

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΡΟΣΘΕΤΩΝ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ΣΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Χουσιίδης Χ. Νικόλαος
Πτυχιούχος Γεωλόγος Ε.Κ.Π.Α,
MS.c Επιστήμη & Τεχνολογία Υλικών

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:

Γ. ΜΠΑΤΗΣ

ΟΜΟΤΙΜΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π

Αθήνα, 2015

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Γ. Μπατής, Καθηγητής Ε.Μ.Π., Επιβλέπων
Α. Μοροπούλου, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.
Κ. Σίδερης, Αναπληρωτής Καθηγητής Δ.Π.Θ

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή

Γ. Μπατής, Καθηγητής Ε.Μ.Π., Επιβλέπων
Α. Μοροπούλου, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.
Κ. Σίδερης, Αναπληρωτής Καθηγητής Δ.Π.Θ
Σ. Τσιβιλής, Καθηγητής Ε.Μ.Π
Χ. Ζέρης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π
Μ. Μπεάζη – Κασιώτη, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π
Ε. Μπαδογιάννης, Λέκτορας Ε.Μ.Π

*Στους γονείς μου,
Χρήστο και Χρυσή*

«Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανώτατη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα. (Ν.5343/1932, Άρθρο 202)»

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε, στον Τομέα III Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. σε συνεργασία με το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών & Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Κύπρου και επιβλέποντα τον Ομότιμο Καθηγητή Ε.Μ.Π. Γεώργιο Μπατή. Στο Εργαστήριο Φυσικοχημείας και Εφαρμοσμένης Ηλεκτροχημείας του Τομέα III έχουν πραγματοποιηθεί επί σειρά ετών τόσο μελέτες ανθεκτικότητας έναντι της διάβρωσης κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, όσο και ανάπτυξη νέων σύνθετων δομικών υλικών και πρόσθετων σκυροδέματος. Επίσης, παρουσιάζει έντονη ερευνητική δραστηριότητα σε θέματα σχετικά με τη διάβρωση του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος, αλλά και στις μεθόδους εκτίμησης της διάβρωσης δομικών υλικών.

Αντικείμενο της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής είναι η πειραματική διερεύνηση ειδικών ορυκτών πρόσμικτων ως αντικατάστατα μέρους του τσιμέντου, τα οποία αποτελούν παραπροϊόντα της χημικής βιομηχανίας για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας και την προστασία από την διάβρωση του οπλισμένου σκυροδέματος. Η Διδακτορική Διατριβή απαρτίζεται από:

Το θεωρητικό μέρος, όπου γίνεται συνολική ανασκόπηση των δομικών συστατικών και στοιχείων που αποτελούν το οπλισμένο σκυροδέμα. Αναλύονται οι παράγοντες που επιδρούν στη διάβρωση του οπλισμένου σκυροδέματος καθώς και οι μέθοδοι προστασίας του. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα ορυκτά πρόσθετα/πρόσμικτα τα οποία προστίθενται στο οπλισμένο σκυροδέμα με σκοπό τη βελτίωση των φυσικοχημικών και μηχανικών ιδιοτήτων καθώς και στην προστασία του ΧΟΣ. Επίσης, αναλύονται οι παράγοντες που επιδρούν στην υποβάθμιση των ιδιοτήτων του Οπλισμένου Σκυροδέματος κατά την παραμονή του στην ατμόσφαιρα αλλά και σε περιβάλλον υψηλής συγκέντρωσης Cl^- και SO_4^{2-} , καθώς επίσης και οι μέθοδοι προστασίας του.

Το πειραματικό μέρος, όπου παρουσιάζονται τα υλικά, οι μέθοδοι εκτίμησης της διάβρωσης, οι πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν, οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών και η συζήτηση των αποτελεσμάτων για κάθε μια από τα στάδια εξέτασης του αντικειμένου της διδακτορικής διατριβής.

Τη συζήτηση αποτελεσμάτων, όπου αναλύονται τα στάδια του πειραματικού μέρους της διδακτορικής διατριβής για κάθε πρόσθετο που χρησιμοποιήθηκε ξεχωριστά και γίνεται συσχέτιση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων με τη διεθνή και Ελληνική βιβλιογραφία,

Τα συμπεράσματα, όπου γίνεται η συνολική αποτίμηση των αποτελεσμάτων του πειραματικού μέρους της Διδακτορικής Διατριβής.

Τις προτάσεις συνέχισης της έρευνας, όπου παρουσιάζονται προτάσεις συνέχισης της έρευνας όσον αφορά την προστασία από τη διάβρωση του Χ.Ο.Σ και τη βελτίωση της ποιότητας του Σκυροδέματος,

Η εκπόνηση και η ολοκλήρωση της παρούσας διδακτορικής διατριβής θα ήταν αδύνατη χωρίς τη συμβολή και τη συνεργασία πλήθους ατόμων τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω ονομαστικά:

Τον Ομότιμο Καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. Γεώργιο Μπατή, επιβλέποντα της Διδακτορικής διατριβής, για την εμπιστοσύνη με την οποία με περιέβαλλε τόσο κατά την ανάθεση, όσο και κατά την εξέλιξη της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής, καθώς και για την επιστημονική υποστήριξη που διαρκώς μου παρείχε και η οποία αποτέλεσε προϋπόθεση για την περαίωση της έρευνας. Επίσης θα ήθελα να τον ευχαριστήσω θερμά, για την κατανόηση και την εμπιστοσύνη που μου έχει δείξει καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας από την ανάθεση και τη διεξαγωγή της Μεταπτυχιακής εργασίας μέχρι την παρούσα Διδακτορική Διατριβή.

Τα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής την Καθηγήτρια κ. Αντωνία Μοροπούλου και τον Αναπληρωτή καθηγητή κ. Κοσμά Σίδηρη για την καθοδήγηση που μου παρείχαν στην εκπόνηση της Διδακτορικής Διατριβής.

Τα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής, την Καθηγήτρια Μαργαρίτα Μπεάζη - Κατσιώτη, τον Καθηγητή Σωτήριο Τσιβιλή, τον Αναπληρωτή Καθηγητή Χρήστο Ζέρη και τον Λέκτορα Ευστράτιο Μπαδογιάννη για τις διορθώσεις και τις υποδείξεις τους για την επιτυχή ολοκλήρωση της Διδακτορικής Διατριβής.

Τον Αναπληρωτή Καθηγητή Ιωάννη Ιωάννου του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος στο Πανεπιστήμιο Κύπρου για την άρτια συνεργασία, τη φιλική διάθεση και την επιστημονική καθοδήγηση που μου παρείχε το διάστημα παραμονής μου στη Λευκωσία για τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

Τη Δρ. Χημικό Μηχανικό Ελένη Ζαχαρίου – Ρακαντά, στο Εργαστήριο «Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών», της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π, για την άριστη συνεργασία και την πολύτιμη επιστημονική βοήθεια της κατά διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων, καθώς επίσης και στην εξαγωγή των συμπερασμάτων της Διδακτορικής Διατριβής.

Τον Δρ. Νικόλαο Παναγιώτου και τον κ. Δρ. Πέτρο Σχοινά οι οποίοι, βοήθησαν στην περάτωση των πειραμάτων της Διδακτορικής Διατριβής.

Το εργαστηριακό και ερευνητικό προσωπικό του εργαστηρίου Δομικών Υλικών του Πανεπιστημίου Κύπρου, τον κ. Δρ. Λούκα Πέτρου, την ερευνήτρια Δρ. Μάγδα Θεοδωρίδου, την υποψήφια Διδάκτωρ Ρεβέκκα Φούρναρη και τον τεχνικό Εργαστηρίου κ. Μιχάλη Μιχαήλ.

Τη βιομηχανία Χαλυβουργική Α.Ε και ιδιαίτερα τον διευθυντή παραγωγής κ. Σκαράκη και τον προϊστάμενο Χημείου κ. Γ. Παναγιωτούλια από τους οποίους έγινε η προμήθεια των χαλύβδινων οπλισμών και της σιδηρούχας σκωρίας ελάστρων για την κατασκευή των δοκιμών τσιμεντοκονίας.

Τη βιομηχανία *TITAN A.E* από την οποία έγινε η προμήθεια της Ι.Τ και του τσιμέντου για την κατασκευή των δοκιμών. Ακόμα, το προσωπικό του εργαστηρίου τεχνολογίας Σκυροδέματος και ιδιαίτερα τον Διευθυντή κ. Χ. Λεπτοκαρίδη και τον Γεωλόγο κ. Γ. Κυπριώτη στο εργοστάσιο του Καμαρίου Ελευσίνας, οι οποίοι βοήθησαν στη διεξαγωγή μέρους των δοκιμών μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής Σκυροδέματος.

Τη μητέρα μου Χρυσή και τον πατέρα μου Χρήστο, για την ηθική - ψυχολογική υποστήριξη όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου, καθώς επίσης για την κατανόηση και την ενθάρρυνση που μου παρείχαν για τη συνέχιση της προσπάθειας καθ' όλη τη διάρκεια της Διδακτορικής μου Διατριβής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Ι.Κ.Υ για την οικονομική ενίσχυση που μου παρείχε μέσω του προγράμματος 'SHORT TERMS', ώστε να μεταβώ στην Κύπρο το χρονικό διάστημα Μάϊος - Οκτώβριος 2014 και να πραγματοποιήσω σημαντικό μέρος των πειραμάτων της Διδακτορικής Διατριβής όσον αφορά τις μηχανικές και φυσικοχημικές ιδιότητες του Σκυροδέματος.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η πειραματική μελέτη και διερεύνηση της χρήσης παραπροϊόντων βιομηχανίας, σκοπό την προστασία του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος (ΧΟΣ) και βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος.

Έγινε συνολική ανασκόπηση για τον όρο σκυρόδεμα και τσιμέντο και αναπτύχθηκαν αναλυτικά οι πρώτες ύλες, τα είδη, οι ιδιότητες, οι παράγοντες που τα επηρεάζουν και οι τρόποι παρασκευής τους. Αναλύονται οι παράγοντες που επιδρούν στη διάβρωση του οπλισμένου σκυροδέματος, η ανθεκτικότητα τους σκυροδέματος στο περιβάλλον, καθώς και οι μέθοδοι προστασίας του. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη χρήση πρόσθετων ως τρόπος προστασίας του οπλισμού από τη διάβρωση.

Τα πρόσθετα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν σιδηρούχα σκωρία ελάστρων από την παραγωγή δομικού χάλυβα (καλαμίνα), δύο είδη ιπτάμενης τέφρας και παραπροϊόν από την παραγωγή ηλεκτροχημικού MnO_2 (EMD). Η πειραματική διαδικασία περιελάμβανε κατασκευή οπλισμένων κυλινδρικών δοκιμίων τσιμεντοκονίας και δοκιμίων σκυροδέματος χωρίς οπλισμό. Η αντικατάσταση του τσιμέντου για κάθε ένα από τα πρόσθετα έγινε σε ποσοστά 5% και 10% κ.β τσιμέντου.

Το διαβρωτικό περιβάλλον που εκτέθηκαν τα δοκίμια ήταν υψηλής συγκεντρώσεως Cl^- , CO_2 . Επίσης, μελετήθηκε η συνεργαστική δράση των χλωριόντων και του Διοξειδίου Άνθρακα. Ακόμα, εξετάστηκε η επίδραση των θεικών ιόντων σε σκυρόδεμα που περιείχε απόβλητο από την παραγωγή EMD.

Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε σε επιταχυνόμενες συνθήκες διάβρωσης (θάλαμος ενανθράκωσης, θάλαμος αλατονέφωσης), σε ελεγχόμενες συνθήκες σε εργαστηριακό περιβάλλον (μερική εμβάπτιση), σε βιομηχανικό/αστικό περιβάλλον (στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου πάνω από υπαίθριο χώρο στάθμευσης οχημάτων) και σε παραθαλάσσιο/βιομηχανικό περιβάλλον (στη Χαλυβουργική Α.Ε πλησίον της θάλασσας).

Η εκτίμηση της προστατευτικής ικανότητας που προσφέρουν τα πρόσθετα στο οπλισμένο σκυρόδεμα, εκτιμήθηκε με τις ακόλουθες μεθόδους:

- ✓ Μέτρηση ηλεκτροχημικών παραμέτρων διάβρωσης (i_{corr} , R_p) και δυναμικού Διάβρωσης (E_{corr}) των οπλισμών συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον,
- ✓ Υπολογισμός ολικών χλωριόντων (στο σκυρόδεμα),
- ✓ Μέτρηση μηχανικών αντοχών του σκυροδέματος (μονοαξονική θλιπτική αντοχή, εφελκυστική αντοχή με διάρρηξη, καμπτική αντοχή),
- ✓ Υπολογισμός κάθισης νωπού Σκυροδέματος και της πυκνότητας νωπού & σκληρυμένου σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου,

- ✓ Μέτρηση βάθους ενανθράκωσης,
- ✓ Εκτίμηση της συνάφειας οπλισμού – σκυροδέματος με τη δοκιμή *Pull-out*,
- ✓ Υπολογισμός της ποσοστιαίας απώλειας μάζας και της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας των οπλισμών,
- ✓ Υπολογισμός πορώδους του σκυροδέματος με τη ποροσιμετρία *Hg* και ανοικτού πορώδους με τη μέθοδο της απαέρωσης,
- ✓ Μέτρηση της απορροφητικότητας του σκυροδέματος σε μεθανόλη,
- ✓ Μέτρηση απορροφητικότητας με διείσδυση νερού υπό σταθερή πίεση *5 bars*,
- ✓ Μέτρηση του Στατικού Μέτρου *E* καθώς επίσης και έμμεσος υπολογισμός του Δυναμικού μέτρου Ελαστικότητας από την ταχύτητα των υπερήχων,
- ✓ Εύρεση κρυσταλλικών φάσεων με την τεχνική περίθλασης ακτίνων Χ (XRD),
- ✓ Οπτική παρατήρηση και φωτογράφιση δοκιμίων σκυροδέματος σε Ψηφιακό στερεοσκόπιο,
- ✓ Οπτική παρατήρηση σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM) και στοιχειομετρική ανάλυση με *EDAX*,
- ✓ Μέτρηση διόγκωσης πρισματικού δοκιμίου με πρόσθετο Ι.Τ υψηλής συγκεντρώσεως αργλικών ορυκτών για συνεχές χρονικό διάστημα 15 ημερών

Από την διατριβή αυτή προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Η χρήση του παραπροϊόντος από την παραγωγή EMD, μείωσε το πορώδες, την απορροφητικότητα και το βάθος ενανθράκωσης του σκυροδέματος. Ακόμα, βελτιώθηκε το μέτρο Ελαστικότητας και οι μηχανικές αντοχές ιδίως στο ποσοστό προσθήκης 5%κ.β. Η απώλεια μάζας των οπλισμών ήταν μικρότερη από το κανονικό σκυρόδεμα που δεν περιείχε πρόσθετο,
2. Η Ι.Τ από την Πτολεμαΐδα βελτίωσε τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος και το μέτρο Ελαστικότητας. Η διάβρωση του οπλισμού ελαττώθηκε καθώς επίσης και η συγκέντρωση των ολικών ιόντων χλωρίου. Το ανοικτό πορώδες μετά από 130 ημέρες μερικής εμβάπτισης μειώθηκε συγκριτικά με τα δοκίμια αναφοράς,
3. Η Ι.Τ από τη Γερμανία η οποία περιέχει σημαντικές ποσότητες αργλικών ορυκτών μείωσε σημαντικά τις μηχανικές αντοχές και το μέτρο *E*. Το ανοικτό πορώδες μειώθηκε όπως επίσης και η απώλεια μάζας των οπλισμών στην ατμόσφαιρα,
4. Από τη χρήση της καλαμίνης στο σκυρόδεμα προέκυψε βελτίωση όλων των φυσικοχημικών και μηχανικών ιδιοτήτων του Σκυροδέματος. Μόνο η θλιπτική αντοχή σε πρώιμες ηλικίες (7 ημέρες) εμφανίστηκε μειωμένη και στα δύο (2) ποσοστά προσθήκης.

ABSTRACT

The object of this thesis is the experimental study of protection of steel reinforcement and the increase of mechanical properties of concrete with replacement cement by factory by-products. It is done comprehensive review for the word concrete and cement and it is developed in detail the factors that affect the properties and their ways of preparation.

Specifically, the durability of reinforcement concrete was examined with partial immersion in NaCl 3.5%w.w and Na₂SO₄ 5%w.w, exposure in atmosphere and stay in Salt-sprayed cabin and Accelerated CO₂ chamber. The mineral additives that were used was fly ash, mill scale (calamine) and byproduct from production processes of Electrochemical Manganese Dioxide (EMD). The replacement of cement was made in rates 5% & 10% w.w. For the experimental procedure constructed concrete specimens (cubic & cylindrical) and cement reinforcement mortars.

The protective ability of mineral additives in concrete compared to the reference concrete without admixture was evaluated by the following methods:

- ✓ Measuring linear polarization resistance and corrosion potential versus time,
- ✓ Measurements of gravimetric and electrochemical mass loss,
- ✓ Measurements of total chloride ions in concrete,
- ✓ Measurements of mechanical properties of concrete (compressive strength, tensile strength, flexural strength, pull-out test),
- ✓ Measurements of carbonation depth,
- ✓ Measurements of total porosity by MRP method and capillary porosity,
- ✓ Estimation of concrete sorptivity,
- ✓ Measurements of static and dynamic Elastic modulus,
- ✓ X-ray Diffraction,
- ✓ Microscopic observation of concrete under Scanning Electron Microscope (SEM),
- ✓ Observation under digital Stereoscope,

From this thesis resulted in the following conclusions:

1. The replacement of cement by EMD waste, decreased the porosity, sorptivity and carbonation depth of concrete. Also, the Young's Modulus and the compressive strength increased. Mass loss measurements of steel embedded in cement mortars was less, compared with control specimens,
2. The use of Ptolemais Fly Ash improved the mechanical properties and Elastic Modulus of concrete. Also, the capillary porosity and total chloride ions were reduced,

3. Germany Fly Ash which contains large amounts of argillic minerals decreased the mechanical strengths and E Modulus of concrete. However, the capillary corrosion of concrete and mass loss of steel, exposure in atmosphere decreased,
4. The replacement of cement by calamine, showed improvement all of physicochemical and mechanical properties of reinforced concrete. Only the compressive strength of concrete at early ages was less compared with reference.

PUBLICATIONS

CHOUSIDIS, N., RAKANTA, E. IOANNOU, I. & BATIS, G. 2015. Anticorrosive effect of Electrochemical Manganese Dioxide (EMD) by-products in reinforced concrete. *Journal of Materials and Chemical Engineering*.

CONFERENCES

CHOUSIDIS, N., IOANNOU, I., RAKANTA, E. & BATIS, G. 2015. Utilization of Electrochemical Manganese by-products in concrete exposed to sulfates salts. *4th Conference: "Utilization of industrial by-products in the construction"*. Thessaloniki: Industrial By-Products Research and Development Association, (oral presentation).

CHOUSIDIS, N., RAKANTA, E. & BATIS, G. 2013. Corrosion behavior of steel reinforcement by replacing the cement by industrial wastes. 9th Panhellenic conference of Chemical Engineering, Athens. NTUA, (oral presentation).

CHOUSIDIS, N., RAKANTA, E. & BATIS, G. 2014. Effect of class C Fly ash on Chloride resistance of Reinforced cement mortars. *6th Advanced Ceramic conference*. Athens: Panhellenic ceramic society, (oral presentation).

CHOUSIDIS, N., RAKANTA, E., IOANNOU, I. & BATIS, G. 2015. Effect of Iron Oxides scrups on mechanical properties and hydration of concrete. *10^o Conference of Chemical Engineering: Challenges and Prospects*, (poster presentation).

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	1
1 ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	9
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
1.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	9
1.2.1 Υλικά σκυροδέματος	9
2 ΠΡΟΣΘΕΤΑ & ΠΡΟΣΜΙΚΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	23
2.1 ΟΡΥΚΤΑ ΠΡΟΣΜΙΚΤΑ	23
2.1.1 Φυσικές ποζολάνες	23
2.1.2 Τεχνητές ποζολάνες	24
2.1.3 Πρόσθετα Σκυροδέματος ή χημικά πρόσθετα	27
3 ΧΑΛΥΒΕΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	31
3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΧΟΣ	31
3.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΧΑΛΥΒΩΝ	32
3.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΧΑΛΥΒΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	32
3.4 ΣΥΝΑΦΕΙΑ ΟΠΛΙΣΜΟΥ-ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	34
4 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΟΠΛΙΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	36
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΓΕΝΙΚΑ.....	36
4.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ.....	37
4.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	38
4.4 ΓΑΛΒΑΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ – ΜΑΚΡΟΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	40
4.4.1 Τοπικά γαλβανικά στοιχεία	40
4.4.2 Μακροστοιχεία	40
4.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	42
4.5.1 Πορώδες σκυροδέματος	42
4.5.2 Διαπερατότητα σκυροδέματος	43

4.5.3	Ποιότητα νερού και αδρανών υλικών	45
4.5.4	Είδος και ποσότητα τσιμέντου:	46
4.5.5	Υπαρξη ρωγμών στο σκυρόδεμα	46
4.6	ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	47
4.6.1	Εισαγωγή	47
4.6.2	Παθητικοποίηση οπλισμού	48
4.6.3	Μηχανισμός ενανθράκωσης	51
4.6.4	Διάχυση CO ₂ στη μάζα του σκυροδέματος	51
4.7	ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΕ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟ ΝΕΡΟ	52
4.7.1	Διάβρωση με βελονισμούς.....	52
4.7.2	Διείσδυση ιόντων Cl ⁻ στο σκυρόδεμα	53
4.8	ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ	55
4.8.1	Γενικά - εισαγωγή	55
4.8.2	Επίδραση θεικών αλάτων στη διάβρωση του σκυροδέματος.....	56
4.9	ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	58
4.9.1	Ερπυσμός σκυροδέματος.....	58
4.9.2	Συστολή σκυροδέματος	59
5	ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΩΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ	60
5.1	ΕΙΔΙΚΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ	60
5.2	ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ	60
5.2.1	Καθοδική προστασία	60
5.2.2	Επανακαλοποίηση σκυροδέματος.....	62
5.2.3	Ηλεκτροχημική αφαίρεση χλωριόντων	63
5.3	ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	63
5.4	ΑΝΑΣΤΟΛΕΙΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ	65
5.5	ΣΥΝΘΕΤΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ ΚΑΙ ΕΠΕΜΒΑΣΗ ΣΤΙΣ ΠΡΩΤΕΣ ΥΛΕΣ.....	66
6	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΠΡΟΙΟΝΤΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	67

6.1	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	67
6.1.1	Φυσικές ιδιότητες και λεπτότητα Ι.Τ	67
6.1.2	Χημική και ορυκτολογική σύσταση Ι.Τ.....	68
6.1.3	Επίδραση της Ι.Τ στην εργασιμότητα του σκυροδέματος,	69
6.1.4	Επίδραση της Ι.Τ στη θερμότητα ενυδάτωσης.....	70
6.1.5	Επίδραση της Ι.Τ στην ανθεκτικότητα έναντι των θειικών ιόντων	71
6.1.6	Επίδραση της Ι.Τ στην αλκαλοπυριτική αντίδραση στο σκυρόδεμα ...	72
6.1.7	Δράση της Ι.Τ στις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος	73
6.1.8	Επίδραση της Ι.Τ στην απόξεση και στη μηχανική αποσάθρωση .	73
6.1.9	Επίδραση της Ι.Τ στην προστασία του οπλισμού από τη διάβρωση εντός σκυροδέματος	74
6.2	ΈΡΕΥΝΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ Ι.Τ ΠΤΟΛΕΜΑΪΔΑΣ ΣΤΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	75
6.2.1	Υφιστάμενη κατάσταση στην Ελλάδα.....	75
6.2.2	Επίδραση των Ελληνικών τεφρών στις ιδιότητες του σκυροδέματος .	76
6.2.3	Διαφορές Ελληνικών Ι.Τ με τα Ευρωπαϊκά και Αμερικάνικα πρότυπα προδιαγραφών	77
6.3	ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΟΞΕΙΔΙΩΝ ΣΙΔΗΡΟΥ.....	79
6.4	ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΟ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΜΑΓΓΑΝΙΟΥ (EMD).....	80
7	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	83
8	ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΚΟΝΙΑΣ/ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	85
8.1	ΥΛΙΚΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	85
8.2	ΟΡΥΚΤΑ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΣΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΔΙΑΤΡΙΒΗ	88
8.3	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΚΟΝΙΑΣ ΚΑΙ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	91
9	ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ..	95
9.1	ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	95
9.1.1	Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης E_{corr}	95

9.1.2	Ηλεκτροχημικός προσδιορισμός του ρυθμού διάβρωσης με τη μέθοδο της Γραμμικής πόλωσης (LPR).....	96
9.2	ΣΤΑΘΜΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΜΑΖΑΣ.....	96
9.3	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΒΑΘΟΥΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	97
9.4	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΛΙΚΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΧΛΩΡΙΟΥ.....	98
9.5	ΟΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ.....	98
9.5.1	Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM)	98
9.5.2	Στερεοσκοπία.....	99
9.6	ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ (X-Ray Diffraction)	100
9.7	ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	100
9.7.1	Αντοχή σε θλίψη (compressive strength)	100
9.7.2	Αντοχή σε εφελκυσμό με διάρρηξη (tensile splitting strength).....	101
9.7.3	Συσχέτιση αντοχής σε θλίψη – εφελκυσμού	102
9.7.4	Αντοχή σε κάμψη (flexural strength)	102
9.7.5	Εξόλκευση οπλισμού (pull-out test)	103
9.7.6	Μέτρο Ελαστικότητας Σκυροδέματος (modulus of elasticity)	103
9.8	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΟΡΩΔΟΥΣ	104
9.8.1	Μέτρηση πορώδους με ποροσιμετρία Hg	104
9.8.2	Μέτρηση ανοικτού πορώδους με απαέρωση.....	105
9.9	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	106
9.10	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΡΙΧΟΕΙΔΟΥΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	106
9.11	ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΝΕΡΟΥ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ (water penetration under pressure)	107
10	ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΟΣ ΑΠΟ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΜΑΓΓΑΝΙΟΥ	108
10.1	ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΚΘΕΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	108
10.2	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	109
10.2.1	Μετρήσεις Δυναμικού Διάβρωσης.....	109
10.2.2	Μετρήσεις Βάθους ενανθράκωσης σκυροδέματος	113
10.2.3	Μετρήσεις ολικών ιόντων Χλωρίου σκυροδέματος.....	120

10.2.4	Μηχανικές αντοχές σκυροδέματος	125
10.2.5	Υπολογισμός μέτρου Ελαστικότητας σκυροδέματος	136
10.2.6	Μετρήσεις τριχοειδούς απορροφητικότητας σκυροδέματος	141
10.2.7	Θερμικές ιδιότητες σκυροδέματος	146
10.2.8	Μετρήσεις πορώδους σκυροδέματος	147
10.2.9	Ηλεκτροχημικός προσδιορισμός του Ρυθμού Διάβρωσης των οπλισμών 152	
10.2.10	Σταθμικός προσδιορισμός απώλειας μάζας οπλισμών	155
10.2.11	Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης και στερεοσκοπία	163
10.2.12	Περίθλαση ακτίνων Χ	168
10.2.13	Συνάφεια οπλισμού – σκυροδέματος (pull-out test).....	170
10.3	ΜΕΡΙΚΟ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ 1 - ΒΑΘΜΟΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΠΟΥ ΠΡΟΣΦΕΡΕΙ Η ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΤΟΥ EMDW ΣΤΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	172
11	ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΑΠΟ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	175
11.1	ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΚΘΕΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	175
11.2	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	176
11.2.1	Μετρήσεις Δυναμικού Διάβρωσης	176
11.2.2	Μετρήσεις Βάθους ενανθράκωσης σκυροδέματος	180
11.2.3	Μετρήσεις ολικών ιόντων Χλωρίου σκυροδέματος	185
11.2.4	Μηχανικές αντοχές σκυροδέματος	188
11.2.5	Υπολογισμός μέτρου Ελαστικότητας σκυροδέματος	197
11.2.6	Μετρήσεις τριχοειδούς απορροφητικότητας σκυροδέματος	200
11.2.7	Θερμικές ιδιότητες σκυροδέματος με προσθήκη ιπτάμενης τέφρας	204
11.2.8	Μετρήσεις πορώδους σκυροδέματος	206
11.2.9	Ηλεκτροχημικός προσδιορισμός ρυθμού διάβρωσης των οπλισμών	211
11.2.10	Σταθμικός προσδιορισμός απώλειας μάζας οπλισμών	213
11.2.11	Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης και στερεοσκοπία	221
11.2.12	Περίθλαση ακτίνων Χ	226
11.2.13	Συνάφεια οπλισμού – σκυροδέματος	228

11.3	ΜΕΡΙΚΟ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ 2 - ΒΑΘΜΟΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΠΟΥ ΠΡΟΣΦΕΡΕΙ Η ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΣΤΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	
	229	
12	ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΣΙΔΗΡΟΥΧΑΣ ΣΚΩΡΙΑΣ ΕΛΑΣΤΡΩΝ (ΚΑΛΑΜΙΝΑ) ΑΠΟ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΑΣ	231
12.1	ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΚΘΕΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	231
12.2	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	232
12.2.1	Μετρήσεις Δυναμικού Διάβρωσης.....	232
12.2.2	Μετρήσεις Βάθους ενανθράκωσης σκυροδέματος	233
12.2.3	Μετρήσεις ολικών ιόντων Χλωρίου σκυροδέματος.....	235
12.2.4	Μηχανικές αντοχές σκυροδέματος	237
12.2.5	Υπολογισμός μέτρου Ελαστικότητας σκυροδέματος	244
12.2.6	Μετρήσεις τριχοειδούς απορροφητικότητας σκυροδέματος	247
12.2.7	Θερμικές ιδιότητες σκυροδέματος με προσθήκη καλαμίνας.....	248
12.2.8	Μετρήσεις πορώδους σκυροδέματος	249
12.2.9	Ηλεκτροχημικός προσδιορισμός του ρυθμού διάβρωσης των οπλισμών	
	252	
12.2.10	Σταθμικός προσδιορισμός απώλειας μάζας οπλισμών	253
12.2.11	Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης και στερεοσκοπία	257
12.2.12	Περίθλαση ακτίνων Χ	259
12.2.13	Συνάφεια οπλισμού – σκυροδέματος	260
12.3	ΜΕΡΙΚΟ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ 3 - ΒΑΘΜΟΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΠΟΥ ΠΡΟΣΦΕΡΕΙ Η ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΚΑΛΑΜΙΝΑΣ ΣΤΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	261
13	ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	263
13.1	ΣΥΖΗΤΗΣΗ – Προσθήκη παραπροϊόντος από την παραγωγή EMD (κωδ. EMDW)	263
13.2	ΣΥΖΗΤΗΣΗ – Προσθήκη ιπτάμενης τέφρας (κωδ. FAGER, FAPTOL)	264
13.3	ΣΥΖΗΤΗΣΗ – Προσθήκη σιδηρούχας σκωρίας ελαστρών (κωδ. kal).....	267
14	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	269
14.1	ΠΡΟΣΘΗΚΗ Ι.Τ ΥΨΗΛΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΑΡΓΙΛΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ	269

14.2	ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ Ι.Τ (ΠΤΟΛΕΜΑΙΔΑΣ)	270
14.3	ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΟΣ EMD	270
14.4	ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΣΙΔΗΡΟΥΧΑΣ ΣΚΩΡΙΑΣ ΕΛΑΣΤΡΩΝ (ΚΑΛΑΜΙΝΑ).....	271
14.5	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΝΑ ΠΡΟΣΘΕΤΟ	272
15	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΣΥΝΕΧΙΣΗΣ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	273
16	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	274
16.1	ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	274
16.2	ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΙΡ (MERCURY INSTRUMENT POROSIMETRY)	277
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	280

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1 ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σκυρόδεμα χρησιμοποιείται στη δόμηση κατασκευών και σχηματίζεται από ανάμειξη αδρανών υλικών και τσιμέντου, το οποίο αναπτύσσει τις ιδιότητες του με τη σκλήρυνση της πάστας του τσιμέντου. Το οπλισμένο σκυρόδεμα αποτελεί σύνθετο υλικό και επομένως οφείλει να αξιοποιεί τις ιδιότητες, τόσο του τσιμέντου όσο και του οπλισμού. Η αντοχή σε θλίψη οφείλεται στην αντοχή του τσιμέντου και τη συνάφεια που έχει με τα αδρανή, ενώ η αντοχή σε κάμψη, στον οπλισμό που περιέχεται στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Για τα βελτίωση των μηχανικών και φυσικοχημικών ιδιοτήτων του, υπάρχει δυνατότητα προσθήκης διαφόρων προσμίξεων ενώ εξίσου σημαντική είναι η καλή συμπίκνωση κατά τη διάρκεια της σκυροδέτησης και η σωστή συντήρηση ώστε να αυξηθεί ο ωφέλιμος χρόνος ζωής της κατασκευής.

Το ειδικό βάρος του σκυροδέματος μεταβάλλεται ανάλογα με τα αδρανή και το είδος του τσιμέντου που έχουν χρησιμοποιηθεί για την παρασκευή του. Με βάση το φαινόμενο ειδικό βάρος το σκυρόδεμα διακρίνεται σε :

- ✓ Σύνηθες σκυρόδεμα με πυκνότητα $\rho = 2200 - 2,600 \text{ kg/m}^3$,
- ✓ Ελαφροβαρές σκυρόδεμα με πυκνότητα $\rho = 300 - 1850 \text{ kg/m}^3$,
- ✓ Βαρύ σκυρόδεμα με πυκνότητα $\rho > 2600 \text{ kg/m}^3$.

Το είδος του σκυροδέματος που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από πολλούς παράγοντες μερικοί από τους οποίους είναι το περιβάλλον χρήσης, το είδος της κατασκευής και οι μηχανικές καταπονήσεις που θα υφίσταται. Επομένως, για την αποφυγή αστοχίας σε μια κατασκευή απαιτείται η χρήση καταλλήλου τύπου σκυροδέματος.

1.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

1.2.1 Υλικά σκυροδέματος

1.2.1.1 Τσιμέντο

1.2.1.1.1 Πρώτες ύλες παρασκευής τσιμέντου

Για την παρασκευή του τσιμέντου χρησιμοποιούνται ως πρώτες ύλες ασβεστολιθικά πετρώματα σε ποσοστό περίπου 75-80% και αργιλικά σε ποσοστό 20-25%. Ειδικότερα, τα πετρώματα που χρησιμοποιούν βιομηχανίες τσιμέντου είναι τα εξής (Τσίμας Σ., 2001):

- ✓ Ανθρακικά πετρώματα. Είναι πετρώματα που αποτελούνται κυρίως από ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) όπως ο ασβεστόλιθος και η κιμωλία. Ο ασβεστόλιθος μπορεί να αποτελείται είτε από ασβεσίτη που κρυσταλλώνεται στο τριγωνικό σύστημα με ειδικό βάρος 2,79 είτε από αραγωνίτη που κρυσταλλώνεται στο ρομβικό σύστημα και ειδικό βάρος 2,95. Η χρήση του δολομίτη και του ανκερίτη πρέπει να αποφεύγεται διότι περιέχουν Mg και Fe που βλάπτουν το τσιμέντο. Ο ασβεστόλιθος μπορεί να περιέχει διάφορες προσμίξεις σε πολύ μικρές ποσότητες (MgCO_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , SO_3 , Na_2O , K_2O) οι οποίες πρέπει να υπολογίζονται ποσοτικά πριν τη χρήση στην παρασκευή του τσιμέντου.
- ✓ Αργιλικά πετρώματα. Οι άργιλοι περιέχουν οξείδια του αργιλίου (Al_2O_3) οξείδια του σιδήρου (Fe_2O_3), αλκάλια (Na_2O , K_2O) καθώς και άλλα στοιχεία σε μικρότερα ποσοστά όπως Si, Mn, H και Ca (ΚΑΤΕΡΙΝΟΠΟΥΛΟΣ Α. and ΜΑΓΚΑΝΑΣ Α., 2000). Η ύπαρξη αργιλικών ορυκτών στο ασβεστολιθικό πέτρωμα πρέπει να ελέγχεται εξαιτίας της ικανότητάς τους να διογκώνονται λόγω προσρόφησης νερού στο μόριο τους (swelling), την πλαστικότητα τους και την ικανότητα ιοντοανταλλαγής στο πλέγμα τους (*ion Exchange Capacity I.E.C*) (ΠΕΡΡΑΚΗ Θ., 2013),
- ✓ Πυριτικά πετρώματα. Το άμορφο πυρίτιο ή το πυρίτιο που είναι ενωμένο με CaO , Al_2O_3 ή Fe_2O_3 είναι περισσότερο δραστικό από το ελεύθερο SiO_2 . Η δραστικότητα των διαφόρων μορφών πυριτίου με το οξείδιο του ασβεστίου αυξάνει κατά την εξής σειρά: Χαλαζίας, σπάλιος, χριστοβαλίτης, τριδυμίτης αστρίοι, αμφίβολοι, άργιλοι, υαλώδεις σκωρίες.

Εκτός των παραπάνω συστατικών και σύμφωνα με το **EN 197-1**, κατά την παρασκευή του κλίνκερ, ως κύρια συστατικά του τσιμέντου είναι δυνατόν να προστεθούν:

- *Σκωρία υψικαμίνων, (S)* που προκύπτει από την παραγωγή σιδήρου στις υψικαμίνους κάνοντας ταχεία ψύξη σε τήγμα σκωρίας κατάλληλης σύστασης.
- *Ποζολανικά υλικά, (P,Q)* τα οποία είναι φυσικά (P) ή βιομηχανικά υλικά (Q), πυριτικής ή Αργιλοπυριτικής σύστασης ή συνδυασμός και των δύο.
- *Ιπτάμενες τέφρες, (V,W)* είναι προϊόντα που προέρχονται από την καύση γαιανθράκων ή λιγνιτών. Χωρίζονται σε πυριτικές (V) και ασβεστιτικές (W) ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε SiO_2 και CaO .
- *Burnt Shale, (T)* που αποδίδεται στην ελληνική ως ψημένος σχιστόλιθος και παράγεται με καύση του Oil shale στους $800\text{ }^\circ\text{C}$ σε ειδικές καμίνους.
- *Ασβεστόλιθος, (L).* Συχνά χρησιμοποιείται ως πληρωτικό μέσο για βελτίωση των αρχικών αντοχών (Vance et al., 2013) του σκυροδέματος και το ποσοστό προσθήκης δεν υπερβαίνει το 5% επί της μάζας του τσιμέντου. Όταν χρησιμοποιείται ως κύριο συστατικό τότε το ποσοστό του ανθρακικού ασβεστίου

(CaCO₃) υπολογισμένο ως οξείδιο του ασβεστίου (CaO) πρέπει να είναι τουλάχιστον 75%.

→ *Silica fume*, (D) που παράγεται από την αναγωγή υψηλής καθαρότητας χαλαζία με άνθρακα σε καμίνοους ηλεκτρικού τόξου κατά την παραγωγή κραμάτων πυριτίου-σιδηροπυριτίου,

Επίσης μπορεί να προστεθούν σε μικρά ποσοστά (<5% κ.β) και δευτερεύοντα συστατικά (mac) π.χ CaSO₄, με σκοπό να βελτιώσουν τις ιδιότητες του τσιμέντου (πίνακας 1.2).

1.2.1.1.2 Κατηγοριοποίηση τσιμέντων σύμφωνα με Διεθνή και Ελληνικά πρότυπα

Τα κοινά τσιμέντα που προδιαγράφονται στο πρότυπο **EN 197-1** χωρίζονται σε πέντε (5) κύριες κατηγορίες (Πίν. 1.2):

- ✓ CEM I, τσιμέντο Portland
- ✓ CEM II, σύνθετα τσιμέντα Portland
- ✓ CEM III, Σκωριοτσιμέντα
- ✓ CEM IV, Ποζολανικά τσιμέντα
- ✓ CEM V, σύνθετα τσιμέντα

Χαρακτηριστικό είναι ότι στους δύο πρώτους τύπους το κλίνκερ συμμετέχει τουλάχιστον κατά 65%. Στα κατηγορίες τσιμέντων του τύπου II, εκτός από τα τσιμέντα με *silica fume*, διακρίνονται δύο ομάδες Α και Β στις οποίες το ποσοστό του κλίνκερ δεν μπορεί να είναι μικρότερο του 80% και 65% κ.β αντίστοιχα. Στους τρεις τελευταίους τύπους το κλίνκερ δεν είναι το κύριο συστατικό και φθάνει ως το 64% κ.β με εξαίρεση τον τύπο CEM IV IV/A στον οποίο το ποσοστό του κλίνκερ κυμαίνεται από 65-89% κ.β.

Ο Ελληνικός κανονισμός τσιμέντου που ίσχυε παλαιότερα περιλάμβανε τέσσερις (4) τύπους τσιμέντου (Τσίμας Σ., 2001):)

- ✓ Τσιμέντο τύπου I,
- ✓ τσιμέντο τύπου II με τεχνητή ή φυσική ποζολάνη σε ποσοστό έως 20%,
- ✓ τύπου III με ποσοστό ποζολάνης 20 - 40% κ.β,
- ✓ τύπου IV ανθεκτικό στα θειικά άλατα.

Ο πίνακας 1.1 δίνει τα όρια τιμών των μηχανικών αντοχών και τις απαιτήσεις του τσιμέντου όσον αφορά τη πήξη και τη διόγκωση του.

Πίνακας 1.1: Μηχανικές αντοχές και φυσικές απαιτήσεις τσιμέντων (Τσακαλάκης Κ., 2010)

	2 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες		Αρχικός Χρόνος πήξης	Διόγκωση
32.5 N	-	≥16 MPa	≥32.5 MPa	≤52.5 MPa	≥75min	≤10mm
32.5R	≥10 MPa					
42.5N	≥10 MPa		≥42.5 MPa	≤62.5 MPa	≥60min	
42.5R	≥20 MPa					
52.5N	≥20 MPa		≥52.5 MPa	-	≥45min	
52.5R	≥30 MPa					

Πίνακας 1.2: Τύποι τσιμέντου σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN197-1 (Σ. Τσίμας, Σ. Τσιβιλής, 2004)

Τύπος	Ονομασία	Κύρια συστατικά									Δευτερεύοντα συστατικά
		Κ (κλίνκερ)	S (σκωρία)	D (silica fume)	P (φ. Ποζολάνη)	Q (Τ. Ποζολάνη)	V (Ι.Τ)	W (Ι.Τ)	T (BURNT SHALE)	L (Ασβεστόλιθος)	
Τσιμέντα PORTLAND											
CEM I	I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
Σύνθετα τσιμέντα PORTLAND											
CEM II	II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	
	II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	0-5
	II/A-P	80-90	-	-	6-20	-	-	-	-	-	
	II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
	II/A-Q	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	
	II/B-Q	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	
	II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	
	II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	
	II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	
	II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5

	II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	
	II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
	II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	
	II/A-M	80-94	6-20								0-5
	II/B-M	65-79	21-35								
Σκωριοσιμμένα											
CEM III	III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	
	III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	
Ποζολανικά τσιμέντα											
CEM IV	IV/A	65-89	-	1-35				-	-	-	0-5
	IV/B	45-64	-	36-55				-	-	-	
Σύνθετα τσιμέντα											
CEM V	V/A	40-64	18-30	-	16-30			-	-	-	0-5
	V/B	20-39	31-50	-	31-50			-	-	-	

1.2.1.1.3 Ενυδάτωση τσιμέντου

Η ενυδάτωση των φάσεων του κλίνκερ ξεκινά αμέσως μετά την ανάμιξη του τσιμέντου με το νερό με μετατροπή των άνυδρων ενώσεων σε ένυδρες, μέσα από ένα σύνολο χημικών αντιδράσεων. Μόλις προστεθεί νερό στο τσιμέντο ξεκινά η πήξη του σκυροδέματος με την ενυδάτωση της φάσης του αλίτη και της αργλικής φάσης ενώ η φερριτική και ο βελλίτης ξεκινούν αργότερα. Ο λόγος $C_2S:C_3S$ αυξάνει συνεχώς και έχει αποδειχθεί ότι στις 90 ημέρες έχει καταναλωθεί όλο το C_3S και C_3A (Nawy E.W., 2006).

Η ενυδάτωση του C_3S αρχίζει με μία γρήγορη αντίδραση διάρκειας λίγων λεπτών κατά την οποία καταναλώνεται 2-10% του υλικού. Ακολουθεί ένα στάδιο, διάρκειας μερικών ωρών που χαρακτηρίζεται από χαμηλή δραστηριότητα. Στη συνέχεια οι αντιδράσεις επιταχύνονται πάλι και έως τις 28 ημέρες περίπου το 70% του αλίτη έχει ενυδατωθεί ενώ μετά από ένα χρόνο έχει καταναλωθεί όλη η άνυδρη φάση. Ο ρυθμός ενυδάτωσης αυξάνεται με αύξηση των SO_3 στο τσιμέντο και ελαττώνεται με αύξηση του λόγου C_2S/C_3S στο κλίνκερ. Αντίθετα το C_2S ενυδατώνεται με πολύ μικρότερη ταχύτητα σε σχέση με το C_3S . Μέχρι τις 28 ημέρες έχει ενυδατωθεί μόλις το 30% ενώ μετά από ένα χρόνο έχει αντιδράσει το 90% του υλικού.

Η διαδικασία της ενυδάτωσης ελέγχεται από τους εξής παράγοντες:

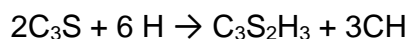
- ✓ Τη σύσταση των φάσεων του κλίνκερ και το βαθμό ενσωμάτωσης ιόντων στο πλέγμα τους.
- ✓ Τις συνθήκες παρασκευής του κλίνκερ. (θερμοκρασία, ταχύτητα ψύξης κτλ.). Οι υψηλές θερμοκρασίες κλινκεροποίησης ευνοούν το σχηματισμό C_3S ενώ γρήγορη ψύξη οδηγεί σε μικρό μέγεθος κόκκων, μεγάλη δραστηριότητα του C_3S και αύξηση της υδραυλικότητας του τσιμέντου. Ρυθμίζοντας τα ποσοστά του αλίτη και του βελλίτη στο κλίνκερ μπορούν να επιτευχθούν υψηλές πρώιμες ή τελικές μηχανικές αντοχές στο σκυρόδεμα ανάλογα την κατασκευή.
- ✓ Το ποσοστό της γύψου στο τσιμέντο. Η γύψος αντιδρά με το C_3A και δημιουργώντας θειικά άλατα (εντριγκίτη, ταουμασίτη σε χαμηλές T) και αυξάνει το χρόνο πήξης (*setting time*). Σε περίπτωση που η ποσότητα είναι μειωμένη υπάρχει ακαριαία πήξη του σκυροδέματος ενώ η αυξημένη ποσότητα δημιουργεί ίζημα (ΤΣΑΚΑΛΑΚΗΣ Κ., 20010).
- ✓ Τη λεπτότητα του τσιμέντου. Επηρεάζει την πορεία της ενυδάτωσης και επομένως το ρυθμό ανάπτυξης των μηχανικών αντοχών.
- ✓ Το λόγο νερού/τσιμέντο. Χαμηλός λόγος W/C οδηγεί σε μικρό βαθμό εργασιμότητας του νωπού σκυροδέματος και χαμηλό βαθμό ενυδάτωσης ενώ

υψηλός λόγος αυξάνει την εργασιμότητα και το τριχοειδές πορώδες του σκληρυμένου σκυροδέματος.

- ✓ Την παρουσία δευτερευόντων συστατικών στο κλίνκερ τα οποία ρυθμίζουν την ταχύτητα ενυδάτωσης.
- ✓ Την ύπαρξη ιπτάμενης τέφρας, σκωρία κ.α. Ως κύρια συστατικά στην παρασκευή του σκυροδέματος τα οποία επιβραδύνουν την ενυδάτωση.

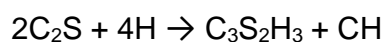
Πυριτικό τριασβέστιο C₃S (alite)

Το C₃S ονομάζεται και πυριτικό τριασβέστιο και αποτελεί ένα από τα βασικά συστατικά του τσιμέντου. Ο χημικός του τύπος είναι 3CaO.SiO₂ ενώ εκτός από αυτά τα οξείδια περιέχει μικρά ποσοστά Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, Na₂O, K₂O και P₂O₅ (TAYLOR H.F.W., 1990). Η συγκέντρωση του στο τσιμέντο μπορεί να ρυθμιστεί με επέμβαση στις πρώτες ύλες ή στις συνθήκες παραγωγής του. Γρήγορη ψύξη και μικρό χρονικό διάστημα στη ζώνη υψηλών θερμοκρασιών δημιουργεί υψηλό ποσοστό C₃S ενώ σε αντίθετη περίπτωση το περιεχόμενο νερό αντιδρά με αυτόν δημιουργώντας C₂S και C₃A. Σε θερμοκρασία μικρότερη των 1250 °C είναι ασταθής και διασπάται σε C₂S και CaO_f. Ο αλίτης λόγω της μεγάλης δραστηριότητας προσδίδει στο σκυρόδεμα αυξημένες πρώιμες αντοχές (Kurtis, 2005) γεγονός που οφείλεται στο υψηλό ποσοστό CaO και του ιόντος οξυγόνου που υπάρχει στο πλέγμα του. Κατά την ενυδάτωση του αλίτη λαμβάνει χώρα η παρακάτω αντίδραση:



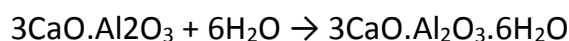
Πυριτικό διασβέστιο C₂S (belite)

Από τις υπάρχουσες μορφές του C₂S, το β-C₂S αποτελεί κύριο συστατικό του κλίνκερ. Η μορφή αυτή είναι μετασταθής σε όλες τις θερμοκρασίες αλλά με την είσοδο διαφόρων ιόντων στο κρυσταλλικό πλέγμα επιτυγχάνεται σταθεροποίηση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η δραστηριότητα του C₂S εξαρτάται από το είδος και τη συγκέντρωση των σταθεροποιητών, τη θερμοκρασία και το χρόνο έψησης, τη λεπτότητα, τη θερμοκρασία ενυδάτωσης και το λόγο W/C (NEVILLE A.M., 1996). Γενικά η δραστηριότητα του C₂S μπορεί να χαρακτηριστεί μικρή σε σχέση με την αντίστοιχη του C₃S. Το αυξημένο ποσοστό του C₂S αυξάνει τις τελικές μηχανικές αντοχές του σκυροδέματος και αντιδρά με το νερό σύμφωνα με την παρακάτω χημική αντίδραση.

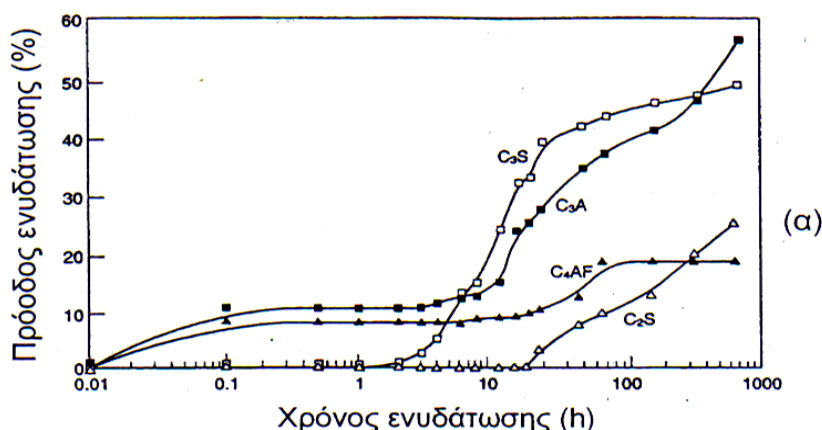
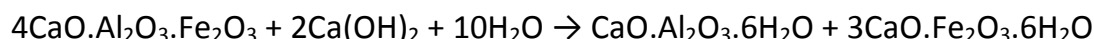


Αργλική φάση C₃A (Tricalcium aluminate)

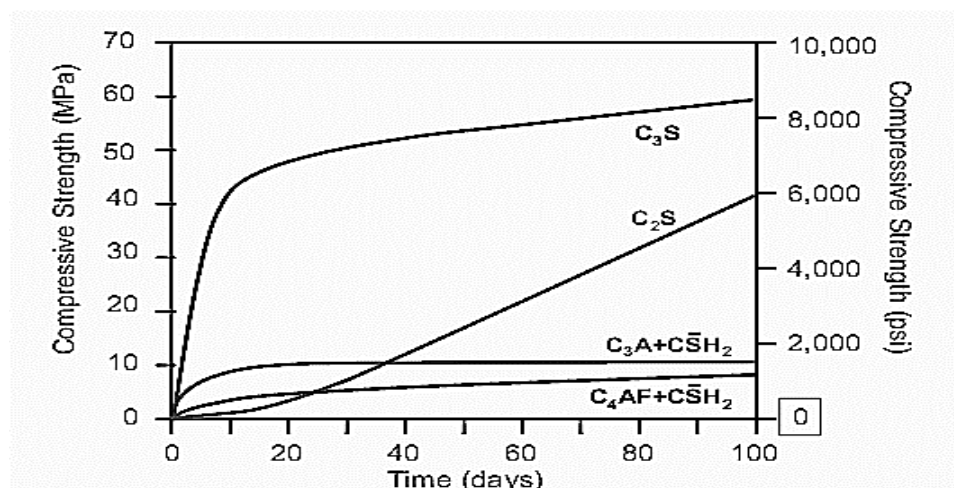
Η ενυδάτωση της αργλικής φάσης που παρατηρείται στο τσιμέντο, εξαρτάται από τη χημική του σύσταση και από τις συνθήκες ενυδάτωσης. Η δημιουργία C₃A στο κατά τις πρώτες ώρες έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία εντριγκίτη η συγκέντρωση του οποίου αυξάνεται μέχρι τις 24 ώρες και στη συνέχεια ελαττώνεται. Η ενυδάτωση του C₃A είναι ιδιαίτερα σημαντική διότι αντιδρά με το νερό και τη γύψο με αποτέλεσμα να καθορίζει την πήξη του τσιμέντου. Κατά το πρώτο στάδιο της ενυδάτωσης το αργλικό τριασβέστιο καλύπτεται από ένα άμορφο υλικό το οποίο μετατρέπεται σε εξαγωνικούς κρυστάλλους σύστασης C₂AH₈ και C₄AH₁₃ και έπειτα σε κυβικούς, σύστασης C₃AH₆, προϊόν χημικά σταθερό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Όσον αφορά τη γύψο, το αργλικό τριασβέστιο αντιδρά με αυτή παράγοντας εντριγκίτη ο οποίος μετά την κατανάλωση της γύψου αντιδρά με το C₃A αυξάνοντας την ταχύτητα ενυδάτωσης.

**Φερριτική φάση C₄AF (Tetracalcium aluminoferrite)**

Τα προϊόντα ενυδάτωσης της φερριτικής φάσης είναι σχεδόν ίδια με εκείνα της αργλικής φάσης παρόλο που οι ρυθμοί των αντιδράσεων διαφοροποιούνται. Η δραστηριότητα της φερριτικής φάσης είναι ανάλογη του λόγου Al/Fe. Το καθαρό C₄AF παρουσιάζει μεγάλο αρχικό ρυθμό ενυδάτωσης ο οποίος στη συνέχεια επιβραδύνεται αλλά συνεχίζεται σταθερά μέχρι την πλήρη κατανάλωση του ανύδρου συστατικού. Η ενυδάτωση του είναι συνήθως ταχύτερη από την ενυδάτωση του C₃A αλλά επιβραδύνεται σημαντικά παρουσία γύψου (Τσίμας Σ., 2001).



Σχήμα 1.1: Κινητική ενυδάτωσης τσιμέντου Portland (Σ. Τσίμας, 2001)



Σχήμα 1.2: Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος σε MPa συναρτήσει του χρόνου (Mindess et.all 2003)

1.2.1.2 Νερό ανάμιξης

Η σύσταση του νερού είναι πολύ σημαντική διότι μαζί με το τσιμέντο παίρνει μέρος στις αντιδράσεις ενυδάτωσης που οδηγούν στην πήξη και τη σκλήρυνση του μίγματος. Επομένως, δεν πρέπει να περιέχει συστατικά που μπορούν να βλάψουν ή να επηρεάσουν τις αντιδράσεις ενυδάτωσης. Οι κυριότερες από τις χημικές ουσίες που έχουν δυσμενή επίδραση στην εξέλιξη των χημικών αντιδράσεων, με αποτέλεσμα τη μείωση της τελικής αντοχής ή την καθυστέρηση της πήξης είναι η ζάχαρη, τα οξέα όπως το ανθρακικό οξύ ή άλλα οργανικής προέλευσης, τα λάδια και τα λίπη (Τσίμας Σ. and Τσιβιλής Σ., 2004).

Πρέπει να γίνεται σαφής διάκριση του νερού ανάμιξης και του νερού το οποίο έρχεται σε επαφή με το σκληρυμένο σκυρόδεμα. Το νερό που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του σκυροδέματος θα πρέπει να μην περιέχει στερεά πάνω από 2000 ppm ενώ για αναλογία νερό:τσιμέντο=0,5 θα πρέπει το στερεό υπόλειμμα να είναι το 0,05% της μάζας του τσιμέντου (NEVILLE A.M., 1996). Επίσης είναι πιθανό, νερό με pH 6 - 8 και πιθανώς 9 να μπορεί να χρησιμοποιηθεί, ενώ νερό που μυρίζει άσχημα ή έχει σκούρο χρώμα να θεωρείται ακατάλληλο για μίξη με το τσιμέντο.

Τα φυσικά νερά που περιέχουν ασθενή οργανικά οξέα δεν επηρεάζουν τις ιδιότητες του σκληρυμένου τσιμέντου, ενώ νερά με χουμικά συστατικά ή άλλα οργανικά οξέα είναι ακατάλληλα για χρήση. Όσον αφορά τα υφάλμυρα ύδατα αυτά είναι αβλαβή εφόσον περιέχουν ιόντα Cl⁻ και SO₃ σε συγκεντρώσεις μικρότερες των 500 ppm και 1000 ppm αντίστοιχα (NEVILLE A.M., 1996). Το θαλασσινό νερό έχει αλμυρότητα περίπου 3,5% κ.β ενώ τα στερεά που είναι διαλυμένα είναι 78% χλωριούχο νάτριο (NaCl) και 15% χλωριούχο μαγνήσιο (MgCl₂) και θειικό Μαγνήσιο (MgSO₄). Η σύσταση αυτή παρά το ότι μειώνει τις τελικές αντοχές του σκυροδέματος, σε ποσοστό 15%, καθιστά το θαλασσινό νερό ικανό για ανάμιξη με το τσιμέντο (NEVILLE

A.M., 1996). Τα όρια τιμών διάφορων συστατικών ανάλογα με το είδος του σκυροδέματος κατά **DIN 1008 & ELOT 345** δίνονται στον πίνακα 1.3.

Πίνακας 1.3: Τιμές συγκέντρωσης συστατικών νερού σε ppm για την παρασκευή σκυροδέματος

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ - ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ		ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ (ppm)
CaCO ₃	Ολική οξύτητα	100-500
CaCO ₃	Ολική αλκαλικότητα	≤500
Ανόργανα στερεά	άοπλο & οπλισμένο	3000-15000
	Προεντεταμένο	≤800
Οργανικά στερεά	-	200-500
Na ₂ SO ₄	άοπλο & οπλισμένο	1500-3000
	Προεντεταμένο	≤400
NaCl	άοπλο & οπλισμένο	2000-15000
	Προεντεταμένο	≤400
KMnO ₄	-	50-100
Λίπη & σάκχαρα	-	0

Η αναλογία νερό:τσιμέντο διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος και κατ' επέκταση στη συμπύκνωση που γίνεται κατά την τοποθέτηση στον ξυλότυπο σε μια κατασκευή. Οι ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος οφείλονται σε πολύ μεγάλο ποσοστό στο λόγο W/C διότι στην περίπτωση που είναι μικρός δεν υπάρχει αρκετό νερό για την ενυδάτωση των φάσεων του τσιμέντου, ενώ σε πολύ υψηλό, δημιουργούνται κενά, τα οποία αυξάνουν το τριχοειδές πορώδες. Ο βέλτιστος λόγος W/C ώστε να παρασκευαστεί σκυρόδεμα μειωμένης διαπερατότητας και αυξημένων μηχανικών αντοχών είναι W/C=0.45 (Massazza F., 1985).

1.2.1.3 Αδρανή υλικά

Αδρανή ονομάζονται φυσικά υλικά που συμμετέχουν στη σύνθεση του σκυροδέματος με σκοπό την αύξηση της αντοχής του χωρίς να αντιδρούν με τις φάσεις του τσιμέντου που δημιουργούνται κατά την ενυδάτωση και την σκλήρυνση του. Έχουν συνήθως γωνιώδες σχήμα και προέρχονται από τη θραύση των πετρωμάτων σε διάφορες κοκκομετρίες. Ως αδρανή υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν θραύσματα πετρωμάτων που έχουν επαρκή αντοχή, χημική σταθερότητα και ικανή πρόσφυση με το τσιμέντο. Τα πετρώματα που μπορούν να δώσουν αδρανή υλικά για χρήση στο σκυρόδεμα σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM C 294-86** είναι τα εξής:

- Πυριτικά πετρώματα (χαλαζία, οπάλιο, χαλκηδόνιο, τριδυμίτη, χριστοβαλίτη).

- Ανθρακικά πετρώματα (με ασβεστίτη ή αραγωνίτη)
- Μαρμαρυγίες (μοσχοβίτης, βιοτίτης),
- Θειούχα ορυκτά
- Ζεόλιθοι
- Οξειδία του σιδήρου, Θειούχα ορυκτά του σιδήρου,
- Αργιλικά ορυκτά

Από τα παραπάνω πετρώματα, έχει αποδειχθεί ότι τα πιο κατάλληλα είναι τα ασβεστολιθικά και τα πυριτικά. Τα υπόλοιπα είδη πετρωμάτων περιέχουν ορυκτές φάσεις που στο κρυσταλλικό πλέγμα τους περιέχουν σίδηρο, μαγνήσιο και θείο αντιδρώντας με τις φάσεις του τσιμέντου ελαττώνοντας τις μηχανικές του ιδιότητες και επιταχύνοντας τη διάβρωση του οπλισμού.

Τα αδρανή διακρίνονται ανάλογα με τον τρόπο θραύσης τους σε φυσικά και τεχνητά (ΜΑΛΑΜΟΥΤΗ Σ., 2007):

- ✓ Τα φυσικά αδρανή (αμμοχάλικα) λαμβάνονται από ποταμούς, από ακτές θαλάσσης και από περιοχές παλαιότερων αποθέσεων (ορυχεία). Το σχήμα του κόκκου είναι γενικώς αποστρογγυλεμένο. Η ορυκτολογική σύσταση των φυσικών αδρανών είναι ετερογενής διότι οι κόκκοι είναι συνήθως διαφορετικής ορυκτολογικής σύστασης.
- ✓ Τα τεχνητά αδρανή (θραυστά αδρανή) είναι και αυτά φυσικής προέλευσης, αλλά παράγονται με θραύση συμπαγών πετρωμάτων και σε αντίθεση με τα φυσικά αδρανή έχουν ακανόνιστο και γωνιώδες σχήμα. Τα πετρώματα θραύονται σε σπαστήρες και κοσκινίζονται, για να ληφθούν οι διάφορες κοκκομετρίες. Τεχνητά αδρανή, παρασκευάζονται για ειδικά για κονιάματα και σκυροδέματα (π.χ. Κλίνκερ, σκουριές υψικαμίνων, σπογγοκέραμος κλπ.).

Τα αδρανή υλικά χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν την αντοχή του σκληρυμένου σκυροδέματος. Επομένως η σκληρότητα, η δυσθραυστότητα, το πορώδες, η απορροφητικότητα και η χημική σύσταση του μητρικού πετρώματος είναι στοιχεία πολύ σημαντικά για τη μηχανική συμπεριφορά του σκυροδέματος. Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι για να κονιοποιηθεί ένα πέτρωμα και να χρησιμοποιηθεί ως αδρανές υλικό στο σκυρόδεμα πρέπει να ελεγχθεί η αντοχή του, η καθαρότητα του, η πρόσφυση που έχει με την τσιμεντοκονία, η κοκκομετρική διαβάθμιση και η χημική συμπεριφορά του.

Προσμίξεις αδρανών υλικών

Η καθαρότητα των αδρανών υλικών παίζει σημαντικό ρόλο στην αντοχή και την πήξη του σκυροδέματος. Οι σημαντικότερες προσμίξεις είναι οι εξής (Τσίμας Σ. and Τσιβιλής Σ., 2004):

- ✓ Παιπάλη. Ως παιπάλη ορίζεται το λεπτότατο υλικό που διέρχεται από το κόσκινο Νο 200 (75μm) και προσδιορίζεται σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος. Η παιπάλη δεν πρέπει να υπερβαίνει το 16% του ξηρού βάρους της άμμου και το 1% των άλλων κλασμάτων (γαρμπιλιού, άμμου, χαλικιών κ.λπ.). Η παιπάλη μπορεί να είναι πηλός ή άργιλος ή σκόνη από το ίδιο πέτρωμα. Ιδιαίτερη όμως σημασία έχει η κατανομή της παιπάλης μέσα στα αδρανή. Μπορεί να είναι: α) επάνω στην επιφάνεια των χονδρότερων κόκκων, β) να σχηματίζει μικρούς σβώλους και γ) να είναι διασκορπισμένη. Η λεπτή αυτή σκόνη απομακρύνεται με έκπλυση των αδρανών.
- ✓ Οργανικές προσμίξεις. Στις οργανικές προσμίξεις περιλαμβάνονται υλικά οργανικής (φυτικής ή ζωικής) προέλευσης, γαιάνθρακες και λιγνίτες. Τα οργανικά προϊόντα μπορεί να έχουν επίδραση στην πήξη της κονιάς (επιβραδύνουν την πήξη) ή να δημιουργήσουν ρηγματώσεις ή αποφλοιώσεις (σκασίματα) στην επιφάνεια του σκυροδέματος.
- ✓ Θειούχες ενώσεις. Έχουν δυσμενή επίδραση στην τελική αντοχή του σκυροδέματος και σε μεγαλύτερη ποσότητα ή όταν είναι συγκεντρωμένες σε ορισμένα σημεία, μπορούν να προκαλέσουν ρηγματώσεις οφειλόμενες στην τοπική διόγκωση του σκυροδέματος. Η επίδραση των θειούχων ενώσεων στο σκυρόδεμα εξαρτάται από τον τύπο τους και από τη διαλυτότητα τους στο νερό.

Κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών υλικών

Οι κόκκοι των αδρανών υλικών στηρίζονται ο ένας πάνω στον άλλον, αλλά λόγω του ακανόνιστου πολυγωνικού σχήματος που έχουν, δεν εφάπτονται απόλυτα μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να αφήνουν ενδιάμεσα κενά. Τα κενά αυτά μεταξύ των αδρανών γεμίζουν με τσιμεντοκονία η οποία συνδέει τους κόκκους και όταν πήξει μετατρέπεται σε ένα συμπαγές υλικό. Ο όγκος του κονιάματος πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσος με τον όγκο που καταλαμβάνεται από τα αδρανή. Γενικά, επειδή το κονίαμα είναι περισσότερο πορώδες και λιγότερο ανθεκτικό από το πέτρωμα των αδρανών όσο λιγότερα είναι τα κενά μεταξύ των αδρανών τόσο πιο μεγάλη αντοχή και πυκνότητα αποκτά το σκυρόδεμα όταν σκληρύνεται. Τον βαθμό πυκνότητας των αδρανών εκφράζει ο λόγος (Τσίμας Σ., 2001):

$$a = \frac{\rho_{\phi}}{\rho_{\pi}}$$

Όπου:

ρ_{ϕ} είναι το συνολικό φαινόμενο ειδικό βάρος των αδρανών,

ρ_{π} είναι το φαινόμενο ειδικό βάρος του μητρικού πετρώματος.

Το ποσοστό των κενών μεταξύ των κόκκων των αδρανών δηλώνεται από το ποσοστό $(1-\alpha)*100\%$.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών και η οποία καθορίζεται με πρότυπα κόσκινα που έχουν οπές διαφορετικών διαμέτρων. Βέβαια, παρόλο που καθορίζεται η κοκκομετρική σύνθεση του σωρού των αδρανών, δεν λαμβάνεται υπόψη η γεωμετρία τους με δεδομένο το γωνιώδες σχήμα τους. Η τελική αντοχή που θα αποκτήσει το σκυρόδεμα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό εκτός από τις ιδιότητες του πετρώματος και από το μέγεθος των αδρανών που χρησιμοποιούνται. Σύμφωνα με άλλους ερευνητές (NEVILLE A.M., 1996) η αύξηση του μεγέθους των αδρανών είναι ευνοϊκή μόνο σε χαμηλές έως μέσες πυκνότητες σκυροδέματος ($170-280\text{kg/m}^3$). Συγκεκριμένα, για πυκνότητα 170 kg/m^3 η αντοχή αυξάνεται σχεδόν γραμμικά αυξανόμενου του μεγέθους των αδρανών υλικών ενώ στην πυκνότητα των 280 kg/m^3 αυξάνεται με φθίνοντα ρυθμό ως το μέγεθος των 76.2 mm (3in). Από κει και έπειτα περαιτέρω αύξηση του μεγέθους δεν επιφέρει κανένα αποτέλεσμα. Αντίθετα σε μεγαλύτερες πυκνότητες, αύξηση του μεγέθους των αδρανών πέραν των 38.1 mm ($1\frac{1}{2}\text{ in}$) οδηγεί σε μειωμένες αντοχές σκυροδέματος. Επομένως, γίνεται αντιληπτό ότι η τελική αντοχή που θα αποκτήσει το σκυρόδεμα είναι συνάρτηση του είδους των αδρανών, του μεγέθους τους και του λόγου νερό:τσιμέντο.

2 ΠΡΟΣΘΕΤΑ & ΠΡΟΣΜΙΚΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

2.1 ΟΡΥΚΤΑ ΠΡΟΣΜΙΚΤΑ

2.1.1 Φυσικές ποζολάνες

Φυσικές ποζολάνες ονομάζονται οι "ηφαιστειακές γαίες" πλούσιες σε πυρίτιο και φτωχές σε ασβέστιο. Τέτοια υλικά είναι η κίσηρης, η ηφαιστειακή σποδός, η ηφαιστειακή τέφρα κλπ. Οι ποζολάνες αντιδρούν με το $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (C-H) δημιουργώντας ένυδρο πυριτικό ασβέστιο (C-S-H). Η φυσική ποζολάνη μπορεί να προστεθεί είτε με συνάλεση κατά την παραγωγή τσιμέντου, είτε με ανάμιξη εκ των υστέρων κατά την παραγωγή του σκυροδέματος, αφού πρώτα έχει αλεστεί σε κλάσμα παρόμοιο με αυτό του τσιμέντου. Ο πίνακας 2.1 παρουσιάζει τη χημική σύσταση των κυριότερων φυσικών ποζολανών στην Ελλάδα (ΣΤΑΜΑΤΑΚΗΣ Μ. and ΚΑΤΕΡΙΝΟΠΟΥΛΟΣ Α., 1995).

Πίνακας 2.1: Χημική σύσταση σε οξείδια (%) διαφόρων ποζολανών που παράγονται στην Ελλάδα

	Μηλαϊκή γη				Θηραϊκή γη				Ποζολάνη Έδεσσας
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO_2	67.0	68.0	63.0	65.1	66.0	56.9	64.7	63.6	62.2
Al_2O_3	13.30	12.80	1-2.20	13.25	13.04	16.84	15.80	16.70	19.78
Fe_2O_3	2.00	1.60	2.00	2.41	4.26	9.33	3.60	4.10	3.99
CaO	2.00	1.40	1.50	2.05	3.58	7.65	4.10	3.60	4.57
MgO	0.71	0.50	1.50	1.10	1.10	4.07	2.10	1.40	2.70
K_2O	3.30	3.30	3.10	2.66	2.94	1.22	2.00	3.50	2.25
Na_2O	3.60	3.80	5.60	3.18	3.29	2.49	3.80	2.10	1.58
L.O.I	7.70	8.40	10.80	8.32	5.30	1.40	3.80	4.00	2.20

Η προσθήκη ποζολάνης στο σκυροδέμα έχει τα παρακάτω θετικά αποτελέσματα (Kouloumbi et al., 1994):

- Μείωση της θερμότητας ενυδάτωσης από την κατανάλωση του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ μέσω της ποζολανικής αντίδρασης,
- Βελτίωση της αντοχής σε όξινο περιβάλλον λόγω της δέσμευσης του CH,
- Υστέρηση μηχανικών αντοχών στις πρώιμες ηλικίες διότι η ποζολανική αντίδραση είναι βραδεία,
- Μείωση πορώδους του σκυροδέματος λόγω της δημιουργίας C-H-S,
- προστασία του οπλισμού από τη διάβρωση από τα ιόντα Cl^- εξαιτίας της δέσμευσης τους από την ποζολάνη,
- Μείωση του κόστους παραγωγής του τσιμέντου και των εκπομπών CO_2 λόγω αντικατάστασης του τσιμέντου από την ποζολάνη.

Τα τσιμέντα με πρόσθετο φυσική ποζολάνη είναι ανθεκτικότερα σε σχέση με το αμιγές τσιμέντο Portland σε μαλακά νερά, θαλασσινό νερό και σε αραιά διαλύματα αλάτων Mg. Επίσης λόγω της ικανότητας δέσμευσης των χλωριόντων συντελούν στην προστασία του οπλισμού στο θαλασσινό νερό (ΡΟΥΤΟΥΛΑΣ Α.Τ., 2000).

2.1.2 Τεχνητές ποζολάνες

2.1.2.1 Ιπτάμενη τέφρα (fly ash)

Ονομάζεται το λεπτότατο κλάσμα που προκύπτει από την καύση γαιανθράκων σε βιομηχανίες παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας και συλλέγεται από διάφορα μηχανικά ή ηλεκτροστατικά φίλτρα. Η διαφορά της ΙΤ από τη φυσική ποζολάνη είναι η περιεκτικότητα σε ελεύθερα άσβεστο (CaO_f) και η μικρότερη περιεκτικότητα σε νερό.

Σύμφωνα με το πρότυπο **EN 197-1** οι ιπτάμενες τέφρες διακρίνονται σε (Τσίμας Σ., 2001):

- ⇒ *Αργιλοπυριτικές* που προέρχονται από την καύση γαιανθράκων και ανθρακιδίων και έχουν ποζολανικές ιδιότητες
- ⇒ *Ασβεστοπυριτικές* που προέρχονται από την καύση λιγνιτών και έχουν τόσο ποζολανικές όσο και υδραυλικές ιδιότητες.

Σύμφωνα με το Αμερικανικό πρότυπο **ASTM C-618-94** οι ιπτάμενες τέφρες κατατάσσονται ανάλογα με τον τύπο του γαιάνθρακα από τον οποίο έχουν προέλθει σε:

- ⇒ **Class F** ιπτάμενη τέφρα η οποία προέρχεται από βιτουμενιούχους άνθρακες με υψηλό ποσοστό πυριτίου. Στο συγκεκριμένο τύπο τέφρας θα πρέπει να ικανοποιείται $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70\%$ & $\text{CaO} < 10\%$.
- ⇒ **Class C** ιπτάμενη τέφρα που προκύπτει από την καύση λιγνιτών και υποβιτουμενιούχων ανθράκων με υψηλό ποσοστό ασβεστίου, Στο συγκεκριμένο τύπο τέφρας θα πρέπει να ικανοποιείται $50\% \leq \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 < 70\%$ & $\text{CaO} > 20\%$.
- ⇒ **Class N** ιπτάμενη τέφρα που παράγεται από την καύση σχιστόλιθων ή ηφαιστειακών πετρωμάτων. Στο συγκεκριμένο τύπο τέφρας θα πρέπει να ικανοποιείται $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70\%$ & $\text{CaO} < 4\%$.

Στην Ελλάδα οι προδιαγραφές και οι χρήσεις των Ιπτάμενων Τεφρών ορίζονται από το **ΦΕΚ 551/Β/18-4-2007**.

Οι ιπτάμενες τέφρες έχουν το πλεονέκτημα της μεγάλης λεπτότητας αφού τα πιο ευμεγέθη σφαιρίδια έχουν διάμετρο 1-100μm και η ειδική επιφάνεια τους κυμαίνεται από 250-600 m²/kg (NEVILLE A.M., 1996). Σημαντικό ρόλο στην ποιότητα

των τεφρών παίζουν η περιεκτικότητά τους σε SiO_2 , Al_2O_3 , C (<3%), SO_3 , και CaO_f . Η χημική σύσταση των Ι.Τ που παράγονται στην Ελλάδα δίνονται στον πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2: Χημική σύσταση σε οξείδια (%) διαφόρων Ι.Τ που παράγονται στην Ελλάδα

	Ι.Τ ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗΣ	Ι.Τ ΠΤΟΛΕΜΑΪΔΑΣ	Ι.Τ ΑΛΙΒΕΡΙΟΥ
SiO_2	40-45	13-35	35
Al_2O_3	15-25	9-20	15
Fe_2O_3	6,5-10	3,5-7	8
CAO	12-18	30-50	25
MGO	1,8-2,8	1,5-4,5	2
SO_3	1,5-3,5	4-11	2,5
K_2O	1,5-2	0,5-1,1	2
Na_2O	-0,5	0,6-0,8	0,5
CaO_f	-	9-15	3
Απώλεια πύρωσης	0,9-2,8	1-7,5	-
Αδιάλυτο υπόλειμμα	30-45	12-32	25-30

2.1.2.2 Φαρίνα Ηλεκτροφίλτρων (ΦΗΦ)

Για την παραγωγή του τσιμέντου χρησιμοποιούνται ηλεκτροστατικά φίλτρα για τη κατακράτηση του λεπτομερέστατου κλάσματος που παράγεται κατά τη λειτουργία των περιστροφικών κλιβάνων. Η τέφρα αυτή, γνωστή και ως σαν φαρίνα Ηλεκτροφίλτρων (ΦΗΦ), συνήθως δεν μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί στην τροφοδοσία των κλιβάνων όταν αυτοί παράγουν τύπο τσιμέντου που απαιτεί χαμηλή περιεκτικότητα σε αλκάλια. Η ΦΗΦ αποτελείται από ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3), χαλαζία (SiO_2) και μικρό ποσοστό αργιλικών ορυκτών (καολίνη, ιλλίτη). Κατατάσσεται στα ασβεστολιθικά πρόσθετα και επειδή έχει αυξημένη αλκαλικότητα βελτιώνει την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος (Τσίμας Σ., 2001).

2.1.2.3 Σκωρία υψικαμίνων (slag)

Η σκωρία υψικαμίνων αποτελείται κυρίως από πυριτικά και αργιλοπυριτικά άλατα του ασβεστίου και από πολύ μικρά ποσοστά μετάλλων. Έχει λανθάνουσες υδραυλικές ιδιότητες οι οποίες αυξάνονται όταν αλέθονται σε πολύ μεγάλες λεπτότητες. Συγκεκριμένα, η σκωρία αλέθεται σε μέγεθος μικρότερο των 45 μm αλλά παρουσιάζει την ιδιομορφία να αλέθεται εύκολα μέχρι τα 100 - 150 μm και μετά να αλέθεται πολύ δύσκολα (NEVILLE A.M., 1996). Οι κόκκοι της σκωρίας είναι γωνιώδεις και έχουν τραχιά επιφάνεια. Έχουν υψηλό ειδικό βάρος και μέτρια απορρόφηση νερού (λιγότερο από 3%). Για να αυξηθεί η δραστητικότητα και η υδραυλικότητα, η σκωρία ψύχεται απότομα με σκοπό την ανάπτυξη υαλώδους φάσεως σε ποσοστό

τουλάχιστον 70% και τον περιορισμό της κρυσταλλικής (Χουσίδης Ν., 2008). Η προσθήκη της σκωρίας στο τσιμέντο μπορεί να γίνει με ξηρή συνάλεση στο κλίνκερ ή με ανάμιξη εφόσον η σκωρία είναι ήδη κονιοποιημένη. Τα ποσοστά ανάμιξης ποικίλουν από 5-85%. Σύμφωνα με το πρότυπο **DIN 1164-1** στα τσιμέντα που περιέχουν σκωρία πρέπει να ικανοποιείται η σχέση $(CaO + MgO + Al_2O_3)/SiO_2 > 1$ και διακρίνονται σε:

- Τσιμέντα με σκωρία 6-35% και τσιμέντο Portland 94-65% που χαρακτηρίζονται σαν σιδηρούχα τσιμέντα Portland με περιεκτικότητα $SO_3 < 3.5\%$ και συρρίκνωση μικρότερη των 8mm/m,
- Τσιμέντα με σκωρία 36-80% και τσιμέντο Portland 64-20% που χαρακτηρίζονται σαν τσιμέντα υψικαμίνου με περιεκτικότητα $SO_3 < 4\%$ και συρρίκνωση μικρότερη των 8mm/m.

Η χημική σύσταση μιας τυπικής σκωρίας φαίνεται στον πίνακα 2.3 (EMERY, 1982).

Πίνακας 2.3: Ποσοστά οξειδίων σε σκωρία υψικαμίνων (Emery, 1982)

Οξείδια	Ποσοστό (%)
CaO	40 - 52
SiO ₂	10 - 19
FeO	10 - 40*
MnO	5 - 8
MgO	5 - 10
Al ₂ O ₃	1 - 3
P ₂ O ₅	0.5 - 1
S	< 0.1
Fe	0.5 - 10

*70 – 80 % FeO + 20 – 30 % Fe₂O₃

Η χρήση της σκωρίας στο τσιμέντο Portland έχει τα παρακάτω ευνοϊκά αποτελέσματα:

- Μειώνει τη θερμότητα ενυδάτωσης του τσιμέντου εξαιτίας της δέσμευσης του Ca(OH)₂ ενώ παράλληλα εξαιτίας της αργής ποζολανικής αντίδρασης εκλύεται θερμότητα με πολύ αργό ρυθμό.
- Ελαττώνει τη συρρίκνωση του σκυροδέματος.
- Η χρήση της σκωρίας μειώνει την απαιτήσες του σκυροδέματος σε νερό εξαιτίας της δέσμευσης του Ασβεστίου ενώ παράλληλα η έχει και από μόνη της υδραυλικές ιδιότητες.

- Τα σκωριοσίμεντα, δεν προσβάλλονται από διαλύματα αραιής ή μέσης συγκέντρωσης CaSO_4 , MgSO_4 και Na_2SO_4 .
- Μειώνει το βάθος ενανθράκωσης συγκριτικά με το αμιγές τσιμέντο Portland στις ίδιες συνθήκες έκθεσης.

Στις πρώιμες ηλικίες, τα σκωριοσίμεντα εμφανίζουν μειωμένες αντοχές, οι οποίες πλησιάζουν τις αντοχές του αμιγούς τσιμέντου Portland στις 90 ημέρες. Ακόμα, τα σκωριοσίμεντα παρουσιάζουν ανεπάρκεια στην προστασία του οπλισμού από τα χλωριόντα. Επομένως, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το περιβάλλον στο οποίο εκτίθεται η κατασκευή. Ακόμα σύμφωνα με άλλες έρευνες (Bakker, 1983) το σκυρόδεμα για να μην προσβάλλεται από τα θειικά ιόντα θα πρέπει να ισχύει $\text{C}_3\text{A} < 3\%$ και το ποσοστό προσθήκης σε σκωρία να είναι $< 70\%$. Γενικά, πάντως η σκωρία υψικαμίνων αποτελεί παραπροϊόν και η χρήση του μειώνει το κόστος παραγωγής του τσιμέντου συνυπολογίζοντας και την ενέργεια που δαπανάται, ενώ παράλληλα προστατεύει και το περιβάλλον.

2.1.2.4 Πυριτική παιπάλη (*silica fume*)

Η πυριτική παιπάλη έχει αυξημένη ποζολανικότητα και είναι παραπροϊόν της βιομηχανικής παραγωγής πυριτικών κραμάτων ή του σιδηροπυριτίου. Σχηματίζεται από την οξείδωση και συμπύκνωση ατμών SiO_2 . Η διάμετρος των σωματιδίων της πυριτικής παιπάλης κυμαίνεται από 0,02 έως 0,5 μm . Κατά κύριο λόγο η χημική της σύσταση είναι SiO_2 σε ποσοστό 85% έως 90%.

Η προσθήκη της πυριτικής παιπάλης στο σκυρόδεμα μειώνει τη θερμότητα ενυδάτωσης, αυξάνει τη θλιπτική αντοχή σε μετέπειτα ηλικίες (Jain and Neithalath, 2010), βελτιώνει την αντίσταση στα θειικά ιόντα και μειώνει τη διαπερατότητα (Dotto et al., 2004). Επίσης, αυξάνει την αντοχή σε κύκλους ψύξης - θέρμανσης και την ανθεκτικότητα σε διάβρωση από το νερό. Εξαιτίας της λεπτής κοκκομετρίας, η προσθήκη πυριτικής παιπάλης αυξάνει την απαίτηση σε νερό ανάμιξης με αποτέλεσμα τη δημιουργία σκυροδεμάτων υψηλής πορώδους δομής ή ακόμα και τη δημιουργία μικρορηγματώσεων στη μάζα του σκυροδέματος.

2.1.3 Πρόσθετα Σκυροδέματος ή χημικά πρόσθετα

Είναι χημικά υλικά που προστίθενται στο νωπό μίγμα, σε μικρές ποσότητες, για να προσδώσουν σε αυτό ορισμένες ιδιότητες, ή για να βελτιώσουν άλλες (ΚΤΣ 2015). Τα χημικά πρόσθετα (admixtures), προστίθενται στο σκυρόδεμα σε ποσοστό μέχρι 5% κ.β τσιμέντου κατά τη διάρκεια της ανάμιξης του και πριν τη χύτευση. Έχουν ως σκοπό τη βελτίωση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος. Χημικά χαρακτηρίζονται σε οργανικά και ανόργανα πρόσθετα, αλλά κατηγοριοποιούνται με

βάση τις ιδιότητες που προσδίδουν στο σκυρόδεμα. Γενικά αποτελούνται από μόρια που περιλαμβάνουν οργανικές αλυσίδες των οποίων το ένα άκρο είναι υδρόφιλο και περιέχει μία ή περισσότερες πολικές ($-COO^-$, $-SO_3^-$, $-NH_4^+$). Τα χημικά πρόσθετα διαχωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες. Η πρώτη περιλαμβάνει αυτά που δρουν αμέσως στην επιφάνεια των κόκκων του τσιμέντου, ενώ η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει αυτά που επηρεάζουν τις αντιδράσεις μεταξύ τσιμέντου και νερού μερικές ώρες μετά την προσθήκη τους.

2.1.3.1 Αερακτικά (*Air-Entraining Admixtures*)

Η δράση των αερακτικών συνίσταται στη μείωση της επιφανειακής τάσης και τη δημιουργία και κατόπιν εγκλωβισμό φυσαλίδων αέρα διαμέτρου 10 – 1000 μm στη μάζα του σκυροδέματος. Τα αερακτικά χρησιμοποιούνται κυρίως στη βελτίωση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος σε εναλλαγές ψύξης – απόψυξης μέσω της χρήσης των φυσαλίδων ως χώρων διαστολής του νερού κατά την πήξη και τη βελτίωση της εργασιμότητας από τη μείωση της εσωτερικής τριβής μεταξύ των στερεών κόκκων, ιδιαίτερα σε μίγματα τα οποία περιέχουν αδρανή μεγάλης τραχύτητας. Επίσης αυξάνουν την ανθεκτικότητα στα θειικά και ελαττώνουν τον κίνδυνο αλκαλοπυριτικής αντίδρασης.

Τα πρόσθετα τα οποία χρησιμοποιούνται συνήθως ως αερακτικά, προέρχονται συνήθως από άλατα ρητινών του ξύλου, από πετρελαϊκά οξέα και από ορισμένα συνθετικά απορρυπαντικά (Ρακαντά-Ζαχαρίου Ε., 2010).

2.1.3.2 Ρευστοποιητές (*Plasticizers*)

Χρησιμοποιούνται στο νωπό σκυρόδεμα ώστε να μειωθεί η ποσότητα του νερού μίξης και να βελτιωθεί η αντοχή και η ανθεκτικότητα. Οι Ρευστοποιητές δρουν ως λιπαντικό στους κόκκους των αδρανών, αυξάνοντας την εργασιμότητα. Οι πλαστικοποιητές που χρησιμοποιούνται ευρύτατα είναι αυτοί που κατατάσσονται σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM C-494** σε *type-A* τα οποία πρέπει να προκαλούν μείωση στο προστιθέμενο νερό στο σκυρόδεμα τουλάχιστον 5% χωρίς μείωση της πυκνότητας και την αντοχής συγκρινόμενο με σκυρόδεμα που περιέχει υψηλότερο λόγο W/C χωρίς ρευστοποιητή.

2.1.3.3 Επιβραδυντές (*Retarders*)

Χρησιμοποιούνται με σκοπό τη αύξηση του χρόνου πήξης και τοποθετούνται στο σκυρόδεμα σε διάφορες αναλογίες συνήθως μαζί με άλλα πρόσθετα. Επίσης τα συγκεκριμένα πρόσθετα βοηθούν στην ομοιόμορφη πήξη του σκυροδέματος και στην αύξηση της εργασιμότητας με χρήση λιγότερου νερού. Οι επιβραδυντές επιδρούν στην ενυδάτωση του C_3S & C_3A τα οποία είναι υπεύθυνα για την πήξη του σκυροδέματος κατά τις πρώτες ώρες (Colleparidi M., 1984). Στα αρνητικά της χρήσης

αυτού του είδους των προσθέτων είναι η μικρή αύξηση του περιεχόμενου αέρα στο σκυρόδεμα, ο αυξημένος χρόνος συντήρησης και οι χαμηλές πρώιμες αντοχές που επιδρούν στη συστολή και τον ερπυσμό (Daugherty and Kowalewski, 1976).

2.1.3.4 Επιταχυντές (*Accelerating*)

Η προσθήκη των επιταχυντών στο σκυρόδεμα έχει ως αποτέλεσμα την επιτάχυνση της ανάπτυξης των πρώιμων αντοχών του σκυροδέματος επιταχύνοντας την πήξη του τσιμέντου αλλά γενικά ελαττώνουν την αντοχή του σκυροδέματος κατά 15% (ΜΠΑΔΟΓΙΑΝΝΗΣ Ε., 2012). Συνήθως οι επιταχυντές χρησιμοποιούνται όταν το σκυρόδεμα πρόκειται να χυτευτεί υπό συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας 2°C έως 4°C.

Σε μεγάλες ποσότητες, οι επιταχυντές αυξάνουν τη συρρίκνωση του σκυροδέματος που προκαλείται από την εκλυόμενη θερμότητα κατά την ενυδάτωση των φάσεων του τσιμέντου. Ο συγκεκριμένος τύπος πρόσθετων επιδρά στο μηχανισμό ενυδάτωσης του C₃S και ο πιο συνήθης επιταχυντής πήξης είναι το CaCl₂ λόγω της μεταβολής της αλκαλικότητας που προκαλεί στο διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος. Το χλωριούχο Ασβέστιο παρά τις αντιπαγωγικές του ιδιότητες, μειώνει την ανθεκτικότητα σε θειικά, διαβρώνει τον οπλισμό εξαιτίας της υψηλής συγκέντρωσης σε ιόντα Cl⁻ για συγκέντρωση >1% κ.β, και αυξάνει τον κίνδυνο δημιουργίας ρωγμών λόγω συρρίκνωσης (ΓΡΗΓΟΡΙΑΔΗΣ Γ., 2014) και ερπυσμού. Για την αποφυγή των παραπάνω προστίθενται διάφορα είδη ποζολανών.

2.1.3.5 Υπερρευστοποιητές (*Superplasticizers*)

Τα υπερρευστοποιητικά αποτελούν ειδική κατηγορία χημικών πρόσθετων επιφανειακής δράσης και αυξάνουν τη ρευστότητα του σκυροδέματος 3 - 4 φορές περισσότερο από τα συνήθη ρευστοποιητικά, επιτρέποντας τη μείωση του νερού ανάμιξης στα 20 - 25% χωρίς απώλεια εργασιμότητας. Τα υπερρευστοποιητικά προστίθενται στο σκυρόδεμα σε ποσότητα συνήθως από 0.5 – 0.8% έως 1.2% κ.β. τσιμέντου. Επίσης δεν προκαλούν επιβράδυνση της πήξης του σκυροδέματος αλλά αντίθετα η δράση τους επιφέρει εξαιρετική διασπορά των κόκκων τσιμέντου με αποτέλεσμα την επιτάχυνση της ενυδάτωσης του (ταχεία πήξη και σκλήρυνση του σκυροδέματος).

Ενώσεις που συνήθως χρησιμοποιούνται ως υπερρευστοποιητικά σκυροδέματος είναι άλατα μελαμίνης, ενώσεις φορμαλδεΐδης και χρησιμοποιούνται κυρίως για την επίτευξη υψηλών αντοχών (Ρακαντά-Ζαχαρίου Ε., 2010).

Το Βρετανικό πρότυπο **BS EN-5075** κατατάσσει τα χημικά πρόσθετα του σκυροδέματος σε επιταχυντές, επιβραδυντές, Ρευστοποιητές και Υπερρευστοποιητές. Ο Ευρωκώδικας **EN 934.02** περιγράφει τη χρήση και τις απαιτήσεις που πρέπει να

καλύπτουν τα πρόσθετα τα οποία φέρουν τη σήμανση CE (Comformiting Marking and Labeling).

Τα πρόσθετα πρέπει να ικανοποιούν τις γενικές απαιτήσεις του **ΕΛΟΤ EN 934-1:2008** και τις ειδικές απαιτήσεις του **ΕΛΟΤ EN 934-2+A1:20012**.

Πίνακας 2.4: Κατηγοριοποίηση πρόσθετων σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN 934-2+A1:20012.

Ρευστοποιητές/μειωτές νερού	Απλοί
	Υψηλού βαθμού
Επιβραδυντές	Επιβραδυντές πήξης
	Επιβραδυντές πήξης/μειωτές νερού-απλοί/ρευστοποιητές
	Επιβραδυντές πήξης/μειωτές νερού-υψηλού βαθμού/υπερευσοποιητές
Αερακτικά	αερακτικά
Επιταχυντές	Επιταχυντές πήξης
	Επιταχυντές σκλήρυνσης
	Επιταχυντές πήξης/μειωτές νερού-απλοί/ρευστοποιητές
Πρόσθετα συγκράτησης νερού	Μειωτές εξίδρωσης
	Μειωτές τριχοειδούς απορρόφησης
Ρυθμιστές ιξώδους	Ρυθμιστές ιξώδους

3 ΧΑΛΥΒΕΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΧΟΣ

Το σκυρόδεμα όπως είναι γνωστό έχει υψηλή θλιπτική αντοχή αλλά πολύ μικρή εφελκυστική, η οποία ισούται περίπου με το 10% της αντοχής σε θλίψη. Για τον παραπάνω λόγο τοποθετείται οπλισμός, συνήθως χαλύβδινος, ο οποίος έχει ραβδώσεις στην επιφάνεια του για καλύτερη πρόσφυση με το σκυρόδεμα. Ο Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος (Κ.Τ.Χ) που συντάχθηκε στην Ελλάδα για πρώτη φορά το 2000, ορίζει τις απαιτήσεις σχετικά με την ποιότητα, τη διαμόρφωση και την τοποθέτηση των χαλύβδινων οπλισμών. Ο ΚΤΧ τροποποιήθηκε το 2007 και ενσωματώνει τις νέες απαιτήσεις των Προτύπων ΕΛΟΤ για τους χάλυβες οπλισμού.

Η ποιότητα των χαλύβων οπλισμού, σχετίζεται με τις παρακάτω παραμέτρους (ΜΑΥΡΟΕΙΔΗΣ Π., 2008):

- Ικανοποίηση των απαιτήσεων των εκάστοτε ισχυόντων Προτύπων σε σχέση με τις μηχανικές αντοχές τους (όριο διαρροής και εφελκυστική αντοχή).
- Δυνατότητα ανάληψης σημαντικών πλαστικών παραμορφώσεων, που εκφράζεται μέσω συγκεκριμένων απαιτήσεων για την ολκιμότητα και την δυσθραυστότητα.
- Ικανότητα του συστήματος σκυρόδεμα/οπλισμός μεταφοράς εφελκυστικών δυνάμεων από τον οπλισμό στο σκυρόδεμα που σχετίζεται με τη συνάφεια του συστήματος οπλισμού-σκυροδέματος. Σημαντική προϋπόθεση για αυτό είναι η ύπαρξη κατάλληλης τραχύτητας του οπλισμού, που εξασφαλίζεται με την τήρηση ειδικών απαιτήσεων για την γεωμετρία επιφάνειας.
- Δυνατότητα συγκολλησιμότητας των χαλύβων, που καθορίζεται από τη χημική τους σύσταση και ελέγχεται μέσω της θέσπισης σχετικών απαιτήσεων.
- Δυνατότητα διατήρησης των βασικών προδιαγραφόμενων ιδιοτήτων, εντός των απαιτήσεων των Προτύπων και των κατασκευαστικών κανονισμών, σε τυπικές συνθήκες διαμόρφωσης των χαλύβων οπλισμού πριν την ενσωμάτωσή τους στο έργο. Εδώ θα μπορούσε να εντάξει κανείς, απαιτήσεις που σχετίζονται με την συμπεριφορά σε δοκιμασίες κάμψης και την πρόβλεψη για πιθανή υποβάθμιση των ιδιοτήτων λόγω προβλημάτων φυσικής γήρανσης.
- Διατήρηση των βασικών ιδιοτήτων των χαλύβων οπλισμού σε περιπτώσεις ιδιαίτερα επιβλαβούς περιβάλλοντος. Εδώ υπάγονται θέματα και απαιτήσεις προστασίας από την διάβρωση.

- Συμπεριφορά των χαλύβων οπλισμού σε ειδικές συνθήκες, όπως σε πολύ υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες ή περιπτώσεις στις οποίες μπορούν να εμφανιστούν προβλήματα κόπωσης.

3.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΧΑΛΥΒΩΝ

Για την παραγωγή Χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος, πραγματοποιούνται επιγραμματικά τα παρακάτω στάδια (ΜΑΥΡΟΕΙΔΗΣ Π., 2005):

- **Χαλυβοποίηση:** Αφορά τις διαδικασίες που απαιτούνται ώστε να παραχθούν κράματα σιδήρου με περιεκτικότητα άνθρακα, κάτω από 2%,
- **Συνεχής χύτευση:** Το τήγμα του χάλυβα της προηγούμενης φάσης, χυτεύεται και στερεοποιείται σε συγκεκριμένη μορφή ημιτελικού προϊόντος,
- **Θερμή έλαση:** Τα ημιτελικά προϊόντα αναθερμαίνονται σε κατάλληλη θερμοκρασία ώστε να είναι ελάσιμα και με συνεχή υποβιβασμό της διατομής τους, παράγονται τελικά προϊόντα σε επιθυμητές διαστάσεις και μορφές.

3.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΧΑΛΥΒΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος σύμφωνα με τον **ΚΤΧ 2008** (Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ., 2008) και τα πρότυπα του **ΕΛΟΤ** (ΕΛΟΤ 971, 1996), (ΕΛΟΤ 959, 1996) διακρίνονται στις πιο κάτω κατηγορίες ως εξής:

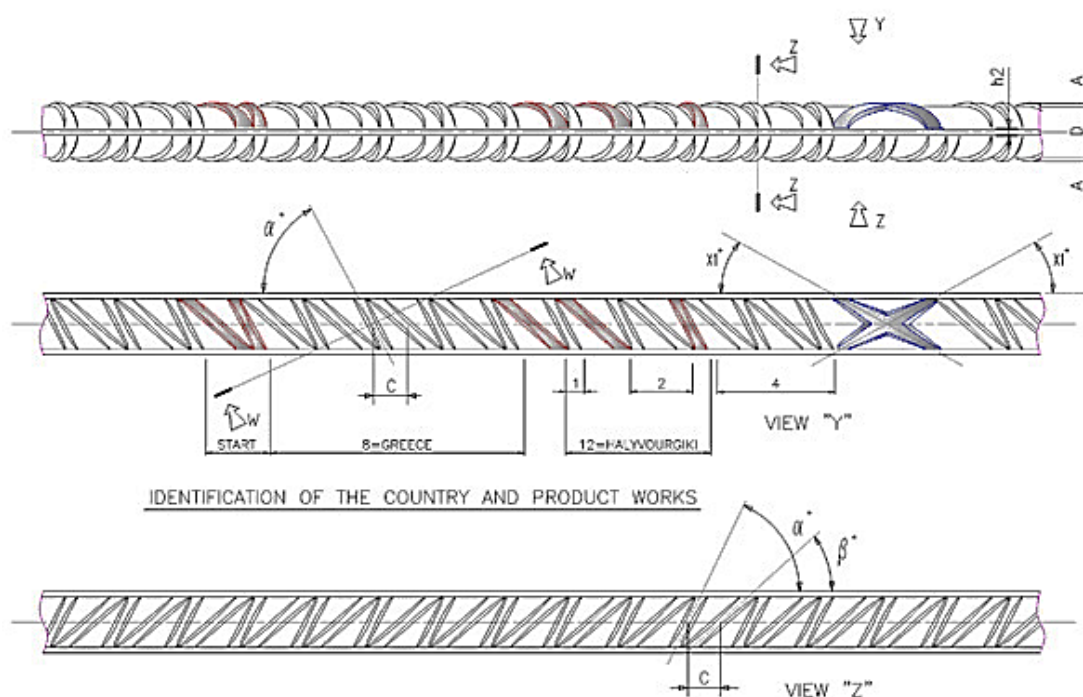
- Ανάλογα με τη μέθοδο παραγωγής όπου διακρίνονται σε θερμής έλασης χωρίς περαιτέρω κατεργασία (ΘΕ-Χ), θερμής έλασης ακολουθούμενη από θερμική κατεργασία (ΘΕ-Θ), και ψυχρή κατεργασία (στρέψη, έλαση ή διέγκυση ή συνδυασμό τους) του προϊόντος της θερμής έλασης (ΨΚ-Ο).
- Ανάλογα με την επιφάνεια τους οπότε διακρίνονται σε λείους, με κοιλότητες ή ανάγλυφες νευρώσεις (υψηλής συνάφειας).
- Ανάλογα με την ολκιμότητα διακρίνονται σε χαμηλής μέσης ή υψηλής ολκιμότητας.
- Ανάλογα με τη συγκολλησιμότητα οπότε υπάρχουν οι συγκολλησιμοι ή μη συγκολλησιμοι χάλυβες. Οι χάλυβες που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα είναι οι **B500C** (υψηλής ολκιμότητας) και **B500A** (χαμηλής ολκιμότητας για πλέγματα), είναι συγκολλησιμοι και έχουν τιμή ορίου διαρροής $f_{y,nom}$ 500MPa.
- Ανάλογα με την αντοχή τους στη διάβρωση οπότε διακρίνονται σε κοινούς χάλυβες (κράματα Fe-C και μικρές περιεκτικότητες άλλων στοιχείων) και ανοξειδωτοι χάλυβες (περιέχουν 12% Cr και μικρές ποσότητες Ni, Mo, Ti, κτλ.).

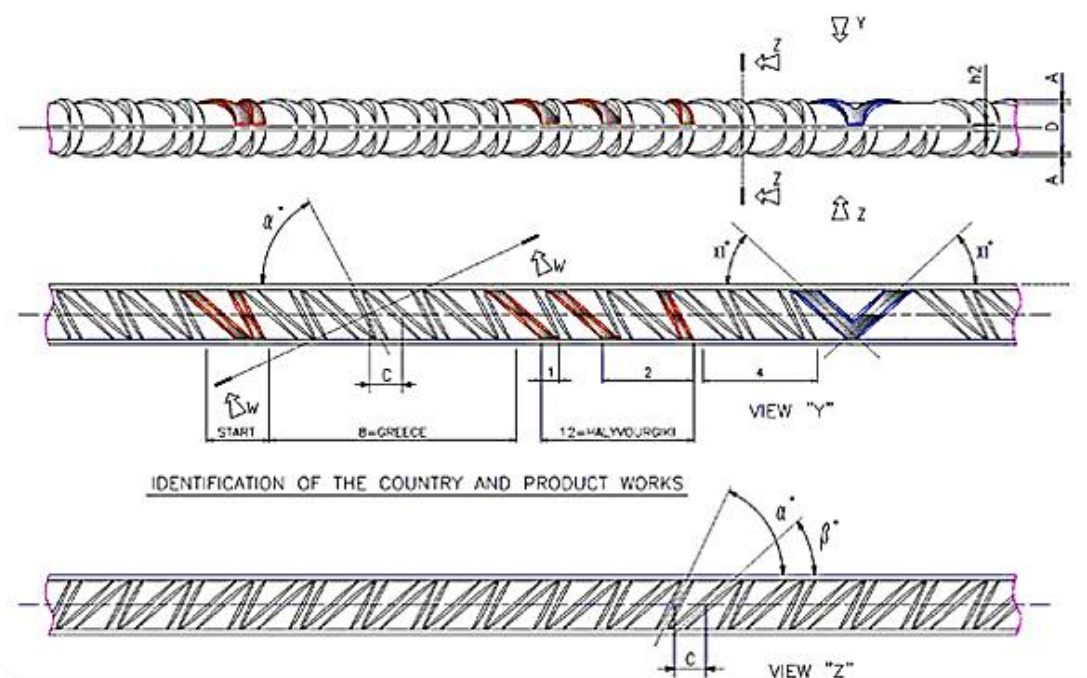
Οι παλιές και νέες απαιτήσεις των ελληνικών Προτύπων και Κανονισμών σε σχέση με τις μηχανικές αντοχές και την ολκιμότητα, παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Απαιτήσεις μηχανικών ιδιοτήτων για τους χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος (Μαυροειδής 2009)

Μέγεθος	ΕΛΟΤ 959, ΕΛΟΤ 971					ΕΛΟΤ 1421	
	S220	S400	S500	S400s	S500s	B500C	B500A
Re (MPa)	220	400	500	400	500	500	500
Rm (MPa)	340	500	550	440	550	Δεν ορίζεται. Τίθεται έμμεση απαίτηση μέσω των περιορισμών για τις τιμές του λόγου Rm/Re	Δεν ορίζεται. Τίθεται έμμεση απαίτηση μέσω των περιορισμών για τις τιμές του λόγου Rm/Re
A ₅ (%)	24	14	12	14	12	-	-
A _{gt} (%)	-	-	-	-	-	Agt≥7,5	Agt≥2,5
Rm/Re	-	-	-	1,05	1,05	1,15≤Rm/Re≤ 1,25	Rm/Re≥1.05
R _{e,act} /R _{e,nom}	-	-	-	-	-	R _{e,act} /R _{e,nom} ≤ 1,35	-

Σύμφωνα με τις απαιτήσεις της νέας σειράς Προτύπων του ΕΛΟΤ, η σήμανση χώρας και εργοστασίου ορίζεται συγκεκριμένα, ενώ ταυτόχρονα προστίθεται και σύστημα αναγνώρισης της τεχνικής κατηγορίας. Το σχήμα 3.1 παρουσιάζει τη σήμανση του χαλύβδινου οπλισμού βάση των χαρακτηριστικών του και τη χώρα παραγωγής.





Σχήμα 3.1: Σήμανση χάλυβα οπλισμού Σκυροδέματος με βάση της χώρας παραγωγής (πηγή: Χαλυθουργική Α.Ε)

3.4 ΣΥΝΑΦΕΙΑ ΟΠΛΙΣΜΟΥ-ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Οι ιδιότητες συνάφειας μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος εξαρτάται από τις ιδιότητες του σκυροδέματος στο οποίο προσφύονται. Όταν οι ράβδοι οπλισμού ενσωματώνονται μέσα στο σκυρόδεμα και στη συνέχεια αναλαμβάνουν φορτία, αναπτύσσεται τάση συνάφειας τους με το σκυρόδεμα, σταδιακά (όχι ωστόσο γραμμικά).

Η τάση συνάφειας του ΧΟΣ με το σκυρόδεμα είναι συνάρτηση πέντε βασικών παραμέτρων (ΜΑΥΡΟΕΙΔΗΣ Π., 2009):

- Του επιβαλλόμενου φορτίου,
- Της ποιότητας του σκυροδέματος,
- Των μηχανικών ιδιοτήτων των ράβδων οπλισμού,
- Των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της επιφάνειας των ράβδων οπλισμού,
- Της κατάστασης στην οποία βρίσκεται η επιφάνεια των ράβδων οπλισμού.

Για την ανάπτυξη της τάσης αυτής, οι ράβδοι πρέπει να έχουν ένα συγκεκριμένο μήκος αγκύρωσης μέσα στο σκυρόδεμα, που σχετίζεται με τις παραπάνω παραμέτρους και φυσικά και με την ποιότητα του σκυροδέματος.

Οι απαιτήσεις για αυξημένη αντοχή συνάφειας, οδήγησαν στη χρήση χαλύβων οπλισμού με νευρώσεις και στη θέσπιση ειδικών απαιτήσεων για τα γεωμετρικά

χαρακτηριστικά της επιφάνειας τους. Το σχέδιο Προτύπου **ΕΛΟΤ 1421**, ορίζει συγκεκριμένες απαιτήσεις, για τη διάταξη των νευρώσεων, το ύψος τους, την απόσταση μεταξύ τους και τις γωνίες κλίσης τους. Οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος με νευρώσεις έχουν τουλάχιστον δύο σειρές παράλληλων πλάγιων νευρώσεων ομοιόμορφα κατανεμημένων στην περιφέρεια του προϊόντος και σε ίσες αποστάσεις καθ' όλο το μήκος κάθε σειράς. Μπορούν να υπάρχουν και διαμήκεις νευρώσεις, χωρίς όμως να είναι υποχρεωτικό.

4 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΟΠΛΙΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΓΕΝΙΚΑ

Οι κατασκευές από σκυρόδεμα γενικά έχουν πολύ καλή συμπεριφορά στη διάβρωση και αντέχουν σε διάφορα περιβάλλοντα χρήσης. Έχουν παρατηρηθεί όμως περιπτώσεις, στις οποίες το σκυρόδεμα έχει υποστεί σημαντικές βλάβες και αυτό επηρεάζει άμεσα τη στατικότητα της κατασκευής. Η φθορά του σκυροδέματος όμως συνεπάγεται και διάβρωση του οπλισμού το οποίο έχει πιο καταστρεπτικά αποτελέσματα από αυτή του σκυροδέματος.

Σύμφωνα με την Αμερικανική Επιτροπή Σκυροδέματος (**ACI 201**), ανθεκτικότητα, είναι η ικανότητά του σκυροδέματος να αντιστέκεται στη διάβρωση, τη χημική προσβολή, την τριβή, ή οποιαδήποτε άλλη διαδικασία φθοράς όταν εκτίθεται σε περιβαλλοντικές συνθήκες.

Η αλλοίωση (degradation) που μπορεί να υποστεί το σκυρόδεμα κάποιες φορές οφείλεται σε περισσότερους από έναν παράγοντες ενώ σε κάποιες άλλες η παρουσία ενός μόνο είναι ικανή ώστε να προκύψει πρόβλημα ευστάθειας της κατασκευής. Το διαβρωτικό περιβάλλον εξαρτάται από τις συνθήκες έκθεσης του σκυροδέματος και μπορεί να είναι υγρό (θαλασσινό νερό), στερεό (έδαφος), αέριο (ατμόσφαιρα) ή συνδυασμός τους. Τα ιόντα τα οποία επιδρούν και επιταχύνουν τη διάβρωση του σκυροδέματος είναι Mg^{2+} , NH_4^+ , H^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , OH^- , HCO_3^- (ΜΠΑΤΗΣ Γ., 1999).

Γενικά, η διάβρωση του σκυροδέματος μπορεί να είναι φυσική ή χημική.

- **Φυσική διάβρωση:** Οφείλεται σε μηχανικά αίτια που οδηγούν είτε σε αργή μείωση του όγκου του σκυροδέματος, είτε σε απότομη ρωγμάτωση. Τέτοιοι παράγοντες είναι:

Τριβή: Μπορεί να δημιουργηθεί στην περίπτωση που το νερό ρέει κατά μήκος μιας επιφάνειας. Μεγαλύτερες φθορές παρατηρούνται σε ανομοιογένειες ή γωνίες που υπάρχουν στην κατασκευή λόγω της δημιουργίας δινών.

Ψύχος: Σε περιόδους χαμηλής θερμοκρασίας περιβάλλοντος παρατηρείται συστολή του σκυροδέματος με αποτέλεσμα την καταστροφή του. Ακόμα, σε περιοχές με υψηλή υγρασία το νερό που υπάρχει στο εσωτερικό του σκυροδέματος μετατρέπεται σε πάγο και οι βελονοειδείς του κρύσταλλοι δημιουργούν τάσεις με αποτέλεσμα τη δημιουργία και την προέκταση των μικρορωγμών.

- **Χημική διάβρωση:** Σχετίζεται με φαινόμενα φυσικοχημικά ή χημικά, χωρίς να αποκλείεται και η συμμετοχή μηχανικών δράσεων. Η χημική δράση μπορεί να χωριστεί σε τρία είδη (ΜΠΑΤΗΣ Γ., 1999):

Διάβρωση λόγω εκχύλισης ιόντων: Τέτοια διάβρωση προκαλούν τα μαλακά νερά που διαλύουν το υδροξείδιο του ασβεστίου.

Διάβρωση από ιοντοανταλλαγή: Πραγματοποιείται μεταξύ του σκυροδέματος και του διαβρωτικού περιβάλλοντος μεταξύ ιόντων που έχουν παρόμοια ιοντική ακτίνα και περίπου ίδιο μέγεθος ατόμων. Ως παράδειγμα μπορεί να αναφερθεί η επίδραση του $MgCl_2$ στην υδράσβεστο προς παραγωγή $Mg(OH)_2$ και $CaCl_2$. Η ελάττωση της υδρασβέστου οδηγεί στην απώλεια των υδραυλικών ιδιοτήτων και των μηχανικών αντοχών του τσιμέντου.

Διάβρωση μέσω σχηματισμού μεγαλομοριακών ενώσεων: Σχηματίζονται μόρια στο εσωτερικό των πόρων τα οποία έχουν μεγάλο όγκο με συνέπεια την καταστροφή του σκυροδέματος. Τέτοια μόρια είναι ο εντριγκίτης που σχηματίζεται από την επίδραση των θειικών αλάτων, και ο δολομίτης που δημιουργείται από άλατα πλούσια σε ιόντα μαγνησίου.

Συνήθως στην πράξη παρατηρούνται πέραν του ενός τύποι χημικής διάβρωσης και ως παράδειγμα μπορεί να αναφερθεί η επίδραση του $MgSO_4$ κατά την οποία παρατηρείται ανταλλαγή των ιόντων Mg^{2+} και Ca^{2+} ενώ παράλληλα το παραγόμενο $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (γύψος) είναι ογκώδες και δημιουργεί ρωγμές στο σκυρόδεμα.

4.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Τα μέταλλα σχεδόν στο σύνολο τους υφίστανται διάφορες φθορές στο περιβάλλον το οποίο βρίσκονται εκτεθειμένα εξαιτίας χημικών, μηχανικών ή μικροβιολογικών δράσεων. Η πλήρης κατανόηση του ορισμού της διάβρωσης παίζει καθοριστικό ρόλο στην προσπάθεια αποφυγής του φαινομένου, καθώς επίσης και την αποκατάσταση των φθορών που έχει υποστεί. Γενικά, ο όρος διάβρωση περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες εκείνες κατά τις οποίες επέρχεται υποβάθμιση των ιδιοτήτων του υλικού και μείωση του χρόνου ζωής του. Η διάβρωση ως διεργασία, είναι συνυφασμένη με την έννοια της ταχύτητας της διαβρωτικής δράσης, της προκαλούμενης φθοράς, αλλά και την έκταση και τη φύση της φθοράς σε σχέση με τη λειτουργία του σχετικού συστήματος.

Η έννοια του όρου διάβρωσης σύμφωνα με τον **8044-86** είναι η εξής:

«Διάβρωση είναι η αλληλεπίδραση ενός μετάλλου με το περιβάλλον του, που έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή των ιδιοτήτων του μετάλλου και που συχνά μπορεί να καταλήξει στην υποβάθμιση της λειτουργίας του μετάλλου, του περιβάλλοντος ή του τεχνικού συστήματος, που αυτά αποτελούν τμήμα του».

Ο παραπάνω ορισμός δεν είναι πλήρης διότι διάβρωση υπάρχει και στην περίπτωση όπου το μέταλλο δεν βρίσκεται σε άμεση επαφή με το περιβάλλον. Ένας άλλος πληρέστερος ορισμός όπως δίνεται από Ευρωπαϊκή Ομοσπονδία Διάβρωσης, της Διεθνούς Επιτροπής Θαλάσσιας Διάβρωσης και Ρύπανσης των Υφάλων είναι ο παρακάτω:

«Διάβρωση ονομάζεται η αυθόρμητη, κατ' επέκταση εκβιασμένη, ηλεκτροχημικής κατ' επέκταση χημικής, κατ' επέκταση μηχανικής, κατ' επέκταση βιολογικής φύσης, αλλοίωση της επιφάνειας των μετάλλων και των κραμάτων, που οδηγεί σε απώλεια υλικού».

Τα μέταλλα στο δεδομένο περιβάλλον το οποίο βρίσκονται μπορούν να συμπεριφερθούν με τους εξής τρόπους:

- **Ενεργή κατάσταση.** Στην κατάσταση αυτή το μέταλλο διαβρώνεται σχηματίζοντας στην επιφάνεια του αδιάλυτα προϊόντα διάβρωσης (οξειδία-υδροξειδία) τα οποία έχουν υποβαθμισμένες ιδιότητες σε σχέση με το μέταλλο.
- **Αδρανής κατάσταση.** Συμβαίνει σε ευγενή μέταλλα *Au, Ag, Pt*, και οφείλεται στη θερμοδυναμική σταθερότητα των μετάλλων αυτών.
- **Παθητική κατάσταση.** Το μέταλλο διαβρώνεται, σχηματίζοντας στην επιφάνεια του ένα λεπτό προστατευτικό φιλμ αδιάλυτου προϊόντος. Τα φιλμ αυτό, εφόσον δεν έχει υποστεί φθορές στην επιφάνεια του, προστατεύει το μέταλλο και ελαττώνει σημαντικά την ταχύτητα διάβρωσης (Davis J. R., 2004).

4.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Τα περισσότερα μέταλλα δεν βρίσκονται στη φύση ως αυτοφυή αλλά με τη μορφή οξειδίων, αλάτων (θειικών, ανθρακικών) κτλ. και παράγονται με εμπλουτισμό των ενώσεων αυτών με κατανάλωση πολύ μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας. Η μεταλλική κατάσταση όμως είναι ασταθής και για το λόγο αυτό τα μεταλλικά υλικά τείνουν να επιστρέφουν στη κατάσταση των χημικών ενώσεων που βρίσκονταν αρχικά η οποία είναι σταθερή από θερμοδυναμικής απόψεως.

Ανάλογα με το διαβρωτικό περιβάλλον η διάβρωση διακρίνεται σε (ΝΤΑΦΛΟΥ, 2012):

- ✓ **Υγρή ή Ηλεκτροχημική**, κατά την οποία το υλικό εκτίθεται σε υγρό περιβάλλον.
- ✓ **Ξηρή ή χημική διάβρωση**, κατά την οποία το υλικό εκτίθεται, απουσία νερού ή υδατικού περιβάλλοντος, σε οξειδωτικό αέριο (π.χ οξυγόνο, αλογόνα, ατμοί θείου κτλ.) σε θερμοκρασία δωματίου ή συνηθέστερα σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

Η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας ΔG° των μετάλλων (κατά Gibbs) από την ελεύθερη κατάσταση, στην ιοντική που βρίσκεται με τη μορφή οξειδίου υποδηλώνει την τάση του μετάλλου να διαβρωθεί. Στην πραγματικότητα όμως, η τάση για διάβρωση που έχουν τα μέταλλα δεν μπορεί να εκτιμηθεί μόνο βάσει θερμοδυναμικών δεδομένων αλλά σημαντικό ρόλο διαδραματίζει το περιβάλλον έκθεσης π.χ Cu ο οποίος έχει μικρή τάση για διάβρωση, αλλά παρουσία H_2O , CO_2 και SO_2 διαβρώνεται έντονα (ΥΦΑΝΤΗΣ Δ., 2006). Επίσης η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας δεν μπορεί να προβλέψει την ταχύτητα και το ρυθμό διάβρωσης διότι υπάρχουν μέταλλα που σχηματίζουν ένα προστατευτικό στρώμα στην επιφάνεια τους, ελαττώνοντας πολύ την ταχύτητα διάβρωσης όπως το αλουμίνιο (ανοδίωση).

Η διάβρωση των μετάλλων είναι ηλεκτροχημικό φαινόμενο και εκδηλώνεται με την εμφάνιση κελιών διάβρωσης που προκύπτουν είτε από επαφή διαφορετικών μεταλλικών επιφανειών, είτε μεταξύ δύο τμημάτων της ίδιας επιφάνειας που είναι σε ηλεκτρική ή ηλεκτρολυτική επαφή, αλλά το δυναμικό του καθενός απουσία σύνδεσης είναι διαφορετικό. Ένα τυπικό ηλεκτρολυτικό κελί διάβρωσης περιλαμβάνει μια περιοχή (άνοδος) στην οποία πραγματοποιείται αποβολή e^- , μια περιοχή (κάθοδος) στην οποία υπάρχει πρόσληψη e^- και έναν ηλεκτρολύτη (ΚΟΥΛΟΥΜΠΗ Ν., 1999). Υπάρχει δηλαδή συνεχής κίνηση ηλεκτρονίων και ιόντων μεταξύ αυτών των δύο περιοχών όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.1. Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν μέρος κατά την οξείδωση του σιδήρου δίνονται παρακάτω:

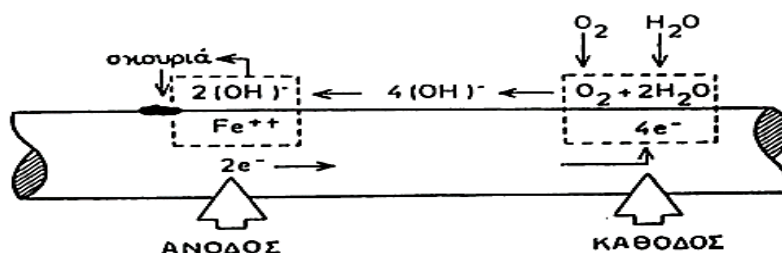
Άνοδος

- ✓ $Fe \rightarrow Fe^{++} + 2e^-$
- ✓ $Fe^{++} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2$
- ✓ $2Fe(OH)_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow Fe_2O_3 + 2H_2O$

Κάθοδος

- $\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$

Τα προϊόντα $Fe(OH)_2$ και Fe_2O_3 είναι μη συνεκτικά και έχουν μεγαλύτερο όγκο από τον σίδηρο με αποτέλεσμα να δημιουργούν εφελκυστικές τάσεις στο σκυρόδεμα και την επακόλουθη ρωγμάτωση ψ του.

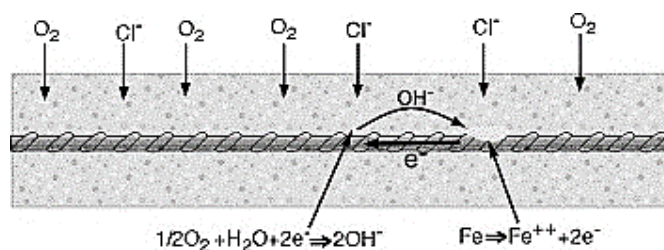


Σχήμα 4.1: Κίνηση ιόντων και e^- κατά τη διάβρωση του χάλυβα (Ahiborn and Denhartigh T., 2003)

4.4 ΓΑΛΒΑΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ – ΜΑΚΡΟΣΤΟΙΧΕΙΑ

4.4.1 Τοπικά γαλβανικά στοιχεία

Σύμφωνα με τη θεωρία των τοπικών γαλβανικών στοιχείων όταν ένα μέταλλο βυθιστεί σε ένα διάλυμα ηλεκτρολύτη οποιασδήποτε φύσεως, τότε μέσα στο ίδιο το μέταλλο δημιουργούνται τοπικά, βραχυκυκλωμένα γαλβανικά μικροστοιχεία στα οποία οφείλεται η διάβρωση του μετάλλου. Η ύπαρξη των τοπικών γαλβανικών στοιχείων στα μέταλλα, οφείλεται στις ατέλειες τους, στα κραματικά στοιχεία που τυχόν περιέχουν, στις προσμίξεις, στην ύπαρξη ενεργειακών κέντρων, στις ανομοιομορφίες της επιφάνειάς τους και στις περιοχές καλυμμένες με προϊόντα διάβρωσης σε σχέση με περιοχές που δεν επικαλύπτονται από προϊόντα διάβρωσης (ΜΠΑΤΗΣ Γ., 1999). Σε όλες τις παραπάνω περιοχές δημιουργείται διαφορά δυναμικού μεταξύ των γειτονικών περιοχών, που είναι της τάξης μερικών mV με αποτέλεσμα τη διάβρωση του μετάλλου.



Σχήμα 4.2: σχηματική απεικόνιση διάβρωσης χάλυβα λόγω μικροστοιχείων (Hansson et al., 2006)

4.4.2 Μακροστοιχεία

Σε αντίθεση με τα τοπικά γαλβανικά στοιχεία, τα μακροστοιχεία εμφανίζονται σε μεγάλες περιοχές του οπλισμού και οφείλουν τη δημιουργία τους στην επίδραση που έχουν οι περιβαλλοντικές συνθήκες σε όλο τον όγκο του οπλισμένου σκυροδέματος.

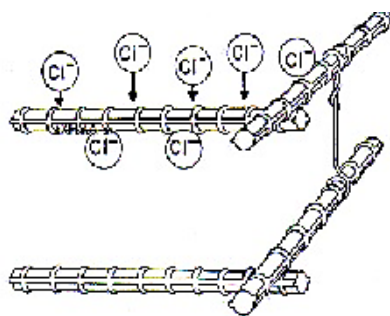
Όπως είναι γνωστό μεταξύ δυο διαφορετικών μετάλλων που έρχονται σε επαφή εμφανίζεται γαλβανική διάβρωση έτσι ώστε στο ένα μέταλλο να συμβαίνει ανοδική δράση και στο άλλο καθοδική. Επίσης σε περιπτώσεις όπου μια περιοχή του σκυροδέματος είναι υγρή και μια άλλη όχι ή στην περίπτωση που μια περιοχή υπάρχει ακάλυπτος οπλισμός λόγω ρωγμών, ενανθράκωσης κ.α., παρατηρείται ροή ρεύματος και ηλεκτρονίων από το ανοδικό στο καθοδικό τμήμα.

Γαλβανικά μακροστοιχεία δημιουργούνται και στις εξής περιπτώσεις (ΜΠΑΤΗΣ Γ., 1999).

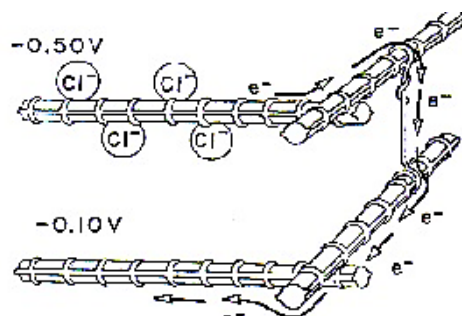
- Περιοχή καλά αεριζόμενη δίπλα σε μη αεριζόμενη,

- Περιοχή με υψηλό pH δίπλα σε περιοχή με χαμηλό pH,
- Περιοχή με υψηλή περιεκτικότητα σε χλωριόντα δίπλα σε περιοχή με χαμηλή συγκέντρωση χλωριόντων.

Τα μακροστοιχεία μπορούν να δώσουν δυναμικό εκατοντάδων mV και η δράση τους είναι προσθετική σε αυτή των τοπικών γαλβανικών στοιχείων. Στις παραπάνω εικόνες φαίνεται η δημιουργία μακροστοιχείου σε σκυρόδεμα που έχει προσβληθεί από χλωριόντα (ΜΠΑΤΗΣ Γ., 1999).

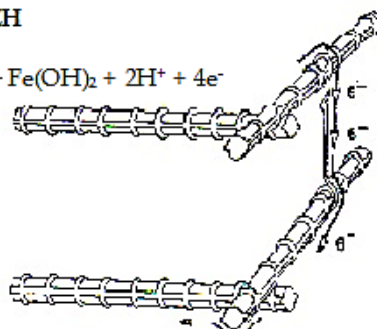
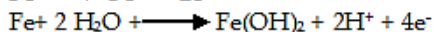
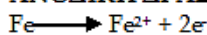


A) Διείσδυση χλωριόντων μέχρι τους πρώτους οπλισμούς

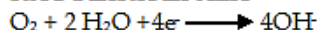


B) Δημιουργία μακροστοιχείου

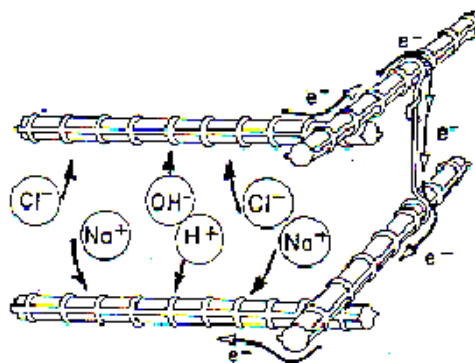
ΑΝΟΔΙΚΗ ΔΡΑΣΗ



ΚΑΘΟΔΙΚΗ ΔΡΑΣΗ

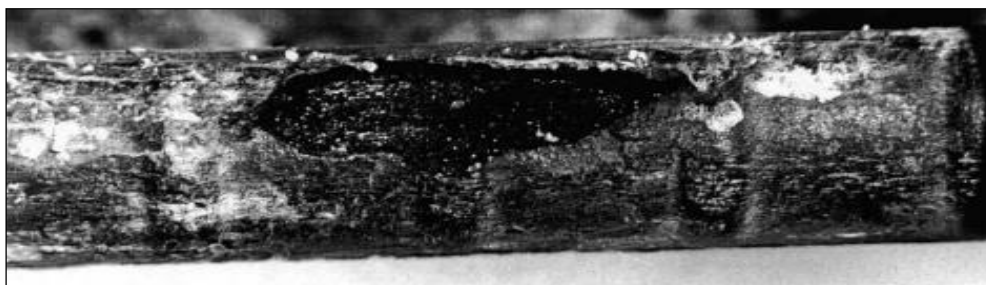


Γ) Ηλεκτροχημικές αντιδράσεις του Γαλβανικού μακροστοιχείου



Δ) Μεταφορά ιόντων

Σχήμα 4.2: Σχηματισμός μακροστοιχείου σε σκυρόδεμα με χλωριόντα (Μπατής Γ. 1999)



Σχήμα 4.3: Εντοπισμένη διάβρωση λόγω δημιουργίας μακροστοιχείων (Elsener B. 2002)

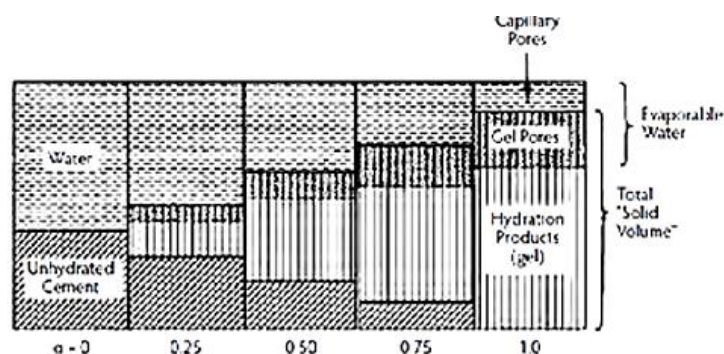
4.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

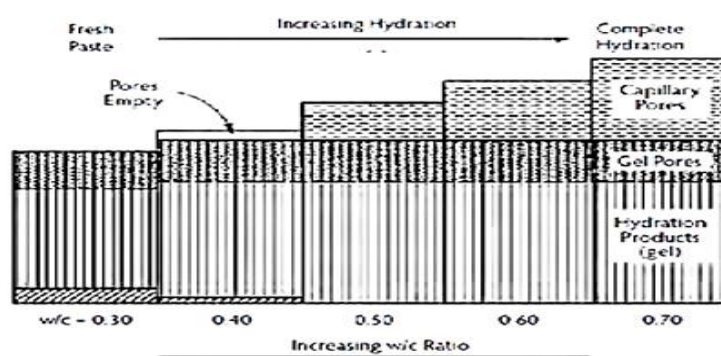
4.5.1 Πορώδες σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα αποτελεί το προστατευτικό περίβλημα του οπλισμού και για το λόγο αυτό η ποιότητα του, διαδραματίζει ουσιαστικό ρόλο στη διάβρωση του χάλυβα. Η δημιουργία των πόρων, οφείλεται στην αλληλεπίδραση που έχουν τα αδρανή με την πάστα του τσιμέντου. Η ζώνη αυτή καταλαμβάνει το 1/3 ως 1/2 του συνολικού όγκου του σκυροδέματος και έχει διαφορετική μικροδομή από αυτή του υπόλοιπου σκυροδέματος.

Οι πόροι που δημιουργούνται εντός του σκυροδέματος διαχωρίζονται σε μικροπόρους (<2.5nm), μεσοπόρους (2.5-100nm,) και μακροπόρους (>100nm) ενώ ανάλογα με τον τρόπο δημιουργίας τους, σε πόρους πήγματος (gel pores) (<10nm) οι οποίοι αποτελούν μέρος της μικροδομής της τσιμεντόπαστας και σε τριχοειδείς πόρους (capillary pores) (>10nm) που δημιουργούνται από την εξάτμιση του νερού κατά την πήξη και σκλήρυνση του τσιμέντου. Οι τριχοειδείς πόροι είναι αυτοί που αυξάνουν τη διαπερατότητα του σκυροδέματος και διευκολύνουν τη διάχυση των αερίων και των ιόντων στο εσωτερικό του και γι' αυτό γίνεται προσπάθεια ελάττωσης του.

Η ελάττωση του πορώδους του σκυροδέματος αποτελεί μείζον θέμα στις κατασκευές και για την επίτευξη αυτού του σκοπού, πραγματοποιείται συμπύκνωση κατά τη διάρκεια της σκυροδέτησης με κατάλληλους δονητές και χρήση προσθέτων τα οποία επιδρούν στις φάσεις ενυδάτωσης του τσιμέντου. Επίσης, ο χαμηλό λόγος W/C οδηγεί σε μείωση των φυσαλίδων αέρα που δημιουργούνται από την εξάτμιση του νερού στο σκληρυμένο σκυρόδεμα (Τσίμας Σ. and Τσιβιλής Σ., 2004). Το μειωμένο πορώδες ελαττώνει τη διάχυση των διαβρωτικών παραγόντων οι οποίοι προκαλούν φθορά στον οπλισμό. Εκτός της διάβρωσης του οπλισμού όμως, το μειωμένο πορώδες οδηγεί σε βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του οπλισμένου σκυροδέματος (Neville, 2006).





Σχήμα 4.4: Σχετικός όγκος προϊόντων ενυδάτωσης και πορώδους στο σκυρόδεμα (Nawy E.W., 2006)

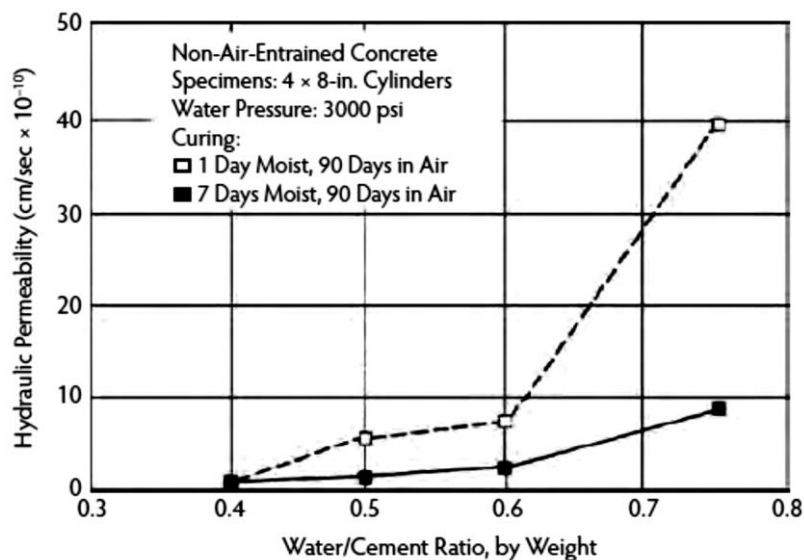
4.5.2 Διαπερατότητα σκυροδέματος

Η διαπερατότητα ενός καλού ποιοτικά σκυροδέματος είναι περίπου 1×10^{-11} cm/s και μπορεί να μειωθεί περαιτέρω με τη χρήση ιπτάμενης τέφρας ή πυριτικής παιπάλης. Για να μελετηθεί η διαπερατότητα θα πρέπει να είναι γνωστή η φύση του συστήματος των πόρων στο σκληρυμένο σκυρόδεμα. Οι πόροι που έχουν διάμετρο μεγαλύτερη από 120 - 160 nm μπορούν να προεκταθούν, να ενωθούν και να δημιουργήσουν ρωγμές αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο τη διαπερατότητα του σκυροδέματος. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι ο αυξημένος χρόνος συντήρησης μειώνει τη διαπερατότητα του σκυροδέματος (Schwarz et al., 2008). Η αυξημένη διαπερατότητα του σκυροδέματος μπορεί να οφείλεται:

- Σε λανθασμένη και μικρού χρόνου διαστήματος συμπίκνωση κατά τη διάρκεια της σκυροδέτησης,
- Σε υψηλό λόγο W/C,
- Σε δημιουργία ρωγμών εξαιτίας κύκλων ψύξης-απόψυξης, σεισμών και διαδοχικών κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης,
- Μη επαρκή συντήρηση κατά τη διάρκεια λειτουργίας της κατασκευής,
- Στην παρουσία προσθέτων.

Ο λόγος W/C διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο τριχοειδές πορώδες και στη διαπερατότητα του σκυροδέματος. Από το Σχήμα 4.5 μπορούν να ειπωθούν τα εξής:

1. Η διαπερατότητα του Σκυροδέματος μειώνεται όσο αυξάνει ο χρόνος συντήρησης,
2. Η διαπερατότητα αυξάνεται όσο αυξάνει ο λόγος W/C.



Σχήμα 4.5: Επίδραση του λόγου W/C και του τρόπου συντήρησης στη Διαπερατότητα του σκυροδέματος (Whiting, D., 1988)

4.5.2.1 Συντελεστής διαπερατότητας.

Η ροή σε τριχοειδείς πόρους στο κορεσμένο σκυρόδεμα ακολουθεί το νόμο του Darcy. Για στρωτή ροή ισχύει ο τύπος:

$$\frac{dq}{dt} \times \frac{1}{A} = \frac{K' \times \rho \times g}{\eta} \times \frac{\Delta h}{L} \quad (1)$$

Όπου,

dq/dt : ρυθμός μεταβολής της ροής σε m^3/s

A : διατομή του δοκιμίου σε m^2

l : πάχος δοκιμίου σε m

η : ιξώδες του ρευστού σε $N*s/m^2$

ρ : πυκνότητα του ρευστού σε kg/m^3

g : επιτάχυνση της βαρύτητας σε m^2/s

K' : εσωτερική διαπερατότητα του υλικού σε m^2

Στην περίπτωση που το ρευστό που εισέρχεται στο σκυρόδεμα είναι το νερό, τότε ισχύει:

$$K = \frac{K' \times \rho \times g}{\eta} \quad (2)$$

Επομένως η σχέση (1) λόγω της (2) γίνεται:

$$\frac{dq}{dt} \times \frac{1}{A} = K \times \frac{\Delta h}{L}$$

Η διαπερατότητα του σκυροδέματος μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με την επιταχυνόμενη δοκιμή διείσδυσης χλωριόντων (rapid Chloride Permeability test) που περιγράφεται από το πρότυπο **ASTM C-1202**. Το σχήμα 4.6 δείχνει τη πειραματική διάταξη για τη συγκεκριμένη δοκιμή.



Σχήμα 4.6: Πειραματική διάταξη της επιταχυνόμενης διείσδυσης Cl^- κατά **ASTM C-1202**

4.5.3 Ποιότητα νερού και αδρανών υλικών

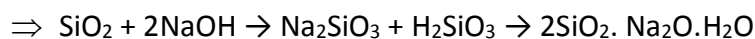
Το νερό εκτός της ρύθμισης του πορώδους, αποτελεί το μέσο για την μεταφορά των διαφόρων ιόντων ή αερίων στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Η ανάμιξη πόσιμου νερού κατά την παρασκευή του σκυροδέματος δεν επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα του, ενώ στην περίπτωση που πρόκειται για νερό ποταμών ή θαλασσινό, η σύστασή του γίνεται ιδιαίτερα σημαντική, με κυριότερο παράγοντα την περιεκτικότητά του σε χλωριόντα, η συγκέντρωση των οποίων δεν πρέπει να ξεπερνά το 0.05% κ.β. τσιμέντου (ΜΠΑΤΗΣ Γ., 1999), (ΦΑΡΔΗΣ Μ., 2004).

Τα αδρανή αποτελούν το 65 - 70% του συνολικού όγκου του σκυροδέματος και οι ιδιότητες τους επηρεάζουν την ποιότητα του. Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα του σκυροδέματος και την διάχυση των διαβρωτικών συστατικών προς τον οπλισμό είναι οι εξής (ΣΙΔΕΡΗΣ Κ.Κ., 1997):

- Η κοκκομετρική διαβάθμιση, το σχήμα και η υφή της επιφάνειάς τους.
- Το πορώδες και η τριχοειδής απορροφητικότητα.
- Η ορυκτολογική σύσταση και οι περιεχόμενες επιβλαβείς ουσίες.
- Η αντοχή τους σε θλίψη και τριβή.

Η περιεκτικότητα των αδρανών σε άμορφο πυρίτιο οδηγεί σε αντίδραση με τα αλκάλια του σκυροδέματος (αλκαλοπυριτική αντίδραση) με αποτέλεσμα τη δημιουργία πυριτικού πήγματος 'silica gel' το οποίο προσροφά νερό, με αποτέλεσμα τη διόγκωση του και τη δημιουργία ρωγμών στο σκυρόδεμα.

Οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα δίνονται παρακάτω:



Η ταχύτητα των παραπάνω αντιδράσεων εξαρτάται από τη μορφή του Si, τη συγκέντρωση των αλκαλίων, τη θερμοκρασία και από τη συγκέντρωση OH⁻ στο διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος (ΡΟΥΤΟΥΛΑΣ Α.Τ., 2000).

4.5.4 Είδος και ποσότητα τσιμέντου:

Η διάβρωση του οπλισμού μπορεί να μειωθεί με τη χρήση ειδικών τύπων τσιμέντου ανάλογα με το περιβάλλον που θα εκτεθεί το συγκεκριμένο σκυρόδεμα. Σε περιβάλλον με ιόντα Cl⁻ απαιτείται τσιμέντο με υψηλό ποσοστό C₃A (>8% κ.β) (ΤΑΣΙΟΣ Θ.Π. and ΑΛΙΓΙΖΑΚΗ Κ., 1993) ώστε τα ελεύθερα να Cl⁻ να δεσμευθούν με ταυτόχρονη μείωση του πορώδους, ενώ σε περιβάλλον με SO₄²⁻ απαιτείται χαμηλή συγκέντρωση C₃A. Σε συνδυαζόμενο περιβάλλον Cl⁻/SO₄²⁻ κατάλληλη περιεκτικότητα του τσιμέντου σε C₃A θεωρείται από 5 έως 8%, ενώ σύμφωνα με άλλες έρευνες (D. Darwin et al., May 1985) το C₃A δεν πρέπει να είναι λιγότερο από 4%. Γενικά, τσιμέντο που περιέχει πρόσθετα και με υψηλά ποσοστά αλκαλίων οδηγεί σε μείωση της διάβρωσης του οπλισμού εντός του σκυροδέματος. Επίσης, το είδος του τσιμέντου που θα χρησιμοποιηθεί διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ανθεκτικότητα του στο περιβάλλον χρήσης. Από προηγούμενες έρευνες (Batis et al., 2005) για παράδειγμα φάνηκε ότι η χρήση τσιμέντου CEM I 35N μειώνει το βάθος ενανθράκωσης και τη διάβρωση του οπλισμού συγκριτικά με το CEM II 35N.

4.5.5 Ύπαρξη ρωγμών στο σκυρόδεμα

Οι ρωγμές στο σκυρόδεμα μπορεί να έχουν προέλθει από εξωτερικές τάσεις, λόγω κακή συμπύκνωσης και ενυδάτωσης ή εξαιτίας της δημιουργίας ενώσεων που δημιουργούν εφελκυστικές τάσεις (γύψος, εντριγκίτης, ασβεστίτης). Επίσης, τα προϊόντα διάβρωσης στον οπλισμό έχουν μεγαλύτερο όγκο από το χάλυβα με

αποτέλεσμα τη δημιουργία ρωγμών και αποκόλληση του περιβάλλοντος σκυροδέματος εξαιτίας εφελκυστικών δυνάμεων (σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.7: Αποκόλληση σκυροδέματος εξαιτίας εφελκυστικών δυνάμεων που ασκούν τα προϊόντα διάβρωσης

4.6 ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

4.6.1 Εισαγωγή

Η ενανθράκωση του σκυροδέματος ξεκινά αμέσως μόλις εκτεθεί το σκυρόδεμα στον ατμοσφαιρικό αέρα και το αποτέλεσμα του φαινομένου είναι η αύξηση της συστολής ξήρανσης και η μείωση της αλκαλικότητας του διαλύματος των πόρων. Η ελάττωση του pH παρουσία O_2 προκαλεί αποπαθητικοποίηση του χάλυβα, με αποτέλεσμα τη διάβρωση του. Η καταστροφή του προστατευτικού φιλμ των οξειδίων στον οπλισμό πραγματοποιείται μόνο όταν το μέτωπο της ενανθράκωσης φθάσει στον οπλισμό και για το λόγο αυτό οι διάφοροι κανονισμοί θέτουν ως πάχος επικάλυψης τα 20mm (Nawy E.W., 2006). Γενικά, σε κανονικό σκυρόδεμα που περιέχει τσιμέντο *Portland*, το βάθος ενανθράκωσης δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 13 mm στα 10 χρόνια λειτουργίας της κατασκευής (Nawy E.W., 2006).

Συμφώνα με το πρότυπο **EN 206-2000** για τη διάβρωση προερχομένη από ένανθράκωση διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

- 1) **Ξηρό (XC1)** Αφορά το εσωτερικό τμήμα των οικοδομών με χαμηλό ποσοστό υγρασίας,
- 2) **Υγρό σπάνια ξηρό (XC2)** όπως τα θεμέλια που συγκρατούν υγρασία,
- 3) **Ενδιάμεσης υγρασίας (XC3)** που αφορά τα τμήματα των οικοδομών με ενδιάμεσο ή μεγάλο ποσοστό υγρασίας,
- 4) **Συνεχείς κύκλοι υγρού και ξηρού περιβάλλοντος (XC4)** που αφορά τα τμήματα εκείνα που υπόκεινται σε επαφή με νερό και έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία.

4.6.2 Παθητικοποίηση οπλισμού

4.6.2.1 Εισαγωγή

Ο σιδηροπλισμός που βρίσκεται μέσα στο σκυρόδεμα καλύπτεται από ένα επιφανειακό στρώμα οξειδίων το οποίο παθητικοποιεί την επιφάνεια του. Στην κατάσταση αυτή συμβάλλει και το pH του διαλύματος των πόρων, το οποίο λόγω της ύπαρξης του $Ca(OH)_2$ είναι έντονα αλκαλικό με τιμές 12.5 - 13.9 (ΚΟΥΛΟΥΜΠΗ Ν., 2005). Οι κυριότεροι παράγοντες που επιδρούν στην καταστροφή του προστατευτικού στρώματος των οξειδίων είναι η ενανθράκωση του σκυροδέματος, η αύξηση της συγκέντρωσης των χλωριόντων και η συνεργιστική δράση Cl^- & CO_2 ενώ για τη δημιουργία και διατήρηση του παθητικού στρώματος, απαιτείται η παρουσία οξυγόνου.

Σύμφωνα με τον *Wagner* (Wagner, 1965) η ηλεκτροχημική παθητικοποίηση του οπλισμού διακρίνεται σε:

- **Ανοδική παθητικοποίηση:** το μέταλλο βρίσκεται σε παθητική κατάσταση όταν αυξάνει το δυναμικό του προς ηλεκτροθετικότερες τιμές με αποτέλεσμα ο ρυθμός της ανοδικής διάλυσης του μετάλλου να γίνει μικρότερος απ' ότι ήταν σε ηλεκτραρνητικότερες περιοχές δυναμικού.
- **Χημική παθητικοποίηση:** Η παθητικοποίηση του μετάλλου προκαλείται από τη δημιουργία ενός λεπτού στρώματος οξειδίων και υδροξειδίων που παράγονται από την επίδραση του περιβάλλοντος στη διάβρωση του χάλυβα, στρώμα το οποίο είναι αρκετά συνεκτικό με την επιφάνεια του μετάλλου (ΚΟΥΛΟΥΜΠΗ Ν., 2005). Όταν το πάχος του στρώματος αυτού δεν ξεπερνά τα 100nm, τότε η ανοδική πυκνότητα του ρεύματος είναι πολύ χαμηλή και σύμφωνα με τον *Vetter* (VETTER K.J., 1955) εξαρτάται μόνο από τη διαφορά δυναμικού της διεπιφάνειας οξειδίου-διαλύματος σύμφωνα με την εξίσωση:

$$i_a = K \cdot \exp\left(\frac{\alpha z F}{RT} \Delta\Phi\right)$$

Όπου,

i_a : Ανοδική πυκνότητα ρεύματος,

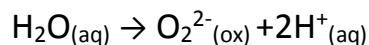
K : Σταθερά αναλογίας,

$\Delta\Phi$: Διαφορά δυναμικού στη διεπιφάνεια οξειδίου/διαλύματος,

T : Θερμοκρασία,

α : παράγων συμμετρίας.

Από την ερμηνεία της παραπάνω εξίσωσης, προκύπτει ότι το ανοδικό ρεύμα διάλυσης του παθητικοποιημένου σιδήρου σε όξινα διαλύματα είναι ανεξάρτητο του δυναμικού του ηλεκτροδίου. Το δυναμικό στη διεπιφάνεια του οξειδίου/διαλύματος προσδιορίζεται από την παρακάτω ηλεκτροχημική αντίδραση:



Κατά συνέπεια προσδιορίζεται σαν συνάρτηση του pH :

$$\Delta\Phi = K + \frac{RT}{F} \ln[H^+]$$

από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει:

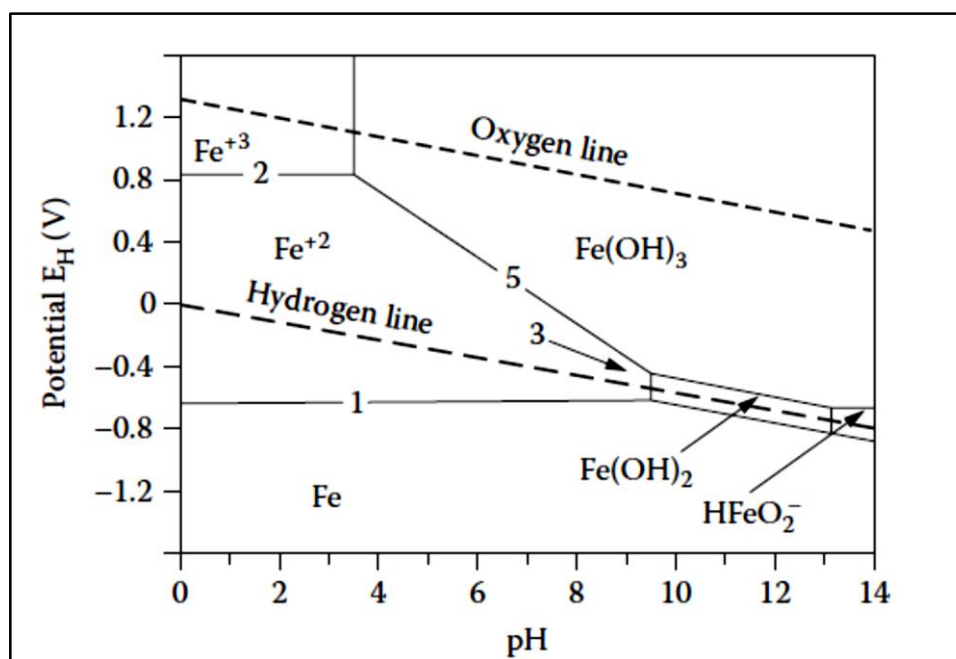
$$\log(i_a) = K' - \alpha \cdot z \cdot pH$$

Η σχέση της ανοδικής πυκνότητας ρεύματος με το pH που φαίνεται στην παραπάνω εξίσωση σύμφωνα με προηγούμενη έρευνα (Sato and Okamoto, 1981) επιβεβαιώνεται για τιμές $pH < 5$ ενώ για μεγαλύτερες το ρεύμα είναι ανεξάρτητο του pH .

4.6.2.2 Ρήξη παθητικού στρώματος οξειδίων από την επιφάνεια του οπλισμού

4.6.2.2.1 Ρήξη παθητικού στρώματος λόγω ενανθράκωσης.

Το διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος, ως γνωστόν είναι έντονα αλκαλικό ($pH = 12.5-13.9$) εξαιτίας της δημιουργίας $\text{CH} [\text{Ca}(\text{OH})_2]$. Σε αυτές τις συνθήκες τα ένυδρα οξείδια του σιδήρου έχουν μικρή διαλυτότητα με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα παθητικό φιλμ στην επιφάνεια του χάλυβα που τον προστατεύει από τη διάβρωση. Σε συνθήκες χαμηλού pH όμως, η διαλυτότητα των οξειδίων αυξάνεται με συνέπεια τη *ολοκληρωτική* ρήξη του παθητικού στρώματος και την αποπαθητικοποίηση του μετάλλου. Η γραφική απεικόνιση της σταθερότητας του μετάλλου και των προϊόντων διάβρωσης αποτυπώνεται σε γράφημα του δυναμικού συναρτήσει του pH του υδατικού διαλύματος σε διάγραμμα *Pourbaix*. Το δυναμικό συναρτήσει του pH για το σύστημα $\text{Fe} - \text{H}_2\text{O}$ δίνεται στο σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8: Διάγραμμα Pourbaix για το σύστημα Fe-H₂O (Philp A. Schweitzer, 2010)

Το διάγραμμα Pourbaix εμφανίζει τις εξής ζώνες σχετικά με την κατάσταση την οποία βρίσκεται ο σίδηρος (Schweitzer P.A., 2009):

- Περιοχή μη-προσβολής (immunity zone). Σε αυτές τις συνθήκες δυναμικού και pH ο σίδηρος βρίσκεται σε μεταλλική κατάσταση.
- Περιοχή διάβρωσης (Corrosion zone). Σε αυτές τις συνθήκες δυναμικού και pH ο σίδηρος μεταβαίνει σε ιοντική κατάσταση Fe²⁺ ή Fe³⁺ ή HFeO₂⁻.
- Περιοχή παθητικοποίησης. Σε αυτή την περιοχή ο Fe καλύπτεται από Fe(OH)₃ εμποδίζοντας την περαιτέρω διάβρωση του.

4.6.2.2.2 Ρήξη παθητικού στρώματος λόγω χλωριόντων

Όταν το διάλυμα περιέχει ιόντα Cl⁻, τότε συνήθως δημιουργείται τοπική καταστροφή του παθητικού στρώματος στη μεταλλική επιφάνεια με αποτέλεσμα την τοπική διάλυση του μετάλλου στις περιοχές αποδόμησης και καταστροφής του παθητικού στρώματος. Ο μηχανισμός διάρρηξης του παθητικού στρώματος περιλαμβάνει τα εξής στάδια (Lin et al., 1981), (Sato, 1971):

- Ρόφηση των διαβρωτικών ιόντων στην επιφάνεια των οξειδίων.
- Διάχυση των ανιόντων στη μάζα των οξειδίων.
- Δημιουργία σύμπλοκων ενώσεων.

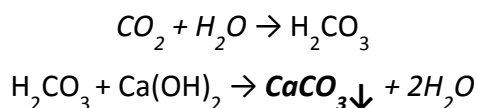
Η διαβρωτική δράση των χλωριόντων, καθίσταται ενεργός όταν η περιεκτικότητα των χλωριόντων στους πόρους του σκυροδέματος στην περιοχή γύρω από την επιφάνεια του χάλυβα υπερβεί την κρίσιμη συγκέντρωση, οπότε και προκαλείται τοπική

καταστροφή του παθητικού στρώματος προστασίας. Η κρίσιμη συγκέντρωση των χλωριόντων δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από το pH του διαλύματος των πόρων του σκυροδέματος, από την ποιότητα του σκυροδέματος, την ύπαρξη πρόσμικτων και την περιεκτικότητά του σε οξυγόνο (Schiegg et al., 2007). Επίσης, η ενανθράκωση του σκυροδέματος απελευθερώνει ιόντα Cl^- με αποτέλεσμα η συγκέντρωσή τους στο διάλυμα να αυξάνεται.

4.6.3 Μηχανισμός ενανθράκωσης

Το διοξείδιο του άνθρακα διαλύεται στο νερό δημιουργώντας H_2CO_3 το οποίο αντιδρά με το $Ca(OH)_2$ που βρίσκεται στο πόρους του σκυροδέματος δημιουργώντας $CaCO_3$.

Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα δίνονται παρακάτω:



Το υδροξείδιο του ασβεστίου (CH) που σχηματίζεται κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου βρίσκεται χημικά δεσμευμένο στις φάσεις του τσιμέντου, ενώ ένα μέρος είναι ελεύθερο. Το ελεύθερο $Ca(OH)_2$ διαλύεται στο υγρό των πόρων και είναι αυτό που αντιδρά με το διοξείδιο του άνθρακα.

Η αντίδραση αυτή πραγματοποιείται σε τρία στάδια (ΜΠΑΤΗΣ Γ., 1999):

- Το πρώτο στάδιο είναι η διάχυση του διοξειδίου του ασβεστίου στους πόρους του σκυροδέματος,
- Το δεύτερο στάδιο είναι η αντίδραση του διοξειδίου του άνθρακα με το νερό,
- Το τρίτο στάδιο είναι η αντίδραση του υδροξειδίου του ασβεστίου με το διαλυμένο διοξείδιο του άνθρακα.

4.6.4 Διάχυση CO_2 στη μάζα του σκυροδέματος

Η διάχυση του CO_2 στο σκυρόδεμα ακολουθεί το νόμο του Fick $\frac{DX}{Dt} = D_0 * \frac{1}{x}$ από τον οποίο προκύπτει ο τύπος $d = A\sqrt{t}$ που περιγράφει και προβλέπει την πορεία της ενανθράκωσης. Στο σκυρόδεμα όμως, η ύπαρξη ρωγμών, η αλλαγή στα επίπεδα υγρασίας κτλ. οδηγούν σε αποκλίσεις του παραπάνω νόμου.

Η ενανθράκωση του σκυροδέματος προκαλεί πολλά προβλήματα στις κατασκευές με κυριότερα την αποπαθητικοποίηση του οπλισμού, την απελευθέρωση των δεσμευμένων ιόντων Cl^- και τη δημιουργία ρωγμών εξαιτίας των τάσεων που προκαλεί το

CaCO₃ (NEVILLE A.M., 1996). Το πορώδες, η κατανομή των πόρων, το ποσό του CaO_f διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη διάχυση του CO₂.

Εκτός των παραπάνω παραγόντων η διάχυση του CO₂ στη μάζα του σκυροδέματος εξαρτάται:

- Από την υγρασία του περιβάλλοντος. Η ενανθράκωση του σκυροδέματος πραγματοποιείται σε μέσες τιμές υγρασίας 50-70%. Όταν υπάρχει πλήρωση των πόρων του σκυροδέματος με νερό, η διάχυση του διοξειδίου του άνθρακα παρεμποδίζεται, ενώ σε περίπτωση πλήρους απουσίας υγρασίας δεν είναι δυνατό να βραχυκυκλωθεί το ηλεκτροχημικό σύστημα διότι απουσιάζει ο ηλεκτρολύτης.
- Από τη θερμοκρασία και τη πίεση. Είναι γνωστό ότι η διαλυτότητα του CO₂ στο νερό μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας και αυξάνεται με αύξηση της πίεσης (Diamond and Akinfiyev, 2003) σε σταθερή T σύμφωνα με το νόμο του *William Henry*,
- Από την ύπαρξη ρωγμών στο σκυρόδεμα. Οι ρωγμές μπορεί να έχουν δημιουργηθεί είτε από μηχανικές δράσεις (επιβολή φορτίων, σεισμοί κτλ.) είτε από τάσεις λόγω δημιουργίας διαφόρων χημικών ενώσεων.

4.7 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΕ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟ ΝΕΡΟ

4.7.1 Διάβρωση με βελονισμούς

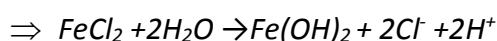
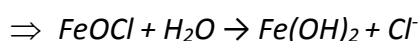
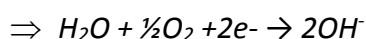
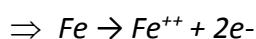
Το είδος αυτό της διάβρωσης είναι ένα από τα πιο καταστρεπτικά διότι προκαλεί καταστροφή των υλικών λόγω διάτρησης, ακόμα και για πολύ μικρό εκατοστιαίο ποσοστό απώλειας βάρους της κατασκευής. Είναι συχνά δύσκολο να διακριθούν οι βελονισμοί, είτε λόγω του μικρού τους μεγέθους είτε γιατί συχνά καλύπτονται από προϊόντα διάβρωσης. Επιπλέον, είναι δύσκολο να μετρηθεί ποσοτικά η έκταση του βελονισμού και να συγκριθεί με ανάλογες περιπτώσεις λόγω του μεταβαλλόμενου βάθους και αριθμού βελονισμών που εμφανίζονται σε πανομοιότυπες συνθήκες.

Οι βελονισμοί εμφανίζονται περισσότερο σε οριζόντιες επιφάνειες παρά σε κατακόρυφες και συνήθως δεν είναι ορατοί αρχικά, παρά μόνο έπειτα από μεγάλο χρονικό διάστημα (ΚΟΥΛΟΥΜΠΗ Ν., 1999). Συνήθως αναπτύσσονται σε μέταλλα ή κράματα που καλύπτονται από λεπτά στρώματα οξειδίων όπως το Al, Ti, Pb, Mg, χάλυβας κτλ. Πρέπει να σημειωθεί ότι βελονισμοί είναι δυνατό να δημιουργηθούν από τη δράση και άλλων στοιχείων της ομάδας των αλογόνων όπως το Br καθώς επίσης και από αλογονίδια διαφόρων μετάλλων όπως Fe, Cu και Hg (Schweitzer P.A., 2009).

Για την αποφυγή των βελονισμών, ο μηχανικός οφείλει να κάνει σωστό σχεδιασμό της κατασκευής (γεωμετρία, καλή αποστράγγιση κτλ.) για την αποφυγή θηλωμάτων και κοιλοτήτων όπου συσσωρεύονται στάσιμα νερά και επιλογή κατάλληλων υλικών ανάλογα με το περιβάλλον έκθεσης της κατασκευής (ΜΟΡΟΠΟΥΛΟΥ Α. and ΚΟΥΛΟΥΜΠΗ Ν., 2012). Συγκεκριμένα για το δομικό χάλυβα η ανθεκτικότητα του στην προσβολή λόγω Cl^- και η αντοχή του είναι δυνατό να βελτιωθούν με κραματοποίηση του (π.χ με Cr, Ni, Mo, Si-Mo).

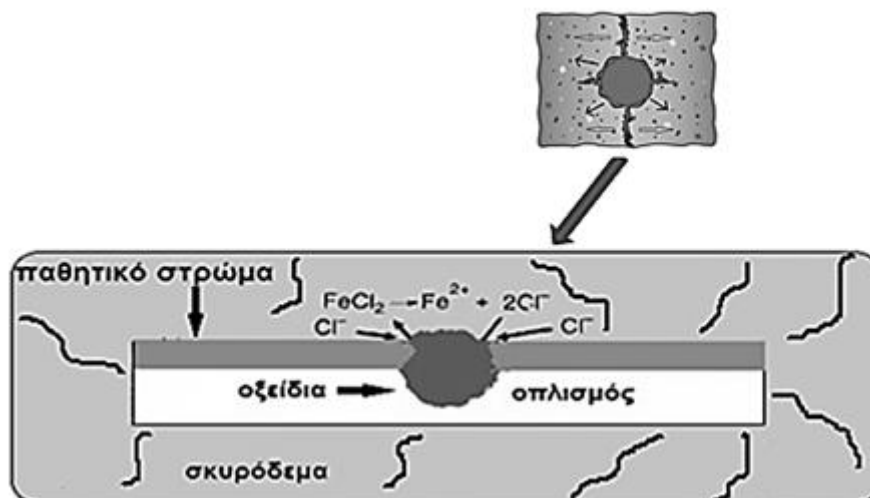
4.7.2 Διείσδυση ιόντων Cl^- στο σκυρόδεμα

Τα ιόντα χλωρίου μπορεί να βρεθούν μέσα στο σκυρόδεμα ως συστατικό της άμμου προερχόμενης από τη θάλασσα, μέσα σε πρόσθετο (π.χ $CaCl_2$), ή στο νερό ανάμιξης. Η επίδραση των χλωριόντων στο χάλυβα εξαρτάται από την παρουσία O_2 και H_2O . Επομένως σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα συνεχώς εμβαπτισμένο σε νερό με χλωριούχα άλατα, δεν εμφανίζεται διάβρωση με βελονισμούς. Επιπλέον, η διείσδυση των χλωριόντων πραγματοποιείται σε κατασκευές που διαβρέχονται από τη θάλασσα ή κοντά σε αυτές. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Ann and Song, 2007), τα όρια τιμών των ιόντων Cl^- και οι μέθοδοι ανίχνευσης τους διαφέρουν στις διάφορες περιοχές του σκυροδέματος (πίνακας 4.1). Τα ιόντα Cl^- προσβάλλουν τοπικά τον οπλισμό (pitting corrosion) σύμφωνα με τις παρακάτω χημικές αντιδράσεις:



Από τις παραπάνω αντιδράσεις προκύπτει το συμπέρασμα ότι με την υδρόλυση, τα χλωριόντα που είχαν δεσμευθεί επιστρέφουν στο διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος με ταυτόχρονη τοπική οξύνιση του διαλύματος. Στην περίπτωση αυτή, ακόμη και αν η περαιτέρω είσοδος των χλωριόντων παρεμποδιστεί από την ελάττωση της διαπερατότητας του σκυροδέματος, η διάβρωση συνεχίζεται, γιατί η ποσότητα των χλωριόντων στην επιφάνεια του οπλισμού παραμένει σταθερή. Η αναγκαία ροή των ηλεκτρονίων πραγματοποιείται μέσω του χάλυβα, ενώ η μετακίνηση των ιόντων διαμέσου των διαλύματος των πόρων του σκυροδέματος. τα προϊόντα διάβρωσης προσβάλλουν τοπικά τον οπλισμό δημιουργώντας οπές και

δημιουργώντας ρωγμές λόγω των δυνάμεων που προκαλούν στο σκυρόδεμα όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.9: Δημιουργία ρωγμών στο σκυρόδεμα από τη δράση των ιόντων Cl⁻ στον οπλισμό

Η διείσδυση των ιόντων χλωρίου καθορίζεται από τους εξής παράγοντες :

- **Το είδος και τη δομή του σκυροδέματος.** Η προσθήκη ποζολανών στο σκυρόδεμα ή η υψηλή συγκέντρωση C₃A δεσμεύουν χλωριόντα, δημιουργώντας άλατα μειώνοντας το πορώδες.
- **Το πάχος της επικάλυψης.** Το πάχος της επικάλυψης του οπλισμού από σκυρόδεμα πρέπει να είναι τουλάχιστον 15 – 20 mm. Η συγκέντρωση των χλωριόντων ελαττώνεται με το βάθος στο σκυρόδεμα.
- **Η παρουσία νερού στο σκυρόδεμα.** Η παρουσία νερού διευκολύνει την κίνηση των ιόντων και αυξάνει την αγωγιμότητα του σκυροδέματος. Επίσης, σε περιόδους ξηρασίας το νερό εξατμίζεται με αποτέλεσμα την είσοδο των διαβρωτικών ιόντων.
- **Η ύπαρξη ρωγμών.** Για την αποφυγή της διείσδυσης των ιόντων Cl⁻ είναι σημαντική η σωστή συμπύκνωση κατά τη διάρκεια της σκυροδέτησης και η συντήρηση του σκυροδέματος καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας της κατασκευής.

Από τη βιβλιογραφία είναι γνωστό ότι ο οπλισμός διαβρώνεται μόνο όταν η συγκέντρωση των ελεύθερων ιόντων Cl⁻ ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή που συνήθως είναι 0.4g/100 g τσιμέντου. Η τιμή αυτή όμως υπάρχει περίπτωση να διαφέρει στην περίπτωση των σύνθετων τσιμέντων ή ακόμα και εντός του ίδιου σκυροδέματος. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι το pH του διαλύματος των πόρων εξαρτάται από το χλωριούχο άλας στο οποίο εκτίθεται το οπλισμένο σκυρόδεμα. Στην περίπτωση που

η κατασκευή εκτίθεται σε CaCl₂ το pH ελαττώνεται ενώ σε NaCl δεν υπάρχει διαφοροποίηση. Με βάση τα προαναφερθέντα, γίνεται αντιληπτό ότι πιο σημαντικό ρόλο στη διάβρωση του οπλισμού διαδραματίζει ο λόγος [Cl⁻]/[OH⁻], ο οποίος δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0.6.

Πίνακας 4.1: Όρια τιμών συγκέντρωσης ιόντων Cl⁻ και μέθοδος ανίχνευσης τους στο σκυρόδεμα (Ki Yong Ann & Ha-Won Song, 2007)

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	ΟΡΙΑ ΤΙΜΩΝ			ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ
	Συνολικά Cl ⁻ %	Ελεύθερα Cl ⁻ %	[Cl ⁻]/[OH ⁻]	
ΔΙΑΛΥΜΑ ΠΟΡΩΝ			0.6	<i>E_{corr}</i>
			0.3	<i>i_{corr}</i>
ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ			8 – 63	<i>i_{corr}</i>
	0.5 – 2.0			ΡΕΥΜΑ ΜΑΚΡΟΣΤΟΙΧΕΙΟΥ
	0.079 – 0.19			ΑC ΕΜΠΕΔΗΣΗ
	0.32 – 1.9			Δm
	0.78 – 0.93	0.11–0.12	0.16 – 0.26	<i>E_{corr}</i>
ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	0.227	0.364	1.5	LPR
	0.5 – 1.5			<i>E_{corr}</i>
	0.70 (OPC)			Δm
	1.8 – 2.9			LPR
ΣΥΣΤΑΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	0.2 – 1.5			Δm

4.8 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

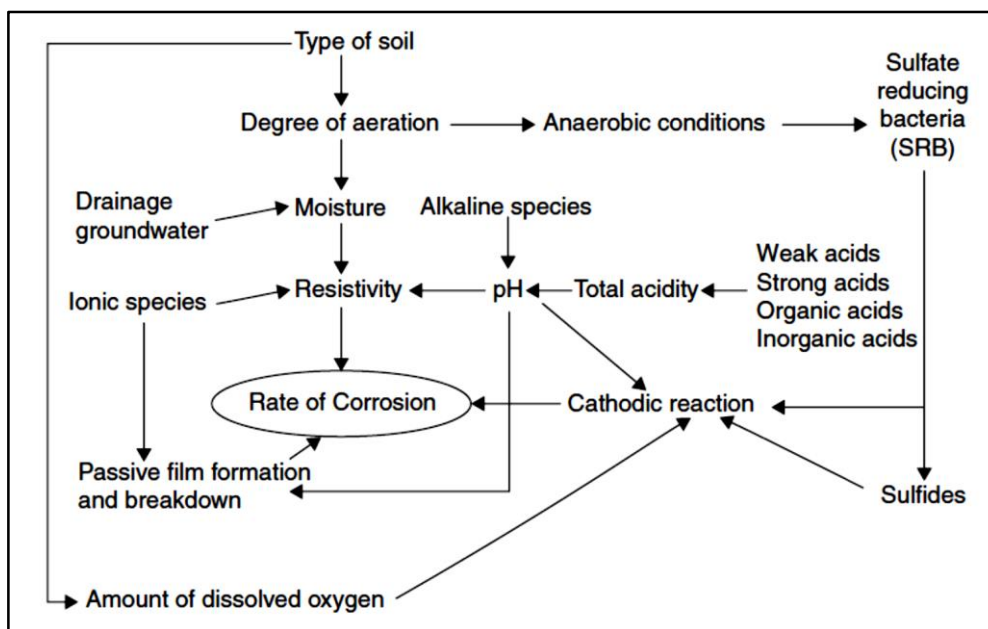
4.8.1 Γενικά - εισαγωγή

Η διάβρωση των μετάλλων στο έδαφος αποτελεί ένα σύνθετο φαινόμενο το οποίο εξαρτάται από τη φύση του μετάλλου και από τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Το έδαφος μπορεί να διαβρώσει το σκυρόδεμα στις περιπτώσεις που περιέχει θειικά άλατα, υψηλή συγκέντρωση μαγνησίας και pH<6 (Schweitzer P.A., 2009). Επίσης τα μολυσμένα εδάφη που περιέχουν οργανικά απόβλητα είναι δυνατό να επιταχύνουν την αποσάθρωση και τον κατακερματισμό του σκυροδέματος.

Η παρουσία θεικών ιόντων κατά κύριο λόγο προκαλεί βλάβες στο σκυρόδεμα και δευτερευόντως στο οπλισμό. Τα θειικά ιόντα εμφανίζονται σε εδάφη που προήλθαν από μαγματικά πετρώματα ή εξαιτίας της δημιουργίας σύμπλοκων χουμικών οξέων στον Α- ορίζοντα του εδαφικού προφίλ (ΒΑΛΑΒΑΝΙΔΗΣ ΑΘ., 2006). Ακόμα, ο οπλισμός είναι δυνατό να διαβρωθεί από συγκεκριμένο είδος βακτηριών προκαλώντας βακτηριακή διάβρωση. Τα βακτήρια αυτά μετατρέπουν τα σουλφίδια σε H₂SO₄ το

οποίο προσβάλλει τον οπλισμό δημιουργώντας 'μαύρη σκουριά (black rust) στην επιφάνεια του (BROOMFIELD, 1997).

Άλλοι παράγοντες οι οποίοι παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαβρωτική ικανότητα των εδαφών στα μέταλλα είναι ο κορεσμός των εδαφών σε νερό, το ποσοστό αερισμού, το pH, η ειδική αντίσταση και η περιεκτικότητα σε ιόντα Cl⁻.

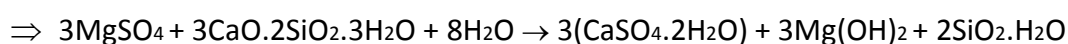
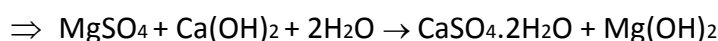
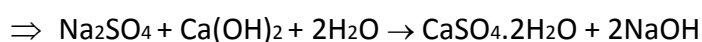


Σχήμα 4.8: Συσχέτιση των διαβρωτικών παραγόντων κατά την έκθεση του μετάλλου στο έδαφος (Robinson W.C, 1993)

4.8.2 Επίδραση θειικών αλάτων στη διάβρωση του σκυροδέματος

Έχει διαπιστωθεί ότι τα στερεά άλατα δεν προσβάλουν το σκυρόδεμα, όταν όμως βρίσκονται σε διάλυμα, μπορούν να αντιδράσουν με το σκληρυμένο τσιμεντοπολτό. Συγκεκριμένα μπορεί να λάβει χώρα η αντίδραση των θειικών ιόντων με την υδράσβεστο και το C3A προς παραγωγή γύψου και θειαργλικό ασβέστιο τα οποία έχουν μεγαλύτερο όγκο από αυτόν των συστατικών που αντικαθιστούν. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η διόγκωση και ρωγμάτωση του σκυροδέματος (Ρακαντά-Ζαχαρίου Ε., 2010) και η μείωση της σκληρότητας και της αντοχής του σκυροδέματος.

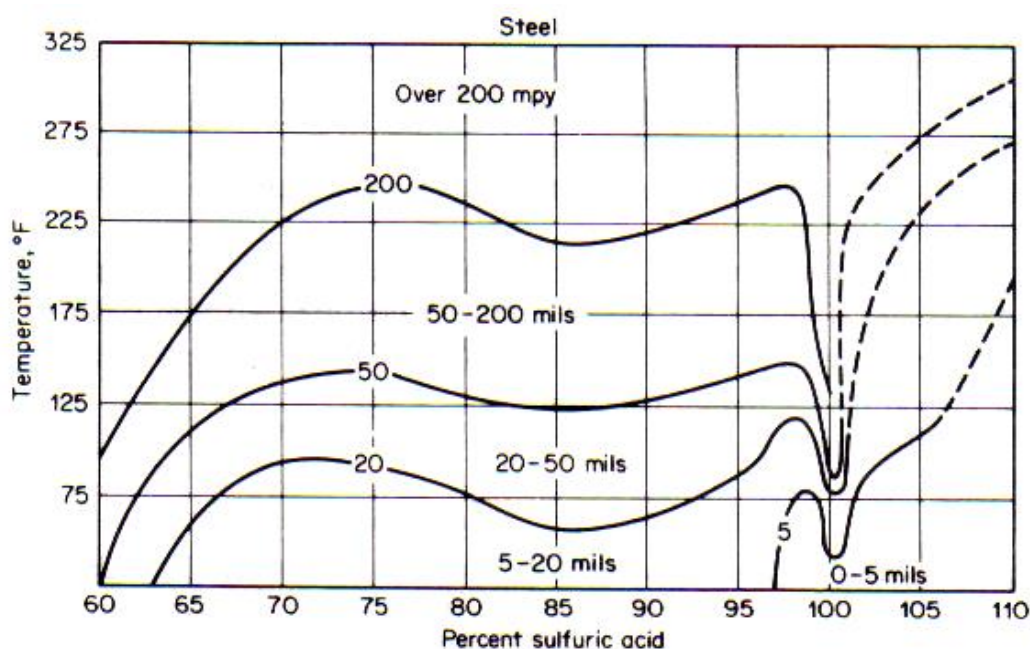
Ανάλογα λοιπόν με τον τύπο κατιόντων που βρίσκονται στο θειικό διάλυμα (π.χ. Na⁺ ή Mg²⁺), τόσο το Ca(OH)₂ όσο και το C-S-H του τσιμεντοπολτού Portland, μπορούν να μετατραπούν σε γύψο από την προσβολή θειικών ιόντων σύμφωνα με τις αντιδράσεις:



Ο ρυθμός της προσβολής από θειικά αυξάνει με την αύξηση της πυκνότητας του διαλύματος, όμως κάτω από μία συγκέντρωση περίπου 0.5% για το $MgSO_4$ ή 1% για το Na_2SO_4 ο ρυθμός της αύξησης της έντασης της προσβολής γίνεται μικρότερος. Κορεσμένα διαλύματα $MgSO_4$ οδηγούν σε σοβαρές φθορές, παρόλο που στα σκυροδέματα καλής ποιότητας (μικρός λόγος νερού/τσιμέντο) η φθορά λαμβάνει χώρα μετά από 2-3 χρόνια. Συγκεντρώσεις της τάξης των 1000 ppm σε SO_3 θεωρούνται μετρίως επικίνδυνες, ενώ των 2000 ppm πολύ επικίνδυνες, ειδικά αν το $MgSO_4$ είναι το επικρατέστερο συστατικό. Οι αντίστοιχες τιμές για τα διαλυτά θειικά στο έδαφος είναι 0.2 – 0.5%.

Πρέπει βέβαια να τονιστεί ότι η ταχύτητα προσβολής του σκυροδέματος δεν εξαρτάται μόνο από τη συγκέντρωση των θεικών ιόντων, αλλά και από το ρυθμό αναπλήρωσης τους που αντιδρούν με το τσιμέντο. Σκυρόδεμα με προσβολή από θειικά έχει χαρακτηριστική υπόλευκη εμφάνιση, ενώ η φθορά συνήθως ξεκινά από τις άκρες και τις γωνίες και ακολουθεί βαθμιαία ρωγμάτωση και θρυμματισμός (ΓΡΗΓΟΡΙΑΔΗΣ Γ., 2014).

Η διάβρωση που παρατηρείται σε έναν χαλύβδινο οπλισμό είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και του ποσοστού του θεικού οξέος (FONTANA M.G., 1986). Η ισοδιαβρωτική καμπύλη για το χάλυβα (σχήμα 4.10) δείχνει ότι σε διαλύματα συγκεκριμένων θερμοκρασιών υπάρχει αυξομείωση στη διαβρωτική τάση του μετάλλου.



Σχήμα 4.10: διάβρωση του χάλυβα με H_2SO_4 ως συνάρτηση της συγκέντρωσης και της θερμοκρασίας (Mars G. Fontana, 1986)

Τα θειικά ιόντα αντιδρούν με τις ένυδρες φάσεις του τσιμέντου ειδικά με το C₃A δημιουργώντας μεγαλομοριακές ενώσεις αλάτων τα οποία προκαλούν διόγκωση του σκυροδέματος και ρωγμάτωση του. Η επιλογή του κατάλληλου τύπου τσιμέντου όπως περιγράφεται στο πρότυπο **ASTM C-150**, της ποσότητας τσιμέντου που θα χρησιμοποιηθεί (>350kg/m³) και η επιλογή του κατάλληλου λόγου W/C (0.40-0.55 αναλόγως του τύπου τσιμέντου) (Nawy E.W., 2006), είναι μείζονος σημασίας στο σχεδιασμό σκυροδέματος υψηλής αντοχής σε SO₄²⁻ (sulphate resistance concrete).

4.9 ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

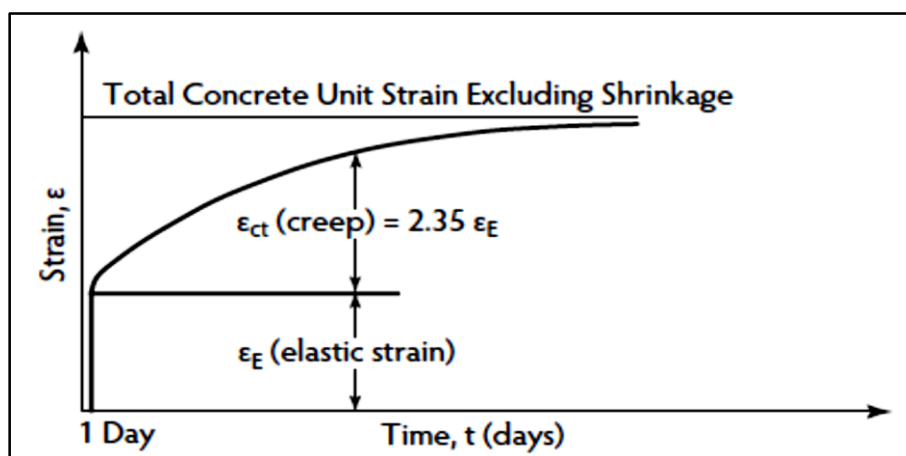
4.9.1 Ερπυσμός σκυροδέματος

Ερπυσμός είναι η προοδευτική παραμόρφωση του σκυροδέματος με την πάροδο του χρόνου με επιβολή σταθερής θλιπτικής τάσης και οφείλεται κυρίως στη μετακίνηση των μορίων νερού στους πόρους του πήγματος από θέσεις υψηλής πίεσης προς θέσεις χαμηλότερης πίεσης. Ο ερπυσμός υπολογίζεται έμμεσα με αφαίρεση της συστολής και της ελαστικής παραμόρφωσης από τη συνολική παραμόρφωση.

$$\text{Total strain } (\epsilon_t) = \text{elastic strain } (\epsilon_e) + \text{creep } (\epsilon_{ct}) + \text{shrinkage } (\epsilon_{sh})$$

Ο ερπυσμός μπορεί να δημιουργήσει ρωγμές στα δομικά στοιχεία των κατασκευών και για την αποφυγή του φαινομένου πρέπει γίνουν τα εξής (Βαμβάτσικος et al.):

- Μείωση του λόγου W/C και της περιεκτικότητας του σκυροδέματος σε τσιμέντο.
- Αύξηση της ποσότητας και της σκληρότητας των αδρανών.
- Αύξηση του βαθμού ενυδάτωσης. Είναι χαρακτηριστικό ότι ο ερπυσμός συμβαίνει σε νέο ηλικιακά σκυρόδεμα.
- Αύξηση του πάχους του δομικού στοιχείου όπου είναι εφικτό.



Σχήμα 4.11: μεταβολή μήκους συναρτήσει του χρόνου στο σκυρόδεμα (NAWY E.W., 2006)

4.9.2 Συστολή σκυροδέματος

Με τον όρο «συστολή ξηράνσεως» δηλώνεται η προοδευτική με την πάροδο του χρόνου παραμόρφωση του σκυροδέματος ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις που οφείλεται στην απομάκρυνση των μορίων νερού που δεν είναι χημικά συνδεδεμένα με το τσιμέντο από τους πόρους του πήγματος. Τα μόρια αυτά, με την παρεμβολή τους μεταξύ των κρυστάλλων του πήγματος, αυξάνουν την απόσταση των τελευταίων και όταν απομακρυνθούν, οι κρύσταλλοι πλησιάζουν υπό την επιρροή των ελκτικών δυνάμεων (δεσμοί *van der Waals*) με συνέπεια τη συστολή του υλικού (Βαμβάτσικος et al.).

Γενικά, οι δύο τύποι της συστολής είναι η «πλαστική συστολή» (*plastic shrinkage*) που πραγματοποιείται κατά τις πρώτες ώρες από την τοποθέτηση του σκυροδέματος και η «συστολή ξήρανσης» (*drying shrinkage*) που πραγματοποιείται μετά από ένα χρονικό διάστημα που έχει προχωρήσει η ενυδάτωση του σκυροδέματος και οφείλεται στην εξάτμιση του νερού. Επιπρόσθετα, υπάρχει και ένας τρίτος τύπος που είναι η «συστολή ενανθράκωσης» (*carbonation shrinkage*). Ο ρυθμός της συστολής ξήρανσης του σκυροδέματος μειώνεται με το χρόνο και γι' αυτό παλαιές κατασκευές εμφανίζονται περισσότερο ανθεκτικές στις περιβαλλοντικές δράσεις.

Οι παράγοντες που επιδρούν στο μέγεθος του φαινομένου της συστολής λόγω ξήρανσης είναι οι εξής (Nawy E.W., 2006):

- Η ποσότητα των αδρανών. Σκυρόδεμα με υψηλή περιεκτικότητα σε αδρανή είναι λιγότερο επιδεκτικά στο φαινόμενο της συστολής λόγω ξήρανσης,
- Λόγος W/C. υψηλός λόγος αυξάνει τη συστολή λόγω ξήρανσης,
- Περιβαλλοντικές συνθήκες π.χ υγρασία, θερμοκρασία κτλ.,
- Μέγεθος κατασκευής και η ύπαρξη ή η απουσία οπλισμού σε αυτήν,
- Ο τύπος του τσιμέντου και η ύπαρξη πρόσθετων,
- Η ενανθράκωση του σκυροδέματος

5 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΩΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ

5.1 ΕΙΔΙΚΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ

Σε ειδικές περιπτώσεις όπου απαιτείται μεγαλύτερη προστασία από τη διάβρωση είτε επειδή υπάρχει έντονα διαβρωτικό περιβάλλον είτε για αύξηση της διάρκειας ζωής της κατασκευής, μπορεί να γίνει χρήση ειδικών χαλύβων. Από προηγούμενες έρευνες (Batis and Rakanta, 2005) προέκυψε μεγάλη διακύμανση στην ανθεκτικότητα των χαλύβων ανάλογα της χημικής τους σύστασης και του τρόπου δημιουργίας τους ενώ τα προϊόντα διάβρωσης που προέκυψαν στην επιφάνεια των οπλισμών ήταν πορώδη, μειώνοντας τη συνάφεια χάλυβα - σκυροδέματος.

Με τον όρο ειδικοί χάλυβες αναφέρονται οι χάλυβες με επικαλύψεις και οι ανοξείδωτοι χάλυβες. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αναφορές με διάφορα επιστρώματα (ανόργανα όπως κεραμικά ή οργανικά όπως PVC) καθώς και άλλα μέταλλα όπως π.χ. τιτάνιο. Η χρήση ειδικών χαλύβων περιορίζεται από το κόστος το οποίο αυξάνει ανάλογα με το βαθμό προστασίας που προσφέρει. Ο παρακάτω πίνακας δίνει τις σχετικές τιμές κόστους σε σχέση με τον κοινό δομικό χάλυβα.

Πίνακας 5.1: Σχετικό κόστος διαφόρων ειδών χαλύβων (Γ. Μπατής, 1999)

Είδη χάλυβα	Σχετικό κόστος
Κοινός δομικός χάλυβας	1
Επιψευδαργυρωμένος χάλυβας	1.5 - 2
Χάλυβας με εποξική επικάλυψη	2
Χάλυβας με επικάλυψη ανοξείδωτο χάλυβα	4
Ανοξείδωτος χάλυβας	8

Μια ιδιαίτερη περίπτωση μεταλλικού επιστρώματος αποτελεί ο γαλβανισμός κατά τον οποίο γίνεται θερμή εμβάπτιση του χάλυβα σε τήγμα ψευδαργύρου με αποτέλεσμα στις εσοχές που τυχόν δημιουργούνται να υπάρχει γαλβανική διάβρωση των δυο μετάλλων με τον ψευδάργυρο να διαβρώνεται ενώ ο οπλισμός να προστατεύεται.

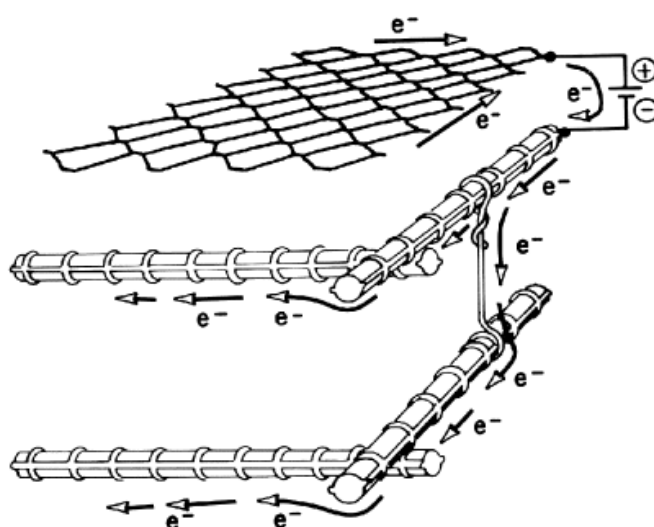
5.2 ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

5.2.1 Καθοδική προστασία

Η καθοδική προστασία είναι ίσως η μόνη μέθοδος που μπορεί να προσφέρει πλήρη προστασία στον οπλισμό που βρίσκεται εγκιβωτισμένος στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Η μέθοδος αυτή αποσκοπεί στη μετατροπή του οπλισμού σε κάθοδο

ηλεκτρολυτικού κελιού. Όλα τα μεταλλικά στοιχεία βρίσκονται στη φύση με τη μορφή ορυκτών. Κατά τις μεταλλουργικές διεργασίες γίνεται εμπλουτισμός του μεταλλεύματος με σκοπό την αύξηση της συγκέντρωσης του μετάλλου και την αναγωγή του μετάλλου. Όμως σύμφωνα με τη θερμοδυναμική όλα τα στοιχεία ανάλογα με το περιβάλλον που βρίσκονται μετατρέπονται σε πιο σταθερές μορφές. Στην καθοδική προστασία γίνεται προσφορά ηλεκτρονίων στο μέταλλο που πρέπει να προστατευτεί ώστε να μη διαβρωθεί. Αυτό γίνεται είτε με τη μέθοδο των θυσιαζόμενων ανόδων είτε με εξωτερικά επιβαλλόμενα ρεύματα (Zeris et al., 2014).

Ο οπλισμός συνδέεται με τον αρνητικό πόλο συνεχούς πηγής ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ ο θετικός πόλος με κατάλληλη άνοδο. Οι άνοδοι που χρησιμοποιούνται ευρύτατα είναι αυτές που έχουν μορφή πλέγματος όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1: Η αρχή της καθοδικής προστασίας του Σιδηροπλισμού στο σκυρόδεμα (Γ. Μπατής, 1999)

Τα πλέγματα κατασκευάζονται από σύρμα τιτανίου και στην επιφάνεια του υπάρχουν διάφορα οξειδία και ευγενή μέταλλα. Το πάχος του σύρματος καθορίζει το ποσό του ρεύματος που θα περάσει και επομένως την επιφάνεια του οπλισμού που προστατεύεται. Η χημική σταθερότητα του τιτανίου και των οξειδίων σε συνθήκες ανοδικής φόρτισης είναι το πλεονέκτημα που έχουν τα πλέγματα σε σχέση με άλλους τύπους ανόδων. Επίσης η ευκολία στη χρήση, η αντικατάσταση τμήματος των ανόδων και η μεγάλη διάρκεια ζωής τους είναι μερικά ακόμα προτερήματα σε σχέση με άλλες μεθόδους προστασίας (ΜΠΑΤΗΣ Γ., 1999).

Εκτός από τα πλέγματα τα οποία βρίσκουν εφαρμογή στην προστασία του χάλυβα, χρησιμοποιούνται αγώγιμα χρώματα, κονιάματα καθώς επίσης και άνοδοι μεταλλικού επιστρώματος όπως ο ψευδάργυρος. Για την επιλογή των ανόδων οι σημαντικότεροι παράγοντες είναι η επιτρεπόμενη πυκνότητα ρεύματος, η διάρκεια

ζωής της ανόδου, η αντοχή στο περιβάλλον που είναι εκτεθειμένο το σκυρόδεμα, το κόστος και η γεωμετρία της κατασκευής (DAILY S.F., 2002).

Στη μέθοδο με τα εξωτερικά επιβαλλόμενα ρεύματα συνδέεται η κατασκευή με ένα βοηθητικό ηλεκτρόδιο και διοχετεύεται ηλεκτρικό ρεύμα έτσι ώστε η κατασκευή να καταστεί κάθοδος και το ηλεκτρόδιο άνοδος. Τα πλεονεκτήματα από αυτή τη μέθοδο προστασίας είναι τα εξής (ΚΟΥΛΟΥΜΠΗ Ν., 1999):

- Δυνατότητα επίτευξης υψηλών τιμών δυναμικού με αποτέλεσμα την προστασία μεγάλων και ακάλυπτων κατασκευών,
- Επιτρέπει καλύτερη ρύθμιση των συνθηκών προστασίας,
- Απαιτεί λιγότερες ανόδους,
- Ρύθμιση της τιμής του δυναμικού μέσω ειδικού οργάνου.

Τα μειονεκτήματα αυτής της τεχνικής είναι το υψηλό κόστος ηλεκτροδίων, ο μεγάλος όγκος τους για την εξασφάλιση υψηλών τιμών ρεύματος, η μόλυνση του περιβάλλοντος από την κατανάλωση μερικών τύπων ηλεκτροδίων και η συχνή τους αντικατάσταση.

5.2.2 Επανακαλοποίηση σκυροδέματος

Η αύξηση της αλκαλικότητας του σκυροδέματος στα επίπεδα του διαλύματος των πόρων ($pH > 12$) οδηγεί στην επαναδημιουργία και την αποκατάσταση του παθητικού στρώματος οξειδίων στην επιφάνεια του χάλυβα. Ένας τρόπος επαναφοράς της αρχικής αλκαλικότητας του σκυροδέματος είναι η μέθοδος της ηλεκτροχημικής επανακαλοποίησης (*electrochemical realkalization*).

Η αύξηση της αλκαλικότητας του σκυροδέματος με τη μέθοδο αυτή, επιτυγχάνεται με τον ψεκασμό αλκαλικού διαλύματος πάνω στην επιφάνεια της κατασκευής στην οποία έχει αγκυρωθεί προσωρινό δίκτυο/πλέγμα ανόδων, διαμέσου ηλεκτρολύτη. Το διάλυμα του ηλεκτρολύτη με το οποίο γίνεται ο ψεκασμός της επιφάνειας είναι συνήθως διάλυμα Na_2CO_3 με $C=1\text{M}$ (ΓΡΗΓΟΡΙΑΔΗΣ Γ., 2014). Τόσο το πλέγμα των ανόδων, όσο και ο οπλισμός συνδέονται στους πόλους μετασχηματιστή/ανορθωτή εναλλασσόμενου ρεύματος. Η τάση τροφοδοσίας κυμαίνεται από 4-40V και εξαρτάται από το πάχος επικάλυψης των οπλισμών στην εκάστοτε κατασκευή αλλά και από την αντίσταση του σκυροδέματος. Η απαιτούμενη πυκνότητα ρεύματος κυμαίνεται στην περιοχή από 0.8 – 2 A/m^2 επιφάνειας σκυροδέματος (Jacobasch et al., 1982). Κατά τη διάρκεια της εφαρμογής της ηλεκτροχημικής επανακαλοποίησης του σκυροδέματος λαμβάνουν χώρα δράσεις που συμβαίνουν ταυτόχρονα με την ηλεκτρόλυση όπως είναι η τριχοειδής αναρρίχηση του αλκαλικού διαλύματος και η

διάχυση του στο σκυρόδεμα λόγω διαφοράς συγκέντρωσης, μεταφορά φορτίου λόγω ηλεκτρικού πεδίου, φαινόμενα ηλεκτρώσωσης και η ηλεκτρόλυση.

5.2.3 Ηλεκτροχημική αφαίρεση χλωριόντων

Η αφαίρεση των χλωριόντων επιτυγχάνεται με ηλεκτροχημικό τρόπο χρησιμοποιώντας έναν κατάλληλο ηλεκτρολύτη, μια ρητίνη ανταλλαγής ιόντων και ένα μεταλλικό πλέγμα το οποίο εφαρμόζεται στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Στο ηλεκτροχημικό κύκλωμα, ο οπλισμός δρα ως κάθοδος και το πλέγμα ως άνοδος. Με την εφαρμογή δυναμικού, τα χλωριόντα έλκονται από την θετικά φορτισμένη άνοδο όπου και δεσμεύονται από την ρητίνη.

Η μέθοδος παρουσιάζει τα εξής μειονεκτήματα (ΤΑΣΙΟΣ Θ.Π. and ΑΛΙΓΙΖΑΚΗ Κ., 1993):

- Απαιτεί την εφαρμογή υψηλού δυναμικού το οποίο αναπτύσσει μεγάλες θερμοκρασίες στο σκυρόδεμα (περίπου 90°C), με αποτέλεσμα την εμφάνιση ρηγματώσεων.
- Αύξηση της διαπερατότητας του σκυροδέματος.
- Μείωση της αντοχής του σκυροδέματος στην περίπτωση χρήσεως μεγάλων πυκνοτήτων ρεύματος.
- Έχει υψηλό κόστος.

5.3 ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

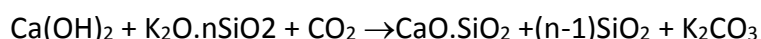
Η επικάλυψη του σκυροδέματος με διάφορα υλικά είναι συνηθισμένη τακτική, ιδιαίτερα όταν το σκυρόδεμα είναι εκτεθειμένο σε διαβρωτικό περιβάλλον. Η επιφανειακή προστασία του σκυροδέματος μπορεί να γίνει με τις παρακάτω μεθόδους:

- **Διαποτισμός & σφράγιση**, με τη δημιουργία ενός λεπτού, υδρόφοβου στρώματος στην επιφάνεια του σκυροδέματος χωρίς την κάλυψη των πόρων του σκυροδέματος. Η προστασία του σκυροδέματος με ανόργανες ή οργανικές επικαλύψεις, συνολικά δεν υπερβαίνει τα 300μm, και επομένως ανήκει σε αυτή την κατηγορία,
- **Επικάλυψη**, με το σχηματισμό ενός ομοιόμορφου στρώματος στην επιφάνεια του σκυροδέματος.

5.3.1.1 *Ανόργανα χρώματα*

Τα ανόργανα χρώματα έχουν σαν συνδετικό μέσο την υδρύαλο που χημικά αποτελείται από πυριτικό κάλιο και ως χρωστικές ανόργανα πιγμέντα. Υδρύαλος

είναι η συνήθης ονομασία των πυριτικών αλάτων των αλκαλίων με γενικό τύπο $Me_2Ox.nSiO_2$, όπου Me είναι το K ή Na (σπάνια Li), των οποίων το pH κυμαίνεται μεταξύ 11 - 13. Το n δηλώνει τον αριθμό των μορίων που συμμετέχουν στη χημική ένωση και κυμαίνεται μεταξύ 2 και 4. Όσο αυξάνεται ο αριθμός των μορίων του SiO_2 τόσο πιο δυσδιάλυτο είναι το άλας. Η συγκράτηση της υδρύαλου με το υπόστρωμα (σκυρόδεμα, λίθος ή σοβάς) και η σκλήρυνση του χρώματος πραγματοποιούνται σύμφωνα με την παρακάτω χημική αντίδραση:



Από την παραπάνω αντίδραση φαίνεται πως η υδρύαλος, αντιδρά λόγω διάχυσης με τα ιόντα ασβεστίου που βρίσκονται στο διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος και με το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας μετατρέπεται σε πυριτικό ασβέστιο και ανθρακικό κάλιο.

5.3.1.2 Οργανικά χρώματα

Τα οργανικά χρώματα που χρησιμοποιούνται στην προστασία του σκυροδέματος είναι χρώματα σιλικόνης, σιλοξάνης, υδατικών διασπορών, κυρίως ακρυλικών, πολυμερών ρητινών, χλωριομένου καουτσούκ καθώς και χρώματα δύο συστατικών.. Τα παραπάνω χρώματα όμως, δεν έχουν όλα την ίδια συμπεριφορά όσον αφορά την προστασία του οπλισμού από τη διάβρωση. Σε προηγούμενες έρευνες (Zafeiropoulou et al., 2011) έχει αποδειχθεί ότι τα διάφορα χρώματα (ακρυλικά, πυριτικά, ελαστομερή, PVA) συμπεριφέρονται με διαφορετικό τρόπο όσον αφορά την ενανθράκωση του σκυροδέματος και την απώλεια μάζας των οπλισμών (Zafeiropoulou et al., 2013). Για την εφαρμογή των χρωμάτων απαιτείται η εφαρμογή υποστρώματος (αστάρι) και στη συνέχεια διπλή εφαρμογή του χρώματος με διαφορά δύο-τριών ωρών μεταξύ τους.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα υποστρώματα (αστάρια) περιέχουν μεγαλύτερο ποσοστό διαλυτών, γεγονός που διευκολύνει τη διείσδυση του χρώματος στους πόρους του σκυροδέματος. Η σωστή εφαρμογή του υποστρώματος είναι μεγάλης σημασίας για τη διάρκεια ζωής του χρώματος και την προστασία του σκυροδέματος και του οπλισμού.

Για να χρησιμοποιηθεί ένα χρώμα σαν επικάλυψη (οργανική ή ανόργανη) και να προσφέρει μέγιστη προστασία στο σκυρόδεμα θα πρέπει:

- Να αποτρέπει τη διείσδυση του νερού στο σκυρόδεμα. Τα χρώματα πολυουρεθάνης έχουν δείξει καλή συμπεριφορά σε αυτή την ιδιότητα (Al-Zahrani et al., 2002).
- Να αποτρέπει τη διείσδυση του διοξειδίου του θείου (SO_2), και του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) στο σκυρόδεμα (Zafeiropoulou T. et al., 2012).

- Να αποτρέπει την είσοδο των χλωριόντων στο σκυρόδεμα.
- Να επιτρέπει τη διείσδυση των υδρατμών.
- Να έχει ελαστικότητα.
- Να έχει ανθεκτικότητα στην ηλιακή ακτινοβολία.

5.4 ΑΝΑΣΤΟΛΕΙΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Ως αναστολέας διάβρωσης ορίζεται κάθε χημική ουσία που όταν μπαίνει στο σκυρόδεμα κοντά στον οπλισμό μειώνει το ρυθμό διάβρωσης του χάλυβα. Οι αναστολείς διάβρωσης ενεργούν στο ανοδικό ή καθοδικό τμήμα της ηλεκτροχημικής δράσης επιβραδύνοντάς το σημαντικά και η ενέργεια τους εντοπίζεται στη διεπιφάνεια μεταξύ μετάλλου και διαβρωτικού περιβάλλοντος (Zacharopoulou et al., 2013). Ακόμα οι αναστολείς αποτρέπουν την κίνηση ή τη διάχυση των ιόντων στη μεταλλική επιφάνεια ενώ παράλληλα αυξάνουν την ηλεκτρική αντίσταση του μετάλλου (ROBERGE P.R., 2012).

Ανάλογα με τη σύσταση τους χωρίζονται σε ανόργανους όπως το νιτρώδες ασβέστιο, και σε οργανικούς όπως οι αμινοαλκοόλες, μίγματα αμινών με εστέρες κ.α.,. Σε πρόσφατες μελέτες έχει αποδειχθεί ότι η χρήση των οργανικών αναστολέων διάβρωσης (DMEA) μειώνουν τη διάβρωση του οπλισμού και αυξάνουν το Δυναμικό Διάβρωσης προς ηλεκτροθετικότερες τιμές (Rakanta et al., 2013).

Οι αναστολείς διάβρωσης ανάλογα με τον τρόπο που δρουν στο χάλυβα χωρίζονται σε (Söylev and Richardson, 2008):

- **Ανοδικούς.** Δρουν στη διάλυση του χάλυβα μειώνοντας το ρυθμό διάβρωσης και αυξάνοντας το Δυναμικό Διάβρωσης. Οι πιο συνηθισμένοι αναστολείς αυτής της κατηγορίας είναι το νιτρώδες Ασβέστιο, Νιτρώδες Νάτριο, βενζοϊκό Νάτριο και το χρωμικό Νάτριο,
- **Καθοδικούς.** Δρουν στο καθοδικό τμήμα (στο οξυγόνο) της αντίδρασης στην επιφάνεια του οπλισμού ελαττώνοντας το ρυθμό διάβρωσης. Οι συνηθέστεροι αναστολείς αυτής της κατηγορίας είναι NaOH , Na_2CO_3 τα οποία αυξάνουν το pH στην περιοχή κοντά στον οπλισμό και μειώνουν τη μεταφορά του O_2 στην επιφάνεια του χάλυβα. Επίσης χρησιμοποιούνται φωσφορικά, πυριτικά και πολύ-φωσφορικά άλατα (Soeda and Ichimura, 2003),
- **Μικτούς.** Οι αναστολείς αυτής τα κατηγορίας δρουν στο ανοδικό και στο καθοδικό τμήμα της ηλεκτροχημικής αντίδρασης χωρίς σημαντική επίδραση στο δυναμικό διάβρωσης αλλά με απορρόφηση τους από το χάλυβα δημιουργώντας ένα προστατευτικό φιλμ. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται ενώσεις που

περιλαμβάνουν στο υδροφοβικό τμήμα της N, S, OH. Επίσης, χρησιμοποιούνται οργανικά πολυμερή όπως αμίνες και αμινοαλκοόλες.

Στο σκυρόδεμα οι αναστολείς εφαρμόζονται είτε στη φάση παραγωγής, είτε με ψεκάσμο στην επιφάνεια του σκυροδέματος με την προϋπόθεση ότι δεν έχει ήδη προχωρήσει σημαντικά η διάβρωση του οπλισμού (Ormellese et al., 2006), (ΜΠΑΤΗΣ Γ., 1999). Είναι μία λύση εύκολη στην εφαρμογή, με καλά αποτελέσματα και χαμηλό κόστος, ωστόσο σχετίζονται με τη μείωση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, σε περιπτώσεις χρήσης νιτρώδους νατρίου. Αντίθετα το νιτρώδες ασβέστιο, παρέχει και προστασία από την διάβρωση και αυξημένη αντοχή (Ann et al., 2006).

5.5 ΣΥΝΘΕΤΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ ΚΑΙ ΕΠΕΜΒΑΣΗ ΣΤΙΣ ΠΡΩΤΕΣ ΥΛΕΣ

Η χρήση διαφόρων πρόσμικτων όπως είναι οι φυσικές ποζολάνες, οι ιπτάμενες τέφρες ή οι διάφορες σκωρίες που αποτελούν παραπροϊόντα μεταλλουργικών διεργασιών αποσκοπούν στη μείωση του πορώδους και στην προστασία του περιβάλλοντος (Χουσίδης Ν. et al., 2014). Οι ποζολάνες που περιέχουν οξείδια του ασβεστίου, πυριτίου, αργιλίου και σιδήρου δεσμεύουν ένα μέρος του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (C-H) και παράγουν μέσω της ποζολανικής αντίδρασης C-S-H. Το προϊόν αυτό εισχωρεί στους πόρους του σκυροδέματος αντικαθιστώντας το νερό με αποτέλεσμα τη μείωση της διαπερατότητας και κατ' επέκταση την προστασία του οπλισμού. Ακόμα, η ποζολάνη δεσμεύει χλωριόντα δημιουργώντας κρυσταλλικές ενώσεις (άλας *Friedel*) βοηθώντας στην προστασία του οπλισμού από τη διάβρωση.

Σχετικά με τις πρώτες ύλες παρασκευής του τσιμέντου και του σκυροδέματος με σκοπό την προστασία του χάλυβα από τη διάβρωση πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα κάτωθι:

- Χαμηλή περιεκτικότητα C_3A στην περίπτωση που το διαβρωτικό περιβάλλον είναι τα θειικά ιόντα. Επίσης, το C_3A αντιδρά με τη γύψο δημιουργώντας τον μεγαλομοριακό εντριγκίτη που ρηγματώνει το σκυρόδεμα,
- Έλεγχος της κοκκομετρίας και της σύστασης των αδρανών για την αποφυγή φυσαλίδων στη διεπιφάνεια μεταξύ αδρανών και τσιμέντου. Σχετικά με την ποιότητα, επιβάλλεται ο έλεγχος της χημικής τους σύστασης και της καθαρότητας έτσι ώστε να μην αντιδρούν με κανένα από τα συστατικά της πάστας του τσιμέντου,
- Παραγωγή ειδικών τύπων τσιμέντου υψηλής περιεκτικότητας φάσεων χαμηλής θερμοκρασίας όπως C_3A και C_2S κατά την παρασκευή του κλίνκερ (Arjunan et al., 1999).

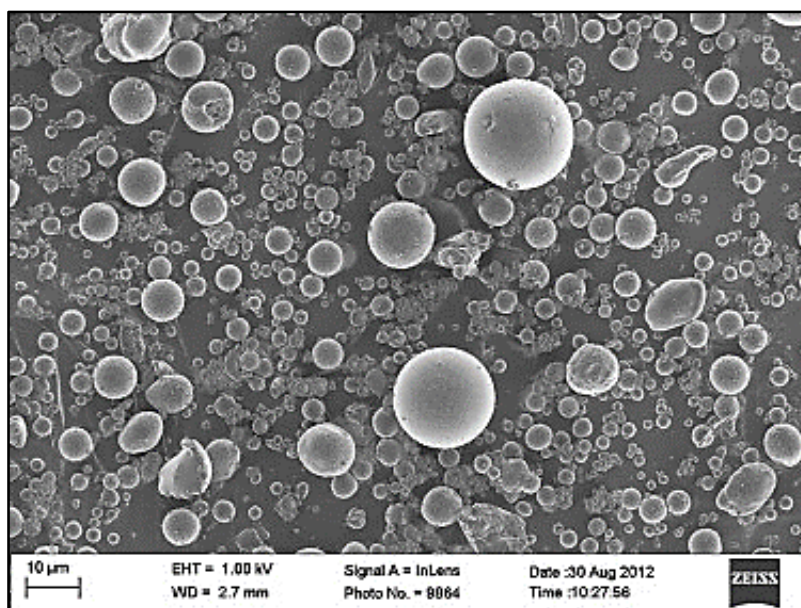
6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΠΡΟΙΟΝΤΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

6.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

6.1.1 Φυσικές ιδιότητες και λεπτότητα Ι.Τ

Η Ι.Τ είναι ένα λεπτόκοκκο υλικό το οποίο αποτελείται κυρίως από σφαιρικά υαλώδη σωματίδια με λεία επιφάνεια και μέση διάμετρο 20 μm. Πάρα ταύτα, το μέγεθος των κόκκων μπορεί να διαφέρει και οι τέφρες μπορεί να περιέχουν γωνιώδη και ακανόνιστου σχήματος κόκκους γεγονός που οφείλεται στις συνθήκες δημιουργίας και τη σύσταση του μητρικού πετρώματος.

Η λεπτότητα των Ι.Τ εκτιμάται συνήθως με ειδικά κόσκινα σύμφωνα με τη μέθοδο που περιγράφεται στο πρότυπο **ASTM C 311-77** σε υγρή ή ξηρή κατάσταση ενώ το πρότυπο **ASTM C 430** περιγράφει τη δοκιμή για την εκτίμηση της λεπτότητας του τσιμέντου. Η διασπορά του μεγέθους των σωματιδίων μπορεί να προσδιοριστεί με πολλές τεχνικές όπως καθίζηση X-Ray, ανάλυση σωματιδίων laser και συσκευή Coulter η οποία μπορεί όμως να προκαλέσει συσσώρευση μικρών σφαιριδίων σε μεγαλύτερα (σχήμα 6.1). Σύμφωνα με προηγούμενες έρευνες (Mehta and GjØrn, 1982) σε τέφρες των Η.Π.Α, οι υψηλού Ca τέφρες είναι πιο λεπτόκοκκες από τις χαμηλού Ca χρησιμοποιώντας την τεχνική της καθίζησης, γεγονός που οφείλεται στην παρουσία υψηλότερων ποσοστών αλκαλίων και θεικών.



Σχήμα 6.1: Μορφολογία σωματιδίων Ι.Τ και συσσώρευση των μικρότερων Σε μεγαλύτερα (van der Merwe et al., 2014)

Προηγούμενες μελέτες (Koukouzas et al., 2007) έδειξαν, ότι από γαιάνθρακες με υψηλό ποσοστό βιομάζας προκύπτουν τέφρες με μικρότερο μέγεθος κόκκων. Ο πίνακας 6.1 παρουσιάζει τις φυσικές ιδιότητες και τη λεπτότητα σε βιτουμενιούχες (B), υποβιτομενιούχες (SB) και λιγνιτικές (L) Ιπτάμενες Τέφρες. Η ειδική επιφάνεια και το ειδικό βάρος προσδιορίστηκαν σύμφωνα με τα πρότυπα **ASTM C204** και **ASTM C188** αντίστοιχα, και είναι τα ίδια που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των ίδιων ιδιοτήτων στο τσιμέντο.

Πίνακας 6.1: Φυσικές ιδιότητες και λεπτότητα διαφόρων τύπων ιπτάμενων τεφρών (Malhotra, V.M., Ramezaniarpour, A.A., 1994)

A/A	ΤΥΠΟΣ ΓΑΙΑΝΘΡΑΚΑ	ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ	ΥΓΡΟ ΚΟΣΚΙΝΙΣΜΑ	ΞΗΡΟ ΚΟΣΚΙΝΙΣΜΑ	ΕΙΔΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ
1	B	2.53	17.3	12.3	289
2	B	2.58	14.7	10.2	312
3	B	2.88	25.2	18.0	127
4	B	2.96	19.2	14.0	198
5	B	2.38	21.2	16.1	448
6	B	2.22	40.7	30.3	303
7	SB	1.90	33.2	26.4	215
8	SB	2.05	19.4	14.3	326
9	SB	2.11	46	33.0	240
10	L	2.38	24.9	18.8	286
11	L	2.53	2.7	2.5	581

6.1.2 Χημική και ορυκτολογική σύσταση Ι.Τ

Σε πολλές έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί (Carette and Malhotra, 1986), (Manz et al., 1989) παρουσιάζονται σημαντικές διαφορές στις χημικές συστάσεις των Ι.Τ. Η χημική τους σύσταση ποικίλλει και εξαρτάται από την προέλευση και την ορυκτολογία που έχει ο γαιάνθρακας στις βιομηχανίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η κύρια σύσταση τους περιλαμβάνει αργιλοπυριτικές, ασβεστιτικές και σιδηρούχες φάσεις ενώ υπάρχει και πλήθος βαρέων μετάλλων όπως Cd, Cr, Cu, Mn, και Pb τα οποία είναι επιβλαβή για τη δημόσια υγεία και το περιβάλλον (Lu et al., 2009).

Οι τύπου F τέφρες συνήθως περιέχουν ποσοστό CaO μικρότερο του 10%, ενώ στις υψηλού ασβεστίου συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 10-35%. Η σύσταση της Ι.Τ διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διόγκωση του σκυροδέματος διότι όπως αναφέρεται σε προηγούμενες έρευνες (Shehata and Thomas, 2000) το χαμηλό

ποσοστό Si, το υψηλό ποσοστό Ca ή/και το υψηλό ποσοστό αλκαλίων αυξάνει τη διαστολή του σκυροδέματος.

Εξαιτίας της ταχείας ψύξης, οι Ι.Τ περιέχουν κυρίως μη-κρυσταλλικά ή υαλώδη σωματίδια σε ποσοστό <90% και μικρές ποσότητες κρυσταλλικών ορυκτών (Κουκουζας et al., 2009). Επίσης, ανάλογα με το σύστημα καύσης του γαιάνθρακα μπορεί να περιέχεται και άκαυτος Άνθρακας μαζί με τα σωματίδια της τέφρας του οποίου το ποσοστό υπολογίζεται με την τεχνική της απώλειας πύρωσης (LOI - Loss on Ignition). Το πρότυπο **ASTM C-618** θέτει ως ανώτατο όριο 6% της τέφρας σε άκαυτο C και 5% σε SO₃ για χρήση στο τσιμέντο. Οι κυριότερες κρυσταλλικές φάσεις που εμφανίζονται είναι μουλίτης, μαγνητίτης και αιματίτης ενώ σε μικρότερες συγκεντρώσεις είναι δυνατό να υπάρχουν άστριοι, αργιλικά ορυκτά και ανυδρίτης. Ο προσδιορισμός των κρυσταλλικών φάσεων γίνεται κυρίως με την τεχνική XRD ενώ το ποσοστό της υαλώδους φάσης προκύπτει έμμεσα χρησιμοποιώντας την τεχνική (RIM) (Chung F.H., 1976). Το σχήμα 6.2 δείχνει την κοκκομετρία δύο (2) ειδών Ι.Τ υπό στερεοσκοπική παρατήρηση.



Σχήμα 6.2: Στερεοσκοπική παρατήρηση x8 της κοκκομετρίας δυο ειδών Ι.Τ (η φωτογραφία απεικονίζει Ι.Τ που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα Διατριβή)

6.1.3 Επίδραση της Ι.Τ στην εργασιμότητα του σκυροδέματος,

Τα μικρά και σφαιρικά σωματίδια της Ι.Τ επιδρούν στα ρεολογικά χαρακτηριστικά του τσιμέντου με αποτέλεσμα τη μείωση του απαιτούμενου νερού στο σκυρόδεμα, αυξάνοντάς την εργασιμότητα εν συγκρίσει με το κανονικό σκυρόδεμα που περιέχει μόνο OPC. Έχει αποδειχθεί (Owens, 1979), ότι η αντικατάσταση των ανδρόκοκκων (>45mm) αδρανών στο σκυρόδεμα από Ιπτάμενη τέφρα, ελαττώνει την ποσότητα του νερού ανάμιξης κατά 25% ενώ η αύξηση του μεγέθους των κόκκων της τέφρας δεν έχει επηρεάζει τις απαιτήσεις σε νερό. Η αντικατάσταση της άμμου από Ι.Τ μπορεί να πραγματοποιηθεί μέχρι 30% (Rajamane et al., 2007) ώστε να υπάρχει και βελτίωση στην θλιπτική αντικατάσταση του σκυροδέματος. Από την άλλη η αντικατάσταση του

τσιμέντου με Ι.Τ αυξάνει τις απαιτήσεις σε νερό (Wang, 2014) εξαιτίας της μεγαλύτερης ειδικής επιφάνειας και της λεπτότητας των κόκκων της Ι.Τ εν συγκρίσει με το τσιμέντο. Στο σχήμα 6.3 φαίνεται η δοκιμή της κάθισης (slump test) σε σκυρόδεμα με 100%ΟΡC (δεξιά) και σε 90%ΟΡC+10% Ι.Τ (αριστερά). Και στα δύο μίγματα ο λόγος W/C ήταν 0.65. Από το σχήμα είναι φανερό ότι η Ι.Τ απορρόφησε μια ποσότητα νερού και γι' αυτό η κάθιση είναι μικρότερη.



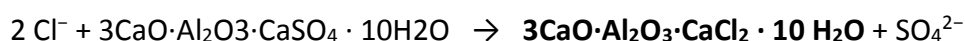
Σχήμα 6.3: Δοκιμή κάθισης σε σκυρόδεμα με 100%ΟΡC (δεξιά) και 90%ΟΡC+10%F.A (αριστερά) με λογό W/C=0.65. (η εικόνα αφορά πειραματά της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής)

6.1.4 Επίδραση της Ι.Τ στη θερμότητα ενυδάτωσης

Η ενυδάτωση του τσιμέντου ξεκινά αμέσως μετά την ανάμιξη του με το νερό και οφείλεται στη υδρόλυση με αποδέσμευση των ιόντων Ca^{2+} και OH^- . Η πρώτη φάση ενυδάτωσης περιλαμβάνει τη δημιουργία C_3A με παράλληλη έκλυση θερμότητας ενώ και η δημιουργία C_3S που ακολουθεί έχει το ίδιο αποτέλεσμα. Από τα παραπάνω είναι φανερό πως οτιδήποτε επιβραδύνει την ενυδάτωση, δηλαδή τη δημιουργία C_3S και C_3A μειώνει την εκλυόμενη θερμότητα. Η χρήση της Ι.Τ στο σκυρόδεμα δεσμεύει ιόντα Ca^{2+} μέσω της ποζολανικής αντίδρασης $CH + SH \rightarrow C-S-H$. Οι Αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα είναι οι εξής:

- $Ca(OH)_2 + H_4SiO_4 \rightarrow Ca^{2+} + H_2SiO_4^{2-}$
- $Ca^{2+} + H_2SiO_4^{2-} + 2H_2O \rightarrow CaH_2SiO_4 \cdot 2H_2O$

Η Ι.Τ εξαιτίας του Al που περιέχει και της ύπαρξης Cl^- μπορεί να δημιουργήσει άλατα (friedel's salt - $Ca_2Al(OH)_6(Cl,OH) \cdot 2H_2O$) οπότε από τη μία υπάρχει μείωση της θερμότητας ενυδάτωσης και από την άλλη ελαττώνεται το πορώδες του σκυροδέματος. Το σχηματισμός του άλατος περιλαμβάνει την παρακάτω χημική εξίσωση.



6.1.5 Επίδραση της Ι.Τ στην ανθεκτικότητα έναντι των θειικών ιόντων

Τα θειικά άλατα προσβάλλουν κατά κύριο λόγο το σκυρόδεμα που περιβάλλει τον οπλισμό αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις επιδρούν άμεσα σε αυτό μέσω της δημιουργίας οξέων (H_2SO_4). Η αποσάθρωση του σκυροδέματος είναι έντονη σε περιπτώσεις μερικής έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον και πραγματοποιείται μεταξύ δύο ζωνών:

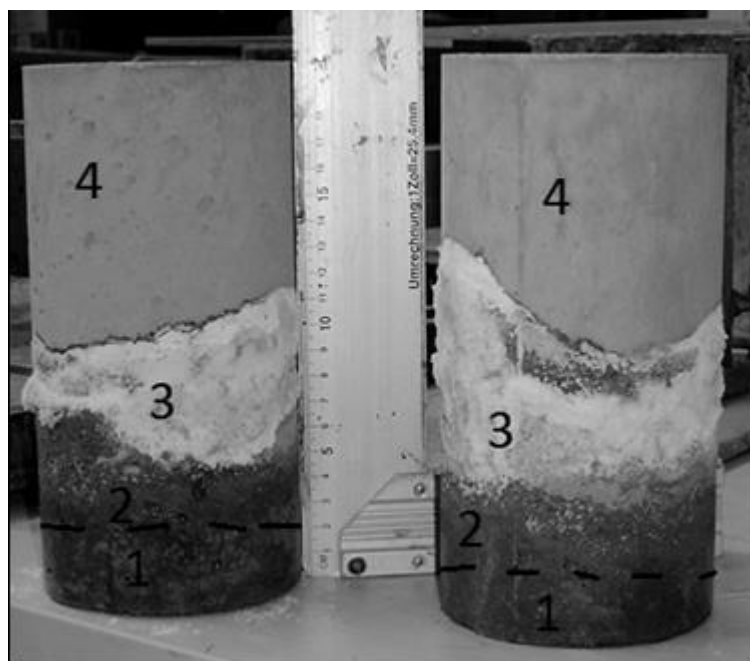
- 1^η ζώνη. Το τμήμα που βρίσκεται εντός του διαβρωτικού περιβάλλοντος που περιέχει θειικά ιόντα. Στο τμήμα αυτό έχουμε χημική αποσάθρωση του σκυροδέματος, με δημιουργία μεγαμοριακών ενώσεων, προϊόντα των αντιδράσεων του θειικού άλατος με τα προϊόντα ενυδάτωσης του τσιμέντου.
- 2^η ζώνη. Αφορά το ανώτερο τμήμα, εκείνο το οποίο βρίσκεται εκτεθειμένο σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον με χαμηλή συγκέντρωση θειικών. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει τριχοειδή άνοδο των θειικών αλάτων, εξάτμιση του διαλύτη (του νερού) και στη συνέχεια διόγκωση και ρωγμάτωση του σκυροδέματος εξαιτίας εφελκυστικών δυνάμεων.

Για την αποφυγή της χημικής διάλυσης του σκυροδέματος είναι ουσιώδες να μειωθεί στο ελάχιστο το πορώδες του σκυροδέματος που μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση Ι.Τ, χαμηλό λόγο W/C, χαμηλό ποσοστό C_3A , σωστή συμπύκνωση και αύξηση της ποσότητας του τσιμέντου (Χουσίδης Ν. et al., 2013). Για την αποφυγή της προσβολής και της διάλυσης του σκυροδέματος επιφανειακά, είναι απαραίτητη η χρήση επικαλύψεων. Σύμφωνα με προηγούμενες έρευνες (Suleiman et al., 2014) εποξειδικές, πυριτικές και ακρυλικές επικαλύψεις στο σκυρόδεμα αύξησαν την ανθεκτικότητα έναντι των θειικών ιόντων.

Στην πιο κάτω εικόνα παρουσιάζονται κυλινδρικά δοκίμια ύψους 30 cm και διαμέτρου 150 mm τα οποία εκτέθηκαν σε περιβάλλον Na_2SO_4 5% κ.β για χρονικό διάστημα πέντε (5) μηνών. Από το σχήμα φαίνονται καθαρά τέσσερα τμήματα:

1. τμήμα Αφορά το τμήμα που βρισκόταν εμβαπτισμένο στο διάλυμα. Δεν έχει επιφανειακές αλλοιώσεις αλλά στο εσωτερικό υπάρχει ανάπτυξη κρυστάλλων εντριγκίτη.
2. τμήμα Αφορά το τμήμα που βρίσκεται ακριβώς πάνω από τη στάθμη του διαλύματος. Υπάρχει έντονη διάλυση της τσιμεντόπαστας από την άνοδο των αλάτων μέσω τριχοειδών πόρων. Εξαιτίας της αυξημένης υγρασίας δεν υπάρχουν αρκετά εξανθήματα στο δοκίμιο.
3. τμήμα Αφορά το τμήμα εκείνο το οποίο είναι σχεδόν ξηρό, έχουν ανέλθει τα άλατα, και λόγω της εξάτμισης του νερού καθιζάνουν και δημιουργούνται επιφανειακά εξανθήματα.

4. τμήμα Είναι το ανώτερο τμήμα του δοκιμίου που δεν έχει προσβληθεί ακόμα από την επίθεση των θεικών αλάτων.



Σχήμα 6.4: Δοκίμια με 100%OPC (αριστερά) και 90% OPC+10% I.T (δεξιά) μερικώς εκτεθειμένα σε διάλυμα Na_2SO_4 κ.β για χρονικό διάστημα 5 μηνών

6.1.6 Επίδραση της I.T στην αλκαλοπυριτική αντίδραση στο σκυρόδεμα

Η αντίδραση των αλκαλίων με τα αδρανή έχει καταστροφικά αποτελέσματα στο σκυρόδεμα προκαλώντας διόγκωση και ρωγμάτωση. Επίσης, η παρουσία Si στα αδρανή με τη μορφή μικροκρυσταλλικού χαλαζία ή οπάλιου οδηγεί προς την κατεύθυνση αυτή. Η προσθήκη ποζολανών και ιδιαίτερα της I.T μειώνει την διαστολή του σκυροδέματος εξαιτίας της αλκαλοπυριτικής αντίδρασης (ASR). Από προηγούμενες έρευνες (Poole, 1981) προέκυψε ότι οι ιπτάμενες τέφρες χαμηλού Ca με ποσοστό αλκαλίων <4% μειώνουν τη διόγκωση του σκυροδέματος λόγω ASR όταν χρησιμοποιηθούν σε ποσοστό 25 - 30%.

Σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες σχετικά με την επίδραση της I.T στη διόγκωση λόγω ASR προέκυψαν τα εξής (Shehata and Thomas, 2000):

- Όσο αυξάνεται το ποσοστό προσθήκης τόσο μειώνεται η διόγκωση του σκυροδέματος.
- Η διόγκωση λόγω ASR αυξάνεται καθώς αυξάνεται το ποσοστό των αλκαλίων.
- Αύξηση της διαστολής καθώς αυξάνεται το ποσοστό του Ca. Επομένως σκυρόδεμα με low-Ca τέφρες εμφανίζουν καλύτερη συμπεριφορά από τις high-Ca.

- Οι τέφρες οι οποίες ελαττώνουν σημαντικά το pH του διαλύματος των πόρων του σκυροδέματος εμφανίζουν τη μικρότερη διαστολή. Οι χαμηλού Ca τέφρες εν συγκρίσει με τις υψηλού Ca ελαττώνουν πιο πολύ την αλκαλικότητα του διαλύματος (Shehata et al., 1999).

6.1.7 Δράση της Ι.Τ στις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος

Η χρήση της ιπτάμενης τέφρας στο σκυρόδεμα είτε ως υλικό αντικατάστασης του τσιμέντου, είτε των αδρανών, έχει ως αποτέλεσμα τη μακροχρόνια βελτίωση των μηχανικών αντοχών επιδρώντας στη μικροδομή του τσιμέντου (Ramachandran VS., 2000). Πάρα ταύτα από τη βιβλιογραφία είναι γνωστό ότι η προσθήκη 10% Ι.Τ παρουσιάζει μεγαλύτερη αύξηση των αντοχών από την προσθήκη 20% (Babu and Nageswara Rao, 1993) ενώ παράλληλα και το μέτρο ελαστικότητας παρουσιάζει μείωση, αυξανόμενου του ποσοστού προσθήκης της τέφρας (Siddique, 2004) . Η ιπτάμενη τέφρα όπως είναι γνωστό αντιδρά με το C-H σύμφωνα με την ποζολανική αντίδραση επιδρώντας στην ενυδάτωση του τσιμέντου. Το ποσοστό της υδρασβέστου που θα αντιδράσει με την τέφρα μπορεί στοιχειομετρικά να υπολογιστεί και το αποτέλεσμα που προκύπτει δίνει το δείκτη δραστηριότητας της τέφρας ώστε να γίνει εκτίμηση των μακροχρόνιων αντοχών του σκυροδέματος (Wang, 2014). Εκτός από τη δραστηριότητα της Ι.Τ άλλοι παράγοντες που επιδρούν στην ανάπτυξη των αντοχών των συνθέτων σκυροδεμάτων με τέφρα είναι η θερμοκρασία και ο τρόπος συντήρησης καθώς επίσης και η κοκκομετρία της Ι.Τ.

Η χημική σύσταση της τέφρας και ειδικά το ποσοστό Ca, Si, αλκαλίων και SO_3 επηρεάζουν επίσης τις ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος. Ειδικότερα, οι F-class τέφρες για παράδειγμα επιβραδύνουν το χρόνο πήξης (Carette and Malhotra, 1986) μειώνοντας τις αρχικές αντοχές του σκυροδέματος ενώ οι C-class έχουν αυξημένες ποζολανικές ιδιότητες και δίνουν σκυροδέματα με αυξημένες αντοχές ακόμα και σε πρώιμες ηλικίες. Ακόμα, Το ποσοστό SO_3 πρέπει να ληφθεί υπόψη διότι παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με τη γύψο και μπορεί να δημιουργήσει μεγαλομοριακές ενώσεις όπως ο εντριγκίτης.

6.1.8 Επίδραση της Ι.Τ στη στην απόξεση και στη μηχανική αποσάθρωση

Οι δομικές κατασκευές από σκυρόδεμα συχνά υπόκεινται σε δυνάμεις τριβής εξαιτίας του πάγου, των οχημάτων και διαφόρων άλλων μηχανικών καταπονήσεων. Η ανθεκτικότητα σε τριβή εξαρτάται από τους εξής παράγοντες (Yen et al., 2007)::

- Από την ποσότητα και τις αναλογίες των αδρανών,
- Από την ποσότητα του τσιμέντου,

- Το λόγο W/C,
- Τις συνθήκες συντήρησης,
- την ύπαρξη ινών ή/και πρόσμικτων,
- Το τελικό φινίρισμα του σκυροδέματος .

Επομένως η ανθεκτικότητα στην απόξεση πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά στο σχεδιασμό και την επιλογή των υλικών από το μηχανικό. Από τους πιο πάνω παράγοντες που αναφέρθηκαν η αύξηση της ποσότητας του τσιμέντου εκτός από την αύξηση του κόστους της κατασκευής, μπορεί να προκαλέσει ρηγματώσεις εξαιτίας της αυξημένης θερμότητας ενυδάτωσης. Για την αποφυγή του παραπάνω φαινομένου μπορεί να γίνει αντικατάσταση από Ι.Τ η οποία μειώνει την εκλυόμενη θερμότητα.

Σε προηγούμενες έρευνες (Naik et al., 1992) έχει βρεθεί ότι η προσθήκη Ι.Τ τύπου C βοηθάει στην βελτίωση της ανθεκτικότητας στην τριβή και ότι η ανθεκτικότητα στην τριβή σχετίζεται άμεσα με τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος (Naik T.R. et al., 1995). Οι ίδιοι ερευνητές αναφέρουν ότι η προσθήκη μέχρι 30% Ι.Τ δεν έχει σημαντική επίδραση στην ανθεκτικότητα έναντι της τριβής εν συγκρίσει με το σκυρόδεμα χωρίς Ι.Τ ενώ σε μεγαλύτερη περιεκτικότητα την αυξάνει σημαντικά.

6.1.9 Επίδραση της Ι.Τ στην προστασία του οπλισμού από τη διάβρωση εντός σκυροδέματος

Η ποιότητα του σκυροδέματος που περιβάλλει τον οπλισμό διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διάβρωση του οπλισμού κατά τη διάρκεια λειτουργίας της κατασκευής. Ειδικότερα, το πορώδες, η διαπερατότητα, το πάχος επικάλυψης, η αλκαλικότητα και η συντήρηση του σκυροδέματος αποτελούν τους σημαντικότερους παράγοντες που επιδρούν στην προστασία του χάλυβα από τη διάβρωση. Επίσης η ενανθράκωση όταν φθάσει στο βάθος που βρίσκεται ο οπλισμός μειώνει την αλκαλικότητα στην περιοχή γύρω από το χάλυβα και τον αποπαθητικοποιεί. Το ίδιο αποτέλεσμα έχει και η αυξημένη συγκέντρωση Cl⁻.

Η χρήση της Ι.Τ στο σκυρόδεμα βοηθάει στην προστασία του οπλισμού στο σκυρόδεμα διότι:

1. Δεσμεύει ιόντα Cl⁻ μειώνοντας τη συγκέντρωσή τους στο σκυρόδεμα.
2. Ελαττώνει το πορώδες και τη διαπερατότητα του σκυροδέματος μέσω της δημιουργίας C-H-S στην ποζολανική αντίδραση.
3. Μειώνει τη συστολή λόγω ξήρανσης που προκαλεί ρωγμές στο σκυρόδεμα.

Παρά τα σημαντικά οφέλη που έχει η χρήση της Ι.Τ, τα σύνθετα σκυροδέματα εμφανίζονται πιο ενανθρακωμένα από τα κανονικά γεγονός που οφείλεται στο

ελεύθερο CaO_f της τέφρας. Επίσης η ελάττωση της αλκαλικότητας του διαλύματος των πόρων από τη δέσμευση $\text{Ca}(\text{OH})_2$ μπορεί να αποπαθητικοποιήσει τον χάλυβα. Η χημική σύσταση της Ι.Τ και κυρίως η ύπαρξη ιόντων χλωρίου που προσβάλλουν τον οπλισμό, πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη. Σε αυτή την περίπτωση προτείνεται, προτού χρησιμοποιηθεί στο τσιμέντο η αφαίρεση τους σε υψηλές θερμοκρασίες ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη απομάκρυνση ιόντων Cl^- (Chen et al., 2012).

6.2 ΈΡΕΥΝΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ Ι.Τ ΠΤΟΛΕΜΑΪΔΑΣ ΣΤΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

6.2.1 Υφιστάμενη κατάσταση στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα η ποσότητα ιπταμένης τέφρας που παράγεται ετησίως, ξεπερνά τους 10 εκατομμύρια τόνους από τους οποίους χρησιμοποιείται μόνο το 10%, κυρίως από τη βιομηχανία τσιμέντου (Paradakis and Tsimas, 2001). Παράγεται στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς Μεγαλόπολης και Πτολεμαΐδας όπου προκύπτουν τέφρες με διαφορετικά φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά. Η σύσταση των ιπτάμενων τεφρών εξαρτάται κυρίως από την αρχική σύσταση του καυσίμου και από τις συνθήκες καύσης, ενώ βάσει της χημικής σύστασής χαρακτηρίζονται είτε ως πυριτικές, είτε ως ασβεστολιθικές. Η ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας είναι πλούσια σε ασβέστιο και κατατάσσεται στην κατηγορία «υδραυλικών τεφρών», ενώ η ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης είναι πλούσια σε πυριτικά και χαρακτηρίζεται ως καλή «ποζολανική τέφρα», καθώς και σε θειικά (SO_3) (ΜΠΑΤΗΣ and ΡΟΥΤΟΥΛΑΣ, 2009).

Οι πυριτικές τέφρες που προέρχονται κυρίως από την καύση λιθάνθρακα εμπίπτουν στο Ευρωπαϊκό πρότυπο **EN 450-1** και επιτρέπεται η χρήση τους στο σκυρόδεμα σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο **EN 260-1**. Σε αντίθεση με τις πυριτικές, οι ασβεστολιθικές ιπτάμενες τέφρες δεν εμπίπτουν στο παραπάνω Ευρωπαϊκό πρότυπο και επομένως η δυνατότητα χρησιμοποίησής τους μπορεί να διασφαλισθεί μόνο βάσει εθνικού σχετικού προτύπου που θα προσαρμόζεται/εντάσσεται στο **EN 206-1**. Το Σχέδιο Εθνικών προδιαγραφών διαχωρίζει τις τέφρες σε κατεργασμένες και μη και θέτει όρια σχετικά με τις τιμές SO_3 CaO_f σύμφωνα με τον πιο κάτω πίνακα.

Πίνακας 6.2: Διάκριση Ι.Τ βάσει του Ε.Σ.Π στο EN-206-1

	R45	SO_3	CaO_f
ΕΙΤ1 (μη κατεργασμένες Ι.Τ)	≤45%	≤7%	-
ΕΙΤ2 (κατεργασμένες Ι.Τ)	≤30%	≤5%	≤3%

6.2.2 Επίδραση των Ελληνικών τεφρών στις ιδιότητες του σκυροδέματος

Γενικά, η χρήση της Ι.Τ στο σκυρόδεμα ελαττώνει τις πρώιμες αντοχές γεγονός που οφείλεται στη χαμηλή δραστικότητα τους και στο αυξημένο πορώδες που εμφανίζουν τα ποζολανικά σκυροδέματα. Παρά το γεγονός αυτό, η δραστικότητα της τέφρας από την Πτολεμαΐδα σύμφωνα με προηγούμενες έρευνες (Antiohos and Tsimas, 2004) είναι εφικτό να αυξηθεί προσθέτοντας ίση ποσότητα με την τέφρα άσβεστο (CaO) ή με προσθήκη μικρής ποσότητας Na_2SiO_3 . Η αύξηση της δραστικότητας οφείλεται στην αύξηση της αλκαλικότητας εξαιτίας της δημιουργίας $\text{Ca}(\text{OH})_2$ και NaOH (Fan et al., 1999).

Σε προηγούμενη έρευνα που διεξήχθη από το **ΙΤΕΣΚ** του Εθνικού Κέντρου Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης σχετικά με τη χρήση της τέφρας από την Πτολεμαΐδα προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

- Η προσθήκη 20-30% Ι.Τ στο σκυρόδεμα έδωσε εφάμιλλες μηχανικές αντοχές και τιμές υδατοαπορροφητικότητας με δοκίμια χωρίς Ι.Τ.
- Το Δυναμικό Μέτρο Ελαστικότητας εμφανίστηκε μειωμένο κατά 10-15% συγκριτικά με το σκυρόδεμα χωρίς ποζολάνη.
- Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας μειώθηκε κατά 10-15% από τη χρήση Ι.Τ σε όλα τα ποσοστά προσθήκης.
- Τα αυξημένα ποσοστά CaO_f & SO_3 δεν δημιούργησαν ιδιαίτερα προβλήματα ενώ σε λίγες περιπτώσεις δημιουργήθηκαν βελονοειδείς κρύσταλλοι εντριγκίτη που δεν επηρέασαν την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος.
- Η Ι.Τ χωρίς κατεργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι 20% στο σκυρόδεμα δίχως να έχει δυσμενείς επιπτώσεις στις μηχανικές αντοχές του σκυροδέματος.

Ο τρόπος κατεργασίας των τεφρών μπορεί να δώσει προϊόντα τα οποία να καλύψουν μεγάλο φάσμα εφαρμογών και απαιτήσεων ανάλογα με το περιβάλλον που εκτίθεται το σκυρόδεμα. Επομένως ρυθμίζοντας το ποσοστό του CaO_f σε 3 – 3.5% και τη λεπτότητα της υπτάμενης τέφρας, μπορεί να επιτευχθεί αναβάθμιση των ιδιοτήτων της, για χρήση στην παραγωγή τσιμέντων υψηλής ανθεκτικότητας (Tsimas and Moutsatsou-Tsima, 2005). Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να δημιουργηθεί σκυρόδεμα με Ι.Τ μέχρι ποσοστού 60% (Papayianni and Anastasiou, 2010). Η χημική σύσταση της τέφρας υψηλού ασβεστίου που παράγεται στην Ελλάδα δίνεται στον πίνακα 6.3.

Πίνακας 6.3: χημική σύσταση και φυσικά χαρακτηριστικά Ι.Τ υψηλού ποσοστού CaO στην Ελλάδα (Ραραγιάννη, 1993)

Οξείδιο	Εύρος
SiO ₂	21-35 (%)
Al ₂ O ₃	10-14(%)
Fe ₂ O ₃	4,5-6,5(%)
CaO	30-45(%)
CaOf	10(%)
MgO	1,5-3,0(%)
SO ₃	4-8(%)
Na ₂ O	0,5-1(%)
K ₂ O	0,4-0, (%)9
Αδιάλυτο υπόλοιπο	19-25(%)
LOI	3-7(%)
Φυσικά χαρακτηριστικά Ι.Τ	
Ειδικό βάρος	2,15-2,55
Λεπτότητα	280-500 (m ² /kg)

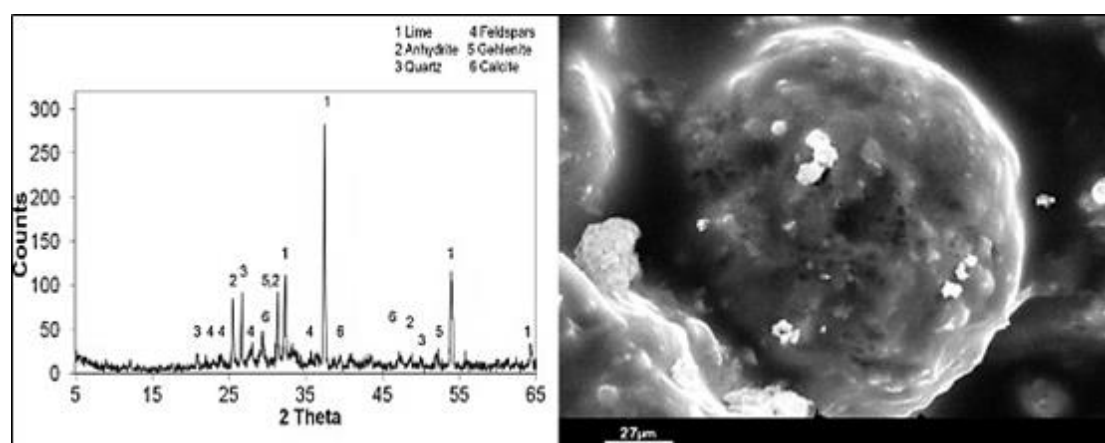
6.2.3 Διαφορές Ελληνικών Ι.Τ με τα Ευρωπαϊκά και Αμερικάνικα πρότυπα προδιαγραφών

Οι Ελληνικές ιπτάμενες τέφρες διαφέρουν από τις προδιάγραφες που θέτει το ευρωπαϊκό πρότυπο **EN-450** στα εξής (Paradakis and Tsimas, 2005):

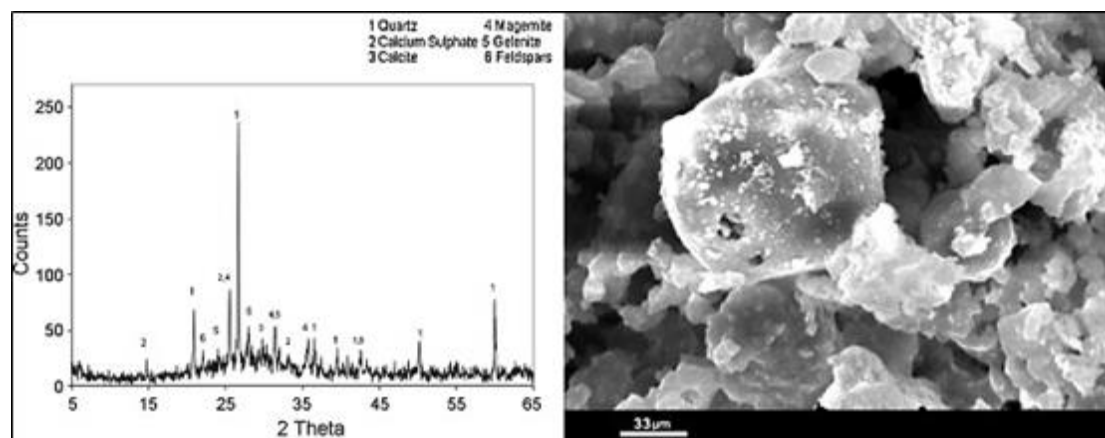
1. Ποσοστό SO₃. Η τέφρα από τη Μεγαλόπολη περιέχει 3 - 5% SO₃ ενώ της Πτολεμαΐδας 5 - 8%. Το ευρωπαϊκό πρότυπο **EN-450** θέτει ως ανώτερο όριο 3.5% ενώ το αντίστοιχο αμερικανικό 5% για χρήση στο τσιμέντο. Ως λύση προτείνεται η χρήση της Ι.Τ σε τσιμέντο με χαμηλή περιεκτικότητα σε γύψο ώστε το ολικό ποσοστό SO₃ να βρίσκεται εντός των ορίων που θέτουν τα πρότυπα.
2. Ποσοστό CaO_f. Το ποσοστό των ελληνικών τεφρών σε ελεύθερο οξείδιο ασβεστίου ξεπερνά κατά πολύ το όριο του 1% που θέτει το **EN-450** το οποίο μπορεί να μειωθεί με μερική ενυδάτωση της Ι.Τ προτού χρησιμοποιηθεί γεγονός το οποίο όμως προκαλεί μείωση της δραστηκότητας της τέφρας. Επίσης με αυτόν τον τρόπο μειώνεται και η διόγκωση του σκυροδέματος,

3. Ποσοστό ολικού CaO. Οι ελληνικές τέφρες περιέχουν πολύ παραπάνω του 10% που βάζει ως όριο το ευρωπαϊκό πρότυπο.
4. Λεπτότητα. Στην Ελλάδα παρακρατείται το 50 - 60% από το κόσκινο με διάμετρο οπής 45 μm ενώ το πρότυπο ορίζει ανώτερο όριο το 35%.

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι για να χρησιμοποιηθούν οι Ελληνικές τέφρες στη βιομηχανία τσιμέντου θα πρέπει να υποστούν επεξεργασία ώστε να εναρμονιστούν με τα Ευρωπαϊκά πρότυπα. Το σχήμα 6.5 δείχνει τη μορφολογία των Ελληνικών τεφρών με παρατήρηση σε Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) και τις ορυκτολογικές φάσεις με την τεχνική της περίθλασης ακτίνων Χ (XRD).



ΙΠΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ ΠΤΟΛΕΜΑΙΔΑΣ



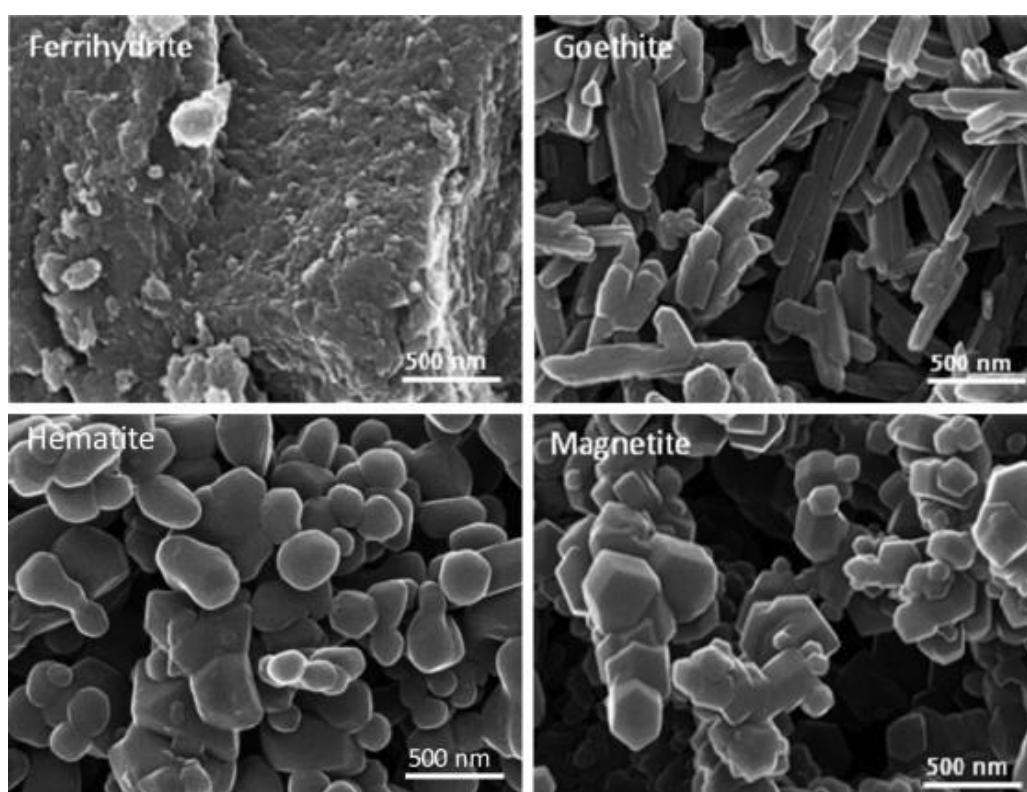
ΙΠΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗΣ

Σχήμα 6.5 : κρυσταλλογραφικές φάσεις XRD (αριστερά) και οπτική παρατήρηση με SEM (δεξιά) στις Ελληνικές ιπτάμενες τέφρες (Moutsatsou et al., 2010)

6.3 ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΟΞΕΙΔΙΩΝ ΣΙΔΗΡΟΥ

Τα οξείδια κυρίως του Σιδήρου προστίθενται στο σκυρόδεμα είτε κατά την παραγωγή του τσιμέντου, είτε ως αντικατάστατο των αδρανών (κυρίως της άμμου) ή του τσιμέντου. Ο λόγος της προσθήκης τους είναι η δημιουργία του τσιμέντου βαρέως τύπου ή η τροποποίηση των φυσικοχημικών και μηχανικών του ιδιοτήτων. Ακόμα γίνεται χρήση μεταλλικών ινών για την αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος.

Το σιδηρομετάλλευμα που χρησιμοποιείται προσδίδει στο τσιμέντο τη φαιά απόχρωση και παράγεται σε βιομηχανίες παραγωγής χάλυβα ως παραπροϊόν. Οι κυριότερες ορυκτολογικές φάσεις του παραπροϊόντος είναι ο βουσίτης, αιματίτης, μαγνητίτης και γκαιτίτης.



Σχήμα 6.6: Οπτική παρατήρηση διάφορων οξειδίων Σιδήρου σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM) (Chung et al., 2014)

Η προσθήκη οξειδίων του Σιδήρου αυξάνει το ποσοστό της φερριτικής φάσης στο τσιμέντο όπως υπολογίζεται βάση των εξισώσεων *Bogue* επιδρώντας στις ιδιότητες του σκυροδέματος. Η φερριτική φάση C_4AF επιδρά στην αύξηση των τελικών αντοχών του σκυροδέματος αφού είναι 6 φορές λιγότερο δραστικό από C_3A (Plowman and Cabrera, 1984).

Από προηγούμενες έρευνες έχει αποδειχθεί ότι:

- Η χρήση >5% Fe_2O_3 και χαμηλότερα ποσοστά 43 - 57% CaO στο τσιμέντο αυξάνει την υδραυλικότητα. Αυτού του τύπου τα τσιμέντα έχουν κανονικούς χρόνους πήξης και υψηλές πρώιμες αντοχές (Mehta, 1977).
- Από τα οξείδια που αναφέρθηκαν μόνο η προσθήκη γκαϊτίτη επιδρά στα ρεολογικά χαρακτηριστικά του τσιμέντου μειώνοντας το χρόνο πήξης (Chung et al., 2014).
- Δημιουργία θεικών ενώσεων όπως ζαροσίτη, αλουνίτη. Σημαντικό ρόλο στη δημιουργία θεικών ενώσεων διαδραματίζει το ποσοστό της γύψου στο τσιμέντο.
- Μείωση της κάθισης στο νωπό σκυρόδεμα καθώς αυξάνεται το ποσοστό προσθήκης του FeO (Ismail and Al-Hashmi, 2008) γεγονός που οφείλεται στο γωνιώδες σχήμα των κόκκων του προσθέτου που προσδίδει μικρή ρευστότητα στο νωπό σκυρόδεμα.
- Αύξηση της πυκνότητας του σκυροδέματος και αύξηση της θλιπτικής αντοχής και καμπτικής αντοχής (Ismail and Al-Hashmi, 2008).
- Η βέλτιστη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος με προσθήκη FeO ως αντικατάστατο της άμμου, επιτυγχάνεται σε ποσοστό 40% (Al-Otaibi, 2008).
- Η χρήση σιδηρούχας σκωρίας στο σκυρόδεμα μειώνει τη συστολή ξήρανσης.
- Η αύξηση του ποσοστού της φερριτικής φάσης έχει ως αποτέλεσμα την προστασία του οπλισμού εντός του σκυροδέματος σε θαλασσινό νερό από τη δέσμευση των ιόντων Cl^- .

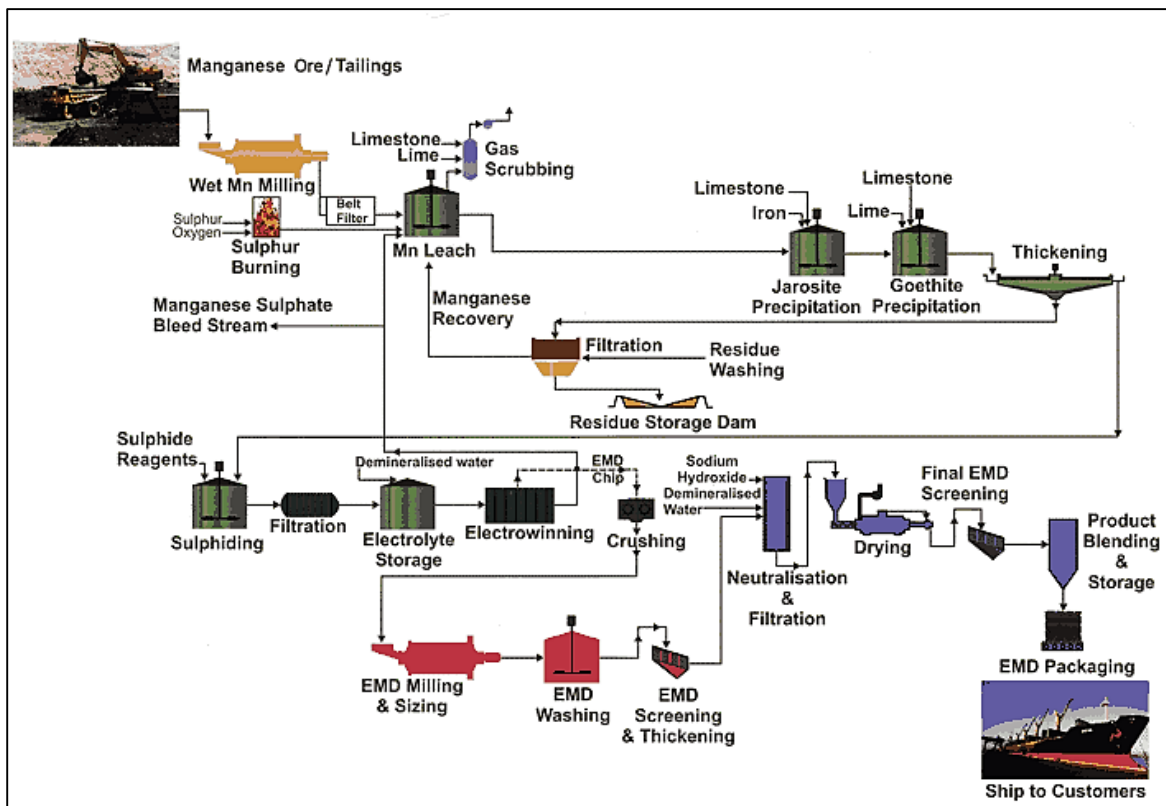
6.4 ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΟ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΜΑΓΓΑΝΙΟΥ (EMD)

Το Ηλεκτρολυτικό Διοξείδιο του Μαγγανίου (EMD) αποτελεί την πρώτη ύλη για την κατασκευή ξηρών στοιχείων. Στην Ελλάδα παράγεται από την εταιρία TOSOH HELLAS που εδρεύει στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης και είναι μία από τις δύο Ευρωπαϊκές βιομηχανίες παραγωγής EMD. Ως πρώτη ύλη χρησιμοποιείται το μέταλλευμα πυρολουσίτη (MnO_2) ενώ σε άλλες χώρες π.χ Κίνα, παράγεται από άλλα μαγγανιούχα ορυκτά όπως ροδοχρωσίτης (MnCO_3).

Κατά την παραγωγή του προϊόντος γίνεται έκπλυση και διήθηση του μεταλλεύματος με H_2SO_4 ώστε να απομακρυνθούν τα βαρέα μέταλλα, το ασβέστιο και ο σίδηρος. Η διάθεση αυτού του παραπροϊόντος στο περιβάλλον είναι δύσκολη και ακριβή υπόθεση για τη βιομηχανία. Βάση των παραπάνω, γίνεται αντιληπτό ότι η χρήση του συγκεκριμένου υλικού στο Σκυρόδεμα εφόσον δεν έχει δυσμενείς επιπτώσεις στην ανθεκτικότητα και στις μηχανικές ιδιότητες του οπλισμένου Σκυροδέματος μπορεί να συνεισφέρει στην αειφορία του περιβάλλοντος και κυρίως στην ποιότητα των

εδαφών και των υπόγειων υδάτων. Η παραγωγική διαδικασία παραγωγής του EMD φαίνεται στο σχήμα 6.7.

Σχήμα 6.7: Στάδια παραγωγής του Ηλεκτροχημικού Διοξειδίου του Μαγγανίου (EMD)



ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

7 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Αντικείμενο της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής είναι η πειραματική διερεύνηση ειδικών ορυκτών προσθέτων τα οποία αποτελούν παραπροϊόντα της χημικής βιομηχανίας για τη βελτίωση της ανθεκτικότητας του Σκυροδέματος και την προστασία του οπλισμού από τη διάβρωση.

Τα παραπροϊόντα τα οποία εξετάζονται ως μέρος αντικατάστασης του τσιμέντου είναι: α) από την παραγωγή Ηλεκτροχημικού Διοξειδίου του Μαγγανίου (EMD), β) δύο είδη Ιπτάμενης Τέφρας από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και γ) σιδηρούχος σκωρία ελαστρών (καλαμίνα) από παραγωγή δομικού χάλυβα. Συγκεκριμένα, ο σχεδιασμός της πειραματικής διαδικασίας περιλαμβάνει:

Το **χαρακτηρισμό του σκυροδέματος** ως προς τις **φυσικοχημικές** και **μηχανικές** ιδιότητες. Ειδικότερα μελετήθηκαν οκτώ (8) συνθέσεις τροποποιημένου σκυροδέματος οι οποίες προέκυψαν από την αντικατάσταση μέρους του τσιμέντου, από τα τέσσερα (4) εξεταζόμενα παραπροϊόντα σε δύο (2) ποσοστά 5% και 10% για το καθένα. Ο **φυσικοχημικός χαρακτηρισμός** περιλαμβάνει την μελέτη της απορροφητικότητας (*sorptivity*) του σκυροδέματος σε μεθανόλη (CH_3OH), το ανοικτό πορώδες του σκυροδέματος με την μέθοδο της απαέρωσης και το κλειστό πορώδες με την μέθοδο της ποροσιμετρίας υδραργύρου (MIP). Η ορυκτολογική σύνθεση και οι κρυσταλλικές φάσεις του προκύπτουν σκυροδέματος πριν και μετά την διάβρωση, διερευνήθηκε με περίθλαση ακτίνων Χ (*X-ray diffraction*) και ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (*Scanning Electron Microscope - SEM*) με μικροανάλυση δέσμης ηλεκτρονίων (*EDAX*). Τέλος, πραγματοποιήθηκε οπτικός έλεγχος με ψηφιακό στερεοσκόπιο (*Digital stereoscopy*). Οι **μηχανικές ιδιότητες** του σκυροδέματος που προσδιορίστηκαν ήταν: Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σε κυβικά δοκίμια (*compressive strength*), εφελκυσμός με διάρρηξη σε κυλινδρικά δοκίμια (*splitting strength - Brazilian test*), κάμψη σε πρισματικά δοκίμια – δοκούς (*flexural strength*), το στατικό μέτρο ελαστικότητας (*Static Young's module*) και το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (*Dynamic Young's module-Ultrasonic Pulse Velocity*). Τέλος, προσδιορίστηκε η πρόσφυση του οπλισμού στο σκυρόδεμα με την τεχνική της εξόλκευσης του χάλυβα (*pull – out test*).

Η δράση και η αποτελεσματικότητα των παραπροϊόντων ως προς την **ανθεκτικότητα και τη διάβρωση** του οπλισμένου σκυροδέματος εξετάστηκε σε περιβάλλον υψηλής συγκέντρωσης χλωριόντων (παραθαλάσσιο περιβάλλον έκθεσης κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος) και ως προς την ενανθράκωση (αστικό-βιομηχανικό περιβάλλον διάβρωσης). Ειδικότερα η αποτίμηση της διάβρωσης του οπλισμού και η ενανθράκωση του σκυροδέματος εκτιμήθηκαν με:

Φυσική έκθεση δοκιμών οπλισμένης τσιμεντοκονίας σε αστικό και παραθαλάσσιο – βιομηχανικό περιβάλλον (I. Βιομηχανική παραθαλάσσια περιοχή: Χαλυβουργική, II. Έκθεση στην ατμόσφαιρα υψηλής συγκέντρωσης σε διοξείδιο του άνθρακα CO₂ και απουσία χλωριόντων: Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου σε περιοχή πάνω από χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων),

Επιταχυνόμενες συνθήκες διάβρωσης δοκιμών οπλισμένης τσιμεντοκονίας/σκυροδέματος με: I. Μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β., II. Θάλαμος επιταχυνόμενης αλατονέφωσης, III. Θάλαμος επιταχυνόμενης ενανθράκωσης με CO₂ 10% κ.β, IV. Μερική εμβάπτιση σε διάλυμα Na₂SO₄ 5% κ.β.

Η αποτίμηση της ανθεκτικότητας όσον αφορά τη διάβρωση του οπλισμένου σκυροδέματος πραγματοποιήθηκε ηλεκτροχημικά με τον προσδιορισμό ηλεκτροχημικών παραμέτρων διάβρωσης. Συγκεκριμένα προσδιορίστηκε το δυναμικό διάβρωσης ανοικτού κυκλώματος συναρτήσει του χρόνου έκθεσης E_{corr} , η πυκνότητα του ρεύματος διάβρωσης i_{corr} , η αντίσταση πόλωσης R_p και ο ρυθμός διάβρωσης CR . Επιπρόσθετα έγινε σταθμικός προσδιορισμός της απώλειας μάζας των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος και εκτιμήθηκε ο ρυθμός διάβρωσης τους. Τέλος, πραγματοποιήθηκε μακροσκοπική και μικροσκοπική παρατήρηση των διαβρωμένων τσιμεντοκονιαμάτων σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) και ψηφιακό στερεοσκόπιο.

8 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΚΟΝΙΑΣ/ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

8.1 ΥΛΙΚΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Τσιμέντο

Το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή όλων των τσιμεντοκονιαμάτων ήταν τύπου *Portland CEM I 42.5N* ενώ για την κατασκευή δοκιμών σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν δύο τύπου τσιμέντου *CEM I 42.5N* και *CEM II A-M 42.5N*. Οι χημικές συστάσεις φαίνονται στον πίνακα 8.1 ενώ η ορυκτολογικές φάσεις των τσιμέντων υπολογίστηκαν σύμφωνα με τις εξισώσεις του *Bogue*.

Πίνακας 8.1: Χημική και ορυκτολογική σύσταση τσιμέντου *CEM I* και *CEM II A-M*

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΟΞΕΙΔΙΩΝ ΣΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟ (% κ.β τσιμέντου)										
Τύπος Οξειδίου	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	NaO	SO_3	Cl	LOI
<i>CEM I 42.5N</i>	19,50	4,80	3,60	61,50	3,40	0,69	0,22	2,60	0,01	3,50
<i>CEM II A-M 42.5N</i>	18,60	4,10	2,90	60,50	2,00	0,66	0,34	3,60	0,05	<8,50

ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ (%)				
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
<i>CEM I 42.5N</i>	57,4	12,6	6,6	11,0
<i>CEM II A-M 42.5N</i>	63,0	5,8	6,0	8,8

Ο πίνακας 8.2 εμφανίζει τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των τσιμέντων που χρησιμοποιήθηκαν σύμφωνα με το πρότυπο **EN 197-1**.

Πίνακας 8.2: Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των τσιμέντων *CEM I 42.5N* και *CEM II A-M 42.5N*

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ			
	2 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες
<i>CEM I 42.5N</i>	25 MPa	39 MPa	53 MPa
<i>CEM II A-M 42.5N</i>	23 MPa	38 MPa	51 MPa

ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ			
	Ειδική επιφάνεια	Αρχικός χρόνος	Τελικός χρόνος
<i>CEM I 42.5N</i>	400 m ² /kg	130 min	200 min
<i>CEM II A-M 42.5N</i>	400 m ² /kg	220 min	290 min

Νερό ανάμιξης

Το νερό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των δοκιμών όλων των πειραμάτων, προήλθε από το δίκτυο ύδρευσης του Ε.Μ.Π και από το δίκτυο ύδρευσης της Λευκωσίας. Το νερό ύδρευσης της Πολυτεχνειούπολης προέρχεται από γεώτρηση και είναι σύμφωνο με τις απαιτήσεις του προτύπου **ΕΛΟΤ 345** και του ευρωπαϊκού προτύπου **DIN EN 1008**. Οι χημικές αναλύσεις και οι φυσικοχημικές παράμετροι των υδάτων στην πόλη της Λευκωσίας (ΔΗΜΟΣ_ΛΑΚΑΤΑΜΙΑΣ, 2009) κ του Ε.Μ.Π (ΟΞΕΝΚΙΟΥΝ-ΠΕΤΡΟΠΟΥΛΟΥ, 2007) δίνονται στους πίνακες 8.3 και 8.4.

Πίνακας 8.3: Χημική σύσταση νερού μίξης των κονιαμάτων/σκυροδεμάτων

	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΙΟΝΤΩΝ (mg/l)								
	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	NH ₄
ΝΕΡΟ ΛΕΥΚΩΣΙΑΣ	177	65	<0,6	0,01	4	116	14	35	<0,06
ΝΕΡΟ ΕΜΠ	63	28,2	28	<0,02	1.6	37.8	33.4	98	<0,2

Πίνακας 8.4: Φυσικοχημικές παράμετροι νερού ανάμιξης των κονιαμάτων/σκυροδεμάτων

	Σκληρότητα CaCO ₃ (°dH)	Αγωγιμότητα μS/cm	pH
Νερό ΛΕΥΚΩΣΙΑΣ	8.2	834	8,4
Νερό ΕΜΠ	21.2	849	7.23

Αδρανή υλικά

Για την διεξαγωγή όλων των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ασβεστολιθική άμμος λατομείου. Στους πίνακες 8.5 και 8.6 φαίνεται η κοκκομετρική διαβάθμιση της άμμου κατά **EN 933-1** και η χημική της σύσταση αντίστοιχα.

Πίνακας 8.5: Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου σύμφωνα με το πρότυπο EN933-1

	Μάζα (g)	Ποσοστό (%)
d > 4mm	23	5,23
2mm < d < 4mm	106,08	24,13
1mm < d < 2mm	77,62	17,66
500μm < d < 1mm	56,47	12,85
250μm < d < 500μm	45,88	10,44
d < 250μm	130,55	29,7

Πίνακας 8.6: Χημική σύσταση ασβεστολιθικής άμμου για την κατασκευή δοκιμών τσιμεντοκονίας

Οξείδια	SiO ₂	Al ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl ⁻	LOI
Ποσοστό (%)	1,22	0,45	0,45	57,80	0,45	0,04	0,22	2,60	0,01	39,54

Χάλυβας

Για την κατασκευή των δοκιμών τσιμεντοκονίας χρησιμοποιήθηκε νευροχάλυβας τύπου **Tempcore B500C** κατά **ΕΛΟΤ 1421-3**, διαμέτρου 10 mm και ύψους 100 mm ενώ για την εξόλκευση του οπλισμού από τα δοκίμια σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε χάλυβας ύψους 500 mm και διαμέτρου 16 mm. Αυτός ο τύπος χάλυβα φέρει στην επιφάνεια του δύο σειρές νευρώσεων αντίθετης κλίσης. Στον πίνακα 8.7 φαίνεται η χημική σύσταση του χαλύβδινου οπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

Πίνακας 8.7: Χημική σύσταση χάλυβα Tempcore B500C

Fe	C	S	P	N	Ceq
99.17%	0.22%	0.050%	0.050%	0.012%	0.50%

Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται τα χαρακτηριστικά που εκφράζουν την ολκιμότητα των χαλύβων κατηγορίας B500C που παράγει η εταιρία ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΚΗ Α.Ε καθώς και αυτά που καθορίζονται από το πρότυπο **ΕΛΟΤ 1421-3**.

Πίνακας 8.8: Χαρακτηριστικά ολκιμότητας χάλυβα B500C κατά ΕΛΟΤ 1421-3 και αυτού που παράγει η ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΚΗ Α.Ε

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ μέγεθος	B500C (ΕΛΟΤ 1421-3)	B500C (ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΚΗ Α.Ε)
Όριο διαρροής, f_y (MPa)	≥500	≥500
Εφελκυστική αντοχή, f_t (MPa)	-	≥550
Επιμήκυνση μετά τη θραύση, ε₅ (%)	-	≥20
Ομοιόμορφη παραμόρφωση, ε_{u,k} (%)	≥7,5	≥8,0
f_{y,act}/f_{y,nom}	≤1,25	≤1,25

8.2 ΟΡΥΚΤΑ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΣΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα βιομηχανικά παραπροϊόντα τα οποία είναι:

▪ **Παραπροϊόν από την παραγωγή Ηλεκτροχημικού Διοξειδίου Μαγγανίου (κωδ. EMDW)**

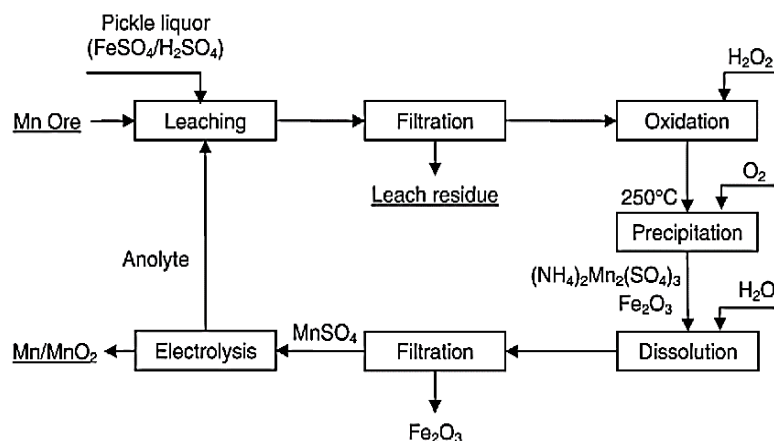
Το διοξείδιο του μαγγανίου συναντάται στη φύση με τη μορφή του ορυκτού πυρολουσίτη το οποίο κρυσταλλώνεται στο τετραγωνικό σύστημα. Το μαγγάνιο συναντάται στη φύση με τη μορφή πολλών ορυκτών όπως ροδοχρωσίτη ($MnCO_3$), ροδονίτη ($MnSiO_3$), μαύρο μαγγανίτη ($MnO(OH)$), και αλαβανδίτη (MnS) (Calvert, 2004). Τα μεγαλύτερα κοιτάσματα μεταλλεύματος μαγγανίου βρίσκονται στα κράτη της πρώην Ε.Σ.Σ.Δ, στη Βραζιλία, Αυστραλία Γκαμπόν και την Ινδία, με τη Ρωσία και τη Ν. Αφρική να κατέχουν το 85% της παγκόσμιας παραγωγής (Zhang and Cheng, 2007).

Το Ηλεκτροχημικό Διοξείδιο Μαγγανίου (E.M.D) αποτελεί το γ - MnO_2 , κρυσταλλώνεται στο ορθορομβικό κρυσταλλικό σύστημα και παράγεται στην Ελλάδα από την εταιρία **Tosoh Hellas A.I.C** με πρώτη ύλη τον πυρολουσίτη. Εκτός από τον πυρολουσίτη, το Ηλεκτρολυτικό Διοξείδιο του Μαγγανίου παράγεται και από ροδοχρωσίτη ($MnCO_3$) σε περιοχές όπου αφθονεί όπως η Κίνα, (Qu, 2006).

Η παραγωγή του E.M.D περιλαμβάνει τα εξής στάδια (Dose and Donne, 2013):

- Φρεζάρισμα μαγγανίου και ασβεστόλιθου,
- Θέρμανση στους $800^\circ C - 900^\circ C$,
- Διάλυση σε θερμό H_2SO_4 ώστε να δημιουργηθεί Θεϊκό Μαγγάνιο,
- Αφαίρεση των ακαθαρσιών, κυρίως του καλίου και σιδήρου από το διάλυμα.
- Απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων,
- Το τελικό προϊόν πλένεται, αλέθεται, ξηραίνεται και συσκευάζεται ως λεπτή σκόνη.

Αναλυτικά τα στάδια παραγωγής του Ηλεκτρολυτικού Διοξειδίου του Μαγγανίου παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.1.



Σχήμα 8.1: Στάδια παραγωγής ηλεκτροχημικού Διοξειδίου Μαγγανίου

Ο πίνακας 8.9 δίνει τη χημική σύσταση του Ηλεκτροχημικού MnO_2 (EMD) και του παραπροϊόντος (EMDW) που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Τα μέταλλα που δίνονται βρίσκονται στο απόβλητο με τη μορφή οξειδίων και θειικών αλάτων.

Πίνακας 8.9: Ποσοστιαία χημική σύσταση EMD και του αποβλήτου EMDW

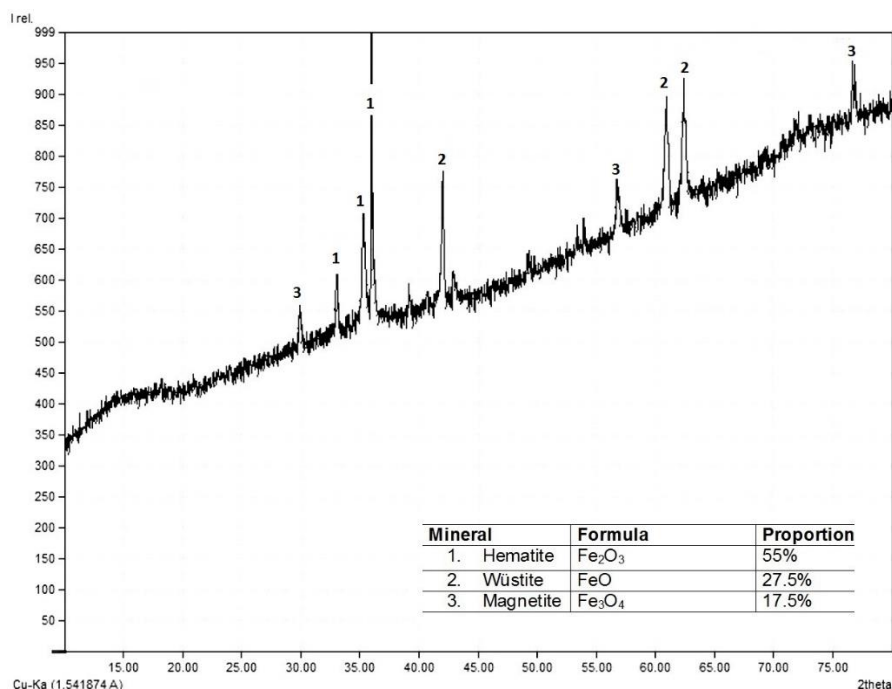
	MnO_2	H_2O	Fe	Ca	Cu	Pb	K	Na	Mg	SO_4^{2-}	$Zn+Co+Ni$
Προϊόν EMD	93.0	5.0	0.004	0.03	0.0005	0.0005	0.05	0.25	0.005	1.66	
Παραπροϊόν EMDW	-	-	9.8	15.0	0.082	0.07	0.65	0.23	0.37	Μη υπολογ.	≈3%

Το Ηλεκτρολυτικό Διοξείδιο του Μαγγανίου (EMD) χρησιμοποιείται ως υλικό στην κάθοδο ξηρών στοιχείων όπως σε αλκαλικές μπαταρίες, μπαταρίες Zn-C, επαναφορτιζόμενες αλκαλικές μπαταρίες κλπ. Μεταξύ των διαφόρων μορφών που εμφανίζεται το μαγγάνιο ο γ-τύπος είναι ευρύτατα διαδεδομένος στη χρήση των ξηρών στοιχείων εξαιτίας της καλής απόδοσης του σε ένα μεγάλο φάσμα θερμοκρασιών, τη μεγάλη διάρκεια ζωής και το χαμηλό κόστος παραγωγής. Το Διοξείδιο του μαγγανίου μπορεί να παρασκευασθεί τόσο ηλεκτρολυτικά όσο και χημικά με την πρώτη μέθοδο να θεωρείται ανώτερη από τη δεύτερη (J. P. Panda, 2009).

Κατά την παραγωγή του EMD πραγματοποιείται έκπλυση με θειικό οξύ και φιλτράρισμα σε δύο (2) στάδια ώστε να απομακρυνθούν τα βαρέα μέταλλα με μορφή θειικών αλάτων. Το παραπροϊόν που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων αποτελείται κυρίως από θειικά άλατα και οξείδια Ca & Fe, βαρέα μέταλλα και μικρές ποσότητες αλουμίτη και ζαροσίτη.

▪ **Σιδηρούχα σκωρία ελάστρων (καλαμίνα) από την παραγωγή δομικού χάλυβα (κωδ. kal)**

Η καλαμίνα που χρησιμοποιήθηκε αποτελεί παραπροϊόν της επεξεργασίας σιδήρου για την παραγωγή δομικού χάλυβα από την εταιρία ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΚΗ Α.Ε και αποτελείται από οξειδία του σιδήρου. Συγκεκριμένα, παράγεται από την απότομη επαφή του χάλυβα με το νερό στο στάδιο θερμής έλασης. Η απότομη αυτή οξείδωση του χάλυβα δημιουργεί ένα λεπτό στρώμα οξειδίου του σιδήρου το οποίο αποκολλάται και συλλέγεται προς αξιοποίηση αδρανούς υλικού. Η κοκκομετρία του κυμαίνεται από 10 - 15μm. Ορυκτολογικά, η καλαμίνα που χρησιμοποιήθηκε στη Διδακτορική Διατριβή αποτελείται από Βουσίτη (FeO), αιματίτη (Fe_2O_3) και μαγνητίτη (Fe_3O_4). Το σχήμα 8.2 δείχνει τις κρυσταλλικές φάσεις που βρέθηκαν με την τεχνική της περίθλαση ακτίνων Χ.



Σχήμα 8.2: Ακτινογράφημα της καλαμίνας με περίθλαση ακτίνων Χ (XRD)

▪ **Ιπτάμενη Τέφρα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (υψηλής συγκεντρώσεως αργλικών ορυκτών), (κωδ. FAGER)**

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε Ιπτάμενη Τέφρα από βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τη Γερμανία. Η ιπτάμενη τέφρα που χρησιμοποιήθηκε είναι υψηλού Ca (τύπου C) κατά **ASTM C-618**. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η εν λόγω τέφρα εμπεριέχει σημαντικά ποσοστά αργλικών ορυκτών στα οποία οφείλεται και η διόγκωση των δοκιμών σκυροδέματος όπως θα αναπτυχθεί σε επόμενο κεφάλαιο. Η αντικατάσταση του τιμέντου από τη συγκεκριμένη Ι.Τ έγινε σε ποσοστά 5% & 10% κ.β τιμέντου.

Η χημική σύσταση της Ι.Τ σε ποσοστά οξειδίων δίνεται στον πίνακα 8.10.

Πίνακας 8.10: Χημική σύσταση σε οξείδια % της Ιπτάμενης Τέφρας από τη Γερμανία

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	LOI	IR	CaO _f
37.2	16.80	6.61	27.21	3.24	1.25	0.49	5.41	1.79	27.93	7.62

▪ **Ιπτάμενη Τέφρα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (προέλευσης Πτολεμαΐδας), (κωδ. FAPTOL)**

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε επίσης Ιπτάμενη τέφρα τύπου C σύμφωνα με την κατάταξη του προτύπου **ASTM C618** από την Πτολεμαΐδα, αντικαθιστώντας το τσιμέντο σε ποσοστά 5% και 10%.

Η χημική σύσταση της εν λόγω Ι.Τ φαίνεται στον πίνακα 8.11.

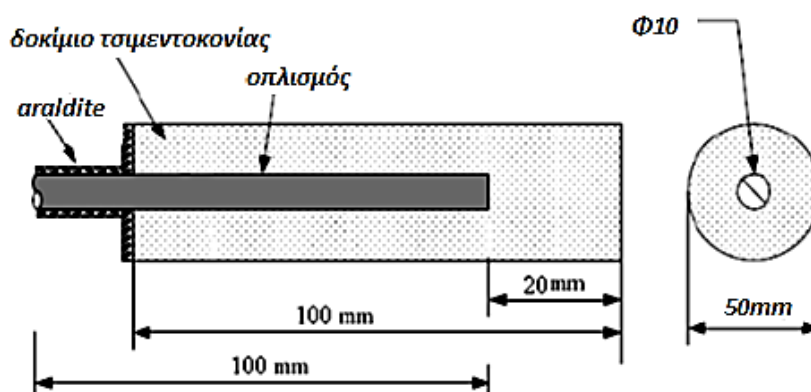
Πίνακας 8.11: Χημική σύσταση σε οξείδια % της ιπτάμενης τέφρας από την Πτολεμαΐδα

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	LOI	IR	CaO _f
27.05	11.44	4.84	37.3	3.9	0.66	0.33	7.56	3.45	27.93	11.5

8.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΚΟΝΙΑΣ ΚΑΙ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

α) Δοκίμια τσιμεντοκονίας

Κατασκευάστηκαν δοκίμια σπλισμένης τσιμεντοκονίας ύψους 100 mm και διαμέτρου $\varnothing 50$ mm στα οποία τοποθετήθηκε χαλύβδινος σπλισμός τύπου *Tempcore B500C* ύψους 100 mm και διαμέτρου 10 mm. Χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο Portland CEM I 42.5N, ασβεστολιθική άμμος και νερό δικτύου ΕΜΠ. Σε όλες τις κατηγορίες δοκιμών χρησιμοποιήθηκε σταθερός λόγος τσιμέντο:νερό:άμμος=1:3:0.65. Η μορφή και οι διαστάσεις των δοκιμών φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 8.3: Μορφή και διαστάσεις δοκιμών τσιμεντοκονίας

Για τη μελέτη της ανθεκτικότητας έναντι στα ιόντα χλωρίου και το διοξείδιο του άνθρακα παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών τρεις (3) σειρές δοκιμών για κάθε παραπροϊόν που χρησιμοποιήθηκε. Μία σειρά δοκιμών στα οποία έγινε αντικατάσταση του τσιμέντου από ορυκτό πρόσθετο σε ποσοστό 5% κ.β, μία με αντικατάσταση τσιμέντου κατά 10% κ.β, ενώ για λόγους σύγκρισης παρασκευάστηκε μια σειρά δοκιμών αναφοράς χωρίς πρόσθετο.

Η διαδικασία σκυροδέτησης περιλάμβανε τα παρακάτω στάδια:

- **Το στάδιο της καθαρισμού χαλύβων.** Σε αυτό το στάδιο οι χάλυβες που επρόκειτο να σκυροδετηθούν καθαρίστηκαν σύμφωνα με το πρότυπο **ISO/DIS 8407.3** με διάλυμα υδροχλωρικού οξέος με αναστολέα για χρονικό διάστημα 20 λεπτών με σκοπό την απομάκρυνση των οξειδίων στην επιφάνεια των χαλύβων. Στη συνέχεια έγινε έκπλυση με νερό δικτύου και απιονισμένο νερό και εμβάπτιση σε ακετόνη ώστε να απομακρυνθούν οι λιπαρές ουσίες και τα λάδια από την επιφάνεια των χαλύβων. Οι οπλισμοί παρέμειναν σε ξηραντήρα για την αποφυγή διάβρωσης από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Τέλος, οι χάλυβες ζυγίστηκαν σε ηλεκτρονικό ζυγό τεσσάρων δεκαδικών ψηφίων (με ακρίβεια 0,1 mg). Ακολούθησε κωδικοποίηση των χαλύβων και σύνδεση τους με αγώγιμο χάλκινο σύρμα έτσι ώστε να διασφαλιστεί η ηλεκτρική συνέχεια των οπλισμών.
- **Το στάδιο της σκυροδέτησης των δοκιμών.** Για την παρασκευή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικές μήτρες διαστάσεων: ύψους 100 mm και διαμέτρου $\varnothing 50$ mm. Τα δοκίμια οπλίστηκαν ομοαξονικά με χάλυβα τύπου *Tempcore B500C* ύψους 100 mm και διαμέτρου $\varnothing 10$ mm. Κατά τη διαδικασία του καλουπώματος πραγματοποιήθηκε δόνηση σε τράπεζα δόνησης *TECHNOTEST AT 224/HS* συχνότητας 50 Hz (3000 ταλαντώσεις ανά λεπτό) ώστε να μειωθεί ο περιεχόμενος αέρας του μίγματος και το πορώδες σε ποσοστό 1%. Ο χάλυβας απείχε 20 mm από τον βάση του καλουπιού ώστε να μην εκτίθεται άμεσα στις συνθήκες διάβρωσης. Στη συνέχεια η άνω επιφάνεια των δοκιμών και το προεξέχον τμήμα του οπλισμού καλύφθηκαν με εποξική ρητίνη 2 συστατικών *Araldite* για την αποφυγή της ατμοσφαιρικής διάβρωσης. Η Συντήρηση των δοκιμών έγινε για επτά ημέρες σε θάλαμο συντήρησης σχετικής υγρασίας $RH=98\% \pm 1$ και θερμοκρασίας $T=25 \pm 1^\circ C$ για την αποφυγή δημιουργίας ρωγμών λόγω έκλυσης θερμότητας.

b) Δοκίμια σκυροδέματος

Η μέτρησης των μηχανικών αντοχών του σκυροδέματος έγινε σε δοκίμια κυβικά ακμής 100 mm και 150 mm, κυλινδρικά ύψους 300 mm και $\varnothing 150$ mm,

κυλινδρικά ύψους 200 mm και \varnothing 100 mm και πρισματικά τετραγωνικής διατομής 100 mm και μήκους 100 cm.

Τα καλούπια στο σύνολο τους ήταν πλαστικά και λιπάνθηκαν εσωτερικά με κατάλληλο λιπαντικό ώστε να είναι ευκολότερη η εξαγωγή των δοκιμών. Ο τρόπος σκυροδέτησης και το είδος των καλουπιών ήταν σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM C31/C31M-12**. Πριν τη σκυροδέτηση μετρήθηκε η κάθιση σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM C143** και στη συνέχεια ακολούθησε δόνηση σε τράπεζα δόνησης συχνότητας 50Hz για 20sec. Τα δοκίμια ξεκαλουπώθηκαν μετά από 24 ώρες και παρέμειναν σε δεξαμενή συντήρησης για 7 ημέρες.

Οι μηχανικές αντοχές του σκυροδέματος μετρήθηκαν στο εργαστήριο οπλισμένου σκυροδέματος της εταιρίας TITAN A.E και στο εργαστήριο οπλισμένου σκυροδέματος της σχολής Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Κύπρου.

Σχεδιάστηκε σκυρόδεμα C20/25 χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικά είδη τσιμέντου **CEM I 42.5N** και **CEM II A-M 42.5N**. Ο σχεδιασμός των μιγμάτων και οι ποσότητες των υλικών δίνονται στους πίνακες 8.12 και 8.13.

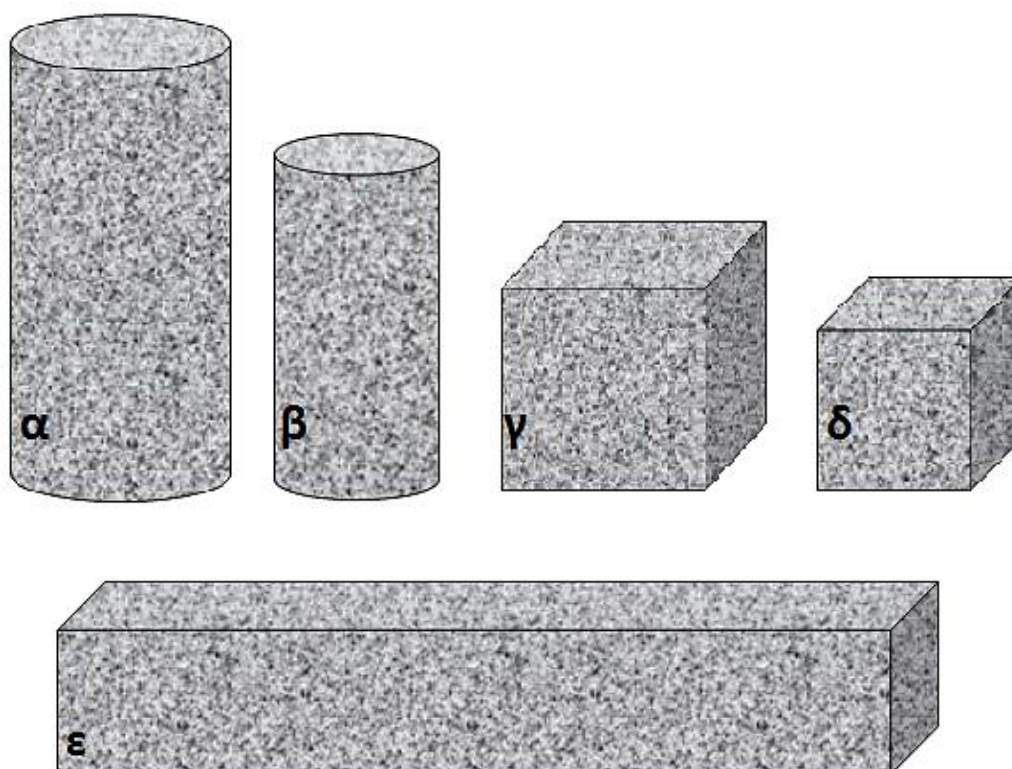
Πίνακας 8.12: Σχεδιασμός μίγματος για σκυρόδεμα C20/25 και CEM I 42.5N

	ποσότητες υλικών (Kg/m ³)		
	αναφοράς	5% πρόσθετο	10% πρόσθετο
<u>C 20/25, W/C=0,57</u>			
Άμμος	713,5	713,5	713,5
Γαρμπίλι	624,3	624,3	624,3
Χαλίκι	446	446	446
Νερό	200,1	200,1	200,1
Τσιμέντο	351	333,5	315,9
Πρόσθετο	0	17,6	35,1

Πίνακας 8.13: Σχεδιασμός μίγματος για σκυρόδεμα C20/25 και CEM II A-M 42.5N

	ποσότητες υλικών (Kg/m ³)		
	αναφοράς	5% πρόσθετο	10% πρόσθετο
<u>C 20/25, W/C=0,65</u>			
Άμμος	715	715	715

Γαρμπίλι	611	611	611
Χαλίκι	433	433	433
Νερό	244	244	244
Τσιμέντο	376	357,2	338,4
Πρόσθετο	0	18,8	37,6



Σχήμα 8.4: Μορφή και διαστάσεις δοκιμών σκυροδέματος

- α. δοκίμιο για splitting test ($h=300$ mm, $\varnothing 150$ mm)
- β. δοκίμιο για static modulus of elasticity ($h=200$ mm, $\varnothing 100$ mm),
- γ. δοκίμιο για compressive strength ($150 \times 150 \times 150$ mm³),
- δ. δοκίμιο για compressive strength, ultrasonic pulse velocity, open porosity, capillary absorption ($100 \times 100 \times 100$ mm³),
- ε. Πρισματική δοκός για flexural strength (μήκος 100 cm, διατομή 100 mm).

9 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

9.1 ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

9.1.1 Μέτρηση Δυναμικού Διάβρωσης E_{corr}

Το δυναμικό διάβρωσης E_{corr} ή δυναμικό ανοικτού κυκλώματος είναι το δυναμικό που αποκτά αυθόρμητα ένα μέταλλο όταν εκτεθεί στο περιβάλλον, μετράται ως προς ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς ενώ παράλληλα είναι απαραίτητη η απουσία ρεύματος διότι σε αντίθετη περίπτωση θα έδινε μια επιπλέον διαφορά δυναμικού η οποία θα προστίθετο στη μετρούμενη τιμή (BROOMFIELD, 1997).

Η μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την κατάσταση που βρίσκεται ο οπλισμός μέσα στο σκυρόδεμα. Έτσι, μετατόπιση του δυναμικού προς ηλεκτροθετικές τιμές σημαίνει ότι ο χάλυβας προστατεύεται και δείχνει προδιάθεση μειωμένης διάβρωσης ενώ η μετατόπιση του δυναμικού διάβρωσης προς πιο ηλεκτραρνητικές τιμές δηλώνει προδιάθεση αυξημένης διάβρωσης δηλαδή ότι ο χάλυβας βρίσκεται σε ενεργή κατάσταση.

Ο παρακάτω πίνακας δείχνει την κατάσταση του οπλισμού σε σχέση με το δυναμικό διάβρωσης σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM C876/87**.

Πίνακας 9.1: Πιθανότητα διάβρωσης για διάφορα είδη ηλεκτροδίων (Broomfield, 1997)

Ηλεκτρόδιο Cu/CuSO ₄	Ag/AgCl C _{KCl} =4M	Πρότυπο ηλεκτρόδιο υδρογόνου	Ηλεκτρόδιο καλομέλανα (SCE)	Πιθανότητα διάβρωσης
> -200 mV	> -106 mV	> +116 mV	> -126 mV	Χαμηλή (10% πιθανότητα διάβρωσης)
-200 ως -350 mV	-106 ως -256 mV	+116 mV ως -34mV	-126 mV ως -276 mV	Ενδιάμεση πιθανότητα διάβρωσης
< -350 mV	< -256 mV	< -34 mV	< -276 mV	Υψηλή (<90% πιθανότητα διάβρωσης)
< -500 mV	< -406 mV	< -184 mV	< -426 mV	Έντονη διάβρωση

Η μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ενός βολτόμετρου και ενός ηλεκτροδίου αναφοράς SCE (καλομέλανας). Το ηλεκτρόδιο αναφοράς συνδέεται με ψηφιακό πολύμετρο υψηλής εσωτερικής αντίστασης του

οποίου ο θετικός πόλος συνδέεται με τον οπλισμό. η καλή ηλεκτρολυτική επαφή του ηλεκτροδίου αναφοράς με το σκυρόδεμα επιτυγχάνεται με ένα βρεγμένο σπόγγο ο οποίος μπαίνει στη διεπιφάνεια μεταξύ του σκυροδέματος και του ηλεκτροδίου αναφοράς. και βυθιζόταν μέσα στο διάλυμα που βρισκόταν ο χάλυβας ενώ στον αρνητικό πόλο συνδεόταν ο οπλισμός μέσω ειδικού καλωδίου. Μετρώντας και καταγράφοντας το δυναμικό σε όλη την κατασκευή δημιουργούνται οι χάρτες δυναμικών των ενεργών και παθητικών περιοχών στην κατασκευή.

9.1.2 Ηλεκτροχημικός προσδιορισμός του ρυθμού διάβρωσης με τη μέθοδο της Γραμμικής Πόλωσης (LPR)

Η τεχνική γραμμικής πόλωσης είναι μια καταστροφική μέθοδος και συνίσταται στη σάρωση ± 25 mV γύρω από το δυναμικό ισορροπίας και καταγραφή του αντίστοιχου ρεύματος. Είναι μία πολύ γρήγορη τεχνική προσδιορισμού της ταχύτητας διάβρωσης και επειδή το ρεύμα που εφαρμόζεται είναι μικρό έχει το πλεονέκτημα ότι η επιφάνεια του δοκιμίου δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα και έτσι το ίδιο δοκίμιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλες μετρήσεις.

Η μέτρηση του R_p γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM G59**. 'Standard Test method for conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements' vol.03.02.

Για την διεξαγωγή των ηλεκτροχημικών μετρήσεων η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε περιλάμβανε Ποτενσιοστάτη / Γαλβανοστάτη της *E.G & Model 263* συνδεδεμένο με υπολογιστή για την καταγραφή των πειραματικών δεδομένων. Για την επεξεργασία των ηλεκτροχημικών αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε λογισμικό *Softcorr III* της εταιρίας *E.G & G Princeton Research*. Οι ηλεκτροχημικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε πρότυπο κελί ηλεκτρόλυσης σε συνθήκες περιβάλλοντος. Η διάταξη ήταν τριών ηλεκτροδίων περιλάμβανε ως ηλεκτρόδιο αναφοράς ηλεκτρόδιο κεκορεσμένου καλομέλανα SCE, το ηλεκτρόδιο εργασίας ήταν ο εγκιβωτισμένος οπλισμός, ενώ ως βοηθητικό ηλεκτρόδιο χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρόδιο άνθρακα. Τα δοκίμια εμβαπτίστηκαν πλήρως σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β. και ο ηλεκτρολύτης ήταν το διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος. Το βήμα σάρωσης του δυναμικού ήταν 0.5 mV/s.

9.2 ΣΤΑΘΜΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΜΑΖΑΣ

Η μέτρηση της απώλειας μάζας των οπλισμών, ανήκει στις καταστροφικές μεθόδους διότι απαιτείται καταστροφή του δοκιμίου. Για τη μέτρηση της απώλειας μάζας

απαιτείται σπάσιμο των δοκιμίων, μετά από ένα σημαντικό χρονικό διάστημα έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον.

Για την εκτίμηση της διάβρωσης του χάλυβα γίνονται μετρήσεις μάζας των οπλισμών του χάλυβα πριν και μετά την έκθεση τους στο διαβρωτικό περιβάλλον και κατόπιν υπολογισμός της διαφοράς μάζας. Η τελική μάζα των οπλισμών υπολογίζεται αφού πρώτα οι οπλισμοί καθαριστούν για την απομάκρυνση των οξειδίων και της ρητίνης που καλύπτει την άνω επιφάνεια των οπλισμών. Η διαφορά μάζας προκύπτει από την αρχική μείον την τελική μάζα του κάθε οπλισμού. Η εκτίμηση της διάβρωσης δίνεται με τον υπολογισμό του ποσοστού επί της εκατό κατά βάρος μεταβολής της μάζας των οπλισμών, καθώς επίσης και από τον υπολογισμό του ρυθμού διάβρωσης.

Το ποσοστό επί της εκατό της μεταβολής του βάρους των οπλισμών δίνεται από την παρακάτω μαθηματική σχέση:

$$\Delta B\% = \frac{m_{\text{αρχ}} - m_{\text{τελ}}}{m_{\text{αρχ}}} \times 100\%$$

$m_{\text{αρχ}}$: Η μάζα των οπλισμών πριν την έκθεση στο διαβρωτικό περιβάλλον

$m_{\text{τελ}}$: Η μάζα των οπλισμών μετά από έκθεση στο διαβρωτικό περιβάλλον

Ο ρυθμός διάβρωσης του οπλισμού δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$CR = \frac{8,76 \times 10^7 \times W}{A \times T \times D}$$

CR : Ρυθμός διάβρωσης (Corrosion Rate)

W : Απώλεια μάζας του οπλισμού σε g ($W = m_{\text{αρχ}} - m_{\text{τελ}}$)

A : Η επιφάνεια του οπλισμού σε cm^2 ($A = 33cm^2$)

T : Χρόνος έκθεσης των δοκιμίων σε h

D : Πυκνότητα χάλυβα ($\rho = 7,8gr/cm^3$)

9.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΒΑΘΟΥΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Το βάθος ενανθράκωσης μετρήθηκε σε όλες τις κατηγορίες και σε κάθε περιβάλλον έκθεσης σύμφωνα με τη μέθοδο **RILEM CPC-18**. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου, το δοκίμιο σπάει αξονικά και ψεκάζεται με διάλυμα δείκτη φαινολοφθαλείνης, ο οποίος παίρνει ιώδες χρώμα στις περιοχές του δοκιμίου που δεν έχουν ενανθρακωθεί ($pH \approx 12-13$) και άχρωμο όταν η αλκαλικότητα του σκυροδέματος είναι κάτω από 9 ($pH \leq 9$). Για την παρασκευή του διαλύματος φαινολοφθαλείνης συνήθως γίνεται μίξη 1g δείκτη σε 100ml απιονισμένου νερού. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου πρέπει να απομακρύνεται η παιπάλη που δημιουργείται από την κοπή του δοκιμίου και μπορεί

να μας δώσει λανθασμένα αποτελέσματα ενώ σε περίπτωση που το σκυρόδεμα είναι ξηρό γίνεται διαβροχή του ώστε να είναι πιο έντονη η χρωματική αλλαγή (BROOMFIELD, 1997).

Όταν είναι γνωστός ο χρόνος έκθεσης σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον και το βάθος ενανθράκωσης του σκυροδέματος μπορεί να υπολογιστεί ο συντελεστής K σύμφωνα με τη σχέση: $D = K * \sqrt{t}$ όπου D το βάθος ενανθράκωσης σε mm, t ο χρόνος έκθεσης σε χρόνια και K ο συντελεστής διάχυσης CO_2 σε $mm/yr^{1/2}$ (Neville, 2006).

9.4 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΛΙΚΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΧΛΩΡΙΟΥ

Στα δοκίμια τα οποία εμβαπτίστηκαν σε διάλυμα $NaCl$ (εργαστηριακά ή σε επιταχυνόμενες συνθήκες) είτε εκτέθηκαν σε παραθαλάσσιο περιβάλλον υπολογίστηκε η συγκέντρωση των ιόντων Cl^- με τη μέθοδο Mohr.

Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μέθοδο ζυγίζονται 5g τσιμεντοκονίας στο ζυγό ακριβείας και τοποθετούνται μέσα σε ογκομετρική φιάλη των 250 ml προσθέτοντας 50ml HNO_3 1N. Στη συνέχεια γίνεται συμπλήρωση με απιονισμένο με ταυτόχρονη ανάδευση. 10 ml από αυτό το διάλυμα μπαίνουν σε κωνική φιάλη μαζί με 90 ml απιονισμένο νερό. Το επόμενο βήμα είναι η εξουδετέρωση με $NaOH$ 0,1 N και η ρίψη 1 ml χρωμικού καλίου. Το τελευταίο βήμα είναι η τιτλοδότηση με $AgNO_3$ 0,01 N μέχρι αλλαγή χρώματος (UNIVERSITY OF CANTEBURY, 2012).

Η μέθοδος βασίζεται στο ότι τα γραμμομόρια του Νιτρικού Αργύρου που χρειάζονται για την τιτλοδότηση είναι ίσα με αυτά των ιόντων χλωρίου.

Η συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου προκύπτει από τον τύπο:

$$C_{Cl} (mgr/lit) = \frac{V_{AgNO_3} \times C_{AgNO_3} \times A_{B_{Cl}} \times 1000}{V_{\delta/τος}} \quad (3)$$

Όπου: V_{AgNO_3} ο όγκος για την τιτλοδότηση, $V_{\delta/τος}=100ml$, $C_{AgNO_3}= 0.01mole/l$, $A_{B_{Cl}}=35,45$.

9.5 ΟΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

9.5.1 Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM)

Η Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης είναι μια από τις πιο νέες τεχνικές ανάλυσης της μικροδομής μεγάλου φάσματος υλικών. Λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο όπως ένα οπτικό μικροσκόπιο με τη διαφορά ότι αντί για φως, προσπίπτει στην επιφάνεια του δείγματος μια δέσμη ηλεκτρονίων. Από την αλληλεπίδραση των ηλεκτρονίων με την επιφάνεια προκύπτουν σημαντικά συμπεράσματα για τη μορφολογία και τη σύσταση

των υλικών. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης έχει σημαντικά πλεονεκτήματα της σε σχέση με την οπτική όπως είναι η τρισδιάστατη και η εις βάθος απεικόνιση των στερεών δειγμάτων και η μεγάλη ανάλυση που φθάνει μέχρι το 1nm-5nm.

Η δέσμη των ηλεκτρονίων συγκρούεται με την επιφάνεια του δείγματος (ελαστικά ή μη ελαστικά) και εκπέμπονται κυρίως δευτερογενή (*secondary*) ηλεκτρόνια, οπισθοσκεδαζόμενα (*backscattered*) ηλεκτρόνια καθώς και ακτίνες Χ. Η ένταση των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Έτσι το SEM δίνει πληροφορίες που αφορούν κυρίως στη μορφολογία και στη σύσταση της επιφάνειας.

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης αποτελείται από σύστημα παραγωγής δέσμης ηλεκτρονίων, σύστημα κατεύθυνσης της δέσμης ηλεκτρονίων, σύστημα πληροφοριών το οποίο περιλαμβάνει τους αισθητήρες που δέχονται τα διάφορα σήματα που εκπέμπονται ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της δέσμης ηλεκτρονίων με το δείγμα, σύστημα κενού, καθώς και το σύστημα μεγέθυνσης, παρουσίασης και καταγραφής αποτελεσμάτων,

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο διαθέτει επίσης σύστημα ανίχνευσης της διασποράς των ενεργειών των ακτίνων Χ που δημιουργούνται στην επιφάνεια από την προσπίπτουσα δέσμη με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η ημιποσοτική στοιχειακή ανάλυση του υλικού (ΚΟΥΛΟΥΜΠΗ et al., 2008).

9.5.2 Στερεοσκοπία

Το στερεοσκόπιο βρίσκει εφαρμογές σε περιπτώσεις όπου χρειάζεται να γίνει παρατήρηση της μορφολογίας ενός υλικού. Με αυτό το όργανο επιτυγχάνεται στερεοσκοπική εικόνα του δείγματος υπό διαφορετική γωνία. Τα στερεοσκόπια είτε έχουν αντικειμενικούς φακούς σταθερής εστιακής απόστασης είτε μεταβαλλόμενης. Συνήθως τα όργανα αυτά μπορούν να μεγεθύνουν μέχρι x80 ενώ το παρασκεύασμα δε χρειάζεται καμία προετοιμασία. Για την παρατήρηση του παρασκευάσματος απαιτείται φωτισμός με λαμπτήρα αλογόνου ή οπτικές ίνες ενώ τα πιο σύγχρονα στερεοσκόπια διαθέτουν και σύστημα φωτισμού με υπεριώδη ακτινοβολία.

Για την οπτική παρατήρηση των δοκιμών σκυροδέματος, οπλισμών και υλικών (αδρανή, ορυκτά πρόσθετα), χρησιμοποιήθηκε εργαστηριακό μικροσκόπιο μοντέλο **LEICA E24** το οποίο έχει δυνατότητα αντικατάστασης των προσοφθάλμιων φακών, ενώ δίνει μεγεθύνσεις από x8 και x35.

9.6 ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ (X-Ray Diffraction)

Η μέθοδος της περίθλασης των ακτίνων Χ (XRD) χρησιμοποιείται για την ταυτοποίηση των κρυσταλλικών ενώσεων που εμπεριέχονται στα υπό εξέταση δείγματα. Οι αποστάσεις μεταξύ των κρυσταλλικών επιπέδων, το είδος των ατόμων και η κατανομή τους στα κρυσταλλικά επίπεδα είναι χαρακτηριστικά για κάθε ορυκτό. Επειδή το μήκος κύματος των ακτίνων Χ είναι ίδιο με αυτό των κρυσταλλικών επιπέδων, οι κρύσταλλοι των ορυκτών μπορούν να προκαλέσουν περίθλαση των ακτίνων Χ. για να λάβει χώρα η περίθλαση ακτίνων Χ πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη του Bragg:

$$n \times \lambda = 2 \times d \times \sin\theta$$

όπου:

$n=1,2,3\dots$

λ το μήκος κύματος των ακτίνων Χ,

d η απόσταση των κρυσταλλικών επιπέδων,

θ η γωνία της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με το κρυσταλλικό επίπεδο.

Στην περίθλαση ακτίνων Χ το δείγμα κατάλληλα κονιοποιημένο περιστρέφεται μαζί με τον ανιχνευτή σε γωνία 2θ ώστε να ανιχνεύονται οι ανακλώμενες ακτίνες. Το μηχάνημα καταγράφει την ένταση της περιθλώμενης ακτινοβολίας I συναρτήσει της γωνίας 2θ . Σε κάθε κορυφή του διαγράμματος XRD υπάρχει μέγιστη ανάκλαση και στην οποία ικανοποιείται η συνθήκη του Bragg για ένα είδος πλεγματικών επιπέδων ενώ ανάμεσα στις κορυφές υπάρχει θόρυβος.

Οι γωνίες 2θ εξαρτώνται από το σχήμα και το μέγεθος της μοναδιαίας κυψελίδας ενώ η ένταση των κορυφών από τη θέση των ατόμων και από την ικανότητα σκέδασης της ακτινοβολίας (ΜΟΡΟΠΟΥΛΟΥ, 2011).

9.7 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

9.7.1 Αντοχή σε θλίψη (compressive strength)

Η μονοαξονική αντοχή σε θλίψη αποτελεί το πιο χαρακτηριστικό μέγεθος του υλικού και μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί πειραματικά, ενώ η αντοχή σε εφελκυσμό και κάμψη συνήθως υπολογίζονται συναρτήσει αυτού. Η αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος είναι σημαντικός δείκτης της ποιότητας του, γιατί όλες του οι

ιδιότητες (ανθεκτικότητα, φθορά, απορροφητικότητα) βελτιώνονται με τη μείωση του πορώδους το οποίο επιτυγχάνεται μειώνοντας το λόγο W/C και κάνοντας σωστή συμπύκνωση και συντήρηση του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος αντίστοιχα.

Η αντοχή του σκυροδέματος σε μονοαξονική θλίψη προσδιορίζεται με επιπόνηση σε κεντρική θλίψη δοκιμίων από σκυρόδεμά, οριζόμενη ως η μέγιστη τάση θραύσεως των δοκιμίων και ο προσδιορισμός της ποιότητας του δίνεται στις 28 ημέρες και συμβολίζεται με το γράμμα C. Η αντοχή του σκυροδέματος αυξάνει με το χρόνο επειδή η ενυδάτωση συνεχίζει για χρόνια αλλά στο σχεδιασμό των κατασκευών λαμβάνεται υπόψη αυτή των 28 ημερών γιατί θεωρείται ότι μπορεί να φέρει όλα τα φορτία της κατασκευής.

Η κατασκευή των δοκιμίων και η δοκιμή της αντοχής σε θλίψη πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τα πρότυπα **BS EN 12390-2** και **BS EN 12390-3** αντίστοιχα στη μηχανή *Controls ADVANTEST 9*. Η δοκιμή έγινε σε κυβικά δοκίμια ακμής 100 mm με ταχύτητα φόρτισης 0.5 MPa/s σε διάφορα χρονικά διαστήματα ενώ το μέγιστο φορτίο της μηχανής ήταν 5000 kN.

9.7.2 Αντοχή σε εφελκυσμό με διάρρηξη (tensile splitting strength)

Η αντοχή του σκυροδέματος σε εφελκυσμό είναι το 10% της θλιπτικής αντοχής του και δεν παίζει σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό των κατασκευών παρά μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, π.χ έλεγχος ανοίγματος ρωγμών, προεντεταμένο σκυρόδεμα κτλ. (NILSON A.H. et al., 2004).

Η πλέον συνηθισμένη δοκιμή της αντοχής του σκυροδέματος σε εφελκυσμό είναι η δοκιμή εφελκυσμού με διάρρηξη ή 'Brazilian test' και γίνεται κατά **EN 12390-6**. Σε αυτή τη δοκιμή κυλινδρικό δοκίμιο ύψους 300 mm και διαμέτρου 150 mm υποβάλλεται σε θλίψη υπό ομοιόμορφα κατανεμημένες δυνάμεις P κατά μήκος δύο αντιδιαμετρικών γενέτειρων της παράπλευρης επιφάνειας. Αποτέλεσμα των δυνάμεων αυτών είναι η ανάπτυξη ομοιόμορφα κατανεμημένων εφελκυστικών τάσεων κάθετα στο επίπεδο που ορίζεται από τις δύο γενέτειρες, μεγέθους ίσο με $\sigma_h = 2P/\pi dl$. Με την αύξηση του θλιπτικού φορτίου οι τάσεις σ_h φθάνουν τη μέγιστη τιμή τους και το δοκίμιο διαχωρίζεται κατά μήκος του επιπέδου αυτού. Η τιμή της τάσης σ_h στη μέγιστη δύναμη P, δηλαδή κατά την αστοχία του δοκιμίου ονομάζεται αντοχή σε εφελκυσμό από διάρρηξη (ΚΩΤΣΟΒΟΣ, 2001).

Η δοκιμή εφελκυσμού με διάρρηξη έγινε σε κυλίνδρους σύμφωνα με το πρότυπο που αναφέρθηκε και η ταχύτητα φόρτισης ήτα 0.05 MPa/s.

9.7.3 Συσχέτιση αντοχής σε θλίψη – εφελκυσμού

Γενικά όσο αυξάνεται η θλιπτική, αυξάνεται και η εφελκυστική αντοχή.

Η ακριβής σχέση μεταξύ αυτών εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως είναι η μέθοδος πειραματικού προσδιορισμού της εφελκυστικής αντοχής, ο χρόνος συντήρησης, η ποιότητα του σκυροδέματος, τα χαρακτηριστικά των αδρανών (π.χ. χαρακτηριστικά εξωτερικής επιφάνειας, ορυκτολογική σύσταση) και τα τυχόν πρόσμικτα ή πρόσθετα (NILSON A.H. et al., 2004).

Γενικά, ο λόγος εφελκυστική προς θλιπτική αντοχή:

- μειώνεται με το χρόνο συντήρησης,
- αυξάνεται μειώνοντας το μέγεθος του μέγιστου κόκκου των αδρανών,
- αυξάνεται με τη χρήση πρόσθετων ή προσμίξεων (όπως είναι η ιπτάμενη τέφρα),
- μειώνεται με την αύξηση της θλιπτικής αντοχής.

Η σχέση μεταξύ εφελκυστικής και θλιπτικής αντοχής με βάση τον Ευρωκώδικα 2 δίνεται από τις σχέσεις (ΚΩΤΣΟΒΟΣ, 2001):

$$f_{ctm} = 0.3 f_{ck}^{2/3} \quad \text{για } f_{ck} < 50 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} = 2.12 \ln[1 + 0.1(f_{ck} + 8)] \quad \text{για } f_{ck} > 50 \text{ MPa}$$

όπου f_{ck} η θλιπτική αντοχή (σε κυλινδρικά δοκίμια) σε MPa.

9.7.4 Αντοχή σε κάμψη (flexural strength)

Στη δοκιμή κάμψης, πρισματικοί δοκοί με διατομή 150 mm και μήκος 600 mm ή 700 mm στηρίζονται αμφιέρειστα και επιπονούνται καμπτικά με ένα ή δύο θλιπτικά φορτία στο μέσον ή στα τρίτα, αντίστοιχα, του ανοίγματος. Λόγω της επιβαλλόμενης καμπτικής επιπόνησης αναπτύσσονται ορθές τάσεις καθ' ύψος της εγκάρσιας διατομής της δοκού, με μέγεθος στις ακραίες ίνες ίσο με $\sigma = M/W$.

Όταν με την αύξηση του φορτίου η εφελκυστική τάση σ φθάσει την οριακή τιμή της η δοκός θραύεται στη μεσαία διατομή. Η μέγιστη αυτή τιμή $f_{ct,fl}$ της εφελκυστικής τάσης, οριζόμενη ως αντοχή σε καμπτικό εφελκυσμό, δίνεται από τη σχέση $f_{ct,fl} = \max M/W$, όπου W η ροπή αντίστασης ($bh^2/6$), (ΚΩΤΣΟΒΟΣ, 2001).

Πειραματικά έχει βρεθεί ότι η καμπτική αντοχή είναι περίπου διπλάσια της αντοχής σε άμεσο εφελκυσμό.

Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σε δοκούς μήκους 100 cm τετραγωνικής διατομής 10 cm με ταχύτητα 0.185 MPa/s. Η μηχανή ήταν της εταιρίας TECNOTEST κ το μοντέλο KD300/R με μέγιστο φορτίο 3000 kN.

9.7.5 Εξόλκευση οπλισμού (pull-out test)

Η συνάφεια μεταξύ οπλισμού-χάλυβα εξετάστηκε με τη δοκιμή εξόλκευσης 'pull-out test' σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM C-234** στο εργαστήριο οπλισμένου σκυροδέματος του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών & Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Κύπρου. Τα δοκίμια σκυροδέματος ήταν κυβικά, ακμής 200 mm στα οποία τοποθετήθηκε ομοαξονικά χαλύβδινη ράβδος μήκους 60 cm και διαμέτρου 16 mm. Η ταχύτητα εξόλκευσης ήταν 0,05MPa/s ενώ η μέγιστη δύναμη της μηχανής ήταν 300 kN. Η μηχανή εξόλκευσης ήταν η LLOYD LR300, συνδεδεμένη με ηλεκτρονικό υπολογιστή ο οποίος κατέγραφε την επιμήκυνση και την τάση συναρτήσεως του χρόνου.

9.7.6 Μέτρο Ελαστικότητας Σκυροδέματος (modulus of elasticity)

9.7.6.1 Στατικό μέτρο Ελαστικότητας

Το μέτρο ελαστικότητας (E_c) εκφράζει το μέτρο αντίστασης του σκυροδέματος στην παραμόρφωσή του υπό μονοαξονική επιπόνηση, αυξάνεται με την μείωση του πορώδους των δοκιμίων και επομένως σχετίζεται με τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος (HOSFORD, 2005). Προσδιορίζεται ως η κλίση της καμπύλης τάσεων $\sigma=f(\varepsilon)$ κυλινδρικών ή πρισματικών δοκιμίων υπό μονοαξονική βραχυχρόνια θλιπτική επιπόνηση. Επειδή η κλίση της καμπύλης σ - ε μεταβάλλεται με την τάση σ , η τιμή του μέτρου ελαστικότητας εξαρτάται από τη στάθμη της επιπόνησης (ΚΩΤΣΟΒΟΣ, 2001).

Το υπό εξέταση δοκίμιο υποβάλλεται σε κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης με μέγιστο το $1/3$ της θλιπτικής του αντοχής όπου καταγράφεται σε κατάλληλο λογισμικό και με τη βοήθεια ηλεκτρομηκυνσιόμετρων που έχουν τοποθετηθεί πάνω στο δοκίμιο, η τάση σ συναρτήσεως της παραμόρφωσης στο δοκίμιο.

9.7.6.2 Δυναμικό μέτρο Ελαστικότητας

Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας μπορεί να υπολογιστεί έμμεσα από τη μέτρηση της ταχύτητας των υπερήχων διαμέσου του σκυροδέματος και η δοκιμή περιγράφεται από τα πρότυπα **ASTM C597-2** και **BS EN 12504-4**. Η μέθοδος των υπερήχων ανήκει στις μη καταστροφικές μεθόδους ελέγχου των υλικών και εξαρτάται από τη φύση του υλικού δηλαδή τις ελαστικές ιδιότητες του μέσου, στο οποίο διαδίδεται.

Για τον υπερηχητικό έλεγχο χρησιμοποιούνται μηχανικά κύματα που παράγονται από τις ταλαντώσεις των δομικών στοιχείων των υλικών. Οι ταχύτητες των υπερήχων χρησιμοποιούνται για τον έμμεσο προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, τον έλεγχο της ομοιογένειάς του, τον προσδιορισμό του δυναμικού

μέτρου ελαστικότητας, τον έλεγχο της ύπαρξης ρωγμών κτλ. (ΠΡΑΣΣΙΑΝΑΚΗΣ, 1997), (Krautkrämer, 1977).

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα των υπερηχητικών κυμάτων είναι η υγρασία και η θερμοκρασία του σκυροδέματος, η μορφή και οι διαστάσεις του δοκιμίου και η απόσταση που διανύουν τα κύματα (Jones R. and Făcșoaru I., 1969).

Η χρόνος μετάδοσης των υπερήχων εξαρτάται από την απόσταση που διανύουν μέσα στο σκυρόδεμα και δίνεται από τον τύπο $t = \frac{L}{V}$ όπου V η ταχύτητα σε km/s και L η απόσταση πομπού - δέκτη σε cm.

Η μαθηματική σχέση που συνδέει το μέτρο ελαστικότητας με την ταχύτητα είναι:

$$V = \sqrt{E(1 - \mu) / [\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)]}$$

Όπου V η ταχύτητα σε m/s, E το μέτρο ελαστικότητας σε GPa, μ ο λόγος Poisson και ρ η πυκνότητα του δοκιμίου σε kg/m³.

9.8 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΟΡΩΔΟΥΣ

9.8.1 Μέτρηση πορώδους με ποροσιμετρία Hg

Η ποροσιμετρία υδραργύρου είναι μια από τις πιο δημοφιλείς και γρήγορες μεθόδους για τον καθορισμό του συνολικού πορώδους και της κατανομής του μεγέθους των πόρων στο σκυρόδεμα και όχι μόνο. Βασίζεται στις ιδιότητες του υδράργυρου ο οποίος είναι ένα ισχυρά μη Νευτωνικό, μη διαβρέχον υγρό για τα περισσότερα υλικά (ΜΟΡΟΠΟΥΛΟΥ Α. and ΚΟΥΛΟΥΜΠΗ Ν., 2012).

Η αρχή της μεθόδου βασίζεται στην εξίσωση του Washburn (1921) σύμφωνα με την οποία η απαιτούμενη πίεση για να εισέλθει ένα μη Νευτωνικό υγρό μέσα σε ένα σύστημα τριχοειδών αγγείων, είναι αντιστρόφως ανάλογη της διαμέτρου των αγγείων αυτών και ανάλογη της επιφανειακής τάσης και της γωνίας επαφής του εισερχόμενου υγρού με τα αγγεία (GIESCHE, 2002).

Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε μικρά, καθαρά και στεγνά δείγματα μάζας συνήθως 5g και ακαθορίστου σχήματος. Το υπό εξέταση δείγμα τοποθετείται σε ειδικό κλωβό στον οποίο εισάγεται υδράργυρος σε ελεγχόμενη ποσότητα και πίεση. Η εισαγωγή του υγρού υδραργύρου υπό πίεση προκαλεί αύξηση του πραγματικού όγκου του δείγματος επειδή πληρώνονται σταδιακά τα κενά των πόρων του. Από την καμπύλη του όγκου του εισαχθέντος υδραργύρου, συναρτήσει της πίεσης, προκύπτει

η καμπύλη κατανομής του μεγέθους των πόρων του δείγματος (ΜΟΡΟΠΟΥΛΟΥ, 2011).

Συνήθως, η πίεση που απαιτείται ώστε να γεμίσουν όλοι οι πόροι του δείγματος με Hg 60000 psi. Το πορώδες του δείγματος, τότε, προκύπτει ως λόγος του όγκου των κενών πόρων προς τον φαινόμενο όγκο του δείγματος:

$$E_p = \frac{V_p}{V_d} \times 100$$

Όπου:

ε_p : πορώδες δείγματος (%),

V_p : όγκος υδραργύρου που απαιτήθηκε για την πλήρωσή των πόρων,

V_b : φαινόμενος όγκος δείγματος.

9.8.2 Μέτρηση ανοικτού πορώδους με απαέρωση

Το πορώδες του σκυροδέματος μπορεί να μετρηθεί σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο πρότυπο **BS EN 1936:2006**.

Για τη διεξαγωγή του πειράματος ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

- Ξήρανση των δοκιμίων μέχρι σταθερής μάζας στους 105°C.,
- Ζύγιση των δοκιμίων σε ζυγό ακρίβειας δύο δεκαδικών ψηφίων για τον υπολογισμό της ξηρής μάζας (M_d),
- Απαέρωση των δοκιμίων για 2-3 ώρες με σκοπό την αφαίρεση του αέρα σε χαμηλή πίεση,
- Εισαγωγή απιονισμένου νερού μέχρι κάλυψη ολόκληρου του δοκιμίου για 24 ώρες,
- Ζύγιση του δοκιμίου μέσα στο νερό για τον υπολογισμό της φαινόμενης μάζας (M_h),
- Απομάκρυνση επιφανειακού νερού και ζύγιση του δοκιμίου για τον προσδιορισμό της μάζας του κορεσμένου και επιφανειακά ξηρού δοκιμίου (M_s).

Το ανοικτό πορώδες υπολογίζεται από τον τύπο $p = \frac{M_s - M_d}{M_s - M_h} \times 100\%$ ενώ η φαινόμενη πυκνότητα από τη σχέση $d = \frac{M_d}{M_s - M_h} \times d_{H_2O}$.

Εκτός από τα παραπάνω μεγέθη μπορεί να προσδιοριστεί και ο όγκος των πόρων σύμφωνα με τη σχέση $V = \frac{M_s - M_d}{d_{νερού}} \times 1000$, όπου $d_{νερού} = 998 \text{ kg/m}^3$.

9.9 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Η θερμική αγωγιμότητα στο σκυρόδεμα είναι μια βασική ιδιότητα που σχετίζεται με την πρόβλεψη της μεταφοράς θερμότητας διαμέσου της μάζας του και εξαρτάται από το πορώδες της τσιμεντοκονίας, το είδος των αδρανών και την περιεχόμενη υγρασία. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία μειώνεται η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος κυρίως λόγω των εσωτερικών ρωγμών που προκαλούνται από του εξάτμιση του νερού (Morabito, 1989).

Η μέτρηση των θερμικών παραμέτρων πραγματοποιήθηκε σε κυβικά δοκίμια ακμής 100 mm με το μηχάνημα ISOMET 2104 το οποίο μετρούσε το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, τη θερμοχωρητικότητα, τη θερμική διάχυση και τη θερμοκρασία των δοκιμών καθώς επίσης και των ορυκτών προσθέτων που χρησιμοποιήθηκαν ως μέρος αντικατάστασης τσιμέντου.

Η θερμοχωρητικότητα δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda = C_p * a$$

Όπου:

λ : θερμική αγωγιμότητα σε W/m^*K

C_p : η θερμοχωρητικότητα σε J/m^3*K και

a : η θερμική διάχυση σε m^2/s

9.10 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΡΙΧΟΕΙΔΟΥΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Η μέτρηση της απορροφητικότητας του σκυροδέματος γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM C-1585**. Για την εκτέλεση της δοκιμής, τα δοκίμια (κυλινδρικά ή κυβικά) σκυροδέματος αρχικά ξηραίνονται στους 105°C για την απομάκρυνση της περιεχόμενης υγρασίας μέχρι σταθερής μάζας. Αφού επιτευχθεί πλήρης ξήρανση, τα δοκίμια ζυγίζονται σε ζυγό ακριβείας κ στη συνέχεια αφήνονται στην ατμόσφαιρα για να κρυσώσουν. Επίσης οι πλευρές του δοκιμίου μονώνονται με κατάλληλη ρητίνη με σκοπό την μονοδιάστατη ροή του υγρού μόνο από την κάτω εμβαπτισμένη επιφάνεια και για να μην υπάρχουν πλευρικές απώλειες υγρού.

Στη συνέχεια τα δοκίμια μπαίνουν σε δοχείο το οποίο περιέχει νερό ή άλλο διαλύτη με την κάτω επιφάνεια να μην ακουμπά στον πυθμένα του δοχείου και το υγρό να απέχει από την κάτω επιφάνεια του δοκιμίου 3 - 5 mm. Το δοκίμιο σε συγκεκριμένους χρόνους βγαίνει από το δοχείο και αφού απομακρυνθεί η υγρασία επιφανειακά ζυγίζεται με ακρίβεια 0.01 g. Κατά τη διάρκεια του πειράματος καταγράφεται η

θερμοκρασία του διαλύτη ώστε να γίνει η διόρθωση της πυκνότητας και συμπληρώνεται υγρό ώστε να διατηρείται σταθερή η στάθμη.

Η απορρόφηση i σε mm δίνεται από τον τύπο:

$$i = \frac{\Delta m}{a/d}$$

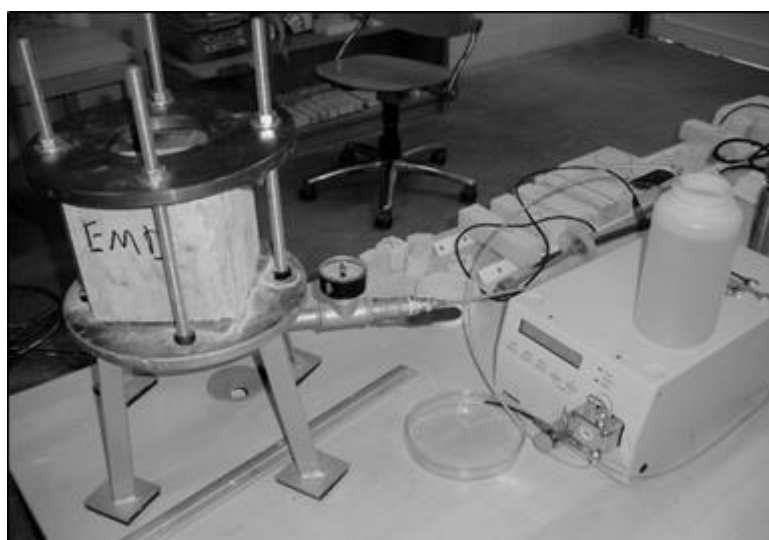
Όπου Δm η μεταβολή της μάζας σε συγκεκριμένο χρόνο t σε g, a η εμβαπτισμένη επιφάνεια του δοκιμίου σε mm² και d η πυκνότητα του υγρού g/mm³.

Στη συνέχεια κατασκευάζεται διάγραμμα $I = f\sqrt{t}$

Από το γράφημα εφαρμόζοντας γραμμική γραμμή τάσης προκύπτει η αρχική απορρόφηση που δίνεται από τη μαθηματική σχέση $I = Si \times \sqrt{t} + a$ για χρονικό διάστημα μέχρι 6 ώρες και ακολουθεί η δευτερογενής απορρόφηση από την 1^η ημέρα εμβάπτισης μέχρι τις 8 ημέρες.

9.11 ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΝΕΡΟΥ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ (water penetration under pressure)

Η δοκιμή της διείσδυσης νερού υπό πίεση έγινε σύμφωνα με το πρότυπο **BS EN 12390-8**. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο το δοκίμιο το οποίο πρέπει να είναι κυβικό ή κυλινδρικό με ακμή ή διάμετρο αντίστοιχα, τουλάχιστον 150 mm, στερεώνεται σε κατάλληλο τρίποδο όπου εισέρχεται νερό από την κάτω επιφάνεια του δοκιμίου όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.1. Εφαρμόζεται σταθερή πίεση 5 bars για 72 ώρες και στη συνέχεια το δοκίμιο σπάει σε 2 κομμάτια και μετράται το βάθος το οποίο έχει διεισδύσει το νερό. Όσο διαρκεί η δοκιμή πρέπει να ελέγχεται εκτός από την πίεση η οποία πρέπει να διατηρείται σταθερή και το αν υπάρχει πλευρική απώλεια νερού.



Σχήμα 9.1: πειραματική διάταξη για τη μέτρηση του βάθους νερού υπό πίεση

10 ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΟΣ ΑΠΟ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΜΑΓΓΑΝΙΟΥ

Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι η εκτίμηση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος αντικαθιστώντας το τσιμέντο από παραπροϊόν που προέκυψε από την παραγωγή του Ηλεκτροχημικού διοξειδίου του Μαγγανίου (EMD). Η αντικατάσταση έγινε σε δύο ποσοστά 5% και 10% κ.β τσιμέντου.

Η εκτίμηση της διάβρωσης του σπλισμού έγινε σε κυλινδρικά δοκίμια τσιμεντοκονίας ύψους $H=100$ mm και $\Phi=50$ mm με υπολογισμό ηλεκτροχημικών παραμέτρων, μέτρηση της απώλειας μάζας και οπτική παρατήρηση σε ψηφιακό στερεοσκόπιο.

Η ποιότητα του σκυροδέματος εκτιμήθηκε με τη μέτρηση του πορώδους, του βάθους ενανθράκωσης, τη μέτρηση των μηχανικών αντοχών και του μέτρου ελαστικότητας ενώ ο προσδιορισμός των χημικών φάσεων πραγματοποιήθηκε με παρατήρηση σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο και XRD.

Τέλος, σε όλα τα δοκίμια τα οποία εκτέθηκαν σε περιβάλλον παρουσία ιόντων Cl^- υπολογίστηκε η συνολική συγκέντρωσή τους με τη μέθοδο Mohr.

10.1 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΚΘΕΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Τα δοκίμια τσιμεντοκονίας ύψους 100 mm και διαμέτρου 50 mm σπλίστηκαν ομοαξονικά με νευροχάλυβα τύπου *Tempcore B500C* ύψους 100 mm και διαμέτρου 10mm. Για τη συνάφεια σπλισμού/σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε χάλυβας διαμέτρου 16 mm και μήκους 60 cm. Όλοι οι σπλισμοί καθαρίστηκαν με διάλυμα υδροχλωρικού (500 ml HCl, πυκνότητας $\rho=1.19$ g/ml, σε 1000ml απιονισμένο H_2O) με αναστολέα (3.5g εξαμεθυλικής τετραμίνης σε 1000ml απιονισμένο H_2O), απιονισμένο νερό και ακετόνη για την απομάκρυνση των οξειδίων και στη συνέχεια ζυγίστηκαν με ακρίβεια 0.1mg (**ISO/DIS 8407.3**). Για όλες τις σειρές δοκιμών χρησιμοποιήθηκε ασβεστολιθική άμμος λατομείου, νερό δικτύου Ε.Μ.Π και Λευκωσίας και δύο τύποι τσιμέντου *CEM I 42.5N* και *CEM II A-M 42.5N*. ο λόγος W/C στα δοκίμια τσιμεντοκονίας ήταν $W/C=0,65$ ενώ στα δοκίμια σκυροδέματος 0.57 και 0.65 για το κάθε είδος τσιμέντου αντίστοιχα.

Το περιβάλλον έκθεσης των δοκιμών ήταν μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3.5% κ.β. σε εργαστηριακό περιβάλλον, παραθαλάσσιο περιβάλλον στην βιομηχανική περιοχή Ασπροπύργου, θάλαμος αλατονέφωσης, ατμοσφαιρικό περιβάλλον, θάλαμος επιταχυνόμενης ενανθράκωσης και διάλυμα Na_2SO_4 5% κ.β.

10.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

10.2.1 Μετρήσεις Δυναμικού Διάβρωσης

Το δυναμικό διάβρωσης των χαλύβων μετρήθηκε ανά βδομάδα για συνολική περίοδο δύο ετών. Κατασκευάστηκαν 24 δοκίμια οπλισμένης τσιμεντοκονίας για κάθε κατηγορία δοκιμίων (δοκίμια αναφοράς, 5% προσθήκη και 10% προσθήκη EMDW). Για την κατασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε ασβεστολιθική άμμος, νερό δικτύου ΕΜΠ και τσιμέντο CEM I 42.5 N. Ο λόγος νερό:τσιμέντο διατηρήθηκε σταθερός και ίσος με 0,65. Τα δοκίμια τσιμεντοκονίας είχαν ύψος 100mm, διάμετρο 50mm ενώ ο χάλυβας τύπου Tempcore B500C βρισκόταν σε ύψος 20mm από τη βάση του δοκιμίου για την αποφυγή της διάβρωσης. Ως ηλεκτρόδιο αναφοράς χρησιμοποιήθηκε καλομέλανας (SCE) ο οποίος βυθιζόταν στο διάλυμα NaCl 3.5% κ.β και οι μετρήσεις λαμβάνονταν από κατάλληλο πολύμετρο.

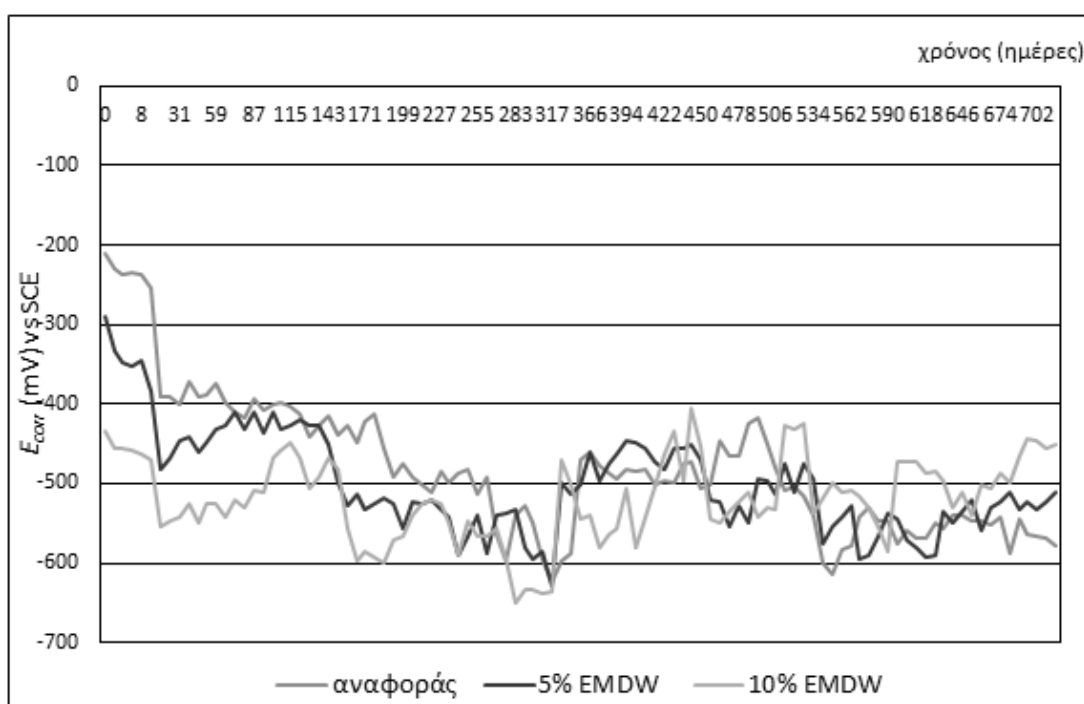
10.2.1.1 Δυναμικό διάβρωσης (E_{corr}) χάλυβα σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Το δυναμικό διάβρωσης E_{corr} μετρήθηκε για συνολικό διάστημα 2 ετών. Τα οπλισμένα δοκίμια τσιμεντοκονίας εμβαπτίστηκαν μερικώς σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β σε εργαστηριακό περιβάλλον. Ως βοηθητικό ηλεκτρόδιο χρησιμοποιήθηκε κορεσμένος καλομέλανας SCE και οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ανά εβδομάδα. Ο πίνακας 10.1 παρουσιάζει τις μέσες τιμές Δυναμικού για την περίοδο των δύο ετών.

Πίνακας 10.1: Δυναμικό διάβρωσης E_{corr} για δοκίμια μερικώς εμβαπτισμένα σε διάλυμα NaCl 3.5% κ.β

Χρόνος (ημέρες)	E_{corr} (mV)			Χρόνος (ημέρες)	E_{corr} (mV)			Χρόνος (ημέρες)	E_{corr} (mV)		
	αναφοράς	5% EMDW	10% EMDW		αναφοράς	5% EMDW	10% EMDW		αναφοράς	5% EMDW	10% EMDW
0	-210	-290	-434	220	-511	-520	-520	492	-418	-494	-543
2	-231	-333	-455	227	-485	-531	-526	499	-450	-497	-530
4	-238	-347	-456	234	-499	-541	-550	506	-479	-515	-533
6	-236	-353	-458	241	-486	-591	-591	513	-509	-474	-428
8	-236	-346	-463	248	-482	-567	-547	520	-504	-511	-433
10	-254	-383	-471	255	-512	-540	-565	527	-517	-474	-425
17	-390	-481	-553	262	-492	-587	-566	534	-540	-494	-538
24	-391	-467	-546	269	-564	-539	-557	541	-599	-576	-517
31	-401	-445	-542	276	-598	-538	-596	548	-615	-555	-499
38	-372	-440	-527	283	-540	-533	-649	555	-583	-542	-512
45	-391	-460	-550	290	-528	-580	-633	562	-578	-527	-510
52	-389	-449	-526	297	-549	-595	-634	569	-543	-594	-515
59	-375	-431	-525	310	-595	-586	-637	576	-530	-590	-530
66	-398	-426	-543	317	-625	-629	-636	583	-547	-566	-554
73	-410	-409	-522	345	-598	-498	-470	590	-547	-538	-587
80	-416	-432	-529	350	-587	-514	-501	597	-576	-545	-474
87	-394	-411	-509	359	-471	-501	-544	604	-559	-571	-474
94	-407	-436	-510	366	-460	-461	-541	611	-570	-580	-474
101	-400	-410	-467	373	-476	-497	-580	618	-568	-592	-488
108	-399	-431	-458	380	-487	-475	-565	625	-551	-590	-484

115	-403	-427	-449	387	-494	-464	-557	632	-557	-535	-496
122	-413	-419	-467	394	-483	-446	-506	639	-541	-549	-531
129	-443	-427	-505	401	-485	-448	-582	646	-540	-535	-512
136	-428	-426	-492	408	-482	-455	-543	653	-548	-521	-539
143	-416	-450	-468	415	-502	-473	-504	660	-548	-560	-501
150	-439	-499	-482	422	-496	-482	-464	667	-552	-529	-506
157	-426	-528	-557	429	-500	-456	-435	674	-543	-523	-487
164	-448	-514	-596	436	-475	-456	-496	681	-587	-511	-499
171	-422	-533	-585	443	-474	-450	-405	688	-545	-532	-465
178	-412	-526	-593	450	-506	-471	-454	695	-565	-522	-443
185	-456	-517	-601	457	-501	-520	-545	702	-566	-532	-445
192	-493	-526	-570	464	-446	-524	-550	709	-569	-522	-455
199	-475	-558	-567	471	-466	-554	-534	716	-578	-511	-450
206	-492	-523	-540	478	-466	-529	-522				
213	-501	-526	-526	485	-425	-550	-511				



Σχήμα 10.1: Δυναμικό διάβρωσης E_{corr} για δοκίμια εμβαπτισμένα σε διάλυμα NaCl 3.5% κ.β

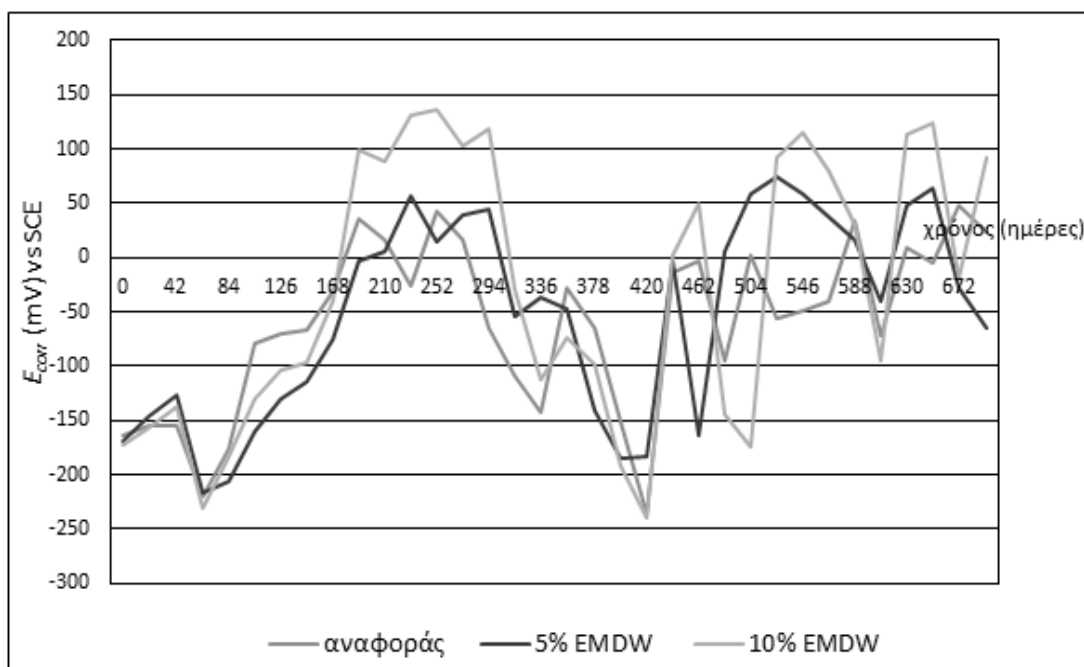
Από το σχήμα 10.1 φαίνεται ότι αρχικά τα δοκίμια στα οποία έχει προστεθεί το παραπροϊόν εμφανίζουν χαμηλότερες τιμές Δυναμικού διάβρωσης συγκριτικά με τα δοκίμια αναφοράς. Αυτή η διαφορά όμως εξομαλύνεται μετά από τους 9 μήνες μερικής εμβάπτισης σε NaCl όπου οι τρεις κατηγορίες δοκιμίων έχουν περίπου ίδιες τιμές. Επίσης διακρίνεται ότι μετά από 600 ημέρες περίπου η προσθήκη του παραπροϊόντος κατά 10% αυξάνει τις τιμές του δυναμικού σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς.

10.2.1.2 Δυναμικό διάβρωσης (E_{corr}) χάλυβα στην ατμόσφαιρα

Το Δυναμικό διάβρωσης των οπλισμών στην ατμόσφαιρα μετρήθηκε για συνολικό διάστημα 700 ημέρων ανά 21 ημέρες. Τα δοκίμια οπλισμένης τσιμεντοκονίας παρέμειναν σε ατμοσφαιρικές συνθήκες στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Ο πίνακας 10.2 παρουσιάζει τις μετρήσεις του δυναμικού για τις τρεις κατηγορίες δοκιμών.

Πίνακας 10.2: Δυναμικό διάβρωσης E_{corr} για δοκίμια εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα

Χρόνος (ημέρες)	E_{corr} (mV)			Χρόνος (ημέρες)	E_{corr} (mV)			Χρόνος (ημέρες)	E_{corr} (mV)		
	αναφοράς	5% EMDW	10% EMDW		αναφοράς	5% EMDW	10% EMDW		αναφοράς	5% EMDW	10% EMDW
0	-164	-169	-173	252	42	15	137	504	59	-175	3
21	-156	-147	-157	273	17	40	102	525	75	93	-56
42	-155	-127	-138	294	-65	45	118	546	58	115	-50
63	-221	-217	-231	315	-109	54	-30	567	38	80	-40
84	-177	-207	-184	336	-143	-37	-113	588	16	31	34
105	-79	-161	-131	357	-29	-47	-73	609	-41	-95	-72
126	-70	-131	-105	378	-66	-141	-99	630	48	113	10
147	-66	-115	-97	399	-151	-186	-192	651	64	124	-6
168	-31	-76	-40	420	-237	-184	-241	672	-27	-20	48
189	36	-3	99	441	-13	-3	3	693	-65	93	24
210	16	6	90	462	-3	-164	5				
231	-26	57	131	483	-96	5	144				



Σχήμα 10.2: Δυναμικό διάβρωσης E_{corr} για δοκίμια εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα

Από το σχήμα 10.2 στο οποίο παρουσιάζονται σε γράφημα το δυναμικό διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου για τα δοκίμια που εκτέθηκαν στην ατμόσφαιρα στη Σχολή Χημικών μηχανικών ΕΜΠ φαίνεται μεγάλη διακύμανση στις τιμές του E_{corr} και στις τρεις σειρές δοκιμών. Το γεγονός αυτό πιθανόν να οφείλεται στις περιβαλλοντικές συνθήκες δηλαδή στις συνθήκες υγρασίας, και θερμοκρασίας που επικρατούσαν κατά τη διάρκεια έκθεσης τους.

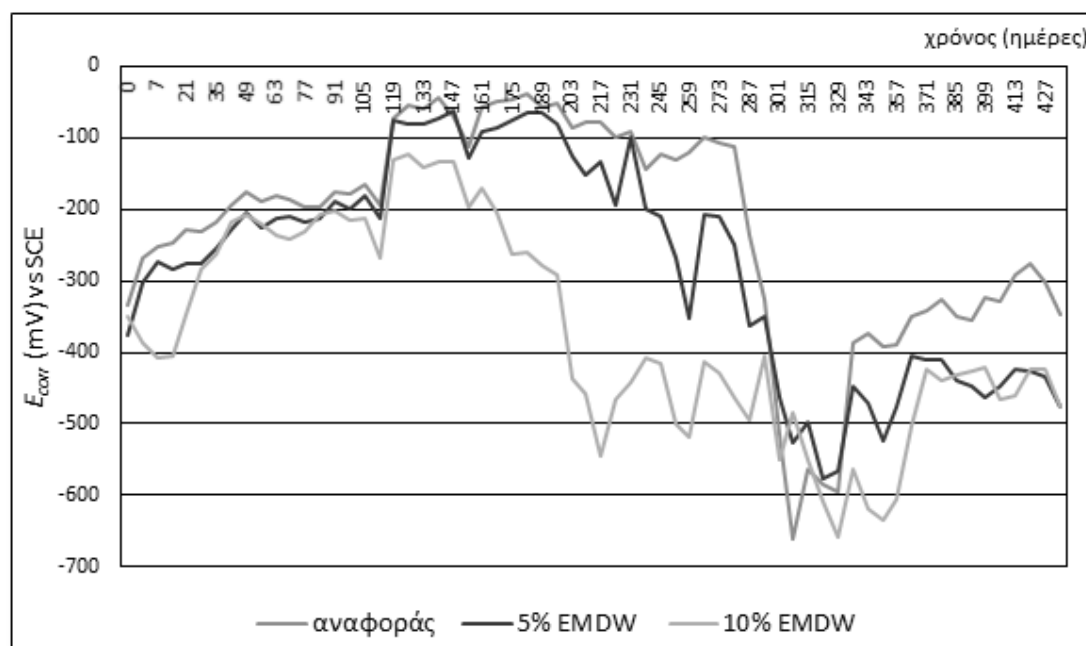
Συγκεκριμένα, μέχρι τους έξι μήνες έκθεσης στην ατμόσφαιρα οι τιμές των δυναμικών μεταβαίνουν προς ηλεκτροθετικότερες τιμές και στη συνέχεια μέχρι τους 14 μήνες βρίσκονται μεταξύ 0 - (+137) mV. Σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM C876-87** οι σπλισμοί βρίσκονται σε παθητική κατάσταση έως χαμηλή πιθανότητα διάβρωσης (πίνακας 9.1).

10.2.1.3 Δυναμικό διάβρωσης (E_{corr}) χάλυβα σε διάλυμα Na_2SO_4 5% κ.β

Η επίδραση των θειικών αλάτων στη διάβρωση του χάλυβα διερευνήθηκε με τη μερική εμβάπτιση κυλινδρικών δοκιμών τσιμεντοκονίας σε διάλυμα Na_2SO_4 5% κ.β. Η μέτρηση του Δυναμικού διάβρωσης πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ηλεκτροδίου καλομέλανα και γινόταν ανά εβδομάδα.

Πίνακας 10.3: Δυναμικό διάβρωσης E_{corr} για δοκίμια μερικώς εμβαπτισμένα σε Na_2SO_4 5% κ.β

Χρόνος (ημέρες)	αναφοράς	5% EMDW	10% EMDW	Χρόνος (ημέρες)	αναφοράς	5% EMDW	10% EMDW	Χρόνος (ημέρες)	αναφοράς	5% EMDW	10% EMDW
0	-335	-377	-349	147	-70	-62	-132	301	-515	-462	-550
3	-269	-303	-388	154	-112	-128	-196	308	-660	-528	-486
7	-252	-273	-409	161	-57	-91	-171	315	-563	-498	-551
14	-246	-284	-406	168	-49	-87	-205	322	-584	-575	-609
21	-229	-275	-347	175	-45	-74	-263	329	-595	-565	-658
28	-232	-275	-283	182	-38	-64	-261	336	-387	-448	-563
35	-219	-256	-263	189	-57	-66	-278	343	-373	-471	-619
42	-194	-229	-219	196	-51	-81	-293	350	-391	-524	-633
49	-175	-205	-207	203	-85	-126	-437	357	-390	-477	-606
56	-189	-225	-221	210	-79	-151	-457	364	-351	-406	-503
63	-181	-213	-237	217	-77	-133	-545	371	-343	-411	-423
70	-187	-211	-241	224	-100	-194	-467	378	-326	-411	-439
77	-197	-217	-231	231	-90	-100	-442	385	-349	-440	-432
84	-196	-213	-207	238	-145	-200	-409	392	-355	-449	-427
91	-176	-188	-201	245	-122	-209	-415	399	-324	-462	-420
98	-178	-200	-216	252	-130	-269	-500	406	-328	-447	-467
105	-165	-180	-214	259	-119	-352	-518	413	-291	-424	-461
112	-194	-214	-269	266	-99	-207	-412	420	-276	-425	-423
119	-73	-74	-130	273	-107	-211	-428	427	-302	-435	-423
126	-54	-80	-123	280	-112	-250	-464	434	-347	-476	-477
133	-59	-82	-141	287	-236	-363	-495				
140	-44	-72	-133	294	-327	-349	-404				



Σχήμα 10.3: Δυναμικό διάβρωσης E_{corr} για δοκίμια εμβαπτισμένα σε διάλυμα Na_2SO_4 5% κ.β

Στο σχήμα 10.3 δίνονται το δυναμικό διάβρωσης των οπλισμών συναρτήσει του χρόνου για τα δοκίμια αναφοράς, με 5% και με 10% πρόσθετο ως προς SCE. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι τα δυναμικά των τριών κατηγοριών μέχρι τις 120 ημέρες κυμαίνονται μεταξύ -400mV και -75mV. Στη συνέχεια οι οπλισμοί των δοκιμών με το παραπροϊόν εμφανίζουν πιο ηλεκτραρνητικές τιμές από τα αναφοράς. Συγκεκριμένα, οι οπλισμοί των δοκιμών με 5% πρόσθετο και τα αναφοράς σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM C876-87** διαβρώνονται έντονα μετά τις 300 ημέρες εμβάπτισης ενώ για τα δοκίμια με 10% η κατάσταση αυτή εμφανίζεται στις 200 ημέρες περίπου. Στο χρονικό διάστημα 200-300 και 240-300 ημέρες για τα δοκίμια με 5% EMDW και τα αναφοράς η πιθανότητα διάβρωσης σύμφωνα με το ίδιο πρότυπο είναι ενδιάμεση έως υψηλή πιθανότητα διάβρωσης (πίνακας 9.1).

Αυτό αποτυπώνεται και μακροσκοπικά αφού τα δοκίμια με το 10% EMDW εμφανίζονται πιο αποσαθρωμένα εξαιτίας των θεικών αλάτων.

10.2.2 Μετρήσεις Βάθους ενανθράκωσης σκυροδέματος

Για τη μέτρηση του βάθους ενανθράκωσης, παρασκευάστηκαν δοκίμια οπλισμένης τσιμεντοκονίας για τρεις κατηγορίες δοκιμών. Μία σειρά χωρίς πρόσθετο (αναφοράς), μια σειρά στην οποία έγινε αντικατάσταση του τσιμέντου σε ποσοστό 5% (5% EMDW) και μια με 10% αντικατάσταση τσιμέντου από το παραπροϊόν EMD (10% EMDW). Χρησιμοποιήθηκε χαλύβδινος οπλισμός τύπου *Tempcore B500C* ύψους 100mm και διαμέτρου $\Phi=10\text{mm}$, ασβεστολιθική άμμος λατομείου, τσιμέντο *CEM I*

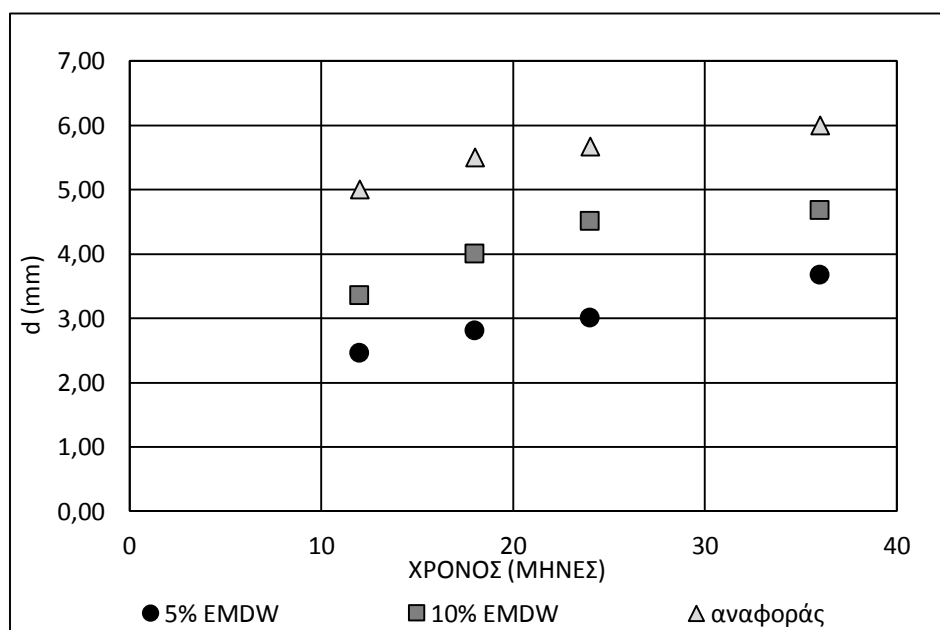
42.5N και νερό δικτύου ΕΜΠ. Η αναλογία των υλικών όλων των δοκιμών ήταν τσιμεντο:άμμος:νερό 1:3:0,65. Η ενανθράκωση των δοκιμών μετρήθηκε με τη μέθοδο **RILEM CPC-18**.

10.2.2.1 Βάθος ενανθράκωσης σκυροδέματος σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Η ενανθράκωση των δοκιμών τσιμεντοκονίας εκτιμήθηκε για συνολικό χρόνο 36 μηνών μερικής εμβάπτισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στον πίνακα 10.4. Το βάθος ενανθράκωσης συναρτήσε του χρόνου υπολογίστηκε, με τον τύπο $d^2 = A * t$, όπου d το βάθος ενανθράκωσης σε mm, t ο χρόνος σε yr και A ο συντελεστής διάχυσης σε mm^2/yr .

Πίνακας 10.4: Βάθος ενανθράκωσης για δοκίμια τσιμεντοκονίας εμβαπτισμένα σε NaCl 3,5% κ.β

ΧΡΟΝΟΣ (μήνες)	ΑΝΑΦΟΡΑΣ	5% EMDW	10% EMDW
12	5	3,13	3,35
18	5,5	3,78	4
24	5,67	4,1	4,5
36	6	4,5	4,67



Σχήμα 10.4: Βάθος ενανθράκωσης σε mm συναρτήσε του χρόνου εμβάπτισης σε NaCl 3,5% κ.β

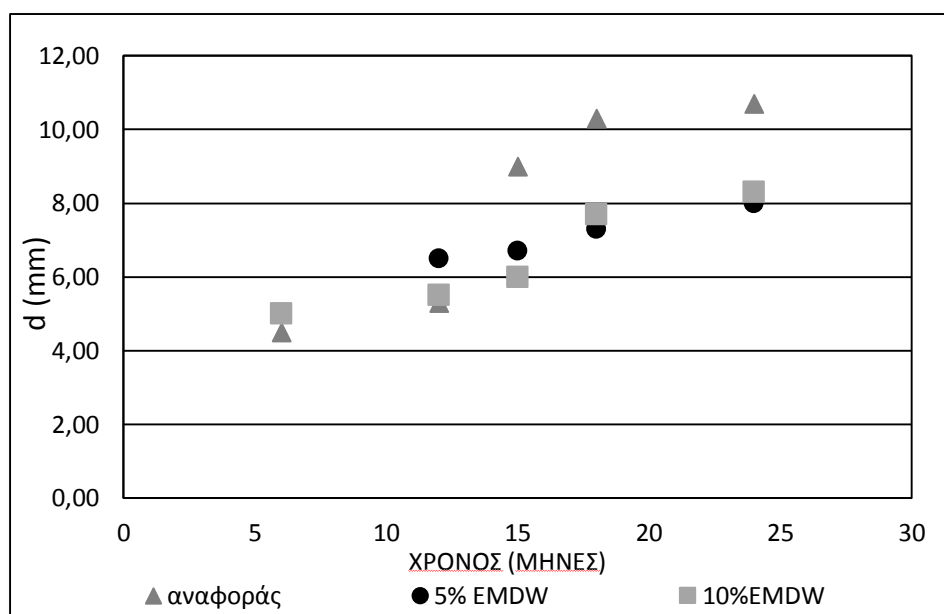
Το σχήμα 10.4 παρουσιάζει το βάθος ενανθράκωσης συναρτήσε του χρόνου εμβάπτισης σε NaCl 3,5% κ.β. Από το γράφημα φαίνεται ότι η σειρά των δοκιμών χωρίς πρόσθετο εμφανίζονται πιο ενανθρακωμένα από τις υπόλοιπες κατηγορίες δοκιμών γεγονός που οφείλεται στο αυξημένο πορώδες τους. Επίσης από το γράφημα φαίνεται ότι την καλύτερη συμπεριφορά έναντι της ενανθράκωσης έχει η σύνθεση με 5% EMDW σε όλους τους χρόνους που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

10.2.2.2 Βάθος ενανθράκωσης σκυροδέματος στην ατμόσφαιρα

Το βάθος ενανθράκωσης των δοκιμών τσιμεντοκονίας μετρήθηκε έπειτα από έκθεση τους στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου για συνολικό χρονικό διάστημα 24 μηνών. Τα δοκίμια έσπασαν στους 9,12,15,18 και 24 μήνες και τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 10.5.

Πίνακας 10.5: Βάθος ενανθράκωσης για δοκίμια τσιμεντοκονίας εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα

Χρόνος (μήνες)	5% EMDW		10%EMDW		αναφοράς	
	A (mm ² /yr)	d (mm)	A (mm ² /yr)	d (mm)	A (mm ² /yr)	d (mm)
6	46,08	4,8	50	5	40,5	4,5
12	42,25	6,5	30,25	5,5	32,49	5,7
15	35,56	6,7	28,80	6	64,80	9,0
18	35,85	7,3	39,53	7,7	70,73	10,3
24	32	8,0	34,45	8,3	57,25	10,7



Σχήμα 10.5: Βάθος ενανθράκωσης σε mm συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στην ατμόσφαιρα

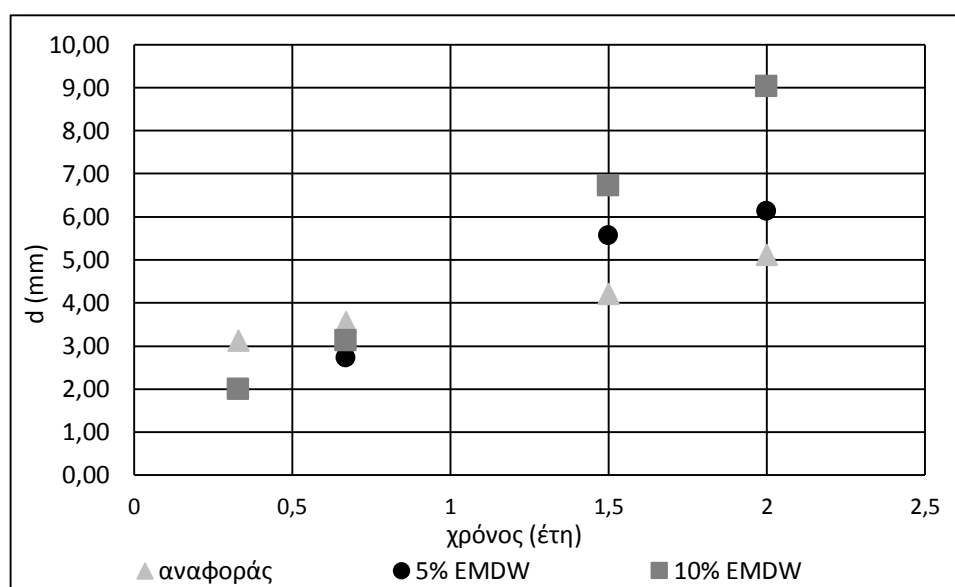
Στο σχήμα 10.5 φαίνεται ότι η προσθήκη του παραπροϊόντος και στα δυο ποσοστά μειώνει σημαντικά την ενανθράκωση διάχυση του CO₂ έπειτα από 12 μήνες έκθεσης σε φυσικό περιβάλλον συγκριτικά με τα δοκίμια χωρίς πρόσθετο. Επίσης, αυξανόμενο το ποσοστό της προσθήκης, το βάθος ενανθράκωσης δεν φαίνεται να διαφοροποιείται από τους 18 μήνες και έπειτα.

10.2.2.3 Βάθος ενανθράκωσης σκυροδέματος σε διάλυμα Na_2SO_4 5% κ.β

Τα δοκίμια εμβάπτιστηκαν σε διάλυμα θειικού Νατρίου και έσπασαν στους 4,8,18,24 μήνες ώστε να μετρηθεί η ενανθράκωση της τσιμεντοκονίας. Ο πίνακας 10.6 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων του βάθους ενανθράκωσης.

Πίνακας 10.6: Βάθος ενανθράκωσης για δοκίμια τσιμεντοκονίας εμβάπτισμένα σε Na_2SO_4 5% κ.β

ΧΡΟΝΟΣ (ΜΗΝΕΣ)	ΧΡΟΝΟΣ (ΕΤΗ)	ΑΝΑΦΟΡΑΣ	5% EMDW	10% EMDW
4	0,33	3,13	2	2
8	0,67	3,56	2,72	3,13
18	1,5	4,21	5,56	6,73
24	2	5,12	6,13	9,03



Σχήμα 10.6: Βάθος ενανθράκωσης συναρτήσει του χρόνου σε mm για δοκίμια σε Na_2SO_4 5% κ.β

Το σχήμα 10.6 παρουσιάζει το βάθος ενανθράκωσης συναρτήσει του χρόνου εμβάπτισης σε διάλυμα Na_2SO_4 . Από το διάγραμμα φαίνεται ότι η προσθήκη 10% EMDW αυξάνει το βάθος ενανθράκωσης μετά από 12 μήνες εμβάπτισης σε Na_2SO_4 συγκριτικά με τις υπόλοιπες κατηγορίες. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη συσσώρευση θειικών αλάτων (εντριγκίτη, γύψος) στους πόρους με αποτέλεσμα τη δημιουργία ρωγμών και την αύξηση της διάχυσης του CO_2 .

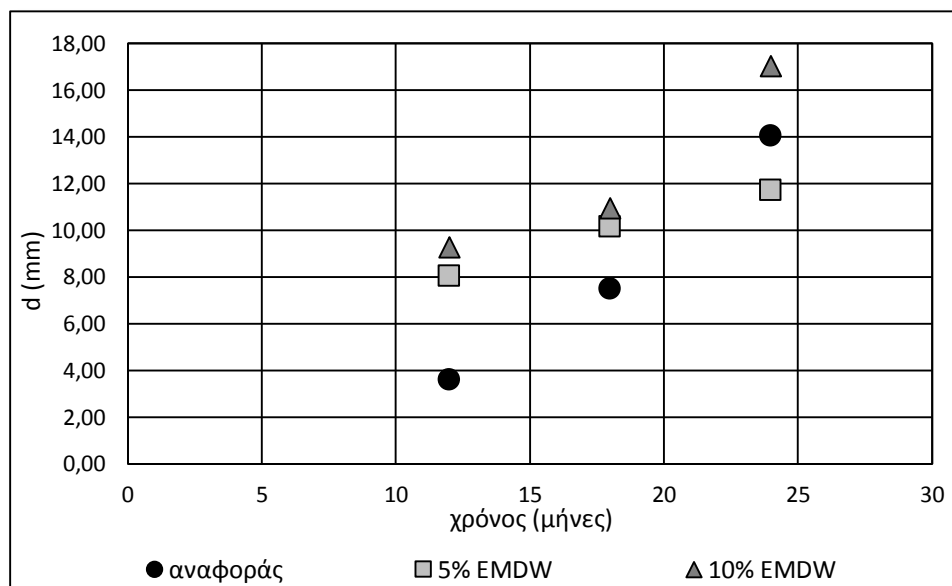
10.2.2.4 Βάθος ενανθράκωσης οπλισμών σε παραθαλάσσιο περιβάλλον

Η εκτίμηση της διάβρωσης των οπλισμών και της ενανθράκωσης του σκυροδέματος πραγματοποιήθηκε με φυσική έκθεση των δοκιμίων τσιμεντοκονίας σε παραθαλάσσιο περιβάλλον στην βιομηχανία Χαλυβουργική Α.Ε. Τα δοκίμια

παρέμειναν στο παραθαλάσσιο/βιομηχανικό περιβάλλον για 24 μήνες και το βάθος ενανθράκωσης μετρήθηκε μετά από 12,18 και 24 μήνες έκθεσης.

Πίνακας 10.7: Αποτελέσματα μέσω των όρων Βάθους ενανθράκωσης για δοκίμια τσιμεντοκονίας εκτεθειμένα σε παραθαλάσσιο περιβάλλον

ΒΑΘΟΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ d (mm)			
χρόνος	5% EMDW	10% EMDW	αναφοράς
12	8,04	9,26	3,58
18	10,14	10,95	7,47
24	11,69	17,03	14,02
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ A (mm ² /yr)			
12	64,64	85,82	12,82
18	68,54	79,86	37,20
24	68,33	145	98,28



Σχήμα 10.7: Βάθος ενανθράκωσης συναρτήσει του χρόνου σε mm για δοκίμια σε παραθαλάσσιο περιβάλλον

Το σχήμα 10.7 παρουσιάζει το βάθος ενανθράκωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης σε παραθαλάσσιο/βιομηχανικό περιβάλλον. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι η προσθήκη 10% EMDW αυξάνει το βάθος ενανθράκωσης σε όλους τους χρόνους που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις συγκριτικά με τις υπόλοιπες κατηγορίες. Τα δοκίμια χωρίς πρόσθετο εμφανίζουν μικρότερα βάθη ενανθράκωσης μέχρι τους 18 μήνες αλλά στους 24 μήνες έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον η σύνθεση με 5% EMDW εμφανίζει καλύτερη συμπεριφορά έναντι της διείσδυσης CO₂.

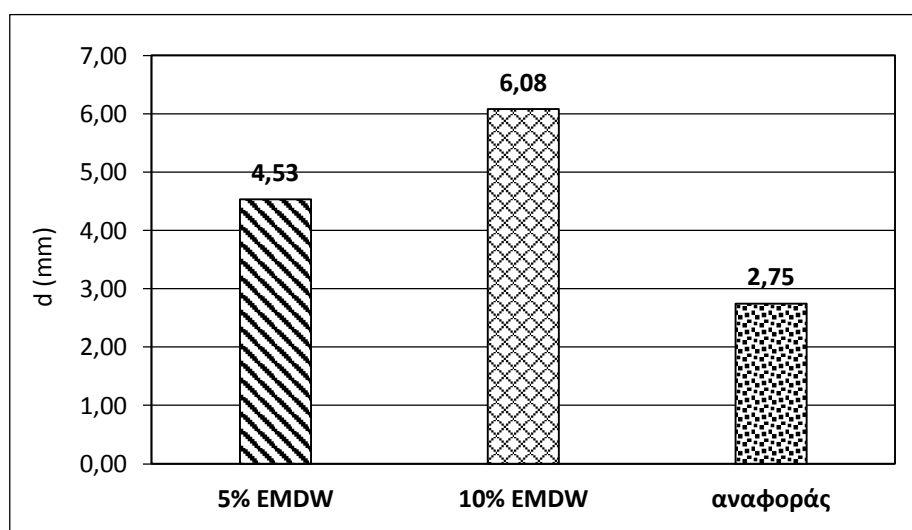
10.2.2.5 Βάθος ενανθράκωσης οπλισμών σε θάλαμο αλατονέφωσης

Για την εκτίμηση της ανθεκτικότητας σε επιταχυνόμενο περιβάλλον διάβρωσης, τα δοκίμια τσιμεντοκονίας παρέμειναν σε θάλαμο αλατονέφωσης για 40 ημέρες και στη συνέχεια εμβαπτίστηκαν μερικώς, σε διάλυμα χλωριούχου Νατρίου 3,5% κ.β για άλλες 50 ημέρες. Οι συνθήκες που επικρατούσαν εντός θαλάμου ήταν υγρασία RH=99%, θερμοκρασία 35 °C και NaCl 5% κ.β.

Ο πίνακας 10.8 παρουσιάζει τα αποτελέσματα όλων των μετρήσεων, τα οποία προβάλλονται στο σχήμα 10.8.

Πίνακας 10.8: Βάθος ενανθράκωσης για δοκίμια τσιμεντοκονίας εντός θαλάμου αλατονέφωσης

	d1 (mm)	d2 (mm)	(d1+d2)/2
ΘΑ-Mn5-1	3,00	1,00	2,00
ΘΑ-Mn5-2	7,00	6,50	6,75
ΘΑ-Mn5-3	5,00	4,60	4,83
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ d (mm)			4,53 ± 1,95
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ A (mm²/yr)			82,0836
	d1 (mm)	d2 (mm)	(d1+d2)/2
ΘΑ-Mn10-1	8,00	7,50	7,75
ΘΑ-Mn10-2	6,00	6,00	6,00
ΘΑ-Mn10-3	4,00	5,00	4,50
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ d (mm)			6,08 ± 1,33
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ A (mm²/yr)			147,8656
	d1 (mm)	d2 (mm)	(d1+d2)/2
ΘΑ-Mn-REF-1	1	2	2,75
ΘΑ-Mn-REF-2	3	2	2,00
ΘΑ-Mn-REF-3	4	5	3,50
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ d (mm)			2,75 ± 0,66
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ A (mm²/yr)			30,25



Σχήμα 10.8: Βάθος ενανθράκωσης σε mm στις 90 ημέρες για δοκίμια εντός θαλάμου αλατονέφωσης

Στο σχήμα 10.8 παρουσιάζεται διάγραμμα του βάθους ενανθράκωσης σε δοκίμια τσιμεντοκονίας στις 90 ημέρες έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον με αυξημένη συγκέντρωση Cl^- . Από το διάγραμμα διαπιστώνεται, ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό της προσθήκης του EMDW τόσο μεγαλώνει το βάθος στο οποίο έχουν ενανθρακωθεί τα δοκίμια τσιμεντοκονίας λόγω του αυξημένου πορώδους που παρουσιάζουν στο χρόνο που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

10.2.2.6 Βάθος ενανθράκωσης οπλισμών σε θάλαμο επιταχυνόμενης ενανθράκωσης

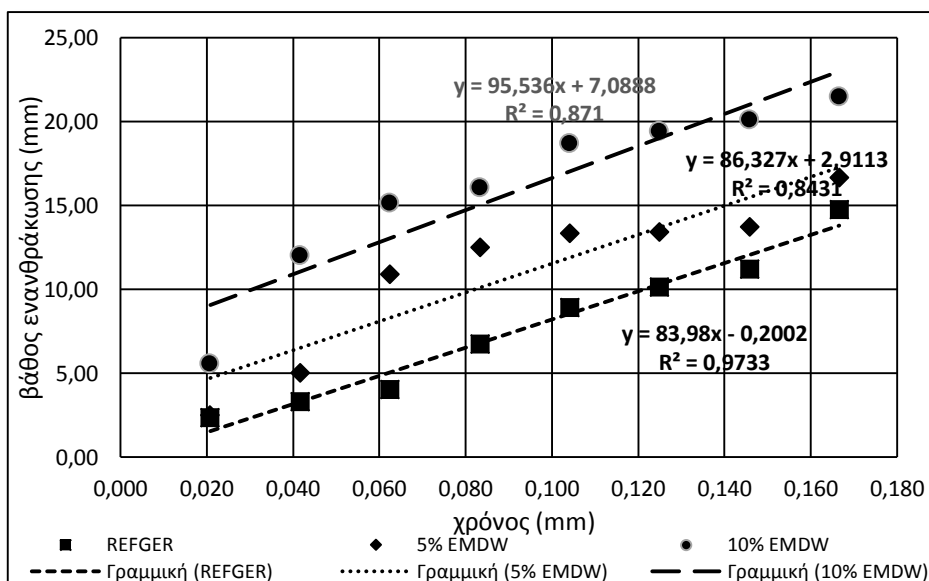
Η ενανθράκωση των δοκιμίων μετρήθηκε μετά από παραμονή των δοκιμίων τσιμεντοκονίας σε θάλαμο επιταχυνόμενης ενανθράκωσης του εργαστηρίου σκυροδέματος της εταιρίας TITAN A.E. Οι συνθήκες εντός του θαλάμου ήταν CO_2 10% κ.β, θερμοκρασία $T=25^\circ C$ και σχετική υγρασία $RH=64\%$. Παρασκευάστηκαν οχτώ δοκίμια για την κάθε μια από τις τρεις σειρές δοκιμίων και η ενανθράκωση μετρήθηκε ανά εβδομάδα για σύνολο οχτώ εβδομάδων έκθεσης στο περιβάλλον διάβρωσης. Τα αποτελέσματα του βάθους ενανθράκωσης συνοψίζονται στον πίνακα 10.9.

Πίνακας 10.9: Βάθος ενανθράκωσης για δοκίμια τσιμεντοκονίας εντός θαλάμου ενανθράκωσης

Χρόνος (εβδομάδες)	Χρόνος (έτη)	αναφοράς	5% EMDW	10% EMDW
1	0,021	2,35	2,49	5,56
2	0,042	3,29	5,01	12,01
3	0,063	4,01	10,89	15,13
4	0,083	6,72	12,50	16,06
5	0,104	8,92	13,35	18,67
6	0,125	10,13	13,42	19,41
7	0,146	11,20	13,73	20,10
8	0,167	14,76	16,65	21,45

Το σχήμα 10.9 παρουσιάζει σε διάγραμμα τα αποτελέσματα του βάθους ενανθράκωσης για δοκίμια που παρέμειναν σε θάλαμο ενανθράκωσης για 8 εβδομάδες. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ανά εβδομάδα.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων όπως εμφανίζονται στο διάγραμμα δείχνουν ότι σε επιταχυνόμενες συνθήκες διάβρωσης με αυξημένη συγκέντρωση CO_2 τα δοκίμια με το EMDW εμφανίζουν μεγαλύτερα βάθη ενανθράκωσης από τα αναφοράς. Συγκεκριμένα αυξανόμενο το ποσοστό της προσθήκης αυξάνεται και το βάθος ενανθράκωσης των δοκιμίων.



Σχήμα 10.9: Βάθος ενανθράκωσης σε mm συναρτήσει του χρόνου παραμονής σε θάλαμο επιταχυνόμενης ενανθράκωσης

10.2.3 Μετρήσεις ολικών ιόντων Χλωρίου σκυροδέματος

10.2.3.1 Ολικά χλωριόντα τσιμεντοκονίας σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

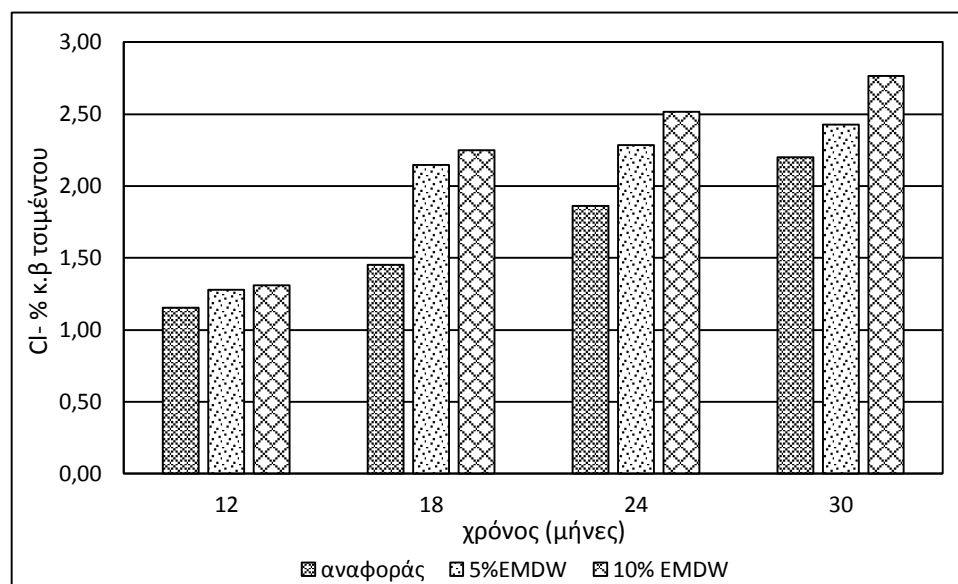
Η συγκέντρωση των συνολικών χλωριόντων υπολογίστηκε σε κυλινδρικά σπλισμένα δοκίμια τσιμεντοκονίας μετά από μερική εμβάπτιση τους σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β στους 12,18,24 και 30 μήνες σε εργαστηριακό περιβάλλον. Ο πίνακας 10.10 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Πίνακας 10.10: Συγκέντρωση ολικών χλωριόντων σε δοκίμια εμβαπτισμένα σε NaCl 3,5% κ.β

χρόνος (μήνες)	Όγκος τιτλοδότησης AgNO ₃ (ml)			Συγκέντρωση ολικών Cl ⁻ (% κ.β τσιμέντου)		
	5% EMDW	10% EMDW	αναφοράς	5% EMDW	10% EMDW	αναφοράς
12	7,2	7,4	6,5	1,28	1,31	1,15
18	12,1	12,7	8,2	2,14	2,25	1.45
24	12,9	14,2	10,5	2,29	2,52	1,86
30	13,7	15,6	12,4	2,43	2,77	2,20

Στο σχήμα 10.10 προβάλλεται η συγκέντρωση των συνολικών ιόντων χλωρίου συναρτήσει του χρόνου εμβάπτισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι στους 12 μήνες έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον η συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου έχει περίπου ίδιες τιμές και για τις τρεις σειρές δοκιμίων ενώ στη συνέχεια παρατηρείται ότι αυξανόμενο το ποσοστό της προσθήκης, αυξάνει και η συγκέντρωση. Από το διάγραμμα επίσης παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη διαφορά με τα δοκίμια αναφοράς υπάρχει στους 18 μήνες ενώ ελαττώνεται έπειτα από 30 μήνες

έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον ειδικότερα μεταξύ των δοκιμών αναφοράς και τα δοκίμια με 5% πρόσθετο (5% EMDW).



Σχήμα 10.10: Συγκέντρωση ολικών χλωριόντων συναρτήσει του χρόνου σε δοκίμια μερικής εμβάπτιση σε NaCl 3,5% κ.β

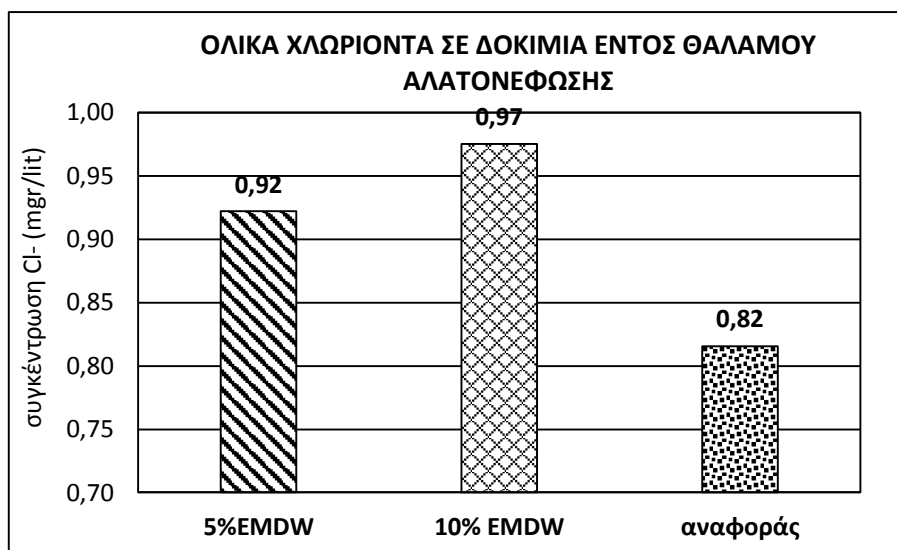
10.2.3.2 Ολικά χλωριόντα τσιμεντοκονίας σε θάλαμο αλατονέφωσης

Η συγκέντρωση των χλωριόντων μετρήθηκε σε επιταχυνόμενο περιβάλλον διάβρωσης μετά από παραμονή δοκιμίων τσιμεντοκονίας σε θάλαμο αλατονέφωσης για 40 ημέρες και στη συνέχεια μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β για 50 ημέρες. Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 10.11.

Πίνακας 10.11: Συγκέντρωση ολικών χλωριόντων σε δοκίμια τσιμεντοκονίας έπειτα από παραμονή σε θάλαμο αλατονέφωσης και εμβάπτιση σε NaCl 3,5% κ.β

	Όγκος τιτλοδότησης AgNO ₃ (ml)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ (% κ.β τσιμέντου)
αναφοράς	5,2	0,82
5% EMDW	5,5	0,92
10% EMDW	4,6	0,97

Στο σχήμα 10.11 δίνεται η συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου για τις τρεις σειρές δοκιμών μετά από έκθεση σε επιταχυνόμενο περιβάλλον διάβρωσης. Τα αποτελέσματα συμφωνούν με αυτά της μερικής εμβάπτισης σε διάλυμα NaCl δηλαδή όσο αυξάνεται η προσθήκη του EMDW αυξάνεται και η συγκέντρωση και το γεγονός αυτό πιθανόν να οφείλεται στο αυξημένο πορώδες που παρουσιάζουν αρχικά τα δοκίμια με το πρόσθετο.



Σχήμα 10.11: Συγκέντρωση ολικών Χλωριόντων σε δοκίμια τσιμεντοκονίας έπειτα από παραμονή σε θάλαμο αλατονέφωσης και εμβάπτιση σε NaCl 3,5% κ.β

10.2.3.3 Ολικά χλωρίοντα σε κυβικά δοκίμια σκυροδέματος μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

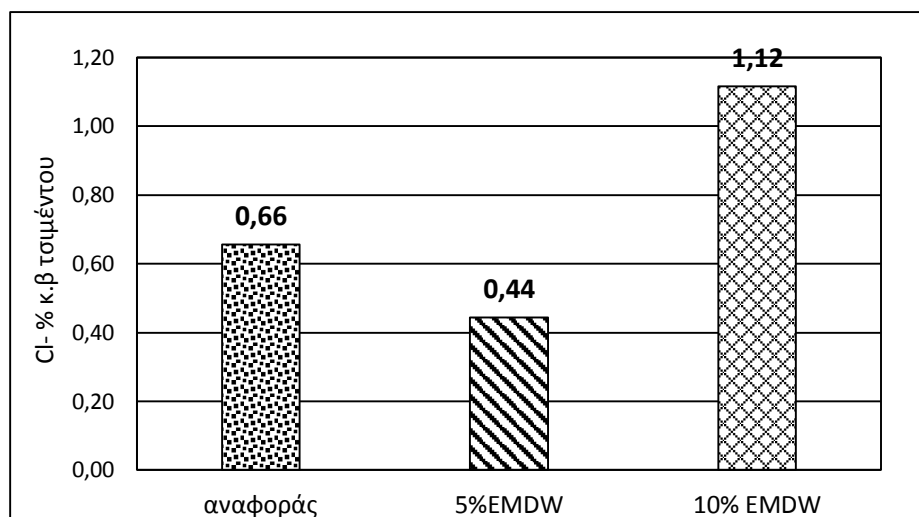
Η συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου στα δοκίμια σκυροδέματος που μετρήθηκαν οι μηχανικές αντοχές, υπολογίστηκε έπειτα από μερική εμβάπτιση τους σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β στις 130 ημέρες.

Τα δοκίμια σκυροδέματος ήταν κυβικά 100x100x100 mm, χωρίς σπλισμό και για την κατασκευή τους χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο **CEM II 42,5N**, ασβεστολιθικά αδρανή από το όρος Τρόδος (άμμος, γαρμπίλι και χαλίκι) και νερό δικτύου Λευκωσίας. Σχεδιάστηκε σκυρόδεμα **C 20/25**, λόγο W/C=0,65 και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 10.12.

Πίνακας 10.12: Συγκέντρωση ολικών χλωριόντων σε κυβικά δοκίμια σκυροδέματος και εμβάπτιση σε NaCl 3,5% κ.β για 130 ημέρες

	Όγκος τιτλοδότησης AgNO ₃ (ml)	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ (% κ.β τσιμέντου)
αναφοράς	3,7	0,66
5%EMDW	2,5	0,44
10% EMDW	6,3	1,12

Στο σχήμα 10.12 παρουσιάζεται η συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου για τις τρεις κατηγορίες δοκιμών στις 130 ημέρες. Από το διάγραμμα φαίνεται σημαντική αύξηση των χλωριόντων στα δοκίμια που έχει αντικατασταθεί το τσιμέντο σε ποσοστό 10% από EMDW ενώ τα δοκίμια με 5% εμφανίζουν τη χαμηλότερη τιμή.



Σχήμα 10.12: Συγκέντρωση ολικών χλωριόντων σε κυβικά δοκίμια σκυροδέματος μετά από εμβάπτιση σε NaCl 3,5% κ.β στις 130 ημέρες

10.2.3.4 Ολικά χλωριόντα σε δοκίμια εκτεθειμένα σε παραθαλάσσιο περιβάλλον

Η συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου μετρήθηκε έπειτα από παραμονή κυλινδρικών οπλισμένων δοκιμίων τσιμεντοκονίας σε παραθαλάσσιο περιβάλλον στην περιοχή της Χαλυβουργικής. Συγκεκριμένα κατασκευάστηκαν 8 δοκίμια αναφοράς, 8 με αντικατάσταση 5% από EMDW και 8 με 10% EMDW. Οι μετρήσεις έγιναν με τη μέθοδο Mohr στους 12,18 και 24 μήνες έκθεσης και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους πίνακες 10.13 και 10.14.

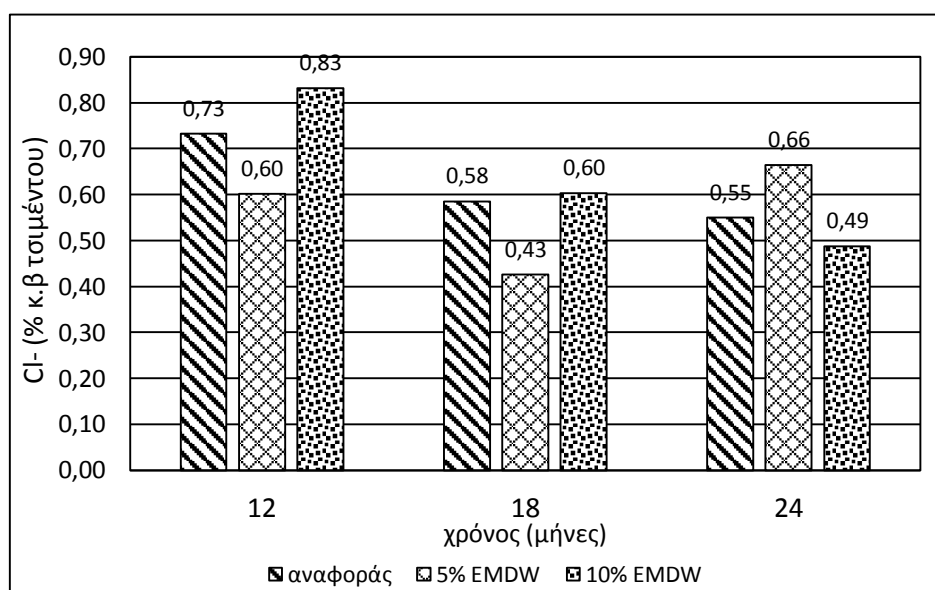
Πίνακας 10.13: Όγκος AgNO₃ που χρειάστηκε για την τιτλοδότηση στη μέθοδο Mohr

Χρόνος έκθεσης: 12 μήνες		Χρόνος έκθεσης: 18 μήνες		Χρόνος έκθεσης: 24 μήνες	
5% EMDW	Όγκος AgNO ₃ (ml)	5% EMDW	Όγκος AgNO ₃ (ml)	5% EMDW	Όγκος AgNO ₃ (ml)
ΧΑΛ-Mn5-5	3,15	ΧΑΛ-Mn5-1	2,80	ΧΑΛ-Mn5-3	3,7
ΧΑΛ-Mn5-8	3,25	ΧΑΛ-Mn5-2	2,00	ΧΑΛ-Mn5-4	3,8
ΧΑΛ-Mn5-7	3,50				3,75
ΧΑΛ-Mn5-6	3,65				
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	3,39	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	2,40	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	3,75
10% EMDW		10% EMDW		10% EMDW	
ΧΑΛ-Mn10-8	4,75	ΧΑΛ-Mn10-4	3,60	ΧΑΛ-Mn10-1	2,8
ΧΑΛ-Mn10-3	2,90	ΧΑΛ-Mn10-7	3,20	ΧΑΛ-Mn10-2	2,7
ΧΑΛ-Mn10-5	5,90				
ΧΑΛ-Mn10-6	5,20				
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	4,69		3,40	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	2,75
ΑΝΑΦΟΡΑΣ		ΑΝΑΦΟΡΑΣ		ΑΝΑΦΟΡΑΣ	
ΧΑΛ-REF-4	5,50	ΧΑΛ-REF-1	3,30	ΧΑΛ-REF-2	3,20
ΧΑΛ-REF-6	3,35	ΧΑΛ-REF-3	3,30	ΧΑΛ-REF-7	3,00

ΧΑΛ-REF-8	3,35		3,30		
ΧΑΛ-REF-5	4,30				
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	4,13	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	3,30	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	3,10

Πίνακας 10.14: Συγκέντρωση ολικών χλωριόντων σε δοκίμια τσιμεντοκονίας σε παραθαλάσσιο περιβάλλον

χρόνος (μήνες)	όγκος νιτρικού αργύρου (ml)			συγκέντρωση Cl ⁻ (% κ.β τσιμέντου)		
	5% EMDW	10% EMDW	αναφοράς	5% EMDW	10% EMDW	αναφοράς
12	3,39	4,69	4,13	0,60	0,83	0,73
18	2,40	3,40	3,30	0,43	0,60	0,58
24	3,75	2,75	3,10	0,66	0,49	0,55



Σχήμα 10.13: Συγκέντρωση ολικών χλωριόντων σε δοκίμια τσιμεντοκονίας συναρτήσει του χρόνου έκθεσης σε παραθαλάσσιο περιβάλλον

Το σχήμα 10.13 παρουσιάζει τη συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου συναρτήσει του χρόνου μετά από παραμονή των δοκιμίων στη βιομηχανία Χαλυβουργική Α.Ε. Από το γράφημα φαίνεται ότι τα δοκίμια με 10% EMDW στους 12 μήνες έχουν αυξημένη συγκέντρωση χλωριόντων ενώ στους 24 μήνες έχουν τη χαμηλότερη, συγκριτικά με τις άλλες δύο σειρές δοκιμίων. Τα αποτελέσματα έρχονται σε αντίθεση με τα δοκίμια που εμβαπτίστηκαν σε εργαστηριακό περιβάλλον σε NaCl 3,5% κ.β και τα δοκίμια του θαλάμου αλατονέφωσης γεγονός που πιθανόν οφείλεται σε έκπλυση των δοκιμίων από τις βροχοπτώσεις.

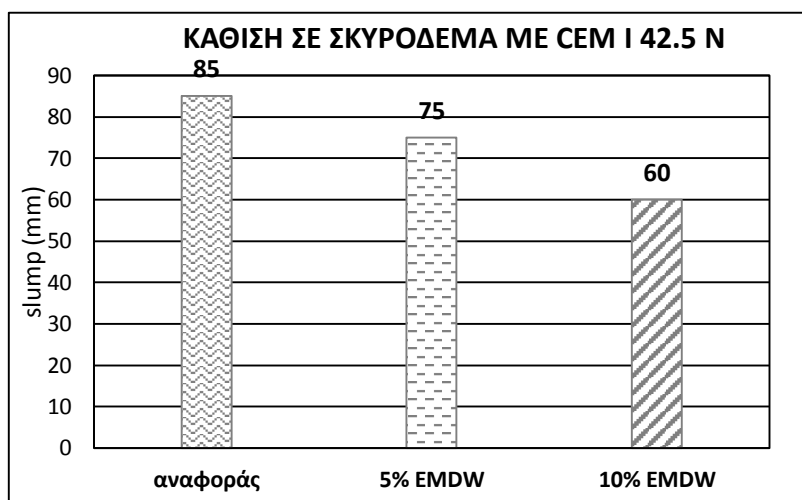
10.2.4 Μηχανικές αντοχές σκυροδέματος

10.2.4.1 Μετρήσεις θλιπτικής αντοχής

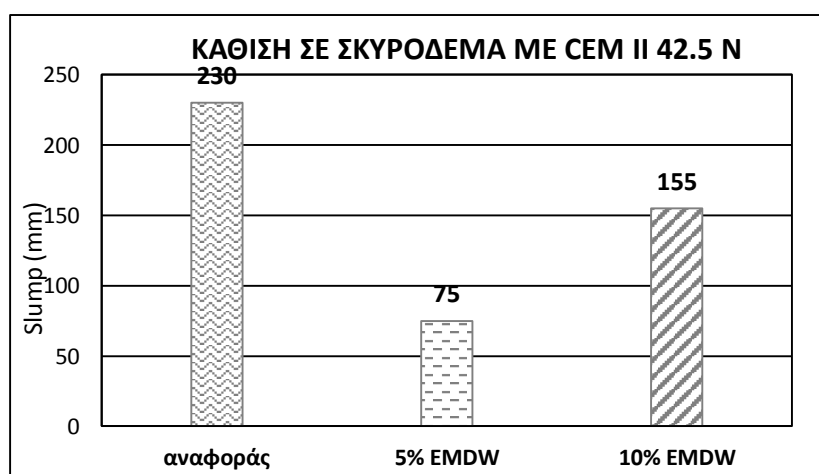
Η θλιπτική αντοχή των δοκιμών μετρήθηκε σε κυβικά δοκίμια ακμής 100mm και 150 mm σύμφωνα με το πρότυπο **BS EN 12390-3**. Για τη μέτρηση της αντοχής σε θλίψης κατασκευάστηκαν τρεις σειρές δοκιμών (αναφοράς, 5% EMDW, 10% EMDW) και ο σχεδιασμός των μιγμάτων δίνεται στους πίνακες 7.12 και 7.13.

10.2.4.1.1 Δοκιμή κάθισης νωπού σκυροδέματος

Η κάθιση του σκυροδέματος μετρήθηκε κατά τη σκυροδέτηση σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM C143**. Το σχήμα 9.14 παρουσιάζει την κάθιση σε σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο CEM I 42.5N και W/C=0,57 ενώ στο σχήμα 9.15 τσιμέντο CEM II 42.5N και W/C=0,65. Και στα δύο μίγματα χρησιμοποιήθηκαν ασβεστολιθικά αδρανή και σχεδιάστηκε σκυρόδεμα C 20/25.



Σχήμα 10.14: Κάθιση σε νωπό σκυρόδεμα με CEM I 42.5N και W/C=0,57



Σχήμα 10.15: Κάθιση σε νωπό σκυρόδεμα με CEM II 42.5N και W/C=0,65

Τα σχήματα 10.14 & 10.15 παρουσιάζουν την κάθιση νωπού σκυροδέματος για τους δύο τύπους τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία. Η μεγάλη διαφορά στην εργασιμότητα των δύο μιγμάτων οφείλεται στο μεγαλύτερο λόγο νερό:τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε στο δεύτερο μίγμα (0,65 αντί 0,57).

10.2.4.1.2 Μετρήσεις θλιπτικής αντοχής μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Η θλιπτική αντοχή μετρήθηκε σε κυβικά δοκίμια ακμής 100mm μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β στις 7,28,70,100 και 130 ημέρες. Συνολικά κατασκευάστηκαν τρία μίγματα σκυροδέματος C 20/25 στο εργαστήριο οπλισμένου σκυροδέματος του πανεπιστημίου Κύπρου (αναφοράς, 5%EMDW, 10%EMDW). Η αντοχή σε θλίψη μετρήθηκε σε μηχανή μέγιστου φορτίου 5000kN και ταχύτητα 0,5 MPa/s.

Η αναλογία αδρανών υλικών ήταν άμμος:γαρμπίλι:χαλίκι=0,4:0,35:0,25 και ο λόγος W/C=0,65. Συνολικά κατασκευάστηκαν 54 κυβικά δοκίμια ακμής 100mm χωρίς οπλισμό και το εργαστηριακό ανάμιγμα φαίνεται στον πίνακα 10.16. Αξίζει να σημειωθεί πως τα ασβεστολιθικά αδρανή που χρησιμοποιούνται στην Κύπρο έχουν αυξημένη υγρασία και απορροφητικότητα (πίνακας 10.15), οπότε έγινε διόρθωση του νερού στο μίγμα σκυροδέματος. Αυτή η διόρθωση αύξησε το λόγο W/C σε 0,787.

Πίνακας 10.15: Ειδικό βάρος και απορροφητικότητα υλικών

	ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ	ΑΠΟΡ/ΤΑ
ΑΜΜΟΣ	2,58	2,00%
ΓΑΡΜΠΙΛΙ	2,52	3,63%
ΧΑΛΙΚΙ	2,5	3,49%
ΝΕΡΟ	1,00	-
ΤΣΙΜΕΝΤΟ	3,15	-

Πίνακας 10.16: Εργαστηριακό ανάμιγμα για δοκίμια μέτρησης της θλιπτικής αντοχής

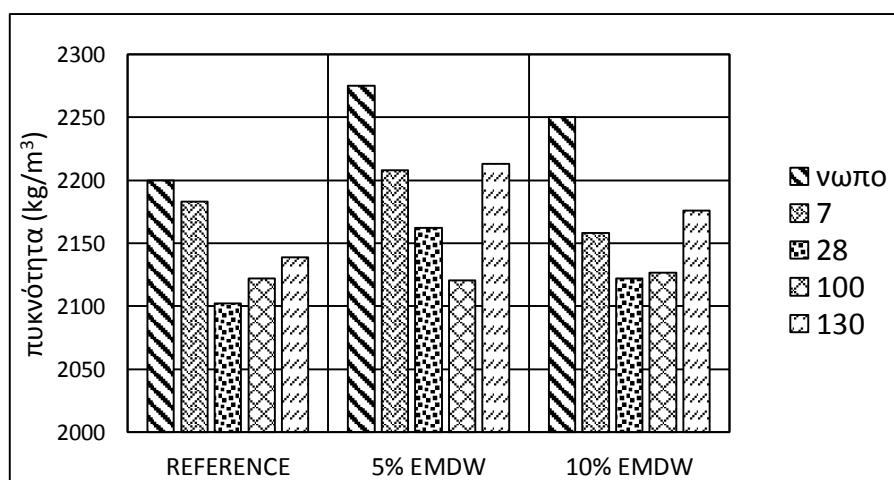
ΕΙΔΟΣ ΥΛΙΚΩΝ	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΑΝΑΜΙΓΜΑ		
	ΑΝΑΦΟΡΑΣ	5% EMDW	10% EMDW
άμμος	36,034 kg	36,034 kg	36,034 kg
γαρμπίλι	30,796 kg	30,796 kg	30,796 kg
χαλίκι	21,823 kg	21,823 kg	21,823 kg
νερό	12,320 kg	12,320 kg	12,320 kg
διορθωμένο νερό	14,92 kg	14,92 kg	14,92 kg
Τσιμέντο CEM II 42.5N	18,954 kg	18,006 kg	17,0586 kg
EMDW	0,000 kg	0,9477 kg	1,8954 kg

Πίνακας 10.17: Αντοχή σε μονοαξονική καταπόνηση κατά τη δοκιμή θλίψης σε δοκίμια σκυροδέματος

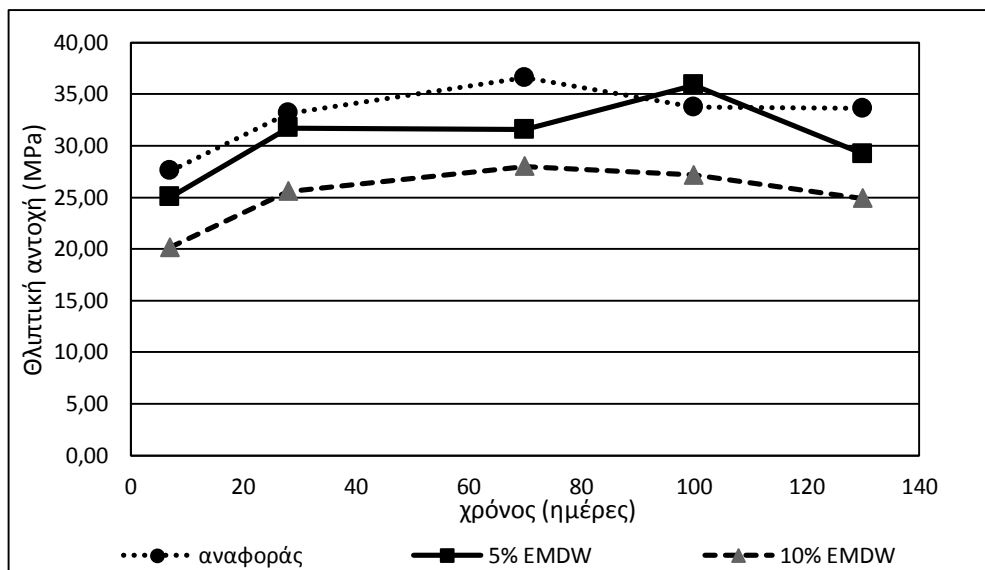
7 ημέρες				100 ημέρες			
κύβος	αναφοράς	5% EMDW	10% EMDW	CUBE	αναφοράς	5% EMDW	10% EMDW
1	27,90		20,13	1	34,90	36,12	27,54
2	27,79	24,74	18,36	2	31,03	36,04	27,78
3	27,00	25,32	21,92	3	33,21	35,42	26,42
μέσος όρος	27,56±0,40	25,03±0,29	20,14±1,45	4	35,84		26,93
28 ημέρες				μέσος όρος	33,75±1,83	35,86±0,31	27,17±0,53
κύβος	αναφοράς	5% EMDW	10% EMDW	130 ημέρες			
1	34,51	31	26,05	κύβος	αναφοράς	5% EMDW	10% EMDW
2	31,74	33,3	26,05	1	38,73	30,39	23,76
3	33,15	30,84	24,64	2	31,97	29,2	24,2
μέσος όρος	33,13±1,13	31,71±1,12	25,58±0,66	3	31,38	31,26	26,45
70 ημέρες				4	31,01	31,81	27,33
κύβος	αναφοράς	5% EMDW	10% EMDW	5	35,31	29,42	22,74
1	37,77	27,46	26,75	6	33,19	23,06	
2	37,16	31,58	25,27	μέσος όρος	33,60±2,70	29,19±2,89	24,90±1,72
3	34,85	35,69	31,95				
μέσος όρος	36,59±1,26	31,58±3,36	27,99±2,86				

Πίνακας 10.18: Μέσοι όροι θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

	αναφοράς	5% EMDW	10% EMDW
f_{cb} 7 (MPa)	27,56	25,03	20,14
f_{cb} 28 (MPa)	33,13	31,71	25,58
f_{cb} 70 (MPa)	36,59	31,58	27,99
f_{cb} 100 (MPa)	33,75	35,86	27,17
f_{cb} 130 (MPa)	33,60	29,19	24,90



Σχήμα 10.16: Πυκνότητες νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος (kg/m^3) σε Δοκίμια εμβαπτισμένα σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β



Σχήμα 10.17: Θλιπτική αντοχή κυβικών δοκιμίων σκυροδέματος (MPa) εμβαπτισμένα σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Στο σχήμα 10.17 προβάλλονται οι θλιπτικές αντοχές των τριών σειρών δοκιμίων μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β. Από το διάγραμμα γίνεται αντιληπτό ότι οι αντοχές των δοκιμίων με 10% EMDW είναι μειωμένες συγκριτικά με τα αναφοράς και ακολουθούν τα 5% EMDW. Επίσης φαίνεται ότι στα δοκίμια αναφοράς και στα 10% EMDW μειώνεται η θλιπτική αντοχή μετά από 70 ημέρες μερική εμβάπτιση, ενώ στα δοκίμια με 5% πρόσθετο αυτό συμβαίνει στις 100 ημέρες. Η μείωση της θλιπτικής αντοχής συναρτήσει το χρόνου έκθεσης σε περιβάλλον χλωριόντων λόγω διάλυσης/αποσάθρωσης της τσιμεντοκονίας έχει μελετηθεί εκτεταμένα και από άλλους ερευνητές (Abosrra et al., 2011).

10.2.4.1.3 Μετρήσεις θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος μετά από συντήρηση στις 7 & 28 ημέρες

Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος μετρήθηκε στο εργαστήριο οπλισμένου σκυροδέματος της εταιρίας TITAN A.E σε κυβικά δοκίμια ακμής 150mm. Συνολικά κατασκευάστηκαν εννέα (9) δοκίμια με τσιμέντο CEM I 42.5N, ασβεστολιθική άμμος λατομείου και νερό δικτύου με λόγο W/C=0,57. Οι ποσότητες των υλικών δίνονται στον πίνακα 9.17. Οι μήτρες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν χαλύβδινες και λιπάνθηκαν εσωτερικά ώστε να είναι ευκολότερη η εξαγωγή των δοκιμίων. Τα δοκίμια ξεκαλουπώθηκαν στις 24 ώρες και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν σε θάλαμο συντήρησης με συνθήκες T=25°C, και υγρασία RH=99% για επτά (7) ημέρες. Η θλιπτική αντοχή μετρήθηκε στις 7 και 28 ημέρες.

Ο πίνακας 10.19 παρουσιάζει την πυκνότητα του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος για τις τρεις σειρές δοκιμών ενώ ο πίνακας 10.21 τα αποτελέσματα των μετρήσεων θλίψης.

Πίνακας 10.19: Πυκνότητα νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος μετά από συντήρηση

	Νωπό σκυρόδεμα	7 ημέρες	28 ημέρες
αναφοράς	2386	2360	2349
5% EMDW	2392	2358	2356
10% EMDW	2402	2366	2357

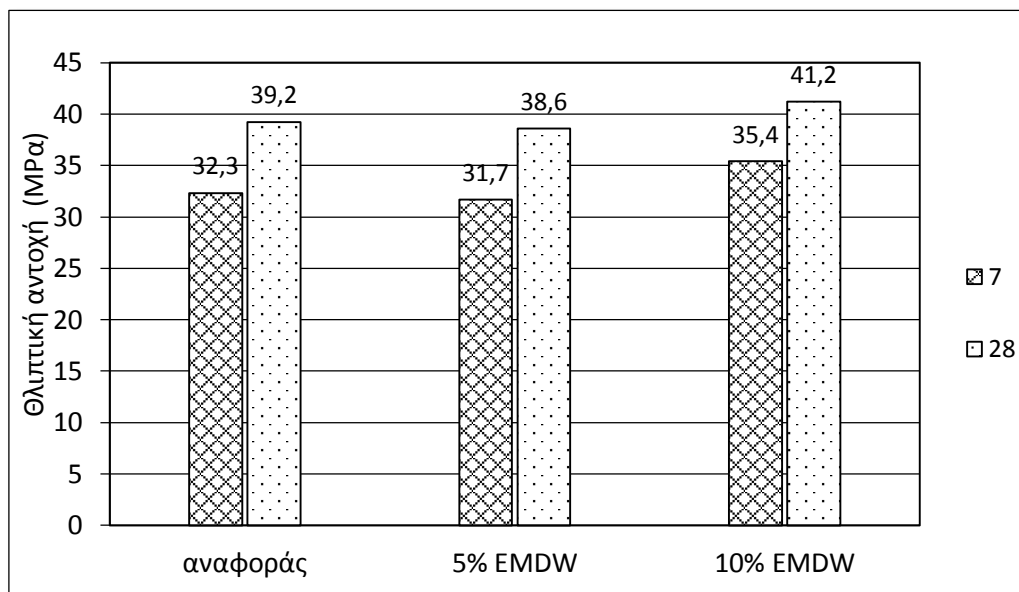
Πίνακας 10.20: ποσότητες υλικών για κυβικά δοκίμια ακμής 150mm

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΑΝΑΜΙΓΜΑ

	αναφοράς	5% EMDW	10% EMDW
ΑΜΜΟΣ	21,423 kg	21,423 kg	21,423 kg
ΓΑΡΜΠΙΛΙ	18,745 kg	18,745 kg	18,745 kg
ΧΑΛΙΚΙ	13,389 kg	13,389 kg	13,389 kg
ΝΕΡΟ	6,002 kg	6,002 kg	6,002 kg
CEM I 42,5N	10,530 kg	10,0035 kg	9,477 kg
ΠΡΟΣΘΕΤΟ	0,000 kg	0,5265 kg	1,053 kg
ΣΥΝΟΛΟ	70,090 kg	70,090 kg	70,090 kg

Πίνακας 10.21: Μέσοι όροι θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος

7 ημέρες		
Κατηγορία δοκιμών	ΦΟΡΤΙΟ (KN)	ΤΑΣΗ (MPa)
αναφοράς	726	32,3
5% EMDW	713	31,7
10% EMDW	797	35,4
28 ημέρες		
Κατηγορία δοκιμών	ΦΟΡΤΙΟ (KN)	ΤΑΣΗ (MPa)
αναφοράς-1	867	38,5
αναφοράς-2	898	39,9
μέσος όρος	883	39,2
5% EMDW-1	863	38,4
5% EMDW-2	872	38,8
μέσος όρος	868	38,6
10% EMDW-1	885	39,3
10% EMDW-2	968	43
μέσος όρος	927	41,2



Σχήμα 10.18: θλιπτική αντοχή κυβικών δοκιμίων σκυροδέματος μετά από συντήρηση

Στο Σχήμα 10.18 προβάλλεται η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος για τις τρεις σειρές δοκιμίων μετά από συντήρηση στις 7 και 28 ημέρες. Από το διάγραμμα γίνεται αντιληπτό ότι η προσθήκη του EMDW δεν μειώνει τις αντοχές συγκριτικά με τα δοκίμια αναφοράς αλλά η προσθήκη 10% παρουσιάζει ελαφρώς αυξημένες τιμές κατά 9,6% στις 7 ημέρες και 5% στις 28 ημέρες.

10.2.4.1.4 Μετρήσεις θλιπτικής αντοχής μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα Na_2SO_4 5% κ.β.

Για τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος σε περιβάλλον θεικών ιόντων παρασκευάστηκαν δύο σειρές δοκιμίων (αναφοράς, 10% EMDW). Ο συνολικός αριθμός των δοκιμίων ακμής 100mm ήταν δεκαπέντε (15) και εμβαπτίστηκαν σε Na_2SO_4 5% κ.β. Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν με βάση το πρότυπο **EN 197-1** και η θλιπτική αντοχή μετρήθηκε σύμφωνα με **BS EN 1230-3**.

Τα καλούπια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν πλαστικά και λιπάνθηκαν εσωτερικά πριν τη σκυροδέτηση. Μετά το ξεκαλούπωμα ακολούθησε συντήρηση σε δεξαμενή για 7 ημέρες και στη συνέχεια εμβαπτίστηκαν στο θειικό Νάτριο. Η θλιπτική αντοχή μετρήθηκε στις 28,100,130 ημέρες και η ταχύτητα φόρτισης της μηχανής ήταν 0,5MPa/s.

Ο λόγος νερού: τσιμέντου διατηρήθηκε σταθερός και ίσος με 0,65. Στον πίνακα 10.22 που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι ποσότητες υλικών των μιγμάτων ενώ οι πίνακες 10.23 & 10.24 δίνουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων της θλιπτικής αντοχή όλων των δοκιμίων.

Πίνακας 10.22: ποσότητες υλικών για δοκίμια ακμής 100mm

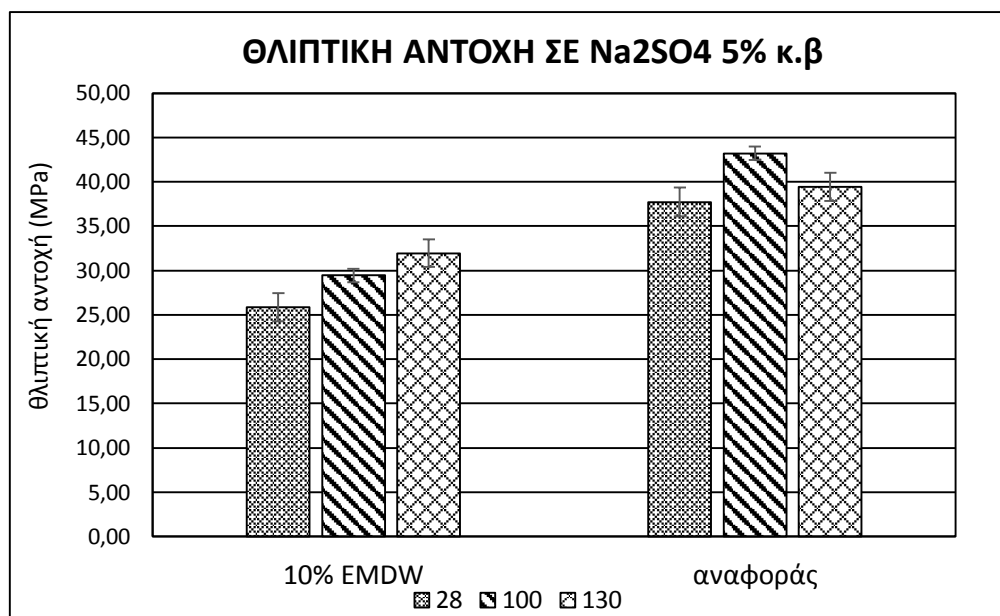
	αναφοράς	10% EMDW
ΑΜΜΟΣ	10,009 kg	10,009 kg
ΓΑΡΜΠΙΛΙ	8,554 kg	8,554 kg
ΧΑΛΙΚΙ	6,062 kg	6,062 kg
ΝΕΡΟ	3,422 kg	3,422 kg
ΔΙΟΡΘΩΜΕΝΟ ΝΕΡΟ	4,14 kg	4,14 kg
CEM II 42,5N	5,265 kg	4,739 kg
EMDW	0,000 kg	0,527kg

Πίνακας 10.23: Αποτελέσματα θλίψης για δοκίμια εμβαπτισμένα σε Na_2SO_4 5% κ.β

28 ημέρες		
	10% EMDW	αναφοράς
κύβος 1	27,34	38,69
κύβος 2	26,64	37,62
κύβος 3	23,62	36,83
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	25,87±1,61	37,71±0,76
100 ημέρες		
	10% EMDW	αναφοράς
κύβος 1	32,48	41,57
κύβος 2	26,42	44,87
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	29,45±3,03	43,22±1,65
130 ημέρες		
	10% EMDW	αναφοράς
κύβος 1	30,4	41,04
κύβος 2	33,48	25,98
κύβος 3		37,82
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	31,94±1,54	34,95±6,48

Πίνακας 10.24: Μέσοι όροι θλιπτικής αντοχής και πυκνότητες σκυροδέματος

	10% EMDW	αναφοράς
28 ημέρες	25,87	37,71
density-28	2186	2172
100 ημέρες	29,45	43,22
density-100	2182	2197
130 ημέρες	31,94	39,43
density-130	2177	2224

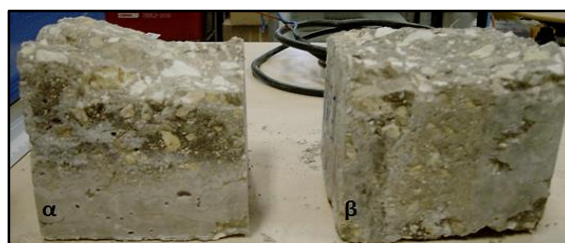


Σχήμα 10.19: Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος μετά από εμβάπτιση δοκιμίων σε Na₂SO₄ 5% κ.β

Από το σχήμα 10.19 διαπιστώνεται ότι τα δοκίμια χωρίς το πρόσθετο εμφανίζουν υψηλότερη θλιπτική αντοχή από τα δοκίμια με 10% EMDW σε όλες τις ηλικίες που έγιναν οι δοκιμές. Επίσης, ενώ οι αντοχές των δοκιμίων με το πρόσθετο αυξάνονται μέχρι τις 130 ημέρες, τα αναφοράς εμφανίζουν πτώση των αντοχών τους μετά από τις 100 ημέρες. Οι μειωμένες αντοχές οφείλονται στη μείωση του ποσοστού του τσιμέντου από αποσάθρωση, εξαιτίας των θειικών ιόντων. Το γεγονός αυτό προκάλεσε αστοχία των δοκιμίων κατά τη θλίψη όπως φαίνεται στο σχήμα 10.21.



Σχήμα 10.20: δοκίμια με 10% EMDW (α) και αναφοράς (β) έπειτα από 130 ημέρες μερικής εμβάπτισης σε Na₂SO₄ 5% κ.β.



Σχήμα 10.21: Αστοχία κατά τη δοκιμή θλίψης για δοκίμιο με 10% EMDW (α) και αναφοράς (β) έπειτα από 130 ημέρες μερικής εμβάπτισης σε Na₂SO₄ 5% κ.β

10.2.4.2 Μετρήσεις εφελκυστικής αντοχής με διάρρηξη

Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος μετρήθηκε με τη δοκιμή διάρρηξης (Brazilian test) σε κυλινδρικά δοκίμια ύψους 300mm και διαμέτρου 150mm. Η μηχανή θλίψης ήταν η ADVANTEST 9 controls και ταχύτητα φόρτισης ήταν 0,05 MPa/s.

10.2.4.2.1 Μετρήσεις εφελκυστικής αντοχής μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Η δοκιμή διάρρηξης πραγματοποιήθηκε έπειτα από μερική εμβάπτιση σε NaCl 3,5% κ.β στις 7,28,100,130 ημέρες στο εργαστήριο οπλισμένου σκυροδέματος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών & Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Κύπρου.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στον πίνακα 10.25.

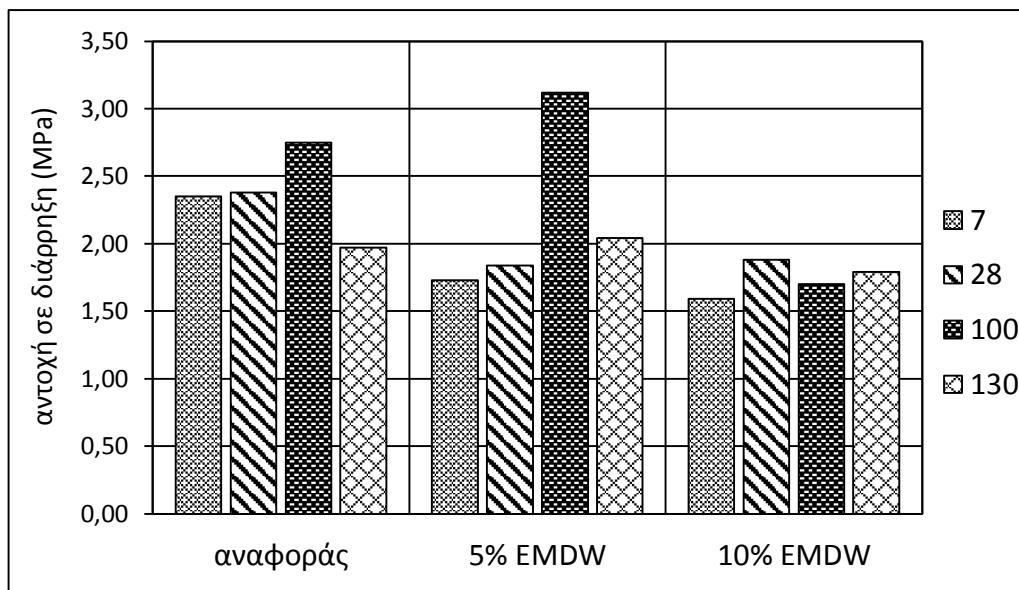
Πίνακας 10.25: Αντοχή σε διάρρηξη (Brazilian test) και πυκνότητα σκυροδέματος

	αναφοράς	5% EMDW	10% EMDW
f_c-7 (MPa)	2,35	1,73	1,59
d 7 (kg/m³)	2194,15	2211,00	2141,00
f_c-28 (MPa)	2,38	1,84	1,88
d 28 (kg/m³)	2160	2114	2137
f_c-100 (MPa)	2,75	3,12	1,70
d 100 (kg/m³)	2110	2111	2063
f_c-130 (MPa)	1,97	2,04	1,79
d 130 (kg/m³)	2076	2095	2088

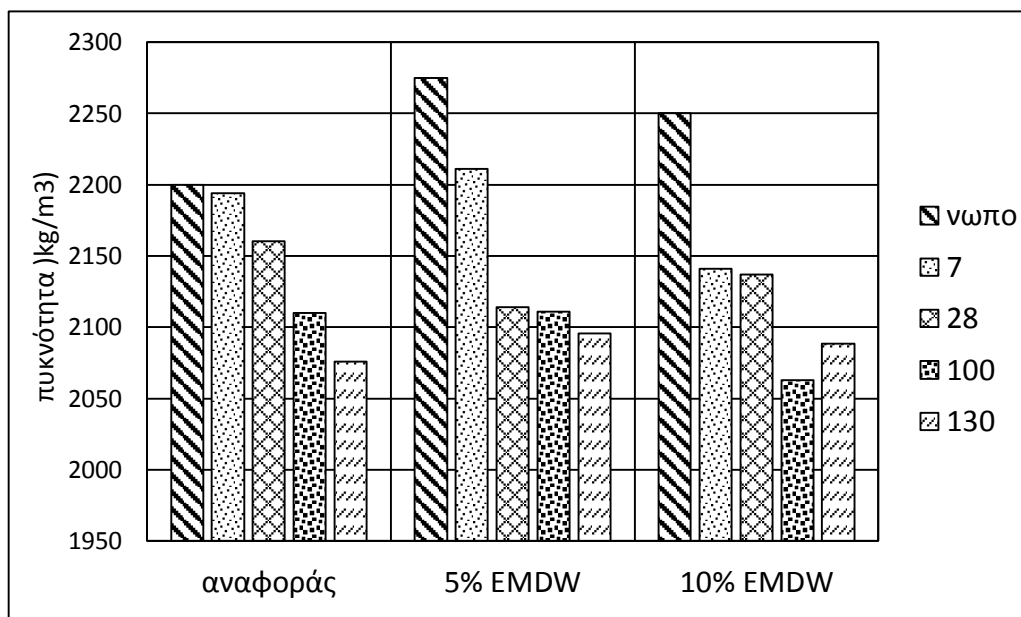
Το σχήμα 10.22 παρουσιάζει τη αντοχή σε διάρρηξη κυλινδρικών δοκιμών συναρτήσει του χρόνου εμβάπτισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β.

Από το διάγραμμα μπορούν να εξαχθούν τα πιο κάτω συμπεράσματα:

- Τα δοκίμια αναφοράς μέχρι τις 28 ημέρες έχουν μεγαλύτερη αντοχή από τις άλλες δυο κατηγορίες δοκιμών,
- Η προσθήκη του παραπροϊόντος και στα δύο ποσοστά δεν διαφοροποιεί σημαντικά την αντοχή σε διάρρηξη σε όλες τις ηλικίες,
- Στις 130 ημέρες και οι τρεις κατηγορίες δοκιμών έχουν περίπου ίδια αντοχή,
- Η υψηλή αντοχή του 5% EMDW στις 100 ημέρες πιθανόν να οφείλεται στο δοκίμιο.



Σχήμα 10.22: Αντοχή σε διάρρηξη κυλινδρικών δοκιμών σκυροδέματος σε NaCl 3,5% κ.β



Σχήμα 10.23: Πυκνότητες νωπού σκυροδέματος και κυλινδρικών δοκιμών σε NaCl 3,5% κ.β

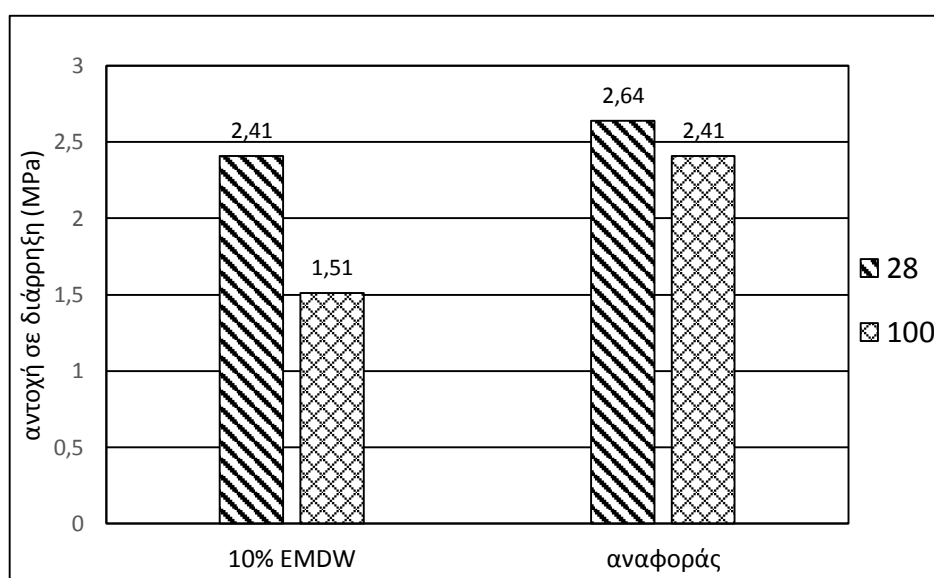
10.2.4.2.2 Μετρήσεις εφελκυστικής αντοχής μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα Na₂SO₄ 5% κ.β

Η αντοχή των δοκιμών σε διάρρηξη σε περιβάλλον θειικών ιόντων μετρήθηκε στις 28 και 100 ημέρες έκθεσης σε διάλυμα Na₂SO₄ 5% κ.β. Ο πίνακας 10.26 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Πίνακας 10.26: Αντοχή σε διάρρηξη (Brazilian test) και πυκνότητα σκυροδέματος για δοκίμια εμβαπτισμένα σε Na₂SO₄ 5% κ.β

Χρόνος (ημέρες)	Αντοχή σε διάρρηξη (MPa)		Πυκνότητα (kg/m ³)	
	EMD 10%	REF	EMD 10%	REF
28	2,41 MPa	2,64 MPa	2149 kg/m ³	2027 kg/m ³
100	1,51 MPa	2,41 MPa	2129 kg/m ³	2169 kg/m ³

Στο σχήμα 10.24 δίνεται το γράφημα της αντοχής σε εφελκυσμό με διάρρηξη σε περιβάλλον θεικών ιόντων. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι τα δοκίμια με το πρόσθετο εμφανίζουν χαμηλότερες αντοχές από τα αναφοράς στις 28 και 100 ημέρες εμβάπτισης. Τα δοκίμια με το πρόσθετο εμφανίζουν 37% μείωση ενώ τα αναφοράς 9% περίπου. Η μείωση αυτή πιθανόν να οφείλεται στη δημιουργία εντριγκίτη και στις εσωτερικές μικρορηγματώσεις που προκαλεί.



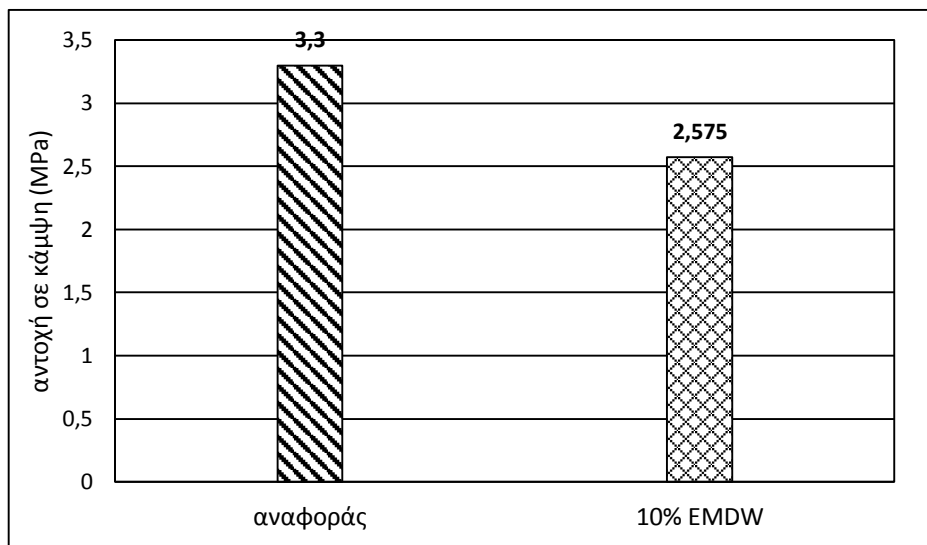
Σχήμα 10.24: Αντοχή σε διάρρηξη κυλινδρικών δοκιμίων σκυροδέματος σε Na₂SO₄ 5% κ.β

10.2.4.3 Μετρήσεις αντοχής σε κάμψη

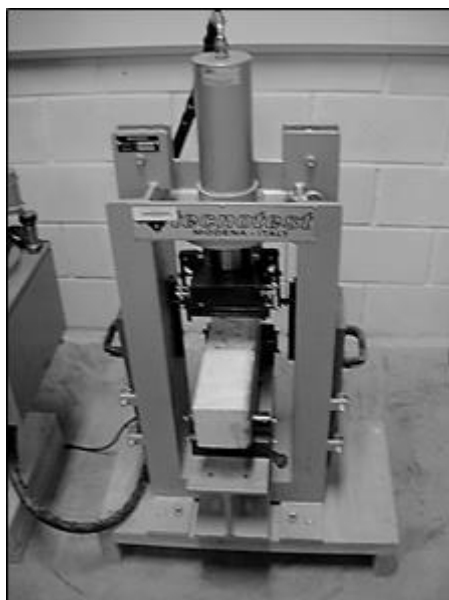
Η αντοχή σε κάμψη (flexural strength) μετρήθηκε στις 28 ημέρες σε δοκούς, μήκους 100cm και διατομής 10cm σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM C78**. Η μηχανή θλίψης ήταν η TECHNOSTEST KD-300/R μέγιστου φορτίου 3000KN και η φόρτιση έγινε με ρυθμό 0,185MPa/s.

Πίνακας 10.27: Αντοχή σε κάμψη πρισματικών δοκιμίων στις 28 ημέρες

ΚΑΜΨΗ 28 ΗΜΕΡΩΝ - ποσοστό προσθήκης 10%						
	ΤΑΣΗ (N/mm ²)			ΦΟΡΤΙΟ (KN)		
	Δοκός 1	Δοκός 2	Μέσος όρος	Δοκός 1	Δοκός 2	Μέσος όρος
αναφοράς	3,3	3,3	3,3	11,01	11,01	11,01
10% EMDW	1,86	3,29	2,575	6,2	10,98	8,59



Σχήμα 10.25: Αντοχή σε κάμψη πρισματικών δοκιμών σκυροδέματος στις 28 ημέρες



Σχήμα 10.26: Δοκιμή κάμψης πρισματικού δοκιμίου σκυροδέματος

10.2.5 Υπολογισμός μέτρου Ελαστικότητας σκυροδέματος

10.2.5.1 Στατικό μέτρο ελαστικότητας

10.2.5.1.1 Μέτρο ελαστικότητας μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

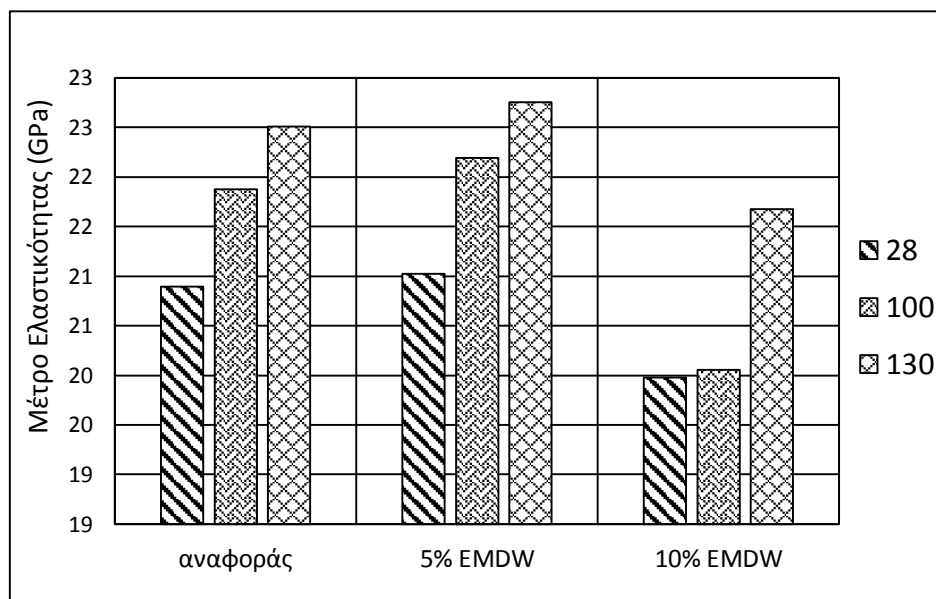
Το μέτρο ελαστικότητας του Σκυροδέματος υπολογίστηκε σε κυλινδρικά δοκίμια ύψους 200mm και διαμέτρου 100mm στις 28,100 και 130 ημέρες μερικής εμβάπτισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β. Για την κατασκευή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο CEM II 42.5N, ασβεστολιθικά αδρανή και νερό δικτύου Λευκωσίας. Ο λόγος W/C ήταν 0,65.

Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας στα δοκίμια υποβλήθηκαν σε τρεις κύκλους φόρτισης - αποφόρτισης με μέγιστη τιμή φόρτισης το 40% της μέγιστης αντοχής τους σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM C469-02**. Στα δοκίμια τοποθετήθηκαν αντιδιαμετρικά ηλεκτρομηκυνσιόμετρα (*strain gauges*) τα οποία κατέγραφαν την παραμόρφωση του δοκιμίου και κατάλληλο λογισμικό δημιουργούσε το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων. Η εφαπτομένη της ευθείας του διαγράμματος αυτού έδινε το μέτρο ελαστικότητας E. Στη συνέχεια το δοκίμιο φορτιζόταν μέχρι θλίψης.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στον πίνακα 10.28.

Πίνακας 10.28: Μέτρο Ελαστικότητας και αντοχή σε θλίψη κυλινδρικών δοκιμίων

	Χρόνος έκθεσης: 28 ημέρες		Χρόνος έκθεσης: 100 ημέρες		Χρόνος έκθεσης: 130 ημέρες	
	E (GPa)	S (MPa)	E (GPa)	S (MPa)	E (GPa)	S (MPa)
αναφοράς	20,895	16,03	21,876	18,56	22,509	29,67
5% EMDW	21,022	13,00	22,190	15,74	22,754	27,46
10% EMDW	19,980	14,04	20,057	16,71	21,675	18,88



Σχήμα 10.27: Μέτρο Ελαστικότητας σε GPa ανά κατηγορία δοκιμίων σε NaCl 3,5% κ.β

Στο σχήμα 10.27 παρουσιάζονται σε γράφημα τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τις τρεις σειρές δοκιμίων. Το μέτρο ελαστικότητας και η θλιπτική αντοχή αυξάνουν με το χρόνο σε όλες τις σειρές σκυροδέματος γεγονός που έχει αποδειχθεί και από άλλους ερευνητές (Sideris et al., 2004). Επίσης, αύξηση της θλιπτικής αντοχής σημαίνει μείωση του πορώδους και κατ' επέκταση αύξηση του στατικού μέτρου Ελαστικότητας (Wang and Li, 2007). Από το διάγραμμα φαίνεται ότι τα δοκίμια με 10% EMDW έχουν το χαμηλότερο μέτρο ενώ οι άλλες δυο κατηγορίες περίπου ίδιες

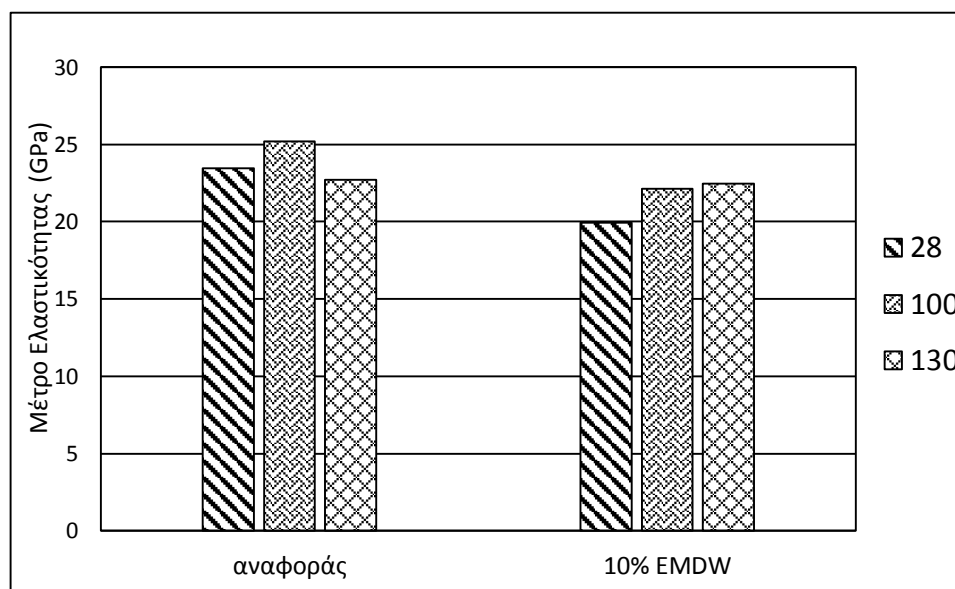
τιμές. Πέρα το γεγονός αυτό όμως τη μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση παρουσιάζει η σειρά 10% EMDW κατά 8% μεταξύ 100 και 130 ημερών.

10.2.5.1.2 Μέτρο ελαστικότητας μετά από εμφάνιση σε διάλυμα Na₂SO₄ 5% κ.β

Το μέτρο ελαστικότητας υπολογίστηκε στις 28, 100 και 130 ημέρες μερικής εμφάνισης σε διάλυμα Na₂SO₄ 5% κ.β. Ο πίνακας 10.29 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Πίνακας 10.29: Αποτελέσματα μετρήσεων στατικού Μέτρου Ελαστικότητας και αντοχή Κυλινδρικών δοκιμών εμφάνισμένα σε Na₂SO₄ 5% κ.β

	Χρόνος έκθεσης: 28 ημέρες		Χρόνος έκθεσης: 100 ημέρες		Χρόνος έκθεσης: 130 ημέρες	
	E (GPa)	S (MPa)	E (GPa)	S (MPa)	E (GPa)	S (MPa)
αναφοράς	23,477	16,35	25,206	18,20	22,714	30,54
10% EMDW	19,916	15,90	22,120	15,04	22,479	27,24



Σχήμα 10.28: Στατικό Μέτρο Ελαστικότητας σε GPa ανά κατηγορία δοκιμών σε Na₂SO₄ 5% κ.β

Από το σχήμα 10.28 φαίνεται ότι η προσθήκη 10% EMDW σε περιβάλλον θειικών ιόντων ελαττώνει το μέτρο Ελαστικότητας στις 28 και 100 ημέρες αλλά στις 130 ημέρες εμφάνισης δεν παρατηρείται ουσιαστική διαφοροποίηση.

10.2.5.2 Υπολογισμός δυναμικού μέτρου Ελαστικότητας με τη χρήση της ταχύτητας Υπερήχων

10.2.5.2.1 Ταχύτητα υπερήχων μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β και Na₂SO₄ 5% κ.β

Το δυναμικό μέτρο Ελαστικότητας μπορεί να υπολογιστεί εύκολα μέσω της ταχύτητας των υπερηχητικών κυμάτων που διαπερνούν τη μάζα του σκυροδέματος.

Οι μετρήσεις της ταχύτητας των υπερήχων έγιναν στις 28,70,100,130 ημέρες στο ίδιο κυβικό δοκίμιο (100x100x100mm) ανά κατηγορία, έπειτα από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β και Na₂SO₄ 5%κ.β.

Τα δοκίμια αφού βγήκαν από τις δεξαμενές με τα διαλύματα τοποθετήθηκαν σε φούρνο μέχρι να απομακρυνθεί πλήρως η υγρασία και στη συνέχεια παρέμειναν σε εργαστηριακό περιβάλλον ώστε να αποκτήσουν θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Πίνακας 10.30: Μετρήσεις ταχύτητας υπερήχων και μέτρου Ελαστικότητας σε NaCl 3,5% κ.β

ΔΙΑΒΡΩΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ: NaCl 3,5% κ.β

Χρόνος (ημέρες)	αναφοράς			5% EMDW			10% EMDW		
	P (kg/m ³)	V (m/sec)	E (GPA)	P (kg/m ³)	V (m/sec)	E (GPA)	P (kg/m ³)	V (m/sec)	E (GPA)
28	1969	2550	12,803	2028	2475	12,423	1949	2325	10,536
70	2003	4132	34,200	2110	4464	42,037	2027	3984	32,179
100	2074	4275	37,912	2121	4504	43,020	2050	4000	32,805
130	2060	4034	33,522	2150	4018	34,710	2085	3517	25,820

Πίνακας 10.31: Μετρήσεις ταχύτητας υπερήχων και μέτρου Ελαστικότητας σε Na₂SO₄ 5% κ.β

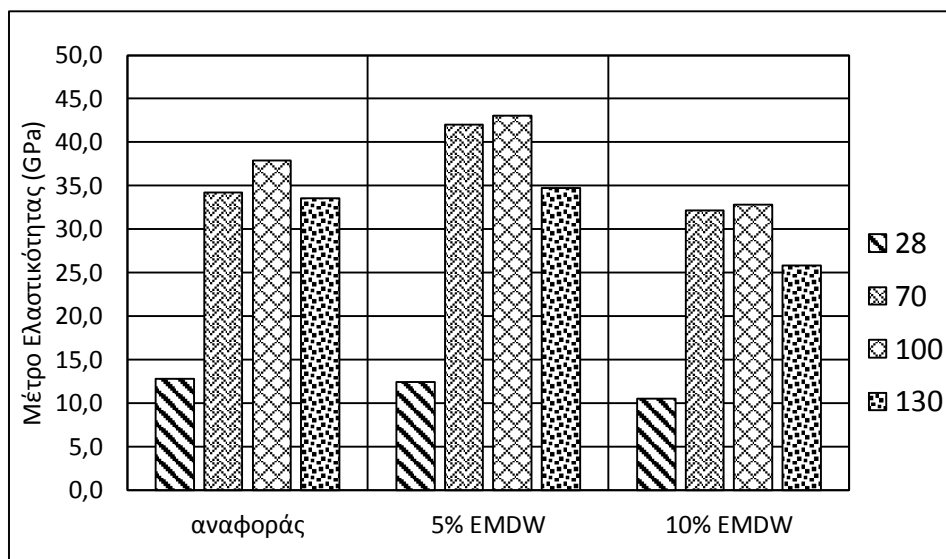
ΔΙΑΒΡΩΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ: Na₂SO₄ 5% κ.β

Χρόνος (ημέρες)	EMD 10% SO4			αναφοράς		
	P (kg/m ³)	V (m/sec)	E (GPA)	P (kg/m ³)	V (m/sec)	E (GPA)
28	2035	2175	9,627	2056	3450	24,472
70	2076	3184	21,041	2111	3571	26,916
100	2075	3410	24,123	2140	4150	36,856

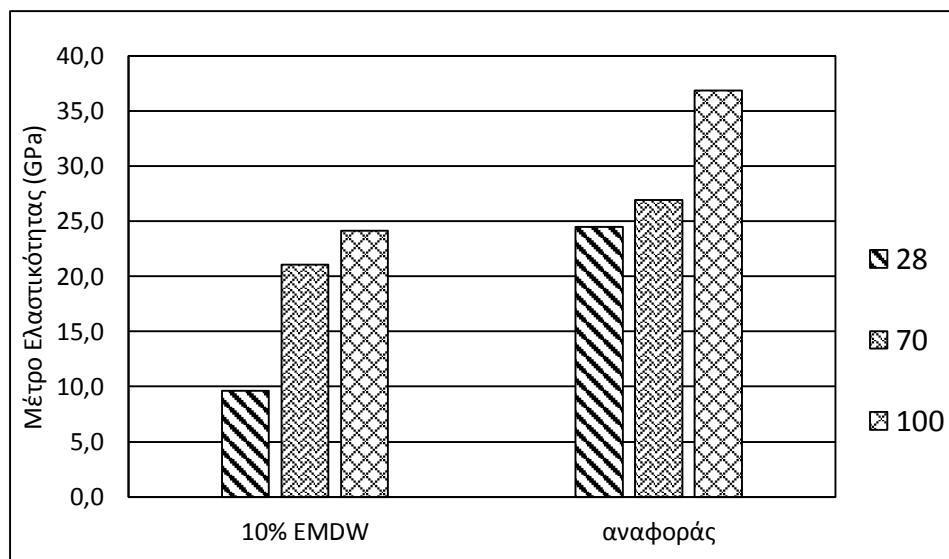
Στο σχήμα 10.29 δίνεται το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας των δοκιμών σκυροδέματος έπειτα από εμβάπτιση σε διάλυμα χλωριούχου νατρίου 3,5% κ.β σε διάφορα χρονικά διαστήματα. Από το διάγραμμα μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η σειρά 10% EMDW εμφανίζει τις χαμηλότερες τιμές δυναμικού μέτρου ελαστικότητας σε όλα τα χρονικά διαστήματα που έγιναν οι μετρήσεις,

- Το δυναμικό μέτρο Ελαστικότητας ελαττώνεται μετά τις 100 ημέρες έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον,
- Η προσθήκη 5% EMDW αυξάνει την ταχύτητα των υπερήχων περισσότερο από τα δοκίμια αναφοράς μέχρι τις 100 ημέρες μερικής εμβάπτισης σε NaCl,
- Το στατικό μέτρο Ελαστικότητας είναι αρκετά χαμηλότερο από το Δυναμικό μέτρο Ελαστικότητας σε όλες τις κατηγορίες,
- Στις 28 ημέρες όλες οι σειρές δοκιμών έχουν περίπου ίδιο στατικό και δυναμικό μέτρο Ελαστικότητας.



Σχήμα 10.29: Δυναμικό Μέτρο Ελαστικότητας σε GPa ανά κατηγορία δοκιμών σε NaCl 3,5% κ.β



Σχήμα 10.30: Δυναμικό Μέτρο Ελαστικότητας σε GPa ανά κατηγορία δοκιμών σε Na₂SO₄ 5% κ.β

Από το σχήμα 10.30 φαίνεται ότι το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας αυξάνει με το χρόνο εμβάπτισης σε διάλυμα θειικών ιόντων κι αυτό πιθανόν να οφείλεται στα

Θειικά άλατα τα οποία πληρώνουν τους πόρους αρχικά, αυξάνοντας παράλληλα και τη θλιπτική αντοχή.

10.2.6 Μετρήσεις τριχοειδούς απορροφητικότητας σκυροδέματος

Για τη μέτρηση της απορροφητικότητας τα δοκίμια κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο οπλισμένου σκυροδέματος του Πανεπιστημίου Κύπρου με ασβεστολιθική άμμο, νερό δικτύου και τσιμέντο CEM II 42.5N. ο λόγος W/C ήταν 0,65 σε όλες τις σειρές δοκιμών. Όλες οι μετρήσεις έγιναν χρησιμοποιώντας ως διαλύτη μεθανόλη.

Τα δοκίμια αρχικά τοποθετήθηκαν σε φούρνο μέχρι να αποκτήσουν σταθερή μάζα και στη συνέχεια παρέμειναν σε εργαστηριακό περιβάλλον ώστε να μειωθεί η θερμοκρασία τους. Για τον υπολογισμό της απορροφητικότητας υπολογίστηκε με παχύμετρο η επιφάνεια του δοκιμίου που βυθίστηκε στο διαλύτη και γινόταν συνεχής καταγραφή της θερμοκρασίας.

Η απορρόφηση I σε mm δίνεται από τον τύπο:

$$I = \frac{\Delta m}{a/d}$$

Όπου Δm η μεταβολή της μάζας σε συγκεκριμένο χρόνο t , a η εμβαπτισμένη επιφάνεια του δοκιμίου σε mm^2 και d η πυκνότητα του υγρού g/mm^3 .

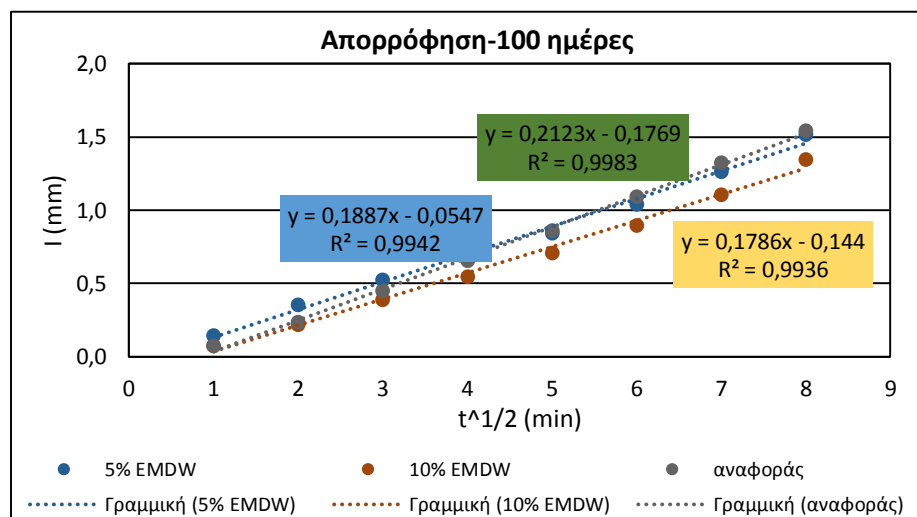
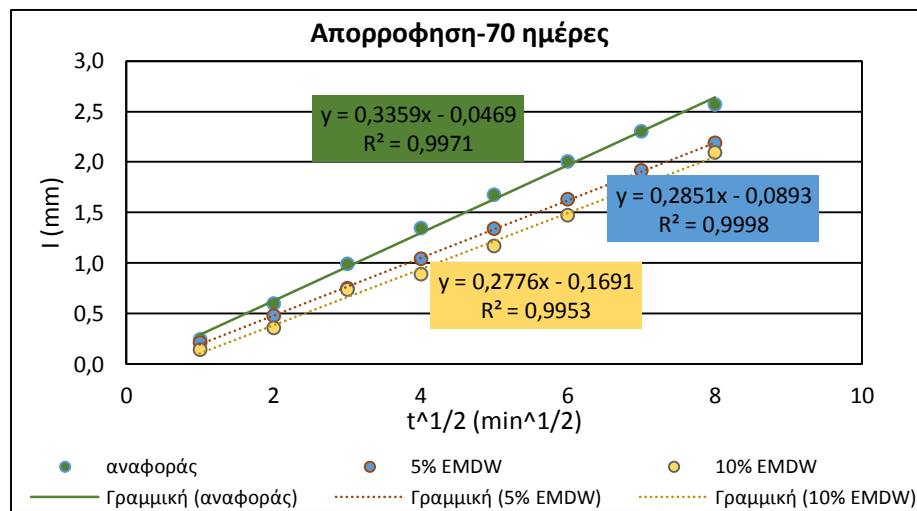
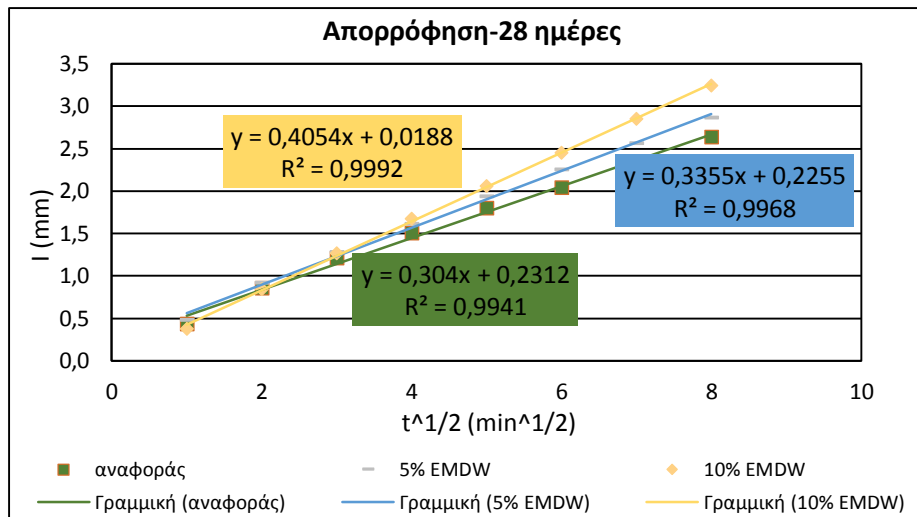
Η απορροφητικότητα (sorptivity) S προκύπτει από τη γραμμή τάσης σε διάγραμμα $I=f(t^{1/2})$.

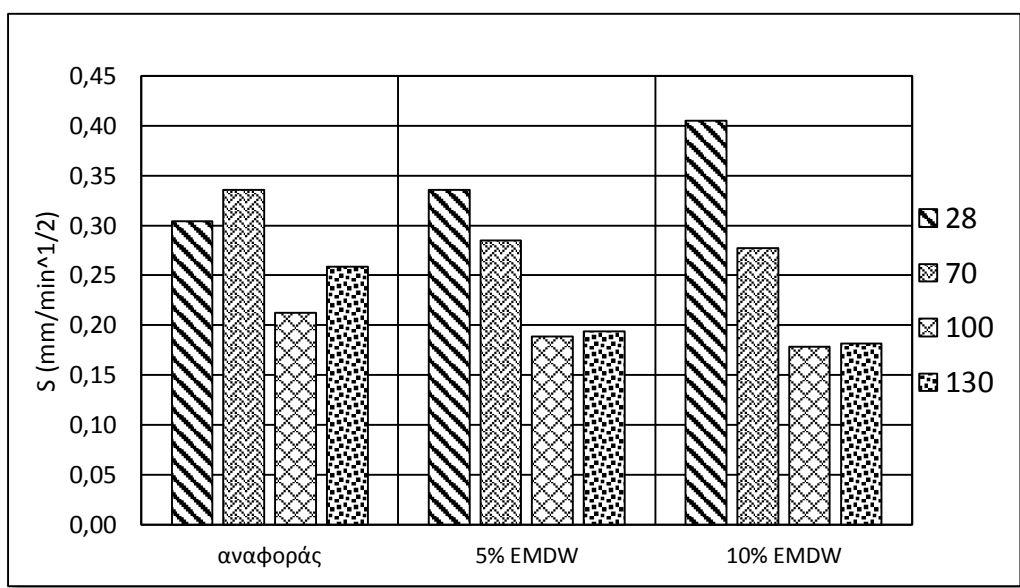
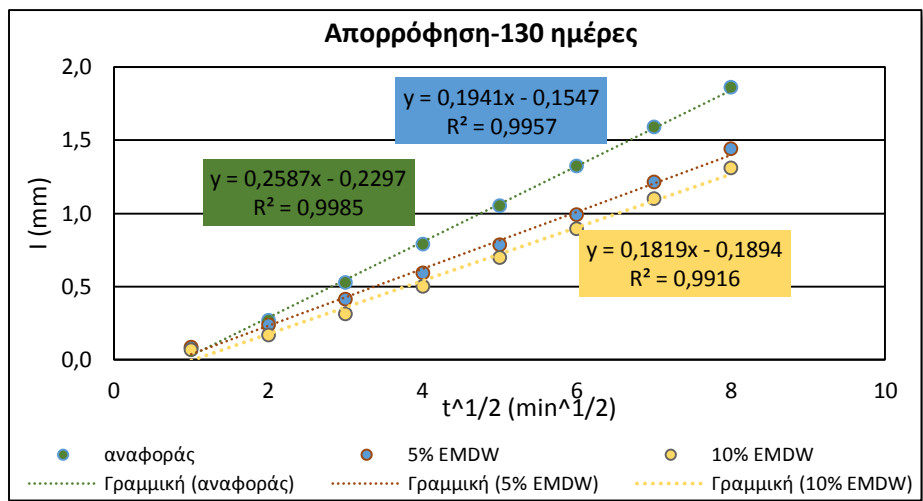
10.2.6.1 Μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Η απορροφητικότητα του σκυροδέματος μετρήθηκε στο ίδιο κυβικό δοκίμιο 100x100x100mm ανά κατηγορία, στις 28,70,100,130 ημέρες μερικής εμβάπτισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β. Ο πίνακας 10.32 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων της απορροφητικότητας (Sorptivity S) για όλες τις κατηγορίες δοκιμών.

Πίνακας 10.32: Απορροφητικότητα S δοκιμών σκυροδέματος σε NaCl 3,5% κ.β.

Χρόνος (ημέρες)	S ($\text{mm}/\text{min}^{1/2}$)			
	28	70	100	130
Αναφοράς	0,3040	0,3359	0,2123	0,2587
5% EMDW	0,3355	0,2851	0,1887	0,1941
10% EMDW	0,4054	0,2776	0,1786	0,1819





Σχήμα 10.31: Απορροφητικότητα S σε mm/min^{1/2} ανά κατηγορία δοκιμίων σε NaCl 3,5% κ.β

Από το σχήμα 10.31 παρατηρείται ότι η απορροφητικότητα σε μεθανόλη των δοκιμίων σκυροδέματος με το πρόσθετο μειώνεται μέχρι τις 70 ημέρες και στη συνέχεια παραμένει σταθερή ενώ στα δοκίμια αναφοράς αυξάνεται στις 130 ημέρες εμβάπτισης σε NaCl. Η σταθεροποίηση της απορροφητικότητας του σκυροδέματος με το χρόνο έχει αποδειχθεί και από άλλους ερευνητές οι οποίοι έχουν αποδείξει ότι δεν υπάρχει μεταβολή της απορροφητικότητας από τις 28 ημέρες και έπειτα (Kubissa and Jaskulski, 2013).

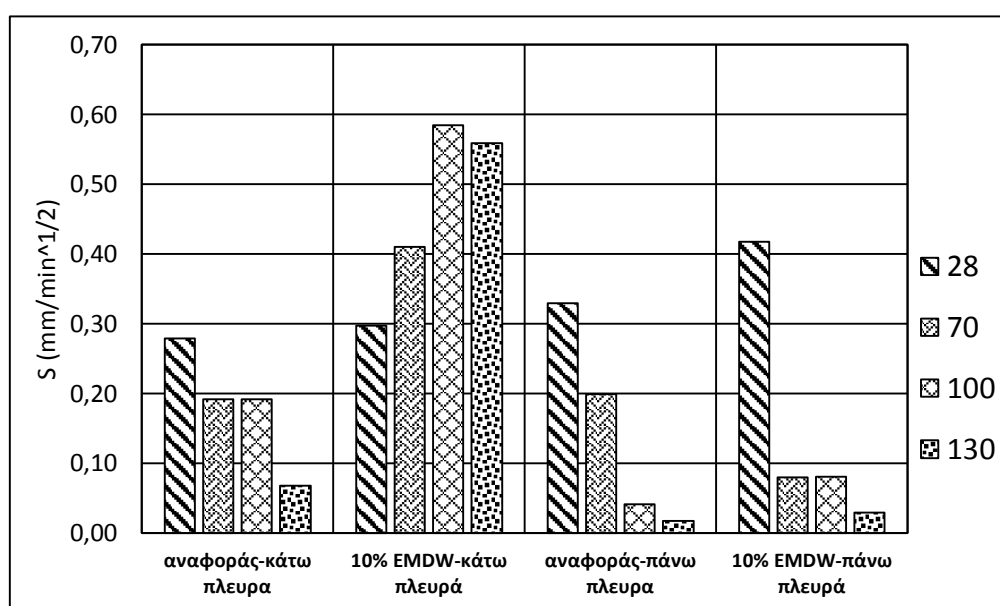
10.2.6.2 Μερική εμβάπτιση σε διάλυμα Na₂SO₄ 5% κ.β

Η απορροφητικότητα S υπολογίστηκε μετά από εμβάπτιση σε διάλυμα Na₂SO₄ 5% κ.β στις 28, 70, 100 και 130 ημέρες μερικής εμβάπτισης σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C1585. Η απορρόφηση συναρτήσε του χρόνου υπολογίστηκε στη βυθισμένη πλευρά

του δοκιμίου στο διάλυμα θειικού Νατρίου και στην πάνω πλευρά για λόγους σύγκρισης. Οι μετρήσεις έγιναν σε δοκίμια αναφοράς και σε δοκίμια με 10% EMDW. Ο πίνακας 10.33 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Πίνακας 10.33: Απορροφητικότητα S δοκιμών σκυροδέματος σε Na₂SO₄ 5% κ.β.

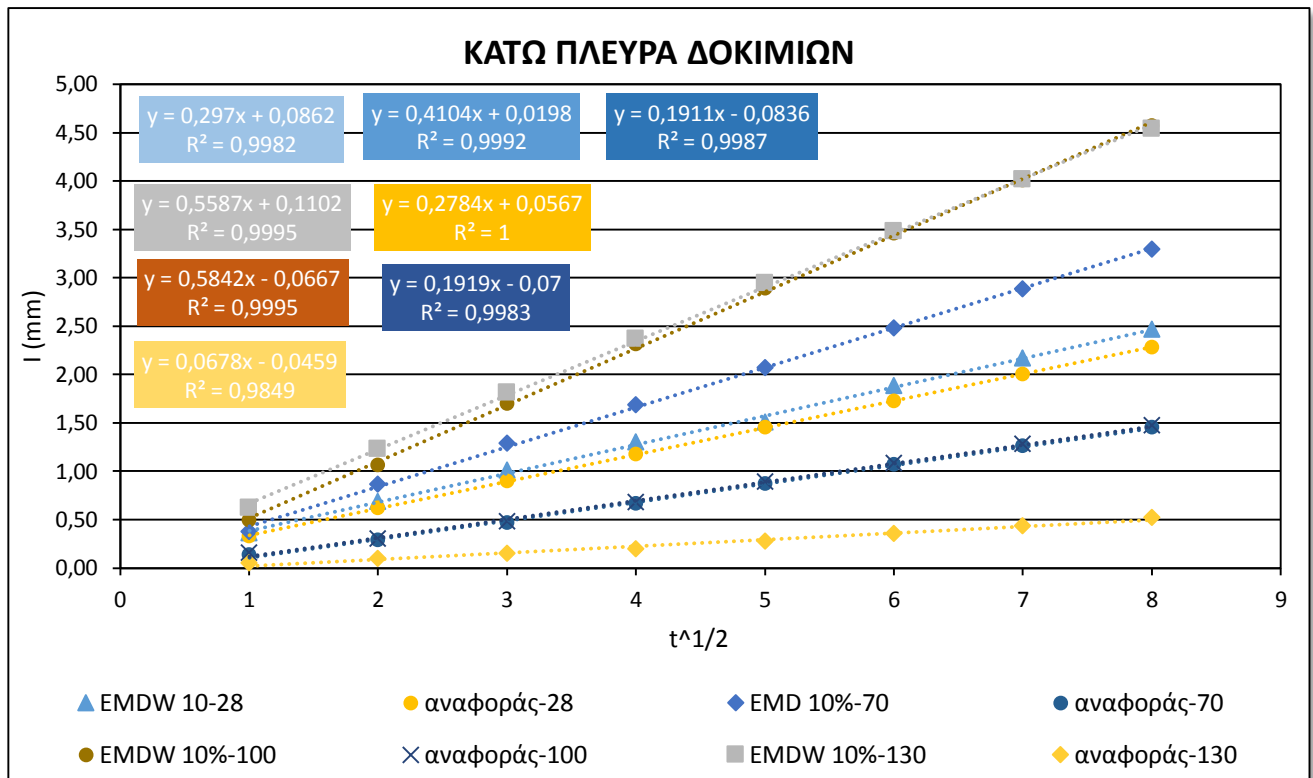
Χρόνος (ημέρες)	Απορροφητικότητα S (mm/min ^{1/2})			
	28	70	100	130
Αναφοράς-κάτω πλευρά	0,2784	0,1911	0,1919	0,0678
10% EMDW κάτω πλευρά	0,2970	0,4104	0,5842	0,5587
Αναφοράς-πάνω πλευρά	0,3295	0,1986	0,0407	0,0167
10% EMDW-πάνω πλευρά	0,4174	0,0798	0,0803	0,0291



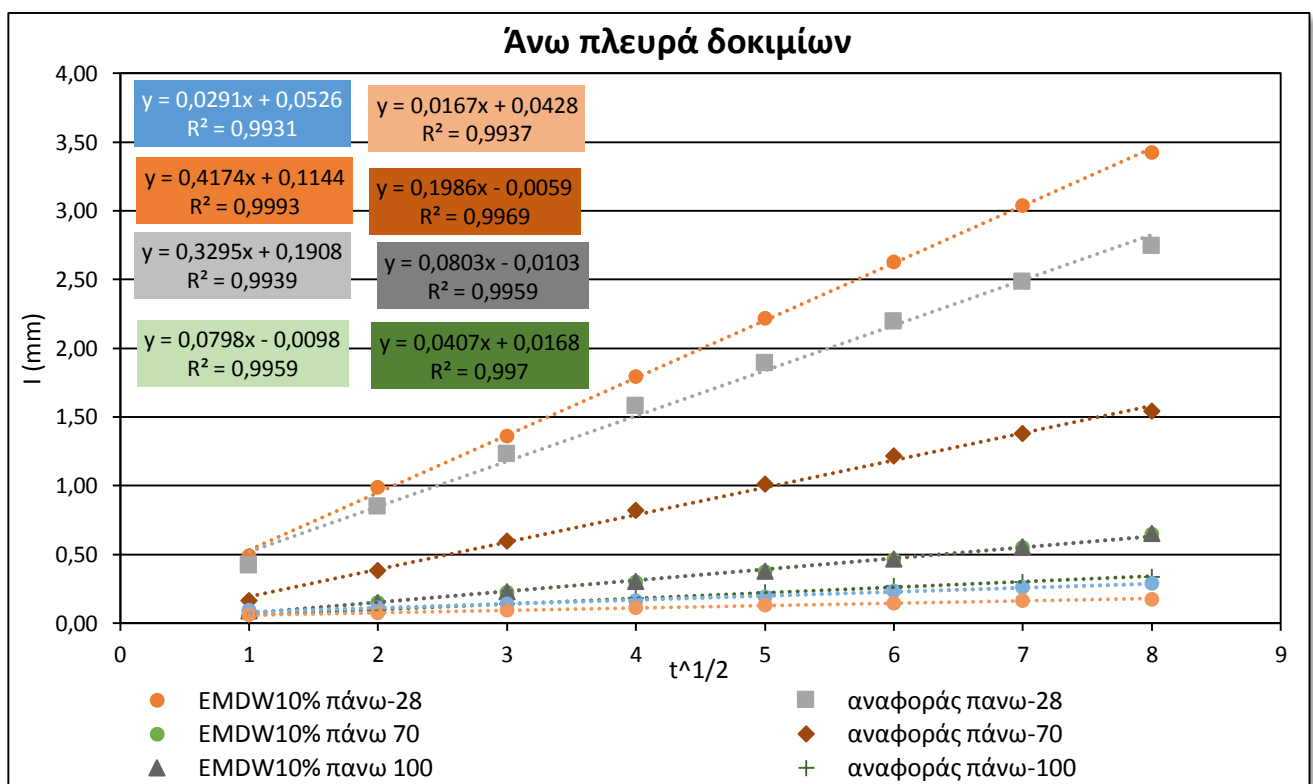
Σχήμα 10.32: Απορροφητικότητα S mm/min^{1/2} ανά κατηγορία δοκιμών σε Na₂SO₄ 5% κ.β

Από το σχήμα 10.32 φαίνεται ότι η κάτω πλευρά των δοκιμών η οποία βρίσκεται εμβαπτισμένη στο διάλυμα έχει υψηλότερη απορροφητικότητα από την άνω πλευρά. Επίσης τα δοκίμια με το πρόσθετο εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές απορροφητικότητας κυρίως στην κάτω πλευρά.

Στο εμβαπτισμένο τμήμα των δοκιμών υπάρχει χημική προσβολή του Na₂SO₄ με δημιουργία Εντριγκίτη ενώ στην εκτιθέμενη πλευρά υπάρχει εξάτμιση του Na₂SO₄ και δημιουργία ρωγμών λόγω εφελκυστικών δυνάμεων.



Σχήμα 10.33: Απορρόφηση I ανά κατηγορία δοκιμών σε Na_2SO_4 5% κ.β



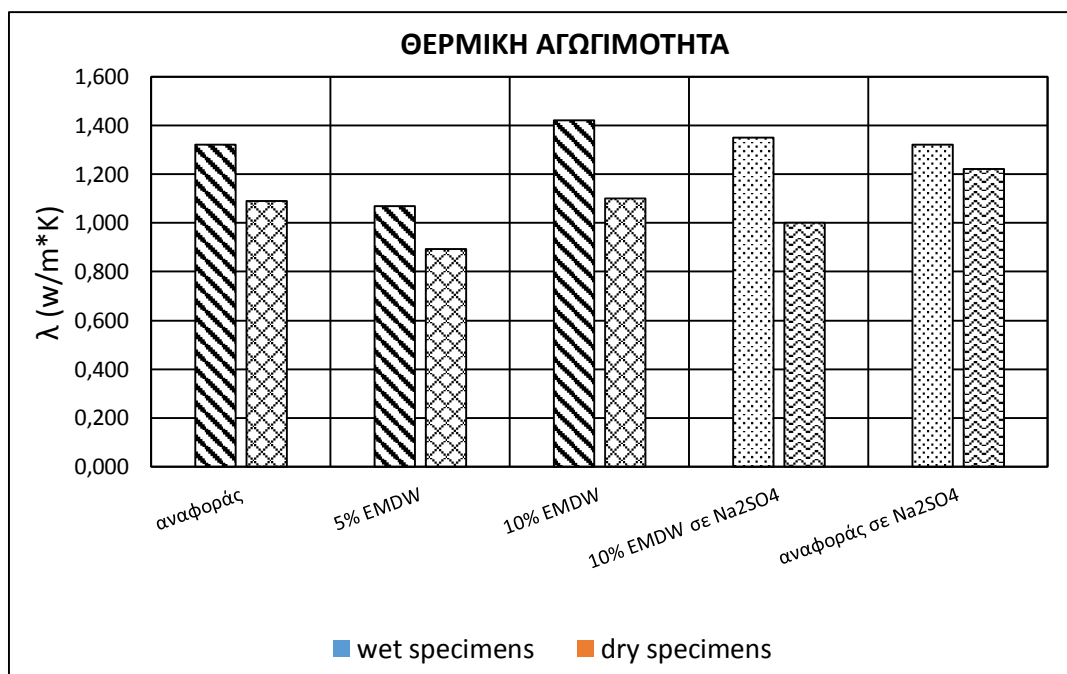
Σχήμα 10.34: Απορρόφηση I ανά κατηγορία δοκιμών σε Na_2SO_4 5% κ.β

10.2.7 Θερμικές ιδιότητες σκυροδέματος

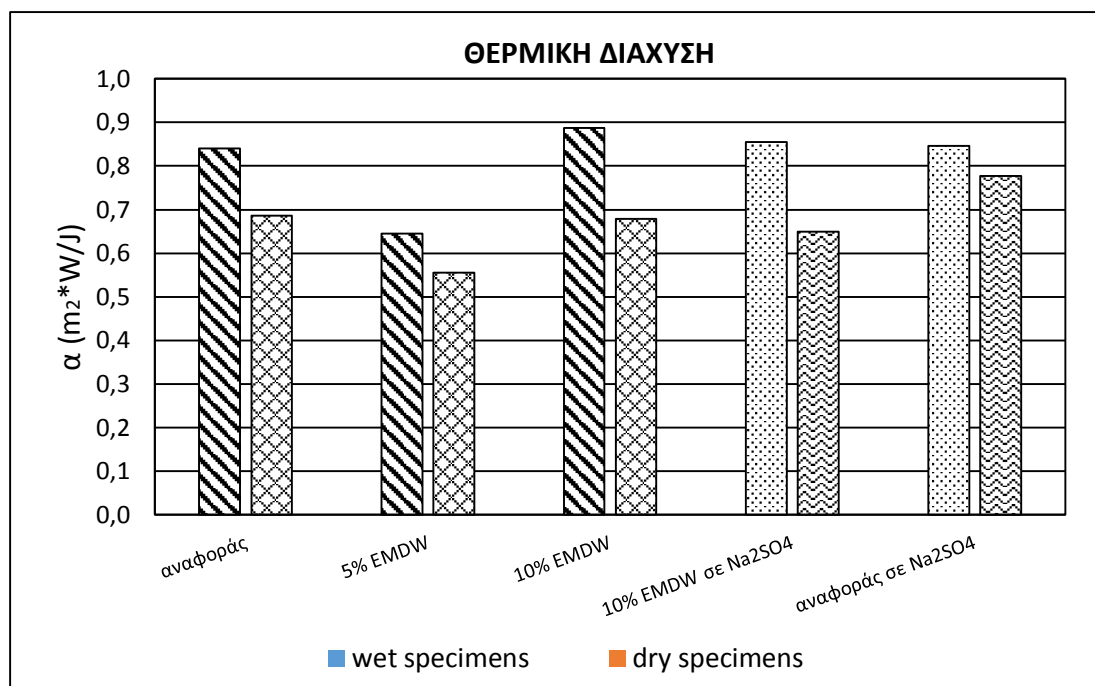
Η θερμική αγωγιμότητα των δοκιμών μετρήθηκε στις 130 ημέρες εμβάπτισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β και Na₂SO₄ 5% κ.β με το μηχάνημα ISOMET model 2104 heat transfer analyzer. Η μέτρηση έγινε σε λειασμένους κυλίνδρους διαμέτρου 100mm και ύψους 25mm. Ο πίνακας 10.34 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων θερμικής αγωγιμότητας, θερμοχωρητικότητας και θερμικής διάχυσης σε νωπό και ξηρό σκυρόδεμα.

Πίνακας 10.34: Θερμικές ιδιότητες δοκιμών σκυροδέματος μετά από παραμονή σε διαλύματα NaCl 3,5% κ.β & Na₂SO₄ 5% κ.β

	Υγρά δοκίμια			Ξηρά δοκίμια		
ΔΙΑΛΥΜΑ ΕΜΒΑΠΤΙΣΗΣ: NaCl 3,5% κ.β						
	λ (W/m*K)	Cp (J/m ³ *K)	a	λ (W/m*K)	Cp (J/m ³ *K)	a (m ² *w/J)
αναφοράς	1,320	1,570	0,8408	1,090	1,590	0,6855
5% EMDW	1,070	1,660	0,6446	0,894	1,610	0,5553
10% EMDW	1,420	1,600	0,8875	1,100	1,620	0,6790
ΔΙΑΛΥΜΑ ΕΜΒΑΠΤΙΣΗΣ: Na ₂ SO ₄ 5% κ.β						
	λ (W/m*K)	Cp (J/m ³ *K)	a	λ (W/m*K)	Cp (J/m ³ *K)	a (m ² *w/J)
10% EMDW	1,350	1,580	0,8544	1,000	1,540	0,6494
αναφοράς	1,320	1,560	0,8462	1,220	1,570	0,7771



Σχήμα 10.35: Θερμική αγωγιμότητα στις 130 ημέρες μερικής εμβάπτισης σε NaCl 3,5% και Na₂SO₄ 5% κ.β



Σχήμα 10.36: θερμική διάχυση ανά κατηγορία δοκιμών στις 130 ημέρες μερικής εμβάπτισης σε NaCl 3,5% και Na₂SO₄ 5% κ.β

Στα σχήματα 10.35 & 10.36 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της θερμικής αγωγιμότητας και θερμικής διάχυσης στις 130 ημέρες μερικής εμβάπτισης σε NaCl και Na₂SO₄. Όπως ήταν αναμενόμενο τα ξηρά δοκίμια σκυροδέματος έχουν χαμηλότερες τιμές θερμικής αγωγιμότητας από τα νωπά (Kim et al., 2003). Επίσης, από τα διαγράμματα φαίνεται ότι τα δοκίμια με το EMDW δεν επηρεάζουν αρνητικά τις θερμικές ιδιότητες του σκυροδέματος συγκριτικά με τα αναφοράς και ότι αυξανόμενο το ποσοστό της προσθήκης αυξάνεται και η θερμική αγωγιμότητα των δοκιμών.

10.2.8 Μετρήσεις πορώδους σκυροδέματος

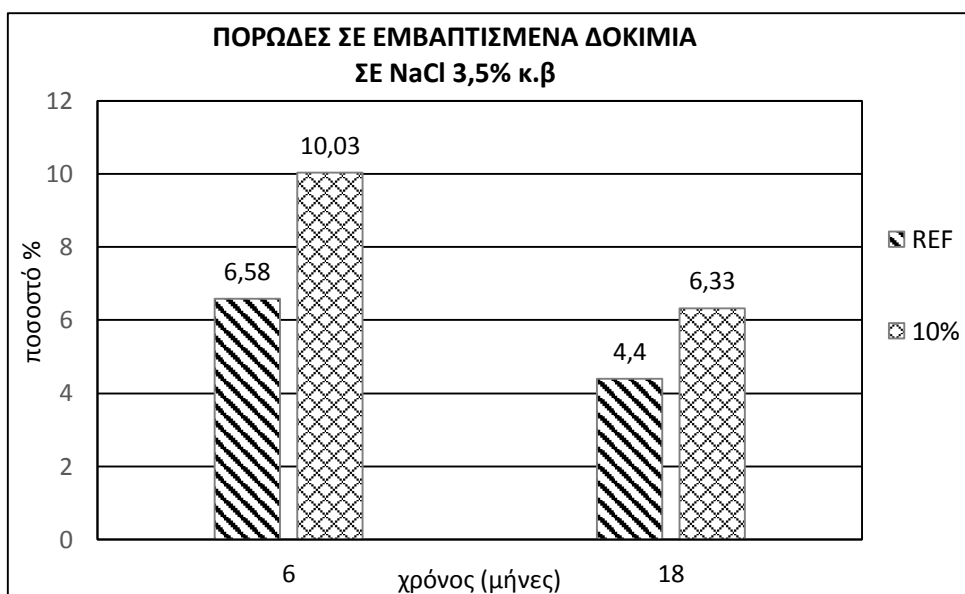
10.2.8.1 Μετρήσεις πορώδους με ποροσιμετρία Hg

Το πορώδες των δοκιμών αναφοράς και με 10% EMDW υπολογίστηκε με ποροσιμετρία Hg σε δοκίμια τσιμεντοκονίας. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στους 6 και 18 μήνες μερικής εμβάπτισης σε NaCl και παραμονής στην ατμόσφαιρα.

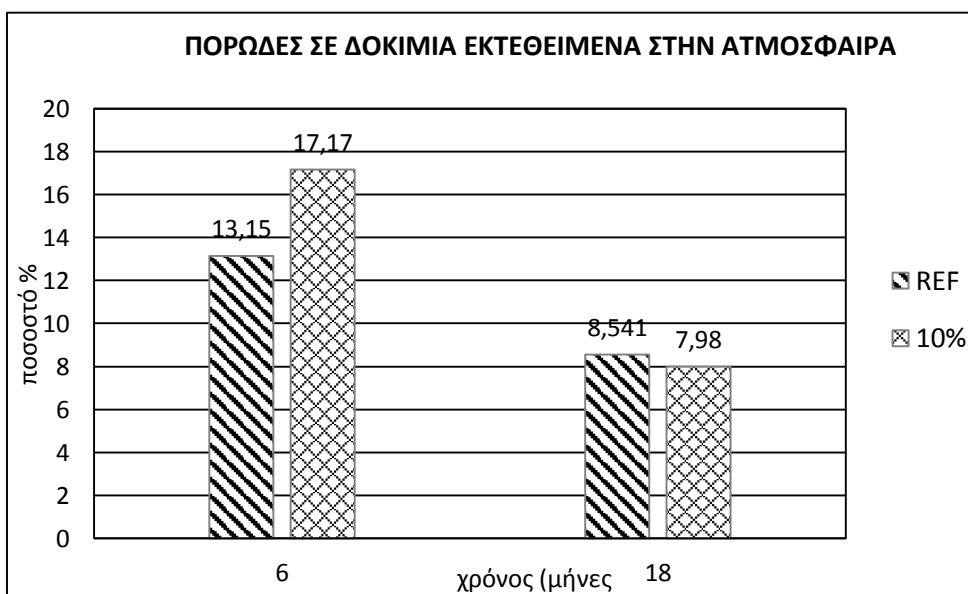
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων πορώδους και μέσης ακτίνας πόρων δίνονται στον πίνακα 10.35. Τα σχήματα 10.37 και 10.38 παρουσιάζουν τα διαγράμματα του πορώδους στους 6 και 18 μήνες έπειτα από μερική εμβάπτιση σε NaCl και έκθεσης σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον αντίστοιχα.

Πίνακας 10.35: Πορώδες και μέση ακτίνα πόρων δοκιμών τιμεντοκονίας

Χρόνος (μήνες)	κατηγορία δοκιμίου	α/α δοκιμίου	Μέση Ακτίνα πόρων	Ολικό πορώδες	διαβρωτικό περιβάλλον
6	10% EMDW	196	0,0375	10,032	NaCl 3,5% κ.β
	αναφοράς	211	0,0261	6,575	
18	10% EMDW	195	0,0473	6,332	
	αναφοράς	208	0,1006	4,449	
Χρόνος (μήνες)	κατηγορία δοκιμίου	α/α δοκιμίου	Μέση Ακτίνα πόρων	Ολικό πορώδες	διαβρωτικό περιβάλλον
6	10% EMDW	227	0,1072	17,173	ατμόσφαιρα
	αναφοράς	229	0,0871	13,152	
18	10% EMDW	221	0,0763	7,977	
	αναφοράς	231	0,0444	8,541	



Σχήμα 10.37: Πορώδες % ανά κατηγορία δοκιμών σε NaCl 3,5% κ.β



Σχήμα 10.38: Πορώδες % ανά κατηγορία δοκιμών εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα

Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ότι το πορώδες των δοκιμών με το EMDW είναι μεγαλύτερο από τα αναφοράς στους 6 μήνες έκθεσης και στα δύο υπό μελέτη διαβρωτικά περιβάλλοντα. Στους 18 μήνες τα δοκίμια με 10% πρόσθετο έχουν περίπου ίδιο πορώδες με αυτά χωρίς EMDW και εμφανίζουν τη μεγαλύτερη μείωση όπως δείχνει και ο πίνακας 10.36.

Πίνακας 10.36: Ποσοστιαία μείωση πορώδους στους 6 και 18 μήνες έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον

ΜΕΡΙΚΗ ΕΜΒΑΠΤΙΣΗ			
	6 μήνες	18 μήνες	% μείωση
ΑΝΑΦΟΡΑΣ	6,58	4,4	33,13↓
10% EMDW	10,03	6,33	36,89↓
ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ			
	6 μήνες	18 μήνες	% μείωση
ΑΝΑΦΟΡΑΣ	13,15	8,541	35,05↓
10% EMDW	17,17	7,98	53,52↓

10.2.8.2 Μετρήσεις ανοικτού πορώδους

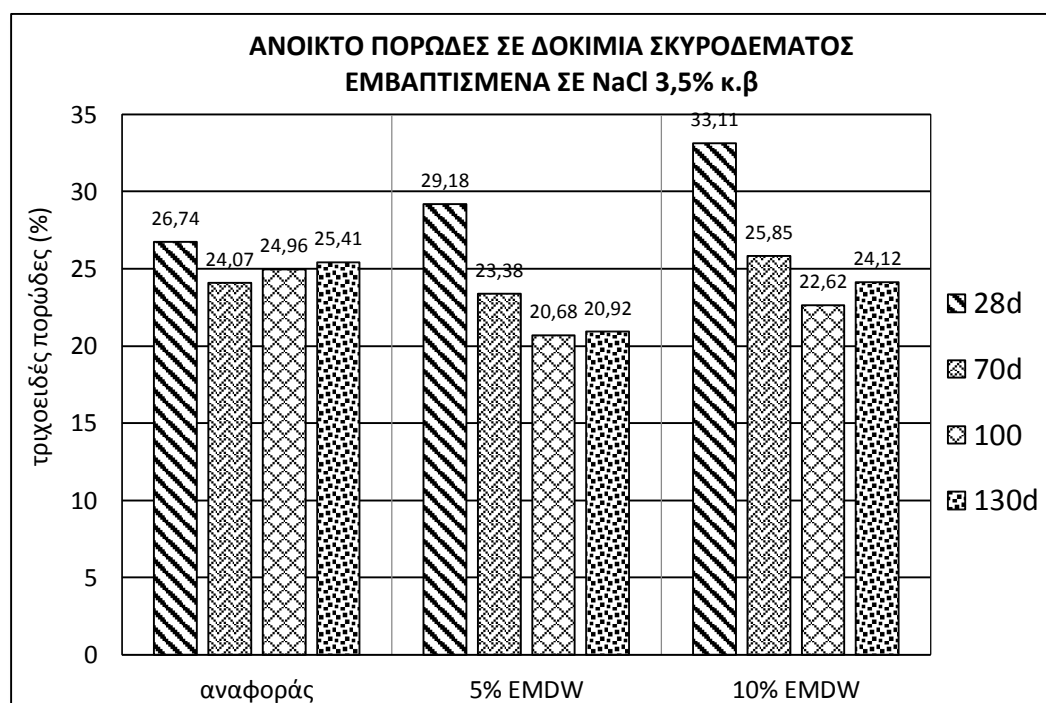
Το ανοικτό πορώδες του σκυροδέματος υπολογίστηκε με τη μέθοδο της απαέρωσης σε κυβικά δοκίμια ακμής 100mm στις 28,70,100και 130 ημέρες. Το περιβάλλον διάβρωσης ήταν διάλυμα NaCl 3,5% κ.β και Na₂SO₄ 5% κ.β. Για τον υπολογισμό του ανοικτού πορώδους τα δοκίμια ξηράθηκαν μέχρι σταθερής μάζας (ξηρή μάζα), αφαιρέθηκε ο αέρας σε κατάλληλο δοχείο απαέρωσης, έγινε κορεσμός για 24 ώρες σε χαμηλή πίεση και στη συνέχεια ζυγίστηκαν μέσα στο νερό και εκτός (μάζα SSD).

Ο πίνακας 10.37 παρουσιάζει τα αποτελέσματα όλων των μετρήσεων πορώδους μετά από εμβάπτιση σε NaCl και Na₂SO₄.

Πίνακας 10.37: Ποσοστιαία μείωση ολικού πορώδους στους 6 και 18 μήνες έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον

χρόνος έκθεσης 28 ημέρες							
		ξηρή μάζα (g)	μάζα μέσα στο νερό (g)	SSD μάζα (g)	πορώδες %	απορρόφηση	φαινόμενη πυκνότητα (kg/m ³)
NaCl	αναφοράς	1910,2	1185,9	2174,6	26,742	13,841	1928
	5% EMDW	1973,1	1258,3	2267,6	29,179	14,926	1951
	10% EMDW	1815,8	1169,4	2135,8	33,113	17,623	1875
Na₂SO₄	10% EMDW	1938,8	1218,5	2198,4	26,492	13,390	1975
	αναφοράς	1967	1234,6	2234,9	26,782	13,620	1962

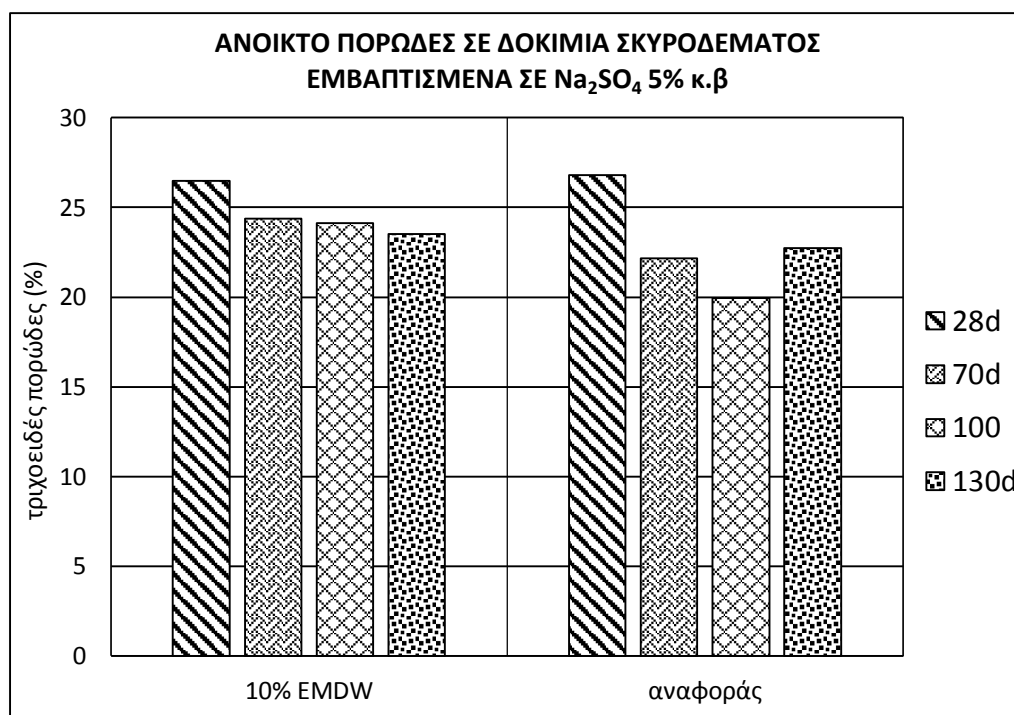
χρόνος έκθεσης 70 ημέρες							
		ξηρή μάζα (g)	μάζα μέσα στο νερό (g)	SSD μάζα (g)	πορώδες %	απορρόφηση	φαινόμενη πυκνότητα (kg/m ³)
NaCl	αναφοράς	1944,2	1200,3	2180	24,069	12,128	1981
	5% EMDW	2053,1	1285,8	2287,2	23,377	11,402	2046
	10% EMDW	1902,8	1191	2150,9	25,846	13,039	1978
Na₂SO₄	10% EMDW	1978,8	1244,2	2215,5	24,369	11,962	2033
	αναφοράς	2022	1245	2243,1	22,152	10,935	2022
χρόνος έκθεσης 100 ημέρες							
	100d	ξηρή μάζα (g)	μάζα μέσα στο νερό (g)	SSD μάζα (g)	πορώδες %	απορρόφηση	φαινόμενη πυκνότητα (kg/m ³)
NaCl	αναφοράς	1951,6	1217,92	2195,6	24,957	12,503	1992
	5% EMDW	2087,28	1293,01	2294,32	20,677	9,919	2080
	10% EMDW	1929,9	1186,67	2147,17	22,621	11,258	2005
Na₂SO₄	10% EMDW	1994,08	1254,26	2229,5	24,140	11,806	2041
	αναφοράς	2031,79	1232,85	2230,72	19,935	9,791	2032
χρόνος έκθεσης 130 ημέρες							
	130d	ξηρή μάζα (g)	μάζα μέσα στο νερό (g)	SSD μάζα (g)	πορώδες %	απορρόφηση	φαινόμενη πυκνότητα (kg/m ³)
NaCl	αναφοράς	1953,2	1223,84	2201,64	25,408	12,720	1994
	5% EMDW	2091,75	1299,72	2301,26	20,919	10,016	2084
	10% EMDW	1933,92	1205,77	2165,33	24,116	11,966	2011
Na₂SO₄	10% EMDW	1991,56	1244,75	2221,03	23,505	11,522	2036
	αναφοράς	2035,05	1264,2	2261,75	22,726	11,140	2036



Σχήμα 10.39: Τριχοειδές πορώδες % ανά κατηγορία δοκιμών σε NaCl 3,5% κ.β

Από το σχήμα 10.39 μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Το πορώδες αυξάνεται στα δοκίμια αναφοράς μετά από 70 ημέρες στο διαβρωτικό περιβάλλον ένα στις άλλες δύο σειρές δοκιμών μετά από 90 ημέρες
- Στις 28 ημέρες το πορώδες αυξάνεται όσο αυξάνει το ποσοστό της προσθήκης EMDW.
- Η προσθήκη 5% EMDW μειώνει το ποσοστό του πορώδους μετά από 70 ημέρες εμφάνισης σε χλωριούχο Νάτριο ενώ το 10% EMDW από τις 90 ημέρες και έπειτα.



Σχήμα 10.40: Τριχρειδές πορώδες % ανά κατηγορία δοκιμών σε Na₂SO₄ 5% κ.β

Από το σχήμα 10.40 σχετικά με το ποσοστό του πορώδους σε περιβάλλον θειικών ιόντων μπορούν να ειπωθούν τα εξής:

- Η προσθήκη EMDW δίνει μεγαλύτερες τιμές πορώδους από τα δοκίμια αναφοράς αλλά η διαφορά τους εξομαλύνεται στις 130 ημέρες.
- Το πορώδες του σκυροδέματος με το πρόσθετο από τις 28 ημέρες δεν παρουσιάζει σημαντική μεταβολή
- Τα δοκίμια με 10% EMDW εμφανίζουν συνεχώς μείωση του πορώδους ενώ στα αναφοράς αυξάνεται στις 130 ημέρες.

10.2.9 Ηλεκτροχημικός προσδιορισμός του Ρυθμού Διάβρωσης των οπλισμών

10.2.9.1 Μετρήσεις Γραμμικής πόλωσης σε εμβαπτισμένα δοκίμια τσιμεντοκονίας σε (NaCl 3,5% κ.β, Na₂SO₄ 5% κ.β) και σε θάλαμο αλατονέφωσης

Ο προσδιορισμός της πυκνότητας ρεύματος και του ρυθμού διάβρωσης πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της γραμμικής πόλωσης (*linear Polarization Resistance*). Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε διάταξη 3 ηλεκτροδίων (καλομέλανας, οπλισμός και ράβδος γραφίτη). Το εύρος σάρωσης ήταν 15mV και το βήμα σάρωσης ήταν 0,1mV/s.

Η απώλεια μάζας με βάση το νόμο του Faraday δίνεται από τον τύπο:

$$m(g) = \frac{M \times I \times t}{Z \times F}$$

Όπου,

m: Η μάζα που καταναλώνεται (g),

I: το ηλεκτρικό ρεύμα (A),

t: Ο χρόνος (s),

z: Αριθμός ανταλλασσόμενων e⁻ (για τον Fe z=2)

M: Ατομικό βάρος μετάλλου (για τον Fe 56 g)

Οι πίνακες 10.38, 10.39 και 10.40 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων *i_{corr}*.

Πίνακας 10.38: Αποτελέσματα *i_{corr}* (μΑ/cm²) και ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας σε χάλυβες εγκιβωτισμένους σε τσιμεντοκονίες συναρτήσεως του χρόνου εμβάπτισης σε NaCl 3,5% κ.β

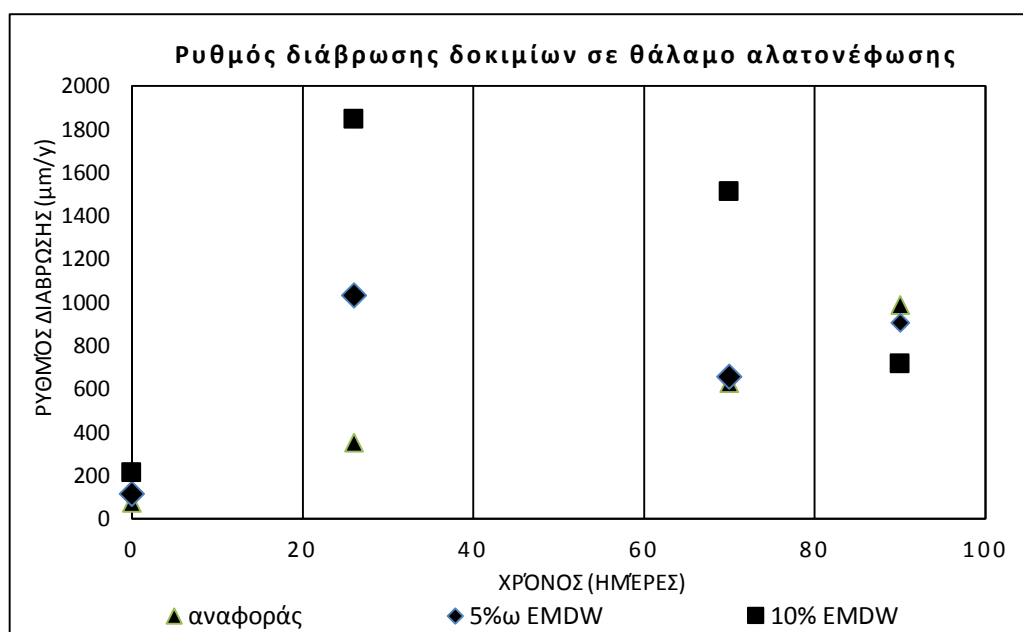
χρόνος (μήνες)	<i>i_{corr}</i> (μΑ/cm ²)			Απώλεια μάζας (g)		
	5% EMDW	10%EMDW	αναφοράς	5% EMDW	10%EMDW	αναφοράς
1	38,4	44	36	0,029221698	0,033483196	0,027395342
3	22,79	22,25	22,52	0,05202832	0,05079553	0,051411925
5	21,65	12,672	25,805	0,082376271	0,048215802	0,098185666
6	28,47	22,54	32,73	0,129990897	0,102915168	0,14944159
7	32,67	20,26	67,38	0,17402891	0,107922428	0,358924638
9	55,18	15,85	74,02	0,377918742	0,108554042	0,506950802
11	16,94	14,418	35,28	0,141801334	0,120690179	0,295321786
12	18,2	14,39	33,42	0,166198408	0,131406323	0,305184109
14	22,08	14,12	54,87	0,235234669	0,150430866	0,584570938
16	28,479	26,167	54,52	0,346751975	0,318601739	0,663819574
18	20,14	26,84	72,4	0,275871093	0,367645489	0,991711378
21	39,35	44	56,36	0,628837245	0,70314711	0,900667525
24	39,4755	55	101,355	0,720963214	1,004495871	1,851103254
26	50,005	66,86	98,24	0,989375164	1,322860183	1,943729949

Πίνακας 10.39: Αποτελέσματα i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) και ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας σε χάλυβες εγκιβωτισμένους σε τιμεντοκονίες συναρτήσει του χρόνου εμβάπτισης σε Na_2SO_4 5% κ.β

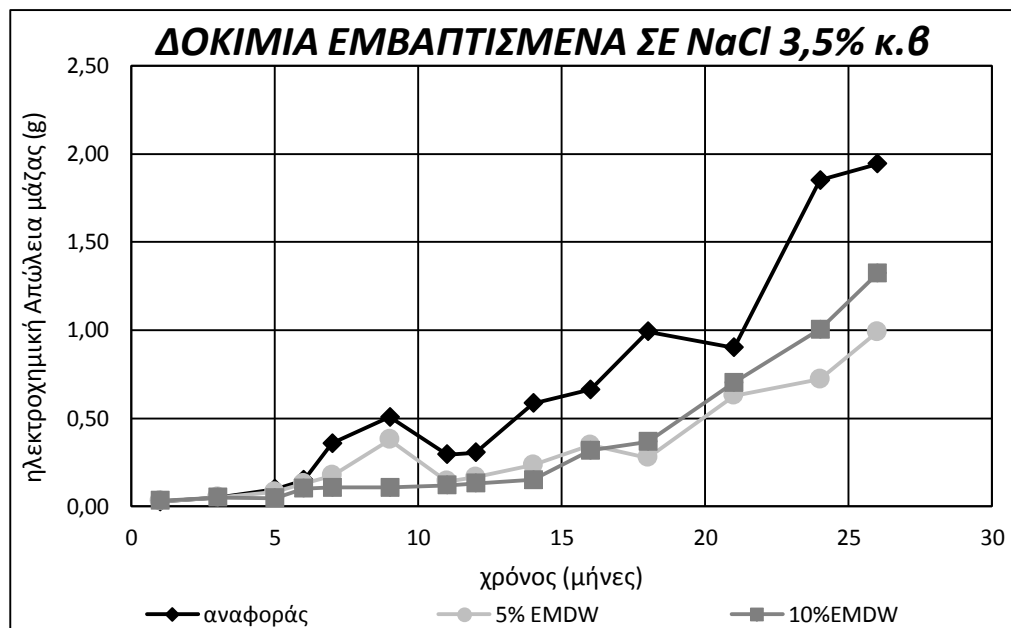
χρόνος (μήνες)	i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)			Απώλεια μάζας (g)		
	5% EMDW	10%EMDW	αναφοράς	5% EMDW	10%EMDW	αναφοράς
0	13,56	8,2	5,37	0	0	0
2	14,465	7,814	14,368	0,022015	0,011893	0,021868
4	11,42	11,3	22,39	0,034762	0,034396	0,068154
6	14,62	15,57	18,41	0,066753	0,071091	0,084058
8	14,38	17,48	19,09	0,087543	0,106416	0,116217
10	16,18	24,89	21,14	0,123127	0,189408	0,160872
12	21,8	37,64	22,26	0,199073	0,34372	0,203273
15	27,82	35,8	23,42	0,317558	0,408647	0,267333
17	26,62	34,97	22,6	0,344375	0,452396	0,292369
19	26,8825	60,89667	23,69	0,388685	0,880484	0,342525
22	54,54	62,64	42,99	0,913087	1,048694	0,719721

Πίνακας 10.40: Αποτελέσματα μέσω των όρων ηλεκτροχημικών παραμέτρων σε χάλυβες εγκιβωτισμένους σε τιμεντοκονίες συναρτήσει του χρόνου εμβάπτισης σε θάλαμο αλατονέφωσης

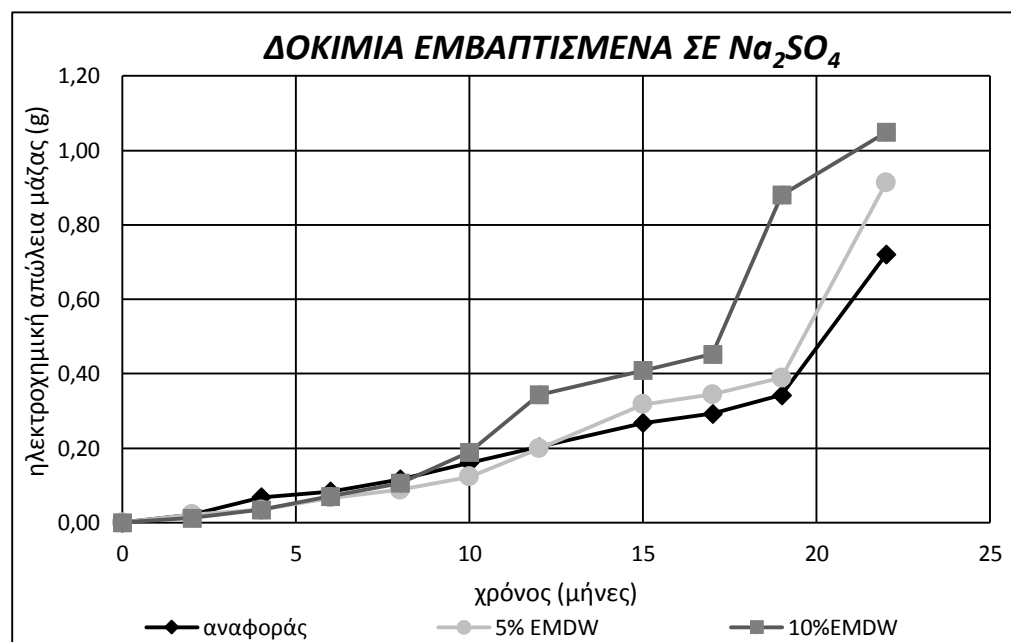
Θάλαμος αλατονέφωσης									
Χρόνος (μήνες)	i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)			Ρυθμός διάβρωσης (mpy)			Ρυθμός διάβρωσης ($\mu\text{m}/\text{y}$)		
	5%ω EMDW	10% EMDW	αναφοράς	5%ω EMDW	10% EMDW	αναφοράς	5% EMDW	10% EMDW	αναφοράς
0	4,97	9,23	3,14	0,092	0,171	0,058	114,17	212,03	72,13
26	44,90	80,39	15,32	1,070	0,817	0,284	1031,45	1846,74	351,94
70	28,60	65,77	27,32	0,531	1,221	0,383	657,01	1510,89	627,60
90	39,33	31,18	42,95	0,728	0,582	0,799	903,50	716,28	986,66



Σχήμα 10.41: Ρυθμός διάβρωσης οπλισμών σε συνάρτηση με το χρόνο σε θάλαμο αλατονέφωσης



Σχήμα 10.42: Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας (g) συναρτήσσει του χρόνου εμβάπτισης σε NaCl 3,5% κ.β



Σχήμα 10.43: Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας σε g συναρτήσσει του χρόνου εμβάπτισης σε Na₂SO₄ 5% κ.β

Από τα διαγράμματα 10.42, 10.43 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Τα δοκίμια που περιέχουν EMDW σε ποσοστό 10% κ.β έχουν τις υψηλότερες τιμές ρεύματος σε δοκίμια εμβαπτισμένα σε Na₂SO₄ 5% κ.β.,
- Οι σπλισμοί των δοκιμών τσιμεντοκονίας χωρίς EMDW και εμβάπτιση σε NaCl 3,5% κ.β εμφανίζονται πιο διαβρωμένοι,
- Η αύξηση του ποσοστού προσθήκης δεν παρουσιάζει δυσμενή αποτελέσματα σχετικά με τη διάβρωση των σπλισμών σε περιβάλλον NaCl.

10.2.10 Σταθμικός προσδιορισμός απώλειας μάζας οπλισμών

Η εκτίμηση της διάβρωση των οπλισμών πραγματοποιήθηκε με υπολογισμό της απώλειας μάζας και του ρυθμού διάβρωσης. Οι οπλισμοί πριν τον εγκιβωτισμό τους στα δοκίμια, καθαρίστηκαν με απιονισμένο νερό και ακετόνη και στη συνέχεια ζυγίστηκαν σε ζυγό με ακρίβεια 0,1mg. Η απώλεια μάζας προέκυψε από τον τύπο:

$$\Delta m (\%) = \frac{M_{\alpha\rho\chi} - M_{\tau\epsilon\lambda}}{M_{\alpha\rho\chi}} \times 100\%, \text{ ενώ ο ρυθμός διάβρωσης από: } CR = \frac{8,76 \times 10^7 \times \Delta m}{A \times T \times d}$$

Όπου,

$$\Delta m = m_{\alpha\rho\chi} - m_{\tau\epsilon\lambda}$$

T ο χρόνος έκθεσης των δοκιμών (h),

A η επιφάνεια του οπλισμού ($A=40\text{cm}^2$).

10.2.10.1 Απώλειες μάζας οπλισμών σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

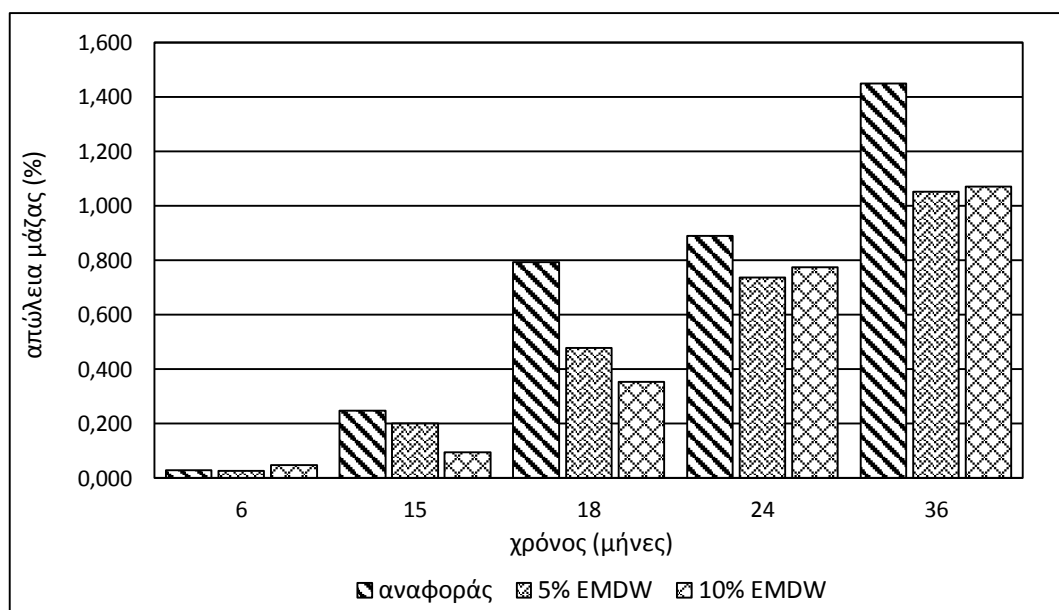
Τα οπλισμένα δοκίμια τσιμεντοκονίας εμβαπτίστηκαν σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β και έσπασαν στους 6,15,18,24 και 36 μήνες. Οι χάλυβες καθαρίστηκαν και ζυγίστηκαν με παρόμοιο τρόπο όπως πριν τον εγκιβωτισμό τους. Συνολικά κατασκευάστηκαν τρεις σειρές δοκιμών με 8 δοκίμια οπλισμένης τσιμεντοκονίας για την καθεμία. Μια σειρά δοκιμών αναφοράς και άλλες δυο σειρές στις οποίες έγινε αντικατάσταση του τσιμέντου σε ποσοστά 5% και 10% από EMDW .

Ο πίνακας 10.41 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων της απώλειας μάζας και του ρυθμού διάβρωσης.

Πίνακας 10.41: Αποτελέσματα απώλειας μάζας και ρυθμού διάβρωσης οπλισμών εντός δοκιμών τσιμεντοκονίας σε NaCl 3,5% κ.β.

ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 6 μήνες				
	ΑΡΧΙΚΗ ΜΑΖΑ	ΤΕΛΙΚΗ ΜΑΖΑ	ΔB%	CR(μm/y)
5% EMDW	62,5252	62,5076	0,0281	1,4572
10% EMDW	62,7136	62,6836	0,0478	2,4838
αναφοράς	62,4917	62,4740	0,0283	1,4654
ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 15 μήνες				
	ΑΡΧΙΚΗ ΜΑΖΑ	ΤΕΛΙΚΗ ΜΑΖΑ	ΔB%	CR(μm/y)
5% EMDW	62,5252	62,3995	0,2010	10,4071
10% EMDW	61,5009	61,4423	0,0953	4,8517
αναφοράς	61,3088	61,1566	0,2483	12,6012
ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 18 μήνες				
	ΑΡΧΙΚΗ ΜΑΖΑ	ΤΕΛΙΚΗ ΜΑΖΑ	ΔB%	CR(μm/y)
5% EMDW	64,1710	63,8638	0,4787	25,4342
10% EMDW	64,1082	63,8813	0,3539	18,7858

αναφοράς	62,6264	62,1297	0,7931	41,1235
ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 24 μήνες				
	ΑΡΧΙΚΗ ΜΑΖΑ	ΤΕΛΙΚΗ ΜΑΖΑ	ΔB%	CR(μm/y)
5%	61,3148	608626	0,7375	37,4433
10% EMDW	61,7119	61,2335	0,7752	39,6084
αναφοράς	61,1273	60,5835	0,8896	45,0231
ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 36 μήνες				
	ΑΡΧΙΚΗ ΜΑΖΑ	ΤΕΛΙΚΗ ΜΑΖΑ	ΔB%	CR(μm/y)
5%	62,5332	61,8741	1,4573	54,5692
10% EMDW	62,259	61,5926	1,0704	55,1736
αναφοράς	61,0115	60,1275	1,4489	73,1894



Σχήμα 10.44: απώλεια μάζας σπλισμών % συναρτήσεως του χρόνου εμβάπτισης σε NaCl 3,5% κ.β.

Από το σχήμα 10.44 φαίνεται ότι η προσθήκη του παραπροϊόντος EMDW και στα δύο ποσοστά προσθήκης, έπειτα από 6 μήνες εμβάπτισης σε διάλυμα NaCl μειώνει την απώλεια μάζας των σπλισμών συγκριτικά με τα δοκίμια αναφοράς.

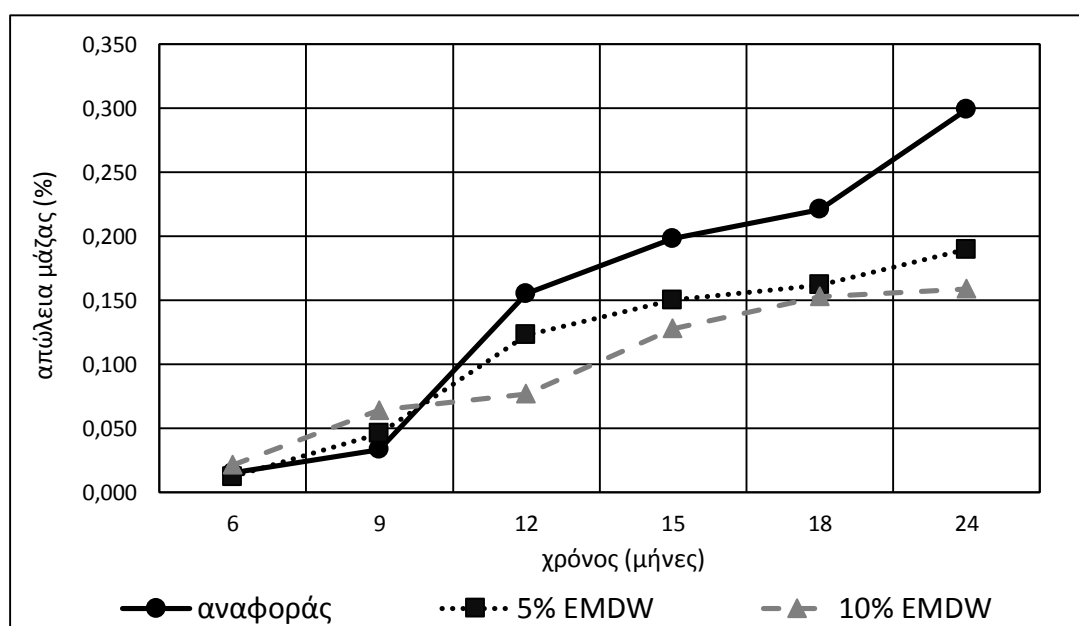
10.2.10.2 Απώλειες μάζας σπλισμών στην ατμόσφαιρα

Η απώλεια μάζας και ο ρυθμός διάβρωση των χαλύβων υπολογίστηκε έπειτα από έκθεση σπλισμένων δοκιμίων τσιμεντοκονίας στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Ο πίνακας 10.42 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Πίνακας 10.42: Αποτελέσματα απώλειας μάζας και ρυθμού διάβρωσης σπλισμών μετά από έκθεση σε φυσικό περιβάλλον

ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 6 μήνες				
	ΑΡΧΙΚΗ ΜΑΖΑ	ΤΕΛΙΚΗ ΜΑΖΑ	Δm%	CR(μm/y)
5% EMDW	60,5445	60,5371	0,0122	0,6127
10% EMDW	61,7307	61,7175	0,0214	1,0929

αναφοράς	62,6382	62,6286	0,0153	0,7948
ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 9 μήνες				
	ΑΡΧΙΚΗ ΜΑΖΑ	ΤΕΛΙΚΗ ΜΑΖΑ	Δm%	CR(μm/y)
5% EMDW	58,9773	58,9503	0,0458	2,2354
10% EMDW	57,8067	57,7696	0,0642	3,0716
αναφοράς	61,7594	61,7388	0,0334	1,7055
ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 12 μήνες				
	ΑΡΧΙΚΗ ΜΑΖΑ	ΤΕΛΙΚΗ ΜΑΖΑ	Δm%	CR(μm/y)
5% EMDW	61,0055	60,9304	0,1231	6,2178
10% EMDW	61,7462	61,6987	0,0769	3,9327
αναφοράς	63,5275	63,4288	0,1554	8,1717
ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 15 μήνες				
	ΑΡΧΙΚΗ ΜΑΖΑ	ΤΕΛΙΚΗ ΜΑΖΑ	Δm%	CR(μm/y)
5% EMDW	62,0112	61,91804	0,1502	7,7130
10% EMDW	62,7129	62,6326	0,1280	6,6483
αναφοράς	61,5761	61,45398	0,1983	10,1107
ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 18 μήνες				
	ΑΡΧΙΚΗ ΜΑΖΑ	ΤΕΛΙΚΗ ΜΑΖΑ	Δm%	CR(μm/y)
5% EMDW	61,9215	61,8212	0,1620	8,3042
10% EMDW	61,9661	61,8716	0,1525	7,8240
αναφοράς	61,0764	60,9414	0,2210	11,1771
ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 24 μήνες				
	ΑΡΧΙΚΗ ΜΑΖΑ	ΤΕΛΙΚΗ ΜΑΖΑ	Δm%	CR(μm/y)
5% EMDW	60,74195	60,6269	0,1899	9,5295
10% EMDW	62,5837	62,4842	0,1590	8,2380
αναφοράς	60,6354	60,4535	0,2990	15,0601



Σχήμα 10.45: απώλεια μάζας οπλισμών % συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στην ατμόσφαιρα.

10.2.10.3 Απώλειες μάζας οπλισμών σε διάλυμα Na_2SO_4 5% κ.β

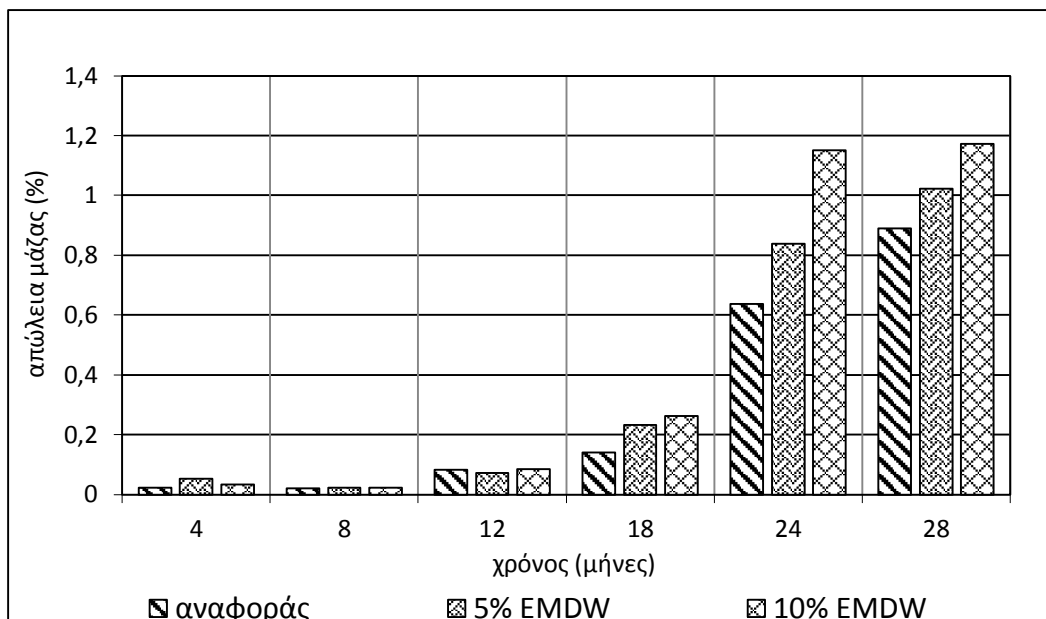
Η εκτίμηση της διάβρωσης των οπλισμών σε περιβάλλον θεικών ιόντων πραγματοποιήθηκε με μερική εμβάπτιση οπλισμένων δοκιμίων τσιμεντοκονίας σε διάλυμα Na_2SO_4 5% κ.β.

Τα δοκίμια παρέμειναν εμβαπτισμένα στο διάλυμα σε εργαστηριακό περιβάλλον και οι μετρήσεις της απώλειας μάζας και του ρυθμού διάβρωσης έγιναν στους 4,8,12,18 και 24 μήνες. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 10.43.

Πίνακας 10.43: Αποτελέσματα απώλειας μάζας και ρυθμού διάβρωσης οπλισμών μετά από μερική εμβάπτιση σε Na_2SO_4 5% κ.β

ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 4 μήνες				
ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΑΡΧΙΚΗ ΜΑΖΑ	ΤΕΛΙΚΗ ΜΑΖΑ	Δm%	CR(μm/y)
5% EMDW	64,3991	64,3659	0,0516	2,7487
10% EMDW	61,5954	61,5748	0,0334	1,7055
αναφοράς	61,4637	61,4499	0,0225	1,1425
ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 8 μήνες				
5% EMDW	61,3745	61,3602	0,0233	1,1839(μm/y)
10% EMDW	61,5724	61,5586	0,0224	1,1425
αναφοράς	60,374	60,3623	0,0194	0,9687
ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 12 μήνες				
5% EMDW	61,3284	61,2779	0,0823	4,1811
10% EMDW	61,7141	61,6703	0,0710	3,6264
αναφοράς	65,1946	65,1393	0,0848	4,5785
ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 18 μήνες				
5% EMDW	60,9817	60,8958	0,1409	7,1120
10% EMDW	63,9171	63,76900	0,2317	12,2617
αναφοράς	60,4711	60,3120	0,2631	13,1724
ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 24 μήνες				
5% EMDW	62,1354	61,6134	0,8377	43,2182
10% EMDW	65,1504	64,4010	1,1503	62,0454
αναφοράς	62,4555	62,0581	0,6363	32,9021
ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 28 μήνες				
5% EMDW	63,4402	62,2551	1,8681	98,1185
10% EMDW	65,5429	64,7813	1,1729	63,0528
αναφοράς	61,7656	61,2157	0,8903	45,5281

Από το σχήμα 10.46 φαίνεται ότι μετά από 12 μήνες εμβάπτισης σε διάλυμα θεικού Νατρίου, τα δοκίμια στα οποία αντικαταστάθηκε το τσιμέντο από EMDW εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές απώλειας μάζας. Συγκεκριμένα αυξανόμενο το ποσοστό της προσθήκης EMDW αυξάνεται και η απώλεια μάζας των οπλισμών.



Σχήμα 10.46: απώλεια μάζας οπλισμών % συναρτήσει του χρόνου εμφύπτισης σε Na_2SO_4 5% κ.β.

Από τη μακροσκοπική εξέταση των δοκιμών τσιμεντοκονίας, φάνηκε σημαντική μείωση της διαμέτρου τους λόγω της επίδρασης των θειικών ιόντων (σχήμα 10.47).



Σχήμα 10.47: οπλισμένα δοκίμια τσιμεντοκονίας με 5% EMDW (αριστερά) και 10% EMDW (δεξιά) μετά από 24 μήνες εμφύπτισης σε Na_2SO_4 5% κ.β.

10.2.10.4 Απώλειες μάζας οπλισμών σε παραθαλάσσιο περιβάλλον

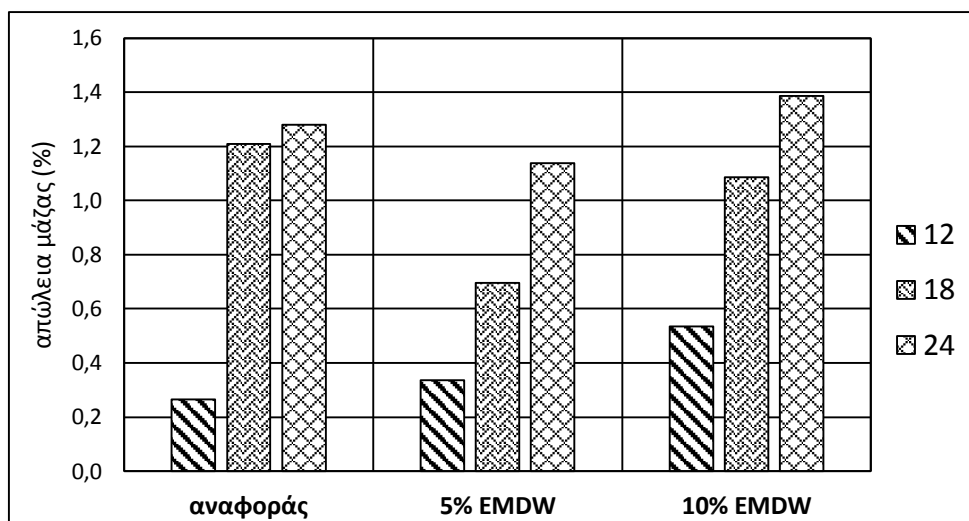
Η εκτίμηση της διάβρωσης των οπλισμών σε φυσικό περιβάλλον παρουσία ιόντων χλωρίου μελετήθηκε με έκθεση δοκιμών τσιμεντοκονίας σε παραθαλάσσιο περιοχή στη βιομηχανία Χαλυβουργική Α.Ε. Συνολικά κατασκευάστηκαν τρεις σειρές δοκιμών με 5% και 10% EMDW ενώ κατασκευάστηκε και μια σειρά δοκιμών χωρίς πρόσθετο.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τσιμέντο CEM I 42.5N, ασβεστολιθική άμμος λατομείου και νερό δικτύου ΕΜΠ. Ο λόγος W/C ήταν 0,65 σε όλες τις κατηγορίες δοκιμών.

Τα δοκίμια εκτέθηκαν για συνολικό διάστημα 24 μηνών και τα αποτελέσματα των μετρήσεων της απώλειας μάζας και του ρυθμού διάβρωσης παρουσιάζονται στον πίνακα 10.44.

Πίνακας 10.44: Αποτελέσματα απώλειας μάζας και ρυθμού διάβρωσης σπλισμών
Σε παραθαλάσσιο/βιομηχανικό περιβάλλον

ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 12ΜΗΝΕΣ					
	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΑΡΧΙΚΗ ΜΑΖΑ	ΤΕΛΙΚΗ ΜΑΖΑ	Δm%	CR(μm/γ)
5% EMDW	XAL-Mn5-5	58,3297	58,1470	0,3132	15,1264
	XAL-Mn5-8	60,5820	60,2768	0,5038	25,2686
	XAL-Mn5-7	62,4683	62,4108	0,0920	4,7606
	XAL-Mn5-6	60,4637	60,2018	0,4332	21,6836
	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ 5% EMDW			0,3355	16,7098
10% EMDW	XAL-Mn10-8	62,1351	61,6228	0,8245	42,4151
	XAL-Mn10-3	61,8062	61,4675	0,5480	28,0421
	XAL-Mn10-5	61,4617	61,2581	0,3313	16,8568
	XAL-Mn10-6	60,2744	60,0148	0,4307	21,4932
	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ 10% EMDW			0,5336	27,2018
αναφοράς	XAL-REF-4	64,1175	63,9187	0,3101	16,4593
	XAL-REF-6	60,8016	60,7236	0,1283	6,4579
	XAL-REF-8	62,0393	61,8623	0,2853	14,6544
	XAL-REF-5	62,2878	62,0763	0,3396	17,5108
	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ			0,2658	13,7706
ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 18ΜΗΝΕΣ					
5% EMDW	XAL-Mn5-1	62,0539	61,6228	0,6947	35,6923
	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ 5% EMDW			0,6947	35,692
10% EMDW	XAL-Mn10-2	64,7732	64,3873	0,5958	31,9500
	XAL-Mn10-4	61,8870	61,0386	1,3709	70,2420
	XAL-Mn10-7	60,3509	59,5725	1,2898	64,4464
	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ 10% EMDW			1,3303	67,3442
αναφοράς	XAL-REF-1	69,4355	68,6126	1,1851	68,1308
	XAL-REF-3	63,3818	62,602	1,2303	64,5624
	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ			1,0855	55,546
ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 24 ΜΗΝΕΣ					
	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΑΡΧΙΚΗ ΜΑΖΑ	ΤΕΛΙΚΗ ΜΑΖΑ	Δm%	CR(μm/γ)
5% EMDW	XAL-Mn5-2	64,3510	63,7596	0,9190	48,9641
	XAL-Mn5-4	61,5007	60,6657	1,3577	69,1326
	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ 5% EMDW			1,1384	59,0483
10% EMDW	XAL-Mn10-1	61,9631	61,1044	1,3858	71,0948
	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ 10% EMDW			1,3858	71,0948
αναφοράς	XAL-REF-2	61,2525	60,0652	1,9384	98,3007
	XAL-REF-7	62,4060	62,0182	0,6214	32,1073
	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ			1,2799	65,2040



Σχήμα 10.48: απώλεια μάζας οπλισμών % συναρτήσει του χρόνου έκθεσης σε παραθαλάσσιο περιβάλλον

από το σχήμα 10.48 προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η προσθήκη 5% μειώνει των απώλεια μάζας του οπλισμού συγκριτικά με τα αναφοράς μετά από 24 μήνες έκθεσης σε παραθαλάσσιο περιβάλλον.
- Τα δοκίμια χωρίς πρόσθετο εμφανίζουν τη μεγαλύτερη ποσοστιαία μεταβολή μεταξύ 12 και 18 μηνών έκθεσης.
- Η προσθήκη 10% EMDW αυξάνει τη διάβρωση του οπλισμού συγκρινόμενο με τα αναφοράς

10.2.10.5 Απώλειες μάζας οπλισμών σε θάλαμο επιταχυνόμενης ενανθράκωσης

Η εκτίμηση της διάβρωσης των οπλισμών σε συνθήκες επιταχυνόμενης ενανθράκωσης εκτιμήθηκε με παραμονή οπλισμένων δοκιμίων τιμεντοκονίας σε θάλαμο επιταχυνόμενης ενανθράκωσης στο εργαστήριο οπλισμένου σκυροδέματος στη βιομηχανία TITAN A.E.

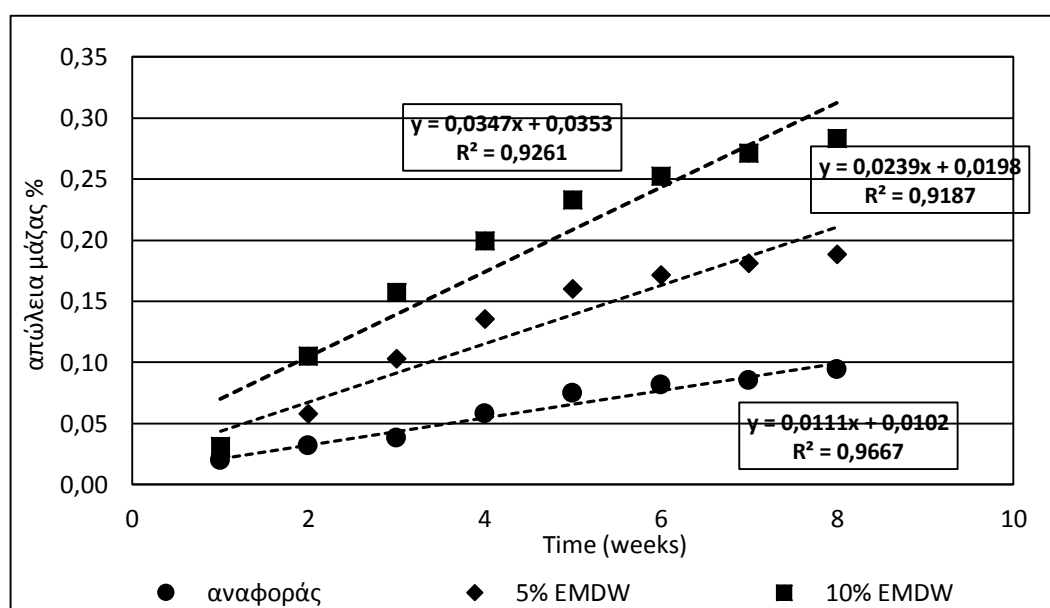
Ο συνολικός χρόνος έκθεσης ήταν 8 εβδομάδες και η απώλεια μάζας μετρήθηκε ανά εβδομάδα έκθεσης για κάθε κατηγορία δοκιμίων. Οι συνθήκες του θαλάμου ήταν CO₂ 12,5%, T= 25^oC και RH= 65%. Ο πίνακας 10.45 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων της απώλειας μάζας και τον υπολογισμό του ρυθμού διάβρωσης των οπλισμών εντός θαλάμου επιταχυνόμενης ενανθράκωσης.

Πίνακας 10.45: Αποτελέσματα απώλειας μάζας οπλισμών σε g εντός θαλάμου επιταχυνόμενης ενανθράκωσης

Χρόνος (εβδομάδες)	5% EMDW	10% EMDW	αναφοράς
1	0,0224	0,031	0,0195
2	0,0576	0,105	0,0317
3	0,1030	0,1571	0,0379

4	0,1352	0,1991	0,0578
5	0,1597	0,2326	0,0747
6	0,1716	0,2523	0,0811
7	0,1807	0,2711	0,0849
8	0,1883	0,2832	0,094

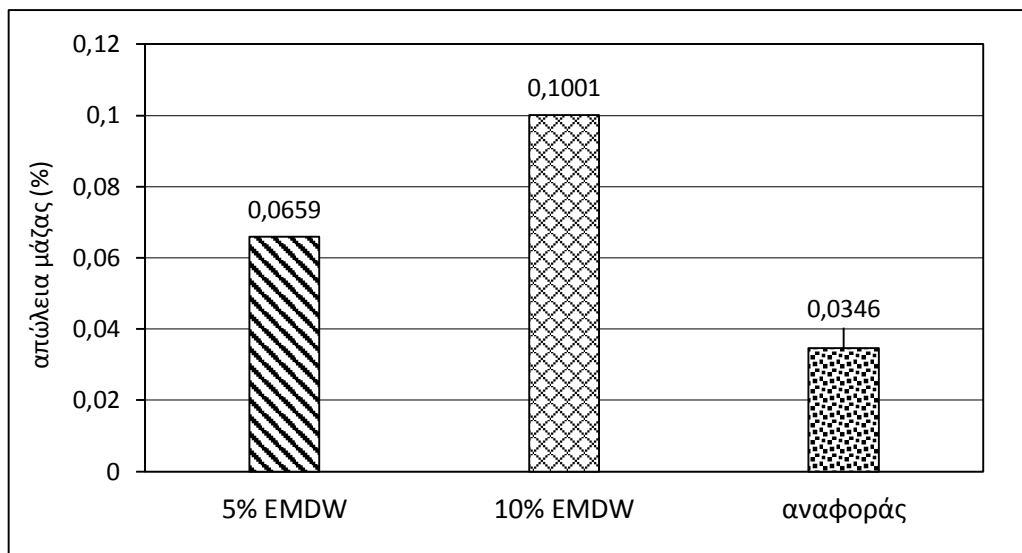
Στο σχήμα 10.49 παρουσιάζεται η απώλεια μάζας των σπλισμών συναρτήσει του χρόνου παραμονής σε θάλαμο ενανθράκωσης. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι τα δοκίμια χωρίς πρόσθετο έχουν τη μικρότερη απώλεια μάζας ενώ όσο αυξάνεται το ποσοστό της προσθήκης οι σπλισμοί διαβρώνονται περισσότερο. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο αυξημένο πορώδες που εμφανίζουν τα δοκίμια με EMDW σε σχέση με τα αναφοράς λόγω ενανθράκωσης.



Σχήμα 10.49: απώλεια μάζας σπλισμών % συναρτήσει του χρόνου έκθεσης σε θάλαμο ενανθράκωσης

10.2.10.6 Απώλειες μάζας σπλισμών σε θάλαμο αλατονέφωσης

Η εκτίμηση της διάβρωσης των σπλισμών σε αυξημένη συγκέντρωση χλωριόντων μελετήθηκε με παραμονή των δοκιμίων για 45 ημέρες σε θάλαμο αλατονέφωσης και στη συνέχεια για 55 ημέρες μερική εμβάπτιση σε NaCl 3,5% κ.β. Οι συνθήκες του θαλάμου ήταν $C_{NaCl} = 5\%$ κ.β, $T = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $RH = 98\%$. Στο σχήμα 10.50 παρουσιάζεται η απώλεια μάζας των σπλισμών για τις τρεις κατηγορίες δοκιμίων όπου φαίνεται τα δοκίμια με 10% πρόσθετο να διαβρώνονται εντονότερα από τις άλλες δυο σειρές δοκιμίων στις 100 ημέρες έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον.



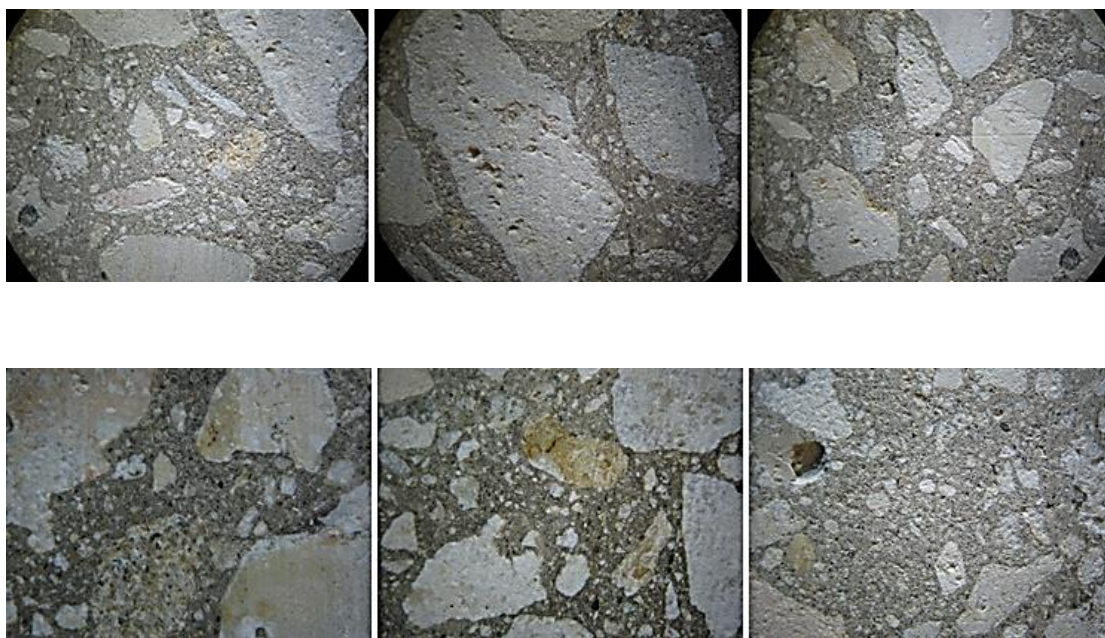
Σχήμα 10.50: απώλεια μάζας σπλισμών % στις 100 ημέρες παραμονής σε θάλαμο αλατονέφωσης

10.2.11 Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης και στερεοσκοπία

10.2.11.1 Στερεοσκοπική παρατήρηση δοκιμών με πρόσθετο EMDW

Τα δοκίμια σκυροδέματος παρατηρήθηκαν με τη χρήση στερεοσκοπίου στις 130 ημέρες μερικής εμβάπτισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β και Na₂SO₄ 5% κ.β. Το ψηφιακό στερεοσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το LEICA EZ4.

ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ 10% EMDW



Σχήμα 10.51: κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος με 10% EMDW μετά από κοπή σε τροχό στις 130 ημέρες εμβάπτισης σε NaCl 3,5% κ.β



Σχήμα 10.52: Μορφολογία σκυροδέματος με 10% EMDW στις 130 ημέρες εμβάπτισης σε **NaCl 3,5% κ.β**



Σχήμα 10.53: Μορφολογία σκυροδέματος χωρίς πρόσθετο στις 130 ημέρες εμβάπτισης σε **Na₂SO₄ 5% κ.β**

ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ 5% EMDW



Σχήμα 10.54: κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος με 5% EMDW μετά από κοπή σε τροχό στις 130 ημέρες εμβάπτισης σε **NaCl 3,5% κ.β**



Σχήμα 10.55: Μορφολογία σκυροδέματος με 5% EMDW στις 130 ημέρες εμβάπτισης σε NaCl 3,5% κ.β



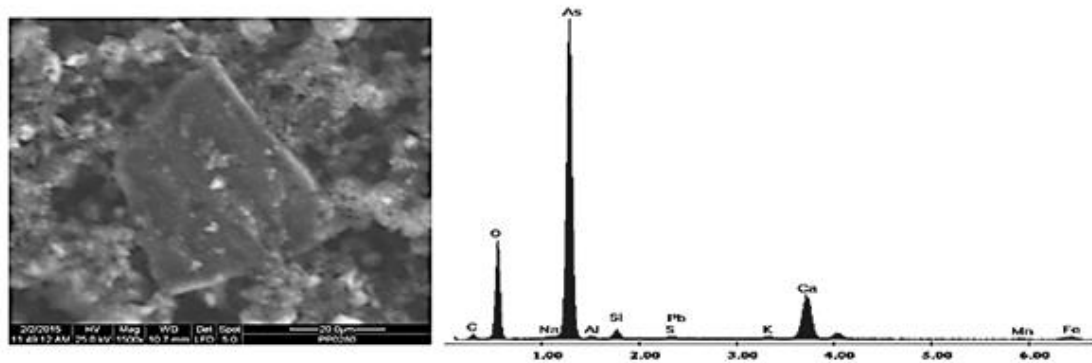
Σχήμα 10.56: Μορφολογία σκυροδέματος με 10% EMDW στις 130 ημέρες εμβάπτισης σε Na_2SO_4 5% κ.β

ΔΟΚΙΜΙΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

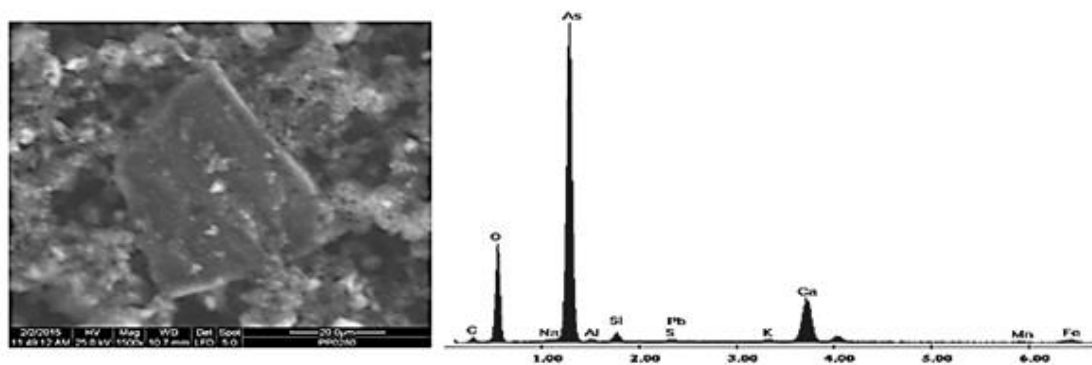


Σχήμα 10.57: Μορφολογία σκυροδέματος χωρίς πρόσθετο στις 130 ημέρες εμβάπτισης σε NaCl 3,5% κ.β

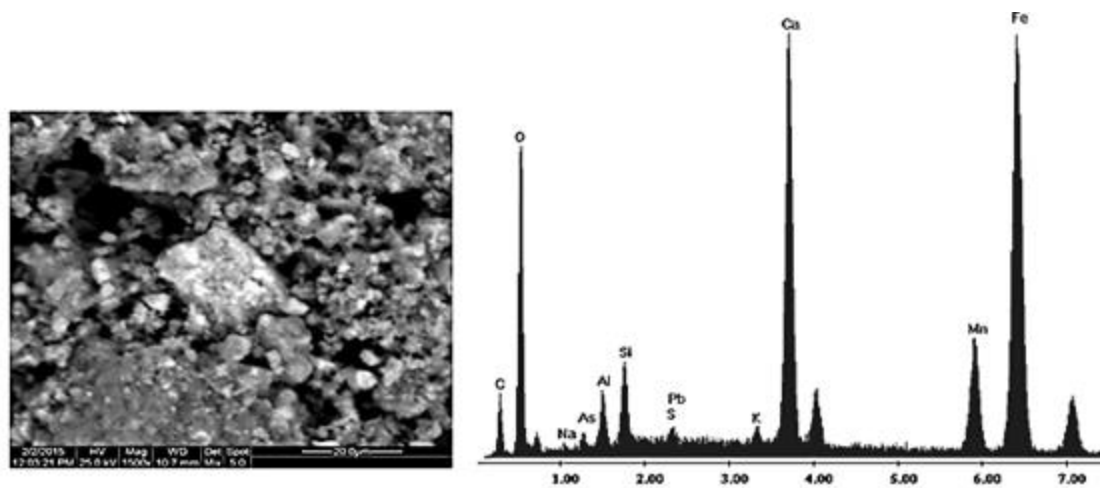
10.2.11.2 Οπτική παρατήρηση σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM) δοκιμίων με πρόσθετο EMDW



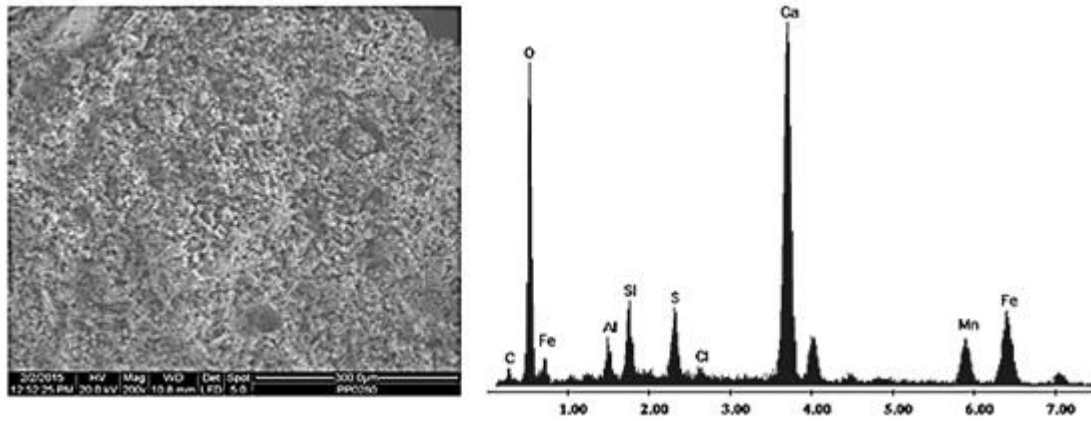
Σχήμα 10.58: Οπτική παρατήρηση x1500 του προσθέτου EMDW στο κέντρο της φωτογραφίας σε δοκίμιο τσιμεντοκονίας ηλικίας 56 ημερών



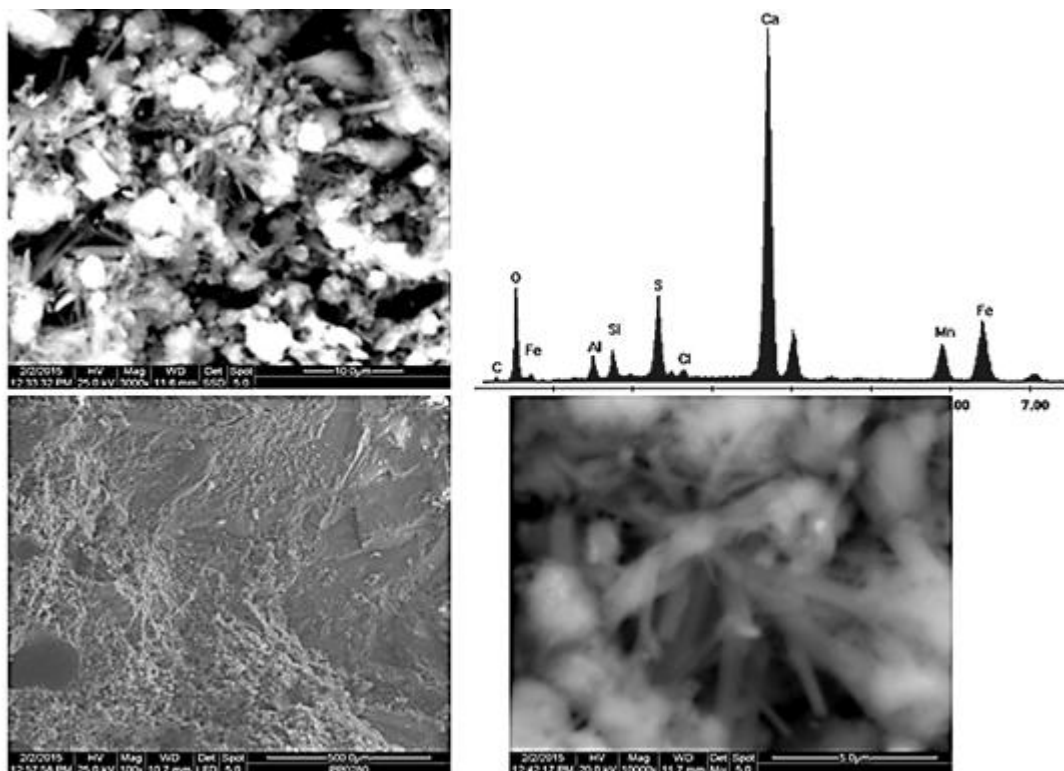
Σχήμα 10.59: Οπτική απεικόνιση x1000 'γέφυρας' μεταξύ του EMDW και του τσιμέντου σε δοκίμιο τσιμεντοκονίας ηλικίας 56 ημερών



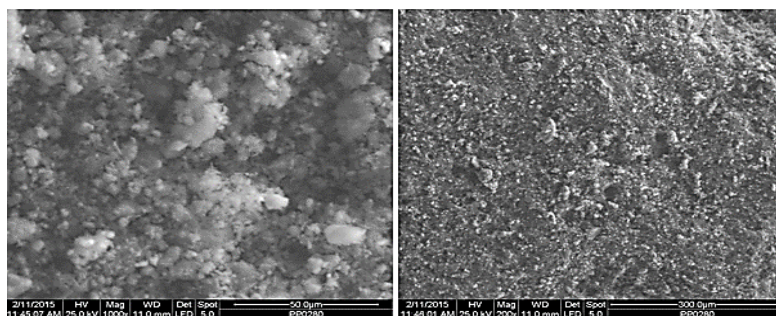
Σχήμα 10.60: Οπτική απεικόνιση x1500 του προσθέτου EMDW και του τσιμέντου σε δοκίμιο Τσιμεντοκονίας ηλικίας 56 ημερών



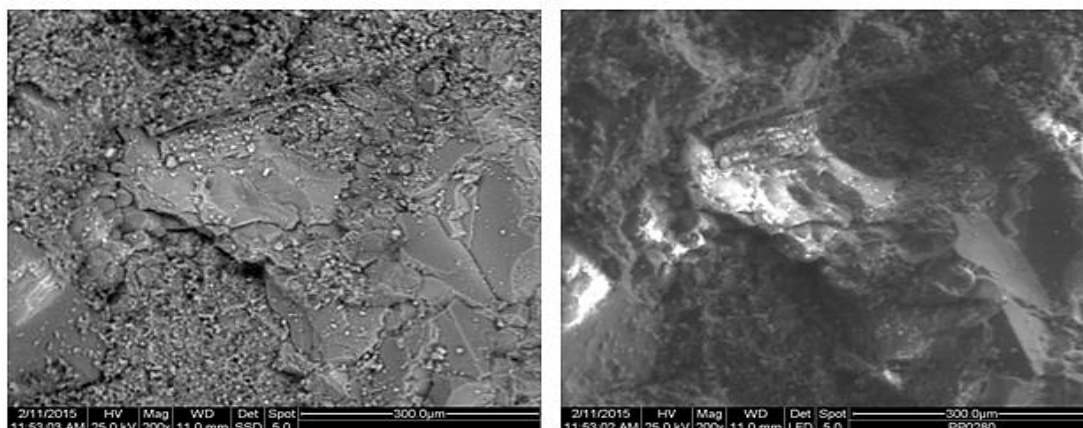
Σχήμα 10.61: Οπτική απεικόνιση x200 δοκιμίου τσιμεντοκονίας ηλικίας 56 ημερών



Σχήμα 10.62: Οπτική απεικόνιση δοκιμίου τσιμεντοκονίας εμβαπτισμένου σε Na₂SO₄ 5% κ.β ηλικίας 150 ημερών όπου διακρίνονται οι βελονοειδείς κρύσταλλοι εντριγκίτη



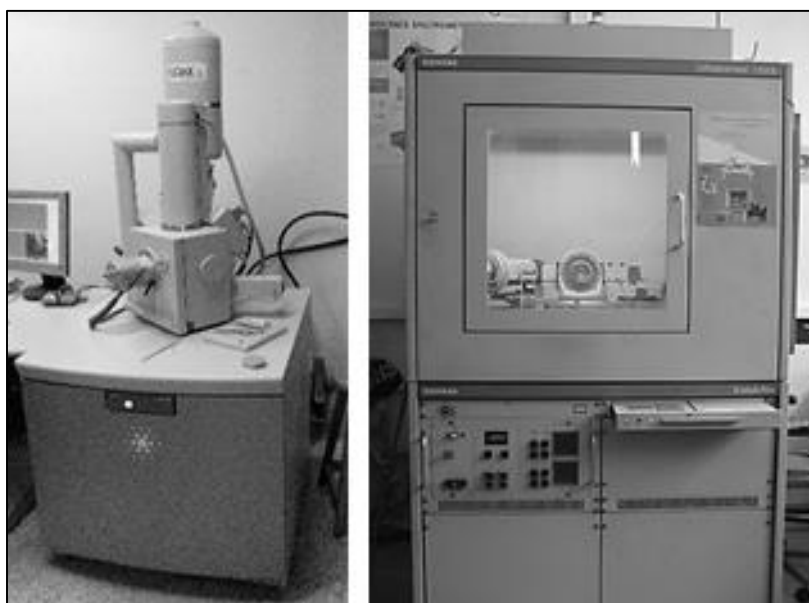
Σχήμα 10.63: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου με EMDW και εμβάπτιση σε Na₂SO₄ 5% κ.β για 20 μήνες



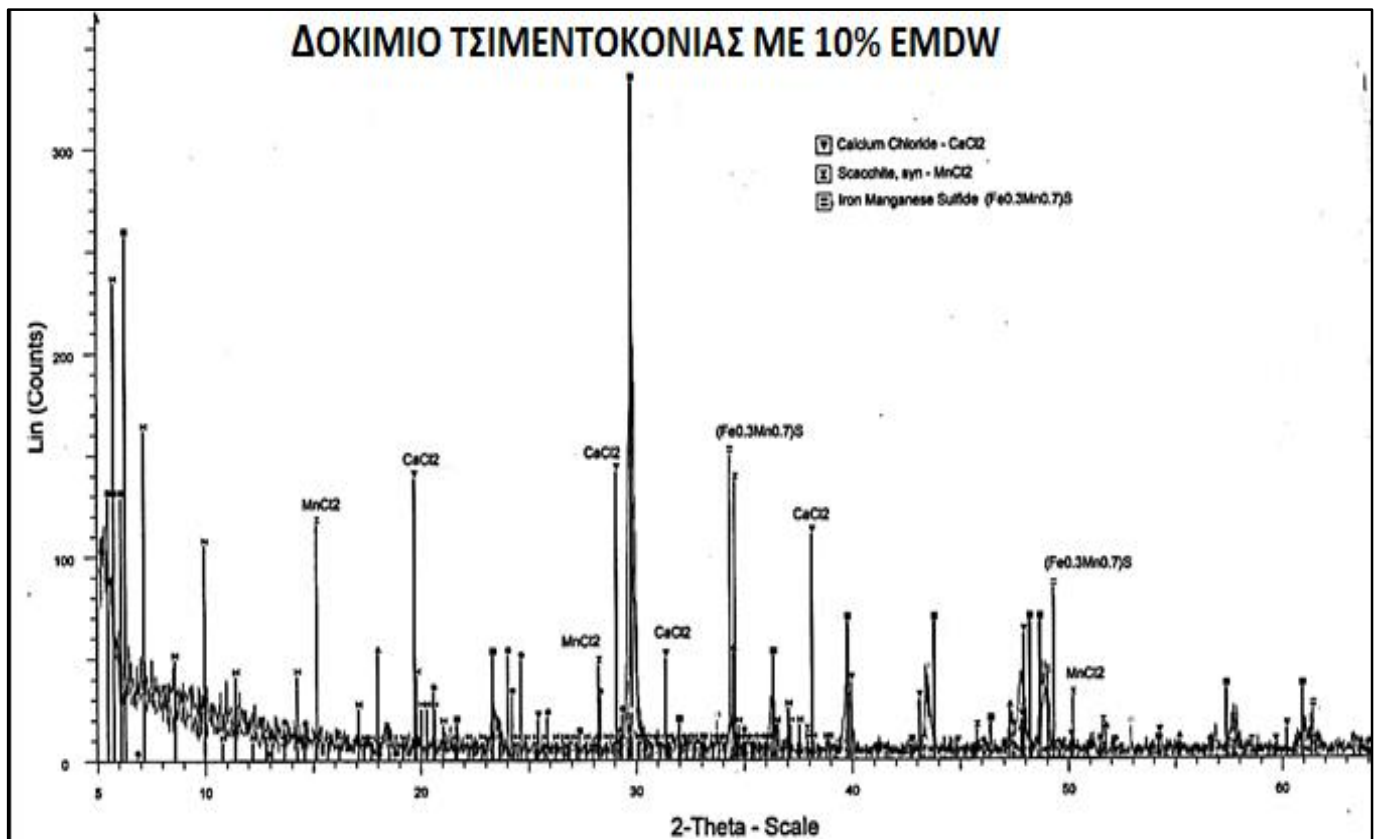
Σχήμα 10.64: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου x200 με EMDW και εμβάπτιση σε Na_2SO_4 για 20 μήνες

10.2.12 Περίθλαση ακτίνων Χ

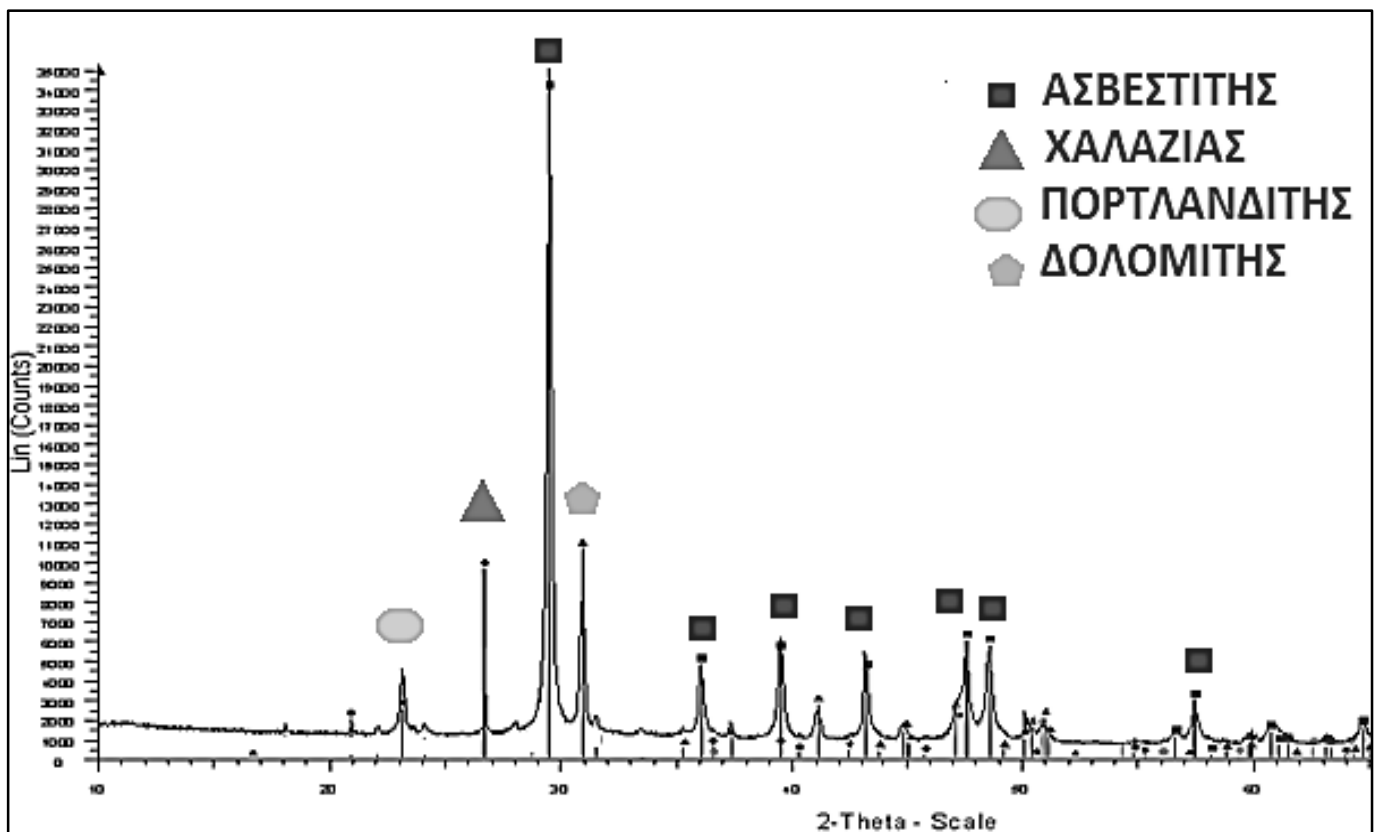
Η εύρεση κρυσταλλικών φάσεων έγινε με την τεχνική της περίθλασης ακτίνων Χ σε περιθλασίμετρο *SIEMENS D5000* στη σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ. Το βήμα σάρωσης των δειγμάτων ήταν 0,033 (2 μοίρες/λεπτό) και η γωνία σάρωσης 5-65 μοίρες.



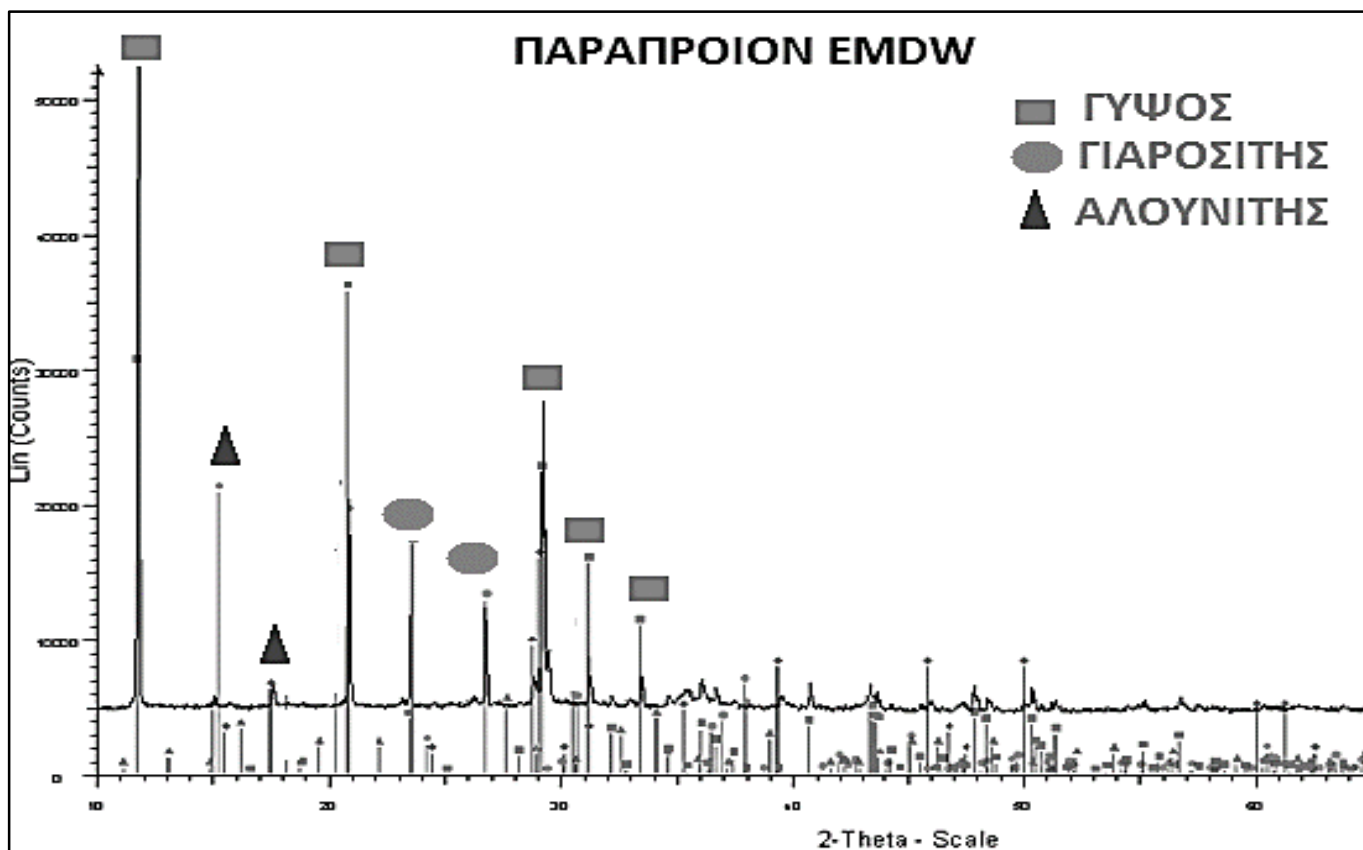
Σχήμα 10.65: Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (αριστερά) και περιθλασίμετρο ακτίνων Χ (δεξιά)



Σχήμα 10.66: XRD με 10% EMDW έπειτα από 2 χρόνια εμβάπτισης σε NaCl 3,5% κ.θ



Σχήμα 10.67: XRD σε σκυρόδεμα με 10% EMDW έπειτα από 130 ημέρες εμβάπτισης σε NaCl 3,5% κ.θ



Σχήμα 10.68: Κρυσταλλικές φάσεις με περίθλαση ακτίνων Χ στο παραπροϊόν EMDW

10.2.13 Συνάφεια οπλισμού – σκυροδέματος (pull-out test)

Η συνάφεια μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος εκτιμήθηκε με τη δοκιμή εξόλκευσης (pull-out test). Για τη δοκιμή χρησιμοποιήθηκαν κυβικά δοκίμια ακμής 200mm στα οποία τοποθετήθηκε νευροχάλυβας τύπου *Tempcore B500C* διαμέτρου 16mm και μήκους 60cm. Τα υλικά κατασκευής των δοκιμών ήταν τσιμέντο *CEM II A-M 42.5 N*, ασβεστολιθικά αδρανή Κύπρου και νερό δικτύου Λευκωσίας. Ο λόγος W/C ήταν 0,65 και κατασκευάστηκαν δοκίμια αναφοράς και δοκίμια στα οποία αντικαταστάθηκε το τσιμέντο με 10%EMDW. Η μορφή των δοκιμών και η πειραματική διάταξη της δοκιμής εξόλκευσης φαίνεται στο σχήμα 10.69.

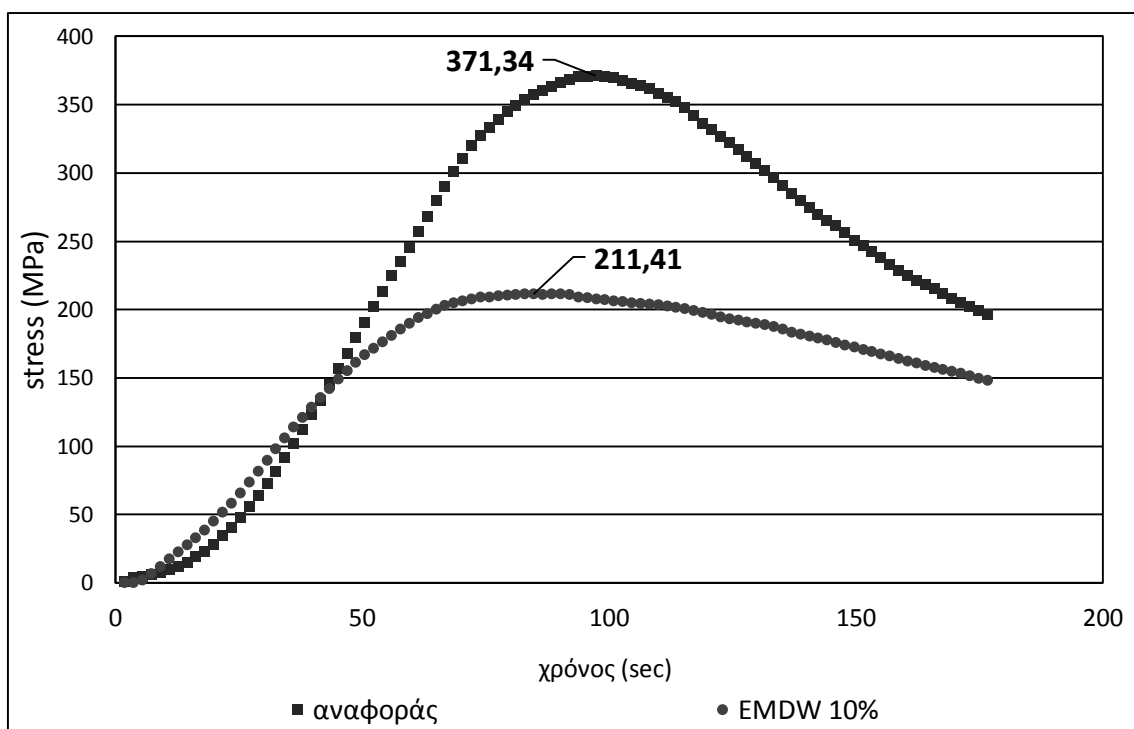
Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε στις 28 ημέρες αφού τα δοκίμια βγήκαν από τη δεξαμενή συντήρησης και η μηχανή που έγινε η εξόλκευση ήταν η LLOYD LR300K με μέγιστο φορτίο 300KN. Ο ρυθμός φόρτισης ήταν 0,05MPa/s.

Στο σχήμα 10.70 παρουσιάζεται η τάση συναρτήσει του χρόνου εξόλκευσης. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι η μέγιστη τάση για ολίσθηση του οπλισμού είναι μεγαλύτερη στο δοκίμιο αναφοράς 371,34 MPa ενώ στο δοκίμιο με 10% EMDW 211,41 MPa. Τα αποτελέσματα της εξόλκευσης ήταν αναμενόμενα εξαιτίας του αυξημένου πορώδους

και επομένως της χαμηλής θλιπτικής αντοχής που παρουσιάζουν τα δοκίμια με το παραπροϊόν στις 28 ημέρες που πραγματοποιήθηκε η δοκιμή.

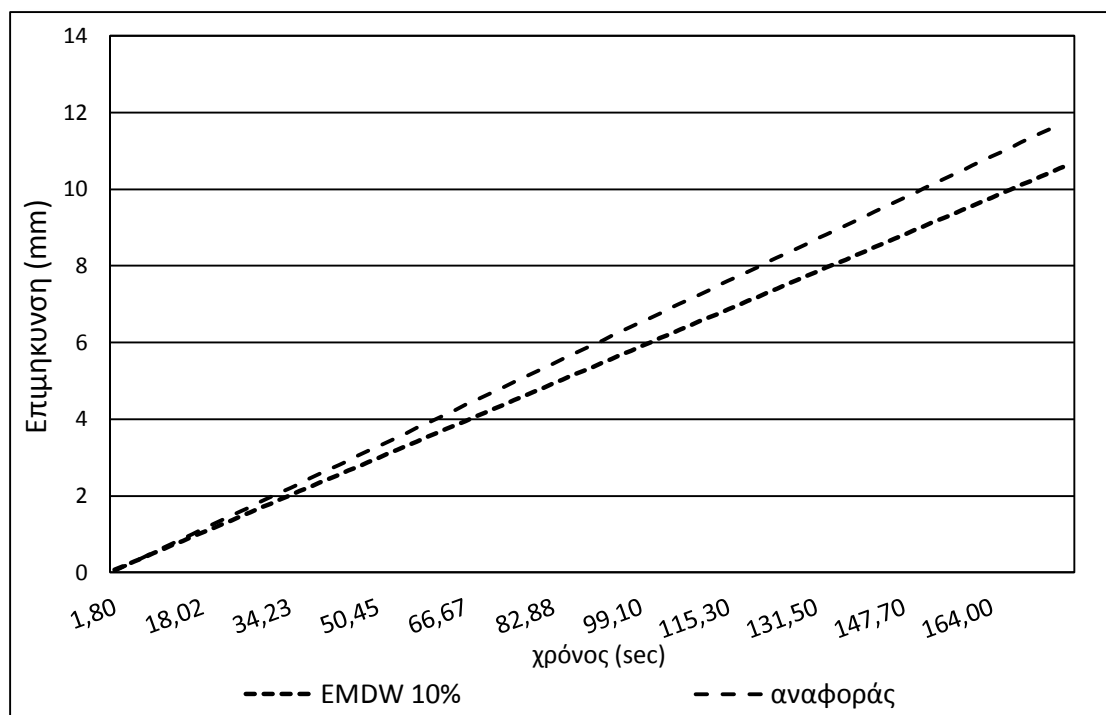


Σχήμα 10.69: Κυβικά δοκίμια για τη δοκιμή εξόλκευσης (αριστερά) και δοκιμή pull-out (δεξιά) στις 28 ημέρες μετά από συντήρηση



Σχήμα 10.70: Τάση σε MPa συναρτήσει του χρόνου εξόλκευσης σε sec κατά τη δοκιμή pull-out

Το σχήμα 10.71 παρουσιάζει την επιμήκυνση (elongation) του οπλισμού συναρτήσει του χρόνου εξόλκευσης. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι η συνάφεια μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος στο σκυρόδεμα με το πρόσθετο είναι μικρότερη από το αναφοράς γεγονός που οφείλεται στη μικρότερη πρόσφυση που έχουν.



Σχήμα 10.71: Επιμήκυνση χάλυβα σε mm συναρτήσει του χρόνου κατά τη δοκιμή εξόλευσης χάλυβα

10.3 ΜΕΡΙΚΟ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ 1 - ΒΑΘΜΟΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΠΟΥ ΠΡΟΣΦΕΡΕΙ Η ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΤΟΥ EMDW ΣΤΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι η εκτίμηση της ικανότητας του παραπροϊόντος από την παραγωγή Ηλεκτροχημικού Οξειδίου του Μαγγανίου (EMD) ως υλικό αντικατάστασης του τσιμέντου, για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος και την προστασία του οπλισμού από τη διάβρωση.

Για την εκτίμηση της ανθεκτικότητας του οπλισμένου σκυροδέματος, το παραπροϊόν, το οποίο αποτελείται κυρίως από θειικά άλατα ασβεστίου, σιδήρου και βαρέων μετάλλων χρησιμοποιήθηκε σε δύο (2) ποσοστά 5% και 10%. Ο βαθμός προστασίας που προσφέρει το συγκεκριμένο υλικό μελετήθηκε σε περιβάλλον αυξημένης συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου (παραθαλάσσιο, μερική εμβάπτιση NaCl, θάλαμος αλατονέφωσης) και περιβάλλον με CO₂ (θάλαμος επιταχυνόμενης ενανθράκωσης, ατμόσφαιρα). Επίσης εξετάστηκε η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος σε περιβάλλον Na₂SO₄. Η επιλογή του συγκεκριμένου άλατος έγινε διότι έχει αποδειχθεί (Nehdi et al., 2014) ότι σε σχέση με τα υπόλοιπα θειικά άλατα, το Na₂SO₄ προσβάλλει όλους τους τύπους σκυροδέματος σε πολύ μεγαλύτερη έκταση.

Ατμόσφαιρα/θάλαμος ενανθράκωσης

Σχετικά με τη βελτίωση της ανθεκτικότητας στην ατμόσφαιρα μπορούν να εξαχθούν τα εξής:

- ✓ Η μεγαλύτερη μείωση της απώλειας μάζας παρατηρήθηκε σε δοκίμια με 10% EMDW και έκθεση στην ατμόσφαιρα για 24 μήνες κατά 46,82% σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς ενώ τα δοκίμια με 10% εμφάνισαν μείωση κατά 36,45%.
- ✓ Το Δυναμικό E_{corr} συναρτήσεως του χρόνου έκθεσης στην ατμόσφαιρα δεν έδειξε διαφοροποιήσεις μεταξύ των τριών σειρών δοκιμών και δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με την τάση των σπλισμών για διάβρωση,
- ✓ Στους 18 μήνες το ολικό πορώδες των δοκιμών τσιμεντοκονίας με 10% EMDW είναι μειωμένο κατά 6,59% σε σχέση με τα αναφοράς,
- ✓ Η ενανθράκωση μειώθηκε κατά 25,23% για τη σειρά 5% EMDW και κατά 22,43% για τη σειρά 10% EMDW.
- ✓ Αυξανόμενο το ποσοστό της προσθήκης, αυξάνεται και το βάθος ενανθράκωσης εντός θαλάμου επιταχυνόμενης ενανθράκωσης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο αυξημένο πορώδες που έχουν τα δοκίμια με το πρόσθετο στις 8 εβδομάδες που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

Μερική εμβάπτιση σε NaCl 3,5% κ.β

Σε περιβάλλον διάβρωσης παρουσία ιόντων χλωρίου μπορούν να βγουν τα εξής συμπεράσματα:

- ✓ Οι σπλισμοί των δοκιμών με το EMDW διαβρώθηκαν λιγότερο κατά 17,10% και 12,86% για 5% και 10% προσθήκη αντίστοιχα μετά από 24 μήνες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον. Η ποσοστιαία μείωση που παρατηρήθηκε είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με τη φυσική έκθεση στην ατμόσφαιρα,
- ✓ Το ανοικτό πορώδες των δοκιμών σκυροδέματος μεταξύ 28 και 130 ημερών μειώθηκε κατά 28,3% για τη σειρά 5% EMDW, 27,15% για τη σειρά 10% EMDW και 4,97% για τη σειρά χωρίς πρόσθετο,
- ✓ Το δυναμικό διάβρωσης συναρτήσεως του χρόνου και των τριών κατηγοριών παρουσιάζει ιδιαίτερες διακυμάνσεις. Οι σπλισμοί σύμφωνα με το ASTM C-876 βρίσκονται σε ενεργή κατάσταση με μεγάλη πιθανότητα διάβρωσης,
- ✓ Η προσθήκη 10% EMDW ελαττώνει το ρυθμό διάβρωσης και την πυκνότητα ρεύματος σε μεγαλύτερο βαθμό από το 5% EMDW,
- ✓ Οι σπλισμοί των δοκιμών αναφοράς εμφανίζονται λιγότερο διαβρωμένοι συγκριτικά με τις άλλες δύο κατηγορίες δοκιμών, γεγονός που οφείλεται στο αυξημένο πορώδες τους,

- ✓ Η προσθήκη του παραπροϊόντος και στα δυο ποσοστά μειώνει την απορροφητικότητα του σκυροδέματος,
- ✓ Η αντοχή σε θλίψη των δοκιμών με EMDW μειώνεται μετά από εμφάνιση 100 ημέρων σε διάλυμα NaCl ενώ στα αναφοράς μετά από 70 ημέρες. Τις χαμηλότερες τιμές παρουσίασε το 10% σε όλες τις ηλικίες μετρήσεων.
- ✓ Το μέτρο ελαστικότητας είναι χαμηλότερο στο 10% EMDW ενώ η προσθήκη 5% φαίνεται να μην το επηρεάζει αρνητικά. Τα αποτελέσματα συμφωνούν με τη θλιπτική αντοχή.
- ✓ Το βάθος ενανθράκωσης είναι πολύ μειωμένο συγκριτικά με την ατμόσφαιρα γεγονός που οφείλεται στην αυξημένη υγρασία από το διάλυμα που είναι εμφαντισμένα τα δοκίμια,
- ✓ Σε παραθαλάσσιο περιβάλλον η προσθήκη 5% EMDW μειώνει τη διάβρωση του οπλισμού κατά 11% περίπου ενώ στην κατηγορία 10% EMDW η απώλεια μάζας αυξάνει κατά 8,282% σε σχέση με τα αναφοράς (πίνακας 10.46). Η αύξηση αυτή πιθανόν να οφείλεται στις μικρορηγμάτωσεις που προκαλεί το CaCO₃ στο εσωτερικό των δοκιμών λόγω ενανθράκωσης η οποία είναι εντονότερη στα δοκίμια με 10% EMDW.

Πίνακας 10.46: Ποσοστιαία απώλεια μάζας και ρυθμού διάβρωσης οπλισμών για δοκίμια τσιμεντοκονίας στους 24 μήνες έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον

ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 24 ΜΗΝΕΣ

	<i>Ατμοσφαιρικό περιβάλλον</i>	<i>Μερική εμφάνιση NaCl 3.5% κ.β</i>	<i>Παραθαλάσσιο περιβάλλον</i>
Ποσοστιαία μεταβολή απώλειας μάζας*			
ΑΝΑΦΟΡΑΣ	-	-	-
5% EMDW	36,45%↓	17,10%↓	11,056%↓
10% EMDW	46,82%↓	12,86%↓	8,282%↑
Ποσοστιαία μεταβολή Ρυθμού διάβρωσης*			
ΑΝΑΦΟΡΑΣ	-	-	-
5% EMDW	36,72%↓	16,84%↓	9,441%↓
10% EMDW	45,30%↓	12,03%↓	9,035%↑

Πίνακας 10.47: Βαθμός προστασίας του παραπροϊόντος EMDW για δοκίμια τσιμεντοκονίας εμφαντισμένα σε NaCl 3,5% κ.β

Χρόνος εμφάνισης (μήνες)	% μείωση i_{corr} *		% μείωση CR*	
	5%EMDW	10% EMDW	5% EMDW	10% EMDW
12	52%↓	59%↓	52%↓	59,1↓
28	49%↓	32%↓	49%↓	31,9%↓

* Η ποσοστιαίες μεταβολές στα δοκίμια με το πρόσθετο EMDW που παρουσιάζονται στους πίνακες 9.43 & 9.44 πραγματοποιήθηκαν εν συγκρίσει με τα δοκίμια αναφοράς.

11 ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΑΠΟ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι η εκτίμηση της ανθεκτικότητας του οπλισμένου σκυροδέματος χρησιμοποιώντας ως υλικό αντικατάστασης του τσιμέντου ιπτάμενη τέφρα από βιομηχανίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Για το σκοπό αυτό συγκρίθηκαν δύο διαφορετικές ιπτάμενες τέφρες από την Πτολεμαΐδα και από τη Γερμανία. Η αντικατάσταση του τσιμέντου και για τα δύο υλικά πραγματοποιήθηκε σε ποσοστά 5% κ.β και 10% κ.β.

Η ποιότητα των σκυροδεμάτων εκτιμήθηκε με μέτρηση μηχανικών και φυσικοχημικών ιδιοτήτων ενώ η διάβρωση του οπλισμού με ηλεκτροχημικές μεθόδους, υπολογισμό απώλειας μάζας και μακροσκοπική παρατήρηση.

11.1 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΚΘΕΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Για τη μέτρηση των ηλεκτροχημικών μετρήσεων, του βάθους ενανθράκωσης και της απώλειας μάζας των οπλισμών κατασκευάστηκαν κυλινδρικά δοκίμια τσιμεντοκονίας διαμέτρου 50 mm και ύψους 100 mm στα οποία τοποθετήθηκε ομοαξονικά νευροχάλυβας τύπου *Tempcore B500C*. Οι χάλυβες καθαρίστηκαν και ζυγίστηκαν πριν την τοποθέτησή τους και τα δοκίμια καλύφθηκαν στην άνω επιφάνεια με εποξική ρητίνη. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τσιμέντο *CEM I 42.5N*, ασβεστολιθική άμμος λατομείου και νερό δικτύου ΕΜΠ. Ο λόγος W/C ήταν 0.65 σε όλες τις κατηγορίες δοκιμίων. Το περιβάλλον διάβρωσης ήταν μερική εμβάπτιση σε NaCl 3.5% κ.β, ατμοσφαιρικές συνθήκες, θάλαμος αλατονέφωσης, θάλαμος επιταχυνόμενης ενανθράκωσης και παραθαλάσσιο/βιομηχανικό περιβάλλον.

Η μέτρηση των μηχανικών αντοχών πραγματοποιήθηκε σε δοκίμια σκυροδέματος (κυλινδρικά, κυβικά, δοκούς) και για την κατασκευή τους χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο *CEM II 42.5N*, ασβεστολιθική άμμος όρους Τροόδου και νερό δικτύου Λευκωσίας. Ο λόγος W/C ήταν σταθερός και ίσος με 0,65. Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων τα δοκίμια εμβαπτίστηκαν σε διάλυμα NaCl 3.5% κ.β. Όλες οι μετρήσεις έγιναν στο εργαστήριο οπλισμένου σκυροδέματος του πανεπιστημίου Κύπρου.

Συνολικά κατασκευάστηκαν 6 σειρές δοκιμίων:

1. Δοκίμια στα οποία αντικαταστάθηκε το τσιμέντο σε ποσοστό 5% από Ιπτάμενη Τέφρα Πτολεμαΐδας με την κωδική ονομασία **5% FAPT**,
2. Δοκίμια στα οποία αντικαταστάθηκε το τσιμέντο σε ποσοστό 10% από Ιπτάμενη Τέφρα Πτολεμαΐδας με την κωδική ονομασία **10% FAPT**,

3. Δοκίμια στα οποία αντικαταστάθηκε το τσιμέντο σε ποσοστό 5% από Ιπτάμενη Τέφρα Γερμανίας με την κωδική ονομασία **5% FAGER**,
4. Δοκίμια στα οποία αντικαταστάθηκε το τσιμέντο σε ποσοστό 10% από Ιπτάμενη Τέφρα Γερμανίας με την κωδική ονομασία **10% FAGER**,
5. Δοκίμια αναφοράς με κωδική ονομασία **REFPT**,
6. Δοκίμια αναφοράς με κωδική ονομασία **REFGER**.

11.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

11.2.1 Μετρήσεις Δυναμικού Διάβρωσης

Η μέτρηση του δυναμικού διάβρωσης των οπλισμών πραγματοποιήθηκε σε οπλισμένα κυλινδρικά δοκίμια τα οποία ήταν εμβαπτισμένα μερικώς σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β. Η μετρήσεις έγιναν με τη χρήση κορεσμένου καλομέλανα ως βοηθητικό ηλεκτρόδιο το οποίο βυθιζόταν στο διάλυμα χλωριούχου Νατρίου κ η καταγραφή γινόταν από κατάλληλο βολτόμετρο. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ανά 15 ημέρες και 30 ημέρες για την FAPT και FAGER αντίστοιχα.

11.2.1.1 Δυναμικό διάβρωσης (E_{corr}) χάλυβα σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Ο πίνακας 11.1 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων του Δυναμικού διάβρωσης E_{corr} για την κατηγορία των δοκιμών αναφοράς (REFPT), των δοκιμών με 5% ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας (5%FAPT) και 10% (10%FAPT) για χρονικό διάστημα 435 ημερών μερικής εμβάπτισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β. Για τις μετρήσεις κατασκευάστηκαν 8 δοκίμια για κάθε κατηγορία δοκιμών τα οποία εκτέθηκαν στο διαβρωτικό περιβάλλον σε περιβάλλον εργαστηρίου.

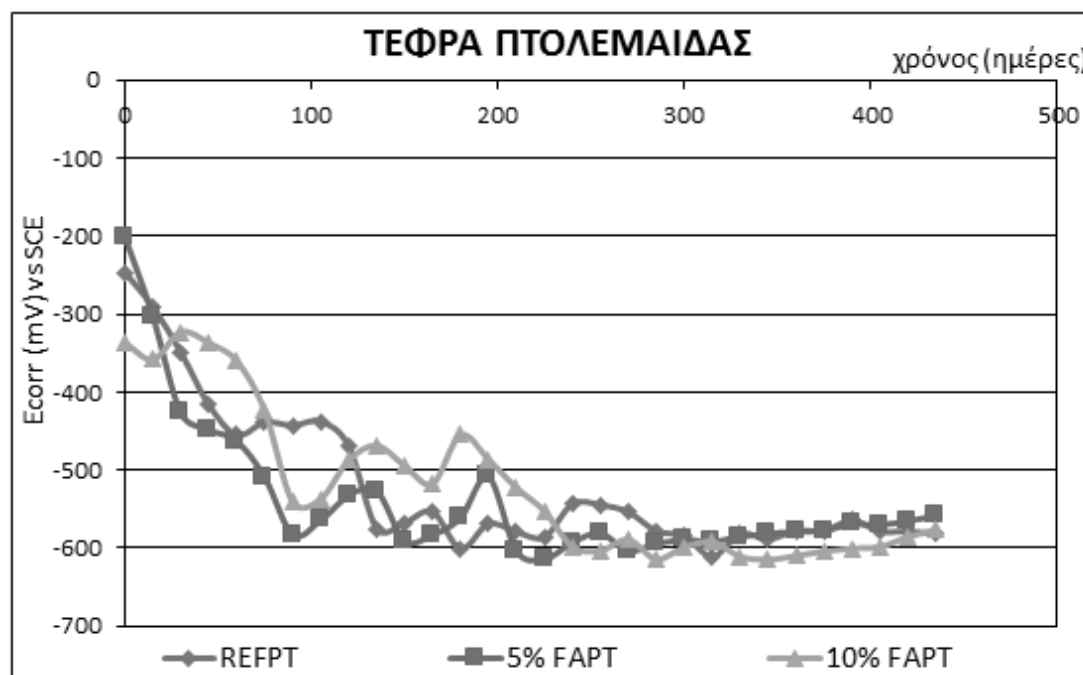
Πίνακας 11.1: Δυναμικό διάβρωσης δοκιμών τσιμεντοκονίας με Ι.Τ Πτολεμαΐδας σε NaCl 3,5% κ.β

Χρόνος (ημέρες)	REFPT	5% FAPT	10% FAPT	Χρόνος (ημέρες)	REFPT	5% FAPT	10% FAPT	Χρόνος (ημέρες)	REFPT	5% FAPT	10% FAPT
0	-246	-201	-337	150	-568	-591	-494	300	-584	-590	-599
15	-291	-303	-358	165	-553	-583	-518	315	-611	-592	-592
30	-349	-427	-323	180	-601	-561	-455	330	-582	-585	-611
45	-416	-449	-337	195	-569	-508	-486	345	-589	-581	-615
60	-455	-463	-360	210	-579	-604	-523	360	-578	-579	-610
75	-439	-509	-424	225	-586	-615	-553	375	-578	-578	-604
90	-443	-583	-541	240	-543	-593	-598	390	-565	-569	-600
105	-437	-565	-537	255	-545	-581	-604	405	-578	-570	-598
120	-469	-533	-488	270	-554	-604	-589	420	-578	-565	-586
135	-575	-526	-469	285	-578	-594	-614	435	-582	-559	-576

Ο πίνακας 11.2 δίνει τους μέσους όρους των δυναμικών διάβρωσης για δοκίμια με προσθετό Ι.Τ προέλευσης Γερμανίας. Τα δοκίμια παρέμειναν στο διαβρωτικό περιβάλλον για 780 ημέρες και οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ανά 30 ημέρες. Το ηλεκτρόδιο αναφοράς ήταν καλομέλανας (SCE) και όλες οι μετρήσεις έγιναν σε εργαστηριακό περιβάλλον.

Πίνακας 11.2: Δυναμικό διάβρωσης δοκιμών τσιμεντοκονίας με Ι.Τ Γερμανίας και εμφάνιση σε NaCl 3,5% κ.β

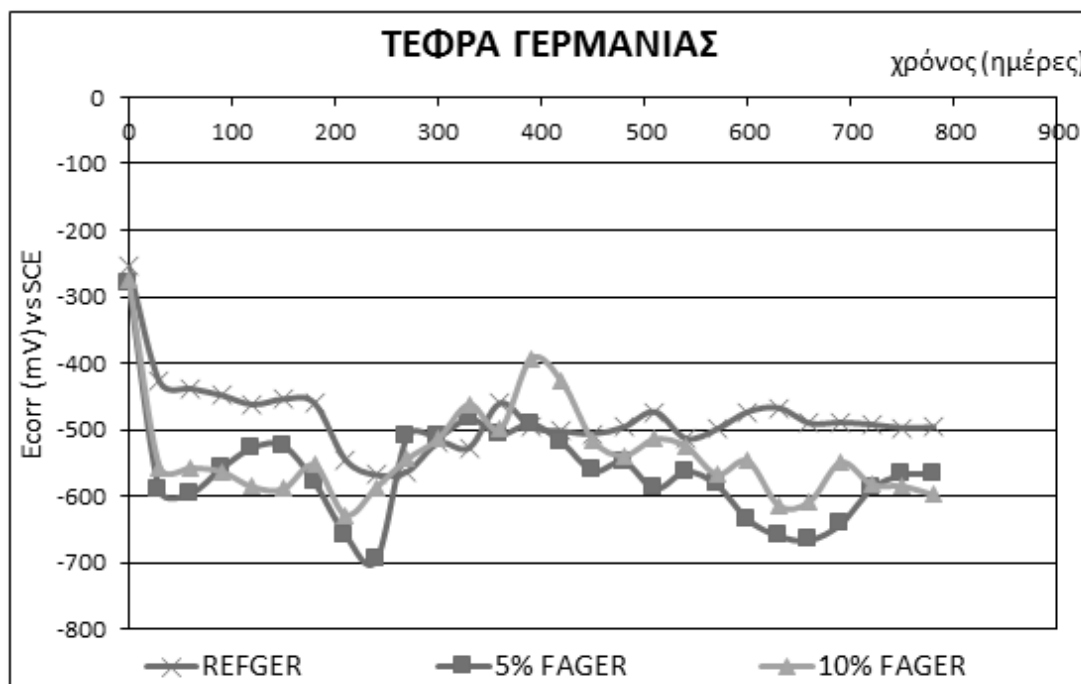
χρόνος (ημέρες)	REFGER	5% FAGER	10% FAGER	Χρόνος (ημέρες)	REFGER	5% FAGER	10% FAGER	Χρόνος (ημέρες)	REFGER	5% FAGER	10% FAGER
0	-255	-280	-274	270	-563	-510	-544	540	-513	-563	-525
30	-428	-591	-557	300	-520	-510	-514	570	-499	-583	-567
60	-438	-596	-557	330	-527	-483	-462	600	-473	-635	-547
90	-448	-558	-563	360	-460	-507	-499	630	-467	-660	-614
120	-462	-527	-586	390	-496	-491	-393	660	-490	-666	-608
150	-454	-524	-589	420	-502	-519	-428	690	-489	-642	-549
180	-460	-579	-553	450	-506	-562	-516	720	-492	-589	-582
210	-545	-658	-628	480	-496	-548	-539	750	-497	-568	-585
240	-568	-696	-587	510	-473	-589	-514	780	-496	-567	-598



Σχήμα 11.1: Δυναμικό διάβρωσης συναρτήσε του χρόνου παραμονής σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β για δοκίμια με Ι.Τ Πτολεμαΐδας ως προς ηλεκτρόδιο SCE

Στο σχήμα 11.1 δίνεται το δυναμικό διάβρωσης συναρτήσε του χρόνου μερικής εμφάνισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β για δοκίμια με πρόσθετο υπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας. Η πορεία των Δυναμικών για τις πρώτες 150 ημέρες παραμονής στο

διαβρωτικό περιβάλλον μεταβάλλεται από την περιοχή $-200\text{mV} \div -337\text{mV}$ προς ηλεκτραρνητικότερες τιμές στην περιοχή των $-500\text{mV} \div -591\text{mV}$ και για τις 3 κατηγορίες. Στη συνέχεια από τις 150 ημέρες μέχρι τις 435 ημέρες οι τιμές των δυναμικών ακολουθούν ευθύγραμμη πορεία και βρίσκονται στην περιοχή $-550\text{mV} \div -615\text{mV}$ και σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM C876-87** οι σπλισμοί βρίσκονται σε ενεργή κατάσταση και έχουν την τάση να διαβρωθούν.



Σχήμα 11.2: Δυναμικό διάβρωσης συναρτήσε του χρόνου παραμονής σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β για δοκίμια με Ι.Τ Γερμανίας ως προς ηλεκτρόδιο SCE

Το σχήμα 11.2 δίνει το Δυναμικό διάβρωσης συναρτήσε του χρόνου για δοκίμια με προσθήκη Ι.Τ Γερμανίας ως προς ηλεκτρόδιο SCE και μερική εμβάπτιση σε NaCl 3,5% κ.β. Η πορεία των δυναμικών μέχρι τις 240 ημέρες είναι προς ηλεκτραρνητικότερες τιμές στα δοκίμια αναφοράς στην περιοχή $-255\text{mV} \div -568\text{mV}$. Οι κατηγορίες με το πρόσθετο εμφανίζουν πιο ομαλή πορεία των δυναμικών το ίδιο χρονικό διάστημα αλλά εμφανώς πιο ηλεκτραρνητικές τιμές στην περιοχή $-587\text{mV} \div -696\text{mV}$. Από τις 240 ημέρες μέχρι τις 540 τα δυναμικά ακολουθούν σχεδόν ευθύγραμμη πορεία μεταξύ $-390\text{mV} \div -567\text{mV}$. Στη συνέχεια μέχρι τις 780 ημέρες μερικής εμβάπτισης τα δοκίμια με την Ι.Τ εμφανίζουν πιο ηλεκτραρνητικές τιμές δυναμικού διάβρωσης από τα δοκίμια αναφοράς. Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C876-87 οι σπλισμοί και των τριών κατηγοριών βρίσκονται σε ενεργή κατάσταση και τείνουν να διαβρωθούν.

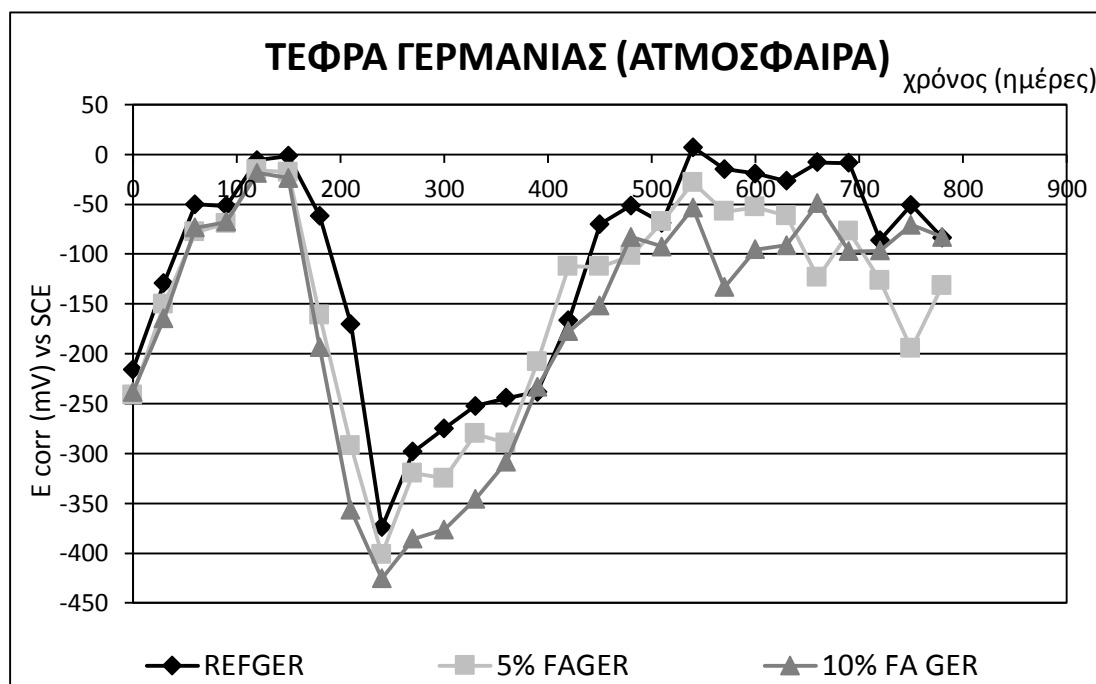
11.2.1.2 Δυναμικό διάβρωσης (E_{corr}) χάλυβα στην ατμόσφαιρα

Το δυναμικό διάβρωσης μετρήθηκε κάθε 30 ημέρες έκθεσης σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου χρησιμοποιώντας ως ηλεκτρόδιο

αναφοράς καλομέλινα (SCE). Κατασκευάστηκαν 3 σειρές δοκιμών με 8 δοκίμια οπλισμένης τσιμεντοκονίας η κάθε μία. Το υλικό αντικατάστασης ήταν Ι.Τ προέλευσης Γερμανίας. Ο πίνακας 11.3 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων του Δυναμικού για δοκίμια εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα για 780 ημέρες.

Πίνακας 11.3: Δυναμικό διάβρωσης δοκιμών τσιμεντοκονίας με Ι.Τ Γερμανίας στην ατμόσφαιρα

Χρόνος (ημέρες)	5% FAGER	10% FA GER	REFGER	Χρόνος (ημέρες)	5% FAGER	10% FA GER	REFGER	Χρόνος (ημέρες)	5% FAGER	10% FAGER	REFGER
0	-242	-239	-216	270	-320	-386	-298	540	-28	-54	7
30	-150	-165	-129	300	-325	-376	-275	570	-57	-133	-15
60	-78	-73	-50	330	-280	-346	-253	600	-53	-95	-19
90	-69	-68	-52	360	-290	-308	-245	630	-62	-91	-27
120	-16	-19	-6	390	-208	-234	-238	660	-124	-49	-8
150	-18	-24	-2	420	-113	-178	-167	690	-77	-97	-9
180	-161	-194	-62	450	-113	-151	-70	720	-127	-97	-86
210	-293	-357	-170	480	-102	-83	-51	750	-195	-71	-51
240	-402	-426	-374	510	-68	-92	-69	780	-132	-83	-84



Σχήμα 11.3: Δυναμικό διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στην ατμόσφαιρα για δοκίμια με Ι.Τ Γερμανίας ως προς ηλεκτρόδιο SCE

Το σχήμα 11.3 παρουσιάζει διάγραμμα δυναμικού διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου για δοκίμια με πρόσθετο Ι.Τ Γερμανίας. Η πορεία των Δυναμικών στο χρόνο είναι η εξής:

- ✓ Χρονικό διάστημα 0 - 150 ημέρες. Οι τιμές των δυναμικών κινούνται προς ηλεκτροθετικότερες τιμές μεταξύ -239 mV ÷ -2 mV.
- ✓ Χρονικό διάστημα 150-240 ημέρες. Η πορεία των δυναμικών είναι προς ηλεκτραρνητικότερες τιμές μέχρι -426 mV. Τα δοκίμια αναφοράς στις 240 ημέρες έχουν $E_{corr} = -374$ mV, η κατηγορία 5% FAGER $E_{corr} = -402$ mV, ενώ η σειρά 10% FAGER $E_{corr} = -426$ mV.
- ✓ Χρονικό διάστημα 240-540 ημέρες. Τα δυναμικά έχουν πορεία προς ηλεκτροθετικότερες τιμές και στις τρεις σειρές δοκιμών.
- ✓ Χρονικό διάστημα 540-600 ημέρες. Πορεία των δυναμικών προς ηλεκτραρνητικές τιμές με πολύ μικρή κλίση.
- ✓ Χρονικό διάστημα 600 – 780 ημέρες. Σταθεροποίηση των δυναμικών στην περιοχή -8 mV ÷ -132 mV.

Πίνακας 11.4: Κατάσταση χάλυβα στην ατμόσφαιρα με πρόσθετο Ι.Τ Γερμανίας

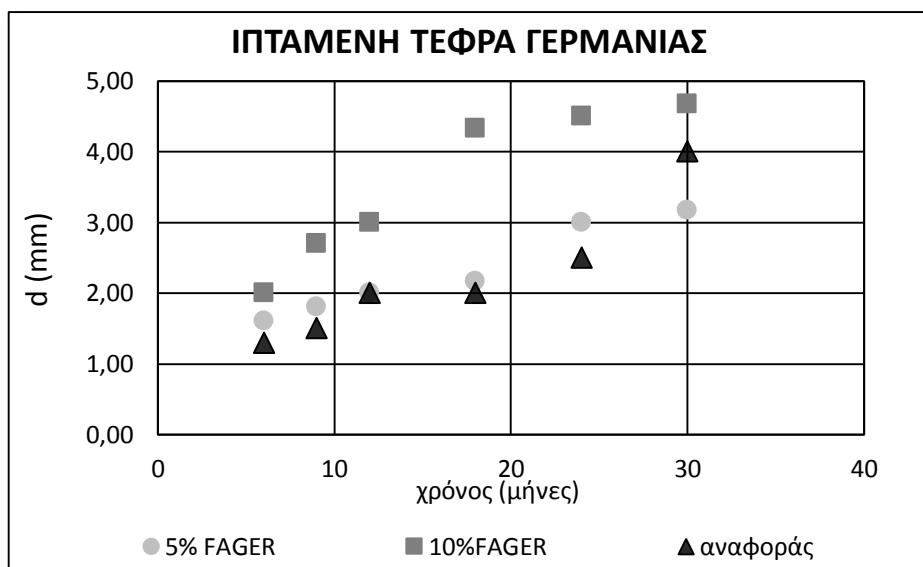
Χρονικό διάστημα (ημέρες)	Κατάσταση οπλισμού (ASTM C876-87)
30 - 180	Παθητική κατάσταση
180 - 210	Αβέβαιη κατάσταση
210 - 330	Ενεργή κατάσταση
330 - 390	Αβέβαιη κατάσταση
390 - 780	Παθητική κατάσταση

11.2.2 Μετρήσεις Βάθους ενανθράκωσης σκυροδέματος

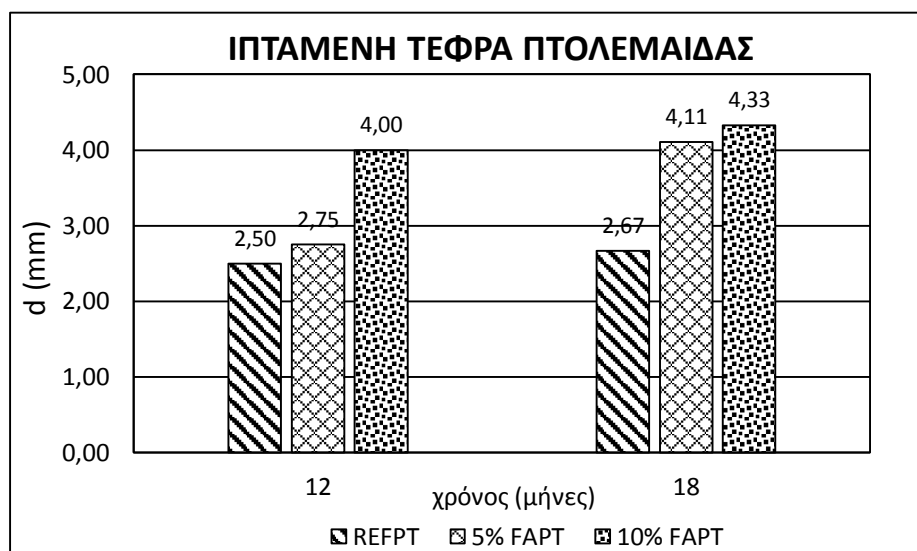
11.2.2.1 Βάθος ενανθράκωσης σκυροδέματος σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Η ενανθράκωση των τσιμεντοκονιαμάτων με πρόσθετα τις υπό εξέταση ιπτάμενες τέφρες εκτιμήθηκε με εμπροσισμό δείκτη φαινολοφθαλείνης. Το βάθος ενανθράκωσης υπολογίστηκε από τη σχέση $d^2 = A \cdot t$.

Το σχήμα 11.4 παρουσιάζει σε διάγραμμα το βάθος ενανθράκωσης σε εμβάπτιση δοκίμια τσιμεντοκονίας σε NaCl 3,5% κ.β με πρόσθετο Ι.Τ Γερμανίας για συνολικό διάστημα 30 μηνών. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι τα δοκίμια με 10% ιπτάμενη τέφρα εμφανίζονται περισσότερο ενανθρακωμένα από τα αναφοράς σε όλους τους χρόνους που έγιναν οι μετρήσεις. Από το σχήμα προκύπτει επίσης, ότι η προσθήκη 5% Ι.Τ μειώνει το βάθος ενανθράκωσης στους 30 μήνες εμβάπτισης σε NaCl 3,5% κ.β.



Σχήμα 11.4: Βάθος ενανθράκωσης (mm) εμβαπτισμένων δοκιμίων σε NaCl 3,5% κ.β με Ι.Τ Γερμανίας



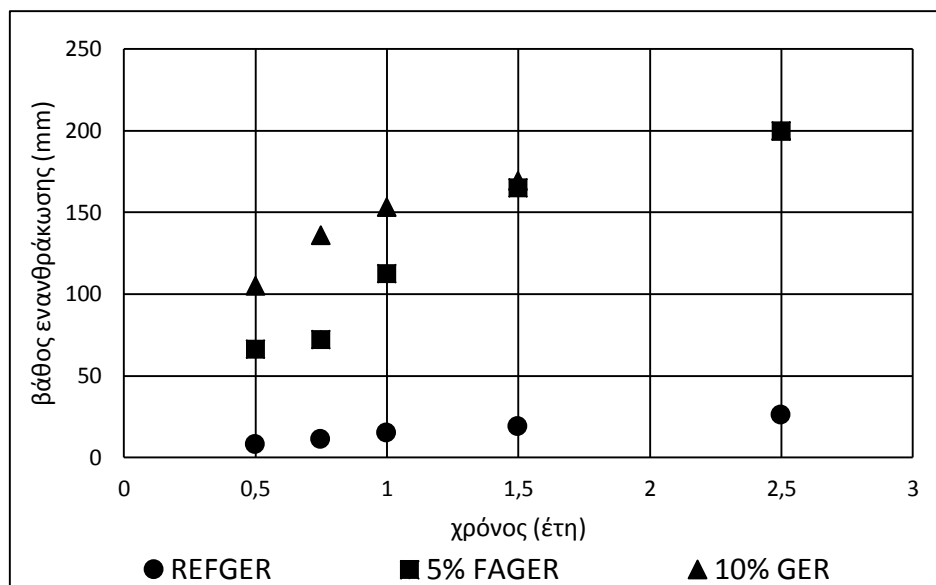
Σχήμα 11.5: Βάθος ενανθράκωσης (mm) εμβαπτισμένων δοκιμίων σε NaCl 3,5% κ.β με Ι.Τ Πτολεμαΐδας

Το σχήμα 11.5 παρουσιάζει τα αποτελέσματα του βάθους ενανθράκωσης με πρόσθετο Ι.Τ από την Πτολεμαΐδα στο οποίο είναι φανερό ότι τα δοκίμια χωρίς πρόσθετο έχουν μικρότερα βάθη ενανθράκωσης από τις άλλες δύο κατηγορίες δοκιμίων.

Όπως είναι γνωστό η ποζολανική αντίδραση η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του πορώδους είναι αργή διαδικασία και για το λόγο αυτό τα δοκίμια με την τέφρα είναι πιο ενανθρακωμένα από τα αναφοράς. Επίσης το ποσοστό του ελεύθερου Ca λόγω της Ι.Τ συμβάλλει στην αύξηση του βάθους ενανθράκωσης στο ποζολανικά σκυροδέματα.

11.2.2.2 Βάθος ενανθράκωσης σκυροδέματος στην ατμόσφαιρα

Η μέτρηση του βάθους ενανθράκωσης των δοκιμών στην ατμόσφαιρα πραγματοποιήθηκε με παραμονή των δοκιμών σε εξωτερικό χώρο στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Για το σκοπό αυτό παρασκευάστηκαν συνολικά 24 δοκίμια οπλισμένης τσιμεντοκονίας και το υλικό αντικατάστασης του τσιμέντου ήταν Ι.Τ Γερμανίας σε ποσοστά 5% και 10%.



Σχήμα 11.6: Βάθος ενανθράκωσης (mm) συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στην Ατμόσφαιρα με πρόσθετο Ι.Τ Γερμανίας

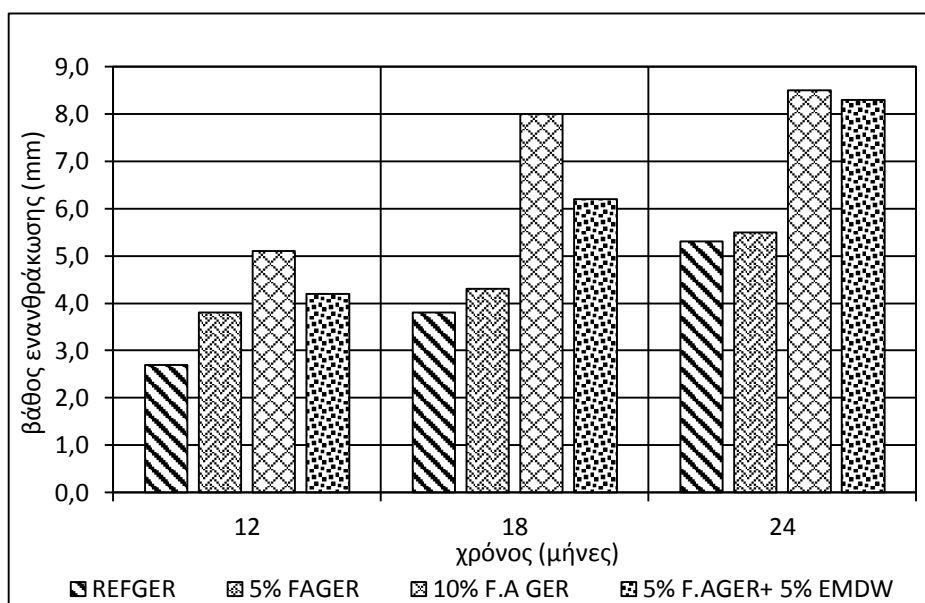
Στο σχήμα 11.6 δίνεται διάγραμμα του βάθους ενανθράκωσης σε συνάρτηση με το χρόνο για δοκίμια εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα. Ο συνολικός χρόνος παραμονής των δοκιμών στο διαβρωτικό περιβάλλον ήταν 30 μήνες. Τα δοκίμια με την Ι.Τ εξαιτίας του αυξημένου πορώδους που παρουσιάζουν διευκολύνουν τη διάχυση του CO₂ και επομένως εμφανίζονται περισσότερο ενανθρακωμένα σε σχέση με τα αναφοράς.

11.2.2.3 Βάθος ενανθράκωσης οπλισμών σε παραθαλάσσιο περιβάλλον

Το βάθος ενανθράκωσης μετρήθηκε σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον παρουσία ιόντων χλωρίου με έκθεση των δοκιμών στη βιομηχανική περιοχή της Χαλυβουργικής Α.Ε. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκαν 4 σειρές δοκιμών, δύο στις οποίες έγινε αντικατάσταση του τσιμέντου με 5% και 10% από Ι.Τ Γερμανίας, μία κατηγορία χωρίς πρόσθετο και ακόμα μια κατηγορία με 5% EMDW και 5% Ι.Τ Γερμανίας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 10.5.

Πίνακας 11.5: Αποτελέσματα μετρήσεων βάθους ενανθράκωσης σε παραθαλάσσιο περιβάλλον

ΧΡΟΝΟΣ (ΜΗΝΕΣ)	REFGER	5% FAGER	10% F.A GER	5% F.AGER+ 5% EMDW
12	2,7± 0,236	3,8 ±0,0553	5,1± 1,256	4,2± 1,093
18	3,8± 0,500	4,3± 0,067	8± 0,333	6,2± 0,833
24	5,3± 0,067	5,5± 0,167	8,5± 0,050	8,3± 0,067



Σχήμα 11.7: Βάθος ενανθράκωσης σε mm με έκθεση δοκιμίων σε παραθαλάσσιο/βιομηχανικό περιβάλλον

Στο σχήμα 11.7 παρουσιάζονται σε διάγραμμα τα αποτελέσματα του βάθους ενανθράκωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης σε παραθαλάσσιο περιβάλλον. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι στους 12 μήνες τα δοκίμια αναφοράς είναι λιγότερο ενανθρακωμένα από τις υπόλοιπες κατηγορίες δοκιμίων. Τη μεγαλύτερη ενανθράκωση παρουσιάζουν τα δοκίμια με 10% I.T και τα δοκίμια με 5% I.T & 5% EMDW. Τα δοκίμια με 5% προσθήκη I.T φαίνεται ότι έχουν μειωμένο βάθος ενανθράκωσης στους 18 & 24 μήνες έκθεσης στο διαβρωτικό περιβάλλον.

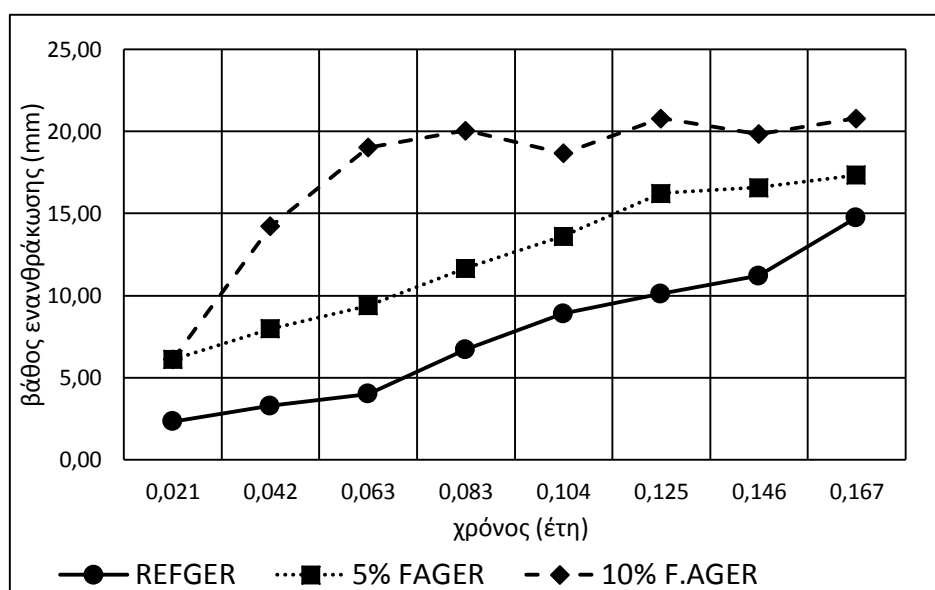
11.2.2.4 Βάθος ενανθράκωσης οπλισμών σε θάλαμο επιταχυνόμενης ενανθράκωσης

Το βάθος ενανθράκωσης των δοκιμίων μετρήθηκε σε επιταχυνόμενες συνθήκες διάβρωσης εντός θαλάμου. Ο συνολικός χρόνος παραμονής των δοκιμίων ήταν οχτώ (8) εβδομάδες και οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ανά εβδομάδα. Οι συνθήκες εντός του θαλάμου ήταν $C_{CO_2}=12,5\%$, $RH=64\%$ και $T=25^{\circ}C$. Ο συντελεστής διάχυσης A σε mm^2/yr υπολογίστηκε σύμφωνα με τον τύπο $A= d^2/t$.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στον πίνακα 11.6.

Πίνακας 11.6: Αποτελέσματα μετρήσεων βάθους ενανθράκωσης δοκιμίων εντός θαλάμου ενανθράκωσης

ΧΡΟΝΟΣ (ΕΒΔΟΜΑΔΕΣ)	REFGER	5% FAGER	10% F.AGER	5% FAGER+5% EMDW
1	2,17	3,50	3,50	3,00
2	2,57	4,00	5,33	4,50
3	2,83	4,33	6,17	5,50
4	3,67	4,83	6,33	5,67
5	4,22	5,22	6,11	6,00
6	4,50	5,70	6,45	6,17
7	4,73	5,76	6,30	6,67
8	5,43	5,89	6,45	8,33



Σχήμα 11.8: Βάθος ενανθράκωσης σε τμη δοκιμίων τσιμεντοκονίας με I.T Γερμανίας εντός θαλάμου ενανθράκωσης

Στο σχήμα 11.8 δίνεται διάγραμμα του βάθους σε συνάρτηση με το χρόνο παραμονής στο θάλαμο επιταχυνόμενης ενανθράκωσης. Από το γράφημα φαίνεται ότι τα δοκίμια χωρίς I.T εμφανίζονται λιγότερο ενανθρακωμένα στις 8 εβδομάδες που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Επίσης παρατηρείται ότι αυξανόμενο το ποσοστό της προσθήκης σε τέφρα το CO₂ διαχέεται με μεγαλύτερη ευκολία στη μάζα του σκυροδέματος γεγονός που οφείλεται στο αυξημένο πορώδες που έχουν τα δοκίμια αυτής της κατηγορίας. Το χρονικό διάστημα που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις είναι πολύ μικρό ώστε η διαπερατότητα των δοκιμίων με την I.T να έχει μειωθεί εξαιτίας της κατανάλωσης του CH από την ποζολάνη.

11.2.3 Μετρήσεις ολικών ιόντων Χλωρίου σκυροδέματος

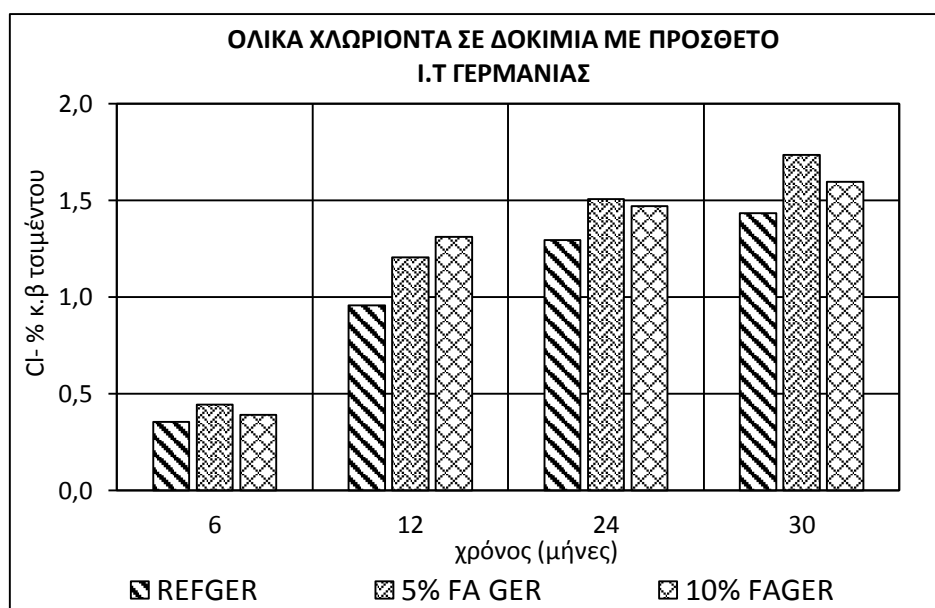
Η μέτρηση της συγκέντρωσης των ιόντων χλωρίου πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο Mohr σε δοκίμια τσιμεντοκονίας και σκυροδέματος μετά από έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον παρουσίας χλωριόντων.

11.2.3.1 Ολικά χλωριόντα τσιμεντοκονίας σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Ο πίνακας 11.7 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων του όγκου AgNO₃ που χρειάστηκε για την τιτλοδότηση του διαλύματος και τη συγκέντρωση των ιόντων Cl⁻ έπειτα από εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β.

Πίνακας 11.7: Όγκος τιτλοδότησης AgNO₃ και συγκέντρωση Cl⁻ για δοκίμια τσιμεντοκονίας εμβαπτισμένα σε NaCl 3,5% κ.β με πρόσθετο Ι.Τ Γερμανίας και Πτολεμαΐδας

χρόνος (μήνες)	Όγκος (ml) AgNO ₃			Συγκέντρωση Cl ⁻ (% κ.β τσιμέντου)		
	5% FAGER	10% FAGER	REFGER	5% FAGER	10% FAGER	REFGER
6	2,5	2,2	2	0,44	0,39	0,35
12	6,8	7,4	5,4	1,21	1,31	0,96
24	8,5	8,3	7,3	1,51	1,47	1,29
30	9,8	9	8,1	1,74	1,60	1,44
χρόνος (μήνες)	Όγκος (ml) AgNO ₃			Συγκέντρωση Cl ⁻ (% κ.β τσιμέντου)		
	5% FAPT	10% FAPT	REFPT	5% FAPT	10% FAPT	REFPT
12	5,85	7	5	1,04	1,24	0,89
18	7,4	7,5	7,3	1,31	1,33	1,29

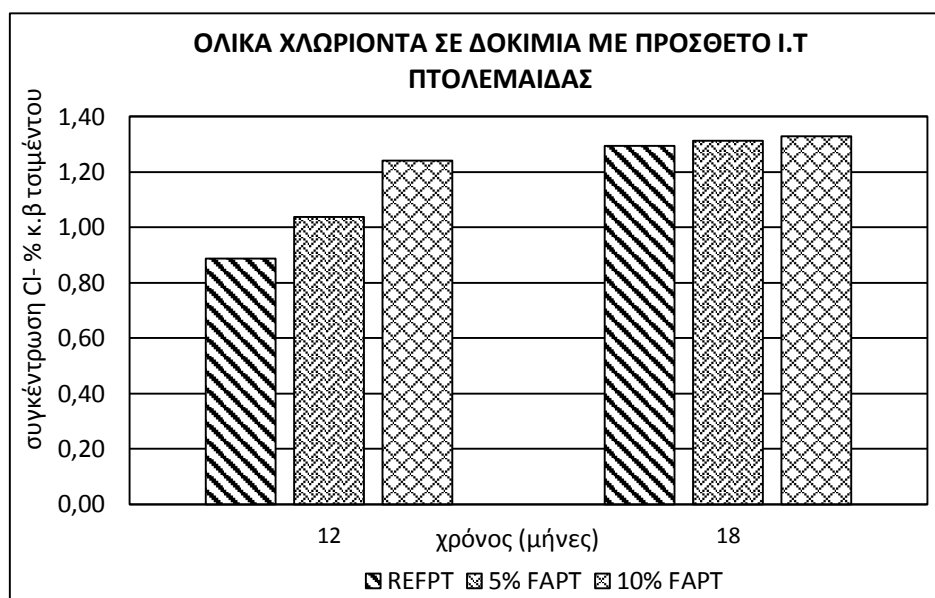


Σχήμα 11.9: Συγκέντρωση ιόντων Cl⁻ για δοκίμια τσιμεντοκονίας συναρτήσεως του χρόνου με πρόσθετο Ι.Τ Γερμανίας και μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Στο σχήμα 11.9 παρουσιάζονται σε γράφημα η συγκέντρωση των ολικών χλωριόντων για δοκίμια με Ι.Τ Γερμανίας συναρτήσε του χρόνου εμβάπτισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι τα δοκίμια αναφοράς έχουν τη μικρότερη συγκέντρωση ιόντων χλωρίου ενώ τα δοκίμια με την ιπτάμενη τέφρα μεγαλύτερη.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων οφείλονται στο αυξημένο πορώδες που παρουσιάζουν τα δοκίμια με την Ι.Τ από τη Γερμανία με αποτέλεσμα τα ιόντα χλωρίου να εισέρχονται στη τσιμεντοκονία, να δεσμεύονται από την ποζολάνη και να δημιουργούν άλατα όπως το άλας *Friedel* $(Ca_2Al(OH)_6(Cl, OH) \cdot 2 H_2O)$.

Στο σχήμα 11.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων ιόντων χλωρίου σε δοκίμια με Ι.Τ Πτολεμαΐδας. Τα δοκίμια αναφοράς στους 12 μήνες εμβάπτισης σε NaCl 3,5% κ.β έχουν τη χαμηλότερη συγκέντρωση ενώ στους 18 μήνες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον οι τρεις σειρές δοκιμίων έχουν περίπου ίδια συγκέντρωση ιόντων Cl⁻ γεγονός το οποίο οφείλεται στη μείωση του πορώδους εξαιτίας της ποζολανικής αντίδρασης.

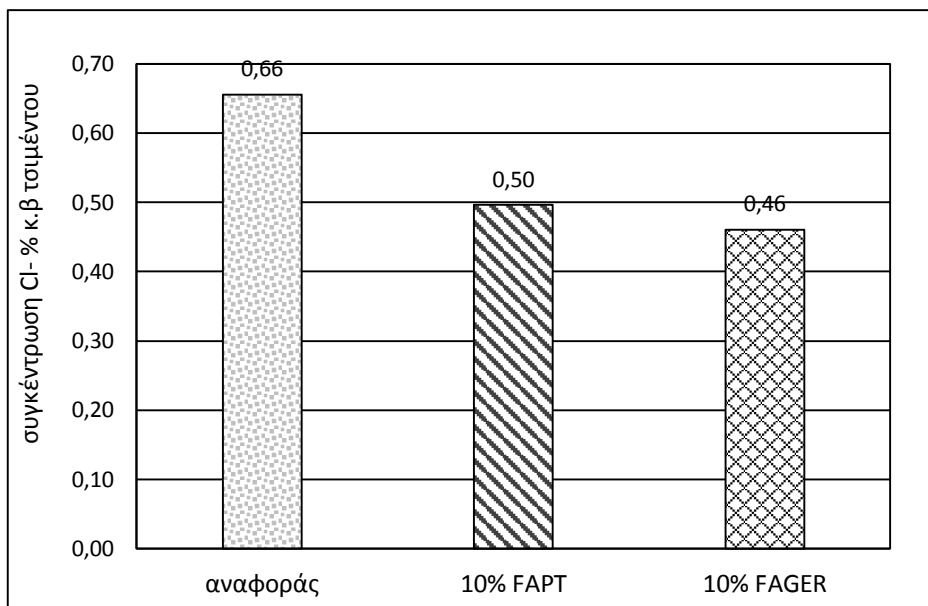


Σχήμα 11.10: Συγκέντρωση ιόντων Cl⁻ για δοκίμια τσιμεντοκονίας συναρτήσε του χρόνου με πρόσθετο Ι.Τ Πτολεμαΐδας και μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

11.2.3.2 Ολικά χλωριόντα σε κυβικά δοκίμια σκυροδέματος μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Ο υπολογισμός της συγκέντρωσης Cl⁻ έγινε με τη μέθοδο Mohr σε κυβικά δοκίμια σκυροδέματος τα οποία εμβάπτιστηκαν σε διάλυμα NaCl για 130 ημέρες. Τα υλικά των δοκιμίων ήταν τσιμέντο CEM II 42.5N, ασβεστολιθική άμμος και νερό δικτύου Λευκωσίας.

Το σχήμα 11.11 παρουσιάζει σε γράφημα τη συγκέντρωση των ολικών ιόντων Χλωρίου μετά από εμφύσηση κυβικών δοκιμίων σκυροδέματος σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β στις 130 ημέρες. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι η αντικατάσταση του τσιμέντου από 10% Ι.Τ μειώνει τα συνολικά χλωριόντα κατά 24,2% και 30,3% για την Ι.Τ Πτολεμαΐδας και Γερμανίας αντίστοιχα. Το γεγονός μπορεί να αιτιολογηθεί από τη μείωση του ανοικτού πορώδους που επιτυγχάνεται στα δοκίμια με της τέφρες.



Σχήμα 11.11: Συγκέντρωση ιόντων Cl⁻ για δοκίμια σκυροδέματος εμφυσημένα σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β για 130 ημέρες

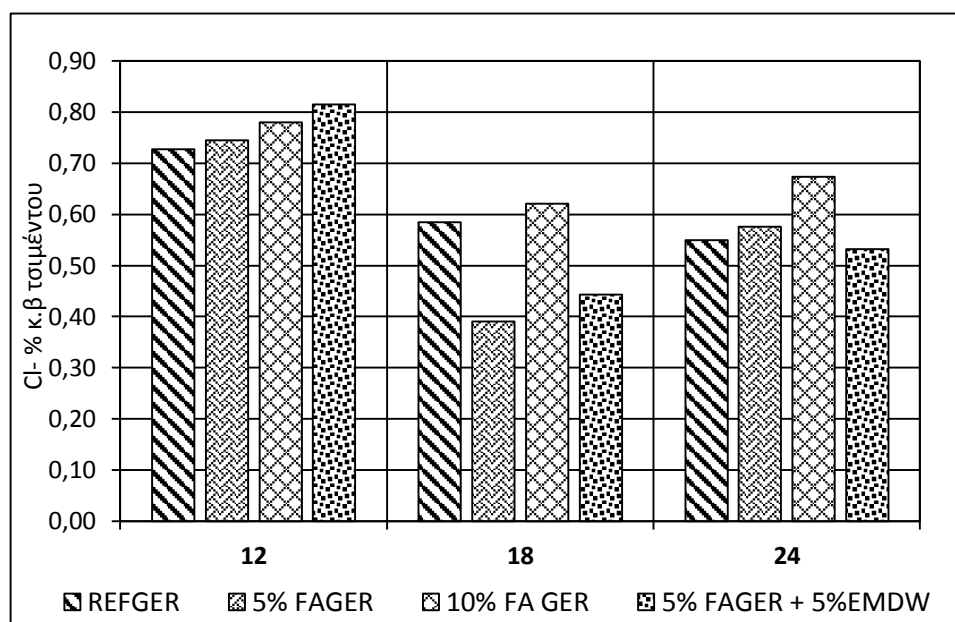
11.2.3.3 Ολικά χλωριόντα τσιμεντοκονίας σε παραθαλάσσιο περιβάλλον

Για την μέτρηση των ιόντων Χλωρίου σε παραθαλάσσιο περιβάλλον δοκίμια οπλισμένης τσιμεντοκονίας παρέμειναν στη βιομηχανική περιοχή της Χαλυβουργικής Α.Ε για χρονικό διάστημα 2 ετών. Η αντικατάσταση του τσιμέντου έγινε σε ποσοστά 5% και 10% με Ι.Τ Γερμανίας, 5% Ι.Τ και 5% EMDW ενώ παρασκευάστηκαν και δοκίμια αναφοράς χωρίς πρόσθετο για λόγους σύγκρισης. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στον πίνακα 11.8.

Πίνακας 11.8: Όγκος τιτλοδότησης AgNO₃ και συγκέντρωση Cl⁻ για δοκίμια τσιμεντοκονίας σε παραθαλάσσιο περιβάλλον

Χρόνος (μήνες)	ΟΓΚΟΣ ΤΙΤΛΟΔΟΤΗΣΗΣ AgNO ₃ (ml)				ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ Cl ⁻ (% κ.β τσιμέντου)			
	5% FAGER	10% FA GER	REFGER	5% FAGER+ 5% EMDW	5% FAGER	10% FA GER	REFGER	5% FAGER+ 5% EMDW
12	4,20	4,40	4,10	4,6	0,74	0,78	0,73	0,82
18	2,20	3,50	3,30	2,5	0,39	0,62	0,58	0,44
24	3,25	3,80	3,10	3	0,58	0,67	0,55	0,53

Το σχήμα 11.12 συνοψίζει σε διάγραμμα τα αποτελέσματα των μετρήσεων ολικών ιόντων Χλωρίου σε παραθαλάσσιο/βιομηχανικό περιβάλλον για 24 μήνες με το πρόσθετο FAGER. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι στους 12 μήνες τα δοκίμια αναφοράς έχουν τη χαμηλότερη συγκέντρωση Cl^- συγκριτικά με τις υπόλοιπες κατηγορίες δοκιμών. Οι αυξομειώσεις της συγκέντρωσης που παρουσιάζεται στους 18 και 24 μήνες σε όλες τις σειρές δοκιμών πιθανόν να οφείλεται σε έκπλυση των αλάτων από τις καιρικές συνθήκες π.χ βροχή.



Σχήμα 11.12: Συγκέντρωση ιόντων Cl^- για δοκίμια τσιμεντοκονίας συναρτήσει του χρόνου σε παραθαλάσσιο περιβάλλον

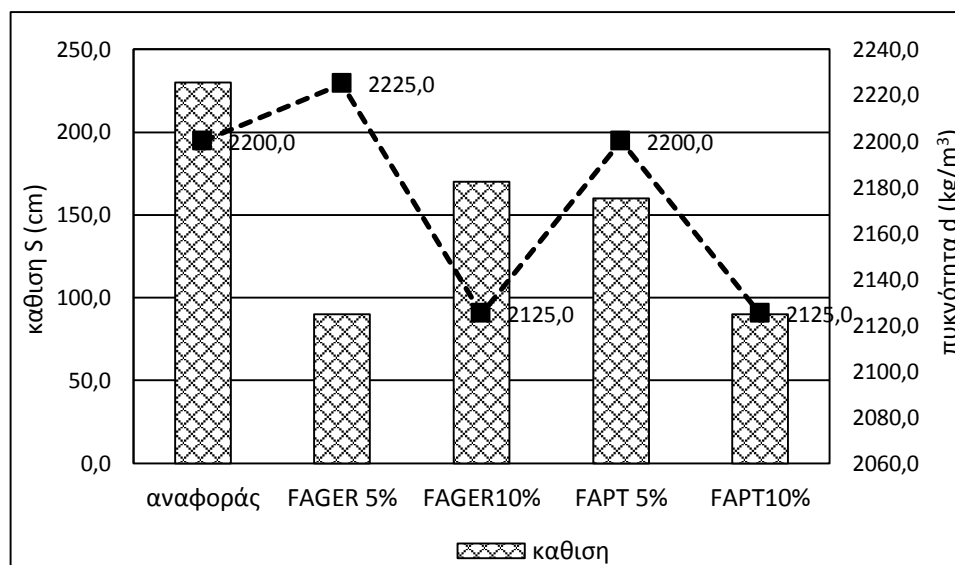
11.2.4 Μηχανικές αντοχές σκυροδέματος

11.2.4.1 Μετρήσεις θλιπτικής αντοχής

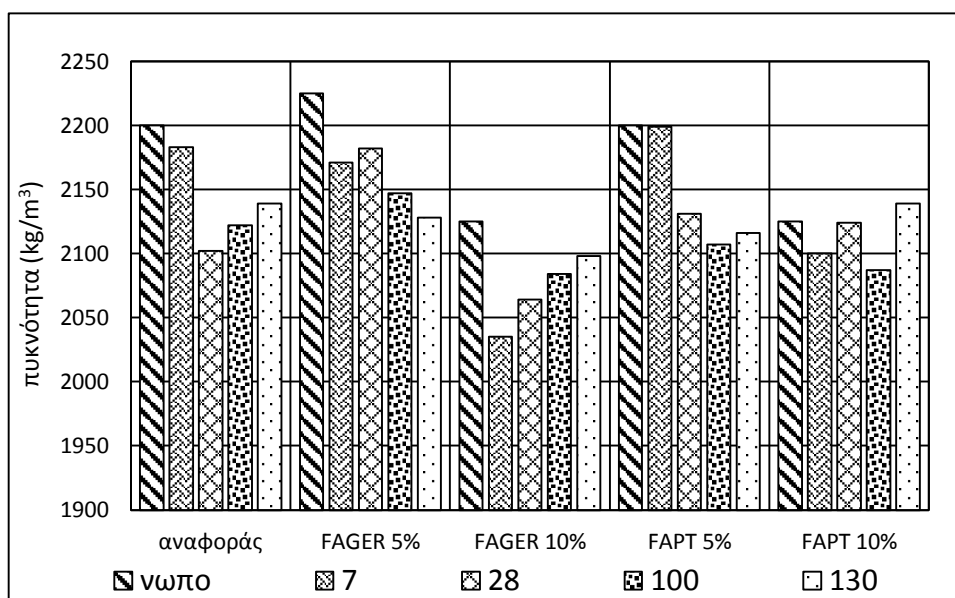
11.2.4.1.1 Δοκιμή κάθισης και πυκνότητες νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος

Η δοκιμή κάθισης πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM C143** σε νωπό σκυρόδεμα που παρασκευάστηκε στο εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του πανεπιστημίου Κύπρου. Για την

Το σχήμα 11.13 παρουσιάζει σε σύνθετο γράφημα την πυκνότητα νωπού σκυροδέματος και την κάθιση. Ο λόγος W/C ήταν 0,65 σε όλες τις κατηγορίες των δοκιμών. Από το σχήμα παρατηρείται μεγαλύτερη κάθιση στα δοκίμια αναφοράς ενώ τα δοκίμια με 5% FAGER και 10% FAGER έχουν τη μικρότερη γεγονός που οφείλεται στην ύπαρξη των Ι.Τ οι οποίες εξαιτίας της κοκκομετρίας και της μεγαλύτερης ειδικής επιφάνειας που έχουν από το τσιμέντο έχουν μεγαλύτερες απαιτήσεις σε νερό.



Σχήμα 11.13: Κάθιση S (mm) και πυκνότητα d (kg/m³) νωπού σκυροδέματος



Σχήμα 11.14: Πυκνότητες νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος (kg/m³) έπειτα από εμφάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Στο σχήμα 11.14 δίνεται διάγραμμα πυκνοτήτων νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος στις 7 ημέρες μετά από συντήρηση και στις 28, 100 & 130 ημέρες μερικής εμφάπτισης σε NaCl 3,5% κ.β. Από το διάγραμμα μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- ✓ Αυξανόμενο το ποσοστό της προσθήκης σε Ι.Τ μειώνεται η πυκνότητα του νωπού και σκληρυνόμενου σκυροδέματος.
- ✓ Στις 7 και 28 ημέρες στα δοκίμια αναφοράς μειώνεται η πυκνότητα ενώ στα δοκίμια με Ι.Τ Γερμανίας αυξάνεται,

- ✓ Στις 7 και 28 ημέρες τα δοκίμια με Ι.Τ Γερμανίας φαίνεται να έχουν μικρότερες πυκνότητες από τα δοκίμια με Ι.Τ Πτολεμαΐδας στο ίδιο ποσοστό προσθήκης

11.2.4.1.2 Μετρήσεις θλιπτικής αντοχής μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Η θλιπτική αντοχή των δοκιμίων μετρήθηκε με θλίψη κυβικών δοκιμίων σκυροδέματος ακμής 150mm. τα δοκίμια μετά το ξεκαλούπωμα μπήκαν σε θάλαμο συντήρησης για 7 ημέρες και στη συνέχεια εμβαπτίστηκαν σε δεξαμενή με διάλυμα NaCl 3,5% κ.β για περίοδο 130 ημερών. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε μηχανή θλίψης Advantest 9 με ρυθμό 0,5MPa/s στο εργαστήριο σκυροδέματος του Πανεπιστημίου Κύπρου.

Ο πίνακας 11.9 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων θλίψης.

Πίνακας 11.9: αποτελέσματα μετρήσεων θλίψης δοκιμίων σκυροδέματος με πρόσθετα Ι.Τ Γερμανίας και Πτολεμαΐδας

ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ (MPa)					
ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 7 ημέρες (ΜΟΝΟ συντήρηση)					
κύβος	αναφοράς	5% FAGER	10% FAGER	5% FAPT	10% FAPT
1	27,90	10,49	12,42	27,71	23,47
2	27,79	11,84	15	25,3	23,84
3	27,00	19,51	13,43	27,12	25,93
Μέσος όρος	27,56	13,95	13,62	26,71	24,41

ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ (MPa)					
ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 28 ημέρες					
κύβος	αναφοράς	5% FAGER	10% FAGER	5% FAPT	10% FAPT
1	34,51	19,39	17,55	36,21	32,71
2	31,74	15,7	20,05	31,08	33,07
3	33,15	19,27	17,63	32,56	32,82
Μέσος όρος	33,13	18,12	18,41	33,28	32,87

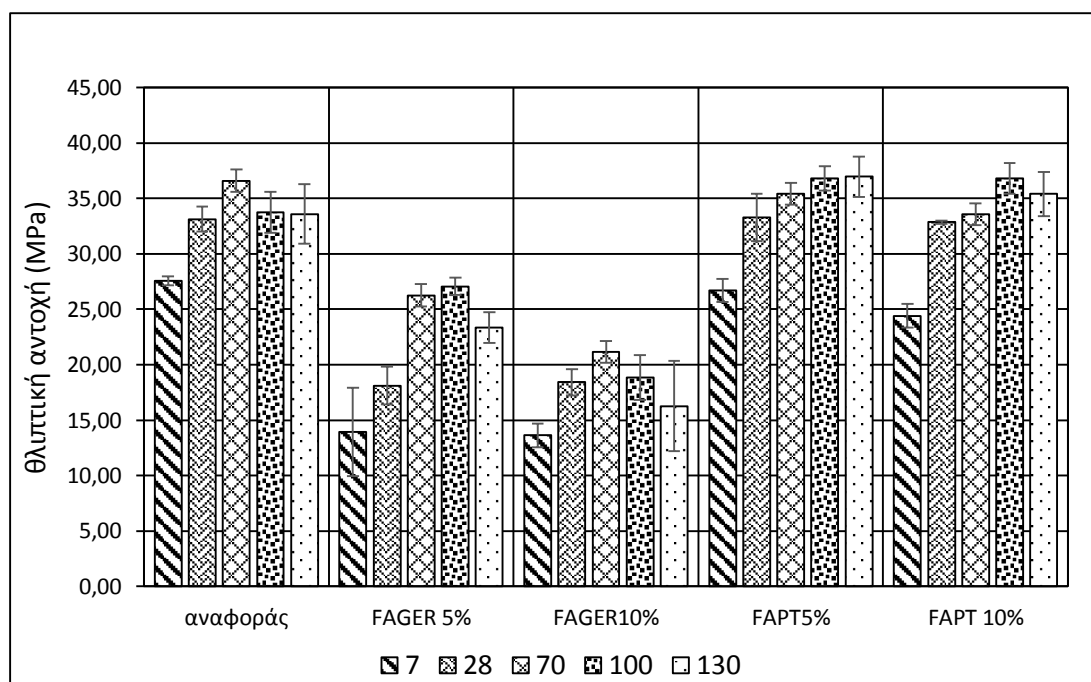
ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ (MPa)					
ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 70 ημέρες					
κύβος	αναφοράς	5% FAGER	10% FAGER	5% FAPT	10% FAPT
1	37,77	25,15	19,6	33,83	32,24
2	37,16	27,39	23,02	35,26	34,91
3	34,85	26,25	20,83	37,16	
Μέσος όρος	36,59	26,26	21,15	35,42	33,58

ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ (MPa)					
ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 100 ημέρες					
κύβος	αναφοράς	5% FAGER	10% FAGER	5% FAPT	10% FAPT
1	34,90	25,75	19,4	37,51	38,4
2	31,03	27,68	20,16	35,76	37,01
3	33,21	27,7	15,44	38,23	35,04

4	35,84	27,13	20,43	35,68	
Μέσος όρος	33,75	27,07	18,86	36,80	36,82

**ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ (MPa)
ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 130 ημέρες**

κύβος	αναφοράς	5% FAGER	10% FAGER	5% FAPT	10% FAPT
1	38,73	23,99	13,73	35,97	38,34
2	31,97	21,4	13,02	39,91	33,27
3	31,38	24,59	22	35,12	33,93
4	31,01	-	-	-	36,13
5	35,31	-	-	36,81	-
6	33,19	-	-	-	-
Μέσος όρος	33,60	23,33	16,25	34,82	34,21



Σχήμα 11.15: Αποτελέσματα μετρήσεων θλίψης (MPa) για δοκίμια σκυροδέματος με πρόσθετα Ι.Τ Γερμανίας & Πτολεμαΐδας σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Στο σχήμα 11.15 δίδεται διάγραμμα της θλιπτικής αντοχής συναρτήσει του χρόνου για δοκίμια αναφοράς και δοκίμια τα οποία έχουν ως πρόσθετα τα δύο είδη ιπτάμενης τέφρας. Η αντικατάσταση του τσιμέντου έγινε σε δύο ποσοστά 5% και 10%.

Από το γράφημα μπορούν να εξαχθούν τα εξής:

- ✓ Τα δοκίμια με ΙΤ Γερμανίας έχουν χαμηλότερες αντοχές από αυτά που περιέχουν Ι.Τ Πτολεμαΐδας,
- ✓ Η αύξηση του ποσοστού σε Ι.Τ Γερμανίας μειώνει τη θλιπτική αντοχή σε όλες τις ηλικίες των μετρήσεων,

- ✓ Η αύξηση του ποσοστού σε Ι.Τ Πτολεμαΐδας δεν φαίνεται να επηρεάζει αρνητικά τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος,
- ✓ Η προσθήκη Ι.Τ Πτολεμαΐδας μειώνει τις πρώιμες αντοχές και τις τελικές αντοχές αλλά στη συνέχεια τα δοκίμια με την Ι.Τ εμφανίζουν υψηλότερες αντοχές από τα δοκίμια αναφοράς.

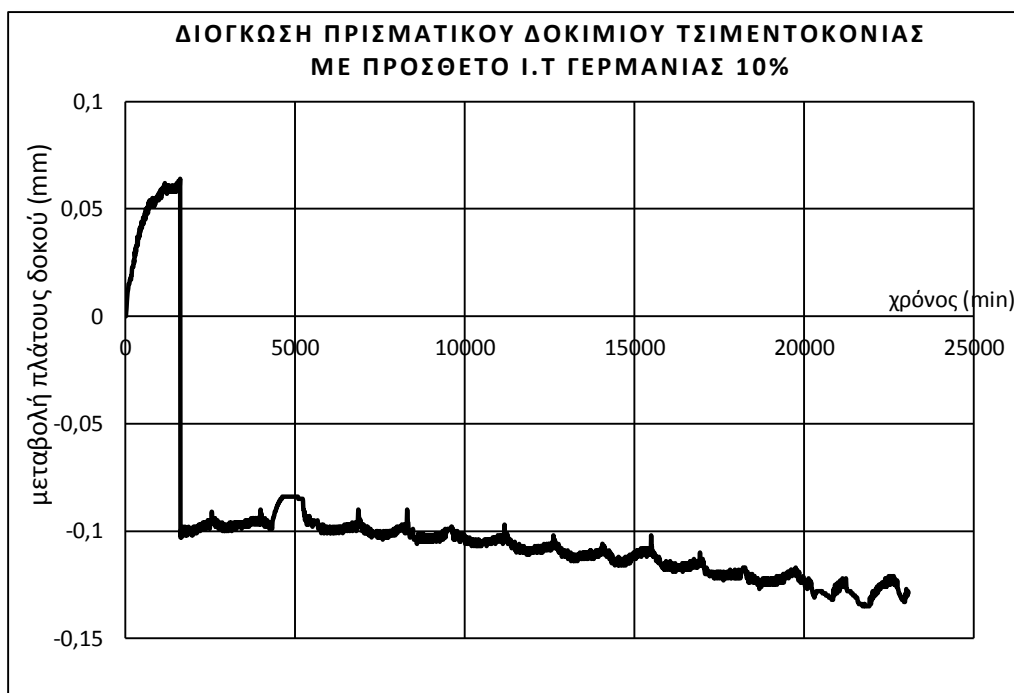
Οι σημαντικά μειωμένες αντοχές που παρατηρήθηκαν στα δοκίμια με Ι.Τ Γερμανίας οφείλεται στο αυξημένο πορώδες και στις εσωτερικές ρηγματώσεις που παρουσιάζουν όπως φαίνεται και στο σχήμα 11.16. Τα δοκίμια με την εν λόγω Ι.Τ παρουσιάζουν έντονη διόγκωση στις πρώτες ώρες μετά τη σκυροδέτηση η οποία συνεχίζει σε μικρότερο βαθμό τις πρώτες 48 ώρες γεγονός που οφείλεται στην χημική της σύσταση και την ύπαρξη αργιλικών ορυκτών. Οι ρηγματώσεις οφείλονται στην αντίδραση του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ με την τέφρα και την παραγωγή αερίων.



Σχήμα 11.16: Δοκίμια σκυροδέματος και τομές με Ι.Τ Γερμανίας (αριστερά) και Ι.Τ Πτολεμαΐδας (δεξιά).

Η διόγκωση της Ι.Τ από τη Γερμανία διερευνήθηκε με την τοποθέτηση *strain Gauges* μήκους 15mm σε δοκούς μήκους 20 cm και διατομής 5cm μετά το ξεκαλούπωμα στις 24 ώρες και καταγραφή σε ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω κατάλληλου λογισμικού. Το δοκίμιο τυλίχτηκε με πολυμερική μεμβράνη για να αποφευχθεί η συστολή ξήρανσης. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τσιμέντο CEM II 42.5N, και Ι.Τ Γερμανίας σε ποσοστό 10%. Λόγος $W/C=0,65$. Αδρανή δεν χρησιμοποιήθηκαν στο μίγμα.

Στο σχήμα 11.17 παρουσιάζεται η διογκωση πρισματικού δοκιμίου συναρτήσει του χρόνου. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι το δοκίμιο διογκώνεται για 26 ωρες μετά την τοποθέτηση των μηκυσιόμετρων και στη συνέχεια συστέλλεται λόγω ξήρανσης. Από τη στιγμή που ξεκίνησε το δοκίμιο να συστέλλεται (26 ώρες) μέχρι το τέλος του πειραματος (16 ημέρες) το μήκος του μειώθηκε κατά 31,7% περίπου.



Σχήμα 11.17: Διόγκωση πρισματικού δοκιμίου με 10% Ι.Τ Γερμανίας

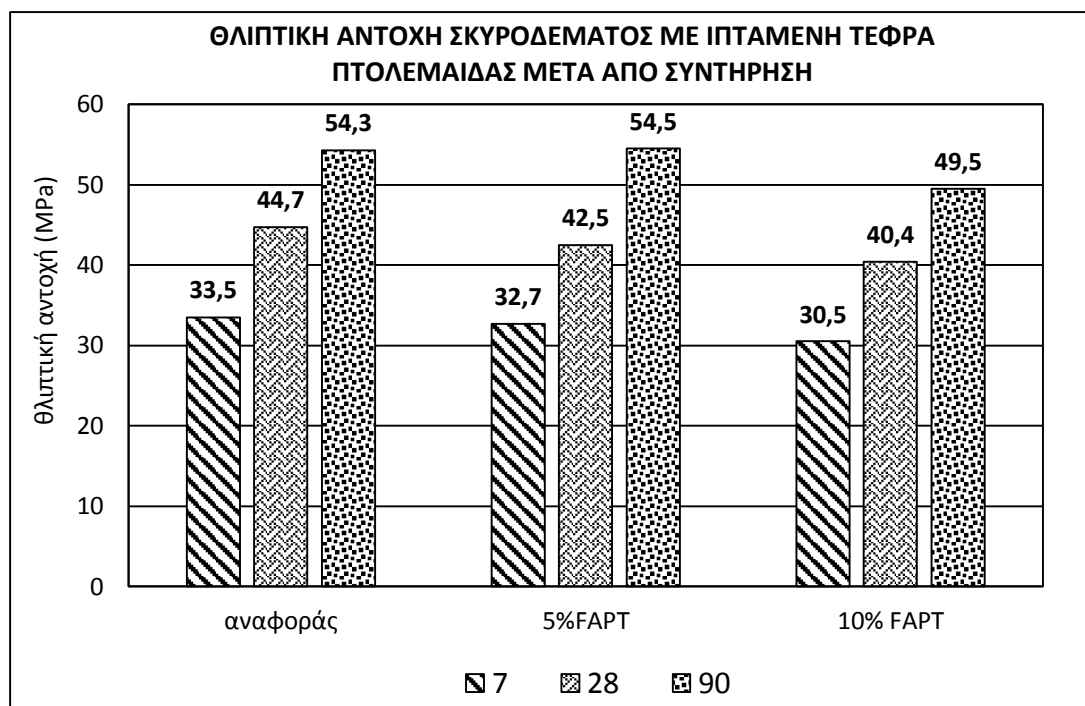
11.2.4.1.3 Μετρήσεις θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος μετά από συντήρηση στις 7 & 28 ημέρες

Η μέτρηση της θλιπτικής αντοχής έπειτα από συντήρηση στις 7 & 28 ημέρες υπολογίστηκε σε κυβικά δοκίμια ακμής 150mm στο εργαστήριο σπλισμένου σκυροδέματος της εταιρίας TITAN Α.Ε. Επίσης μετρήθηκε η αντοχή σε θλίψη στις 90 ημέρες μετά από παραμονή των δοκιμίων σε θάλαμο ενανθράκωσης για 62 ημέρες.

Ο πίνακας 11.10 παρουσιάζει τις ποσότητες των υλικών για την κατασκευή των δοκιμίων ενώ τα αποτελέσματα των μετρήσεων θλίψης δίνονται στο διάγραμμα 11.18.

Πίνακας 11.10: Ποσότητες υλικών για την κατασκευή δοκιμίων σκυροδέματος με FAPTOL

	αναφοράς		5% FAPT		10% FAPT	
	Ποσότητα kg/m ³	Ποσότητα g/κύβο	Ποσότητα kg/m ³	Ποσότητα /κύβο	Ποσότητα kg/m ³	Ποσότητα /κύβο
CEM I 42,5N	351	5265	333,4	5001	315,9	4738,5
νερό	200,1	3001,5	200,1	3001,5	200,1	3001,5
άμμος	713,5	10703	713,5	10703	713,5	10703
γαρμπίλι	624,3	9365	624,3	9365	624,3	9365
χαλίκι	446	6690	446	6690	446	6690



Σχήμα 11.18: Θλιπτική αντοχή (MPa) δοκιμών σκυροδέματος με Ι.Τ Πτολεμαΐδας

Από το σχήμα 11.18 μπορούν να ειπωθούν τα εξής:

- Η προσθήκη Ι.Τ Πτολεμαΐδας μειώνει τη θλιπτική αντοχή στις 7 και 28 ημέρες
- Η αντοχή σε θλίψη ελαττώνεται καθώς αυξάνεται το ποσοστό της Ι.Τ στο σκυρόδεμα,
- Η ενανθράκωση του σκυροδέματος φαίνεται να επηρεάζει αρνητικά το σκυρόδεμα με 10% Ι.Τ.

Ο πίνακας 11.11 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων θλίψης σε δοκίμια σκυροδέματος που περιείχαν Ι.Τ Γερμανίας στις 7 & 28 ημέρες έπειτα από συντήρηση

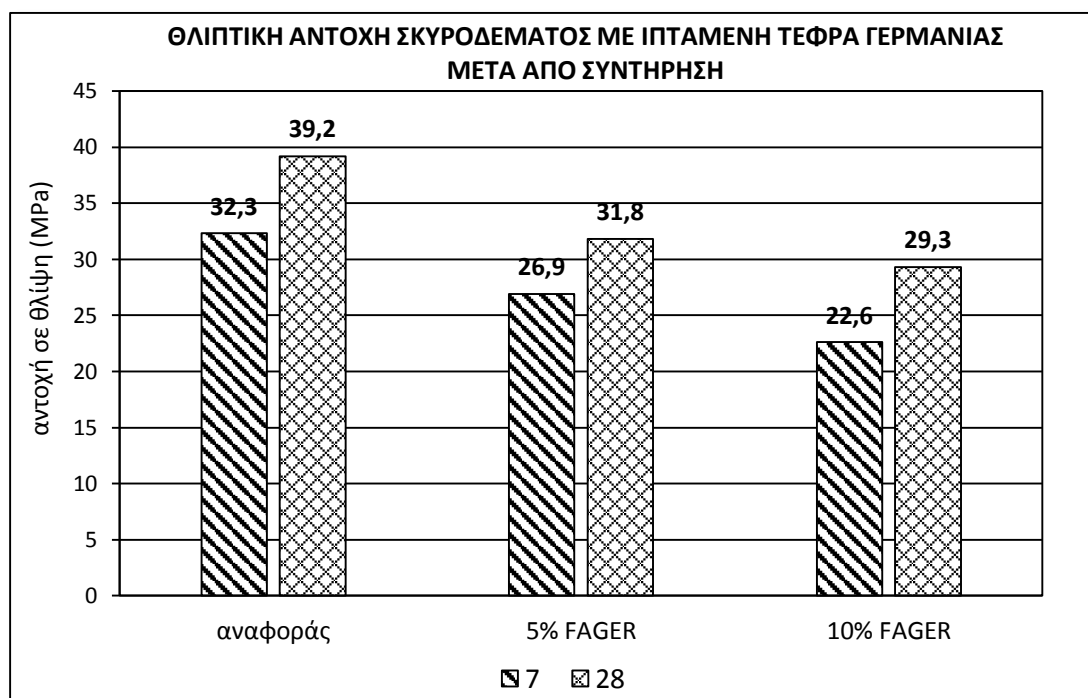
Πίνακας 11.11: Αποτελέσματα μετρήσεων θλίψης και πυκνότητας σε δοκίμια σκυροδέματος με πρόσθετο Ι.Τ Γερμανίας

	7 ΗΜΕΡΕΣ		28 ΗΜΕΡΕΣ	
	αντοχή σε θλίψη (MPa)	Πυκνότητα (kg/m ³)	αντοχή σε θλίψη (MPa)	Πυκνότητα (kg/m ³)
αναφοράς	32,3	2360	39,2	2346
5% FAGER	26,9	2348	31,8	2339
10% FAGER	22,6	2335	29,3	2334

Το σχήμα 11.19 παρουσιάζει σε διάγραμμα τη θλιπτική αντοχή δοκιμών σκυροδέματος με Ι.Τ Γερμανίας και χωρίς πρόσθετο έπειτα από συντήρηση στις 7 και 28 ημέρες.

Όπως ήταν αναμενόμενο τα δοκίμια χωρίς πρόσθετο εμφανίζουν υψηλότερες πρώιμες και τελικές αντοχές, ενώ η αύξηση της περιεκτικότητας σε Ι.Τ μειώνει και τη

θλιπτική αντοχή. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο αυξημένο πορώδες που έχουν τα ποζολανικά σκυροδέματα και στη μείωση του ποσοστού του τσιμέντου εξαιτίας της ύπαρξης Ι.Τ.



Σχήμα 11.19: θλιπτική αντοχή (MPa) δοκιμών σκυροδέματος με Ι.Τ Γερμανίας

11.2.4.2 Μετρήσεις εφελκυστικής αντοχής με διάρρηξη

Η εφελκυστική αντοχή των δοκιμών υπολογίστηκε με διάρρηξη κυλινδρικών δοκιμών σκυροδέματος ύψους 300mm και διαμέτρου 150mm. Η ταχύτητα φόρτισης ήταν 0,05 MPa/s και ο λόγος W/C για την κατασκευή των κυλίνδρων 0,65. Η αντικατάσταση του τσιμέντου έγινε σε ποσοστά 5% και 10% με χρήση δύο ειδών Ι.Τ από τη Γερμανία και την Πτολεμαΐδα. Τα δοκίμια μετά από συντήρηση 7 ημερών τοποθετήθηκαν σε δεξαμενή με διάλυμα NaCl 3,5% κ.β και οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στις 7,28,100 και 130 ημέρες.

11.2.4.2.1 Μετρήσεις εφελκυστικής αντοχής μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β.

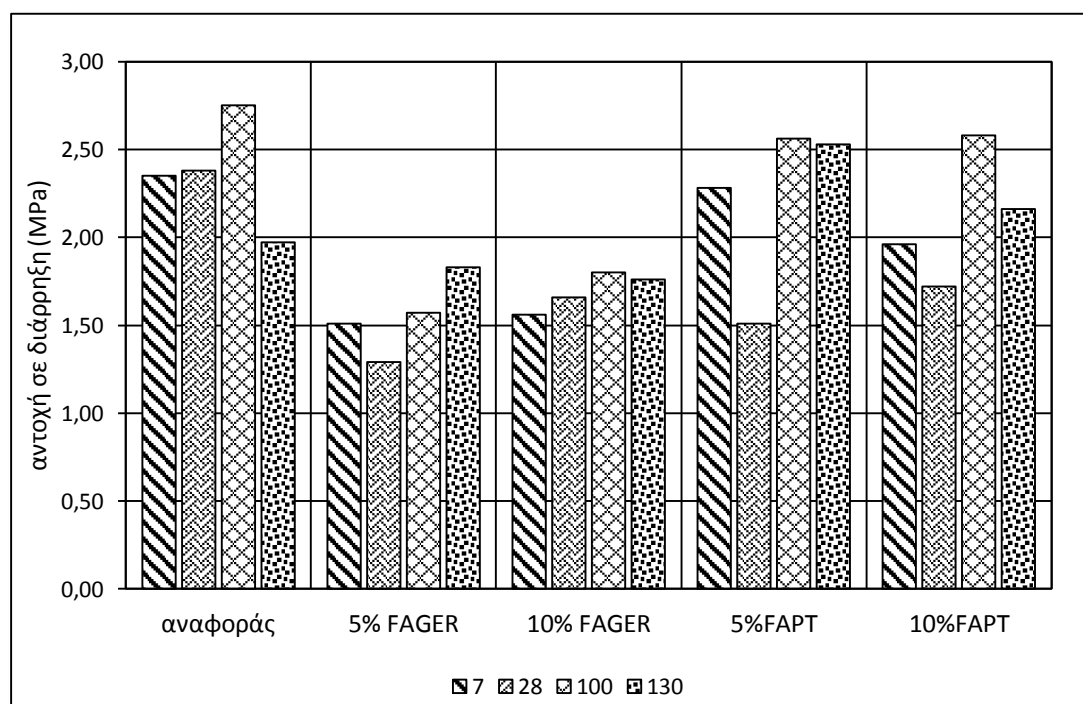
Η εκτίμηση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος έγινε με τη δοκιμή διάρρηξης (Brazilian test) σε κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος ύψους 300mm και διαμέτρου 150mm. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του πανεπιστημίου της Κύπρου. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στον πίνακα 11.12.

Πίνακας 11.12: Αποτελέσματα μετρήσεων διάρρηξης και πυκνότητας σε κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος

	Αντοχή σε διάρρηξη	αναφοράς	5% FAGER	10% FAGER	5% FAPT	10% FAPT
7 ημέρες	f_{ctm} (MPa)	2,35	1,51	1,56	2,28	1,96
	d (kg/m ³)	2194,15	1981,13	1996,23	2050,00	2045,00
28 ημέρες	f_{ctm} (MPa)	2,38	1,29	1,66	1,51	1,72
	d (kg/m ³)	2160	1979	1999	2158	2092
100 ημέρες	f_{ctm} (MPa)	2,75	1,57	1,80	2,56	2,58
	d (kg/m ³)	2110	2080	1991	2077	2094
130 ημέρες	f_{ctm} (MPa)	1,97	1,83	1,76	2,53	2,16
	d (kg/m ³)	2076	2082	2061	2112	2046

Στο σχήμα 11.20 δίνεται διάγραμμα της αντοχής σε διάρρηξη του σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου εμφάπτισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Οπλισμένου σκυροδέματος του Πανεπιστημίου Κύπρου.

Από το διάγραμμα φαίνεται ότι την χαμηλότερη αντοχή στη δοκιμή διάρρηξης την έχουν τα δοκίμια την Ι.Τ από τη Γερμανία το οποίο οφείλεται στο αυξημένο πορώδες και στις εσωτερικές ρηγματώσεις των δοκιμών. Επίσης ένα άλλο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι οι πρώιμες και τελικές αντοχές είναι χαμηλότερες στα σκυροδέματα με τις ποζολάνες αλλά στις 100 και 130 ημέρες τα δοκίμια με την τέφρα της Πτολεμαΐδας αυξάνουν τις αντοχές εν συγκρίσει με τα δοκίμια αναφοράς.

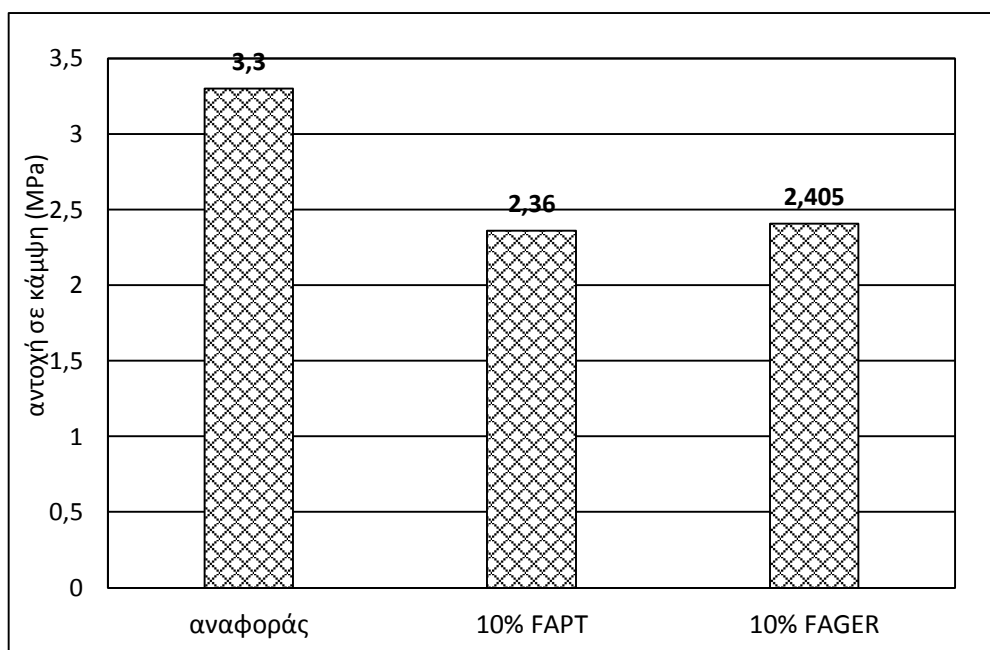


Σχήμα 11.20: Αντοχή σε διάρρηξη κυλινδρικών δοκιμών σκυροδέματος σε MPa

11.2.4.3 Μετρήσεις αντοχής σε κάμψη

Η αντοχή σε κάμψη μετρήθηκε σε πρισματικά δοκίμια διατομής 10cm και μήκους 100cm. Τα δοκίμια μετά την κατασκευή τους παρέμειναν εντός δεξαμενής συντήρησης μέχρι τις 28 ημέρες, χρόνος στον οποίο έγινε η δοκιμή κάμψης. Η αντικατάσταση του τσιμέντου έγινε σε ποσοστό 10% και για τα δύο είδη υπτάμενης τέφρας που χρησιμοποιήθηκαν.

Το σχήμα 11.21 παρουσιάζει την αντοχή σε κάμψη πρισματικών δοκιμίων στις 28 ημέρες από το οποίο φαίνεται ότι τα δοκίμια αναφοράς έχουν υψηλότερη καμπτική αντοχή συγκρινόμενη με τις άλλες δύο κατηγορίες.



Σχήμα 11.21: Αντοχή σε κάμψη (MPa) πρισματικών δοκιμίων σκυροδέματος στις 28 ημέρες

11.2.5 Υπολογισμός μέτρου Ελαστικότητας σκυροδέματος

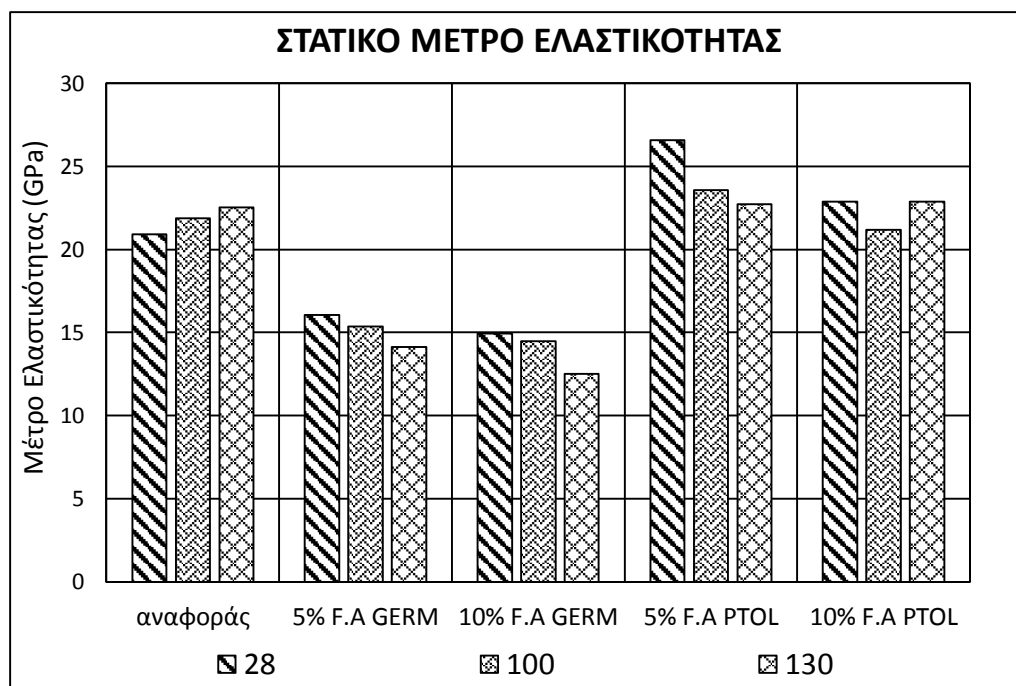
11.2.5.1 Στατικό μέτρο ελαστικότητας μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.θ

Το μέτρο ελαστικότητας υπολογίστηκε μετά από κύκλους φόρτισης – αποφόρτισης στο 40% της μέγιστης αντοχής κυλινδρικών δοκιμίων σκυροδέματος. Τα δοκίμια είχαν ύψος 200mm και διάμετρο 100mm και για τη μέτρηση της παραμόρφωσης των κυλίνδρων τοποθετήθηκαν ηλεκτρομηκυνσιόμετρα μήκους 40mm αντιδιαμετρικά και η καταγραφή γινόταν από ειδικό λογισμικό σε Ηλεκτρονικό Υπολογιστή. Τα υλικά κατασκευής ήταν τσιμέντο CEM II 42.5N, νερό δικτύου Λευκωσίας και ασβεστολιθικά αδρανή ενώ ο λόγος W/C ήταν ίσος με 0,65. Η αντικατάσταση του τσιμέντου από τα δύο είδη τέφρας έγινε σε ποσοστά 5% και 10%.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν έπειτα από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β στις 28,100 και 130 ημέρες και τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 11.13. Αφού υπολογίστηκε το μέτρο ελαστικότητας τα δοκίμια φορτίστηκαν μέχρι θλίψης.

Πίνακας 11.13: Αποτελέσματα μετρήσεων στατικού μέτρου Ελαστικότητας σε GPa σε Κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος

	28 ημέρες		100 ημέρες		130 ημέρες	
	E (GPa)	S (MPa)	E (GPa)	S (MPa)	E (GPa)	S (MPa)
αναφοράς	20,895	16,03	21,876	18,560	22,509	29,672
5% F.A GERM	16,062	4,75	15,372	7,500	14,147	6,312
10% F.A GERM	14,935	6,00	14,462	6,500	12,513	7,832
5% F.A PTOL	26,560	15,18	23,572	16,720	22,720	29,32
10% F.A PTOL	22,892	16,55	21,165	18,710	22,884	28,664



Σχήμα 11.22: Στατικό μέτρο Ελαστικότητας κυλινδρικών δοκιμών σκυροδέματος σε GPa έπειτα από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β.

Το σχήμα 11.22 παρουσιάζει το διάγραμμα του μέτρου ελαστικότητας δοκιμών σκυροδέματος για όλες τις κατηγορίες δοκιμών αφού εμβάπτιστηκαν σε διάλυμα Χλωριούχου Νατρίου. Από το διάγραμμα προκύπτουν τα παρακάτω:

- Τα δοκίμια με την Ι.Τ από τη Γερμανία εμφανίζουν το χαμηλότερο μέτρο E ενώ αυξανόμενο το ποσοστό της προσθήκης δεν φαίνεται να μειώνεται περαιτέρω το μέτρο Ελαστικότητας,

- Η προσθήκη 5% Ι.Τ Πτολεμαΐδας βελτιώνει το μέτρο ελαστικότητας εν συγκρίσει με τα δοκίμια αναφοράς,
- Η προσθήκη 10% Ι.Τ Πτολεμαΐδας αυξάνει το μέτρο Ε στις 28 ημέρες κατά 10% περίπου ενώ σε μετέπειτα ηλικίες οι τιμές του μέτρου Ελαστικότητας είναι περίπου ίδιες με τα δοκίμια χωρίς Ι.Τ.

11.2.5.2 Υπολογισμός δυναμικού μέτρου Ελαστικότητας μέσω της ταχύτητας υπερήχων μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Ο υπολογισμός του Δυναμικού μέτρου Ελαστικότητας πραγματοποιήθηκε έμμεσα από τη ταχύτητα των υπερηχητικών κυμάτων διαμέσου της μάζας του σκυροδέματος. Οι μετρήσεις έγιναν κατά τη φορά της σκυροδέτησης σε κυβικά δοκίμια ακμής 100mm. το διαβρωτικό περιβάλλον των δοκιμών ήταν διάλυμα NaCl 3,5% κ.β και προτού πραγματοποιηθεί η μέτρηση της ταχύτητας, τα δοκίμια βγήκαν από τη δεξαμενή, ξηράθηκαν σε φούρνο στους 105°C και αφέθηκαν σε εργαστηριακό περιβάλλον ώστε να αποκτήσουν θερμοκρασία περιβάλλοντος. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ταχύτητας των υπερήχων και του μέτρου Ελαστικότητας δίνονται στους πίνακες 11.14, 11.15 αντίστοιχα.

Πίνακας 11.14: Αποτελέσματα μετρήσεων ταχύτητας υπερήχων και πυκνότητας σε κυβικά δοκίμια σκυροδέματος με πρόσθετα Ι.Τ Γερμανίας και Πτολεμαΐδας

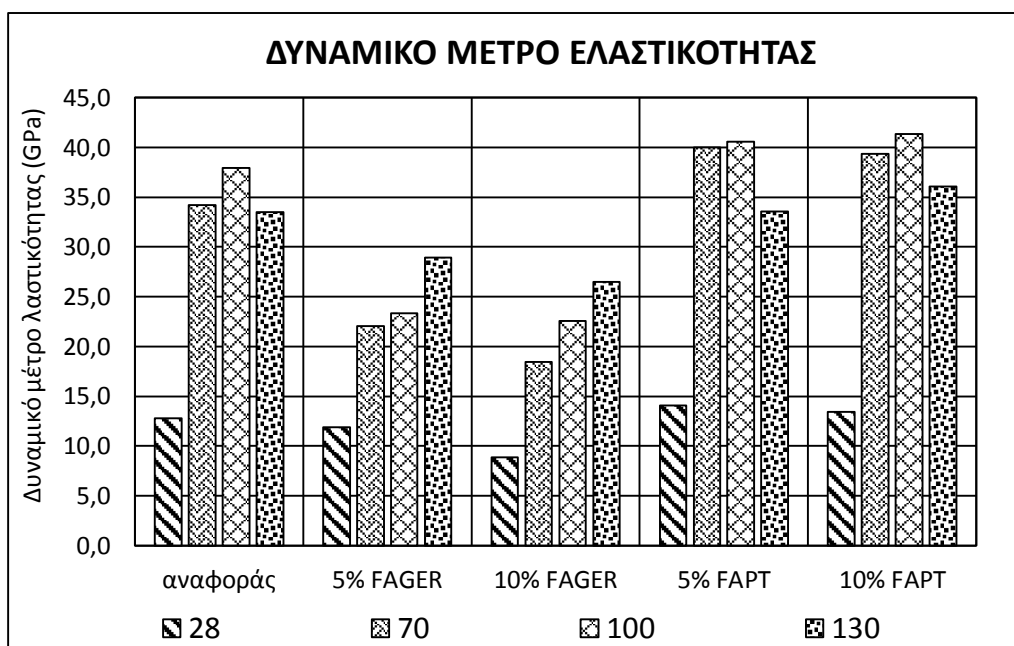
Χρόνος (ημέρες)	αναφοράς		5% FAGER		10% FAGER		5% FAPT		10% FAPT	
	P (kg/m ³)	V (m/sec)	P (kg/m ³)	V (m/sec)	P (kg/m ³)	V (m/sec)	P (kg/m ³)	V (m/sec)	P (kg/m ³)	V (m/sec)
28	1969	2550	2017	2425	1918	2150	2007	2650	1985	2600
70	2003,1	4132	2040,6	3289	1952,9	3074	2044	4424	2048,9	4382
100	2074,45	4275	2050,8	3372	1967,5	3389	2074,45	4424	2075,17	4464
130	2059,98	4034	2059,62	3750	1990,59	3650	2098,61	4000	2095,44	4150

Πίνακας 11.15: δυναμικό Μέτρο Ελαστικότητας σε κυβικά δοκίμια σκυροδέματος με πρόσθετα Ι.Τ Γερμανίας και Πτολεμαΐδας μετά από εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (GPa)					
Χρόνος (ημέρες)	αναφοράς	5% FAGER	10% FAGER	5% FAPT	10% FAPT
28	12,80	11,86	8,87	14,09	13,42
70	34,20	22,07	18,45	40,01	39,34
100	37,91	23,32	22,60	40,60	41,35
130	33,52	28,96	26,52	33,58	36,09

Το σχήμα 11.23 δίνει διάγραμμα του Δυναμικού Μέτρου Ελαστικότητας δοκιμών σκυροδέματος μετά από εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl. Από το γράφημα μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα.

- Στις 28 ημέρες όλες τις κατηγορίες δοκιμών έχουν περίπου ίδιο μέτρο E,
- Η προσθήκη της Ι.Τ από τη Γερμανία ελαττώνει το μέτρο E μετά τις 28 ημέρες μερικής εμβάπτισης στο διαβρωτικό περιβάλλον,
- Η αντικατάσταση του τσιμέντου με Ι.Τ Πτολεμαΐδας αυξάνει το μέτρο E συγκριτικά με τα δοκίμια αναφοράς,
- Οι τιμές του Δυναμικού μέτρου Ελαστικότητας είναι αρκετά αυξημένες συγκριτικά με το στατικό μέτρο Ελαστικότητας,
- Στις 130 ημέρες το μέτρο Ελαστικότητας μειώνεται στα δοκίμια αναφοράς και τα δοκίμια με Ι.Τ και για τα δύο ποσοστά προσθήκης.



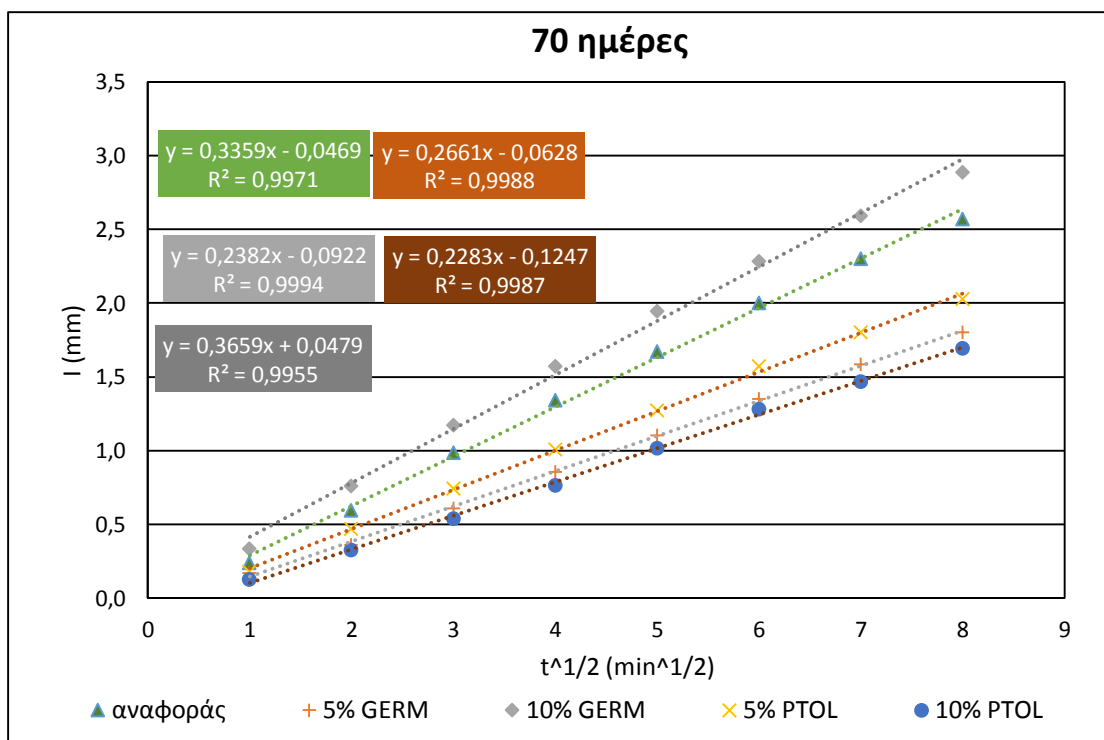
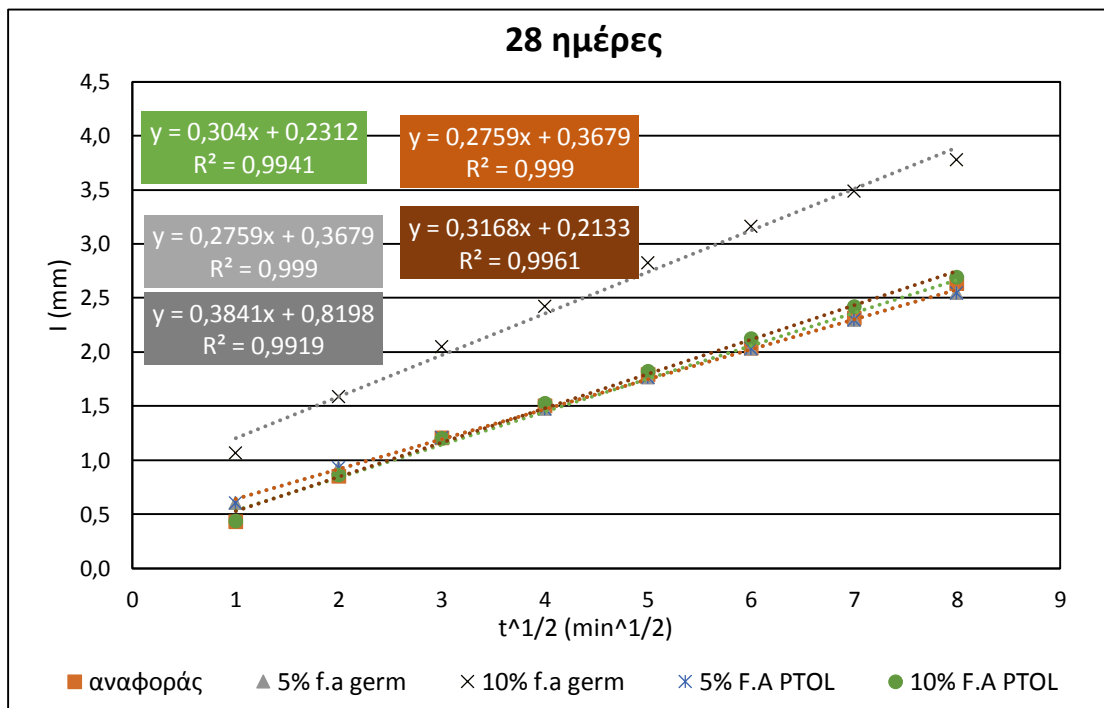
Σχήμα 11.23: Δυναμικό μέτρο Ελαστικότητας δοκιμών σκυροδέματος σε GPa έπειτα από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β.

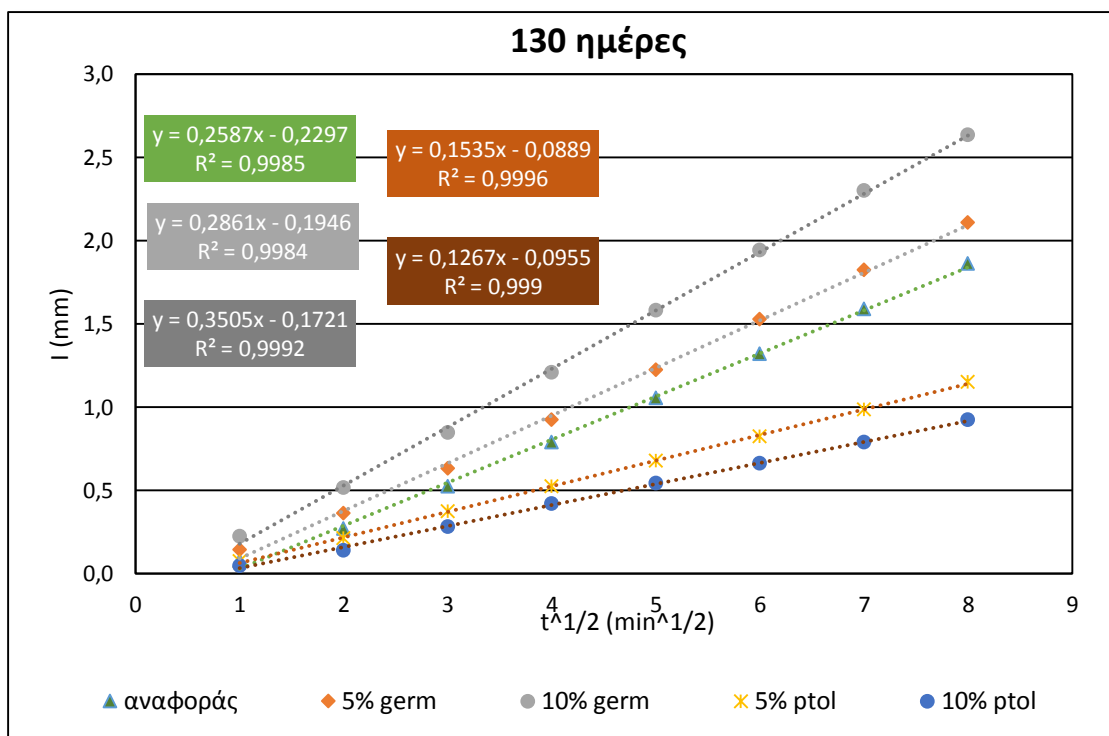
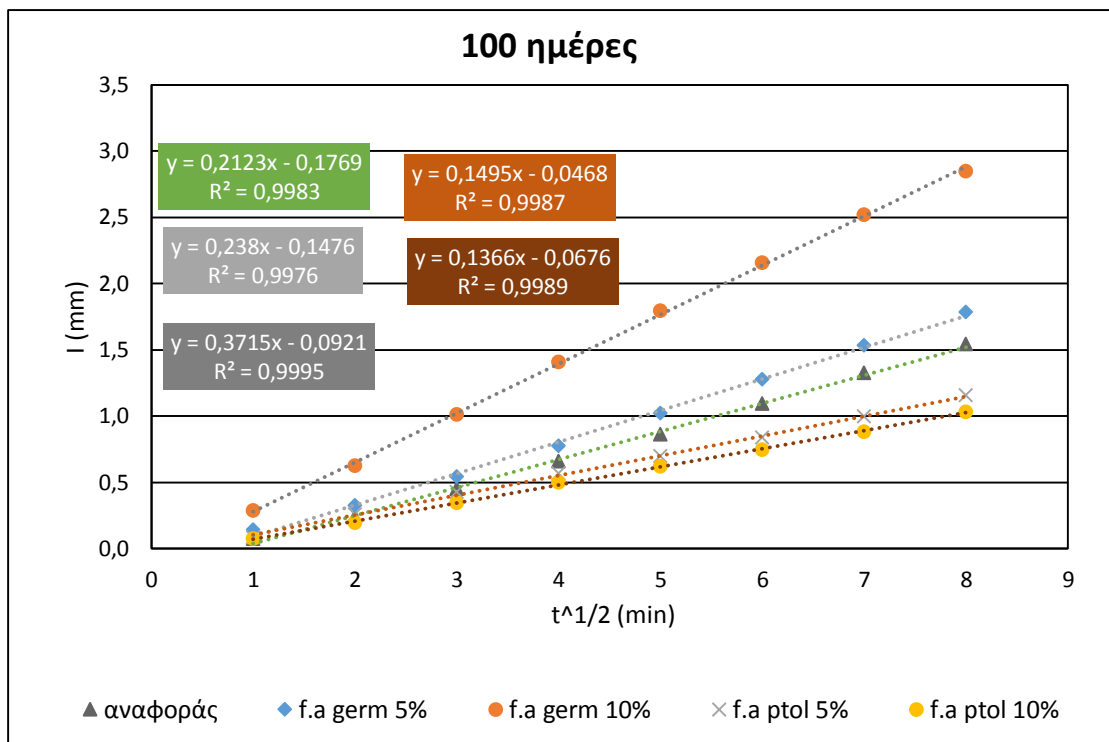
11.2.6 Μετρήσεις τριχοειδούς απορροφητικότητας σκυροδέματος

Η τριχοειδής απορροφητικότητα υπολογίστηκε σε διάλυμα μεθανόλης σε κυβικά δοκίμια ακμής 100mm. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο ίδιο δοκίμιο για κάθε κατηγορία και το διαβρωτικό περιβάλλον ήταν μερική εμβάπτιση σε NaCl 3,5% κ.β. Για τον υπολογισμό της απορροφητικότητας πραγματοποιήθηκαν τα εξής:

- Πλήρης ξήρανση των δοκιμών σε φούρνο,
- Κάλυψη των πλευρών των δοκιμών με ρητίνη ώστε η απορρόφηση να πραγματοποιείται μονοδιάστατα μόνο από την εμβαπτισμένη πλευρά,
- Υπολογισμός της επιφάνειας εμβάπτισης των δοκιμών με παχύμετρο,
- Συνεχής καταγραφή της θερμοκρασίας της μεθανόλης με ψηφιακό θερμόμετρο και υπολογισμός της πυκνότητας.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της απορροφητικότητας δίνονται στον πίνακα 11.16.



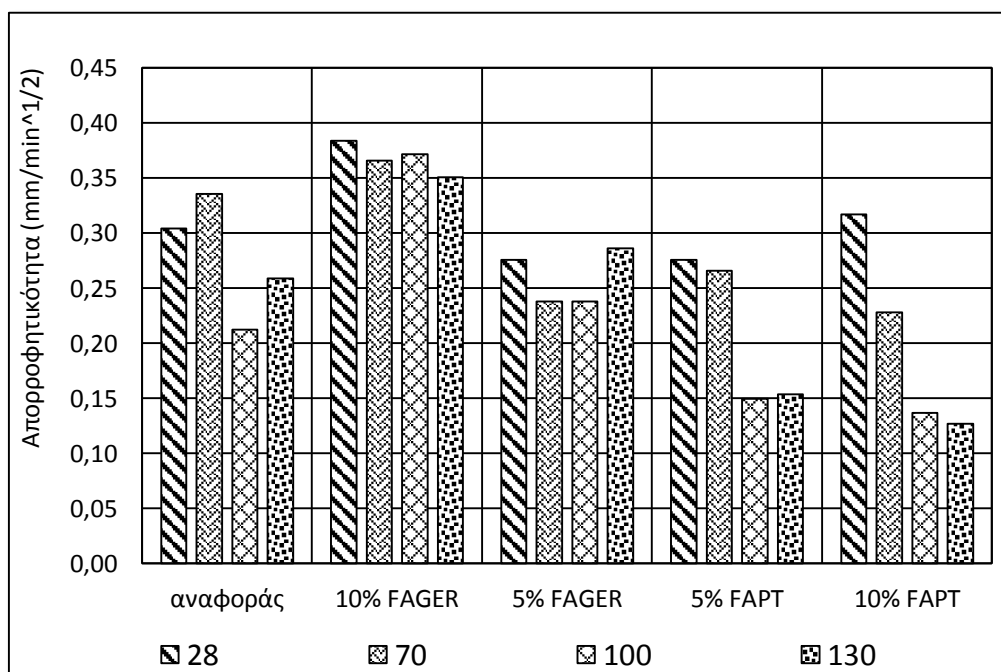


Στο σχήμα 11.24 παρουσιάζεται διάγραμμα της απορροφητικότητας σε μεθανόλη δοκιμών σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου εμφάνισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β. Από το διάγραμμα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Στις 28 ημέρες όλες οι σειρές δοκιμών έχουν περίπου ίδιες τιμές απορροφητικότητας με εξαίρεση τη σειρά 10% FAGER που έχει περίπου 26% μεγαλύτερη σε σχέση με τα αναφοράς,
- Τη μεγαλύτερη ποσοστιαία μείωση της απορροφητικότητας μεταξύ 28 και 130 ημερών την έχουν οι κατηγορίες των δοκιμών με την Ι.Τ από την Πτολεμαΐδα,
- Η προσθήκη της Ι.Τ σε ποσοστό 10% αυξάνει την απορροφητικότητα S σε όλες τις ηλικίες που έγιναν οι μετρήσεις,
- Τα δοκίμια χωρίς προσθήκη τέφρας και με 5% F.AGER αυξάνουν την απορροφητικότητα στις 130 ημέρες μερικής εμβάπτισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β.

Πίνακας 11.16: Αποτελέσματα απορροφητικότητας και ποσοστιαία μεταβολή σε κυβικά δοκίμια σκυροδέματος μετά από εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑ S (mm/min ^{1/2})					Ποσοστιαία (%) μεταβολή S μεταξύ 28 & 130 ημερών
Χρόνος(ημέρες)	28	70	100	130	
αναφοράς	0,3040	0,3359	0,2123	0,2587	14,9↓
10% GERM	0,3841	0,3659	0,3715	0,3505	08,7↓
5% GERM	0,2759	0,2382	0,2380	0,2861	03,7↑
5% PTOL	0,2759	0,2661	0,1495	0,1535	44,4↓
10% PTOL	0,3168	0,2283	0,1366	0,1267	60,0↓



Σχήμα 11.24: Απορροφητικότητα δοκιμών σε mm/min^{1/2} σκυροδέματος μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β.

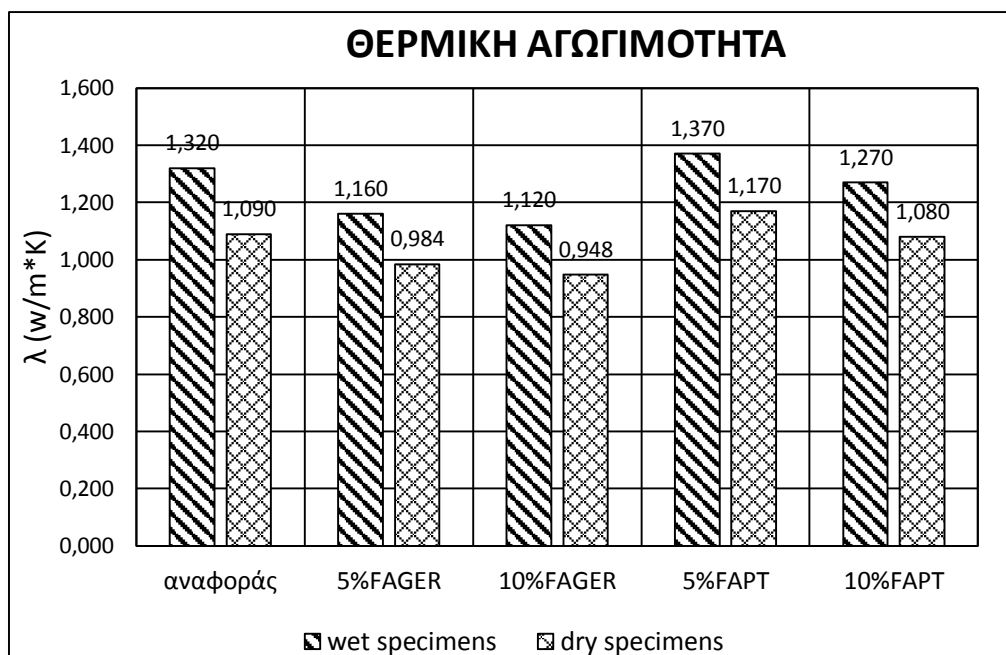
11.2.7 Θερμικές ιδιότητες σκυροδέματος με προσθήκη υπτάμενης τέφρας

Οι θερμικές ιδιότητες του σκυροδέματος μελετήθηκαν σε κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος διαμέτρου 100mm και ύψους 25mm. Το μηχάνημα που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ήταν το *ISOMET model 2104 heat transfer analyzer*. Τα αποτελέσματα δίνονται στο πίνακα 11.17.

Πίνακας 11.17: Συντελεστές θερμικών ιδιοτήτων σε δοκίμια σκυροδέματος στις 130 ημέρες

ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 130 ΗΜΕΡΕΣ

	ΝΩΠΑ ΔΟΚΙΜΙΑ			ΞΗΡΑ ΔΟΚΙΜΙΑ		
	λ (W/m*K)	C_p (J/m ³ *K)	a (m ² *W/J)	λ (W/m*K)	C_p (J/m ³ *K)	a (m ² *W/J)
ΑΝΑΦΟΡΑΣ	1,320	1,570	0,8408	1,090	1,590	0,6855
5% FAGER	1,160	1,460	0,7945	0,984	1,430	0,6881
10% FAGER	1,120	1,620	0,6914	0,948	1,650	0,5745
5% FAPT	1,370	1,650	0,8303	1,170	1,590	0,7358
10% FAPT	1,270	1,590	0,7987	1,080	1,590	0,6792



Σχήμα 11.25: Θερμική αγωγιμότητα λ δοκιμίων σκυροδέματος στις 130 ημέρες μερικής εμβάπτισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β.

Το σχήμα 11.25 δίνει διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας λ για δοκίμια σκυροδέματος στις 130 ημέρες μερικής εμβάπτισης σε NaCl 3,5% κ.β.

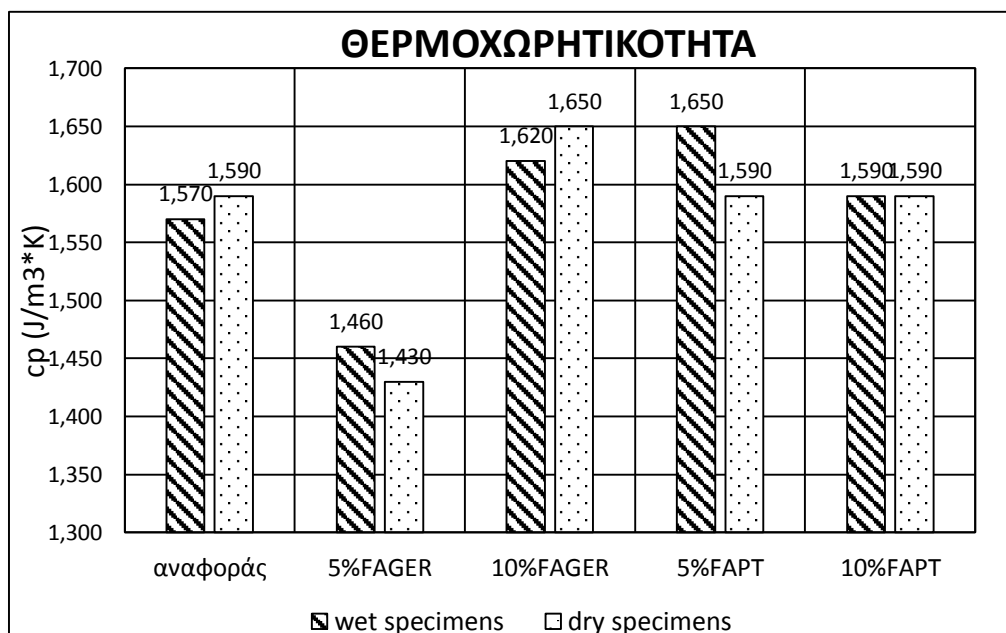
Από το διάγραμμα προκύπτουν τα εξής:

- Η ξήρανση μειώνει τη αγωγιμότητα του σκυροδέματος στη θερμότητά σε όλες τις σειρές δοκιμών γεγονός που οφείλεται στις μικρορωγμές που δημιουργούνται λόγω εξάτμισης του νερού,
- Η προσθήκη υπτάμενης τέφρας στο σκυρόδεμα ελαττώνει τη θερμική αγωγιμότητα (Bentz et al., 2011). Η αναντιστοιχία της σειράς 5% FAPT πιθανόν να οφείλεται στην περιεχόμενη υγρασία των δοκιμών,
- Η αύξηση του ποσοστού προσθήκης σε Ι.Τ μειώνει το συντελεστή λ σε σχέση με το σκυρόδεμα χωρίς τέφρα (Bentz et al., 2011).

Η θερμοχωρητικότητα του σκυροδέματος εξαρτάται από την ποιότητα του, δηλαδή το πορώδες, την υγρασία και το είδος των αδρανών που περιέχονται. Στο σχήμα 10.25 δίνεται διάγραμμα της ειδικής θερμότητας του σκυροδέματος στις 130 ημέρες μερικής εμβάπτισης σε NaCl 3,5% κ.β.

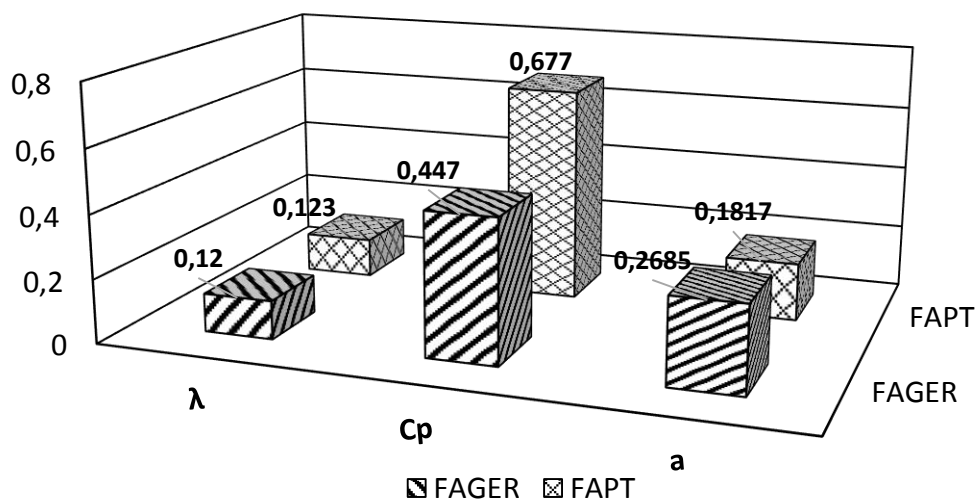
τα συμπεράσματα που μπορούν να προκύψουν είναι τα παρακάτω:

- Η αύξηση του C_p στα δοκίμια αναφοράς και με 10% FAGER πιθανόν να οφείλεται στην αυξημένη θερμοκρασία τους εξαιτίας του μικρού χρόνου παραμονής σε εργαστηριακό περιβάλλον μετά την ξήρανση,
- Η προσθήκη 10% Ι.Τ Γερμανίας αυξάνει το C_p σε υγρά δοκίμια. Η αυξημένη υγρασία τους οφείλεται στην ύπαρξη αργιλικών ορυκτών.
- Τα δοκίμια με την κωδική ονομασία 5% FAGER εμφανίζουν τις χαμηλότερες τιμές C_p . Το γεγονός αυτό πιθανόν να οφείλεται στη χαμηλότερη υγρασία των δοκιμών που έγινε η μέτρηση (EUROCODE-2, 2004).



Σχήμα 11.26: Θερμοχωρητικότητα δοκιμών σκυροδέματος στις 130 ημέρες μερικής Εμβάπτισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β.

ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΡΟΣΘΕΤΩΝ



Σχήμα 11.27: Θερμικές ιδιότητες των Ι.Τ που χρησιμοποιήθηκαν ως υλικά αντικατάστασης του τσιμέντου

Το σχήμα 11.27 παρουσιάζει τις θερμικές ιδιότητες των δύο τεφρών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή. Από το γράφημα φαίνεται ότι τη μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα την έχει η τέφρα από την Πτολεμαΐδα γεγονός που οφείλεται στην αυξημένη υγρασία της.

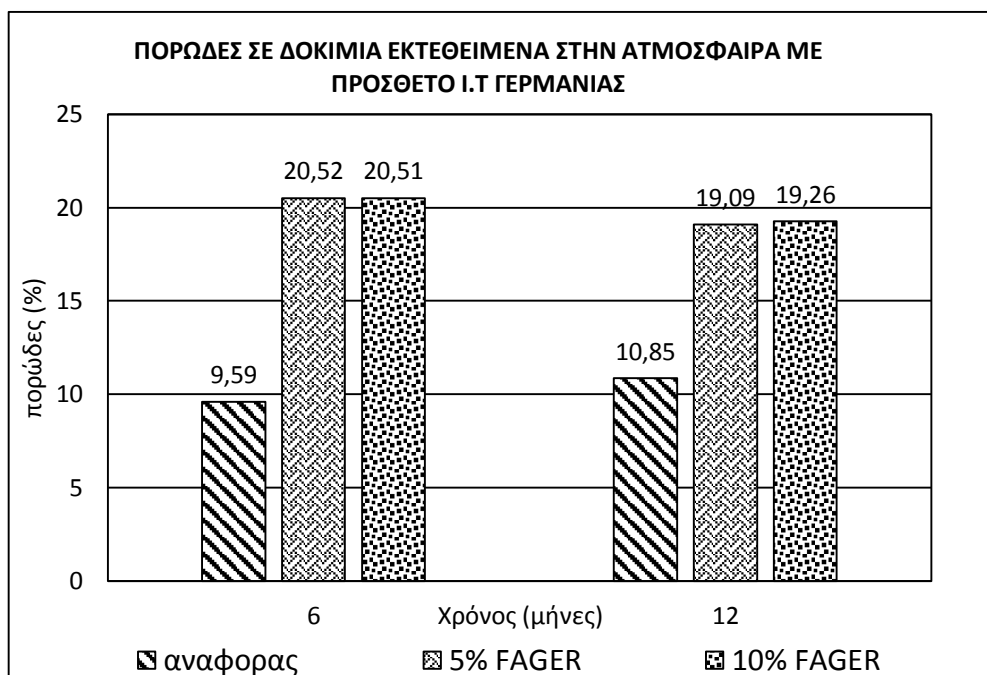
11.2.8 Μετρήσεις πορώδους σκυροδέματος

11.2.8.1 Μετρήσεις πορώδους με ποροσιμετρία Hg

Το πορώδες των δοκιμών τσιμεντοκονίας εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα υπολογίστηκε με τη μέθοδο της ποροσιμετρίας υδραργύρου (*Mercury Intrusion Porosimetry, MIP*). Τα αποτελέσματα, ως προς το πορώδες (%) παρουσιάζονται στους πίνακες 11.18 και 11.19.

Πίνακας 11.18: Αποτελέσματα μετρήσεων πορώδους δοκιμών τσιμεντοκονίας με έκθεση στην ατμόσφαιρα

ΧΡΗΣΗ Ι.Τ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ ΓΕΡΜΑΝΙΑΣ	ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 6 ΜΗΝΕΣ			ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 12 ΜΗΝΕΣ		
	10% FAGER	5% FAGER	αναφοράς	10% FAGER	5% FAGER	αναφοράς
Total cumulative volume (mm ³ /g)	101,4948	96,8159	44,3575	93,1183	91,8033	50,1316
Total specific surface area (m ² /g)	4,6900	3,5870	2,6600	4,2790	4,3970	4,5510
Average pore radius (μm)	0,2202	0,3918	0,1058	0,2470	0,2636	0,0553
Total porosity (%)	20,5056	20,5197	9,5945	19,2560	19,0910	10,8464
Bulk density (g/cm ³)	2,0204	2,1195	2,1630	2,0679	2,0796	2,1636
Apparent density (g/cm ³)	2,5415	2,6666	2,3925	2,5611	2,5702	2,4268



Σχήμα 11.28: Πορώδες δοκιμών (%) τσιμεντοκονίας με Ι.Τ Γερμανίας συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στην ατμόσφαιρα

Το σχήμα 11.28 παρουσιάζει σε διάγραμμα το πορώδες των δοκιμών τσιμεντοκονίας συναρτήσει του χρόνου μετά από έκθεση στην ατμόσφαιρα με πρόσθετο Ι.Τ Γερμανίας. Όπως αναμενόταν τα δοκίμια χωρίς Ι.Τ έχουν το χαμηλότερο πορώδες σε σχέση με τις άλλες δύο κατηγορίες δοκιμών. Στους 12 μήνες έκθεσης σε φυσικό περιβάλλον παρατηρείται μικρή μείωση του πορώδους στις σειρές 5% FAGER και 10% FAGER της τάξεως του 12% συγκριτικά με τους 6 μήνες.

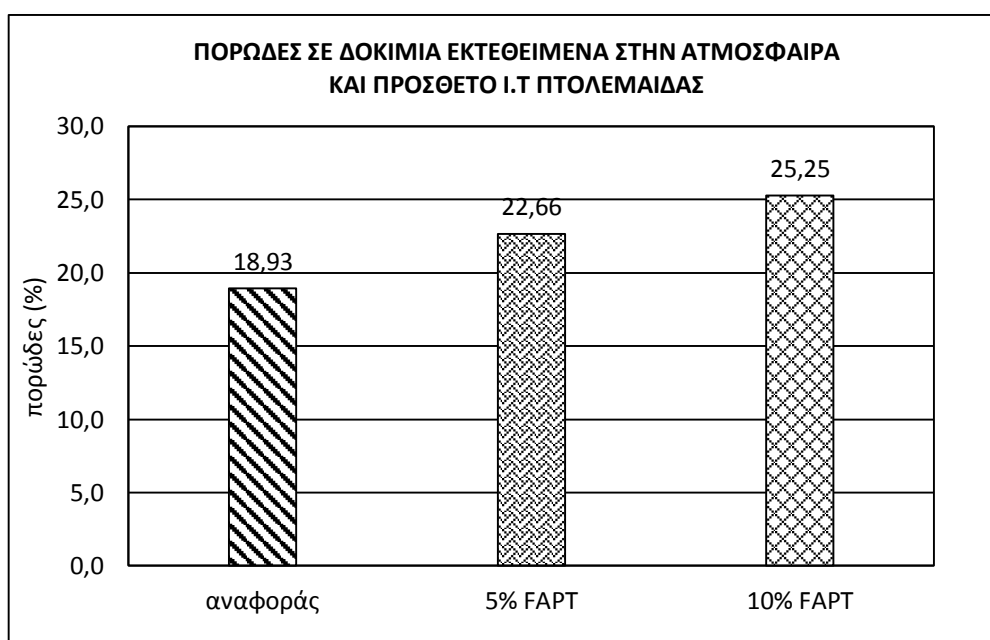
Πίνακας 11.19: Αποτελέσματα μετρήσεων πορώδους δοκιμών τσιμεντοκονίας εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα και πρόσθετο Ι.Τ Πτολεμαΐδας

ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 12 ΜΗΝΕΣ

ΧΡΗΣΗ Ι.Τ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ ΠΤΟΛΕΜΑΪΔΑΣ	αναφοράς	5% FAPT	10% FAPT
Total Intrusion Volume (mL/g)	0,0894	0,1094	0,1228
Total Pore Area (m ² /g)	26,9040	34,4670	35,9800
Average Pore Diameter (4V/A) (μm)	0,0133	0,0127	0,0136
Bulk Density (g/mL)	2,1181	2,0709	2,0573
Apparent Density (g/mL)	2,6126	2,6779	2,7524
Total porosity (%)	18,9303	22,6645	25,2547

Στο σχήμα 11.29 δίνεται διάγραμμα ολικού πορώδους για δοκίμια τσιμεντοκονίας τα οποία εκτέθηκαν σε φυσικό περιβάλλον για 6 μήνες εντός εργαστηρίου και περιείχαν ως πρόσθετο Ι.Τ Πτολεμαΐδας. Τα συμπεράσματα τα οποία μπορούν να εξαχθούν είναι τα εξής:

- Τα δοκίμια χωρίς πρόσθετο παρουσιάζουν το μικρότερο πορώδες,
- Το πορώδες των δοκιμών αυξάνεται, όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου από Ι.Τ Πτολεμαΐδας,
- Το αυξημένο πορώδες των δοκιμών με την Ι.Τ Πτολεμαΐδας (σχήμα 11.29) συγκριτικά με τα δοκίμια που περιέχουν Ι.Τ Γερμανίας (σχήμα 11.28) οφείλονται στο γεγονός ότι τα πρώτα έχουν ενανθρακωθεί πλήρως στους 12 μήνες εξαιτίας της παραμονής τους σε εργαστηριακό περιβάλλον.



Σχήμα 11.29: Πορώδες δοκιμών (%) τσιμεντοκονίας με Ι.Τ Πτολεμαΐδας μετά από 12 μήνες έκθεσης στην ατμόσφαιρα

11.2.8.2 Μετρήσεις ανοικτού πορώδους

Το ανοικτό πορώδες των δοκιμών σκυροδέματος υπολογίστηκε με τη μέθοδο της απαέρωσης για συνολικό χρόνο 130 ημέρες μερικής εμβάπτισης σε διάλυμα NaCl 3,55 κ.β. Τα υλικά κατασκευής των δοκιμών ήταν τσιμέντο CEM II 42.5N, ασβεστολιθική άμμος και νερό δικτύου Λευκωσίας. Η αντικατάσταση του τσιμέντου από Ι.Τ Γερμανίας και Πτολεμαΐδας έγινε σε ποσοστά 5% και 10% και η μέτρηση του πορώδους πραγματοποιήθηκε στο ίδιο δοκίμιο ανά κατηγορία σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στον πίνακα 11.20.

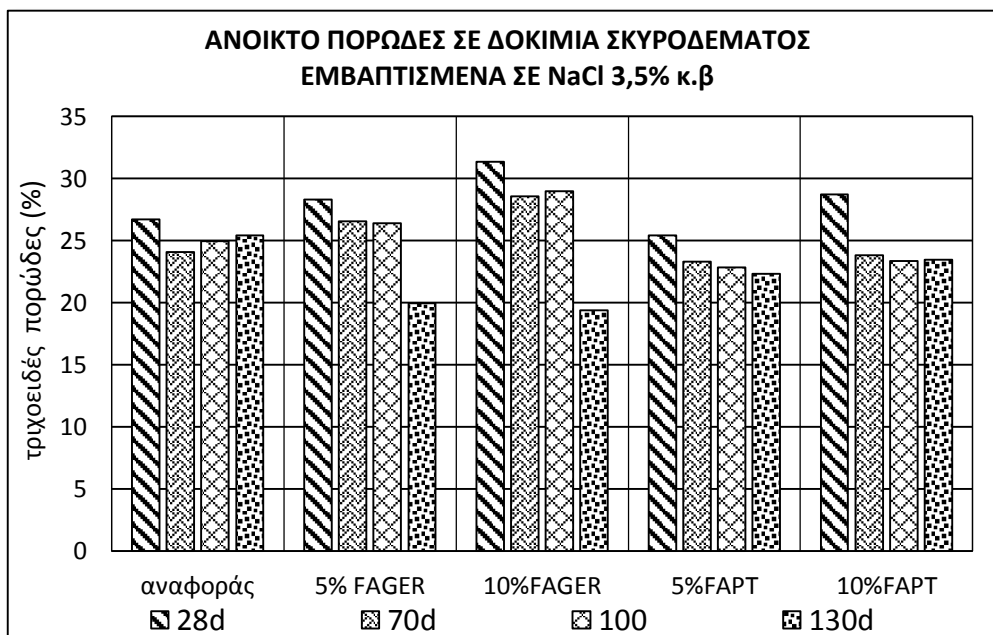
Πίνακας 11.20: Αποτελέσματα μετρήσεων ανοικτού πορώδους σε κυβικά δοκίμια σκυροδέματος έπειτα από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 28 ΗΜΕΡΕΣ						
	ξηρή μάζα (g)	μάζα μέσα στο νερό (g)	SSD μάζα (g)	Πορώδες (%)	απορρόφηση	φαινόμενη πυκνότητα (kg/m ³)
αναφοράς	1910,2	1185,9	2174,6	26,74	13,841	1928
5% FAGER	2039	1267,1	2343,8	28,31	14,949	1889
10% FAGER	1896,7	1178,3	2225	31,37	17,309	1808
5% FAPT	1955,2	1222,1	2205	25,41	12,776	1985
10% FAPT	1912,4	1212,8	2194,2	28,71	14,735	1944
ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 70 ΗΜΕΡΕΣ						
	ξηρή μάζα (g)	μάζα μέσα στο νερό (g)	SSD μάζα (g)	Πορώδες (%)	απορρόφηση	φαινόμενη πυκνότητα (kg/m ³)
αναφοράς	1944,2	1200,3	2180	24,07	12,128	1980
5% FAGER	2062	1282,3	2344,2	26,58	13,686	1937
10% FAGER	1931,7	1193,6	2226,8	28,56	15,277	1865
5% FAPT	1992,2	1247	2218,9	23,33	11,379	2045
10% FAPT	1976,4	1236,6	2207,8	23,83	11,708	2030
ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 100 ΗΜΕΡΕΣ						
	ξηρή μάζα (g)	μάζα μέσα στο νερό (g)	SSD μάζα (g)	Πορώδες (%)	απορρόφηση	φαινόμενη πυκνότητα (kg/m ³)
αναφοράς	1951,6	1217,92	2195,6	24,96	12,502	1992
5% FAGER	2069,91	1288	2350,41	26,40	13,551	1944
10% FAGER	1943,5	1209,72	2242,74	28,97	15,396	1877
5% FAPT	2002,26	1252,24	2224,26	22,84	11,087	2055
10% FAPT	1983,8	1239,23	2210,66	23,35	11,435	2038
ΧΡΟΝΟΣ ΕΚΘΕΣΗΣ: 130 ΗΜΕΡΕΣ						
	ξηρή μάζα (g)	μάζα μέσα στο νερό (g)	SSD μάζα (g)	Πορώδες (%)	απορρόφηση	φαινόμενη πυκνότητα (kg/m ³)
αναφοράς	1953,2	1223,84	2201,64	25,41	12,719	1993
5% FAGER	2071,26	1220,71	2283,29	19,95	10,237	1945
10% FAGER	1946,49	1114,2	2146,99	19,41	10,301	1880
5% FAPT	2008,15	1253,16	2225,17	22,33	10,807	2061
10% FAPT	1986,74	1243,18	2214,52	23,45	11,465	2041

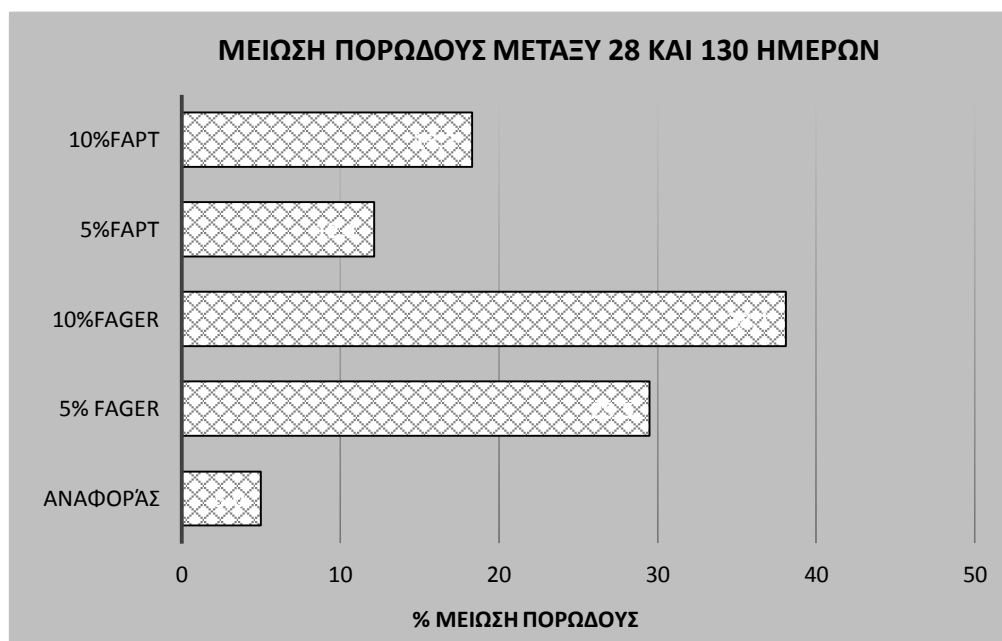
Στο σχήμα 11.30 δίνεται διάγραμμα του ανοικτού πορώδους συναρτήσει του χρόνου εμβάπτισης σε NaCl 3,5% κ.β για κυβικά δοκίμια σκυροδέματος. Από το διάγραμμα μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Στις 28 ημέρες το πορώδες είναι αυξημένο στα δοκίμια με Ι.Τ συγκριτικά με τα αναφοράς,
- Το πορώδες δεν μεταβάλλεται σημαντικά με αύξηση του ποσοστού της Ι.Τ στο σκυρόδεμα (αφορά και τις δύο τέφρες) μετά τις 70 ημέρες,
- Η μεγαλύτερη μείωση του πορώδους παρατηρήθηκε στα δοκίμια σκυροδέματος με την Ι.Τ από τη Γερμανία,

- Αύξηση του χρόνου εμφάνισης σε διάλυμα NaCl μετά τις 70 ημέρες δεν μειώνει περαιτέρω το πορώδες (αφορά δοκίμια με Ι.Τ Πτολεμαΐδας),
- Τα δοκίμια αναφοράς τείνουν να αυξάνουν το ποσοστό του πορώδους μετά από 70 ημέρες μερικής εμφάνισης σε διάλυμα χλωριούχου Νατρίου.



Σχήμα 11.30: Τριχοειδές πορώδες δοκιμών (%) σκυροδέματος στις 130 ημέρες μερικής εμφάνισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β.



Σχήμα 11.31: Ποσοστιαία μείωση ανοικτού πορώδους δοκιμών (%) σκυροδέματος στις 130 ημέρες μερικής εμφάνισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β.

11.2.9 Ηλεκτροχημικός προσδιορισμός ρυθμού διάβρωσης των οπλισμών

11.2.9.1 Μετρήσεις Γραμμικής πόλωσης σε εμβαπτισμένα δοκίμια τσιμεντοκονίας σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Για την εκτίμηση του ρυθμού διάβρωσης των οπλισμών πραγματοποιήθηκαν ηλεκτροχημικές μετρήσεις γραμμικής πόλωσης (*Linear Polarization Resistance – LPR*) σε οπλισμένα κυλινδρικά δοκίμια τσιμεντοκονίας διαμέτρου 50mm και ύψους 100mm. Τα υλικά κατασκευής των δοκιμών ήταν ασβεστολιθική άμμος λατομείου, τσιμέντο CEM I 42.5N και νερό δικτύου ΕΜΠ. Η αντικατάσταση του τσιμέντου από τις υπό μελέτη Ιπτάμενες τέφρες έγινε σε ποσοστά 5% και 10% ενώ κατασκευάστηκαν και δοκίμια χωρίς τεφρά (αναφοράς) για λόγους σύγκρισης.

Η πειραματική διάταξη για τη διεξαγωγή των ηλεκτροχημικών μετρήσεων περιελάμβανε ποτενσιοστάτη/γαλβανοστάτη της *E.G & Model 263* συνδεδεμένο με υπολογιστή για την καταγραφή των πειραματικών δεδομένων. Για την επεξεργασία των ηλεκτροχημικών αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε λογισμικό *Softcorr III* της εταιρίας *E.G & G Princeton Research*. Οι ηλεκτροχημικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε κελί ηλεκτρόλυσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος $T=25^{\circ}\text{C}$. Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ως ηλεκτρόδιο αναφοράς κεκορεσμένος καλομέλανας (SCE), ως ηλεκτρόδιο εργασίας ο υπό εξέταση χάλυβας και βοηθητικό ηλεκτρόδιο ράβδος άνθρακα κυκλικής διατομής $\Phi 5$, μήκους 100mm. Το βήμα σάρωσης του δυναμικού ήταν (Scan rate) 0.2mV/s ενώ η πόλωση του δομικού χάλυβα έγινε στην περιοχή $\pm 20\text{mV}$ από το δυναμικό διάβρωσης του E_{corr} . Η απώλεια μάζας των οπλισμών υπολογίστηκε από το νόμο του Faraday σύμφωνα με τη σχέση:

$$m(g) = \frac{M \times I \times t}{ZxF}$$

Όπου,

M: το Α.Β του Fe (55.8)

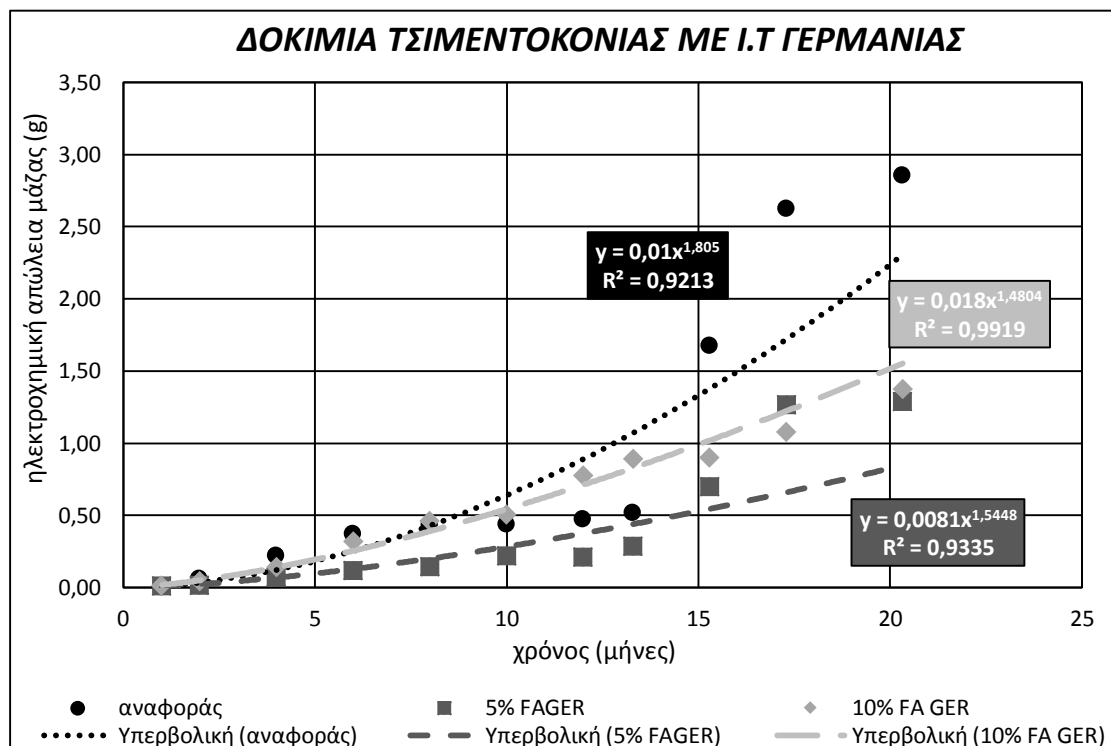
I: το ρεύμα σε μA

Z: ο αριθμός των e^- (2)

F: Σταθερά Faraday (96487 A^*s)

Το σχήμα 11.32 παρουσιάζει σε γράφημα τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας των οπλισμών συναρτήσει του χρόνου εμβάπτισης σε NaCl 3,5% κ.β σε δοκίμια με προσθήκη Ι.Τ Γερμανίας. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι οι οπλισμοί των δοκιμών με 5% Ι.Τ (Γερμανίας) διαβρώνονται λιγότερο σε όλους

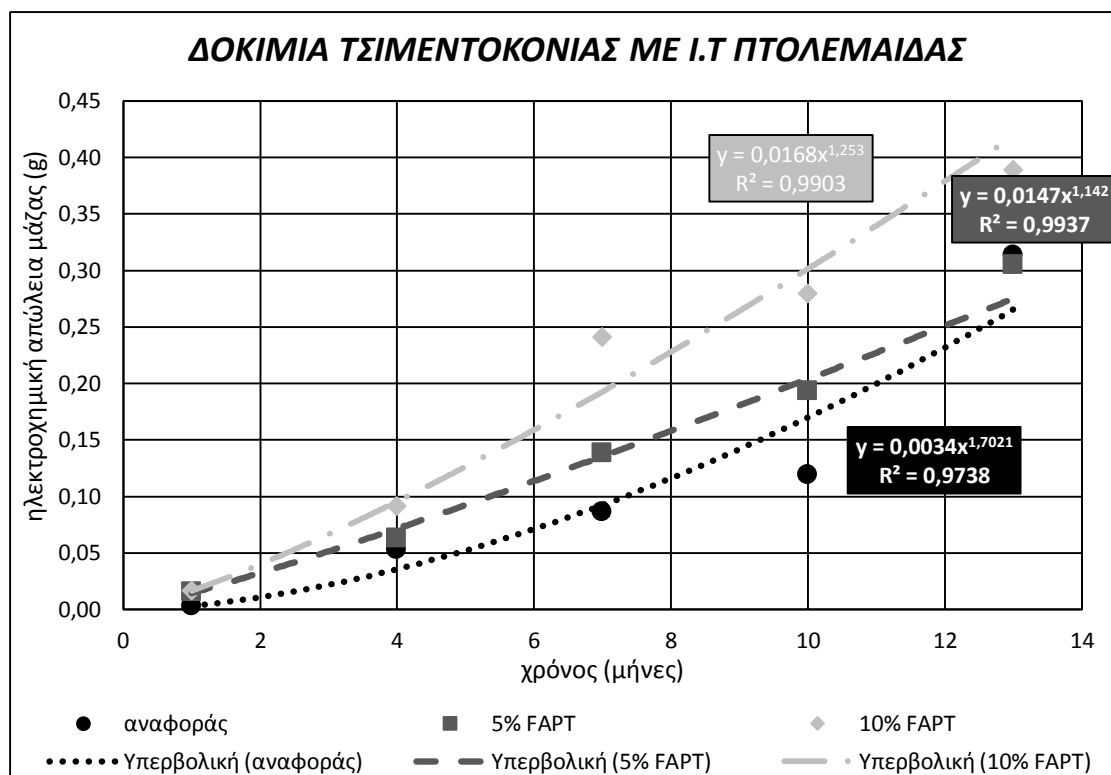
τους χρόνους που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις σε σχέση με τις άλλες δύο κατηγορίες. Η χρήση της Ι.Τ φαίνεται να μειώνει τη διάβρωση του χάλυβα και στο ποσοστό προσθήκης 10% αλλά έπειτα από 15 μήνες εμβάπτισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β.



Σχήμα 11.32: Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας σε g συναρτήσει του χρόνου εμβάπτισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β για οπλισμούς εγκιβωτισμένους σε δοκίμια τσιμεντοκονίας με Ι.Τ Γερμανίας

Το σχήμα 11.33 παρουσιάζει σε διάγραμμα την ηλεκτροχημική απώλεια μάζα των οπλισμών εγκιβωτισμένοι σε δοκίμια τσιμεντοκονίας, συναρτήσει του χρόνου εμβάπτισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β. Οι μετρήσεις αφορούν δοκίμια με προσθήκη Ι.Τ από την Πτολεμαΐδα. Από το παραπάνω διάγραμμα μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

- Τα δοκίμια με 10% Ι.Τ έχουν τις υψηλότερες τιμές ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας εν συγκρίσει με τις άλλες δύο κατηγορίες δοκιμών σε όλους τους χρόνους που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις,
- Όσο αυξάνεται το ποσοστό προσθήκης σε Ι.Τ αυξάνεται και η απώλεια μάζας εξαιτίας του αυξημένου πορώδους που παρουσιάζουν τα ποζολανικά σκυροδέματα,
- Η προσθήκη 5% Ι.Τ Πτολεμαΐδας παρουσιάζει την ίδια ηλεκτροχημική απώλεια μάζας με τα δοκίμια αναφοράς στους 13 μήνες εμβάπτισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β.



Σχήμα 11.33: Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας σε g συναρτήσει του χρόνου εμφάνισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β για οπλισμούς εγκιβωτισμένους σε δοκίμια τσιμεντοκονίας με Ι.Τ Πτολεμαΐδας

11.2.10 Σταθμικός προσδιορισμός απώλειας μάζας οπλισμών

Ο υπολογισμός της απώλειας μάζας πραγματοποιήθηκε σε εγκιβωτισμένους χαλύβδινους οπλισμούς σε δοκίμια τσιμεντοκονίας, τα οποία μετά την κατασκευή και τη συντήρησή τους σε δεξαμενή με απιονισμένο νερό τοποθετήθηκαν στο διαβρωτικό περιβάλλον.

Οι οπλισμοί πριν τη σκυροδέτηση καθαρίστηκαν με απιονισμένο νερό και ακετόνη για την απομάκρυνση τυχόν οξειδίων και ελαίων από την επιφάνειά τους και στη συνέχεια ζυγίστηκαν σε ζυγό με ακρίβεια 0,1mg. Οι χάλυβες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τύπου Tempcore (h=100mm, φ=10mm) και τα υλικά κατασκευής των δοκιμών τσιμεντοκονίας ήταν τσιμέντο CEM I 42,5N, ασβεστολιθική άμμος λατομείου και νερό δικτύου ΕΜΠ. Λόγος W/C = 0,65.

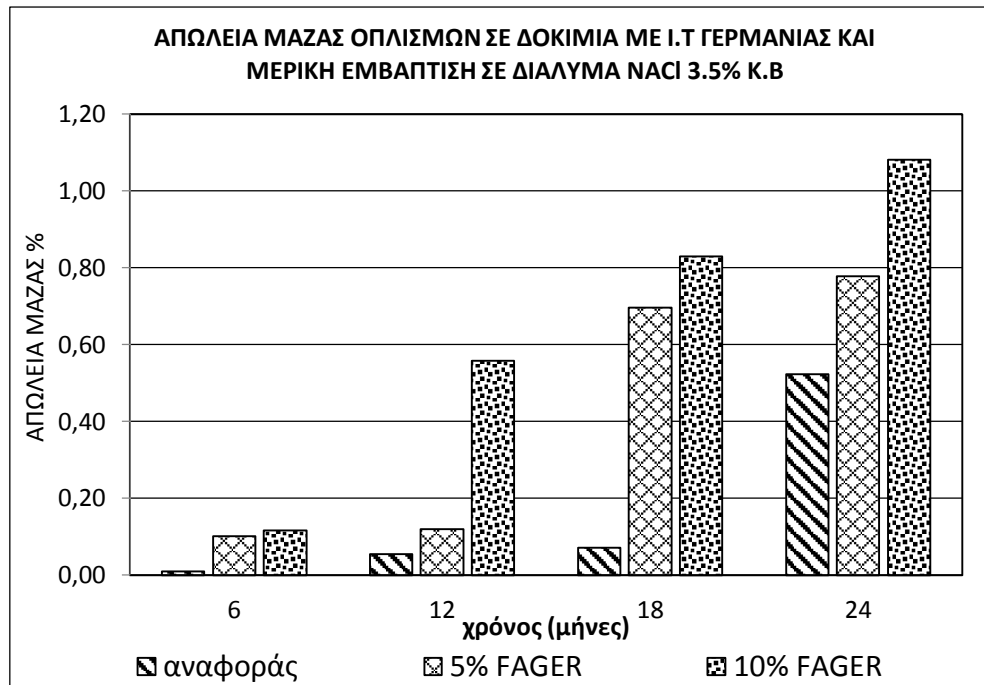
Η αντικατάσταση του τσιμέντου από τις Ι.Τ (Γερμανίας & Πτολεμαΐδας) έγινε σε ποσοστά 5% και 10% ενώ για λόγους σύγκρισης κατασκευάστηκαν και δοκίμια χωρίς πρόσθετο (αναφοράς). Συγκεκριμένα κατασκευάστηκαν 8 δοκίμια οπλισμένης τσιμεντοκονίας ανά κατηγορία για κάθε περιβάλλον διάβρωσης.

11.2.10.1 Απώλειες μάζας οπλισμών σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Η εκτίμηση της διάβρωσης των οπλισμών σε περιβάλλον χλωριόντων εξετάστηκε με μερική εμβάπτιση οπλισμένων δοκιμίων τσιμεντοκονίας σε διάλυμα NaCl 3,55 κ.β σε εργαστηριακές συνθήκες περιβάλλοντος. Οι πίνακες 11.21 και 11.22 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της ποσοστιαίας απώλειας μάζας και του ρυθμού διάβρωσης των οπλισμών για δοκίμια με πρόσθετα Ι.Τ από τη Γερμανία και την Πτολεμαΐδα αντίστοιχα.

Πίνακας 11.21: Υπολογισμός απώλειας μάζας (%) και ρυθμού διάβρωσης CR (μm/y) οπλισμών εγκιβωτισμένων σε δοκίμια με πρόσθετο Ι.Τ Γερμανίας εμβαπτισμένα σε NaCl 3,5% κ.β

ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ (%)			
ΧΡΟΝΟΣ (ΜΗΝΕΣ)	5% FAGER	10% FAGER	αναφοράς
6	0,100	0,116	0,009
12	0,119	0,559	0,054
18	0,695	0,830	0,071
24	0,778	1,081	0,523
ΡΥΘΜΟΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ (ΜΜ/Υ)			
ΧΡΟΝΟΣ (ΜΗΝΕΣ)	5% FAGER	10% FAGER	αναφοράς
6	5,150	5,961	0,530
12	6,061	29,160	2,774
18	35,855	42,879	3,568
24	39,468	55,405	26,966

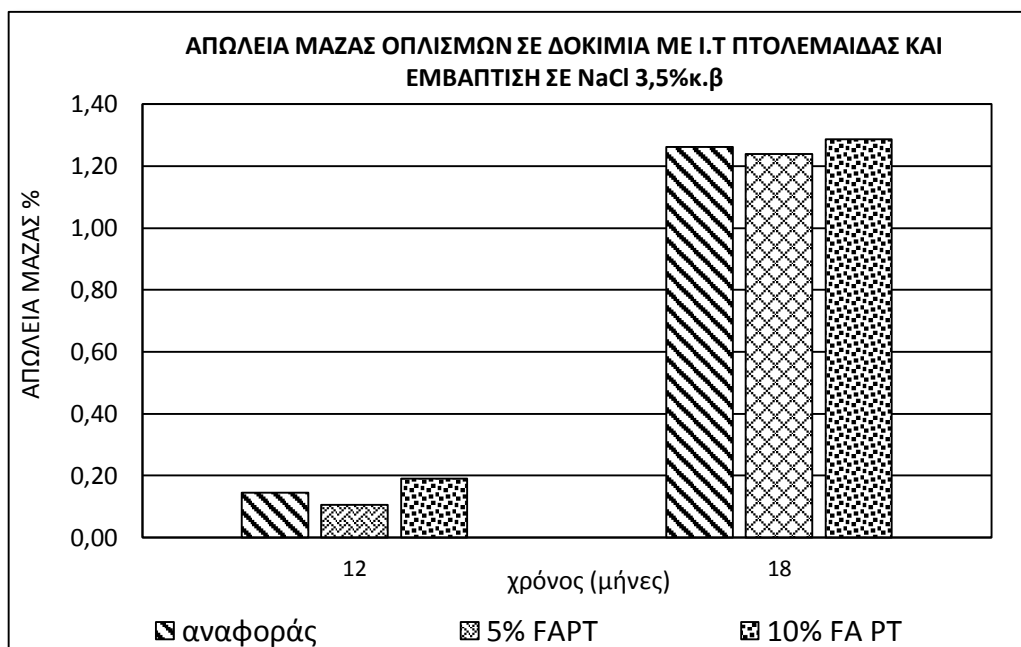


Σχήμα 11.34: Απώλεια μάζας οπλισμών % συναρτήσει του χρόνου εμβάπτισης σε NaCl 3,5% κ.β και πρόσθετο Ι.Τ Γερμανίας

Στο σχήμα 11.34 δίνεται διάγραμμα της ποσοστιαίας απώλειας μάζας των οπλισμών για δοκίμια με Ι.Τ Γερμανίας εμβαπτισμένα σε NaCl 3,5% κ.β. Από το γράφημα φαίνεται ότι μέχρι τους 24 μήνες η απώλεια μάζας των οπλισμών στα δοκίμια με 10% Ι.Τ Γερμανίας είναι αυξημένη σε σχέση με τα αναφοράς.

Πίνακας 11.22: Υπολογισμός απώλειας μάζας (%) και ρυθμού διάβρωσης CR ($\mu\text{m}/\text{y}$) οπλισμών, εγκιβωτισμένων σε δοκίμια με πρόσθετο Ι.Τ Πτολεμαΐδας εμβαπτισμένα σε NaCl 3,5% κ.β

ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ (%)			
ΧΡΟΝΟΣ (ΜΗΝΕΣ)	αναφοράς	5% FAPT	10% FAPT
12	0,1441±0,018	0,1048±0,042	0,1901±0,022
18	1,2615±0,094	1,2385±0,083	1,2871±0,023
ΡΥΘΜΟΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ (MM/Y)			
ΧΡΟΝΟΣ (ΜΗΝΕΣ)	αναφοράς	5% FAPT	10% FAPT
12	7,9772±1,056	5,4106±1,999	9,9021±1,109
18	66,7357±3,647	63,4750±3,851	69,1657±0,497



Σχήμα 11.35: Απώλεια μάζας οπλισμών % συναρτήσει του χρόνου εμβάπτισης σε NaCl 3,5% κ.β και πρόσθετο Ι.Τ Πτολεμαΐδας

11.2.10.2 Απώλειες μάζας οπλισμών στην ατμόσφαιρα

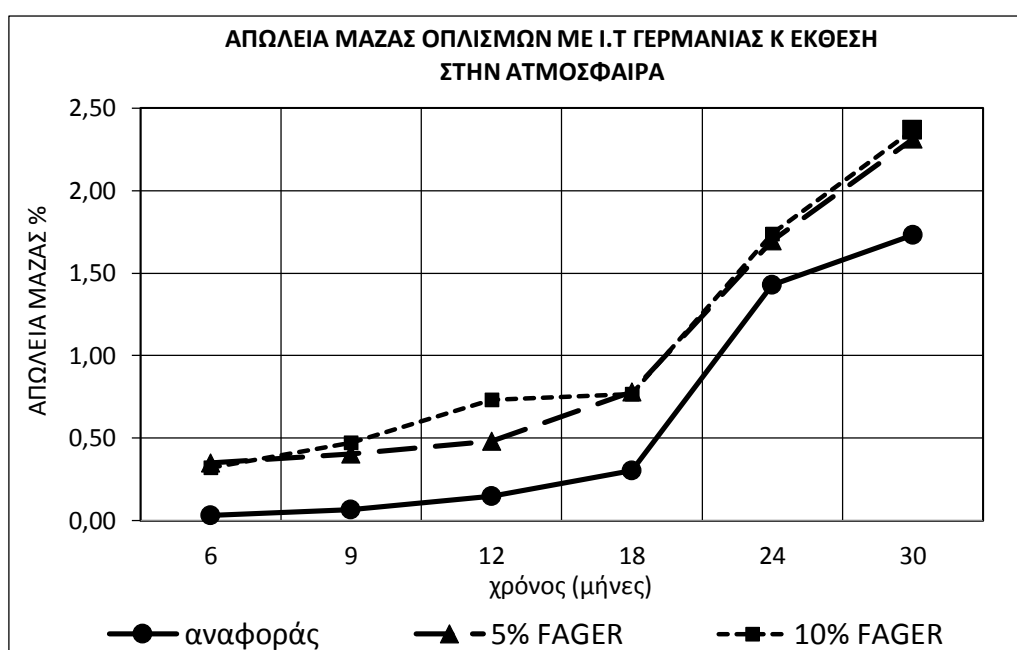
Ο προσδιορισμός της απώλειας μάζας των χαλύβων σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον υπολογίστηκε μετά από έκθεση των δοκιμίων στην Πολυτεχνειούπολη ζωγράφου. Τα δοκίμια με FAGER εκτεθήκαν για συνολικό διάστημα 30 μηνών ενώ αυτά που περιείχαν FAPTOL για 24 μήνες. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στους πίνακες 11.23 και 11.24.

Πίνακας 11.23: Υπολογισμός απώλειας μάζας (%) και ρυθμού διάβρωσης CR ($\mu\text{m}/\gamma$) οπλισμών, εγκιβωτισμένων σε δοκίμια με πρόσθετο Ι.Τ Γερμανίας εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα

ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ (%)			
ΧΡΟΝΟΣ (ΜΗΝΕΣ)	5% FAGER	10% FAGER	αναφοράς
6	0,3514	0,3220	0,0320
9	0,4044	0,4737	0,0680
12	0,4811	0,7339	0,1464
18	0,7811	0,7673	0,3043
24	1,6956	1,7390	1,4290
30	2,3143	1,8569	1,7345

ΡΥΘΜΟΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ($\mu\text{m}/\gamma$)			
ΧΡΟΝΟΣ (ΜΗΝΕΣ)	5% FAGER	10% FAGER	αναφοράς
6	18,1318	16,5090	1,6393
9	20,4914	24,1012	3,2621
12	24,7221	39,1448	7,5425
18	39,6125	40,5688	15,6603
24	87,0325	88,3120	73,5372
30	115,3975	95,3615	120,0671

Στο σχήμα 11.36 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της απώλειας μάζας των οπλισμών για δοκίμια αναφοράς και δοκίμια με Ι.Τ Γερμανίας. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι τα δοκίμια αναφοράς παρουσιάζουν τη μικρότερη απώλεια μάζας σε σχέση με τις υπόλοιπες σειρές δοκιμών στους 30 μήνες έκθεσης σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον. Επίσης διακρίνεται ότι αυξανόμενο το ποσοστό της Ι.Τ η απώλεια μάζας δεν μεταβάλλεται σημαντικά.

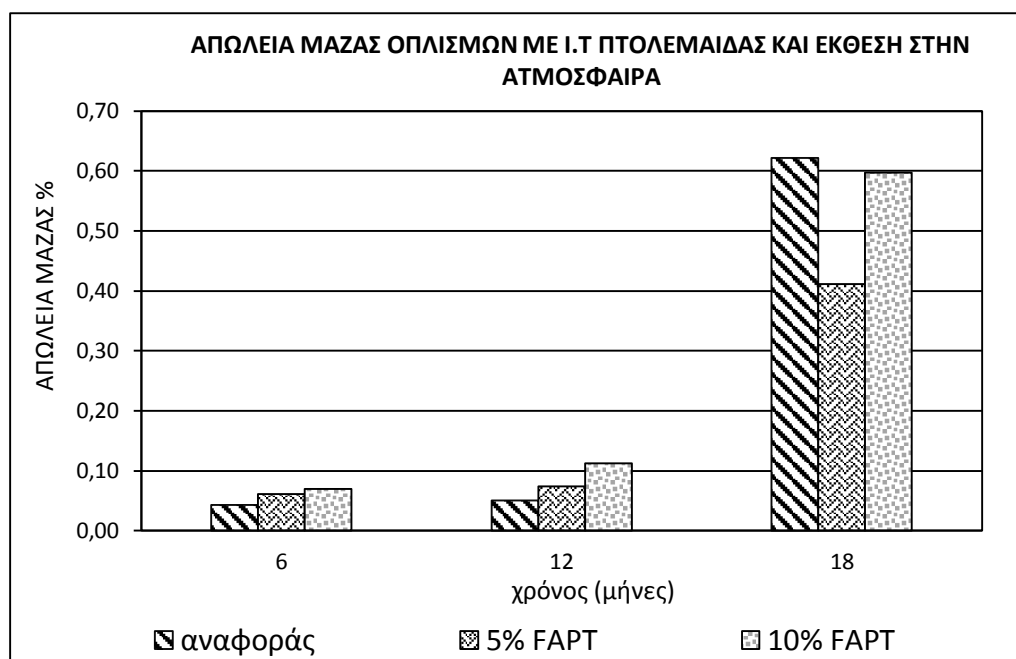


Σχήμα 11.36: Απώλεια μάζας οπλισμών % συναρτήσεως του χρόνου έκθεσης στην ατμόσφαιρα και πρόσθετο Ι.Τ Γερμανίας

Πίνακας 11.24: Υπολογισμός απώλειας μάζας (%) και ρυθμού διάβρωσης CR (μm/y) οπλισμών, εγκιβωτισμένων σε δοκίμια με πρόσθετο Ι.Τ Πτολεμαΐδας εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα

ΑΠΩΛΕΙΑ ΜΑΖΑΣ (%)			
ΧΡΟΝΟΣ (ΜΗΝΕΣ)	5% FAPT	10% FAPT	αναφοράς
6	0,0605	0,0701	0,0433
12	0,0741	0,1120	0,0503
18	0,4116	0,5965	0,6216
ΡΥΘΜΟΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ (ΜΜ/Υ)			
ΧΡΟΝΟΣ (ΜΗΝΕΣ)	5% FAPT	10% FAPT	αναφοράς
6	3,102	3,618	2,211
12	3,817	5,874	2,550
18	21,228	30,973	32,824

Στο σχήμα 11.37 δίνεται γράφημα της απώλειας μάζας των οπλισμών σε δοκίμια με Ι.Τ Πτολεμαΐδας. Μέχρι τους 12 μήνες δεν υπάρχει ουσιαστική διαφοροποίηση των τιμών αλλά στους 24 μήνες έκθεσης σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον η προσθήκη 5% φαίνεται να μειώνει τη διάβρωση του οπλισμού.



Σχήμα 11.37: Απώλεια μάζας οπλισμών % συναρτήσει του χρόνου έκθεσης στην ατμόσφαιρα και πρόσθετο Ι.Τ Πτολεμαΐδας

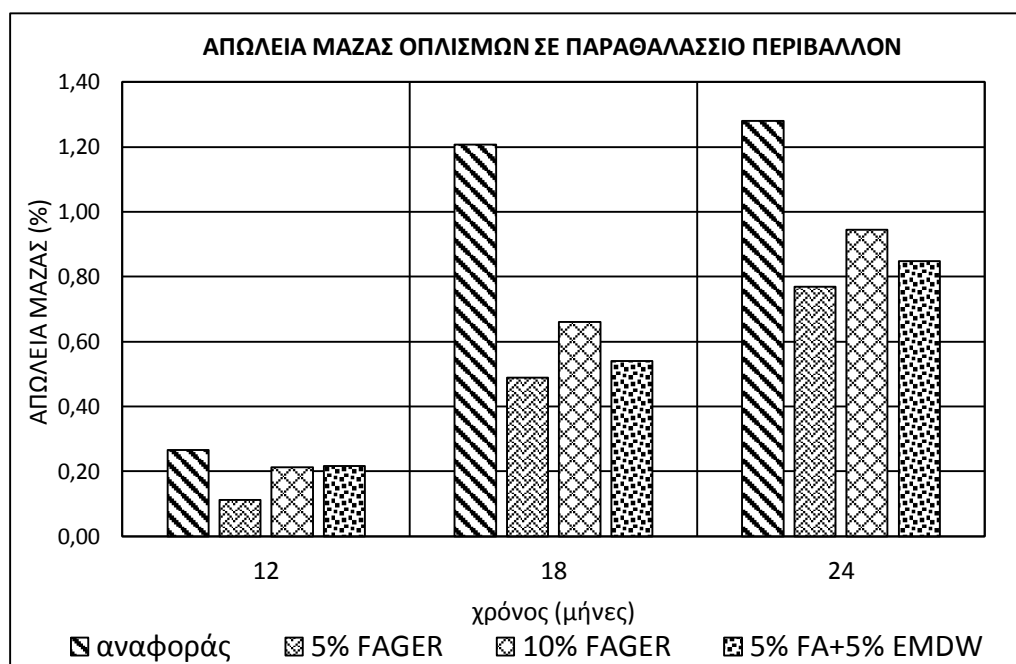
11.2.10.3 Απώλειες μάζας οπλισμών σε παραθαλάσσιο περιβάλλον

Η εκτίμηση της διάβρωσης των οπλισμών πραγματοποιήθηκε με υπολογισμό της απώλειας μάζας και του ρυθμού διάβρωσης σε παραθαλάσσιο περιβάλλον στην περιοχή της Χαλυβουργικής. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στους 12,18 και 24 μήνες και τα αποτελέσματα δίνονται στο σχήμα 10.37. Κατασκευάστηκαν 3

συνθέσεις τσιμεντοκονίας, με 8 Οπλισμένα κυλινδρικά δοκίμια η κάθε μία. Τα υλικά κατασκευής ήταν τσιμέντο CEM I 42.5N, ασβεστολιθικά αδρανή και νερό δικτύου. Ο λόγος νερό:τσιμέντο ήταν σταθερός σε όλα τα μίγματα (W/C=0,65).

Το σχήμα 11.38 παρουσιάζει διάγραμμα της απώλειας μάζας των οπλισμών για δοκίμια που εκτέθηκαν σε παραθαλάσσιο/βιομηχανικό περιβάλλον. Από το διάγραμμα προκύπτουν τα εξής:

- Στους 12 μήνες παραμονής σε παραθαλάσσιο περιβάλλον οι οπλισμοί όλων των κατηγοριών έχουν διαβρωθεί σχεδόν το ίδιο,
- Η σειρά 5% FAGER εμφανίζει τις μικρότερες απώλειες μάζας στους 18 και 24 μήνες,
- Η προσθήκη 10% Ι.Τ μειώνει την απώλεια μάζας συγκριτικά με το σκυρόδεμα χωρίς Ι.Τ αλλά όχι όσο η προσθήκη 5%,
- Η μίξη 5% FAGER και 5% EMDW βελτιώνει τη διάβρωση του χάλυβα μετά τους 18 μήνες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.



Σχήμα 11.38: Απώλεια μάζας οπλισμών % συναρτήσει του χρόνου έκθεσης σε παραθαλάσσιο/βιομηχανικό περιβάλλον

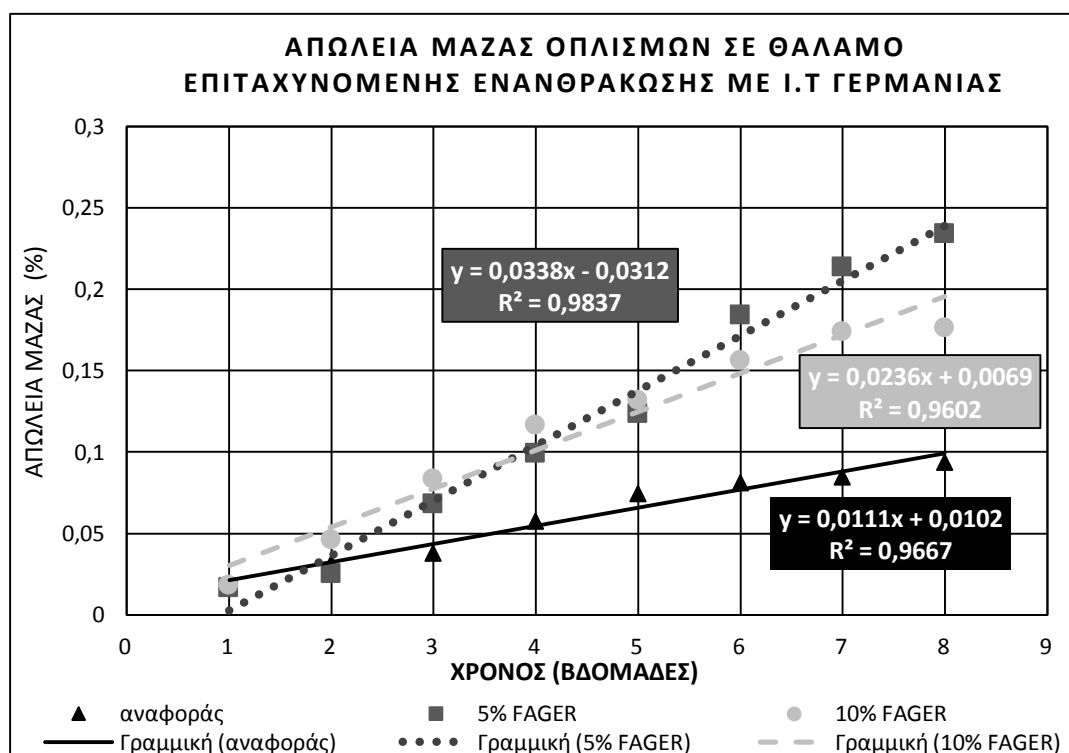
11.2.10.4 Απώλειες μάζας οπλισμών σε επιταχυνόμενες συνθήκες διάβρωσης (θάλαμος επιταχυνόμενης ενανθράκωσης, θάλαμος αλατονέφωσης)

Η εκτίμηση της διάβρωσης των οπλισμών σε επιταχυνόμενες συνθήκες διάβρωσης πραγματοποιήθηκε με παραμονή των δοκιμίων εντός θαλάμου ενανθράκωσης και αλατονέφωσης. Οι συνθήκες που επικρατούσαν εντός των θαλάμων δίνονται στον πίνακα 11.25.

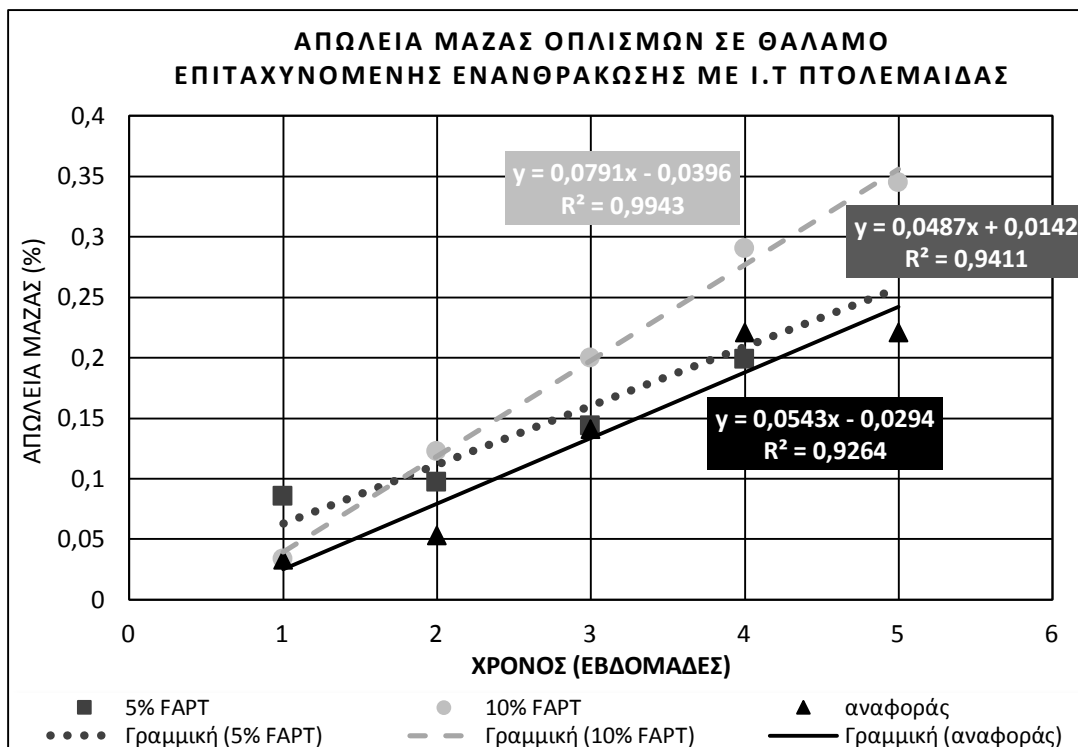
Πίνακας 11.25: Συνθήκες θαλάμων επιταχυνόμενων συνθηκών διάβρωσης για την Εκτίμηση της απώλειας μάζας και του ρυθμού διάβρωσης των οπλισμών

Διαβρωτικό περιβάλλον	Αριθμός δοκιμών	Χρόνος παραμονής	Συνθήκες θαλάμου
Θάλαμος αλατονέφωσης	48	45 ημέρες	$C_{NaCl} = 5\% \text{ w.w}$, $T = 35\text{ }^\circ\text{C}$, $RH = 99\%$
Θάλαμος επιταχυνόμενης ενανθράκωσης	48	8 εβδομάδες FAGER 5 εβδομάδες FAPT	$12,5\% \text{ w.w CO}_2$, $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$

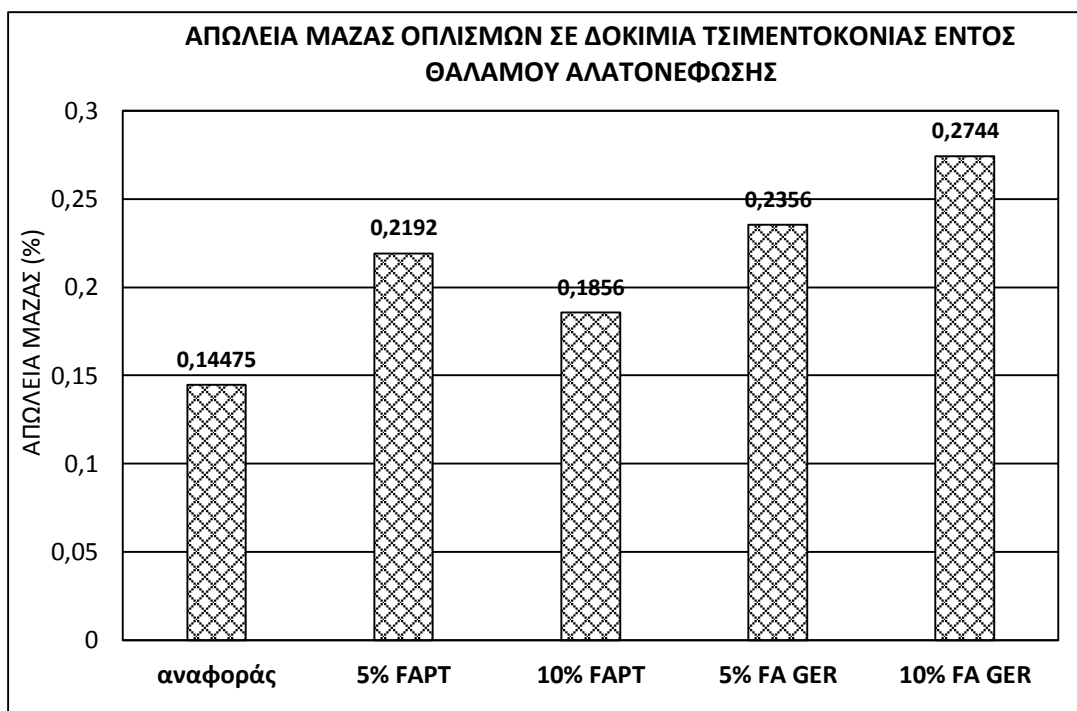
Η ενανθράκωση των δοκιμών τιμεντοκονίας με πρόσθετο Ι.Τ Γερμανίας υπολογίστηκε με εμποτισμό δείκτη Φαινολοφθαλείνης για κάθε εβδομάδα παραμονής στο θάλαμο ενανθράκωσης σύμφωνα με τη μέθοδο **RILEM CP-18**. Η αντικατάσταση του τιμέντου από την ποζολάνη έγινε σε ποσοστά 5% και 10% κ.β και η σύγκριση πραγματοποιήθηκε με δοκίμια αναφοράς. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στο σχήμα 11.39.



Σχήμα 11.39: Απώλεια μάζας οπλισμών % συναρτήσει του χρόνου παραμονής σε θάλαμο ενανθράκωσης και πρόσθετο Ι.Τ Γερμανίας



Σχήμα 11.40: Απώλεια μάζας οπλισμών % συναρτήσει του χρόνου παραμονής σε θάλαμο ενανθράκωσης και πρόσθετο Ι.Τ Πτολεμαΐδας



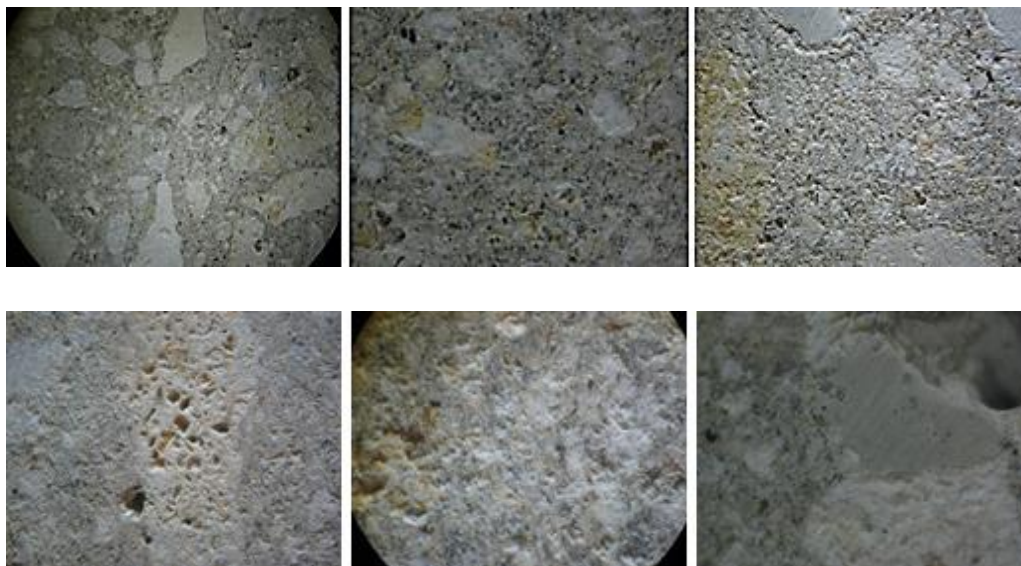
Σχήμα 11.41: Απώλεια μάζας οπλισμών % εγκιβωτισμένων σε δοκίμια τσιμεντοκονίας μετά από παραμονή σε θάλαμο αλατονέφωσης για 45 ημέρες

11.2.11 Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης και στερεοσκοπία

11.2.11.1 Στερεοσκοπική παρατήρηση δοκιμών με πρόσθετο FAGER

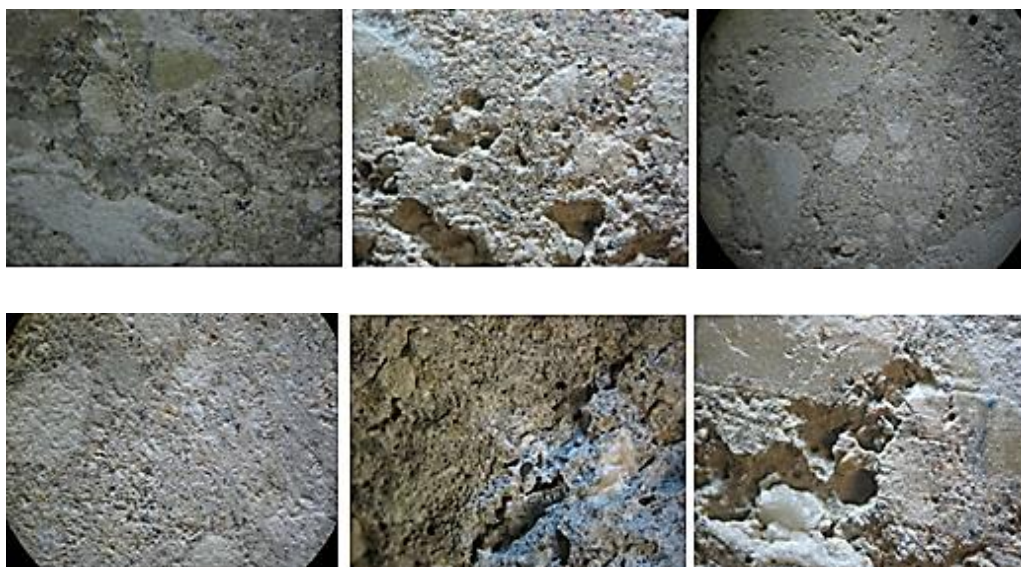
Η οπτική παρατήρηση των δοκιμών στα οποία έγινε αντικατάσταση του τσιμέντου από τα δύο είδη Ι.Τ πραγματοποιήθηκε με ψηφιακό στερεοσκόπιο στις 130 ημέρες μερικής εμβάπτισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β.

ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ 5% Ι.Τ ΓΕΡΜΑΝΙΑΣ



Σχήμα 11.42: Δοκίμια σκυροδέματος με 5% FAGER μετά από κοπή σε τροχό στις 130 ημέρες εμβάπτισης σε NaCl 3,5% κ.β

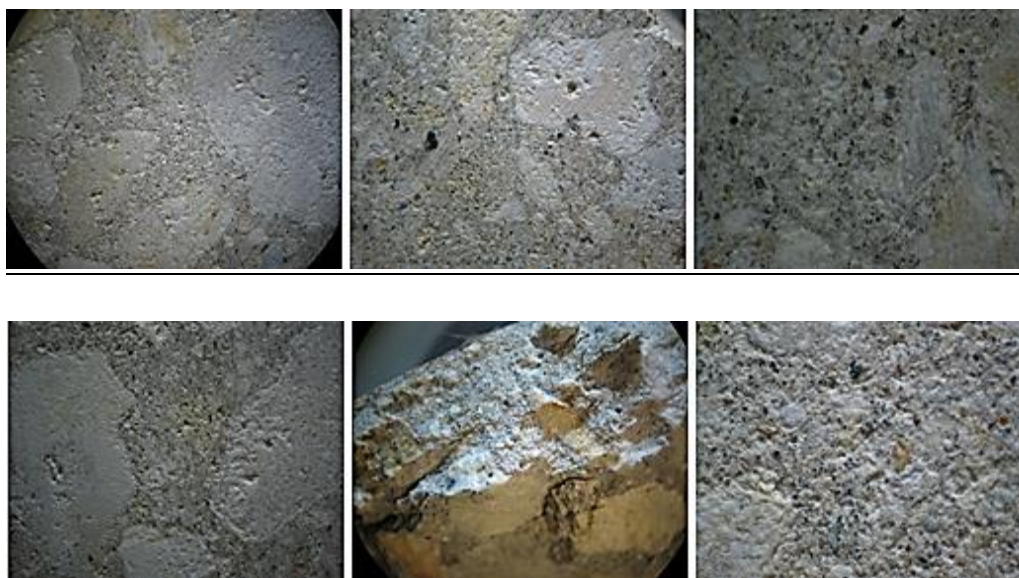
ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ 10% Ι.Τ ΓΕΡΜΑΝΙΑΣ



Σχήμα 11.43: Δοκίμια σκυροδέματος με 10% FAGER μετά από κοπή σε τροχό στις 130 ημέρες εμβάπτισης σε NaCl 3,5% κ.β

11.2.11.2 Στερεοσκοπική παρατήρηση δοκιμίων με πρόσθετο FAPTOL

ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ 5% Ι.Τ ΠΤΟΛΕΜΑΙΔΑΣ



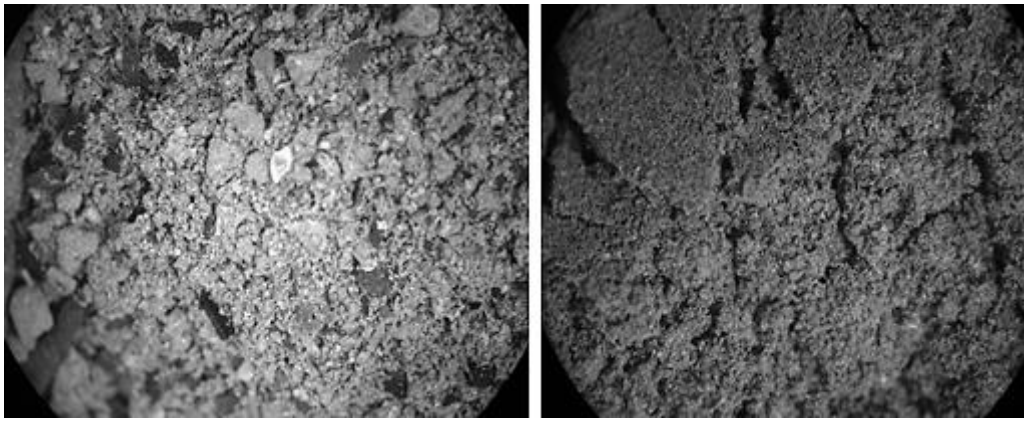
Σχήμα 11.44: Δοκίμια σκυροδέματος με 5% FAPT μετά από κοπή σε τροχό στις 130 ημέρες εμβάπτισης σε NaCl 3,5% κ.θ

ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ 10% Ι.Τ ΠΤΟΛΕΜΑΙΔΑΣ



Σχήμα 11.45: Δοκίμια σκυροδέματος με 10% FAPT μετά από κοπή σε τροχό στις 130 ημέρες εμβάπτισης σε NaCl 3,5% κ.θ

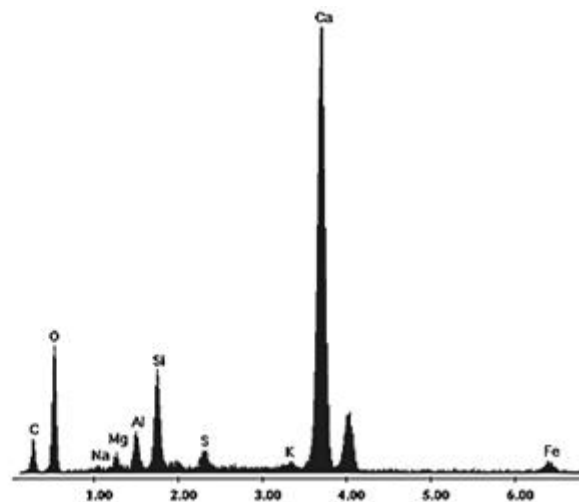
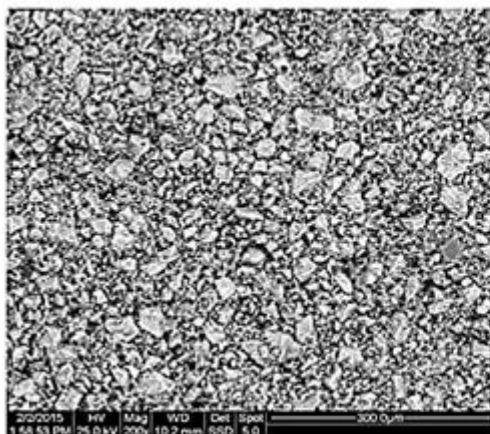
ΙΠΤΑΜΕΝΕΣ ΤΕΦΡΕΣ



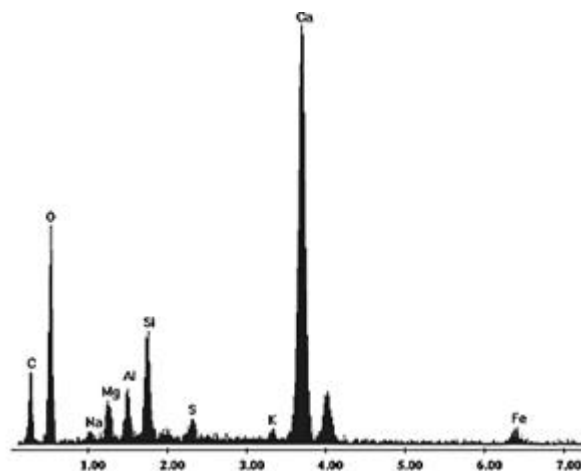
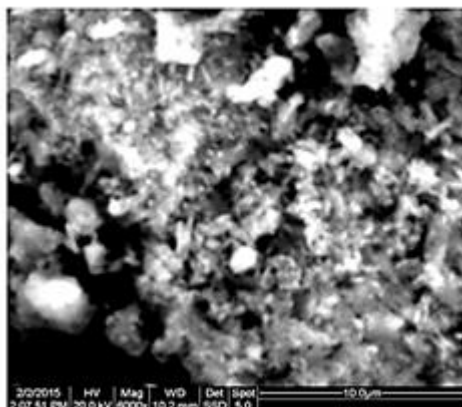
Σχήμα 11.46: Ιπτάμενη Τέφρα από τη Γερμανία (αριστερά) και από την Πτολεμαΐδα (δεξιά)

11.2.11.3 Οπτική παρατήρηση σε Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM)

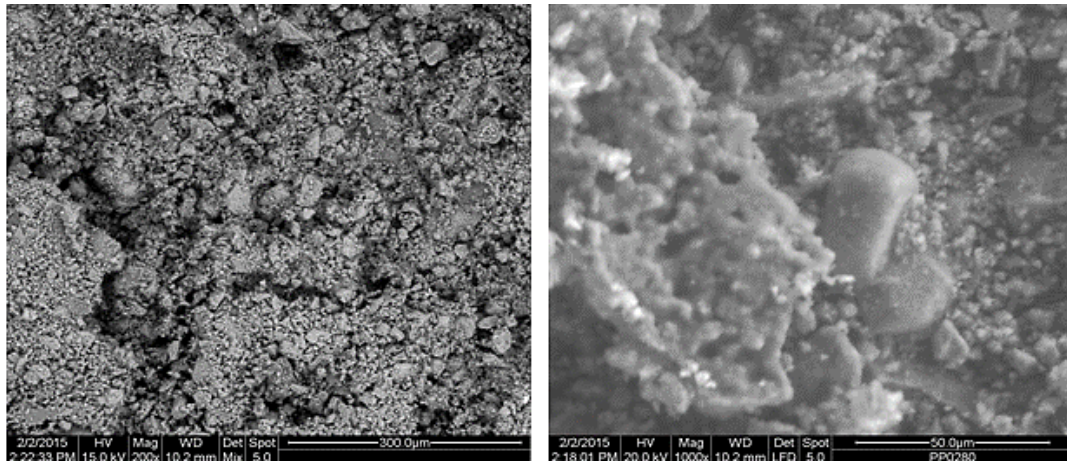
11.2.11.3.1 Δοκίμια με πρόσθετο FAGER



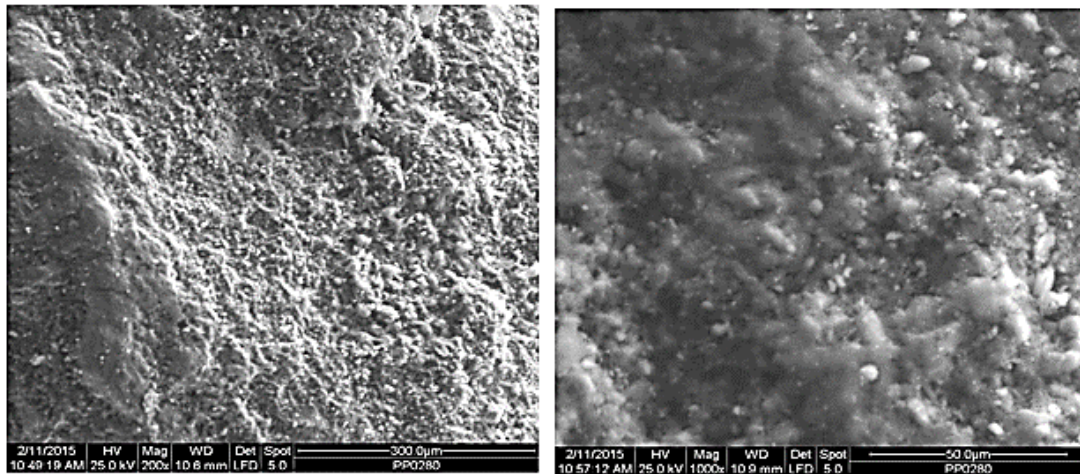
Σχήμα 11.47: Οπτική παρατήρηση δοκιμίου τσιμεντοκονίας με FAGER x200 ηλικίας 56 ημερών



Σχήμα 11.47: Οπτική απεικόνιση x4000 δοκιμίου τσιμεντοκονίας ηλικίας 56 ημερών.

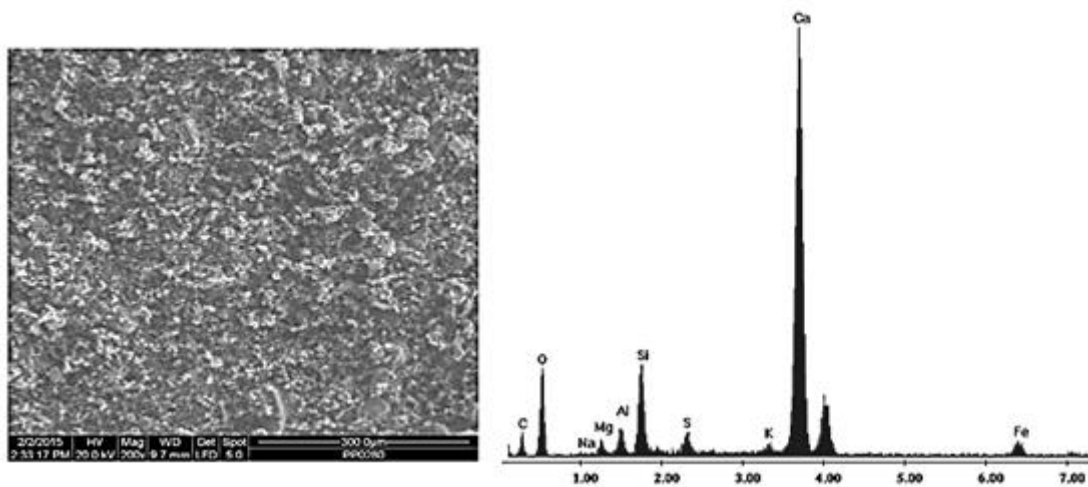


Σχήμα 11.48: Οπτική απεικόνιση x200(αριστερά) και x1000 (δεξιά) δοκιμίου τσιμεντοκονίας με FAGER ηλικίας 56 ημερών.

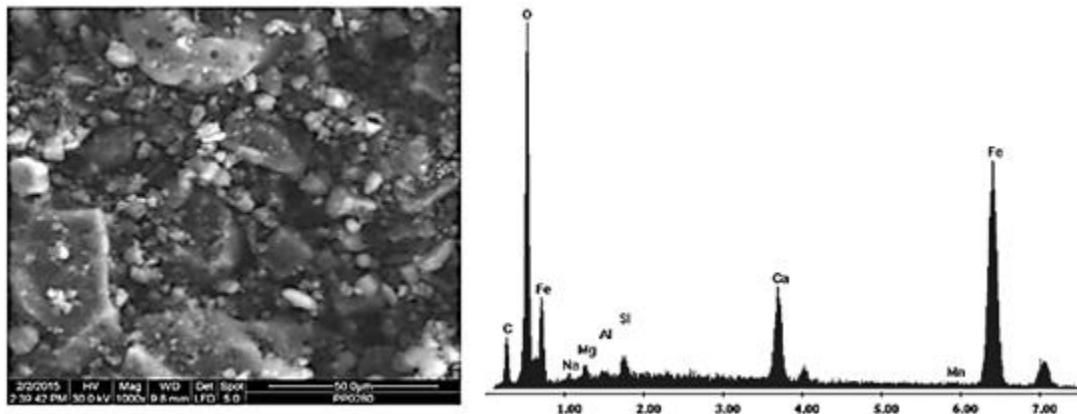


Σχήμα 11.49: Οπτική παρατήρηση σε δοκίμιο τσιμεντοκονίας με πρόσθετο FAGERM και εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

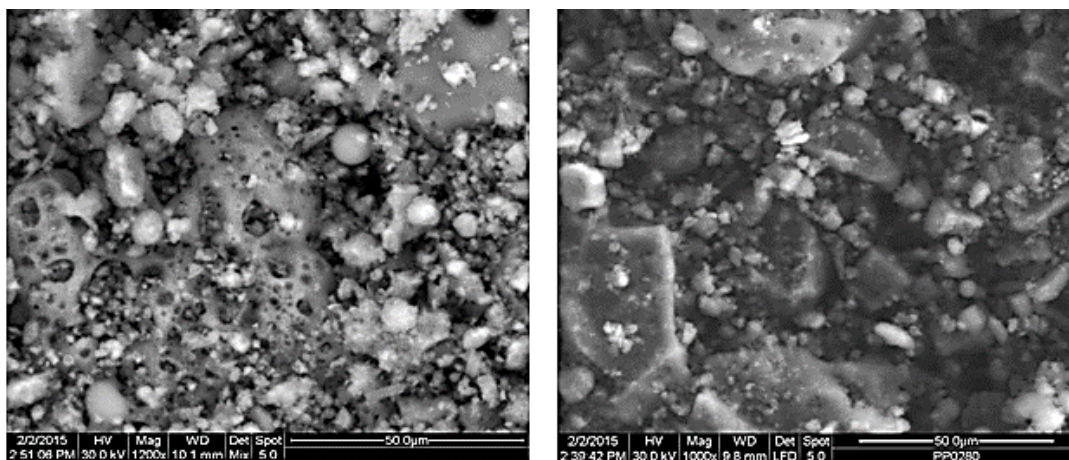
11.2.11.3.2 Δοκίμια με πρόσθετο FAPTOL



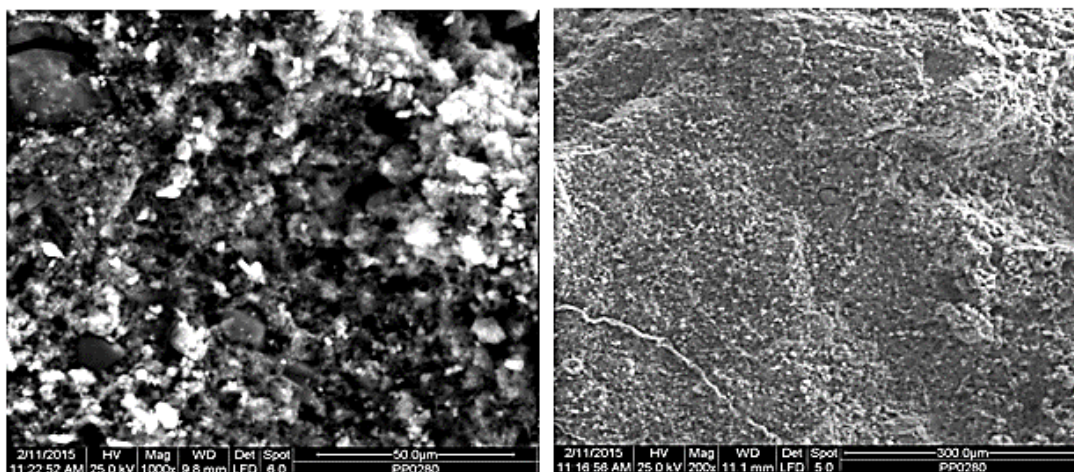
Σχήμα 11.50: Οπτική παρατήρηση x200 δοκιμίου τσιμεντοκονίας με FAPTOL ηλικίας 56 ημερών



Σχήμα 11.51: Οπτική παρατήρηση x1000 δοκιμίου τσιμεντοκονίας με FAPTOL ηλικίας 56 ημερών



Σχήμα 11.52: Οπτική παρατήρηση x1200 (αριστερά) & x1000 (δεξιά) δοκιμίου τσιμεντοκονίας με FAPTOL ηλικίας 56 ημερών

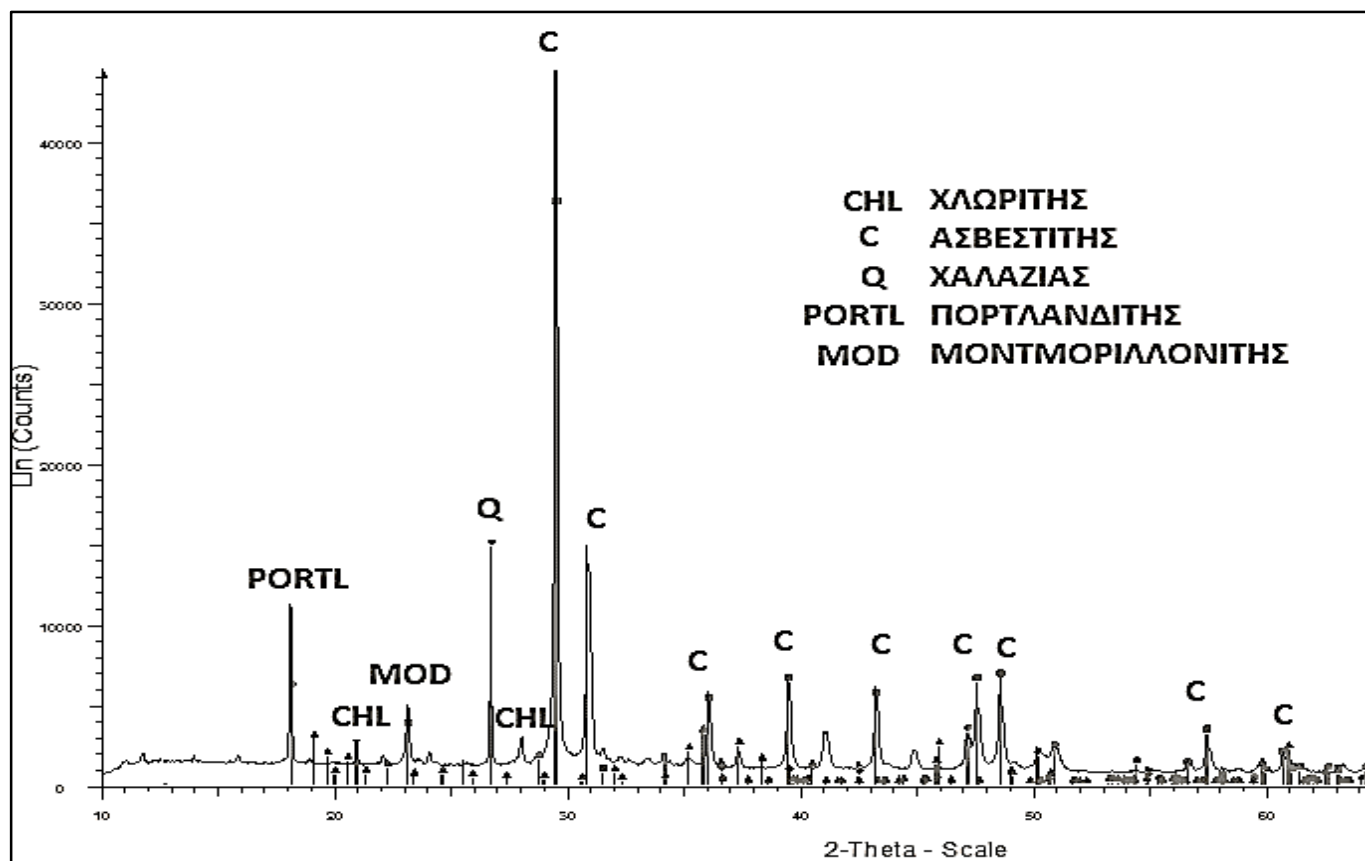


Σχήμα 11.53: Οπτική παρατήρηση x1000 (αριστερά) & x200 (δεξιά) δοκιμίου τσιμεντοκονίας με FAPTOL με μερική εμβάπτιση σε NaCl 3,5% κ.β για 24 μήνες

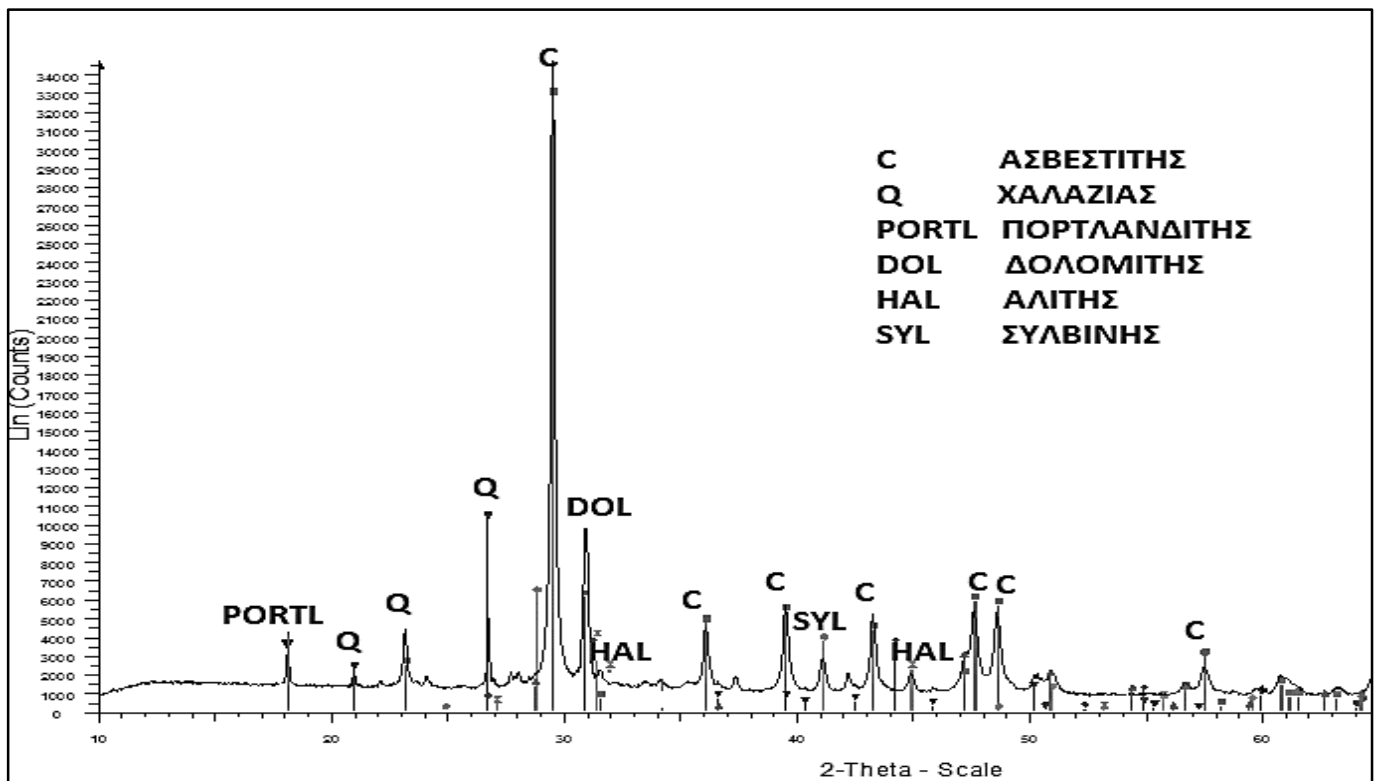
11.2.12 Περίθλαση ακτίνων Χ

Η εύρεση των ορυκτολογικών φάσεων έγινε με την τεχνική της περίθλασης ακτίνων Χ σε δοκίμια σκυροδέματος στις 130 ημέρες μερικής εμβάπτισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β. Το περιθλασίμετρο ήταν το D8 ADVANCE της εταιρίας BRUKER και η ανάλυση πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο ΛΗΔΡΑ του Πανεπιστημίου της Κύπρου.

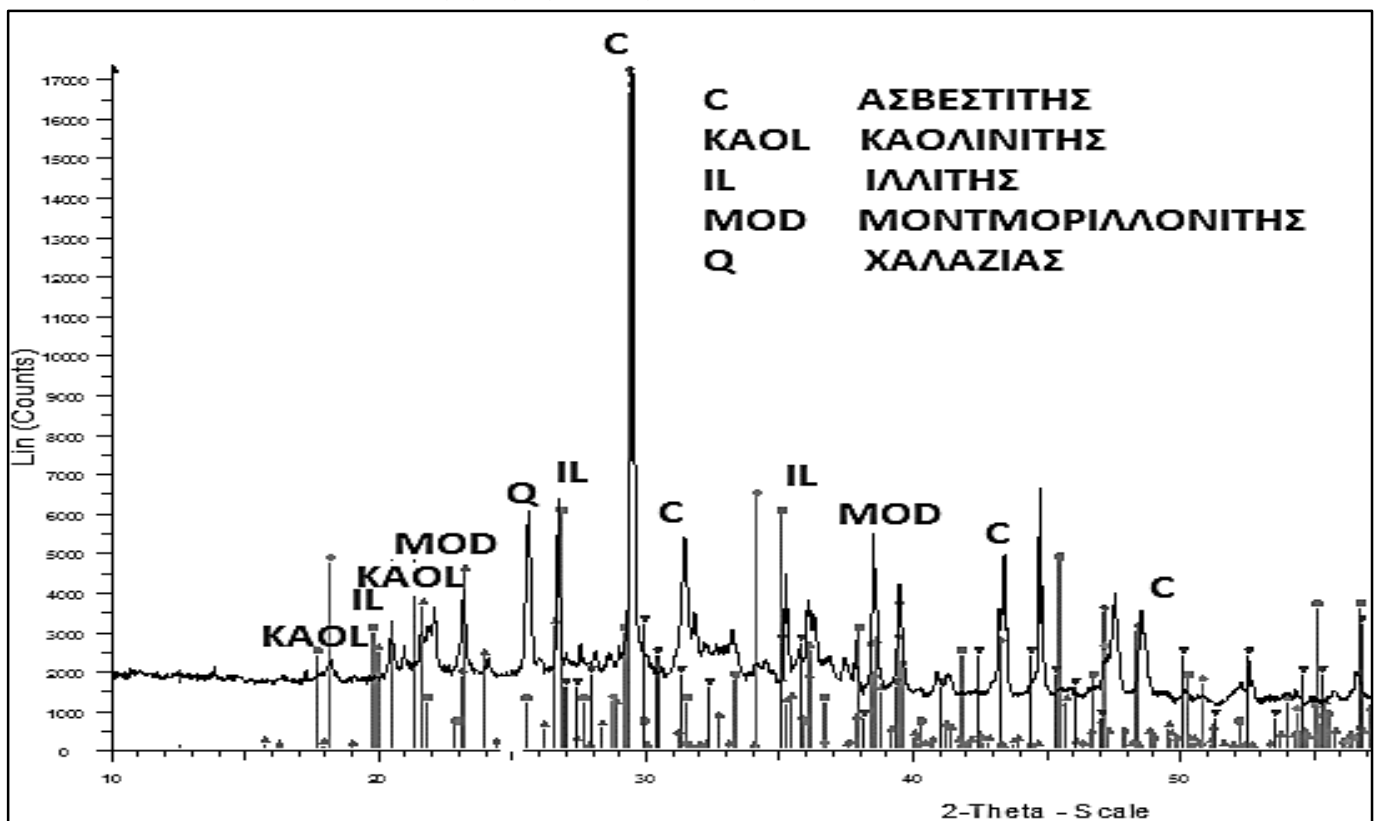
Το βήμα σάρωσης των δειγμάτων ήταν 0,033 (2 μοίρες/λεπτό) και η γωνία σάρωσης 10 - 65 μοίρες.



Σχήμα 11.54: XRD σε δοκίμιο σκυροδέματος με πρόσθετο 10% Ι.Τ Γερμανίας στις 130 ημέρες μερικής εμβάπτισης σ διάλυμα NaCl 3,5% κ.β



Σχήμα 11.55: XRD σε δοκίμιο σκυροδέματος με πρόσθετο 10% Ι.Τ Πτολεμαΐδας στις 130 ημέρες μερικής εμβάπτισης σ διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

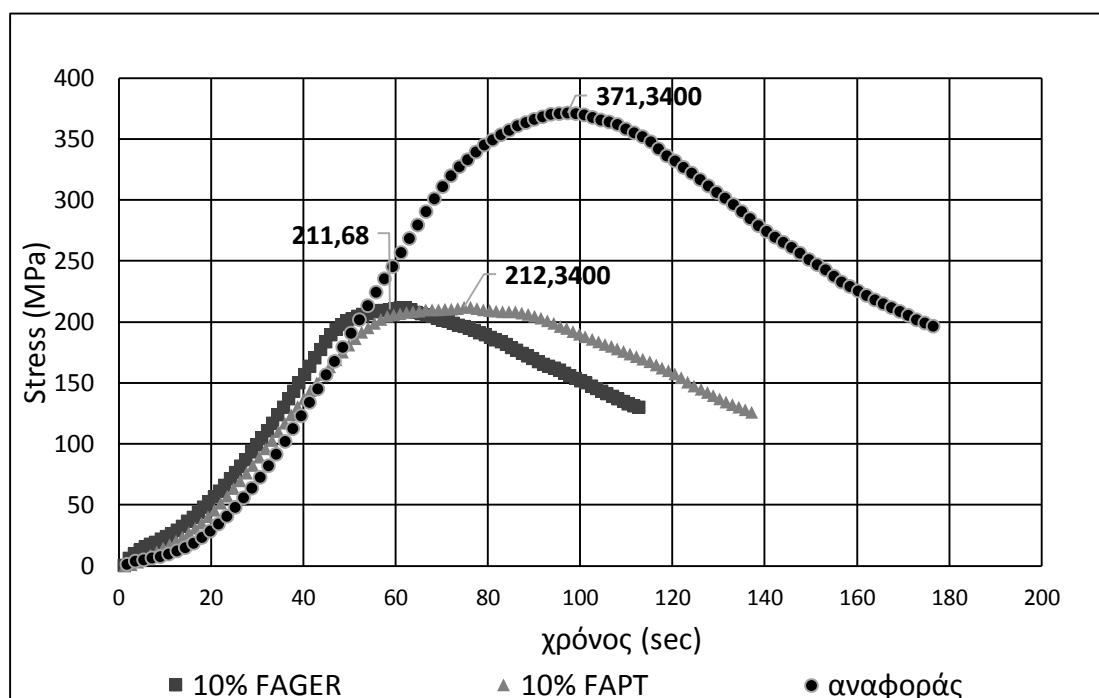


Σχήμα 11.56: XRD στην Ι.Τ από τη Γερμανία που χρησιμοποιήθηκε ως υλικό αντικατάστασης του τσιμέντου στη πειραματική διαδικασία

11.2.13 Συνάφεια οπλισμού – σκυροδέματος

Η συνάφεια μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος εκτιμήθηκε με τη δοκιμή εξόλκευσης (pull-out test) που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο οπλισμένου σκυροδέματος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Κύπρου. Η μηχανή που χρησιμοποιήθηκε ήταν η LLOYD LR300K, μέγιστου φορτίου 300KN και η ταχύτητα εξόλκευσης 0,05MPa/s.

Τα δοκίμια ήταν κυβικά ακμής 200mm και για την κατασκευή τους χρειάστηκε τσιμέντο CEM II 42.5N, ασβεστολιθική άμμος Τροόδου και νερό δικτύου Λευκωσίας. Εντός των δοκιμών, τοποθετήθηκε κατά τη σκυροδέτηση ομοαξονικά νευροχάλυβας τύπου *Tempcore B500C*. Η δοκιμή έγινε μετά από συντήρηση στις 28 ημέρες. Συνολικά παρασκευάστηκαν τρεις συνθέσεις σκυροδέματος, μία δοκιμών αναφοράς, μία με 10% αντικατάσταση τσιμέντου από Ι.Τ Γερμανίας, και μία σειρά με 10% Ι.Τ Πτολεμαΐδας. Για την παρασκευή του κάθε μίγματος χρειάστηκαν 13kg αδρανών υλικών, 2,21kg νερού και 2,808kg τσιμέντου. Η ποσότητα της τέφρας που χρειάστηκε ήταν 0,208kg για το κάθε είδος.



Σχήμα 11.57: Τάση σε MPa συναρτήσει του χρόνου εξόλκευσης χάλυβα από σκυροδεμα

Στο σχήμα 11.57 δίνεται η δύναμη εξόλκευσης του οπλισμού στα δοκίμια σκυροδέματος. Από το γράφημα διακρίνεται ότι η μεγαλύτερη τάση εμφανίστηκε στα δοκίμια αναφοράς γεγονός που οφείλεται στο μικρότερο πορώδες που έχουν συγκριτικά με τα δοκίμια που περιέχουν ιπτάμενες τέφρες στις 28 ημέρες που πραγματοποιήθηκε η δοκιμή.

11.3 ΜΕΡΙΚΟ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ 2 - ΒΑΘΜΟΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΠΟΥ ΠΡΟΣΦΕΡΕΙ Η ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΣΤΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την προστασία που προσφέρει η χρήση της ιπτάμενης τέφρας ως υλικό αντικατάστασης του τσιμέντου στο οπλισμένο σκυρόδεμα από τη διάβρωση και την αποσάθρωση σε περιβάλλον με αυξημένη παρουσία ιόντων χλωρίου και ατμοσφαιρικό περιβάλλον. Επίσης μελετήθηκε η συνεργιστική δράση Cl^- και CO_2 σε παραθαλάσσιο/βιομηχανικό περιβάλλον. Η πειραματική διαδικασία περιελάμβανε χρήση δύο ειδών Ι.Τ υψηλού Ca (C- class) από εργοστάσια παραγωγής Ηλεκτρικής ενέργειας από τη Γερμανία και την Πτολεμαΐδα.

Ι.Τ ΓΕΡΜΑΝΙΑΣ

Η Ι.Τ από τη Γερμανία εξαιτίας των αργιλικών ορυκτών που περιέχει προκαλεί διόγκωση των δοκιμών κατά τις πρώτες ώρες μετά τη σκυροδέτηση. Επίσης η εν λόγω Ι.Τ αντιδρά έντονα σε αλκαλικό περιβάλλον προς παραγωγή αερίου και για το λόγο αυτό παρουσιάζει ρωγμές εσωτερικά και στην εξωτερική επιφάνεια των δοκιμών. Μια σημαντική παρατήρηση που προκύπτει από τα αποτελέσματα των πειραμάτων είναι ότι παρότι το ανοικτό πορώδες δείχνει να μειώνεται με το χρόνο, το ολικό πορώδες τείνει να αυξάνεται. Επομένως, φαίνεται να μειώνονται οι πόροι που επικοινωνούν μεταξύ τους κ να αυξάνονται οι κλειστοί πόροι του σκυροδέματος με την εξεταζόμενη Ι.Τ.

Σχετικά με την ανθεκτικότητα του οπλισμένου σκυροδέματος με προσθήκη την ε Ι.Τ από τη Γερμανία μπορούν να βγουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- ✓ η προσθήκη Ι.Τ προκαλεί αύξηση της συγκέντρωσης των ολικών ιόντων Cl^- στη μάζα του σκυροδέματος. Σε αυτό συνηγορεί και η αύξηση του πορώδους των δοκιμών τσιμεντοκονίας το οποίο υπολογίστηκε με ποροσιμετρία Hg,
- ✓ Το ανοικτό πορώδες του σκυροδέματος με Ι.Τ αρχικά είναι αυξημένο αλλά στη συνέχεια δείχνει να μειώνεται σημαντικά συγκριτικά με το κανονικό σκυρόδεμα,
- ✓ Η προσθήκη 10% μειώνει σημαντικά τις μηχανικές αντοχές και το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος σε αρχικές ηλικίες. Μετέπειτα, στις 130 ημέρες οι θλιπτική αντοχή πλησιάζει τις τιμές του σκυροδέματος χωρίς πρόσθετο. Το ίδιο παρατηρήθηκε και στη δοκιμή απορροφητικότητας.
- ✓ Η προσθήκη 5% Ι.Τ δεν φαίνεται να επηρεάζει αρνητικά τη θλιπτική αντοχή.

- ✓ Στους 30 μήνες εμφάνισης οι οπλισμοί οι οποίοι ήταν εγκιβωτισμένοι σε τσιμεντοκονία με I.T διαβρώθηκαν κατά 30% λιγότερο για τη σειρά 5%FAGER και κατά 42,5% για τη σειρά 10%FAGER.
- ✓ Η προσθήκη I.T από τη Γερμανία ελαττώνει τη θερμική αγωγιμότητα του σκυροδέματος σε νωπό και σκληρυμένο σκυρόδεμα,
- ✓ Η προσθήκη 5% I.T ελαττώνει την απορροφητικότητα του σκυροδέματος γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τις μετρήσεις ανοικτού πορώδους και τις μηχανικές αντοχές,
- ✓ Η προσθήκη της I.T αυξάνει το βάθος ενανθράκωσης σημαντικά μετά από έκθεση σε φυσικό περιβάλλον για 30 μήνες,
- ✓ Η απώλεια μάζας είναι αυξημένη στα δοκίμια που περιείχαν I.T γεγονός που οφείλεται στην αποπαθητικοποίηση του οπλισμού εξαιτίας της πλήρους ενανθράκωσης που παρατηρήθηκε στις σειρές 5% FAGER & 10% FAGER.

I.T ΠΤΟΛΕΜΑΪΔΑΣ

Για την εκτίμηση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε I.T από την Πτολεμαΐδα σε ποσοστά 5% & 10% κατά βάρος τσιμέντου. Τα συμπεράσματα που μπορούν να προκύψουν παρουσιάζονται παρακάτω:

- ✓ Η προσθήκη I.T από την Πτολεμαΐδα αυξάνει το βάθος ενανθράκωσης σε δοκίμια τσιμεντοκονίας μετά από 18 μήνες μερικής εμφάνισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β,
- ✓ Η συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου αρχικά είναι αυξημένη στα δοκίμια με την I.T. Στους 18 μήνες εμφάνισης σε χλωριούχο Νάτριο και οι τρεις συνθέσεις (αναφοράς, 5% και 10% I.T) έχουν περίπου ίδιες συγκεντρώσεις Cl⁻
- ✓ Το ολικό πορώδες του σκυροδέματος αυξάνει όσο μεγαλώνει το ποσοστό της προσθήκης σε I.T.,
- ✓ Σχετικά με το ανοικτό πορώδες σε εμφάνισμένα δοκίμια σε διάλυμα NaCl δείχνει αυξημένο στις 28 ημέρες. Στη συνέχεια και μέχρι τις 130 ημέρες παρατηρείται μια σχετική εξισορρόπηση του ποσοστού ανοικτού πορώδους με τα δοκίμια αναφοράς,
- ✓ Η αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος με I.T αυξάνει στις 100 ημέρες μερικής εμφάνισης σε διάλυμα σε NaCl 3,5% κ.β. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει και τη μείωση της απορροφητικότητας και του ανοικτού πορώδους που παρατηρήθηκε στα δοκίμια σκυροδέματος σε διάλυμα NaCl,
- ✓ Η πυκνότητα ρεύματος i_{corr} και ο ρυθμός διάβρωσης CR των οπλισμών φαίνεται να μειώνονται στους 13 μήνες εμφάνισης σε διάλυμα NaCl,
- ✓ Η προσθήκη I.T στο οπλισμένο σκυρόδεμα μειώνει την απώλεια μάζας των οπλισμών σε δοκίμια εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα.

12 ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΣΙΔΗΡΟΥΧΑΣ ΣΚΩΡΙΑΣ ΕΛΑΣΤΡΩΝ (ΚΑΛΑΜΙΝΑ) ΑΠΟ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΑΣ

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η χρήση καλαμίνας από βιομηχανία χαλυβουργίας, ως υλικό αντικατάστασης του τσιμέντου στο οπλισμένο σκυρόδεμα με σκοπό την προστασία του οπλισμού από τη διάβρωση εξαιτίας των ιόντων Cl^- και του σκυροδέματος από την ενανθράκωση. Παράλληλα, εξετάζονται και οι μηχανικές ιδιότητες εξαιτίας της αποσάθρωσης που υφίσταται το σκυρόδεμα σε περιβάλλον με αυξημένη συγκέντρωση χλωριόντων.

12.1 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΚΘΕΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Για τη μέτρηση των ηλεκτροχημικών παραμέτρων και της απώλειας μάζας των οπλισμών κατασκευάστηκαν κυλινδρικά δοκίμια οπλισμένης τσιμεντοκονίας ύψους 100mm και $\Phi=50$ mm με τσιμέντο *CEM I 42.5N*, νερό δικτύου ΕΜΠ και ασβεστολιθική άμμο λατομείου. Στα δοκίμια τοποθετήθηκαν ομοαξονικά χαλύβδινοι οπλισμοί τύπου *Tempcore B500C* διαμέτρου 10 mm και μήκους 100 mm απέχοντας από τη βάση των δοκιμίων 20 mm. Οι οπλισμοί προτού τοποθετηθούν στα δοκίμια καθαρίστηκαν με απιονισμένο νερό και ακετόνη και ζυγίστηκαν με ακρίβεια 0.1 mg.

Για την εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων κατασκευάστηκαν δοκίμια σκυροδέματος κυβικά (ακμής 100mm & 150mm), κυλινδρικά ($H=200$, $\Phi=100$ & $H=300$, $\Phi=150$) και πρισματικά μήκους 100 cm και τετραγωνικής διατομής 10 cm. για την κατασκευή τους χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο *CEM II A-M 42.5N*, ασβεστολιθικά αδρανή Τροόδου και νερό δικτύου Λευκωσίας.

Το πρόσθετο χρησιμοποιήθηκε σε ποσοστά 5% κ.β & 10% κ.β και για την πειραματική διαδικασία παρασκευάστηκαν 3 συνθέσεις:

- Μια σύνθεση τσιμεντοκονίας/σκυροδέματος χωρίς καλαμίνα με την ονομασία **‘αναφοράς’**,
- Μία σύνθεση τσιμεντοκονίας/σκυροδέματος που έγινε αντικατάσταση του τσιμέντου κατά 5% κ.β από καλαμίνα με την ονομασία **‘5% kal’**,
- Μία σύνθεση τσιμεντοκονίας/σκυροδέματος που έγινε αντικατάσταση του τσιμέντου κατά 10% κ.β από καλαμίνα με την ονομασία **‘10% kal’**,

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων τα δοκίμια εκτέθηκαν σε περιβάλλον με αυξημένη συγκέντρωση Cl^- , σε παραθαλάσσιο/βιομηχανικό περιβάλλον και σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον απουσίας ιόντων Cl^- .

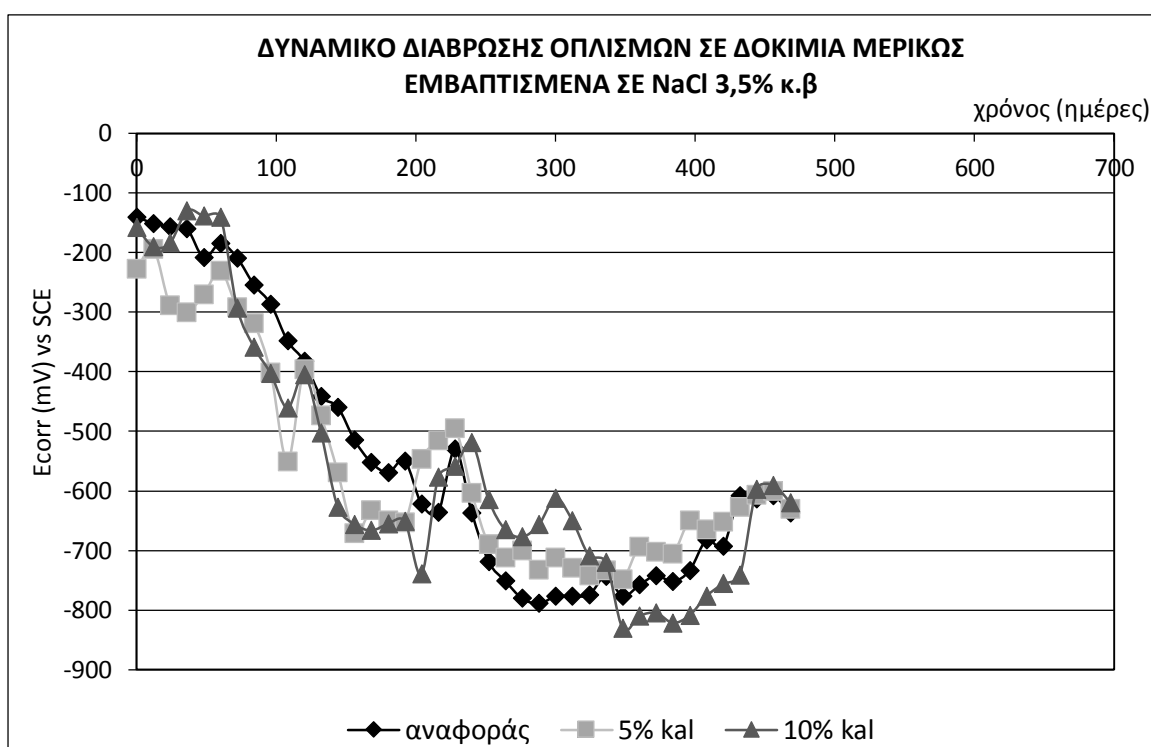
12.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

12.2.1 Μετρήσεις Δυναμικού Διάβρωσης

12.2.1.1 Δυναμικό διάβρωσης (E_{corr}) χάλυβα σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Το δυναμικό διάβρωσης E_{corr} των οπλισμών υπολογίστηκε σε δοκίμια τσιμεντοκονίας τα οποία ήταν εμβαπτισμένα σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β σε εργαστηριακό περιβάλλον. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο πολύμετρο και ως βοηθητικό ηλεκτρόδιο κορεσμένος καλομέλανας (SCE).

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ανά 15 ημέρες και τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται σε διάγραμμα στο σχήμα 12.1.



Σχήμα 12.1: μετρήσεις Δυναμικού διάβρωσης σε mV συναρτήσει του χρόνου εμβάπτισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Η πορεία των δυναμικών βάσει του σχήματος 12.1 είναι η εξής:

- 0 – 250 ημέρες. Οι τιμές των δυναμικών ξεκινούν από την περιοχή -158mV ÷ -227 mV και μεταβαίνουν προς πιο ηλεκτραρνητικές τιμές. Οι οπλισμοί που είναι εγκιβωτισμένοι σε δοκίμια που περιέχουν καλαμίνα εμφανίζουν χαμηλότερες τιμές δυναμικών συγκριτικά με τα αναφοράς,
- 250 – 336 ημέρες. Σχετική Σταθεροποίηση των τιμών δυναμικού διάβρωσης στην περιοχή -689mV ÷ -831 mV. Οι χαμηλότερες τιμές δυναμικών εμφανίζονται στους χάλυβες των δοκιμών αναφοράς,

- 336 ημέρες – 468 ημέρες. Τα δυναμικά μεταβαίνουν προς πιο ηλεκτροθετικές τιμές στην περιοχή $-831\text{mV} \div -619\text{ mV}$. Η σειρά 10%kal εμφανίζει τις χαμηλότερες τιμές δυναμικού.

Η κατάσταση των οπλισμών σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM C876-87** για το συνολικό χρόνο εμφάνισης σε NaCl παρουσιάζεται στον πίνακα 12.1.

Πίνακας 12.1: Πιθανότητα διάβρωσης οπλισμού σύμφωνα με το ASTM C876-87 με ηλεκτρόδιο κορεσμένου καλομέλανα SCE

	Δυναμικό διάβρωσης E_{corr} vs SCE	Πιθανότητα διάβρωσης (ASTM C876-87)
0 ως 84 ημέρες	-126 mV ως -276 mV	Ενδιάμεση πιθανότητα διάβρωσης
84 ως 120 ημέρες	< -276 mV	Υψηλή (<90% πιθανότητα διάβρωσης)
120 ημέρες ως 468 ημέρες	< -426 mV	Έντονη διάβρωση

12.2.2 Μετρήσεις Βάθους ενανθράκωσης σκυροδέματος

12.2.2.1 Βάθος ενανθράκωσης σκυροδέματος σε περιβάλλον με αυξημένη συγκέντρωση Cl⁻ (μερική εμφάνιση NaCl 3,5% κ.β, θάλαμος αλατονέφωσης)

Η ενανθράκωση των δοκιμών εκτιμήθηκε με εμπροτισμό δείκτη φαινολοφθαλείνης σε δοκίμια τσιμεντοκονίας για συνολικό διάστημα δύο (2) ετών μερικής εμφάνισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β και σε δοκίμια που παρέμειναν σε θάλαμο αλατονέφωσης για 40 ημέρες. Το βάθος ενανθράκωσης d (mm) υπολογίστηκε από τον τύπο:

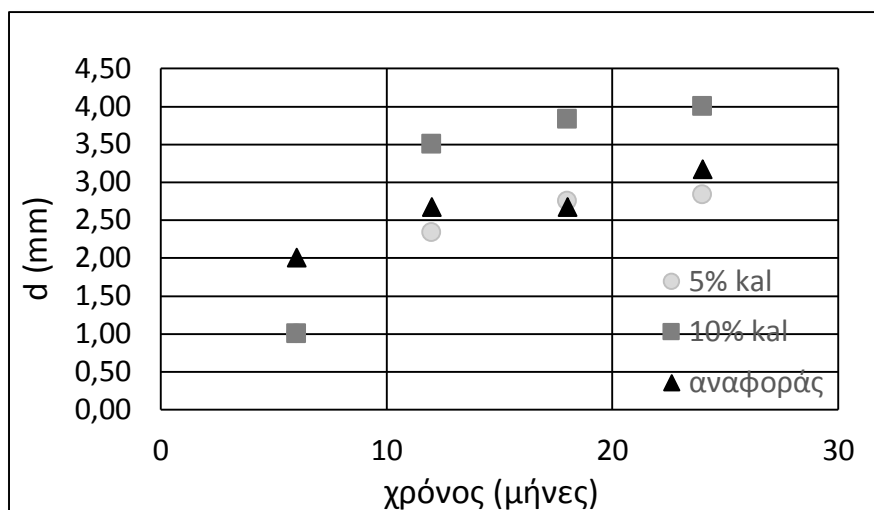
$$d^2 = A * t$$

d το βάθος ενανθράκωσης σε mm, A ο συντελεστής διάχυσης σε mm²/yr, t: ο χρόνος σε yr.

Για την πειραματική διαδικασία κατασκευάστηκαν τρεις (3) συνθεσεις τσιμεντοκονίας και οχτώ (8) κυλινδρικά δοκίμια για την κάθε κατηγορία. Οι μέσοι όροι του βάθους ενανθράκωσης και ο υπολογισμός του συντελεστή διάχυσης δίνονται στον πίνακα 11.2.

Πίνακας 12.2: Βάθος ενανθράκωσης d (mm) και συντελεστής διάχυσης CO₂ A (mm²/yr) σε δοκίμια τσιμεντοκονίας εμφαπτισμένα σε NaCl 3,5% κ.β.

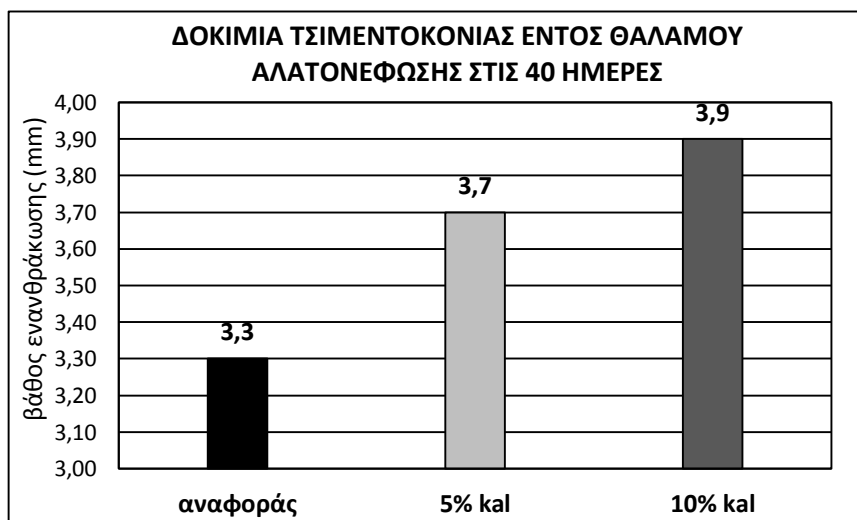
Χρόνος (μήνες)	5% kal		10% kal		αναφοράς	
	A (mm ² /yr)	d (mm)	A (mm ² /yr)	d (mm)	A (mm ² /yr)	d (mm)
12	5,43	2,33	12,25	3,5	7,11	2,00
18	5,08	2,67	9,81	3,83	5,04	2,67
24	4,03	2,83	8	4,00	5,69	3,17



Σχήμα 12.2: Βάθος ενανθράκωσης d σε mm συναρτήσει του χρόνου εμφάπτισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Στο σχήμα 12.2 δίνεται διάγραμμα του βάθους ενανθράκωσης σε συνάρτηση με το χρόνο, σε δοκίμια που εμφαπτίστηκαν σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β. Το μικρότερο βάθος ενανθράκωσης παρατηρήθηκε στα δοκίμια με 5% καλαμίνα έπειτα από 2 χρόνια εμφάπτισης σε διάλυμα χλωριόντων.

Η ενανθράκωση των δοκιμίων έπειτα από παραμονή τους σε θάλαμο αλατονέφωσης για 40 ημέρες παρουσιάζεται στο σχήμα 12.3.



Σχήμα 12.3: Βάθος ενανθράκωσης d σε mm στις 40 ημέρες παραμονής σε θάλαμο αλατονέφωσης

Από το σχήμα 12.3 φαίνεται ότι τα δοκίμια με το πρόσθετο εμφανίζονται πιο ενανθρακωμένα από τα αναφοράς και στα δύο ποσοστά προσθήκης γεγονός που οφείλεται στο αυξημένο πορώδες τους με αποτέλεσμα να διευκολύνεται η είσοδος του Διοξειδίου του Άνθρακα στη μάζα των δοκιμίων τσιμεντοκονίας.

12.2.3 Μετρήσεις ολικών ιόντων Χλωρίου σκυροδέματος

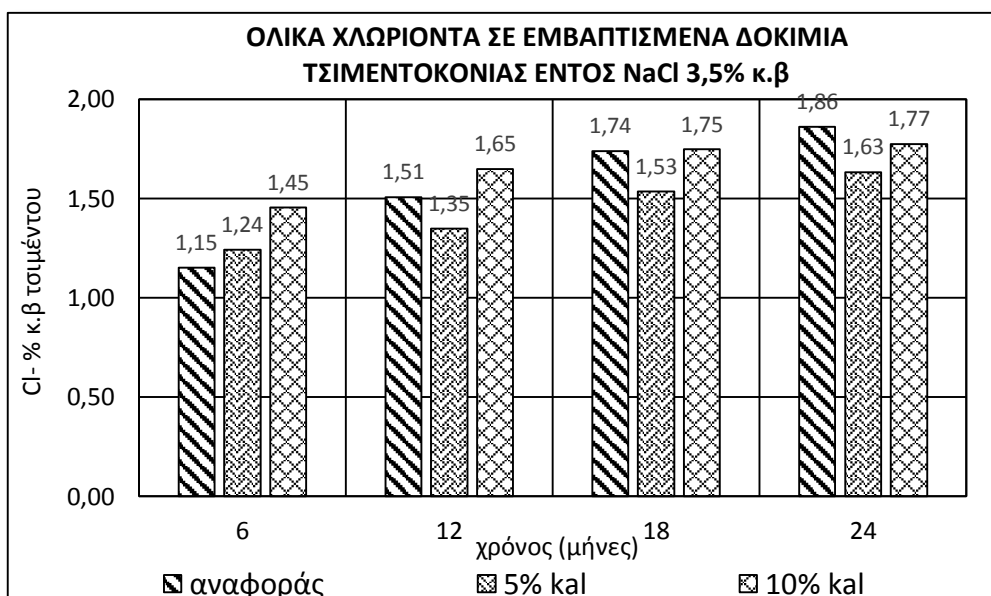
Ο υπολογισμός της συγκέντρωσης των ιόντων Cl⁻ σε συνθέσεις σκυροδέματος με προσθήκη σιδηρούχας σκωρίας υπολογίστηκε με τη μέθοδο Mohr. Το διαβρωτικό περιβάλλον ήταν μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β και παραμονή σε θάλαμο αλατονέφωσης για 40 ημέρες.

12.2.3.1 Ολικά χλωριόντα τσιμεντοκονίας σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Τα ολικά χλωριόντα υπολογίστηκαν σε κυλινδρικά δοκίμια τσιμεντοκονίας ύψους 100mm και διαμέτρου 50mm τα οποία εμβάπτιστηκαν για συνολικό χρονικό διάστημα 24 μηνών σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β. Για την κατασκευή τους χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο CEM I 42,5N, ασβεστολιθική άμμος και νερό δικτύου ΕΜΠ. Ο πίνακας 12.3 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων στη μέθοδο Mohr και τον υπολογισμό της συγκέντρωσης Cl⁻.

Πίνακας 12.3: Υπολογισμός της συγκέντρωσης Cl⁻ σε δοκίμια τσιμεντοκονίας εμβάπτισιμμένα σε NaCl 3,5% κ.β με τη μέθοδο Mohr

χρόνος (μήνες)	ΟΓΚΟΣ ΤΙΤΛΟΔΟΤΗΣΗΣ AgNO ₃ (ml)			ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ Cl ⁻ (% κ.β τσιμέντου)		
	5% kal	10% kal	αναφοράς	5% kal	10% kal	αναφοράς
6	7	8,2	6,5	1,24	1,45	1,15
12	7,6	9,3	8,5	1,35	1,65	1,51
18	8,65	9,85	9,8	1,53	1,75	1,74
24	9,2	10	10,5	1,63	1,77	1,86



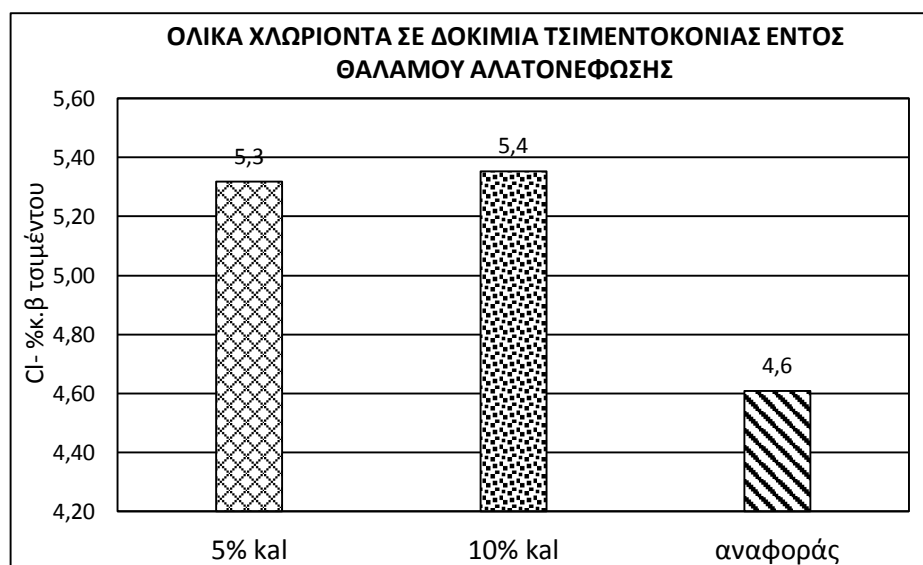
Σχήμα 12.4: Συγκέντρωση συνολικών ιόντων Cl⁻ συναρτήσεως του χρόνου εμβάπτισης σε NaCl 3,5% κ.β

Στο σχήμα 12.4 δίνεται ραβδόγραμμα της συγκέντρωσης των ολικών ιόντων χλωρίου συναρτήσει του χρόνου εμφάνισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β. Από το διάγραμμα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η προσθήκη 5% καλαμίνας μειώνει τα συνολικά χλωριόντα μετά από 12 μήνες παραμονής στο διαβρωτικό περιβάλλον.
- Το σκυρόδεμα χωρίς καλαμίνα παρουσιάζει τη μικρότερη συγκέντρωση Cl⁻ στους 6 μήνες εμφάνισης σε διάλυμα NaCl,
- Η προσθήκη 10% καλαμίνας μειώνει τα συνολικά ιόντα Cl⁻ σε σχέση με τα αναφοράς κατά 5% στους 24 μήνες.

12.2.3.2 Ολικά χλωριόντα τσιμεντοκονίας σε θάλαμο αλατονέφωσης

Η συγκέντρωση των χλωριόντων έπειτα από παραμονή των δοκιμών τσιμεντοκονίας σε θάλαμο αλατονέφωσης υπολογίστηκε στις 40 ημέρες. Το σχήμα 12.5 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τις τρεις (3) συνθέσεις τσιμεντοκονίας. Όπως είναι φανερό η συγκέντρωση των ιόντων Cl⁻ αυξάνεται με την αύξηση της προσθήκης σε καλαμίνα γεγονός που οφείλεται στο αυξημένο πορώδες (σχήμα 12.5 & 12.6). Όπως έχει αποδειχθεί και σε άλλες έρευνες αύξηση του ποσοστού της σκωρίας προκαλεί αύξηση του πορώδους του σκυροδέματος (Otiemo et al., 2014).

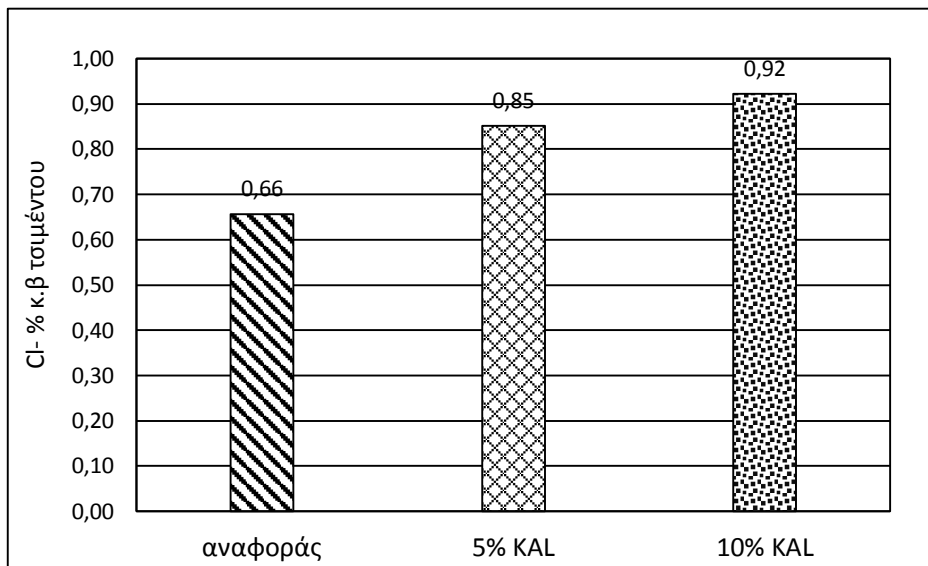


Σχήμα 12.5: Συγκέντρωση συνολικών ιόντων Cl⁻ στις 40 ημέρες παραμονής σε θάλαμο αλατονέφωσης

12.2.3.3 Ολικά χλωριόντα σε κυβικά δοκίμια σκυροδέματος μετά από μερική εμφάνιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Για τη μέτρηση των ολικών ιόντων χλωρίου στο σκυρόδεμα κατασκευάστηκαν τρεις συνθέσεις κυβικών δοκιμών ακμής 100mm τα οποία εμφάνιστηκαν σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β για 130 ημέρες. Για την κατασκευή τους χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο

CEM II 42.5N και λόγος W/C=0.65. Η αντικατάσταση του τσιμέντου από το πρόσθετο, έγινε σε ποσοστό 5% & 10% κ.β τσιμέντου. Από το σχήμα 12.6 προκύπτει ότι στις 130 ημέρες τα δοκίμια χωρίς προσθήκη καλαμίνας έχουν τη μικρότερη συγκέντρωση Cl⁻ συγκριτικά με τις υπόλοιπες κατηγορίες δοκιμών.



Σχήμα 12.6: Συγκέντρωση ολικών ιόντων Cl⁻ δοκιμών σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου εμβάπτισης σε NaCl 3,5%κ.β

12.2.4 Μηχανικές αντοχές σκυροδέματος

12.2.4.1 Μετρήσεις θλιπτικής αντοχής

Η αντοχή του σκυροδέματος σε θλίψη υπολογίστηκε σε κυβικά δοκίμια και για το σκοπό αυτό σχεδιάστηκαν δύο τύποι σκυροδέματος C20/25 με διαφορετικές αναλογίες υλικών:

- 1^ο εργαστηριακό ανάμιγμα. Εργαστήριο Οπλισμένου σκυροδέματος TITAN A.E. Υλικά: Τσιμέντο CEM I 42.5N, ασβεστολιθική άμμος λατομείου, νερό δικτύου Αττικής. Λόγος W/C=0.57. Κυβικά δοκίμια 150x150x150mm³,
- 2^ο εργαστηριακό ανάμιγμα. Εργαστήριο Οπλισμένου σκυροδέματος Πανεπιστημίου Κύπρου. Υλικά: τσιμέντο CEM II 42.5N A-M, ασβεστολιθική άμμος Τροόδου, νερό δικτύου Λευκωσίας. Λόγος W/C=0.65. Κυβικά δοκίμια 100x100x100mm³.

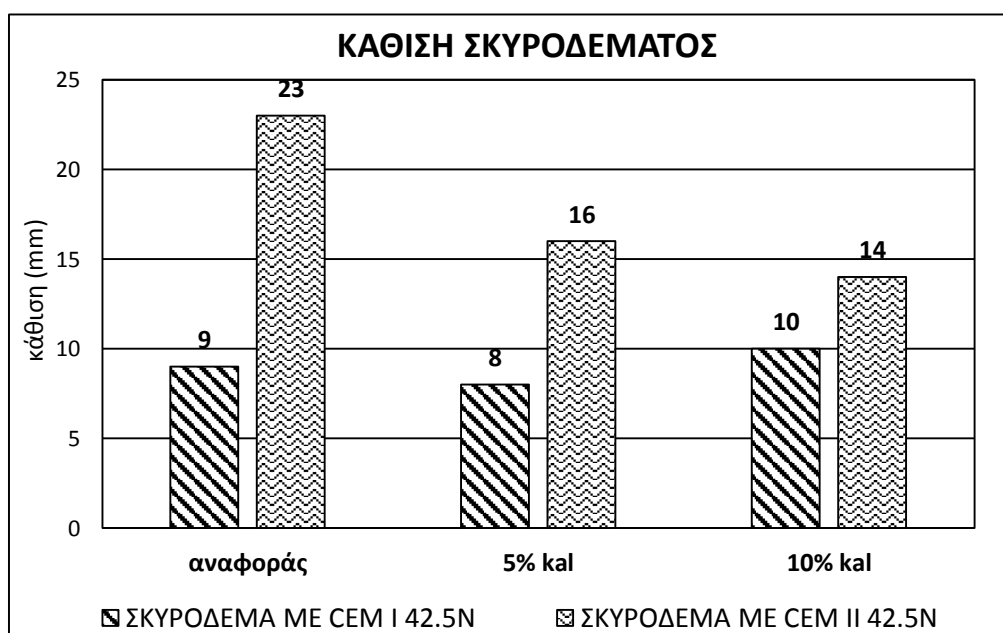
Για το κάθε εργαστηριακό ανάμιγμα δημιουργήθηκαν τρεις συνθέσεις σκυροδέματος, μία σειρά δοκιμών με 5% καλαμίνα, μία με 10% καλαμίνα και μια κατηγορία χωρίς πρόσθετο.

12.2.4.1.1 Δοκιμή κάθισης και πυκνότητα νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος

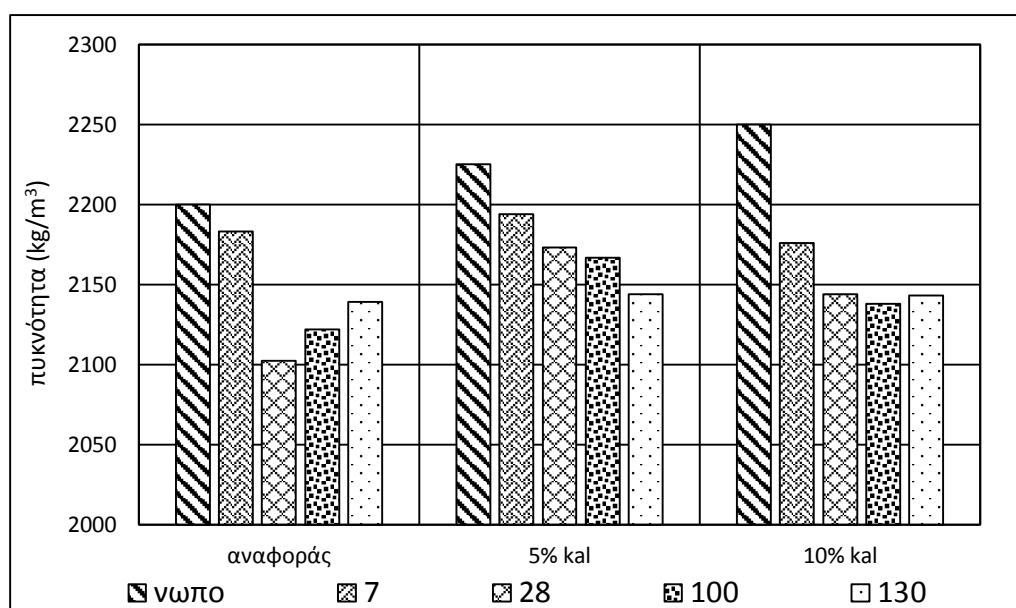
Η δοκιμή κάθισης εκτελέστηκε σε νωπό σκυρόδεμα σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM C143**. Το σχήμα 12.7 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της κάθισης. Η μεγάλη διαφορά στην κάθιση μεταξύ των μιγμάτων οφείλεται στο υψηλότερο λόγο W/C που έχει το σκυρόδεμα με CEM II 42.5N.

Το σχήμα 12.8 παρουσιάζει τις πυκνότητες των δοκιμών σκυροδέματος και του νωπού μίγματος. Από το γράφημα μπορούν να εξαχθούν τα εξής:

- Σε νωπό σκυρόδεμα το κανονικό σκυρόδεμα χωρίς πρόσθετο παρουσιάζει τη μικρότερη πυκνότητα,
- Στις 7 ημέρες τα δοκίμια και των τριών συνθέσεων παρουσιάζουν περίπου ίδιες τιμές πυκνότητας ενώ στις 28 τα σκυροδέματα με την καλαμίνα έχουν αυξημένη πυκνότητα σε σχέση με τα αναφοράς.
- Τα δοκίμια αναφοράς μετά τις 28 ημέρες παρουσιάζουν αύξηση της πυκνότητας τους. Το γεγονός αυτό πιθανόν να οφείλεται στη συσσώρευση αλάτων στους πόρους με δεδομένο ότι το ανοικτό πορώδες αυξάνεται όπως υπολογίστηκε με τη μέθοδο της απαέρωσης.



Σχήμα 12.7: δοκιμή κάθισης για νωπό σκυρόδεμα με CEM I 42.5N & CEM II 42.5N



Σχήμα 12.8: Πυκνότητα νωπού (kg/m^3) και σκληρυμένου σκυροδέματος έπειτα από εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

12.2.4.1.2 Μετρήσεις θλιπτικής αντοχής μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

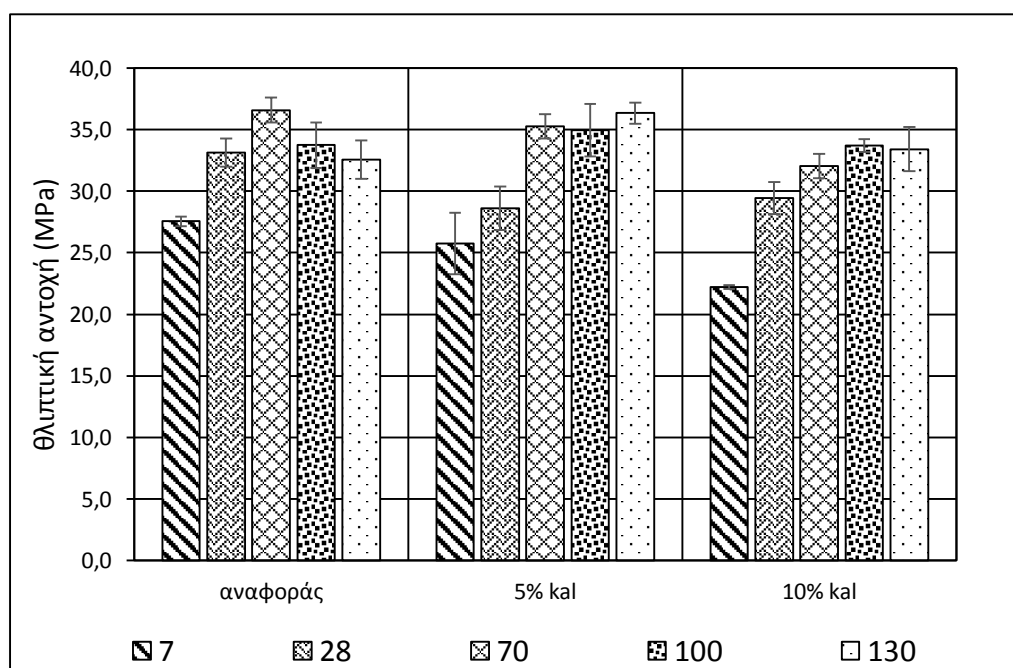
Η επίδραση των ιόντων Cl^- στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος διερευνήθηκε με εμβάπτιση κυβικών δοκιμίων σκυροδέματος ακμής 100mm σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β. Για το σκοπό αυτό παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο Οπλισμένου σκυροδέματος του Πανεπιστημίου Κύπρου τρεις (3) συνθέσεις με τις ποσότητες των υλικών που δίνονται στον πίνακα 12.4. Η ταχύτητα φόρτισης των δοκιμίων στη μηχανή ήταν 0,5MPa/s και τα αποτελέσματα των μετρήσεων θλίψης δίνονται στον πίνακα 12.5. Ο λόγος νερό:τσιμέντο ήταν σταθερός σε όλες τις συνθέσεις και ίσος με 0,65.

Πίνακας 12.4: Ποσότητες υλικών για σκυρόδεμα C 20/25 και τσιμέντο CEM II 42.5N

ΕΙΔΟΣ ΥΛΙΚΟΥ	Ποσότητα/ m^3	5% kal	10% kal	αναφοράς
άμμος	715 kg/m^3	12,678 kg	12,011 kg	12,678 kg
Γαρμπίλι	611 kg/m^3	10,836 kg	10,265 kg	10,836 kg
χαλίκι	433 kg/m^3	7,678 kg	7,274 kg	7,678 kg
νερό	244 kg/m^3	4,335 kg	4,107 kg	4,335 kg
CEM II 42,5N	376 kg/m^3	6,335 kg	5,7 kg	6,669 kg
πρόσθετο	-	0,334	0,632	-

Πίνακας 12.5: Αποτελέσματα μετρήσεων θλίψης κυβικών δοκιμών σκυροδέματος με τσιμέντο CEM 42.5N και μερική εμβάπτιση σε NaCl 3,5% κ.β

7 ημέρες				100 ημέρες			
κύβος	αναφοράς	5% kal	10% kal	κύβος	αναφοράς	5% kal	10% kal
1	27,90	22,2	22,08	1	34,90	34,17	33,73
2	27,79	27,39	22,41	2	31,03	37,86	34,35
3	27,00	27,66	22,15	3	33,21	32,85	33,09
μέσος όρος	27,56	25,75	22,21	4	35,84	-	-
28 ημέρες				μέσος όρος	33,75	34,96	33,72
κύβος	αναφοράς	5% kal	10% kal	130 ημέρες			
1	34,51	27,36	28,18	κύβος	αναφοράς	5% kal	10% kal
2	31,74	27,41	31,27	1	-	37,22	35,2
3	33,15	31,1	28,91	2	31,97	35,47	31,45
μέσος όρος	33,13	28,62	29,45	3	31,38	-	35,24
70 ημέρες				4	31,01	-	31,78
κύβος	αναφοράς	5% kal	10% kal	5	35,31	-	-
1	37,77	34,86	33,09	6	33,19	-	-
2	37,16	37,6	31,5	μέσος όρος	32,57	36,35	33,42
3	34,85	33,32	31,58				
μέσος όρος	36,59	35,26	32,06				



Σχήμα 12.9: Αντοχή σε θλίψη (MPa) κυβικών δοκιμών σκυροδέματος μετά από εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Το σχήμα 12.9 παρουσιάζει την αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου εμβάπτισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β. Από το διάγραμμα προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

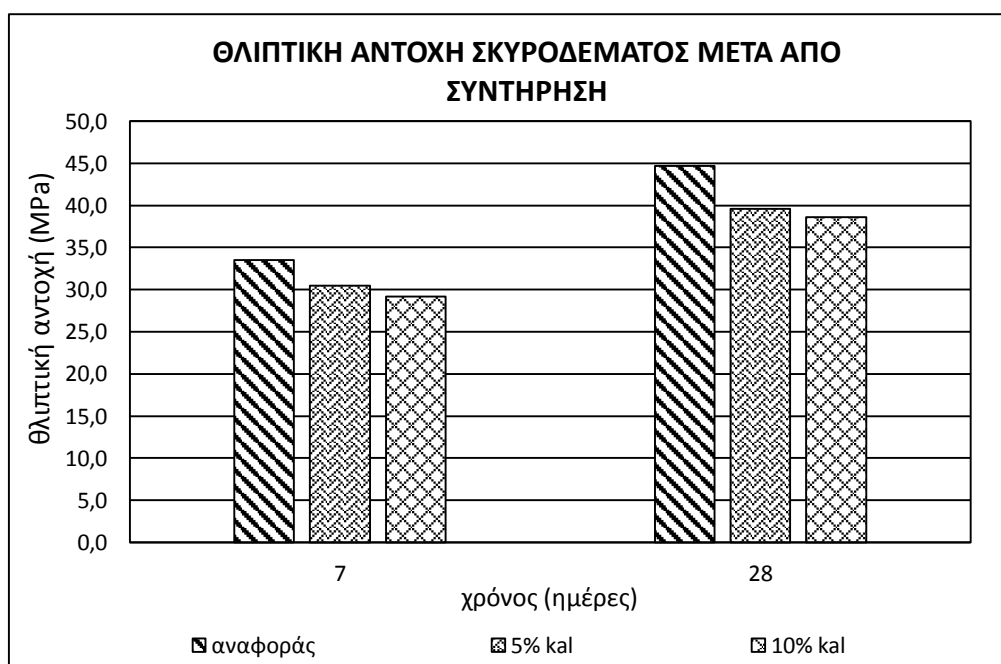
- Η προσθήκη της καλαμίνας ελαττώνει τη θλιπτική αντοχή στις 7 & 28 ημέρες. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μείωση του ποσοστού του τσιμέντου κατά την παρασκευή του σκυροδέματος,
- Η αύξηση του ποσοστού της καλαμίνας από 5% σε 10% δεν μειώνει τη θλιπτική αντοχή έπειτα από 100 ημέρες εμβάπτισης σε διάλυμα NaCl,
- Στις 100 ημέρες τα δοκίμια και των τριών συνθέσεων σκυροδέματος απέκτησαν περίπου ίδια θλιπτική αντοχή,
- Η θλιπτική αντοχή μειώνεται σε σχέση με το χρόνο εμβάπτισης σε NaCl.

12.2.4.1.3 Μετρήσεις θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος μετά από συντήρηση στις 7 & 28 ημέρες

Οι μετρήσεις θλιπτικής αντοχής μετά από συντήρηση, πραγματοποιήθηκαν σε κυβικά δοκίμια ακμής 150mm στο εργαστήριο σκυροδέματος της εταιρίας TITAN A.E. οι ποσότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται στον πίνακα 12.6.

Πίνακας 12.6: Ποσότητες υλικών για σκυρόδεμα C 20/25 και τσιμέντο CEM I 42.5N

	αναφοράς		5% kal		10% kal	
	kg/m ³	ποσότητα /κύβο	kg/m ³	ποσότητα /κύβο	kg/m ³	ποσότητα /κύβο
I/42,5 KMR	351	5265	333,4	5001	315,9	4738,5
νερό	200,1	3001,5	200,1	3001,5	200,1	3001,5
άμμος	713,5	10703	713,5	10703	713,5	10703
Γαρμπίλι	624,3	9365	624,3	9365	624,3	9365
Χαλίκι	446	6690	446	6690	446	6690



Σχήμα 12.10: Αντοχή σε θλίψη σκυροδέματος μετά από συντήρηση στις 7 & 28 ημέρες

Το σχήμα 12.10 παρουσιάζει την αντοχή σε θλίψη σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου μετά από συντήρηση. Από το διάγραμμα προκύπτει, όπως και στο σχήμα 12.9, ότι η καλαμίνα ελαττώνει τις πρώιμες και τελικές αντοχές του σκυροδέματος. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι συγκριτικά, τα δύο ποσοστά προσθήκης δεν διαφοροποιούν τη θλιπτική αντοχή.

12.2.4.2 Μετρήσεις εφελκυστικής αντοχής με διάρρηξη

12.2.4.2.1 Μετρήσεις εφελκυστικής αντοχής μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Η αντοχή του σκυροδέματος σε εφελκυσμό με πρόσθετο τη σιδηρούχα σκωρία εκτιμήθηκε έμμεσα με τη δοκιμή διάρρηξης (Brazilian test) σε κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος ύψους 300mm και διαμέτρου 150mm. Τα υλικά κατασκευής των δοκιμών ήταν τσιμέντο CEM II 42.5N, ασβεστολιθική άμμος Τροόδου και νερό δικτύου Λευκωσίας.

Για την πειραματική διαδικασία κατασκευάστηκαν τρεις (3) συνθέσεις σκυροδέματος, μία σειρά δοκιμών χωρίς πρόσθετο (αναφοράς), με 5% καλαμίνα (5% kal) και 10% καλαμίνα (10% kal). Ο λόγος νερό:τσιμέντο ήταν σταθερός και ίσος με 0,65 σε όλες τις κατηγορίες. Η ταχύτητα φόρτισης των δοκιμών ήταν 0.05MPa/s και δοκιμή πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM 12390-6**.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στον πίνακα 12.7.

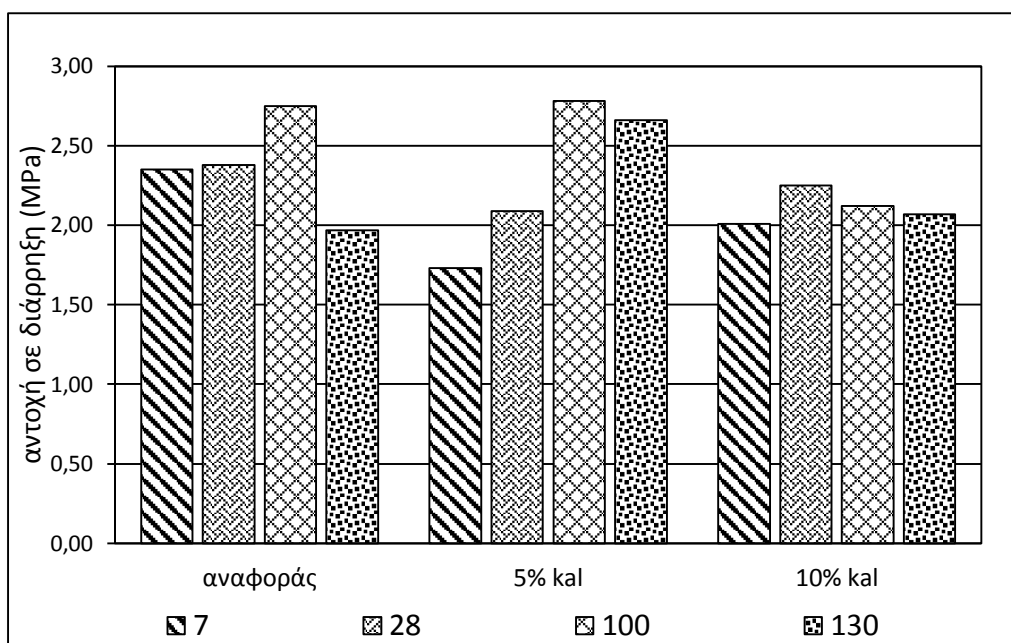
Πίνακας 12.7: Αντοχή σε διάρρηξη και πυκνότητα σκυροδέματος με εμβάπτιση δοκιμών σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

		ΑΝΑΦΟΡΑΣ	5% KAL	10% KAL
7 ΗΜΕΡΕΣ	f_{ctm} (MPa)	2,35	1,73	2,01
	d (kg/m ³)	2194,15	2211,00	2141,00
28 ΗΜΕΡΕΣ	f_{ctm} (MPa)	2,38	2,09	2,25
	d (kg/m ³)	2160	2114	2137
100 ΗΜΕΡΕΣ	f_{ctm} (MPa)	2,75	3,02	2,12
	d (kg/m ³)	2110	2111	2063
130 ΗΜΕΡΕΣ	f_{ctm} (MPa)	1,97	2,66	2,07
	d (kg/m ³)	2076	2095	2088

Το σχήμα 12.11 παρουσιάζει διάγραμμα της αντοχής σε διάρρηξη του σκυροδέματος με προσθήκη καλαμίνα και χωρίς. Από το διάγραμμα μπορούν να προκύψουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η προσθήκη καλαμίνας και στα δυο ποσοστά προσθήκης ελαττώνει την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος στις 7 & 28 ημέρες.

- Η εφελκυστική αντοχή ελαττώνεται σε όλες τις κατηγορίες δοκιμών στις 130 ημέρες μερικής εμβάπτισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β.
- Η αντικατάσταση του τσιμέντου με 5% καλαμίνα αυξάνει την εφελκυστική αντοχή στις 100 ημέρες ενώ η προσθήκη 10% στις 130 ημέρες σε διάλυμα NaCl.



Σχήμα 12.11: Αντοχή σε διάρρηξη κυλινδρικών δοκιμών σκυροδέματος μετά από εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

12.2.4.3 Μετρήσεις αντοχής σε κάμψη

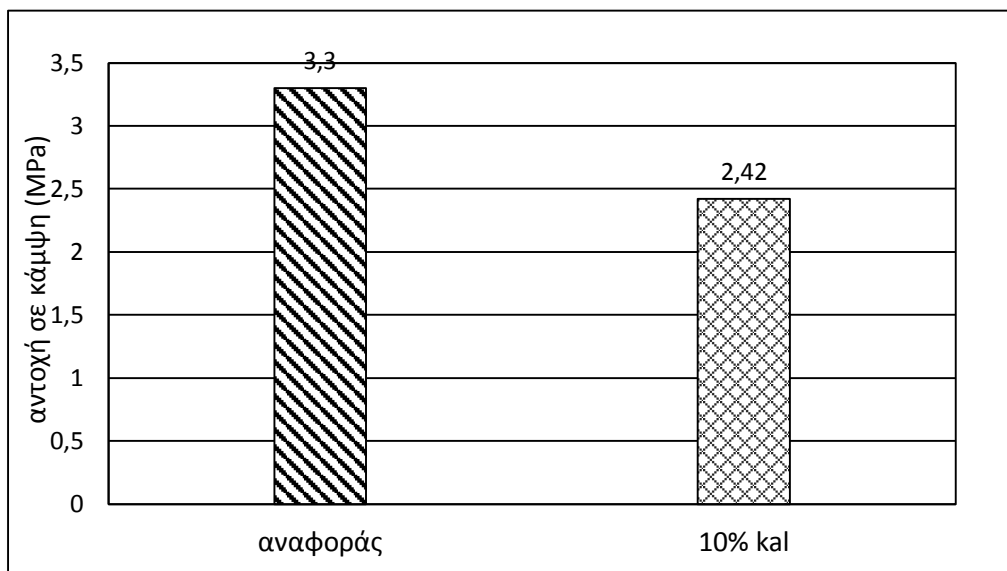
Η αντοχή του σκυροδέματος σε κάμψη υπολογίστηκε με τη δοκιμή κάμψης σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM C78**, σε πρισματικά δοκίμια τετραγωνικής διατομής 100mm και μήκους 100cm με ταχύτητα 0,185 MPa/s. Η μηχανή ήταν της εταιρίας TECNOTEST κ το μοντέλο KD300/R με μέγιστο φορτίο 3000KN. Για τη δοκιμή κατασκευάστηκαν δύο δοκίμια χωρίς πρόσθετο και δύο δοκίμια με 10% καλαμίνα. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε μετά από συντήρηση 28 ημερών από τη σκυροδέτηση. Οι ποσότητες των υλικών για την κατασκευή των δοκιμών δίνονται στον πίνακα 12.8.

Πίνακας 12.8: ποσότητες υλικών για τη δοκιμή κάμψης

Είδος υλικού	αναφοράς	10% kal
ΑΜΜΟΣ	13,346 kg	13,346 kg
ΓΑΡΜΠΙΛΙ	11,406 kg	11,406 kg
ΧΑΛΙΚΙ	8,082 kg	8,082 kg
ΝΕΡΟ	4,563 kg/ 5,53 kg*	4,563 kg/ 5,53kg*
ΤΣΙΜΕΝΤΟ 42,5	7,020 kg	6318 kg
ΚΑΛΑΜΙΝΑ	0 kg	0,703 kg

* Τελική ποσότητα νερού στο ανάμιγμα σκυροδέματος μετά από διόρθωση εξαιτίας της υψηλής απορροφητικότητας που παρουσιάζουν τα αδρανή της Κύπρου.

Το σχήμα 12.12 παρουσιάζει διάγραμμα των αποτελεσμάτων της δοκιμής κάμψης στις 28 ημέρες από το οποίο είναι φανερό όπως και στα διαγράμματα των μετρήσεων θλίψης και εφελκυσμού ότι στις 28 ημέρες η καλαμίνα δίνει χαμηλότερες τιμές αντοχών από τα δοκίμια αναφοράς.



Σχήμα 12.12: Αντοχή σε κάμψη πρισματικών δοκιμίων σκυροδέματος μετά από συντήρηση στις 28 ημέρες

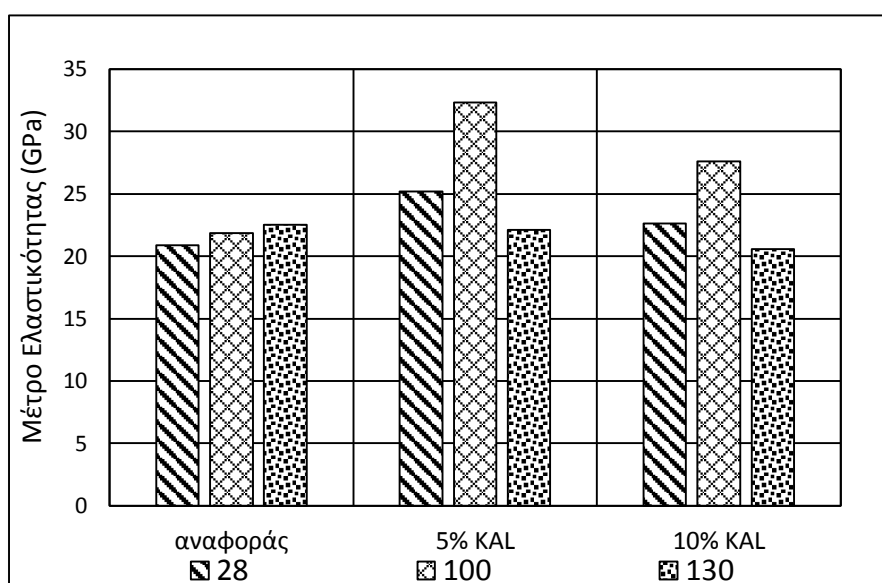
12.2.5 Υπολογισμός μέτρου Ελαστικότητας σκυροδέματος

12.2.5.1 Στατικό μέτρο ελαστικότητας μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Η παραμόρφωση του σκυροδέματος εκτιμήθηκε με τον υπολογισμό του μέτρου Ελαστικότητας E σε κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος ύψους 200mm και διαμέτρου 100mm. Για τις μετρήσεις κατασκευάστηκαν δοκίμια αναφοράς και δοκίμια στα οποία αντικαταστάθηκε το τσιμέντο από 5% και 10% καλαμίνα. Στα δοκίμια τοποθετήθηκαν μηκυσιόμετρα ώστε να μετράται η παραμόρφωση τους συναρτήσει της επιβαλλόμενης τάσης και υποβλήθηκαν σε κύκλους φόρτισης – αποφόρτισης στο 40% της θλιπτικής αντοχής τους. Το μέτρο Ελαστικότητας εκτιμήθηκε από την εφαπτομένη σε διάγραμμα $S=f(e)$ και τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 12.9.

Πίνακας 12.9: Αποτελέσματα στατικού μέτρου Ελαστικότητας σε δοκίμια σκυροδέματος εμβαπτισμένα σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

	28 ΗΜΕΡΕΣ		100 ΗΜΕΡΕΣ		130 ΗΜΕΡΕΣ	
	E (GPa)	S (MPa)	E (GPa)	S (MPa)	E (GPa)	S (MPa)
ΑΝΑΦΟΡΑΣ	20,895	16,03	21,876	18,56	22,509	29,67
5% KAL	25,173	17,78	32,343	15,21	22,131	27,85
10% KAL	22,642	17,23	27,628	18,33	20,567	23,89



Σχήμα 12.13: Στατικό μέτρο Ελαστικότητας E σε GPa σε κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Το σχήμα 12.13 παρουσιάζει διάγραμμα του στατικού μέτρου Ελαστικότητας E για τις τρεις συνθέσεις σκυροδέματος. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι η προσθήκη της καλαμίνας στο σκυρόδεμα βελτιώνει το μέτρο Ελαστικότητας μέχρι τις 100 ημέρες σε εμβαπτισμένα δοκίμια εντός διαλύματος NaCl ενώ στις 130 ημέρες το μέτρο E στη σειρά 10% kal είναι χαμηλότερο κατά 8,63% σε σχέση με τα αναφοράς.

12.2.5.2 Υπολογισμός δυναμικού μέτρου Ελαστικότητας μέσω της ταχύτητας υπερήχων μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Το Δυναμικό μέτρο Ελαστικότητας υπολογίστηκε έμμεσα από τη ταχύτητα των υπερήχων διαμέσου της μάζας του σκυροδέματος. Οι μετρήσεις έγιναν κατά τη φορά της σκυροδέτησης σε κυβικά δοκίμια ακμής 100mm. τα υλικά κατασκευής των δοκιμών ήταν τσιμέντο CEM II 42.5N, ασβεστολιθική άμμος και νερό δικτύου Λευκωσίας. Το διαβρωτικό περιβάλλον των δοκιμών ήταν διάλυμα NaCl 3,5% κ.β.

Για τη μέτρηση της ταχύτητας των υπερήχων, τα δοκίμια ξηράθηκαν σε φούρνο στους 105°C και αφέθηκαν σε εργαστηριακό περιβάλλον ώστε να αποκτήσουν θερμοκρασία περιβάλλοντος. Το μηχάνημα που χρησιμοποιήθηκε ήταν το PUNDIT

PLUS και οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Οπλισμένου σκυροδέματος του Πανεπιστημίου Κύπρου.

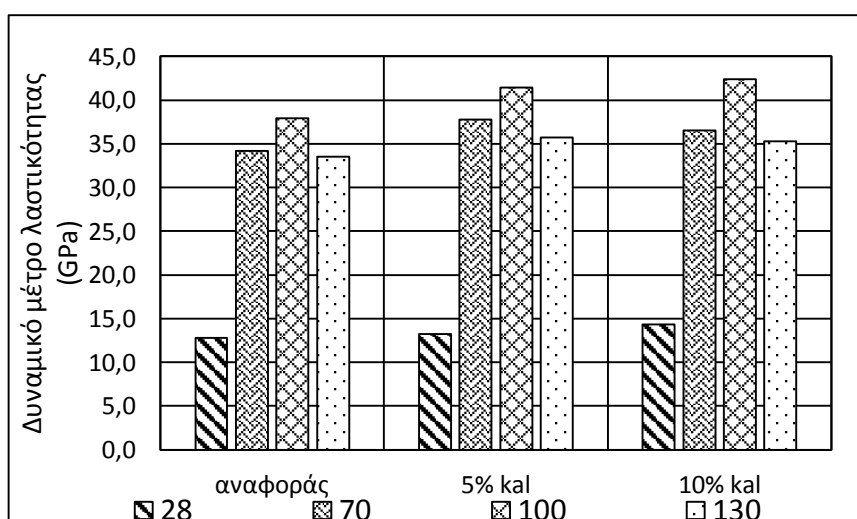
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της ταχύτητας των υπερήχων και του μέτρου Ελαστικότητας δίνονται στον πίνακα 12.10.

Πίνακας 12.10: Αποτελέσματα δυναμικού μέτρου Ελαστικότητας (GPa) σε κυβικά δοκίμια σκυροδέματος εμβαπτισμένα σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Χρόνος (ημέρες)	αναφοράς			5% kal			10% kal		
	ρ (kg/m ³)	V (m/sec)	E (Gpa)	ρ (kg/m ³)	V (m/sec)	E (Gpa)	ρ (kg/m ³)	V (m/sec)	E (Gpa)
28	1969	2550	12,803	2037	2550	13,246	2042	2650	14,340
70	2003,1	4132	34,200	2085,2	4255	37,753	2071,6	4201	36,560
100	2074,45	4275	37,912	2110,52	4432	41,456	2107,95	4484	42,383
130	2059,98	4034	33,522	2146,76	4080	35,736	2159,75	4040	35,251

Στο σχήμα 12.14 παρουσιάζονται σε διάγραμμα, τα αποτελέσματα του υπολογισμού του δυναμικού μέτρου Ελαστικότητας για τις τρεις (3) κατηγορίες δοκιμών. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από το διάγραμμα είναι τα παρακάτω:

- Στις 28 ημέρες και οι τρεις συνθέσεις δοκιμών παρουσιάζουν περίπου ίδιο μέτρο E,
- Η προσθήκη καλαμίνας και στα δύο ποσοστά προσθήκης βελτιώνει το δυναμικό μέτρο Ελαστικότητας μέχρι τις 130 ημέρες εμβάπτισης σε NaCl, χρόνος στον οποίο έγιναν οι μετρήσεις της ταχύτητας υπερήχων,
- Το μέτρο Ελαστικότητας ελαττώνεται σε όλες τις κατηγορίες στις 130 ημέρες μερικής εμβάπτισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β.

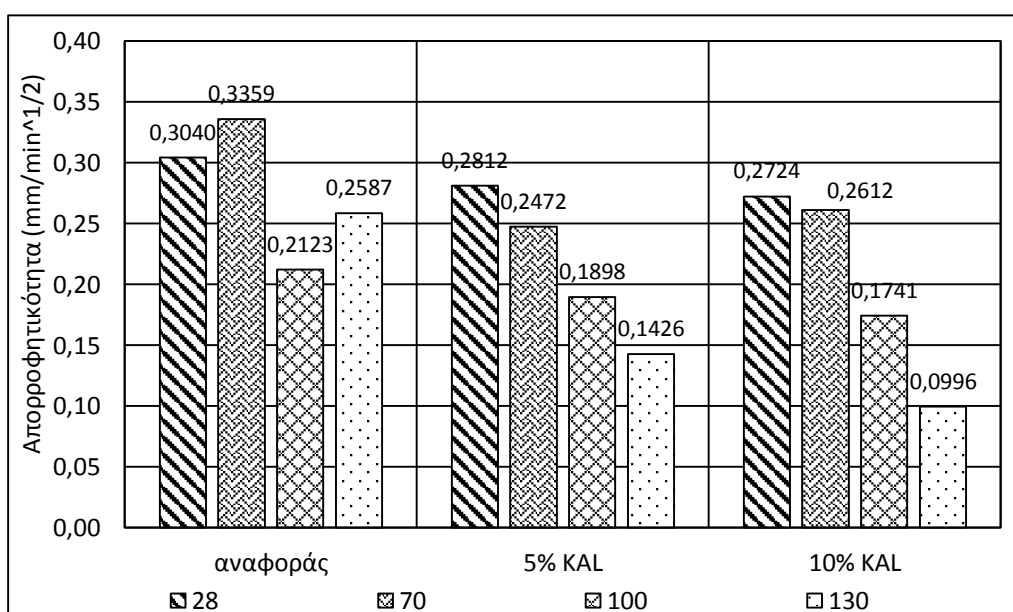


Σχήμα 12.14: Δυναμικό μέτρο Ελαστικότητας E σε GPa σε κυβικά δοκίμια Σκυροδέματος μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

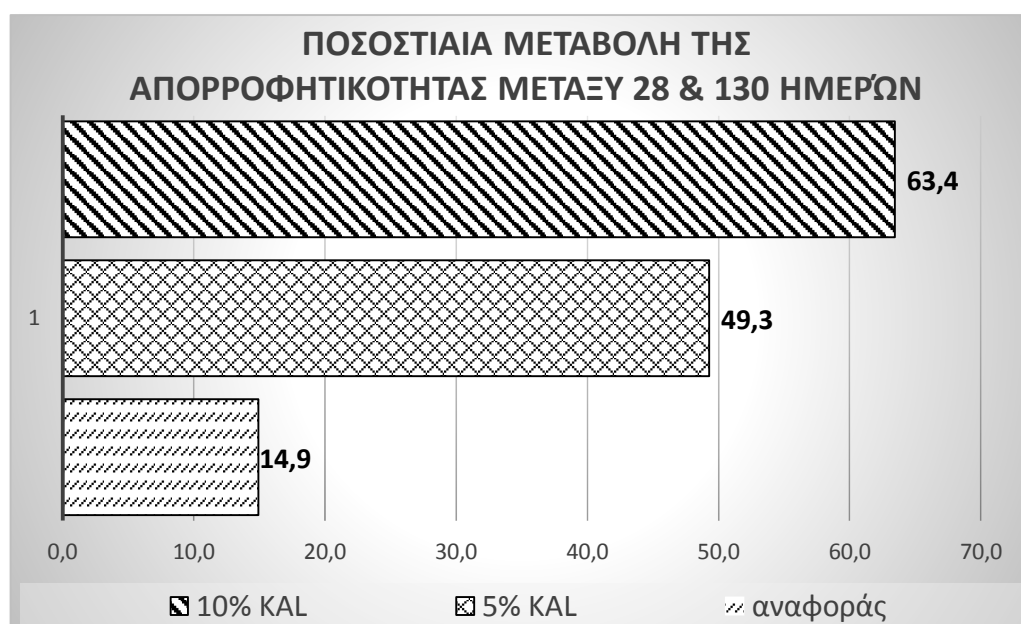
12.2.6 Μετρήσεις τριχοειδούς απορροφητικότητας σκυροδέματος

Η επίδραση της καλαμίνας ως αντικαταστατό του τσιμέντου στην απορροφητικότητα του σκυροδέματος εξετάστηκε με κατάλληλη δοκιμή σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM C1585**. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκαν κυβικά δοκίμια σκυροδέματος ακμής 100mm με τσιμέντο CEM II 42.5N, ασβεστολιθική άμμο και νερό δικτύου Λευκωσίας. Η αντικατάσταση του τσιμέντου από τη σκωρία έγινε σε ποσοστά 5% και 10% κ.β τσιμέντου και τα δοκίμια παρέμειναν σε δεξαμενή συντήρησης για 7 ημέρες και στη συνέχεια εμβάπτιστηκαν σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β. Για τη δοκιμή τα δοκίμια προτού τοποθετηθούν στο διαλύτη (μεθανόλη) για τη μέτρηση της απορροφητικότητας (sorptivity) ξηραίνονταν και στη συνέχεια παρέμειναν σε εργαστηριακό περιβάλλον ώστε να αποκτήσουν θερμοκρασία περιβάλλοντος. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων γινόταν καταγραφή της θερμοκρασίας και του χρόνου. Το σχήμα 12.15 παρουσιάζει διάγραμμα της απορροφητικότητας S σε μεθανόλη, δοκιμίων σκυροδέματος εμβάπτισμένα σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β. Από το σχήμα προκύπτουν τα εξής:

- Η προσθήκη καλαμίνας στο σκυρόδεμα μειώνει την απορροφητικότητα του σκυροδέματος σημαντικά σε κάθε χρόνο που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις,
- Τη μεγαλύτερη μείωση της απορροφητικότητας μεταξύ 28 & 130 ημερών επιτυγχάνει η σειρά με 10% καλαμίνα (σχήμα 12.16),
- Η απορροφητικότητα του σκυροδέματος χωρίς πρόσθετο αυξάνει στις 130 ημέρες γεγονός που επιβεβαιώνεται και από την αύξηση του ανοικτού πορώδους.



Σχήμα 12.15: Απορροφητικότητα σκυροδέματος σε μεθανόλη σε κυβικά δοκίμια σκυροδέματος μετά από μερική εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β



Σχήμα 12.16: % Μείωση της απορροφητικότητας του σκυροδέματος με πρόσθετο καλαμίνα μεταξύ 28 & 130 ημερών μερικής εμβάπτισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

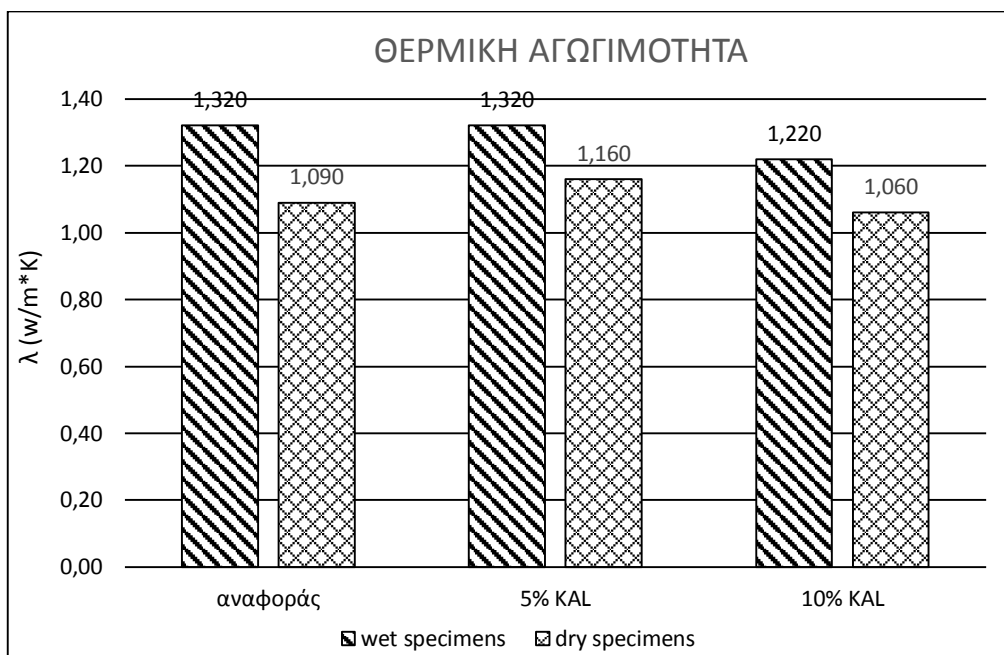
12.2.7 Θερμικές ιδιότητες σκυροδέματος με προσθήκη καλαμίνας

Οι θερμικές ιδιότητες του σκυροδέματος εξαρτώνται από το είδος των αδρανών υλικών που περιέχει, την πυκνότητά του, την περιεχόμενη υγρασία κτλ. Για τη μέτρηση της αγωγιμότητας του σκυροδέματος στη θερμότητα κατασκευάστηκαν κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 100mm και ύψους 25mm και χρησιμοποιήθηκε το μηχάνημα *ISOMET model 2104 heat transfer analyzer*.

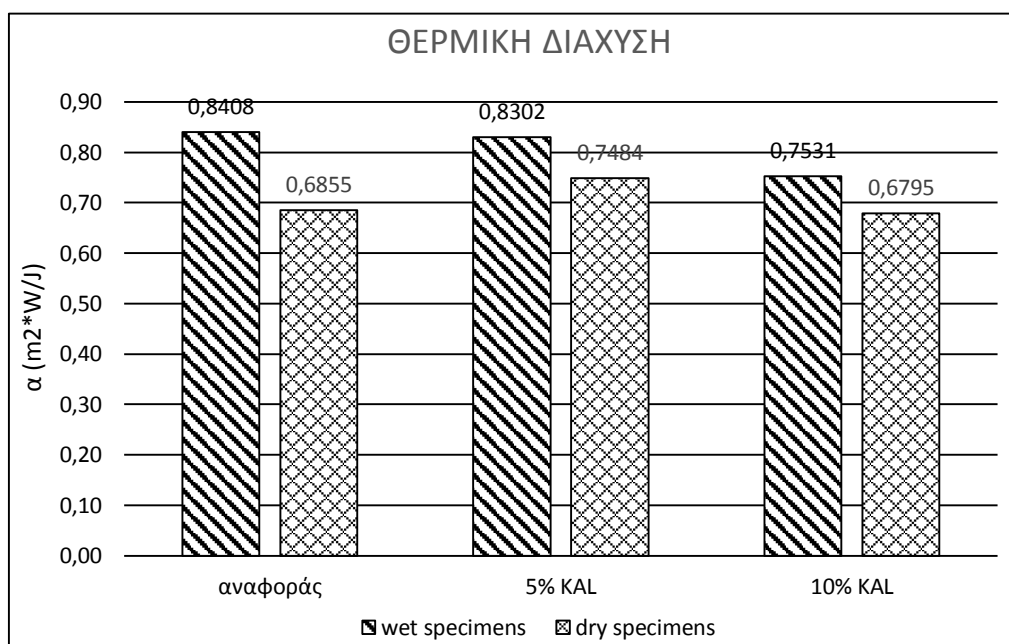
Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε υγρά και ξηρά δοκίμια μετά από 130 ημέρες μερική εμβάπτισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β. Η αντικατάσταση του τοιμέντου έγινε σε ποσοστά 5% και 10% από σιδηρούχα σκωρία. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στον πίνακα 12.11.

Πίνακας 12.11: Θερμικές ιδιότητες σκυροδέματος με πρόσθετο καλαμίνα σε εμβαπτισμένα δοκίμια εντός διαλύματος NaCl 3,5% κ.β

	ΥΓΡΑ ΔΟΚΙΜΙΑ			ΞΗΡΑ ΔΟΚΙΜΙΑ		
	λ (W/m*K)	C_p (J/m ³ *K)	α (m ² *W/J)	λ (W/m*K)	C_p (J/m ³ *K)	α (m ² *W/J)
αναφοράς	1,320	1,570	0,8408	1,090	1,590	0,6855
5% KAL	1,320	1,590	0,8302	1,160	1,550	0,7484
10% KAL	1,220	1,620	0,7531	1,060	1,560	0,6795



Σχήμα 12.17: Θερμική αγωγιμότητα σκυροδέματος λ (W/m*K) με πρόσθετο καλαμίνα στις 130 ημέρες μερικής εμβάπτισης σε NaCl 3,5% κ.β



Σχήμα 12.18: Θερμική διάχυση σκυροδέματος α (m²*W/J) με πρόσθετο καλαμίνα στις 130 ημέρες μερικής εμβάπτισης σε NaCl 3,5% κ.β

12.2.8 Μετρήσεις πορώδους σκυροδέματος

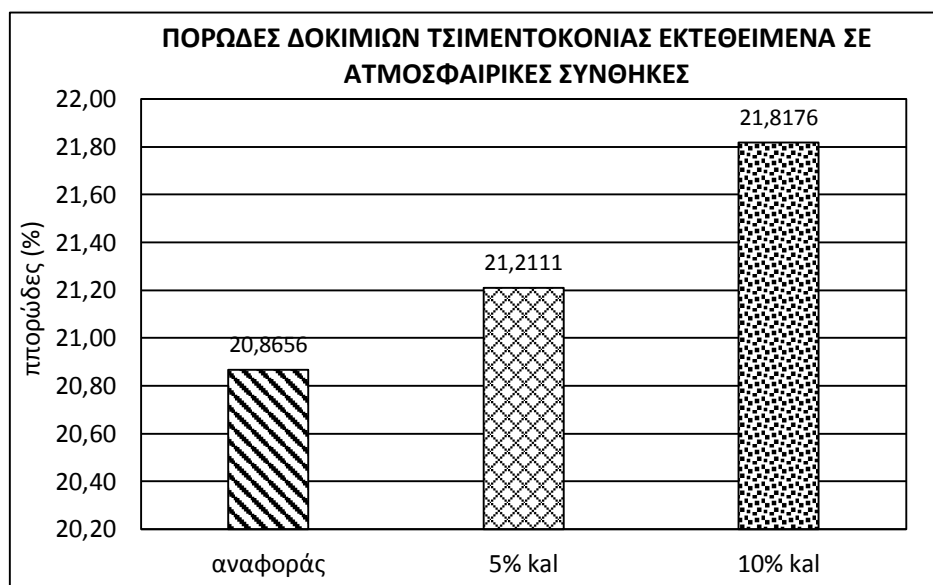
12.2.8.1 Μετρήσεις πορώδους με ποροσιμετρία Hg

Η μέτρηση του πορώδους πραγματοποιήθηκε σε δοκίμια τσιμεντοκονίας τα οποία είχαν εκτεθεί σε ατμοσφαιρικές συνθήκες για χρονικό διάστημα 6 μηνών με τη με τη μέθοδο της ποροσιμετρίας υδραργύρου (Mercury Intrusion Porosimetry, MIP). Τα

δοκίμια κατασκευάστηκαν με τσιμέντο CEM I 42.5N, λόγο W/C=0.65 και η αντικατάσταση του τσιμέντου από καλαμίνα έγινε σε ποσοστά 5% κ.β και 10% κ.β τσιμέντου. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στον πίνακα 12.12.

Πίνακας 12.12: αποτελέσματα μετρήσεων με τη μέθοδο της ποροσιμετρίας Hg για δοκίμια τσιμεντοκονίας εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα

	αναφοράς	5% kal	10% kal
Total Intrusion Volume (ml/g)	0,1008	0,1246	0,1038
Total Pore Area (m²/g)	30,6980	28,814	34,002
Median Pore Diameter (Volume) (μm)	0,0440	0,0827	0,0309
Median Pore Diameter (Area) (μm)	0,0047	0,0049	0,0048
Average Pore Diameter (4V/A) (μm)	0,0131	0,0173	0,0122
Bulk Density (g/ml)	2,0700	2,0675	2,0888
Apparent Density (g/mL)	2,6159	2,6241	2,6717
Total porosity (%)	20,8656	21,2111	21,8176



Σχήμα 12.19: Πορώδες (%) σε δοκίμια με πρόσθετο καλαμίνα στους 15 μήνες παραμονής σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον

12.2.8.2 Μετρήσεις ανοικτού πορώδους

Το ανοικτό πορώδες των δοκιμίων υπολογίστηκε με τη μέθοδο της απαέρωσης σε κυβικά δοκίμια σκυροδέματος τα οποία ήταν εμβαπτισμένα σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β. Το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των δοκιμίων ήταν CEM II 42.5N και ο λόγος W/C=0.65. Τα δοκίμια πριν από κάθε μέτρηση ξηραίνονταν μέχρι σταθερής μάζας εντός φούρνου στους 105°C. Στη συνέχεια γινόταν απαέρωση για 2-3h και ακολουθούσε κορεσμός για 24h σε χαμηλή πίεση. Για τις μετρήσεις κατασκευάστηκαν δοκίμια αναφοράς και δοκίμια στα οποία αντικαταστάθηκε το τσιμέντο από καλαμίνα σε ποσοστά 5% και 10% κ.β. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στον πίνακα 12.13.

Πίνακας 12.13: αποτελέσματα μετρήσεων ανοικτού πορώδους για δοκίμια σκυροδέματος εμβαπτισμένα σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

ΧΡΟΝΟΣ ΕΜΒΑΠΤΙΣΗΣ ΣΕ NaCl 3,5% κ.β: 28 ημέρες

	ξηρή μάζα (g)	μάζα μέσα στο νερό (g)	μάζα SSD (g)	πορώδες (%)	Απορρόφηση νερού	Φαινόμενη Πυκνότητα (kg/m ³)
αναφοράς	1910,2	1185,9	2174,6	26,74	13,841	1928
5% KAL	2003,4	1266,1	2279,3	27,23	13,772	1973
10% KAL	1984,0	1250,1	2230,3	25,13	12,414	2020

ΧΡΟΝΟΣ ΕΜΒΑΠΤΙΣΗΣ ΣΕ NaCl 3,5% κ.β: 70 ημέρες

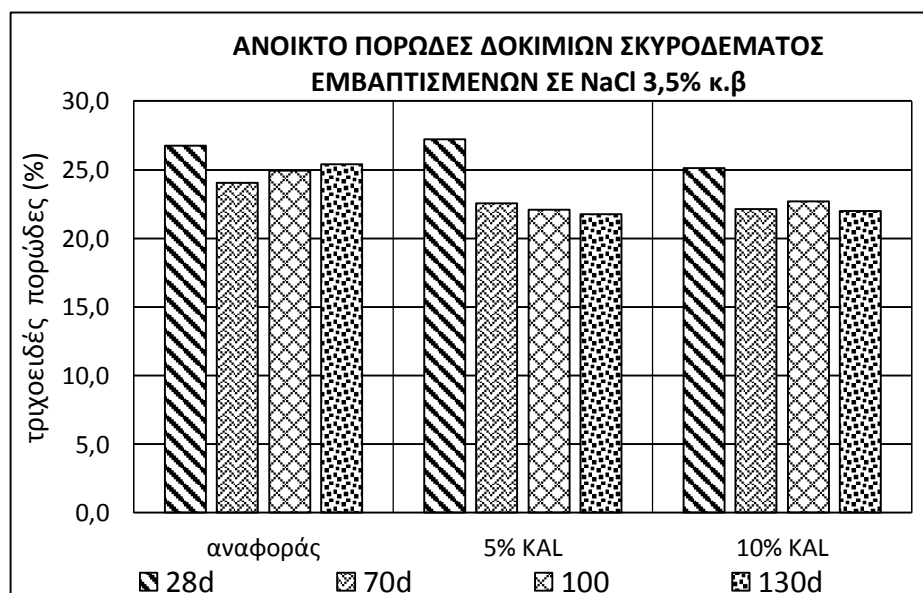
	ξηρή μάζα (g)	μάζα μέσα στο νερό (g)	μάζα SSD (g)	Πορώδες (%)	Απορρόφηση νερού	Φαινόμενη Πυκνότητα (kg/m ³)
αναφοράς	1944,2	1200,3	2180,0	24,07	12,128	1981
5% KAL	2051,4	1273,0	2278,4	22,58	11,066	2036
10% KAL	2014,0	1254,6	2229,8	22,13	10,715	2061

ΧΡΟΝΟΣ ΕΜΒΑΠΤΙΣΗΣ ΣΕ NaCl 3,5% κ.β: 100 ημέρες

	ξηρή μάζα (g)	μάζα μέσα στο νερό (g)	μάζα SSD (g)	πορώδες (%)	απορρόφηση νερού	Φαινόμενη Πυκνότητα (kg/m ³)
αναφοράς	1951,6	1217,9	2195,6	24,96	12,503	1992
5% KAL	2082,7	1300,4	2304,7	22,11	10,660	2070
10% KAL	2031,4	1278,1	2252,7	22,71	10,894	2080

ΧΡΟΝΟΣ ΕΜΒΑΠΤΙΣΗΣ ΣΕ NaCl 3,5% κ.β: 130 ημέρες

	ξηρή μάζα (g)	μάζα μέσα στο νερό (g)	μάζα SSD (g)	πορώδες (%)	απορρόφηση νερού	Φαινόμενη Πυκνότητα (kg/m ³)
αναφοράς	1953,2	1223,8	2201,6	25,41	12,720	1994
5% KAL	2086,7	1300,6	2305,2	21,75	10,471	2073
10% KAL	2040,6	1280,6	2255,3	22,02	10,518	2089



Σχήμα 12.20: Τριχοειδές πορώδες (%) σε σκυρόδεμα με πρόσθετο καλαμίνα σε NaCl 3,5% κ.β

Το σχήμα 12.20 δίνει διάγραμμα των μετρήσεων ανοικτού πορώδους συναρτήσει του χρόνου εμφάνισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β. Από το διάγραμμα προκύπτουν τα εξής:

- Η προσθήκη καλαμίνας ως μέρος αντικατάστασης του τσιμέντου μειώνει το πορώδες σε σκυρόδεμα εντός διαλύματος NaCl,
- Στα δοκίμια αναφοράς το πορώδες αυξάνεται με το χρόνο εμφάνισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β,
- Το πορώδες και των τριών (3) συνθέσεων σκυροδέματος μειώνεται μετά τις 28 ημέρες εξαιτίας της αντίδρασης του C₃A και των ιόντων Cl⁻ προς τη δημιουργία άλατος (*friedel's salt*) (Maes and De Belie, 2014),
- Το ολικό πορώδες των δοκιμίων με καλαμίνα είναι αυξημένο σε σχέση με τα δοκίμια χωρίς πρόσθετο (σχήμα 12.19).

12.2.9 Ηλεκτροχημικός προσδιορισμός του ρυθμού διάβρωσης των οπλισμών

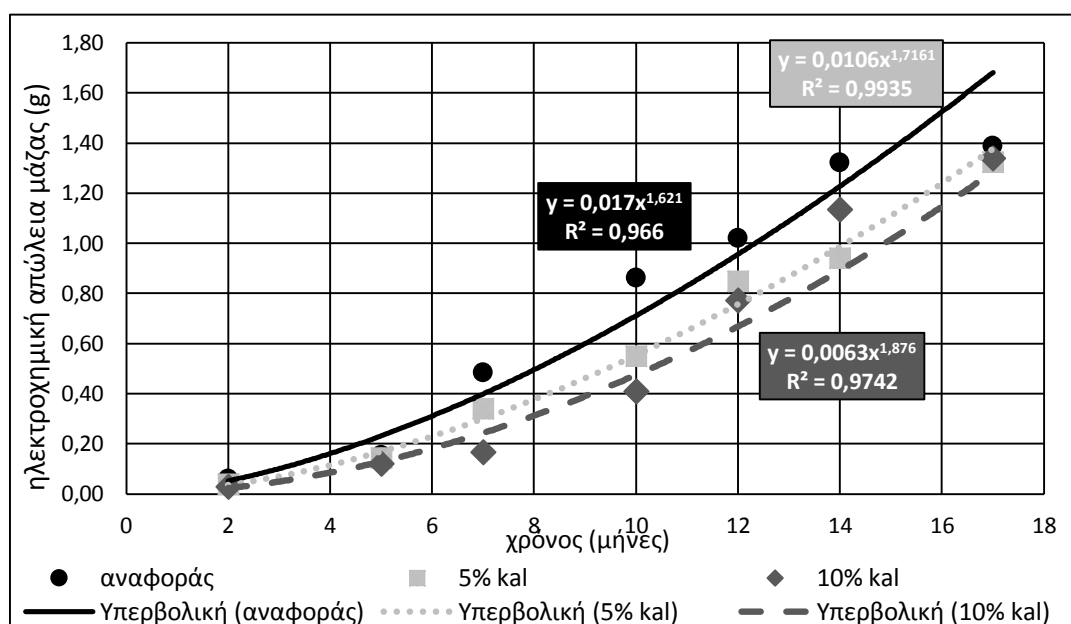
12.2.9.1 Μετρήσεις Γραμμικής πόλωσης σε εμφατισμένα δοκίμια τσιμεντοκονίας σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Η διάβρωση των οπλισμών εντός του σκυροδέματος εκτιμήθηκε με μετρήσεις ηλεκτροχημικών παραμέτρων (i_{corr} , CR) με τη μέθοδο της γραμμικής πόλωσης (Linear Polarization Resistance – LPR) σε οπλισμένα κυλινδρικά δοκίμια τσιμεντοκονίας διαμέτρου 50mm και ύψους 100mm. Το περιβάλλον διάβρωσης των δοκιμίων ήταν μερική εμφάνιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β. Τα υλικά κατασκευής των δοκιμίων ήταν ασβεστολιθική άμμος λατομείου, τσιμέντο CEM I 42.5N και νερό δικτύου ΕΜΠ. Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ως ηλεκτρόδιο αναφοράς κεκορεσμένος καλομέλανας (SCE), ως ηλεκτρόδιο εργασίας ο υπό εξέταση χάλυβας και βοηθητικό ηλεκτρόδιο ράβδος άνθρακα κυκλικής διατομής Φ5, μήκους 100mm.

Η πειραματική διάταξη για τη διεξαγωγή των ηλεκτροχημικών μετρήσεων περιελάμβανε ποτενσιοστάτη/γαλβανοστάτη της E.G & Model 263 συνδεδεμένο με υπολογιστή για την καταγραφή των πειραματικών δεδομένων. Για την επεξεργασία των ηλεκτροχημικών αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε λογισμικό Softcorr III της εταιρίας E.G & G Princeton Research. Το βήμα σάρωσης του δυναμικού ήταν (Scan rate) 0.2mV/s ενώ η πόλωση του δομικού χάλυβα έγινε στην περιοχή ±20mV από το δυναμικό διάβρωσης του E_{corr} . Η απώλεια μάζας των οπλισμών υπολογίστηκε από το νόμο του *Faraday*. Οι μέσοι όροι των αποτελεσμάτων της πυκνότητας ρεύματος i_{corr} και ο υπολογισμός της απώλειας μάζας δίνονται στον πίνακα 12.14.

Πίνακας 12.14: Αποτελέσματα i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) και ηλεκτροχημικής απώλειας μάζας σε χάλυβες εγκιβωτισμένους σε τσιμεντοκονίες συναρτήσεως του χρόνου εμφάπτισης σε NaCl 3,5% κ.β

χρόνος (μήνες)	i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)			απώλεια μάζας (g)		
	5% kal	10% kal	αναφοράς	5% kal	10% kal	αναφοράς
2	23,84	18,61	37,89	0,0363	0,0283	0,0577
5	37,23	31,38	40,06	0,1417	0,1194	0,1524
7	63,64	30,80	90,41	0,3390	0,1641	0,4816
10	72,20	53,60	113,02	0,5494	0,4079	0,8601
12	92,72	84,51	111,63	0,8467	0,7718	1,0194
14	88,08	106,30	123,82	0,9384	1,1325	1,3191
17	102,20	103,30	107,10	1,3221	1,3364	1,3855



Σχήμα 12.21: Ηλεκτροχημική απώλεια μάζας σε g συναρτήσεως του χρόνου εμφάπτισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β για οπλισμούς εγκιβωτισμένους σε δοκίμια τσιμεντοκονίας με καλαμίνα

Το σχήμα 12.21 παρουσιάζει σε διάγραμμα την απώλεια μάζας των οπλισμών συναρτήσεως του χρόνου εμφάπτισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β. Από το σχήμα προκύπτει ότι οι οπλισμοί των δοκιμών χωρίς πρόσθετο διαβρώνονται εντονότερα σε σχέση με τις υπόλοιπες κατηγορίες δοκιμών. Επίσης φαίνεται ότι η αύξηση του ποσοστού αντικατάστασης του τσιμέντου από καλαμίνα πιθανόν να ελαττώνει τη διάβρωση του οπλισμού.

12.2.10 Σταθμικός προσδιορισμός απώλειας μάζας οπλισμών

Για τον προσδιορισμό της απώλειας μάζας των οπλισμών οι χάλυβες πριν τον εγκιβωτισμό τους στα δοκίμια, καθαρίστηκαν με απιονισμένο νερό και ακετόνη και

στη συνέχεια ζυγίστηκαν σε ζυγό με ακρίβεια 0,1mg. Τα δοκίμια τσιμεντοκονίας έσπασαν σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, οι σπλισμοί καθαρίστηκαν από τα εναπομείναντα τσιμέντα και τα προϊόντα διάβρωσης και ζυγίστηκαν σε ζυγό ακριβείας. Η απώλεια μάζας προέκυψε από τον τύπο: $\Delta m (\%) = \frac{M_{αρχ} - M_{τελ}}{M_{αρχ}} \times 100\%$,

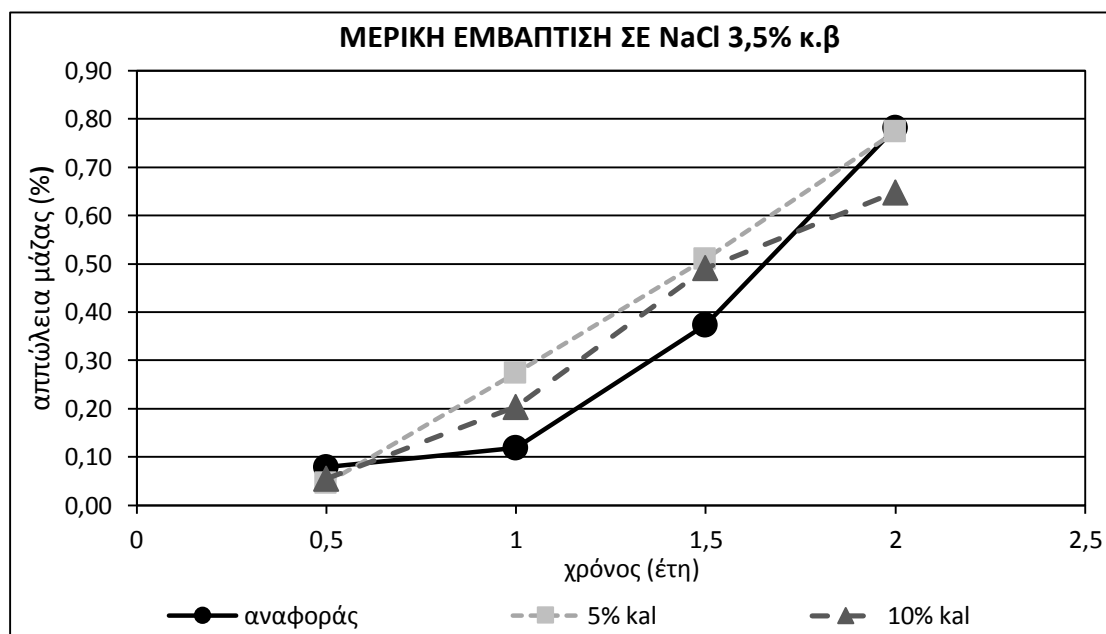
ενώ ο ρυθμός διάβρωσης από: $CR = \frac{8,76 \times 10^7 \times \Delta m}{A \times T \times d}$

Όπου, $\Delta m = m_{αρχ} - m_{τελ}$ (g), T ο χρόνος έκθεσης των δοκιμίων (h) και A η επιφάνεια του σπλισμού ($A = 40 \text{cm}^2$).

Για την κατασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο CEM I 42.5N, ασβεστολιθική άμμος και νερό δικτύου ΕΜΠ. Ο λόγος νερό:τσιμέντο ήταν 0.65 σε όλες τις σειρές δοκιμίων.

12.2.10.1 Απώλειες μάζας σπλισμών σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Για τον υπολογισμό της απώλειας μάζας των σπλισμών σε περιβάλλον χλωριόντων, σπλισμένα δοκίμια τσιμεντοκονίας εμβαπτίστηκαν μερικώς σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β σε εργαστηριακό περιβάλλον. Συγκεκριμένα κατασκευάστηκαν τρεις (3) συνθέσεις κονιαμάτων, μία χωρίς πρόσθετο (αναφοράς) και δύο που περιείχαν ως υλικό αντικατάστασης του τσιμέντου καλαμίνα σε ποσοστά 5% & 10% κ.β. Για κάθε κατηγορία παρασκευάστηκαν οχτώ (8) κυλινδρικά δοκίμια τα οποία έσπασαν ανά δύο κάθε έξι (6) μήνες ώστε να μετρηθεί η απώλεια μάζας των χαλύβων.



Σχήμα 12.22: Απώλεια μάζας σπλισμών εγκιβωτισμένων σε δοκίμια τσιμεντοκονίας με πρόσθετο καλαμίνα και εμβάπτιση σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β

Στο σχήμα 12.22 δίνεται διάγραμμα της απώλειας μάζας των οπλισμών συναρτήσει του χρόνου για εμβαπτισμένα δοκίμια σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι μετά από 24 μήνες στο διαβρωτικό περιβάλλον οι οπλισμοί που βρίσκονται εγκιβωτισμένοι σε δοκίμια που περιέχουν 10% καλαμίνα εμφανίζονται λιγότερο διαβρωμένοι σε σχέση με τα δοκίμια χωρίς πρόσθετο. Ειδικότερα η προσθήκη 10% φαίνεται να μειώνει τη διάβρωση των οπλισμών κατά 13,4% συγκριτικά με την κατηγορία των δοκιμίων αναφοράς.

12.2.10.2 Απώλειες μάζας οπλισμών στην ατμόσφαιρα και σε θάλαμο επιταχυνόμενης ενανθράκωσης

Η εκτίμηση της διάβρωσης των οπλισμών σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον πραγματοποιήθηκε με έκθεση οπλισμένων δοκιμίων τσιμεντοκονίας στην ατμόσφαιρα εντός εργαστηρίου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 12.15.

Πίνακας 12.15: Απώλεια μάζας και ρυθμός διάβρωσης οπλισμών σε δοκίμια εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα και πρόσθετο καλαμίνα

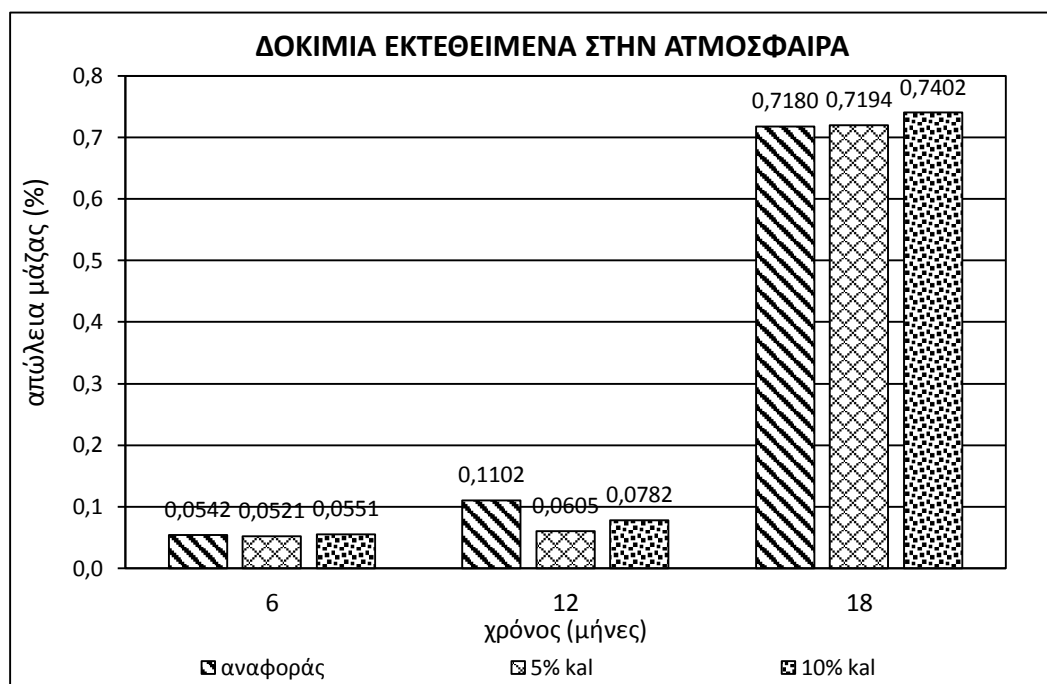
Χρόνος (μήνες)	5% kal		10% kal		αναφοράς	
	Απώλεια μάζας (%)	Ρυθμός διάβρωσης (μm/y)	Απώλεια μάζας (%)	Ρυθμός διάβρωσης (μm/y)	Απώλεια μάζας (%)	Ρυθμός διάβρωσης (μm/y)
6	0,0521	2,790	0,0551	3,055	0,0542	3,022
12	0,0605	3,188	0,0782	4,144	0,1102	6,243
18	0,7194	37,878	0,7402	37,857	0,7180	39,803

Η διάβρωση των οπλισμών σε επιταχυνόμενες συνθήκες διάβρωσης εκτιμήθηκε με παραμονή οπλισμένων δοκιμίων τσιμεντοκονίας σε θάλαμο επιταχυνόμενης ενανθράκωσης στο εργαστήριο Οπλισμένου σκυροδέματος της εταιρίας TITAN Α.Ε. οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ανά εβδομάδα για συνολικό χρονικό διάστημα πέντε (5) εβδομάδων. Οι συνθήκες εντός του θαλάμου ήταν $C_{CO_2}=12,5\%$, $RH=64\%$ και $T=25^{\circ}C$. Πρέπει να σημειωθεί ότι εξαιτίας της υψηλής συγκέντρωσης CO_2 τα δοκίμια ενανθρακώθηκαν πλήρως, από τις πρώτες 7 ημέρες παραμονής στο θάλαμο.

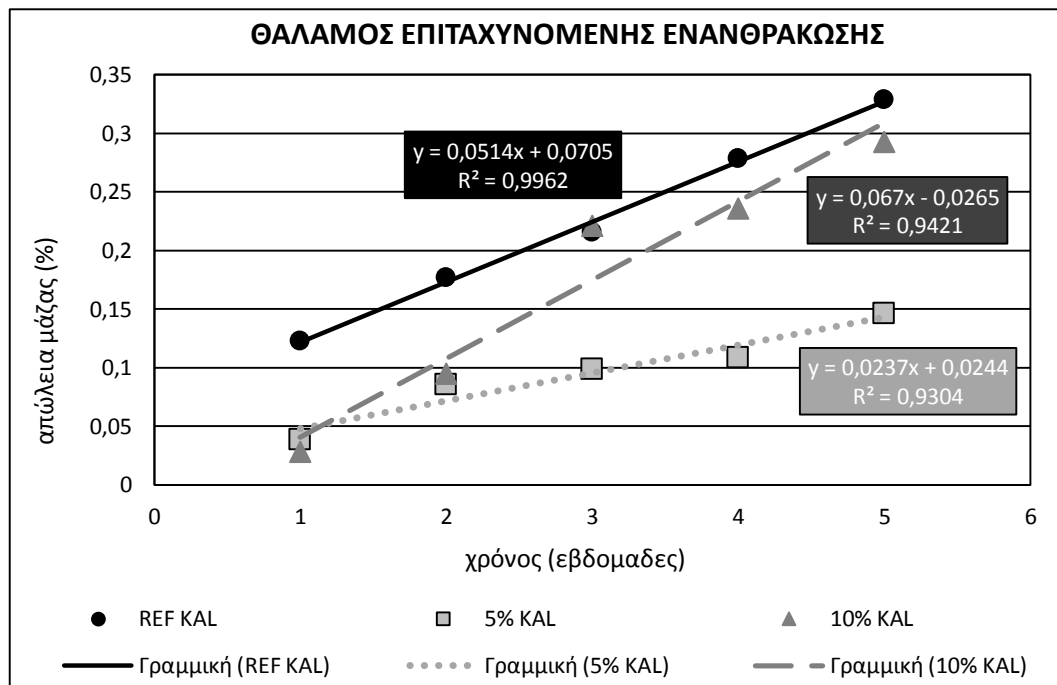
Τα σχήματα 12.23 και 12.24 παρουσιάζουν την απώλεια μάζας των χαλύβων για δοκίμια εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα και εντός θαλάμου ενανθράκωσης αντίστοιχα. Από τα σχήματα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Οι οπλισμοί των δοκιμίων όλων των κατηγοριών που εκτέθηκαν σε ατμοσφαιρικές συνθήκες παρουσίασαν περίπου ίδιες τιμές απώλειας μάζας,
- Η μεγάλη μείωση της απώλειας μάζας των χαλύβων από τους 12 στους 18 μήνες οφείλεται στην πλήρη ενανθράκωση των τσιμεντοκονιαμάτων,

- Σε επιταχυνόμενες συνθήκες διάβρωσης η προσθήκη 5% καλαμίνα φαίνεται να μειώνει την απώλεια μάζας των σπλισμών.



Σχήμα 12.23: Απώλεια μάζας σπλισμών εγκιβωτισμένων σε δοκίμια τσιμεντοκονίας με πρόσθετο καλαμίνα και έκθεση στην ατμόσφαιρα



Σχήμα 12.24: Απώλεια μάζας σπλισμών εγκιβωτισμένων σε δοκίμια τσιμεντοκονίας με πρόσθετο καλαμίνα με παραμονή σε θάλαμο ενανθράκωσης

12.2.11 Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης και στερεοσκοπία

12.2.11.1 Στερεοσκοπική παρατήρηση δοκιμών με πρόσθετο *kal*

Η οπτική παρατήρηση των δοκιμών σκυροδέματος πραγματοποιήθηκε με ψηφιακό στερεοσκόπιο στις 130 ημέρες μερικής εμβάπτισης σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β.

ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ 5% ΚΑΛΑΜΙΝΑΣ



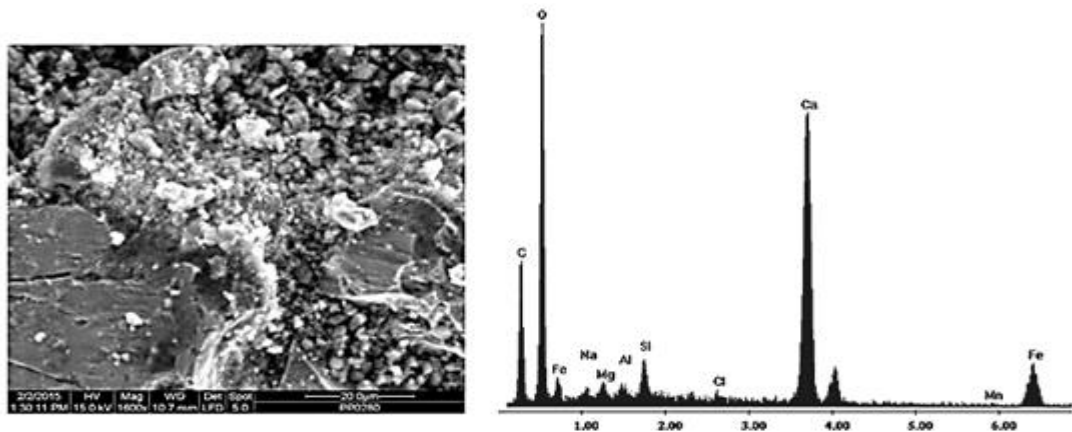
Σχήμα 12.25: Δοκίμια σκυροδέματος με 5% καλαμίνα στις 130 ημέρες εμβάπτισης σε NaCl 3,5% κ.β

ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ 10% ΚΑΛΑΜΙΝΑΣ

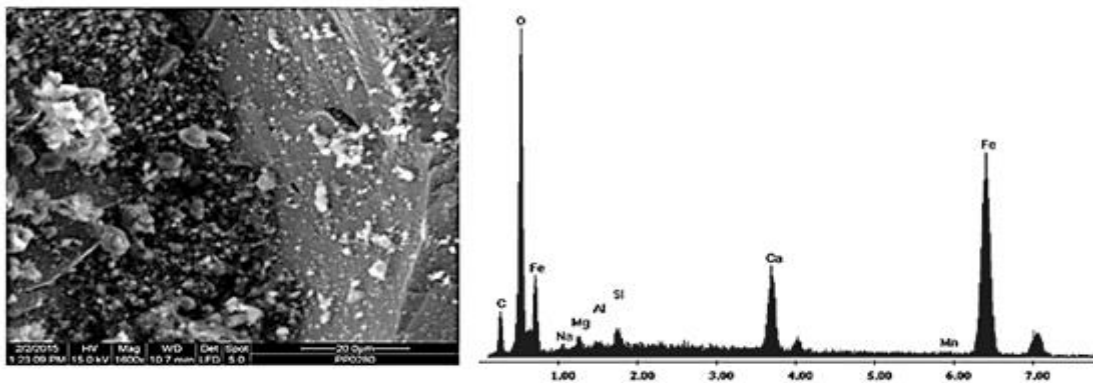


Σχήμα 12.26: Δοκίμια σκυροδέματος με 10% καλαμίνα στις 130 ημέρες εμβάπτισης σε NaCl 3,5% κ.β

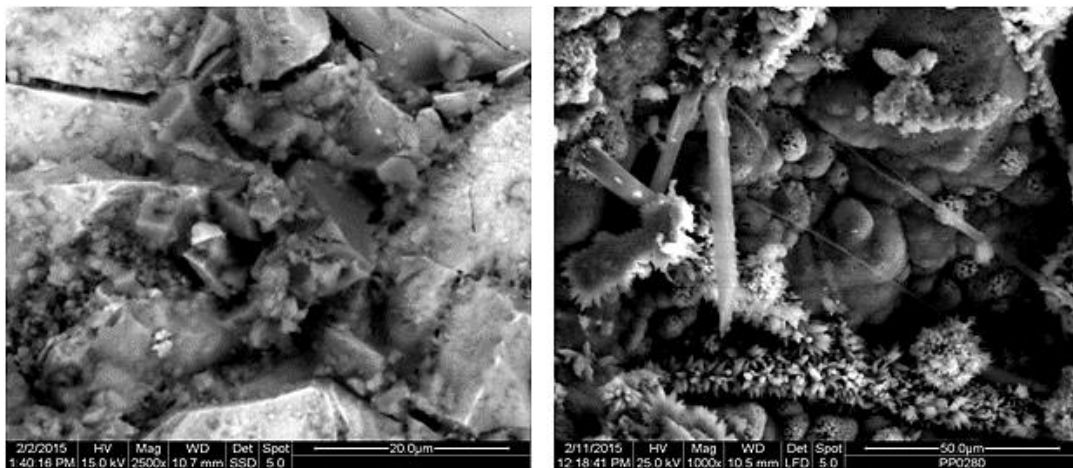
12.2.11.2 Οπτική παρατήρηση σε Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (SEM)



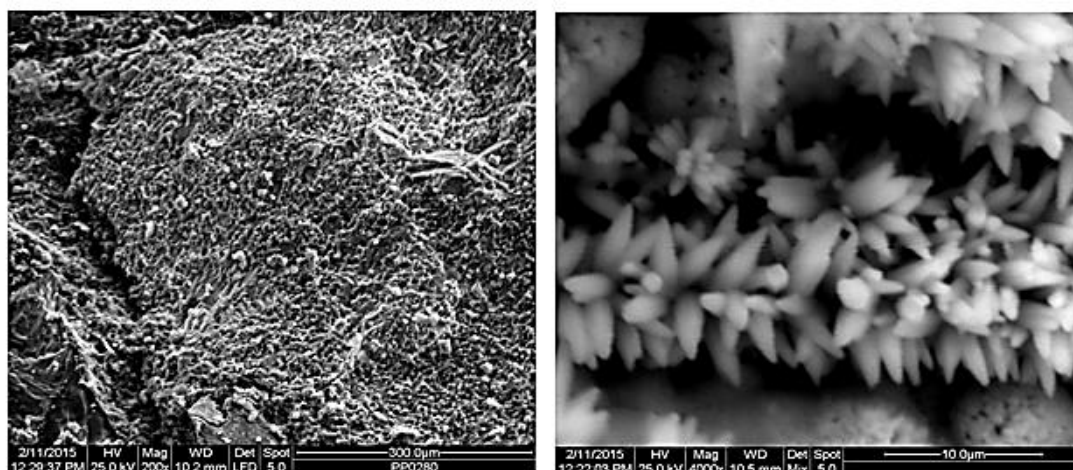
Σχήμα 12.27: Οπτική παρατήρηση x1600 δοκιμίου τσιμεντοκονίας με πρόσθετο καλαμίνια στις 56 ημέρες



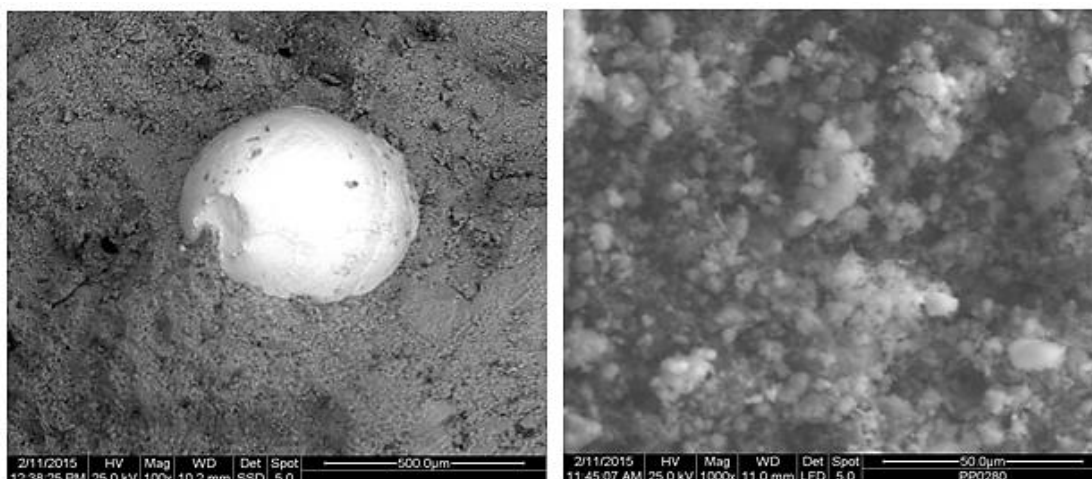
Σχήμα 12.28: Οπτική παρατήρηση x1600 τσιμεντοκονίας με πρόσθετο καλαμίνια στις 56 ημέρες. Στη φωτογραφία διακρίνεται η δεπιφάνεια μεταξύ της καλαμίνιας (αριστερά) και του τσιμέντου (δεξιά)



Σχήμα 12.29: Οπτική παρατήρηση x2500 (αριστερά) & x1000 (δεξιά) δοκιμίου τσιμεντοκονίας με πρόσθετο καλαμίνια και εμβάπτιση σε NaCl 3,5% κ.θ για 24 μήνες



Σχήμα 12.30: Οπτική παρατήρηση x200 (αριστερά) & x4000 (δεξιά) δοκιμίου τσιμεντοκονίας με πρόσθετο καλαμίνα και εμφάπτιση σε NaCl 3,5% κ.β για 24 μήνες

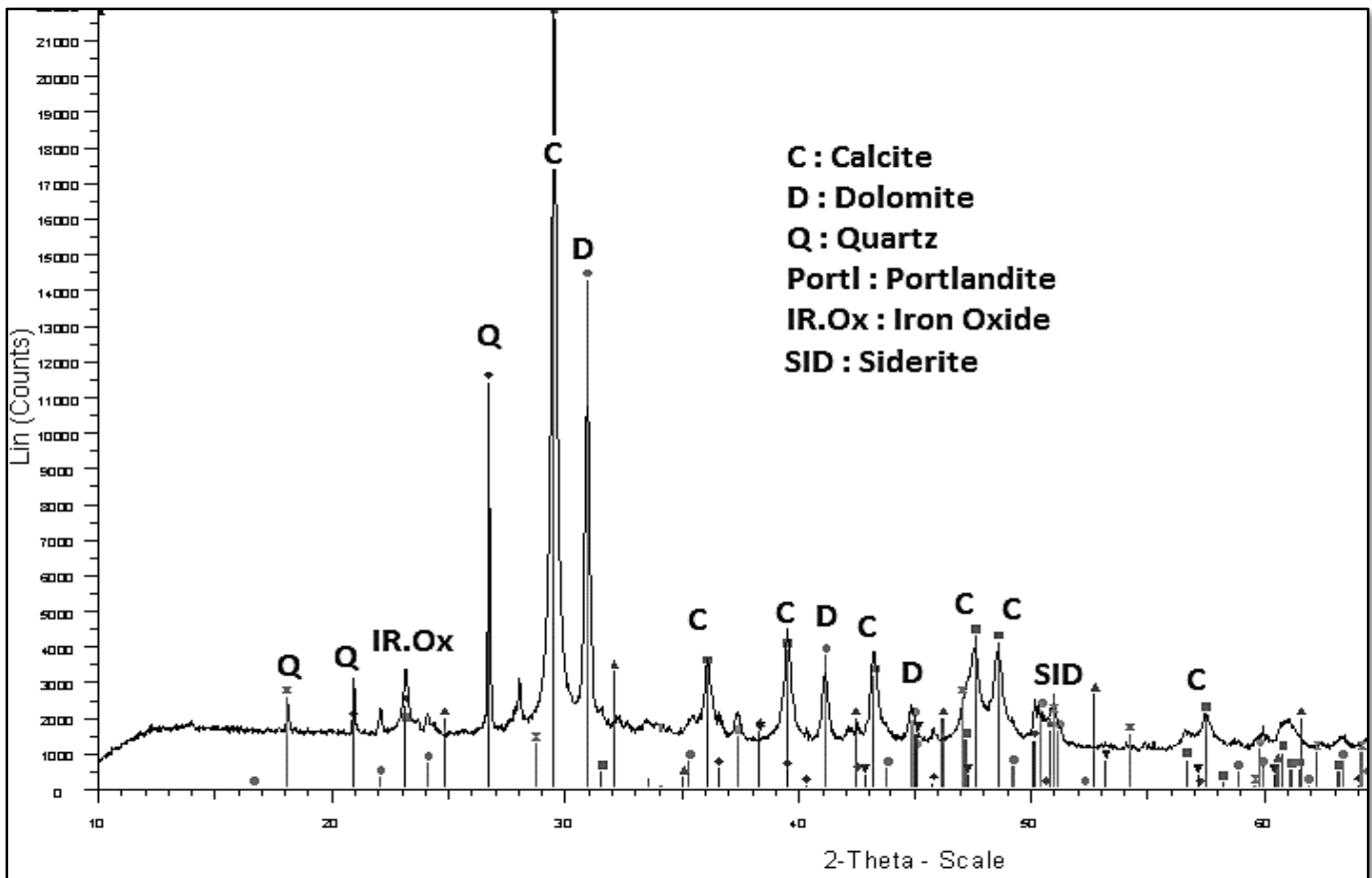


Σχήμα 12.31: Δοκίμιο τσιμεντοκονίας x1000 (δεξιά) και σφαιρίδιο Fe (αριστερά) x100

12.2.12 Περιθλαση ακτίνων Χ

Ο προσδιορισμός των κρυσταλλικών φάσεων πραγματοποιήθηκε με την τεχνική της περιθλασης ακτίνων Χ (XRD) σε δοκίμια τσιμεντοκονίας εμφαπτισμένα σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β για χρονικό διάστημα 130 ημερών. Το περιθλασίμετρο ήταν το D8 ADVANCE της εταιρίας BRUKER και η ανάλυση πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο ΛΗΔΡΑ του Πανεπιστημίου της Κύπρου.

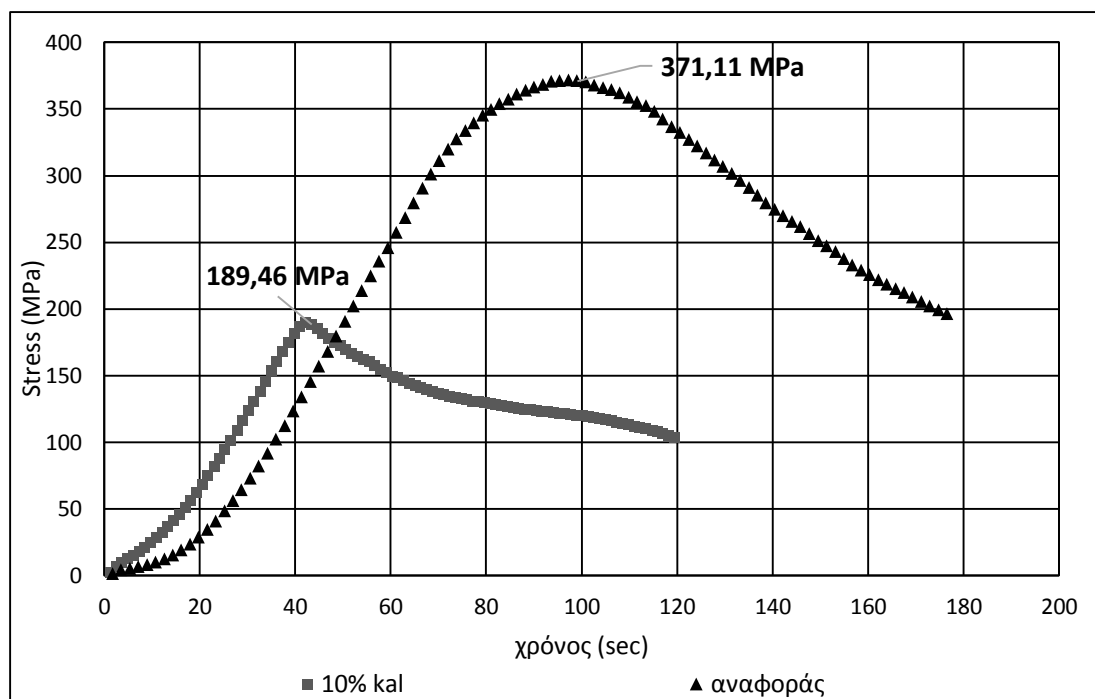
Το βήμα σάρωσης των δειγμάτων ήταν 0,033 (2 μοίρες/λεπτό) και η γωνία σάρωσης 10 - 65 μοίρες.



Σχήμα 12.32: XRD σε δοκίμιο τσιμεντοκονίας με προσθήκη 10% καλαμίνα σε εμβαπτισμένο σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β για χρονικό διάστημα 130 ημερών

12.2.13 Συνάφεια οπλισμού – σκυροδέματος

Η συνάφεια του οπλισμού με το σκυρόδεμα εξετάστηκε με τη δοκιμή εξόλκευσης χάλυβα (pull-out test). Για τη δοκιμή κατασκευάστηκαν κυβικά δοκίμια ακμής 200mm στα οποία τοποθετήθηκαν ομοαξονικά νευροχάλυβες τύπου **Tempcore B500C** $\Phi=16\text{mm}$. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε στις 28 ημέρες έπειτα από συντήρηση και για την κατασκευή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν ασβεστολιθικά αδρανή, τσιμέντο CEM II 42.5N και λόγος $W/C=0,65$. Η δύναμη εξόλκευσης ήταν 0,05MPa/s. Η τάση σε συνάρτηση με το χρόνο εξόλκευσης του χάλυβα παρουσιάζεται στο σχήμα 11.28.



Σχήμα 12.33: Τάση σε MPa συναρτήσει του χρόνου εξόλκευσης χάλυβα από σκυρόδεμα με 10% καλαμίνα

12.3 ΜΕΡΙΚΟ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ 3 - ΒΑΘΜΟΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΠΟΥ ΠΡΟΣΦΕΡΕΙ Η ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΚΑΛΑΜΙΝΑΣ ΣΤΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά την προστασία του οπλισμού από τη διάβρωση και τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος όταν αντικατασταθεί μέρος του τσιμέντου από καλαμίνα χαλυβουργίας. Η σιδηρούχα σκωρία χρησιμοποιήθηκε σε δύο ποσοστά προσθήκης 5% & 10% και αποτελείται από οξείδια του Σιδήρου σε ποσοστό >95%. Η πειραματική διαδικασία περιελάμβανε δοκιμές μηχανικών ιδιοτήτων σκυροδέματος, φυσικοχημικές μετρήσεις και μετρήσεις ηλεκτροχημικών παραμέτρων.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα πειραματικά αποτελέσματα είναι τα κάτωθι:

- Η προσθήκη 5% καλαμίνας μειώνει την ενανθράκωση σε δοκίμια σκυροδέματος εμβαπτισμένα σε διάλυμα NaCl 3,5% κ.β,
- Η αντικατάσταση του τσιμέντου από σιδηρούχα σκωρία μέχρι συγκεντρώσεως 10% ελαττώνει τη συγκέντρωση των ολικών Cl⁻ έπειτα από 24 μήνες μερικής εμβάπτισης σε NaCl,

- Οι μηχανικές αντοχές (θλιπτική, εφελκυστική, κάμψη), εμφανίζονται μειωμένες στα σκυροδέματα με καλαμίνα μέχρι τις 28 ημέρες,
- Στις 70 ημέρες τα δοκίμια με καλαμίνα επιτυγχάνουν εφελκυστική αντοχή ανώτερη των δοκιμών χωρίς πρόσθετο,
- Το ποσοστό προσθήκης της καλαμίνας (μέχρι 10%) δεν επηρεάζει σημαντικά τη θλιπτική αντοχή από τις 100 ημέρες και μετά,
- Το μέτρο Ελαστικότητας (στατικό και δυναμικό) στα δοκίμια με καλαμίνα εμφανίζεται υψηλότερο από τα αναφοράς,
- Η απορροφητικότητα του σκυροδέματος (σε μεθανόλη) με πρόσθετο την εξεταζόμενη σκωρία μειώθηκε σημαντικά και στα δύο ποσοστά προσθήκης. Η μεγαλύτερη μείωση παρατηρήθηκε στην προσθήκη 10% κατά 63,4% σε σχέση με το σκυρόδεμα χωρίς καλαμίνα,
- Η αντικατάσταση του τσιμέντου από καλαμίνα μέχρι ποσοστού 10% βοηθάει στη μείωση του ανοικτού πορώδους σε εμβαπτισμένα δοκίμια εντός διαλύματος NaCl 3,5% κ.β,
- Βασιζόμενοι στην ηλεκτροχημική απώλεια μάζας η προσθήκη καλαμίνας μείωσε τη διάβρωση των οπλισμών σε δοκίμια τσιμεντοκονίας εμβαπτισμένα σε NaCl 3,5% κ.β.
- Από τα αποτελέσματα του σταθμικού προσδιορισμού της απώλειας μάζας, προκύπτει ότι οι οπλισμοί των δοκιμών τσιμεντοκονίας με 10% καλαμίνα εμφανίζονται κατά 13,4% λιγότερο διαβρωμένοι από τα αναφοράς. Τα αποτελέσματα αφορούν ως διαβρωτικό περιβάλλον μερική εμβάπτιση σε NaCl 3,5% κ.β.

13 ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

13.1 ΣΥΖΗΤΗΣΗ – Προσθήκη παραπροϊόντος από την παραγωγή EMD (κωδ. EMDW)

Το πρώτο κατά σειρά πρόσθετο που αναπτύχθηκε στη διατριβή ήταν το παραπροϊόν που προκύπτει κατά την παραγωγική διαδικασία του Ηλεκτροχημικού Διοξειδίου του Μαγγανίου (EMD) το οποίο αντικατέστησε το τσιμέντο σε ποσοστά 5% και 10% κ.β. Τα συγκεκριμένα ποσοστά προσθήκης επιλέχθηκαν, διότι πριν τη διεξαγωγή των πειραμάτων κατασκευάστηκαν δοκίμια τσιμεντοκονίας που περιείχαν μεγαλύτερες περιεκτικότητες σε πρόσθετο (20% & 25% κ.β) αλλά οι αντοχή τους στις 28 ημέρες υπολογισμένη με τη μέθοδο της κρουσιμετρίας ήταν πολύ χαμηλή.

Από την έκθεση των δοκιμών σκυροδέματος σε διάλυμα Na_2SO_4 5% κ.β προέκυψε ανομοιόμορφη διάβρωση των δοκιμών μεταξύ δύο ζωνών, η μία αφορά το τμήμα του δοκιμίου εκτεθειμένο στην ατμόσφαιρα και μία το εμβαπτισμένο τμήμα. Η αποσάθρωση στην 'ατμοσφαιρική' ζώνη (εκτός διαλύματος Na_2SO_4) οφείλεται σε άνοδο των αλάτων με τριχοειδή δράση και στη συνέχεια εξάτμιση του νερού, οπότε η συγκέντρωση του Na_2SO_4 υπερβαίνει τη συγκέντρωση κορεσμού με αποτέλεσμα την κρυστάλλωση του θειικού Νατρίου στους πόρους του σκυροδέματος προκαλώντας εσωτερικές τάσεις (Irassar et al., 1996). Σύμφωνα με άλλους ερευνητές (P.K. Mehta, 1986) οι τάσεις αυτές είναι αρκετές για να δημιουργήσουν ρωγμές στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Όσον αφορά τη ζώνη του σκυροδέματος εντός του διαλύματος Na_2SO_4 υπάρχει δημιουργία εντριγκίτη ο οποίος προκαλεί επίσης διόγκωση του σκυροδέματος και τη δημιουργία εσωτερικών ρωγμών (Atahan and Dikme, 2011), (Santhanam et al., 2002).

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων των μηχανικών αντοχών του σκυροδέματος σε περιβάλλον θειικών ιόντων προέκυψε βελτίωση της θλιπτικής αντοχής με προσθήκη 10% EMDW μέχρι τις 130 ημέρες μερικής εμβάπτισης (Σχήμα 10.19). Στη βιβλιογραφία αναφέρεται (Nehdi et al., 2014) ότι παρά την έντονη αποσάθρωση που παρατηρείται στο εκτιθέμενο τμήμα, ο πυρήνας του δοκιμίου παραμένει συμπαγής με αποτέλεσμα η θλιπτική αντοχή να αυξάνεται. Στις 130 ημέρες παρατηρείται μείωση του μέτρου ελαστικότητας (Σχήμα 10.28) και της θλιπτικής αντοχής των δοκιμών αναφοράς εξαιτίας της δημιουργίας εντριγκίτη στο κατώτερο τμήμα που βρίσκεται εμβαπτισμένο στο διάλυμα (Nehdi et al., 2014). Τη δημιουργία εντριγκίτη στο εμβαπτισμένο τμήμα του σκυροδέματος αποδεικνύουν και τα αποτελέσματα των μετρήσεων απορροφητικότητας (Σχήμα 10.32) σύμφωνα με τα οποία, η εμβαπτισμένη πλευρά των δοκιμών ενώ αρχικά έχει μικρότερη απορροφητικότητα από την εκτιθέμενη πλευρά, στη συνέχεια, το τμήμα εντός του διαλύματος έχει μεγαλύτερη

εξαιτίας των εφελκυστικών τάσεων και των ρωγμών που δημιουργεί το συγκεκριμένο θειικό άλας (Χουσιδής N. et al., 2015a). Η υστέρηση των μηχανικών ιδιοτήτων στο σκυρόδεμα που περιείχε το προσθετό EMDW συγκριτικά με το σκυρόδεμα αναφοράς πιθανόν να οφείλεται στην ύπαρξη γύψου που περιέχει το συγκεκριμένο παραπροϊόν και στη μείωση του Ca(OH)_2 εξαιτίας της αντικατάστασης του 10% κ.β του τσιμέντου από το πρόσθετο (Atahan and Dikme, 2011). Πέρα από το γεγονός αυτό όμως, η θλιπτική αντοχή δείχνει να αυξάνεται με το χρόνο σε αντίθεση με τα δοκίμια αναφοράς των οποίων η θλιπτική αντοχή ελαττώνεται στις 130 ημέρες (Σχήμα 10.19).

Από τα αποτελέσματα της απώλειας μάζας των οπλισμών (Σχήμα 10.46) και των ηλεκτροχημικών μετρήσεων σε περιβάλλον Na_2SO_4 (Σχήμα 10.43), προέκυψε σημαντική διάβρωση στα δοκίμια με το παραπροϊόν, η οποία ήταν πιο έντονη στο 10% προσθήκης. Το παραπροϊόν όπως έχει αναφερθεί περιέχει γύψο με αποτέλεσμα τη δημιουργία επιπλέον ποσότητας εντριγκίτη στους πόρους του σκυροδέματος και τη ρωγμάτωση του.

Στο σκυρόδεμα το οποίο εκτίθεται σε περιβάλλον NaCl το C_3A και το C_4AF όπως είναι γνωστό, αντιδρούν με τα ιόντα Cl^- δημιουργώντας χλωριούχα άλατα (π.χ Friedel's salt) μειώνοντας έτσι το πορώδες (Maes and De Belie, 2014) και προστατεύοντας με αυτόν τον τρόπο τον οπλισμό (Chousidis et al., 2015). Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα των μηχανικών ιδιοτήτων το σκυρόδεμα με το πρόσθετο που εμβαπτίστηκε μερικώς σε διάλυμα NaCl εμφάνισε χαμηλότερες αντοχές από τα δοκίμια χωρίς πρόσθετο που οφείλεται στη μείωση της ποσότητας του τσιμέντου και στη γύψο, η οποία σε αλκαλικό περιβάλλον ($\text{pH}>12$) μετατρέπεται σε εντριγκίτη. Από τις ηλεκτροχημικές μετρήσεις και την απώλεια μάζας των οπλισμών είναι φανερό ότι οι οπλισμοί οι οποίοι βρίσκονται εγκιβωτισμένοι σε δοκίμια με το πρόσθετο, διαβρώνονται λιγότερο από τα δοκίμια χωρίς πρόσθετο. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από τις μετρήσεις του πορώδους και της τριχοειδούς απορροφητικότητας όπου παρατηρείται μείωση. Σύμφωνα με τον πίνακα 8.9 όπου δίνεται η χημική σύσταση του EMDW, το παραπροϊόν περιέχει 9.8% Fe και 15% Ca, στοιχεία τα οποία πιθανόν να συμβάλλουν στη δημιουργία άλατος Friedel στο οποίο οφείλεται η μείωση του πορώδους και η προστασία του οπλισμού. Επίσης, η ύπαρξη Αλουνίτη και ζαροσίτη στο πρόσθετο που χρησιμοποιήθηκε, αυξάνει το ποσοστό του C_4AF επηρεάζοντας το χρόνο ενυδάτωσης και το σχηματισμό των ορυκτολογικών φάσεων στο σκυρόδεμα (Tsakiridis et al., 2005), (Katsioti et al., 2005).

13.2 ΣΥΖΗΤΗΣΗ – Προσθήκη υπτάμενης τέφρας (κωδ. FAGER, FAPTOL)

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η χρήση υπτάμενης τέφρας στο οπλισμένο σκυρόδεμα με στόχο την προστασία του οπλισμού από τη διάβρωση και τη βελτίωση

των μηχανικών ιδιοτήτων του έπειτα από έκθεση σε περιβάλλον NaCl. Συγκρίθηκαν δύο ασβεστοτικές ιπτάμενες τέφρες διαφορετικής χημικής σύστασης.

Ιπτάμενη Τέφρα υψηλής συγκεντρώσεως αργιλικών ορυκτών (κωδ. FAGER)

Η συγκεκριμένη τέφρα περιέχει σημαντικές ποσότητες αργιλικών ορυκτών (Σχήματα 11.54, 11.56) τα οποία διογκώνουν τα δοκίμια κατά τις πρώτες ώρες μετά τη σκυροδέτηση (Σχήμα 11.16). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των πειραμάτων οι μηχανικές αντοχές (Σχήματα 11.15, 11.18, 11.19) και το μέτρο ελαστικότητας (Σχήματα 11.22, 11.23), μειώθηκαν καθώς αυξήθηκε η περιεκτικότητα σε Ι.Τ σε όλες τις ηλικίες που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, γεγονός που οφείλεται στις ρωγμές και στα κενά εσωτερικά του σκυροδέματος που δημιουργούνται λόγω αντίδρασης της τέφρας στο αλκαλικό περιβάλλον του διαλύματος των πόρων με ταυτόχρονη παραγωγή αερίων όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Η τριχοειδής απορροφητικότητα όπως αποτυπώνεται στο αντίστοιχο διάγραμμα αυξάνεται, καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε Ι.Τ και είναι σύμφωνη με τα αποτελέσματα άλλων ερευνητών (Uysal and Akyuncu, 2012). Το πορώδες των δοκιμίων που περιέχουν Ι.Τ και εμβαπτίστηκαν σε NaCl είναι αυξημένο σε σχέση με τα δοκίμια χωρίς πρόσθετο έως τις 100 ημέρες αλλά στις 130 ημέρες έχει μειωθεί κατά 22% περίπου και στα δύο ποσοστά προσθήκης.

Τα αποτελέσματα της ενανθράκωσης έδειξαν σημαντική αύξηση του βάθους ενανθράκωσης σε δοκίμια τσιμεντοκονίας με Ι.Τ. εκτιθέμενα σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον. Η ενανθράκωση οφείλεται στο αυξημένο πορώδες που έχουν τα συγκεκριμένα δοκίμια όπως μετρήθηκε με τη τεχνική MIP (Σχήμα 11.28). Η προσθήκη ποζολάνης μειώνει το Ca(OH)_2 εξαιτίας της ποζολανικής δράσης με αποτέλεσμα την ελάττωση του pH. Επίσης, η Ι.Τ περιέχει SO_3 και Al_2O_3 τα οποία μπορεί να ελαττώσουν σημαντικά το pH του διαλύματος των πόρων του σκυροδέματος ($\text{pH} \approx 6$) (Kalogridis et al., 2000). Όπως έχει μελετηθεί και από άλλους ερευνητές η ενανθράκωση αυξάνει με το ποσοστό προσθήκης Ι.Τ, του CO_2 και του λόγου W/C (Khunthongkeaw et al., 2006).

Τα αποτελέσματα των ηλεκτροχημικών μετρήσεων και της απώλειας μάζας των χαλύβων, έδειξαν ότι η προσθήκη Ι.Τ στο σκυρόδεμα πιθανόν να βοηθάει στην αντιδιαβρωτική προστασία τους αλλά μόνο έπειτα από 30 μήνες παραμονής σε περιβάλλον Cl^- γεγονός που οφείλεται στη μείωση του πορώδους εξαιτίας της ποζολανικής δράσης. Τα πειραματικά αποτελέσματα της συγκέντρωσης των ολικών Cl^- έδειξαν σημαντική αύξηση καθώς αυξάνεται το ποσοστό της προσθήκης σε Ι.Τ το οποίο οφείλεται στο σχηματισμό αλάτων στους πόρους του σκυροδέματος.

Ιπτάμενη Τέφρα Πτολεμαΐδας (κωδ. FAPTOL)

Η Ι.Τ από την Πτολεμαΐδα περιέχει υψηλά ποσοστά Ca και SO₃, ενυδατώνεται γρήγορα και δε προκαλεί διόγκωση του σκυροδέματος. Η χρήση της συγκεκριμένης τέφρας ενδείκνυται παρά το αυξημένο ποσοστό SO₃ (Kouloumbi and Batis, 1992) και τα αυξημένα επίπεδα ραδιενέργειας (Skodras et al., 2007). Η συγκεκριμένη Ιπτάμενη Τέφρα χρησιμοποιήθηκε ως υλικό αντικατάστασης του τσιμέντου σε ποσοστά 5% και 10% κ.β.

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων προέκυψε μείωση των πρώιμων αντοχών (7 ημέρες) στο σκυρόδεμα με 10% Ι.Τ σε δοκίμια μερικώς εμβαπτισμένα σε NaCl 3,5% κ.β (Σχήμα 11.15). Η προσθήκη της τέφρας στο συγκεκριμένο ποσοστό βελτιώνει τη θλιπτική αντοχή μετά από τις 100 ημέρες εμβάπτισης σε NaCl. Ένα γεγονός που πρέπει να σημειωθεί είναι τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν, ότι η προσθήκη 5% Ι.Τ δεν ελαττώνει τις αντοχές ακόμα και στις 7 ημέρες, γεγονός παράδοξο διότι η γενικά οι ποζολάνες βελτιώνουν την αντοχή του σκυροδέματος σε μετέπειτα ηλικίες εξαιτίας της ελάττωσης του Ca(OH)₂ (Vedalakshmi et al., 2003) από την αντίδραση του με την ποζολάνη. Σύμφωνα με άλλους ερευνητές (Paradakis, 2000) αυτό μπορεί να συμβεί στην περίπτωση που το ποσοστό του πυριτίου της τέφρας υπερβαίνει αυτό του τσιμέντου (στην παρούσα έρευνα Ι.Τ 27,05%, CEM 18,60%). Επίσης η προσθήκη της τέφρας αυξάνει το C₃A και το C₄AF στη δημιουργία των οποίων οφείλονται οι αυξημένες αντοχές του προκύπτοντος σκυροδέματος στις 7 ημέρες και στις 28 ημέρες (η δημιουργία C₄AF γίνεται αργότερα χρονικά από το C₃A) (Suryavanshi et al., 1996). Επιπλέον, η μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια των κόκκων της ιπτάμενης τέφρας συγκριτικά με το τσιμέντο σε συνδυασμό με το σχήμα τους, έχει ως αποτέλεσμα τη δέσμευση μιας ποσότητας νερού στο νωπό σκυρόδεμα με αποτέλεσμα τη ελάττωση του τριχοειδούς πορώδους. Η ενανθράκωση επηρεάζει αρνητικά το σκυρόδεμα μόνο σε ποσοστό προσθήκης 10% (Σχήμα 11.18). Το μέτρο ελαστικότητας σε σκυρόδεμα με Ι.Τ εμφάνισε βελτίωση εν συγκρίσει με το αναφοράς σε όλες τις ηλικίες των μετρήσεων (Σχήματα 11.22, 11.23).

Η συγκέντρωση των ολικών ιόντων χλωρίου σε εμβαπτισμένα δοκίμια εντός NaCl είναι αυξημένη καθώς αυξάνεται στο ποσοστό προσθήκης και τα αποτελέσματα είναι συμβατά με αυτά άλλων ερευνητών (Kouloumbi and Batis, 1992). Το γεγονός αυτό οφείλεται στο αυξημένο πορώδες που έχουν τα σύνθετα σκυροδέματα και στη δέσμευση των ιόντων Cl⁻ από την ποζολάνη. Τα αποτελέσματα των ηλεκτροχημικών μετρήσεων στους οπλισμούς έδειξαν αυξημένες τιμές της πυκνότητας ρεύματος στα δοκίμια με 10% Ι.Τ μέχρι τους 13 μήνες μερικής εμβάπτισης σε NaCl 3,5% κ.β. Από το σταθμικό υπολογισμό της απώλειας μάζας των χαλύβων δεν προέκυψαν ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της Ι.Τ στο σκυρόδεμα.

Η τριχοειδής απορροφητικότητα και το πορώδες όπως εμφανίζονται στα αντίστοιχα διαγράμματα συσχετίζονται άμεσα και παρατηρείται μείωση τους από τις 28 ημέρες εμφάνισης σε NaCl 3.5% κ.β. Η ελάττωση του πορώδους και η επακόλουθη αύξηση της θλιπτικής αντοχής οφείλεται στην ενεργότητα της Ι.Τ εξαιτίας της λεπτότητας και του σφαιρικού σχήματος των κόκκων της (Chindaprasirt et al., 2004).

13.3 ΣΥΖΗΤΗΣΗ – Προσθήκη σιδηρούχας σκωρίας ελάστρων (κωδ. kal)

Το τελευταίο κατά σειρά πρόσθετο που παρουσιάστηκε στη Διατριβή ήταν η σιδηρούχα σκωρία ελάστρων (mill-scale) που παράγεται κατά την παραγωγή δομικού χάλυβα, αντικαθιστώντας το τσιμέντο στο σκυρόδεμα σε ποσοστά 5% και 10%. Η καλαμίνα συνήθως έχει κοκκομετρία 10-15 μm και περιέχει κυρίως αιματίτη και μικρές ποσότητες βουσίτη και μαγνητίτη (Mironovs V. et al., 2011).

Από τα αποτελέσματα της έρευνας, το μέτρο ελαστικότητας (δυναμικό – στατικό) εμφανίζεται βελτιωμένο στο σκυρόδεμα με την καλαμίνα (Σχήματα 12.13, 12.14) και είναι σύμφωνα με τα αποτελέσματα άλλων ερευνών (Mironovs V. et al., 2011). Οι μηχανικές αντοχές στο σκυρόδεμα με το πρόσθετο είναι μειωμένες αρχικά ενώ στη συνέχεια αυξάνονται (Σχήματα 12.9, 12.10, 12.11) γεγονός που οφείλεται στη μείωση του ανοικτού πορώδους όπως παρουσιάζεται στο αντίστοιχο γράφημα (Σχήμα 12.20). Η προσθήκη οξειδίων Σιδήρου στο σκυρόδεμα αυξάνει τη συγκέντρωση της φερριτικής φάσης (C_4AF) το οποίο έχει θετική επίδραση στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σε μετέπειτα ηλικίες (Huiwen W. et al., 2013). Η αυξημένη πυκνότητα του νωπού σκυροδέματος οφείλεται στην προσθήκη καλαμίνας όπως έχει παρουσιαστεί και στα αποτελέσματα άλλων ερευνών (Ismail and Al-Hashmi, 2008). Από τα διαγράμματα της απορροφητικότητας (Σχήμα 12.15) και του ανοικτού πορώδους (Σχήμα 12.20), παρατηρείται ότι η αύξηση του ποσοστού της προσθήκης σκωρίας από 5% σε 10% δεν βελτιώνει επί πρόσθετα τις εν λόγω παραμέτρους όποτε πιθανόν ένα ποσοστό της καλαμίνας να παραμένει ως αδρανές και να μη λαμβάνει μέρος στις αντιδράσεις ενυδάτωσης του τσιμέντου (Χουσίδης Ν. et al., 2015b).

Σχετικά με τη διάβρωση των οπλισμών, τα αποτελέσματα της γραμμικής πόλωσης και του σταθμικού υπολογισμού της απώλειας μάζας (Σχήματα 12.21, 12.22) έδειξαν ότι η προσθήκη της καλαμίνας μέχρι 10% βελτιώνει τη διάβρωση σε δοκίμια τσιμεντοκονίας με μερική εμφάνιση σε NaCl 3,5% κ.β. Επίσης, αυξήθηκε και η συγκέντρωση Cl^- αυξανόμενου του ποσοστού της προσθήκης. Τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούν να αιτιολογηθούν από τη μείωση του πορώδους εξαιτίας της δέσμευσης των ιόντων χλωρίου από το C_4AF και τη δημιουργία χλωριούχων αλάτων στο εσωτερικό των πόρων.

Η παραμονή των δοκιμίων σε εργαστηριακό περιβάλλον χωρίς εμφάνιση σε NaCl ενανθράκωσε πλήρως τα δοκίμια τσιμεντοκονίας γεγονός που οφείλεται στις σταθερές συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας που επικρατούσαν το χρονικό διάστημα έκθεσης. Η ενανθράκωση, είχε ως αποτέλεσμα την αποπαθητικοποίηση των χαλύβων και την έντονη διάβρωση τους από τους 12 μέχρι τους 18 μήνες όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις της απώλειας μάζας όπως παρουσιάστηκαν στο σχήμα 12.23 χωρίς να μπορούν να βγουν ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση του CO₂ σε σύνθετο σκυρόδεμα με προσθήκη καλαμίνα ως υλικό αντικατάστασης του τσιμέντου.

14 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

14.1 ΠΡΟΣΘΗΚΗ Ι.Τ ΥΨΗΛΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΑΡΓΙΛΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η προσθήκη 5% Ι.Τ μειώνει το βάθος ενανθράκωσης τόσο σε παραθαλάσσιο περιβάλλον όσο και σε μερικώς εμβαπτισμένο σκυρόδεμα εντός NaCl,
- Η χρήση της εν λόγω Ι.Τ προκαλεί μείωση των μηχανικών αντοχών (θλίψη, εφέλκυσμός, κάμψη) και του μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος (δυναμικό-στατικό),
- Η Ι.Τ προκαλεί αύξηση της τριχοειδούς απορροφητικότητας και του πορώδους σε σκυρόδεμα εντός NaCl,
- Η χρήση του συγκεκριμένου υλικού μείωσε το ποσοστό των πόρων που επικοινωνούν μεταξύ τους στις 130 ημέρες μερικής εμβάπτισης σε NaCl,
- Η Ι.Τ ελαττώνει την του θερμική αγωγιμότητα και την ταχύτητα διάδοσης της θερμότητας στο σκυρόδεμα,
- Η χρήση της συγκεκριμένης τέφρας αυξάνει τη διάβρωση του οπλισμού σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον,
- Η χρήση του συγκεκριμένου υλικού στο σκυρόδεμα σε παραθαλάσσιο περιβάλλον (συνεργιστική δράση Cl⁻ και CO₂) έδωσε χαμηλότερες τιμές απώλειας μάζας των χαλύβων και στα δύο ποσοστά προσθήκης,

Από το σύνολο των πειραματικών αποτελεσμάτων προκύπτει ότι το υλικό αυτό δεν θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανικό/αστικό/αγροτικό περιβάλλον εξαιτίας της ενανθράκωσης που υφίσταται το σκυρόδεμα με προσθήκη Ι.Τ.

Επίσης, η χρήση της Ι.Τ δεν ενδείκνυται σε περιπτώσεις όπου υπάρχει επιβολή φορτίου εξαιτίας των χαμηλών αντοχών που παρουσιάζει το συγκεκριμένο σκυρόδεμα.

Σε αντίθεση με τα παραπάνω, το οπλισμένο σκυρόδεμα που περιέχει τη συγκεκριμένη τέφρα σε ποσοστό 5% κ.β μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε υποθαλάσσιες και παραθαλάσσιες κατασκευές εξαιτίας της μικρής απώλειας μάζας των οπλισμών και του μικρού βάθους ενανθράκωσης του σκυροδέματος σε ημικορεσμένο σκυρόδεμα εξαιτίας της συνεργιστικής δράσης Cl⁻ & CO₂.

14.2 ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ Ι.Τ (ΠΤΟΛΕΜΑΪΔΑΣ)

Η χρήση της Ι.Τ από την Πτολεμαΐδα ως υλικό αντικατάστασης του τσιμέντου εμφανίζει καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με αυτή από τη Γερμανία. Η συγκεκριμένη τέφρα είναι αδρανής όσον αφορά το αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος και δεν περιέχει σημαντικές ποσότητες αργιλικών ορυκτών.

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο η συγκεκριμένη τέφρα παρά την αυξημένη συγκέντρωση SO_3 που περιέχει δεν προκαλεί διόγκωση του σκυροδέματος, συνοψίζοντας,

τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις πειραματικές μετρήσεις είναι τα εξής:

- Η αντικατάσταση του τσιμέντου με την εξεταζόμενη Ι.Τ μέχρι ποσοστό 10% μειώνει τη συγκέντρωση των ελεύθερων ιόντων χλωρίου στο σκυρόδεμα,
- Η προσθήκη της Ι.Τ σε ποσοστό 5% δεν μειώνει τη θλιπτική και εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος στις 7 ημέρες,
- Η προσθήκη 5% Ι.Τ δεν ελαττώνει τη θλιπτική αντοχή σε ενανθρακωμένο σκυρόδεμα,
- Η συγκεκριμένη τέφρα βελτιώνει τις τελικές και τις μετέπειτα αντοχές του σκυροδέματος που εκτίθεται σε περιβάλλον με αυξημένη συγκέντρωση Cl^- ,
- Το μέτρο Ελαστικότητας βελτιώνεται με τη χρήση της Ιπτάμενης τέφρας στο σκυρόδεμα. Καλύτερα αποτελέσματα έδωσε η χρήση 5% Ι.Τ,
- Η προσθήκη 5% Ι.Τ στο οπλισμένο σκυρόδεμα μειώνει την διάβρωση των οπλισμών στην ατμόσφαιρα. Σε περιβάλλον Cl^- δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα.

14.3 ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΟΣ EMD

Το παραπροϊόν που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται κυρίως από θειικά άλατα και οξείδια ασβεστίου, σιδήρου και βαρέων μετάλλων. Τα συνολικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τη χρήση του συγκεκριμένου υλικού στο σκυρόδεμα στην παρούσα έρευνα είναι τα εξής:

- Η προσθήκη του παραπροϊόντος EMDW μειώνει το βάθος ενανθράκωσης σε αστικό/βιομηχανικό περιβάλλον μέχρι ποσοστού 10%,
- Σε περιβάλλον υψηλής συγκέντρωσης Cl^- το σκυρόδεμα με 5% πρόσθετο εμφάνισε τις χαμηλότερες τιμές βάθους ενανθράκωσης,
- Η προσθήκη του πρόσθετου EMDW βελτιώνει τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος στις 7 & 28 ημέρες έπειτα από συντήρηση,

- Η θλιπτική και εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος εκτεθειμένου σε NaCl και πρόσθετο 5% πιθανόν να βελτιώνονται σε χρόνο μεγαλύτερο των 100 ημερών,
- Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος με EMDW σε περιβάλλον Na_2SO_4 αυξάνονται με το χρόνο παρ' ότι είναι χαμηλότερες από το κανονικό σκυρόδεμα. Η δοκιμή έγινε σε σκυρόδεμα C20/25 και η προσθήκη 10% EMDW έδωσε αντοχή 25,87 MPa, τιμή αποδεκτή για χρήση στις κατασκευές,
- Η προσθήκη 5% βελτιώνει το Στατικό & το Δυναμικό μέτρο Ελαστικότητας σε σκυρόδεμα εντός NaCl,
- Η απορροφητικότητα και το ανοικτό πορώδες του σκυροδέματος μειώνονται με την αντικατάσταση του τσιμέντου από το EMDW,
- Η προσθήκη 5% EMDW μειώνει τη θερμική αγωγιμότητα και την ταχύτητα διάδοσης της θερμότητας σε νωπό και ξηρό σκυρόδεμα,
- Το πορώδες σε δοκίμια τσιμεντοκονίας εκτεθειμένα σε αστικό περιβάλλον εμφανίζεται μειωμένο κατά 6,7% από το κανονικό σκυρόδεμα στις ίδιες συνθήκες. Επιπλέον, η προσθήκη EMDW μειώνει τη διάβρωση του οπλισμού σύμφωνα με τα αποτελέσματα των ηλεκτροχημικών μετρήσεων και του σταθμικού υπολογισμού μάζας εντός διαλύματος NaCl. Το ίδιο συμπέρασμα προέκυψε και σε οπλισμούς που εγκιβωτίστηκαν σε δοκίμια τσιμεντοκονίας και εκτέθηκαν σε ατμοσφαιρικό περιβάλλον,
- Η προσθήκη 5% EMDW ελαττώνει τη διάβρωση του οπλισμού και μειώνει το βάθος ενανθράκωσης σε σκυρόδεμα που εκτίθεται σε παραθαλάσσιο/βιομηχανικό περιβάλλον.

14.4 ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΣΙΔΗΡΟΥΧΑΣ ΣΚΩΡΙΑΣ ΕΛΑΣΤΡΩΝ (ΚΑΛΑΜΙΝΑ)

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη χρήση της καλαμίνης βάσει των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι τα κάτωθι:

- Η προσθήκη 5% καλαμίνης μειώνει την ενανθράκωση σε σκυρόδεμα εντός διαλύματος NaCl 3,5% κ.β,
- Η αντικατάσταση του τσιμέντου από σιδηρούχα σκωρία μέχρι συγκεντρώσεως 10% ελαττώνει τη συγκέντρωση των ολικών Cl^- ,
- Η καλαμίνη εμφανίζει χαμηλές πρώιμες και τελικές αντοχές αλλά αυξάνονται στη συνέχεια (μετά από 70 ημέρες εμβάπτισης σε NaCl),
- Το μέτρο ελαστικότητας βελτιώνεται με την αντικατάσταση του τσιμέντου από τη σκωρία σε ποσοστό προσθήκης έως 10%,

- Η απορροφητικότητα και το ανοικτό πορώδες μειώνονται σε σκυρόδεμα που προστίθεται καλαμίνα,
- Η προσθήκη καλαμίνας μειώνει την απώλεια μάζας των οπλισμών βασιζόμενοι στις μετρήσεις της πυκνότητας ρεύματος,
- Ο σταθμικός υπολογισμός της απώλειας μάζας έδειξε μείωση της διάβρωσης στους 24 μήνες σε περιβάλλον NaCl.

14.5 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΝΑ ΠΡΟΣΘΕΤΟ

Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα βιομηχανικά παραπροϊόντα τα οποία επιδρούν στις ιδιότητες του Σκυροδέματος με διαφορετικό τρόπο.

1. **Η Ιπτάμενη Τέφρα από την Πτολεμαΐδα** έδειξε ότι βελτιώνει τις αντοχές του Σκυροδέματος και το μέτρο ελαστικότητας και στα δύο ποσοστά προσθήκης σε περιβάλλον υψηλής συγκεντρώσεως Cl⁻, ενώ παράλληλα μειώνει τη διάβρωση του οπλισμού στο ίδιο περιβάλλον διάβρωσης. Η ενανθράκωση έδειξε αυξημένη στα προκύπτοντα Σκυροδέματα από αυτό που δεν περιείχε Ι.Τ.

2. **Η Ιπτάμενη Τέφρα η οποία περιείχε σημαντικές ποσότητες αργλικών ορυκτών** έδωσε Σκυροδέματα διογκωμένα 8%. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι αντιδρά στο αλκαλικό περιβάλλον του Σκυροδέματος παράγοντας H₂S με αποτέλεσμα την εμφάνιση έντονων ρωγμών στην επιφάνεια των δοκιμίων οι οποίες μείωσαν τις αντοχές και αύξησαν τη διάβρωση του οπλισμού σε περιβάλλον υψηλής συγκεντρώσεως χλωριόντων. Επομένως, η συγκεκριμένη Ιπτάμενη Τέφρα ίσως μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μετά από κατεργασία π.χ λέπτυνση ώστε να αυξηθεί η δραστηριότητα της, σε συνδυασμό με κάποιο πρόσθετο πήξης του τσιμέντου.

3. **Η σιδηρούχα σκωρία ελάστρων** αποτελείται από οξείδια του Σιδήρου τα οποία σύμφωνα με τη βιβλιογραφία και τα πειραματικά αποτελέσματα επιδρούν στη φερριτική φάση (C₄AF) αυξάνοντας τις αντοχές του Σκυροδέματος μετά από 100 ημέρες στο διαβρωτικό περιβάλλον. Επιπλέον, η χρήση του παραπροϊόντος ελάττωσε τη διάβρωση του οπλισμού και μείωσε το ανοικτό πορώδες του Σκυροδέματος.

4. **Το παραπροϊόν από την παραγωγή EMD** δεν έχει ξαναχρησιμοποιηθεί στα Σκυροδέματα σε παγκόσμια κλίμακα. Χρησιμοποιήθηκε ως αντικατάστατο του τσιμέντου, παρά το γεγονός ότι δεν έχει ποζολανική δράση διότι έχει μέγεθος κόκκου περίπου 10μm οπότε λειτουργεί ως πληρωτικό και περιέχει βαρέα μέταλλα που επιβαρύνουν το περιβάλλον. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το παραπροϊόν μείωσε το πορώδες, τη διάβρωση του οπλισμού σε περιβάλλον Cl⁻ και την ενανθράκωση του Σκυροδέματος αλλά επειδή δεν έχει ποζολανικότητα και μειώθηκε το ποσοστό τσιμέντου στα αναμίγματα οι αντοχές ελαττώθηκαν ειδικά στην προσθήκη 10%. Το παραπροϊόν θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία τσιμέντου στα ποσοστά που μελετήθηκαν σε συνδυασμό με την Ι.Τ Πτολεμαΐδας ή κάποιο πρόσθετο (επιταχυντή πήξης, ρευστοποιητή) ώστε να αυξηθεί η θλιπτική αντοχή.

15 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΣΥΝΕΧΙΣΗΣ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

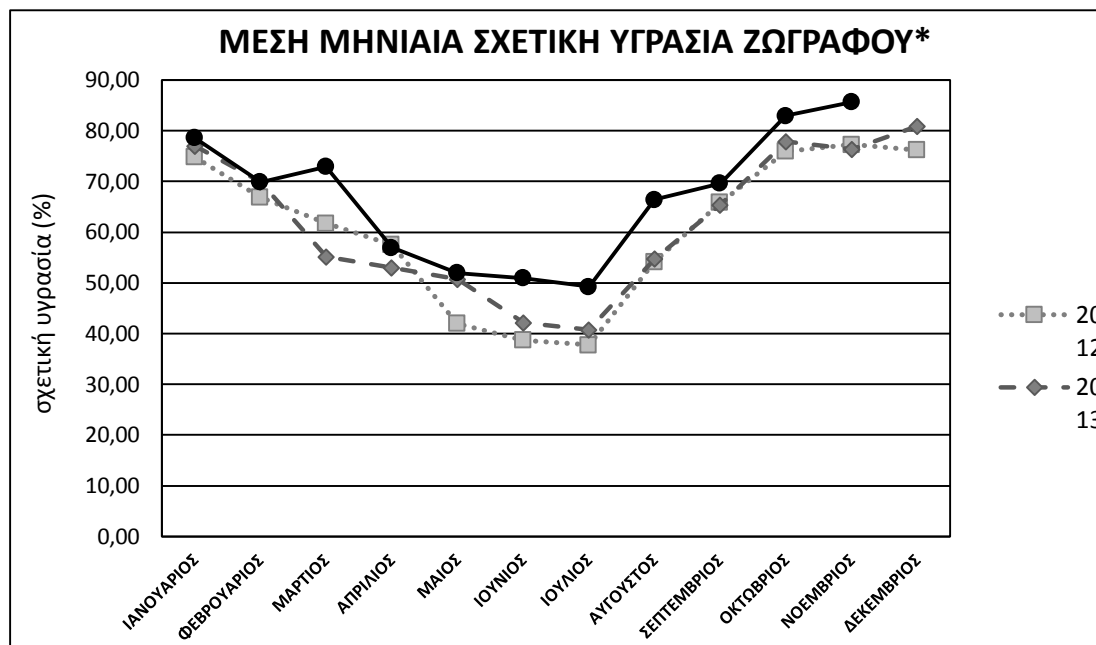
Με την παρούσα Διδακτορική διατριβή έγινε προσπάθεια βελτίωσης της ποιότητας του σκυροδέματος και μείωση της διάβρωσης του οπλισμού με τη χρήση βιομηχανικών παραπροϊόντων τόσο από την ατμοσφαιρική διάβρωση, όσο και από τη διάβρωση σε περιβάλλον NaCl και Na_2SO_4 .

Η παρούσα έρευνα θα μπορούσε να συνεχισθεί προκειμένου να πραγματοποιηθεί:

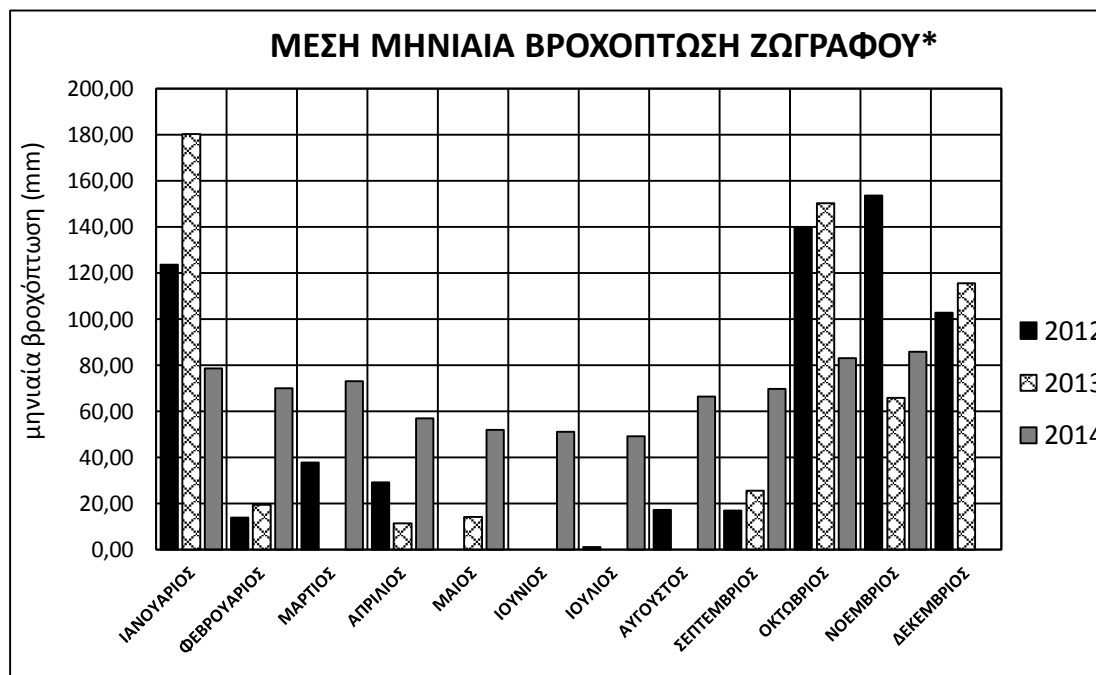
- ⇒ Υπολογισμός των ελεύθερων ιόντων Cl^- στο σκυρόδεμα,
- ⇒ Υπολογισμός SO_3 στις τέφρες και στο παραπροϊόν EMDW,
- ⇒ Επίδραση της χρήσης των προσθέτων σε σκυρόδεμα που εκτίθεται σε περιβάλλον οργανικών αποβλήτων και ελαίων π.χ δεξαμενές, διάφοροι χώροι αποθήκευσης κτλ.,
- ⇒ Συσχέτιση της χρήσης βιομηχανικών αποβλήτων με οργανικούς αναστολείς κατά την παρασκευή σκυροδέματος,
- ⇒ Βελτιστοποίηση/μείωση του λόγου W/C σε σκυρόδεμα που περιέχει βιομηχανικά απόβλητα με χρήση ρευστοποιητών ώστε να μειωθεί το πορώδες του σκυροδέματος,
- ⇒ Τροποποίηση της χημικής σύστασης του EMDW και των τεφρών (π.χ αφαίρεση γύψου στο EMDW, προσθήκη Si στην τέφρα ώστε να αυξηθεί η ενεργότητα της),
- ⇒ Ακριβής υπολογισμός της μάζας των προϊόντων διάβρωσης και της χημικής τους σύστασης στον οπλισμό,
- ⇒ Ποσοτικοποίηση της κρίσιμης συγκέντρωσης Cl^- στην οποία αποπαθητικοποιείται ο οπλισμός, σε σκυρόδεμα που περιέχει βιομηχανικά παραπροϊόντα,
- ⇒ Πειραματική διερεύνηση της συνδυαστικής επίδρασης που έχουν τα πρόσθετα στην ανθεκτικότητα του Σκυροδέματος και στη διάβρωση του οπλισμού.

16 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

16.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ



Σχήμα 1: Μηνιαία σχετική υγρασία % κατά τη χρονική περίοδο των πειραμάτων, στην περιοχή Ζωγράφου

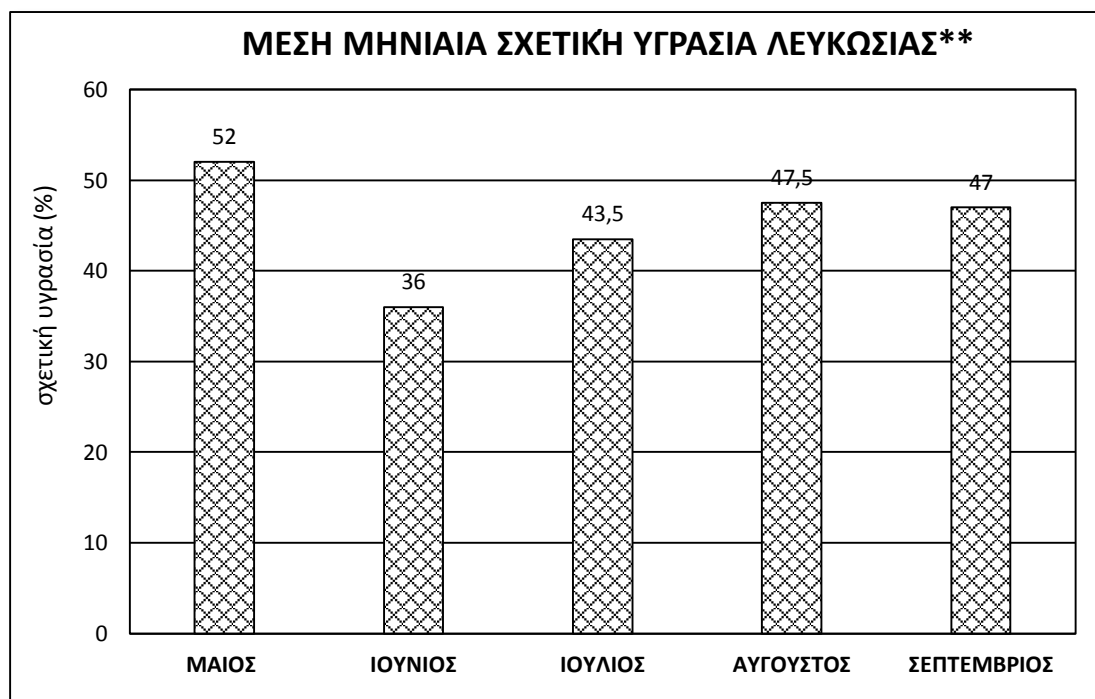


Σχήμα 2: Μηνιαία βροχόπτωση σε mm κατά τη χρονική περίοδο των πειραμάτων, στην περιοχή Ζωγράφου



Σχήμα 3: Μηνιαία Θερμοκρασία °C κατά τη χρονική περίοδο των πειραμάτων στην περιοχή Ζωγράφου

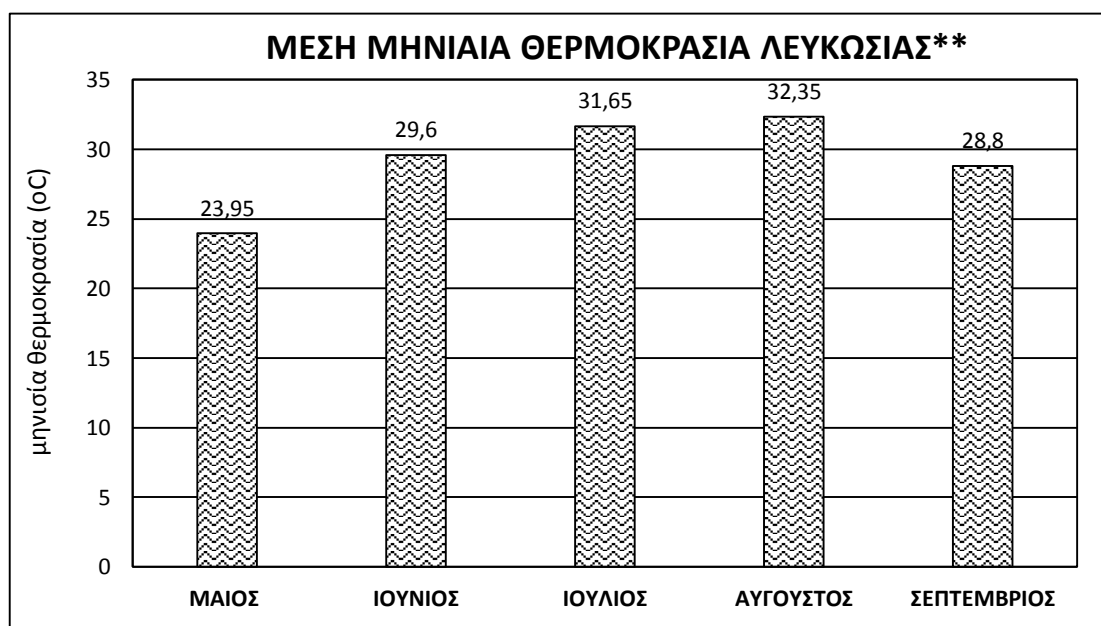
* Τα δεδομένα για την κατασκευή των γραφημάτων προέρχονται από το μετεωρολογικό σταθμό ΖΩΓΡΑΦΟΥ του Υδρολογικού παρατηρητηρίου Αθηνών που βρίσκονται στην ιστοσελίδα <http://hoa.ntua.gr/stations/d/13/>.



Σχήμα 4: Μηνιαία σχετική υγρασία % κατά τη χρονική περίοδο των πειραμάτων στη Λευκωσία



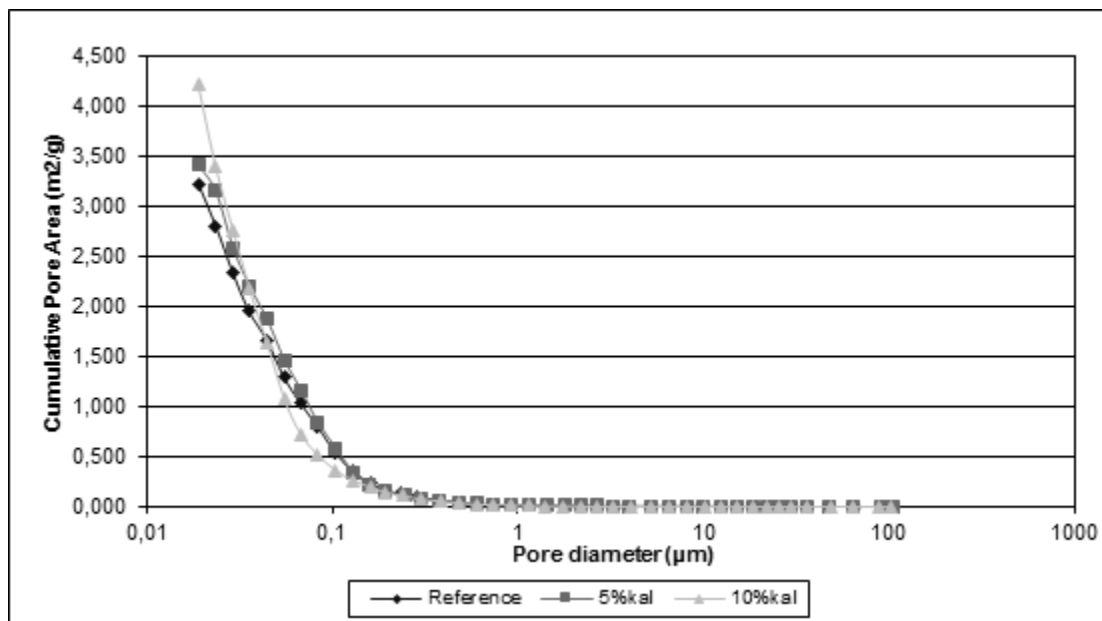
Σχήμα 5: Μηνιαία βροχόπτωση σε mm κατά τη χρονική περίοδο των πειραμάτων στη Λευκωσία



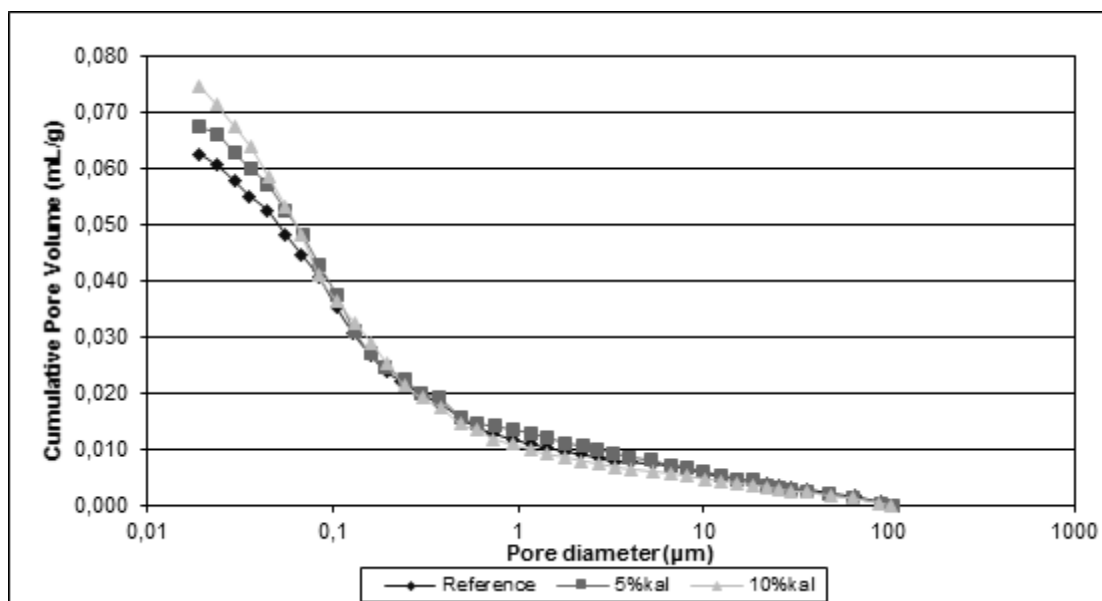
Σχήμα 6: Μηνιαία θερμοκρασία σε °C κατά τη χρονική περίοδο των πειραμάτων στη Λευκωσία

** Τα διαγράμματα αναφέρονται στις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούσαν στη Λευκωσία (περιοχή Στροβόλου) κατά την περίοδο Μαΐου – Σεπτεμβρίου στην οποία πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα μηχανικών ιδιοτήτων (μηχανικές αντοχές, μέτρο Ελαστικότητας, εξόλκευση σπλισμού) του σκυροδέματος και η δοκιμή απορροφητικότητας. Τα μετεωρολογικά δεδομένα για την κατασκευή των διαγραμμάτων δόθηκαν από τη Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου.

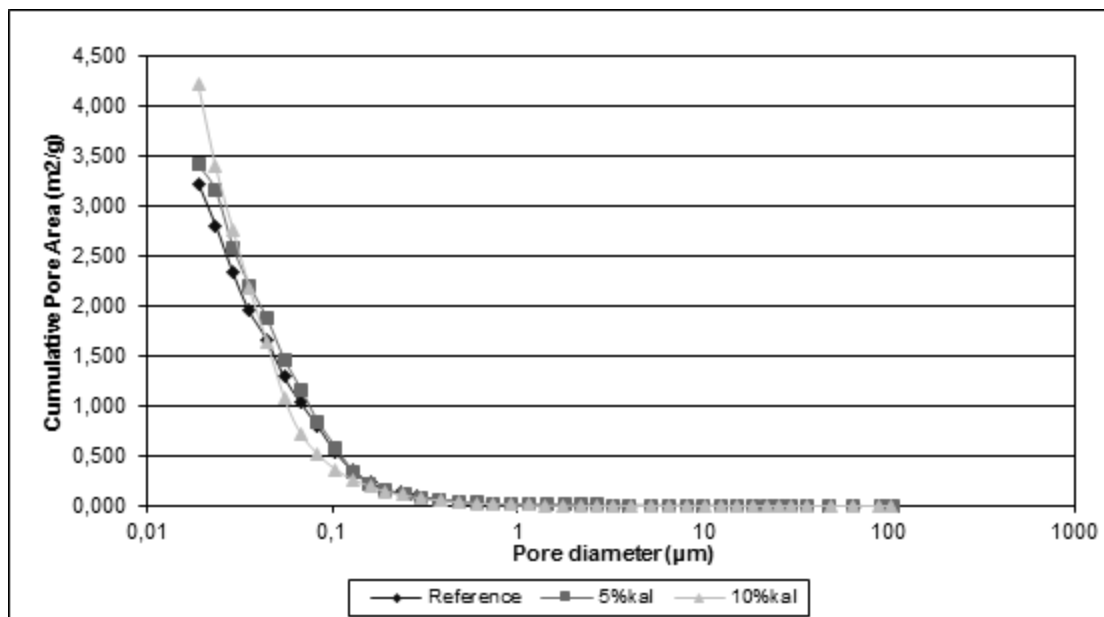
16.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ MIP (MERCURY INSTRUMENT POROSIMETRY)



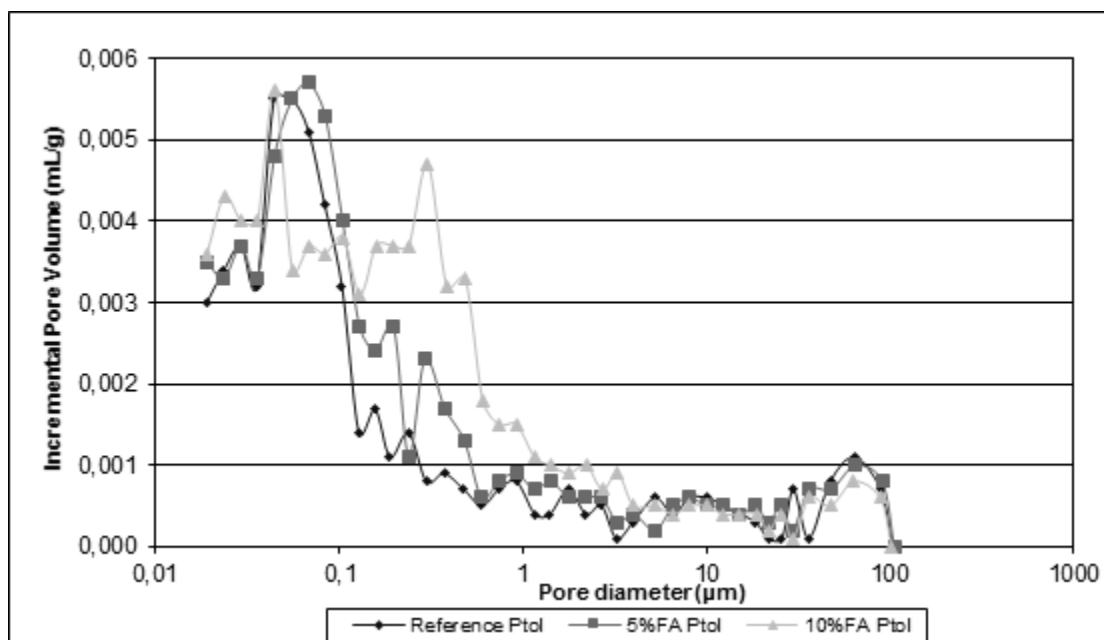
Σχήμα 1: Όγκος πόρων (ml/g) συναρτήσει της διαμέτρου πόρων (µm) για δοκίμια εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα και πρόσθετο καλαμίνα



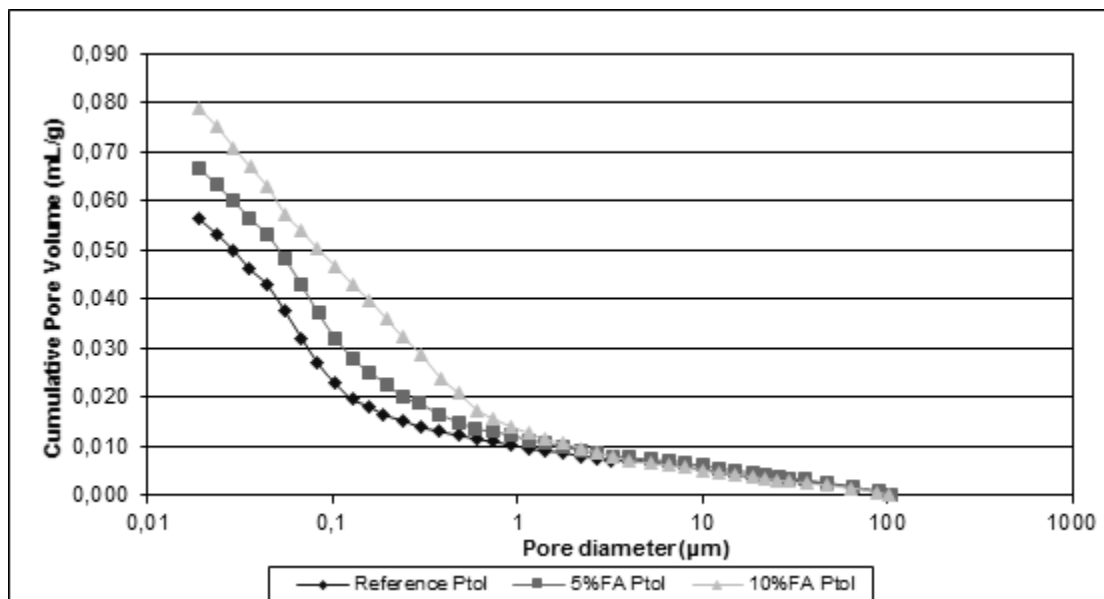
Σχήμα 2: Αθροιστικός όγκος πόρων (ml/g) συναρτήσει της διαμέτρου πόρων (µm) για δοκίμια εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα και πρόσθετο καλαμίνα



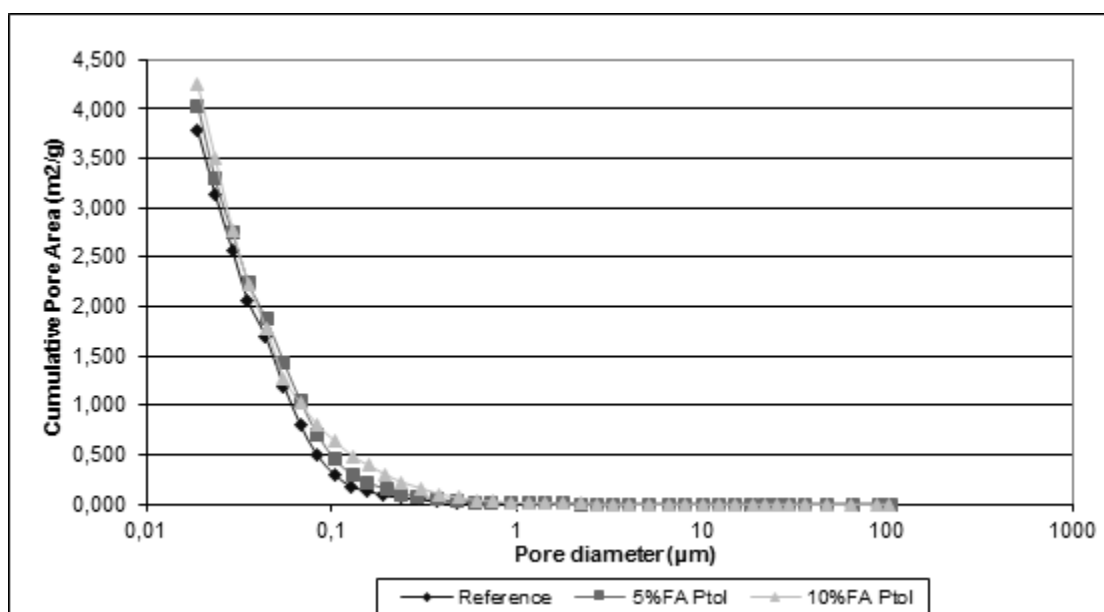
Σχήμα 3: Αθροιστική επιφάνεια πόρων (m²/g) συναρτήσει της διαμέτρου πόρων (µm) για δοκίμια εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα και πρόσθετο καλαμίνια



Σχήμα 4: Όγκος πόρων (ml/g) συναρτήσει της διαμέτρου πόρων (µm) για δοκίμια εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα και πρόσθετο Ι.Τ Πτολεμαΐδας



Σχήμα 5: αθροιστικός όγκος πόρων (ml/g) συναρτήσει της διαμέτρου πόρων (μm) για δοκίμια εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα και πρόσθετο Ι.Τ Πτολεμαΐδας



Σχήμα 6: Αθροιστική Επιφάνεια πόρων (m²/g) συναρτήσει της διαμέτρου πόρων (μm) για δοκίμια εκτεθειμένα στην ατμόσφαιρα και πρόσθετο Ι.Τ Πτολεμαΐδας

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- ABOSRRA, L., ASHOUR, A. F. & YOUSEFFI, M. 2011. *Corrosion of steel reinforcement in concrete of different compressive strengths. Construction and Building Materials, 25, 3915-3925.*
- AHIBORN, T. & DENHARTIGH T. 2003. *A comparative study of MMFX reinforcing steel in concrete, Michigan technology university, Center for Structural Durability.*
- AL-OTAIBI, S. 2008. *Recycling Steel Mill Scale as Fine Aggregate in Cement Mortars. European Journal of Scientific Research; Dec2008, Vol. 24 Issue 3, p332, vol.24,, pp. 332-338.*
- AL-ZAHRANI, M. M., AL-DULAIJAN, S. U., IBRAHIM, M., SARICIMEN, H. & SHARIF, F. M. 2002. *Effect of waterproofing coatings on steel reinforcement corrosion and physical properties of concrete. Cement and Concrete Composites, 24, 127-137.*
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, A. *Guide to Durable Concrete, ACI Committee 201.2R-01, USA.*
- ANN, K. Y., JUNG, H. S., KIM, H. S., KIM, S. S. & MOON, H. Y. 2006. *Effect of calcium nitrite-based corrosion inhibitor in preventing corrosion of embedded steel in concrete. Cement and Concrete Research, 36, 530-535.*
- ANN, K. Y. & SONG, H.-W. 2007. *Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. Corrosion Science, 49, 4113-4133.*
- ANTIOHOS, S. & TSIMAS, S. 2004. *Activation of fly ash cementitious systems in the presence of quicklime: Part I. Compressive strength and pozzolanic reaction rate. Cement and Concrete Research, 34, 769-779.*
- ARJUNAN, P., SILSBEE, M. R. & DELLA, M. R. 1999. *Sulfoaluminate-belite cement from low-calcium fly ash and sulfur-rich and other industrial by-products. Cement and Concrete Research, 29, 1305-1311.*
- ASTM C-1202 2002. *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, USA, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, .*
- ASTM C31/C31M-12 2012. *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field vol.04.02. Philadelphia: ASTM International.*
- ASTM C-234 *Annual Book of ASTM Standards, Section 4- Construction. Philadelphia USA: American Society for Testing and Materials.*
- ASTM C469-02 1999. *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. Philadelphia: ASTM International.*
- ASTM C597-02 2009. *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete vol.04.2. West Conshohocken, PA: ASTM International.*
- ASTM C876-87 2002. *Standard test method for Half-Cell Potentials of reinforcing Steel in Concrete. USA: ASTM International.*

- ASTM C-618 2012. *Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete vol 04.02*. Philadelphia: ASTM International.
- ASTM C-1585 2013. *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM G59 2009. *Standard Test method for conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements vol 03.02*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.
- ASTM C-143 *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, vol 04.02*. Philadelphia: ASTM International.
- ATAHAN, H. N. & DIKME, D. 2011. *Use of mineral admixtures for enhanced resistance against sulfate attack*. *Construction and Building Materials*, 25, 3450-3457.
- BABU, K. G. & NAGESWARA RAO, G. S. 1993. *Efficiency of fly ash in concrete*. *Cement and Concrete Composites*, 15, 223-229.
- BAKKER, R. F. M. 1983. *Permeability of blended cement concrete, Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral Byproducts in Concrete, Vol. 1, SP-79,, pp. 589-605*.
- BATIS, G., KOULOUMBI, N. & PANTAZOPOULOU, P. 2005. *Corrosion protection of steel in pumice lightweight mortar by coatings*. *Cement and Concrete Composites*, 27, 261-267.
- BATIS, G. & RAKANTA, E. 2005. *Corrosion of steel reinforcement due to atmospheric pollution*. *Cement and Concrete Composites*, 27, 269-275.
- BENTZ, D., PELTZ, M., DURA'N-HERRERA, A., VALDEZ, P. & JUAREZ CU. 2011. *Thermal properties of high-volume fly ash mortars and concretes*. *Building Physics*, vol.34 (3), 263-275.
- BROOMFIELD, J. P. 1997. *Corrosion of steel in concrete: Understanding, investigation and repair*, E&FN SPON.
- CALVERT, J. B. 2004. *Chromium and Manganese [Online]*. Available: <http://mysite.du.edu/~jcalvert/phys/chromang.htm>.
- CARETTE, G. G. & MALHOTRA, V. M. 1986. *Characterization of Canadian Fly Ashes and Their Relative Performance in Concrete, Report 86-6E.*, Ottawa, Canada, CANMET.
- CHEN, W.-S., CHANG, F.-C., SHEN, Y.-H., TSAI, M.-S. & KO, C.-H. 2012. *Removal of chloride from MSWI fly ash*. *Journal of Hazardous Materials*, 237–238, 116-120.
- CHINDAPRASIRT, P., HOMWUTTIWONG, S. & SIRIVIVATNANON, V. 2004. *Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar*. *Cement and Concrete Research*, 34, 1087-1092.
- CHOUSIDIS, N.,** RAKANTA, E., IOANNOU, I. & BATIS, G. 2015. *Anticorrosive Effect of Electrochemical Manganese Dioxide By-Products in Reinforced Concrete*. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, Vol.03No.05, 12.

- CHUNG, C.-W., CHUN, J., WANG, G. & UM, W. 2014. *Effects of iron oxides on the rheological properties of cementitious slurry. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 453, 94-100.
- CHUNG F.H. 1976. *Quantitative interpretation of X-ray diffraction patterns of mixtures I & II. Matrix-flushing method for quantitative multicomponent analysis. Applied Crystallography*, vol.7, pp. 519-531.
- COLLEPARDI M. 1984. *Water reducers/retarders. In Concrete Admixtures Handbook: Properties, Science, and Technology, Ramachandran, V.S., Ed., N.J, Noyes Publications, Park Ridge.*
- D. DARWIN, D. MANNING, E. HOGNESTAD, A. BEEDY, P. RICE & CHOWRWAL, A. May 1985. *Crack width cover and corrosion. Concrete International.*
- DAILY S.F. 2002. *Understanding Corrosion and Cathodic protection of reinforced Concrete Structures, Corpro Companies, Inc.*
- DAUGHERTY, K. E. & KOWALEWSKI, M. J. 1976. *Use of Admixtures Placed at High Temperatures, Washington, D.C.*
- DAVIS J. R. 2004. *Corrosion: Understanding the Basics, U.S.A, ASM International, The Materials Information Society.*
- DIAMOND, L. W. & AKINFIEV, N. N. 2003. *Solubility of CO₂ in water from -1.5 to 100 °C and from 0.1 to 100 MPa: evaluation of literature data and thermodynamic modelling. Fluid Phase Equilibria*, 208, 265-290.
- DIN 1164-1 1986-12. *Portland-, Eisenportland-, Hochofen- und Traßzement; Begriffe, Bestandteile, Anforderungen, Lieferung.*
- DIN EN-1008 2002. *Mixing water for concrete - Specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete, German version EN 1008.*
- DIN EN 933-1 2012. *Tests for geometrical properties of aggregates. Determination of particle size distribution, European Standard.*
- DOSE, W. M. & DONNE, S. W. 2013. *Heat treated electrolytic manganese dioxide for primary Li/MnO₂ batteries: Effect of manganese dioxide properties on electrochemical performance. Electrochimica Acta*, 105, 305-313.
- DOTTO, J. M. R., ABREU, A. G. D., DAL MOLIN, D. C. C. & MÜLLER, I. L. 2004. *Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behaviour of reinforcement bars. Cement and Concrete Composites*, 26, 31-39.
- EMERY, J. J. 1982. *Slag Utilization in Pavement Construction' Extending Aggregate Resources. ASTM Special Technical Publication 774, Washington, DC, American Society for Testing and Materials.*
- EN 206-1 2013. *Concrete. Specification, performance, production and conformity, London, British Standards Institution.*
- EN 1881-201 1986. *Guide to the Use of Non-destructive Methods of Test for Hardened Concrete. British Standard Institution.*

- EN 5075 2000. *Part 1: Superplasticizing Admixtures, part 3: Accelerating Admixtures, Retarding Admixtures and Water Reducing Admixtures.*
- EN 12390-8 2009. *Testing hardened concrete. Depth of penetration of water under pressure.* London: British Standard Institution.
- EN 12504-4 2004. *Testing concrete-Part 4: Determination of pulse velocity.* UK, London.
- EN 1936:2006 2007. *Natural stone test methods. Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity.* London: British Standard Institution.
- EUROCODE-2 2004. *Design of Concrete Structures – Part 1-2 : General Rules – Structural Fire Design (EN 1992-1-2).*
- FAN, Y., YIN, S., WEN, Z. & ZHONG, J. 1999. *Activation of fly ash and its effects on cement properties*. *Cement and Concrete Research*, 29, 467-472.
- FONTANA M.G. 1986. *Corrosion Engineering*, 3rd edition, pp.319-320, USA, N.Y, McGraw-Hill.
- GIESCHE, H. 2002. *Porosimetry in Handbook of Porous Solid. vol.1*, 309-351.
- HANSSON, C. M., POURSAEE, A. & LAURENT, A. 2006. *Macrocell and microcell corrosion of steel in ordinary Portland cement and high performance concretes.* *Cement and Concrete Research*, 36, 2098-2102.
- HOSFORD, W. F. 2005. *Mechanical behavioral of materials*, Cambridge University Press.
- HUIWEN W., YOUWU WU., CHAO C., PENGLIANG W. & G., Z. 2013. *Effects of Clinker Contents of Different C3A and C4AF on the Performance of PSC Cement.* *Journal of Wuhan University of Technology-Mater*, 521-526.
- IRASSAR, E. F., DI MAIO, A. & BATIC, O. R. 1996. *Sulfate attack on concrete with mineral admixtures.* *Cement and Concrete Research*, 26, 113-123.
- ISMAIL, Z. Z. & AL-HASHMI, E. A. 2008. *Reuse of waste iron as a partial replacement of sand in concrete.* *Waste Management*, 28, 2048-2053.
- ISO/8044 15/08/1999 *Corrosion of Metals and Alloys – Basic Terms and Definitions.*
- ISO/DIS 8407.3 2009. *Corrosion of metals and alloys-Removal of corrosion products from corrosion test specimens.*
- J. P. PANDA, K. S., M. K. GHOSH AND T. SUBBIAH 2009. *Electrolytic Manganese Dioxide (EMD) from Manganese Cake- A Byproduct of Nodule Process.* *Proceedings of The Eighth ISOPE Ocean Mining Symposium*, 149.
- JACOBASCH, H. J., BAUBÖCK, G. & SCHURTZ, J. 1982. *Das Zeta-Potential: Ursprung, Messung, praktische Anwendungen.* *Österreichische Chemie-Zeitschrift*, vol.83, pp.247-254.

- JAIN, J. A. & NEITHALATH, N. 2010. Chloride transport in fly ash and glass powder modified concretes – Influence of test methods on microstructure. *Cement and Concrete Composites*, 32, 148-156.
- JONES R. & FĂCĂOARU I. 1969. Recommendations for testing concrete by the ultrasonic pulse method. *Matériaux et Constructions*, 275-284.
- KALOGRIDIS, D., KOSTOGLLOUDIS, G. C., FTIKOS, C. & MALAMI, C. 2000. A quantitative study of the influence of non-expansive sulfoaluminate cement on the corrosion of steel reinforcement. *Cement and Concrete Research*, 30, 1731-1740.
- KATSIOTI, M., TSAKIRIDIS, P. E., AGATZINI-LEONARDOU, S. & OUSTADAKIS, P. 2005. Examination of the jarosite–alunite precipitate addition in the raw meal for the production of Portland and sulfoaluminate-based cement clinkers. *International Journal of Mineral Processing*, 76, 217-224.
- KHUNTHONGKEAW, J., TANGTERMSIRIKUL, S. & LEELAWAT, T. 2006. A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 20, 744-753.
- KIM, K.-H., JEON, S.-E., KIM, J.-K. & YANG, S. 2003. An experimental study on thermal conductivity of concrete. *Cement and Concrete Research*, 33, 363-371.
- KOUKOUZAS, N., HÄMÄLÄINEN, J., PAPANIKOLAOU, D., TOURUNEN, A. & JÄNTTI, T. 2007. Mineralogical and elemental composition of fly ash from pilot scale fluidised bed combustion of lignite, bituminous coal, wood chips and their blends. *Fuel*, 86, 2186-2193.
- KOUKOUZAS, N., WARD, C. R., PAPANIKOLAOU, D., LI, Z. & KETIKIDIS, C. 2009. Quantitative evaluation of minerals in fly ashes of biomass, coal and biomass–coal mixture derived from circulating fluidised bed combustion technology. *Journal of Hazardous Materials*, 169, 100-107.
- KOULOUMBI, N. & BATIS, G. 1992. Chloride corrosion of steel rebars in mortars with fly ash admixtures. *Cement and Concrete Composites*, 14, 199-207.
- KOULOUMBI, N., BATIS, G. & MALAMI, C. 1994. The anticorrosive effect of fly ash, slag and a Greek pozzolan in reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 16, 253-260.
- KRAUTKRÄMER, J. A. H. 1977. *Ultrasonic Testing of Materials*, Berlin, Springer - Verlag.
- KUBISSA, W. & JASKULSKI, R. 2013. Measuring and Time Variability of The Sorptivity of Concrete. *Procedia Engineering*, 57, 634-641.
- KURTIS, K. 2005. *Portland Cement Hydration*, School of Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, USA.
- LIN, L. F., CHAO, C. Y. & MCDONALD, D. D. 1981. A Point Defect Model for Anodic Passive Films: II. Chemical Breakdown and Pit Initiation. *Journal of the Electrochemical Society*, 128, 1194-1198.

- LU, S. G., CHEN, Y. Y., SHAN, H. D. & BAI, S. Q. 2009. Mineralogy and heavy metal leachability of magnetic fractions separated from some Chinese coal fly ashes. *Journal of Hazardous Materials*, 169, 246-255.
- MAES, M. & DE BELIE, N. 2014. Resistance of concrete and mortar against combined attack of chloride and sodium sulphate. *Cement and Concrete Composites*, 53, 59-72.
- MALHOTRA, V. M. & RAMEZANIANPOUR, A. A. 1993. *Fly Ash in Concrete*, MSL 94-45(IR),, Ottawa, Canada, Canada Center for Mineral and Energy Technology (CANMET),.
- MANZ, O. E., MCCARTHY, G. J., STEVENSON, R. J., DOCKTER, B. A. & HASSETT, D. G. 1989. Characterization and classification of North American lignite fly ashes for use in concrete,. *Proceedings of the 3rd International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete (supplementary papers)*, pp. 16-32.
- MASSAZZA F. 1985. *Concrete Resistance to Sea Water and Marine Environment*”, II Cement. vol.1, 3-26.
- MEHTA, P. K. 1977. High iron oxide hydraulic cement. California, U.S.A patent application 05/598411.
- MEHTA, P. K. & GJØRV, O. E. 1982. Properties of portland cement concrete containing fly ash and condensed silica-fume. *Cement and Concrete Research*, 12, 587-595.
- MIRONOV V., BRONKA J., KORJAKINS A. & J., K. possibilities of application iron containing waste materials in manufacturing of heavy concrete. 3rd International Conference CIVIL ENGINEERING, 11 Proceedings I BUILDING MATERIALS, 2011.
- MORABITO, P. 1989. Measurements of the Thermal Properties of Different Concretes. *High Temperatures-High Pressures* 51-59.
- MOUSATSOU, A., ITSKOS, G., VOUNATSOS, P., KOUKOUZAS, N. & VASILATOS, C. 2010. Microstructural characterization of PM-Al and PM-Al/Si composites reinforced with lignite fly ash. *Materials Science and Engineering: A*, 527, 4788-4795.
- NAIK T.R., SINGH, S. S. & HOSSAIN M.M. 1995. Abrasion resistance of high-strength concrete made with class C fly ash. *ACI Mater J*, 92 (6) (1995), pp. 649–659, Vol.92 (6), PP.649-659.
- NAIK, T. R., SINGH, S. A. & HOSSEIN, M. M. 1992. *Abrasion Resistance of High-Volume Fly Ash Concrete Systems*, Palo Alto, CA, Electric Power Research Institute.
- NAWY E.W. 2006. *Concrete Construction Engineering Handbook*, 2nd edition, USA, New Jersey, CRC Press.
- NEHDI, M. L., SULEIMAN, A. R. & SOLIMAN, A. M. 2014. Investigation of concrete exposed to dual sulfate attack. *Cement and Concrete Research*, 64, 42-53.

- NEVILLE, A. 2006. *Concrete: Neville's Insights & Issue* London, Thomas Telford Publishing.
- NEVILLE A.M. 1996. *Properties of concrete*, Addison Wesley Longman Limited., 4th edition, England
- NEVILLE A.M. 1996 *Properties of concrete, England*, Addison Wesley Longman Limited., forth and final edition.
- NILSON A.H., DARWIN D. & DOLAN C. 2004. *Design of concrete structures* 13th edition, McGraw Hill
- ORMELLESE, M., BERRA, M., BOLZONI, F. & PASTORE, T. 2006. *Corrosion inhibitors for chlorides induced corrosion in reinforced concrete structures*. *Cement and Concrete Research*, 36, 536-547.
- OTIENO, M., BEUSHAUSEN, H. & ALEXANDER, M. 2014. *Effect of chemical composition of slag on chloride penetration resistance of concrete*. *Cement and Concrete Composites*, 46, 56-64.
- OWENS, P. L. 1979. *Fly ash and its usage in concrete*. *Concrete J. Concrete Soc.*, vol.13, pp.21-26.
- P.K. MEHTA 1986. *Concrete: Structure, Properties and Materials*, N.J, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs.
- PAPADAKIS, V. G. 2000. *Effect of fly ash on Portland cement systems: Part II. High-calcium fly ash*. *Cement and Concrete Research*, 30, 1647-1654.
- PAPADAKIS, V. G. & TSIMAS, S. 2001. *Supplementary Cementing Materials for Sustainable Building Sector Growth*, European Commission DGXII, Marie Curie Fellowship, Final Scientific Report, Project No HPMF-CT-1999-00370,, Αθήνα, ΕΜΠ.
- PAPADAKIS, V. G. & TSIMAS, S. 2005. *Greek supplementary cementing materials and their incorporation in concrete*. *Cement and Concrete Composites*, 27, 223-230.
- PAPAYIANNI, I. & ANASTASIOU, E. 2010. *Production of high-strength concrete using high volume of industrial by-products*. *Construction and Building Materials*, 24, 1412-1417.
- PAPAYIANNI, J. 1993. *Use of a high-calcium fly ash in blended type cement production*. *Cement and Concrete Composites*, 15, 231-235.
- PLOWMAN, C. & CABRERA, J. G. 1984. *Mechanism and kinetics of hydration of C3A and C4AF. Extracted from cement*. *Cement and Concrete Research*, 14, 238-248.
- POOLE, A. B. 1981. *Alkali-Carbonate Reactions in Concrete*,. 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Cape Town, South Africa.
- QU, D. 2006. *Investigation of the porosity of electrolytic manganese dioxide and its performance as alkaline cathode material*. *Journal of Power Sources*, 156, 692-699.

- RAJAMANE, N. P., ANNIE PETER, J. & AMBILY, P. S. 2007. *Prediction of compressive strength of concrete with fly ash as sand replacement material. Cement and Concrete Composites*, 29, 218-223.
- RAKANTA, E., ZAFEIROPOULOU, T. & BATIS, G. 2013. *Corrosion protection of steel with DMEA-based organic inhibitor. Construction and Building Materials*, 44, 507-513.
- RAMACHANDRAN VS. 2000. *Concrete admixtures handbook*, N.J, USA, No-Yes Publications.
- RILEM_CPC-18 1998. *Measurement of hardened concrete carbonation depth. RILEM Publications SARL.*
- ROBERGE P.R. 2012. *handbook of corrosion engineering'* N.Y, Mc-Graw-hill handbooks.
- ROBINSON W.C. 1993. *Testing soil for corrosiveness. Materials Performance*, vol.32, 56-8.
- SANTHANAM, M., COHEN, M. D. & OLEK, J. 2002. *Mechanism of sulfate attack: A fresh look: Part 1: Summary of experimental results. Cement and Concrete Research*, 32, 915-921.
- SATO, N. 1971. *A theory for breakdown of anodic oxide films on metals. Electrochimica Acta*, 16, 1683-1692.
- SATO, N. & OKAMOTO, G. 1981. "Electrochemical Passivation of Metals" in: Mockris, O. M., Conway, B. E., Yeager, E. B., White, R. E. (eds.), "Comprehensive Treatise of Electrochemistry", Plenum Press,. vol.4.
- SCHIEGG, Y., HUNKELER, F. & UNGRICH, H. 2007. 18 - Effectiveness of corrosion inhibitors – a field study. In: RAUPACH, M. (ed.) *Corrosion of Reinforcement in Concrete. Woodhead Publishing.*
- SCHWARZ, N., CAM, H. & NEITHALATH, N. 2008. *Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. Cement and Concrete Composites*, 30, 486-496.
- SCHWEITZER P.A. 2009. *Fundamentals of Corrosion: Mechanisms, Causes, and Preventative Methods*, CRC Press
- SHEHATA, M. H. & THOMAS, M. D. A. 2000. *The effect of fly ash composition on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction. Cement and Concrete Research*, 30, 1063-1072.
- SHEHATA, M. H., THOMAS, M. D. A. & BLESZYNSKI, R. F. 1999. *The effects of fly ash composition on the chemistry of pore solution in hydrated cement pastes. Cement and Concrete Research*, 29, 1915-1920.
- SIDDIQUE, R. 2004. *Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete. Cement and Concrete Research*, 34, 487-493.
- SIDERIS, K. K., MANITA, P. & SIDERIS, K. 2004. *Estimation of ultimate modulus of elasticity and Poisson ratio of normal concrete. Cement and Concrete Composites*, 26, 623-631.

- SKODRAS, G., GRAMMELIS, P., KAKARAS, E., KARANGELOS, D., ANAGNOSTAKIS, M. & HINIS, E. 2007. *Quality characteristics of Greek fly ashes and potential uses. Fuel Processing Technology, 88, 77-85.*
- SOEDA, K. & ICHIMURA, T. 2003. *Present state of corrosion inhibitors in Japan. Cement and Concrete Composites, 25, 117-122.*
- SÖYLEV, T. A. & RICHARDSON, M. G. 2008. *Corrosion inhibitors for steel in concrete: State-of-the-art report. Construction and Building Materials, 22, 609-622.*
- SULEIMAN, A. R., SOLIMAN, A. M. & NEHDI, M. L. 2014. *Effect of surface treatment on durability of concrete exposed to physical sulfate attack. Construction and Building Materials, 73, 674-681.*
- SURYAVANSHI, A. K., SCANTLEBURY, J. D. & LYON, S. B. 1996. *Mechanism of Friedel's salt formation in cements rich in tri-calcium aluminate. Cement and Concrete Research, 26, 717-727.*
- TAYLOR H.F.W. 1990. *cement chemistry, 2nd edition, Academic Press.*
- TSAKIRIDIS, P. E., AGATZINI-LEONARDOU, S., OUSTADAKIS, P., KATSIOTI, M. & MAURIDOU, E. 2005. *Examination of the jarosite–alunite precipitate addition in the raw meal for the production of portland cement clinker. Cement and Concrete Research, 35, 2066-2073.*
- TSIMAS, S. & MOUTSATSOU-TSIMA, A. 2005. *High-calcium fly ash as the fourth constituent in concrete: problems, solutions and perspectives. Cement and Concrete Composites, 27, 231-237.*
- UNIVERSITY_OF_CANTEBURY. 2012. *Determination of Chloride by Precipitation Titration with Silver Nitrate - Mohr's Method [Online]. New Zealand. Available: http://www.outreach.canterbury.ac.nz/chemistry/chloride_mohr.shtml.*
- UYSAL, M. & AKYUNCU, V. 2012. *Durability performance of concrete incorporating Class F and Class C fly ashes. Construction and Building Materials, 34, 170-178.*
- VAN DER MERWE, E. M., PRINSLOO, L. C., MATHEBULA, C. L., SWART, H. C., COETSEE, E. & DOUCET, F. J. 2014. *Surface and bulk characterization of an ultrafine South African coal fly ash with reference to polymer applications. Applied Surface Science, 317, 73-83.*
- VANCE, K., AGUAYO, M., OEY, T., SANT, G. & NEITHALATH, N. 2013. *Hydration and strength development in ternary portland cement blends containing limestone and fly ash or metakaolin. Cement and Concrete Composites, 39, 93-103.*
- VEDALAKSHMI, R., SUNDARA RAJ, A., SRINIVASAN, S. & GANESH BABU, K. 2003. *Quantification of hydrated cement products of blended cements in low and medium strength concrete using TG and DTA technique. Thermochemica Acta, 407, 49-60.*
- VETTER K.J. 1955. *Die Korrosion des passiven Eisens in saurer Lösung. Zeitschrift für Elektrochemie, pp.67-72.*

- WAGNER, C. 1965. *Passivity and inhibition during the oxidation of metals at elevated temperatures*. *Corrosion Science*, 5, 751-764.
- WANG, H. & LI, Q. 2007. *Prediction of elastic modulus and Poisson's ratio for unsaturated concrete*. *International Journal of Solids and Structures*, 44, 1370-1379.
- WANG, X.-Y. 2014. *Effect of fly ash on properties evolution of cement based materials*. *Construction and Building Materials*, 69, 32-40.
- YEN, T., HSU, T.-H., LIU, Y.-W. & CHEN, S.-H. 2007. *Influence of class F fly ash on the abrasion-erosion resistance of high-strength concrete*. *Construction and Building Materials*, 21, 458-463.
- ZACHAROPOULOU, E., ZACHAROPOULOU, A., SEYEDALHOSSEINI A., BATIS, G. & TSIVILIS, S. 2013. *Effect of corrosion Inhibitors in Limestone cements*. *Materials sciences ans Applications*, vil.4,12A, pp.12-19.
- ZAFEIROPOULOU, T., RAKANTA, E. & BATIS, G. 2011. *Performance evaluation of organic coatings against corrosion in reinforced cement mortars*. *Progress in Organic Coatings*, 72, 175-180.
- ZAFEIROPOULOU, T., RAKANTA, E. & BATIS, G. 2013. *Carbonation Resistance and Anticorrosive Properties of Organic Coatings for Concrete Structures*. *JSEMAT*, VOL.3/1A, 67-74.
- ZAFEIROPOULOU T., RAKANTA E. & BATIS G. 2012. *Industrial Coatings for high performance application: Physicochemical characteristics and anti-corrosion behavior*. *Brick and Mortar Research*, capter 9, 245-258.
- ZERIS, C., BATIS, G. & MARAKIS, J. 2014. *Accelarated corrosion investigation of axially loaded reinforced concrete elements*. *anti-corrosion methods and materials*, vol.61, No4, pp.215-223.
- ZHANG, W. & CHENG, C. Y. 2007. *Manganese metallurgy review. Part I: Leaching of ores/secondary materials and recovery of electrolytic/chemical manganese dioxide*. *Hydrometallurgy*, 89, 137-159.
- ΒΑΛΑΒΑΝΙΔΗΣ ΑΘ. 2006. *Οικοτοξικολογία και Περιβαλλοντική Τοξικολογία, Έρευνητική Μεθοδολογία και Εκτίμηση Οικολογικού Κινδύνου από Επικίνδυνες Χημικές Ουσίες*, Αθήνα, ΕΚΠΑ, τμήμα Χημείας.
- ΒΑΜΒΑΤΣΙΚΟΣ, Β., ΒΟΥΓΙΟΥΚΑΣ, Ε. & ΑΒΡΑΑΜ, Τ. *Οπλισμένο Σκυρόδεμα - Μεταλλικές Κατασκευές*, κεφ.2, Αθήνα, ΕΜΠ.
- ΓΡΗΓΟΡΙΑΔΗΣ Γ. 2014. *Σχεδιασμός τσιμεντών υψηλής ανθεκτικότητας με χρήση παραπροϊόντων της τσιμεντοβιομηχανίας*, Αθήνα, ΕΜΠ.
- ΔΗΜΟΣ ΛΑΚΑΤΑΜΙΑΣ 2009. *Έλεγχος ποιότητας Υδατων στα όρια του Δήμου*, Τεχνική Έκθεση, Λευκωσία, Κύπρος.
- ΕΛΟΤ-345 1979. *Το Ύδωρ αναμίξεως και συντηρήσεως σκυροδέματος*.
- ΕΛΟΤ-959 1996. *Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος*.

- ΕΛΟΤ-971 1996. Συγκολλησιμοι Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος.
- ΕΛΟΤ 1421-3 2004. Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος - Συγκολλησιμοι Χάλυβες - Μέρος 3: ΤΕΧΝΙΚΗ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ Β500C
- ΕΛΟΤ EN 1421 2005. Μέρος 3, Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος, κατηγορίας Β500C.
- ΕΛΟΤ EN 197-1 2000. Τσιμέντο-Μέρος 1:Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για κοινά τσιμέντα.
- Ι.Τ.Ε.Σ.Κ 2001. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΝΕΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΣΤΗ ΔΥΤΙΚΗ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ.
- ΚΑΤΕΡΙΝΟΠΟΥΛΟΣ Α. & ΜΑΓΚΑΝΑΣ Α. 2000. Συστηματική ορυκτολογία, Αθήνα, ΕΚΠΑ.
- ΚΟΥΛΟΥΜΠΗ, Ν., ΜΟΡΟΠΟΥΛΟΥ, Α. & ΜΠΑΤΗΣ, Γ. 2008. Υλικά Ι (σημειώσεις), Αθήνα, Εκδόσεις ΕΜΠ.
- ΚΟΥΛΟΥΜΠΗ Ν. 1999. Διάβρωση και προστασία, ΑΘΗΝΑ, ΕΜΠ.
- ΚΟΥΛΟΥΜΠΗ Ν. 2005. Ηλεκτροχημεία, Αθήνα, εκδοσεις Συμεών.
- ΚΩΤΣΟΒΟΣ, Μ. Δ. 2001. Οπλισμένο σκυρόδεμα, pp 28-33, Αθήνα, Εκδόσεις ΕΜΠ.
- ΜΑΛΑΜΟΥΤΗ Σ. 2007. Μελέτη προστασίας χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος από την ατμοσφαιρική διάβρωση με αναστολείς διάβρωσης, μεταπτυχιακή εργασία, Αθήνα, ΕΜΠ.
- ΜΑΥΡΟΕΙΔΗΣ Π. 2005. Χάλυβες Οπλισμού Σκυροδέματος με βάση τις σύγχρονες απαιτήσεις των κανονισμών, Αθήνα, Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- ΜΑΥΡΟΕΙΔΗΣ Π. 2008. ΗΜΕΡΙΔΑ 'Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος, Νέες Απαιτήσεις Προτύπων ΕΛΟΤ EN 10080, ΕΛΟΤ 1421-2, 1421-3 και Κανονισμού Τεχνολογίας Χαλύβων (ΚΤΧ-2007)'. Αλεξανδρουπολη.
- ΜΑΥΡΟΕΙΔΗΣ Π. 2009. Χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος: Νέες προδιαγραφές και απαιτήσεις
- ΜΟΡΟΠΟΥΛΟΥ, Α. 2011. Χαρακτηρισμός, Έλεγχος Ποιότητας, Διάγνωση Φθοράς και Συντήρηση Δομικών Υλικών, Μεθοδολογία Ενόργανων και Μη καταστρεπτικών τεχνικών pp 177-179, 357-361, εκδόσεις ΕΜΠ.
- ΜΟΡΟΠΟΥΛΟΥ Α. & ΚΟΥΛΟΥΜΠΗ Ν. 2012. Φθορά και προστασία Υλικών, Αθήνα, ΕΜΠ.
- ΜΠΑΔΟΓΙΑΝΝΗΣ Ε. 2012. ΤΕΧΝΙΚΑ ΥΛΙΚΑ, 2ο εξάμηνο, Αθήνα,, ΕΜΠ.
- ΜΠΑΤΗΣ, Γ. & ΡΟΥΤΟΥΛΑΣ, Α. Τ. Βελτιστοποίηση συνδυασμού ιπτάμενης τέφρας και παραπροϊόντος κοιτάσματος πορφυρίτη στην νθεκτικότητα σκυροδέματος. 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, , 2009 Πάφος, Κύπρος. ΤΕΕ, ΕΤΕΚ.
- ΜΠΑΤΗΣ Γ. 1999. Φθορά και προστασία υλικών', ΑΘΗΝΑ, ΕΜΠ.
- ΝΤΑΦΛΟΥ, Ε. 2012. Ανθεκτικότητα οργανικών επικαλύψεων που περιέχουν αναστολεις διάβρωσης, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, ΕΜΠ.
- ΟΑΣΠ 2011. Κανονισμός επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ). Τελικό εναρμοσμένο κείμενο, Αθήνα, Υπουργείο Υποδομών. Μεταφορών και Δικτύων.

- ΟΞΕΝΚΙΟΥΝ-ΠΕΤΡΟΠΟΥΛΟΥ, Μ. 2007. Αναλύσεις δειγμάτων νερού Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου», Τεχνική Έκθεση Ποιότητας, Αθήνα, ΕΜΠ.
- ΠΕΡΡΑΚΗ Θ. 2013. Βιομηχανικά ορυκτα και πετρώματα - Αργίλοι, Αθήνα, ΕΜΠ.
- ΠΡΑΣΣΙΑΝΑΚΗΣ, Ι. 1997. Μη Καταστροφικός Έλεγχος των Υλικών. Η Μέθοδος των Υπερήχων, ΕΜΠ.
- ΡΑΚΑΝΤΑ-ΖΑΧΑΡΙΟΥ Ε. 2010. «Διερεύνηση της χρήσης ειδικών προσθέτων για την προστασία του οπλισμού στο σκυρόδεμα», Διδακτορική διατριβή,, Αθήνα, ΕΜΠ.
- ΡΟΥΤΟΥΛΑΣ Α.Τ. 2000. ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΟΜΗΣΙΜΩΝ ΥΛΙΚΩΝ, Αθήνα, ΤΟΜΕΑΣ ΧΗΜΕΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ, ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ.
- ΣΙΔΕΡΗΣ Κ.Κ. 1997. Τεχνολογία Δομικών Υλικών, Ξάνθη, Δ.Π.Θ.
- ΣΤΑΜΑΤΑΚΗΣ Μ. & ΚΑΤΕΡΙΝΟΠΟΥΛΟΣ Α. 1995. Έφαρμοσμένη ορυκτολογία-πετρολογία. Τα βιομηχανικά ορυκτά και πετρώματα και οι χρήσεις τους', πανεπιστήμιο Αθηνών pp. 247-250, 310-311.
- ΤΑΣΙΟΣ Θ.Π. & ΑΛΙΓΙΖΑΚΗ Κ. 1993. Ανθεκτικότητα οπλισμένου σκυροδέματος, Αθήνα, Εκδόσεις Φοίβος.
- ΤΣΑΚΑΛΑΚΗΣ Κ. 20010. Ενυδάτωση του τσιμέντου, Αθήνα, ΕΜΠ.
- ΤΣΙΜΑΣ Σ. 2001. Δομικά υλικά, ΑΘΗΝΑ, ΕΜΠ.
- ΤΣΙΜΑΣ Σ. & ΤΣΙΒΙΛΗΣ Σ. 2004. Επιστήμη και τεχνολογία τσιμέντου, ΑΘΗΝΑ, ΕΜΠ.
- Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ. 2008. Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος (ΚΤΧ-2008), ΑΘΗΝΑ.
- ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΥΠΟΔΟΜΩΝ, Μ. Κ. Δ. 2015. Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος (Κ.Τ.Σ). 2015. Αθήνα.
- ΥΦΑΝΤΗΣ Δ. 2006. Υλικά, διάβρωση και προστασία', ΑΘΗΝΑ, ΕΜΠ.
- ΦΑΡΔΗΣ Μ. 2004. Ανθεκτικότητα του οπλισμένου σκυροδέματος σε διάρκεια, αφιέρωμα.
- ΦΕΚ 551/Β 18 Απριλίου 2007. In: ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, Χ. Κ. Δ. Ε. (ed.). Αθήνα: ΕΦΗΜΕΡΙΣ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑΣ.
- ΧΟΥΣΙΔΗΣ Ν. 2008.** Μελέτη της διάβρωσης οπλισμού σε κονιάματα με σύνθετα τσιμέντα Portland με πρόσθετο απόβλητο κοιτάσματος σκωριών (Μεταπτυχιακή Διατριβή), Αθήνα, ΕΜΠ.
- ΧΟΥΣΙΔΗΣ Ν.,** ΡΑΚΑΝΤΑ Ε., ΙΩΑΝΝΟΥ Ι. & ΜΠΑΤΗΣ Γ. 2015. Αξιοποίηση των αποβλήτων από την παραγωγή Ηλεκτροχημικού Οξειδίου Μαγγανίου σε σκυρόδεμα εκτεθειμένο σε θειικά άλατα. 4^ο Συνέδριο ΕΒΙΠΑΡ. Θεσσαλονίκη.
- ΧΟΥΣΙΔΗΣ Ν.,** ΡΑΚΑΝΤΑ Ε., ΙΩΑΝΝΟΥ Ι. & ΜΠΑΤΗΣ Γ. 2015. Επίδραση της σιδηρούχας σκωρίας ελάστρων στις μηχανικές ιδιότητες και στην ενυδάτωση του σκυροδέματος. 10^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Χημικής Μηχανικής. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πάτρας.

ΧΟΥΣΙΔΗΣ Ν., ΡΑΚΑΝΤΑ Ε. & ΜΠΑΤΗΣ Γ. 2013. *χρησιμοποίηση ορυκτών πρόσθετων στο σκυρόδεμα από παραπροϊόντα της βιομηχανίας παραγωγής ηλεκτροχημικού MnO₂. 9^ο πανελλήνιο συνέδριο χημικής μηχανικής,. Αθήνα: ΕΜΠ.*

ΧΟΥΣΙΔΗΣ Ν., ΡΑΚΑΝΤΑ Ε. & ΜΠΑΤΗΣ Γ. 2014. *Ανθεκτικότητα του οπλισμένου κονιάματος/σκυροδέματος με τη χρήση Ιπτάμενης Τέφρας τύπου C,. 6^ο Συνέδριο Ελληνικής κεραμικής εταιρίας,. Αθήνα, ΕΜΠ: Ελληνική Κεραμική εταιρία.*