



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ ΚΑΙ
ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ
ΔΟΜΙΚΟΥ ΕΛΑΦΡΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Γερασιμίνας Έρσης Δ. Λάζαρη

Επιβλέπων:

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2021

ΕΟΣ ΔΕ 2021/03

Λάζαρη Γ. Ε. Δ. (2021).
Βελτιστοποίηση συνθέσεων και μελέτη της ανθεκτικότητας δομικού ελαφροσκυροδέματος
Διπλωματική Εργασία ΕΟΣ ΔΕ 2021/03
Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Lazari G. E. D. (2021).
Mix design optimization and study of structural lightweight concrete
Diploma Thesis ΕΟΣ ΔΕ 2021/03
Laboratory of Reinforced Concrete, National Technical University of Athens, Greece

Πίνακας Περιεχομένων

| | |
|---|-----|
| Περίληψη | ii |
| Abstract..... | iii |
| 1 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ | 1 |
| 1.1 Γενικά..... | 1 |
| 1.2 Πρόσθετα Υλικά..... | 3 |
| 1.3 Τσιμέντο | 4 |
| 1.4 Αδρανή | 5 |
| 1.4.1 Αδρανή κανονικού βάρους..... | 6 |
| 1.4.2 Ελαφρά αδρανή..... | 6 |
| 2 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ | 11 |
| 2.1 Γενικά..... | 11 |
| 2.2 Διαπερατότητα | 12 |
| 2.2.1 Πορώδες – Συνδεδεμένοι πόροι | 14 |
| 2.2.2 Η παρουσία νερού ως παράγοντας φθοράς..... | 15 |
| 2.2.3 Τριχοειδής απορρόφηση | 16 |
| 2.3 Χλωριόντα..... | 16 |
| 2.3.1 Πηγές χλωριόντων | 16 |
| 2.3.2 Μηχανισμός προσβολής..... | 17 |
| 2.3.3 Κανονιστικό πλαίσιο και μέτρα προστασίας | 19 |
| 2.4 Παγετός | 22 |
| 2.4.1 Μηχανισμός προσβολής..... | 22 |
| 2.4.2 Παράγοντες ανθεκτικότητας σκυροδέματος έναντι παγετού..... | 23 |
| 2.4.3 Κανονιστικό πλαίσιο και τρόποι αντιμετώπισης..... | 25 |
| 3 ΕΛΑΦΡΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑ | 28 |
| 3.1 Γενικά – Εισαγωγή..... | 28 |
| 3.2 Ιδιότητες..... | 29 |
| 3.3 Προτερήματα και μειονεκτήματα της χρήσης ελαφροσκυροδέματος..... | 36 |
| 3.4 Εφαρμογές..... | 37 |
| 4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ..... | 39 |
| 4.1 Εισαγωγή..... | 39 |
| 4.2 Ανασκόπηση ερευνητικών μελετών | 39 |
| 5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ..... | 43 |
| 5.1 Εισαγωγή..... | 43 |
| 5.2 Α ΦΑΣΗ : Βελτιστοποίηση συνθέσεων ελαφροσκυροδέματος | 44 |
| 5.2.1 Υλικά και συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος..... | 44 |
| 5.2.2 Ιδιότητες νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος..... | 47 |
| 5.3 Β ΦΑΣΗ : Τελικές συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος..... | 50 |
| 5.3.1 Υλικά, συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος και δοκίμια | 50 |
| 5.3.2 Ιδιότητες νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος..... | 51 |
| 5.4 Συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης..... | 52 |
| 5.5 Ανοιχτό πορώδες OP% - Υδατοαπορροφητικότητα | 54 |
| 5.6 Δοκιμή επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων (NordTest Build 492)..... | 55 |
| 5.7 Δοκιμή επαναλαμβανόμενων κύκλων ψύξης-απόψυξης και παράλληλη δοκιμή μέτρησης ταχύτητας υπερήχων (UPV) | 59 |

| | | |
|-------|--|----|
| 6 | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ | 64 |
| 6.1 | Β ΦΑΣΗ : Τελικές συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος..... | 64 |
| 6.1.1 | Ιδιότητες νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος..... | 64 |
| 6.2 | Συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης..... | 66 |
| 6.3 | Ανοιχτό πορώδες OP% - Υδατοαπορροφητικότητα | 68 |
| 6.4 | Δοκιμή επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων (NordTest Build 492)..... | 70 |
| 6.5 | Δοκιμή επαναλαμβανόμενων κύκλων ψύξης-απόψυξης και παράλληλη δοκιμή μέτρησης ταχύτητας υπερήχων (UPV)..... | 72 |
| 7 | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ | 79 |
| 8 | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 81 |
| 9 | Παράρτημα Α. Συμπληρωματικά διαγράμματα και πίνακες αποτελεσμάτων..... | 87 |
| 9.1 | Ανοιχτό πορώδες..... | 87 |
| 9.2 | Επαναλαμβανόμενοι κύκλοι ψύξης-απόψυξης..... | 89 |
| 10 | Παράρτημα Β. Φωτογραφικό υλικό πειραματικών μεθόδων | 92 |

Πίνακας Σχημάτων

| | |
|---|----|
| Σχήμα 2.1 Βασικοί παράγοντες ανθεκτικότητας[3]..... | 11 |
| Σχήμα 2.2 Επίδραση του λόγου N/T και του πορώδους, στη διαπερατότητα του σκυροδέματος[34] | 13 |
| Σχήμα 2.3 Επιρροή της διάρκειας συντήρησης του σκυροδέματος στο συντελεστή διαπερατότητας έναντι διείσδυσης οξυγόνου[35] | 13 |
| Σχήμα 2.4 Σχέση θλιπτικής αντοχής και διαπερατότητας με το ολικό πορώδες[3] | 15 |
| Σχήμα 2.5 Προσβολή της παθητικής στρώσης από χλωριόντα[33] | 18 |
| Σχήμα 2.6 Αύξηση του όγκου του σκυροδέματος λόγω ψύξης, σε σχέση με την ηλικία κατά την οποία ψύχεται[43] | 24 |
| Σχήμα 5.1 Διαδικασία εκτέλεσης δοκιμής κάθισης [74] | 48 |
| Σχήμα 5.2 Αποδεκτές μορφές δοκιμίων κατά τη δοκιμή σε θλίψη[76]..... | 49 |
| Σχήμα 5.3 Μη αποδεκτές μορφές δοκιμίων κατά τη δοκιμή θλίψης[76] | 49 |
| Σχήμα 5.4 Συσκευή μέτρησης περιεχόμενου αέρα σκυροδέματος[77] | 52 |
| Σχήμα 5.5 Σχηματική απεικόνιση της διάταξης της δοκιμής τριχοειδούς απορρόφησης[80] | 53 |
| Σχήμα 5.6 Σχηματική απόδοση διάταξης δοκιμής επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων NordTest Build 492 (1999) | 56 |
| Σχήμα 5.7 Απεικόνιση του τρόπου μέτρησης των βαθών διείσδυσης των χλωριόντων στο δοκίμιο[85]..... | 58 |
| Σχήμα 5.8 Εναλλακτικές διατάξεις ακροδεκτών κατά τη δοκιμή υπερήχων[90] | 62 |
| Σχήμα 6.1 Θλιπτική αντοχή των συνθέσεων στις 28 και 90 ημέρες (Μ.Ο. 3 δοκιμίων) και αντίστοιχη τυπική απόκλιση | 66 |
| Σχήμα 6.2 Συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης S ($\text{min}/\text{min}^{0.5}$) για κάθε σύνθεση. 67 | |
| Σχήμα 6.3 Μεταβολή βάρους δοκιμίων για κάθε σύνθεση κατά τον προσδιορισμό του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης, συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου. 68 | |
| Σχήμα 6.4 Αποτελέσματα ανοικτού πορώδους OP% ανά σύνθεση και ανά ηλικία ελέγχου | 70 |
| Σχήμα 6.5 Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων D_{nssm} ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) ανά σύνθεση, για τις ηλικίες ελέγχου 28, 90 και 180 ημερών | 72 |
| Σχήμα 6.6 Μάζα αναφοράς δοκιμίων και μάζα κατά τον 75 ^ο κύκλο της δοκιμής ψύξης-απόψυξης | 73 |
| Σχήμα 6.7 Ποσοστιαία μεταβολή της μάζας των συνθέσεων κατά τη δοκιμή ψύξης-απόψυξης | 74 |
| Σχήμα 6.8 Μέσος όρος μήκους των δοκιμίων κατά τον 5 ^ο και 75 ^ο κύκλο της δοκιμής ψύξης-απόψυξης και αντίστοιχη τυπική απόκλιση | 75 |
| Σχήμα 6.9 Ποσοστιαία μεταβολή του μήκους των δοκιμίων των συνθέσεων κατά τη δοκιμή ψύξης-απόψυξης..... | 75 |
| Σχήμα 6.10 Μέσος όρος θλιπτικών αντοχών όλων των συνθέσεων, πριν την έναρξη της δοκιμής ψύξης-απόψυξης και μετά από 75 κύκλους | 77 |
| Σχήμα 6.12 Ποσοστιαία μεταβολή της ταχύτητας υπερήχων των συνθέσεων κατά τη δοκιμή ψύξης-απόψυξης..... | 78 |

Πίνακες

| | |
|--|----|
| Πίνακας 1.1 Κατηγορίες σκυροδέματος[1] | 2 |
| Πίνακας 2.1 Απαιτήσεις για το σκυρόδεμα ανάλογα με την κατηγορία έκθεσης σε χλωριόντα[1] | 20 |
| Πίνακας 2.2 Απαιτήσεις σκυροδέματος ανάλογα με την κατηγορία έκθεσης στον παγετό[1] | 26 |
| Πίνακας 3.1 Κατηγοριοποίηση ελαφροσκυροδεμάτων[50] | 30 |
| Πίνακας 3.2 Τυπικά χαρακτηριστικά ελαφρών αδρανών[13] | 31 |
| Πίνακας 5.1 Περιεκτικότητες συστατικών των δοκιμαστικών συνθέσεων (Kg/m^3) ... | 45 |
| Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα δοκιμών νωπού (κάθιση και μοναδιαίο βάρος) και σκληρυμένου σκυροδέματος (θλιπτική αντοχή 2, 7 και 28 ημερών) όλων των δοκιμαστικών συνθέσεων | 46 |
| Πίνακας 5.3 Κατηγορίες κάθισης σύμφωνα με EN 206 [1] | 48 |
| Πίνακας 5.4 Περιεκτικότητες συστατικών των πέντε (5) τελικών συνθέσεων (Kg/m^3) | 50 |
| Πίνακας 5.5 Διαστάσεις των 18 δοκιμίων που παρασκευάστηκαν ανά σύνθεση | 51 |
| Πίνακας 5.6 Διαφορά δυναμικού και διάρκεια δοκιμής [85] | 57 |
| Πίνακας 5.7 Κατηγοριοποίηση της αντίστασης του σκυροδέματος απέναντι στη διείδυση χλωριόντων με βάση την τιμή του συντελεστή διείδυσης $D_{nssm}(x 10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$ [86] | 59 |
| Πίνακας 5.8 Ποιοτική κατάταξη σκυροδέματος με βάση την ταχύτητα της δοκιμής υπερήχων[90] | 63 |
| Πίνακας 6.1 Αποτελέσματα δοκιμών τελικών συνθέσεων σε νωπή φάση | 64 |
| Πίνακας 6.2 Μέσος όρος θλιπτικών αντοχών (MPa) στις 28 και 90 ημέρες και αντίστοιχη τιμή τυπικής απόκλισης | 65 |
| Πίνακας 6.3 Αποτελέσματα δοκιμής τριχοειδούς απορρόφησης S ($\text{min}/\text{min}^{0.5}$) και ποσοστιαία μεταβολή της ως προς τη σύνθεση αναφοράς | 67 |
| Πίνακας 6.4 Αποτελέσματα δοκιμής ανοικτού πορώδους OP% ανά σύνθεση και ποσοστιαία μεταβολή του ως προς τη σύνθεση αναφοράς | 69 |
| Πίνακας 6.5 Αποτελέσματα επιταχυνόμενης διείδυσης χλωριόντων για κάθε σύνθεση και ποσοστιαία μεταβολή τους ως προς τη σύνθεση αναφοράς REF | 71 |
| Πίνακας 6.6 Χαρακτηρισμός συνθέσεων με βάση το συντελεστή διείδυσης χλωριόντων D_{nssm} στις 28, στις 90 και στις 180 ημέρες | 71 |
| Πίνακας 6.7 Μέσος όρος θλιπτικών αντοχών δοκιμίων πριν και μετά τη δοκιμή ψύξης απόψυξης, και αντίστοιχο ποσοστό μεταβολής σε σχέση με την αντοχή αναφοράς | 76 |
| Πίνακας 9.1 Αποτελέσματα μετρήσεων δοκιμής ανοικτού πορώδους OP% για όλα τα δοκίμια 28 ημερών | 87 |
| Πίνακας 9.2 Αποτελέσματα μετρήσεων δοκιμής ανοικτού πορώδους OP% για όλα τα δοκίμια 90 ημερών | 88 |
| Πίνακας 9.3 Αποτελέσματα μετρήσεων δοκιμής ανοικτού πορώδους OP% για όλα τα δοκίμια 180 ημερών | 88 |
| Πίνακας 9.4 Αποτελέσματα μετρήσεων μάζας όλων των δοκιμίων, κατά τους κύκλους ψύξης-απόψυξης | 89 |
| Πίνακας 9.5 Αποτελέσματα μέτρησης μήκους όλων των δοκιμίων, κατά τους κύκλους ψύξης-απόψυξης | 90 |
| Πίνακας 9.6 Αποτελέσματα μέτρησης ταχύτητας υπερήχων για όλα τα δοκίμια, κατά τους κύκλους ψύξης-απόψυξης | 91 |

Βελτιστοποίηση Συνθέσεων και Μελέτη της Ανθεκτικότητας Δομικού Ελαφροσκυροδέματος

Λάζαρη Γ.Ε. (Επιβλέπων: Μπαδογιάννης Ε.)

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο, σε πρώτο στάδιο, τη βελτιστοποίηση συνθέσεων ελαφροσκυροδέματος με γνώμονα τη θλιπτική αντοχή, το μοναδιαίο βάρος και την εργασιμότητα των μιγμάτων, και σε δεύτερο στάδιο, τη διερεύνηση της επίδρασης των συστατικών τους στις παραμέτρους ανθεκτικότητας. Για τις τέσσερις (4) τελικές συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν τα ελαφρά αδρανή μη διογκωμένος περλίτης, ελαφρόπετρα και τέφρα φλοιού ρυζιού (RHA) σε διαφορετικές αναλογίες. Μελετώνται παράμετροι ανθεκτικότητας όπως το ανοιχτό πορώδες, η τριχοειδής απορρόφηση, ο συντελεστής επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων σύμφωνα με το πρότυπο NT BUILD 492 και η αντίσταση σε επαναλαμβανόμενους κύκλους ψύξης-απόψυξης κατά το πρότυπο ASTM C 666, επικουρούμενη από μετρήσεις ταχύτητας υπερήχων.

Συνοψίζοντας, ο πειραματικός σκοπός της εργασίας αναφορικά με τη βελτιστοποίηση των συνθέσεων επετεύχθη, δηλαδή η παραγωγή συνθέσεων ελαφροσκυροδέματος με μοναδιαίο βάρος περί τα 1600 kg/m^3 , με κατάλληλη εργασιμότητα και ανάπτυξη ικανοποιητικής αντοχής, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε δομοστατικές εφαρμογές. Σε σχέση με τις παραμέτρους ανθεκτικότητας, παρατηρήθηκε ότι η προσθήκη ελαφρών αδρανών εν γένει, επέφερε αύξηση τόσο στο ανοιχτό πορώδες όσο και στο συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης. Ωστόσο, όλες οι συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος είχαν πολύ χαμηλό συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων, ο οποίος μειωνόταν με την πάροδο του χρόνου. Η συνοχή όλων των συνθέσεων ελαφροσκυροδέματος, φάνηκε να επηρεάζεται από τους επαναλαμβανόμενους κύκλους ψύξης-απόψυξης, με πρώτη τη σύνθεση που περιείχε RHA και στη συνέχεια εκείνες με μεγάλο ποσοστό περιεχόμενης κίσηρης. Παρόλα αυτά, οι συνθέσεις φάνηκε να διατηρήθηκαν σε ικανοποιητικά επίπεδα ποιότητας, ακόμη και μετά το τέλος της δοκιμής ψύξης-απόψυξης.

Λέξεις Κλειδιά: ελαφροσκυρόδεμα, κίσηρης, περλίτης, τέφρα φλοιού ρυζιού, αντοχή, ανθεκτικότητα, ανοιχτό πορώδες, τριχοειδής απορρόφηση, διείσδυση χλωριόντων, ψύξη-απόψυξη, δοκιμή ταχύτητας υπερήχων

Mix Design Optimization and Study of Structural Lightweight Concrete

Lazari G.E. (supervised by Badogiannis E.)

Abstract

The first goal of the current postgraduate study is the optimization of lightweight concrete (LW) mixtures, based on their compressive strength, density and workability. Additionally, the study aims to investigate the effect of different components of the mixtures, on the durability of the concrete. The lightweight aggregates used to produce the four (4) final mixtures are perlite, pumice and rice husk ash (RHA), in different amounts. Durability parameters are investigated, such as open porosity, capillary absorption, chloride penetration according to NT BUILD 492 standard and freeze and thaw resistance of concrete admixtures, according to ASTM C 666 standard and evaluated by ultrasonic pulse velocity test.

In conclusion, the experimental purpose of this study regarding the optimization of the mixtures was achieved, meaning that all LW mixtures appeared to have density close to 1600 kg/m^3 , they had an appropriate workability level and reached adequate compressive strength that allow them to be used in structural applications. Summarizing the laboratory test results on durability, the addition of lightweight aggregates led to the increase of the mixtures porosity and capillary, absorption in general. Nevertheless, all the LW mixtures had a very low chloride diffusion coefficient, which continued to decrease overtime. The coherence of LW mixtures appeared to be negatively affected by the freeze-thaw cycles. Most affected was the mixture containing RHA and the ones with the higher additions of pumice. Even so, results showed that all LW mixtures maintained a relatively good quality, even after the end of the freeze and thaw test.

Keywords: lightweight concrete, pumice, perlite, rice husk ash, strength, durability, open porosity, sorptivity, chloride penetration, freeze-thaw, ultrasonic pulse velocity test

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε τμηματικά στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του Τομέα Δομοστατικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ) και στο Εργαστήριο του Ελληνικού Κέντρου Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΕΚΕΤΣ) της ΑΓΕΤ Ηρακλής, του ομίλου Lafarge Holcim. Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Ευστράτιο Μπαδογιάννη, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής, για την ευκαιρία που μου έδωσε αναθέτοντάς μου αυτή τη διπλωματική αλλά και για την εμπιστοσύνη του και τη βοήθειά του σε όλα τα στάδια αυτής.

Παράλληλα, θέλω να ευχαριστήσω την κυρία Μαρία Νομικού, υπεύθυνη του ΕΚΕΤΣ, η οποία ενέκρινε τη συνεργασία των δυο εργαστηρίων για την διενέργεια των πειραματικών δοκιμών της παρούσας διπλωματικής και μου έδωσε τη δυνατότητα να συνδυάσω την εκπόνηση της διπλωματικής μου με την εξέλιξη της εμπειρίας μου σε πραγματικές συνθήκες εργασίας. Η αρωγή της, η εμπιστοσύνη της και η συνεργατική της διάθεση ήταν κομβικές για την πραγματοποίηση αυτής της εργασίας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ και στην υποψήφια διδάκτωρ Μαρία Στρατουρά, για τη συνεργασία της και τη βοήθειά της από την πρώτη μέρα και μέχρι το τέλος της παρούσας διπλωματικής. Η στήριξη και η καθοδήγησή της ήταν πολύτιμη σε κάθε βήμα της πειραματικής διαδικασίας και της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων αυτής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης όλο το προσωπικό του ΕΚΕΤΣ για την άπογη συνεργασία τους, τη βοήθειά τους και το ευχάριστο και συνάμα επαγγελματικό περιβάλλον που δημιούργησαν. Για την προθυμία τους και τη στήριξή τους, πρακτική και ψυχολογική, ευχαριστώ ιδιαίτερω το Διαμαντή Διαμαντή, το Σάββα Μιχαηλίδη, το Σωκράτη Παραθύρα, το Δημήτρη Θεοδωρή και το Γιάννη Μακρυγιάννη.

Ευχαριστώ επίσης τον Τρύφωνα και το Στέλιο Ρουμπεδάκη γιατί από αυτούς ξεκίνησαν όλα, παρόλο που ξέρω πόσο δεν τους αρέσει να τους ευχαριστούν.

Τέλος, για όλη τη στήριξη και την υπομονή τους, ευχαριστώ τη οικογένειά μου και όλους τους κοντινούς μου ανθρώπους, το Νίκο, τη Μαρρία, την Έλενα, το Στρατή, τη Τζωρτζίνα, τον Κώστα, τη Ζωή και την Πηνελόπη.

1 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Αναμφισβήτητα, το σκυρόδεμα αποτελεί το πλέον διαδεδομένο υλικό του 20^{ου} αιώνα. Η παραγωγή του και ο αντίστοιχος κύκλος εργασιών, τόσο στην Ελλάδα όσο και παγκοσμίως, ανέρχεται σε αρκετά εκατομμύρια κάθε χρόνο. Η πεποίθηση όμως ότι οι κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι άφθαρτες, έχει αρχίσει να καταρρέει τα τελευταία 40 χρόνια, καθώς όλο και περισσότερες κατασκευές, πριν καν ακόμη κλείσουν την πρώτη δεκαετία της ζωής τους, εμφανίζουν σημαντικά προβλήματα που δεν σχετίζονται με τη φθορά από μηχανική καταπόνηση.

Ως διάρκεια ζωής μιας κατασκευής εννοούμε το ελάχιστο χρονικό διάστημα κατά το οποίο η κατασκευή εξασφαλίζει τα χαρακτηριστικά της επιτελεστικότητας για τα οποία σχεδιάστηκε, πάνω από ένα όριο, δηλαδή την ασφάλεια, τη λειτουργικότητα και την αισθητική εμφάνιση. Η διάρκεια ζωής των κατασκευών από σκυρόδεμα εξαρτάται πρωτίστως από την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος.

Με τον όρο ανθεκτικότητα εννοούμε την ικανότητα του υλικού, στην προκειμένη του σκυροδέματος, να ανθίσταται στις επιβλαβείς επιδράσεις που δέχεται από το περιβάλλον λειτουργίας της κατασκευής, χωρίς να χάνει τις μηχανικές και φυσικές του ιδιότητες κάτω από ένα όριο. Η έννοια της ανθεκτικότητας συνιστά σημαντικό δείκτη της ποιότητας του σκυροδέματος και αποτελεί κλάδο της επιστήμης της τεχνολογίας του σκυροδέματος που σημειώνει σημαντική ερευνητική δραστηριότητα τα τελευταία χρόνια, καθώς πολλοί είναι οι ερευνητές που έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους προς τα εκεί.

Πολλές μελέτες έχουν ως αντικείμενο, τη χρήση εναλλακτικών υλικών ως προσθήκη στο σκυρόδεμα, με σκοπό τη βελτίωση της ανθεκτικότητάς του αλλά και πολλών άλλων ιδιοτήτων του, που θα το καταστήσουν οικονομικότερο και πιο κατάλληλο στο να καλύψει τις ποικίλες και συνεχώς εναλλασσόμενες ανάγκες του σύγχρονου κατασκευαστικού κλάδου.

Σε μια εποχή στην οποία υπάρχει η δυνατότητα και η τεχνογνωσία παραγωγής σκυροδέματος πολύ υψηλών αντοχών, τίθεται το ερώτημα αν μπορούμε να συνδέσουμε την κλασική έννοια της αντοχής με την έννοια της ανθεκτικότητας στο χρόνο, ώστε να εξασφαλίσουμε ότι οι κατασκευές θα εκπληρώσουν το σχεδιαζόμενο χρόνο ζωής τους.

1.1 Γενικά

Το σκυρόδεμα είναι ένα τεχνητό δομικό υλικό το οποίο παρασκευάζεται με τη ανάμιξη τσιμέντου, αδρανών υλικών και νερού, και το οποίο στερεοποιείται με τη χημική ένωση του νερού με το τσιμέντο (ενυδάτωση), εγκλωβίζοντας μέσα στη μάζα του τα αδρανή υλικά. Ο όρος αδρανή υλικά, στην περίπτωση του συμβατικού σκυροδέματος, περιλαμβάνει γενικά την άμμο, το γαρμπίλι και τα σκύρα (χαλίκια). Σύμφωνα με το πρότυπο EN 206-1, προβλέπεται η προσθήκη και άλλων συστατικών στο σκυρόδεμα, όπως τα βελτιωτικά πρόσθετα, τα οποία λειτουργούν τροποποιώντας συγκεκριμένες ιδιότητες του υλικού.

Για την παραγωγή καλής ποιότητας σκυροδέματος, χρειάζεται, εκτός από τη σωστή διαλογή των συστατικών του, να τηρούνται κάποιες συγκεκριμένες προδιαγραφές σχετικά με τη διάστρωση και τη συντήρησή του. Τέτοιου είδους οδηγίες, περιλαμβάνονται στον

Ελληνικό Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ 2016), μαζί με διαδικασίες για τον πλήρη και σωστό έλεγχο ποιότητας του υλικού σε όλα τα στάδια ζωής του.

Οι ιδιότητες του σκυροδέματος είναι πολλές και διαφέρουν ανάλογα με τη μεθοδολογία παρασκευής του και το είδος, την ποιότητα και τις επιμέρους ιδιότητες των υλικών που το συνιστούν. Για κανένα άλλο υλικό δεν είναι τόσο απαραίτητη η γνώση των ιδιοτήτων των υλικών που το συνθέτουν. Θεωρείται ίσως το σημαντικότερο δομικό υλικό και έχει κυρίαρχη θέση στον κατασκευαστικό τομέα. Οι απαιτήσεις σχετικά με το σκυρόδεμα διαμορφώνονται με βάση το είδος της κατασκευής για την οποία προορίζεται, το περιβάλλον που αυτή θα εκτεθεί και την ειδική χρήση που αυτή θα έχει.

Όπως γίνεται κατανοητό, λόγω της ποικιλίας των χαρακτηριστικών και των ιδιοτήτων του, το σκυρόδεμα δύναται να κατηγοριοποιηθεί με πολλούς τρόπους. Ένας από του πιο βασικούς είναι με βάση την αντοχή του. Στον **Πίνακα 1.1**, παρουσιάζονται οι κατηγορίες αντοχής του σκυροδέματος σύμφωνα με τον ΚΤΣ 2016.

Πίνακας 1.1 Κατηγορίες σκυροδέματος[1]

| Κατηγορία αντοχής σε θλίψη | Ελάχιστη χαρακτηριστική αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου $f_{ck,cyl}$ N/mm ² (MPa) | Ελάχιστη χαρακτηριστική αντοχή κυβικού δοκιμίου $f_{ck,cube}$ N/mm ² (MPa) |
|----------------------------|---|--|
| C8/10 | 8 | 10 |
| C12/15 | 12 | 15 |
| C16/20 | 16 | 20 |
| C20/25 | 20 | 25 |
| C25/30 | 25 | 30 |
| C30/37 | 30 | 37 |
| C35/45 | 35 | 45 |
| C40/50 | 40 | 50 |
| C45/55 | 45 | 55 |
| C50/60 | 50 | 60 |

Εκτός από το διαχωρισμό με βάση την αντοχή, το σκυρόδεμα, ανάλογα με το βάρος του, κατατάσσεται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες :

- στα κοινά σκυροδέματα με ειδικό βάρος μεταξύ 2000-2500 kg/m³
- στα ελαφρά σκυροδέματα, με τα οποία ασχολείται και η παρούσα εργασία, με ειδικό βάρος 300-2000 kg/m³
- στα βαριά σκυροδέματα με ειδικό βάρος μεταξύ 3000-5000 kg/m³[2]

Ακόμη, το σκυρόδεμα μπορεί να διακριθεί ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε έργου και τις περιβαλλοντικές συνθήκες στις εξής κατηγορίες:

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

Τέλος, υπάρχουν και αρκετές κατηγορίες ειδικών σκυροδεμάτων όπως τα υψηλής αντοχής, τα ινοπλισμένα, τα εκτοξευόμενα κ.α.[3].

Στις επόμενες ενότητες αναλύονται ξεχωριστά τα συστατικά και οι ιδιότητες, τόσο του συμβατικού σκυροδέματος όσο και του ελαφροσκυροδέματος.

1.2 Πρόσθετα Υλικά

Πρόσθετα ή βελτιωτικά σκυροδέματος, ονομάζονται τα υλικά εκείνα που προστίθενται κατά την παρασκευή του και τροποποιούν με συγκεκριμένο τρόπο κάποιες από τις ιδιότητές του[2]. Ανάλογα με τη δράση τους, τα πρόσθετα χωρίζονται σε δυο κατηγορίες.

Την πρώτη κατηγορία αποτελούν οι προσθήκες, υλικά που έχουν πολύ μικρή ή και καθόλου χημική δράση και η επίδρασή τους είναι κυρίως μηχανική. Η ποσότητα αυτών των υλικών είναι τέτοια ώστε θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν στην τελική σύνθεση του μίγματος. Εν συντομία, σε αυτή την κατηγορία υπάγονται:

- Παιπάλη ή Filler, πολύ λεπτόκοκκα γαιώδη υλικά, συνήθως αδρανή
- Ποζολάνες, ηφαιστειακής προέλευσης γαιώδη υλικά που όταν ενώνονται με το νερό δημιουργούν ασβεστοπυριτικές ενώσεις και αναπτύσσουν μικρές αντοχές σε βάθος χρόνου
- Ιπτάμενη τέφρα, κατάλοιπα της καύσης γαιάνθρακα ή λιγνίτη, κυρίως σε εργοστάσια ηλεκτρικού ρεύματος, διαθέτει μικρές υδραυλικές ή ποζολανικές ιδιότητες
- Πυριτική παιπάλη (silica fume), είναι υποπροϊόν της τήξεως πυριτιούχων μετάλλων και αποτελείται σε μεγάλο ποσοστό από διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2), έχει λιπαντική δράση μεταξύ των κόκκων του υλικού και συμβάλλει θετικά στην αντοχή του[2]

Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα χημικά πρόσμικτα. «Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ομοσπονδία Εταιρειών Χημικών Πρόσμικτων (EFCA), πρόσμικτα είναι χημικές ενώσεις οι οποίες προστίθενται στο σκυρόδεμα κατά τη διαδικασία ανάμειξης με στόχο τη βελτίωση των ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς του (EN 934)» [4].

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία στους τύπους των χημικών αυτών, με αντίστοιχα μεγάλη επίδραση στο τελικό προϊόν, το σκυρόδεμα. Η χρήση τους επιφέρει βελτίωση στην εργασιμότητα και τη διαδικασία άντλησης, στις μηχανικές επιδόσεις του υλικού καθώς και στην ανθεκτικότητά του απέναντι στη συρρίκνωση, σε αλληπάλληλους κύκλους ψύξης-απόψυξης κ.α. Παράλληλα, τα χημικά πρόσμικτα επιτρέπουν την παραγωγή ορισμένων ειδικών τύπων σκυροδέματος όπως είναι τα υψηλής αντοχής, τα υπέρρευστα, τα εκτοξευόμενα και αυτά που προορίζονται για υποβρύχιες κατασκευές [5].

Κάποιες από τις βασικές κατηγορίες των χημικών πρόσμικτων αποτελούν οι επιταχυντές, οι μειωτές νερού, οι υπερρευστοποιητές, τα αερακτικά, τα αντιπαγωτικά και οι επιβραδυντές.

- **Επιταχυντές**

Πρόσμικτα που χρησιμοποιούνται για την αύξηση των πρώιμων αντοχών, με ή χωρίς επίδραση στο χρόνο πήξης του σκυροδέματος.

- **Μειωτές νερού**

Δίνουν τη δυνατότητα μείωσης του περιεχόμενου νερού σε ένα μίγμα, διατηρώντας τη συνεκτικότητά του ή/και αυξάνοντας την εργασιμότητά του. Στην κατηγορία αυτή απαντώνται και συνδυασμοί προσμίκτων όπως οι *μειωτές νερού/επιβραδυντές*, ιδανικοί για σκυροδετήσεις σε υψηλές θερμοκρασίες και οι *μειωτές νερού/επιταχυντές* που επιτρέπουν τη σύντομη απομάκρυνση των καλουπιών και προτιμώνται κατά τις χειμερινές σκυροδετήσεις.

- **Υπερρευστοποιητές**

Οι υπερρευστοποιητές είναι ικανοί να μειώσουν σημαντικά την απαίτηση για περιεχόμενο νερό μίγματος, μέχρι και σε ποσοστό 30%[6]. Μερικά από τα βασικά οφέλη που προσφέρουν είναι η αύξηση της εργασιμότητας του σκυροδέματος χωρίς τη μείωση της περιεκτικότητάς του σε τσιμέντο και η αύξηση της αντοχής του με διατήρηση της εργασιμότητας αλλά με μειωμένο περιεχόμενο νερό.

- **Αερακτικά**

Τα αερακτικά είναι υλικά παρόμοιας φύσεως με τα ρευστοποιητικά. Σκοπός τους είναι η ανάπτυξη μικρών φυσαλίδων στο εσωτερικό της μήτρας κονιάματος, ώστε να αυξηθεί η εργασιμότητα και η αντοχή του σκυροδέματος, χωρίς αισθητή μείωση της θλιπτικής αντοχής. Το συνολικό ποσοστό του περιεχόμενου αέρα στο σκυρόδεμα κυμαίνεται μεταξύ 4% και 8% κατ' όγκο[2].

- **Αντιπαγωτικά**

Με τον όρο αυτό χαρακτηρίζονται τα πρόσμικτα που στοχεύουν στη μείωση ή και στην άρση των αρνητικών επιπτώσεων του παγετού κατά την περίοδο της πήξης του σκυροδέματος, επιτρέποντας έτσι τις σκυροδετήσεις σε χαμηλές θερμοκρασίες. Τα περισσότερα εμπορικά αντιπαγωτικά είναι συνδυασμός αερακτικών, ρευστοποιητικών και επιταχυντών.

- **Επιβραδυντές**

Είναι πρόσμικτα στηριζόμενα σε παρόμοιες χημικές ενώσεις με τους μειωτές νερού. Χρησιμοποιούνται ως λύση στα προβλήματα που προκαλούνται από τις υψηλές θερμοκρασίες και τις έκτακτες καθυστερήσεις παράδοσης. Μπορούν να επιμηκύνουν το χρόνο έναρξης και ολοκλήρωσης της πήξης του σκυροδέματος και η επίδρασή τους είναι ανάλογη της ποσότητας που θα προστεθεί στο μίγμα[4],[5],[6].

1.3 Τσιμέντο

Το τσιμέντο αποτελεί μια υδραυλική συνδετική ύλη, γνωστή ήδη από την εποχή των αρχαίων Ρωμαίων και Αιγύπτων. Οι πρώτες βάσεις, για τον πιο ελεγχόμενο και αναπαραξιμο προσδιορισμό των ιδιοτήτων του, τέθηκαν το 1817 από τον Louis Vicat, ενώ το 19^ο αιώνα καθιερώθηκε ο τύπος Portland βραδείας πήξεως, που χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα [7].

Το ανόργανο αυτό υλικό μετά τη χαρακτηριστική αντίδρασή του με το νερό, αποκτά ιδιότητες πήξης και σκλήρυνσης, που το καθιστούν ιδανικό στην παραγωγή

σκυροδεμάτων και κονιαμάτων. Κύριο συστατικό του αποτελεί το κλίνκερ, ο γύψος και πληθώρα άλλων υλικών όπως η πυριτική παιπάλη, ο ασβεστόλιθος, η σκωρία υψικαμίνων, οι ιπτάμενες τέφρες κ.α.

Υπάρχουν αρκετές κατηγορίες τύπων τσιμέντου που ορίζονται με βάση τα διαθέσιμα υλικά και τις εκάστοτε απαιτήσεις της εφαρμογής του υλικού, το σύνολο των οποίων περιλαμβάνονται στο πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1.

Οι κατηγορίες τσιμέντου βάσει χημικής συνθέσεως είναι οι εξής :

- CEM I Τσιμέντο Πόρτλαντ προερχόμενο από την άλεση κλίνκερ με γύψο 2% - 3% και filler < 3% κ.β
- CEM II Σύνθετο Τσιμέντο Πόρτλαντ που περιέχει ποζολάνες
- CEM III Σκωριοτσιμέντο που περιέχει ποζολάνη σε ποσοστό μεγαλύτερο από εκείνο του τύπου II και διακρίνεται για τη χαμηλότερη θερμότητα ενυδάτωσής του
- CEM IV Ποζολανικό Τσιμέντο που μπορεί να παραχθεί από ποζολάνη ή ιπτάμενη τέφρα ή πυριτική παιπάλη ή συνδυασμό αυτών, είναι ανθεκτικό στα θειικά άλατα και κατάλληλο για κατασκευές εκτεθειμένες σε πολύ διαβρωτικά περιβάλλοντα
- CEM V Σύνθετο Τσιμέντο με σκωρία υψικαμίνου και συνδυασμό ποζολάνης και πυριτικής ιπτάμενης τέφρας[2],[8]

Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου CEM I 42,5 R της εταιρείας Ηρακλή, σχεδιασμένο να προσφέρει υψηλές πρώιμες και τελικές αντοχές σκυροδέματος.

1.4 Αδρανή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το σκυρόδεμα αποτελεί ένα μίγμα νερού, τσιμέντου και αδρανών υλικών. Τα τελευταία, καταλαμβάνουν το 70% με 80% του όγκου του[9] και αναπόφευκτα επηρεάζουν σημαντικά τις ιδιότητές του, εξασφαλίζοντας παράλληλα την ογκομετρική σταθερότητα που χρειάζεται.

Ως αδρανή νοούνται τα διαβαθμισμένα, μη συνεκτικά, κοκκώδη υλικά όπως η άμμος, το χαλίκι, η θρυμματισμένη πέτρα ή η σκωρία υψικαμίνου, που χρησιμοποιούνται, τόσο σε συνδυασμό με συγκολλητικό μέσο για την παραγωγή σκυροδέματος και κονιαμάτων, αλλά και αυτούσια σε μεγάλο φάσμα τεχνικών έργων. Όπως υποδηλώνει και το όνομά τους, δεν αντιδρούν χημικά με τα εκάστοτε συγκολλητικά μέσα παρά μόνο συγκρατούνται από αυτά[10].

Ο διαχωρισμός των αδρανών σε οικογένειες δύναται να γίνει με βάση αρκετά διαφορετικά κριτήρια. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας παραθέτονται ενδεικτικά οι παρακάτω κατηγορίες.

Βάσει της προέλευσής τους

1. φυσικά ή φυσικής προέλευσης, τα οποία προέρχονται από πηγές φυσικών αποθέσεων και η μόνη επεξεργασία στην οποία έχουν υποβληθεί είναι η θραύση, το πλύσιμο και η διαλογή

2. τεχνητά ή βιομηχανικά, είναι τα αδρανή που προκύπτουν ως προϊόντα ή παραπροϊόντα βιομηχανικής προέλευσης

3. ανακυκλωμένα ονομάζονται τα αδρανή που επαναχρησιμοποιούνται και προκύπτουν από την επεξεργασία δομικών υλικών υφιστάμενων κατασκευών

Βάσει ειδικού βάρους

1. κανονικού ειδικού βάρους αδρανή μεταξύ 2000 – 3000 kg/m³, με ασβεστολιθική ή πυριτική σύσταση, αποτελούν τα πιο διαδεδομένα αδρανή για χρήση σε τεχνικά έργα
2. ελαφροβαρή με ειδικό βάρος < 2000kg/m³ όπως η κίσηρης, ο περλίτης, η διογκωμένη άργιλος κ.α.
3. βαριά αδρανή με ειδικό βάρος > 3000 kg/m³ όπως ο αιματίτης, ο μαγνητίτης κ.α. που προορίζονται για ειδικές χρήσεις

Βάσει του μεγέθους των κόκκων τους

1. χονδρόκοκκα αδρανή, αποτελούνται από κόκκους με μέγεθος >4 mm όπως τα χαλίκια, το ρυζάκι, οι κροκάλες κ.α.
2. λεπτόκοκκα με κόκκους μεγέθους από 4 – 0,063 mm (είδη άμμων με διαφόρους κόκκους)
3. αδρανή filler, σε ποσοστό μεγαλύτερο από 70% αποτελούνται από κόκκους που διέρχονται από το κόσκινο διαμέτρου 0,063 mm και σίγουρα δεν ξεπερνούν τα 2mm
4. παιπάλη ονομάζεται το διερχόμενο από το κόσκινο διαμέτρου 0,063mm[10]

Η καταλληλότητα των αδρανών για χρήση τους στην παραγωγή σκυροδέματος καθορίζεται στα Ευρωπαϊκά Πρότυπα EN 12620 (για τα κανονικού βάρους και τα βαριά αδρανή) και EN 13055-1 (για τα ελαφρά αδρανή). Εν συνεχεία θα αναπτυχθούν ξεχωριστά δυο βασικές κατηγορίες.

1.4.1 Αδρανή κανονικού βάρους

Σε αυτή την κατηγορία θα βρει κανείς τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα αδρανή σε τεχνικά έργα αλλά και στην παραγωγή του συμβατικού σκυροδέματος. Τα αδρανή κανονικού βάρους, που προορίζονται για χρήση στο σκυρόδεμα, μπορεί να έχουν ακανόνιστο σχήμα και διαφορετικό μέγεθος. Στη συνέχεια, περιγράφονται εν συντομία τα πιο βασικά.

Άμμος : Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα αδρανή που έχουν διάμετρο κόκκου $0 \leq d < 8 \text{ mm}$. Το τμήμα των αδρανών το οποίο αποτελείται από τους πιο λεπτούς κόκκους του υλικού που διέρχεται σε ποσοστό 70% - 100% από το κόσκινο 0,063 ονομάζεται παιπάλη, ενώ το τμήμα των αδρανών που η διάμετρος των κόκκων τους ικανοποιεί τη σχέση $4 \leq d < 8 \text{ mm}$, ονομάζεται ριζάκι.

Γαρμπίλι : Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα αδρανή υλικά που έχουν διάμετρο $8 \leq d < 16 \text{ mm}$.

Σκύρα : Τα αδρανή αυτής της κατηγορίας έχουν διάμετρο κόκκων που ικανοποιεί τη σχέση $16 \leq d < 64 \text{ mm}$.

Τα χονδρόκοκκα συλλεκτά υλικά, γαρμπίλι και σκύρα, ονομάζονται χαλίκια. Επιπλέον, το αδρανές υλικό το οποίο αποτελείται από κόκκους όλων των μεγεθών ορίζεται ως αμμοχάλικο[11].

1.4.2 Ελαφρά αδρανή

Για το δομικό ελαφροσκυρόδεμα, μια ρεαλιστική απαίτηση είναι γενικά κάθε χρησιμοποιούμενο ελαφρύ αδρανές να διαθέτει επαρκή αντοχή σε θραύση ώστε να έχει μια λογική αντίσταση στον κατακερματισμό αλλά και να επιτρέπει την ανάπτυξη αντοχών

μεγαλύτερων των 20 N/mm^2 . Παράλληλα, θα πρέπει το τελικό σκληρυμένου προϊόν να έχει πυκνότητα μεταξύ $1500\text{--}2000 \text{ kg/m}^3$ [12]. Ο μόνος πρακτικός τρόπος να μειωθεί το βάρος ενός πετρώματος ώστε να χαρακτηριστεί ως ελαφροαδρανές, είναι η αύξηση του περιεχόμενου αέρα σε αυτό. Κάποιες φορές, τα πετρώματα καταλήγουν σε αυτή την κατάσταση μέσα από ενέργειες της φύσης, με αποτέλεσμα τα φυσικά ελαφρά αδρανή, και άλλοτε ο άνθρωπος παρεμβαίνει στη διαδικασία παράγοντας τα τεχνητά ελαφρά αδρανή. Υπάρχει μια πληθώρα ελαφρών αδρανών τα οποία χρησιμοποιούνται κατά καιρούς για την παραγωγή ελαφροσκυροδέματος. Μερικά από αυτά είναι η ελαφρόπετρα ή κίσηρης, η σκωρία υψικαμίνου η οποία αποτελεί παραπροϊόν της παραγωγής σιδήρου, ο περλίτης, ο διογκωμένος βερμικουλίτης που ομοιάζει σε ιδιότητες με το διογκωμένο περλίτη, η άργιλος και ο σχιστόλιθος μετά από συγκεκριμένη κατεργασία. Ελαφρά αδρανή μπορεί να αποτελέσουν ακόμη η ιπτάμενη τέφρα προερχόμενη κυρίως από την καύση λιθάνθρακα καθώς και διάφορα οργανικά υλικά που αποτελούν απόβλητα καλλιεργειών όπως ο φλοιός ρυζιού και το πριονίδι[13].

Εκτός από τη χρήση ως προσθήκη στο σκυρόδεμα, τα ελαφρά αδρανή έχουν κατά καιρούς βρει εφαρμογή και αλλού. Λόγω της ικανότητάς τους να απορροφούν νερό, έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορες κηπουρικές εργασίες όπως στην προσθήκη εδάφους για την κάλυψη υπόγειων χώρων στάθμευσης. Είναι αρκετά βοηθητικά καθώς απορροφούν την υγρασία μετά από τη βροχή και έχουν τη δυνατότητα να απελευθερώσουν το νερό σε περιόδους ξηρασίας, τροφοδοτώντας έτσι τα φυτά. Παράλληλα, τα ελαφρά αδρανή, λόγω της χαμηλής τους πυκνότητας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην αντικατάσταση αναχωμάτων που έχουν αστοχήσει, καθώς αποτελούν μια πιο σταθερή λύση για κεκλιμένες πλαγιές. Μια ακόμη ιδανική χρήση των ελαφρών αδρανών είναι στη συντήρηση οδικών αξόνων. Επιτυγχάνουν ισχυρότερη σύνδεση με την ασφαλτο σε σχέση με τα συνηθισμένα αδρανή, τα οποία πολλές φορές αποκολλώνται, προκαλώντας ζημιές στα διερχόμενα οχήματα και αφήνοντας ζημιές στο οδόστρωμα[14]. Στη συνέχεια, επιλέχθηκε να αναλυθούν περαιτέρω, τα βασικά ελαφρά αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας.

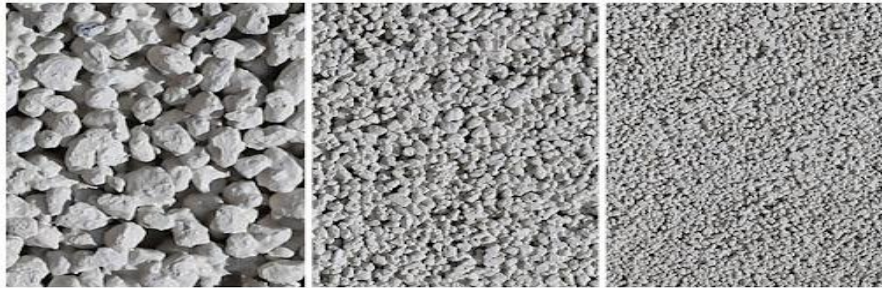
Κίσηρης

Η κίσηρης ή ελαφρόπετρα είναι πέτρωμα χημικά αδρανές, ηφαιστειακής προέλευσης που υπάρχει σε διάφορα μέρη του κόσμου. Έχει πυκνότητα $0,25 \text{ gr/cm}^3$ και ανοιχτό ή λευκό χρώμα. Στην **Εικόνα 1.1** παρουσιάζονται τρία διαφορετικά κλάσματα ελαφρόπετρας. Στην Ελλάδα, η παραγωγή της γίνεται αποκλειστικά από το ορυχείο της νησίδας Γυαλί, κοντά στη Νίσυρο[15]. Το 2019, η Ελλάδα ήταν ένας από του δύο μεγαλύτερους παραγωγούς παγκοσμίως μαζί με την Τουρκία.

Η ελαφρόπετρα δημιουργείται από τη βίαιη εκτόξευση υπερσυμπιεσμένου και υπέρθερμου πετρώματος από ένα ηφαίστειο. Οφείλει τη σπογγώδη διαμόρφωσή της, και ως εκ τούτου και το αυξημένο πορώδες της, ακριβώς σε αυτή την ταχεία ψύξη και αποσυμπίεση που υφίσταται το πέτρωμα. Αποτελεί ένα φυσικό ελαφροαδρανές το οποίο παρά το μειωμένο βάρος του, είναι αρκετά ισχυρό ώστε να χρησιμοποιείται στην παραγωγή ελαφροσκυροδέματος.

Οι ιδιότητες αυτού του υλικού το έχουν καταστήσει ευρέως διαδεδομένο στον τομέα των κατασκευών εδώ και αιώνες. Λόγω της χαμηλής πυκνότητας που διαθέτει, η αντικατάσταση των χονδρόκοκκων αδρανών με ελαφρόπετρα οδηγεί στη μείωση του βάρους του σκυροδέματος και κατ' επέκταση στη σημαντική μείωση του βάρους των κατασκευών. Η ελαφρόπετρα διαθέτει μεγάλη απορροφητικότητα σε νερό λόγω του πορώδους της, για αυτό το λόγο προτείνεται ο προκορεσμός της σε νερό για ένα 24ωρο

πριν τη χρήση της. Παράλληλα η ελαφρόπετρα έχει θερμομονωτικές ιδιότητες[16],[17],[18],[19].



Εικόνα 1.1 Διαφορετικά κλάσματα ελαφρόπετρας[20]

Περλίτης

Η ονομασία περλίτης αποτελεί έναν κοινό όρο για φυσικά πυριγενή ηφαιστειακά πετρώματα τα οποία δημιουργούνται από την απότομη ψύξη και στερεοποίηση ηφαιστειακής λάβας, παγιδεύοντας νερό στη μάζα τους. Αυτό που ξεχωρίζει τον περλίτη από τα υπόλοιπα ηφαιστειακά γυαλιά, είναι η ιδιότητά του να διογκώνεται, αυξάνοντας από 5 έως 20 φορές τον αρχικό του όγκο, όταν θερμανθεί γρήγορα σε θερμοκρασίες μεταξύ 900°C και 1200°C[21]. Την ικανότητά του αυτή την οφείλει στην ύπαρξη του παγιδευμένου νερού. Είναι ένα υλικό πλούσιο σε πυρίτιο (SiO_2). Τα σωματίδιά του είναι κούφια και πορώδη με αποτέλεσμα να έχει αρκετά χαμηλό βάρος και μονωτικές ιδιότητες. Η φαινόμενη πυκνότητα του περλίτη κυμαίνεται από 0,03 – 0,15 gr/cm^3 και το διογκωμένο υλικό (expanded perlite) έχει λαμπερό λευκό χρώμα λόγω της αντανάκλασης των παγιδευμένων φυσαλίδων[22]. Στην **Εικόνα 1.2** απεικονίζεται η υφή, το χρώμα και το μέγεθος τεσσάρων διαφορετικών κλασμάτων περλίτη. Παράγεται σε μεταλλευτικά ορυχεία σε όλο τον κόσμο, με την Ελλάδα να βρίσκεται μέσα στις 6 χώρες που αντιπροσωπεύουν το 97% της παγκόσμιας παραγωγής[23].

Μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά του περλίτη είναι η χαμηλή του πυκνότητα, η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα συνδυαστικά με την υψηλή θερμική αντοχή και η χημική αδράνεια. Τα προαναφερθέντα, τον κατέστησαν ένα αρκετά δελεαστικό εμπορικά υλικό για χρήση στις κατασκευές, στη γεωργία και όχι μόνο, ήδη από το 1800[24],[25]. Στην κατασκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σαν υποκατάστατο του τσιμέντου και των αδρανών υλικών, όσο και σαν προσθήκη στα γνωστά τσιμεντοειδή υλικά. Ο περλίτης μπορεί να λειτουργήσει ως μονωτικό υλικό και απαντάται επίσης στην πετροχημική και τη γεωργική βιομηχανία[26].



Διαφορετικά κλάσματα διογκωμένου περλίτη

Εικόνα 1.2 Απεικόνιση διαφόρων κλασμάτων διογκωμένου περλίτη[27]

Τέφρα φλοιού ρυζιού (Rice husk ash - RHA)

Το κύριο παραπροϊόν μιας μονάδας παραγωγής ρυζιού είναι ο φλοιός (Rice Husk-RH), που βασικά συστατικά του αποτελούν το οξείδιο του πυριτίου και ο άνθρακας. Με τον όρο RHA (Rice Husk Ash) περιγράφονται όλοι οι τύποι τέφρας που παράγονται με την καύση του RH. Ο φλοιός ρυζιού έχει ασυνήθιστα υψηλό ποσοστό τέφρας σε σύγκριση με τα άλλα καύσιμα βιομάζας και όταν αποτεφρώνεται, παράγει 17% – 20% RHA, το οποίο είναι ένα ελαφρύ, ογκώδες και αρκετά πορώδες υλικό με πυκνότητα περίπου 0,18 – 0,20 gr/cm³. Υπάρχουν δύο τύποι RHA, η τέφρα φλοιού λευκού ρυζιού (WRHA) και η τέφρα φλοιού μαύρου ρυζιού (BRHA), και προκύπτουν ανάλογα με το αν η καύση του RH είναι πλήρης ή ημιτελής[28]. Η μορφή του υλικού πριν και μετά την καύση, παρουσιάζεται στην **Εικόνα 1.3**.

Η σύνθεση καθώς και οι φυσικοχημικές ιδιότητες του RHA μπορεί να εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες αλλά ως επί το πλείστον το ποσοστό πυριτίου (SiO_2) στην τέφρα κυμαίνεται μεταξύ 80% και 99%[28]. Πρακτικά, οι κατηγορίες της παραγόμενης τέφρας ποικίλουν ανάλογα με την τεχνική της καύσης. Το οξείδιο του πυριτίου (SiO_2) που περιέχεται στην τέφρα, υποβάλλεται σε μετασχηματισμό της δομής ανάλογα με τις συνθήκες της καύσης (χρόνος, θερμοκρασία κ.α.). Σε περιοχές θερμοκρασιών μεταξύ 5500°C – 9000°C[29] διαμορφώνεται άμορφη σίλικα, ενώ σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες το υλικό μετασχηματίζεται και αλλάζει κρυσταλλική δομή. Αυτές οι κατηγορίες οξειδίου του πυριτίου (SiO_2) έχουν διαφορετικές ιδιότητες και σε κάθε περίπτωση είναι σημαντικό να παράγεται υλικό με κατάλληλα χαρακτηριστικά για την αντίστοιχη χρήση για την οποία προορίζεται.

Το συγκεκριμένο υλικό διαθέτει μικρό ειδικό βάρος και μεγάλη ειδική επιφάνεια. Έχει απορροφητικές και μονωτικές ιδιότητες και είναι πολύ χρήσιμο σε αρκετές βιομηχανικές εφαρμογές. Παράλληλα η RHA είναι εμπλουτισμένη σε σίλικα και αποτελεί μια οικονομική πρώτη ύλη για την παραγωγή καθαρής σίλικας. Στις κατασκευές χρησιμοποιείται είτε ως ελαφρύ αδρανές ή ως συμπληρωματικό υλικό τσιμέντου στο σκυρόδεμα. Για κάθε τέτοιο υλικό η ποζολανική ιδιότητα είναι πολύ σημαντική, κάτι που έχει αποδειχθεί ότι η τέφρα φλοιού ρυζιού κατέχει σε υψηλό βαθμό λόγω της παρουσίας του άμορφου πυριτίου[29],[30],[31].



(a)



(b)

Εικόνα 1.3 (a) Τέφρα φλοιού ρυζιού – Rice husk ash και (b) Φλοιός ρυζιού – Rice husk[32]

2 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

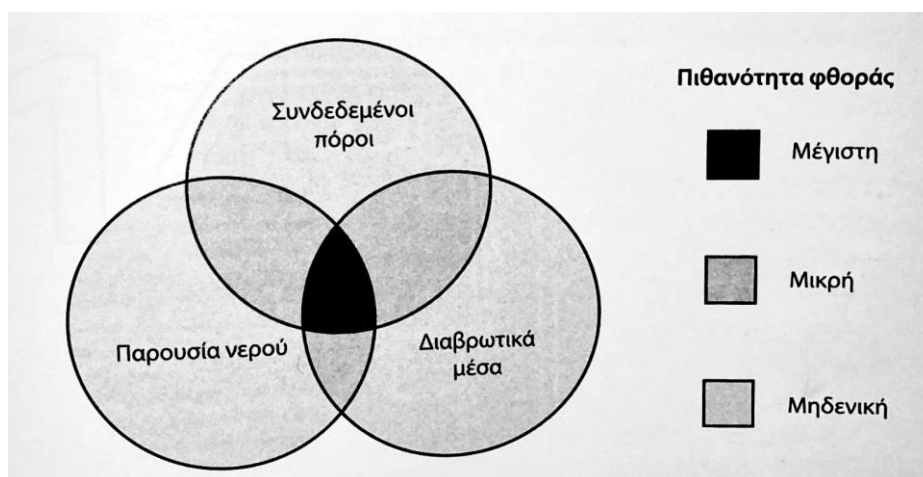
2.1 Γενικά

Ο όρος ανθεκτικότητα υποδηλώνει τη δυνατότητα του σκυροδέματος να διατηρεί την αντοχή και τη λειτουργικότητά του στην κατασκευή, για όσο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα γίνεται. Παράλληλα, αναφέρεται στην ικανότητα του υλικού να μη φθείρεται και να ανθίσταται στις βλαβερές επιδράσεις που δέχεται από το περιβάλλον λειτουργίας της κατασκευής, χωρίς να χάνει τις μηχανικές και φυσικές του ιδιότητες κάτω από ένα όριο. Η φθορά είναι το αποτέλεσμα των φυσικών και χημικών δράσεων που συμβαίνουν μεταξύ των συστατικών του σκυροδέματος και των διαβρωτικών μέσων που ενυπάρχουν στο περιβάλλον στο οποίο εκτίθεται. Η μελέτη των φαινομένων που προκαλούν τη φθορά είναι σύνθετη αλλά η κατανόησή τους μας οδηγεί στην αναγωγή τους σε παράγοντες ανθεκτικότητας.

Σύμφωνα με τη γενική άποψη της ερευνητικής κοινότητας, προκύπτουν τρεις βασικοί παράγοντες που ρυθμίζουν την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος:

- η παρουσία συνδεδεμένων πόρων
- η παρουσία νερού
- η έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον[3]

Στο **Σχήμα 2.1**, αποτυπώνεται η σχέση αλληλεξάρτησης μεταξύ των τριών παραγόντων. Γίνεται κατανοητό ότι ακόμη και ένας από αυτούς τους παράγοντες να απουσιάζει, η πιθανότητα φθοράς μειώνεται σημαντικά έως και εξαλείφεται.



Σχήμα 2.1 Βασικοί παράγοντες ανθεκτικότητας[3]

Θέλοντας να εξετάσουμε, συνολικά και συνοπτικά, την έννοια της ανθεκτικότητας, μπορούμε να πούμε ότι η μακροβιότητα μιας κατασκευής και οι φθορές που θα αποκτήσει έχουν άμεση σχέση με α) το πορώδες και τη διαπερατότητα του σκυροδέματος, β) τις περιβαλλοντικές συνθήκες και γ) τις φυσικές, μηχανικές και χημικές επιδράσεις. Η διαπερατότητα καθορίζεται από παραμέτρους όπως τη σύσταση του τσιμέντου, το λόγο νερού/τσιμέντου, τη συμπίκνωση και τη συντήρηση του σκυροδέματος και την ύπαρξη ρωγμών. Η παρουσία διαβρωτικών μέσων στο νερό, η θερμοκρασία και το ποσοστό υγρασίας, είναι παράγοντες που διαμορφώνουν τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Στις

μηχανικές επιδράσεις συγκαταλέγονται τα επιβαλλόμενα φορτία και παραμορφώσεις όπως ενδεικτικά η συστολή ξήρανσης, ο ερπυσμός, ο σεισμός, η διαφορική καθίζηση κ.α. Μηχανικές φθορές, όπως η απότριψη και η υδροφθορά, καθώς και ακραίες θερμοκρασίες, όπως η πυρκαγιά και ο παγετός, αποτελούν τις φυσικές επιδράσεις. Χημικές ή αλλιώς βιολογικές, είναι οι επιδράσεις που σχετίζονται με τα άλατα, τις βάσεις, τα οξέα και τα βακτηρίδια[3].

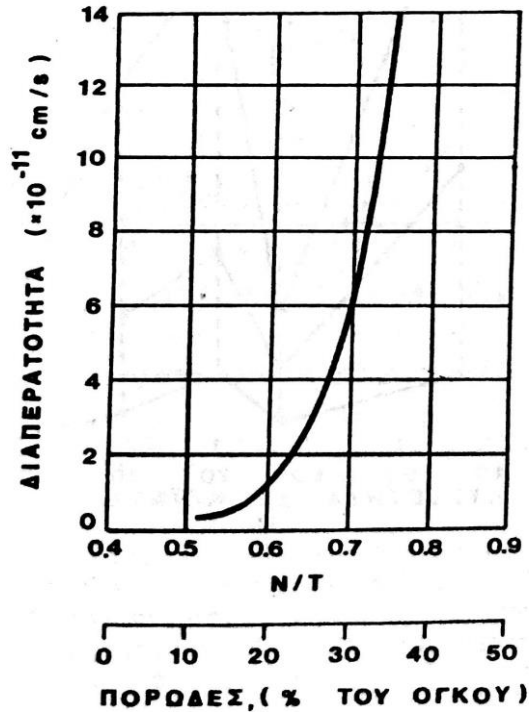
Όπως έγινε ήδη κατανοητό, οι μηχανισμοί φθοράς και κατ' επέκταση και οι αντίστοιχοι παράγοντες ανθεκτικότητας του σκυροδέματος, αποτελούν ένα πολύπλευρο θέμα για να εξετάσει κανείς. Για αυτό και στη συνέχεια αναπτύσσονται κυρίως τα φαινόμενα που είναι συναφή με το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

2.2 Διαπερατότητα

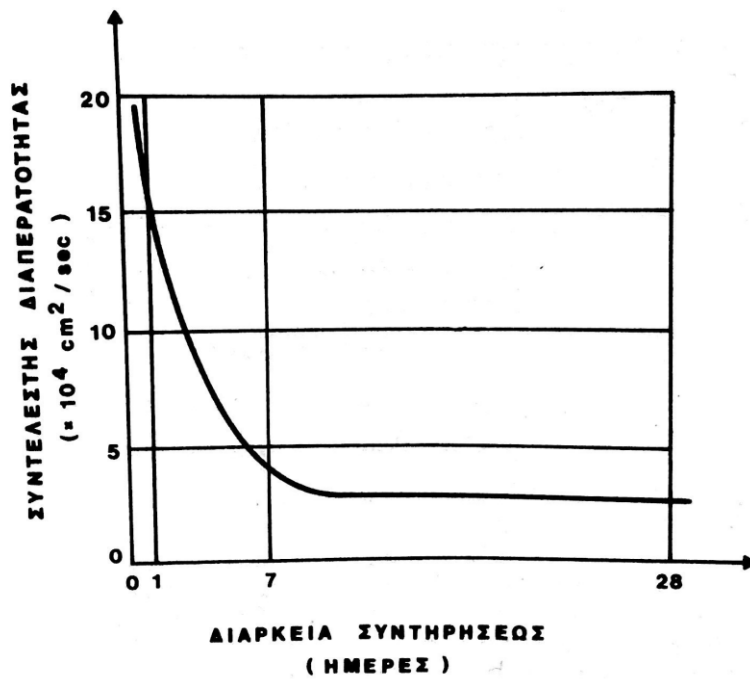
Η διείσδυση ενός αερίου ή ενός υγρού σε ένα πορώδες στερεό σώμα, γίνεται είτε με ροή είτε με διάχυση, και ονομάζεται διαπερατότητα. Αποτελεί έναν από τους παράγοντες που καθορίζουν την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, μαζί με τον όγκο, το μέγεθος και το είδος των πόρων[33]. Οι παράμετροι που επηρεάζουν τη διαπερατότητα είναι οι εξής:

- Η σύσταση του τσιμέντου. Ο τύπος του τσιμέντου που θα χρησιμοποιηθεί έχει σημαντική επίδραση στη διαπερατότητα αλλά και σε άλλες ιδιότητες του σκυροδέματος. Παράλληλα, με την αύξηση της ποσότητας του τσιμέντου, μειώνεται αντίστοιχα και η διαπερατότητα. Πιο συγκεκριμένα, για περιεχόμενο τσιμέντο μεγαλύτερο από 300 kg/m^3 και συνδυαστικά με επιμελή συντήρηση, το σκυρόδεμα εμφανίζει μικρή διαπερατότητα[3]
- Ο λόγος νερού/τσιμέντου. Σε περιπτώσεις όπου ο N/T ξεπερνά το 0,6, παρουσιάζεται μεγάλη αύξηση της διαπερατότητας λόγω της αύξησης στο μέγεθος και στον αριθμό των τριχοειδών πόρων
- Το πορώδες. Το μέγεθος, η κατανομή και ο βαθμός κορεσμού των πόρων του σκυροδέματος επηρεάζουν αρκετά τη διαπερατότητά του
- Η συντήρηση. Η διαδικασία με την οποία εξασφαλίζεται η διατήρηση των επιπέδων υγρασίας και θερμοκρασίας σε ευνοϊκά επίπεδα, κατά την περίοδο των αντιδράσεων ενυδάτωσης. Σε γενικές γραμμές ένας χρόνος συντήρησης 7 ημερών θεωρείται ικανοποιητικός, ασχέτως του λόγου N/T
- Παρουσία ρωγμών. Οι ρωγμές διευκολύνουν τη διείσδυση επιβλαβών ουσιών στο εσωτερικό του σκυροδέματος και προς τον οπλισμό. Η ύπαρξή τους μπορεί να οφείλεται σε φυσικά, χημικά, θερμικά ή κατασκευαστικά αίτια

Στα **Σχήματα 2.2** και **2.3**, παρουσιάζεται ποσοτικά η επίδραση του πορώδους, του λόγου N/T και της διάρκειας συντήρησης του σκυροδέματος στη διαπερατότητά του.



Σχήμα 2.2 Επίδραση του λόγου N/T και του πορώδους, στη διαπερατότητα του σκυροδέματος[34]



Σχήμα 2.3 Επιρροή της διάρκειας συντήρησης του σκυροδέματος στο συντελεστή διαπερατότητας έναντι διείσδυσης οξυγόνου[35]

2.2.1 Πορώδες – Συνδεδεμένοι πόροι

Το σκυρόδεμα δεν είναι υλικό απόλυτα συμπαγές και πλήρες, αλλά περιέχει ένα πλήθος από κοιλότητες, μακροσκοπικές και μικροσκοπικές. Οι κοιλότητες αυτές ονομάζονται κενά ή πόροι, καθώς δεν περιέχουν στερεό υλικό αλλά μπορεί να είναι γεμάτες με αέρα ή νερό. Στο σύνολό τους αποτελούν το πορώδες του σκυροδέματος.

Με βάση την προέλευσή τους, οι πόροι αυτοί χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- i. Πόροι των αδρανών του σκυροδέματος
- ii. Πόροι που προκύπτουν από τον εγκλεισμό φυσαλίδων αέρα στη μήτρα κονιάματος
- iii. Πόροι ή τριχοειδή κενά που δημιουργούνται μετά την εξάτμιση του πλεονάζοντος νερού από το σκυρόδεμα
- iv. Κοιλότητες μεταξύ της πάστας τσιμέντου και των αδρανών που οφείλονται είτε στη συστολή του κονιάματος, είτε στην κακή πρόσφυση είτε στο φαινόμενο της εξίδρωσης
- v. Κοιλότητες μεγάλου μεγέθους που προκύπτουν λόγω κακής συμπίκνωσης
- vi. Τριχοειδή κενά δημιουργούμενα μετά τις μικρορηγματώσεις λόγω της συστολής του μίγματος ή της εξωτερικής καταπόνησης[2]

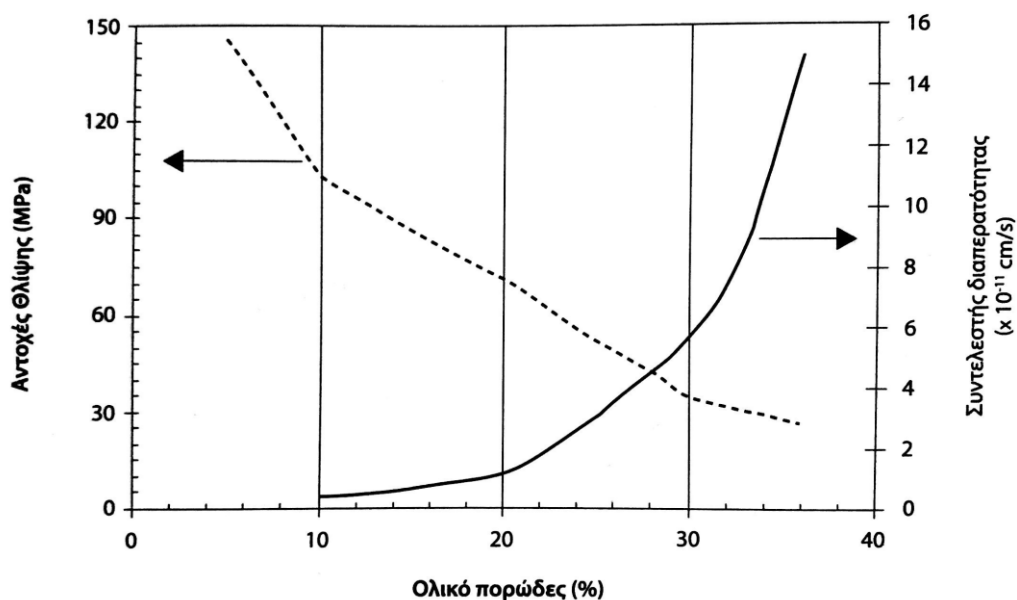
Οι τιμές του συνολικού πορώδους στο σκυρόδεμα κυμαίνονται μεταξύ 8% και 25%, παρόλα αυτά, τα αριθμητικά μεγέθη μόνα τους δεν προσφέρουν επαρκείς πληροφορίες για τη μορφή των πόρων, το μέγεθος, την κατανομή τους μέσα στο σκυρόδεμα και γενικότερα το είδος τους. Τα στοιχεία αυτά είναι που καθορίζουν τη συμπεριφορά του υλικού και τον βαθμό διείσδυσης του νερού. Το πορώδες, ως παράγοντας επίδρασης στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, επιδρά σε πολλές ιδιότητές του όπως η χρόνια συστολή, ο ερπυσμός, η υδατοστεγανότητα και υδατοαπορροφητικότητα και λειτουργεί σαν το φορέα του νερού στην περίπτωση του παγετού[2].

Μια ακόμη χρήσιμη κατηγοριοποίηση των πόρων είναι αυτή που τους διαχωρίζει σε τρία διαφορετικά είδη. Οι κλειστοί πόροι βρίσκονται διάσπαρτοι μέσα στη μάζα του σκυροδέματος και δεν είναι προσπελάσιμοι ούτε από τον αέρα αλλά ούτε και από το νερό. Τέτοιου είδους πόροι αποτελούν αυτοί που δημιουργούνται από τη χρήση αερακτικών. Οι ανοιχτοί πόροι είναι εκείνοι που διασχίζουν τη σκληρυμένη μάζα του υλικού. Ξεκινούν από την επιφάνεια και καταλήγουν ξανά στην επιφάνεια, επιτρέποντας έτσι τη διείσδυση ή και την προσπέλαση του νερού, των διαλυμάτων, με ό,τι αυτά περιέχουν, και των αερίων. Τέλος, υπάρχουν οι ανοιχτοί πόροι στο ένα άκρο, οι οποίοι ξεκινούν επίσης από την επιφάνεια με τη διαφορά ότι καταλήγουν στο εσωτερικό της σκληρυμένης μάζας. Επιτρέπουν μέχρι ένα βαθμό την προσπέλασή τους, αλλά αυτός καθορίζεται από το σχήμα τους και τη διάμετρό τους[33].

Από τα ανωτέρω, γίνεται αντιληπτό το πόσο σημαντική είναι η επίδραση του πορώδους στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, και πιο συγκεκριμένα το πόσο σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η διάμετρος των πόρων, το σχήμα τους και το είδος τους στην προσπελασιμότητα του υλικού από τα διάφορα ρευστά. Η ηλικία ασφαλούς χρήσης του σκυροδέματος μπορεί να ποικίλλει από 15 έτη έως και άνω των 100, ανάλογα με το βαθμό που έχει εξασφαλιστεί ότι δεν υπάρχουν συνδεδεμένοι πόροι στο σκυρόδεμα ώστε να επιτραπεί η διείσδυση βλαπτικών ουσιών.

Είναι γνωστό ότι για το ίδιο ολικό πορώδες, όσο μειώνεται το μέγεθος των πόρων, και κατ' επέκταση αυξάνεται το πλήθος τους για τον ίδιο όγκο, και όσο περισσότερο ομοιόμορφα είναι κατανεμημένοι στη μάζα του σκυροδέματος, με σχήμα που πλησιάζει το

σφαιρικό, τόσο βελτιώνονται οι ιδιότητές του και η ανθεκτικότητά του. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 2.4, αποτυπώνεται η συσχέτιση της αντοχής σε θλίψη και της διαπερατότητας με το πορώδες.



Σχήμα 2.4 Σχέση θλιπτικής αντοχής και διαπερατότητας με το ολικό πορώδες[3]

Μερικές πρακτικές και παράγοντες που συμβάλλουν στη μείωση της διαπερατότητας του πορώδους του σκυροδέματος είναι οι εξής:

1. η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών
2. η ελάττωση του νερού και κατ' επέκταση και των πόρων που δημιουργούνται από την εξάτμισή του
3. η καλή ποιότητα και η καθαρότητα των αδρανών ώστε να εξασφαλίζεται καλύτερη πρόσφυση με την πάστα τσιμέντου
4. η αποτελεσματική συμπύκνωση του νωπού σκυροδέματος
5. η καλή συντήρηση για την αποφυγή ρηγματώσεων κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης[3]

2.2.2 Η παρουσία νερού ως παράγοντας φθοράς

Το νερό έχει σημαντικό ρόλο σε όλα τα στάδια ζωής του σκυροδέματος, και οι τρόποι που μπορεί να επηρεάσει την ανθεκτικότητά του υλικού είναι αρκετοί. Μια από τις αρχικές χρήσεις του στην πορεία του σκυροδέματος, είναι ως νερό ανάμιξης αλλά και ως περιεχόμενη υγρασία στα αδρανή. Ο λόγος N/T αλλά και το επίπεδο κορεσμού των αδρανών, είναι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν αρκετές ιδιότητες του σκυροδέματος, και κατ' επέκταση και την ανθεκτικότητά του.

Παράλληλα, το νερό παίζει σημαντικό ρόλο κατά την ενυδάτωση του σκυροδέματος και την πρόιμη συντήρησή του, που αν είναι ανεπαρκής, μπορεί να επηρεάσει εξίσου την τελική ανθεκτικότητά του μίγματος. Σε δεύτερο χρόνο, και μετά τη σκλήρυνση του

σκυροδέματος, το νερό διευκολύνει τη διείσδυση επιβλαβών ουσιών (π.χ. χλωριούχα άλατα, θειικά άλατα) στο εσωτερικό της μάζας του σκυροδέματος, καθώς αποτελεί έναν πολύ καλό φυσικό διαλύτη. Αυτές οι ουσίες δύνανται να προκαλέσουν στο σκυρόδεμα τοπικές ζημιές αλλά και πιο εκτεταμένες, φτάνοντας μέχρι και τη διάβρωση του εσωτερικού οπλισμού.

Τέλος, η παρουσία του νερού στις εσωτερικές κοιλότητες του σκυροδέματος, και η παραμονή του εκεί κατά την έκθεση του υλικού σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες εσωτερικές αυξομειώσεις όγκου και σε ρηγματώσεις. Μειώνεται έτσι η αντίσταση του υλικού έναντι προσβολής από παγετό.

2.2.3 Τριχοειδής απορρόφηση

Η παράμετρος, η οποία θεωρείται ότι εκφράζει την ταχύτητα διείσδυσης του νερού εντός του σκυροδέματος και δίνει έτσι μια καλή πρόβλεψη της ανθεκτικότητάς του, είναι η τριχοειδής απορρόφηση (sorptivity). Συγκεκριμένα, δεδομένου ότι η παρουσία του νερού σε υγρή μορφή είναι ένας από τους κυριότερους παράγοντες φθοράς στις κατασκευές από σκυρόδεμα, η τριχοειδής απορρόφηση είναι ο πιο συνηθής μηχανισμός διείσδυσης του νερού μέσα στα δομικά υλικά. Ο συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης είναι μια παράμετρος που χαρακτηρίζει τα δομικά υλικά καθώς εκφράζει το ρυθμό ρόφησης υγρασίας μέσω των τριχοειδών πόρων τους. Ο συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης, δύνανται να προσδιορισθεί μέσω διαφορετικών πρότυπων δοκιμών, μια από τις οποίες χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία και περιγράφεται στο πειραματικό μέρος.

Η τριχοειδής απορρόφηση (ή αλλιώς προσρόφηση μέσω τριχοειδών πόρων), αποτελεί έναν από τους συνηθέστερους μηχανισμούς προσβολής σε περιπτώσεις εναλλασσόμενων κύκλων διαβροχής/ξήρανσης της επιφάνειας του σκυροδέματος (ειδικά σε περιπτώσεις στεγνών επιφανειών), αλλά δεν μπορεί από μόνη της να δημιουργήσει πρόβλημα στον οπλισμό. Μειώνει ωστόσο τη διαθέσιμη απόσταση που χρειάζεται να διανυθεί από τις διαβρωτικές ουσίες που βρίσκονται διαλυμένες στο νερό, ώστε να φτάσουν στη στάθμη του οπλισμού. Παράλληλα, τα τριχοειδή κενά σχετίζονται με το πορώδες του σκυροδέματος, όπως έχει αναφερθεί ήδη, και κατ' επέκταση μπορούν να επηρεάσουν τη συνολική ανθεκτικότητα του υλικού.

2.3 Χλωριόντα

Ένας από τους μεγαλύτερους κινδύνους που διατρέχει ο οπλισμός του σκυροδέματος είναι η προσβολή από τη δράση μεγάλης ποσότητας χλωριόντων, κάτι που δύνανται να μειώσει δραματικά την ωφέλιμη διάρκεια ζωής μια κατασκευής. Τα προβλήματα που ανέκυψαν από το φαινόμενο αυτό ήταν τόσο έντονα ώστε, μετά το 1990, άρχισε μια διεθνής εντατικοποίηση της έρευνας σχετικά με θέματα προστασίας των κατασκευών από την έκθεση σε χλωριόντα[33].

2.3.1 Πηγές χλωριόντων

Τα χλωριόντα μπορούν να εισαχθούν στο σκυρόδεμα κατά τη φάση παρασκευής ή να διεισδύσουν σε αυτό από το εξωτερικό περιβάλλον, κάποια στιγμή στη διάρκεια ζωής του.

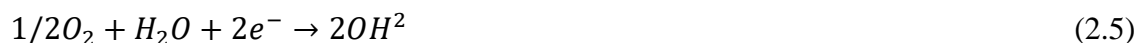
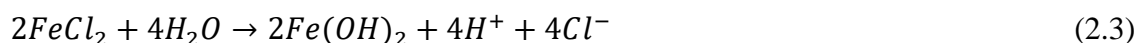
Στην κατηγορία των χλωριόντων που εισάγονται ήδη από το στάδιο της παρασκευής του σκυροδέματος, ανήκουν αυτά που προστίθενται σκόπιμα με επιταχυντές, όπως το χλωριούχο ασβέστιο. Επίσης, η χρήση θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού κατά την ανάμιξη του υλικού αποτελεί μια ακόμη τέτοια περίπτωση. Τέλος, τέτοιου είδους χλωριόντα μπορεί

να προέρχονται και από μολυσμένα υλικά του εδάφους, δηλαδή από αδρανή των οποίων δεν έχει προηγηθεί επαρκής καθαρισμός πριν τη χρήση τους.

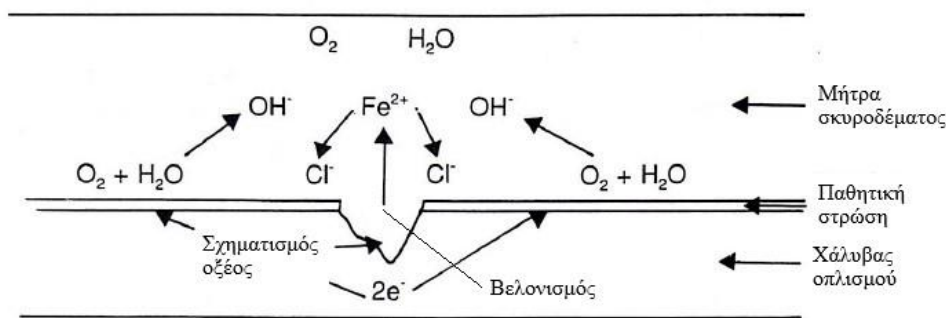
Ποσότητες χλωριόντων μπορεί να διεισδύσουν στο σκυρόδεμα από εξωτερικές πηγές με διάφορους τρόπους. Ένας από αυτούς είναι μέσω του ψεκασμού ή της αερομεταφοράς σταγονιδίων θαλασσινού νερού σε ένα δομικό στοιχείο ή και με την απ' ευθείας επαφή του με αυτό. Τα αντιπαγωτικά άλατα που χρησιμοποιούνται στους αυτοκινητοδρόμους μπορούν να αποτελέσουν μια επιπλέον πηγή. Ωστόσο, ακόμη και η ίδια η χρήση της κατασκευής μπορεί να αποτελεί παράγοντα κινδύνου, ειδικά αν στα πλαίσια αυτής γίνεται χρήση χημικών ουσιών που περιέχουν Cl^- [33].

2.3.2 Μηχανισμός προσβολής

Τα χλωριόντα προσβάλουν το σκυρόδεμα μέσω ενός αποπαθητικοποιητικού μηχανισμού ο οποίος λειτουργεί ως εξής. Αρχικά, τα χλωριόντα προσβάλουν την παθητική στρώση, χωρίς όμως αυτό να έχει ως επακόλουθο μια γενικευμένη πτώση του pH. Ως παθητική στρώση νοείται ένα πυκνό, μη διαπερατό φιλμ, του οποίου η δημιουργία πυροδοτείται από τη μεταβολή της τιμής του pH, και αναπτύσσεται γύρω από τον οπλισμό [33]. Εφόσον αυτή του η δημιουργία είναι ολοκληρωμένη και διατηρηθεί, δύναται να αποτρέψει τη διάβρωση του οπλισμού από εξωγενείς παράγοντες. Κατά τη διαδικασία της προσβολής από χλωριόντα, το σκυρόδεμα συνήθως διατηρεί την αλκαλικότητά του και το παθητικό στρώμα παραμένει σταθερό, αλλά τα χλωριόντα μπορούν να το διαπερνούν όταν βρίσκονται σε υψηλή συγκέντρωση. Στη συνέχεια παρατίθενται οι **Αντιδράσεις 2.1** έως **2.5**, οι οποίες περιγράφουν την ηλεκτροχημική αντίδραση των χλωριόντων.



Με τη βοήθεια του **Σχήματος 2.5**, αποδίδεται πιο κατανοητά η πορεία των χλωριόντων και οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα.



Σχήμα 2.5 Προσβολή της παθητικής στρώσης από χλωριόντα[33]

Όπως φαίνεται, τα χλωριόντα δεν καταναλώνονται κατά τη φάση της αντίδρασης, αλλά ανακυκλώνονται, παραμένοντας διαθέσιμα για να προχωρήσουν στην οξείδωση του οπλισμού. Στην περίπτωση που φτάσουν σε αυτό το σημείο, η διάβρωση που θα πραγματοποιήσουν στον οπλισμό είναι τοπική και ονομάζεται διάβρωση κατά βελονισμό. Η αντίστοιχη μείωση της διατομής του οπλισμού θα είναι και αυτή τοπική, καθώς θα δημιουργηθεί ένα τοπικό αδύνατο σημείο στο χάλυβα. Ο εντοπισμός τέτοιου είδους βλαβών είναι δύσκολος και ακόμη περισσότερο σε περιπτώσεις κατασκευών που είναι εξ' ολοκλήρου βυθισμένες στο νερό[33].

Πολύ σημαντικός παράγοντας για την έναρξη αλλά και για την ταχύτητα με την οποία συντελείται η οξείδωση του οπλισμού αποτελεί η διαθεσιμότητα σε οξυγόνο και υγρασία. Για την αρχική διάτρηση του παθητικού στρώματος είναι αρκετή η υψηλή συγκέντρωση χλωριόντων. Αφότου συμβεί όμως αυτό, είναι απαραίτητη η ύπαρξη υγρασίας αλλά και οξυγόνου για να μπορέσουν να πραγματοποιηθούν οι αντιδράσεις των **Αντιδράσεων 2.3** έως **2.5**. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι, η διάβρωση του οπλισμού σε σκυρόδεμα που είναι μόνιμα βυθισμένο σε νερό ή μόνιμα ξηρό δεν θα πραγματοποιηθεί ποτέ. Αντίθετα, το μεγαλύτερο κίνδυνο διατρέχουν κατασκευές των οποίων οι επιφάνειες υπόκεινται σε εναλλασσόμενους κύκλους διαβροχής/ξηράνσης.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να επισημανθεί ότι δεν είναι όλα τα χλωριόντα διαθέσιμα ώστε να οδηγήσουν στη διάβρωση του οπλισμού. Υπάρχει μια σημαντική ποσότητα των αρχικών χλωριόντων που δεσμεύεται από τα συστατικά του σκυροδέματος. Κατά συνέπεια, μόνο τα χλωριόντα που παραμένουν ελεύθερα μπορούν να λάβουν μέρος στις αντιδράσεις τις οποίες έχουμε ήδη αναφέρει. Γενικά ισχύει:

$$\text{Συνολικά χλωριόντα}(Cl_{total}) = \text{δεσμευμένα χλωριόντα}(Cl_{bound}) + \text{ελεύθερα χλωριόντα}(Cl_{free})$$

Υπάρχουν δύο τρόποι με τους οποίους δεσμεύονται τα χλωριόντα, φυσικώς και χημικώς. Πιο συγκεκριμένα τα ασβεστοαργιλικά ένυδρα ($C_xA_yH_z$) της τσιμεντόπαστας, όπως και οι αργλικές φάσεις του τσιμέντου (C_3A , C_4AF), έχουν τη δυνατότητα να δεσμεύουν μια ποσότητα των χλωριόντων που βρίσκεται στο διάλυμα των πόρων[33].

Θα πρέπει να αποσαφηνιστεί ότι, οι προαναφερθέντες μηχανισμοί δρουν με σημαντικά αργούς ρυθμούς και κατά συνέπεια, η μελέτη του φυσικού φαινομένου δύναται να γίνει μόνο με τη βοήθεια επιταχυνόμενων μεθόδων, όπως αυτή που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Αναφορικά με το όριο πέρα από το οποίο η συγκέντρωση των χλωριόντων ξεκινά τη διαβρωτική της δράση, αυτό εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Για παράδειγμα, σε ένα πλέον δυσμενές σενάριο, μπορεί να παρατηρηθεί οξείδωση του οπλισμού για

συγκέντρωση χλωριόντων μόλις 0,2%, όταν η ποιότητα του σκυροδέματος δεν είναι καλή και υπάρχει διαθεσιμότητα σε οξυγόνο και νερό. Παρόλα αυτά, ως κρίσιμη τιμή έχει επικρατήσει η συγκέντρωση 0,4% κ.β. του τσιμέντου και η αντίστοιχη τιμή 0,6 για το λόγο Cl/OH . Πάντως, πολλά μοντέλα υπολογισμού του χρόνου ζωής των κατασκευών, χρησιμοποιούν την τιμή 1% κ.β[33],[36].

2.3.3 Κανονιστικό πλαίσιο και μέτρα προστασίας

Σε πολλές χώρες του κόσμου, η διείδυση των χλωριόντων αποτελεί ένα βασικό πρόβλημα για το σκυρόδεμα. Κατασκευές όπως οδικές γέφυρες και λιμενικές εγκαταστάσεις, εκτίθενται σε περιβάλλοντα με μεγάλη συγκέντρωση χλωριόντων λόγω της χρήσης αλάτων κατά του παγετού αλλά και της διαβροχής από το θαλασσίνο νερό. Παρόλα αυτά, δεν πρέπει να αγνοείται και η ύπαρξη χλωριόντων μέσα στο σκυρόδεμα ήδη από το στάδιο της ανάμιξης. Στην Ελλάδα το πρόβλημα εντοπίζεται σε νησιωτικές περιοχές όπου χρησιμοποιείται υφάλμυρο νερό για την παρασκευή σκυροδέματος. Οι κατηγορίες έκθεσης που έχουν οριστεί, καλύπτουν όλες τις περιπτώσεις κατά τις οποίες το σκυρόδεμα κινδυνεύει λόγω της ύπαρξης χλωριόντων. Αναλύονται συνοπτικά στη συνέχεια.

Χλωριόντα που εισέρχονται στο σκυρόδεμα κατά την παρασκευή του. Τα χλωριόντα αυτής της κατηγορίας έχουν πολύ πιο έντονη δράση από την αντίστοιχη ίσης ποσότητας χλωριόντων, τα οποία όμως θα εισέρχονταν στο σκυρόδεμα από το εξωτερικό περιβάλλον[37]. Τα όρια της περιεκτικότητας για αυτή την κατηγορία χλωριόντων, σύμφωνα με το πρότυπο EN 206-1, είναι 1,00% κ.β. του τσιμέντου, για άοπλα σκυροδέματα, 0,40% και 0,20% για οπλισμένα και 0,20% και 0,10% για προεντεταμένα[33].

Κατηγορία έκθεσης XS1 Η συγκεκριμένη κατηγορία, καλύπτει το οπλισμένο και το προεντεταμένο σκυρόδεμα που εκτίθεται σε χλωριόντα από θαλασσίνο νερό, που μεταφέρονται μέσω του αέρα. Δεν καλύπτονται οι περιπτώσεις κατασκευών που έρχονται σε επαφή με θαλασσίνο νερό, απευθείας ή μέσω κυμάτων. Τέτοιες περιπτώσεις αποτελούν οι κατασκευές σε παράκτιες περιοχές, πίσω όμως από τη ζώνη διαβροχής λόγω κυμάτων

Κατηγορία έκθεσης XS2 Η κατηγορία αφορά οπλισμένο και προεντεταμένο σκυρόδεμα που καλύπτεται μόνιμα από θαλασσίνο νερό. Τέτοιου είδους κατασκευές αποτελούν λιμενικά και παράκτια έργα που βρίσκονται αρκετά κάτω από το επίπεδο της επιφάνειας της θάλασσας.

Κατηγορία έκθεσης XS3 Η κατηγορία καλύπτει το οπλισμένο και προεντεταμένο σκυρόδεμα που βρίσκεται στη ζώνη παλίρροιας και στη ζώνη διαβροχής των κυμάτων. Οι συνθήκες αυτές είναι και οι δυσμενέστερες. Συγκεκριμένα τμήματα λιμενικών και παράκτιων κατασκευών υπάγονται σε αυτή την κατηγορία.

Κατηγορία έκθεσης XD1 Καλύπτει το οπλισμένο και προεντεταμένο σκυρόδεμα μέσης εσωτερικής υγρασίας, που δεν είναι ούτε ξηρό ούτε υγρό, και βρίσκεται εκτεθειμένο σε χλωριόντα που μεταφέρονται με τον αέρα αλλά από πηγές διάφορες του θαλασσινού νερού. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν κατασκευές που βρίσκονται κοντά σε μεγάλους αυτοκινητοδρόμους στους οποίους γίνεται χρήση αλάτων τήξεως του πάγου.

Κατηγορία έκθεσης XD2 Καλύπτει το οπλισμένο και προεντεταμένο σκυρόδεμα που είναι μόνιμα υγρό, σπανίως ξηρό, και έρχεται σε επαφή με νερό που περιέχει μεγάλες ποσότητες χλωριόντων από πηγές άλλες από το θαλασσίνο νερό. Τέτοια περίπτωση αποτελούν οι πισίνες.

Κατηγορία έκθεσης XD3 Καλύπτει το οπλισμένο και προεντεταμένο σκυρόδεμα που υποβάλλεται σε εναλλασσόμενους κύκλους διαβροχής/ξήρασης και έρχεται σε επαφή με

νερό που περιέχει χλωριόντα από άλλες πηγές από το θαλασσινό νερό. Τέτοιες περιπτώσεις αποτελούν οι αυτοκινητόδρομοι στους οποίους παρατεταμένα χρησιμοποιούνται άλατα τήξεως του πάγου καθώς και δάπεδα στάθμευσης των αυτοκινήτων που διασχίζουν συχνά τέτοιους αυτοκινητοδρόμους.

Στον Πίνακα 2.1, παρουσιάζονται οι απαιτήσεις του σκυροδέματος με βάση την κατηγορία έκθεσης σε χλωριόντα σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος 2016.

Πίνακας 2.1 Απαιτήσεις για το σκυρόδεμα ανάλογα με την κατηγορία έκθεσης σε χλωριόντα[1]

| Διάβρωση λόγω χλωριόντων | | | | | | | | | |
|--|---|-------------------------------|---------------------------|---|--------|--------|--|--------|---------|
| Κατηγορία έκθεσης | Θαλασσινό νερό | | | | | | Χλωριόντα που δεν προέρχονται από θαλασσινό νερό | | |
| | Τσιμέντα II, III, IV (Εκτός CEM II/B-LL + CEM II/B-L) | | | Τσιμέντα I (+ CEM II/B-LL + CEM II/B-L) | | | | | |
| | XS1 | XS2 | XS3 | XS1 | XS2 | XS3 | XD1 | XD2 | XD3 |
| max N/T | 0,50 | 0,50 | 0,45 | 0,50 | 0,50 | 0,45 | 0,55 | 0,55 | 0,50 |
| min κατηγορία αντοχής | C25/30 | C25/30 | C30/37 | C30/37 | C30/37 | C35/45 | C30/37 | C35/45 | C 35/45 |
| min περιεκτικότητα σε τσιμέντο kg/m ³ | 330 | 330 | 350 | 330 | 330 | 350 | 330 | 330 | 350 |
| min επικάλυψη για ανθεκτικότητα mm | 45 | 45 | 50 | 40 | 40 | 50 | 35 | 40 | 50 |
| Άλλες απαιτήσεις | Σημ.: Παραθαλάσσιο 1,5 km | Σημ.: Μόνιμα μέσα στη θάλασσα | Σημ.: Διαβρεχόμενες ζώνες | | | | | | |

Για την προστασία του οπλισμού των κατασκευών από τον κίνδυνο οξείδωσης, λόγω διεύδυσης των χλωριόντων, προτείνονται διάφορα μέτρα προστασίας επιπλέον των ελάχιστων απαιτήσεων που θέτει ο κανονισμός. Τα μέτρα αυτά χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες.

1. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τα μέτρα προστασίας που αφορούν το σκυρόδεμα και έχουν ως σκοπό τη μείωση της διαπερατότητάς του σε χλωριόντα, ώστε να μην καταφέρουν να φτάσουν στον οπλισμό.

Επιφανειακή προστασία σκυροδέματος

Η προστασία της επιφάνειας του σκυροδέματος με χρήση χρωμάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορες μεθόδους. Με τη μέθοδο του διαποτισμού η επιφάνεια του σκυροδέματος εμποτίζεται με ένα λεπτό στρώμα, χωρίς όμως να καλύπτονται οι πόροι του. Η μέθοδος της σφράγισης της επιφάνειας του σκυροδέματος, δημιουργεί ένα λεπτό στρώμα, το οποίο όμως σφραγίζει μερικά ή ολικά τους πόρους του υλικού. Στην κατηγορία της σφράγισης υπάγονται και οι, διαφορετικού πάχους, επικαλύψεις[38].

Χρήση ποζολανικών υλικών

Τα ποζολανικά υλικά μπορούν να προστεθούν στο σκυρόδεμα είτε ως αντικατάσταση μέρους του τσιμέντου, όπως συμβαίνει με τη χρήση σύνθετων τσιμέντων, ή των αδρανών υλικών. Χάρη στα συγκεκριμένα υλικά, υπάρχει μείωση του πορώδους, και κυρίως του υδατοπερατού πορώδους, λόγω του σχηματισμού δευτερογενών ασβεστοπυριτικών ενύδρων[39]. Παράλληλα, αυξάνουν τον αριθμό δεσμευμένων χλωριόντων. Όλα τα παραπάνω, έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης των χλωριόντων που απαιτείται για τη διάβρωση του οπλισμού.

2. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει μέτρα προστασίας για τον οπλισμό, με σκοπό την επιβράδυνση ή και τη ματαίωση της χημικής διάβρωσής του από τα χλωριόντα.

Καθοδική προστασία

Η αρχή της μεθόδου συνίσταται στην εφαρμογή ηλεκτρικού δυναμικού αντίθετου με το δυναμικό διάβρωσης. Με αυτό, τον τρόπο ο οπλισμός μετατρέπεται σε κάθοδο ενός ηλεκτρολυτικού κελιού χωρίς πλέον να οξειδώνεται. Η πηγή του συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος μπορεί να είναι εξωτερική, και σε αυτή την περίπτωση ονομάζεται καθοδική προστασία με επιβολή εξωτερικού ρεύματος. Διαφορετικά, υπάρχει και η επιλογή της χρήσης μετάλλου με υψηλότερο δυναμικό από αυτό του χάλυβα οπλισμού, και η μέθοδος ονομάζεται καθοδική προστασία με θυσιαζόμενες ανόδους[33]. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η μέθοδος αυτή είναι η μόνη που μπορεί να αναστείλει και να αντιστρέψει το δυναμικό διάβρωσης, αλλά σε περίπτωση αναστολής της προστασίας παρουσιάζεται έντονη διάβρωση[40].

Χρήση ειδικών χαλύβων

Ως ειδικοί χάλυβες λογίζονται οι ανοξειδωτοί χάλυβες ή οι χάλυβες που έχουν καλυφθεί επιφανειακά με ένα λεπτό στρώμα εποξικής ρητίνης προκειμένου να προστατευθούν από τη διάβρωση. Οι ανοξειδωτοί χάλυβες αποτελούν μια πιο αξιόπιστη και μακροπρόθεσμη λύση, παρόλα αυτά έχουν μεγαλύτερο κόστος συγκριτικά με τους χάλυβες με εποξική ρητίνη.

Χρήση αναστολέων διάβρωσης

Οι αναστολείς διάβρωσης είναι χημικές ουσίες οι οποίες όταν βρίσκονται σε επαρκή ποσότητα στην επιφάνεια του χάλυβα, μπορούν να αναστείλουν την οξειδωσή του, χωρίς να επηρεάζουν τις ιδιότητες του ίδιου του υλικού. Οι αναστολείς διάβρωσης είναι υδατικά διαλύματα που περιέχουν τη χημική ουσία που πραγματοποιεί την αναστολή, και προστίθενται στο σκυρόδεμα στη φάση της παρασκευής, συνήθως αναμεμιγμένοι με το νερό ανάμιξης. Η προστασία που προσφέρουν αυτές οι ουσίες μπορεί να συντελείται με το να επηρεάζουν τη διείσδυση των χλωριόντων από το εξωτερικό περιβάλλον και τον τρόπο που αυτά δεσμεύονται, επηρεάζοντας τη συγκέντρωση χλωριόντων που απαιτείται ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία της διάβρωσης, επιδρώντας στην ταχύτητα διάχυσης του οξυγόνου και στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του σκυροδέματος και τέλος, επηρεάζοντας τη χημική σύνθεση του διαλύματος των πόρων του σκυροδέματος[33].

2.4 Παγετός

Για σκυροδέματα που είναι εκτεθειμένα περιστασιακά σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, ο κίνδυνος καταστροφής είναι μεγάλος λόγω της δράσης του παγετού. Το πρόβλημα εστιάζεται στο γεγονός ότι εξαιτίας των χαμηλών θερμοκρασιών, ένα μέρος του νερού που βρίσκεται δεσμευμένο στους πόρους του υλικού παγώνει. Παράλληλα, δημιουργείται πάγος και στα ευαίσθητα αδρανή. Η ψύξη του νερού επιφέρει αύξηση του όγκου του και στην περίπτωση που δεν υπάρχει αρκετός χώρος για να καταλάβει, αρχίζει να αυξάνει τις εφελκυστικές τάσεις στο σκυρόδεμα. Όταν αυτή η εφελκυστική τάση ξεπεράσει την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος τότε η καταστροφή είναι αναπόφευκτη.

2.4.1 Μηχανισμός προσβολής

Ο μηχανισμός προσβολής του σκυροδέματος από τον παγετό είναι αρκετά σύνθετος. Ο σχηματισμός του πάγου ξεκινάει από τους πόρους που βρίσκονται εγγύτερα στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Ακολουθεί η φάση της ψύξης κατά την οποία το νερό παγώνει έως ότου ο πάγος καταλάβει όλο τον διαθέσιμο όγκο. Το νερό που περισσεύει, μαζί με τον εγκλωβισμένο αέρα, πιέζονται στους γειτονικούς πόρους δημιουργώντας ροή στις εσωτερικές κοιλότητες του σκυροδέματος, αυξάνοντας παράλληλα και τη συγκέντρωση των διαλυμένων ουσιών στους πόρους στους οποίους μεταφέρονται. Η αντίσταση σε αυτή τη ροή δημιουργεί υδραυλική πίεση, επιπλέον των εφελκυστικών τάσεων που αναπτύσσονται λόγω της διόγκωσης του παγωμένου νερού.

Όταν έχει καταληφθεί πλέον όλος ο διαθέσιμος χώρος στο εσωτερικό της μάζας σκυροδέματος, και εφόσον έχουν αναπτυχθεί οι μέγιστες δυνατές εφελκυστικές δυνάμεις, ακολουθεί η καταστροφή του σκυροδέματος. Δύναται να εκδηλωθεί με τις ακόλουθες μορφές:

- εσωτερική ρηγμάτωση του σκυροδέματος και επακόλουθη καταστροφή των ακμών του ή αποσύνθεση
- εκτίναξη μικρών όγκων
- αποφλοίωση των επιφανειών

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι η αρχική δημιουργία των ρηγματώσεων στο σκυρόδεμα, επιτρέπει την είσοδο επιπλέον νερού, όταν οι θερμοκρασίες αυξηθούν, δηλαδή κατά τη φάση της απόψυξης. Το επιπλέον αυτό νερό θα παγώσει με τη σειρά του όταν η

θερμοκρασίες μειωθούν ξανά, στη φάση της κατάψυξης, και θα διογκωθεί, δημιουργώντας περισσότερους κρυστάλλους πάγου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της εφαρμοζόμενης κρυσταλλικής πίεσης στο σκυρόδεμα. Έτσι, δημιουργείται ένας επαναλαμβανόμενος κύκλος ψύξης-απόψυξης[33].

2.4.2 Παράγοντες ανθεκτικότητας σκυροδέματος έναντι παγετού

Υπάρχει ένα πλήθος παραμέτρων, από τις οποίες επηρεάζεται η ανθεκτικότητα που θα επιδείξει το σκυρόδεμα απέναντι στην προσβολή από παγετό, και οι οποίες αναπτύσσονται παρακάτω.

Εσωτερική υγρασία σκυροδέματος

Όπως είδαμε και σε προηγούμενη παράγραφο, το νερό διογκώνεται όταν ψύχεται και μπορεί να παρατηρηθεί αύξηση του όγκου του έως και 9%. Όταν αυτό το νερό βρίσκεται δεσμευμένο στους πόρους του σκυροδέματος, διογκώνεται, καταλαμβάνοντας όλο το διαθέσιμο χώρο που υπάρχει. Από το σημείο εκείνο και έπειτα, οι κρυσταλλικές πιέσεις που αναπτύσσονται είναι μεγάλες και οδηγούν στην καταστροφή του υλικού.

Εύκολα κατανοεί κανείς ότι ο βαθμός του κορεσμού των πόρων του σκυροδέματος είναι μείζονος σημασίας στην εξέλιξη αυτής της διαδικασίας. Όσο περισσότερο δεσμευμένο νερό υπάρχει στους πόρους του σκυροδέματος, τόσο μειώνεται ο διαθέσιμος χώρος για εκτόνωση των κρυσταλλικών πιέσεων, αυξάνοντας τον κίνδυνο για ρηγματώση του υλικού. Ο κορεσμός του σκυροδέματος παρατηρείται αν αυτό βρέχεται περιοδικά από νερό ή αν δέχεται νερό υπό πίεση. Γενικά, όσο περισσότερος αέρας υπάρχει διαθέσιμος στο δίκτυο πόρων του σκυροδέματος, τόσο μειώνεται αντίστοιχα η πιθανότητα πρόκλησης ζημιάς λόγω παγετού. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, ο κορεσμός των πόρων του σκυροδέματος σε ποσοστό 90% θεωρείται κρίσιμος για την αντίστασή του έναντι παγετού[37].

Το διαθέσιμο νερό στους πόρους

Ως συνολικό διαθέσιμο νερό στο σκυρόδεμα, λογίζεται το συνολικό νερό της αναμίξεως, δηλαδή το απαραίτητο για την ενυδάτωση του σκυροδέματος, μαζί με το νερό που εισέρχεται στο υλικό από εξωτερικές πηγές. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι το απαραίτητο νερό για την ενυδάτωση του σκυροδέματος υπολογίζεται περίπου στο 40% του βάρους του τσιμέντου. Το νερό πέραν αυτού του ποσοστού, παραμένει ελεύθερο στο εσωτερικό του σκυροδέματος σχηματίζοντας ένα δίκτυο τριχοειδών πόρων.

Όσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα του ελεύθερου νερού στο σκυρόδεμα, τόσο μεγαλύτερος είναι και ο όγκος που θα καταλάβει στην περίπτωση του παγετού, άρα και μεγαλύτερες οι εφελκυστικές τάσεις που θα αναπτυχθούν. Έτσι, η πιθανότητα καταστροφής λόγω παγετού αυξάνεται. Ένας χαμηλός λόγος N/T θα μπορούσε να είναι αρκετά βοηθητικός σε αυτή την περίπτωση, καθώς θα μείωνε την ποσότητα του νερού στο μίγμα αλλά και το πορώδες, με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η είσοδος επιπλέον νερού από εξωτερικές πηγές.

Η δομή των πόρων

Η δομή των πόρων μπορεί να επηρεάσει την αντίσταση έναντι παγετού του σκυροδέματος με δυο διαφορετικούς τρόπους. Αρχικά, το μέγεθος των πόρων καθορίζει το σημείο ψύξης του διαλύματος που περιέχουν. Έτσι, η μετατροπή του διαλύματος σε πάγο,

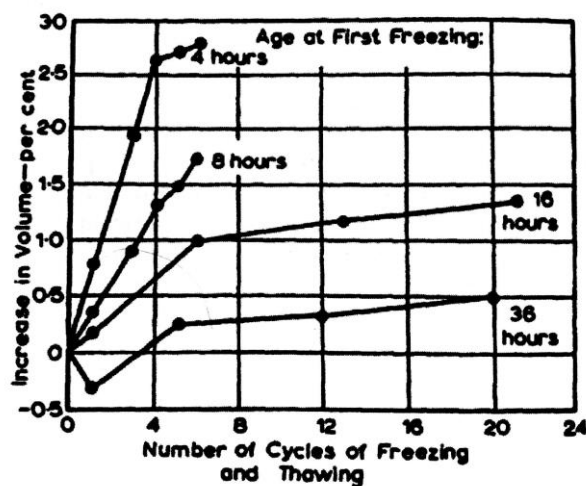
ξεκινάει από τους μεγαλύτερους πόρους και στη συνέχεια προχωράει σε αυτούς με μικρότερη διάμετρο. Είναι χαρακτηριστικό ότι, για θερμοκρασίες υψηλότερες των $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, μόνο τα $2/3$ της συνολικής ποσότητας του νερού μπορούν να μετατραπούν σε πάγο[41].

Παράλληλα, ο όγκος αλλά και η προσβασιμότητα των κενών στα οποία μπορεί να καταφύγει το επιπλέον νερό, επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την αντίσταση σε βλάβη έναντι παγετού. Μελέτες έχουν δείξει ότι, το όφελος από τη μείωση του ελεύθερου νερού, μπορεί να εξαλειφθεί από την ύπαρξη πόρων που δεν επικοινωνούν μεταξύ τους και έτσι δεν επιτρέπουν την μετακίνηση του νερού[42]. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το νερό, αν και λιγότερο, να παραμένει εγκλωβισμένο στις εσωτερικές κοιλότητες του σκυροδέματος και μαζί παραμένει και ο κίνδυνος διόγκωσής του από τον παγετό. Για αυτό θα πρέπει να υπάρχει μια ισορροπία μεταξύ υψηλότερου πορώδους και χαμηλής υδατοπερατότητας.

Η ηλικία του σκυροδέματος

Ανάλογα με την ηλικία του, το σκυρόδεμα μπορεί να είναι πιο ευάλωτο έναντι παγετού. Συγκεκριμένα, το σκυρόδεμα νεαρής ηλικίας είναι πιο επιρρεπές απέναντι στην προσβολή σε παγετό για διάφορους λόγους. Αρχικά, σε αυτό το στάδιο ζωής του υλικού, δεν έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία της ενυδάτωσης, άρα η ποσότητα του ελεύθερου νερού στο εσωτερικό του είναι μεγαλύτερη και υπάρχει κίνδυνος, αν ψυχθεί, να διογκωθεί σε μεγάλο βαθμό προκαλώντας ζημιές. Αντίστοιχα αυξημένο είναι και το πορώδες, ιδιαίτερα το υδατοπερατό, το οποίο μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Παρόλα αυτά, σε νεαρή ηλικία, επιτρέπει περισσότερο νερό να διεισδύσει στο σκυρόδεμα από εξωτερικές πηγές.

Τέλος, κατά τις πρώιμες ηλικίες του, το σκυρόδεμα δεν έχει προλάβει να αναπτύξει πλήρως την εφελκυστική του αντοχή, με αποτέλεσμα να είναι πιο ευάλωτο στις ενδεχόμενες εφελκυστικές τάσεις που θα αναπτυχθούν από την διόγκωση του εσωτερικού νερού όταν ψυχθεί. Στο **Σχήμα 2.6**, αποτυπώνεται η μεγάλη διαφορά του επιπέδου κινδύνου από προσβολή παγετού, ανάλογα με την ηλικία του σκυροδέματος κατά την ψύξη του.



Σχήμα 2.6 Αύξηση του όγκου του σκυροδέματος λόγω ψύξης, σε σχέση με την ηλικία κατά την οποία ψύχεται[43]

Σε γενικές γραμμές, η πρώτη εβδομάδα μετά τη σκυροδέτηση θεωρείται η πλέον κρίσιμη και δεν πρέπει το σκυρόδεμα να εκτεθεί σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Το είδος των αδρανών

Η χρήση αδρανών με μεγάλη απορροφητικότητα στο σκυρόδεμα πιθανόν να αποτελέσει κίνδυνο σε περίπτωση προσβολής του υλικού από τον παγετό. Αδρανή με αυξημένο πορώδες, θα απορροφήσουν μεγάλη ποσότητα νερού κατά τη διαδικασία της αναμίξεως, με αποτέλεσμα αυτό να διογκωθεί όταν ψυχθεί, δημιουργώντας μεγάλες κρυσταλλικές πιέσεις.

Θα πρέπει βέβαια να σημειωθεί ότι ο ακριβής τρόπος συμβολής του πορώδους των αδρανών, δεν έχει αποσαφηνιστεί πλήρως. Υπάρχει περίπτωση, το αυξημένο πορώδες των αδρανών να αποτελέσει και μια διέξοδο εκτόνωσης των κρυσταλλικών πιέσεων που πιθανόν να αναπτυχθούν λόγω παγετού.

Κλιματολογικές συνθήκες

Λόγω της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας που διαθέτει το σκυρόδεμα, χρειάζεται να υπάρχουν αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες για εκτεταμένο χρονικό διάστημα ώστε να παγώσει το εσωτερικό νερό που βρίσκεται στους πόρους του. Όσο περισσότερο διαρκέσει το φαινόμενο αυτό τόσο μεγαλύτερο ποσοστό του νερού θα παγώσει. Διαφαίνεται λοιπόν η σημασία της απόλυτης τιμής της ελάχιστης θερμοκρασίας, της διάρκειας της περιόδου παγετού καθώς και της συχνότητας των κύκλων ψύξης-απόψυξης, στο πόσο σφοδρό θα είναι το πλήγμα για το σκυρόδεμα.

Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι, για την ίδια τιμή της χαμηλότερης θερμοκρασίας, ο συνολικός ετήσιος αριθμός κύκλων ψύξης-απόψυξης αποτελεί σημαντικότερο παράγοντα επίδρασης από το συνολικό χρονικό διάστημα που θα εκτεθεί το σκυρόδεμα στον παγετό.

Τα άλατα τήξεως

Η παρουσία αλάτων τήξεως μπορεί να επηρεάσει σημαντικά το βαθμό κορεσμού των πόρων ενός σκυροδέματος. Ο κορεσμός γενικότερα, επηρεάζεται τόσο από την έκθεση της κατασκευής στην υγρασία αλλά και από την έκθεσή της σε καταστάσεις ξηρασίας. Παρόλα αυτά, ισχύει ότι οι επιφανειακές τάσεις που αναπτύσσονται στους μικρότερους πόρους στο σκυρόδεμα, και συγκρατούν το δεσμευμένο νερό, είναι μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτές των πόρων μεγαλύτερης διαμέτρου. Έτσι, ακόμη και σε περιόδους ξηρασίας, οι μικροί πόροι παραμένουν κορεσμένοι σε σημαντικό βαθμό.

Αυτές ακριβώς τις επιφανειακές τάσεις αυξάνει η χρήση των αλάτων τήξεως, με αποτέλεσμα να αυξάνεται εν τέλει η ποσότητα δεσμευμένου νερού στο εσωτερικό των πόρων. Και όπως έχει αναφερθεί ήδη, όσο μεγαλύτερη η ποσότητα του δεσμευμένου νερού τόσο μεγαλύτερος ο όγκος που θα απαιτήσει όταν παγώσει και διογκωθεί. Τελικά, ο βαθμός κορεσμού των πόρων σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία, είναι υψηλότερος στα σκυροδέματα των οποίων οι πόροι έχουν εκτεθεί σε άλατα τήξεως[33].

2.4.3 Κανονιστικό πλαίσιο και τρόποι αντιμετώπισης

Οι κατασκευές που υποβάλλονται σε επαναλαμβανόμενους κύκλους ψύξης-απόψυξης, κινδυνεύουν να καταστραφούν λόγω των επιπτώσεων του παγετού που έχουν αναλυθεί ήδη. Σε περιοχές με ιδιαίτερα ψυχρό κλίμα, ο κίνδυνος είναι μικρότερος, καθώς το

σκυρόδεμα θα παγώσει άπαξ το φθινόπωρο και θα ξεπαγώσει την άνοιξη. Αντίθετα, σε περιοχές με νοτιότερα κλίματα όπως π.χ. οι μεσογειακές χώρες, και με υψηλό υψόμετρο, ο κίνδυνος μεγαλώνει, καθώς οι κατασκευές θα υποστούν περισσότερους κύκλους ψύξης-απόψυξης στην διάρκεια ενός ημερολογιακού έτους.

Υπάρχουν τέσσερις κατηγορίες έκθεσης σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN12620 και στον **Πίνακα 2.2**, παρουσιάζονται οι ελάχιστες απαιτήσεις του σκυροδέματος ανάλογα με την κατηγορία στην οποία υπάγεται.

Πίνακας 2.2 Απαιτήσεις σκυροδέματος ανάλογα με την κατηγορία έκθεσης στον παγετό[1]

| Προσβολή από ψύξη-απόψυξη | | | | |
|--|--|-------------------|-------------------|-------------------|
| Κατηγορία έκθεσης | XF1 | XF2 | XF3 | XF4 |
| max N/T | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,50 |
| min κατηγορία αντοχής | C 30/37 | C 25/30 | C 25/30 | C 30/37 |
| min περιεκτικότητα σε τσιμέντο kg/m ³ | 320 | 300 | 300 | 320 |
| min περιεκτικότητα σε αέρα% | --- | 4,00 ^a | 4,00 ^a | 4,00 ^a |
| Άλλες απαιτήσεις | Αδρανή σύμφωνα με ΕΛΟΤ EN12620 με ικανοποιητική αντοχή σε παγετό | | | |

^a Όταν δεν προστίθεται αερακτικό πρόσθετο, η επιτελεστικότητα του σκυροδέματος ελέγχεται με κατάλληλη μέθοδο, σε σύγκριση με σκυρόδεμα του οποίου η αντοχή σε ψύξη/απόψυξη για την αντίστοιχη κατηγορία έκθεσης είναι αποδεδειγμένη

- **Κατηγορία έκθεσης XF1** Η συγκεκριμένη κατηγορία καλύπτει το σκυρόδεμα που δέχεται την επίδραση εναλλασσόμενων κύκλων ψύξης-απόψυξης, όντας σε υγρή κατάσταση, και χαρακτηρίζεται ως σκυρόδεμα με μέτριο βαθμό κορεσμού, χωρίς χρήση αντιπαγωτικών αλάτων. Π.χ. κατακόρυφες επιφάνειες δομικών στοιχείων σκυροδέματος εκτεθειμένες στη βροχή και στον παγετό.
- **Κατηγορία έκθεσης XF2** Η συγκεκριμένη κατηγορία καλύπτει το σκυρόδεμα που δέχεται την επίδραση εναλλασσόμενων κύκλων ψύξης-απόψυξης, όντας σε υγρή κατάσταση, και χαρακτηρίζεται ως σκυρόδεμα με μέτριο βαθμό κορεσμού, με χρήση αντιπαγωτικών αλάτων. Π.χ. κατακόρυφες επιφάνειες σε κατασκευές οδικών έργων.
- **Κατηγορία έκθεσης XF3** Από αυτή την κατηγορία καλύπτεται το σκυρόδεμα που εκτίθεται σε επαναλαμβανόμενους κύκλους ψύξης-απόψυξης, όντας σε υγρή κατάσταση, και χαρακτηρίζεται ως σκυρόδεμα με υψηλό βαθμό κορεσμού, χωρίς

χρήση αντιπαγωτικών αλάτων. Π.χ. οριζόντιες επιφάνειες δομικών στοιχείων σκυροδέματος εκτεθειμένες στη βροχή και στον παγετό.

- Κατηγορία έκθεσης XF4 Αυτή η κατηγορία καλύπτει το σκυρόδεμα που εκτίθεται σε επαναλαμβανόμενους κύκλους ψύξης-απόψυξης, όντας σε υγρή κατάσταση, και χαρακτηρίζεται ως σκυρόδεμα με υψηλό βαθμό κορεσμού και ταυτόχρονη χρήση αντιπαγωτικών αλάτων. Π.χ. καταστρώματα γεφυρών αυτοκινητοδρόμων, επιφάνειες που δέχονται ψεκασμό με νερό που περιέχει άλατα τήξεως του πάγου, λιμενικά και θαλάσσια έργα[33].

Η τήρηση των απαιτήσεων που αντιστοιχούν σε κάθε κατηγορία έκθεσης, αποτελεί μια καλή πρακτική στην αντιμετώπιση της προσβολής του σκυροδέματος από τον παγετό. Εκτός αυτού, ένας επιπλέον τρόπος βελτίωσης της αντίστασης έναντι της επίδρασης του παγετού, αποτελεί και η εισαγωγή αέρα κατά την παρασκευή του μίγματος. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ειδικών χημικών πρόσθετων, των αερακτικών. Τα πρόσθετα αυτά δημιουργούν φυσαλίδες αέρα κατά την ανάμιξη του σκυροδέματος, οι οποίες σταθεροποιούνται και κατανέμονται ομοιόμορφα στη μάζα του.

Η θετική συνεισφορά του εισαγόμενου αέρα έναντι της προσβολής από παγετό, οφείλεται στον εξής μηχανισμό. Το νερό, όπως αναφέρθηκε ήδη, αυξάνει τον όγκο του όταν παγώνει, δημιουργώντας κρυσταλλικές πιέσεις στο εσωτερικό του σκυροδέματος που οδηγούν στη διάρρηξή του. Οι φυσαλίδες αέρα λειτουργούν σαν κοιλότητες διαφυγής του επιπλέον νερού κατά τη φάση της ψύξης, με αποτέλεσμα η πίεση που αναπτύσσεται, να εκτονώνεται χωρίς να φτάνει σε καταστροφικά, για το σκυρόδεμα, αποτελέσματα[33].

Προκειμένου να αυξηθεί η αντίσταση έναντι παγετού με την εισαγωγή αέρα, θα πρέπει να υπάρξει παράλληλη μείωση του όγκου των τριχοειδών πόρων, διαφορετικά η εκτόνωση που επιδιώκεται μπορεί να μη μπορεί να γίνει μέσω των κενών που έχουν δημιουργηθεί επί τούτου. Η μείωση των τριχοειδών πόρων επιτυγχάνεται με τη μείωση του λόγου νερού/τσιμέντου, και πιο συγκεκριμένα ένα σκυρόδεμα στο οποίο θα εισαχθεί αέρας, δεν θα πρέπει να κατασκευάζεται με λόγο N/T μεγαλύτερο του 0,5, προκειμένου να θεωρηθεί ανθεκτικό έναντι παγετού[44].

3 ΕΛΑΦΡΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

3.1 Γενικά – Εισαγωγή

Η χρήση του ελαφροσκυροδέματος για κατασκευαστικούς σκοπούς, ξεκινά ήδη από την αρχαιότητα, αν και η ακριβής χρονολογία δεν έχει προσδιοριστεί. Το υλικό αυτό έγινε γνωστό όταν οι χτίστες παρατήρησαν ότι τα φυσαλιδώδη προϊόντα της ηφαιστειακής δραστηριότητας, όπως η ελαφρόπετρα και η σκωρία, ήταν πιο εύκολο να χρησιμοποιηθούν στις διάφορες κατασκευές, σε σύγκριση με τα αδρανή κανονικού βάρους. Εκτός από το μειωμένο βάρος τους, τα ελαφρά αδρανή προσέφεραν επίσης το πλεονέκτημα της εύκολης κατεργασίας, καθώς απαιτούνταν λιγότερη δύναμη για να σπάσουν στα επιθυμητά μεγέθη.

Υπάρχουν πολλά παραδείγματα αρχαίων οικοδομημάτων που αποτελούν πειστήριο της διαδεδομένης χρήσης του ελαφροσκυροδέματος εδώ και αιώνες. Το γεγονός ότι κάποια από αυτά διατηρούνται έως και σήμερα, αποτελεί ένα πρώτο δείγμα τόσο της ανθεκτικότητας του υλικού όσο και της δυνατότητάς του για δομική χρήση. Ένας από τους λαούς που χρησιμοποίησε το ελαφροσκυρόδεμα ήταν οι Σουμέριοι, κατά την ανοικοδόμηση της Βαβυλώνας τον 3^ο αιώνα π.Χ. Οι αρχαίοι Έλληνες και οι Ρωμαίοι ήταν ακόμη δυο πολιτισμοί που αξιοποίησαν την ελαφρόπετρα ως υλικό, δημιουργώντας κατασκευές που έχουν αντέξει στο χρόνο. Πιο συγκεκριμένα, τον 4^ο αιώνα μ.Χ., επί Ιουστινιανού Α΄, οικοδομήθηκε ο καθεδρικός ναός της Αγίας Σοφίας στην Κωνσταντινούπολη (**Εικόνα 3.1**), ο οποίος διασώζεται ακόμη[45]. Κατά τις αρχές του 2^{ου} αιώνα μ.Χ, ο Ρωμαίος αυτοκράτορας Ανδριανός ξεκίνησε την κατασκευή για το, ύψους 43,3 μέτρων, Πάνθεον της Ρώμης (**Εικόνα 3.2**). Χρησιμοποιώντας ελαφρά αδρανή, διαφοροποίησε την πυκνότητα του σκυροδέματος ομοιόμορφα καθ' ύψος του οικοδομήματος. Περισσότερο πυκνή ελαφρόπετρα χρησιμοποιήθηκε στη βάση όπου απαιτήθηκε η μεγαλύτερη αντοχή, και λιγότερο πυκνή ελαφρόπετρα στην κορυφή του θόλου[46]. Το Πάνθεον επιβιώνει μέχρι τις μέρες μας, εξυπηρετώντας ακόμη την αρχική θρησκευτική του χρήση.



Εικόνα 3.1 Καθεδρικός ναός Αγίας Σοφίας, Κωνσταντινούπολη, οικοδομημένος κατά τον 4^ο αιώνα μ.Χ.[47]



Εικόνα 3.2 Το Πάνθεον της Ρώμης, οικοδομημένο κατά τον 2^ο αιώνα μ.Χ[47]

Σύμφωνα με τον ορισμό που έχει δοθεί από την Επιτροπή ACI 213[48], το ελαφροσκυρόδεμα είναι σκυρόδεμα φτιαγμένο από χονδρόκοκκα ελαφρά αδρανή και λεπτόκοκκα αδρανή κανονικού βάρους με πιθανώς μερικά λεπτόκοκκα ελαφρά αδρανή. Στη συνέχεια αναφέρονται οι βασικές ιδιότητες του ελαφροσκυροδέματος, τα πλεονεκτήματα που προσφέρει, οι ιδιαιτερότητές του και οι πιθανές πρακτικές του εφαρμογές.

3.2 Ιδιότητες

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ελαφροσκυροδέματος, ανάλογα με το είδος των χρησιμοποιούμενων αδρανών, τα χαρακτηριστικά και τη διαδικασία παραγωγής τους, καθώς και τη σύνθεση του βασικού κονιάματος. Το ελαφροσκυρόδεμα μπορεί να παραχθεί με εύρος μοναδιαίου βάρους από 300 έως 2000 kg/m³[47] το περισσότερο, και αντίστοιχες αντοχές από 1 έως και πάνω από 60 MPa. Οι βασικοί τρόποι παραγωγής ελαφροσκυροδέματος είναι οι εξής:

- Ακολουθώντας τη διαδικασία που καθιερώθηκε αρχικά από τον Wimbley στο Ηνωμένο Βασίλειο το 1924[49], παραλείπονται τα λεπτότερα κλάσματα των αδρανών κανονικού βάρους στο σκυρόδεμα, ώστε να δημιουργηθούν κενά γεμάτα αέρα. Το τελικό προϊόν είναι γνωστό και ως NFC (no-fines concrete).
- Τα ελαφροσκυροδέματα με εγκλωβισμένο αέρα ή αέριο (κυψελωτά κονιοδέματα) που παρασκευάζονται με την εισαγωγή φυσαλίδων διαμέτρου 0,1 – 1 mm στο τσιμεντοκονίαμα. Οι φυσαλίδες δημιουργούνται είτε με τον εγκλωβισμό αερίου που παράγεται από κάποια χημική αντίδραση (αεριοσκυρόδεμα), είτε με τον εγκλωβισμό αέρα σε μορφή αφρού (αφροσκυρόδεμα)
- Τα ελαφροσκυροδέματα που προκύπτουν από ολική ή μερική αντικατάσταση των αδρανών κανονικού βάρους με ελαφρά αδρανή.

Εκτός από τον τρόπο παραγωγής, το ελαφροσκυρόδεμα μπορεί να κατηγοριοποιηθεί με βάση τις ιδιότητές του και τη χρήση που αυτές επιτρέπουν. Στον **Πίνακα 3.1** παρουσιάζεται ο διαχωρισμός του ελαφροσκυροδέματος σε κατηγορίες και τύπους χρήσης κατά RILEM 1978.

Πίνακας 3.1 Κατηγοριοποίηση ελαφροσκυροδεμάτων[50]

| Ιδιότητα | Κατηγορία και τύπος | | |
|---|---------------------|--------------------|--------------|
| | I Δομικό | II Δομικό/Μονωτικό | III Μονωτικό |
| Θλιπτική αντοχή (MPa) | > 15 | > 3,5 | > 0,5 |
| Θερμική αγωγιμότητα (W/mK) | - | < 0,75 | < 0,30 |
| Πιθανό εύρος μοναδιαίου βάρους (kg/m ³) | 1600 - 2000 | < 1600 | << 1450 |

Εν συνεχεία, εξετάζονται οι βασικές ιδιότητες του δομικού ελαφροσκυροδέματος που προκύπτει από την προσθήκη ελαφρών αδρανών.

Νωπό σκυρόδεμα

Η αυξημένη απορρόφηση, η μειωμένη πυκνότητα και η ποικιλία των διαθέσιμων ελαφρών αδρανών πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός μίγματος σκυροδέματος. Ιδιαίτερη σημασία έχει η απορρόφηση νερού. Ο μεγάλος ρυθμός απορρόφησης του αδρανούς μειώνει την περιεκτικότητα σε νερό στη διεπαφή αδρανούς/πάστας τσιμέντου και επηρεάζει σημαντικά το σχεδιασμό του μίγματος. Παρόλο που ο ρυθμός αυτός μειώνεται με την πάροδο του χρόνου, οι επιπτώσεις του γίνονται περισσότερο αισθητές στην περίπτωση που το αδρανές είναι ακόρεστο ή μερικώς κορεσμένο πριν την τελική ανάμιξη. Αυτό επηρεάζει σημαντικά τις ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος όπως η εργασιμότητα (συμπεριλαμβανομένης της αντλησιμότητας) και η πυκνότητα και παράλληλα επιδρά και στις σκληρυμένες ιδιότητες όπως η πυκνότητα, η θερμομόνωση, η αντίσταση στη φωτιά και στην ψύξη-απόψυξη.

Για ένα μεμονωμένο σωματίδιο η ποσότητα του νερού που απορροφάται και ο ρυθμός απορρόφησης εξαρτώνται κυρίως από (α) τον όγκο πόρων, (β) την κατανομή των πόρων εντός του σωματιδίου και (γ) τη δομή των πόρων (αν είναι συνδεδεμένοι ή όχι). Στα σωματίδια ελαφρών αδρανών με σχετικά μεγάλο όγκο πόρων, ο ρυθμός απορρόφησης νερού είναι πιθανότατα πολύ μεγαλύτερος από ότι για τα αδρανή κανονικού βάρους. Πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι οι απαιτήσεις νερού για τα λεπτότερα κλάσματα ενός υλικού θα είναι γενικά υψηλότερες από εκείνες για τα πιο χοντρά. Προκειμένου να γίνει μια προσεγγιστική διόρθωση του μίγματος αναφορικά με το νερό που απορροφάται από τα ελαφρά αδρανή κατά τη διάρκεια και αμέσως μετά την ανάμιξη, μπορεί να γίνει χρήση της τιμής απορρόφησης των 30 λεπτών. Στον **Πίνακα 3.2** παρατίθενται κάποια από τα πιο γνωστά ελαφρά αδρανή μαζί με ενδεικτικές τιμές για την πυκνότητα, το ειδικό βάρος και την απορροφητικότητα τους.

Πίνακας 3.2 Τυπικά χαρακτηριστικά ελαφρών αδρανών[13]

| Αδρανές | Σχετική πυκνότητα | Πυκνότητα (kg/m ³) | %Απορροφητικότητα σε νερό κ.β. |
|--|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Κίσηρης (Ελαφρόπετρα) | 1,25 – 1,65 | 480 – 880 ^α | 20 – 30 |
| Αφρώδης σκωρία υψικαμίνου | 1,15 – 2,20 | 400 – 1200 | 8 - 15 |
| Διογκωμένος περλίτης | 0,90 – 1,05 | ~ 160 | 10 - 30 |
| Διογκωμένος βερμικουλίτης | 0,85 – 1,05 | ~ 160 | 10 - 30 |
| Διογκωμένη άργιλος, σχιστή άργιλος και σχιστόλιθος | 1,1 – 2,1 | 560 – 960 | 2 - 15 |
| Ιπτάμενη τέφρα | ~ 1,7 | 590 – 770 | 14 - 24 |
| Πριονίδι | 0,35 – 0,6 | 128 – 320 | 10 - 35 |
| Αφρός πολυστερίνης | 0,05 | 10 – 20 | ~ 50 |

Έχοντας ως δεδομένη την επίδραση της απορρόφησης νερού των ελαφρών αδρανών, θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν η πιθανή απώλεια της εργασιμότητας του σκυροδέματος, τόσο μεταξύ της ανάμιξης και της τοποθέτησης του, όσο και κατά τη μεταφορά του. Η χρήση χημικών πρόσθετων είναι απαραίτητη για τον έλεγχο και τη διατήρηση της εργασιμότητας και της αντλησιμότητας του ελαφροσκυροδέματος. Οι διαδικασίες της συμύκνωσης και της σκλήρυνσης δεν διαφέρουν από το σκυρόδεμα κανονικού βάρους, αλλά το ελαφροσκυρόδεμα έχει μεγαλύτερη ανοχή στην ελλειπή συντήρηση κατά τις πρώιμες ηλικίες, λόγω του αποθέματος νερού που διατηρείται στα σωματίδιά του. Κατά την ολοκλήρωση της διαμόρφωσης της επιφάνειας του ελαφροσκυροδέματος, θα πρέπει να δίνεται προσοχή στην πιθανότητα επίπλευσης των ελαφρών σωματιδίων[49].

Πυκνότητα και αντοχή

Οι φυσικές ιδιότητες του σκυροδέματος είναι αυτές που διατηρούν την ακεραιότητα της κατασκευής. Η αντοχή είναι μια από τις πιο σημαντικές και συνδέεται στενά με την πυκνότητα. Για το ελαφροσκυρόδεμα, η πυκνότητα κυμαίνεται μεταξύ των 1200 και 2000 kg/m³ με το αντίστοιχο εύρος τιμών για τα συμβατικά σκυροδέματα να είναι από 2300 έως 2500 kg/m³[49]. Η συνολική συμπεριφορά του ελαφροσκυροδέματος εξαρτάται από την πυκνότητα που θα αναπτύξει. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, υπάρχουν αρκετοί διαφορετικοί παράγοντες που επηρεάζουν την πυκνότητα του μίγματος. Πιο συγκεκριμένα, μια αύξηση κατά 100 kg/m³ στην ποσότητα του τσιμέντου επιφέρει 50 kg/m³ αύξηση στην πυκνότητα. Παράλληλα, αν τα λεπτόκοκκα ελαφρά αδρανή του μίγματος αντικατασταθούν με αδρανή κανονικού βάρους, αυτό θα οδηγήσει σε μια αύξηση της πυκνότητας μεταξύ 150 – 200 kg/m³. Αν τα χρησιμοποιούμενα ελαφρά αδρανή είναι πλήρως ή μερικώς προκορεσμένα, η πυκνότητα του νωπού σκυροδέματος θα

αυξηθεί. Τέλος, σημαντική είναι η επίδραση των εξωτερικών συνθηκών, όπως η ξήρανση ή η υγρασία, στην πυκνότητα του ελαφροσκυροδέματος[51].

Η αντοχή του ελαφροσκυροδέματος εξαρτάται από μια πληθώρα παραγόντων, συμπεριλαμβανομένης και της πυκνότητάς του, όπως αναφέρθηκε ήδη. Μεταξύ των λοιπών παραμέτρων που την επηρεάζουν βρίσκεται, το είδος των ελαφρών αδρανών, ο λόγος ενεργού νερού/τσιμέντου, η περιεκτικότητα του μίγματος σε τσιμέντο και η ηλικία του σκυροδέματος. Σε γενικές γραμμές, η αύξηση στην πυκνότητα των αδρανών, και κατ' επέκταση και του μίγματος, οδηγεί σε αύξηση της αντοχής. Επιπλέον, ένας ισχυρός δεσμός μεταξύ των αδρανών και του τσιμέντου και μια ομοιομορφία στη δυσκαμψία των αδρανών και της μήτρας κονιάματος, εξασφαλίζει ένα μίγμα μεγάλης αντοχής με προοπτική να φτάσει ακόμη και τη μέγιστη θεωρητική αντοχή.

Λόγω της αυξημένης απορροφητικότητας σε νερό που παρουσιάζουν τα ελαφρά αδρανή, ο λόγος νερού/τσιμέντου στο ελαφροσκυρόδεμα δεν είναι κατ' αντιστοιχία συγκρίσιμος με αυτόν του συμβατικού σκυροδέματος, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις η αύξηση του ενεργού νερού οδηγεί σε μείωση της αντοχής του μίγματος. Παρόλα αυτά, η θετική επίδραση ενός χαμηλού λόγου νερού/τσιμέντου μπορεί να επισκιαστεί από τη χρήση ελαφρών αδρανών χαμηλής αντοχής και πυκνότητας. Με τον ίδιο τρόπο μπορεί να υποβιβαστεί και η ευεργετική δράση της πάστας τσιμέντου υψηλής αντοχής, λόγω της χρήσης ελαφρών αδρανών μικρής πυκνότητας. Τέλος, η αύξηση στην ποσότητα των χρησιμοποιούμενων ελαφρών αδρανών επιφέρει μείωση τόσο της αντοχής όσο και της πυκνότητας του ελαφροσκυροδέματος[52].

Ελαστικότητα

Σε κάθε είδος σκυροδέματος, η δυσκαμψία του εξαρτάται από τη δυσκαμψία των επιμέρους συστατικών του καθώς και της αναλογίας τους στο μίγμα. Αν απλοποιήσουμε τη δομή του σκυροδέματος μπορούμε να πούμε ότι αποτελείται από χονδρόκοκκα σωματίδια που έχουν ενσωματωθεί σε μια μήτρα κονιάματος. Με βάση αυτόν τον ισχυρισμό, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το μέτρο ελαστικότητας της σύνθεσης σκυροδέματος θα μειωθεί εάν:

- μειωθεί η δυσκαμψία του κονιάματος, η οποία εξαρτάται με τη σειρά της από την αναλογία κατ' όγκο σε τσιμέντο, νερό και λεπτόκοκκα ελαφρά αδρανή καθώς και από το είδος των τελευταίων
- μειωθεί η δυσκαμψία των χονδρόκοκκων ελαφρών αδρανών

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι το μέτρο ελαστικότητας των περισσότερων ελαφρών αδρανών είναι χαμηλότερο από αυτό των αδρανών κανονικού βάρους και το ελαφροσκυρόδεμα περιέχει κατά κανόνα μεγαλύτερη ποσότητα τσιμέντου, καταλήγουμε στο ότι το ελαφροσκυρόδεμα τείνει να έχει μειωμένο μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Αυξημένη μείωση δε, παρουσιάζεται στις περιπτώσεις των ελαφροσκυροδεμάτων που παράγονται με χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα ελαφρά αδρανή έναντι αυτών που προέρχονται από ανάμιξη χονδρόκοκκων ελαφρών αδρανών και λεπτόκοκκων αδρανών κανονικού βάρους. Με βάση τα προαναφερθέντα, γίνεται κατανοητό ότι το μειωμένο μέτρο ελαστικότητας θα οδηγήσει σε αύξηση των παραμορφώσεων σε δομικά στοιχεία υπό δεδομένα φορτία, παράλληλα όμως το αντίκτυπο αυτό μπορεί να μειωθεί από το ήδη μειωμένο ίδιο βάρος της κατασκευής από ελαφροσκυρόδεμα. Τέλος, η μειωμένη δυσκαμψία μπορεί να φανεί ευεργετική σε περιπτώσεις δυναμικής καταπόνησης όπως είναι η κρούση[49],[52].

Συστολή ξηράνσεως και ερπυσμός

Η συστολή ξηράνσεως στο σκυρόδεμα επηρεάζεται κυρίως από τις ιδιότητες και το συνολικό περιεχόμενο σε ελαφρά αδρανή, καθότι σχεδόν τα $\frac{3}{4}$ του όγκου του μίγματος αποτελείται από αυτά. Στην περίπτωση του συμβατικού σκυροδέματος, όπου τα αδρανή έχουν μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας, η συστολή ξηράνσεως δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη αλλά η μεταβολή του όγκου της πάστας του τσιμέντου προκαλεί περισσότερες μικρορηγματώσεις. Αντίθετα, στο ελαφροσκυρόδεμα παρατηρείται μεγαλύτερη συστολή ξηράνσεως. Παρόλα αυτά οι ρηγματώσεις είναι μειωμένες, καθώς τα ελαφρά αδρανή είναι λιγότερο δύσκαμπτα και έχουν τη δυνατότητα να προσαρμοστούν στη μεταβολή του όγκου της πάστας τσιμέντου[52].

Ως ερπυσμός του σκυροδέματος νοείται η αύξηση της παραμόρφωσης με την πάροδο του χρόνου, υπό σταθερό φορτίο. Ο ερπυσμός σκυροδέματος σε συνθήκες ξήρανσης υπολογίζεται με βάση τον χρόνο που απαιτείται ώστε ένα αφόρτιστο στοιχείο να αναπτύξει την ίδια παραμόρφωση με ένα φορτισμένο, εξεταζόμενα ταυτόχρονα και στις ίδιες συνθήκες[49]. Στο ελαφροσκυρόδεμα παρουσιάζεται εν γένει μεγαλύτερος ερπυσμός συγκριτικά με το συμβατικό σκυρόδεμα, λόγω του μειωμένου μέτρου ελαστικότητας. Πιο συγκεκριμένα, ο ερπυσμός ελαφροσκυροδέματος μπορεί να είναι ίσος ή και έως 1,5 φορές μεγαλύτερος αυτού του συμβατικού σκυροδέματος, αλλά το αντίστοιχο μέγεθος του ερπυσμού υπό συνθήκες ξήρανσης είναι σημαντικά μεγαλύτερο. Ο ρυθμός του βασικού ερπυσμού μειώνεται με την πάροδο του χρόνου και είναι ανάλογος του φορτίου όταν η τάση δεν ξεπερνάει το 40% της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος.

Ο ερπυσμός και η συστολή ξηράνσεως είναι δυο καταστάσεις που υπόκεινται στο νόμο της υπέρθεσης και εμφανίζονται ταυτόχρονα[52]. Αυτός πιθανά είναι ακόμη ένας λόγος που οι ρηγματώσεις λόγω της συστολής ξηράνσεως είναι πιο σπάνιες στο ελαφροσκυρόδεμα, καθώς έχει προηγηθεί μια ανακούφιση λόγω του ερπυσμού. Παράλληλα σε αυτό βοηθάει η συνεχής ενυδάτωση από το δεσμευμένο νερό στους πόρους των αδρανών και η καλύτερη συμπεριφορά που επιδεικνύει το ελαφροσκυρόδεμα στον εφελκυσμό.

Ανθεκτικότητα

- Ψύξη-απόψυξη

Κατ' αντιστοιχία με το συμβατικό σκυρόδεμα, η αντίσταση του ελαφροσκυροδέματος στην ψύξη-απόψυξη εξαρτάται από τις αναλογίες των υλικών στο μίγμα, το είδος των αδρανών και το ποσοστό κορεσμού τους καθώς και το ποσοστό εγκλωβισμένου αέρα. Εργαστηριακές δοκιμές έχουν δείξει ότι για την πλειοψηφία των διαφορετικών ελαφρών αδρανών, προκορεσμένα ή μη, το ελαφροσκυρόδεμα, με και χωρίς χρήση αερακτικού, εμφανίζει τουλάχιστον ίδια αν όχι πολύ καλύτερη συμπεριφορά συγκριτικά με το συμβατικό, απέναντι σε επαναλαμβανόμενους κύκλους ψύξης-απόψυξης[53],[54]. Ιδιαίτερα στις περιπτώσεις ελαφροσκυροδέματος υψηλών αντοχών (54–73 MPa), σημειώθηκε εξαιρετική συμπεριφορά απέναντι στην ψύξη-απόψυξη[55]. Ο κύριος παράγοντας που επηρέασε τα συγκεκριμένα αποτελέσματα ήταν το ποσοστό υγρασίας των ελαφρών αδρανών και το επίπεδο κορεσμού τους.

- Υδατοαπορροφητικότητα

Κατά κανόνα, όλα τα είδη ελαφρών αδρανών παρουσιάζουν αρκετά υψηλότερη απορρόφηση νερού σε σχέση με τα αδρανή κανονικού βάρους. Αποτέλεσμα αυτού, είναι το ελαφροσκυρόδεμα να έχει αντίστοιχα αυξημένη απορρόφηση νερού σε μάζα, συγκριτικά με το συμβατικό σκυρόδεμα. Σε αντίθεση όμως με το συμβατικό σκυρόδεμα, η υψηλής ποιότητας μήτρα κονιάματος που περιβάλλει τα ελαφρά αδρανή, συμβάλλει στο να περιοριστεί η αύξηση της απορροφητικότητας. Η μεγάλη απορροφητικότητα του ελαφροσκυροδέματος δεν έχει άμεση επίπτωση στην ανθεκτικότητά του και αυτό πιθανόν να οφείλεται στο ότι, κατά τη σύγκριση της συμπεριφοράς των σκυροδεμάτων, η χρήση της τιμής απορρόφησης νερού σε μάζα είναι λιγότερο κατάλληλη από την τιμή απορρόφησης σε όγκο[48],[51],[56].

- Αντοχή σε απόξεση

Με βάση τα όσα έχουν αναφερθεί για το ελαφροσκυρόδεμα μέχρι αυτό το σημείο, είναι εύλογο να υποθέσει κανείς ότι η αντοχή του έναντι τριβής θα είναι χαμηλή, λόγω του ότι τα ελαφρά αδρανή δεν είναι αντιστοίχως ισχυρά με τα πετρώματα που χρησιμοποιούνται ως αδρανή στο συμβατικό σκυρόδεμα. Ωστόσο, η αντοχή σε τριβή δεν εξαρτάται μονομερώς από την αντοχή των αδρανών αλλά και από την αντοχή της μήτρας κονιάματος και το δεσμό μεταξύ των αδρανών και της πάστας τσιμέντου. Στο δομικό ελαφροσκυρόδεμα η αντοχή του κονιάματος που περιβάλλει τα ελαφρά αδρανή, αντισταθμίζει την έλλειψη αντοχής τους και ο δεσμός που αναπτύσσεται μεταξύ της πάστας τσιμέντου με τα ελαφρά αδρανή είναι σημαντικά ισχυρότερος συγκριτικά με τον αντίστοιχο δεσμό στο συμβατικό σκυρόδεμα. Η συγκόλληση αδρανούς με πάστα τσιμέντου στο ελαφροσκυρόδεμα, πραγματοποιείται επιφανειακά αλλά εισχωρεί και βαθύτερα στο αδρανές. Παράλληλα, η ίδια η επιφάνεια των ελαφρών αδρανών μπορεί να αντιδρά με το τσιμέντο, καθιστώντας το δεσμό ακόμη πιο δυνατό, μέσω της ποζολανικής αντίδρασης που πραγματοποιείται μεταξύ του ενεργού πυριτίου που περιέχουν και του, παραγόμενου από την ενυδάτωση του τσιμέντου, υδροξειδίου του ασβεστίου.

Τελικά, η αντίσταση του ελαφροσκυροδέματος απέναντι στην τριβή είναι μεγαλύτερη από αυτή που επιδεικνύει το συμβατικό σκυρόδεμα. Αυτό οφείλεται στην υψηλή αντοχή της πάστας του τσιμέντου που μπορεί να είναι έως και δυο φορές μεγαλύτερη από ότι στο συμβατικό σκυρόδεμα, και με τη σειρά της είναι αποτέλεσμα της μεγαλύτερης ποσότητας τσιμέντου που χρησιμοποιείται στο ελαφροσκυρόδεμα σε συνδυασμό με το χαμηλότερο λόγο νερού/τσιμέντου[52].

- Διαπερατότητα

Η διαπερατότητα αποτελεί τον κυριότερο παράγοντα ανθεκτικότητας του σκυροδέματος. Ωστόσο δεν είναι συνώνυμη έννοια με το πορώδες καθώς θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν το μέγεθος των πόρων και ύπαρξη, ή μη, σύνδεσης μεταξύ τους. Έτσι, το ελαφροσκυρόδεμα δεν είναι απαραίτητα περισσότερο διαπερατό από το συμβατικό σκυρόδεμα, αφού τα πορώδη ελαφρά αδρανή καλύπτονται από μια μήτρα κονιάματος που φέρει πολύ λιγότερες ρηγματώσεις. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, το ελαφροσκυρόδεμα παρουσιάζει μειωμένες ρηγματώσεις χάρη στον ισχυρό δεσμό των αδρανών με την πάστα τσιμέντου και στην ποζολανική δράση τους[57], στη συνεχή ενυδάτωση που παρέχεται από το δεσμευμένο νερό στους πόρους των αδρανών καθώς και στη μικρότερη επίδραση της θερμότητας της διαδικασίας ενυδάτωσης. Μελέτες έχουν δείξει ότι η διαπερατότητα του ελαφροσκυροδέματος σε νερό είναι σε χαμηλότερα επίπεδα

σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα, και σε ακόμη χαμηλότερα όσον αφορά τη διαπερατότητα σε αέρα[58],[59]. Παράλληλα, δοκιμές που έχουν γίνει σε σκυροδέματα υπό ποικίλες συνθήκες συντήρησης, κατέληξαν στο ότι το ελαφροσκυρόδεμα έχει παρόμοια ή χαμηλότερη διαπερατότητα οξυγόνου συγκριτικά με συνθέσεις συμβατικού σκυροδέματος αντίστοιχου όγκου[60].

- **Ενανθράκωση**

Η αντίδραση του διοξειδίου του άνθρακα με την υγρασία και τα προϊόντα της ενυδάτωσης του τσιμέντου που βρίσκονται στην πάστα του, ονομάζεται ενανθράκωση και είναι ένα φαινόμενο που μειώνει την αλκαλικότητα του σκυροδέματος, προκαλώντας τη συστολή του. Ακόμη πιο επιβλαβείς είναι οι επιπτώσεις, στην περίπτωση που η ενανθράκωση εισχωρήσει στο εσωτερικό του σκυροδέματος και φτάσει στον οπλισμό του, με αποτέλεσμα τη διάβρωσή του[49].

Το αυξημένο ποσοστό πόρων των ελαφρών αδρανών έναντι των αδρανών κανονικού βάρους, πιθανόν να διευκολύνει τη διάχυση αερίων όπως το διοξείδιο του άνθρακα. Παρόλα αυτά, εφόσον εξασφαλίζεται καλή κατανομή των ελαφρών αδρανών σε μήτρα κονιάματος καλής ποιότητας, ο ρυθμός ενανθράκωσης του ελαφροσκυροδέματος θα προσομοιάζει αυτόν των συμβατικών σκυροδεμάτων. Είναι σημαντικό να μην υπάρχουν συνδεδεμένοι πόροι στο μίγμα, που να δημιουργούν συνεχείς διαδρομές μεταξύ της επιφάνειας και του οπλισμού. Υποδεικνύεται η πιθανή ανάγκη για μεγαλύτερη επικάλυψη του οπλισμού στο ελαφροσκυρόδεμα.

Με βάση τις δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί, διαφαίνεται ότι το βάθος ενανθράκωσης μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού του τσιμέντου και με τη χρήση πιο λεπτόκοκκων αδρανών μεγαλύτερης πυκνότητας. Τέλος, σύμφωνα με μελέτη που διερεύνησε την επίπτωση της έκθεσης σε μολυσμένο περιβάλλον σε ένα μεγάλο εύρος ειδών σκυροδέματος, παρατηρήθηκε ότι για περιεκτικότητα τσιμέντου από 350 kg/m^3 [61] και άνω, το βάθος ενανθράκωσης ήταν μικρό, τόσο για τα ελαφροσκυροδέματα όσο και για τις συνθέσεις συμβατικού σκυροδέματος[62],[63].

Θερμική αγωγιμότητα

Η θερμική αγωγιμότητα του ελαφροσκυροδέματος, αν και εν γένει χαμηλότερη από αυτή του συμβατικού σκυροδέματος, μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με την πυκνότητά του, το είδος των περιεχόμενων ελαφρών αδρανών και τα ποσοστά υγρασίας[64]. Ο αέρας που περιέχεται στην δομή των ελαφρών αδρανών μειώνει το ρυθμό μεταφοράς της θερμότητας, σε σύγκριση με τα αδρανή κανονικού βάρους, καθώς αποτελεί ένα από τα καλύτερα μονωτικά υλικά. Έτσι, με το να συμπεριλάβουμε ελαφρά αδρανή μέσα στη δομή ενός τσιμεντοειδούς κονιάματος, βελτιώνουμε αισθητά τη θερμική του αγωγιμότητα. Γίνεται εμφανές ότι ένα συμβατικό σκυρόδεμα με μεγαλύτερη πυκνότητα και λιγότερα κενά αέρα θα έχει μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα. Το ελαφροσκυρόδεμα διαθέτει πολύ καλή θερμική συμπεριφορά και είναι ιδανικό για χρήση με σκοπό τη θερμομόνωση κτιρίων και κατασκευών.

Παράλληλα, η προσθήκη νερού σε ένα ξηρό δομικό υλικό αυξάνει τη θερμική του αγωγιμότητα. Το υγρό σκυρόδεμα λοιπόν, μεταδίδει θερμότητα καλύτερα από το ξηρό σκυρόδεμα, επειδή η θερμική αγωγιμότητά του υγρού σκυροδέματος είναι 24 φορές μεγαλύτερη από αυτή του αέρα. Η θερμότητα περνάει μέσα από το νερό 15 φορές γρηγορότερα από ότι μέσω του σταθερού αέρα. Για το λόγο αυτό, η τιμή θερμικής αγωγιμότητας του μονωτικού σκυροδέματος πέφτει όταν βραχεί[52].

Ηχομονωτική ικανότητα

Η μόνωση, έναντι της διάδοσης του ήχου μέσω του αέρα, σε συμπαγή, ομοιογενή στοιχεία όπως τα τοιχώματα και τα δάπεδα, αυξάνεται όταν αυξάνεται η μάζα τους. Άρα θα ήταν αναμενόμενο ότι για να επιτευχθεί η ίδια ηχομόνωση, το πάχος των αντίστοιχων στοιχείων από ελαφροσκυρόδεμα θα έπρεπε να είναι μεγαλύτερο από αυτό των στοιχείων συμβατικού σκυροδέματος. Αντιθέτως, μελέτες έχουν δείξει ότι στοιχεία κατασκευασμένα από ελαφροσκυρόδεμα, με ελαφρά αδρανή που διαθέτουν επιφάνεια πυκνής υφής, παρουσιάζουν σημαντικά καλύτερη συμπεριφορά από όσο διαφαίνεται με βάση τη μάζα τους [49],[65],[66].

3.3 Προτερήματα και μειονεκτήματα της χρήσης ελαφροσκυροδέματος

Το ελαφροσκυρόδεμα έχει πολλά θετικά να προσφέρει στον κατασκευαστικό τομέα αλλά όπως και κάθε άλλο υλικό, διαθέτει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τα οποία πιθανόν να οδηγήσουν σε νέες απαιτήσεις και προκλήσεις στο στάδιο της παραγωγής του.

Η πλειοψηφία των ελαφρών αδρανών παράγεται από τον άνθρωπο, γεγονός που βοηθάει στο να αποκτήσουν μεγαλύτερη χημική ομοιογένεια και σταθερότητα στις ιδιότητές τους σε σύγκριση με τα συνήθη πετρώματα που χρησιμοποιούνται ως αδρανή κανονικού βάρους. Εφόσον οι φυσικοχημικές ιδιότητες των αδρανών επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ανθεκτικότητα του τελικού προϊόντος, αυτό το πλεονέκτημα μας επιτρέπει να παράγουμε σκυρόδεμα, και κατ' επέκταση κατασκευές, με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Η βελτιωμένη ανθεκτικότητα που επιδεικνύει το ελαφροσκυρόδεμα είναι αποτέλεσμα αρκετών διαφορετικών παραγόντων. Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα, ένας από αυτούς είναι και η χαμηλή πιθανότητα να παρουσιάσει συρρίκνωση και ρωγμές λόγω της συστολής ξηράνσεως. Παράλληλα, διαθέτει χαμηλή διαπερατότητα συγκριτικά με το συμβατικό σκυρόδεμα και μεγαλύτερη ανοχή απέναντι σε ανεπαρκείς συνθήκες συντήρησης. Τέλος, ο δεσμός που αναπτύσσεται μεταξύ της πάστας του τσιμέντου και των ελαφρών αδρανών είναι ισχυρότερος και σαν υλικό έχει υψηλή αντίσταση απέναντι στο φαινόμενο της ψύξης-απόψυξης.

Τα πλεονεκτήματα του υλικού όμως δε σταματούν στην ανθεκτικότητά του αλλά έχουν πρακτικές και οικονομικές προεκτάσεις. Το ελαφροσκυρόδεμα, λόγω του μειωμένου βάρους του, οδηγεί σε πιο ελαφριές κατασκευές, κάτι που έχει πολλαπλές αναγνώσεις. Αρχικά μειώνονται τα μόνιμα φορτία των κατασκευών, συμβάλλοντας έτσι και στην μείωση των απαιτήσεων για άλλα υλικά, όπως τα σίδερα οπλισμού. Επιπλέον, σημαντική είναι και η μείωση του βάρους των υλικών σαν πρώτες ύλες, με αποτέλεσμα να διευκολυνθεί η μεταφορά τους, η κατεργασία τους στο πεδίο, ακόμη και η κατεδάφιση και διαχείρισή τους στο τέλος του κύκλου ζωής της κατασκευής. Διαφαίνεται τελικά το μεγάλο οικονομικό αντίκτυπο που μπορεί να έχει η χρήση ελαφροσκυροδέματος και η δυνατότητα που προσφέρει για μειωμένο κόστος σε υλικά, εργαλεία, συντήρηση και γενικότερα σε όλα τα στάδια της κατασκευαστικής διαδικασίας.

Αντιστοίχως σημαντικό είναι και το περιβαλλοντικό όφελος που μπορεί να προκύψει από την αύξηση της χρήσης ελαφροσκυροδέματος. Εφόσον γίνει αξιοποίηση κάποιων βιομηχανικών αποβλήτων για την παραγωγή του, αυτόματα θα μειωθούν και οι ανάγκες διαχείρισης και αποθήκευσης των αποβλήτων αυτών και θα δημιουργηθεί μια εναλλακτική με σκοπό να ελαχιστοποιηθεί η εξάρτησή μας από τα φυσικά αδρανή. Φυσικά, είναι προφανές ότι σε αυτή τη διαδικασία υπάρχουν περιορισμοί καθώς είναι αναγκαία η λεπτομερής ανάλυση των βιομηχανικών αποβλήτων και της καταλληλότητάς τους, πριν από τη χρήση τους στο ελαφροσκυρόδεμα.

Όπως αναφέρθηκε ήδη, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ελαφρών αδρανών είναι αυτά που προσδίδουν και τις αντίστοιχες ευεργετικές ιδιότητες στο ελαφροσκυρόδεμα ως κατασκευαστικό υλικό. Παράλληλα όμως, αυτή η ιδιαιτερότητα είναι που οδηγεί σε κάποια μειονεκτήματα και πρακτικά θέματα που χρήζουν προσοχής.

Ανάλογα με την επιλογή των ελαφρών αδρανών που θα χρησιμοποιηθούν, υπάρχει πιθανότητα αύξησης της απαιτούμενης ποσότητας σε τσιμέντο. Επίσης, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε τσιμέντο, το ελαφροσκυρόδεμα μπορεί να καταστεί πιο εύθραυστο. Το είδος των αδρανών μπορεί να επηρεάσει εξίσου και την απορρόφηση σε νερό, άρα και την περιεκτικότητα σε νερό του τελικού μίγματος. Θα πρέπει να γίνονται προσεκτικοί έλεγχοι των παραμέτρων αυτών κατά την ανάμιξη, ώστε να εξασφαλίζεται ότι θα διατηρηθούν οι απαιτήσεις τελικών αντοχών και εργασιμότητας του προϊόντος. Τα πορώδη αδρανή απαιτούν λήψη ειδικών μέτρων για το αντλούμενο σκυρόδεμα ενώ η θερμοκρασία που αναπτύσσεται κατά την ενυδάτωση του ελαφροσκυροδέματος είναι αισθητά υψηλότερη. Τέλος, το ελαφροσκυρόδεμα παρουσιάζει μειωμένη αντοχή σε περιοχές συγκεντρωμένων φορτίων, όπου χρειάζεται επιπλέον ενίσχυση και περιορισμούς[14].

3.4 Εφαρμογές

Ήδη από την αρχαιότητα, η χρήση του ελαφροσκυροδέματος στις κατασκευές ήταν διαδεδομένη και η μεγάλη διάρκεια ζωής των έργων αυτών επιβεβαιώνει την βελτίωση που προσδίδει το υλικό όσον αφορά την ανθεκτικότητα. Εκτός όμως από τις κτηριακές κατασκευές, το ελαφροσκυρόδεμα έχει βρει επιτυχημένα εφαρμογή και σε κάποιες άλλες περιπτώσεις.

Κατά την παραγωγή ελαφρών αδρανών, δημιουργείται μια πορώδης δομή, η οποία προσδίδει στο σκυρόδεμα χρήσιμες θερμομονωτικές ιδιότητες. Συγκεκριμένα το ελαφροσκυρόδεμα αναπτύσσει έως και έξι φορές μεγαλύτερη θερμική αντίσταση σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα[14]. Η χρήση του αφρώδους πλαστικού στις μονώσεις επικρατεί έναντι άλλων λύσεων, παρόλα αυτά αποτελεί ένα υλικό αρκετά εύφλεκτο και με ευαίσθητη επιφάνεια που χρήζει προστασίας. Το υλικό αυτό μπορεί να τοποθετείται σε στρώση ανάμεσα από δυο τοιχοποιίες αποτελούμενες από ελαφροσκυρόδεμα. Με αυτόν τον τρόπο, καλύπτεται η ανάγκη προστασίας της επιφάνειάς του και παράλληλα ενισχύεται η θερμομονωτική ιδιότητα της κατασκευής. Ακόμη, σε κάποιες περιπτώσεις, τα ελαφρά αδρανή μπορούν να αποτελέσουν ξεχωριστά μονωτικό γέμισμα σε κοιλότητες τοίχων, ειδικά μετά την τοποθέτηση αγωγών.

Άλλος ένας τομέας εφαρμογής του ελαφροσκυροδέματος είναι η κατασκευή πλοίων, λόγω της χαμηλής πυκνότητας και του μειωμένου βάρους που διαθέτει. Εκτός από αυτό, η ανθεκτικότητα του υλικού αποτελεί ένα επιπλέον θετικό, ιδίως σε σύγκριση με το ξύλο που χρησιμοποιούταν ευρέως σε κάποιες παλιότερες περιόδους. Το ελαφροσκυρόδεμα μειώνει το χρόνο κατασκευής και τον χρόνο και την πολυπλοκότητα πιθανών επισκευών σε ζημιές που θα προκύψουν. Όντας ένα μονολιθικό υλικό, έχει τη δυνατότητα να αναπτύσσει πολύ καλή πρόσφυση με το παλιό υλικό σε περιπτώσεις επισκευών, εφόσον εφαρμοστεί και κατασκευαστεί σωστά. Τέλος, η στεγανότητα που προσδίδει στα πλοία διευκολύνει τη μεταφορά ξηρού φορτίου.

Είναι πολλές οι περιπτώσεις που το ελαφροσκυρόδεμα έχει χρησιμοποιηθεί σε εγκαταστάσεις ανοιχτής θαλάσσης. Παρατηρήθηκε ότι βελτιώνει τη συμπεριφορά όπου απαιτείται μόνωση και αυξάνει την πλευστότητα. Προσφέρει στεγανότητα, χαμηλή διαπερατότητα και μειώνει τη δημιουργία ρωγμών από ερπυσμό, συστολή ξηράνσεως, θερμικές καταπονήσεις και φορτία παραμόρφωσης. Η αυξημένη ανθεκτικότητα του ελαφροσκυροδέματος οδηγεί σε μεγαλύτερη αντίσταση στην ψύξη-απόψυξη και σε υψηλότερο επίπεδο προστασίας του οπλισμού από διάβρωση. Σημαντικό οικονομικό

όφελος μπορεί να προκύψει από την εξοικονόμηση κατά τη μεταφορά, την τοποθέτηση και τη συντήρηση του σκυροδέματος, των ξυλοτύπων και τελικά των ίδιων των εγκαταστάσεων[14],[67].

4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

4.1 Εισαγωγή

Με την ανάγκη για πρόοδο και βελτίωση του σκυροδέματος να μεγαλώνει, πολλοί ερευνητές στράφηκαν στη μελέτη για την αξιοποίηση υπαρχόντων υλικών. Κύριος προσανατολισμός τους είναι η διερεύνηση της επίδρασης που έχουν στο σκυροδέμα, τόσο σε επίπεδο μηχανικών ιδιοτήτων όσο και σε επίπεδο ανθεκτικότητας. Εξάλλου, όπως έχει ήδη σημειωθεί, η μακροβιότητα των κατασκευών και η διατήρηση της επιτελεστικότητάς τους καθ' όλο τον κύκλο ζωής τους, αποτελεί σήμερα βασικό στόχο των μηχανικών σε παγκόσμιο επίπεδο.

Στη συνέχεια παρατίθεται ερευνητικό υλικό, από μελέτες που έχουν διενεργηθεί για την επίδραση της χρήσης ελαφρών αδρανών, όπως ο περλίτης, η ελαφρόπετρα και η τέφρα φλοιού ρυζιού, στο σκυροδέμα. Έχουν επιλεγεί να παρουσιαστούν μελέτες με πειραματικό αντικείμενο συναφές με αυτό που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική.

4.2 Ανασκόπηση ερευνητικών μελετών

Από τους *Sengul et al (2011)*[68] μελετήθηκε η επίδραση του διογκωμένου περλίτη στις μηχανικές ιδιότητες και τη θερμική αγωγιμότητα του σκυροδέματος. Για το σκοπό αυτό, παρασκεύασαν 6 συνθέσεις σκυροδέματος στις οποίες αντικατέστησαν τη φυσική άμμο με διογκωμένο περλίτη σε ποσοστά από 0% έως 100% με βήμα 20% για κάθε σύνθεση. Ο λόγος ενεργού νερού/τσιμέντο κρατήθηκε σταθερός στο 0,55 και έγινε προϋγρανση του περλίτη για 30 λεπτά πριν τη χρήση του ώστε, η απορρόφησή του σε νερό, να μην επηρεάσει το λόγο αυτό. Για όλα τα αναμίγματα χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο Portland τύπου CEM I 42,5 R, υπερρυστοποιητής και το ίδιο πρόσθετο υγρό αερακτικό σε ποσοστό 0,3% κ.β. του τσιμέντου.

Στο πειραματικό μέρος της μελέτης, εξετάστηκε η θλιπτική αντοχή των δοκιμίων κάθε σύνθεσης καθώς και το μέτρο ελαστικότητας, σύμφωνα με τα πρότυπα EN 206 και EN 12390. Πραγματοποιήθηκε η δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας με εμβάπτιση των δοκιμίων σε νερό καθώς και ο προσδιορισμός της τριχοειδούς απορρόφησης με βάση το πρότυπο EN 13057. Τέλος, σύμφωνα με το πρότυπο EN 12667, έγινε ο υπολογισμός της θερμικής αγωγιμότητας των συνθέσεων.

Τα τελικά αναμίγματα που προέκυψαν είχαν τιμές ειδικού βάρους μεταξύ 696 kg/m^3 και 2015 kg/m^3 . Με βάση τα αποτελέσματα, η προσθήκη περλίτη στις συνθέσεις οδήγησε σε σημαντική μείωση του ειδικού τους βάρους. Επίσης, διαπιστώθηκε ισχυρή σύνδεση μεταξύ του ειδικού βάρους και της θερμικής αγωγιμότητας του σκυροδέματος. Παρατηρήθηκε υψηλή μείωση του μεγέθους αυτού, με την αύξηση του ποσοστού περλίτη στις συνθέσεις. Αντίστοιχη μείωση σημείωσαν τόσο η θλιπτική αντοχή όσο και το μέτρο ελαστικότητας, με την τελευταία να επηρεάζεται σημαντικά περισσότερο. Πιο συγκεκριμένα, οι συνθέσεις με προσθήκη περλίτη σε ποσοστό άνω του 20%, εμφάνισαν τέτοια μείωση της αντοχής τους που χαρακτηρίστηκαν ως σκυροδέματα για μονωτική χρήση. Τέλος, η προσθήκη περλίτη οδήγησε στην αύξηση της υδατοαπορροφητικότητας αλλά και της τριχοειδούς απορρόφησης, σε μικρότερο όμως βαθμό.

Οι *Kabay et al (2015)*[69] ερεύνησαν τις ιδιότητες συνθέσεων σκυροδέματος με χρήση σκόνης ελαφρόπετρας και ιπτάμενης τέφρας ως υλικά αντικατάστασης του τσιμέντου. Για την παραγωγή των συνθέσεων χρησιμοποίησαν επίσης χημικά πρόσμικτα, χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα ασβεστολιθικά αδρανή καθώς και τσιμέντου τύπου CEM I 42,5 R. Η σκόνη ελαφρόπετρας ελήφθη με την αρχική ξήρανση των αδρανών σε θερμοκρασία περίπου 100 ° C, για να εξαλειφθεί το ελεύθερο νερό, και στη συνέχεια αλέθοντάς τα με εργαστηριακό μύλο Η σκόνη κοσκινίστηκε στη συνέχεια και, για τους σκοπούς της εργασίας, χρησιμοποιήθηκε το διερχόμενο από το κόσκινο 63μm.

Συνολικά επτά μίγματα σκυροδέματος παρασκευάστηκαν με σταθερή αναλογία νερού προς συνδετικό υλικό και περιεκτικότητα συνδετικού υλικού 0,42 και 500 kg/m³, αντίστοιχα. Εκτός από τη σύνθεση αναφοράς με συμβατικό σκυρόδεμα, οι υπόλοιπες έξι περιείχαν ιπτάμενη τέφρα και σκόνη ελαφρόπετρας προς υποκατάσταση του τσιμέντου, σε ποσοστά 5%, 10% και 20%, είτε μεμονωμένα είτε συνδυαστικά. Διενεργήθηκαν δοκιμές για τον προσδιορισμό των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των μιγμάτων στις 7, 28, 90 και 180 ημέρες. Αυτές περιελάμβαναν τη δοκιμή κάθισης, τη δοκιμή τριχοειδούς απορρόφησης κατά ASTM C 1585 και τις δοκιμές προσδιορισμού της φαινόμενης πυκνότητας επί ξηρό, της υδατοαπορροφητικότητας και της περιεκτικότητας σε αέρα κατά ASTM C 642. Επιπλέον, για τον υπολογισμό της αντοχής, έλαβαν χώρα οι δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού σύμφωνα με τα πρότυπα EN 12390 και EN 12390-6. Τέλος, η ανθεκτικότητα των μιγμάτων αξιολογήθηκε με την έκθεση των δοκιμίων σε διάλυμα θεικού μαγνησίου.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η προσθήκη ελαφρόπετρας σε γενικές γραμμές μείωσε την κάθιση στο νωπό σκυρόδεμα. Επίσης παρατηρήθηκε μείωση της υδατοαπορροφητικότητας, της τριχοειδούς απορρόφησης και του ποσοστού περιεχόμενου αέρα τόσο στα μίγματα με σκόνη ελαφρόπετρας, όσο και σε αυτά με την ιπτάμενη τέφρα. Παράλληλα, σε αυτά τα μίγματα, παρατηρήθηκαν και χαμηλές αντοχές σε θλίψη και εφελκυσμό στις πρώιμες ηλικίες που όμως εξελίχθηκαν σε παρόμοια επίπεδα με τη σύνθεση αναφοράς, μετά τις 28 ημέρες. Η αντίσταση στο θεικό μαγνήσιο όλων των συνθέσεων που περιείχαν ελαφρόπετρα ή ιπτάμενη τέφρα, ήταν αισθητά υψηλότερη από αυτή του συμβατικού σκυροδέματος, στις 180 και 360 ημέρες. Τα καλύτερα αποτελέσματα παρουσίασαν η σύνθεση που περιείχε 20% σκόνη ελαφρόπετρας και η σύνθεση με προσθήκη 10% ιπτάμενης τέφρας και 10% ελαφρόπετρας.

Οι *Karthika et al (2021)*[18] ασχολήθηκαν επίσης με τη χρήση ελαφρόπετρας για την παραγωγή ελαφροσκυροδέματος, εξετάζοντας τις μηχανικές ιδιότητες και την ανθεκτικότητά του. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στις συνθέσεις είναι τσιμέντο τύπου Portland 43 (OPC 43), γαρμπίλι, λεπτόκοκκα αδρανή κανονικού βάρους, ελαφρόπετρα σε κάποιο ποσοστό και υπερρευστοποιητής Conplast SP430. Συγκεκριμένα παράχθηκαν τέσσερις συνθέσεις, μια σύνθεση αναφοράς συμβατικού σκυροδέματος, η M₃₀, και ακόμη τρεις συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος, με ποσοστό προσθήκης ελαφρόπετρας προς αντικατάσταση των χονδρόκοκκων αδρανών κανονικού βάρους, 50%, 80% και 100% αντίστοιχα. Πριν τη διαδικασία της ανάμιξης είχε προηγηθεί προϋγρानση της ελαφρόπετρας για 24 ώρες.

Κατά το πειραματικό κομμάτι της μελέτης, διερευνήθηκαν αρκετές παράμετροι αντοχής και ανθεκτικότητας της κάθε σύνθεσης. Για το νωπό σκυρόδεμα, έλαβε χώρα η δοκιμή κάθισης και η δοκιμή προσδιορισμού του συντελεστή συμπίεσης. Στη συνέχεια προσδιορίστηκαν οι θλιπτικές, εφελκυστικές και καμπτικές αντοχές των δοκιμίων όλων των συνθέσεων. Τέλος, διενεργήθηκε η δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας, η μέτρηση της ταχύτητας υπερήχων UPV και μη καταστροφικός έλεγχος για τον προσδιορισμό της σκληρότητας των συνθέσεων, με τη μέθοδο του κρουσιμέτρου αναπήδησης.

Σύμφωνα με τα τελικά αποτελέσματα, προέκυψε ότι η απορρόφηση της ελαφρόπετρας σε νερό είναι αρκετά μεγάλη ώστε να επηρεάζει την εργασιμότητα του νωπού υλικού, και για αυτό το λόγο ενδείκνυται η χρήση υπερρρευστοποιητών. Παράλληλα φάνηκε ότι, η αντικατάσταση μέρους των χονδρόκοκκων αδρανών με ελαφρόπετρα βοηθάει αισθητά στη μείωση του ειδικού βάρους του τελικού προϊόντος και η μείωση της πυκνότητας είναι ανάλογη της ποσότητας της ελαφρόπετρας. Αναφορικά με τη θλιπτική, εφελκυστική και καμπτική αντοχή των συνθέσεων, η αύξηση της ποσότητας της κίσηρης, επέφερε σημαντική μείωση στα συγκεκριμένα μεγέθη συγκριτικά με τις αντοχές της σύνθεσης αναφοράς. Πιο συγκεκριμένα, μετά το ποσοστό του 50% προσθήκης ελαφρόπετρας, που εμφάνισε τα καλύτερα σχετικά αποτελέσματα, παρατηρήθηκε μεγάλη μείωση των αντοχών, με κυριότερη αυτή της θλιπτικής αντοχής. Τέλος, όλες οι συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος είχαν παρόμοιες τιμές σκληρότητας, σχετικά κοντινές με αυτή του συμβατικού σκυροδέματος, και επέδειξαν εξαιρετική ποιότητα δομής σύμφωνα με τη δοκιμή υπερήχων.

Αρκετοί είναι οι μελετητές που ασχολήθηκαν με την τέφρα φλοιού ρυζιού (RHA) σαν υλικό προσθήκης στο σκυρόδεμα καθώς και με την επίδρασή της στην αντοχή και την ανθεκτικότητα αυτού. Οι *Swaminathan et al (2021)*[70] ασχολήθηκαν με την επίδραση του RHA και του μετακαολίνης (MK) στην αντοχή και την ανθεκτικότητα σκυροδεμάτων υψηλών αποδόσεων. Τα δύο αυτά υλικά χρησιμοποιήθηκαν ως υποκατάστατα του τσιμέντου, με συνδυασμούς ποσοστών μεταξύ τους, από 0% έως 25% αθροιστικά. Σε όλες τις συνθέσεις έγινε χρήση συμβατικού τσιμέντου τύπου Portland, με χαρακτηριστικά σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C. Παράχθηκαν συνολικά 9 συνθέσεις με συνδυαστική προσθήκη μετακαολίνης και RHA, μαζί με μία σύνθεση αναφοράς. Ο λόγος νερού/τσιμέντου διατηρήθηκε σταθερός και ίσος με 0,31 ενώ η ποσότητα του τσιμέντου διαφοροποιήθηκε για κάθε σύνθεση, ώστε να προκύψουν σκυροδέματα υψηλής απόδοσης. Τέλος, έγινε χρήση του ίδιου υπερρρευστοποιητή σε όλα τα αναμίγματα.

Αρχικά, η δοκιμή κάθισης στο νωπό σκυρόδεμα έδειξε πως η προσθήκη μετακαολίνης και RHA στις συνθέσεις, μείωσε σημαντικά την εργασιμότητά τους, και για να καταφέρουν να τη διατηρήσουν στα επιθυμητά επίπεδα, κρίθηκε αναγκαία η προσθήκη υπερρρευστοποιητή. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων για τον προσδιορισμό των παραμέτρων αντοχής και ανθεκτικότητας κάθε σύνθεσης, όπως το ειδικό βάρος, η θλιπτική αντοχή, η υδατοαπορροφητικότητα και η διαπερατότητα, καθώς και η αντίσταση στην επιταχυνόμενη διείδυση χλωριόντων. Οι δοκιμές βασίστηκαν στα πρότυπα ASTM C127, ASTM C192, ASTM C 642 και ASTM C 1202 αντίστοιχα.

Τα τελικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέγιστη αντοχή των συνθέσεων με μετακαολίνη και τέφρα φλοιού ρυζιού, επιτεύχθηκε με την αναλογία 7,5% MK και 12,5% RHA. Μέχρι οι τιμές να φτάσουν αυτά τα ποσοστά, παρατηρήθηκε ότι οι αντοχές των συνθέσεων αυξάνονταν, ενώ άρχισαν να μειώνονται από εκείνο το σημείο και έπειτα, μέχρι να φτάσουν το 25% αθροιστικά. Επιπλέον, η χρήση μετακαολίνης και RHA οδήγησε στην παραγωγή σκυροδεμάτων που πρακτικά είναι μη διαπερατά και εμφανίζουν εξαιρετικά υψηλή αντίσταση στη διείδυση των χλωριόντων, συγκριτικά με το συμβατικό σκυρόδεμα.

Αντίστοιχη μελέτη διενήργησαν και οι *Sahoo et al (2021)*[71] χρησιμοποιώντας αυτή τη φορά RHA και πυριτική παιπάλη (silica fume – SF), γνωστό και ως microsilica, ως υποκατάστατα σκυροτσιμέντου τύπου Portland. Ο λόγος νερού/τσιμέντου για όλες τις συνθέσεις διατηρήθηκε σταθερός και ίσος με 0,5. Παράχθηκαν 9 συνθέσεις συνολικά, μια από αυτές, η σύνθεση αναφοράς, περιείχε μόνο σκυροτσιμέντο τύπου Portland, νερό και κανονικού βάρους λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα αδρανή. Στις υπόλοιπες 8 συνθέσεις

έγινε αντικατάσταση του τσιμέντου σε ποσοστά 5%, 10%, 15% και 20% από RHA και SF ξεχωριστά.

Αρχικά, μελετήθηκε η θλιπτική αντοχή των δοκιμίων στις 3, 7, 28 και 60 ημέρες, σύμφωνα με το πρότυπο IS:516. Η αντοχή του σκυροδέματος σε έκθεση σε οξύ προσδιορίστηκε με τη βύθιση των δοκιμίων σε διάλυμα όξινου pH για κατάλληλο χρονικό διάστημα, σύμφωνα με το τροποποιημένο πρότυπο ASTM C 267 και οι αντίστοιχοι συντελεστές ανθεκτικότητας απέναντι σε επιθετικό περιβάλλον με οξύ υπολογίστηκαν με βάση το πρότυπο ASTM 666. Επιπλέον, η αντίσταση στα χλωριόντα υπολογίστηκε με βάση τα αποτελέσματα της δοκιμής επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων του προτύπου ASTM C 1202-91. Η δοκιμή ενανθράκωσης βασίστηκε στο πρότυπο ISO 1920-12: 2015 και τέλος, η δοκιμή υδατοπερατότητας και η δοκιμή τριχοειδούς απορρόφησης, εκτελέστηκαν σύμφωνα με τα πρότυπα DIN1048 και ASTM 1585 αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των παραπάνω δοκιμών, με την αύξηση της προσθήκης RHA και SF στο σκυρόδεμα, μειώθηκαν ανάλογα και οι πρώιμες αντοχές του μέχρι τις 7 ημέρες. Από εκείνη την ηλικία και μετά όμως παρουσιάστηκε αύξηση των αντοχών των συνθέσεων με προσθήκη των δυο υλικών μέχρι το ποσοστό του 15%, το οποίο χαρακτηρίστηκε και ως βέλτιστο. Παρατηρήθηκε επίσης ότι οι συνθέσεις με αυξημένο ποσοστό τόσο σε RHA όσο και σε SF, είχαν καλύτερη αντίσταση απέναντι στο θειικό οξύ, στη διείσδυση των χλωριόντων αλλά και στην ενανθράκωση. Παράλληλα, η βελτίωση της πυκνότητας της δομής των συνθέσεων λόγω της προσθήκης RHA και SF, είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση του βαθμού υδατοπερατότητας και της τριχοειδούς απορρόφησης αυτών.

5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

5.1 Εισαγωγή

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας και για τις πειραματικές ανάγκες της, παράχθηκαν και μελετήθηκαν τέσσερις (4) διαφορετικές συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος και μια (1) σύνθεση αναφοράς συμβατικού σκυροδέματος που κωδικοποιείται ως REF. Η διερεύνηση της εφαρμογής των διαφορετικών ελαφρών αδρανών στο σκυρόδεμα, η επάρκεια του παραγόμενου ελαφροσκυροδέματος για δομοστατικές εφαρμογές και η μελέτη της ανθεκτικότητας του, έλαβε χώρα σε δυο φάσεις.

- **A ΦΑΣΗ**

Βελτιστοποίηση των συνθέσεων ελαφροσκυροδέματος με γνώμονα τη θλιπτική αντοχή τους στις 2 και στις 7 ημέρες. Σκοπός ήταν η επίτευξη συγκεκριμένης κατηγορίας αντοχής (LC 25/28, κατά το EN 206), κατηγορίας κάθισης τουλάχιστον S2 και πυκνότητας D1,6.

- **B ΦΑΣΗ**

Παραγωγή των βέλτιστων συνθέσεων ελαφροσκυροδέματος όπως αυτές προέκυψαν από την Α Φάση, ώστε να μελετηθεί τόσο η αντοχή τους όσο και η ανθεκτικότητά τους. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν οι εξής πειραματικές δοκιμές :

- Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης σε κυβικά δοκίμια
- Δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας – προσδιορισμός ανοιχτού πορώδους OP%
- Δοκιμή προσδιορισμού συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης
- Δοκιμή επιταχυνόμενης διείδυσης χλωριόντων – NT Build 492
- Δοκιμή ψύξης-απόψυξης και αποτίμηση μέσω μέτρησης ταχύτητας υπερήχων (US)

Στα επόμενα κεφάλαια περιγράφονται αναλυτικά οι παραπάνω δοκιμές και τα αποτελέσματά τους. Η παρασκευή όλων των δοκιμαστικών συνθέσεων της Α Φάσης και των τελικών συνθέσεων της Β Φάσης, η λήψη των δοκιμίων καθώς και η μελέτη της θλιπτικής αντοχής αυτών στις 2, στις 7 και στις 28 ημέρες για τις δοκιμαστικές και στις 28 και 90 ημέρες για τις τελικές συνθέσεις, πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο του Ελληνικού Κέντρου Έρευνας και Τεχνολογίας Σκυροδέματος (EKETΣ) της ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ.

Η συντήρηση των δοκιμίων και όλες οι δοκιμές ανθεκτικότητας έλαβαν χώρα στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

5.2 Α ΦΑΣΗ : Βελτιστοποίηση συνθέσεων ελαφροσκυροδέματος

5.2.1 Υλικά και συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος

Σκοπός της φάσης αυτής ήταν η βελτιστοποίηση των τεσσάρων (4) βασικών συνθέσεων ελαφροσκυροδέματος με βάση τα αποτελέσματα των θλιπτικών τους αντοχών, κυρίως στις 2 και στις 7 ημέρες, ώστε να μπορούν να αναπτύξουν στη συνέχεια αντοχές που θα τις καθιστούσαν κατάλληλες για δομοστατική χρήση. Παράλληλα, η διαδικασία είχε ως στόχο την επίτευξη πυκνότητας 1600-1800 kg/m³ (D1,6) και κατηγορίας κάθισης τουλάχιστον S2. Μέσα από τη διαδικασία αυτή προέκυψε η τελική μορφή των συνθέσεων και των πρακτικών παραγωγής τους που χρησιμοποιήθηκαν στην τελική Β Φάση.

Σε όλες τις δώδεκα (12) συνθέσεις, έγινε χρήση τσιμέντου CEM I 42,5 R. Οι βασικές του ιδιότητες είναι η χαμηλή απαίτηση σε νερό και οι αρκετά υψηλές πρώιμες και τελικές αντοχές που επιτυγχάνει. Τα ελαφρά αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των συνθέσεων είναι :

- ελαφρά αδρανή, κίσηρης, με μέγεθος κόκκων 0-8 mm και 0-16 mm με αντίστοιχη κωδικοποίηση για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας (PuSand) και (Pu)
- δυο κλάσματα ακατέργαστου περλίτη, με μέγεθος 0-2 mm (Pe-1) και 0-4 mm (Pe-2)
- τέφρα φλοιού ρυζιού (RHA)
- ασβεστολιθικά αδρανή (Ca), χρησιμοποιήθηκε ρυζάκι 4-8 mm (Gr-1) και για τις ανάγκες των συνθέσεων της Β Φάσης, άμμος με μέγεθος 0-4 mm (Sand) και γαρμπίλι 8-16 mm (Gr-2)

Τα δυο χημικά πρόσμικτα που προστέθηκαν στις συνθέσεις ήταν ο επιβραδυντής Sika® Plastiment®-20 R και ο υπερρευστοποιητής Sika® ViscoCrete® Ultra-450. Οι ποσότητες των υλικών ανά σύνθεση παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.1**. Τα παραγόμενα αναμίγματα ήταν της τάξης των 20 l το καθένα.

Αναφορικά με την κωδικοποίηση των συνθέσεων, χρησιμοποιήθηκαν τα αρχικά από τα βασικά υλικά που περιείχε η καθεμία, με βάση την κωδικοποίηση των επιμέρους υλικών, όπως έχει αναλυθεί ήδη. Πιο συγκεκριμένα, η σύνθεση με κωδικό PeCaPu, σύμφωνα με την ονομασία της, περιέχει περλίτη (Pe), ασβεστολιθικά αδρανή (Ca) και ελαφρόπετρα (Pu). Κατ' αντιστοιχία έχουν κωδικοποιηθεί και οι λοιπές συνθέσεις της Β Φάσης, PePu, PuCa, RPePu και η σύνθεση αναφοράς ως REF από την αγγλική λέξη reference.

Πίνακας 5.1 Περιεκτικότητες συστατικών των δοκιμαστικών συνθέσεων (Kg/m³)

| Υλικά (Kg/m ³) | PeCaPu-1 | PeCaPu-2 | PeCaPu-3 | PeCaPu-4 | PeCaPu-5 | PeCaPu-6 | PeCaPu-7 | PeCaPu-8 | PeCaPu-9 | PePu | PuCa | RPePu |
|----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------|------|-------|
| Τσιμέντο | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| Νερό Προϋγρανσης | 64 | 64 | 64 | 64 | 77 | 87 | 64 | 84 | 90 | 152 | 175 | 145 |
| Συνολικό Νερό | 317 | 297 | 242 | 267 | 289 | 311 | 302 | 263 | 268 | 318 | 336 | 346 |
| Άμμος (Sand) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ρυζάκι 4-8 mm (Gr-1) | 95 | 95 | 95 | 95 | 56 | 64 | 95 | 55 | 53 | 0 | 51 | 0 |
| Γαριπίλι 8-16 mm (Gr-2) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Κίσηρης 0-8 mm (PuSand) | 0 | 0 | - | - | - | - | 0 | 0 | - | 397 | 607 | 402 |
| Κίσηρης 0-16 mm (Pu) | 374 | 374 | 374 | 374 | 452 | 508 | 374 | 492 | 530 | 446 | 354 | 402 |
| Περλίτης 0-2 mm (Pe-1) | 167 | 167 | 167 | 167 | 113 | 127 | 167 | 109 | 159 | 149 | 0 | - |
| Περλίτης 0-4 mm (Pe-2) | 740 | 740 | 740 | 740 | 508 | 572 | 740 | 437 | 318 | 0 | 0 | 101 |
| RHA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 101 |
| Επιβραδυντής | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 1,20 |
| Υπερρευστοποιητής | 2,40 | 4,15 | 8,00 | 6,40 | 2,90 | 3,40 | 5,00 | 2,40 | 2,40 | 2,40 | 2,40 | 4,35 |
| Λόγος N/T | 0,63 | 0,58 | 0,45 | 0,51 | 0,53 | 0,56 | 0,60 | 0,45 | 0,44 | 0,42 | 0,40 | 0,50 |

Κατά το σχεδιασμό των δοκιμαστικών συνθέσεων έγινε η παραδοχή ότι το ποσοστό υδατοαπορρόφησης της κίσηρης είναι κατά προσέγγιση 17%, γεγονός που το καθιστά μη αμελητέο ως προς το βαθμό που επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα του ελαφροσκυροδέματος, τόσο σαν μεμονωμένο μέγεθος όσο και συγκριτικά με τα ποσοστά υδατοαπορρόφησης των λοιπών αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν. Για αυτό το λόγο, υπολογίστηκε αρχικά μια συγκεκριμένη ποσότητα νερού προϋγρανσης της κίσηρης Pu, η

οποία δεν λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό του λόγου ενεργού νερού προς τσιμέντο των μιγμάτων. Το φαινόμενο αυτό έχει επισημανθεί ως σημείο προσοχής και στη βιβλιογραφία [72] αλλά και από προηγούμενες πειραματικές μετρήσεις του ΕΟΣ του ΕΜΠ. Στην πορεία των δοκιμών, παρατηρήθηκε ότι η αρχική προϋγρανση της κίσσης Ρu, συνδυαστικά με τον περλίτη Ρe-1, βελτιώνει επιπλέον την εργασιμότητα και την κάθιση του νωπού υλικού.

Σε συνέχεια της διαδικασίας προϋγρανσης, ακολούθησε η ανάμιξη των υλικών σύμφωνα με την πρότυπη διαδικασία του ΕΚΕΤΣ. Ακολούθως, έγινε η μέτρηση της πυκνότητας του νωπού υλικού και ελήφθησαν 6 κυβικά δοκίμια από κάθε σύνθεση, 2 για τον προσδιορισμό της θλιπτική αντοχής 2 ημερών, 2 για τις 7 ημέρες και ακόμη 2 για τη θλιπτική αντοχή των 28 ημερών. Στον **Πίνακα 5.2**, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής κάθισης, της πυκνότητας και των θλιπτικών αντοχών για όλες τις δοκιμαστικές συνθέσεις, τα οποία εξήχθησαν από τις διαδικασίες που περιγράφονται στο **Κεφάλαιο 5.2.2**.

Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα δοκιμών νωπού (κάθιση και μοναδιαίο βάρος) και σκληρυμένου σκυροδέματος (θλιπτική αντοχή 2, 7 και 28 ημερών) όλων των δοκιμαστικών συνθέσεων

| Ιδιότητα | PeCaPu-1 | PeCaPu-2 | PeCaPu-3 | PeCaPu-4 | PeCaPu-5 | PeCaPu-6 | PeCaPu-7 | PeCaPu-8 | PeCaPu-9 | PePu | PuCa | RPePu |
|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|-------|-------|
| Κάθιση (mm) | 130 | 120 | 40 | 20 | 160 | 190 | 160 | 120 | 210 | απόμιξη | 210 | 260 |
| Μον.βάρος (kg/m ³) | 1723 | 1751 | 1766 | 1778 | 1645 | 1609 | 1726 | 1655 | 1620 | 1466 | 1477 | 1528 |
| Αντοχή 2 ημερών (MPa) | 20,06 | 24,28 | 24,70 | 15,08 | 24,75 | 22,92 | 22,94 | 23,34 | 20,68 | 10,64 | 20,06 | 17,01 |
| Αντοχή 7 ημερών (MPa) | 25,87 | 28,11 | 32,42 | 22,60 | 30,01 | 24,90 | 29,30 | 26,75 | 26,75 | 16,56 | 23,72 | 22,97 |
| Αντοχή 28 ημερών (MPa) | 30,30 | 32,38 | 38,13 | 28,27 | 32,94 | 26,27 | 32,81 | 32,41 | 30,07 | 21,46 | 29,90 | 26,35 |

Στο αρχικό στάδιο της διαδικασίας βελτιστοποίησης των συνθέσεων ελαφροσκυροδέματος, παρασκευάστηκαν τα μίγματα PeCaPu-1 έως και PeCaPu-4, με ίδιες ποσότητες αδρανών υλικών και διαφορετική ποσότητα υπερρευστοποιητή και συνολικού νερού. Παρατηρήθηκε ότι όσο μειωνόταν ο λόγος N/T των συνθέσεων, τόσο καλύτερες θλιπτικές αντοχές είχαν στις πρώιμες ηλικίες. Παράλληλα όμως, το μοναδιαίο

βάρος τους κυμαινόταν κοντά στα 1700kg/m^3 , τιμή υψηλότερη από την επιθυμητή, και η κατηγορία κάθισης κάποιων συνθέσεων δεν έφτασε στα επίπεδα της S2.

Με προσανατολισμό την περαιτέρω μείωση της πυκνότητας των συνθέσεων, και θέλοντας παράλληλα να διατηρηθούν τα ικανοποιητικά επίπεδα πρώιμων αντοχών και να βελτιωθεί η κάθιση των μιγμάτων, σχεδιάστηκαν και παράχθηκαν οι συνθέσεις PeCaPu-5 έως και PeCaPu-7. Οι συνθέσεις αυτές είχαν διαφοροποιημένες αναλογίες των αδρανών υλικών. Επίσης είχαν μειωμένους λόγους N/T συγκριτικά με τις πρώτες δοκιμαστικές, και μια αντίστοιχη τάση μείωσης της ποσότητας του χρησιμοποιούμενου υπερρευστοποιητή. Αυτό ήταν και το σημείο στο οποίο υιοθετήθηκε η πρακτική της προϋγρानσης της κίσηρης μαζί με τον περλίτη Pe-1, κάτι που επέφερε αισθητή βελτίωση της εργασιμότητας και της κάθισης όλων των συνθέσεων, εκπληρώνοντας το στόχο για ελάχιστη κάθιση κατηγορίας S2. Το μοναδιαίο βάρος των συνθέσεων μειώθηκε, προσεγγίζοντας το επιθυμητό D1,6 και παράλληλα οι θλιπτικές αντοχές των 2 ημερών για όλες τις συνθέσεις, ξεπέρασαν τα 20MPa. Και σε αυτό το στάδιο παρατηρήθηκε ότι ένας χαμηλότερος λόγος N/T οδηγεί σε αύξηση της αντοχής των μιγμάτων.

Στο τελικό στάδιο της βελτιστοποίησης των συνθέσεων, σχεδιάστηκαν και παράχθηκαν ακόμη δυο εκδοχές της σύνθεσης PeCaPu, η PeCaPu-8 και η PeCaPu-9, με διαφορετικές αναλογίες αδρανών υλικών αλλά βασισμένες στις προηγούμενες, ώστε να διατηρηθεί το μειωμένο μοναδιαίο βάρος. Επίσης υπήρξε επιπλέον μείωση του λόγου N/T. Εκτός από τις δυο αυτές συνθέσεις, σχεδιάστηκε και μια δοκιμαστική εκδοχή για κάθε μια από τις υπόλοιπες 3 βασικές συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος, με γνώμονα τα αποτελέσματα των προηγούμενων σταδίων. Δηλαδή και εδώ ο στόχος ήταν το μειωμένο μοναδιαίο βάρος και αντίστοιχα ο λόγος N/T παρέμεινε χαμηλός για την επίτευξη υψηλότερων αντοχών.

Όλες οι συνθέσεις έπιασαν το στόχο του μοναδιαίου βάρους, με κάποιες να έχουν και χαμηλότερο από 1600kg/m^3 . Παράλληλα, στις περισσότερες περιπτώσεις, οι απαιτήσεις για κάθιση τουλάχιστον κατηγορίας S2 και αντοχή 2 ημερών κοντά στα 20MPa, ικανοποιήθηκαν. Εξαίρεση αποτέλεσε η δοκιμαστική σύνθεση PePu, στην οποία παρουσιάστηκε απόμιξη των υλικών στη νωπή κατάσταση, εξου και οι χαμηλές θλιπτικές αντοχές που έδωσε.

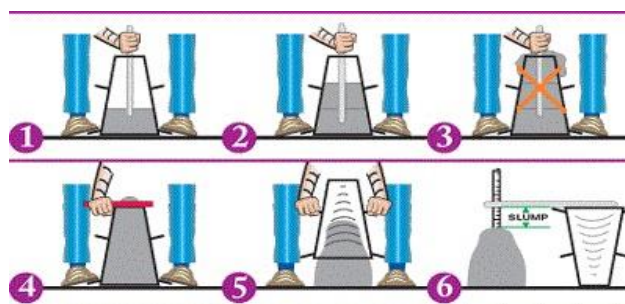
Για τις τελικές συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος της Β Φάσης, χρησιμοποιήθηκαν οι αναλογίες αδρανών των δοκιμαστικών συνθέσεων PeCaPu-8, PePu, PuCa και RPePu ώστε να διατηρηθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα πυκνοτήτων, αλλά έγινε περαιτέρω μείωση του λόγου N/T και μικρές διαφοροποιήσεις στις ποσότητες υπερρευστοποιητή, ώστε να υπάρξει μεγαλύτερη αύξηση των πρώιμων αντοχών, και ειδικότερα στην περίπτωση της σύνθεσης PePu, να αποφευχθεί και το φαινόμενο της απόμιξης. Αναλυτική παρουσίαση τόσο των τελικών συνθέσεων όσο και των διαδικασιών που διενεργήθηκαν, ακολουθεί στο **Κεφάλαιο 5.3**.

5.2.2 Ιδιότητες νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος

Για τον προσδιορισμό της εργασιμότητας αλλά και για την παρατήρηση της συνεκτικότητας των συνθέσεων τόσο στην Α όσο και στη Β Φάση, διενεργήθηκε η δοκιμή κάθισης στο νωπό σκυρόδεμα σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 12350-2.

Η δοκιμή αυτή απαιτεί τη χρήση του ειδικού κώνου κάθισης και η διαδικασία πραγματοποίησης του ελέγχου είναι η ακόλουθη. Αρχικά το σκυρόδεμα διαστρώνεται σε τρεις στρώσεις πάχους 10 cm η κάθε μία. Κάθε στρώση δονείται με την ειδική ράβδο Φ16, μήκους 60cm με στρογγυλεμένα άκρα, με 25 χτυπήματα ανά στρώση. Τα χτυπήματα γίνονται ομοιόμορφα στο κέντρο και στην περιφέρεια. Μετά το τέλος της συμπύκνωσης, η τελική επιφάνεια επιπεδώνεται ελαφρά με μυστρί και καθαρίζονται όσα υπολείμματα

υλικού έχουν πέσει εκτός κώνου. Στη συνέχεια, ο κώνος ανασηκώνεται κατακόρυφα με σταθερή ταχύτητα και τοποθετείται ανεστραμμένος δίπλα στο δείγμα. Η μεταλλική ράβδος στερεώνεται επάνω του σε οριζόντια θέση. Κάθιση ορίζεται η απόσταση του κάτω μέρους της ράβδου από το υψηλότερο σημείο της επιφάνειας του σκυροδέματος, η οποία μετράται με τη χρήση μέτρου. όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 5.1**. Στον **Πίνακα 5.3**, παρουσιάζονται οι κατηγορίες κάθισης που αντιστοιχούν σε εύρος μετρήσεων ≥ 10 mm και ≤ 210 mm, το οποίο συνίσταται και ως πεδίο εφαρμογής της συγκεκριμένης δοκιμής [1],[73].



Σχήμα 5.1 Διαδικασία εκτέλεσης δοκιμής κάθισης [74]

Πίνακας 5.3 Κατηγορίες κάθισης σύμφωνα με EN 206 [1]

| 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 10 mm

Έγινε χρήση ειδικού δοχείου 8 l, για τον υπολογισμό της πυκνότητας του νωπού σκυροδέματος. Το ίδιο δοχείο χρησιμοποιήθηκε κατά τη δοκιμή μέτρησης του περιεχόμενου αέρα των συνθέσεων της επόμενης φάσης.

Για τη διερεύνηση της αντοχής των συνθέσεων επιλέχτηκε και διενεργήθηκε η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης σύμφωνα με τα πρότυπα DIN EN 12390-3[75]. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με τη διακριβωμένη μηχανή θραύσης που διαθέτε το ΕΚΕΤΣ, στις 2, στις 7 και στις 28 ημέρες για τις δοκιμαστικές συνθέσεις της Α Φάσης και στις 28 και 90 ημέρες για τις τελικές της Β Φάσης. Τα αποτελέσματα για τις δυο φάσεις παρουσιάζονται αναλυτικά στα **Κεφάλαια 5.2.1** και **6.1.1**.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κυβικά, διαστάσεων 100x100 mm. Ο ρυθμός επιβολής φορτίου που επιλέχθηκε ήταν 0,8MPa/s ώστε να βρίσκεται στο επιτρεπτό εύρος των 0,2 MPa/s έως 1,0 MPa/s, που προδιαγράφει το πρότυπο.

Η αντοχή σε θλίψη δίνεται από τον τύπο:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (5.1)$$

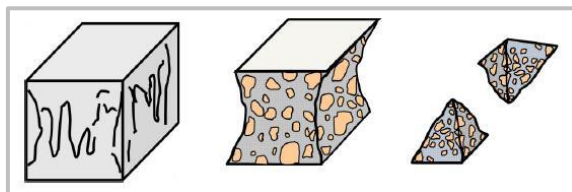
όπου,

f_c : η θλιπτική αντοχή σε MPa

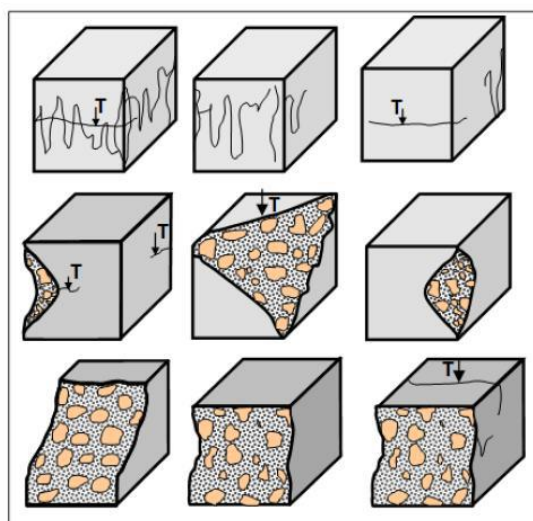
F : το μέγιστο φορτίο σε N

A_c : το εμβαδόν του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με την πλάκα φόρτισης (mm²)

Στα ακόλουθα **Σχήματα (5.2,5.3)** φαίνονται οι αποδεκτές και μη αποδεκτές μορφές αστοχίας αντίστοιχα, που μπορεί να έχει ένα κυβικό δοκίμιο μετά τη δοκιμή της μονοαξονικής θλίψης.



Σχήμα 5.2 Αποδεκτές μορφές δοκιμίων κατά τη δοκιμή σε θλίψη[76]



Σχήμα 5.3 Μη αποδεκτές μορφές δοκιμίων κατά τη δοκιμή θλίψης[76]

5.3 Β ΦΑΣΗ : Τελικές συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος

5.3.1 Υλικά, συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος και δοκίμια

Έχοντας ως οδηγό τα αποτελέσματα και τις πρακτικές παρασκευής των συνθέσεων από την Α Φάση, έγινε η σύνθεση και η παραγωγή των τεσσάρων (4) τελικών συνθέσεων ελαφροσκυροδέματος και της μιας (1) σύνθεσης αναφοράς από συμβατικό σκυρόδεμα (REF).

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν έχουν ήδη αναλυθεί στην **Παράγραφο 5.2.1**. Οι ποσότητες όλων των συστατικών για κάθε σύνθεση, αναφέρονται στον **Πίνακα 5.4**.

Με βάση τις παρατηρήσεις της Α Φάσης, έγινε και εδώ προϋγρανση της κίσηρης μαζί με τον περλίτη Pe-1(στις συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος που τον περιείχαν), πριν από την τελική ανάμιξη των υλικών. Τα παραγόμενα αναμίγματα αυτής της φάσης ήταν 25 l έκαστο και περιείχαν σταθερή ποσότητα τσιμέντου. Αντίστοιχα σταθερός, και μειωμένος συγκριτικά με την Α Φάση, παρέμεινε και ο λόγος ενεργού νερού προς τσιμέντο (N/T = 0,4).

Πίνακας 5.4 Περιεκτικότητες συστατικών των πέντε (5) τελικών συνθέσεων (Kg/m³)

| Υλικά (Kg/m ³) | REF | PeCaPu | PuCa | PePu | RPePu |
|----------------------------|------|--------|------|------|-------|
| Τσιμέντο | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| Νερό Προϋγρανσης | 0 | 84 | 175 | 151 | 158 |
| Συνολικό Νερό | 189 | 263 | 336 | 317 | 322 |
| Άμμος (Sand) | 946 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ρυζάκι 4-8 mm (Gr-1) | 568 | 55 | 51 | 0 | 0 |
| Γαμπύλι 8-16 mm (Gr-2) | 370 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Κίσηρης 0-8 mm (PuSand) | 0 | 0 | 607 | 397 | 402 |
| Κίσηρης 0-16 mm (Pu) | 0 | 492 | 354 | 446 | 402 |
| Περλίτης 0-2 mm (Pe-1) | 0 | 109 | 0 | 149 | 0 |
| Περλίτης 0-4 mm (Pe-2) | 0 | 437 | 0 | 0 | 101 |
| RHA | 0 | 0 | 0 | 0 | 101 |
| Επιβραδυντής | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 1,20 |
| Υπερρευστοποιητής | 4,80 | 3,00 | 2,40 | 2,40 | 3,20 |
| Λόγος N/T | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |

Ακολούθως της διαδικασίας προϋγρανσης, ξεκινούσε η τυποποιημένη διαδικασία ανάμιξης των υλικών της εκάστοτε σύνθεσης, σύμφωνα με τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος 2016 και τα πρότυπα που ακολουθεί το ΕΚΕΤΣ.

Για κάθε μια από τις συνθέσεις ελήφθησαν συνολικά 18 δοκίμια. Τα 6 κυβικά δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν κατά την δοκιμή μονοαξονικής θλίψης ενώ τα 6 κυλινδρικά προορίζονταν για τον προσδιορισμό του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης, του ανοικτού πορώδους και του συντελεστή διείδυσης χλωριόντων. Τέλος, τα 6 κυβικά δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν κατά τη δοκιμή ψύξης απόψυξης. Στον **Πίνακα 5.5** φαίνονται αναλυτικά οι διαστάσεις όλων των δοκιμίων ανά σύνθεση.

Πίνακας 5.5 Διαστάσεις των 18 δοκιμίων που παρασκευάστηκαν ανά σύνθεση

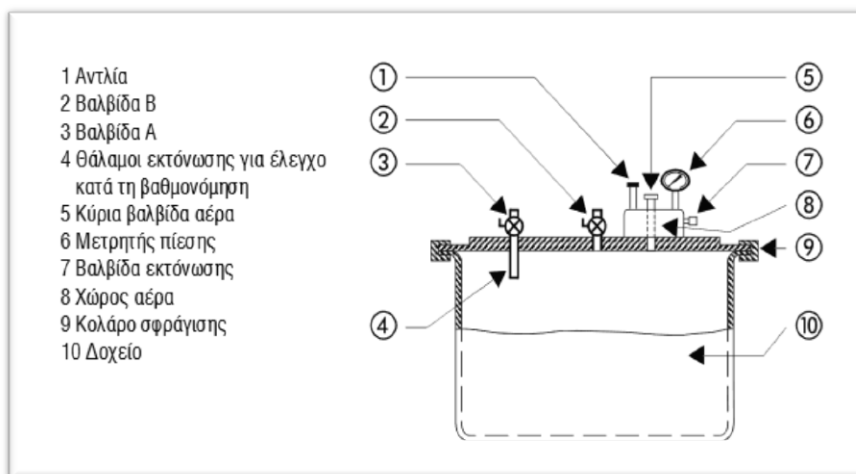
| Πλήθος και είδος δοκιμίων | Διαστάσεις (mm) |
|---------------------------|------------------|
| 6 Κυβικά | 100 x 100 |
| 6 Κυβικά | 70 x 70 |
| 6 Κυλινδρικά | Φ100 x 200 |

Τα δοκίμια ελήφθησαν με τη χρήση μητρών αντίστοιχων διαστάσεων, οι οποίες πληρώθηκαν σε δυο στρώσεις. Η κάθε στρώση συμπακνώθηκε για 30 δευτερόλεπτα στη δονητική τράπεζα. Όταν τα δοκίμια αφαιρέθηκαν από τις μήτρες μετά από 24 ώρες, μεταφέρθηκαν στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του ΕΜΠ όπου συντηρήθηκαν σε δεξαμενή νερού μέχρι την ημερομηνία διεξαγωγής του εκάστοτε πειράματος.

5.3.2 Ιδιότητες νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος

Στη Β Φάση, εκτός από τη μέτρηση της αρχικής κάθισης των συνθέσεων, προσδιορίστηκε επιπλέον η απώλεια κάθισης που είχαν τα μίγματα στα 30'.

Σε συνέχεια της δοκιμής κάθισης, έγινε ο προσδιορισμός του περιεχόμενου αέρα κατά EN 12350-7, με χρήση δοχείου 8 λίτρων με ενσωματωμένη χειροκίνητη αντλία πίεσης. Το δοχείο πληρώνεται σε 3 ίσες στρώσεις οι οποίες συμπακνώνονται με 25 χτύπους η καθεμία με τη βοήθεια της ράβδου συμπύκνωσης. Μετά τη συμπύκνωση κάθε στρώσης, το δοχείο κρούεται με πλαστικό σφυρί 10-15 φορές ώστε να κλείσουν τα κενά. Αφού καθαριστούν τα χείλη του δοχείου για να εξασφαλιστεί η σωστή επαφή με το κάλυμμα, το τελευταίο τοποθετείται ώστε να εφαρμόσει πολύ καλά. Στη συνέχεια γίνεται η εξισορρόπηση της πίεσης του αέρα του δοχείου με τη χρήση των βαλβίδων που φαίνονται και στο **Σχήμα 5.4**. Η συσκευή έχει βαθμονομηθεί έτσι ώστε η τελική ένδειξη που λαμβάνεται από τον μετρητή, να αντιστοιχεί στο ποσοστό του αέρα στο σκυρόδεμα. Το βάρος του συμπακνωμένου σκυροδέματος του συγκεκριμένου δοχείου 8 l χρησιμοποιήθηκε και για τον υπολογισμό της πυκνότητας του νωπού υλικού.



Σχήμα 5.4 Συσκευή μέτρησης περιεχόμενου αέρα σκυροδέματος[77]

Η διερεύνηση της αντοχής των συνθέσεων έγινε με τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης στις 28 και 90 ημέρες, όπως έχει ήδη περιγραφεί στο **Κεφάλαιο 5.2.2**.

5.4 Συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης

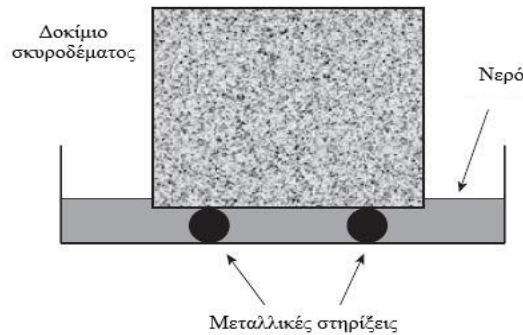
Η μεταφορά υγρών σε πορώδη στερεά λόγω επιφανειακής τάσης που δρα στους τριχοειδείς πόρους, ονομάζεται απορρόφηση νερού (absorption). Η απορρόφηση σχετίζεται τόσο με τη δομή του πόρου, όσο και με την κατάσταση υγρασίας του σκυροδέματος. Οι δύο βασικές παράμετροι της απορρόφησης στο ξηρό σκυρόδεμα είναι :

- η μάζα του νερού που απαιτείται για τον κορεσμό του σκυροδέματος (πραγματικό πορώδες), που διερευνάται στο **Κεφάλαιο 5.5**
- το ποσοστό διείδυσης της τριχοειδούς ανόδου (sorptivity)[78]

Για τον προσδιορισμό της τριχοειδούς απορρόφησης (capillary absorption), με σκοπό την εκτίμηση της απορροφητικότητας (sorptivity) μέσω τριχοειδών πόρων, S ($mm/min^{0.5}$) του σκυροδέματος, έγινε δοκιμή με χρήση της οδηγίας RILEM TC 116 PCD (1999)[79]. Η δοκιμή αυτή, βασίζεται στον προσδιορισμό της μεταβολής του βάρους του υπό έλεγχο, δοκιμίου λόγω της απορρόφησης νερού που πραγματοποιείται διαμέσου των τριχοειδών πόρων του. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 2 κυλινδρικά ανά σύνθεση, με διαστάσεις $\Phi 100 \times 30$ mm και με ηλικία ελέγχου τις 28 ημέρες. Πριν τη διεξαγωγή της δοκιμής, το εκάστοτε δοκίμιο ξηράνθηκε σε φούρνο ξηράνσεως (πυριαντήριο) υπό σταθερή θερμοκρασία $105 \text{ }^\circ\text{C}$ μέχρι σταθεροποίησης του βάρους του. Η τελευταία εξακριβώθηκε με διαδοχικές μετρήσεις βάρους έως ότου η απόκλιση δυο εξ αυτών, σε διάστημα 24 ± 3 ωρών, προκύψει μικρότερη από 0,1%. Στη συνέχεια, το δοκίμιο παρέμεινε σε συνθήκες περιβάλλοντος για περίπου μία ή δύο ώρες, ώστε να εξισωθεί η θερμοκρασία του με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος πριν τη διενέργεια της δοκιμής απορροφητικότητας.

Για τις ανάγκες της δοκιμής, χρησιμοποιήθηκε πλαστικό δοχείο, μέσα στο οποίο είχαν τοποθετηθεί παρατεταγμένες μεταλλικές στηρίξεις από ανοξείδωτο χάλυβα. Πριν την έναρξη της δοκιμής και για την αποφυγή της πλευρικής εισροής ύδατος, κάθε ένα δοκίμιο καλύφθηκε περιμετρικά με στεγανοποιητική ταινία. Στη συνέχεια τοποθετούνταν επάνω στη μεταλλική στήριξη και σε οριακή επαφή με το νερό του δοχείου (βάθος εμβάπτισης 3

mm), και καταγράφονται το βάρος του συναρτήσει του χρόνου, σε προκαθορισμένες χρονικές στιγμές. Πριν από κάθε ζύγιση, η επιφάνεια του δοκιμίου, που ερχόταν σε επαφή με το νερό, σκουπιζόταν με ένα μη απορροφητικό πανί έτσι ώστε να αφαιρεθούν οι ελεύθερες ρίζες νερού αλλά η επιφάνεια να παραμείνει ενυδατωμένη. Η διάταξη που περιγράφηκε, παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.5**. Καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος, γινόταν έλεγχος της στάθμης του νερού στο δοχείο ώστε το βάθος εμβάπτισης των δοκιμίων να διατηρείται σταθερό. Οι μετρήσεις διήρκεσαν 4 ώρες και 16 λεπτά.



Σχήμα 5.5 Σχηματική απεικόνιση της διάταξης της δοκιμής τριχοειδούς απορρόφησης[80]

Όπως έχει ήδη αποδειχθεί στη βιβλιογραφία[81], συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου, $T^{0.5}$ (T σε min), η μεταβολή του βάρους του δοκιμίου, ανηγμένου στην επιφάνεια έκθεσης σε νερό (αγνοώντας την πλευρική έκθεση), $i=DW/A$ (kg/m^2), ακολουθεί τη γραμμική **Εξίσωση 5.2**. Ως απορροφητικότητα ορίζεται η κλίση της ευθείας, S ($\text{mm/min}^{0.5}$).

$$i = \frac{\Delta W}{A} = St^{1/2} + i_0 \quad (5.2)$$

όπου,

i : η αύξηση στη μάζα σε g/mm^2 από την έναρξη της δοκιμής για κάθε μονάδα εμβαδού που έρχεται σε επαφή με το νερό εφόσον η αύξηση στη μάζα οφείλεται στη διείσδυση του νερού (1 g ισοδυναμεί με 1 mm^3 , οπότε το i μπορεί να εκφραστεί σε mm)

ΔW : η μάζα του απορροφημένου νερού (g)

A : το εμβαδόν της επιφάνειας που είναι σε επαφή με το νερό (mm^2)

t : ο χρόνος σε min στον οποίο καταγράφεται η αύξηση της μάζας

S : η τριχοειδής απορρόφηση (sorptivity), σε $\text{mm/min}^{0.5}$

i_0 : η αρχική απορρόφηση

Το μέγεθος i_o δίνει τη δυνατότητα να εκφραστεί η μικρή αρχική αναχαίτιση στην απορρόφηση που προκύπτει από την ταχεία πλήρωση των επιφανειακών πόρων κατά την έναρξη της διαδικασίας.

Η γραμμικότητα ελέγχεται μέσω της τιμής του συντελεστή συσχέτισης, R^2 , της γραμμικής παλινδρόμησης. Με βάση υπάρχουσες μελέτες[82], κατά τις δοκιμές απορροφητικότητας που έχουν γίνει σε διάφορα πορώδη υλικά αλλά και στο σκυρόδεμα, φαίνεται πως η ροή είναι μονοδιάστατη και ως εκ τούτου οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης πρέπει να ξεπερνούν το 0,98, κατά το πρότυπο ASTM C 1585, για δεδομένα που λαμβάνονται τουλάχιστον έως τις πρώτες οκτώ ώρες της δοκιμής. Αν το κριτήριο αυτό δεν ικανοποιείται, η τιμή της απορροφητικότητας θα πρέπει να απορρίπτεται, καθώς αποτελεί ένδειξη μη επαρκούς γραμμικότητας της καμπύλης.

5.5 Ανοιχτό πορώδες OP% - Υδατοαπορροφητικότητα

Για τη δοκιμή προσδιορισμού του ανοιχτού πορώδους (open porosity) OP(%), ως παραμέτρου υδατοαπορροφητικότητας του σκυροδέματος, χρησιμοποιήθηκαν 2 κυλινδρικά δοκίμια ανά σύνθεση, με διαστάσεις $\Phi 100$ και πάχος περίπου 3 cm. Η πειραματική διαδικασία στηρίχθηκε στο αμερικανικό πρότυπο ASTM C 642 (1997)[83] και διενεργήθηκε στις 28, στις 90 και στις 180 ημέρες αντίστοιχα.

Στο πλαίσιο των δοκιμών αυτών, η συντήρηση όλων των δοκιμών έγινε σε δεξαμενή νερού. Σε κάθε περίπτωση χρειάζεται να σημειωθεί ότι, πριν την διεξαγωγή του πειράματος, τα δοκίμια πρέπει να έχουν έρθει σε κατάσταση πλήρους κορεσμού. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε τεχνητά (π.χ. με βρασμό) είτε με το να παραμείνουν εμβαπτισμένα σε νερό για κατάλληλο χρονικό διάστημα. Κατά τις εκάστοτε ηλικίες ελέγχου, τα δοκίμια ζυγίστηκαν με δύο τρόπους: (i) σε νερό υπό άνωση (μάζα υπό άνωση) και (ii) σε αέρα (μάζα κορεσμένου δοκιμίου). Εν συνεχεία, ξηράθηκαν σε φούρνο ξηράνσεως (πυριαντήριο) υπό σταθερή θερμοκρασία 105 °C μέχρι σταθεροποίησης του βάρους τους. Η τελευταία εξακριβώθηκε με διαδοχικές μετρήσεις βάρους έως ότου η απόκλιση μεταξύ αυτών φτάσει το 0,1 %. Μετά την ξήρανσή τους, τα δοκίμια ζυγίστηκαν ξανά σε αέρα (μάζα ξηρού δοκιμίου). Με χρήση των τριών μαζών που προέκυψαν από τις προαναφερθείσες μετρήσεις και των **Εξισώσεων 5.3** έως **5.6**, υπολογίστηκε το ανοικτό πορώδες OP %. Όπου ρ το ειδικό βάρος του νερού σε συνήθη θερμοκρασία (18 °C), το οποίο ελήφθη ίσο με 1000 kg/m³.

$$\text{Απορρόφηση μετά την εμβάπτιση και επί ξηρό \%} = \frac{C-A}{A} \times 100 \quad (5.3)$$

$$\text{Πυκνότητα επί ξηρό} = \frac{A}{C-D} \times \rho = g_1 \quad (5.4)$$

$$\text{Φαινόμενη πυκνότητα} = \frac{A}{A-D} \times \rho = g_2 \quad (5.5)$$

$$\text{Ανοιχτό πορώδες OP \%} = \frac{g_1 - g_2}{g_2} \times 100 \quad (5.6)$$

Όπου,

A : μάζα δοκιμίου επί ξηρό (g)

C : μάζα δοκιμίου πλήρες κορεσμένο επιφανειακά στεγνό (g)

D : φαινόμενη μάζα του δοκιμίου επί ξηρό (g)

g_1 : πυκνότητα του δοκιμίου επί ξηρό (Mg/m^3)

g_2 : φαινόμενη πυκνότητα (Mg/m^3)

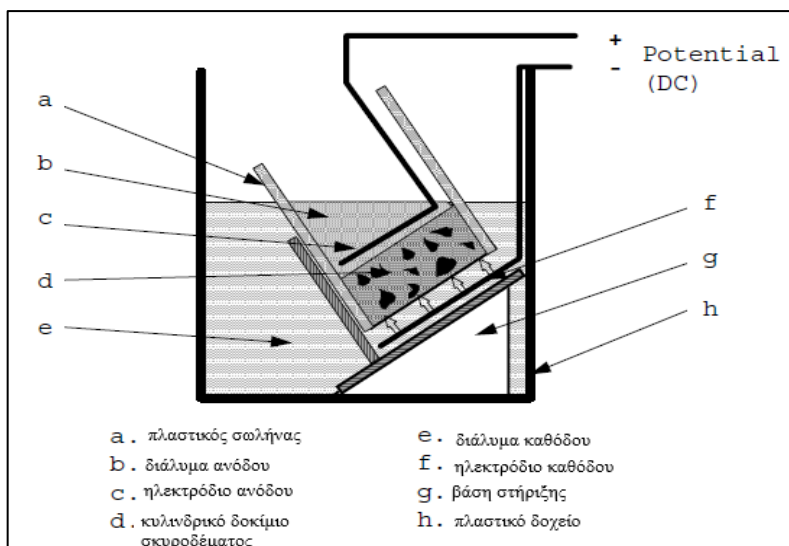
ρ : πυκνότητα νερού (Mg/m^3)

5.6 Δοκιμή επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων (NordTest Build 492)

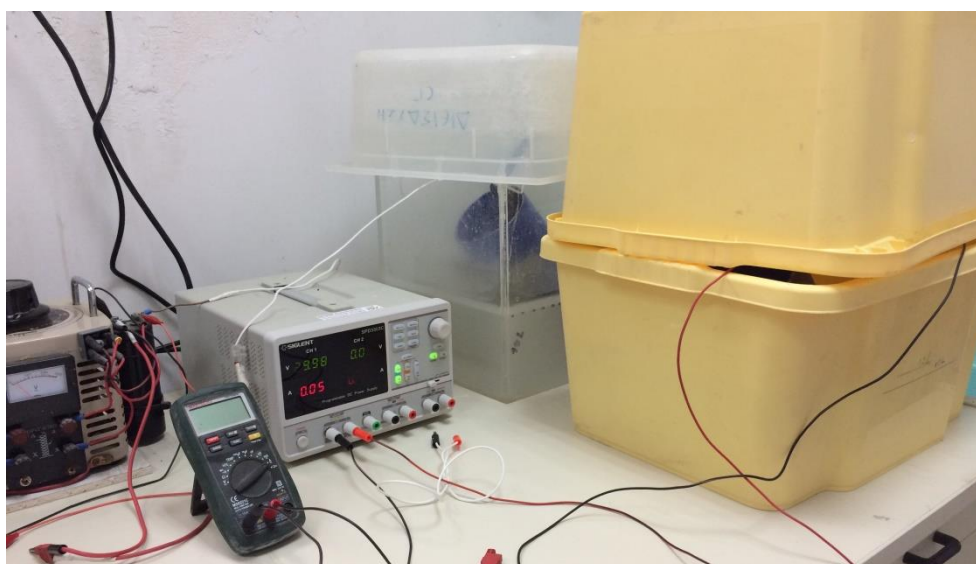
Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και με σκοπό τον προσδιορισμό της διαπερατότητας των συνθέσεων σε χλωριόντα, επιλέχθηκε και διενεργήθηκε η πρότυπη μέθοδος NordTest Built 492 (1999). Η συγκεκριμένη μέθοδος επιτρέπει την επιτάχυνση της διαδικασίας διείσδυσης των χλωριόντων στο σκυρόδεμα μέσω της εφαρμογής ενός εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Με βάση τα αποτελέσματα της δοκιμής, προσδιορίζεται ο συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων μη σταθερής κατάστασης D_{nssm} (m^2/s).

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της δοκιμής, ήταν κυλινδρικά με διαστάσεις $\Phi 100$ και πάχος 50 mm, 6 συνολικά για κάθε σύνθεση και πιο συγκεκριμένα 2 σε κάθε μια από τις ηλικίες ελέγχου των 28, 90 και 180 ημερών αντίστοιχα. Πριν τη διενέργεια του πειράματος, τα δοκίμια συντηρήθηκαν σε διάλυμα υδροξειδίου του ασβεστίου ($\text{Ca}(\text{OH}_2)$). Δεν έλαβε χώρα η συντήρηση τους σε αντλία κενού όπως αναφέρει το πρότυπο λόγω έλλειψης της κατάλληλης διάταξης. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η συντήρηση σε διάλυμα υδροξειδίου του ασβεστίου, συνδράμει στη βελτίωση της αντίστασης της επιφάνειας του σκυροδέματος στην απορρόφηση χλωριόντων, κυρίως στο αρχικό στάδιο εισαγωγής του διαλύματος χλωριόντων[84]. Η αντλία κενού προορίζεται για τον ίδιο ακριβώς σκοπό με ελαφρώς καλύτερα τελικά αποτελέσματα. Ως εκ τούτου, αναμένεται οι συντελεστές διείσδυσης χλωριόντων των δοκιμίων να προκύψουν αυξημένοι σε ένα βαθμό

Η επιταχυνόμενη δοκιμή NordTest Build 492 (1999) συνιστά μια ποσοτική δοκιμή που, μέσω πειραμάτων μη σταθερής κατάστασης, οδηγεί στον προσδιορισμό του συντελεστή μεταφοράς των χλωριόντων (chloride migration coefficient) στο σκυρόδεμα. Η μεταφορά των χλωριόντων επιτυγχάνεται με την εξαναγκασμένη επιταχυνόμενη κίνηση αυτών, διαμέσου κυλινδρικού δοκιμίου σκυροδέματος, και μέσω κατάλληλης διάταξης. Η διάταξη αυτή παρουσιάζεται στο **Σχήμα 5.6** και αντιστοίχως, στην **Εικόνα 5.1**, παρουσιάζεται ο πειραματικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε και κατασκευάστηκε στο ΕΟΣ/ΕΜΠ.



Σχήμα 5.6 Σχηματική απόδοση διάταξης δοκιμής επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων NordTest Build 492 (1999)



Εικόνα 5.1 Πειραματικός εξοπλισμός δοκιμής NordTest Build 492(1999) στο ΕΟΣ/ΕΜΠ

Στο πρώτο στάδιο της δοκιμής γίνεται η προετοιμασία των δυο διαλυμάτων, της ανόδου και της καθόδου. Πιο συγκεκριμένα, για το διάλυμα ανόδου (0,3 $NaOH$) χρησιμοποιούνται 4,84gr $NaOH$ σε 365 ml απιονισμένου νερού ενώ για την επίτευξη του διαλύματος καθόδου (10% κ.β. $NaCl$), τοποθετούνται 12 l νερό βρύσης μέσα στην πλαστική δεξαμενή όπου και διαλύονται 1333,33 gr $NaCl$.

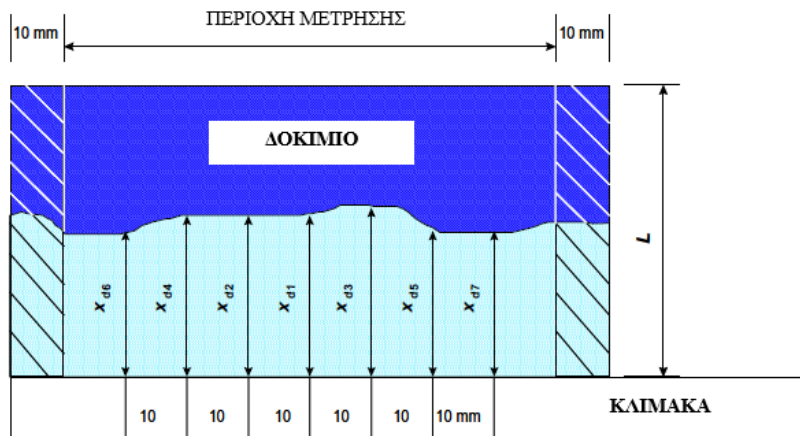
Αφότου έχει τοποθετηθεί κατάλληλα η διάταξη του **Σχήματος 5.6** στη δεξαμενή, μαζί με τα διαλύματα ανόδου και καθόδου, γίνεται έναρξη του πειράματος με μια αρχική δοκιμαστική διαφορά δυναμικού ίση με 30 V DC. Ένα τμήμα του κυλινδρικού δοκιμίου παραμένει, μέσω της διάταξης των ηλεκτροδίων, υπό σταθερή διαφορά δυναμικού, από 10 έως 60 V DC (συνηθέστερα μεταξύ 10 και 30 V DC), για μία περίοδο μεταξύ 6 έως 96

ωρών (συνηθέστερα 24 ωρών). Με βάση το αρχικώς διερχόμενο ρεύμα, γίνεται η επιλογή της διάρκειας της δοκιμής και της διαφοράς δυναμικού, σύμφωνα με τον **Πίνακα 5.6**. Τόσο κατά την έναρξη όσο και κατά τη λήξη της δοκιμής, καταγράφεται η θερμοκρασία του διαλύματος ανόδου, το διερχόμενο ρεύμα καθώς και η ηλεκτρική αντίσταση του δοκιμίου, όπως επιβάλλεται και από το πρότυπο.

Πίνακας 5.6 Διαφορά δυναμικού και διάρκεια δοκιμής [85]

| Αρχική Ένταση I_{30V} (με 30V) (mA) | Επιλεγόμενη τάση V (V) | Πιθανή νέα αρχική ένταση I_0 (mA) | Διάρκεια πειράματος (hour) |
|---|------------------------------|---|----------------------------------|
| $I_0 < 5$ | 60 | $I_0 < 10$ | 96 |
| $5 \leq I_0 < 10$ | 60 | $10 \leq I_0 < 20$ | 48 |
| $10 \leq I_0 < 15$ | 60 | $20 \leq I_0 < 30$ | 24 |
| $15 \leq I_0 < 20$ | 50 | $25 \leq I_0 < 35$ | 24 |
| $20 \leq I_0 < 30$ | 40 | $25 \leq I_0 < 40$ | 24 |
| $30 \leq I_0 < 40$ | 35 | $35 \leq I_0 < 50$ | 24 |
| $40 \leq I_0 < 60$ | 30 | $40 \leq I_0 < 60$ | 24 |
| $60 \leq I_0 < 90$ | 25 | $50 \leq I_0 < 75$ | 24 |
| $90 \leq I_0 < 120$ | 20 | $60 \leq I_0 < 80$ | 24 |
| $120 \leq I_0 < 180$ | 15 | $60 \leq I_0 < 90$ | 24 |
| $180 \leq I_0 < 360$ | 10 | $60 \leq I_0 < 120$ | 24 |
| $I_0 \geq 360$ | 10 | $I_0 \geq 120$ | 6 |

Μετά το τέλος της δοκιμής και αφού η διάταξη έχει αποσυναρμολογηθεί, το δοκίμιο αφαιρείται, ξεπλένεται με νερό και σκουπίζεται ώστε να είναι επιφανειακά στεγνό. Ακολουθεί η χρωματογραφική μέθοδος προσδιορισμού του βάθους διείσδυσης των χλωριόντων. Αναλυτικότερα, το δοκίμιο διαχωρίζεται αξονικά μέσω διάρρηξης και μια εκ των δυο θραυσμένων επιφανειών του, ψεκάζεται με διάλυμα νιτρικού αργύρου 0,1 M $AgNO_3$ (10 ψεκασμοί). Ύστερα από περίπου 15 λεπτά και έχοντας ολοκληρωθεί η χημική αντίδραση του νιτρικού αργύρου με τα ελεύθερα χλωριόντα, γίνεται εμφανές το βάθος διείσδυσης των χλωριόντων στο δοκίμιο. Ο τρόπος μέτρησης των βαθών αυτών φαίνεται στο **Σχήμα 5.7**. Στην **Εικόνα 5.2** παρουσιάζεται η κατάσταση δυο θραυσμένων δοκιμίων, πριν και μετά των ψεκασμό τους με το διάλυμα νιτρικού αργύρου, όταν πλέον διακρίνονται οι χρωματισμένες επιφάνειες διείσδυσης χλωριόντων.



Σχήμα 5.7 Απεικόνιση του τρόπου μέτρησης των βαθών διείσδυσης των χλωριόντων στο δοκίμιο[85]



Εικόνα 5.2 Εμφάνιση δυο θραυσμένων δοκιμίων, πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) τον ψεκασμό τους με διάλυμα $AgNO_3$ κατά τη δοκιμή NT Build 492(1999)

Για τον υπολογισμό του συντελεστή μεταφοράς χλωριόντων, D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ m/s²), χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή των μετρήσεων των βαθών διείσδυσης, x_d , καθώς και οι ακόλουθες **Εξισώσεις 5.7** έως **5.9**.

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} \times \frac{xd - a\sqrt{xd}}{t} \quad (5.7)$$

με

$$E = \frac{U-2}{L} \quad (5.8)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \times \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right) = g_1 \quad (5.9)$$

Όπου,

D_{nssm} : συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων ($\times 10^{-12}$ m²/s)

F : σταθερά του Faraday, $F=9,648 \cdot 10^4 \text{ J}/(\text{V mol})$

R : σταθερά αερίου, $R=8,314 \text{ J}/(\text{K mol})$

U : απόλυτη τιμή της εφαρμοσμένης τάσης (V)

T : μέση τιμή αρχικής και τελικής θερμοκρασίας του διαλύματος ανόδου ($^{\circ}\text{C}$)

L : πάχος δοκιμίου (mm)

x_d : μέση τιμή των βαθών διείσδυσης των χλωριόντων (mm)

t : διάρκεια πειράματος (h)

erf^{-1} : αντίστροφη συνάρτηση σφάλματος

c_d : συγκέντρωση χλωριόντων στην οποία το χρώμα αλλάζει, $c_d = 0,07 \text{ N}$

c_0 : συγκέντρωση χλωριόντων στο διάλυμα καθόδου, $c_0 = 2 \text{ N}$

Ο χαρακτηρισμός της αντίστασης των συνθέσεων της παρούσας εργασίας, έγινε με βάση τον **Πίνακα 5.7**, στον οποίο φαίνονται οι κατηγορίες σκυροδέματος ανάλογα με την τιμή του συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων, όπως αυτός προκύπτει από την προαναφερθείσα πειραματική διαδικασία.

Πίνακας 5.7 Κατηγοριοποίηση της αντίστασης του σκυροδέματος απέναντι στη διείσδυση χλωριόντων με βάση την τιμή του συντελεστή διείσδυσης $D_{nssm}(\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$ [86]

| Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων $D_{nssm} (\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$ | Αντίσταση στη 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 |

5.7 Δοκιμή επαναλαμβανόμενων κύκλων ψύξης-απόψυξης και παράλληλη δοκιμή μέτρησης ταχύτητας υπερήχων (UPV)

Για τη διενέργεια της δοκιμής ψύξης-απόψυξης, χρησιμοποιήθηκαν κυβικά δοκίμια διατομής 70 mm x 70 mm, τρία για κάθε σύνθεση. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 666[87] και πριν την εφαρμογή των επαναλαμβανόμενων κύκλων ψύξης-απόψυξης, για να είναι δυνατή η πρόκληση φθορών, προηγήθηκε κορεσμός των δοκιμίων σε νερό. Η ψύξη των δοκιμίων λάμβανε χώρα σε ξηρό περιβάλλον ενώ η απόψυξη γινόταν σε νερό. Το στάδιο της ψύξης διαρκούσε 4 h όσο και το στάδιο της

απόψυξης. Με κάθε 4h ψύξης ακολουθούμενες από 4h απόψυξης, ολοκληρωνόταν ένας κύκλος της δοκιμής. Σύμφωνα με το πρότυπο, η θερμοκρασία των δοκιμίων κατά το στάδιο της ψύξης θα πρέπει να κινείται στο εύρος των $-18\pm 2^{\circ}\text{C}$ και η αντίστοιχη θερμοκρασία κατά το στάδιο απόψυξης στην περιοχή των $+4\pm 2^{\circ}\text{C}$. Σε κάθε διακοπή των κύκλων, τα δοκίμια παρέμεναν σε κατάσταση κατάψυξης. Η αξιολόγηση της συμπεριφοράς των δοκιμίων έγινε μέσω μετρήσεων μάζας και μήκους. Κάθε 5 επαναλαμβανόμενους κύκλους ψύξης-απόψυξης, ή όποτε παρατηρούνταν σοβαρή υποβάθμιση των δοκιμίων, τα δοκίμια ζυγίζονταν και γινόταν μέτρηση του μήκους τους. Η δοκιμή τερματίστηκε μετά από 75 επαναλαμβανόμενους κύκλους ψύξης-απόψυξης. Μετά το πέρας του πειράματος, έγινε θραύση των δοκιμίων με χρήση του εξοπλισμού του ΕΟΣ του ΕΜΠ και σύμφωνα με τη διαδικασία που έχει ήδη περιγραφεί στο **Κεφάλαιο 5.2.2**. Επιλέχθηκε ρυθμός επιβολής φορτίου 5KN/s. Θραύση 3 ακόμη κυβικών δοκιμίων ανά σύνθεση, διενεργήθηκε και κατά την ημερομηνία έναρξης της δοκιμής, ώστε τα αποτελέσματά τους να χρησιμοποιηθούν ως αντοχές αναφοράς.



Εικόνα 5.3 Διατεταγμένα δοκίμια κατά το στάδιο της κατάψυξης για τη δοκιμή ψύξης-απόψυξης

Στην **Εικόνα 5.3**, παρουσιάζονται τα δοκίμια τοποθετημένα σε ειδική διάταξη ώστε να μην έρχονται σε επαφή μεταξύ τους, εντός της κατάψυξης. Όπως φαίνεται, καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής ψύξης-απόψυξης, η θερμοκρασία παρακολουθούνταν με θερμομότρο ώστε να παραμένει στα όρια που ορίζονται από το πρότυπο.

Παράλληλα με τη δοκιμή ψύξης-απόψυξης, και για τον πληρέστερο προσδιορισμό της επίδρασης αυτής στα δοκίμια, διενεργήθηκε και δοκιμή μέτρησης ταχύτητας υπερήχων, σύμφωνα με το πρότυπο EN 12504-4:2004[88]. Η δοκιμή εντάσσεται στην κατηγορία των μη καταστροφικών ελέγχων του σκυροδέματος στη σκληρυμένη φάση του. «Οι υπέρηχοι είναι ελαστικοί κυματισμοί του αέρα, της ίδιας φύσης με τον ήχο, αλλά συχνότητας >

20.000 m/sec. Η ταχύτητά τους (V) μέσα από ένα υλικό, συνδέεται με το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας E_δ και την πυκνότητα ρ του υλικού : $V=(E_\delta/\rho)^{0.5}$.

Σε ελαστικά υλικά ισχύει :

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (5.10)$$

Όπου

E : το μέτρο ελαστικότητας

ν : ο λόγος του Poisson[89]»

Η ελαστικότητα των υλικών αποτελεί έναν έμμεσο παράγοντα της αντοχής τους και κατά συνέπεια η δοκιμή υπερήχων μπορεί να χρησιμεύσει στην εκτίμηση της αντοχής του σκυροδέματος αλλά και στην ανίχνευση τυχόν ατελειών ή ρωγμών του υλικού. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, χρησιμοποιήθηκε κυρίως ως εργαλείο προσδιορισμού της ποιότητας του σκυροδέματος μετά από έναν αριθμό κύκλων ψύξης-απόψυξης, καθώς ο μεγάλος χρόνος μετάδοσης των κυμάτων μπορεί να αποτελέσει δείκτη κακής ποιότητας σκυροδέματος και ύπαρξης ρωγμών. Πιο συγκεκριμένα, οι μετρήσεις της ταχύτητας υπερήχων (Ultrasonic Pulse Velocity-UPV) πραγματοποιούνταν ανά 5 κύκλους ψύξης-απόψυξης μέχρι τους 55 και διενεργήθηκε μια τελευταία μέτρηση στο τέλος της δοκιμής ψύξης-απόψυξης δηλαδή μετά από 75 κύκλους.

Η δοκιμή υπερήχων βασίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή, αποτελείται κυρίως από μια γεννήτρια ηλεκτρικού παλμού και ένα ζεύγος μορφοτροπέων και ηλεκτροακουστικών κρυστάλλων (ακροδέκτες). Χρησιμοποιείται χρονοδιακόπτης για τη μέτρηση του μεσοδιαστήματος μεταξύ της έναρξης ενός παλμού από τον ακροδέκτη μετάδοσης και της άφιξης του στον ακροδέκτη λήψης, με άμεση ανάγνωση ψηφιακής απεικόνισης. Καθώς ο παραγόμενος παλμός μεταφέρεται στο σκυρόδεμα, με τη χρήση υγρού υλικού σύζευξης (γλυκερόλης), υποβάλλεται σε πολλαπλές ανακλάσεις πάνω στις εσωτερικές επιφάνειες του υλικού με αποτέλεσμα να αναπτύσσεται ένα περίπλοκο σύστημα κυμάτων εντάσεως, τόσο διαμήκων όσο και εγκάρσιων. Τα πρώτα κύματα που φθάνουν στον πρώτο μορφοτροπέα είναι τα διαμήκη, τα οποία μετατρέπονται σε ηλεκτρικό σήμα από τον δεύτερο. Τα κυκλώματα ηλεκτρονικού συγχρονισμού επιτρέπουν τη μέτρηση του χρόνου διέλευσης T του παλμού. Η διαμήκης παλμική ταχύτητα (σε km/s ή m/s) δίνεται από την **Εξίσωση 5.11**.

$$v = \frac{L}{T} \quad (5.11)$$

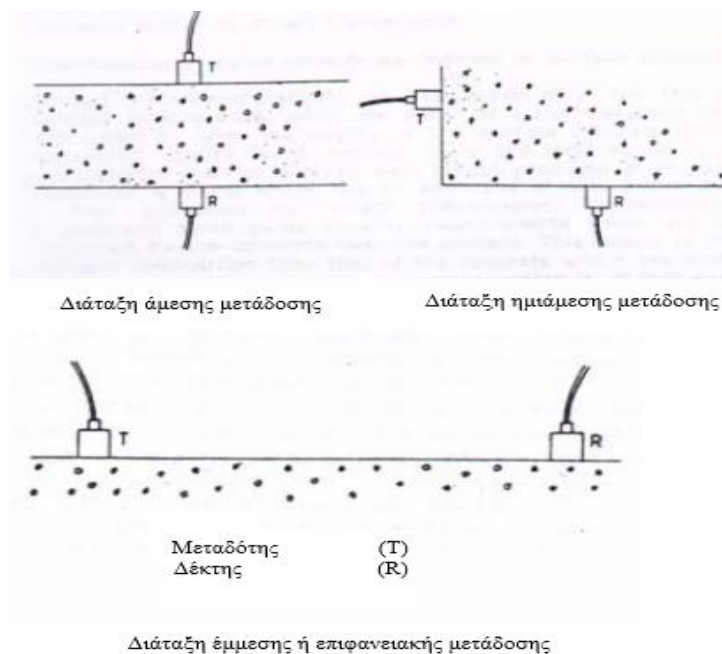
Όπου

v : η διαμήκης παλμική ταχύτητα,

L : το μήκος διαδρομής,

T : ο χρόνος που χρειάζεται ο παλμός ώστε να διασχίσει το μήκος L

Είναι σημαντικό, καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής, να εξασφαλίζεται επαρκής ακουστική ζεύξη μεταξύ του σκυροδέματος και της επιφάνειας κάθε ακροδέκτη. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση του εκάστοτε υλικού σύζευξης, στην προκειμένη με τη γέλη γλυκερόλης. Το στρώμα του συνδετικού υλικού μεταξύ της επιφάνειας του σκυροδέματος και του ακροδέκτη θα πρέπει να είναι αρκετά λεπτό και πριν τη λήψη της τελικής μέτρησης συνίσταται να προηγείται αραίωση της στρώσης, με επανειλημμένες μετρήσεις μέχρι να ληφθεί μια ελάχιστη τιμή του χρόνου μετάδοσης. Παράλληλα, ως επιφάνειες εφαρμογής των ακροδεκτών θα πρέπει να επιλεγθούν οι πιο ομαλές και λείες του δοκιμίου ώστε να μην επηρεαστούν οι μετρήσεις της ταχύτητας υπερήχων UPV[90]. Στο **Σχήμα 5.8** παρουσιάζονται οι πιθανές διατάξεις μετάδοσης των ακροδεκτών. Όπου είναι δυνατόν, θα πρέπει να χρησιμοποιείται η άμεση διάταξη μετάδοσης, δεδομένου ότι η μεταφορά ενέργειας μεταξύ των μορφοτροπέων είναι στο μέγιστο και η ακρίβεια προσδιορισμού της ταχύτητας διέπεται κυρίως από την ακρίβεια της μέτρησης του μήκους διαδρομής[90].



Σχήμα 5.8 Εναλλακτικές διατάξεις ακροδεκτών κατά τη δοκιμή υπερήχων[90]

Με βάση τον **Πίνακα 5.8** γίνεται ο χαρακτηρισμός της ποιότητας του σκυροδέματος, ανάλογα με το εύρος τιμών στο οποίο ανήκει η ταχύτητα υπερήχων UPV.

Πίνακας 5.8 Ποιοτική κατάταξη σκυροδέματος με βάση την ταχύτητα της δοκιμής υπερήχων[90]

| Διαμήκης ταχύτητα υπερήχων v (km/s. 10^{-3}) | Ποιότητα σκυροδέματος |
|--|-----------------------|
| > 4,5 | Εξαιρετική |
| 3,5 – 4,5 | Καλή |
| 3,0 – 3,5 | Αμφίβολη |
| 2,0 – 3,0 | Κακή |
| < 2,0 | Πολύ κακή |

6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

6.1 Β ΦΑΣΗ : Τελικές συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος

6.1.1 Ιδιότητες νωπού και σκληρωμένου σκυροδέματος

Μετά την τελική ανάμιξη των υλικών και την ομογενοποίησή τους, διενεργήθηκαν οι δοκιμές στο νωπό υλικό για κάθε μια σύνθεση. Τα αποτελέσματα αφορούν στην κάθιση (αρχική και μετά από 30'), στην περιεκτικότητα σε αέρα και στο μοναδιαίο βάρος του σκυροδέματος και παρουσιάζονται στον **Πίνακα 6.1**.

Πίνακας 6.1 Αποτελέσματα δοκιμών τελικών συνθέσεων σε νωπή φάση

| Ιδιότητα | REF | PeCaPu | PuCa | PePu | RPePu |
|--------------------------------------|------|--------|------|------|-------|
| Αρχική κάθιση (mm) | 110 | 90 | 240 | 200 | 75 |
| Απώλεια κάθισης (30') (mm) | 90 | 80 | 190 | 160 | 95 |
| Περιεκτικότητα σε αέρα % | 3,1 | 4,8 | 6,2 | 5,3 | 5,6 |
| Μοναδιαίο βάρος (kg/m ³) | 2389 | 1682 | 1526 | 1528 | 1553 |

Όπως φαίνεται, με βάση τα αποτελέσματα της δοκιμής κάθισης, όλες οι συνθέσεις είναι κατηγορίας S2 (50-90 mm) και άνω. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι συνθέσεις PuCa και PePu οι οποίες εντάσσονται στην κατηγορία S4 (160-210 mm) με αρκετά μεγαλύτερη κάθιση σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς. Αυτό οφείλεται στα αντιστοιχώς υψηλά ποσοστά περιεχόμενου αέρα των συνθέσεων αυτών, τα οποία είναι γνωστό και από τη βιβλιογραφία ότι αυξάνουν την εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος [91]. Παρόμοια αυξημένο ποσοστό περιεκτικότητας αέρα όμως εμφανίζει και η σύνθεση RPePu, γεγονός που δεν οδήγησε σε αύξηση της κάθισης όπως θα περίμενε κανείς. Αυτό οφείλεται στο υλικό της τέφρας φλοιού ρυζιού το οποίο έχει αναφερθεί ότι μπορεί να μειώσει το ποσοστό κάθισης έως και 48,5 % [92] σε σύγκριση με μια αντίστοιχη σύνθεση που δεν το περιέχει. Το πορώδες του συγκεκριμένου υλικού αποτελείται από πόρους μεγάλου και μεσαίου μεγέθους, τόσο στο εσωτερικό όσο και στην επιφάνεια, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει αυξημένη ειδική επιφάνεια. Ως εκ τούτου, απαιτείται μεγαλύτερη ποσότητα νερού για την ύγρανση της επιφάνειας αυτής, γεγονός που οδηγεί σε μείωση τόσο του ελεύθερου νερού όσο και της κάθισης του νωπού μίγματος.

Οι τιμές των αποτελεσμάτων για την περιεκτικότητα των συνθέσεων σε αέρα κυμάνθηκαν από 3,1% έως 6,2%. Παρατηρείται αύξηση στην περιεκτικότητα σε αέρα. Ωστόσο, με εξαίρεση τη σύνθεση PeCaPu, επιβεβαιώνεται το φαινόμενο να παρατηρείται αυξημένη ρευστότητα όταν υπάρχει αυξημένη περιεκτικότητα σε αέρα

Τέλος, εκτός από την πυκνότητα της σύνθεσης REF, που ήταν αναμενόμενο να προκύψει μεγαλύτερη από 1800 kg/m³ καθώς είναι μίγμα συμβατικού σκυροδέματος, όλες

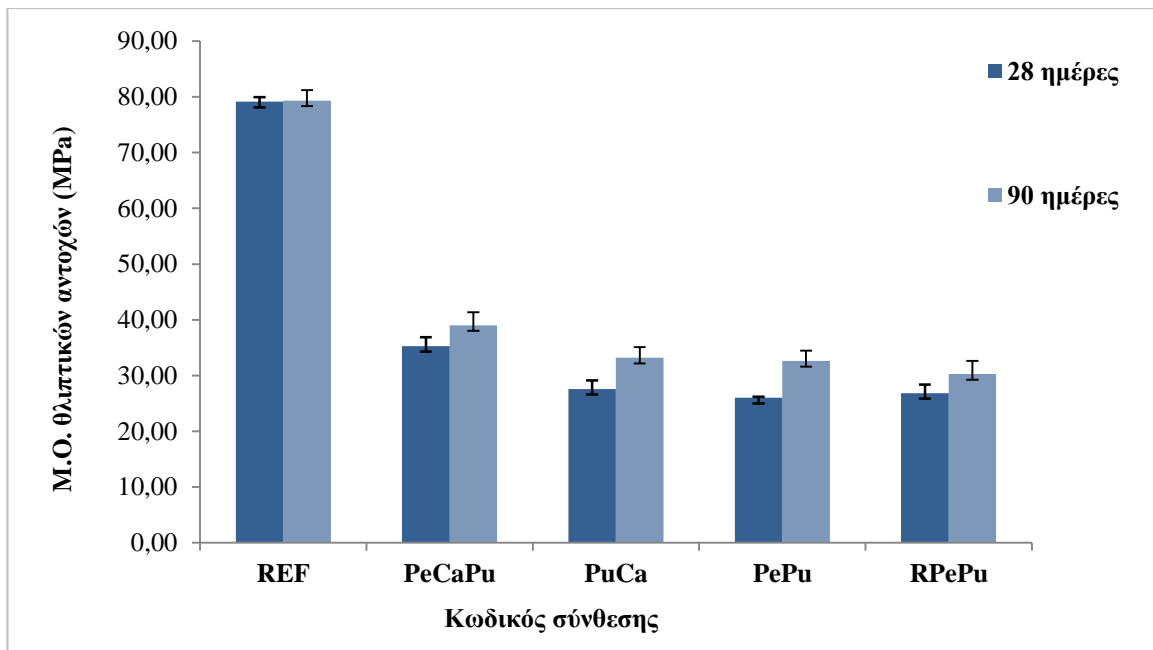
οι υπόλοιπες συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος είχαν πυκνότητα από 1526-1682 kg/m³, δηλαδή πολύ κοντά στην τιμή 1600 kg/m³. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο σχεδιασμός των συνθέσεων έγινε ώστε να προσεγγίσουν την πυκνότητα D1,6.

Στον **Πίνακα 6.2** παρουσιάζεται ο μέσος όρος των θλιπτικών αντοχών των δοκιμίων όλων των συνθέσεων στις 28 και 90 ημέρες και η αντίστοιχη τυπική απόκλιση, όπως προέκυψαν από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, η οποία περιγράφεται στο **Κεφάλαιο 5.2.2**. Τα τελικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται προέκυψαν με τη χρήση του μέσου όρου των τιμών για τα 3 δοκίμια κάθε σύνθεσης.

Πίνακας 6.2 Μέσος όρος θλιπτικών αντοχών (MPa) στις 28 και 90 ημέρες και αντίστοιχη τιμή τυπικής απόκλισης

| Δοκίμιο | 28 Ημέρες | | 90 Ημέρες | |
|---------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|
| | Μ.Ο. (MPa) | Τυπική απόκλιση (MPa) | Μ.Ο. (MPa) | Τυπική απόκλιση (MPa) |
| REF | 79,13 | 0,81 | 79,35 | 1,88 |
| PeCaPu | 35,27 | 1,63 | 39,03 | 2,33 |
| PuCa | 27,59 | 1,55 | 33,20 | 1,91 |
| PePu | 26,00 | 0,18 | 32,61 | 1,89 |
| RPePu | 26,83 | 1,56 | 30,27 | 2,34 |

Στη συνέχεια, στο **Σχήμα 6.1**, παρουσιάζεται συγκριτικό ραβδόγραμμα για την τυπική απόκλιση και τη θλιπτική αντοχή όλων των συνθέσεων, στις 28 και στις 90 ημέρες, χρησιμοποιώντας το μέσο όρο των αντοχών των 3 δοκιμίων. Όπως γίνεται εμφανές, όλες οι συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος παρουσίασαν μειωμένη αντοχή σε σχέση με τη σύνθεση συμβατικού σκυροδέματος REF. Παρόλα αυτά, και οι 4 συνθέσεις που περιείχαν ελαφρά αδρανή, κατάφεραν να αναπτύξουν αντοχές μεγαλύτερες των 20 MPa ήδη από τις 28 ημέρες, γεγονός που ικανοποιεί τον δεύτερο πειραματικό στόχο της εργασίας, δηλαδή την ανάπτυξη συνθέσεων ελαφροσκυροδέματος κατάλληλων για δομοστατική χρήση. Εξάλλου, όπως είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία, η αρνητική επίδραση του περλίτη και της κίσηρης στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος είναι αρκετά μικρότερη συγκριτικά με άλλα ελαφρά αδρανή[93]. Παράλληλα παρατηρείται ότι, όλες οι συνθέσεις, πλην της σύνθεσης συμβατικού σκυροδέματος REF, παρουσίασαν αύξηση της αντοχής τους με την πάροδο του χρόνου.



Σχήμα 6.1 Θλιπτική αντοχή των συνθέσεων στις 28 και 90 ημέρες (Μ.Ο. 3 δοκιμίων) και αντίστοιχη τυπική απόκλιση

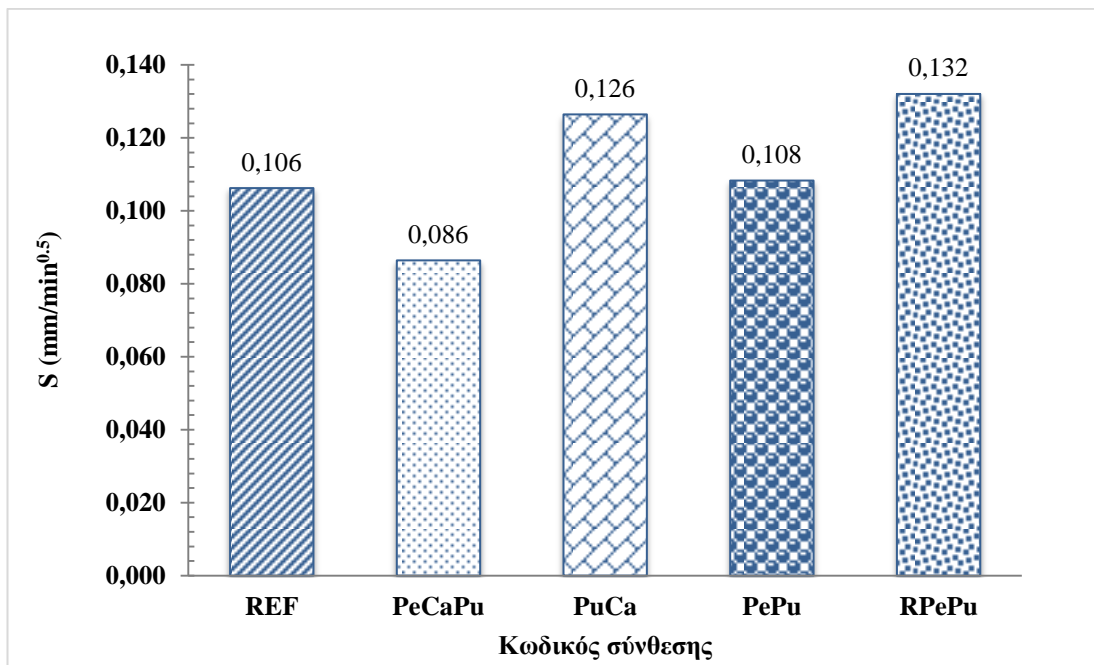
Έτσι, αξίζει να σημειωθεί ότι οι δυο συνθέσεις με τα μεγαλύτερα ποσοστά περιεχόμενης κίσηρης, PuCa και PePu, ήταν και αυτές που παρουσίασαν και τη μεγαλύτερη αύξηση σε αντοχή, από τις 28 στις 90 ημέρες. Πιο συγκεκριμένα η θλιπτική αντοχή των PuCa και PePu αυξήθηκε κατά 17% και 20% αντίστοιχα. Η κίσηρης είναι γνωστό και από τη βιβλιογραφία ότι βελτιώνει μακροπρόθεσμα τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σε σημαντικό βαθμό[94]. Επιπροσθέτως, η σύνθεση PeCaPu είναι εκείνη που ανέπτυξε τις υψηλότερες θλιπτικές αντοχές από όλες τις υπόλοιπες συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος (35,27 MPa και 39,03 MPa στις 28 και 90 ημέρες αντίστοιχα). Συγκριτικά με την PuCa, φαίνεται η θετική συνδρομή της προσθήκης του περλίτη, ο οποίος, δρώντας ως φυσικό πληρωτικό υλικό, αυξάνει τη συμπύκνωση της μήτρας του σκυροδέματος και συνεπώς την αντοχή του σκυροδέματος.

6.2 Συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης

Στον **Πίνακα 6.3** και στο **Σχήμα 6.2**, παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα της δοκιμής τριχοειδούς απορρόφησης όπως αυτή περιγράφηκε στο **Κεφάλαιο 5.4**. Η τριχοειδής απορρόφηση S προκύπτει από το μέσο όρο των αποτελεσμάτων 2 δοκιμίων για κάθε σύνθεση. Παρατίθεται επιπλέον ο συντελεστής συσχέτισης R^2 και η επί τοις εκατό (%) μεταβολή της S αναφορικά με τη σύνθεση συμβατικού σκυροδέματος REF.

Πίνακας 6.3 Αποτελέσματα δοκιμής τριχοειδούς απορρόφησης S ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$) και ποσοστιαία μεταβολή της ως προς τη σύνθεση αναφοράς

| Κωδικός Σύνθεσης | Τριχοειδής απορρόφηση S (Μ.Ο 2 δοκιμών) | Μεταβολή % ως προς τη σύνθεση αναφοράς REF | R^2 |
|------------------|--|---|-------|
| REF | 0,106 | - | 0,99 |
| PeCaPu | 0,086 | -18,65 | 0,99 |
| PuCa | 0,126 | 19,02 | 0,99 |
| PePu | 0,108 | 1,95 | 0,99 |
| RPePu | 0,132 | 24,30 | 0,99 |

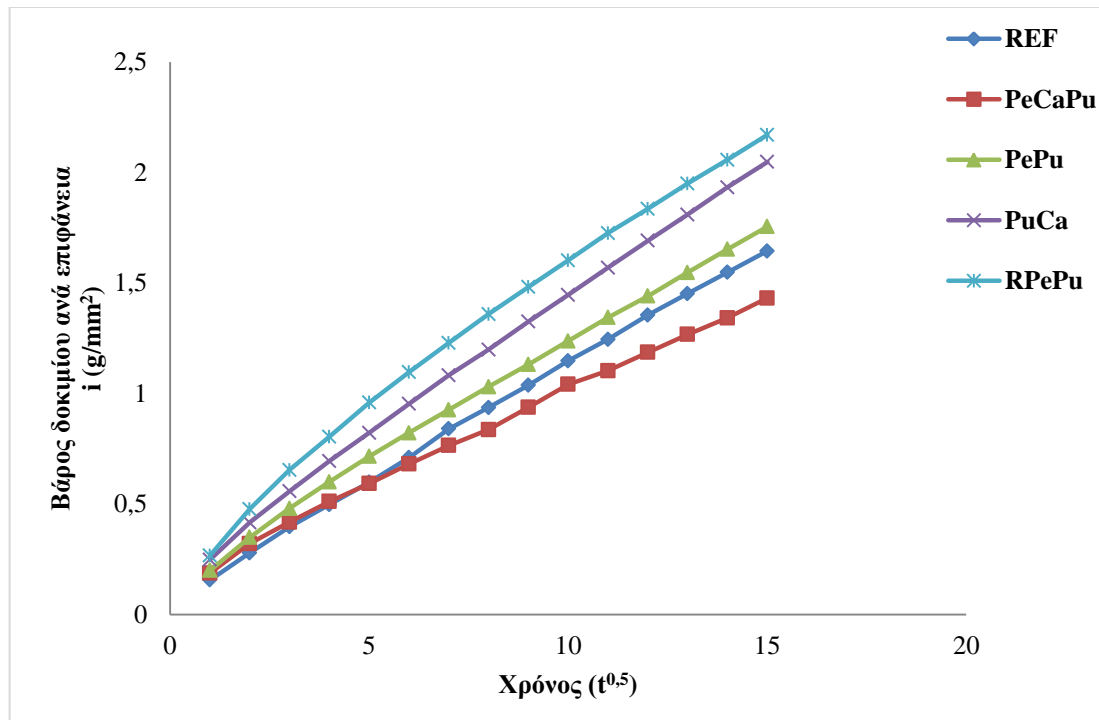


Σχήμα 6.2 Συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης S ($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$) για κάθε σύνθεση

Όπως παρατηρείται, τόσο από τον **Πίνακα 6.3** όσο και από το **Σχήμα 6.2**, όλες οι συνθέσεις εκτός από την PeCaPu, παρουσίασαν αύξηση στο συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης συγκριτικά με τη σύνθεση αναφοράς. Υπάρχουσες μελέτες έχουν δείξει ότι η προσθήκη περλίτη στο σκυρόδεμα, είτε μεμονωμένα είτε συνδυαστικά με κίσηρη, αυξάνει το συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης του υλικού[68],[95],[96]. Επιπλέον, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η θετική επίδραση της κίσηρης στη μείωση της τριχοειδούς απορρόφησης, διαφαίνεται κυρίως με την πάροδο του χρόνου[94]. Λαμβάνοντας υπόψη τα προαναφερθέντα, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι τα αποτελέσματα των συνθέσεων PuCa, PePu και RPePu συμφωνούν με τη βιβλιογραφία. Είναι ενδιαφέρον ότι η σύνθεση PeCaPu έρχεται σε αντίθεση με τις παρατηρήσεις που συναντώνται στη βιβλιογραφία, καθώς, παρόλο που περιέχει τη μεγαλύτερη συνολικά ποσότητα περλίτη, παρουσίασε τη μικρότερη τιμή συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης

($S = 0,086 \text{ min/min}^{0.5}$) συγκριτικά με όλες τις συνθέσεις, συμπεριλαμβανομένης και της σύνθεσης αναφοράς REF. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε ίσως να αποδοθεί στην ποζολανική δραστικότητα του περλίτη αλλά περισσότερο στη φυσική του δράση ως πληρωτικό υλικό του πορώδους της πάστας αλλά και της κίσηρης.

Στο **Σχήμα 6.3** αποδίδεται η μεταβολή του βάρους δοκιμίου συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου για κάθε μια σύνθεση. Γίνεται εμφανής η σημαντικά μεγαλύτερη αύξηση βάρους των δοκιμίων όλων των συνθέσεων λόγω τριχοειδούς απορρόφησης, σε σύγκριση με τη σύνθεση συμβατικού σκυροδέματος REF, πλην της PeCaPu.



Σχήμα 6.3 Μεταβολή βάρους δοκιμίων για κάθε σύνθεση κατά τον προσδιορισμό του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης, συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου.

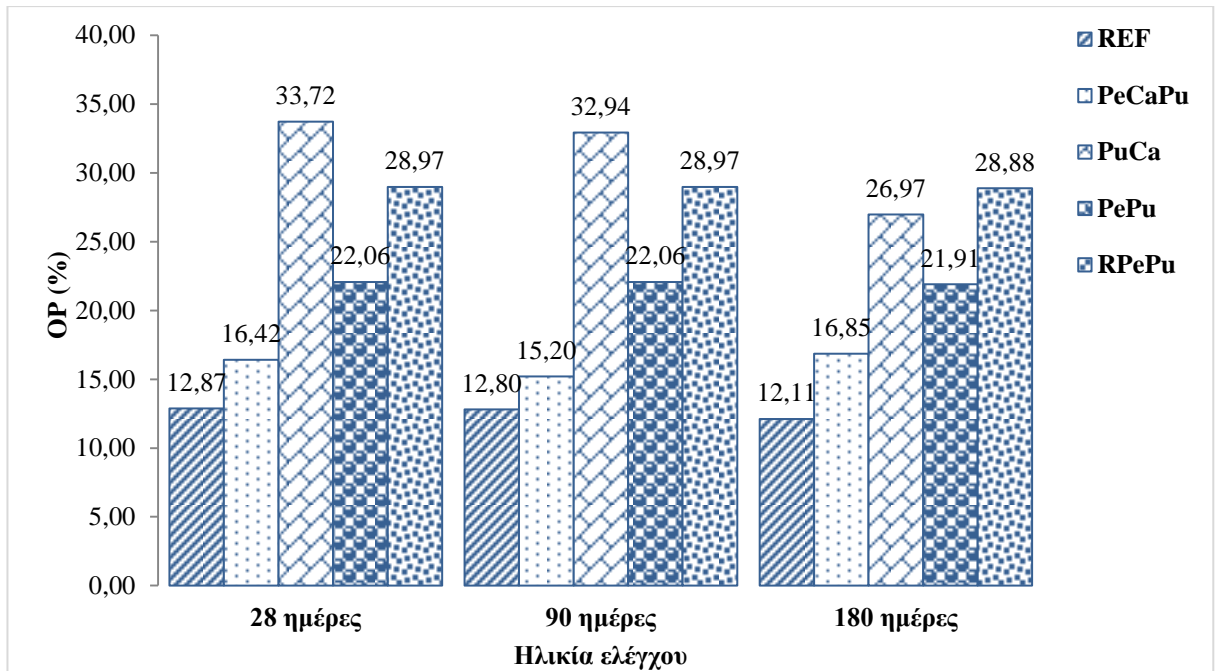
6.3 Ανοιχτό πορώδες OP% - Υδατοαπορροφητικότητα

Στον **Πίνακα 6.4** παρατίθενται τα αποτελέσματα της πειραματικής δοκιμής για τον προσδιορισμό του ανοικτού πορώδους OP%, για κάθε μια σύνθεση και για κάθε μια ηλικία ελέγχου ξεχωριστά. Το ανοιχτό πορώδες προκύπτει ως μέσος όρος των αποτελεσμάτων των τριών δοκιμίων από κάθε σύνθεση. Παρουσιάζονται επίσης και οι αντίστοιχες μεταβολές (%) του OP συγκριτικά με τα αποτελέσματα της σύνθεσης συμβατικού σκυροδέματος REF.

Πίνακας 6.4 Αποτελέσματα δοκιμής ανοικτού πορώδους OP% ανά σύνθεση και ποσοστιαία μεταβολή του ως προς τη σύνθεση αναφοράς

| Κωδικός σύνθεσης | 28 Ημέρες | | 90 Ημέρες | | 180 Ημέρες | |
|------------------|--|---|--|---|--|---|
| | Ανοιχτό Πορώδες OP % (Μ.Ο. 3 δοκιμίων) | % Μεταβολή ως προς το συμβατικό σκυρόδεμα | Ανοιχτό Πορώδες OP % (Μ.Ο. 3 δοκιμίων) | % Μεταβολή ως προς το συμβατικό σκυρόδεμα | Ανοιχτό Πορώδες OP % (Μ.Ο. 3 δοκιμίων) | % Μεταβολή ως προς το συμβατικό σκυρόδεμα |
| REF | 12,87 | - | 12,80 | - | 12,11 | - |
| PeCaPu | 16,42 | 27,61 | 15,20 | 18,75 | 16,85 | 39,16 |
| PuCa | 33,72 | 162,11 | 32,94 | 157,42 | 26,97 | 122,79 |
| PePu | 22,06 | 71,49 | 22,06 | 72,43 | 21,91 | 80,95 |
| RPePu | 28,97 | 125,12 | 28,97 | 126,36 | 28,88 | 138,50 |

Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 6.4**, σε όλες τις συνθέσεις παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση του ανοικτού πορώδους σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς REF. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση λεπτόκοκκου περλίτη Pe-1 συνδυαστικά με την παρουσία κίσηρης, οδήγησε στις δυο χαμηλότερες αυξήσεις ανοικτού πορώδους που εμφάνισαν οι συνθέσεις PePu και PeCaPu αντίστοιχα, με την τελευταία να εμφανίζει το χαμηλότερο ποσοστό της τάξεως του 17%. Παρόλα αυτά, στην περίπτωση της σύνθεσης RPePu, η ύπαρξη περλίτη και κίσηρης φαίνεται ότι δεν μπόρεσε να αντισταθμίσει την επίδραση της τέφρας φλοιού ρυζιού και έτσι η σύνθεση είχε το υψηλότερο ποσοστό OP (29%). Στο αυξημένο ποσοστό πορώδους στη συγκεκριμένη σύνθεση μπορεί να συντέλεσε και η αντίστοιχα αυξημένη ποσότητα υπερρευστοποιητή που χρησιμοποιήθηκε, που πιθανόν να διατάραζε τη συνεκτικότητα του τελικού υλικού. Τέλος για τη σύνθεση PuCa, παρατηρήθηκε ότι η χρήση δύο κλασμάτων κίσηρης οδήγησε σταδιακά στο να μειωθεί το ποσοστό ανοικτού πορώδους, παρόλα αυτά το τελικό ποσοστό μεταβολής της, συγκριτικά με τη REF, έφτασε το 123%. Αξίζει πάντως να σημειωθεί ότι η σύνθεση αυτή περιείχε τη μεγαλύτερη ποσότητα κίσηρης και παρουσίασε την υψηλότερη μείωση του ανοικτού πορώδους με την πάροδο του χρόνου. Το γεγονός αυτό συμφωνεί και με τη βιβλιογραφία[69], σύμφωνα με την οποία η κίσηρης συμβάλλει σημαντικά στη μακροπρόθεσμη μείωση του OP%.



Σχήμα 6.4 Αποτελέσματα ανοικτού πορώδους OP% ανά σύνθεση και ανά ηλικία ελέγχου

6.4 Δοκιμή επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων (NordTest Build 492)

Τα τελικά αποτελέσματα της δοκιμής για κάθε σύνθεση και για κάθε μια ηλικία ελέγχου, των 28, 90 και 180 ημερών, καθώς και η μεταβολή του συντελεστή D_{nssm} σε σχέση με το μίγμα συμβατικού σκυροδέματος REF, δίνονται στον Πίνακα 6.5. Στον Πίνακα 6.6 παρουσιάζεται επιπλέον και ο χαρακτηρισμός της κάθε σύνθεσης ως προς την αντίσταση στη διείσδυση των χλωριόντων, με βάση τις κατηγορίες του Πίνακα 5.7.

Πίνακας 6.5 Αποτελέσματα επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων για κάθε σύνθεση και ποσοστιαία μεταβολή τους ως προς τη σύνθεση αναφοράς REF

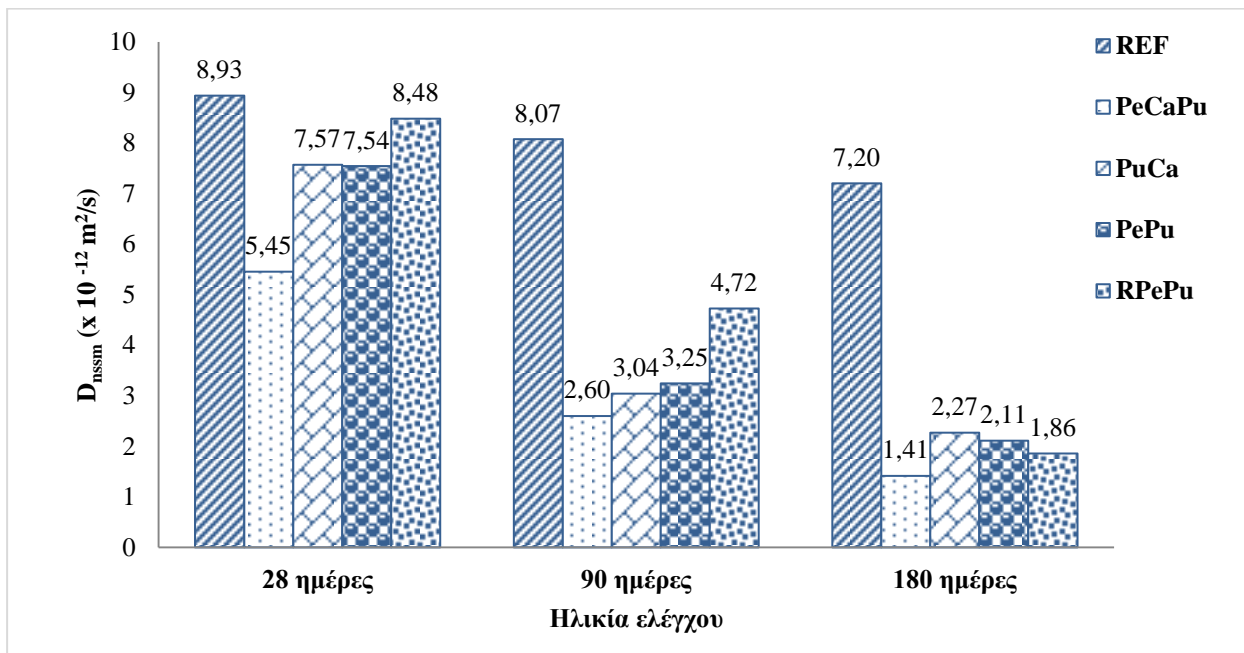
| Κωδικός σύνθεσης | 28 Ημέρες | | 90 Ημέρες | | 180 Ημέρες | |
|------------------|--|---|--|---|--|---|
| | Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων D_{nssm} (10^{-12} m ² /s) | % Μεταβολή ως προς το συμβατικό σκυρόδεμα | Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων D_{nssm} (10^{-12} m ² /s) | % Μεταβολή ως προς το συμβατικό σκυρόδεμα | Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων D_{nssm} (10^{-12} m ² /s) | % Μεταβολή ως προς το συμβατικό σκυρόδεμα |
| REF | 8,93 | - | 8,07 | - | 7,20 | - |
| PeCaPu | 5,45 | -38,93 | 2,60 | -67,81 | 1,41 | -80,38 |
| PuCa | 7,57 | -15,56 | 3,04 | -59,79 | 2,27 | -70,67 |
| PePu | 7,54 | -15,25 | 3,25 | -62,36 | 2,11 | -68,50 |
| RPePu | 8,48 | -5,10 | 4,72 | -41,48 | 1,86 | -74,19 |

Πίνακας 6.6 Χαρακτηρισμός συνθέσεων με βάση το συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων D_{nssm} στις 28, στις 90 και στις 180 ημέρες

| Κωδικός σύνθεσης | Κατηγορία αντίστασης στη διείσδυση χλωριόντων | | |
|------------------|---|------------|------------------|
| | 28 Ημέρες | 90 Ημέρες | 180 Ημέρες |
| REF | Υψηλή | Υψηλή | Υψηλή |
| PeCaPu | Υψηλή | Πολύ υψηλή | Εξαιρετικά υψηλή |
| PuCa | Υψηλή | Πολύ υψηλή | Εξαιρετικά υψηλή |
| PePu | Υψηλή | Πολύ υψηλή | Εξαιρετικά υψηλή |
| RPePu | Υψηλή | Πολύ υψηλή | Εξαιρετικά υψηλή |

Όπως φαίνεται και από τους Πίνακες 6.5 και 6.6, η προσθήκη κίσηρης, περλίτη και τέφρας φλοιού ρυζιού βελτίωσαν αισθητά την αντίσταση του σκυροδέματος στη διείσδυση χλωριόντων, συγκριτικά με τη σύνθεση συμβατικού σκυροδέματος. Η βελτίωση αυτή ήταν ορατή ήδη από τις πρώιμες ηλικίες του σκυροδέματος και αυξήθηκε σημαντικά με την πάροδο του χρόνου, γεγονός που δεν παρατηρήθηκε στον ίδιο βαθμό και για τη σύνθεση REF, η οποία παρουσίασε το μικρότερο ποσοστό μείωσης του συντελεστή αντίστασης χλωριόντων, της τάξεως του 19%. Η σύνθεση PeCaPu είχε την καλύτερη συμπεριφορά απέναντι στη διείσδυση των χλωριόντων σε όλες τις ηλικίες ελέγχου, με τον χαμηλότερο συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων D_{nssm} ($\times 10^{-12}$ m²/s), ίσο με 1,41, να παρουσιάζεται στις 180 ημέρες.

Στο **Σχήμα 6.5**, αποδίδονται και γραφικά τα αποτελέσματα της δοκιμής επιταχυνόμενης διείσδυσης χλωριόντων για όλες τις συνθέσεις και για κάθε μια ηλικία ελέγχου. Αξίζει να επισημανθεί ότι η σύνθεση RPePu, παρόλο που δεν παρουσίασε τη μεγαλύτερη συνολικά αντίσταση στη διείσδυση των χλωριόντων, και αντιθέτως στην πρώιμη ηλικία ελέγχου των 28 ημερών είχε το δεύτερο υψηλότερο συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων μετά τη REF, κατάφερε να σημειώσει το μεγαλύτερο ποσοστό βελτίωσης της αντίστασης σε χλωριόντα (78%). Στις 180 ημέρες η σύνθεση RPePu είχε το δεύτερο μικρότερο συντελεστή διείσδυσης χλωριόντων μετά την PeCaPu. Με βάση τα αποτελέσματα διαφαίνεται ότι κυρίως ο συνδυασμός περλίτη και κίσηρης είναι αυτός που οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της αντίστασης του σκυροδέματος στη διείσδυση χλωριόντων, κάτι που αναφέρεται και στη βιβλιογραφία [97].

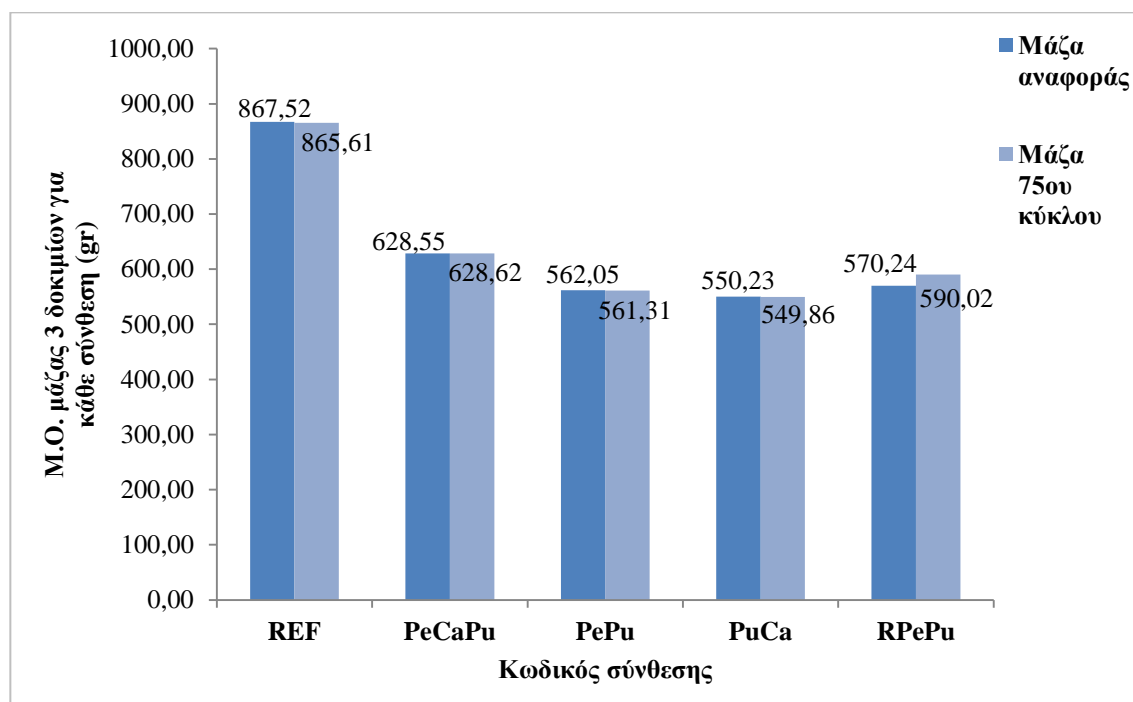


Σχήμα 6.5 Συντελεστής διείσδυσης χλωριόντων D_{nssm} ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) ανά σύνθεση, για τις ηλικίες ελέγχου 28, 90 και 180 ημερών

6.5 Δοκιμή επαναλαμβανόμενων κύκλων ψύξης-απόψυξης και παράλληλη δοκιμή μέτρησης ταχύτητας υπερήχων (UPV)

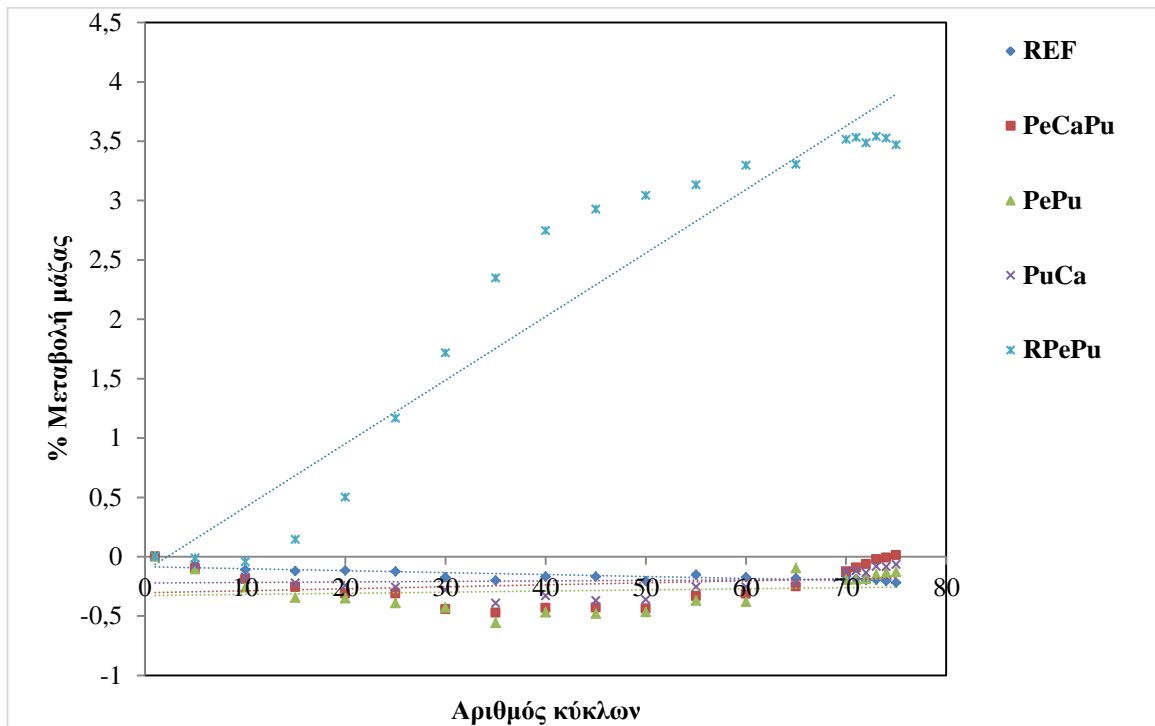
Τα αποτελέσματα της δοκιμής ψύξης-απόψυξης προέκυψαν μετά τη διενέργεια της πειραματικής διαδικασίας όπως αυτή περιγράφεται στο **Κεφάλαιο 5.7**. Για τον υπολογισμό της μάζας χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος (Μ.Ο) των μαζών των 3 δοκιμίων κάθε σύνθεσης, ενώ για τον υπολογισμό του μήκους, ο μέσος όρος (Μ.Ο) των μηκών τους, που προέκυψε μετά από μετρήσεις σε 3 πλευρές καθενός δοκιμίου. Στα **Σχήματα 6.6** έως **6.9** παρουσιάζονται οι τιμές της μάζας και του μήκους κάθε σύνθεσης κατά την έναρξη της δοκιμής ψύξης-απόψυξης και μετά από 75 κύκλους, καθώς και η ποσοστιαία μεταβολή αυτών καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής. Αναλυτικότερη παράθεση των αριθμητικών

αποτελεσμάτων γίνεται στους Πίνακες 9.4 και 9.5 στο “Παράρτημα Α. Συμπληρωματικά διαγράμματα και πίνακες αποτελεσμάτων”.



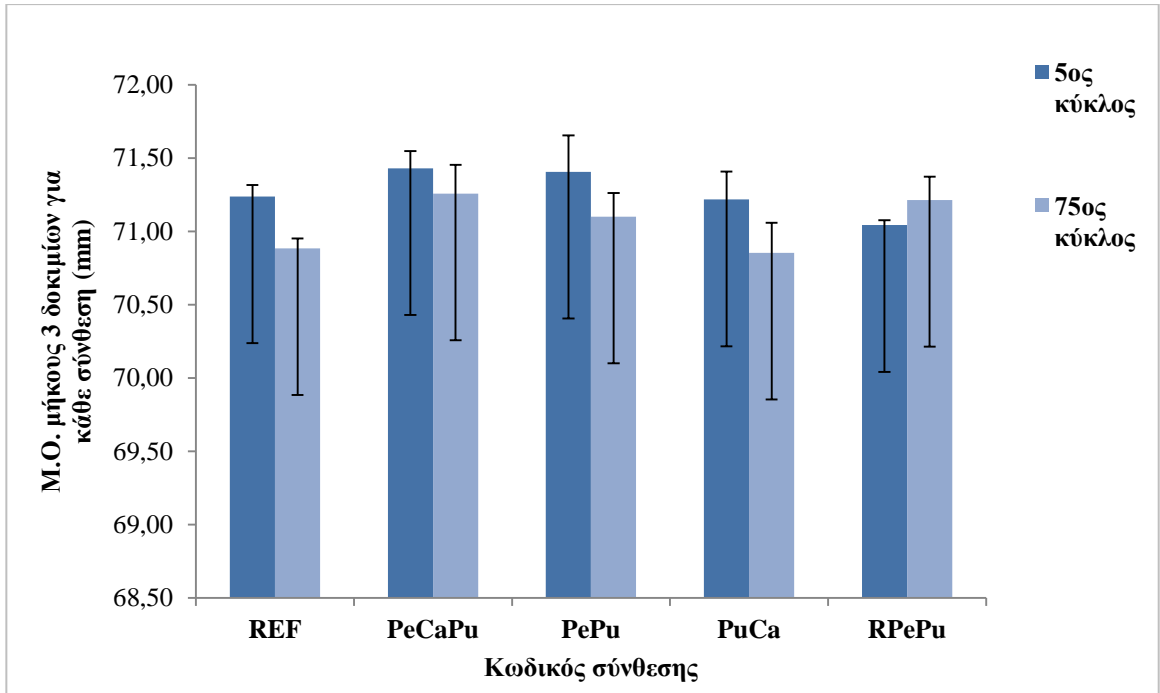
Σχήμα 6.6 Μάζα αναφοράς δοκιμίων και μάζα κατά τον 75^ο κύκλο της δοκιμής ψύξης-απόψυξης

Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6.7**, η επίδραση των επαναλαμβανόμενων κύκλων ψύξης-απόψυξης στη μάζα των δοκιμίων, είναι μικρή για όλες τις συνθέσεις εκτός της RPePu. Πιο συγκεκριμένα, εξ αρχής παρατηρείται αρνητική ποσοστιαία μεταβολή της μάζας των συνθέσεων, κάτι που είναι λογικό καθώς η μέτρηση γίνεται όταν τα δοκίμια είναι σε ψύξη. Η τάση αυτή παραμένει σε όλες τις συνθέσεις σε αντίθεση με τη σύνθεση RPePu για την οποία πριν τον 10^ο κύκλο η τάση αντιστρέφεται και καταγράφεται βαθμιαία αύξηση της μάζας. Μέχρι τον 75^ο κύκλο η μάζα των δοκιμίων όλων των συνθέσεων μεταβάλλεται αρνητικά, εκτός της RPePu και της PeCaPu. Η PeCaPu επίσης πριν τον 75^ο κύκλο, ξεκινά να αυξάνει βάρος, γεγονός που υποδηλώνει πιθανή έναρξη υποβάθμισης της δομής της. Είναι απολύτως σαφές ότι η προσθήκη RHA επηρέασε αρνητικά τη συμπεριφορά των δοκιμίων στους επαναλαμβανόμενους κύκλους ψύξης-απόψυξης με αποτέλεσμα η σύνθεση RPePu να παρουσιάσει μεγάλη αύξηση της μάζας της, η οποία δεν φάνηκε να περιορίζεται με το χρόνο. Ειδικότερα, μετά από 75 κύκλους ψύξης-απόψυξης, η μάζα των δοκιμίων της RPePu είχε αυξηθεί κατά περίπου 3%.

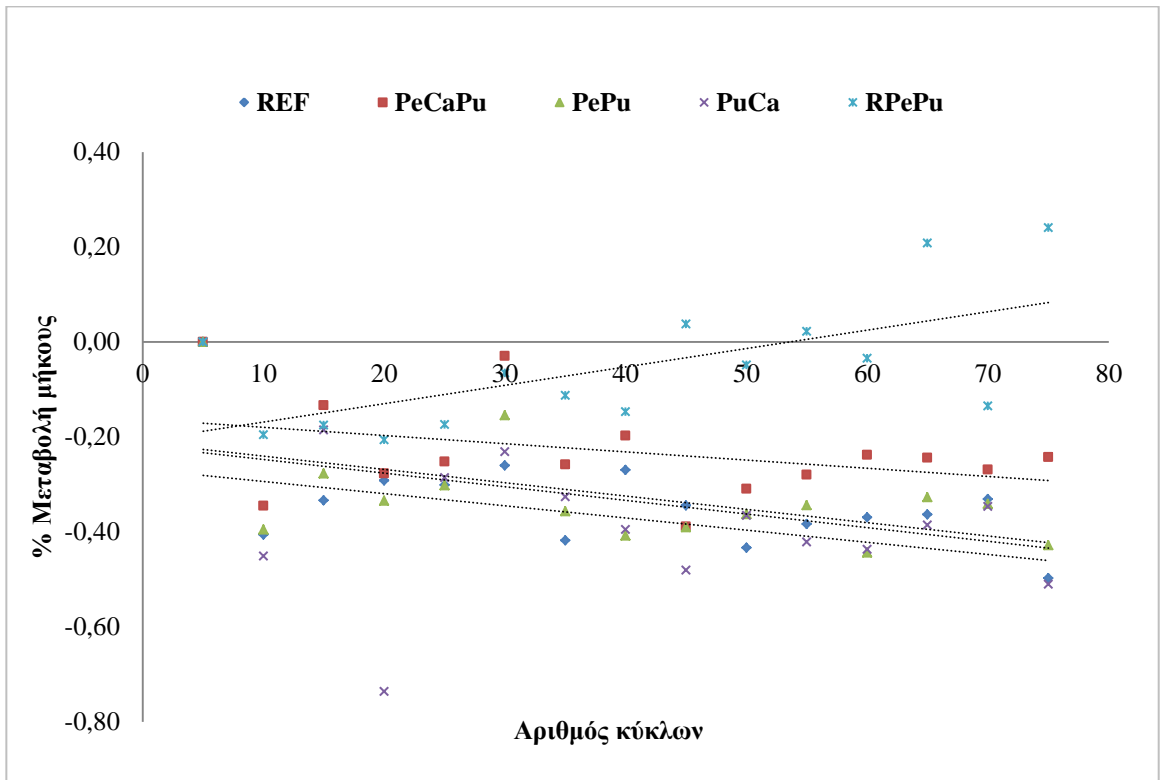


Σχήμα 6.7 Ποσοστιαία μεταβολή της μάζας των συνθέσεων κατά τη δοκιμή ψύξης-απόψυξης

Αναφορικά με τα αποτελέσματα της μεταβολής του μήκους των δοκιμίων, όπως αποτυπώνεται και στα **Σχήματα 6.8** και **6.9**, όλες οι συνθέσεις, πλην της RPePu, παρουσίασαν μείωση του συγκεκριμένου μεγέθους. Αντίθετα, και εδώ, όπως φαίνεται από το **Σχήμα 6.9**, η σύνθεση RPePu διαφοροποιήθηκε, εμφανίζοντας αύξηση του μήκους των δοκιμίων της, μεγαλύτερη από 0,1% μετά τον 60^ο κύκλο. Επίσης, με βάση τις γραμμές τάσης των μετρήσεων για όλες τις συνθέσεις (**Σχήμα 6.9**), η σύνθεση PeCaPu φαίνεται να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αντίσταση στην επίδραση των επαναλαμβανόμενων κύκλων ψύξης-απόψυξης, αναφορικά με τη μεταβολή του μήκους της. Ο περλίτης που περιέχει, φάνηκε να συμβάλλει θετικά στην ανθεκτικότητα της σύνθεσης. Αντίθετα, η προσθήκη λεπτόκοκκης κίσηρης (PuSand) στις συνθέσεις PePu και PuCa επηρέασε αρνητικά την αντίστασή τους στην ψύξη-απόψυξη. Όπως φαίνεται από τα συνολικά αποτελέσματα, η αύξηση του ποσοστού κίσηρης στις συνθέσεις δεν συντελεί θετικά στην ανθεκτικότητα έναντι των επαναλαμβανόμενων κύκλων ψύξης-απόψυξης, γεγονός που έχει επισημανθεί και σε προηγούμενες μελέτες [98].



Σχήμα 6.8 Μέσος όρος μήκους των δοκιμών κατά τον 5^ο και 75^ο κύκλο της δοκιμής ψύξης-απόψυξης και αντίστοιχη τυπική απόκλιση



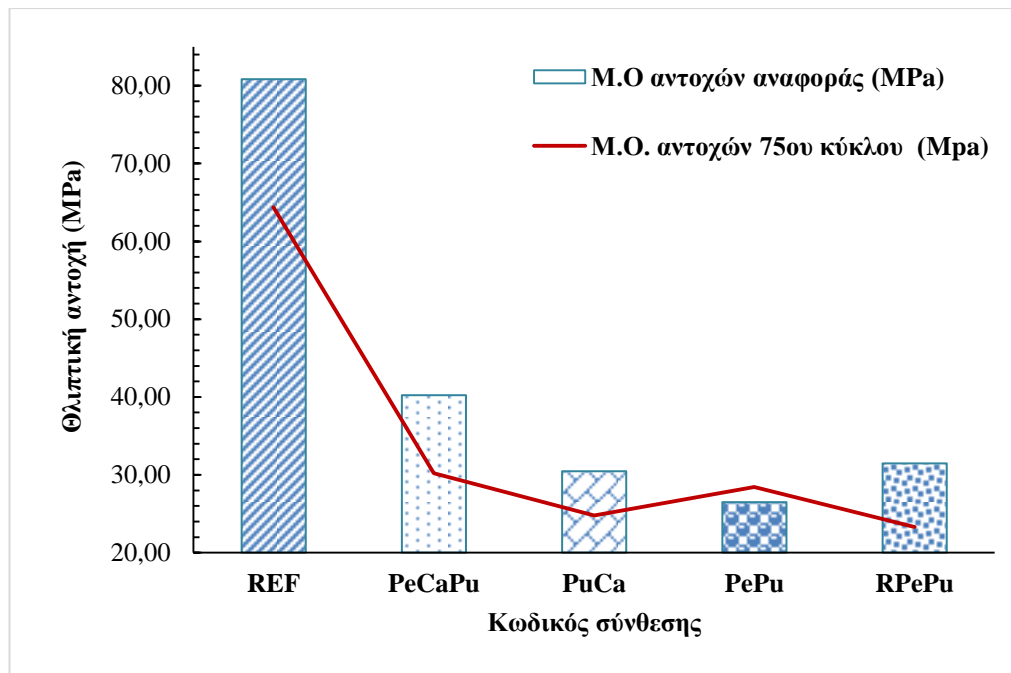
Σχήμα 6.9 Ποσοστιαία μεταβολή του μήκους των δοκιμών των συνθέσεων κατά τη δοκιμή ψύξης-απόψυξης

Στον **Πίνακα 6.7** και στο **Σχήμα 6.10**, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων όλων των συνθέσεων, κατά την έναρξη της δοκιμής ψύξης-απόψυξης και μετά την ολοκλήρωσή της. Όπως φαίνεται, υπήρξε μια μείωση της αντοχής σε όλες τις συνθέσεις, συμπεριλαμβανομένης και της σύνθεσης συμβατικού σκυροδέματος REF. Πιο συγκεκριμένα, το μεγαλύτερο ποσοστό μείωσης της αντοχής τους, μετά τη σύνθεση αναφοράς, εμφάνισαν οι συνθέσεις PeCaPu και RPePu (25% και 26% αντίστοιχα). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, ο συνδυασμός κίσηρης με τον περλίτη Pe-2 αλλά και το RHA, μείωσαν την αντίσταση του ελαφροσκυροδέματος έναντι των επαναλαμβανόμενων κύκλων ψύξης-απόψυξης, και μετά το πέρας τους, οδήγησαν σε υποβίβαση της αντοχής του.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύνθεση PePu, η οποία ήταν η μόνη που είχε αύξηση της αντοχής της σε ποσοστό 7% μετά το τέλος της δοκιμής ψύξης-απόψυξης. Πιθανόν να συντέλεσε σε αυτό ο λεπτόκοκκος περλίτης Pe-1 που περιείχε, ο οποίος δρώντας σαν πληρωτικό υλικό, επηρέασε το είδος του πορώδους της σύνθεσης, μειώνοντας τη διαπερατότητά του και μειώνοντας παράλληλα και το εγκλωβισμένο νερό στο εσωτερικό του υλικού, το οποίο πάγωνε κατά τη φάση της κατάψυξης.

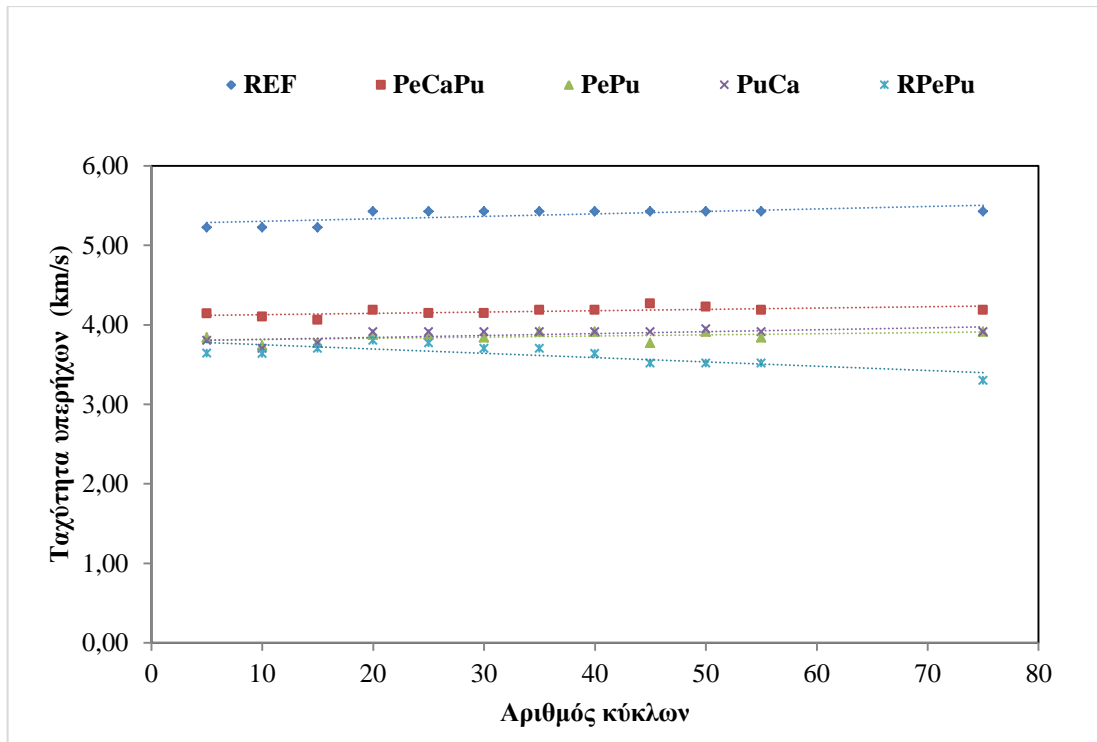
Πίνακας 6.7 Μέσος όρος θλιπτικών αντοχών δοκιμίων πριν και μετά τη δοκιμή ψύξης απόψυξης, και αντίστοιχο ποσοστό μεταβολής σε σχέση με την αντοχή αναφοράς

| Κωδικός σύνθεσης | Μ.Ο. αντοχών αναφοράς 90 ημερών | Μ.Ο αντοχών μετά από 75 κύκλους ψύξης-απόψυξης | %Μεταβολή θλιπτικής αντοχής δοκιμίων |
|------------------|---------------------------------|--|--------------------------------------|
| REF | 80,83 | 64,37 | -20% |
| PeCaPu | 40,22 | 30,20 | -25% |
| PuCa | 30,46 | 24,78 | -19% |
| PePu | 26,48 | 28,42 | +7% |
| RPePu | 31,46 | 23,31 | -26% |

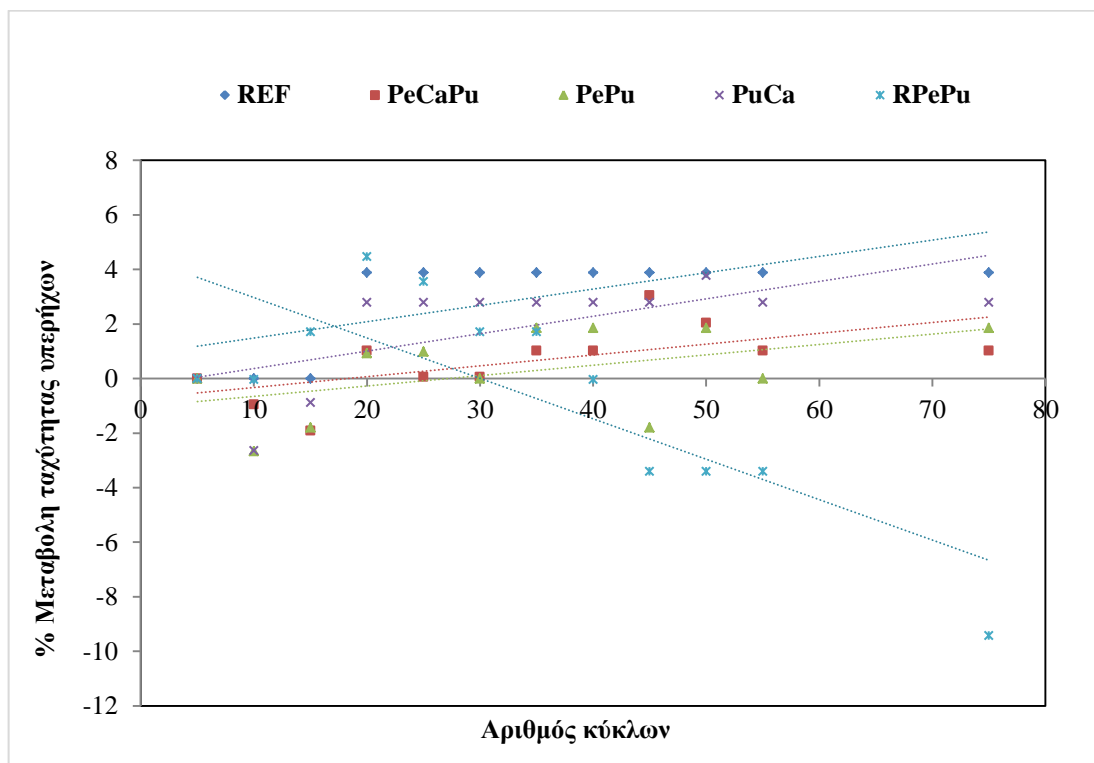


Σχήμα 6.10 Μέσος όρος θλιπτικών αντοχών όλων των συνθέσεων, πριν την έναρξη της δοκιμής ψύξης-απόψυξης και μετά από 75 κύκλους

Στο **Σχήμα 6.11** αποτυπώνονται οι τιμές της ταχύτητας υπερήχων v (km/s) κατά τη διάρκεια των επαναλαμβανόμενων κύκλων ψύξης-απόψυξης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, για τη σύνθεση PeCaPu καταγράφεται η υψηλότερη τάση μεταβολής της ταχύτητας υπερήχων, μετά τη σύνθεση συμβατικού σκυροδέματος REF. Οι συνθέσεις PuCa και PePu παρουσίασαν παρόμοιες τάσεις μεταβολής της UPV μέχρι και τους 75 κύκλους ψύξης-απόψυξης. Αντίθετα η σύνθεση RPePu άρχισε να μειώνεται μετά τον 20^ο κύκλο, με αποτέλεσμα, στο τέλος της δοκιμής, να έχει ταχύτητα υπερήχων ίση με 3,29 km/s, χαμηλότερη από όλες τις άλλες συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος. Φαίνεται πως ειδικά ο περλίτης αλλά και η κίσηρης συντελούν θετικά στη διατήρηση της ποιότητας των συνθέσεων κατά τη δοκιμή ψύξης-απόψυξης. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, τα αυξημένα ποσοστά κίσηρης μειώνουν την ταχύτητα υπερήχων (UPV) του σκυροδέματος και επιδεινώνουν τη συμπεριφορά του σε ψύξη-απόψυξη [99]. Ωστόσο με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν, δεν καταγράφηκε σημαντική μεταβολή της ταχύτητας υπερήχων μετά τους 10 κύκλους και μέχρι τους 75.



Σχήμα 6.11 Εξέλιξη ταχύτητας υπερήχων (km/s) συνθέσεων κατά τη δοκιμή ψύξης-απόψυξης



Σχήμα 6.12 Ποσοστιαία μεταβολή της ταχύτητας υπερήχων των συνθέσεων κατά τη δοκιμή ψύξης-απόψυξης

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές και έχουν ήδη παρουσιαστεί στα προηγούμενα κεφάλαια, μπορούμε να συμπεράνουμε τα ακόλουθα.

Ιδιότητες νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος

Η προσθήκη ελαφρών αδρανών στο σκυρόδεμα οδήγησε εν γένει σε μείωση του ειδικούς βάρους του συγκριτικά με τη σύνθεση αναφοράς. Παρατηρήθηκαν αυξημένα ποσοστά περιεχόμενου αέρα σε όλες τις συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος, γεγονός που συντέλεσε και στην αύξηση της κατηγορίας κάθισης και της εργασιμότητας αυτών, συνδυαστικά με τη χρήση του υπερρυστοποιητή. Εξαίρεση αποτέλεσε η σύνθεση με προσθήκη RHA, η οποία παρουσίασε τη χαμηλότερη κάθιση, παρόλο που περιείχε τη μεγαλύτερη ποσότητα υπερρυστοποιητή. Φαίνεται λοιπόν ότι η τέφρα φλοιού ρυζιού επηρεάζει σημαντικά την εργασιμότητα του σκυροδέματος.

Αναφορικά με τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής των συνθέσεων, όπως ήταν αναμενόμενο, προέκυψαν αρκετά χαμηλότερα σε σχέση με αυτά του συμβατικού σκυροδέματος. Και σε αυτή την περίπτωση η επίδραση της RHA ήταν μεγαλύτερη στην τελική αντοχή του σκυροδέματος. Παρόλα αυτά, η κίσηρης φαίνεται πως βοήθησε στην αύξηση των θλιπτικών αντοχών σε βάθος χρόνου. Αντίστοιχα βοήθησε και ο χαμηλός λόγος N/T. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι όλες οι συνθέσεις που περιείχαν ελαφρά αδρανή, παρουσίασαν μειωμένες αντοχές, ικανές όμως ήδη από τις 28 ημέρες για να τις χαρακτηρίσουν ως συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος κατάλληλες για δομοστατική χρήση.

Με βάση τα αποτελέσματα, επιτεύχθηκαν οι πειραματικοί στόχοι της εργασίας, δηλαδή η βελτιστοποίηση της σύνθεσης ελαφροσκυροδεμάτων με πυκνότητα κοντά στα 1600 kg/m^3 , ικανοποιητική εργασιμότητα και αντοχή που να επιτρέπει δομοστατική χρήση.

Συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης

Παρατηρήθηκε ότι η προσθήκη ελαφρών αδρανών και κυρίως περλίτη, αυξάνει σημαντικά την τριχοειδή απορρόφηση του σκυροδέματος, οδηγώντας σε αντίστοιχη αύξηση της μάζας των δοκιμίων, σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Η μόνη σύνθεση ελαφροσκυροδέματος που διαφοροποιήθηκε ήταν η ReCaPu, η οποία παρουσίασε τη μικρότερη τριχοειδή απορρόφηση από όλες τις συνθέσεις, συμπεριλαμβανομένης και της REF. Πιθανοί παράγοντες που μπορεί να οδήγησαν σε αυτό το αποτέλεσμα, είναι οι ποζολανικές ιδιότητες που διαθέτει ο περλίτης καθώς και το γεγονός ότι η συγκεκριμένη σύνθεση είχε το μεγαλύτερο ειδικό βάρος συγκριτικά με τις λοιπές συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος, κάτι που υποδηλώνει μια πιο συμπαγή δομή.

Ανοιχτό πορώδες OP% - Υδατοαπορροφητικότητα

Φαίνεται ότι τα ελαφρά αδρανή, με κυριότερη την επιρροή της RHA, ευνοούν την αύξηση του ανοιχτού πορώδους στο σκυρόδεμα. Παράλληλα όμως, διαπιστώθηκε και η

θετική επίδραση της κίσηρης στη μείωσή του, η οποία γίνεται αισθητή κυρίως στις μεγαλύτερες ηλικίες του σκυροδέματος.

Επιταχυνόμενη διείσδυση χλωριόντων NordTest Build 492

Εξαιρετικά σημαντική ήταν η επίδραση των ελαφρών αδρανών στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος απέναντι στη διείσδυση των χλωριόντων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η προσθήκη περλίτη συνδυαστικά με την κίσηρη, αλλά και η RHA, βελτίωσαν σε μεγάλο βαθμό την αντίσταση των συνθέσεων ελαφροσκυροδέματος απέναντι στα χλωριόντα στις πρώιμες ηλικίες. Ακόμα πιο ενδιαφέρουσα είναι η συνεχόμενη αύξηση της ανθεκτικότητας με την πάροδο του χρόνου, κάτι που δεν παρατηρήθηκε το ίδιο έντονα στη σύνθεση συμβατικού σκυροδέματος REF.

Επαναλαμβανόμενοι κύκλοι ψύξης-απόψυξης και UPV

Συγκριτικά με το συμβατικό σκυρόδεμα, οι συνθέσεις με προσθήκη ελαφρών αδρανών επηρεάστηκαν περισσότερο από τους επαναλαμβανόμενους κύκλους ψύξης-απόψυξης, διατηρώντας όμως στην πλειοψηφία τους ικανοποιητική ποιότητα ακόμα και μετά το τέλος της δοκιμής. Παρατηρήθηκε βέβαια ότι η τέφρα φλοιού ρυζιού ήταν αυτή που οδήγησε περισσότερο σε διόγκωση και επιμήκυνση των δοκιμίων κατά τη διαδικασία της ψύξης-απόψυξης, και η μόνη που μείωσε αρκετά την ποιότητα του σκυροδέματος, τόσο ώστε να χαρακτηριστεί αμφίβολη. Φάνηκε επίσης ότι η αύξηση του ποσοστού περιεχόμενης κίσηρης, επέφερε μείωση στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος απέναντι στους επαναλαμβανόμενους κύκλους ψύξης-απόψυξης. Παρόλα αυτά είναι δυνατό να αποφευχθεί η αρνητική της αυτή επίδραση, όταν το ποσοστό της προσθήκης της δεν ξεπερνά κάποια συγκεκριμένα επίπεδα.

Είναι εμφανές ότι η χρήση ελαφρών αδρανών στο σκυρόδεμα έχει να προσφέρει πολλαπλά οφέλη. Η παραγωγή δομικού ελαφροσκυροδέματος θα μειώσει αυτόματα το βάρος των κατασκευών και κατ' επέκταση το κόστος τους, προσδίδοντάς τους από εξαιρετική μέχρι ικανοποιητική ανθεκτικότητα απέναντι σε παράγοντες όπως η προσβολή από χλωριόντα και η έκθεση σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες.

Αναγκαία είναι βέβαια η περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης των υλικών αυτών στο σκυρόδεμα και των ιδιοτήτων που του προσδίδουν. Για να είναι δυνατή η χρήση ελαφρών αδρανών στο σκυρόδεμα με θετικά αποτελέσματα, θα πρέπει να υπολογιστούν οι κατάλληλες αναλογίες προσθήκης του κάθε υλικού, μεμονωμένα και συνδυαστικά με άλλα, ώστε να μειωθούν ή και να εξαλειφθούν οι αρνητικές επιδράσεις που αυτά επιφέρουν. Κάποια από τα θέματα που χρήζουν περαιτέρω αποσαφήνισης, και αναδείχθηκαν από την παρούσα εργασία, είναι ο προσδιορισμός της ποσότητας του περλίτη, της κίσηρης και της RHA, κυρίως σε συνδυασμούς μεταξύ τους, ώστε να βελτιστοποιηθεί ο συντελεστής τριχοειδούς απορρόφησης και το ανοιχτό πορώδες του σκυροδέματος. Παράλληλα, αντίστοιχη διερεύνηση χρειάζεται και για τη βελτίωση των αποτελεσμάτων των θλιπτικών αντοχών υπέρ της ασφαλείας. Τέλος, σημαντικό είναι να εξακριβωθούν οι πρακτικές προετοιμασίας (π.χ. χρόνος προϋγρανσης κίσηρης) και η ποσότητα υπερρευστοποιητών, ώστε α) να μην επηρεάζεται ο ενεργός λόγος νερού/τσιμέντου από τα υψηλά ποσοστά απορροφητικότητας των ελαφρών αδρανών, β) να μπορεί να επιτευχθεί και να διατηρηθεί η επιθυμητή κάθιση και εργασιμότητα του σκυροδέματος και γ) να μπορεί η όλη διαδικασία να αυτοματοποιηθεί ώστε να έχει πρακτική εφαρμογή σε μια μονάδα παραγωγής σκυροδέματος με σκοπό να εξυπηρετήσει πιθανή μαζική ζήτηση της αγοράς.

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος 2016 (ΚΤΣ-2016), in *Εφημερίδα της Κυβερνήσεως*. 2016, Υπουργείο Υποδομών, Μεταφορών και Δικτύων, Γενική Γραμματεία Υποδομών.
2. Οικονόμου, Χ.Μ., (2006), *Τεχνολογία του Σκυροδέματος*, in *Τεχνολογία του Σκυροδέματος*. 2006, "ΣΕΛΚΑ - 4Μ" ΕΠΕ - ΤεΚΔΟΤΙΚΗ: Αθήνα. p. 199-216.
3. Τσίμας, Σ. and Τσιβιλής, Σ., (2010), *Επιστήμη Και Τεχνολογία Τσιμέντου*. Εκδόσεις ΕΜ Π, Αθήνα.
4. Κεχαγιά, Φ., Obbliger, M., and Τσώχος, Γ., *ΧΗΜΙΚΑ ΠΡΟΣΜΙΚΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ*, in *1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, ΤΕΕ*,. 2008: Αθήνα.
5. Plank, J., Sakai, E., Miao, C.W., Yu, C., and Hong, J.X., (2015), *Chemical admixtures — Chemistry, applications and their impact on concrete microstructure and durability*. Cement and Concrete Research. **78**: p. 81-99.
6. Ramachandran, V.S., Paroli, R.M., Beaudoin, J.J., and Delgado, A.H., (2002), *4 - Introduction to Concrete Admixtures*, in *Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials*, V.S. Ramachandran, et al., Editors. 2002, William Andrew Publishing: Norwich, NY. p. 143-188.
7. © Lafarge 2019. *Ιστορία Τσιμέντου*. 2019 [cited Ιούλιος 2021; Available from: https://www.lafarge.gr/istoria_tsimentou].
8. Λιβανός, Δ. and Στάμος, Κ., (2016), *Πειραματική διερεύνηση των χαρακτηριστικών του υλικού και της ανακκοκλιζόμενης συμπεριφοράς δοκών από φέρον ελαφροσκυρόδεμα*.
9. Alexander, M. and Mindess, S., (2005), *Aggregates in Concrete*. 2010 ed. Modern concrete technology series 13, ed. A. Bentur and S. Mindess. Taylor & Francis.
10. Τσιάβου, Ε., Χρυσοβελίδου, Δ., Φωτόπουλος, Α., Μπίλλα, Ε., and Δερζέκο, Χ. *Αδρανή*. 2021 [cited Ιούλιος 2021; Available from: http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/P_AGGREGATES].
11. Κορωνάιος, Α. and Πουλάκος, Γ., (2011), *Τεχνικά Υλικά*. Αθήνα, Ελλάδα: Εκδόσεις Συμμετρία.
12. CEN/TC154/SC5, S.-C.L.A., *BSI Document 92/87196: European Draft Standard method of test for Crushing Strength of Lightweight Aggregates*. 1992.
13. Popovics, S., (1992), *14 - Lightweight and Heavyweight Aggregates*, in *Concrete Materials (Second Edition)*, S. Popovics, Editor. 1992, William Andrew Publishing: Oxford. p. 512-532.
14. Chandra, S. and Berntsson, L., (2002), *11 - Applications of Lightweight Aggregate Concrete*, in *Lightweight Aggregate Concrete*, S. Chandra and L. Berntsson, Editors. 2002, William Andrew Publishing: Norwich, NY. p. 369-400.
15. *Κίσσηρις*. 2021 [cited 2021 September 2021]; Available from: <https://www.orykta.gr/oryktes-protos-yles-tis-ellados/latomika-orykta/biomihanika-orykta/59-kisshris>.
16. Chandan, M.B., S, D.N., M, S.K.M., H.R, A., and B.S, R.K., (1982 – 1985, 2017), *An Experimental Study on Lightweight Concrete by Partially Replacing of Normal*

- Coarse Aggregate by Pumice Stone*. International Journal for Scientific Research and Development. **5**(2).
17. Rajeswari, S. and George, S., (2016), *Experimental study of light weight concrete by partial replacement of coarse aggregate using pumice aggregate*. Int. J. Sci. Eng. Res. **4**(5): p. 50-53.
 18. Karthika, R.B., Vidyapriya, V., Nandhini Sri, K.V., Merlin Grace Beaula, K., Harini, R., and Sriram, M., (2021), *Experimental study on lightweight concrete using pumice aggregate*. Materials Today: Proceedings. **43**: p. 1606-1613.
 19. lakshmi, A.S., S.Karthick, Helden, G., Boopathi, M.D., and Pandian, V.B., (2017), *Experimental investigation on light weight concrete using pumice aggregate*. International Journal of Innovative and Emerging Research in Engineering. **4**(3).
 20. *Pumice and Concrete - Pumice~Crete® Structures*. [cited 2021 September 2021]; Available from: <http://pumiceconcrete.com/pumicecrete.html>.
 21. Berge, B., (2007), *Ecology of building materials*. Routledge.
 22. Rashad, A.M., (2016), *A synopsis about perlite as building material—A best practice guide for Civil Engineer*. Construction and Building Materials. **121**: p. 338-353.
 23. Ober, J.A., *Mineral commodity summaries 2016*, in *Mineral Commodity Summaries*. 2016: Reston, VA. p. 205.
 24. Ennis. (2015), *Perlite mining and reclamation in the No Agua Peaks, Taos County, New Mexico*. in *62nd Annual Fall Field Conference*. New Mexico Geological Society.
 25. Mukherjee, S., (2011), *Industrial Mineralogy: Mineral Processing, Beneficiations and Other Related Mineral Usage*, in *Applied Mineralogy: Applications in Industry and Environment*, S. Mukherjee, Editor. 2011, Springer Netherlands: Dordrecht. p. 428-489.
 26. Singh, M. and Garg, M., (1991), *Perlite-based building materials — a review of current applications*. Construction and Building Materials. **5**(2): p. 75-81.
 27. SA, C.A.P. *Expanded Perlite*. September 2021]; Available from: https://www.aegean-perlites.com/el/ns_products/expanded-perlite/.
 28. Zou, Y. and Yang, T., (2019), *Chapter 9 - Rice Husk, Rice Husk Ash and Their Applications*, in *Rice Bran and Rice Bran Oil*, L.-Z. Cheong and X. Xu, Editors. 2019, AOCS Press. p. 207-246.
 29. Βουβουλής, Σ., *Χρήση παραπροϊόντων μονάδων παραγωγής ρυζιού για παρασκευή καθαρού οξειδίου του πυριτίου*. 2007, TEI Δυτικής Μακεδονίας.
 30. Syahida Adnan, Z., Ariffin, N.F., Syed Mohsin, S.M., and Abdul Shukor Lim, N.H., (2021), *Review paper: Performance of rice husk ash as a material for partial cement replacement in concrete*. Materials Today: Proceedings.
 31. Mahmud, H.B., Hamid, N.A.A., and Chin, K.Y. (2010), *Production of high strength concrete incorporating an agricultural waste-rice husk ash*. in *2010 2nd International Conference on Chemical, Biological and Environmental Engineering*. IEEE.
 32. Tambichik, A., Mohamad, N., Abdul Samad, A.A., Mohd Bosro, M., and Iman, M.A., (2018), *Utilization of construction and agricultural waste in Malaysia for development of Green Concrete: A Review*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. **140**: p. 012134.
 33. Σίδερης, Κ.Κ., (2010), *Θέματα Τεχνολογίας - Ανθεκτικότητας Σκυροδέματος*. Ξάνθη: "ΣΕΛΚΑ - 4Μ" ΕΠΕ, TeKΔOTIKH.
 34. Mindess, S., Young, J., and Darwin, D., (1981), *Hydration of Portland Cement*. Chapter-4, Concrete, 1st ed, Prentice-Hall, Inc, Englewood, Cliffs, New Jersey.

35. Hurling, H. (1984), *Oxygen permeability of concrete*. in *Proceedings of the RILEM Seminar on the Durability of Concrete Structures under normal outdoor Exposure*. Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität, Hannover.
36. Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M., and Castro, P., (2000), *Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar*. Cement and Concrete research. **30**(7): p. 1047-1055.
37. Neville, A.M., (1995), *Properties of concrete*. Vol. 4: Longman London.
38. Μπατής, Γ., Ρακαντά, Ε., Θεοδωρίδης, Β., and Σίδερης, Κ., (2003), *Επίδραση του αναστολέα διάβρωσης με βάση την Ν, Ν-διμεθυλαμινοαιθανόλη στη προστασία του οπλισμού σκυροδέματος λόγω ενανθράκωσης και ταυτόχρονης παρουσίας χλωριόντων*. 14ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Κως.
39. Σίδερης, Κ.Κ., "Επίδραση των φυσικών ποζολανών στη θλιπτική αντοχή και το πορώδες των τσιμεντοκονιαμάτων", in *Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών 1996*, Πολυτεχνική Σχολή Ξάνθης. p. 245.
40. Μπατής, Γ. and Καρύδης, Π., (1999), *Καθοδική Προστασία του οπλισμού στο σκυρόδεμα*. 13ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Ρέθυμνο.
41. Guide, C.D., (1989), *Durable concrete structures*. CEB Bulletin d'Information(182).
42. Dhir, R., TITTLE, P.J., and McCarthy, M., (2000), *Role of cement content in specifications for durability of concrete: a review*. Concrete (London). **34**(10): p. 68-76.
43. Moller, G. (1956), *Tests of resistance of concrete to early frost action*. in *RILEM Symposium on Winter Concreting, Copenhagen*.
44. Committee, A.C.I., *201.2R-16 Guide to Durable Concrete*. Technical Documents.
45. Bremner, T.W., (2008), *13 - Lightweight concrete*, in *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete (Second Edition)*, S. Mindess, Editor. 2008, Woodhead Publishing. p. 307-323.
46. Bremner, T.W., Holm, T.A., and Stepanova, V.F. (1994), *Lightweight Concrete-A Proven Material for Two Millennia*. in *Advances in Cement and Concrete*. ASCE.
47. Chandra, S. and Berntsson, L., (2002), *1 - Historical Background of Lightweight Aggregate Concrete*, in *Lightweight Aggregate Concrete*, S. Chandra and L. Berntsson, Editors. 2002, William Andrew Publishing: Norwich, NY. p. 5-19.
48. Akers, D.J., Gruber, R., Ramme, B.W., Boyle, M.J., Grygar, J.G., Rowe, S.K., Bremner, T.W., Kluckowski, E.S., Sheetz, S.R., Burg, R.G., Kowalsky, M.J., Snow, P.G., Crocker, D.A., Leming, M.L., Speck, J., Dodl, C.L., Mccall, W.C., Sypher, W.X., Fidjestøl, P., Mor, A.A., Vaysburd, A.M., Golden, D.M., and Parekh, D.T. (2003), *Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete ACI 213 R-03 Reported by ACI Committee 213*.
49. Newman, J. and Owens, P., (2003), *2 - Properties of lightweight concrete*, in *Advanced Concrete Technology*, J. Newman and B.S. Choo, Editors. 2003, Butterworth-Heinemann: Oxford. p. 3-29.
50. RILEM, (1978), *Recommandations: Classification fonctionnelle des bétons / Functional classification of lightweight concretes*. Materials and Structures. **11**(64): p. 281-282.
51. Finn, E.V., Society, C., and Engineers, I.o.S., (1987), *Guide to the Structural Use of Lightweight Aggregate Concrete*. Institution of Structural Engineers.
52. Chandra, S. and Berntsson, L., (2002), *7 - Physical Properties of Lightweight Aggregate Concrete*, in *Lightweight Aggregate Concrete*, S. Chandra and L. Berntsson, Editors. 2002, William Andrew Publishing: Norwich, NY. p. 167-229.

53. Dhir, R., (1987), *Durability potential of lightweight aggregate concrete*. Concrete (London). **21**(4).
54. Klieger, P. and Hanson, J. (1961), *Freezing and thawing tests of lightweight aggregate concrete*. in *Journal Proceedings*.
55. Whiting, D. and Burg, R., (1991), *Freezing and Thawing Durability of High-Strength Lightweight Concretes*. Special Publication. **126**: p. 84-100.
56. Hanson, J.A., (1964), *Replacement of Lightweight Aggregate Fines with Natural Sand in Structural Concrete*. Portland Cement Assoc., Res. and Development Lab.
57. Holm, T., Bremner, T., and Newman, J., (1984), *Concrete bridge decks: lightweight aggregate concrete subject to severe weathering*. Concrete international. **6**(6): p. 49-54.
58. Dhir, R., Munday, J., and Cheng, H., (1989), *Lightweight concrete: Durability*. Construction Weekly.
59. Lydon, F. and Mahawish, A., (1989), *Strength and permeability results from a range of concretes*. Cement and Concrete Research. **19**(3): p. 366-376.
60. Ben-Othman, B. and Buenfeld, N., (1990), *Oxygen permeability of structural lightweight aggregate concrete*. Protection of Concrete; Dhir, RK, Green, JW, Eds.; E & FN Spon: London, UK.
61. Grimer, F., (1967), *Durability of steel embedded in lightweight concrete*. Concrete. **1**(4): p. 125-&.
62. Bandyopadhyay, A. and Swamy, R., (1975), *Durability of steel embedded in structural lightweight concrete*. Matériaux et Construction. **8**(3): p. 203-210.
63. Schulze, W. and Gunzler, J., (1968), *Corrosion protection of the reinforcement in lightweight concrete*.
64. (FIP), F.i.d.l.p., *FIP State of Art Report : Principles of Thermal Insulation with Respect to Lightweight Concrete*. 1978. p. 46.
65. Berner, D., Gerwick, B., and Polivka, M. (1983), *Prestressed lightweight concrete in the transport of cryogenic liquids*. in *Proceedings OCEANS'83*. IEEE.
66. Calleri, C., Astolfi, A., Shtrepi, L., Prato, A., Schiavi, A., Zampini, D., and Volpatti, G., (2019), *Characterization of the sound insulation properties of a two-layers lightweight concrete innovative façade*. Applied Acoustics. **145**: p. 267-277.
67. Clarke, J.L., (1993), *Structural lightweight aggregate concrete*.
68. Sengul, O., Azizi, S., Karaosmanoglu, F., and Tasdemir, M.A., (2011), *Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete*. Energy and Buildings. **43**(2): p. 671-676.
69. Kabay, N., Tufekci, M.M., Kizilkanat, A.B., and Oktay, D., (2015), *Properties of concrete with pumice powder and fly ash as cement replacement materials*. Construction and Building Materials. **85**: p. 1-8.
70. Swaminathen, A.N., Vivek Kumar, C., Robert Ravi, S., and Debnath, S., (2021), *Evaluation of strength and durability assessment for the impact of Rice Husk ash and Metakaolin at High Performance Concrete mixes*. Materials Today: Proceedings.
71. Sahoo, S., Parhi, P.K., and Chandra Panda, B., (2021), *Durability properties of concrete with silica fume and rice husk ash*. Cleaner Engineering and Technology. **2**: p. 100067.
72. Domagała, L., (2015), *The effect of lightweight aggregate water absorption on the reduction of water-cement ratio in fresh concrete*. Procedia Engineering. **108**: p. 206-213.
73. Standardization, G.I.f., *DIN EN 12350-2 Testing fresh concrete - Part 2: Slump test*. 2019.

74. ΔΟΚΙΜΗ ΚΑΘΙΣΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (ΣΚ309). Ιούλιος 2021]; Available from: http://www.paver.gr/images/stories/virtuemart/product/skyrodema/slump_test_sk309.pdf.
75. Standardization, G.I.f., *DIN EN 12390-3 Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens*. 2009.
76. Κυριακόπουλος, Β.Α., *Σχέση αντοχής σκυροδέματος σε θλίψη και κάμψη*. 2012.
77. Κομνηνού, Ε. and Οικονόμου, Π., (2015), *Συγκριτική αξιολόγηση μηχανικών χαρακτηριστικών και μηχανικής συμπεριφοράς σκυροδέματος, ινοπλισμένου με μεταλλικές και συνθετικές ίνες*.
78. Basheer, L., Kropp, J., and Cleland, D.J., (2001), *Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review*. *Construction and Building Materials*. **15**(2): p. 93-103.
79. 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.
80. (2021), *4 - Surface tests to determine transport properties of concrete – II: analytical models to calculate permeability*, in *Transport Properties of Concrete (Second Edition)*, P.A. Claisse, Editor. 2021, Woodhead Publishing: Oxford. p. 41-58.
81. Hall, C. and Raymond Yau, M.H., (1987), *Water movement in porous building materials—IX. The water absorption and sorptivity of concretes*. *Building and Environment*. **22**(1): p. 77-82.
82. Taha, M.M.R., El-Dieb, A.S., and Shrive, N.G., (2001), *Sorptivity: a reliable measurement for surface absorption of masonry brick units*. *Materials and Structures*. **34**(7): p. 438-445.
83. *ASTM C642-97, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. 1997, ASTM International: West Conshohocken, PA.
84. Stanish, K., Hooton, R.D., and Thomas, M.D., (2001), *Testing the chloride penetration resistance of concrete: a literature review*.
85. Finland:NordTest, *NT Build 492 (1999) Concrete, mortar and cement-based materials: Chloride migration coefficient from non-steady state migration experiment*. 1999.
86. Nilsson, L., Ngo, M., and Gjorv, O. (1998), *High-performance repair materials for concrete structures in the port of Gothenburg*. in *Second international conference on concrete under severe conditions: environment and loading*.
87. *ASTM C666-97, Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*. 1997, ASTM International: West Conshohocken, PA.
88. Standardization, G.I.f., *EN 12504-4:2004 Testing concrete - Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity*. 2004.
89. Χαλιορής, Κ. (2019), *Έλεγχοι - Εργαστηριακές Δοκιμές - Αποτύπωση - Υλικά για επεμβάσεις σε κατασκευές*. in *Ημερίδα "Ειδικά Θέματα Αντισεισμικού Σχεδιασμού Κτιρίων - Ενισχύσεις - Επισκευές"*. Ξάνθη- Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης.
90. No, T.C.S., (2002), *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures*. Training Course Series.
91. Kim, H.-K., Jeon, J., and Lee, H.-K., (2012), *Workability, and mechanical, acoustic and thermal properties of lightweight aggregate concrete with a high volume of entrained air*. *Construction and Building Materials*. **29**: p. 193-200.
92. Shaaban, M., (2021), *Properties of concrete with binary binder system of calcined dolomite powder and rice husk ash*. *Heliyon*. **7**(2): p. e06311.

93. Tasdemir, C., Sengul, O., and Tasdemir, M.A., (2017), *A comparative study on the thermal conductivities and mechanical properties of lightweight concretes*. Energy and Buildings. **151**: p. 469-475.
94. Samimi, K., Kamali-Bernard, S., Akbar Maghsoudi, A., Maghsoudi, M., and Siad, H., (2017), *Influence of pumice and zeolite on compressive strength, transport properties and resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes*. Construction and Building Materials. **151**: p. 292-311.
95. Lanzón, M. and García-Ruiz, P.A., (2008), *Lightweight cement mortars: Advantages and inconveniences of expanded perlite and its influence on fresh and hardened state and durability*. Construction and Building Materials. **22**(8): p. 1798-1806.
96. Polat, R., Demirboğa, R., Karakoç, M.B., and Türkmen, İ., (2010), *The influence of lightweight aggregate on the physico-mechanical properties of concrete exposed to freeze–thaw cycles*. Cold Regions Science and Technology. **60**(1): p. 51-56.
97. Stratoura, M., Badogiannis, E., and Papadakis, V., *Μελέτη παραμέτρων ανθεκτικότητας ελαφροσκυροδέματος | Study on the durability parameters of lightweight concrete*, in *18th Greek Concrete Conference*. 2018: Athens, Greece.
98. Turkmen, I., Demirboga, R., and Gul, R., (2006), *The effects of different cement dosages, slumps and pumice aggregate ratios on the freezing and thawing of concrete*. Computers and Concrete. **3**(2_3): p. 163-175.
99. Karakoç, M.B., Demirboğa, R., Türkmen, İ., and Can, İ., (2011), *Modeling with ANN and effect of pumice aggregate and air entrainment on the freeze–thaw durabilities of HSC*. Construction and Building Materials. **25**(11): p. 4241-4249.

9 Παράρτημα Α. Συμπληρωματικά διαγράμματα και πίνακες αποτελεσμάτων

9.1 Ανοιχτό πορώδες

Παρατίθενται τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων της δοκιμής ανοιχτού πορώδους για τις 28, 90 και 180 ημέρες, και για τα δυο δοκίμια κάθε σύνθεσης.

Πίνακας 9.1 Αποτελέσματα μετρήσεων δοκιμής ανοιχτού πορώδους OP% για όλα τα δοκίμια 28 ημερών

| Κωδικός σύνθεσης | | Μέτρηση βάρους ξηρών δοκιμίων (g) | Μέτρηση βάρους κορεσμένων δοκιμίων (g) | Μέτρηση ειδικού βάρους υπό αιώρηση (g) | Ανοιχτό πορώδες % |
|------------------|---|-----------------------------------|--|--|-------------------|
| REF | A | 580,69 | 612,61 | 362,84 | 12,78 |
| | B | 512,45 | 541,01 | 320,53 | 12,95 |
| PeCaPu | A | 404,28 | 456,02 | 195,83 | 19,89 |
| | B | 344,13 | 388,53 | 164,50 | 19,82 |
| PuCa | A | 312,93 | 397,61 | 175,51 | 38,13 |
| | B | 304,58 | 368,43 | 150,67 | 29,32 |
| PePu | A | 337,23 | 384,45 | 155,88 | 20,66 |
| | B | 313,01 | 362,85 | 150,50 | 23,47 |
| RPePu | A | 319,57 | 384,45 | 155,88 | 28,39 |
| | B | 300,11 | 362,85 | 150,50 | 29,55 |

Πίνακας 9.2 Αποτελέσματα μετρήσεων δοκιμής ανοικτού πορώδους OP% για όλα τα δοκίμια 90 ημερών

| Κωδικός σύνθεσης | | Μέτρηση βάρους ξηρών δοκιμίων (g) | Μέτρηση βάρους κορεσμένων δοκιμίων (g) | Μέτρηση ειδικού βάρους υπό αιώρηση (g) | Ανοικτό πορώδες % |
|------------------|---|-----------------------------------|--|--|-------------------|
| REF | A | 580,81 | 612,62 | 362,80 | 12,73 |
| | B | 512,56 | 540,99 | 319,90 | 12,86 |
| PeCaPu | A | 404,27 | 458,39 | 149,69 | 17,53 |
| | B | 343,96 | 360,80 | 198,93 | 10,40 |
| PuCa | A | 312,68 | 391,61 | 156,46 | 33,57 |
| | B | 304,22 | 369,20 | 168,10 | 32,31 |
| PePu | A | 337,23 | 384,45 | 155,88 | 20,66 |
| | B | 313,01 | 362,85 | 150,50 | 23,47 |
| RPePu | A | 319,57 | 384,45 | 155,88 | 28,39 |
| | B | 300,11 | 362,85 | 150,50 | 29,55 |

Πίνακας 9.3 Αποτελέσματα μετρήσεων δοκιμής ανοικτού πορώδους OP% για όλα τα δοκίμια 180 ημερών

| Κωδικός σύνθεσης | | Μέτρηση βάρους ξηρών δοκιμίων (g) | Μέτρηση βάρους κορεσμένων δοκιμίων (g) | Μέτρηση ειδικού βάρους υπό αιώρηση (g) | Ανοικτό πορώδες % |
|------------------|---|-----------------------------------|--|--|-------------------|
| REF | A | 581,81 | 611,97 | 362,23 | 12,08 |
| | B | 513,49 | 540,29 | 319,49 | 12,14 |
| PeCaPu | A | 405,07 | 461,03 | 201,45 | 21,56 |
| | B | 344,82 | 392,12 | 168,84 | 21,18 |
| PuCa | A | 313,27 | 362,05 | 150,93 | 23,11 |
| | B | 304,86 | 370,53 | 157,61 | 30,84 |
| PePu | A | 337,53 | 384,45 | 155,88 | 20,53 |
| | B | 313,40 | 362,85 | 150,50 | 23,29 |
| RPePu | A | 319,66 | 384,45 | 155,88 | 28,35 |
| | B | 300,41 | 362,85 | 150,50 | 29,40 |

9.2 Επαναλαμβανόμενοι κύκλοι ψύξης-απόψυξης

Πίνακας 9.4 Αποτελέσματα μετρήσεων μάζας όλων των δοκιμίων, κατά τους κύκλους ψύξης-απόψυξης

| Μάζες αναφοράς (gr) | | | | | |
|------------------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|
| | REF | PeCaPu | PuCa | PePu | RPePu |
| A | 862,78 | 627,54 | 552,02 | 559,21 | 576,48 |
| B | 874,22 | 635,20 | 558,03 | 564,08 | 569,21 |
| C | 865,55 | 622,90 | 540,63 | 562,85 | 565,02 |
| M.O | 867,52 | 628,55 | 550,23 | 562,05 | 570,24 |
| Μάζες 15 ^{ου} κύκλου (gr) | | | | | |
| A | 861,70 | 626,13 | 550,33 | 557,45 | 577,90 |
| B | 873,00 | 633,49 | 557,19 | 561,92 | 569,74 |
| C | 864,66 | 621,14 | 539,49 | 560,91 | 565,55 |
| M.O | 866,45 | 626,92 | 549,00 | 560,09 | 571,06 |
| Μάζες 30 ^{ου} κύκλου (gr) | | | | | |
| A | 861,41 | 625,08 | 549,90 | 557,33 | 588,58 |
| B | 872,48 | 632,27 | 557,06 | 561,32 | 578,23 |
| C | 864,16 | 619,94 | 539,07 | 560,24 | 573,25 |
| M.O | 866,02 | 625,76 | 548,68 | 559,63 | 580,02 |
| Μάζες 45 ^{ου} κύκλου (gr) | | | | | |
| A | 861,28 | 625,39 | 549,41 | 556,79 | 595,20 |
| B | 872,53 | 632,27 | 556,42 | 561,60 | 585,18 |
| C | 864,37 | 619,88 | 538,74 | 559,61 | 580,38 |
| M.O | 866,06 | 625,85 | 548,19 | 559,33 | 586,92 |
| Μάζες 60 ^{ου} κύκλου (gr) | | | | | |
| A | 861,27 | 626,27 | 549,72 | 558,08 | 597,39 |
| B | 872,46 | 633,05 | 556,99 | 562,94 | 587,19 |
| C | 864,28 | 620,4 | 539,77 | 560,05 | 582,51 |
| M.O | 866,00 | 626,57 | 548,83 | 561,50 | 589,03 |
| Μάζες 75 ^{ου} κύκλου (gr) | | | | | |
| A | 860,86 | 628,74 | 550,57 | 559,22 | 598,84 |
| B | 872,03, | 635,27 | 55,,4 | 564,05 | 587,96 |
| C | 863,94 | 621,86 | 541,62 | 560,65 | 583,27 |
| M.O | 865,61 | 628,62 | 549,86 | 561,31 | 590,02 |

Πίνακας 9.5 Αποτελέσματα μέτρησης μήκους όλων των δοκιμίων, κατά τους κύκλους ψύξης-απόψυξης

| Μήκη αναφοράς (mm) | | | | | |
|-----------------------------------|-------|--------|-------|-------|-------|
| | REF | PeCaPu | PePu | PuCa | RPePu |
| M.O A | 70,00 | 70,00 | 70,00 | 70,00 | 70,00 |
| M.O B | 70,00 | 70,00 | 70,00 | 70,00 | 70,00 |
| M.O C | 70,00 | 70,00 | 70,00 | 70,00 | 70,00 |
| M.O | 70,00 | 70,00 | 70,00 | 70,00 | 70,00 |
| Μήκη 15 ⁰⁰ κύκλου (mm) | | | | | |
| M.O A | 71,13 | 71,64 | 71,11 | 71,01 | 70,94 |
| M.O B | 71,31 | 71,11 | 71,18 | 71,43 | 70,97 |
| M.O C | 71,27 | 71,25 | 71,33 | 70,81 | 70,85 |
| M.O | 71,24 | 71,33 | 71,21 | 71,08 | 70,92 |
| Μήκη 30 ⁰⁰ κύκλου (mm) | | | | | |
| M.O A | 71,06 | 71,51 | 71,24 | 70,96 | 71,02 |
| M.O B | 71,06 | 71,27 | 71,35 | 71,24 | 71,08 |
| M.O C | 71,04 | 71,44 | 71,30 | 70,96 | 70,88 |
| M.O | 71,05 | 71,41 | 71,30 | 71,05 | 71,00 |
| Μήκη 45 ⁰⁰ κύκλου (mm) | | | | | |
| M.O A | 70,97 | 71,29 | 70,88 | 70,90 | 71,21 |
| M.O B | 71,01 | 70,99 | 71,21 | 71,21 | 71,17 |
| M.O C | 71,00 | 71,18 | 71,29 | 70,51 | 70,83 |
| M.O | 70,99 | 71,15 | 71,13 | 70,87 | 71,07 |
| Μήκη 60 ⁰⁰ κύκλου (mm) | | | | | |
| M.O A | 71,00 | 71,35 | 70,93 | 70,93 | 71,13 |
| M.O B | 70,94 | 71,26 | 71,08 | 71,11 | 71,07 |
| M.O C | 70,98 | 71,17 | 71,25 | 70,67 | 70,86 |
| M.O | 70,97 | 71,26 | 71,09 | 70,91 | 71,02 |
| Μήκη 75 ⁰⁰ κύκλου (mm) | | | | | |
| M.O A | 70,94 | 71,33 | 70,89 | 70,62 | 71,33 |
| M.O B | 70,79 | 70,99 | 71,12 | 71,12 | 71,33 |
| M.O C | 70,92 | 71,45 | 71,29 | 70,81 | 70,99 |
| M.O | 70,88 | 71,26 | 71,10 | 70,85 | 71,21 |

Πίνακας 9.6 Αποτελέσματα μέτρησης ταχύτητας υπερήχων για όλα τα δοκίμια, κατά τους κύκλους ψύξης-απόψυξης

| Ταχύτητα υπερήχων (m/s) 5 ^ο κύκλου | | | | | |
|--|------|--------|------|------|-------|
| | REF | PeCaPu | PuCa | PePu | RPePu |
| A | 5224 | 4142 | 3804 | 3911 | 3704 |
| B | 5224 | 4142 | 3804 | 3804 | 3518 |
| C | 5224 | 4142 | 3804 | 3804 | 3704 |
| M.O | 5224 | 4142 | 3804 | 3840 | 3642 |
| Ταχύτητα υπερήχων (m/s) 15 ^ο κύκλου | | | | | |
| A | 5224 | 4023 | 3804 | 3804 | 3704 |
| B | 5224 | 4142 | 3704 | 3804 | 3704 |
| C | 5224 | 4023 | 3804 | 3704 | 3704 |
| M.O | 5224 | 4063 | 3771 | 3771 | 3704 |
| Ταχύτητα υπερήχων (m/s) 30 ^ο κύκλου | | | | | |
| A | 5426 | 4023 | 3911 | 3911 | 3704 |
| B | 5426 | 4268 | 3911 | 3804 | 3704 |
| C | 5426 | 4142 | 3911 | 3804 | 3704 |
| M.O | 5426 | 4144 | 3911 | 3840 | 3704 |
| Ταχύτητα υπερήχων (m/s) 45 ^ο κύκλου | | | | | |
| A | 5426 | 4268 | 3911 | 3804 | 3518 |
| B | 5426 | 4268 | 3911 | 3704 | 3518 |
| C | 5426 | 4268 | 3911 | 3804 | 3518 |
| M.O | 5426 | 4268 | 3911 | 3771 | 3518 |
| Ταχύτητα υπερήχων (m/s) 55 ^ο κύκλου | | | | | |
| A | 5426 | 4142 | 3911 | 3911 | 3518 |
| B | 5426 | 4268 | 3911 | 3804 | 3518 |
| C | 5426 | 4142 | 3911 | 3804 | 3518 |
| M.O | 5426 | 4184 | 3911 | 3840 | 3518 |
| Ταχύτητα υπερήχων (m/s) 75 ^ο κύκλου | | | | | |
| A | 5426 | 4268 | 3911 | 3911 | 3196 |
| B | 5426 | 4142 | 3911 | 3911 | 3349 |
| C | 5426 | 4142 | 3911 | 3911 | 3349 |
| M.O | 5426 | 4184 | 3911 | 3911 | 3298 |

10 Παράρτημα Β. Φωτογραφικό υλικό πειραματικών μεθόδων



Εικόνα 10.1 Εκτέλεση δοκιμής κάθισης στο νωπό σκυρόδεμα



Εικόνα 10.2 Θραύση κυβικού δοκιμίου στο ΕΟΣ του ΕΜΠ



Εικόνα 10.3 Κυβικά και κυλινδρικά δοκίμια