



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ



ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΜΕ ΣΚΩΡΙΑ ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΑΣ ΣΕ ΚΟΝΙΑΜΑΤΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Από τη προπτυχιακή φοιτήτρια:

ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ ΝΑΤΑΣΑ ΒΟΛΑ, ΑΕΜ: 15149

Επιβλέπων καθηγητής:

ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2024

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θέλω να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Δομικών Υλικών του ΑΠΘ για την ανεκτίμητη συνεισφορά τους στην επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ειδικότερα, θέλω να απευθύνω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Ελευθέριο Αναστασίου για την αφοσίωσή του, την επαγγελματική καθοδήγησή του και την αμέριστη στήριξή του κατά τη διάρκεια της έρευνάς μου. Η επιλογή ενός θέματος που αντανακλούσε τα ενδιαφέροντά μου αποδείχθηκε κρίσιμη για την ενθάρρυνσή μου και την απόδοσή μου.

Επιπλέον, εκφράζω τη βαθιά μου ευγνωμοσύνη προς την Υποψήφια Διδάκτορα Φωτεινή Κεσικίδου για την ανέκκλητη παρουσία της στο εργαστήριο κατά τη διάρκεια των πειραματικών διαδικασιών. Η συνεργασία μας αποδείχθηκε κρίσιμη για την επίτευξη των επιθυμητών αποτελεσμάτων.

Επίσης, εκφράζω τις ευχαριστίες μου προς την οικογένειά μου για την αμέριστη σε όλα τα επίπεδα στήριξή της της φοιτητικής μου πορείας. Τέλος, ευχαριστώ θερμά τους φίλους μου που ήταν εκεί για μένα και με στήριζαν ψυχολογικά κατά τη διάρκεια αυτής της πορείας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά την αντικατάσταση του τσιμέντου με σκωρία χαλυβουργίας στην παραγωγή κονιαμάτων. Επικεντρώνεται στη διερεύνηση των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων της σκωρίας χαλυβουργίας και συγκρίνονται με τις ιδιότητες του παραδοσιακού τσιμέντου Portland, συμβάλλοντας στη μείωση της χρήσης του τσιμέντου Portland. Η εργασία αναλύει τις περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις της παραγωγής τσιμέντου, καθώς και τα οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση βιομηχανικών υποπροϊόντων όπως η σκωρία χαλυβουργίας, προτείνοντας βιώσιμες λύσεις για την κατασκευαστική βιομηχανία.

Επιπλέον, η εργασία περιλαμβάνει πειραματική μελέτη στην οποία ερευνώνται οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των κονιαμάτων με σκωρία χαλυβουργίας. Αξιολογούνται παράμετροι όπως η καμπτική και θλιπτική αντοχή, η εργασιμότητα, το πορώδες, η τριχοειδή ανύψωση, η σταθερότητα όγκου και η αντοχή από προσβολή σε χλωριόντα και κύκλους ψύξης- απόψυξης. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών, τα οποία δείχνουν ότι η αντικατάσταση μέρους του τσιμέντου με σκωρία χαλυβουργίας μπορεί να βελτιώσει ορισμένες ιδιότητες των κονιαμάτων, συμβάλλοντας παράλληλα στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της παραγωγής τσιμέντου.

SUMMARY

This thesis examines the replacement of cement with steel slag in the production of mortars. It focuses on investigating the physical and chemical properties of steel slag, comparing them with those of traditional Portland cement, thus contributing to the reduction of Portland cement usage. The study analyzes the environmental and economic impacts of cement production, as well as the benefits derived from the use of industrial by-products like steel slag, proposing sustainable solutions for the construction industry.

Moreover, the thesis includes an experimental study that investigates the physical and mechanical properties of mortars containing steel slag. Parameters such as flexural and compressive strength, workability, porosity, capillary rise, volume stability, resistance to chloride penetration, and freeze-thaw cycles are evaluated. The test results demonstrate that replacing part of the cement with steel slag can improve certain mortar properties while simultaneously reducing the environmental impact of cement production.

Πίνακας περιεχομένων

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
SUMMARY	4
ΜΕΡΟΣ Ι: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	8
1. Εισαγωγή.....	8
1.1 Βιομηχανικά παραπροϊόντα.....	9
1.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις παραγωγής τσιμέντου Portland.....	9
2. Σκωρίες.....	10
2.1 Σκωρία χαλβουργίας.....	10
2.2 Παραγωγή και τύποι των σκωριών	11
2.2.1 BOFS (σκωρία βασικού κλιβάνου οξυγόνου).....	11
2.2.2 EAF (σκωρία κλίβανου φωτοβολταϊκού τόξου).....	12
2.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και οφέλη αξιοποίησης της σκωρίας χαλβουργίας	13
3. Εφαρμογές σκωρίας.....	14
3.1 Ιστορική αναδρομή χρήσης της σκωρίας	14
3.2 Τρέχουσες εφαρμογές σκωρίας χαλβουργίας και σκωρίας υψικαμίνων	14
3.3 Χρήση βιομηχανικών αποβλήτων στο σκυρόδεμα και στα κονιάματα.....	15
3.3.1 Χρήση των υποπροϊόντων ως αδρανή στο σκυρόδεμα.....	15
3.3.2 Χρήση των υποπροϊόντων ως συνδετική κονία και στην αντικατάσταση του τσιμέντου Portland.....	18
3.3.3 Χρήση των υποπροϊόντων στην παραγωγή τσιμέντων blended- type	19
3.3.4 Χρήση αδρανών σκωρίας σε ασφατικά έργα και έργα οδοποιίας	20
4. Μηχανισμοί, συμπεριφορά και ιδιότητες της σκωρίας χαλβουργίας σε κονίες....	21
4.1 Μικροδομή ενυδατωμένων προϊόντων της σύνθετης συνδετικής κονίας τσιμέντου- σκωρίας χαλβουργίας.....	22
4.2 Επίδραση της σκωρίας χαλβουργίας στις μηχανικές ιδιότητες και στη διαδικασία ενυδάτωσης	23
4.3 Σύγκριση των ιδιοτήτων πρώιμης ενυδάτωσης συνδετικού υλικού τσιμέντου-σκωρίας χαλβουργίας και συνδετικού υλικού τσιμέντου-ασβεστόλιθου	23
4.4 Επίδραση της λεπτότητας στις τσιμεντοειδείς ιδιότητες της σκωρίας χαλβουργίας	24

4.5 Διερεύνηση των συνεργιστικών επιδράσεων σε τετραμερές συνδετικό υλικό που περιέχει ερυθρά ιλύ, σκωρία υψικαμίνου, σκωρία χαλυβουργίας και γύψο από αποθείωση καυσασερίων με βάση τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.....	26
4.6 Συμπεριφορά ενανθράκωσης και ενυδάτωσης συνδετικών υλικών σκωρίας χαλυβουργίας EAF και BOF	26
5. Οφέλη και προκλήσεις της χρήσης σκωρίας χαλυβουργίας στην αντικατάσταση τσιμέντου Portland	27
5.1 Οφέλη.....	28
5.2 Προκλήσεις και στρατηγικές μετριασμού	28
6. Πρότυπα και κανονισμοί.....	29
6.1 Ρυθμιστικές προκλήσεις	29
6.2 Τρέχοντα πρότυπα	29
7. Μελλοντικές κατευθύνσεις και ευκαιρίες έρευνας.....	30
7.1 Καινοτόμες χρήσεις	30
7.1.1 Οικονομικές και νομικές πτυχές.....	30
7.1.2 Τεχνικές πτυχές	31
7.2 Ερευνητικά κενά	32
7.3 Αντίκτυπος χρήσης σκωρίας χαλυβουργίας	32
ΜΕΡΟΣ II: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	34
8. Εισαγωγή	34
8.1 Πρώτες ύλες και οι ιδιότητες τους	35
8.2 Συνθέσεις και αναλογίες υλικών	39
8.3 Σύνθεση κονιαμάτων και έλεγχος εργασιμότητας	43
9. Αποτελέσματα.....	45
9.1 Μηχανικά χαρακτηριστικά.....	45
9.1.1 Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας.....	45
9.1.2 Δοκιμή κάμψης	47
9.1.3 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης	50
9.2 Φυσικά χαρακτηριστικά.....	53
9.2.1 Προσδιορισμός πορώδους, απορροφητικότητας και φαινόμενου ειδικού βάρους.....	53
9.2.2 Αντίσταση στη διείδυση χλωριοϊόντων.....	59
9.2.3 Σταθερότητα όγκου.....	62

9.2.4 Ενανθράκωση	65
9.2.5 Ανθεκτικότητα σε κύκλους ψύξης- απόψυξης.....	67
10. Συμπεράσματα	72
10.1 Στόχος.....	72
10.2 Κύρια ευρήματα	72
10.3 Σχολιασμός.....	73
Βιβλιογραφία.....	75

ΜΕΡΟΣ Ι: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. Εισαγωγή

Κατά την παραγωγή βιομηχανικών προϊόντων, προκύπτουν διάφορα υποπροϊόντα ή παραπροϊόντα. Με τους όρους αυτούς εννοούνται τα δευτερογενή προϊόντα που προκύπτουν κατά την κατασκευή ή σύνθεση κάποιου άλλου. Ενώ παλιότερα συνηθίζονταν η απόρριψη των παραπροϊόντων, τα τελευταία χρόνια έχει οξυνθεί το ενδιαφέρον για την αξιοποίησή τους και έτσι βρίσκουν ολοένα και περισσότερες εφαρμογές. Η ανάγκη για την αξιοποίηση προκύπτει κυρίως από την ένταση των περιβαλλοντικών ζητημάτων που προκύπτουν με την τοπική συσσώρευση τους αλλά και την συνεχή ανάπτυξη σε πολλούς τομείς του επιστητού [1,5,6]. Ιδιαίτερα στον τομέα της κατασκευής υπάρχει υψηλή απορρόφηση σε παραπροϊόντα [10], καθώς η απαίτηση για όγκο υλικών είναι σημαντική και συνεχώς αυξανόμενη. Η αρχή για την εκμετάλλευση των παραπροϊόντων αυτών ταυτίζεται με την έναρξη της βιομηχανικής παραγωγής. Τέτοιου είδους υλικά που παράγονται σε μεγάλες ποσότητες είναι, μεταξύ άλλων, τέφρες και σκωρίες. [10]

Πέρα από την εξοικονόμηση πρώτων υλών και τη μείωση των αποβλήτων, η ανάκτηση και αξιοποίηση παραπροϊόντων μειώνει την ανάγκη για νέα εξόρυξη και επεξεργασία πρώτων υλών αρά και την μείωση κατανάλωσης ενέργειας. Επιπλέον, η ανακύκλωση και αξιοποίηση των υποπροϊόντων μπορεί να συμβάλει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στην εξοικονόμηση ενέργειας. Η δημιουργία νέων αγορών με αυτά τα παραπροϊόντα ενισχύει την οικονομία και συμβάλλει στη δημιουργία θέσεων εργασίας σε διάφορους τομείς, όπως στην ανακύκλωση, στη κατασκευή, και στην παραγωγή ενέργειας. Συχνά, παρατηρούνται προσπάθειες και από τις ίδιες βιομηχανίες ώστε τα δευτερεύοντα υλικά που προκύπτουν από την διαδικασία παραγωγής να τους αποδίδουν εμπορικό κέρδος.

Οι προσπάθειες για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και διεργασιών που επιτρέπουν την αποτελεσματική αξιοποίηση των παραπροϊόντων αποτελούν σημαντικό πεδίο έρευνας και ανάπτυξης. Σε πολλές περιπτώσεις έρευνας η χρήση τους απέδειξε ακόμα και τεχνικά πλεονεκτήματα. Συμπερασματικά, με σωστή διαχείριση και αξιοποίηση των παραπροϊόντων γίνονται βήματα προς μια πιο βιώσιμη και αποτελεσματική οικονομία.

Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησης της σκωρίας χάλυβα στον κατασκευαστικό τομέα και ειδικότερα στην παραγωγή κονιάματος με αυτήν. Η έρευνα συμπεριλαμβάνει την

αξιολόγηση με πειραματικές μεθόδους των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων ενός κονιάματος με αντικατάσταση μέρους του τσιμέντου με σκωρία χαλυβουργίας.

1.1 Βιομηχανικά παραπροϊόντα

Ανάλογα με το είδος της παραγωγικής βιομηχανικής διαδικασίας προκύπτουν και διαφορετικά υποπροϊόντα. Κάποια είναι περισσότερο ελκυστικά για αξιοποίηση από κάποια άλλα, λόγω των ιδιοτήτων, της χημικής σύνθεσης, της απαίτησης για επεξεργασία και του ρυθμού παραγωγής.

Τα βιομηχανικά παραπροϊόντα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

1^η κατηγορία: μπορούν να χρησιμοποιηθούν από την κατασκευαστική βιομηχανία είτε χωρίς επεξεργασία είτε μετά την επεξεργασία χαμηλού κόστους (ιπτάμενη τέφρα, σκωρία υψικαμίνων, πυρηντική παιπάλη, κ.α.).

2^η κατηγορία: χρειάζονται περαιτέρω έρευνα και επεξεργασία ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Δεν έχουν τόσο ευρεία χρήση όπως αυτά της 1^{ης} κατηγορίας (τέφρα πυθμένα, ερυθρά ιλύς, κ.α.).

3^η κατηγορία: έχουν ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά ή μπορεί να είναι επικίνδυνα, χρήζουν ιδιαίτερη επεξεργασία και άρα η χρήση τους καθίσταται αντιοικονομική (λασπώδεις εναποθέσεις βιομηχανικών διεργασιών, ιλύς αμιάντου, σκόνη σακκοφίλτρων).

Η σκωρία χαλυβουργίας εντάσσεται στην 1^η κατηγορία και άρα η χρήση της είναι οικονομική και έτσι βρίσκει ευρεία χρήση στον κατασκευαστικό τομέα.

1.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις παραγωγής τσιμέντου Portland

Το σκυρόδεμα είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο και διαδεδομένο από όλα τα οικοδομικά υλικά στον κόσμο λόγω των μοναδικών πλεονεκτημάτων σε σχέση με άλλα υλικά. Προτιμάται επειδή διαθέτει εξαιρετικά μηχανικά χαρακτηριστικά και είναι ιδιαίτερα προσιτό. Οι καλές ιδιότητες του οφείλονται κυρίως λόγω του τσιμέντου Portland που περιέχει το σκυρόδεμα. Καθώς η ζήτηση για σκυρόδεμα άρα και για τσιμέντο αυξάνεται συνεχώς, προκαλείται αύξηση της χρήσης των αδρανών υλικών, ιδίως του ασβεστόλιθου δεδομένου ότι είναι σημαντικός για την παραγωγή τσιμέντου Portland. Η συλλογή των αδρανών απαιτεί την κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας. [4] Η εξάντληση των μη ανανεώσιμων πόρων της γης είναι ένα πρόβλημα το οποίο ολοένα και μεγαλώνει, ενώ ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι η

συνεχώς αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας. Λόγω της τόσο μεγάλης ζήτησης σε ενέργεια κάποια στιγμή στο μέλλον, τα αποθέματα των μη ανανεώσιμων πόρων θα είναι μηδαμινά, καθώς γίνεται η εξαγωγή τους συνεχώς από το περιβάλλον και χρησιμοποιούνται για να εξυπηρετούν οικονομικά οφέλη. Οι μη ανανεώσιμοι πόροι είναι πεπερασμένοι σε ποσότητα και τα αποθέματά τους δεν ανανεώνονται μετά την εξόρυξή τους. Η συνεχής συγκομιδή φυσικών πόρων προκαλεί αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, όπως είναι η απώλεια της βιοποικιλότητας, η παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας, η κλιματική αλλαγή, η υποβάθμιση της βλάστησης, η καταστροφή του οικοσυστήματος και η καταστροφή ποταμών. Με την εκτεταμένη χρήση τσιμέντου είναι αναπόφευκτη η κατανάλωση σημαντικών ποσοτήτων ενέργειας και η ρύπανση του περιβάλλοντος. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παραγωγής τσιμέντου, μια σημαντική ποσότητα ορυκτών καυσίμων και εναλλακτικών καυσίμων καίγεται για την παροχή θερμότητας στους φούρνους τσιμέντου, ξηραντήρες και προθερμαντήρες. Επιπλέον, καταναλώνεται μεγάλη ποσότητα ενέργειας στους φούρνους τσιμέντου και ειδικότερα στις μηχανές θραύσης. Έτσι, για να παραχθεί μεγάλος όγκος τσιμέντου, απαιτείται να καταναλώνεται μια τεράστια ποσότητα ενέργειας. Από τα αρχικά στάδια της διαδικασίας παραγωγής τσιμέντου μέχρι και το τελικό στάδιο είναι ιδιαίτερα επιβαρυντικά προς το περιβάλλον, ιδιαίτερα για την ατμόσφαιρα. Μελέτες έχουν δείξει ότι η παραγωγή τσιμέντου απελευθερώνει περίπου 0,8 τόνους CO₂ ανά τόνο τσιμέντου στην ατμόσφαιρα. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι ένας τόνος παραγωγής τσιμέντου Portland παράγει περίπου έναν τόνο CO₂ αερίων του θερμοκηπίου και περίπου το 2% έως 8% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας οφείλεται στη διαδικασία παραγωγής τσιμέντου. [4]

Για τους λόγους αυτούς μελετάται η αντικατάσταση του τσιμέντου με άλλα υλικά όπως είναι τα υποπροϊόντα και πιο συγκεκριμένα η σκωρία χαλυβουργίας.

2. Σκωρίες

Οι σκωρίες αποτελούν υποπροϊόντα που προκύπτουν από μεταλλουργικές ή άλλες βιομηχανικές διαδικασίες. Οι σκωρίες που προκύπτουν από μεταλλουργικές διεργασίες μπορεί να περιέχουν σίδηρο όπως είναι η σκωρία χαλυβουργίας και η σκωρία υψικαμίνου, όμως μπορεί να μην περιέχουν σίδηρο που σε αυτές συμπεριλαμβάνονται η σκωρία χαλκού και σιδηρονικελίου.

2.1 Σκωρία χαλυβουργίας

Η σκωρία που παράγεται από χαλυβουργίες παρουσιάζει διαφοροποιήσεις στις φυσικές και χημικές της ιδιότητες, οι οποίες εξαρτώνται από τη χώρα παραγωγής. Αυτή η

ποικιλία οφείλεται κυρίως στις διαφορετικές διαδικασίες παραγωγής που ακολουθούνται σε κάθε χώρα. Τα αποκαμινεύματα χαλυβουργίας δηλαδή η σκωρία δημιουργείται κατά τη φάση απομάκρυνσης των προσμίξεων από τον τηγμένο χάλυβα. Προκύπτουν σε υγρή κατάσταση και είναι ένα σύνθετο διάλυμα οξειδίων που στερεοποιείται όταν ψύχεται [10].

2.2 Παραγωγή και τύποι των σκωριών

Με την παραγωγή ενός τόνου ακατέργαστου χάλυβα παράγεται μια σημαντική ποσότητα σκωρίας χαλυβουργίας η οποία κυμαίνεται μεταξύ 130-200 kg. Η σκωρία χαλυβουργίας (steel slag), συμβολίζεται με SS και έχει ευρεία χρήση στον κατασκευαστικό τομέα. Πιο συγκεκριμένα, είναι το στερεό απόβλητο που παράγεται κατά τη μετατροπή του παλαιοσιδήρου σε χάλυβα ενώ καταλαμβάνει περίπου το 15% της ποσότητας του υλικού που μετατρέπεται, σύμφωνα με τη National Slag Association [8] και το Ινστιτούτο Γεωλογικών Ερευνών των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής (USGS). Τα δύο κυριότερα είδη σκωρίας χαλυβουργίας είναι αυτή που δημιουργείται σε βασικό κλίβανο οξυγόνου (BOF) και αυτή που παίρνει μορφή κατά την τήξη θραυσμάτων παλαιοσιδήρου σε κλίβανο ηλεκτρικού τόξου (EAF). Από το σύνολο της σκωρίας χαλυβουργίας που παράγεται, η πλειονότητα αποδίδεται στη σκωρία τύπου BOF. Ένας τρίτος τύπος σκωρίας χαλυβουργίας, γνωστή ως σκωρία κάδου, προκύπτει από την περαιτέρω διύλιση. Η επεξεργασία αυτή γίνεται με την προσθήκη άσβεστου μέσα σε κάδο ώστε να αφαιρεθεί όλη η ποσότητα σιδήρου. Η διαφορές μεταξύ των σκωριών είναι η πηγή ενέργειας των διεργασιών και τα προϊόντα που προκύπτουν στο τέλος της διαδικασίας.

Πέρα από την σκωρία χαλυβουργίας πριν από την παραγωγή χάλυβα παράγεται και σκωρία υψικαμίνων. Η σκωρία υψικαμίνων (blastfurnace slag) είναι ένα παραπροϊόν διεθνώς καθιερωμένο, το οποίο διαφέρει από το προϊόν που μελετάτε στην παρούσα εργασία. Αυτή, δημιουργείται με την εισαγωγή του ορυκτού σιδήρου σε υψικάμινο με αποτέλεσμα τα οξείδια του μαγνησίου και του ασβεστίου να είναι πάντα δεσμευμένα σε μορφή πυριτικών και αλουμινοπυριτικών ενώσεων. Οι ενώσεις αυτές αποτελούν τον τηγμένο σίδηρο που μετέπειτα χρησιμοποιείται στην παραγωγή του χάλυβα. Σε αντίθεση με την σκωρία χαλυβουργίας που η παραγωγή της πραγματοποιείται ανά παρτίδες, η διαδικασία παραγωγής σκωρίας υψικαμίνου, είναι συνεχής [10].

2.2.1 BOFS (σκωρία βασικού κλιβάνου οξυγόνου)

Στην μέθοδο παραγωγής βασικού κλιβάνου οξυγόνου, το φορτίο που εισέρχεται στον κλίβανο αποτελείται από τηγμένο μέταλλο σε υψικάμινο, παλαιοσίδηρο και συλλιπάσματα. Ένα ακροφύσιο εισέρχεται στον κλίβανο και εισάγει οξυγόνο υψηλής

πίεσης. Το οξυγόνο αυτό αντιδράει και δεσμεύει τις προσμίξεις και έτσι απομακρύνονται από τον καθαρό χάλυβα. Οι προσμίξεις περιλαμβάνουν αέριο μονοξείδιο του άνθρακα και οξείδια του πυριτίου, μαγγανίου, φωσφόρου και σιδήρου σε υγρή μορφή, τα οποία μαζί με την άσβεστο και τη δολομιτική άσβεστο σχηματίζουν τη σκωρία. Στην συνέχεια ο χάλυβας και η σκωρία διαχωρίζονται.

Η BOFS είναι ένα πορώδες υλικό, ενώ η φαινόμενη πυκνότητα της κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 3,3-3,4 g/cm³. Η χημική σύσταση της σκωρίας BOFS μπορεί να διαφέρει σημαντικά ανάλογα με την προέλευσή και την διαδικασία παραγωγής της. Ωστόσο, τα κύρια συστατικά της είναι τα CaO (29,7 - 52,6%), SiO₂ (10,74 - 19,9%), οξείδια του σιδήρου (16,2 - 32%), Al₂O₃ (0,98 - 9,84%), MgO (0,82 - 11,2%), καθώς και ελεύθερο CaO (1,7 - 12,2%) και ίχνη ελεύθερου MgO [1]. Εξαιτίας της παρουσίας οξειδίων όπως είναι τα CaO, SiO₂, Al₂O₃ και Fe₂O₃ σχηματίζονται ενώσεις όπως οι C₂S, C₃S, C₄AF και C₂F, οι οποίες έχουν την ικανότητα να υποστούν ενυδάτωση. Οι ενώσεις αυτές είναι καθοριστικές για την ανάπτυξη τσιμεντοειδών χαρακτηριστικών όταν η σκωρία χρησιμοποιείται σε λεπτόκοκκη μορφή και την καθιστούν κατάλληλη ως πρόσθετο στο σκυρόδεμα. Συμβάλλουν επίσης στη βελτίωση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος όταν η σκωρία χρησιμοποιείται ως αδρανές [1].

Η παρουσία ελεύθερου CaO (f-CaO) προέρχεται κυρίως από τις πρώτες ύλες που συμπεριλαμβάνει ο υπολειπόμενος ελεύθερος ασβέστης και από τον ασβέστη που καταβυθίζεται στη σκωρία. Η κατάλληλη ποσότητα f-CaO ενισχύει την αλκαλικότητα. Ωστόσο, μια υπερβολική ποσότητα f-CaO θα μπορούσε να οδηγήσει σε ζητήματα όπως την υπερβολική παραγωγή θερμότητας και τις απότομες μεταβολές όγκου, οδηγώντας σε σημαντικά προβλήματα αστάθειας όγκου όταν χρησιμοποιείται στην παραγωγή σκυροδέματος ή κονιάματος. Επιπλέον, τα οξείδια του διαστέλλονται όταν έρχονται σε επαφή με το νερό, γεγονός που επίσης επηρεάζει σημαντικά τη σταθερότητα όγκου του σκυροδέματος ή κονιάματος [1].

2.2.2 EAF (σκωρία κλίβανου φωτοβολταϊκού τόξου)

Από την άλλη πλευρά, η διαδικασία EAF χρησιμοποιεί ηλεκτροκλιβάνους υψηλής ισχύος. Η σκωρία κλίβανου φωτοβολταϊκού τόξου (EAF) είναι και αυτή που θα μελετηθεί και χρησιμοποιηθεί στην πειραματική διαδικασία. Στους κλιβάνους, όπου η θερμοκρασία φτάνει μέχρι και τους 1800°C, εισέρχονται τηγμένο μέταλλο, παλαιοσίδηρος και συλλιπάσματα που αποτελούνται από άσβεστο (CaO) και δολομιτική άσβεστο (CaO.MgO). Με αυτή την διαδικασία η σκωρία έρχεται στην επιφάνεια του τηγμένου μίγματος και απομακρύνεται από αυτό.

Υπό κανονικές συνθήκες, παρόμοια με την BOFS, η EAFS παρουσιάζει και αυτή πορώδη μορφή και σε αυτήν υπάρχουν αξιοσημείωτες διαφορές στις ιδιότητες της ανάλογα την πηγή και τις παρτίδες παραγωγής. Η φαινόμενη πυκνότητα της EAFS

κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 3,4 - 3,5 g/cm³, η οποία είναι λίγο υψηλότερη από εκείνη της BOFS. Το πορώδες της EAFS συγκεντρώνεται μεταξύ 0,5 - 1,5%, λίγο μικρότερο από εκείνον του BOFS. Η διαφορά στο πορώδες θα μπορούσε να αποδοθεί στην ελαφρώς υψηλότερη πυκνότητα της.

Σε σύγκριση με τη BOFS, η EAFS παρουσιάζει μεγαλύτερη μεταβλητότητα στη χημική της σύνθεση. Τα κύρια συστατικά και τα αντίστοιχα ποσοστά που περιλαμβάνει είναι CaO (29,11-53,98%), SiO₂ (14,1-18,42%), οξείδια του σιδήρου (18-29,92%), Al₂O₃ (1,05-7,4%), MgO (2,91-10,48%), όπως καθώς και f-CaO (0,45-5,45%) και f-MgO (1%) ως ελεύθερα συστατικά [1].

Σε γενικές γραμμές, η EAFS παρουσιάζει ελαφρώς χαμηλότερη περιεκτικότητα σε CaO αλλά υψηλότερη περιεκτικότητα σε SiO₂ και σε οξείδια του σιδήρου σε σχέση με τη BOFS. Οι διαφορές αυτές στη χημική σύνθεση μπορούν να αποδοθούν στη χρήση διαφορετικών διαδικασιών στις βιομηχανίες χαλυβουργίας. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι διαφορές μεταξύ των δύο τύπων σκωρίας είναι σχετικά μικρές.

Η παρουσία του f-CaO μπορεί να προκαλέσει σημαντικά ζητήματα σχετικά με τη σταθερότητα του όγκου στο κονίαμα ή στο σκυρόδεμα. Κατά συνέπεια, πριν από τη χρήση τους σε δομικά υλικά, τόσο το BOF όσο και το EAF υποβάλλονται σε διεξοδική επεξεργασία (όπως η γήρανση) ώστε να μειωθεί σημαντικά η περιεκτικότητα σε f-CaO εντός της σύνθεσης. Αυτό εξασφαλίζει ότι το συστατικό f-CaO διατηρείται σε συγκρίσιμο επίπεδο μεταξύ EAF και BOF. [1]

2.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και οφέλη αξιοποίησης της σκωρίας χαλυβουργίας

Η απόρριψη και η μη αξιοποίηση της σκωρίας χαλυβουργίας μπορεί να προκαλέσει σημαντικές περιβαλλοντικές προκλήσεις και κατά επέκταση οικονομικές. Η ανάγκη για την αξιοποίηση της προκύπτει κυρίως λόγω περιβαλλοντικών ζητημάτων και όχι τόσο για την εμπορική της αξία, αφού η αξία της κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα. Η συσσώρευση της σκωρίας μπορεί να προκαλέσει περιβαλλοντικά ζητήματα, όπως την έκπλυση βαρέων μετάλλων, την ατμοσφαιρική ρύπανση και την κάλυψη πολύτιμης γης με την δημιουργία υγειονομικών ταφών και χωματερών. Σε αναπτυγμένες χώρες το ποσοστό χρησιμοποίησης της σκωρίας μπορεί και αγγίζει το 100% όμως σε χώρες όχι τόσο ανεπτυγμένες το ποσοστό αυτό κυμαίνεται από 20% έως 30%. Δεδομένης της μεγάλης ποσότητας SS που παράγεται κάθε χρόνο, θα μπορούσε να καλύπτει τη ζήτηση πρώτης ύλης σε διάφορες βιομηχανικές διεργασίες αλλά και σε κατασκευές, ως εναλλακτικό υλικό. Ωστόσο, απαιτείται αρκετή εξέλιξη έτσι ώστε η κατανάλωσή της να πλησιάσει τον παραγόμενο όγκο. Κατά συνέπεια, δίνεται ολοένα και μεγαλύτερη έμφαση στη διερεύνηση νέων προσεγγίσεων για την αξιοποίηση και στη διενέργεια

αναλύσεων σκοπιμότητας και οφέλους της σκωρίας αυτής, γεγονός που έχει καταστεί σημαντικό επίκεντρο στην έρευνα. [5]

3. Εφαρμογές σκωρίας

3.1 Ιστορική αναδρομή χρήσης της σκωρίας

Η διερεύνηση για την αξιοποίηση των βιομηχανικών παραπροϊόντων έχει τις ρίζες της από την έναρξη της βιομηχανικής παραγωγής υλικών στις αρχές του 20ου αιώνα. Στις πρώτες μελέτες που εξέτασαν την χρήση της σκωρίας υψικαμίνων ή χαλυβουργίας περιλαμβάνεται η έρευνα του Croxton το 1910, του Thompson το 1917 και του Freeman το 1918. Σε αυτές τις μελέτες, η σκωρία ερευνήθηκε ως αδρανές υλικό για σκυρόδεμα και για την κατασκευή ασύνδετων βάσεων για σιδηροτροχιές. Στην εργασία των Emery και συνεργατών του το 1973, η σκωρία χαλυβουργίας εξετάστηκε ως υλικό για την κατασκευή ασφαλικών μιγμάτων οδοστρωσίας. Η μεταγενέστερη έρευνα διαχώρισε τις ιδιότητες των σκωριών υψικαμίνου από εκείνες των σκωριών ηλεκτροκλιβάνου και βασικού οξυγόνου, λόγω των διαφορών στις φυσιοχημικές ιδιότητες που προκύπτουν από τη διαδικασία παραγωγής. Τα αδρανή από σκωρία υψικαμίνων διαθέτουν σχετικά υψηλή φαινόμενη πυκνότητα (2700 kg/m^3) και παρουσιάζουν καλές ιδιότητες όσον αφορά τη σταθερότητα όγκου, καθώς και την αντοχή σε κρούση και απότριψη. [10]

3.2 Τρέχουσες εφαρμογές σκωρίας χαλυβουργίας και σκωρίας υψικαμίνων

Κάποιες από τις εφαρμογές που βρίσκει η σκωρία χαλυβουργίας είναι [5]:

- στην γεωργία ως λίπασμα καθώς αναβαθμίζει την ποιότητα του εδάφους για την παραγωγή των καλλιεργειών
- στην σταθεροποίηση του εδάφους για την ανέγερση τεχνικών έργων
- σε φίλτρα διαχείρισης υδατικών λυμάτων αφού έχει την δυνατότητα να απομακρύνει ανεπιθύμητα στοιχεία λόγω της πορώδους δομής και της υψηλής πυκνότητας της
- στην βελτίωση καυσίμων, χρησιμοποιείται στους καταλύτες επειδή έχει υψηλή περιεκτικότητα σε οξείδια των μετάλλων
- στην δέσμευση CO_2 λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς της σε ασβέστιο και μαγνήσιο
- ως αδρανές σε έργα οδοποιίας (βάσεις, υποβάσεις, επιφανειακά στρώματα), σε σκυροδέματα και σε κονιάματα λόγω των ικανοποιητικών μηχανικών χαρακτηριστικών της

Κάποιες από τις εφαρμογές που βρίσκει η σκωρία υψικαμίνων είναι [10]:

- ως υποκατάστατο του τσιμέντου Portland σε σκυροδέματα
- ως συμπλήρωμα του τσιμέντου Portland σε σκυροδέματα
- στην κατασκευή δομικών υλικών, όπως σε τούβλα
- στην παραγωγή υλικών που ενεργοποιούνται με αλκάλια (AAM)
- στην παραγωγή τσιμέντων blended- type

3.3 Χρήση βιομηχανικών αποβλήτων στο σκυρόδεμα και στα κονιάματα

Έχουν διεξαχθεί εκτεταμένες μελέτες που διερευνούν την δυνατότητα χρήσης βιομηχανικών αποβλήτων για την αντικατάσταση του τσιμέντου Portland στο σκυρόδεμα. [2, 7, 8, 9]. Οι έρευνες έχουν ως κατευθυντήριο δύναμη την υψηλή ζήτηση για τσιμέντο Portland, την παγκόσμια παραγωγή σκυροδέματος και την αυξανόμενη ανάγκη για την αποτροπή εξάντλησης των φυσικών πόρων. Δεν είναι λίγες οι μελέτες που συνεχίζουν να δημοσιεύονται για την αξιολόγηση των δυνατοτήτων της SS ως συμπληρωματική κονία και ως αδρανές σε κονιάματα και σκυροδέματα με βάση το τσιμέντο Portland. Η SS πρέπει να διαθέτει επαρκή ογκομετρική σταθερότητα για να χρησιμοποιηθεί ως κονία [7, 8, 9] το οποίο αποτελεί βασικό εμπόδιο στην αξιοποίησή της μέχρι σήμερα. Η παρουσία ελεύθερου ασβέστη ($f\text{-CaO}$) και μαγνησίου (ελεύθερο MgO) είναι ο κύριος παράγοντας που συμβάλλει στην ογκομετρική του διαστολή. Το ελεύθερο μη ενυδατωμένο CaO και MgO αντιδρούν με το νερό σχηματίζοντας έτσι υδροξείδια τα οποία αυξάνεται ο όγκος τους. Η αύξηση που παρατηρείται είναι ανάλογη με την περιεκτικότητά σε CaO και MgO . Η αντίδραση αυτή μπορεί να προκαλέσει αποσύνθεση και απώλεια αντοχής. Διάφορες μέθοδοι επεξεργασίας όπως η ταχεία ψύξη, η προσθήκη άμμου, η θραύση και η διαλογή, η ψύξη με αέρα, η εξαγωγή μετάλλων, η σκλήρυνση με νερό, μεταξύ άλλων, έχουν αναπτυχθεί για να διασφαλιστεί η κατάλληλη σύσταση της SS σε κονίαμα ή σκυρόδεμα [5].

3.3.1 Χρήση των υποπροϊόντων ως αδρανή στο σκυρόδεμα

Αρκετά βιομηχανικά υποπροϊόντα μπορούν να αξιοποιηθούν ως αδρανή υλικά στις κατασκευές. Σε αυτά συγκαταλέγονται οι σκωρίες, οι ιπτάμενες τέφρες, τα παραπροϊόντα εξόρυξης μετάλλων, τα υπολείμματα αποτέφρωσης αποβλήτων, η ερυθρά ιλύς και τα στείρα των λατομείων. Με βάση μια μελέτη του Emery το 1984 και μία του National Research Council του Καναδά το 1981, τα υλικά με μεγαλύτερη προοπτική είναι οι σκωρίες και η ιπτάμενη τέφρα, λόγω της σταθερότητας όγκου, της αντοχής, της κοκκομετρίας και της ανθεκτικότητάς τους. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα αυτών των υλικών είναι ότι παράγονται σε έναν περιορισμένο αριθμό βιομηχανικών

μονάδων, γεγονός που διευκολύνει τη συλλογή, τον έλεγχο και την επίτευξη σταθερής ποιότητας στο παραγόμενο υλικό [10].

Οι σκωρίες ηλεκτροκλιβάνου (EAF slags), βασικού οξυγόνου (BOF slags), όπως και οι σκωρίες υψικαμίνου, όταν ψύχονται με αργό ρυθμό, παράγουν προϊόντα με ποικίλη κοκκομετρία (κόκκοι από 0 έως 50 mm ή και μεγαλύτεροι), υψηλή σκληρότητα και υψηλό ειδικό βάρος. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν τις σκωρίες κατάλληλες για χρήση στον κατασκευαστικό τομέα ως αδρανή υλικά, καθώς μπορούν να ανταγωνιστούν τα παραδοσιακά αδρανή τόσο στο κόστος όσο και στις μηχανικές ιδιότητες. Επιπλέον, η ενσωμάτωση αυτών των σκωριών στις κατασκευές μπορεί να απορροφήσει σημαντικό μέρος των παραγόμενων παραπροϊόντων, μεγιστοποιώντας έτσι το οικονομικό και περιβαλλοντικό όφελος [10].

Η χρήση της SS ως αδρανές στο σκυρόδεμα με βάση το τσιμέντο Portland δεν συνίσταται μετά από τις αστοχίες που παρατηρήθηκαν σε ένα κτίριο στον Καναδά στις αρχές της δεκαετίας του 1960. Ωστόσο, μετά από εκτεταμένη έρευνα, οι Ιάπωνες κατοχύρωσαν με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας τη χρήση της SS ως υποκατάστατο φυσικών αδρανών στο σκυρόδεμα με βάση το τσιμέντο Portland (JAPANESE PATENT, 1982a; 1982b). Έκτοτε, πολλές μελέτες διεθνώς έχουν αναδείξει τις δυνατότητες και τα οφέλη της χρήσης της SS στην βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων και της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος. [19-29] Η κύρια ανησυχία σχετικά με την χρήση της SS σε κονιάματα και σκυροδέματα με βάση το τσιμέντο Portland αφορά την αστάθεια όγκου που προκαλείται από το ελεύθερο CaO και MgO. Έτσι, είναι απαραίτητη η επεξεργασία της SS για να εξασφαλιστεί η σταθερότητα όγκου της πριν από τη χρήση. Ο Rehman και οι συνεργάτες του μελέτησαν την επίδραση της κοκκώδους SS ως αντικατάστατο λεπτόκοκκου αδρανούς (σε ποσοστά 40, 60 και 80 % κ.β.) στις φυσικές ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος (εργασιμότητα, πυκνότητα και πορώδες) και στις μηχανικές ιδιότητες (αντοχή σε θλίψη, κάμψη, εφελκυσμό και μέτρο ελαστικότητας). Στη μελέτη αυτή, διαπιστώθηκε μια τάση μείωσης της εργασιμότητας με την αύξηση της περιεκτικότητας σε SS, η οποία αποδίδεται στην πορώδη και τραχιά υφή της SS. Όλες οι μηχανικές αντοχές και το μέτρο ελαστικότητας βελτιώθηκαν λόγω της ποζολανικής αντίδρασης των αδρανών SS και της μεγαλύτερης σκληρότητάς τους.

Μια άλλη μελέτη που επικεντρώθηκε στην επίδραση της SS ως λεπτόκοκκο αδρανές στο σκυρόδεμα υπό αξονική συμπίεση κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η προσθήκη SS βελτιώνει την στατική και δυναμική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, αυξάνοντας τη δυσκαμψία και τη ευθραυστότητα με βέλτιστο ποσοστό αντικατάστασης 20% των φυσικών αδρανών.

Παρόμοια αποτελέσματα ανέφεραν οι Guo et al. [34], οι Campos et al. [31] με την καλύτερη απόδοση να επιτυγχάνεται με 20% αντικατάσταση του λεπτόκοκκου αδρανούς από SS. Επίσης τόνισαν ότι υψηλότερες περιεκτικότητες σε SS μειώνουν τη μηχανική απόδοση του σκυροδέματος. Το ίδιο βέλτιστο ποσοστό SS (20%) διαπιστώθηκε και από τους Chen et al [32]. Οι Li et al. [36] με ίδια χρήση της σκωρίας

διαπίστωσαν ότι η διατμητική αντοχή αρχικά αυξάνεται και στη συνέχεια μειώνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό περιεκτικότητας σε SS, με τη βέλτιστη τιμή να επιτυγχάνεται για ποσοστό 40% SS.

Οι Guo et al. [33] αξιολόγησαν την επιρροή μη επεξεργασμένης SS ως λεπτόκοκκο αδρανές (σε ποσοστά 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100% κ.β.) σε σκυροδέματα υψηλής και μέσης αντοχής. Διαπίστωσαν ότι η SS βελτιώνει την ανθεκτικότητα και τον λόγο τελικής διαστολής, αυξάνοντας την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση της SS ήταν αποτελεσματικότερη για την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος μέσης αντοχής (20 και 80% ποσοστό αντικατάστασης) ωστόσο έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην βελτίωση της σκληρότητας του σκυροδέματος υψηλής αντοχής (30% ποσοστό αντικατάστασης).

Τα βιβλιογραφικά αποτελέσματα δείχνουν μεγαλύτερη συμφωνία όταν η SS χρησιμοποιείται ως χονδρόκοκκο αδρανές. Ο Qasrawi [38] σε ένα αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα αντικατέστησε το 50% κ.β. του χονδρόκοκκου αδρανούς με SS και διαπίστωσε ότι σε θερμές συνθήκες δεν έχει καλή συμπεριφορά ως προς την σταθερότητα όγκου, ενώ η υψηλότερη ποσότητα SS μειώνει την εργασιμότητα και τη σταθερότητα όγκου. Η χρήση της SS αυξάνει πορώδες και τη πυκνότητα του νωπού σκυροδέματος.

Οι Saxena και Tembhurkar [41] διαπίστωσαν και αυτοί ότι το 50% κ.β. είναι η βέλτιστη περιεκτικότητα σε SS ως αντικατάσταση των χονδρόκοκκων αδρανών. Παρατήρησαν βελτίωση της θλιπτικής αντοχής κατά 33%, της αντοχής σε κάμψη κατά 9,8% και του μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος κατά 22%. Η μικροδομή ήταν πυκνή και η ανθεκτικότητα βελτιωμένη, με μειωμένη διείσδυση των χλωριόντων από 40 έως 70%. Οι συγγραφείς παρατήρησαν επίσης μειώσεις στη συνεκτικότητα (κάθιση σκυροδέματος) και στη νωπή πυκνότητα, λόγω του υψηλότερου πορώδους.

Οι Baalamurugan et al. [30] κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το 50% κ.β. SS ως χονδρόκοκκο αδρανές υλικό με διάμετρο 10-12,5 mm είναι μια εναλλακτική λύση για τη θωράκιση από την ακτινοβολία γάμμα στην πυρηνική βιομηχανία για χώρους αποθήκευσης καυσίμων και θερμούς θαλάμους. Πέρα από καλύτερη απόδοση θωράκισης, το σκυρόδεμα που περιείχε SS, παρουσίασε υψηλότερη πυκνότητα και υψηλότερη αντοχή σε θλίψη.

Οι Roychand et al. [40] ανακύκλωσαν την SS που είχε χρησιμοποιηθεί ήδη για την επεξεργασία νερού (στην απομάκρυνση του φωσφόρου). Πιο συγκεκριμένα την χρησιμοποίησαν ως χονδρόκοκκο αδρανές (5-10 mm) στο σκυρόδεμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η διαδικασία επεξεργασίας νερού μετέβαλλε σημαντικά τη χημική και ορυκτολογική σύνθεση της σκωρίας. Οι αλλαγές αυτές έχουν ως αποτέλεσμα την καλύτερη συνοχή μεταξύ του τσιμεντοκονιάματος με των αδρανών και την βελτίωση της θλιπτικής αντοχής κατά 17% στις 28 ημέρες.

Οι Rooholamini et al. [39] προεπεξεργάστηκαν την SS με την έκθεση της σε περιβαλλοντικές συνθήκες για περισσότερο από ένα έτος έτσι ώστε να μειωθεί η διαστολή της. Στην συνέχεια, αξιολόγησαν την επίδραση της SS ως λεπτόκοκκο και ως χονδρόκοκκο αδρανές στις μηχανικές ιδιότητες και στις ιδιότητες θραύσης σε ένα συμπυκνωμένο με κύλινδρο σκυρόδεμα. Η αντικατάσταση ήταν 25 και 50% κ.β. για το λεπτόκοκκο φυσικό αδρανές ενώ 50 και 100% κ.β. για το χονδρόκοκκο φυσικό αδρανές. Η αντικατάσταση των λεπτών αδρανών παρουσίασε αρνητική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες και στη συμπεριφορά διαστολής, πιθανώς λόγω της υψηλής ειδικής επιφάνειας και της παρουσίας ελεύθερου CaO. Από την άλλη πλευρά, η χονδρόκοκκη SS αύξησε τη στήριξη των κόκκων μεταξύ τους, καθώς και την πρόσφυση με το κονίαμα κυρίως λόγω της υψηλής πολυγωνικότητας και τραχύτητάς τους, αναβαθμίζοντας τις μηχανικές ιδιότητες και τις ιδιότητες θραύσης.

Οι Prasad et al. [37] εντόπισαν και αυτοί καλύτερη σύνδεση μεταξύ των χονδρόκοκκων αδρανών και το κονίαμα, που σημαίνει αυξημένες μηχανικές ιδιότητες. Η μελέτη χρησιμοποίησε την SS ως υποκατάστατο των φυσικών αδρανών (λεπτόκοκκη SS < 4,75 mm και χονδρόκοκκη SS < 20 mm και τα δύο σε 20, 40, 60, 80, 100% κ.β.). Η καλύτερη θλιπτική αντοχή παρατηρήθηκε με 20% λεπτή και 80% χονδρόκοκκη SS, η καλύτερη συμπεριφορά σε κάμψη με 60% λεπτή και 80% χονδρόκοκκη SS και σε 40% και των δύο SS για συμπεριφορά σε διάσπαση σε εφελκυσμό. Επίσης σε όλες τις περιπτώσεις, παρατηρήθηκε μείωση της εργασιμότητας λόγω της πορώδους μορφής της SS.

Ένα διαπερατό σκυρόδεμα που περιέχει τσιμέντο με φωσφορικό μαγνήσιο και SS διερευνήθηκε από τους Lang et al. [35]. Μελέτησαν την επίδραση του μεγέθους των αδρανών (2,5-5 mm, 5-10 mm και 10-15 mm) στο καλούπωμα. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το πορώδες και η υδατοπερατότητα αυξάνονται με την χρήση πιο χονδροειδών αδρανών. Οι συγγραφείς επεσήμαναν επίσης ότι η περίπτωση που εμπειριείχε μεσαίο μέγεθος κόκκων (5-10 mm) παρείχε τις βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες (αντοχή σε θλίψη 41 MPa και αντοχή σε κάμψη 8 MPa) όταν χρησιμοποιήθηκε η δόνηση κατά τη διαδικασία έγχυσης στα καλούπια. [5]

3.3.2 Χρήση των υποπροϊόντων ως συνδετική κονία και στην αντικατάσταση του τσιμέντου Portland

Η χρήση των βιομηχανικών υποπροϊόντων ως συνδετικών κονιών παρουσιάζει περισσότερα πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες χρήσεις, λόγω του υψηλού κόστους του τσιμέντου και τεχνικό-περιβαλλοντικών οφελών. Τα σπουδαιότερα βιομηχανικά υποπροϊόντα με αυτή τη χρήση είναι η κοκκοποιημένη σκωρία υψικαμίνων, η ιπτάμενη τέφρα και η πυριτική παιπάλη. Ωστόσο τον τελευταίο καιρό αποδίδεται ιδιαίτερη βαρύτητα στην έρευνα για την χρήση της σκωρίας χαλυβουργίας.

Αρχικά, διαχωρίζονται τα χονδρόκοκκα κλάσματα της σκωρίας που χρησιμοποιούνται ως αδρανή υλικά ενώ η λεπτόκοκκη σκωρία συλλέγεται ξεχωριστά. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει άμεση αγορά για την λεπτόκοκκη σκωρία, ως επί το πλείστον καταλήγουν σε χωματερές. Για αυτό και τα τελευταία χρόνια έχει οξυνθεί το ενδιαφέρον για την αξιοποίηση της λεπτόκοκκης σκωρίας.

Οι διαφορές στη χημική σύνθεση μεταξύ της σκόνης σκωρίας χαλυβουργίας (SSP) και του κοινού τσιμέντου Portland οφείλονται κυρίως στην υψηλότερη περιεκτικότητα της SSP σε οξείδιο του σιδήρου και σε μικρή ποσότητα f-CaO και f-MgO. Με βάση την ανάλυση ακτίνων X με ενεργειακή διασπορά (EDX), η SSP περιέχει ενώσεις όπως C_2S , C_3S και C_4AF , υποδεικνύοντας την εγγενή κατοχή ορισμένων τσιμεντοειδών ιδιοτήτων, όμοιες με το συνηθισμένο τσιμέντο Portland. Κατά συνέπεια, η SSP μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συμπληρωματικό τσιμεντοειδές υλικό στην παραγωγή κονιάματος και σκυροδέματος [6]. Έχει παρατηρηθεί ότι η ενσωμάτωση SSP ως συμπληρωματικό τσιμεντοειδές υλικό, υπό συγκεκριμένες συνθήκες, μπορεί να βελτιώσει τη μικροδομή, τη μηχανική αντοχή και τις ιδιότητες ανθεκτικότητας του κονιάματος ή του σκυροδέματος. Ωστόσο, η ενσωμάτωση της SSP ως συμπληρωματικό τσιμεντοειδές υλικό οδηγεί συχνά σε καθυστερημένη πήξη, μειωμένη πρώιμη αντοχή και ορισμένα ζητήματα σταθερότητας όγκου. Ως εκ τούτου, για να ξεπεραστούν αυτές οι εγγενείς προκλήσεις και να επιτευχθούν βελτιωμένα αποτελέσματα εφαρμογής, συνιστάται συνήθως ο συνδυασμός της SSP με άλλα συμπληρωματικά τσιμεντοειδή υλικά.

Για την χρήση της σκωρίας χαλυβουργίας ως πρόσθετο ή για την αντικατάσταση του τσιμέντου η ειδική της επιφάνεια θα πρέπει να είναι αν όχι μεγαλύτερη, κοντά σε αυτή του τσιμέντου. Ειδικότερα στα κονιάματα και στα τσιμέντα με μικρή ποσότητα σκωρίας είναι εύκολο να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις των σχετικών προτύπων. Η αντικατάσταση του τσιμέντου με σκωρία ελαττώνει την πρώιμη αντοχή του, όποτε η μεγάλη περιεκτικότητα σε σκωρία δεν είναι εύκολο να αποκτήσει τις επιθυμητές πρώιμες αντοχές. [1]

3.3.3 Χρήση των υποπροϊόντων στην παραγωγή τσιμέντων blended- type

Μια άλλη χρήση των βιομηχανικών υποπροϊόντων ως συνδετικές κονίες είναι για την παραγωγή blended- type τσιμέντων με την συνάλεση στο κλίνκερ. Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή εδώ και αρκετές δεκαετίες και παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα, όπως καλύτερο ποιοτικό έλεγχο των συστατικών κονιών και μικρότερη διακύμανση των ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος, αλλά περιορίζει και την ελευθερία στη χρησιμοποίηση διάφορων αναλογιών των κονιών για την προσαρμογή στις ανάγκες κάθε έργου. Η ποσότητα και το είδος των παραγόμενων τσιμέντων blended- type ποικίλει σε κάθε χώρα. Ο ευρωπαϊκός κανονισμός τσιμέντων EN 197-1 προδιαγράφει 27 διαφορετικούς τύπους τσιμέντων ανάλογα με τις κονίες που χρησιμοποιούνται για συνάλεση με κλίνκερ Portland. [10]

Στην Ελλάδα από τη δεκαετία του 1980 είναι διαδεδομένη η χρήση του τσιμέντου τύπου CEM IV/ B (P- W) 32,5 N, που παράγεται με τη συνάλεση κλίνκερ, φυσικής ποζολάνης, ιπτάμενης τέφρας και γύψου.

Και η σκωρία χαλυβουργίας μπορεί να ενσωματωθεί στην παραγωγή τσιμέντου με δύο διαφορετικούς τρόπους. Πρώτον, ως πρώτη ύλη για το κλίνκερ τσιμέντου (μερική υποκατάσταση του ασβεστόλιθου), όταν θερμαίνεται στον κλίβανο μαζί με άλλα φυσικά υλικά. Μελέτες έχουν δείξει ότι μέχρι 10% BOF SS, μέχρι 14% SS κάδου και μέχρι 30% BOF SS δεν προκαλούν καμία αρνητική επίδραση στις ιδιότητες του τσιμέντου. Το SS χρησιμοποιείται επίσης μετά την επεξεργασία της που περιλαμβάνει την άλεση SS με σκωρία υψικαμίνου BFS και κλίνκερ για την παραγωγή τσιμέντου. Λόγω της δυνατότητας εξοικονόμησης ενέργειας, η τελευταία προσέγγιση προτιμάται. Οι προσθήκες SS κυμαίνονται συνήθως από 10 έως 55 % κ.β., ανάλογα με τη χημική και ορυκτολογική σύσταση των SS. Ειδικό τσιμέντο SS, αποτελούμενο από SS, BFS και PC, κυκλοφορεί στο εμπόριο στην Κίνα εδώ και πάνω από 30 χρόνια. [5]

Σύμφωνα με τους Shi & Qian [42] η συνάλεση σκωρίας χαλυβουργίας για την παραγωγή σκωριοτσιμέντων έδειξε ότι δίνουν αδύναμο κλίνκερ τσιμέντου, λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε πυριτικό τριασβέστιο.

Στην Ελλάδα σύμφωνα με τους Tsakiridis et. al. [43] πραγματοποιήθηκε η συνάλεση σκωρίας ηλεκτροκλιβάνου για την παραγωγή αντίστοιχων τσιμέντων. Το συγκεκριμένο τσιμέντο εμφανίζει αυξημένο χρόνο πήξης και χαμηλότερη αντοχή όμως μπορεί να βρεί εφαρμογή σε έργα μεγάλου όγκου και χαμηλών απαιτήσεων λόγω του χαμηλού κόστους και της χαμηλότερης θερμότητας ενυδάτωσης. [10]

Επιπρόσθετα σύμφωνα με τους Qing et al., [44], έχουν γίνει προσπάθειες για την αξιοποίηση της πιθανής διόγκωσης τσιμέντου που γίνεται λόγω της παρουσίας ελεύθερου MgO που περιέχει η σκωρία χαλυβουργίας. Γίνεται η παραγωγή ελαφρώς διογκωμένου σκωριοτσιμέντου χαμηλής θερμότητας ενυδάτωσης, με σκοπό την αντιμετώπιση της συστολής ξήρανσης κατασκευών μεγάλου όγκου από σκυρόδεμα. Έχει γίνει και έρευνα για την ταυτόχρονη συνάλεση σκωριών χαλυβουργίας και ιπτάμενης τέφρας ως μέρους του κλίνκερ τσιμέντου για την επίτευξη καλύτερων τελικών ιδιοτήτων. [10]

3.3.4 Χρήση αδρανών σκωρίας σε ασφαλτικά έργα και έργα οδοποιίας

Ο Emery το 1975 [45] έκανε την πρόβλεψη ότι η πιθανότερη εφαρμογή των αδρανών σκωρίας χαλυβουργίας θα ήταν σε ασφαλτικά έργα, λόγω του μεγάλου ειδικού βάρους και των εξαιρετικών αντιστοιχισμένων ιδιοτήτων τους. Η πρόβλεψη του επιβεβαιώθηκε αφού η κύρια χρήση των αδρανών σκωρίας είναι για την κατασκευή βάσεων και υποβάσεων οδοστρωμάτων, καθώς και στρώσεων κυκλοφορίας ασφαλτικών σκυροδεμάτων. Οι Huang et al, [46] κατέληξαν στο ότι τα αδρανή σκωρίας πρέπει να αντικαθιστούν τα χονδρόκοκκα θραυστά αδρανή στις στρώσεις κυκλοφορίας

οδοστρωμάτων, ώστε να γίνει καλύτερη εκμετάλλευση της μηχανικής αντοχής και αντιολισθηρότητάς τους.

Η Εταιρεία Έρευνας Σκωρίας Σιδήρου και Χάλυβα (FEhS) της Γερμανίας προτείνει την χρήση του υλικού για την κατασκευή ασφαλτομιγμάτων και βάσεων σιδηροδρομικών γραμμών [47]. Οι έρευνες απέδειξαν ότι η σκωρία βασικού οξυγόνου (BOF) εμφανίζει καλύτερη συμπεριφορά ως προς την παραλαβή φορτίων και την αντιολισθηρότητα σε σχέση με ασφαλικά μίγματα κατασκευασμένα με τα συνηθισμένα αδρανή.

Τα προβλήματα που μπορούν να δημιουργηθούν με τη χρήση του υλικού αυτού είναι της μεταβολής του όγκου ή της απορροής ανεπιθύμητων υλικών στο περιβάλλον [48].

Στην Ελλάδα η σκωρία χαλυβουργίας χρησιμοποιείται στην αντιολισθηρή στρώση ασφαλικών μιγμάτων από τους Μουρατίδης & Κεχαγιά και στη κατασκευή βάσεων οδοστρώσας από τον Νικολαΐδης, το 1996. [10]

4. Μηχανισμοί, συμπεριφορά και ιδιότητες της σκωρίας χαλυβουργίας σε κονίες

Η χρήση της σκωρίας σε μείγματα σκυροδέματος και κονιάματος ως αντικατάσταση του τσιμέντου Portland ή και των αδρανών είναι μια διαδεδομένη πρακτική με πολλά οφέλη τόσο οικονομικά όσο και περιβαλλοντικά. Αυτή η πρακτική συμβάλλει στη μείωση κατανάλωσης τσιμέντου ή αδρανών, τα οποία είναι υλικά που απαιτούν υψηλή δαπάνη πόρων και ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο οι κατασκευαστικές διαδικασίες γίνονται πιο βιώσιμες, παρέχοντας ταυτόχρονα μείωση του αποτυπώματος άνθρακα. Ωστόσο, είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη οι προδιαγραφές και οι απαιτήσεις του έργου κάθε φορά, καθώς και οι επιπτώσεις της χρήσης παραπροϊόντων στις μηχανικές ιδιότητες και την αντοχή του σκυροδέματος. Επίσης, πρέπει να γίνεται προσεκτική διαχείριση των παραμέτρων δοσολογίας και μίξης για να εξασφαλίζεται η επίτευξη των επιθυμητών χαρακτηριστικών του τελικού προϊόντος. Ενώ η χρήση της σκωρίας χαλυβουργίας είναι διαδεδομένη, η έλλειψη μελετών για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών, των ιδιοτήτων και της αξιολόγησης του κύκλου ζωής των κατασκευών στις οποίες χρησιμοποιείται αποδεικνύει την επιτακτική ανάγκη για περαιτέρω έρευνα.

4.1 Μικροδομή ενυδατωμένων προϊόντων της σύνθετης συνδετικής κονίας τσιμέντου- σκωρίας χαλυβουργίας

Σε μια έρευνα των Wang et al. [6] διερευνάται η σύνθεση κονιαμάτων που χρησιμοποιούν ως κονία άλλα το τσιμέντο, άλλα την σκωρία χαλυβουργίας και ένα σύνθετο υλικό που αποτελείται από σκωρία χαλυβουργίας και τσιμέντο. Στην μελέτη, αναλύθηκε η επίδραση της σκωρίας χαλυβουργίας στις ιδιότητες ενυδάτωσης του τσιμέντου μέσα σε ένα σύνθετο συνδετικό υλικό τσιμέντου-σκωρίας. Στόχος ήταν να κατανοηθεί πώς η σκωρία χαλυβουργίας επηρεάζει τη συμπεριφορά ενυδάτωσης του τσιμέντου και να προσδιοριστούν οι συνολικές ιδιότητες ενυδάτωσης του σύνθετου συνδετικού υλικού. Από την ανάλυση των ερευνητών, φαίνεται ότι η σκωρία χαλυβουργίας αποτελείται από τσιμεντοειδείς φάσεις (C_2S , C_3S , $C_{12}A$ και $Ca_2Al_2SiO_{12}$) και αδρανείς φάσεις (φάση RO , FeO_{34} και C_2F). Οι τσιμεντοειδείς φάσεις της σκωρίας χαλυβουργίας είναι παρόμοιες με τις πυριτικές και τις αργιλικές φάσεις του τσιμέντου. Η σκωρία ψύχεται με φυσικό τρόπο, ενώ η ψύξη του τσιμέντου απαιτεί ανθρώπινη επέμβαση. Στις τσιμεντοειδείς φάσεις της χαλυβδοσκωρίας παρατηρείται πολύ καλύτερη κρυστάλλωση από εκείνες του τσιμέντου και, συνεπώς, η δραστηριότητά της σκωρίας είναι πολύ μικρότερη από εκείνη του τσιμέντου κλίνκερ. Έτσι, η σκωρία μπορεί να παρομοιαστεί ως μίγμα τσιμέντου χαμηλής αντοχής και αδρανών στοιχείων. Τα κύρια προϊόντα ενυδάτωσης του σύνθετου συνδετικού υλικού και του τσιμέντου είναι τα ίδια και αποτελούνται από: $C-S-H$ και $Ca(OH)_2$. Η φάση του RO , το FeO_{34} και ο C_2F αυξάνονται, με την αύξηση της ποσότητας της σκωρίας στα προϊόντα ενυδάτωσης των σύνθετων συνδετικών υλικών. Όπως είναι γνωστό, η λεπτά αλεσμένη σκωρία υψικαμίνων και η ιπτάμενη τέφρα αντιδρούν με το $Ca(OH)_2$ που προκύπτει από το τσιμέντο, κατά την ενυδάτωση της κονίας σκωρίας- τσιμέντου. Η αντίδραση αυτή ονομάζεται ποζολανική αντίδραση. Ωστόσο, η σκωρία δεν αντιδρά με τα προϊόντα ενυδάτωσης του τσιμέντου. Το τσιμέντο δεν αντιδρά ούτε με τα προϊόντα ενυδάτωσης της σκωρίας. Έτσι, το τσιμέντο και η σκωρία χαλυβουργίας επηρεάζουν το ένα την ενυδάτωση της άλλης και αντίστροφα (π.χ. ρυθμός και βαθμός ενυδάτωσης), μεταβάλλοντας το περιβάλλον ενυδάτωσης το ένα της άλλης και αντίστροφα κατά την ενυδάτωση του σύνθετου συνδετικού υλικού τσιμέντου-σκωρίας χαλυβουργίας. Οι ιδιότητες ενυδάτωσης της σκωρίας χαλυβουργίας επηρεάζουν σημαντικά τις ιδιότητες ενυδάτωσης του σύνθετου συνδετικού υλικού τσιμέντου-σκωρίας χαλυβουργίας. Ωστόσο, και οι ιδιότητες ενυδάτωσης του τσιμέντου παίζουν καθοριστικό ρόλο στη συνολική διαδικασία ενυδάτωσης του σύνθετου υλικού. Η αλληλεπίδραση μεταξύ τσιμέντου και σκωρίας χαλυβουργίας κατά τη διάρκεια της ενυδάτωσης είναι κρίσιμη και η επίδραση της σκωρίας στις ιδιότητες ενυδάτωσης του τσιμέντου δεν πρέπει να αγνοηθεί. Ακόμη, με την αντικατάσταση μέρους του τσιμέντου με σκωρία χαλυβουργίας παρατηρείται καθυστέρηση στην ενυδάτωση του τσιμέντου. Η επίδραση αυτή είναι πιο εμφανής με την αντικατάσταση μεγαλύτερης ποσότητας σκωρίας χαλυβουργίας. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στη σκωρία χαλυβουργίας που οδηγεί σε μεγαλύτερη περίοδο αδράνειας της κονίας τσιμέντου-σκωρίας, η οποία καθυστερεί την ενυδάτωση της σύνθετης κονίας καθώς και του τσιμέντου. [6]

4.2 Επίδραση της σκωρίας χαλυβουργίας στις μηχανικές ιδιότητες και στη διαδικασία ενυδάτωσης

Σύμφωνα με μία άλλη έρευνα, των Zhang et al. [9], το τσιμέντο χαμηλής θερμότητας (LHC) ήταν σημαντικό για την παρασκευή μαζικού σκυροδέματος. Ωστόσο, η χαμηλή πρώιμη αντοχή ήταν μία από τις δυσκολίες κατά τη διάρκεια των τεχνικών εφαρμογών. Στη μελέτη αυτή, η έκλυση χαμηλής ποσότητας θερμότητας κατά την αντίδραση της ενυδάτωσης επιτυγχάνεται με την προσθήκη σκωρίας χαλυβουργίας χαμηλής δραστηριότητας, με αποτέλεσμα την χαμηλή πρώιμη αντοχή του κονιάματος. Για να βελτιωθεί η πρώιμη αντοχή της κονιάς τσιμέντου-σκωρίας SS προστίθεται σε αυτήν νανο-SiO₂ (NS). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η περιεκτικότητα 30% σε SS και 3% σε NS στην κονία, συνέβαλαν τόσο στη χαμηλή έκλυση θερμότητας κατά την αντίδραση ενυδάτωσης όσο και στη βελτίωση της πρώιμης αντοχής. Συμπερασματικά, η χρήση της σκωρίας μείωσε σημαντικά τον ρυθμό της πρώιμης ενυδάτωσης του τσιμέντου ενώ η θλιπτική αντοχή μειώθηκε και ως φυσικό ακόλουθο παρατηρήθηκε αύξηση στο πορώδες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η κονία τσιμέντου-SS θα μπορούσε να λειτουργήσει ως LHC. Ενώ η προσθήκη NS στην κονία τσιμέντου-σκωρίας SS προωθεί την ανάπτυξη της πρώιμης αντοχής, η οποία είναι παρόμοια με αυτή του συμβατικού τσιμέντου. Ιδιαίτερα σημαντική παρατήρηση αποτελεί η μικρή αύξηση της έκλυσης θερμότητας και της θερμοκρασίας κατά την ενυδάτωση. Εκτός αυτού, η χρήση NS μείωσε το πορώδες του συστήματος τσιμέντου-SS κάνοντας την δομή των πόρων πιο περίπλοκη. Η παρουσία SS μείωσε την περιεκτικότητα σε CH του τσιμέντου λόγω του φαινομένου της αραίωσης. Ενώ η προσθήκη NS μείωσε την περιεκτικότητα του CH στην κονία τσιμέντου-SS λόγω της ποζολανικής αντίδρασης. Ο βαθμός ενυδάτωσης του τσιμέντου και του συνδετικού υλικού τσιμέντου-SS-NS ήταν παραπλήσιος. [9]

4.3 Σύγκριση των ιδιοτήτων πρώιμης ενυδάτωσης συνδετικού υλικού τσιμέντου-σκωρίας χαλυβουργίας και συνδετικού υλικού τσιμέντου-ασβεστόλιθου

Με παρόμοιο τρόπο οι Yan et al. [7] σύγκριναν τις ιδιότητες της πρώιμης ενυδάτωσης ενός σύνθετου συνδετικού υλικού από σκωρία χαλυβουργίας και τσιμέντο και ενός σύνθετου συνδετικού υλικού από τσιμέντο και ασβεστόλιθο. Έγινε ο προσδιορισμός της έκλυσης θερμότητας στα συνδετικά υλικά των αντιδράσεων ενυδάτωσης κατά την διάρκεια 3 ημερών, της δομής των πόρων της πάστας και της θλιπτικής αντοχής των κονιαμάτων σε ηλικία 3 ημερών.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι στην θερμοκρασία σκλήρυνσης των 25 °C, η θερμότητα έκλυσης της πρώιμης αντίδρασης ενυδάτωσης του συνδετικού υλικού που περιέχει σκωρία χαλυβουργίας είναι μικρότερη από εκείνη του συνδετικού υλικού που περιέχει ασβεστόλιθο, για ίδιο ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου. Ωστόσο, στη θερμοκρασία σκλήρυνσης των 50 °C, η θερμότητα έκλυσης της πρώιμης αντίδρασης ενυδάτωσης του συνδετικού υλικού που περιέχει σκωρία χάλυβα είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή που περιέχει ασβεστόλιθο.

Σε θερμοκρασία ωρίμανσης των 25 °C, η δομή των πόρων σε πρώιμη ηλικία του κονιάματος που περιέχει σκωρία χαλυβουργίας είναι πιο χονδροειδής από εκείνου που περιέχει ασβεστόλιθο, για ίδιο ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου. Ωστόσο, στη θερμοκρασία ωρίμανσης των 50 °C, το πορώδες σε πρώιμη ηλικία του κονιάματος που περιέχει σκωρία χαλυβουργίας είναι μικρότερο σε σχέση με αυτή που περιέχει ασβεστόλιθο.

Είτε σε θερμοκρασία ωρίμανσης των 25 °C είτε των 50 °C, η πρώιμη θλιπτική αντοχή του κονιάματος που περιέχει σκωρία χαλυβουργίας είναι μεγαλύτερη από εκείνου που περιέχει ασβεστόλιθο, για ίδιο ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία ωρίμανσης, τόσο μεγαλύτερη είναι και η διαφορά της θλιπτικής αντοχής ανάμεσα στο κονίαμα που περιέχει σκωρία χαλυβουργίας και στο κονίαμα που περιέχει ασβεστόλιθο.

Αν και ο πρώιμος ρυθμός αντίδρασης της σκωρίας χαλυβουργίας που πραγματοποιείται κάτω από τους 25 °C είναι χαμηλός, η χημική συμβολή της στην αντοχή του κονιάματος δεν μπορεί να παραληφθεί. Η αύξηση της θερμοκρασίας ωρίμανσης μπορεί να ενισχύσει τη χημική συνεισφορά της σκωρίας χαλυβουργίας στην ενυδάτωση και στη σκλήρυνση του σύνθετου συνδετικού υλικού. [7]

4.4 Επίδραση της λεπτότητας στις τσιμεντοειδείς ιδιότητες της σκωρίας χαλυβουργίας

Διεξήχθη μια έρευνα από τους Liu και Li [2] που διερευνά την επίδραση της λεπτότητας της σκωρίας χαλυβουργίας στις τσιμεντοειδείς ιδιότητές της και τις ιδιότητες ενός κονιάματος που περιέχει σκωρία χαλυβουργίας με διαφορετική λεπτότητα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η αύξηση στην λεπτότητα της σκωρίας μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τις πρώιμες καθώς και τις όψιμες τσιμεντοειδείς ιδιότητες της. Ωστόσο, οι πρώιμες αντιδράσεις ενυδάτωσης του τσιμέντου και της σκωρίας χαλυβουργίας τείνουν να παρεμποδίζουν η μία την άλλη, ιδίως στην περίπτωση μεγάλου ποσοστού αντικατάστασης της σκωρίας χαλυβουργίας και της υψηλής λεπτότητας της. Επομένως, η αύξηση της λεπτότητας της σκωρίας χαλυβουργίας δεν μπορεί να βελτιώσει τις πρώιμες τσιμεντοειδείς ιδιότητες της κονιάς. Στις 28 ημέρες, οι αντιδράσεις ενυδάτωσης της σκωρίας χαλυβουργίας και του τσιμέντου τείνουν να προάγουν η μία την άλλη. Η αύξηση της λεπτότητας της σκωρίας

χάλυβα βελτιώνει σημαντικά τις όψιμες τσιμεντοειδείς ιδιότητες του τσιμέντου που περιέχει σκωρία χαλυβουργίας.

Η εξώθερμη διαδικασία της σκωρίας μοιάζει πολύ με εκείνη του τσιμέντου, η οποία μπορεί να χωριστεί σε πέντε στάδια: (1) σύντομο γρήγορο εξώθερμο στάδιο κατά το οποίο σχηματίζεται η πρώτη εξώθερμη κορυφή- (2) περίοδος αδράνειας κατά την οποία ο εξώθερμος ρυθμός είναι πολύ χαμηλή- (3) περίοδος επιτάχυνσης στο τέλος της οποίας σχηματίζεται η δεύτερη εξώθερμη κορυφή- (4) περίοδος επιβράδυνσης- και (5) σταθερή περίοδος.

Η εξώθερμη αντίδραση της σκωρίας διαφέρει ανάλογα με την λεπτότητά της. Η περίοδος αδράνειας γίνεται μικρότερη και η δεύτερη εξώθερμη κορυφή εμφανίζεται πολύ νωρίτερα καθώς αυξάνεται η λεπτότητα. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται πιθανώς στη πρώιμη δραστηριότητα των ενεργών συστατικών που είναι περισσότερα λόγω της αύξησης της λεπτότητας της σκωρίας. Συμπερασματικά, όσο πιο λεπτά αλεσμένη είναι η σκωρία τόσο πιο υψηλή θερμοότητα ενυδάτωσης παρατηρείται. Επίσης, όσο πιο λεπτή είναι η σκωρία τόσο υψηλότερη είναι και η περιεκτικότητα σε νερό που παραμένει και δεν εξατμίζεται, στο κονίαμα. Οι πρώιμες ενυδατώσεις του τσιμέντου και της σκωρίας τείνουν να παρεμποδίζουν η μία την άλλη, ιδίως στην περίπτωση αντικατάστασης μεγάλου ποσοστού τσιμέντου με σκωρία και υψηλής λεπτότητας της. Η αύξηση της λεπτότητας της σκωρίας χάλυβα έχει περιορισμένη επίδραση στην πρώιμη περιεκτικότητα σε μη εξατμιζόμενο νερό και στην αντοχή στην περίπτωση αντικατάστασης μεγάλης ποσότητας τσιμέντου με σκωρία. Το κονίαμα που περιέχει λεπτότερη σκωρία χάλυβα αποκτά υψηλότερη περιεκτικότητα σε μη εξατμιζόμενο νερό 28 ημερών ενώ αποκτά και υψηλότερη αντοχή 28 ημερών.

Συμπερασματικά:

- 1) Η αύξηση της λεπτότητας της σκωρίας χαλυβουργίας βελτιώνει τις τσιμεντοειδείς ιδιότητες, όπως την βελτίωση του ρυθμού της πρώιμης εξώθερμης αντίδρασης και της αύξησης της θερμοότητας πρώιμης ενυδάτωσης και της περιεκτικότητας σε μη εξατμιζόμενο νερό.
- 2) Οι πρώιμες αντιδράσεις ενυδάτωσης του τσιμέντου και της σκωρίας χαλυβουργίας τείνουν να παρεμποδίζουν η μία την άλλη, ιδίως στην περίπτωση μεγάλου ποσοστού αντικατάστασης της σκωρίας χαλυβουργίας και της υψηλής λεπτότητας της.
- 3) Στην περίπτωση αντικατάστασης μεγάλου ποσοστού σκωρίας χαλυβουργίας στα αρχικά στάδια της αντίδρασης η αύξηση της λεπτότητας της σκωρίας χαλυβουργίας έχει περιορισμένη επίδραση στην περιεκτικότητα σε μη εξατμιζόμενο νερό και στην αντοχή.
- 4) Στις 28 ημέρες το κονίαμα που περιέχει λεπτότερη σκωρία χαλυβουργίας αποκτά υψηλότερη περιεκτικότητα σε μη εξατμιζόμενο νερό και υψηλότερη αντοχή. [2]

4.5 Διερεύνηση των συνεργιστικών επιδράσεων σε τετραμερές συνδετικό υλικό που περιέχει ερυθρά ιλύ, σκωρία υψικαμίνου, σκωρία χαλυβουργίας και γύψο από αποθείωση καυσαερίων με βάση τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

Στο εν λόγω πείραμα, παρασκευάστηκε με βάση τη θεωρία της συνέργειας ένα τεταρτογενές υλικό αρμολόγησης που αποτελείται από ερυθρά ιλύ, αλεσμένη κοκκοποιημένη σκωρία υψικαμίνου, σκωρία χαλυβουργίας και γύψο αποθείωσης καυσαερίων. Δημιουργήθηκαν μοντέλα τεχνητού νευρωνικού δικτύου για την πρόβλεψη του αρχικού χρόνου πήξης και της θλιπτικής αντοχής. Τα κύρια συμπεράσματα και επιτεύγματα αυτής της μελέτης ήταν τα εξής.

1. Η ερυθρά ιλύς έχει την δυνατότητα να παρατείνει τον χρόνο πήξης και να μειώνει την θλιπτική αντοχή του τεταρτοταγούς συνδετικού υλικού. Ενώ αρχικά ο χρόνος πήξης του τεταρτοταγούς συνδετικού υλικού μειώθηκε, στη συνέχεια και με την αύξηση της περιεκτικότητας σε σκωρία χαλυβουργίας και γύψου από την αποθείωση καυσαερίων (FGD) αυξήθηκε. Όσον αφορά τη θλιπτική αντοχή του τεταρτοταγούς συνδετικού υλικού αρχικά αυξήθηκε, ενώ στη συνέχεια με την αύξηση της περιεκτικότητας σε σκωρία χαλυβουργίας και FGD, μειώθηκε.
2. Η μέθοδος του τεχνητού νευρωνικού δικτύου υιοθετήθηκε για τη δημιουργία μοντέλων πρόβλεψης για έναν νέο τύπο υλικού τσιμεντενέσεων που παρασκευάζεται από ερυθρά ιλύ, λεπτά αλεσμένη σκωρία υψικαμίνου, χαλυβουργίας και γύψο από αποθείωση καυσαερίων. Τα μοντέλα τεχνητών νευρωνικών δικτύων απέδειξαν ότι είναι αποτελεσματικά μοντέλα για την πρόβλεψη του αρχικού χρόνου πήξης και της θλιπτικής αντοχής.
3. Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα και τη γεωτεχνική μηχανική, γίνεται η χρήση καθιερωμένων μοντέλων πρόβλεψης τεχνητού νευρωνικού δικτύου για τη τεχνική τσιμεντενέσεων και προσδιορίστηκε η βέλτιστη περιεκτικότητα των πρώτων υλών για την θλιπτική αντοχή με αλγόριθμο. [8]

4.6 Συμπεριφορά ενανθράκωσης και ενυδάτωσης συνδετικών υλικών σκωρίας χαλυβουργίας EAF και BOF

Σε μια μελέτη, των Mahoutian et al. [3], διερευνήθηκε η σκωρία χαλυβουργίας που ενεργοποιείται με την ενανθράκωση ως προς την ικανότητά της να σχηματίζει δεσμούς και να δημιουργεί προϊόντα. Από τη συγκεκριμένη μελέτη προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Οι υβριδικές σκωρίες χαλυβουργίας EAF και EAF-BOF παρουσιάζουν λανθάνουσα υδραυλική συμπεριφορά. Η ενεργοποίηση των σκωριών χαλυβουργίας με τη ενανθράκωση μπορεί να επιταχύνει την πρόωμη αντοχή, η οποία μπορεί να γίνει τρεις έως τέσσερις φορές μεγαλύτερη από την αντοχή ενυδάτωσης. Με την ενεργοποίηση

από ενανθράκωση, η σκωρία χαλυβουργίας μπορεί να χρησιμεύσει ως συνδετικό υλικό για την δημιουργία δομικών υλικών με τον σχηματισμό δεσμών ανάμεσα στην σκωρία.

- Όσο πιο μεγάλος είναι ο χρόνος ενανθράκωσης τόσο μεγαλύτερη μπορεί να είναι η πρόσληψη διοξειδίου του άνθρακα και η αύξηση της αντοχής. Η θλιπτική αντοχή μετά από 24 ώρες ενανθράκωσης ήταν σχεδόν διπλάσια από την αντοχή που μετρήθηκε μετά από 2 ώρες ενανθράκωσης.

- Η ενανθράκωση δεν εμπόδισε την επακόλουθη ενυδάτωση των σκωριών χαλυβουργίας. Η θλιπτική αντοχή που επιτεύχθηκε μετά την ενανθράκωση και την επακόλουθη ενυδάτωση ήταν σχεδόν το άθροισμα της αντοχής στην ενανθράκωση και της αντοχής στην ενυδάτωση .

- Η αύξηση της αντοχής στη σκωρία χαλυβουργίας εξαρτιόταν από την περιεκτικότητα της σκωρίας σε πυριτικά άλατα ασβεστίου.

- Η ενεργοποίηση των πυριτικών αλάτων ασβεστίου οποιασδήποτε μορφής με την ενανθράκωση μπορεί να παράγει υδροξείδια πυριτικού ασβεστίου και κρυστάλλους ανθρακικού ασβεστίου, συμβάλλοντας έτσι στην αύξηση της αντοχής της σκωρίας. Κατά την πρώιμη ενανθράκωση της σκωρίας χαλυβουργίας, άλλες ενώσεις που περιέχουν ασβέστιο δεν αντιδρούν με CO₂. Η σκωρία χαλυβουργίας που έχει υψηλή περιεκτικότητα σε πυριτικά άλατα ασβεστίου και χαμηλή περιεκτικότητα σε ενώσεις σιδήρου είναι ιδανική για να υποστεί ενεργοποίηση με ενανθράκωση για την παραγωγή δομικών υλικών που σχηματίζουν δεσμούς σκωρίας. Τα προϊόντα σκωρίας που ενεργοποιούνται με ενανθράκωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αντικαταστήσουν τα αντίστοιχα δομικά υλικά που έχουν βάση το τσιμέντο. Τα δομικά υλικά με σκωρία απαιτούν κατανάλωση μικρής ποσότητας ενέργειας, περιορίζουν την κατανάλωση φυσικών πόρων και επιτυγχάνεται η αξιοποίηση των αποβλήτων. Επιπλέον, καθώς η ενανθράκωση της σκωρίας είναι μια διαδικασία στην οποία απορροφάται CO₂, με αυτόν τον τρόπο τα προϊόντα σκωρίας μέσω της καθίζησης ορυκτών μπορεί να δεσμεύει διοξείδιο του άνθρακα με αποτέλεσμα τη μείωση των εκπομπών του. [3]

5. Οφέλη και προκλήσεις της χρήσης σκωρίας χαλυβουργίας στην αντικατάσταση τσιμέντου Portland

Η χρήση της σκωρίας χαλυβουργίας ως αντικατάστατο του τσιμέντου Portland αποτελεί ένα σύγχρονο και καινοτόμο μέσο με πολλαπλά οφέλη και προκλήσεις. Η εξέλιξη των κατασκευαστικών μεθόδων και η αύξηση της ζήτησης για πιο βιώσιμα υλικά έχουν οδηγήσει στην αναζήτηση εναλλακτικών λύσεων όπως η χρήση βιομηχανικών υποπροϊόντων, μεταξύ αυτών και η σκωρία χαλυβουργίας.

5.1 Οφέλη

Η σκωρία χαλυβουργίας, που προέρχεται από την παραγωγή χάλυβα, είναι ένα υποπροϊόν που μπορεί να ανακυκλωθεί και να χρησιμοποιηθεί ως συστατικό στο σκυρόδεμα, προσφέροντας οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα είναι η μείωση του κόστους παραγωγής σκυροδέματος, καθώς η σκωρία είναι συνήθως φθηνότερη από το παραδοσιακό τσιμέντο Portland. Αυτή η οικονομική ωφέλεια είναι ιδιαίτερα σημαντική σε μεγάλης κλίμακας κατασκευαστικά έργα όπου το κόστος των υλικών παίζει καθοριστικό ρόλο. Επιπλέον, η χρήση της σκωρίας συμβάλλει σημαντικά στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Κατά την παραγωγή τσιμέντου, απελευθερώνονται μεγάλες ποσότητες CO₂, ενώ η σκωρία, ως υποπροϊόν, δεν απαιτεί πρόσθετη παραγωγική διαδικασία με εκπομπές CO₂. Συνεπώς, η ενσωμάτωση σκωρίας στην κατασκευή σκυροδέματος μειώνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και προάγει την αειφορία. Ακόμη, η σκωρία χαλυβουργίας μπορεί να βελτιώσει τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος, όπως η αντοχή στη διάβρωση και η χημική ανθεκτικότητα. Αυτές οι ιδιότητες είναι ιδιαίτερα επιθυμητές σε κατασκευές που εκτίθενται σε επιθετικά περιβάλλοντα, όπως θαλάσσια έργα ή βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Η αυξημένη ανθεκτικότητα και διάρκεια ζωής του σκυροδέματος συμβάλλει στη μείωση των απαιτήσεων συντήρησης και αντικατάστασης, οδηγώντας σε μακροπρόθεσμη οικονομία πόρων και κόστους.

5.2 Προκλήσεις και στρατηγικές μετριασμού

Η ενσωμάτωση της σκωρίας χαλυβουργίας ως υποκατάστατο του τσιμέντου Portland στην κατασκευή σκυροδέματος παρουσιάζει σημαντικά οφέλη αλλά και προκλήσεις, οι οποίες απαιτούν κατάλληλες στρατηγικές μετριασμού για την αποτελεσματική αξιοποίησή της. Μία από τις κύριες προκλήσεις είναι η διασφάλιση της ποιότητας και της σταθερότητας του σκυροδέματος, δεδομένου ότι η σκωρία μπορεί να παρουσιάζει μεταβλητότητα στη χημική της σύνθεση. Η πρόκληση αυτή μπορεί να μετριαστεί μέσω της εφαρμογής αυστηρών διαδικασιών ελέγχου ποιότητας και της τυποποίησης της προμήθειας της σκωρίας. Επιπλέον, η πρώιμη αντοχή του σκυροδέματος με σκωρία μπορεί να είναι μικρότερη σε σύγκριση με το σκυρόδεμα με τσιμέντο Portland. Αυτό το ζήτημα μπορεί να αντιμετωπιστεί μέσω της βελτιστοποίησης της σύνθεσης του σκυροδέματος και της χρήσης κατάλληλων πρόσθετων υλικών για την ενίσχυση της αντοχής κατά τα αρχικά στάδια. Η έρευνα και ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και μεθόδων είναι κρίσιμη για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του σκυροδέματος και την εξασφάλιση της μακροχρόνιας απόδοσής του. Τέλος, η εκπαίδευση και η κατάρτιση των επαγγελματιών του τομέα είναι απαραίτητη για την κατανόηση των ιδιοτήτων και των δυνατοτήτων της σκωρίας χαλυβουργίας. Η ορθή χρήση της απαιτεί τεχνική γνώση και επίγνωση των προδιαγραφών ασφαλείας και ποιότητας.

6. Πρότυπα και κανονισμοί

Το κανονιστικό πλαίσιο που διέπει τη λειτουργία της κατασκευαστικής βιομηχανίας διαρθρώνεται σε τέσσερα επίπεδα: την εθνική νομοθεσία, τις οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, τις τεχνικές προδιαγραφές και τις τεχνικές οδηγίες. Η εθνική νομοθεσία κατέχει την ανώτερη νομική ισχύ, ενώ οι οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι συνήθως συμβουλευτικού χαρακτήρα. Οι τεχνικές προδιαγραφές ορίζουν την πρότυπη χρήση υλικών και πρακτικών στις κατασκευές και έχουν δεσμευτικό χαρακτήρα, ενώ οι τεχνικές οδηγίες παρέχουν κατευθύνσεις για την επίλυση πρακτικών ζητημάτων κατά την εφαρμογή νέων τεχνολογιών.

6.1 Ρυθμιστικές προκλήσεις

Ως κανονιστικές διατάξεις νοούνται οι νόμοι και οι κοινοτικές οδηγίες που ρυθμίζουν τη διακίνηση των βιομηχανικών παραπροϊόντων και καθορίζουν τις επιτρεπόμενες εφαρμογές τους. Για παράδειγμα, προκύπτουν προβλήματα στη μεταφορά σκωριών μεταξύ χωρών λόγω της κατηγοριοποίησής τους ως απόβλητα στον Ευρωπαϊκό Κατάλογο Αποβλήτων (European Waste Catalogue) (Haimi, 2005). Σύμφωνα με τον Motz, το πρόβλημα αυτό πηγάζει από την καθυστέρηση της εναρμόνισης της συγκεκριμένης κανονιστικής διάταξης με τις συνθήκες της αγοράς, και οι ενδιαφερόμενοι φορείς, μέσω της Euroslag, προσπαθούν να την τροποποιήσουν ώστε να μην εμποδίζεται η εμπορική χρήση του υλικού [Motz, 2005].

Παράδειγμα κανονιστικής διάταξης είναι και η κοινοτική νομοθεσία REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemical substances), η οποία αφορά όλα τα βιομηχανικά παραπροϊόντα. Ο σκοπός του REACH είναι η προστασία των καταναλωτών και του περιβάλλοντος από τους κινδύνους των χημικών και απαιτεί την εγγραφή όλων των εμπορεύσιμων χημικών προϊόντων στην Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Χημικών (European Chemicals Agency - ECHA). Η εγγραφή στην ECHA περιλαμβάνει την παροχή πληροφοριών για τα υλικά, τις ποσότητες παραγωγής τους και τις χρήσεις τους. Σε αυτό το πλαίσιο, οι παραγωγοί ιπτάμενης τέφρας και σκωρίας εργάζονται για την κατοχύρωση των βιομηχανικών παραπροϊόντων μέσω των σχετικών οργανισμών προώθησης (ECOPA, Euroslag) (Bech & Feuerborn, 2008).

6.2 Τρέχοντα πρότυπα

Η έκδοση προδιαγραφών πρέπει να γίνεται με στόχο να μην αποκλείονται μεγάλες ποσότητες υλικών, αλλά να διαθέτουν κατάλληλο εύρος και κατηγοριοποίηση των παραπροϊόντων για διάφορες χρήσεις (Swamy, 1993). Για αυτόν τον λόγο, πολλές

προδιαγραφές αναθεωρούνται τακτικά, ώστε να ενσωματώνουν τις πιο πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις. Τα τελευταία χρόνια, οι σχετικές ευρωπαϊκές προδιαγραφές για τη χρήση αδρανών στο σκυρόδεμα και στην οδοποιία (EN 12620 και EN 13043, αντίστοιχα) έχουν τροποποιηθεί για να συμπεριλάβουν τα αδρανή σκωρίας υψικαμίνων.

Πρόσφατα, εκδόθηκε πλήθος ευρωπαϊκών προτύπων σχετικά με τη χρήση βιομηχανικών παραπροϊόντων στο σκυρόδεμα, τα οποία υιοθετήθηκαν από τον Ελληνικό Οργανισμό Τυποποίησης (ΕΛΟΤ) και ισχύουν στην Ελλάδα. Επίσης, πολλές άλλες προδιαγραφές για τα βιομηχανικά παραπροϊόντα έχουν εκδοθεί και σε άλλες χώρες, όπως στις ΗΠΑ (ASTM), στη Μεγάλη Βρετανία (British Standards) και στην Ιαπωνία (JIS).

Ορισμένες από τις σημαντικότερες προδιαγραφές για τη χρήση εναλλακτικών κονιών και της σκωρίας χαλυβουργίας στο σκυρόδεμα περιλαμβάνουν:

- ΕΛΟΤ EN 14227-2: Μίγματα κατεργασμένα με υδραυλικές κονίες - Προδιαγραφές - Μέρος 2. Μίγματα κατεργασμένα με σκωρίες (2005)
- ΕΛΟΤ EN 15167: Λειοτριβημένη κοκκοποιημένη σκωρία υψικαμίνων για χρήση σε σκυρόδεμα, κονιάματα και ενέματα - Μέρος 1 & 2 (2007)

Προδιαγραφές για τη χρήση εναλλακτικής κονιάς σκωρίας υψικαμίνων:

- ASTM C 989: Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars (2009) [10]
- EN 15167-1:2006. Ground granulated blast furnace slag for use in concrete, mortar and grout - Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria
- EN 15167-2:2024. Ground granulated blast furnace slag for use in concrete, mortar and grout - Part 2: Assessment and verification of constancy of performance

7. Μελλοντικές κατευθύνσεις και ευκαιρίες έρευνας

7.1 Καινοτόμες χρήσεις

7.1.1 Οικονομικές και νομικές πτυχές

Η σκωρία χαλυβουργίας ήδη αξιοποιείται σε τομείς όπως είναι η γεωργία, η οδοποιία ενώ χρησιμοποιείται και σε άλλες εφαρμογές του κατασκευαστικού τομέα, κυρίως σε χώρες όπως η Ιαπωνία και οι ΗΠΑ. Ωστόσο, η εικόνα διαφέρει σε άλλες χώρες, στις οποίες συμπεριλαμβάνεται η Κίνα, η οποία παράγει την μεγαλύτερη ποσότητα σκωρίας.

Μία μεγάλη ποσότητα της SS που παράγεται ετησίως θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτικό υλικό ώστε να καλύψει τη ζήτηση που υπάρχει σε διάφορες βιομηχανικές διεργασίες. Πέρα από αυτή την προοπτική όμως, θα πρέπει να εφαρμόζονται και άλλες πρακτικές χρήσης της ώστε η κατανάλωση να προσεγγίσει τον παραγόμενο όγκο. Η εφαρμογή της SS στην ανάπτυξη AAM (Υλικών Ενεργοποιημένα με Αλκάλια) αναδεικνύεται ως βιώσιμη λύση για τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της χαλυβουργίας. Ωστόσο, η νομοθεσία αποτελεί συχνά εμπόδιο, καθώς απαιτείται σαφής διάκριση μεταξύ υποπροϊόντων/ συμπροϊόντων και αποβλήτων/ υπολειμμάτων. Σε πολλές περιπτώσεις, αντί για φορολογικά κίνητρα, επιβάλλονται αυστηρότεροι κανονισμοί για τη χρήση της SS, δεδομένου ότι θεωρείται ως αλκαλικό υλικό και δυνητικά διογκούμενο υλικό.

Οι βιομηχανίες χαλυβουργίας θα πρέπει να δώσουν μεγαλύτερη προτεραιότητα στην επεξεργασία της SS, με σκοπό την δημιουργία πρώτης ύλης για άλλες εφαρμογές. Συνήθως, οι περισσότερες επιχειρήσεις επικεντρώνονται στις βασικές τους δραστηριότητες, και η αξιοποίηση της SS δεν αποτελεί μέλημα τους.

7.1.2 Τεχνικές πτυχές

Αρκετές μελέτες έχουν δείξει θετικά αποτελέσματα στην ανάπτυξη νέων εφαρμογών με χρήση της SS, όπως είναι η χρήση της στη γεωργία, στη σταθεροποίηση εδάφους, στη επεξεργασία υγρών αποβλήτων, στη δέσμευση CO₂. Ακόμα, στον κατασκευαστικό τομέα σε δρόμους και πεζοδρόμια, στην παραγωγή τσιμέντου και σκυροδέματος, σε δομικά υλικά και αλκαλικά ενεργοποιημένα υλικά (AAM). Σε κάποιους από αυτούς τους τομείς η χρήση της σκωρίας είναι πιο καθορισμένη και διαδεδομένη η γνώση των θεμελιωδών χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων της. Αυτό πιθανώς να παρατηρείται επειδή οι μελέτες και η αξιοποίηση σε αυτούς τους τομείς ξεκίνησαν νωρίτερα και πλέον είναι καλά εδραιωμένες.

Η χρήση της SS στο τσιμέντο και στο σκυρόδεμα παρουσιάζει ορισμένες προκλήσεις, καθώς μπορεί να μειώσει την αντοχή του υλικού σε πρώιμη ηλικία, γεγονός που επηρεάζει τη χρήση του σε προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος. Επιπλέον, υπάρχουν αντιφατικά ευρήματα σχετικά με το πορώδες και τη διαπερατότητα στη διείσδυση χλωριόντων. Ενώ οι μελέτες για την ανθεκτικότητα της SS παραμένουν περιορισμένες.

Η εφαρμογή των SS στα AAM έχει αναδείξει τη βιωσιμότητα και τη δυνατότητα χρήσης τους ως συνδετικό ή αδρανές υλικό. Ωστόσο, ο αριθμός των μελετών είναι περιορισμένος, καθιστώντας δύσκολη την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Το SS μπορεί να υποκαταστήσει φυσικούς πόρους (όπως άμμο ή άργιλο) και άλλα βιομηχανικά παραπροϊόντα με ήδη καθιερωμένες μεθόδους ανακύκλωσης (π.χ. Σκωρία υψικαμίνου BFS, Ιπτάμενη τέφρα FA). Η χημική και μορφολογική μεταβλητότητα της SS επηρεάζει την αντιδραστικότητά του, ενώ η παρουσία μη ενυδατωμένων CaO και MgO μπορεί να προκαλέσει διόγκωση.

Λόγω των περιορισμένων δεδομένων, η κατανόηση στην επίδραση της SS στα AAM αποτελεί ακόμη νέο πεδίο έρευνας. Επιπλέον, η γεωγραφική θέση και η εγγύτητα με τις πηγές παραγωγής SS είναι κρίσιμες για την καθιέρωση αυτής της εναλλακτικής διαδρομής. Συνολικά, απαιτείται περισσότερη έρευνα για την πλήρη αξιοποίηση της SS σε κατασκευαστικά έργα. [1]

7.2 Ερευνητικά κενά

Παρά τη σημαντική πρόοδο στην αξιοποίηση της σκωρίας χαλυβουργίας, υπάρχουν ακόμη αρκετά ερευνητικά κενά που πρέπει να καλυφθούν για να μεγιστοποιηθεί η χρήση της. Στα κενά αυτά περιλαμβάνονται η ανθεκτικότητα, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και η οικονομική βιωσιμότητα. Υπάρχει ανάγκη για περισσότερες μελέτες σχετικά με τη ανθεκτικότητα των υλικών που περιέχουν σκωρία χαλυβουργίας. Ειδικότερα, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για να αξιολογηθεί η συμπεριφορά αυτών των υλικών υπό διάφορες κλιματικές και περιβαλλοντικές συνθήκες. Επιπρόσθετα, είναι απαραίτητες επιπλέον μελέτες για την κατανόηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της χρήσης σκωρίας χαλυβουργίας. Πιο συγκεκριμένα δηλαδή την εκτίμηση των πιθανών εκπομπών ρύπων και τον αντίκτυπο στην ποιότητα των υδάτων και των εδαφών. Τέλος, όσο αφορά την οικονομική βιωσιμότητα, χρειάζεται ανάλυση κόστους-οφέλους και μελέτες βιωσιμότητας για την εμπορική χρήση της σκωρίας χαλυβουργίας. Η αξιολόγηση των οικονομικών πλεονεκτημάτων σε σύγκριση με τις παραδοσιακές πρώτες ύλες είναι ζωτικής σημασίας για την ευρύτερη αποδοχή και χρήση της. Το βασικό ερευνητικό κενό όμως είναι στη χρήση της σκωρίας χαλυβουργίας κλιβάνου φωτοβολταϊκού τόξου EAF ως κονία, καθώς υπάρχει λίγη σχετική βιβλιογραφία. Προσπάθεια για την συρρίκνωση του κενού αυτού αποτελεί η παρούσα διπλωματική εργασία καθώς στόχος της αποτελεί η χρήση σκωρίας EAF σε κονιάματα ως αντικατάστατο μέρους τσιμέντου και ο προσδιορισμός των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών τους.

7.3 Αντίκτυπος χρήσης σκωρίας χαλυβουργίας

Η χρήση της σκωρίας χαλυβουργίας έχει σημαντικό αντίκτυπο σε διάφορους τομείς. Η αντικατάσταση του τσιμέντου με σκωρία χαλυβουργίας συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών CO₂ και της εξόρυξης πρώτων υλών, προστατεύοντας το περιβάλλον. Επιπλέον, η ανακύκλωση της σκωρίας χαλυβουργίας μειώνει την ποσότητα των αποβλήτων που καταλήγουν στους χώρους υγειονομικής ταφής. Ακόμη, η αξιοποίηση της σκωρίας χαλυβουργίας μπορεί να εξοικονομήσει κόστος για τη βιομηχανία κατασκευών, καθώς και να δημιουργήσει νέες θέσεις εργασίας στον τομέα της ανακύκλωσης και της παραγωγής νέων δομικών υλικών. Η προώθηση της βιώσιμης ανάπτυξης μέσω της χρήσης σκωρίας χαλυβουργίας μπορεί να συμβάλλει ακόμα και στη βελτίωση της ποιότητας ζωής, παρέχοντας πιο ανθεκτικά και φιλικά προς το

περιβάλλον υλικά για την κατασκευή υποδομών. Αυτό ενισχύει τη συνολική ευημερία των κοινοτήτων και υποστηρίζει τη μετάβαση σε μια πιο βιώσιμη κοινωνία. [1]

ΜΕΡΟΣ II: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

8. Εισαγωγή

Όλες οι πειραματικές διαδικασίες πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών του ΑΠΘ, όπου η έρευνα σχετικά με τις ιδιότητες των δομικών υλικών είναι πρωταρχικής σημασίας. Η παρασκευή των συνθέσεων και η δημιουργία των δοκιμών κονιάματος έγινε με παρουσία του διδακτικού προσωπικού και την χρήση του υπάρχοντος εξοπλισμού και υλικών του εργαστηρίου.

Το πειραματικό μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας εστίασε στην παρασκευή δοκιμών με σκοπό τον καθορισμό της συμπεριφοράς, των ιδιοτήτων των μηχανικών και των φυσικών χαρακτηριστικών ενός κονιάματος που περιέχει σκωρία χαλυβουργίας. Σκοπός της εργασίας ήταν να διερευνηθεί η χρήση της σκωρίας χαλυβουργίας ως εναλλακτική κονία για την αντικατάσταση του τσιμέντου Portland σε κονιάματα. Με συγκεκριμένη μεθοδολογία, αντικαταστάθηκε μέρος του τσιμέντου Portland με σκωρία σε διάφορα ποσοστά σε κάθε σύνθεση.

Πιο συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν συνολικά τέσσερις διαφορετικές συνθέσεις. Για την διεξαγωγή όλων των πειραματικών διαδικασιών παρασκευάστηκαν συνολικά τρεις παρτίδες δοκιμών, κάθε μία από τις οποίες απαρτίζονταν από τις τέσσερις συνθέσεις, ενώ η κάθε σύνθεση είχε διαφορετικό ποσοστό περιεκτικότητας σε σκωρία. Οι συνθέσεις και στις τρεις παρτίδες είχαν την ίδια αναλογία υλικών. Αυτή η προσέγγιση επέτρεψε τη σύγκριση των επιδόσεων των διαφόρων συνθέσεων και την αξιολόγηση του δυναμικού της σκωρίας ως συστατικού υλικού σε κονίαμα.

Η πρώτη παρτίδα αποτελούνταν από έξι πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 40 x 40 x 160 mm, το καθένα. Στη δεύτερη παρτίδα περιλαμβάνονταν έξι πρισματικά δοκίμια των ίδιων διαστάσεων, δύο πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 25 x 25 x 285 mm για τη μέτρηση της συστολής ξήρανσης και ένα κυλινδρικό δοκίμιο διαστάσεων διαμέτρου 100 mm και ύψους 100 mm για τη διεξαγωγή του ελέγχου διείσδυσης χλωριοϊόντων. Με την βοήθεια των πρισματικών δοκιμών με διαστάσεις 40 x 40 x 160 mm προσδιορίστηκαν οι μηχανικές ιδιότητες, το πορώδες και η τριχοειδής απορρόφηση. Στην τρίτη παρτίδα κονιάματος κατασκευάστηκαν έξι κυβικά δοκίμια διαστάσεων 70 x 70 x 70 mm ανά σύνθεση, προκειμένου να εξεταστεί η συμπεριφορά τους σε κύκλους ψύξης-απόψυξης και σε επιταχυνόμενη ενανθράκωση. Όλα τα δοκίμια παρασκευάστηκαν με τη χρήση μεταλλικών καλουπιών, εξασφαλίζοντας ομοιομορφία και ακρίβεια στις διαστάσεις τους.

8.1 Πρώτες ύλες και οι ιδιότητες τους

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία των κονιαμάτων αποτελούνται από το τσιμέντο Portland CEM I 42,5R και τη σκωρία χαλυβουργίας κλιβάνου ηλεκτρικού τόξου (SS) τα οποία είχαν τον ρόλο του συνδετικού υλικού. Διαλύτης στο κονίαμα αποτέλεσε το νερό. Ως αδρανές υλικό στις συνθέσεις προστέθηκε πυριτική άμμος ποταμού, ενώ έγινε και η προθήκη υπερρευστοποιητή Master Glenium 11 όπου ήταν απαραίτητη για την διασφάλιση της επιθυμητής εργασιμότητας.

Τσιμέντο Portland CEM I 42,5R

Το συγκεκριμένο τσιμέντο συμμορφώνεται σύμφωνα με τις προδιαγραφές του ΕΛΟΤ EN 197-1 και είναι ικανό να αναπτύσσει υψηλές πρώιμες αντοχές. Η ειδική του επιφάνεια είναι 9.210 cm²/g.

Σκωρία χαλυβουργίας

Η σκωρία χαλυβουργίας που χρησιμοποιήθηκε (SS), είναι παραπροϊόν της βιομηχανίας παραγωγής χάλυβα που παράγεται με τη μέθοδο του ηλεκτρικού τόξου. Μετά την παραγωγή της, η σκωρία ψύχθηκε με νερό και στη συνέχεια αλέστηκε σε όσο το δυνατόν σε πιο λεπτόκοκκη μορφή ώστε να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτική κονία στην αντικατάσταση τσιμέντου.

Τα παρακάτω αποτελέσματα μετρήσεων για τη σκωρία πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών του ΑΠΘ και παρέχονται για την ενσωμάτωσή τους στη διπλωματική εργασία:

Χημική σύσταση

Η χημική σύσταση της σκωρίας προσδιορίστηκε με τη χρήση της τεχνικής των

Στοιχείο	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	Cr ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	BaO	SO ₃	Cl ⁻	L.O.I.
%	29.2	9.88	24.6	5.94	1.67	3.83	1.32	0.24	0.05	0.22	0.54	0.38	0.49	0.12	1.87

ακτίνων φθορισμού X. Από την ανάλυση, που φαίνεται στον Πίνακα 1, προκύπτει ότι το υλικό περιέχει υψηλή περιεκτικότητα σε οξείδια του ασβεστίου (CaO = 29,2%) και του σιδήρου (Fe₂O₃ = 24,6%). Το ποσοστό σε περιεχόμενο ολικό μαγνήσιο (MgO) είναι χαμηλό, άρα δεν φαίνεται να υπάρχει σημαντικός κίνδυνος εμφάνισης διογκώσεων.

Πίνακας 1: Χημική σύσταση σκωρίας χαλυβουργίας

Στοιχείο	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	Cr ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	BaO	SO ₃	Cl ⁻
%	60-67	18-23	0,5-6	4-8	0,1-5	<0.1	0.003-0.03	<1	<1	<0.2	0.1-0.3	<0.1	2-4	<0.1

Πίνακας 2: Χημική σύσταση τσιμέντου Portland

Ποκνότητα

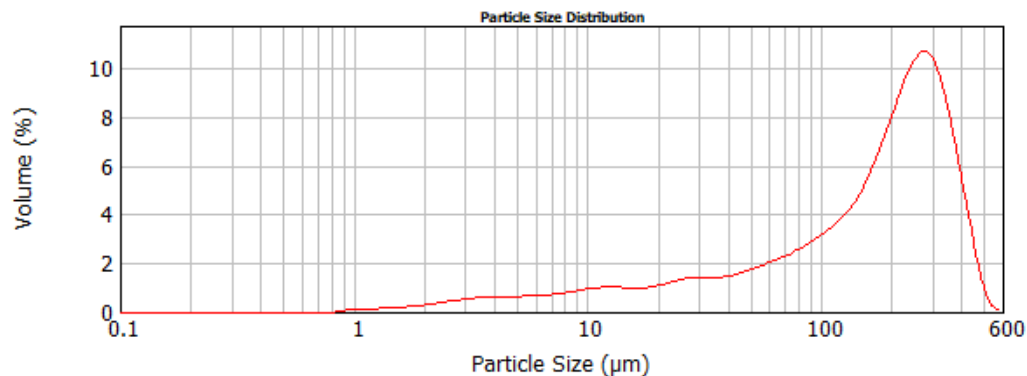
Η πυκνότητά της προσδιορίστηκε με πυκνόμετρο ηλίου και είναι ίση με 3,5360 kg/dm³.

Λεπτότητα

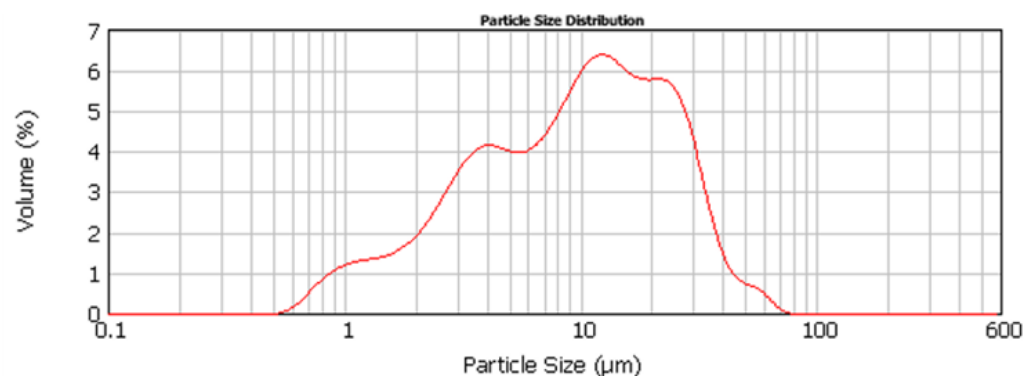
Η λεπτότητα της σκωρίας προσδιορίστηκε με τη χρήση ενός Laser Particle Size analyzer. Η κατανομή των κόκκων φαίνεται στο Διάγραμμα 1, ενώ για την περαιτέρω προσδιορισμό των μεγεθών των κόκκων, δίνονται τα στοιχεία d(0.1), d(0.5) και d(0.9) στον Πίνακα 2. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, κάτω από τα 100 μm βρίσκεται το 31,87% της σκωρίας και κάτω από τα 45 μm το 19,32%. Για σύγκριση, παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα στοιχεία για το τσιμέντο Portland τύπου CEM I42.5 N στο Διάγραμμα 2. Από τη σύγκριση προκύπτει ότι η σκωρία είναι αρκετά πιο χονδρόκοκη σε σχέση με το τσιμέντο, κάτι που επηρεάζει τη δραστηκότητά της.

Υλικό	d(0.1)	d(0.5)	d(0.9)
Σκωρία	15,01	187,47	355,91
Τσιμέντο CEM I42.5 N	2,18	9,99	27,95

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά λεπτότητας σκωρίας και τσιμέντου



Διάγραμμα 1: Κοκκομετρική καμπύλη σκωρίας χαλυβουργίας



Διάγραμμα 2: Κοκκομετρική καμπύλη τσιμέντου CEM I42.5 N

Ειδική επιφάνεια

Η ειδική επιφάνεια της σκωρίας προσδιορίστηκε με τη μέθοδο Brunauer–Emmett–Teller (BET) και βρέθηκε ίση με 21.000 cm²/g. Το μέγεθος αυτό οφείλεται στην ακανόνιστη γεωμετρία της σκωρίας, όπως αυτή προκύπτει από τον τρόπο ψύξης της και είναι ιδιαίτερα μεγάλο, γεγονός θετικό τόσο για τη δραστητικότητα της σκωρίας όσο και για την ανάπτυξη δυνάμεων συνάφειας. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η ειδική επιφάνεια του σαφώς λεπτότερου τσιμέντου CEM I42.5 N προσδιορίστηκε ίση με 9.210 cm²/g.

Χρόνος πήξης

Μια από τις επιθυμητές ιδιότητες των εναλλακτικών κονιών είναι να μην καθυστερούν και να μην επιταχύνουν το χρόνο πήξης του τσιμέντου περισσότερο από κάποια όρια. Σύμφωνα με την ευρωπαϊκή προδιαγραφή EN 196-3, ελέγχεται ο χρόνος πήξης μιας πάστας 100% τσιμέντου και συγκρίνεται με μια πάστα με 75% τσιμέντο και 25% σκωρία. Όταν ο αρχικός χρόνος πήξης μίας πάστας τσιμέντου και εναλλακτικής κονιάς κανονικής συνεκτικότητας ελέγχεται με τη μέθοδο Vicat (όπως αυτή προδιαγράφεται στον EN 196-3), πρέπει να μην καθυστερείται περισσότερο από 120', σε σχέση με τον αρχικό χρόνο πήξης μιας πάστας κανονικής συνεκτικότητας μόνο με τσιμέντο. Από τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 4, προκύπτει ότι η χρήση σκωρίας χαλβουργίας σε αντικατάσταση του τσιμέντου δεν μεταβάλλει σημαντικά τον αρχικό και τελικό χρόνο πήξης.

Συνθέσεις	Λόγος N/K για κανονική συνεκτικότητα	Αρχικός χρόνος πήξης (min)	Τελικός χρόνος πήξης (min)
100% Τσιμέντο CEM I42.5 N	0,29	125	205
75% Τσιμέντο CEM I42.5 N + 25% Σκωρία χαλβουργίας	0,23	142	190

Πίνακας 4: Αποτελέσματα ελέγχου Vicat για τον προσδιορισμό του χρόνου πήξης

Σταθερότητα όγκου

Η τάση για διόγκωση που παρουσιάζουν ορισμένες κονίες ελέγχεται και με τη μέθοδο Le Chatelier, όπως αυτή προδιαγράφεται στον EN 196-3. Η δοκιμή διενεργήθηκε για μια κανονική πάστα με 100% τσιμέντο και για μια πάστα με 75% τσιμέντο και 25% σκωρία χαλβουργίας. Τα αποτελέσματα της δοκιμής παρουσιάζονται στον Πίνακα 5. Μια κονία θεωρείται ότι δεν προκαλεί διόγκωση όταν το αποτέλεσμα της δοκιμής είναι μικρότερο από 10 mm, σύμφωνα με την ευρωπαϊκή προδιαγραφή EN 450-1, και από

τα αποτελέσματα δε φαίνεται να υπάρχει κίνδυνος διόγκωσης κατά την ενυδάτωση της σκωρίας χαλυβουργίας.

Συνθέσεις	Διόγκωση (mm)		
	Δείγμα 1	Δείγμα 2	Δείγμα 3
100% Τσιμέντο CEM I42.5 N	-0,67	-0,02	0,28
75% Τσιμέντο CEM I42.5 N + 25% Σκωρία χαλυβουργίας	0,02	-0,59	0

Πίνακας 5: Αποτελέσματα ελέγχου Le Chatelier για τον προσδιορισμού της σταθερότητας όγκου

Αδρανή

Για την παραγωγή συνθέσεων, χρησιμοποιήθηκε φυσική άμμος ποταμού, αποθηκευμένη σε πλαστικούς σάκους μπάζων στον υπαίθριο χώρο του Εργαστηρίου Δομικών Υλικών. Σύμφωνα με τον ΚΤΣ 97, η φυσική - συλλεκτή άμμος πρέπει να περνάει 100% από το κόσκινο 8 ή το 3/8" και τουλάχιστον 95% από το κόσκινο Νο 4. Το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 12620 ορίζει την άμμο ως το κλάσμα με μέγιστη διάμετρο κόκκου $D \leq 4\text{mm}$. Η παραγωγή της φυσικής - συλλεκτής άμμου απαιτεί καθαρό υλικό, χωρίς αργιλικές ή άλλες προσμίξεις, από κοίτες ή παλαιοκοίτες ποταμών ή χειμάρρων. Απαιτούνται εργαστηριακές δοκιμές για την καταλληλότητα χρήσης, ιδιαίτερα για τις ιδιότητες που επηρεάζουν την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Η διαδικασία περιλαμβάνει ξήρανση της άμμου για 24 ώρες σε φούρνο για την απομάκρυνση της υγρασίας.

Νερό

Το νερό είναι το τρίτο σημαντικό συστατικό των κονιαμάτων, μετά την κονία και τα αδρανή. Συμμετέχει σε χημικές αντιδράσεις που οδηγούν στην πήξη και σκλήρυνση του μείγματος μέσω της δημιουργίας ένυδρων κρυστάλλων. Για να είναι αποτελεσματικό, το νερό πρέπει να είναι καθαρό από επιβλαβείς προσμίξεις όπως οργανικά και ανόργανα οξέα, λίπη, λάδια, διαλυτά σάκχαρα, αιωρούμενες ουσίες και υπερβολικά ποσά διαλυμένων αλάτων, ιδιαίτερα θεικών και χλωριούχων.

Η ποσότητα νερού στο μείγμα πρέπει να καλύπτει διάφορες ανάγκες: ένα μέρος συνδέεται χημικά με την κονία (ενυδάτωση), ένα άλλο μέρος ενώνεται κρυσταλλικά, κάποια ποσότητα απορροφάται από τα αδρανή, μια ποσότητα εξατμίζεται και μια ποσότητα παραμένει ελεύθερη στους πόρους του κονιάματος. Αυτή η τελευταία ποσότητα επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες του κονιάματος: όσο μικρότερη είναι, τόσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή. Παράλληλα, μια περίσσεια νερού είναι αναγκαία για την ομοιόμορφη κατανομή και την επιθυμητή ρευστότητα του μίγματος, ώστε να μπορεί να μεταφερθεί και να γεμίσει τους πόρους ανάμεσα στα αδρανή.

Υπερρευστοποιητής

Τέλος, εισήχθη ο υπερρευστοποιητής Master Glenium 11 όπου απαιτήθηκε. Πρόκειται για ένα πρόσθετο νέας γενιάς με βάση το τροποποιημένο πολυκαρβοξυλικό αιθέρα, σχεδιασμένο για τη διατήρηση της εργασιμότητας χωρίς την προσθήκη νερού που θα μειώσει την αντοχή και την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Η ικανότητά του να λειτουργεί με χαμηλή αναλογία νερού προς τσιμέντο και να διατηρεί την εργασιμότητα του σκυροδέματος επιτρέπει την παραγωγή σκυροδεμάτων υψηλής ποιότητας. Παρουσιάζει συμβατότητα με τα πρότυπα ΕΛΟΤ EN 197-1 και ASTM και δεν περιέχει χλωρίδια. Η προτεινόμενη δοσολογία κυμαίνεται μεταξύ 0.5% και 1% κατά βάρος κονίας.

8.2 Συνθέσεις και αναλογίες υλικών

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στη διαδικασία σχεδιασμού των συνθέσεων, το τσιμέντο και η σκωρία χαλυβουργίας χρησιμοποιήθηκαν ως κονίες, δηλαδή ως τα συνδετικά υλικά. Στις τέσσερις συνθέσεις η ποσοστιαία αναλογία της σκωρίας χρησιμοποιήθηκε στο εύρος από 0 έως 30%, με βήμα αύξησης του 10% μεταξύ των συγκεκριμένων ποσοστών. Το ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου με σκωρία λήφθηκε σύμφωνα με το βάρος του τσιμέντου. Κάθε σύνθεση χαρακτηρίστηκε με έναν μοναδικό συμβολισμό, ανάλογα με το ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου με σκωρία, ο οποίος αναλύεται λεπτομερώς παρακάτω:

Συμβολισμοί συνθέσεων κονιαμάτων

S0: σύνθεση χωρίς περιεκτικότητα σε σκωρία

S10: σύνθεση με περιεκτικότητα 10% σε σκωρία, του κατά βάρους ποσοστού τσιμέντου

S20: σύνθεση με περιεκτικότητα 20% σε σκωρία, του κατά βάρους ποσοστού τσιμέντου

S30: σύνθεση με περιεκτικότητα 30% σε σκωρία, του κατά βάρους ποσοστού τσιμέντου

Για την παρασκευή των δοκιμών σκυροδέματος, έγινε ανάμειξη των υλικών με την αναλογία νερού προς κονία να είναι 0,53 και την αναλογία κονίας προς άμμο 3. Οι αναλογίες των υλικών για κάθε σύνθεση ήταν ίδιες σε όλες τις παρτίδες και φαίνονται στον Πίνακα 6. Δίνονται οι ακριβείς ποσότητες της πρώτης παρτίδας ως παράδειγμα στον Πίνακα 7 που συνοδεύονται από τα αποτελέσματα του ελέγχου της εργασιμότητας (στήλη της εξάπλωσης του Πίνακα 7). Παρατίθενται και φωτογραφικό υλικό από την διαδικασία ζυγίσματος και ανάμειξης των υλικών για την σύνθεση S30 που έγινε στο εργαστήριο (Εικόνες 1- 5).

Παρακάτω περιγράφεται η προετοιμασία για την παρασκευή των συνθέσεων που έγιναν με όμοιο τρόπο και στις τρεις παρτίδες και σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 196-1.

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία σύνθεσης τα αδρανή πρέπει να υποστούν μια προεπεξεργασία. Απαιτείται η τοποθέτησή τους σε κλίβανο ξήρανσης για 24 ώρες στους 100 βαθμούς κελσίου ώστε τελικά να μην περιέχουν υγρασία. Μετά το πέρας των 24 ωρών αφαιρούνται από τον κλίβανο και παραμένουν σε θερμοκρασία δωματίου σε ελεγχόμενο περιβάλλον ώστε να επανέλθουν σε θερμοκρασία δωματίου. Ακολουθείται αυτή η διαδικασία ώστε τα αδρανή να μην απορροφήσουν ανεπιθύμητη υγρασία λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας. Εφόσον τα αδρανή είναι έτοιμα μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία δημιουργίας των κονιαμάτων. Οπότε, συγκεντρώνονται όλα τα απαραίτητα υλικά για την κάθε σύνθεση ξεχωριστά, αφού πρώτα ζυγιστούν σε ζυγαριά ακριβείας τηρώντας τις αναλογίες που αναγράφονται στον Πίνακα 5.

Σύνθεση	S0				S10			
Υλικά	Βάρος	Πυκνότητα	Αναλογίες	Μέρη	Βάρος	Πυκνότητα	Αναλογίες	Μέρη
	g	kg/m ³	kg/m ³		g	kg/m ³	kg/m ³	
Τσιμέντο	1200	3135	508	1	1080	3135	457	0,900
Σκωρία	0	3536	0	0	120	3536	51	0,100
Άμμος	3600	2677	1523	3	3600	2677	1522	3,000
Νερό	636	1000	269	0,53	636	1000	269	0,530
Υπερ/της	0	1000	0	0	6	1000	3	0,005
Σύνολο			2300	5			2301	5
Σύνθεση	S20				S30			
Υλικά	Βάρος	Πυκνότητα	Αναλογίες	Μέρη	Βάρος	Πυκνότητα	Αναλογίες	Μέρη
	g	kg/m ³	kg/m ³		g	kg/m ³	kg/m ³	
Τσιμέντο	960	3135	407	0,8	840	3135	356	0,700
Σκωρία	240	3536	102	0,2	360	3536	152	0,300
Άμμος	3600	2677	1525	3	3600	2677	1524	3,000
Νερό	636	1000	269	0,53	636	1000	269	0,530
Υπερ/της	6	1000	3	0,005	12	1000	5	0,010
Σύνολο			2305	5			2306	5

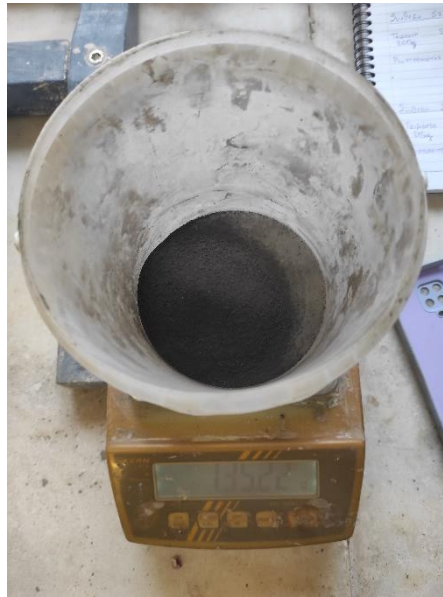
Πίνακας 6: Αναλογίες υλικών των διαφορετικών συνθέσεων

<u>Σύνθεση</u>	<u>Τσιμέντο</u>	<u>Σκωρία γκρι αλεσμένη</u>	<u>Άμμος ποταμίσια</u>	<u>Νερό</u>	<u>Υπερρευστοποιητής</u>		<u>ν/κ</u>	<u>κ/α</u>	<u>Εξάπλωση</u>
	g	g	g	ml	g				cm
S0	450	-	1350	240	-	-	0,53	0,33	15,5
S10	405	45	1350	240	2,25	0,5%*450	0,53	0,33	16
S20	360	90	1350	240	2,25	0,5%*450	0,53	0,33	16,2
S30	315	135	1350	240	4,5	1%*450	0,53	0,33	14

Πίνακας 7: Ποσότητες υλικών πρώτης παρτίδας συνθέσεων



Εικόνα 1: Μέτρηση βάρους τσιμέντου Portland



Εικόνα 2: Μέτρηση βάρους σκυριάς χαλυβουργίας



Εικόνα 3: Μέτρηση βάρους υπερρευστοποιητή



Εικόνα 4: Μέτρηση βάρους αδρανούς/ άμμου



Εικόνα 5: Μέτρηση ποσότητας του νερού



Εικόνα 6: Ανάμειξη όλων των υλικών που συμπεριλαμβάνονται στις εικόνες 1-5

8.3 Σύνθεση κονιαμάτων και έλεγχος εργασιμότητας

Για την ανάμιξη των μιγμάτων κονιάματος χρησιμοποιήθηκε μηχανικός αναδευτήρας χωρητικότητας 30 dm³ (Εικόνα 6) για την δεύτερη και τρίτη παρτίδα συνθέσεων ενώ στην πρώτη παρτίδα όπου ορίστηκε και η ποσότητα του ρευστοποιητή με γνώμονα τον έλεγχο της εργασιμότητας, ο οποίος παρουσιάζεται παρακάτω, χρησιμοποιήθηκε πιο μικρός αναδευτήρας. Ακολουθεί η ανάμιξη των υλικών ξεκινώντας με την τοποθέτηση της συνδετικής κονίας και των αδρανών. Η ανάμιξη των στερεών γίνεται για λίγα δευτερόλεπτα. Στην συνέχεια προστίθεται σταδιακά το νερό ή το μείγμα νερού με υπερρευστοποιητή αν βέβαια αυτός περιέχεται στην σύνθεση. Γίνεται η ανάμιξη των υλικών για περίπου δέκα λεπτά, έως ότου το μίγμα γίνει ομοιογενές. Πριν την τοποθέτηση του μίγματος στα μεταλλικά καλούπια βεβαιώνεται ότι είναι επαρκώς λαδωμένα και έχουμε επιτύχει την κατάλληλη εργασιμότητα.

Ο προσδιορισμός της συνεκτικότητας του νωπού κονιάματος γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 1015-3:1999. Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε με την τράπεζα εξάπλωσης η οποία είναι μια διαδεδομένη μέθοδος για τον προσδιορισμό της εργασιμότητας του νωπού κονιάματος.

Για τη δοκιμή κάθισης χρησιμοποιήθηκαν:

- Μεταλλικό καλούπι (κόλουρος κώνος)
- Μεταλλική ράβδος (κυκλικής διατομής)
- Τράπεζα εξάπλωσης (μεταλλική)
- Μέτρο
- Μυστρί
- Λάδι για το καλούπι

Αρχικά, το καλούπι λαδώνεται και τοποθετείται με την μεγάλη πλευρά προς τα κάτω, επάνω στην επιφάνεια της τράπεζας εξάπλωσης και γεμίζεται με κονίαμα σε τρεις ισόβαθμες στρώσεις, οι οποίες συμπτκνώνονται καλά κάθε φορά. Η συμπτκνωση πραγματοποιείται με την βοήθεια της μεταλλικής ράβδου και χωρίς να διαπερνά την προηγούμενη στρώση όταν συμπτκνώνεται η επόμενη. Είναι σημαντικό να εξασφαλιστεί η ομοιόμορφη πλήρωση του καλουπιού. Αφού πραγματοποιηθεί η συμπτκνωση, γίνεται η εξομάλυνση της τελικής επιφάνειας και ο κώνος αφαιρείται κατακόρυφα με σταθερή ταχύτητα. Στη συνέχεια, εκτελούνται μια σειρά από δεκαπέντε κατακόρυφες κρούσεις με σταθερή συχνότητα περίπου ανά δευτερόλεπτο, ανεβάζοντας την τράπεζα και επιτρέποντάς της να πέσει ελεύθερα από ένα δεδομένο ύψος (10 mm). Μόλις τελειώσουν οι κρούσεις το νωπό μίγμα θα έχει εξαπλωθεί επάνω στην μεταλλική επιφάνεια της τράπεζας. Οπότε, πραγματοποιούνται δύο μετρήσεις για τη διάμετρο του κονιάματος, με ακρίβεια χιλιοστού, σε κάθετες κατευθύνσεις μεταξύ τους. Οι δύο αυτές τιμές πρέπει να συγκλίνουν προς μια μέση τιμή και να μην αποκλίνουν περισσότερο από 10%. Η μέση διάμετρος του δείγματος χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της τιμής ροής του. Στόχος κατά την παρασκευή των συνθέσεων, ορίστηκε η επίτευξη του επιθυμητού και κοινού βαθμού ρευστότητας για κάθε μίγμα,

ο οποίος εκφράζεται μέσω της εξάπλωσης. Η επιθυμητή εξάπλωση ορίστηκε στα $16 \pm 1\text{εκ.}$ ώστε να εξασφαλισθεί η κατάλληλη συνεκτικότητα του υλικού ταυτόχρονα με την κατάλληλη ρευστότητα του. Από τις μετρήσεις του νωπού κονιάματος, γίνεται φανερό πως ο στόχος αυτός επετεύχθη, με την τροποποίηση, βέβαια, της ποσότητας του υπερρυστοποιητή σε κάθε σύνθεση.

Αφού έχει πραγματοποιηθεί ο έλεγχος της εργασιμότητας και ικανοποιεί της απαιτήσεις, το νωπό μίγμα διαμοιράζεται στα καλά λαδωμένα μεταλλικά καλούπια που έχουν επιλεγεί σε κάθε παρτίδα και εξυπηρετούν τους απαιτούμενους ελέγχους που θα ακολουθήσουν. Η διαδικασία εκτελείται με τέτοιο τρόπο, ώστε να διασφαλίζεται το πλήρες γέμισμα των καλουπιών, με τη βοήθεια σταδιακού γεμίσματος ανά στρώσεις και συμπύκνωσης. Αφού ολοκληρωθεί το γέμισμα, τα καλούπια καλύπτονται με μεταλλικά καπάκια, τα οποία επίσης είναι καλά λαδωμένα, προκειμένου να προστατευτούν και να αποφευχθεί η επίδραση των συνθηκών περιβάλλοντος στο κονίαμα. Το κονίαμα αφήνεται στα καλούπια για 24 ώρες ώστε να αναπτύξει τις πρώιμες αντοχές του. Μετά τη σκλήρυνση, τα δοκίμια αφαιρούνται από τα καλούπια, σημειώνεται ο κωδικός της σύνθεσης τους και τοποθετούνται σε θάλαμο, όπου οι συνθήκες υγρασίας κυμαίνονται ανάμεσα στις τιμές $95 \pm 5\%$ και η θερμοκρασία στους 20 ± 2 βαθμούς Κελσίου, σύμφωνα με τον κανονισμό BS EN 1015-11:1999. Στον θάλαμο αυτόν πραγματοποιείται η ωρίμανση των δοκιμών κονιάματος, τα οποία αφαιρούνται σε χρονικό διάστημα ανάλογα με τις απαιτήσεις των ελέγχων που θα γίνουν στην συνέχεια.



Εικόνα 7: Διαμοιρασμός και συμπύκνωση μείγματος στα μεταλλικά καλούπια



Εικόνα 8: Σκληρυμένα δοκίμια αφού αφαιρεθούν από τα καλούπια και μετά το πέρας των 24 ωρών

9. Αποτελέσματα

Για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των κονιαμάτων με περιεκτικότητα σε σκωρία και τελικά για τον καθορισμό του βέλτιστου ποσοστού αντικατάστασης του τσιμέντου με σκωρία πραγματοποιήθηκε μια σειρά από πειραματικούς ελέγχους στο εργαστήριο.

Οι πειραματικοί έλεγχοι που πραγματοποιήθηκαν περιλάμβαναν τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών, τη διερεύνηση της τριχοειδούς ανύψωσης, την παρακολούθηση της σταθερότητας όγκου, τη μέτρηση του πορώδους, την εκτίμηση της αντοχής στην προσβολή από χλωριόντα, τον χρόνο ενανθράκωσης και την ανοχή σε κύκλους ψύξης και απόψυξης.

9.1 Μηχανικά χαρακτηριστικά

Οι απαιτήσεις των μηχανικών χαρακτηριστικών για τη χρήση σκωρίας ως υποκατάστατου του τσιμέντου προδιαγράφονται στο πρότυπο EN 196-1:1995. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας και της καμπτικής και θλιπτικής αντοχής για περίοδο ωρίμανσης των δοκιμών κονιάματος 7, 28 και 90 ημερών και για τις τέσσερις συνθέσεις.

Για τον καθορισμό των μεγεθών γίνεται καταγραφή των διαστάσεων, πλάτους (b) , ύψους (h) και μήκους (l) των δοκιμών, καθώς και του βάρους τους (m), με ηλεκτρικό παχύμετρο και ζυγαριά ακριβείας, αντίστοιχα.

9.1.1 Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας

Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$E_{dyn} = 0,9245668 * \rho * Vs^2 \text{ σε GPa.}$$

Όπου $\rho = \frac{m}{V}$, η πυκνότητα του δοκιμίου σε kg/ dm³,

$Vs = \frac{l}{t}$, η μέση ταχύτητα σε km/ s,

ενώ t είναι ο χρόνος διάδοσης των υπερήχων σε s.

Ο χρόνος αυτός ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για τη διάδοση του κύματος μεταξύ του αρχικού σημείου εκκίνησης από τον πομπό και της λήψης του παλμού στον δέκτη, ο οποίος μετράται ηλεκτρονικά και δίνεται σε μονάδες ms στο σονόμετρο.



Εικόνα 7: Συσκευή σονομέτρησης

Η παρουσιαζόμενη συσκευή ονομάζεται σονόμετρο ενώ περιλαμβάνει έναν πομπό και ένα δέκτη, οι οποίοι τοποθετούνται στην αρχή και στο τέλος του πρισματικού δοκιμίου αντίστοιχα. Ο πομπός κρύσταλλος με την επιβολή κατάλληλου φορτίου ρεύματος έχει ως αποτέλεσμα να πάλλεται με φυσική συχνότητα, δημιουργώντας υπερήχους με υψηλή ταχύτητα μετάδοσης, ξεπερνώντας τα 20.000 m/sec. Από την άλλη πλευρά, ο δέκτης, ο οποίος είναι επίσης κρύσταλλος, ανιχνεύει τους υπερήχους, και τους μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα. Ταυτόχρονα με την δημιουργία του παλμού του ηλεκτρικού ρεύματος, ένα χρονόμετρο ακριβείας τίθεται σε λειτουργία. Μόλις ο παλμός φθάσει στον δέκτη σταματά το χρονόμετρο και στην οθόνη της συσκευής αναγράφεται ο αντίστοιχος χρόνος. Για την καλύτερη επαφή των κρυστάλλων στην επιφάνεια του σκυροδέματος χρησιμοποιείται λιπαντική ουσία η οποία καλύπτει τις ατέλειες της εξωτερικής επιφάνειας του στοιχείου. Η λιπαντική ουσία μπορεί να είναι γράσο, βαζελίνη ή γενικά κάποιο παράγωγο του πετρελαίου.

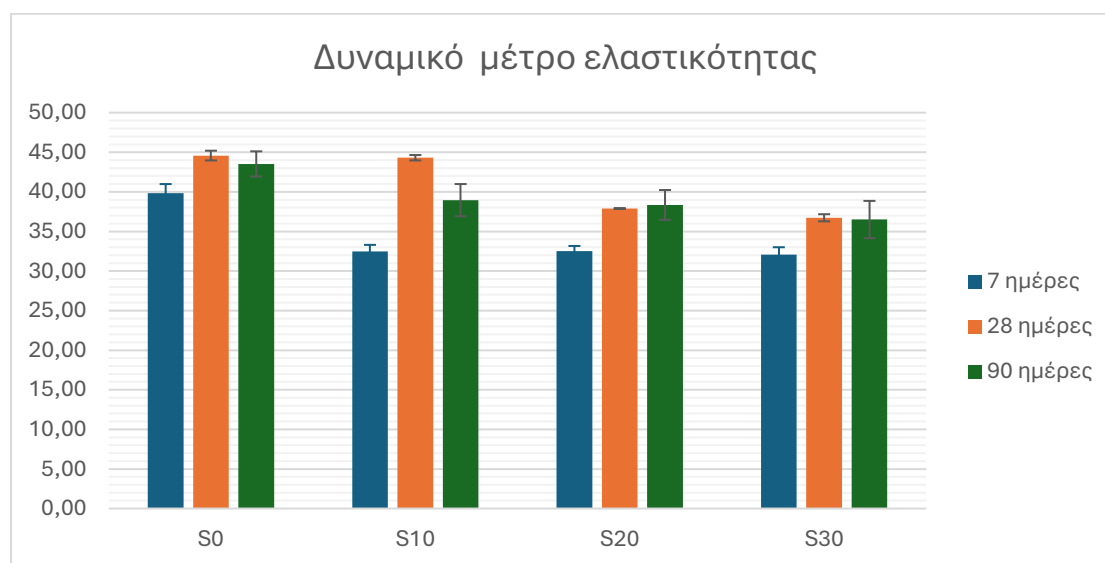
Στα παρακάτω πίνακα και διάγραμμα φαίνονται τα αποτελέσματα του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας και των αντίστοιχων τυπικών αποκλίσεων για κάθε σύνθεση που προέκυψαν ύστερα από την σονομέτρηση και την εφαρμογή των κατάλληλων τύπων:

Μέση ταχύτητα Vs (km/s)						
	7 ημέρες	Τυπική απόκλιση	28 ημέρες	Τυπική απόκλιση	90 ημέρες	Τυπική απόκλιση
S0	4,42	0,058	4,68	0,014	4,67	0,094
S10	4,11	0,048	4,64	0,025	4,49	0,092
S20	4,12	0,029	4,36	0,014	4,40	0,062
S30	4,05	0,079	4,27	0,038	4,28	0,096

Πίνακας 8: Μέσοι όροι μέσης ταχύτητας για κάθε σύνθεση και οι τυπικές αποκλίσεις τους

Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (GPa)						
	7 ημέρες	Τυπική απόκλιση	28 ημέρες	Τυπική απόκλιση	90 ημέρες	Τυπική απόκλιση
S0	39,85	1,133	44,58	0,616	43,53	1,593
S10	32,46	0,846	44,31	0,339	38,95	2,034
S20	32,51	0,654	37,89	0,053	38,35	1,881
S30	32,06	0,948	36,73	0,448	36,50	2,355

Πίνακας 9: Μέσοι όροι δυναμικού μέτρου ελαστικότητας για κάθε σύνθεση και οι τυπικές αποκλίσεις τους



Διάγραμμα 3: Διάγραμμα απεικόνισης δυναμικού μέτρου ελαστικότητας, αποτελεσμάτων Πίνακα 8, με αγκύλες απεικονίζονται οι τυπικές αποκλίσεις των τιμών

- Το μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου, καθώς τα κονιάματα ωριμάζουν.
- Υπάρχει γενικά μικρή μείωση του μέτρου ελαστικότητας με την αύξηση της περιεκτικότητας σε σκωρία, αλλά οι διαφορές δεν είναι μεγάλες, υποδεικνύοντας ότι η χρήση σκωρίας μέχρι 30% δεν υποβαθμίζει σημαντικά τις ελαστικές ιδιότητες των κονιαμάτων.

9.1.2 Δοκιμή κάμψης

Η αντοχή σε κάμψη είναι μια σημαντική ιδιότητα του τσιμεντοκονιάματος καθώς αποτελεί βασική παράμετρο για τον προσδιορισμό της απόδοσης και της καταλληλότητας του τσιμεντοκονιάματος σε διάφορες κατασκευαστικές εφαρμογές, διασφαλίζοντας έτσι την δομική ακεραιότητα και την ανθεκτικότητα των κατασκευών.

Ο προσδιορισμός της αντοχής του κονιάματος σε εφελκυσμό έγινε με την δοκιμή κάμψης τριών σημείων. Η εργαστηριακή δοκιμή πραγματοποιήθηκε με την επιβολή κατακόρυφου φορτίου στο μέσον και επάνω μέρος του δοκιμίου με την στήριξη του στο κάτω μέρος στα άκρα. Κατά την κάμψη τριών σημείων, στην κάτω ίνα αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις άρα εφελκύεται, ενώ στην άνω ίνα οι τάσεις που αναπτύσσονται είναι θλιπτικές και άρα βραχύνεται.

Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε σε υδραυλική πρέσα του εργαστηρίου. Βάσει του ευρωπαϊκού κανονισμού EN196 - 1, η χρησιμοποιούμενη μηχανή για προσδιορισμό της αντοχής σε κάμψη πρέπει να είναι ικανή να εφαρμόζει φορτία μέχρι και 20 kN. Το πρισματικό δοκίμιο τοποθετείται πάνω σε δύο παράλληλα μεταλλικά ελάσματα διαμέτρου 1 cm, με τον διαμήκη άξονά τους κάθετα προς τη διεύθυνση των στηρίξεων. Ελέγχθηκαν πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 40 × 40 × 160 mm. Πριν από κάθε δοκιμή, τα δοκίμια μετρήθηκαν ως προς τις ακριβείς διαστάσεις και το βάρος τους, με ηλεκτρικό παχύμετρο και ζυγαριά ακριβείας, αντίστοιχα. Ο έλεγχος έναντι της καμπτικής αντοχής έγινε μετά την χρονική περίοδο των 7, 28 και 90 ημερών ωρίμανσης σε υγρές συνθήκες και κάθε φορά για τρία δοκίμια κάθε σύνθεσης. Για την διεξαγωγή της μέτρησης το πρισματικό δοκίμιο τοποθετείται όσο πιο συμμετρικά γίνεται στην πρέσα (όπως φαίνεται στην Εικόνα 9). Ο σταδιακός επιβαλλόμενος ρυθμός φόρτισης των δοκιμίων ήταν τα 0.2 KN/s. Σημειώνεται η τιμή του φορτίου (P_K) για την οποία το δοκίμιο αστοχεί (όπως φαίνεται στην Εικόνα 10) και με αυτή υπολογίζεται η καμπτική αντοχή.

Ο υπολογισμός της αντοχής του σκυροδέματος σε κάμψη έγινε σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο :

$$\sigma_K = \frac{1,5 \cdot P_K \cdot L}{b \cdot h^2}, \text{ όπου:}$$

σ_K : η αντοχή σε κάμψη σε MPa

P_K: Το φορτίο θραύσης που λαμβάνεται από την ηλεκτρική πρέσα σε KN

L: Η απόσταση μεταξύ των κάτω στηρίξεων που αντιστοιχεί σε 100 mm

b: Το πλάτος του δοκιμίου σε mm

h: το ύψος του δοκιμίου σε mm



Εικόνα 9: Έλεγχος σε κάμψη τριών σημείων

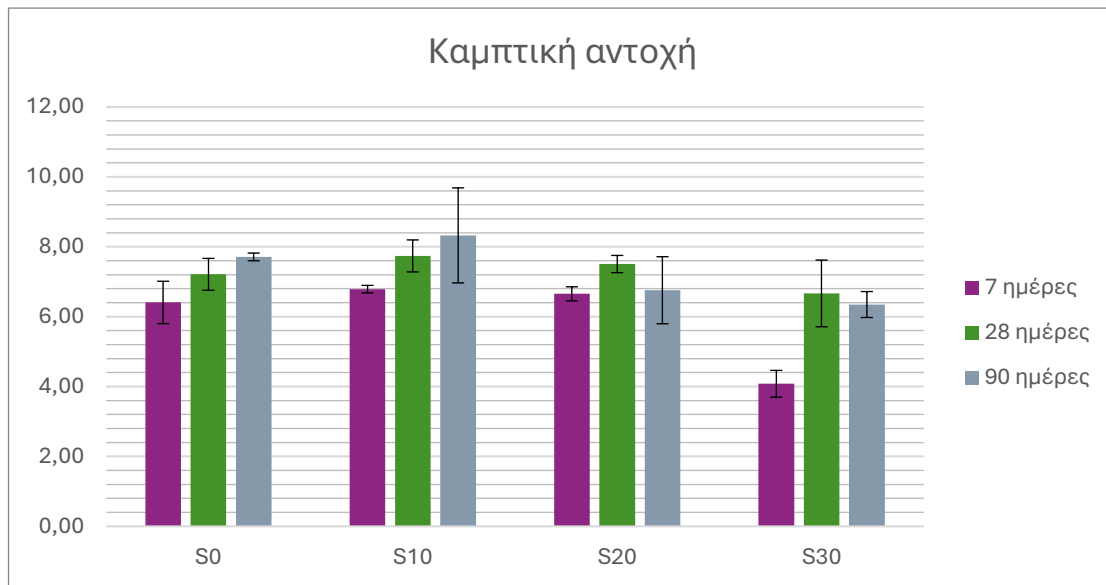


Εικόνα 10: Αστοχία σε κάμψη τριών σημείων

Τα αποτελέσματα της καμπτικής αντοχής και των αντίστοιχων τυπικών αποκλίσεων τους παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 10 και στο παρακάτω Διάγραμμα 4:

Καμπτική αντοχή						
	7 ημέρες	Τυπική απόκλιση	28 ημέρες	Τυπική απόκλιση	90 ημέρες	Τυπική απόκλιση
S0	6,41	0,607	7,21	0,456	7,71	0,111
S10	6,79	0,108	7,74	0,458	8,33	1,360
S20	6,65	0,202	7,51	0,246	6,76	0,960
S30	4,08	0,383	6,67	0,955	6,35	0,371

Πίνακας 10: Μέσοι όροι καμπτικής αντοχής και οι τυπικές τους αποκλίσεις τους



Διάγραμμα 4: Διάγραμμα απεικόνισης καμπτικής αντοχής, αποτελεσμάτων Πίνακα 10, με αγκύλες απεικονίζονται οι τυπικές αποκλίσεις των τιμών

- Η αντικατάσταση τσιμέντου με σκωρία έως και 20% (S10, S20) οδηγεί σε αύξηση της καμπτικής αντοχής, κυρίως λόγω της μεγαλύτερης ειδικής επιφάνειας της σκωρίας, η οποία συμβάλλει στη βελτιωμένη συνοχή και μηχανική απόδοση.
- Στην περίπτωση του 30% (S30), η μεγάλη αντικατάσταση μειώνει την αντοχή, ειδικά σε μακροπρόθεσμες χρονικές περιόδους, ενδεχομένως λόγω υπερβολικής ποσότητας σκωρίας που επηρεάζει τη μικροδομή του κονιάματος.

9.1.3 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

Πρόκειται για την πιο κοινή δοκιμή λόγω της απλότητάς της και το γεγονός πως η θλίψη αποτελεί το βασικό χαρακτηριστικό του κονιάματος. Για την δοκιμή αυτή χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια δοκίμια με αυτά στην δοκιμή κάμψης, δηλαδή ένα πρισματικό δοκίμιο που αστόχησε στην δοκιμή κάμψης υποβάλλεται σε δύο δοκιμές θλίψης, μια για κάθε κομμάτι. Μόνο ένα κομμάτι από κάθε σύνθεση διατηρήθηκε για την μέτρηση του πορώδους. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο του EN 12390-3. Το δοκίμιο τοποθετήθηκε ανάμεσα στις πλάκες φόρτισης της ειδικά διαμορφωμένης διάταξης μέσα στην πρέσα και υποβλήθηκε σε θλιπτική επιπόνηση, η οποία είναι αποτέλεσμα δύο δυνάμεων, ίσου μέτρου, ίδιας διεύθυνσης και αντίθετης φοράς. Η θλιπτική αντοχή του δοκιμίου προκύπτει από την μέγιστη δύναμη που μπορεί να παραλάβει μέχρι τη θραύση του και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\sigma_{\theta} = \frac{P_{\theta}}{A}$$

όπου

- σ_{θ} : Η θλιπτική αντοχή σε MPa
- P_{θ} : Το μέγιστο επιβαλλόμενο κατακόρυφο φορτίο σε KN
- A : Η θλιβόμενη επιφάνεια $b \cdot h$ σε mm

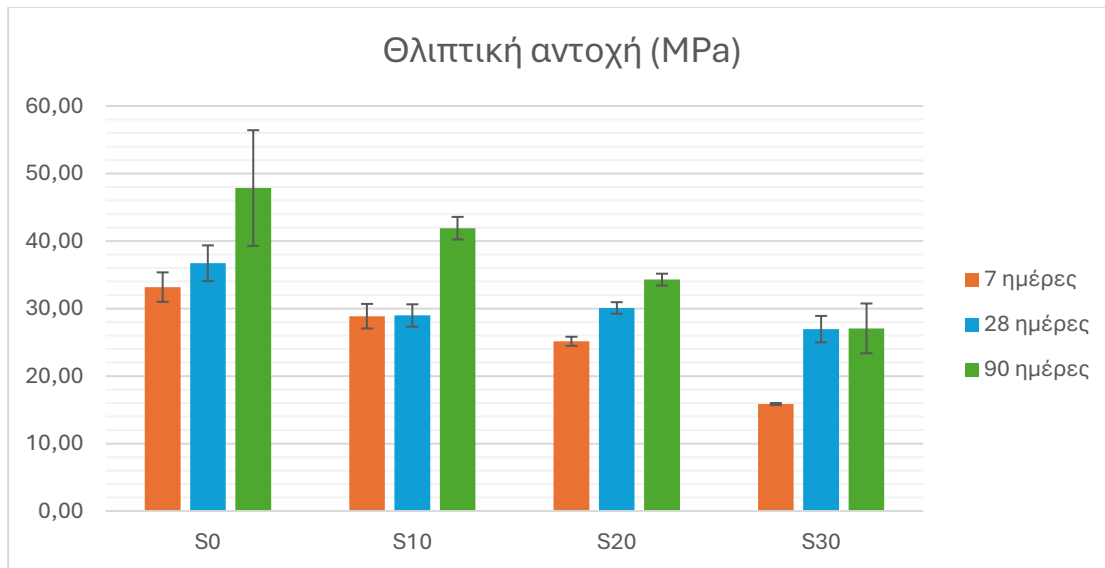


Εικόνα 11: Έλεγχος έναντι θλιπτικής αντοχής σε ηλεκτρική πρέσα

Τα αποτελέσματα της μοναξονικής θλίψης μαζί με τις τυπικές αποκλίσεις τους παρουσιάζονται παρακάτω:

Πίνακας 11: Μέσοι όροι θλιπτικής αντοχής και οι τυπικές αποκλίσεις τους

Θλιπτική αντοχή (MPa)									
	7 ημέρες	Τυπική απόκλιση	% Αναφοράς (S0)	28 ημέρες	Τυπική απόκλιση	% Αναφοράς (S0)	90 ημέρες	Τυπική απόκλιση	% Αναφοράς (S0)
S0	33,18	2,178	100,000	36,72	2,643	100,000	47,85	8,569	100,000
S10	28,87	1,819	87,007	28,97	1,660	78,914	41,91	1,672	87,582
S20	25,15	0,670	75,806	30,09	0,856	81,952	34,29	0,877	71,662
S30	15,85	0,155	47,784	26,95	1,958	73,407	27,06	3,690	56,554

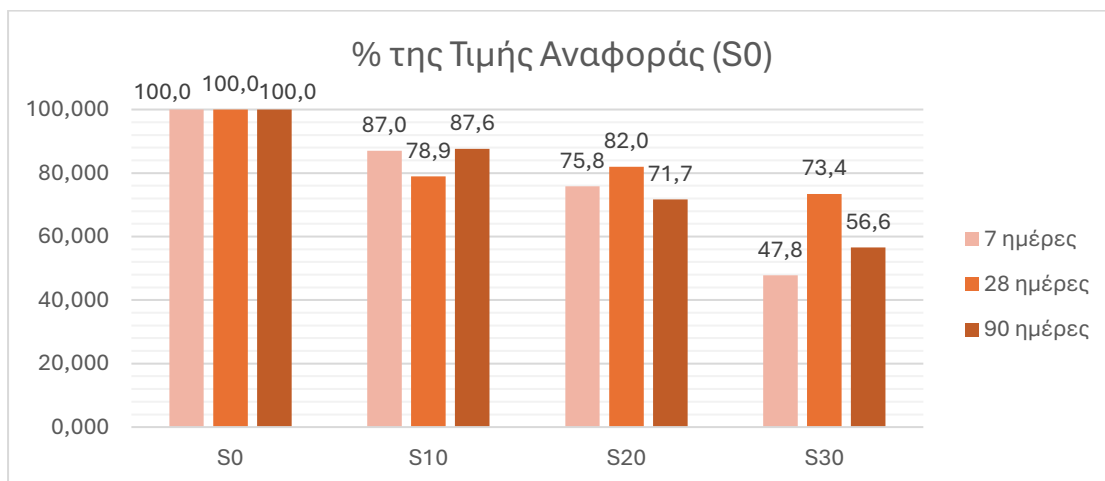


Διάγραμμα 2: Διάγραμμα απεικόνισης θλιπτικής αντοχής, αποτελεσμάτων του Πίνακα 11, με αγκύλες απεικονίζονται οι τυπικές αποκλίσεις των τιμών.

Η προσθήκη σκωρίας οδηγεί σε χαμηλότερες τιμές πρώιμης θλιπτικής αντοχής (στις 7 ημέρες), όμως δεν παρουσιάζει μεγάλη διαφορά στην αντοχή των 90 ημερών ιδιαίτερα στα δοκίμια με 10% και 20% σκωρία.

Τα δοκίμια με 10% και 20% σκωρία παρουσιάζουν μια καλή ισορροπία μεταξύ αρχικής και τελικής αντοχής.

Η σκωρία έχει βραδύτερη αντίδραση ενυδάτωσης, η οποία συνεισφέρει στην ανάπτυξη αντοχής σε μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα.



Διάγραμμα 8: Ποσοστό της τιμής αναφοράς της θλιπτικής αντοχής του S0

Για να χαρακτηριστεί ένα υλικό ως ποζολανικό σύμφωνα με το ASTM C618, απαιτείται οι θλιπτικές αντοχές των μιγμάτων με 20% αντικατάσταση του τσιμέντου από την ποζολάνη να είναι τουλάχιστον το 75% των αντίστοιχων τιμών του μίγματος αναφοράς, τόσο στις 7 ημέρες όσο και στις 28 ημέρες. Από ό,τι φαίνεται, το ποσοστό

ικανοποιείται "οριακά", δηλαδή τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η αντοχή πλησιάζει το ελάχιστο όριο του 75%.

Το γεγονός ότι οι αντοχές στις 7 και 28 ημέρες ικανοποιούν τις απαιτήσεις του προτύπου, έστω και οριακά, σημαίνει ότι το υλικό πληροί τις προϋποθέσεις για να χαρακτηριστεί ποζολανικό. Ο χαρακτηρισμός αυτός βασίζεται στη χημική αντίδραση της ποζολάνης με το υδροξείδιο του ασβεστίου που παράγεται από την ενυδάτωση του τσιμέντου, συνεισφέροντας στις μακροπρόθεσμες αντοχές του σκυροδέματος.

9.2 Φυσικά χαρακτηριστικά

Τα φυσικά χαρακτηριστικά που εξετάστηκαν είναι το πορώδες, η απορροφητικότητα, το φαινόμενο ειδικό βάρος, η τριχοειδής ανύψωση και η σταθερότητα όγκου.

Οι διαστάσεις και το βάρος των δοκιμίων όπου ήταν απαραίτητο λήφθηκαν με ηλεκτρονικό παχύμετρο και ζυγαριά ακριβείας, αντίστοιχα.

9.2.1 Προσδιορισμός πορώδους, απορροφητικότητας και φαινόμενου ειδικού βάρους

Το κονίαμα, όπως και οι φυσικοί λίθοι, δεν είναι υλικό απόλυτα συμπαγές και πλήρες, αλλά περιέχει πληθώρα εσωτερικών κοιλιοτήτων. Αυτές οι κοιλότητες ή ο όγκος κενών αποτελούν το πορώδες του κονιάματος. Ο όγκος αυτός μπορεί να περιέχει είτε αέρα είτε νερό, δηλαδή ορίζεται ως των όγκο των κενών σε σχέση με το συνολικό όγκο του κονιάματος. Το πορώδες επηρεάζει σημαντικά τις ιδιότητές του κονιάματος, κυρίως στη διαμόρφωση των αντοχών και της διαπερατότητάς του. Επιπλέον, επηρεάζει τη συστολή ξήρανσης, τον ερπυσμό, την υδατοαπορροφητικότητα, την υδατοστεγανότητα και την ανθεκτικότητα του υλικού στον παγετό.

Αυτή η ιδιότητα της δομής του κονιάματος είναι θεμελιώδης και σημαντική. Δεν είναι σταθερή, αλλά αποτελεί μια μεταβλητή παράμετρο που επηρεάζεται από εσωτερικές και εξωτερικές συνθήκες, καθώς και από το πέρασμα του χρόνου. Η συνολική της εικόνα καθορίζεται από τρεις παράγοντες: α) το ποσοστό των κενών, β) το είδος των κενών και γ) την κατανομή τους.

Η μέτρηση του πορώδους έγινε και αυτή σε χρονικό διάστημα ωρίμανσης του σκυροδέματος σε υγρές συνθήκες μετά το πέρας των 7, 28 και 90 ημερών. Για τον προσδιορισμό του πορώδους χρησιμοποιήθηκαν τα εναπομείναντα πρισματικά δοκίμια, τα οποία αποσπάστηκαν από τα αρχικά δοκίμια μετά την δοκιμή της κάμψης, με διαστάσεις διατομής 4x4 cm.

Για τον προσδιορισμό του πορώδους λήφθηκαν τρεις τιμές βάρους των δοκιμίων. Του ξηρού βάρους $B_{ξήρ}$ που είναι το βάρος του δοκιμίου μετά την ξήρανση του σε κλίβανο στους 100°C για 24 ώρες. Του κορεσμένου βάρους B_{ssd} που είναι το βάρος του δοκιμίου μετά την τοποθέτηση σε δεξαμενή νερού υπο πίεση 0,8 Atm για 24 ώρες. Του βάρους άνωσης B_{H_2O} που είναι το βάρος του δοκιμίου όταν αυτό βρίσκεται μέσα στο νερό υπό την επίδραση της άνωσης. Η τιμή αυτή λήφθηκε με την βύθιση των δοκιμίων

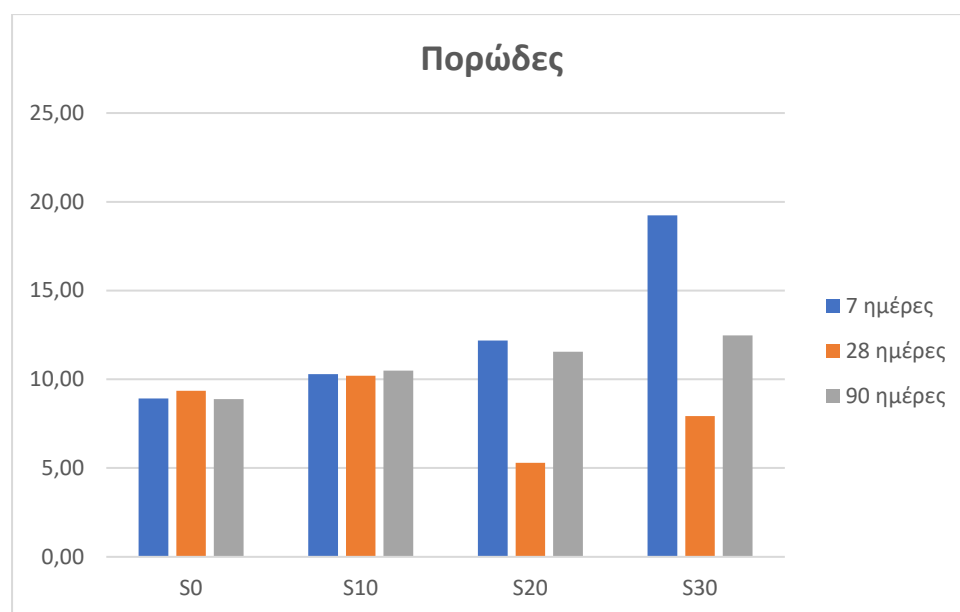
σε ειδικό υποδοχέα που βρίσκεται μέσα στο νερό και είναι συνδεδεμένος με ζυγαριά ακριβείας.

Με την βοήθεια αυτών των μεγεθών υπολογίζεται το πορώδες, ενώ ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του είναι ο παρακάτω:

$$\text{Πορώδες} = \left(\frac{(B_{ssd} - B_{\xi\eta\rho})}{B_{ssd}} \right) * 100\%$$

Πορώδες			
Συνθέσεις	Ημέρες		
	7	28	90
S0	8,92	9,35	8,89
S10	10,29	10,21	10,49
S20	12,19	5,29	11,55
S30	19,23	7,94	12,48

Πίνακας 12: Αποτελέσματα πορώδους



Διάγραμμα 9: Διάγραμμα πορώδους, απεικόνιση αποτελεσμάτων Πίνακα 12

Κατά την αξιολόγηση των μετρήσεων πορώδους σε διαφορετικές χρονικές περιόδους (7, 28 και 90 ημερών), παρατηρήθηκε ότι οι τιμές στις 7 και 90 ημέρες παρουσιάζουν συνέπεια και ακολουθούν μια λογική πορεία εξέλιξης, υποδεικνύοντας τη μεταβολή της μικροδομής του υλικού με την πάροδο του χρόνου. Ωστόσο, στις μετρήσεις των 28 ημερών για τα δοκίμια S20 και S30 εντοπίστηκαν αποκλίσεις από τη γενική τάση, οι

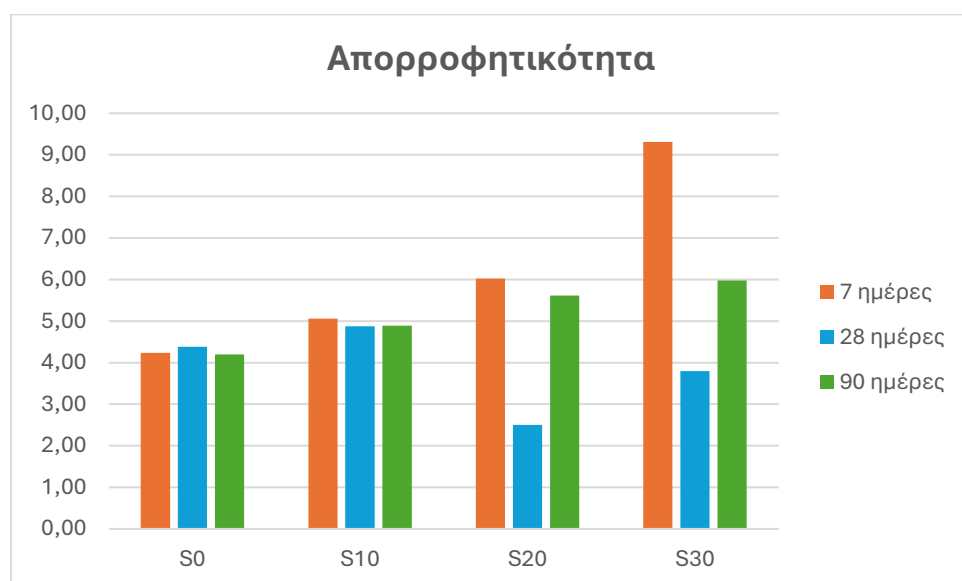
οποίες δεν αντικατοπτρίζουν την αναμενόμενη μεταβολή του πορώδους. Αυτές οι αποκλίσεις πιθανόν να οφείλονται σε σφάλματα κατά τη μέτρηση. Παρά τις αποκλίσεις στις τιμές των 28 ημερών, η γενική τάση παραμένει εμφανής και οι τιμές πορώδους των 7 και 90 ημερών μπορούν να θεωρηθούν ως αντιπροσωπευτικές της εξέλιξης του πορώδους του υλικού.

Με τις ίδιες παραμέτρους υπολογίζονται τα μεγέθη της απορροφητικότητας και του φαινόμενου ειδικού βάρους, σύμφωνα με τους παραπάνω τύπους:

$$\text{Απορροφητικότητα} = \left(\frac{(B_{ssd} - B_{\xi\eta\rho})}{B_{\xi\eta\rho}} \right) * 100\%$$

Απορροφητικότητα			
Συνθέσεις	Ημέρες		
	7	28	90
S0	4,24	4,38	4,20
S10	5,06	4,88	4,89
S20	6,02	2,51	5,61
S30	9,31	3,80	5,98

Πίνακας 12: Εργαστηριακά αποτελέσματα απορροφητικότητας



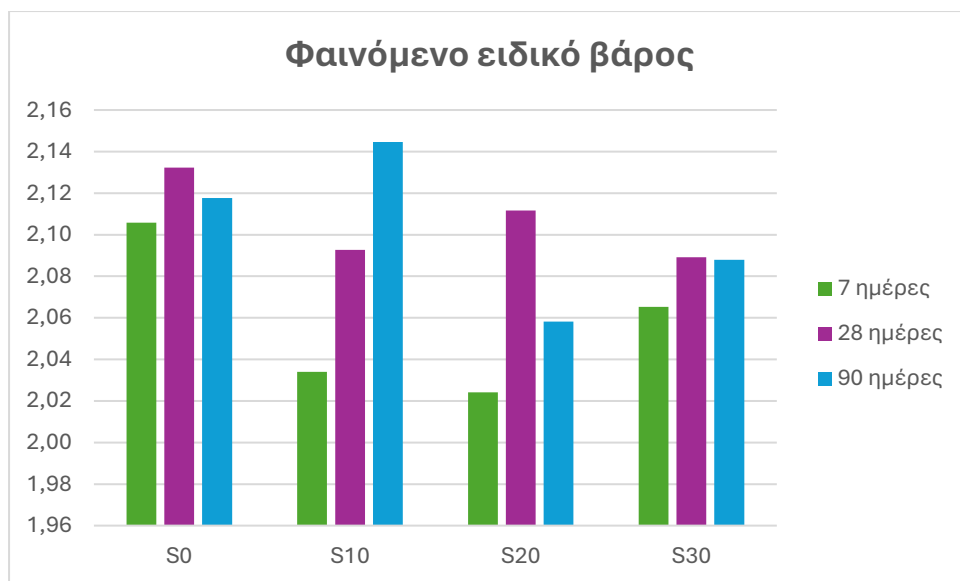
Διάγραμμα 10: Διάγραμμα απεικόνισης των αποτελεσμάτων της απορροφητικότητας του Πίνακα 12

Στις μετρήσεις απορροφητικότητας του υλικού για τις διάφορες χρονικές περιόδους (7, 28 και 90 ημερών), παρατηρείται παρόμοιο σφάλμα με εκείνο που εντοπίστηκε στις προηγούμενες μετρήσεις πορώδους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για τον υπολογισμό της απορροφητικότητας χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες τιμές βάρους των δειγμάτων (κορεσμένης επιφάνειας ξηρότητας και ξηρής κατάστασης). Ως εκ τούτου, οι αποκλίσεις που εμφανίζονται στις τιμές των 28 ημερών για τα δοκίμια S20 και S30 αποτυπώνουν την ίδια απόκλιση που παρατηρήθηκε και στις τιμές πορώδους, υποδεικνύοντας ότι το σφάλμα ενδέχεται να προέρχεται από ασυνέπειες στην προετοιμασία ή τη μέτρηση των συγκεκριμένων δειγμάτων. Παρά τις αποκλίσεις αυτές, η συνολική τάση της απορροφητικότητας παραμένει συνεπής με εκείνη του πορώδους, επιβεβαιώνοντας τη σταδιακή βελτίωση των ιδιοτήτων του υλικού με την πάροδο του χρόνου.

$$\text{Φαινόμενο ειδικό βάρος} = (B_{\xi\eta\rho} / (B_{ssd} - B_{H2O}))$$

Φαινόμενο ειδικό βάρος			
Συνθέσεις	Ημέρες		
	7	28	90
S0	2,11	2,13	2,12
S10	2,03	2,09	2,14
S20	2,02	2,11	2,06
S30	2,07	2,09	2,09

Πίνακας 13: Αποτελέσματα φαινόμενου ειδικού βάρους



Διάγραμμα 11: Διάγραμμα απεικόνισης των αποτελεσμάτων φαινόμενου ειδικού βάρους του Πίνακα 13

Η ενσωμάτωση της σκωρίας στα δείγματα δεν φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά το φαινομενικό ειδικό βάρος του υλικού. Παρά το αυξημένο βάρος της σκωρίας, η επίδρασή της αντισταθμίζεται από την ταυτόχρονη αύξηση του πορώδους του υλικού, με αποτέλεσμα η συνολική μεταβολή του φαινομενικού ειδικού βάρους να παραμένει αμελητέα.

Τριχοειδής ανύψωση

Η τριχοειδής ανύψωση, επίσης γνωστή ως τριχοειδής απορρόφηση, είναι ένα φαινόμενο που παρατηρείται σε πορώδη υλικά, όπως είναι το σκυρόδεμα και το κονίαμα. Εμφανίζεται λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ της επιφανειακής τάσης του υγρού και της πορώδους δομής του υλικού. Η επιφανειακή τάση είναι η τάση μιας υγρής επιφάνειας να ελαχιστοποιεί την επιφάνειά της. Όταν ένα υγρό έρχεται σε επαφή με μια στερεή επιφάνεια (όπως οι πόροι του υλικού), μπορεί είτε να βρέξει την επιφάνεια (σχηματίζοντας ένα λεπτό φιλμ) είτε να απωθηθεί σε αυτήν. Η τριχοειδής δράση εμφανίζεται όταν οι δυνάμεις συνοχής μεταξύ των μορίων του υγρού είναι ισχυρότερες από τις δυνάμεις πρόσφυσης μεταξύ του υγρού και της στερεάς επιφάνειας. Στα πορώδη υλικά, το υγρό τραβιέται στα κενά μεταξύ των στερεών σωματιδίων λόγω της διαφοράς δυνάμεων. Καθώς το υγρό απορροφάται μέσα στα κενά, ανυψώνεται ενάντια στη βαρύτητα έως ότου οι δυνάμεις συνοχής και πρόσφυσης φτάσουν σε ισορροπία. Το ύψος στο οποίο ανέρχεται το υγρό εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το μέγεθος των πόρων, την επιφανειακή τάση του υγρού και του στερεού και η γωνία επαφής μεταξύ του υγρού και της επιφάνειας του στερεού. Ο ρυθμός με τον οποίο πραγματοποιείται η τριχοειδής άνοδος εξαρτάται από παράγοντες όπως το πορώδες και τη διαπερατότητα του υλικού, το ιξώδες του υγρού και τις περιβαλλοντικές συνθήκες όπως η θερμοκρασία και η υγρασία. Η τριχοειδής ανύψωση

μπορεί να έχει διάφορες επιπτώσεις στα πορώδη υλικά, συμπεριλαμβανομένης της εισροής υγρασίας, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα όπως η εξίδρωση, η κρυστάλλωση αλάτων και η φθορά του υλικού λόγω κύκλων ψύξης-απόψυξης ή χημικών αντιδράσεων με διαλυμένα άλατα.

Για τον εργαστηριακό προσδιορισμό της τριχοειδούς ανύψωσης ακολουθήθηκαν οι διαδικασίες σύμφωνα με το πρότυπο EN1015-18:2002. Αρχικά προσδιορίζονται οι διαστάσεις και το βάρος των δοκιμίων, όμοια με τα υπόλοιπα πειράματα. Το βάρος των δοκιμίων που λαμβάνεται είναι το ξηρό βάρος, δηλαδή μετά την τοποθέτηση των κονιαμάτων σε κλίβανο για 24 ώρες στους 100°C. Πριν την διεξαγωγή των ελέγχων τα δοκίμια αφήνονται σε συνθήκες περιβάλλοντος μέχρι να φτάσουν την θερμοκρασία δωματίου. Στη συνέχεια τα δοκίμια τοποθετούνται σε όρθια θέση σε κλειστή πλαστική δεξαμενή με νερό και διεισδυτικό χαρτί να καλύπτει την επιφάνεια της, φροντίζοντας η επιφάνεια επαφής του δοκιμίου να είναι όσο το δυνατόν λεία και επίπεδη. Το βάρος των δοκιμίων λαμβάνεται μετά από χρόνο 5, 10, 15, 30, 45, 60, 120 και 1440 λεπτών. Για την μέτρηση αφαιρούμε τα δοκίμια τα στεγνώνουμε με απορροφητικό χαρτί επιφανειακά και τα τοποθετούμε στην ζυγαριά ακριβείας. Φροντίζουμε κατά την διάρκεια των μετρήσεων τα δοκίμια να μην μένουν για πολύ χρόνο εκτός της δεξαμενής.



Εικόνα 12: Φαινόμενο τριχοειδούς ανύψωσης σε πλαστική δεξαμενή

Αφαιρώντας το αρχικό βάρος από το βάρος που μετρήθηκε στις δεδομένες χρονικές στιγμές και διαιρώντας με το εμβαδόν της επιφάνειας που εφάπτεται στο διηθητικό χαρτί προκύπτουν οι τιμές που σχεδιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα συναρτήσεως της ρίζας του χρόνου, ενώ ο τύπος υπολογισμού είναι:

$$\frac{Bo - Bt}{h * b}$$

Όπου,

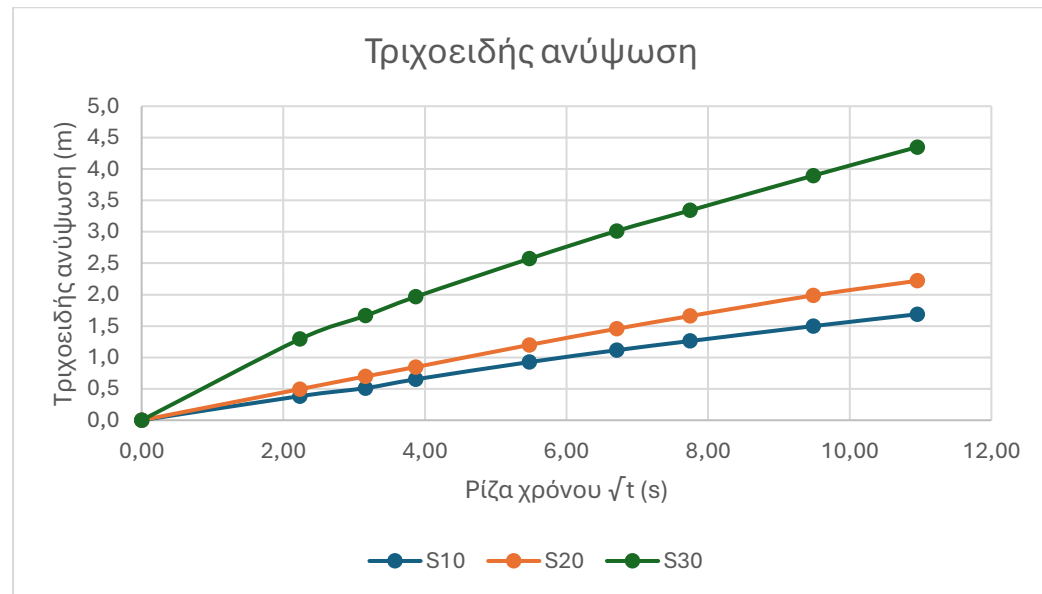
Bo: το αρχικό βάρος του δοκιμίου, σε kg

Bt: το βάρος του δοκιμίου μετά από χρόνο t στην δεξαμενή, σε kg

b: Το πλάτος του δοκιμίου σε m

h: το ύψος του δοκιμίου σε m

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της τριχοειδούς ανύψωσης που προέκυψαν στο εργαστήριο.



Διάγραμμα 12: Διάγραμμα απεικόνισης των αποτελεσμάτων της τριχοειδούς ανύψωσης

9.2.2 Αντίσταση στη διείσδυση χλωριοϊόντων

Για τον έλεγχο χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά δοκίμια σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 1202–97, με σκοπό τον προσδιορισμό της αντίστασης των κονιαμάτων στη διείσδυση χλωριοϊόντων. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται παρέχει μια γρήγορη ένδειξη της αντοχής τους στη διείσδυση ιόντων χλωρίου. Η διαδικασία περιλαμβάνει τη μέτρηση του ηλεκτρικού ρεύματος που διέρχεται από δείγματα πάχους 50 mm και διαμέτρου 100 mm για 6 ώρες. Εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού 60 Volt συνεχούς ρεύματος μεταξύ δύο άκρων του δείγματος, εκ των οποίων το ένα βυθίζεται σε διάλυμα χλωριούχου νατρίου και το άλλο σε διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου. Το συνολικό

φορτίο που διαπερνά το δείγμα, μετρημένο σε Coulomb, συνδέεται με την αντίσταση του δείγματος στη διείσδυση ιόντων χλωρίου.

Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για την αξιολόγηση υλικών και αναλογιών ανάμιξης και χρησιμοποιείται σε σχεδιασμό, έρευνα και ανάπτυξη. Αρχικά αναπτύχθηκε για την αξιολόγηση εναλλακτικών υλικών, αλλά έχει επεκταθεί και στον ποιοτικό έλεγχο.

Διεξαγωγή ελέγχου:

Προετοιμασία Δοκιμίων:

Για την προετοιμασία των δοκιμίων, χρησιμοποιήθηκε ρητίνη Sintecno δύο συστατικών, η οποία εφαρμόστηκε περιμετρικά στην επιφάνειά τους για να δημιουργηθεί ένα αδιαπέρατο στρώμα. Μετά την ξήρανση της κόλλας, τα δοκίμια τροποποιήθηκαν στις επιθυμητές διαστάσεις (10x 5 cm).

Εξοπλισμός:

- Δύο πλαστικές πλάκες, υποδοχείς, διαστάσεων 150x 160 mm και πάχους 50 mm υλικού ανθεκτικό σε υψηλές θερμοκρασίες και διαλύματα, με ενσωματωμένους μεταλλικούς δίσκους για τη μεταφορά ηλεκτρικών φορτίων.
- Πλαστικός δακτύλιος εσωτερικής διαμέτρου 140 mm που τοποθετείται στο δοκίμιο πριν από τους υποδοχείς.
- Δύο κυλινδρικά λάστιχα για σωστή συναρμογή των δοκιμίων με τους υποδοχείς.
- Μηχάνημα για τη μεταφορά και καταγραφή των ηλεκτρικών φορτίων και των θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της δοκιμής.
- Διάλυμα χλωριούχου νατρίου 3% κατά βάρος και διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου με συγκέντρωση 12 g ανά λίτρο.
- Καλώδια για τη μεταφορά του ηλεκτρικού ρεύματος.

Τα δοκίμια, μετά την κατάλληλη προετοιμασία, τοποθετούνται ανάμεσα στους δύο υποδοχείς. Το σύστημα στερεώνεται με τέσσερις βίδες για να εξασφαλιστεί η στεγανότητα. Στη συνέχεια, τα υδατικά διαλύματα εισάγονται στις υποδοχές των πλακών και συνδέονται με το μηχάνημα μέτρησης μέσω καλωδίων. Μετά το πέρας της μέτρησης διάρκειας έξι ωρών, καταγράφεται το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο που διέρχεται από το δοκίμιο σε Coulomb. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η μέτρηση μπορεί να διακοπεί νωρίτερα εάν η διείσδυση χλωριόντων ολοκληρωθεί σε λιγότερο χρόνο.

Το μηχάνημα καταγράφει την ένταση του ρεύματος (σε mA) σε συνάρτηση με το χρόνο. Το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο Q υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του τραπεζοειδούς κανόνα αριθμητικής ολοκλήρωσης και τις τιμές της έντασης του ρεύματος I . Ο τύπος που γίνεται ο υπολογισμός του είναι ο παρακάτω:

$$Q = 900 * (I_0 + 2 * I_{30} + 2 * I_{60} + \dots + 2 * I_{330} + I_{360})$$

Όπου,

- Q: το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο (Coulomb)
- I_0 : η ένταση του ρεύματος σε χρόνο $t=0$ (mA)
- I_t : η ένταση του ρεύματος σε χρόνο t (mA)

Σύνθεση	Δοκίμιο 1 (C)	Δοκίμιο 2 (C)	M.O.	Chloride Ion Penetrability
S0	3814	4306	4060	High
S10	7397	-	7397	High
S20	6664	5795	6229,5	High
S30	8483	-	8483	High

Πίνακας 14: Πίνακας αποτελεσμάτων ελέγχου περιεκτικότητας σε χλωριόντα

**TABLE X1.1 Chloride Ion Penetrability
Based on Charge Passed (1)**

Charge Passed (coulombs)	Chloride Ion Penetrability
>4,000	High
2,000–4,000	Moderate
1,000–2,000	Low
100–1,000	Very Low
<100	Negligible

Πίνακας 15: Πίνακας κατηγοριοποίησης ανάλογα με το φορτίο που διαπερνά το δοκίμιο, από τον ASTM C 1202–97



Εικόνα 13: Εξοπλισμός για την μέτρηση της περιεκτικότητας σε χλωριόντα



Εικόνα 14: Κυλινδρικά δοκίμια με επιφανειακή στρώση ρητίνης τοποθετημένα στον υποδοχέα μέτρησης

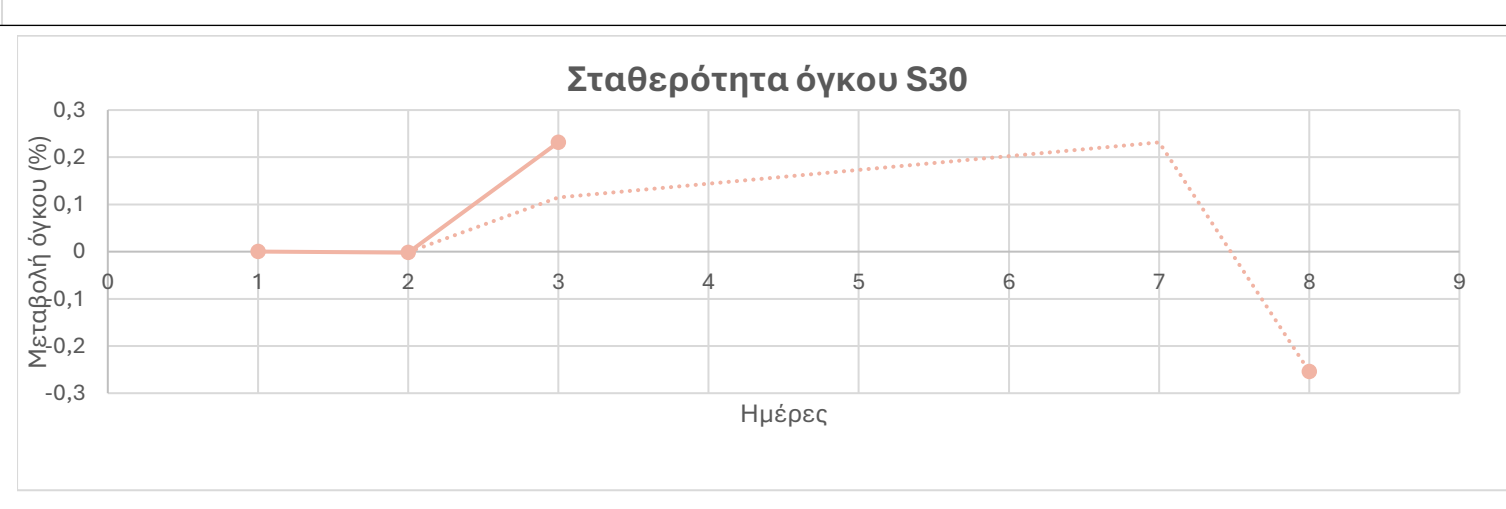
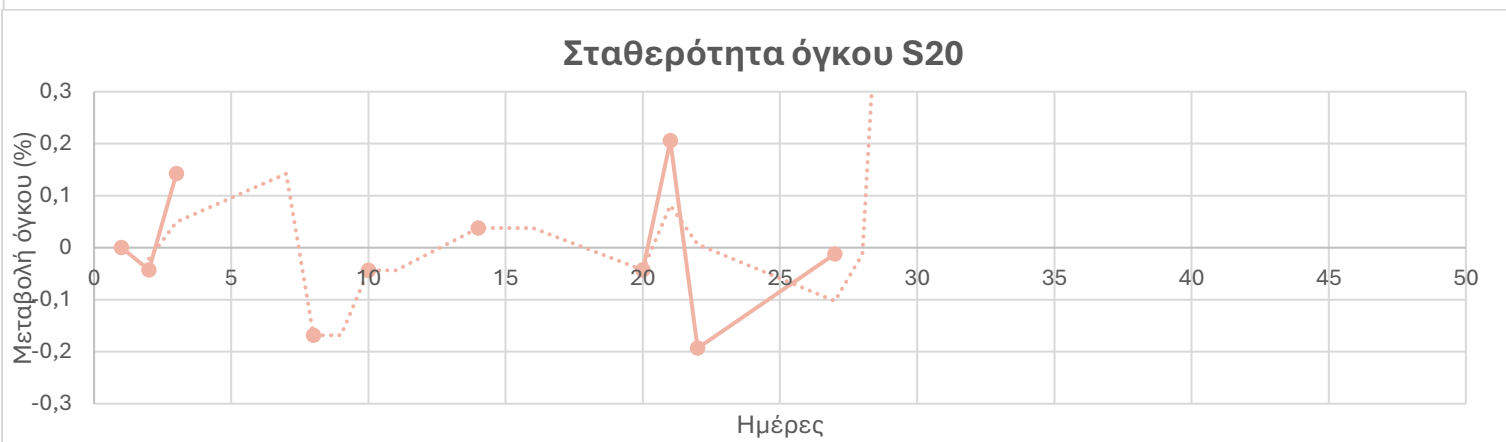
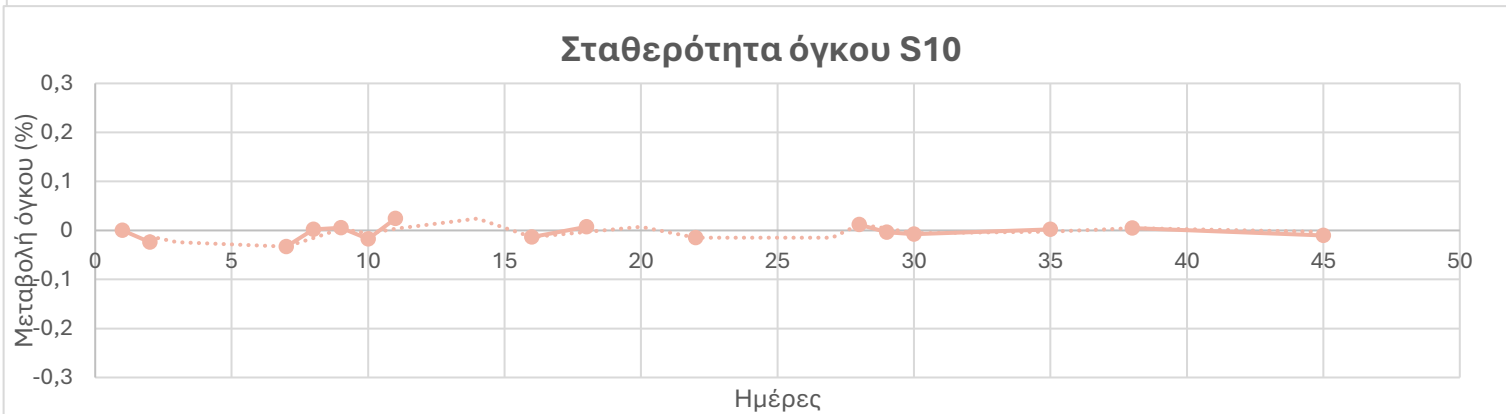
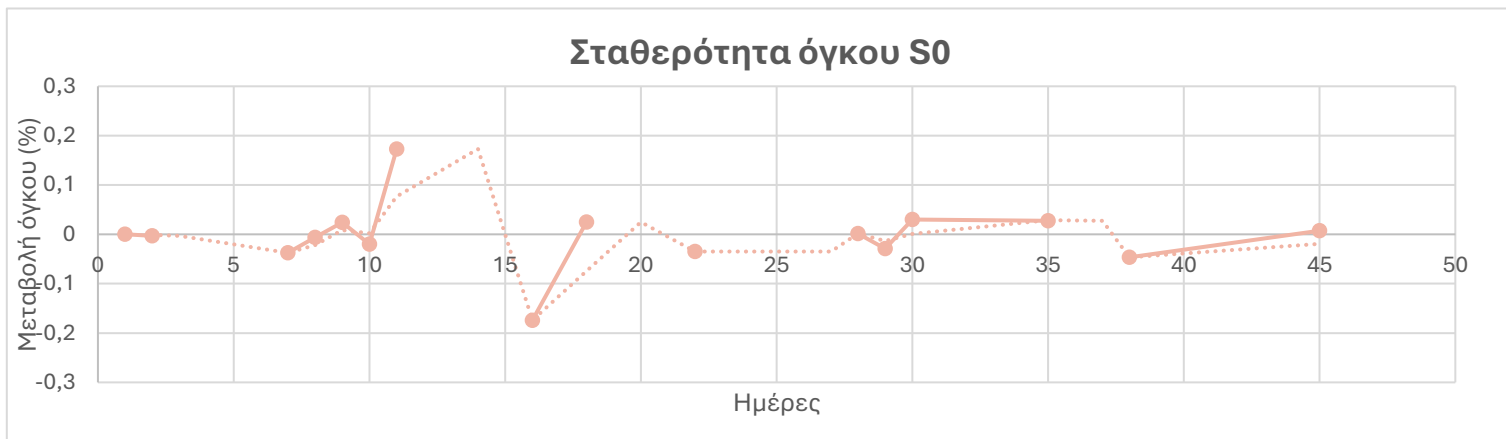
9.2.3 Σταθερότητα όγκου

Ο εργαστηριακός έλεγχος της σταθερότητας όγκου των δοκιμίων κονιάματος είναι μια διαδικασία που πραγματοποιείται για την αξιολόγηση του αν το κονίαμα διατηρεί τον όγκο του μετά τη σκλήρυνση και είναι κρίσιμη για την εξασφάλιση της μακροχρόνιας απόδοσης και της δομικής ακεραιότητας του υλικού. Η σταθερότητα όγκου είναι σημαντική, καθώς η μεταβολή του όγκου μπορεί να οδηγήσει στην δημιουργία ρηγματώσεων, ακόμα και στην αστοχία. Για τον συγκεκριμένο έλεγχο απαιτούνται δύο δοκίμια από κάθε σύνθεση με διαστάσεις 25 x 25 x 285 mm. Μετά την παρασκευή των συνθέσεων και την έγχυση στα καλούπια, τα δοκίμια αφήνονται να σκληρύνουν υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Ένα δοκίμιο από κάθε σύνθεση τοποθετείται σε υγρές συνθήκες και ένα δοκίμιο από κάθε σύνθεση αφήνεται σε ξηρές συνθήκες. Η διατήρηση σε υγρές συνθήκες γίνεται σε θάλαμο που έχει καθορισμένες συνθήκες. Ο στόχος είναι να ελεγχθεί πως η παρατεταμένη έκθεση σε υγρασία επηρεάζει τον όγκο των δοκιμίων. Σε πολλές περιπτώσεις, το κονίαμα μπορεί να απορροφήσει νερό και να διογκωθεί. Τα δοκίμια για τα οποία εξετάστηκε η μεταβολή του όγκου τους σε ξηρές συνθήκες τοποθετήθηκαν σε ειδικό διαμορφωμένο θάλαμο θερμοκρασίας 20°C και υγρασίας κάτω του 50%. Στόχος είναι να παρατηρηθεί η συρρίκνωση που μπορεί να προκύψει λόγω της απώλειας υγρασίας. Η συρρίκνωση αυτή μπορεί να οδηγήσει σε ρωγμές ή σε προβλήματα σταθερότητας. Οι μεταβολές στον όγκο μεταξύ των δύο συνθηκών (υγρές και ξηρές) συγκρίνονται για να κατανοηθούν οι διαφορές στη συμπεριφορά του κονιάματος υπό διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτός ο έλεγχος μπορεί να βοηθήσει στην πρόβλεψη της απόδοσης του κονιάματος σε πραγματικές συνθήκες χρήσης, όπου μπορεί να εκτίθεται τόσο σε υγρασία όσο και σε ξηρότητα.

Το μήκος και έμμεσα ο όγκος των δοκιμίων μετράται αμέσως μετά την σκλήρυνση και ύστερα από αυτό σε διάφορα χρονικά διαστήματα. Όλες οι μετρήσεις γίνονται με τη χρήση μηκυνσιόμετρου ακρίβειας χιλιοστών του χιλιοστού. Η μεταβολή του όγκου συγκρίνεται με την αρχική μέτρηση, για να προσδιοριστεί τελικά η σταθερότητα του κονιάματος.

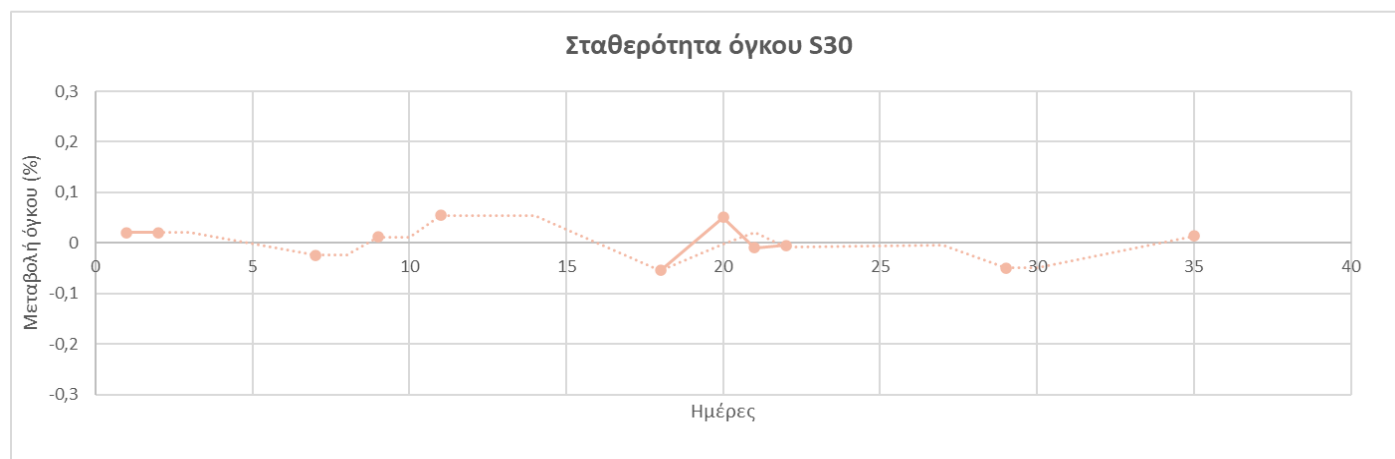
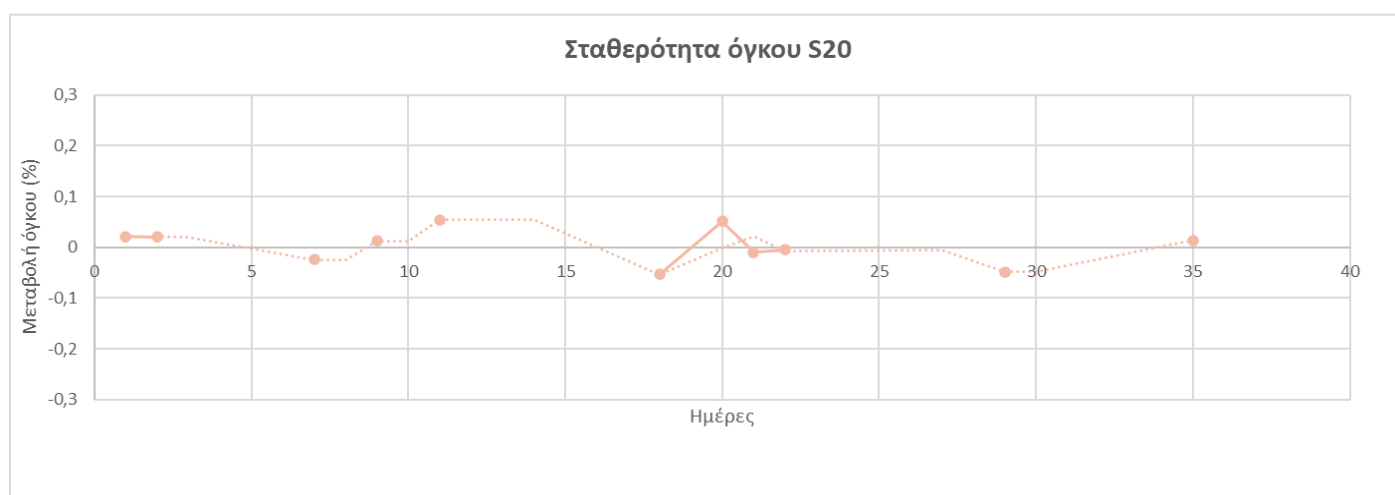
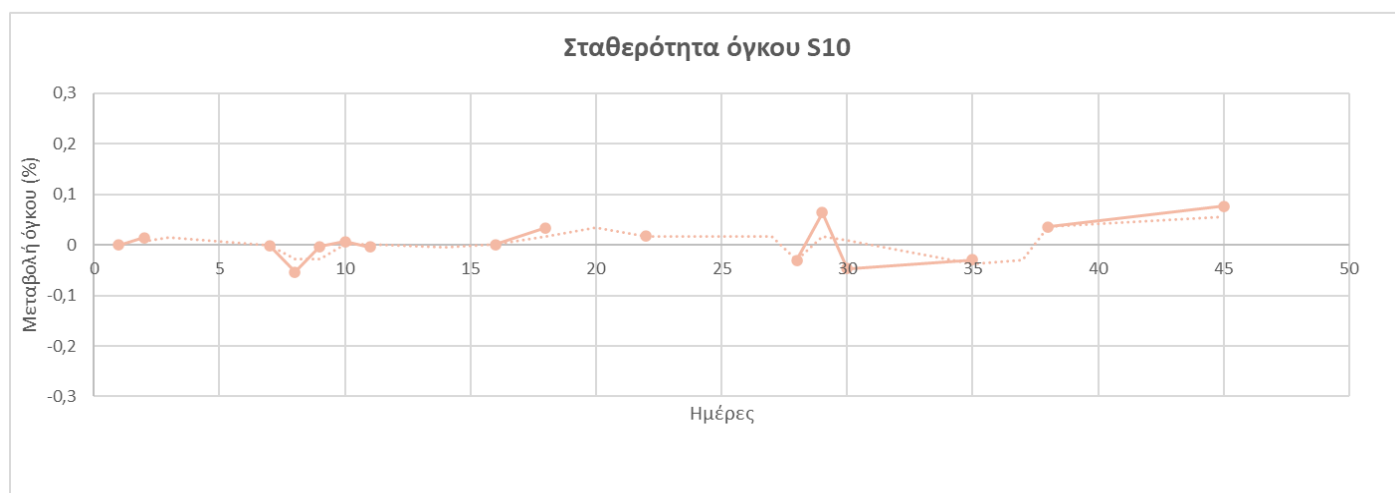
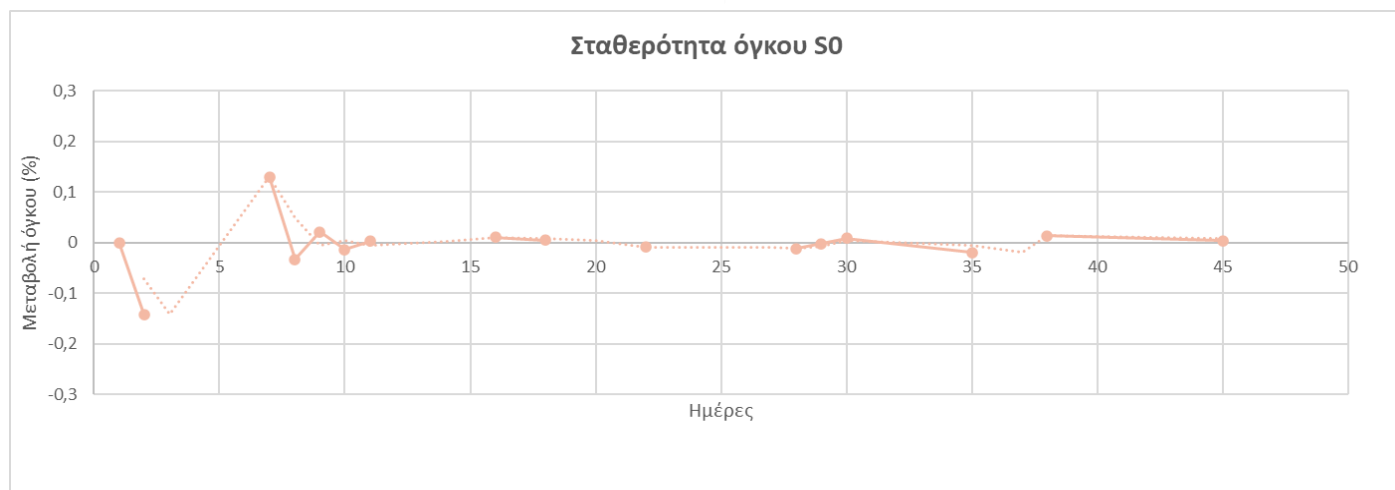
Σταθερότητα όγκου δοκιμίων σε ξηρές συνθήκες

Διαγράμματα 13: Σταθερότητα όγκου συνθέσεων σε ξηρές συνθήκες



Σταθερότητα όγκου δοκιμών σε υγρές συνθήκες

Διαγράμματα 14: Σταθερότητα όγκου συνθέσεων σε υγρές συνθήκες





Εικόνα 15: Αστοχία δοκιμίου σύνθεσης S30 στις ξηρές συνθήκες μετά από 8 ημέρες

Η πρώτη αυτή αστοχία πιθανόν να οφείλεται στην αυξημένη συστολή ξήρανσης που παρατηρείται συχνά σε υλικά με υψηλή περιεκτικότητα σε σκωρία. Η σκωρία, λόγω της διαφοροποιημένης σύστασης και της τάσης για αύξηση του πορώδους, μπορεί να προκαλέσει μεγαλύτερη απώλεια υγρασίας κατά τη φάση της ξήρανσης, οδηγώντας σε έντονες συστολές και, κατά συνέπεια, σε αυξημένο κίνδυνο ανάπτυξης μικρορωγμών και αστοχιών. Επιπλέον, η αντικατάσταση του τσιμέντου με σκωρία μπορεί να έχει επηρεάσει τη συνοχή και την εσωτερική δομή του κονιάματος, με αποτέλεσμα το υλικό να εμφανίζει χαμηλότερη αντίσταση στις παραμορφώσεις που προκαλούνται από την απομάκρυνση της υγρασίας. Αυτή η συμπεριφορά ενδέχεται να περιορίζει τη χρήση σκωρίας σε υψηλά ποσοστά αντικατάστασης του τσιμέντου, όταν τα δοκίμια πρόκειται να εκτεθούν σε συνθήκες ξηρής ωρίμανσης. Η συγκεκριμένη αστοχία υποδεικνύει ότι η σκωρία αυξάνει την ευαισθησία του υλικού στη συρρίκνωση ξήρανσης, κάτι που επιβεβαιώνεται και από τη βιβλιογραφία, όπου η χρήση σκωρίας συχνά συνδέεται με αυξημένη συρρίκνωση και πιθανότητα ανάπτυξης μικρορωγμών. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να διερευνηθούν εναλλακτικές αναλογίες και μέθοδοι συντήρησης, ώστε να βελτιωθεί η σταθερότητα όγκου του υλικού και να διασφαλιστεί η μηχανική του αντοχή σε συνθήκες ξηρής ωρίμανσης.

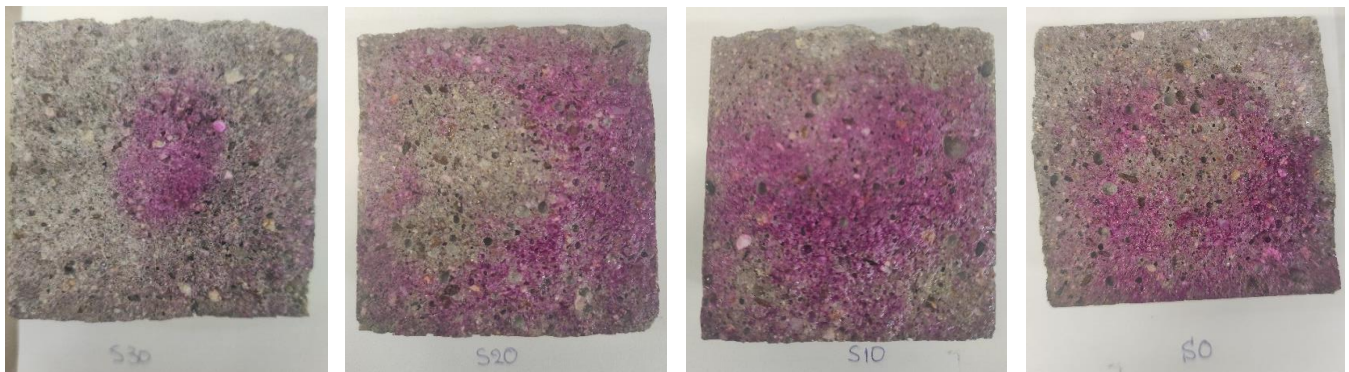
9.2.4 Ενανθράκωση

Στην παρούσα διπλωματική το πείραμα της ενανθράκωσης πραγματοποιήθηκε με 3 κύβους για κάθε σύνθεση. Πριν την διεξαγωγή του πειράματος οι κύβοι αφέθηκαν σε συνθήκες ωρίμανσης για 28 ημέρες, σύμφωνα με τον κανονισμό EN 12390-2. Στην συνέχεια, τοποθετούνται σε συνθήκες περιβάλλοντος για 14 ημέρες. Μετά από αυτό μεταφέρουμε τα δοκίμια σε ειδικό θάλαμο αποθήκευσης με υψηλή συγκέντρωση σε διοξείδιο του άνθρακα με ποσοστό $3 \pm 0,5$ % κατ' όγκο σε κανονικές συνθήκες (1013 mbar στους 25 °C), θερμοκρασία 20 ± 2 °C και σχετική υγρασία 57 ± 3 %. Τα δοκίμια μένουν σε αυτές τις συνθήκες για χρονικό διάστημα έως και 70 ημέρες. Αμέσως μετά την αποθήκευση των κύβων σε συνθήκες υψηλής συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα, αφαιρούνται σταδιακά τα δοκίμια μετά από καθορισμένα χρονικά διαστήματα των 7, 28 και 70 ημερών. Μετά το πέρας των καθορισμένων ημερών τα κυβικά δοκίμια αφαιρούνται από τον θάλαμο αποθήκευσης και χωρίζονται στη μέση,

στην συνέχεια η επιφάνειά τους καλύβεται με ένα διάλυμα με περιεκτικότητα 0,8 g σκόνης φαινολοφθαλείνης διαλυμένη σε 70 ml αιθανόλης και 30 ml απιονισμένου νερού. Με το διάλυμα αυτό θα παρατηρηθεί χρωματική μεταβολή του δοκιμίου για τιμή του pH μεταξύ 8-11. Σε περίπτωση που στο δοκίμιο δεν παρατηρηθεί χρωματική μεταβολή σημαίνει ότι έχει pH μικρότερο του 8 και είναι ένδειξη για ενανθράκωση του σκυροδέματος. Με την διεξαγωγή της διαδικασίας προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα:



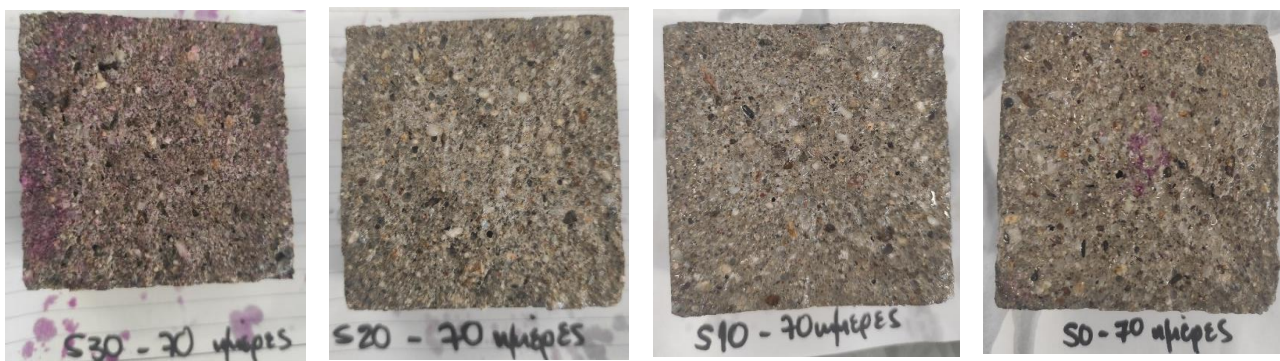
Εικόνα 16: Θάλαμος με υψηλή συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα



Εικόνα 17: Αποτελέσματα ενανθράκωσης μετά από 7 ημέρες



Εικόνα 18: Αποτελέσματα ενανθράκωσης μετά από 28 ημέρες



Εικόνα 19: Αποτελέσματα ενανθράκωσης μετά από 70 ημέρες

Παρατηρείται ότι μετά από την διεκπεραίωση του πειράματος έχουμε διαφορετικά αποτελέσματα ανάλογα με την σύνθεση και τις ημέρες διατήρησης των δοκιμίων στον θάλαμο με συγκέντρωση CO₂. Στην περίπτωση αφαίρεσης των δοκιμίων μετά από το χρονικό διάστημα των 7 ημερών από τον θάλαμο, διαπιστώνουμε μερική ενανθράκωση σε όλες τις συνθέσεις με μεγαλύτερο ποσοστό ενανθράκωσης να υπάρχει στο δοκίμιο της σύνθεσης S30. Μετά από 28 ημέρες παρατηρείται πλήρης ενανθράκωση όλων των δοκιμίων εκτός αυτού της σύνθεσης S0, που εν μέρη δεν έχει ενανθρακωθεί. Τέλος, μετά το πέρας των 70 ημερών όλες οι συνθέσεις έχουν ενανθρακωθεί πλήρως.

9.2.5 Ανθεκτικότητα σε κύκλους ψύξης- απόψυξης

Ο κανονισμός που περιλαμβάνει την μέθοδο δοκιμής για τον προσδιορισμό της αντοχής του σκυροδέματος σε περίπτωση ταχείας ψύξης και απόψυξης αναγράφεται στο ASTM C666 C666M-03. Η μέθοδος εξετάζει την συμπεριφορά του σκυροδέματος σε επαναλαμβανόμενους κύκλους ταχέως ψύξης και απόψυξης και πραγματοποιείται στο εργαστήριο με δύο διαφορετικές διαδικασίες: Η διαδικασία Α περιλαμβάνει την ταχεία ψύξη και απόψυξη στο νερό, ενώ η διαδικασία Β περιλαμβάνει ταχεία ψύξη στον αέρα και απόψυξη στο νερό.

Και οι δύο διαδικασίες προορίζονται για τον καθορισμό της μεταβολής των ιδιοτήτων αντοχής του σκυροδέματος κατά την έκθεση του σε κύκλους ψύξης και απόψυξης οι οποίοι περιγράφονται στη συγκεκριμένη διαδικασία. Καμία από τις δύο διαδικασίες όμως δεν μπορεί να προβλέψει την διάρκεια ζωής που αναμένεται να έχει ένας συγκεκριμένος τύπος σκυροδέματος. Στην παρούσα διπλωματική για το πείραμα ψύξης- απόψυξης χρησιμοποιήθηκε η διαδικασία Α, η οποία θα αναλυθεί και παρακάτω.

Η συσκευή που χρησιμοποιείται για τους κύκλους ψύξης και απόψυξης είναι ένας θάλαμος στον οποίο υποβάλλονται τα δείγματα με την συνοδεία κατάλληλου εξοπλισμού ώστε να υπάρχει συνεχή και αυτόματη διεξαγωγή καθορισμένων κύκλων εντός των θερμοκρασιακών απαιτήσεων. Σε περίπτωση που ο εξοπλισμός δεν λειτουργεί αυτόματα, θα πρέπει να ακολουθείται μια συνεχής 24ωρη χειροκίνητη

διαδικασία ενώ όταν ο εξοπλισμός δεν λειτουργεί να γίνεται ψύξη όλων των δειγμάτων. Η διάταξη της συσκευής πρέπει να διαθέτει τα απαραίτητα στηρίγματα για κάθε δείγμα και να καλύπτεται πλήρως από νερό τουλάχιστον 1 mm και όχι περισσότερο από 3 mm πάνω από την επιφάνεια του δοκιμίου, σε όλη τη διάρκεια των κύκλων ψύξης και απόψυξης. Θα πρέπει να αποφεύγονται άκαμπτα δοχεία, τα οποία ενδέχεται να προκαλέσουν βλάβη στα δοκίμια. Η μέση εναλλαγή της θερμοκρασίας πρέπει να είναι ομοιόμορφη κατά μήκος του δοκιμίου και εντός των 3°C, οποιαδήποτε χρονική στιγμή που πραγματοποιείται μέτρηση, σε οποιοδήποτε σημείο της επιφάνειας, σε οποιοδήποτε δοκίμιο, εκτός της περιόδου μετάβασης από την ψύξη στην απόψυξη και αντίστροφα. Η τοποθέτηση του κάθε δείγματος στον πυθμένα του δοχείου πρέπει να γίνεται με τρόπο τέτοιο ώστε κατά την εναλλαγή της θερμοκρασίας, η μετάδοση της θερμότητας να μην γίνεται απευθείας μέσω του πυθμένα του δοχείου στην επιφάνεια του δείγματος που έχει επαφή με τον πυθμένα, υποβάλλοντάς την μια επιφάνεια του δείγματος ουσιαστικά σε διαφορετικές συνθήκες από το υπόλοιπο. Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας των δοκιμίων κατά την διάρκεια των κύκλων ψύξης και απόψυξης πρέπει να συμμορφώνονται σύμφωνα με τις απαιτήσεις ελέγχου για παρόμοιο σκυρόδεμα με τα υπό δοκιμή δοκίμια, στα οποία τοποθετείται κατάλληλος εξοπλισμός για την μέτρηση της θερμοκρασίας. Απαιτείται συχνή αλλαγή της θέσης των δοκιμίων κατά τρόπο τέτοιο ώστε να καταγράφονται οι ακραίες τιμές της μεταβολής της θερμοκρασίας σε διαφορετικές θέσεις του θαλάμου δοκιμίων. Σε έναν κύκλο ψύξης-απόψυξης συνίσταται η εναλλαγή μεταξύ των συνθηκών οι οποίες θα διαμορφώνονται με μείωση της θερμοκρασίας των δοκιμίων από 4 σε -18°C για την ψύξη και με την αύξησή της από -18 σε 4°C για την απόψυξη, η εναλλαγή αυτή πρέπει να πραγματοποιείται σε χρονικό διάστημα μεταξύ των 2 με 5 ωρών.

Στη διαδικασία Α, τουλάχιστον το 25 % του χρόνου θα πρέπει να καταναλώνεται για την απόψυξη των δοκιμίων. Στο τέλος της διαδικασίας ψύξης η θερμοκρασία στο κέντρο των δοκιμίων πρέπει να είναι $-18 \pm 2^\circ\text{C}$ και στο τέλος της περιόδου απόψυξης να είναι $4 \pm 2^\circ\text{C}$, χωρίς κανένα δοκίμιο να φτάνει σε καμία χρονική στιγμή θερμοκρασία χαμηλότερη από -19°C και υψηλότερη από 6°C . Ο χρόνος που απαιτείται για να μειωθεί η θερμοκρασία από 3 σε -16°C στο κέντρο οποιουδήποτε δοκιμίου θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από το μισό της διάρκειας της περιόδου ψύξης ενώ ο χρόνος που απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία στο κέντρο οποιουδήποτε δοκιμίου από -16 σε 3°C θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από το μισό της διάρκειας του χρόνου απόψυξης. Για να μπορεί να πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ των δοκιμίων θα πρέπει ο χρόνος που απαιτείται να μεταβεί η θερμοκρασία από 2 σε -12°C στο κέντρο κάθε δοκιμίου να μην υπερβαίνει το ένα έκτο του χρόνου ψύξης οποιοδήποτε δοκιμίου ενώ ο αντίστοιχος χρόνος που απαιτείται για τη μεταβολή της θερμοκρασίας από -12 σε 2°C δεν θα πρέπει να μην υπερβαίνει το ένα τρίτο της περιόδου απόψυξης που απαιτείται για οποιοδήποτε δοκίμιο. Η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας στο κέντρο ενός δοκιμίου και της θερμοκρασίας στην επιφάνειά του δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να υπερβαίνει τους 28°C . Η περίοδος μετάβασης μεταξύ των φάσεων ψύξης και απόψυξης ενός κύκλου δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 10 λεπτά.

Τα υλικά για την κατασκευή των δοκιμών σκυροδέματος στο εργαστήριο πρέπει να ακολουθούν τις προδιαγραφές τυποποιημένων μεθόδων, ενώ τα δοκίμια που λαμβάνονται από κοπή σκληρυμένου σκυροδέματος πρέπει να συμμορφώνονται με τον κανονισμό C 823. Για τη συγκεκριμένη μέθοδο, τα δοκίμια θα πρέπει να είναι πρισματικά ή κυλινδρικά, με διαστάσεις διατομής από 75 mm έως 125 mm και μήκος από 275 mm έως 405 mm. Η ωρίμανση πρέπει να γίνεται σύμφωνα με τον κανονισμό C 192/C 192M και τις προδιαγραφές C 490. Τα δοκίμια πρέπει να συντηρούνται σε συνθήκες υγρασίας τουλάχιστον ίσες με αυτές της κατασκευής τους, κάτι που μπορεί να επιτευχθεί με τύλιγμα σε πλαστικό ή άλλο υλικό. Τα δοκίμια αποθηκεύονται σε κορεσμένο ασβεστόνερο και υποβάλλονται σε ωρίμανση για 14 ημέρες πριν τη διαδικασία δοκιμών ή σε υγρασία για 48 ώρες, εάν πρόκειται για κομμένα δείγματα. Η θερμοκρασία κατά τις δοκιμές ψύξης-απόψυξης πρέπει να κυμαίνεται σε συγκεκριμένα όρια, με απόκλιση όχι μεγαλύτερη από -1°C ή $+2^{\circ}\text{C}$. Η προετοιμασία των δοκιμών περιλαμβάνει τη διεκπεραίωση σονομέτρησης, προσδιορισμό μάζας, μέσου μήκους και διαστάσεων διατομής σύμφωνα με τον κανονισμό C 215.

Για την έναρξη της διαδικασίας ψύξης- απόψυξης, τοποθετούνται τα δοκίμια σε νερό το οποίο θεωρείται η αρχή της φάσης απόψυξης του συνολικού κύκλου. Έπειτα, τα δοκίμια τοποθετούνται στο θάλαμο ψύξης και αφαιρούνται από αυτόν ανά διαστήματα ώστε να πραγματοποιείται η απόψυξη. Μετά από όχι περισσότερους από 36 κύκλους ψύξης- απόψυξης και ανά τακτά χρονικά διαστήματα για κάθε δοκίμιο γίνεται μέτρηση με το σονόμετρο, η καταγραφή της μάζας και προαιρετικά των διαστάσεων του. Για την εξασφάλιση της πλήρους απόψυξης και της καθορισμένης θερμοκρασίας των δοκιμών, τοποθετούνται σε δεξαμενή σκλήρυνσης ή αφαιρούνται από την συσκευή ψύξης για αρκετό χρόνο. Επίσης θα πρέπει να αποφευχθεί η απώλεια υγρασίας των δοκιμών όταν αυτά βρίσκονται εκτός της συσκευής. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί γυρνώντας τα και αλλάζοντας την διάταξή τους. Για τη διαδικασία A η οποία πραγματοποιείται στην παρούσα διπλωματική, το δοχείο ξεπλένεται και προστίθεται καθαρό νερό. Τα δοκίμια επιστρέφονται είτε σε τυχαίες θέσεις στη συσκευή είτε σε θέσεις σύμφωνα με κάποιο προκαθορισμένο σύστημα εναλλαγής θέσεων που εξασφαλίζει ότι κάθε δοκίμιο σε οποιοδήποτε χρονικό διάστημα εκτίθεται στις κατάλληλες συνθήκες καθ' όλη την διάρκεια της διαδικασίας ψύξης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε δοκίμιο έως ότου υποβληθεί συνολικά σε 300 κύκλους ή έως ότου το σχετικό δυναμικό μέτρο ελαστικότητάς του φθάσει το 60 % του αρχικού μέτρου ελαστικότητας. Όταν η ακολουθία των κύκλων ψύξης και απόψυξης πρέπει να διακοπεί για κάποιο λόγο, τα δείγματα παραμένουν σε συνθήκες ψύξης. Παρακάτω ενδείκνυται ο υπολογισμός του σχετικού μέτρου ελαστικότητας και του συντελεστή ανθεκτικότητας.



Εικόνα 20: Τοποθέτηση των κυβικών δοκιμίων σε δοχείο με νερό για την πραγματοποίηση του ελέγχου ψύξης- απόψυξης

Υπολογισμός του σχετικού δυναμικού μέτρου ελαστικότητας:

$$Pc = (n1^2 / n^2) * 100$$

όπου:

Pc = σχετικό δυναμικό μέτρο ελαστικότητας, μετά από c κύκλους ψύξης-απόψυξης, εκφρασμένο σε ποσοστό,

n = θεμελιώδης εγκάρσια συχνότητα στους 0 κύκλους ψύξης-απόψυξης, και

n1 = θεμελιώδης εγκάρσια συχνότητα μετά από c κύκλους κατάψυξη και απόψυξη.

Συντελεστής ανθεκτικότητας:

$$DF = PN/M$$

όπου:

DF = συντελεστής ανθεκτικότητας του δοκιμίου,

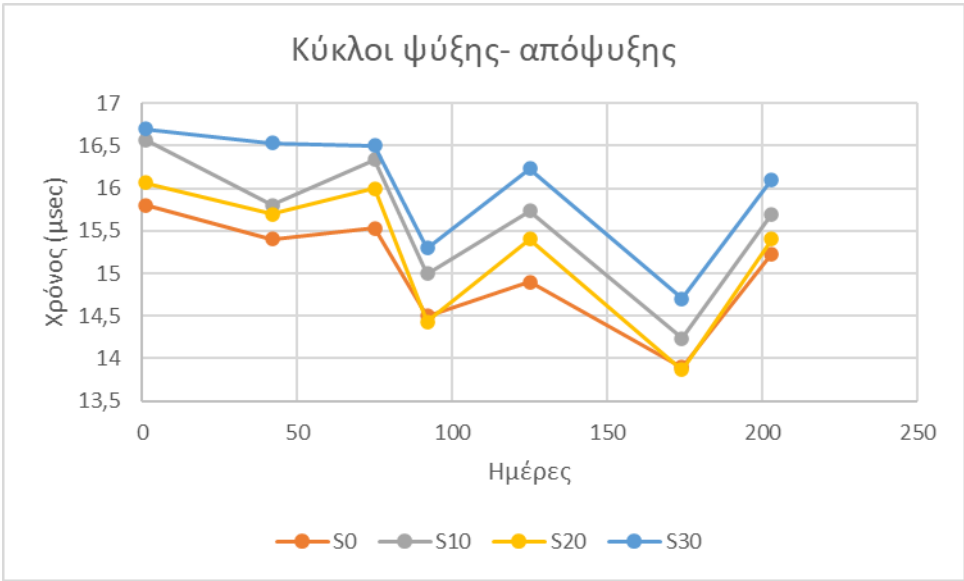
P = σχετικό δυναμικό μέτρο ελαστικότητας σε N κύκλους, %,

N = αριθμός κύκλων μέχρι την διακοπή της δοκιμής, ο οποίος αντιστοιχεί όταν το P φτάνει την καθορισμένη ελάχιστη τιμή του, δηλαδή σε τιμή μικρότερη από το 60% της αρχικής της, ή στον καθορισμένο αριθμό κύκλων στους οποίους πρέπει να τερματιστεί η διαδικασία, δηλαδή όταν φτάσουμε τους 300 κύκλους, όποιο από τα δύο απαιτεί τους λιγότερους κύκλους θα είναι αυτό που θα καθορίσει την τιμή του N, και

M = καθορισμένος αριθμός κύκλων στους οποίους η διαδικασία θα τερματιστεί.

Κύκλοι ψύξης- απόψυξης							
Ημερομηνία:	15/3/2024	25/4/2024	28/5/2024	14/6/2024	17/7/2024	4/9/2024	3/10/2024
Ημέρα	1	42	75	92	125	174	203
	t						
S0	15,8	15,4	15,5	14,5	14,9	13,9	15,2
S10	16,6	15,8	16,3	15	15,7	14,2	15,7
S20	16,1	15,7	16	14,4	15,4	13,9	15,4
S30	16,7	16,5	16,5	15,3	16,2	14,7	16,1

Πίνακας 16: Αποτελέσματα κύκλων ψύξης- απόψυξης, τιμή μέσου όρου τριών δοκιμών για κάθε σύνθεση, ο χρόνος υπολογίστηκε με το σονόμετρο



Διάγραμμα 15: Απεικόνιση αποτελεσμάτων Πίνακα 16 των κύκλων ψύξης- απόψυξης

Αρχική Φάση (0-50 ημέρες): Οι αρχικές τιμές σονόμετρου (περίπου 16,5 μsec) υποδηλώνουν ότι το υλικό είναι αρχικά σε κατάσταση όπου η μετάδοση υπερήχων απαιτεί περισσότερο χρόνο. Αυτό μπορεί να υποδεικνύει υψηλότερη πυκνότητα ή αυξημένη εσωτερική τάση στο υλικό λόγω θερμικής καταπόνησης.

Μείωση Χρόνου (50-75 ημέρες): Η πτωτική τάση του χρόνου σονόμετρου υποδηλώνει μείωση των εσωτερικών τάσεων του υλικού, πιθανώς λόγω αναδιάταξης της

μικροδομής ή μερικής ανάκαμψης από τη θερμική καταπόνηση. Η μείωση αυτή είναι πιο εμφανής για τις κατηγορίες S0 και S20, κάτι που μπορεί να υποδεικνύει ότι τα συγκεκριμένα δοκίμια είναι πιο ανθεκτικά στην καταπόνηση αυτή.

Αυξομειώσεις σε μεσοπρόθεσμη κλίμακα (75-150 ημέρες): Η μετέπειτα αύξηση του χρόνου μπορεί να οφείλεται σε φαινόμενα κόπωσης ή εσωτερικής ρωγμάτωσης του υλικού, που καθυστερούν τη μετάδοση των υπερήχων. Η κατηγορία S30, η οποία παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αύξηση του χρόνου, ενδέχεται να επηρεάζεται περισσότερο από την επαναλαμβανόμενη θερμική καταπόνηση.

Τελική φάση (150-200 ημέρες): Στο τέλος της παρατήρησης, οι χρόνοι όλων των κατηγοριών τείνουν να σταθεροποιούνται κοντά στις 15,5 μsec , γεγονός που μπορεί να υποδεικνύει ότι τα υλικά έχουν φτάσει σε ένα σημείο ισορροπίας, όπου η εσωτερική μικροδομή έχει προσαρμοστεί πλήρως στους θερμικούς κύκλους.

10. Συμπεράσματα

Η αντικατάσταση τσιμέντου με σκωρία προσφέρει περιβαλλοντικά οφέλη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συγκεκριμένες εφαρμογές, αλλά η προσεκτική διαχείριση του ποσοστού σκωρίας είναι απαραίτητη για τη διατήρηση των επιθυμητών μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των κονιαμάτων.

10.1 Στόχος

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η διερεύνηση της επίδρασης της αντικατάστασης τσιμέντου με σκωρία σε κονιάματα, με σκοπό τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών και των φυσικών ιδιοτήτων τους και την δυνητική χρήση της σκωρίας ως κονία σε πραγματικά έργα. Οι κύριες μετρήσεις περιελάμβαναν τη θλιπτική και καμπτική αντοχή, το πορώδες, την τριχοειδή ανύψωση, την ανθεκτικότητα στην διείδυση σε χλωριόντα και σε κύκλους ψύξης-απόψυξης και τη σταθερότητα όγκου.

10.2 Κύρια ευρήματα

1. Στο **δυναμικό μέτρο ελαστικότητας** παρατηρείται μικρή μείωση με την αύξηση του ποσοστού της σκωρίας.
2. Η **καμπτική αντοχή** παρουσιάζει μια ελαφριά βελτίωση σε χαμηλά ποσοστά σκωρίας, ειδικά στο S10. Η καμπτική αντοχή του S10 και S20, ίση ή υψηλότερη από την τιμή του δείγματος αναφοράς S0. Ωστόσο, σε υψηλότερα ποσοστά σκωρίας, όπως στο S30, παρατηρείται μείωση αυτής.

3. Η **θλιπτική αντοχή** των κονιαμάτων μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού σκωρίας, ιδιαίτερα για ποσοστό σκωρίας 30%. Ωστόσο, στα κονιάματα με χαμηλότερα ποσοστά σκωρίας, παρατηρείται ότι η μείωση της θλιπτικής αντοχής είναι μικρότερη και σε μερικές περιπτώσεις αποδεκτή για εφαρμογές με ελαφρώς μειωμένες απαιτήσεις αντοχής. Η απαίτηση δραστηκότητας με τσιμέντο όπως αναφέρεται στους κανονισμούς ASTM C311 και ASTM C618 πληρείται, οπότε το υλικό μπορεί να χαρακτηριστεί ως ποζολανικό.
4. Το **πορώδες** αυξήθηκε σε σημαντικό βαθμό με την αύξηση της σκωρίας, επηρεάζοντας και άλλες ιδιότητες, όπως τη θλιπτική αντοχή, τη διείσδυση σε χλωριόντα και τη τριχοειδής ανύψωση. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην τραχεία μικροδομή της σκωρίας που μπορεί να εγκλωβίζει φυσαλίδες αέρα.
5. Στον έλεγχο της **τριχοειδούς ανύψωσης** το κονίαμα με υψηλό ποσοστό σκωρίας (S30) παρουσιάζει ταχύ ρυθμό τριχοειδούς ανύψωσης, κάτι που σημαίνει ότι το υλικό είναι περισσότερο ευάλωτο σε απορρόφηση νερού, συγκριτικά με το S0. Για ποσοστά αντικατάστασης τσιμέντου 10 και 20% με σκωρίας ο ρυθμός εξέλιξης της τριχοειδούς ανύψωσης είναι ελάχιστα μεγαλύτερος σε σχέση με αυτό που δεν περιέχει σκωρία.
6. Όλα τα δείγματα, ανεξαρτήτως του ποσοστού σκωρίας, εμφάνισαν υψηλή **διεισδυτικότητα σε ιόντα χλωρίου**, με το S30 να εμφανίζει τη μεγαλύτερη τιμή. Η επαρκής προστασία του χάλυβα οπλισμού σε μείγματα με σκωρία χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.
7. Όσον αφορά τη **σταθερότητα όγκου** σε ξηρές και σε υγρές συνθήκες δεν υπήρχε σχετική διακύμανση στο σύνολο των δοκιμών και η χρήση της σκωρίας δεν φαίνεται να επιφέρει σημαντικές μεταβολές στη βραχυχρόνια σταθερότητα όγκου των κονιαμάτων.
8. Η διαδικασία των κύκλων **ψύξης απόψυξης** έδειξε ότι τα δοκίμια με περιεκτικότητα σε σκωρία δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από αυτό.

10.3 Σχολιασμός

1. Η χρήση σκωρίας σε ποσοστά 10% (κυρίως) και 20% φαίνεται να βελτιώνει την καμπτική αντοχή, γεγονός που υποδηλώνει πιθανή βελτίωση της διεπιφάνειας μεταξύ των αδρανών και της τσιμεντόπαστας. Αυτή η βελτίωση μπορεί να οφείλεται είτε στην αυξημένη τραχύτητα είτε στην προώθηση της ενυδάτωσης (φαινόμενο filler και πιθανή ποζολανική δράση). Ωστόσο, το φαινόμενο αντιστρέφεται με τη χρήση σκωρίας σε ποσοστό 30%, ειδικά στις πρώιμες αντοχές, κάτι που είναι αναμενόμενο και συμφωνεί με τα δεδομένα της βιβλιογραφίας.

2. Οι αναλογίες σκωρίας 10-20% φαίνεται να προσφέρουν μια καλή ισορροπία μεταξύ διατήρησης της θλιπτικής αντοχής και της περιβαλλοντικής/ οικονομικής αξίας της χρήσης σκωρίας.

3. Σύμφωνα με τις τιμές, παρατηρείται μείωση του πορώδους με την πάροδο του χρόνου, η οποία αποδίδεται στην πρόοδο της ενυδάτωσης. Επιπλέον, καταγράφεται αύξηση του πορώδους με την άνοδο του ποσοστού της σκωρίας, γεγονός που οφείλεται στο εγγενές πορώδες της ίδιας της σκωρίας. Αξιοσημείωτο είναι ότι η παρουσία σκωρίας δεν φαίνεται να εμποδίζει τη διαδικασία της ενυδάτωσης. Τα ευρήματα αυτά αναμένεται να επιβεβαιωθούν και από τις περαιτέρω μετρήσεις του πορώδους, ενισχύοντας την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων.

4. Η χρήση σκωρίας φαίνεται να αυξάνει τον κίνδυνο διεύθυνσης χλωριοϊόντων, όπως έχει τεκμηριωθεί και στη σχετική βιβλιογραφία. Η εκτίμηση του κινδύνου αυτού βασίζεται σε έμμεση μεθοδολογία, γεγονός που υποδεικνύει την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα. Στο πλαίσιο μελλοντικών μελετών, θα ήταν σκόπιμο να πραγματοποιηθούν μακροχρόνιες δοκιμές εμποτισμού των δειγμάτων σε διαλύματα κορεσμένα σε άλατα, προκειμένου να αποσαφηνιστεί ο βαθμός και η ταχύτητα διεύθυνσης των χλωριοϊόντων στο υλικό.

5. Τα αποτελέσματα από τον έλεγχο σταθερότητας όγκου υποδεικνύουν ότι η χρήση σκωρίας δεν προκαλεί σημαντικές διαφοροποιήσεις στη σταθερότητα του υλικού κατά τις πρώτες 40-50 ημέρες. Η συμπεριφορά αυτή υποδηλώνει ότι η ενσωμάτωση σκωρίας δεν επηρεάζει άμεσα την ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων και την τάση για συστολή ή διαστολή του υλικού σε αυτό το χρονικό διάστημα.

6. Η χρήση σκωρίας φαίνεται να επιταχύνει τη διαδικασία ενανθράκωσης του σκυροδέματος. Η επίδραση αυτή μπορεί να αποδοθεί είτε στο αυξημένο πορώδες του υλικού, είτε στο χαμηλότερο pH της σκωρίας συγκριτικά με το τσιμέντο. Ανεξαρτήτως του μηχανισμού που επικρατεί, τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η χρήση σκωρίας είναι καταλληλότερη για σκυροδέματα που δεν περιέχουν οπλισμό από χάλυβα, ώστε να περιοριστούν τυχόν επιπτώσεις από τη μειωμένη ανθεκτικότητα σε ενανθράκωση.

Βιβλιογραφία

- [1] Li, Yinglong, Faqi Liu, Feng Yu, and Tao Du. 2024. 'A Review of the Application of Steel Slag in Concrete'. Structures 63.
- [2] Liu, Shuhua, and Lihua Li. 2014. 'Influence of Fineness on the Cementitious Properties of Steel Slag'. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 117(2):629–34. doi: 10.1007/s10973-014-3789-0.
- [3] Mahoutian, Mehrdad, Yixin Shao, Alfonso Mucci, and Benoit Fournier. 2015. 'Carbonation and Hydration Behavior of EAF and BOF Steel Slag Binders'. Materials and Structures/Materiaux et Constructions 48(9):3075–85. doi: 10.1617/s11527-014-0380-x.
- [4] Mohamad, Nabilla, Khairunisa Muthusamy, Rahimah Embong, Andri Kusbiantoro, and Mohd Hanafi Hashim. 2021. 'Environmental Impact of Cement Production and Solutions: A Review'. Pp. 741–46 in Materials Today: Proceedings. Vol. 48. Elsevier Ltd.
- [5] Nunes, Vitor A., and Paulo H. R. Borges. 2021. 'Recent Advances in the Reuse of Steel Slags and Future Perspectives as Binder and Aggregate for Alkali-Activated Materials'. Construction and Building Materials 281.
- [6] Wang, Qiang, Pei Yu Yan, and Song Han. 2011. 'The Influence of Steel Slag on the Hydration of Cement during the Hydration Process of Complex Binder'. Science China Technological Sciences 54(2):388–94. doi: 10.1007/s11431-010-4204-0.
- [7] Yan, Peiyu, Guidong Mi, and Qiang Wang. 2014. 'A Comparison of Early Hydration Properties of Cement-Steel Slag Binder and Cement-Limestone Powder Binder'. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 115(1):193–200. doi: 10.1007/s10973-013-3360-4.
- [8] Zhang, Jian, Shucai Li, and Zhaofeng Li. 2020. 'Investigation the Synergistic Effects in Quaternary Binder Containing Red Mud, Blast Furnace Slag, Steel Slag and Flue Gas Desulfurization Gypsum Based on Artificial Neural Networks'. Journal of Cleaner Production 273. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122972.
- [9] Zhang, Ting, Baoguo Ma, Siyao Wu, Zihao Jin, and Jie Wang. 2022. 'Mechanical Properties and Hydration Process of Steel Slag-Cement Binder Containing Nano-SiO₂'. Construction and Building Materials 314. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125660.
- [10] Αναστασίου Ελευθέριος Κ., 2009. Αξιοποίηση σκουριών χαλυβουργίας και ιπτάμενων λιγνιτικών τεφρών στην παραγωγή ειδικών σκυροδεμάτων. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

- [11] ASTM C666/C 666M - 03. 2003. Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing.
- [12] ASTM C989-09. 2009. Standard Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag Cement for Use in Concrete and Mortars.
- [13] ASTM C1202-12. 2012. “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration 1.” doi: 10.1520/C1202-12.
- [14] EN 12390-12. 2020. “Testing Hardened Concrete - Part 12: Determination of the Carbonation Resistance of Concrete - Accelerated Carbonation Method.”
- [15] ΕΛΟΤ. 2009α. ΤΠ 1501-05-03-03-00.
- [16] ΕΛΟΤ. 2009β. ΤΠ 1501-08-05-01-04.
- [17] ΕΛΟΤ EN 197 -1. 2000. “Τσιμέντο - Μέρος 1: Σύνθεση, Προδιαγραφές Και Κριτήρια Συμμόρφωσης Κοινών Τσιμέντων.”
- [18] National Slag Association. 2001. ‘Steel Slag- a Premier Construction Aggregate’.
- [19] Akinmusuru, Joseph O. 1991. Potential Beneficial Uses of Steel Slag Wastes for Civil Engineering Purposes.
- [20] Arribas, I., I. Vegas, J. T. San-José, and Juan M. Manso. 2014. ‘Durability Studies on Steelmaking Slag Concretes’. Materials and Design 63:168–76. doi: 10.1016/j.matdes.2014.06.002.
- [21] Beshr, H., A. A. Almusallam, and M. Maslehuddin. 2003. Effect of Coarse Aggregate Quality on the Mechanical Properties of High Strength Concrete. Vol. 17.
- [22] Brand, Alexander S., and Jeffery R. Roesler. 2015. ‘Steel Furnace Slag Aggregate Expansion and Hardened Concrete Properties’. Cement and Concrete Composites 60:1–9. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2015.04.006.
- [23] Faleschini, Flora, Katya Brunelli, Mariano Angelo Zanini, Manuele Dabalà, and Carlo Pellegrino. 2016. ‘Electric Arc Furnace Slag as Coarse Recycled Aggregate for Concrete Production’. Journal of Sustainable Metallurgy 2(1):44–50. doi: 10.1007/s40831-015-0029-1.
- [24] Liapis, Alexandros, Eleftherios K. Anastasiou, Michail Papachristoforou, and Ioanna Papayianni. 2018. ‘Feasibility Study and Criteria for EAF Slag Utilization in Concrete Products’. Journal of Sustainable Metallurgy 4(1):68–76. doi: 10.1007/s40831-017-0152-2.
- [25] Maslehuddin, M., Alfarabi M. Sharif, M. Shameem, M. Ibrahim, and MS Barry. 2003. Comparison of Properties of Steel Slag and Crushed Limestone Aggregate Concretes. Vol. 17.
- [26] Mo, Liwu, Feng Zhang, Min Deng, Fei Jin, Abir Al-Tabbaa, and Aiguo Wang. 2017. ‘Accelerated Carbonation and Performance of Concrete Made with Steel Slag as

Binding Materials and Aggregates'. *Cement and Concrete Composites* 83:138–45. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.07.018.

- [27] Montgomery, D. G., and G. Wang. 1991. INSTANT-CHILLED STEEL SLAG AGGREGATE IN CONCRETE-STRENGTH RELATED PROPERTIES. Vol. 21.
- [28] Qasrawi, Hisham, Faisal Shalabi, and Ibrahim Asi. 2009. 'Use of Low CaO Unprocessed Steel Slag in Concrete as Fine Aggregate'. *Construction and Building Materials* 23(2):1118–25. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.06.003.
- [29] Subathra Devi, V., and B. K. Gnanavel. 2014. 'Properties of Concrete Manufactured Using Steel Slag'. Pp. 95–104 in *Procedia Engineering*. Vol. 97. Elsevier Ltd.
- [30] Baalamurugan, J., V. Ganesh Kumar, S. Chandrasekaran, S. Balasundar, B. Venkatraman, R. Padmapriya, and V. K. Bupesh Raja. 2019. 'Utilization of Induction Furnace Steel Slag in Concrete as Coarse Aggregate for Gamma Radiation Shielding'. *Journal of Hazardous Materials* 369:561–68. doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.02.064.
- [31] Campos, Stefanie A., Maria F. C. Rafael, and Antônio E. B. Cabral. 2018. 'Evaluation of Steel Slag of Companhia Siderúrgica Do Pecém Replacing Fine Aggregate on Mortars'. Pp. 145–52 in *Procedia Structural Integrity*. Vol. 11. Elsevier B.V.
- [32] Chen, Ying-Liang, Juu-En Chang, Yi-Chieh Lai, Ming-Sheng Ko, and Yi-Hsin Chen. 2018. 'Recycling of Steel Slag Fines for the Production of Autoclaved Aerated Concrete (AAC)'. *Ce/Papers* 2(4):445–49. doi: 10.1002/cepa.849.
- [33] Guo, Yongchang, Jianhe Xie, Jianbai Zhao, and Kexian Zuo. 2019. 'Utilization of Unprocessed Steel Slag as Fine Aggregate in Normal- and High-Strength Concrete'. *Construction and Building Materials* 204:41–49. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.178.
- [34] Guo, Yongchang, Jianhe Xie, Wenyu Zheng, and Jianglin Li. 2018. 'Effects of Steel Slag as Fine Aggregate on Static and Impact Behaviours of Concrete'. *Construction and Building Materials* 192:194–201. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.129.
- [35] Lang, Lei, Haijuan Duan, and Bing Chen. 2019. 'Properties of Pervious Concrete Made from Steel Slag and Magnesium Phosphate Cement'. *Construction and Building Materials* 209:95–104. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.123.
- [36] Li, Wei, Lei Lang, Da Wang, Yang Wu, and Fudong Li. 2018. 'Investigation on the Dynamic Shear Modulus and Damping Ratio of Steel Slag Sand Mixtures'. *Construction and Building Materials* 162:170–80. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.026.
- [37] Prasad, Brajkishor, Virendra Kumar, and Prince Singh. 2020. 'Influence of Linz Donawitz Slag Aggregates on Strength Development of Concrete'. Pp. 633–38 in *Lecture Notes in Civil Engineering*. Vol. 54. Springer.

- [38] Qasrawi, Hisham. 2018. 'Fresh Properties of Green SCC Made with Recycled Steel Slag Coarse Aggregate under Normal and Hot Weather'. *Journal of Cleaner Production* 204:980–91. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.09.075.
- [39] Rooholamini, H., R. Sedghi, B. Ghobadipour, and M. Adresi. 2019. 'Effect of Electric Arc Furnace Steel Slag on the Mechanical and Fracture Properties of Roller-Compacted Concrete'. *Construction and Building Materials* 211:88–98. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.223.
- [40] Roychand, Rajeev, Biplob Kumar Pramanik, Guomin Zhang, and Sujeeva Setunge. 2020. 'Recycling Steel Slag from Municipal Wastewater Treatment Plants into Concrete Applications – A Step towards Circular Economy'. *Resources, Conservation and Recycling* 152. doi: 10.1016/j.resconrec.2019.104533.
- [41] Saxena, Shekhar, and A. R. Tembhurkar, 2018. 'Impact of Use of Steel Slag as Coarse Aggregate and Wastewater on Fresh and Hardened Properties of Concrete'. *Construction and Building Materials* 165:126–37. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.030.
- [42] Shi, C. & Qian, J. 2000. 'High performance cementing materials from industrial slags-a review. *Resources, Conservation and Recycling*.
- [43] Tsakiridis, P.E. Papadimitriou, G.D., Tsivilis, S. & Koroneos, C. ,2008. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. *Journal of Hazardous Materials*.
- [44] Qing, Y., Huxing, C., Yuqing, W., Shangxian, W. & Zonghan, L. ,2004. Effect of MgO and gypsum content on long-term expansion of low heat Portland slag cement with slight expansion. *Cement and Concrete Composites*.
- [45] Emery, J.J. ,1975. Waste and byproduct utilization in highway construction. *Resource, Recovery and Conservation*.
- [46] Huang, Y., Bird, R.N. & Heidrich, O. ,2007. A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Resources, Conservation and Recycling*.
- [47] Merkel, Th. ,2007. New field of application - Steel slag for railway tracks. *Proceedings of the 5th European Slag Conference: Slag Products-Providing Sustainable Solutions for the Built Environment*. 19th -21st September 2007.
- [48] Mroueh, U.M. & Eskola, P. ,2001. Life-cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction. *Waste Management*.

