

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΘΕΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ – ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Ε. Υφαντή¹, Ε.Γ. Παπαδάκης², Δ. Σπαρτινός^{1,*}

¹Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Ελλάδα

²Τμήμα Διαχείρισης Περιβάλλοντος & Φυσικών πόρων, Πανεπιστήμιο Πατρών, Αργίτιο, Ελλάδα

[*dspart@chemeng.upatras.gr](mailto:dspart@chemeng.upatras.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το σκυρόδεμα αποτελεί το πλέον διαδεδομένο υλικό δόμησης που χρησιμοποιείται για κατασκευές στη σύγχρονη εποχή. Η εκτεταμένη χρήση του έχει δημιουργήσει την ανάγκη για περαιτέρω μελέτη των ιδιοτήτων του, καθώς τα προβλήματα που σχετίζονται με τη φθορά του και τις τελικές αποχίες του αυξάνονται. Η φθορά επηρεάζει την αντοχή του σε διάρκεια και συνεπώς καθιστά μη ασφαλείς τις κατασκευές μετά το πέρας κάποιου χρονικού διαστήματος. Συνεπώς, η επιστημονική κοινότητα ασχολείται πλέον πιο έντονα με την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος σε διάρκεια και όχι μόνο με τις μηχανικές αντοχές του. Η παρουσία ή η διείδυση μεγάλης ποσότητας θεικών ιόντων στο σκυρόδεμα με ταυτόχρονη δέσμευση νερού οδηγούν στη δημιουργία ενώσεων μεγάλου μοριακού όγκου που επιφέρουν τελικά εσωτερικές τάσεις ρηγμάτωσης του σκυροδέματος και δραστική μείωση της ανθεκτικότητάς του σε διάρκεια.

Ευρύτερος σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η θεωρητική μελέτη της διείδυσης των θεικών ιόντων στο σκυρόδεμα και η επίδρασή της στη διάρκεια ζωής των κατασκευών. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε συγκέντρωση βιβλιογραφικού υλικού, που σχετίζεται με τον μηχανισμό φθοράς του σκυροδέματος μέσω δράσης των θεικών, και έγινε εκτενής και συγκριτική μελέτη αυτού. Διατυπώθηκε το σχετικό μαθηματικό μοντέλο με βάση πειραματικά αποτελέσματα και πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις για πρόβλεψη και σχεδιασμό με χρήση του υπολογιστικού πακέτου EUCON[®].

Από την ανάλυση αυτή προέκυψαν ενδιαφέροντα αποτελέσματα, σχετικά με τις ικανότητες του υπολογιστικού μοντέλου και τις προβλέψεις του. Τα αποτελέσματα του μοντέλου βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν και αποτελούν σημαντική πηγή πληροφοριών για περαιτέρω μελέτη της προσβολής σκυροδέματος μέσω θεικών ιόντων.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το τσιμέντο αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα υλικά του σύγχρονου πολιτισμού μας. Με βάση το τσιμέντο και άλλα υλικά δημιουργείται το σκυρόδεμα, το πλέον διαδεδομένο υλικό δόμησης των ημερών μας. Η τεχνολογία σκυροδέματος και οι επιστήμες που αφορούν στη μελέτη υλικών έχουν σημειώσει σημαντική πρόοδο, όμως παραμένουν τα προβλήματα ανεπαρκούς ανθεκτικότητας σε διάρκεια. Η διάβρωση του οπλισμού αναδεικνύεται ως το σημαντικότερο πρόβλημα στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα όχι μόνο σημαντικό οικονομικό κόστος, επειδή το κόστος επισκευών είναι σχεδόν ίσο με το κόστος μιας νέας κατασκευής, αλλά και σημαντικές επιπτώσεις στην ασφάλεια της κατασκευής έναντι επιβαλλόμενων δράσεων.

Η φθορά του σκυροδέματος είναι αποτέλεσμα μηχανικών, φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών. Οι χημικές διεργασίες περιλαμβάνουν τη χημική δράση επιβλαβών ουσιών (μορίων ή ιόντων) στο σκυρόδεμα και η παρουσία νερού είναι αναγκαία συνθήκη για να λάβουν χώρα.

Λόγω του χαμηλού ρυθμού μεταφοράς αυτών των συστατικών στη μάζα του σκυροδέματος, αυτές οι αντιδράσεις μπορεί να χρειαστούν πολλά χρόνια ώστε να επιδράσουν καταστρεπτικά στο σκυρόδεμα. Στην πράξη οι πλέον συνήθεις χημικές αντιδράσεις στο σκυρόδεμα είναι: η επίδραση οξέων, η επίδραση θεικών και η αλκαλοπυριτική αντίδραση ^[1].

Η επίδραση θεικών στο σκυρόδεμα συνίσταται στην αντίδραση των θεικών ιόντων κυρίως με την αργλική φάση του τσιμέντου. Ως αποτέλεσμα της αντίδρασης αυτής προκαλείται διόγκωση στο σκυρόδεμα, οδηγώντας τελικά σε ρηγμάτωση και αποσύνθεση ^[1].

Για την παρασκευή του σκυροδέματος χρησιμοποιούνται τσιμέντο, νερό, άμμος και σκύρα. Το τσιμέντο, όταν ενωθεί με το νερό αντιδρά χημικά, γι' αυτό ονομάζεται και ενεργό υλικό σκυροδέματος. Τα υλικά άμμος, γαρμπίλι, χαλίκι και σκύρα ονομάζονται αδρανή, διότι διατηρούν όλες τις φυσικές και χημικές τους ιδιότητες και μετά την πήξη και σκλήρυνση του σκυροδέματος ^[2]. Συνιστούν την πετρώδη δομή του, της οποίας τα κενά πρέπει να είναι πληρωμένα όσο το δυνατόν περισσότερο με τη συνδετική κονία. Τα αδρανή του σκυροδέματος αποτελούν, κατά προσέγγιση, το 80% του συνολικού βάρους του και καταλαμβάνουν το 70-75% του όγκου του. Η αναλογία του νερού στο μίγμα είναι καθοριστικός παράγοντας επίτευξης των επιθυμητών αντοχών στο σκυρόδεμα και πρέπει να διατηρείται αυστηρά στα όρια που καθορίζει η μελέτη σύνθεσης. Εν γένει, λιγότερο νερό συνεπάγεται μεγαλύτερες αντοχές και περισσότερο νερό σημαίνει υψηλότερη εργασιμότητα ^[2].

Το σκυρόδεμα παρουσιάζει πολύ καλές ιδιότητες, γι' αυτό και σήμερα είναι το βασικότερο δομικό υλικό. Οι σπουδαιότερες ιδιότητές του είναι: η ανθεκτικότητα, η αντοχή στη θλίψη, η αντοχή στην κάμψη και στον εφελκυσμό, η αντοχή στην τριβή, το πορώδες και η στεγανότητα ^[3]. Οι ιδιότητες του σκληρυνθέντος σκυροδέματος επηρεάζονται από τους εξής παράγοντες ^[4]: Βαθμός ενυδάτωσης, λόγος νερού/τσιμέντο (W/C), θερμοκρασία, υγρασία. Οι προσβολές από θειικά μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα είτε τη διόγκωση και ρηγμάτωση του σκυροδέματος, είτε να οδηγήσουν στη βαθμιαία μείωση της αντοχής σε θλίψη ^[5].

Η ρηγμάτωση και η αποφλοίωση επιτρέπουν στο δραστικό και διαβρωτικό (υπόγειο) νερό να διεισδύσει πιο εύκολα, σαν άμεσο αποτέλεσμα της αυξημένης διαπερατότητας, που θα επιταχύνει αποτελεσματικά την αποσάθρωση του προσβλημένου σκυροδέματος. Αυτό είναι επίσης γνωστό ως εξωτερική προσβολή από θειικά ^[5].

Εξωτερική προσβολή (external sulfate attack): Είναι η διείσδυση διαλυμένων θεικών, π.χ. από υπόγεια ύδατα μέσα στο σκυρόδεμα από το εξωτερικό περιβάλλον ^[6].

Εσωτερική προσβολή (internal sulfate attack): Είναι η διείσδυση μιας διαλυμένης ουσίας (π.χ. της γύψου) ενσωματωμένης μέσα στο σκυρόδεμα την ώρα της ανάμιξης ^[6].

Η εξωτερική προσβολή περιλαμβάνει εκτεταμένη ρωγμή, διόγκωση και απώλεια ισχύος δεσμού ανάμεσα στη τσιμεντόπαστα και στο μίγμα. Αλλαγές στη σύνθεση της τσιμεντόπαστας οδηγούν στη μετατροπή της μονοσουλφιδικής φάσης σε ετρινγκίτη και σε επόμενα στάδια σε σχηματισμό γύψου. Η επίδραση αυτών των αλλαγών έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια της συνολικής δύναμης του σκυροδέματος. Η εσωτερική προσβολή περιλαμβάνει την περίπτωση του καθυστερημένου σχηματισμού ετρινγκίτη, ο οποίος προκαλεί διόγκωση στο σκυρόδεμα.

Η καταστροφή του σκυροδέματος επέρχεται ως συνδυασμός δύο διαφορετικών καταστροφικών μηχανισμών: Της ρηγμάτωσης λόγω της διόγκωσης, που προκαλείται από το σχηματισμό του ετρινγκίτη, και της διάρρηξης του ιστού των ένυδρων συστατικών της τσιμεντόπαστας. Τα ένυδρα του τριασβεστίου του αργιλίου και το υδροξείδιο του ασβεστίου αντιδρούν με τα θειικά

άλατα και σχηματίζουν στερεά προϊόντα με όγκο μεγαλύτερο από αυτόν που καταλαμβάνουν. Ο εττρινγκίτης και η γύψος είναι τα κύρια προϊόντα των αντιδράσεων αυτών ^[6].

ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟ

Το χημειο-μεταφορικό μοντέλο περιλαμβάνει την περιγραφή των χημικών αντιδράσεων και της ρόφησης, των ιόντων μέσα στην φάση του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού, το σύστημα διαφορικών εξισώσεων και τη μέθοδο επίλυσής του. Πιο αναλυτικά, αρχικά αναφέρονται οι ρυθμοί της ρόφησης-εκρόφησης και της συνολικής αντίδρασης και παρουσιάζονται αναλυτικά οι μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν τους ρυθμούς αυτούς κατά το πρότυπο Langmuir. Εν συνεχεία, γίνεται διατύπωση των διαφορικών εξισώσεων του μαθηματικού μοντέλου. Υποτίθεται ότι το σύστημα είναι σε μόνιμη κατάσταση και βρίσκονται οι κινητικές σταθερές αυτών των εξισώσεων. Ακολουθεί η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων με τον ορισμό των αρχικών και συνοριακών συνθηκών. Η χρησιμότητα των συνθηκών αυτών έγκειται στον υπολογισμό των διάφορων παραμέτρων συναρτήσει της συγκέντρωσης του σκυροδέματος. Παράλληλα, προκειμένου να γίνει απλοποίηση του συστήματος των διαφορικών εξισώσεων πραγματοποιείται η αδιαστατοποίησή τους καθώς και απλοποιήσεις-προσεγγίσεις. Η ανάλυση ολοκληρώνεται με τον υπολογισμό όλων των παραμέτρων και την επιβεβαίωση του προτεινόμενου μοντέλου.

Η χημική προσβολή του σκυροδέματος μπορεί να συμβεί είτε εξωτερικά είτε εσωτερικά. Στη συγκεκριμένη ανάλυση αναφέρονται οι χημικές αντιδράσεις κατά την εξωτερική χημική προσβολή. Τα θειικά ιόντα βρίσκονται στον περιβάλλοντα χώρο του σκυροδέματος και διεισδύουν εντός αυτού μέσω διάχυσης. Αποτέλεσμα αυτής της διείσδυσης είναι η παραγωγή του εττρινγκίτη που αποτελεί την βασική αιτία πρόκλησης φθοράς στο σκυρόδεμα ^[7]. Πιο αναλυτικά, όλες οι χημικές αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα ανάμεσα στα θειικά ιόντα και στα συστατικά του τσιμέντου. Οι πόροι του σκυροδέματος είναι πλήρως ή μερικώς πληρωμένοι με νερό. Ο βαθμός του κορεσμού των πόρων εξαρτάται από τη διάμετρό τους και από την σχετική υγρασία που επικρατεί στο περιβάλλον. Διαμέσου αυτών των υπαρχόντων πόρων γίνεται η είσοδος των ιόντων στο σκυρόδεμα ^[7].

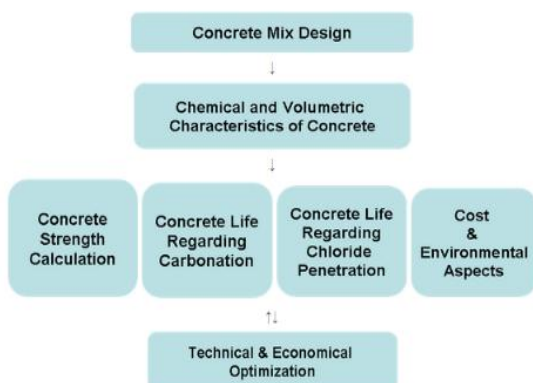
Στο πρώτο στάδιο, πραγματοποιείται η αντίδραση ανάμεσα στα θειικά ιόντα που υπάρχουν στο περιβάλλον και στο ένυδρο πυριτικό ασβέστιο (C-S-Hgel). Το αποτέλεσμα αυτής της χημικής αντίδρασης είναι η παραγωγή της γύψου $C\bar{S}H_2$. Πρέπει να αναφερθεί πως στην ανάλυση που πραγματοποιείται δε μελετάται η δημιουργία της γύψου. Η παραγωγή αυτού του προϊόντος αποτελεί απλώς ένα ενδιάμεσο στάδιο κατά την θειική προσβολή του σκυροδέματος ^[7]. Η αιτιολόγηση της μη μελέτης της γύψου έγκειται στο γεγονός πως ο σχηματισμός του εττρινγκίτη είναι αυτός που προκαλεί την φθορά στο σκυρόδεμα και αποτελεί το βασικό προϊόν προς ανάλυση.

Στο δεύτερο στάδιο, η γύψος που έχει δημιουργηθεί αντιδρά με τα αργιλικά άλατα ασβεστίου, τα οποία υπάρχουν στην πάστα τσιμέντου, σχηματίζοντας τον εττρινγκίτη $C_6A\bar{S}_3H_{32}$ ^[7]. Η μελέτη του ενδιάμεσου προϊόντος της θειικής προσβολής (γύψος) είναι αρκετά δύσκολη και πολύπλοκη. Στην επιστημονική κοινότητα παρατηρείται μια ασάφεια ως προς τον προσδιορισμό του ρόλου της γύψου στο μηχανισμό που προκαλεί την διόγκωση του σκυροδέματος ^[7]. Η είσοδος των θειικών ιόντων στην σκληρυμένη τσιμεντόπαστα είναι μια αντιστρέψιμη διαδικασία, που οδηγείται σε ισορροπία. Τα θειικά ιόντα απορροφώνται από το ένυδρο πυριτικό ασβέστιο (C-S-Hgel) και από άλλα συστατικά της σκληρυμένης τσιμεντόπαστας είτε είναι ενυδατωμένα, είτε όχι.

Αντιδρούν επίσης με τα αργιλικά συστατικά του τσιμέντου με αποτέλεσμα τον σχηματισμό νέων προϊόντων, του ετρινγκίτη. Έτσι μέσω αυτής της διαδικασίας ρόφησης-αντίδρασης τα διαλυμένα θειικά ιόντα, $SO_4^{-2}{}_{(aq)}$, απορροφώνται φυσικά ή χημικά στην στερεή φάση της τσιμεντόπαστας ως $SO_4^{-2}{}_{(s)}$. Κάποια από τα ιόντα $SO_4^{-2}{}_{(s)}$ που έχουν ροφηθεί, εκροφώνται, και η διαδικασία τείνει σε ισορροπία ανάμεσα στα $SO_4^{-2}{}_{(aq)}$ και στα $SO_4^{-2}{}_{(s)}$. Θέτουμε τον ρυθμό των $SO_4^{-2}{}_{(aq)}$ που ροφώνται στην στερεή φάση ως r_a και τον ρυθμό των $SO_4^{-2}{}_{(s)}$ που εκροφώνται στην υγρή φάση ως r_d . Σε συνθήκες πλήρους κορεσμού του σκυροδέματος, η ρόφηση των $SO_4^{-2}{}_{(aq)}$ περιγράφεται κατά το πρότυπο Langmuir. Τα θειικά ιόντα διαλύονται στην υγρή φάση των πόρων και διαχέονται στους κορεσμένους πόρους με νερό σύμφωνα με τον νόμο του Fick. Ο συντελεστής αποτελεσματικής διαχυτότητας των θειικών ιόντων $SO_4^{-2}{}_{(aq)}$ στο σκυρόδεμα, $D_{e,SO_4^{-2}}$ (m^2/s), εξαρτάται από την μοριακή διαχυτότητα των SO_4^{-2} στο νερό, το πορώδες ϵ , την κατανομή του μεγέθους των πόρων και από το βαθμό κορεσμού των πόρων. Επίσης, η ποσότητα και η κατανομή του νερού στους πόρους του σκυροδέματος μπορεί να μεταβάλλονται με το χρόνο, λόγω των διάφορων εξωτερικών συνθηκών υγρασίας. Η μεταφορά μάζας και η ρόφηση – εκρόφηση του νερού στους πόρους εισάγει επιπρόσθετους μηχανισμούς μεταφοράς για τα $SO_4^{-2}{}_{(aq)}$. Για πρακτικούς λόγους η κατανομή του νερού στους πόρους θεωρείται σταθερή, οπότε μόνο η διάχυση των $SO_4^{-2}{}_{(aq)}$ λαμβάνει χώρα.

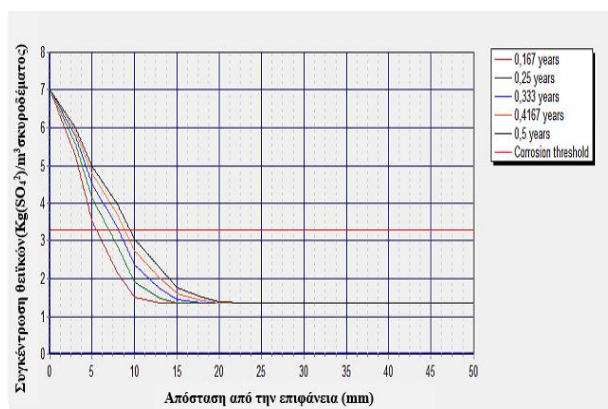
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η αριθμητική προσομοίωση του προαναφερθέντος μοντέλου. Σκοπός της αριθμητικής προσομοίωσης είναι ο έλεγχος της ισχύος του επιλεγέντος μοντέλου με σύγκρισή του με ανεξάρτητα πειραματικά δεδομένα. Για την πραγματοποίηση της αριθμητικής προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό EUCON[®] [8]. Πιο συγκεκριμένα, η δομή του λογισμικού πακέτου βρίσκεται σε πλήρη συμφωνία με το EN-197 πρότυπο για το τσιμέντο (το οποίο είναι εφαρμόσιμο σε 27 τύπους τσιμεντών) και το πρότυπο EN-206 για το σκυρόδεμα (συμπεριλαμβανομένης και τη χρήσης πρόσθετων όπως τέφρα, διοξειδίου του πυριτίου και άλλων συστατικών). Στο πρώτο στάδιο, επιλέγονται οι απαραίτητες παράμετροι που χαρακτηρίζουν τη σύνθεση του σκυροδέματος. Στο δεύτερο στάδιο, πραγματοποιείται ο υπολογισμός των κύριων χημικών και ογκομετρικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος. Βασιζόμενοι στις επιλεγμένες αναλογίες μίγματος εκτιμάται η τάξη αντοχής του σκυροδέματος. Τέλος, υπολογίζεται η διάρκεια ζωής του σκυροδέματος που βρίσκεται σε συγκεκριμένο περιβάλλον, το οποίο προκαλεί την θεική προσβολή. Όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, συνοψίζονται στο σχήμα 1 [6].

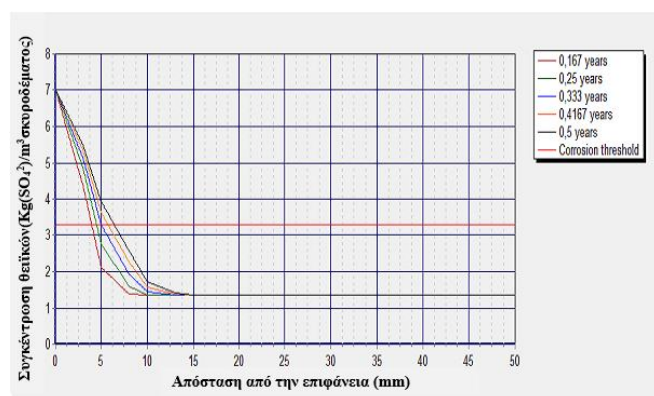


Σχήμα 1. Συνοπτική περιγραφή αριθμητικής προσομοίωσης με χρήση λογισμικού πακέτου EUCON[®]

Στη συγκεκριμένη εργασία τα πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αντλήθηκαν από την εργασία των Sun et al ^[9]. Τα δείγματα σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούνται από τσιμέντο, άμμο και χαλίκια αναμειγμένα με νερό. Οι διαστάσεις των δοκιμίων σκυροδέματος είναι 150 mm X 150 mm X 450mm. Ο τύπος τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκε είναι No. 325 Portland, το οποίο περιέχει 4.03% Al_2O_3 , 2.40% SO_3 , 6.23% $3CaO \cdot Al_2O_3$, 2.72% Fe_2O_3 και 0.43% f-CaO. Αφού κατασκευάστηκαν τα κατάλληλα καλούπια σκυροδέματος, αποθηκεύονται σε ειδικούς υγραντήρες. Η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή στους 20 °C και η σχετική υγρασία είναι στο 90% για 28 ημέρες. Έπειτα, κάθε ένα από τα δείγματα σφραγίζεται σε πέντε πλευρές και αφήνεται μόνο μια πλευρά ελεύθερη για τη διεξαγωγή πειραμάτων διάχυσης. Όλα τα δείγματα εμποτίστηκαν σε δυο δεξαμενές, μία με καθαρό νερό και μία με 5% διάλυμα θειικού νατρίου. Με χρήση του λογισμικού πακέτου EUCON πραγματοποιήθηκαν όλες οι υπολογιστικές προσομοιώσεις. Στο σχήμα 2 εμφανίζεται η συγκέντρωση των θειικών ιόντων έναντι της απόστασης από την επιφάνεια του σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου για 2 διαφορετικούς συντελεστές διάχυσης.



(α)



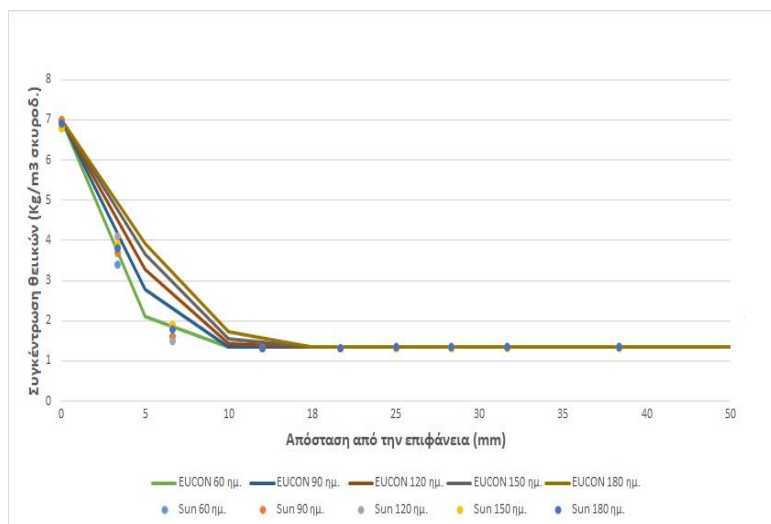
(β)

Σχήμα 2. Συγκέντρωση θειικών ιόντων έναντι της απόστασης από την επιφάνεια του σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου

(α) $De = 0.468 \text{ E-}12 \text{ m}^2/\text{s}$, (β) $De = 0.2 \text{ E-}12 \text{ m}^2/\text{s}$

Από το σχήμα 2 παρατηρείται ότι η μείωση του συντελεστή αποτελεσματικής διαχυτότητας των θειικών ιόντων έχει ως αποτέλεσμα την πτώση των τιμών της συγκέντρωσης στα πρώτα 10 mm κατά μήκος του σκυροδέματος. Η μεταβολή του συντελεστή αποτελεσματικής διαχυτότητας επηρεάζει τη διάχυση των ιόντων στα πρώτα στρώματα του δείγματος σκυροδέματος. Όμως μετά το πέρας του κρίσιμου πάχους των 10 mm οι τιμές και για τις δύο προσομοιώσεις παραμένουν σε παρόμοια επίπεδα.

Στο παρακάτω σχήμα 3 γίνεται σύγκριση των πειραματικών τιμών από την εργασία των Sun et al με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με τη χρήση του λογισμικού EUCON[®]. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των θειικών ιόντων συναρτήσει του βάθους διείδυσης στο σκυρόδεμα για 60, 90, 120, 150 και 180 ημέρες. Όπως φαίνεται στο σχήμα, οι πειραματικές τιμές βρίσκονται σε πολύ ικανοποιητική συμφωνία με τα αποτελέσματα του λογισμικού EUCON[®] για 0-3mm, στη συνέχεια παρουσιάζεται μια αρκετά μεγάλη απόκλιση για 4-9mm και τέλος υπάρχει πολύ καλή συμφωνία για βάθος διείδυσης μεγαλύτερο των 10mm.



Σχήμα 3. Συγκριτικό διάγραμμα πειραματικών με υπολογιστικών τιμών

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της εργασίας είναι η επίδραση της θεικής προσβολής στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος σε διάρκεια με την μαθηματική μοντελοποίηση της χημικής διεργασίας και την υπολογιστική προσομοίωση.

Για την καλύτερη προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων προέκυψε η ανάγκη για αλλαγές στις πειραματικές τιμές. Η βελτίωση της ακρίβειας με την αύξηση των υπολογιστικών κελιών οδήγησε σε βελτιωμένα αποτελέσματα και σε καλύτερη παρουσίαση των διαγραμμάτων.

Στην παρούσα εργασία που αποτελεί μια πρωταρχική πηγή πληροφοριών για τη μελέτη του συγκεκριμένου επιστημονικού θέματος, η προσομοίωση πειραματικών δεδομένων της εξωτερικής θεικής προσβολής στο σκυρόδεμα ήταν αρκετά ικανοποιητική.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Παπαδάκης, Ε., Υπολογισμός Διάρκειας Ζωής Οπλισμένου Σκυροδέματος Λόγω Διάβρωσης Οπλισμού, Ημερίδα Τεχνολογίας Σκυροδέματος και Χαλύβων, ΤΕΕ, Ιωάννινα, Δεκέμβριος, 2004.
- [2] Ευρύδογλου, Ε., Πτυχιακή Εργασία, Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης, 2013.
- [3] Παπαδάκης, Β., Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 1990.
- [4] Κωσταράς, Α., Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πειραιά, Πειραιάς, 2017.
- [5] www.penetron.gr
- [6] A.Campos, C. Lopez, A. Aguado, CONSTR BUILD MATER 102 (2016) 531-540.
- [7] T. Ikumi , S. Cavalaro, I.Segura , A. Aguado, Cement Concrete Res, 63 (2014) 105-116.
- [8] <http://www.eucon.gr>
- [9] C.Sun, J. Chen , J.Zhu, M. Zhang, J.Ye, CONSTR BUILD MATER, 39 (2013) 39-45.