5
REC30	0,79	200	2386	2,3
REC30MK10	1,02	190	2355	3,6
REC30MK10SR	1,01	185	2364	3,0
REC60	0,81	140	2362	3,6
REC60MK10	1,28	180	2284	6,0
REC60MK10SR	1,04	175	2298	5,4
REC90	0,80	180	2309	5,2
REC90MK10	1,38	90	2242	8,0
REC90MK10SR	1,22	155	2262	7,0

Για να είναι το μείγμα του σκυροδέματος αντλήσιμο, η επιθυμητή κάθιση είναι κατά κανόνα από 100 mm έως 150 mm (Mehta et al., 2009) [10], δηλαδή κατηγορίας S3 κατά EN 206 (**Πίνακας 4.5**) [24].

Γενικά όλες οι συνθέσεις εντάσσονται στην κατηγορία S3-S4 και οι μετρήσεις τους παρουσίασαν ομοιομορφία ως προς τις τιμές της κάθισης ανά ομάδα συνθέσεων.

Η σύνθεση αναφοράς REF παρουσίασε την μεγαλύτερη κάθιση στα 210 mm (ημίρρευστο μείγμα) και η σύνθεση REC90MK10, την μικρότερη παρά την μεγάλη κατανάλωση ρευστοποιητή. Η αντικατάσταση του κλάσματος γαρμπιλιού από ανακυκλωμένο φαίνεται να επηρεάζει αρνητικά την κάθιση, καθώς με την ίδια κατανάλωση ρευστοποιητή (~0,80% κ.β. τσιμέντου), καταγράφεται μείωση της κάθισης στις συνθέσεις REC30-60-90. Η προσθήκη ΜΚ επίσης επηρεάζει αρνητικά την εργασιμότητα του μείγματος, όπου καταγράφεται αντίστοιχα αύξηση της ποσότητας ρευστοποιητή προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή κατηγορία κάθισης.

Αναφορικά με την πυκνότητα του μείγματος, όπως είναι αναμενόμενο, η αντικατάσταση του κλάσματος γαρμπιλιού από ανακυκλωμένο συντελεί στην μείωση της πυκνότητας του σκυροδέματος καθώς και σε αυξημένη περιεκτικότητα εγκλωβισμένου

αέρα στο μείγμα (**Πίνακας 5.1**). Η προσθήκη MK επίσης μειώνει την πυκνότητα του μείγματος καθώς αντικαθιστά συστατικά όπως το τσιμέντο και η ασβεστολιθική άμμος.

Όσον αφορά τον εγκλωβισμένο αέρα, η τιμή του εξαρτάται από το ποσοστό προσθήκης του ρευστοποιητή. Κατά βάση είναι αυξημένη όσο αυξάνεται η χρήση ρευστοποιητή λόγω του μηχανισμού δράσης των ρευστοποιητών. Αρνητική επίδραση καταγράφεται και από την αντικατάσταση του κλάσματος γαρμπιλιού από ανακυκλωμένο, καθώς παρατηρείται αύξηση της τιμής του στις συνθέσεις REC30-60-90, παρά τη σταθερή ποσότητα ρευστοποιητή.

5.2 Αντοχή

Η θλιπτική αντοχή είναι βασική ιδιότητα του σκληρυμένου σκυροδέματος και αποτελεί γενικό δείκτη ποιότητας. Υπολογίζεται με την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης που αναφέρεται στην **Παράγραφο 4.3.2**. Παρακάτω παρατίθεται ο **Πίνακας 5.2** με τα αποτελέσματα της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια ηλικίας 28 και 105 ημερών αντίστοιχα ανά σύνθεση. Τα αποτελέσματα αυτά προέκυψαν ως μέσος όρος των θλιπτικών αντοχών 3 δοκιμίων των επί μέρους συνθέσεων.

Πίνακας 5.2 Μέσος όρος θλιπτικών αντοχών (MPa) για κάθε σύνθεση στις 28 και στις 105 ημέρες αντίστοιχα

Κωδικός Σύνθεσης	Θλιπτική αντοχή 28 ημερών (MPa)		Θλιπτική αντοχή 105 ημερών (MPa)	
	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση
REF	63,50	1,26	69,88	0,76
REC30	62,60	0,52	67,96	0,99
REC30MK10	69,09	1,09	79,38	0,88
REC30MK10SR	75,03	1,02	77,47	0,19
REC60	57,92	2,07	65,12	1,03
REC60MK10	67,46	0,76	67,53	1,72
REC60MK10SR	63,44	3,88	66,72	2,49
REC90	55,17	1,93	60,12	1,30
REC90MK10	63,25	3,55	65,98	1,25
REC90MK10SR	69,05	2,18	67,00	2,27

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η αντικατάσταση του κλάσματος γαρμπιλιού από ανακυκλωμένο φαίνεται να επηρεάζει αρνητικά την αντοχή στις συνθέσεις REC60-90, συγκριτικά με τη σύνθεση αναφοράς REF. Αντίθετα παρατηρείται ότι μέχρι ποσοστό αντικατάστασης 30% κ.β. (σύνθεση REC30) η τιμή της αντοχής διατηρείται ίδια με εκείνη της σύνθεσης αναφοράς. Η προσθήκη MK ως αντικατάσταση του τσιμέντου (σε ποσοστό 10% κ.β.) αύξησε την θλιπτική αντοχή κατά ~8% στη σύνθεση REC30MK10 συγκριτικά με την REC30, ενώ αντίστοιχα η αντικατάσταση του κλάσματος της άμμου από MK (σε ποσοστό 10% κ.β.) αύξησε την αντοχή ~15% στη σύνθεση REC30MK10SR. Όπως είναι εμφανές η αντικατάσταση του κλάσματος γαρμπιλιού από ανακυκλωμένο σε ποσοστό 30% δεν επηρέασε αρνητικά την αντοχή του σκυροδέματος. Μάλιστα, μετά την προσθήκη MK και την αντικατάσταση της άμμου στην ίδια ομάδα συνθέσεων, καταγράφηκε περαιτέρω αύξηση της αντοχής. Στην αύξηση συνετέλεσε, πέρα από το

αυξημένο ποσοστό MK στο μείγμα, και το χαμηλότερο ποσοστό περιεκτικότητας σε αέρα στις συνθέσεις της ομάδας REC30 (**Πίνακας 5.1**), όπως και το ανοικτό πορώδες, το οποίο όπως θα φανεί στη συνέχεια, εμφανίζονται ελαφρώς βελτιωμένο σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς (REF).

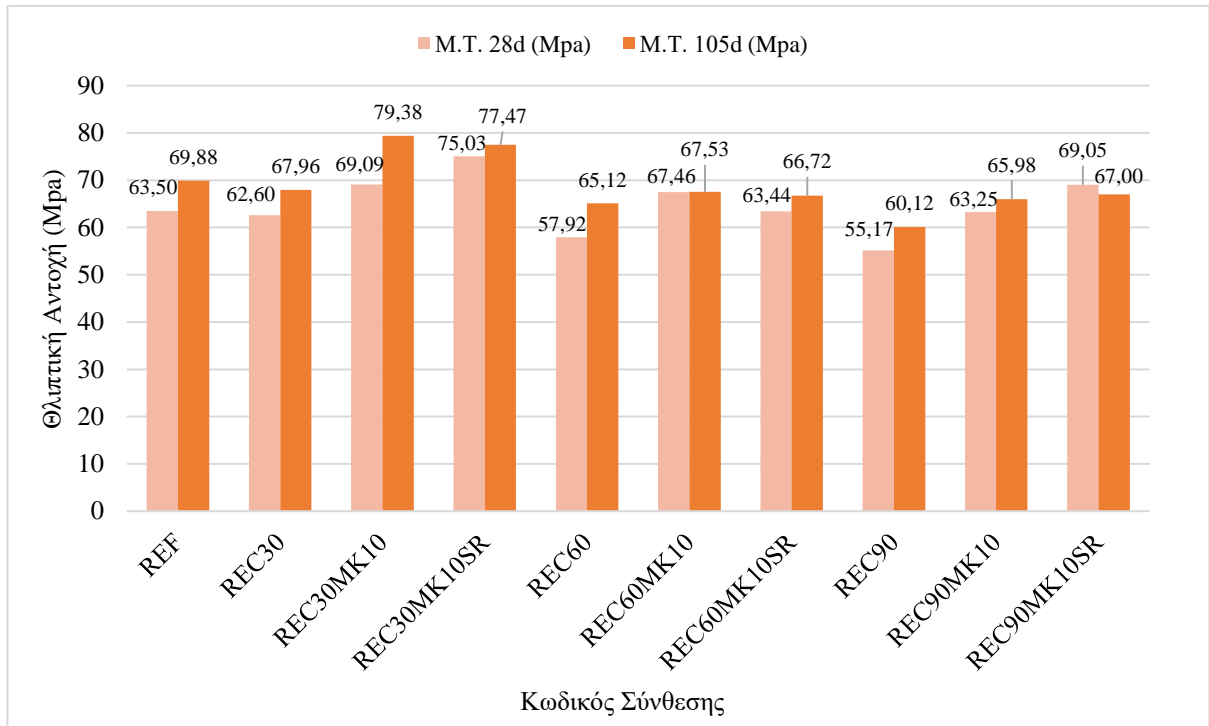
Συνεπώς, όσο καλύτερη η διαβάθμιση των αδρανών τόσο καλύτερη προκύπτει η κατανομή του μεγέθους των πόρων (γεμίζουν τα κενά). Ο ρόλος του MK είναι εξίσου σημαντικός, καθώς αυξάνει τις θετικές ιδιότητες της πλήρως ενυδατωμένης πάστας τσιμέντου στη δομή της φάσης (C-S-H) και συμβάλλει στην ενίσχυση της διεπιφανειακής μεταβατικής ζώνης μεταξύ της τσιμεντόπαστας και των αδρανών, άρα στον πυρήνα της αντοχής του μείγματος.

Στις συνθέσεις της ομάδας REC60 η προσθήκη MK ως αντικατάσταση του τσιμέντου (σε ποσοστό 10% κ.β.) αύξησε την αντοχή ~17% ενώ δεν συνέβη το ίδιο με την αντικατάσταση της άμμου, όπως αναμενόταν. Η υψηλή περιεκτικότητα σε αέρα στις δύο συνθέσεις της ομάδας αυτής, κρίνεται ως βασικός παράγοντας μείωσης της αντοχής.

Όμοια αποτελέσματα καταγράφηκαν στην ομάδα REC90, όπου παρατηρήθηκε εμφανής μείωση της αντοχής με την περαιτέρω αντικατάσταση κλάσματος του γαρμπιλιού από ανακυκλωμένο. Εδώ η προσθήκη MK αύξησε την αντοχή ~9% στη σύνθεση REC90MK10, παρά το γεγονός ότι υπήρχε υψηλό ποσοστό εγκλωβισμένου αέρα. Η αντικατάσταση της άμμου από MK στη τελευταία σύνθεση συνέβαλε θετικά στην αύξηση της αντοχής του μίγματος ~20%.

Όπως αναμενόταν, σε όλες τις συνθέσεις παρατηρήθηκε γενικά αύξηση της αντοχής με το πέρας των 105 ημερών.

Στο **Σχήμα 5.1** αναπαρίσταται γραφικά η μέση τιμή της αντοχής για τις συνθέσεις 28 και 105 ημερών αντίστοιχα. Όπως καταγράφεται στο σχήμα, η θλιπτική αντοχή δεν επηρεάζεται σημαντικά από την αντικατάσταση ασβεστολιθικού γαρμπιλιού από ανακυκλωμένο μέχρι το ποσοστό αντικατάστασης 30% και γενικά βελτιώνεται με την προσθήκη MK. Αντιθέτως για ποσοστά αντικατάστασης ασβεστολιθικού γαρμπιλιού από ανακυκλωμένο 60 ή 90%, δεν υπάρχει σαφής εικόνα της επίδρασης αντικατάστασης. Επίσης καθίσταται αβέβαιη η θετική επίδραση της προσθήκης MK.



Σχήμα 5.1 Μέση τιμή θλιπτικής αντοχής των συνθέσεων στις 28 και στις 105 ημέρες αντίστοιχα

5.3 Ανθεκτικότητα

5.3.1 Υδατοαπορροφητικότητα – Ανοικτό Πορώδες OP%

Το σκληρυμένο σκυρόδεμα μικροσκοπικά, είναι ουσιαστικά κόκκοι αδρανών και τσιμεντόπαστα. Τα κενά αντιπροσωπεύουν τον χώρο εκείνο που δεν καταλαμβάνεται από τα στερεά προϊόντα της τσιμεντόπαστας, μετά την διαδικασία ενυδάτωσης του τσιμέντου. Ο συνολικός όγκος των κενών της ενυδατωμένης τσιμεντόπαστας, ορίζεται ως ανοικτό πορώδες (open porosity) OP%.

Ο συνολικός όγκος των κενών της ενυδατωμένης τσιμεντόπαστας, προσδιορίζεται με τη δοκιμή της υδατοαπορροφητικότητας όπως αυτή περιγράφεται αναλυτικά στην **Παράγραφο 4.3.3.1**. Τα αποτελέσματα της δοκιμής εκφράζονται μέσω του ανοικτού πορώδους OP%, και παρατίθενται στον **Πίνακα 5.3**. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζεται και η τυπική απόκλιση των μετρήσεων (%). Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, οι τιμές παρουσιάζουν χαμηλή σχετικά διακύμανση με εξαίρεση στις συνθέσεις REC60, REC90MK10SR και REC30MK10SR.

Πίνακας 5.3 Αποτελέσματα δοκιμής ανοικτού πορώδους OP% για κάθε σύνθεση στις 28 ημέρες (Μ.Ο. 2 δοκιμών ανά σύνθεση)

Κωδικός Σύνθεσης	Ανοικτό πορώδες OP (%)	Τυπική απόκλιση (%)
REF ¹	14,51	0,54
REC30	13,62	0,04
REC30MK10	13,94	0,52
REC30MK10SR	15,13	0,73
REC60	14,54	3,50
REC60MK10	13,89	0,06
REC60MK10SR	15,49	0,03
REC90	13,89	0,09
REC90MK10	12,80	0,06
REC90MK10SR ²	13,12	0,86

Σε ένα συμβατικό σκυρόδεμα αναμένονται τιμές πορώδους της τάξης του 12-14%. Η αντικατάσταση του κλάσματος γαρμπιλιού από ανακυκλωμένο στις επιμέρους συνθέσεις, δεν επηρέασε αρνητικά σε γενικές γραμμές την τιμή του πορώδους συγκριτικά

¹ Η σύνθεση αναφοράς REF έχει υποεκτιμηθεί καθώς δεν έχει συμπληρώσει 28 ημέρες κατά την έναρξη της δοκιμής (27 ημερών).

² Ομοίως για την REC30MK10SR (26 ημερών).

με την σύνθεση αναφοράς (REF). Τα αποτελέσματα φαίνονται γραφικά και στο **Σχήμα 5.2**.

Συγκεκριμένα στην ομάδα συνθέσεων REC30, μετρήθηκε πιο μικρό πορώδες από την REF όπως και μετά την προσθήκη MK ως αντικατάσταση του τσιμέντου. Όμως μετά την αντικατάσταση του κλάσματος της άμμου από MK (κ.β. σε ποσοστό 10%), το πορώδες αυξήθηκε. Φαίνεται ότι η αντικατάσταση άμμου από MK, διαταράσσει σημαντικά την κοκκομετρική καμπύλη των αδρανών με αποτέλεσμα να αυξάνεται το πορώδες.

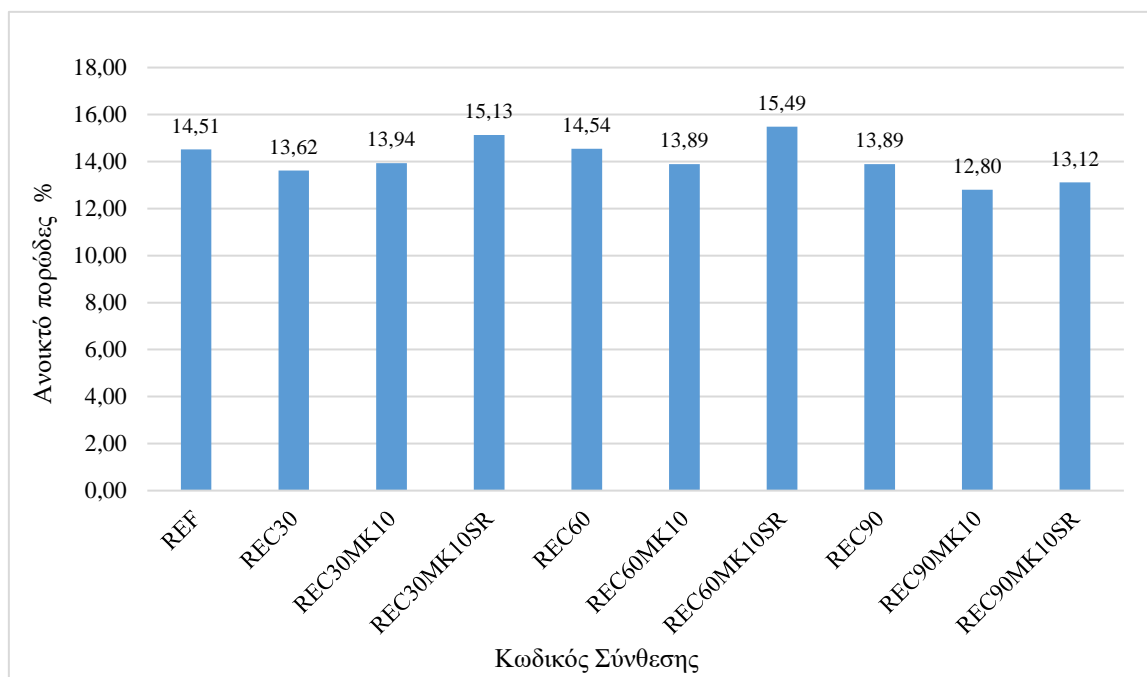
Η περαιτέρω αύξηση του ανακυκλωμένου γαρμπιλιού στις συνθέσεις της ομάδας REC60, είχε αρχικά αρνητική επίδραση στην τιμή του πορώδους. Πάραυτα μετά την προσθήκη MK στην ίδια ομάδα, το αποτέλεσμα ήταν θετικό. Για τη σύνθεση REC60MK10SR, η επίδραση της αντικατάστασης του κλάσματος της άμμου από MK λειτούργησε αρνητικά στην αύξηση του πορώδους όπως έγινε αντίστοιχα και στην ομάδα REC30, για τους λόγους που αναφέρθηκαν ήδη.

Αντιθέτως στις επιμέρους συνθέσεις της ομάδα REC90, η αντικατάσταση του κλάσματος γαρμπιλιού από ανακυκλωμένο αδρανές είχε μόνο θετικό αποτέλεσμα στην τιμή του πορώδους.

Η σύνθεση REC90MK10 εξαιτίας της διαβάθμισης της κοκκομετρίας (με μικρότερα αδρανή) παρουσίασε την μικρότερη τιμή πορώδους συγκριτικά με τις υπόλοιπες συνθέσεις, έχοντας συμπεριφορά συμβατικού σκυροδέματος ~12%. Γενικά η προσθήκη μετακαολίνη επιδρά θετικά, καθώς εξαιτίας της ποζολανικότητάς του, δημιουργείται μια πιο συμπαγής τσιμεντόπαστα με μικρότερη διαπερατότητα.

Συνοψίζοντας, δεν παρατηρείται σημαντική επιβάρυνση του πορώδους με την αντικατάσταση αδρανών από ανακυκλωμένα αδρανή, καθώς οι τιμές του πορώδους αναλογιζόμενοι και τις τιμές της τυπικής απόκλισης, είναι παρόμοιες. Παρόλα αυτά μπορεί να ειπωθεί ότι η θετική επίδραση της προσθήκης MK προς αντικατάσταση τσιμέντου γίνεται αισθητή μόνο για ποσοστά υποκατάστασης αδρανών μεγαλύτερα από 60%.

Αντιθέτως, όταν αντικαθίσταται άμμος από MK, καταγράφεται θετική επίδραση μόνο για το μεγαλύτερο ποσοστό υποκατάστασης αδρανών από ανακυκλωμένα αδρανή και συγκεκριμένα στη σύνθεση REC90MK10SR.



Σχήμα 5.2 Υδατοαπορροφητικότητα – Ανοικτό Πορώδες OP% για κάθε σύνθεση στις 28 ημέρες

5.3.2 Τριχοειδής αναρρόφηση

Ο συνολικός όγκος των τριχοειδών κενών της ενυδατωμένης τσιμεντόπαστας, προσδιορίζεται με τη δοκιμή τριχοειδούς αναρρόφησης όπως αυτή περιγράφεται αναλυτικά στην **Παράγραφο 4.3.3.2**. Ο ρυθμός τριχοειδούς αναρρόφησης νερού είναι ένας βασικός δείκτης της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος, καθώς αποκαλύπτει πόσο εύκολα μπορούν να διεισδύσουν χημικές ουσίες που περιέχουν υγρασία στο σώμα του σκυροδέματος, μέσω της επιφάνειάς του. Δείχνει επίσης την ικανότητα του σκυροδέματος να απορροφά νερό μέσω των τριχοειδών πόρων του.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής εκφράζονται μέσω του συντελεστή τριχοειδούς αναρρόφησης S ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$), και παρατίθενται στον **Πίνακα 5.4** για δοκίμια ηλικίας τουλάχιστον 28 ημερών. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζεται και η τυπική απόκλιση των μετρήσεων και ο συντελεστής διακύμανσης (%). Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, οι τιμές παρουσιάζουν χαμηλή σχετικά διακύμανση με εξαίρεση στις συνθέσεις REC60MK10, REC60MK10SR και REC90MK10SR.

Πίνακας 5.4 Αποτελέσματα δοκιμής τριχοειδούς αναρρόφησης S ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$) για κάθε σύνθεση στις 28 ημέρες (Μ.Ο. δύο δοκιμίων ανά σύνθεση)

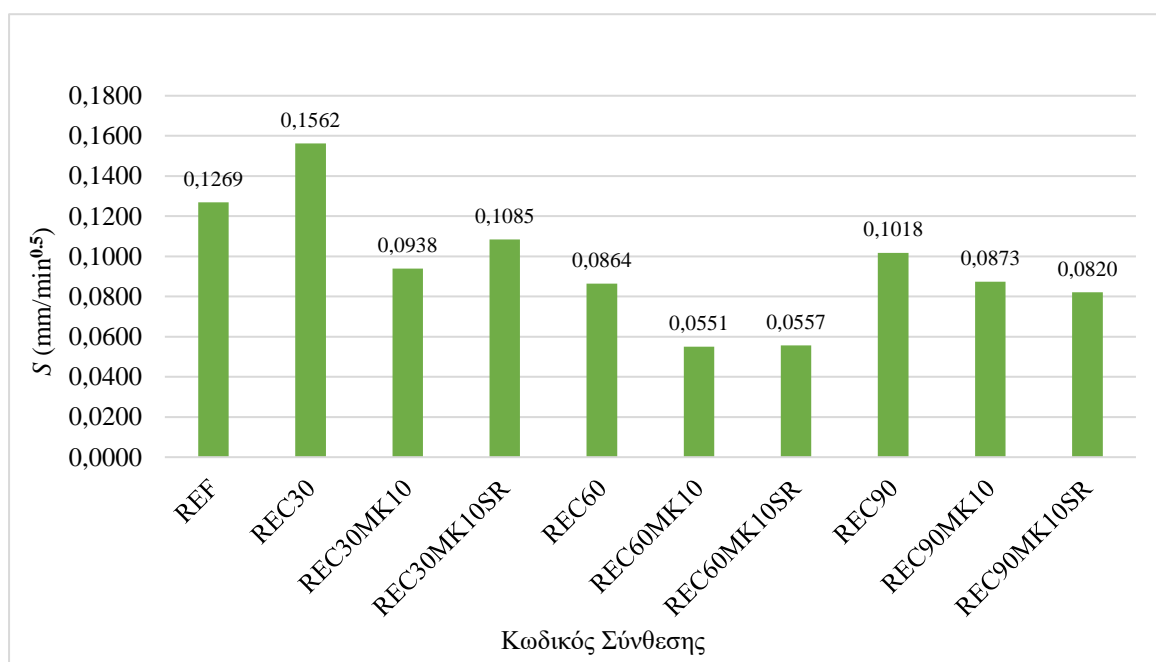
Κωδικός Σύνθεσης	Τριχοειδής αναρρόφηση S ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$)	Τυπική απόκλιση ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$)	CoV (%)
REF	0,1269	0,0086	7
REC30	0,1562	0,0029	2

REC30MK10	0,0938	0,0059	6
REC30MK10SR	0,1085	0,0055	5
REC60	0,0864	0,0007	1
REC60MK10	0,0551	0,0098	18
REC60MK10SR	0,0557	0,0075	13
REC90	0,1018	0,0018	2
REC90MK10	0,0873	0,0041	5
REC90MK10SR	0,0820	0,0086	10

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται γραφικά στο **Σχήμα 5.3**. Όπως φαίνεται και από το σχήμα η υποκατάσταση αδρανών από ανακυκλωμένα αδρανή γενικά δεν φαίνεται να επηρεάζει αρνητικά τον συντελεστή τριχοειδούς αναρρόφησης, με εξαίρεση την σύνθεση με ποσοστό υποκατάστασης 30% κ.β..

Εξάλλου όπως φαίνεται από το **Σχήμα 5.3**, η κοκκομετρική διαβάθμιση των μειγμάτων ανά ομάδα σύνθεσης, επηρεάζεται σημαντικά στα μεγάλα μεγέθη σωματιδίων και συνεπώς δεν αναμένεται να επιβαρυνθεί το τριχοειδές πορώδες το οποίο αναφέρεται στο πορώδες κυρίως της πάστας.

Έτσι όπως αναμένεται, η προσθήκη MK είχε θετική επίδραση κατά την υποκατάσταση αδρανών από ανακυκλωμένα αδρανή. Βέβαια σε υψηλά ποσοστά υποκατάστασης η αντιστάθμιση ήταν μικρότερη. Φαίνεται ότι, η ποζολανική δράση του MK βελτιώνει τη δομή της τσιμεντόπαστας και ως εκ τούτου ο συντελεστής τριχοειδούς αναρρόφησης εμφανίζει συνεπή βελτίωση. Μάλιστα είναι γνωστό ότι η ποζολανική δραστηριότητα του MK εκδηλώνεται σχετικά άμεσα, δηλαδή και σε ηλικία μικρότερη των 28 ημερών.



Σχήμα 5.3 Συντελεστής τριχοειδούς αναρρόφησης S (mm/min^{0.5}) για κάθε σύνθεση στις 28 ημέρες

5.3.3 Δοκιμή επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων

Τα τελικά αποτελέσματα της δοκιμής επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων για όλες τις συνθέσεις και για ηλικία δοκιμίων 28 και 105 ημερών αντίστοιχα, εκφράζονται με τον συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων D_{nssm} (m^2/s), και δίνονται στον Πίνακα 5.5. Η αντίσταση στην διείσδυση χλωριόντων σχετίζεται στενά με την ανθεκτικότητα της τσιμεντόπαστας, με το μέγεθος των πόρων όσο και με το ανοικτό πορώδες του σκυροδέματος. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δοκιμών με βάση τις τιμές του συντελεστή που δίνονται στον Πίνακα 4.6, γίνεται η κατηγοριοποίηση των συνθέσεων ως προς την αντίστασή τους στην διείσδυση χλωριόντων.

Πίνακας 5.5 Αποτελέσματα δοκιμής επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων για κάθε σύνθεση στις 28 και στις 105 ημέρες αντίστοιχα

Κωδικός Σύνθεσης	Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ m^2/s)	
	28 ημέρες	105 ημέρες
REF	16,71	14,07
REC30	16,33	13,29
REC30MK10	6,06	5,13
REC30MK10SR	7,52	4,48
REC60	16,03	13,66
REC60MK10	3,69	4,18
REC60MK10SR	4,77	4,54
REC90	15,64	15,53
REC90MK10	2,75	1,99
REC90MK10SR	3,24	2,27

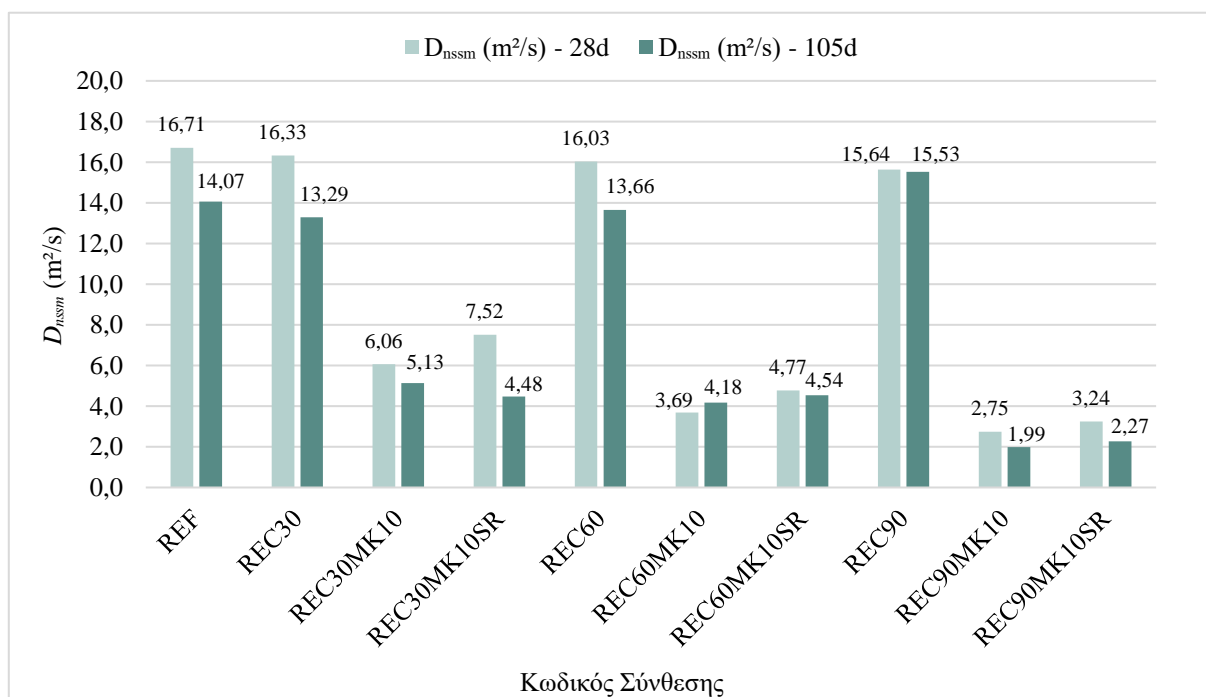
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα σε όλες τις συνθέσεις που έγινε μερική αντικατάσταση του τσιμέντου με MK, βελτιώθηκε αισθητά η αντίσταση του σκυροδέματος στην διείσδυση χλωριόντων συγκριτικά με τη σύνθεση αναφοράς REF, όπως και με τις συνθέσεις REC 30-60-90, οι οποίες κινήθηκαν σε ανάλογες τιμές με την σύνθεση REF παρά την υποκατάσταση του γαρμπιλιού από ανακυκλωμένα αδρανή. Συγκεκριμένα η σύνθεση REC90MK10 κατηγοριοποιείται ως πολύ υψηλής αντίστασης για ηλικία 28 ημερών και ως εξαιρετικά υψηλής αντίστασης για ηλικία 105 ημερών.

Η μερική αντικατάσταση της άμμου από MK στις επιμέρους συνθέσεις παρουσίασε αντίστοιχα υψηλή έως πολύ υψηλή αντίσταση στην διείσδυση χλωριόντων, ενώ για την σύνθεση REC90MK10SR μετρήθηκε πολύ χαμηλός συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων στις 105 ημέρες και η σύνθεση κατηγοριοποιείται ως εξαιρετικά υψηλής αντίστασης.

Γενικότερα η προσθήκη MK, συνέβαλε θετικά κατά την υποκατάσταση γαρμπιλιού από ανακυκλωμένα αδρανή στις συνθέσεις. Αξιοσημείωτο είναι ότι επίδραση του MK

ήταν αναλογικά μεγαλύτερη όσο αυξάνονταν παράλληλα και τα ποσοστά υποκατάστασης.

Συμπερασματικά, η μερική αντικατάσταση του τσιμέντου κι εναλλάξ της άμμου μειώνει το συνολικό πορώδες ενώ η ποζολανική δράση του MK βελτιώνει την μικροδομή της τσιμεντόπαστας, και ως εκ τούτου ενισχύεται η αντίσταση στην διείσδυση χλωριόντων στο σώμα του σκυροδέματος. Τέλος, τα δοκίμια ηλικίας 105 ημερών σε όλες τις συνθέσεις παρουσίασαν υψηλότερη αντίσταση στην διείσδυση χλωριόντων από εκείνα των 28 ημερών. Τα αποτελέσματα φαίνονται γραφικά και στο **Σχήμα 5.4**.



Σχήμα 5.4 Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ m²/s) για κάθε σύνθεση στις 28 και στις 105 ημέρες αντίστοιχα

5.4 Οικονομική αποτίμηση των συνθέσεων

Το μειωμένο κόστος των ανακυκλωμένων αδρανών συγκριτικά με εκείνο των φυσικών ασβεστολιθικών αδρανών συμβάλλει θετικά στην παραγωγή σκυροδέματος με ανακυκλωμένα αδρανή. Ενδεικτικά στον **Πίνακα 5.6** που ακολουθεί, παρουσιάζεται το κόστος των επιμέρους υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις συνθέσεις σκυροδέματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Πίνακας 5.6 Αναλυτικά το κόστος των επιμέρους υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις συνθέσεις

ΥΛΙΚΑ	ΚΟΣΤΟΣ €/t
Τσιμέντο τύπου CEM I	110
Ασβεστολιθικά αδρανή υλικά	9,5 (υλικό & μεταφορά)
Ανακυκλωμένα αδρανή υλικά	7,0 (υλικό & μεταφορά)
Χημικό πρόσμικτο (υπερρυστοποιητής)	0,8 - 0,9
Μετακαολίνη	600

6 Συμπεράσματα

Συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα που εξάγονται από την παρούσα εργασία αναφορικά με την αντικατάσταση του ασβεστολιθικού γαρμπιλιού από ανακυκλωμένα αδρανή και την προσθήκη MK στις ιδιότητες νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος.

Στο νωπό σκυρόδεμα:

- Η αντικατάσταση του κλάσματος γαρμπιλιού από ανακυκλωμένο φαίνεται να επηρεάζει αρνητικά την κάθιση στις συνθέσεις REC30-60-90.
- Η προσθήκη MK στις συνθέσεις REC30-60-90, επηρεάζει αρνητικά την εργασιμότητα του μείγματος, όπου καταγράφεται αντίστοιχα αύξηση της ποσότητας ρευστοποιητή ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή κατηγορία κάθισης.
- Όσον αφορά τον εγκλωβισμό αέρα, η τιμή του εξαρτάται από το ποσοστό προσθήκης του ρευστοποιητή. Συνεπώς οι συνθέσεις REC60-90 με MK είχαν την μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε αέρα.
- Όσο μεγαλύτερο το ποσοστό αντικατάστασης του κλάσματος γαρμπιλιού από ανακυκλωμένο τόσο μειωμένη η πυκνότητα των μειγμάτων. Παρατηρήθηκε ακόμη μεγαλύτερη μείωση της πυκνότητας με την προσθήκη MK στις συνθέσεις REC30-60-90.

Στο σκληρυμένο σκυρόδεμα:

- Αντοχή Θλίψης: Η θλιπτική αντοχή δεν επηρεάζεται σημαντικά από την αντικατάσταση ασβεστολιθικού γαρμπιλιού από ανακυκλωμένο μέχρι το ποσοστό αντικατάστασης 30%, ενώ γενικά η προσθήκη MK βελτιώνει το πορώδες του υλικού, το οποίο είναι καθοριστικός παράγοντας της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος. Αντιθέτως για ποσοστά αντικατάστασης ασβεστολιθικού γαρμπιλιού 60 ή 90% από ανακυκλωμένο, δεν υπάρχει σαφής εικόνα της επίδρασης της αντικατάστασης. Επίσης καθίσταται αβέβαιη η θετική επίδραση της προσθήκης MK. Ωστόσο, η αντοχή θλίψης βελτιώθηκε σε όλες τις συνθέσεις στην ηλικία των 105 ημερών.
- Ανοικτό Πορώδες OP%: Σε ένα συμβατικό σκυρόδεμα αναμένονται τιμές πορώδους της τάξης του 12-14%. Η αντικατάσταση του κλάσματος γαρμπιλιού από ανακυκλωμένο στις επιμέρους συνθέσεις, δεν επηρέασε αρνητικά σε γενικές γραμμές την τιμή του πορώδους συγκριτικά με την σύνθεση αναφοράς (REF). Η θετική επίδραση της προσθήκης MK προς αντικατάσταση τσιμέντου γίνεται αισθητή μόνο για ποσοστά υποκατάστασης αδρανών μεγαλύτερα από 60%. Αντιθέτως, όταν αντικαθίσταται άμμος από MK, διαταράσσει σημαντικά

την κοκκομετρική καμπύλη των αδρανών με αποτέλεσμα να αυξάνεται το πορώδες. Η σύνθεση REC90MK10 εξαιτίας της διαβάθμισης της κοκκομετρίας (με μικρότερα αδρανή) παρουσίασε την μικρότερη τιμή πορώδους συγκριτικά με τις υπόλοιπες συνθέσεις, έχοντας συμπεριφορά συμβατικού σκυροδέματος ~12%.

- Τριχοειδής Αναρρόφηση: Η αντικατάσταση του κλάσματος γαρμπιλιού από ανακυκλωμένο γενικά δεν φαίνεται να επηρεάζει αρνητικά τον συντελεστή τριχοειδούς αναρρόφησης (S), με εξαίρεση την σύνθεση REC30. Στις συνθέσεις με μεγαλύτερο ποσοστό αντικατάστασης γαρμπιλιού από ανακυκλωμένο, η προσθήκη MK είχε θετική επίδραση στο πορώδες της τσιμεντόπαστας. Οι συνθέσεις με χαμηλό (S) είχαν αντίστοιχα καλή θλιπτική αντοχή. Η μείωση της διαπερατότητας της τσιμεντόπαστας σχετίζεται με το πορώδες του υλικού το οποίο είναι καθοριστικός παράγοντας της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος.
- Διείσδυση Χλωριόντων: Η εναλλάξ αντικατάσταση τσιμέντου και άμμου από μετακαολίνη επιδρά θετικά σε όλες τις συνθέσεις, καθώς εξαιτίας της ποζολανικότητάς του, δημιουργείται μια πιο συμπαγής τσιμεντόπαστα με μικρότερη διαπερατότητα χλωριόντων στο σώμα του σκυροδέματος. Η σύνθεση REC90MK10 εξαιτίας της διαβάθμισης της κοκκομετρίας (με μικρότερα αδρανή) παρουσίασε την μεγαλύτερη αντίσταση στη διείσδυση χλωριόντων και ακολούθως η σύνθεση REC90MK10SR. Η συμβολή του MK στο σκυρόδεμα ήταν αναλογικά μεγαλύτερη όσο αυξάνονταν παράλληλα και τα ποσοστά υποκατάστασης ασβεστολιθικού γαρμπιλιού από ανακυκλωμένο. Η αντίσταση στην διείσδυση χλωριόντων ήταν υψηλότερη σε όλες τις συνθέσεις στην ηλικία των 105 ημερών.

Βιβλιογραφία

1. Abdellatief, Mohamed, Saeed M. AL-Tam, Walid E. Elemam, Hani Alanazi, Gamal M. Elgendy, and Ahmed M. Tahwia. 2023. "Development of Ultra-High-Performance Concrete with Low Environmental Impact Integrated with Metakaolin and Industrial Wastes." *Case Studies in Construction Materials* 18 (July). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01724>.
2. Badogiannis, E., and S. Tsivilis. 2009. "Exploitation of Poor Greek Kaolins: Durability of Metakaolin Concrete." *Cement and Concrete Composites* 31 (2): 128–33. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.11.001>.
3. Brito, Jorge de, and Nabajyoti Saikia. 2013. "Recycled Aggregate in Concrete: Use of Industrial, Construction and Demolition Waste." *Green Energy and Technology* 54. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4540-0>.
4. Cordoba, Gisela, Ricarda Sposito, Mathias Köberl, Silvina Zito, Nancy Beuntner, Alejandra Tironi, Karl Christian Thienel, and Edgardo F. Irassar. 2022. "Chloride Migration and Long-Term Natural Carbonation on Concretes with Calcined Clays: A Study of Calcined Clays in Argentina." *Case Studies in Construction Materials* 17 (December). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01190>.
5. Eurostat. January 2023. "Waste Statistics"; Available from: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics/el&oldid=80519
6. Gao, Song, Jia Guo, Yaoyao Gong, Shunli Ban, and Ang Liu. 2022. "Study on the Penetration and Diffusion of Chloride Ions in Interface Transition Zone of Recycled Concrete Prepared by Modified Recycled Coarse Aggregates." *Case Studies in Construction Materials* 16 (June). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01034>.
7. Gebremariam, Hintsu G., Shifferaw Taye, and Abrham Gebre Tarekegn. 2023. "Disparity in Research Findings on Parent Concrete Strength Effects on Recycled Aggregate Quality as a Challenge in Aggregate Recycling." *Case Studies in Construction Materials* 19 (December). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02342>.
8. Juan, Marta Sánchez de, and Pilar Alaejos Gutiérrez. 2009. "Study on the Influence of Attached Mortar Content on the Properties of Recycled Concrete Aggregate." *Construction and Building Materials* 23 (2): 872–77. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012>.
9. Lim D. T. Y., Sabet Divsholi B., Xu D., and Teng S., "Evaluation of high performance concrete using electrical resistivity technique", *Proceedings of the Our World in Concrete and Structures*, 2011, Singapore.

10. Mehta K.P., Monteiro P.H.M. 2009. «Σκυρόδεμα: μικροδομή, ιδιότητες και υλικά», Μετάφραση-επιστημονική επιμέλεια Ι. Παπαγιάννη, Τρίτη Αμερικάνικη Έκδοση, Εκδόσεις Κλειδάριθμος
11. Young, J.F. 2001. “Portland Cements.” In Encyclopedia of Materials: Science and Technology. Elsevier Science Ltd. ISBN: 0-08-0431526. pp. 7768-7774
12. Roychand, Rajeev, Shannon Kilmartin-Lynch, Mohammad Saberian, Jie Li, Guomin Zhang, and Chun Qing Li. 2023. “Transforming Spent Coffee Grounds into a Valuable Resource for the Enhancement of Concrete Strength.” Journal of Cleaner Production 419 (September).
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138205>.
13. F. Pacheco-Torgal, V. W. Y. Tam, J. A. Labrincha, Y. Ding and J. de Brito. 2013. “Handbook of recycled concrete and demolition waste.” Woodhead Publishing. ISBN: 978-0-85709-690-6
14. Wang, Liang, Jialai Wang, Xin Qian, Peiyuan Chen, Ying Xu, and Jinxing Guo. 2017. “An Environmentally Friendly Method to Improve the Quality of Recycled Concrete Aggregates.” Construction and Building Materials 144:432–41. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.191>.
15. Xie, Jun, Heng Zhang, Long Duan, Yongzhu Yang, Jie Yan, Doudou Shan, Xinglong Liu, et al. 2020. “Effect of Nano Metakaolin on Compressive Strength of Recycled Concrete.” Construction and Building Materials 256.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119393>.
16. © LAFARGE 2024. «Αδρανή Υλικά». Ανακτήθηκε από:
<https://www.lafarge.gr/adrani-ylika>
17. Μπαδογιάννης Γ. Ευστράτιος. Αθήνα 2002. «Αξιοποίηση Καολίνων Στην Τεχνολογία Σκυροδέματος.» Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Ανακτήθηκε από: <https://www.didaktorika.gr/eadd/>
18. Meyer, C. 2005. “Concrete as a Green Building Material.” Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics Columbia University New York, NY 10027, USA
19. Rethinking The Future – RTF. “10 examples of recycled concrete”; Available from: <https://www.re-thinkingthefuture.com/materials-construction/a4311-10-examples-of-recycled-concrete/>
20. © Statista 2024. “Production of cement in the United States from 2010 to 2023”; Available from: <https://www.statista.com/statistics/219343/cement-production-worldwide/>
21. CHEMIUM NT 2 - DOMYLCO Construction Chemicals; Available from: <https://www.domylo.gr>
22. © ANAEKK AE 2023. «Τι είναι τα ΑΕΚΚ». Ανάκτηση από: <https://anaekk.gr>

23. ΔΟΚΙΜΗ ΚΑΘΙΣΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (ΣΚ309). Ανάκτηση από:
<http://www.paver.gr>
24. «Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος 2016 (ΚΤΣ-2016), Εφημερίδα της Κυβερνήσεως.» 2016. Υπουργείο Υποδομών, Μεταφορών και Δικτύων. Γενική Γραμματεία Υποδομών.
25. EN 12350-2:2009 “Testing fresh concrete - Part 2: Slump test.” 2009. BSI - British Standards Institution
26. EN 12350-7:2009 “Testing fresh concrete - Part 7: Air content - Pressure methods.” 2009. BSI - British Standards Institution
27. EN 12390-3:2009 “Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens.” 2011. BSI - British Standards Institution
28. ASTM C642-97 “Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.” 1997. ASTM International: West Conshohocken, PA.
29. ASTM C1585-04 “Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes.” 2004. ASTM International: West Conshohocken, PA.
30. MATERIAUX, R.I.D.L.D.E.E. (1999). “RILEM Technical Recommendation: Determination of the capillary absorption of water of hardened concrete.” Materials and Structures. **32**: p. 178-179.
31. SIST EN 12390-18:2021 “Testing hardened concrete - Part 18: Determination of the chloride migration coefficient.” 2021. Available from:
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/5cd1533c-f4ce-459c-a6f8-e5a205649125/sist-en-12390-18-2021>

Παράρτημα