

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ – ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ

Δρ. Σωτήρης Δέμης

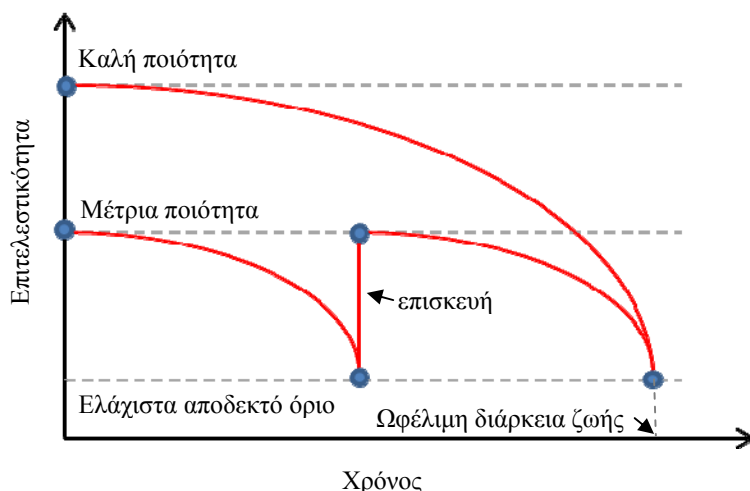
Πανεπιστημιακός Υπότροφος, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα έντονα σημάδια πρόωρης υποβάθμισης της διάρκειας ζωής κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος (ΟΣ), επιτάσσουν την ανάγκη ενός εμπειριστατωμένου σχεδιασμού ανθεκτικότητας. Στα πλαίσια του τελευταίου, προσδιοριστικά μοντέλα εκτίμησης της διάρκειας ζωής κατασκευών ΟΣ μπορούν να αποτελέσουν ένα σημαντικό εργαλείο. Ποιες οι αρχές πίσω από τη λειτουργία τους? Ποια τα αποτελέσματα τους και η σημασία τους? Ποια η επόμενη μέρα? Ερωτήματα που η παρούσα εργασία προσπαθεί να απαντήσει.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΝΑΓΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Με τον όρο «ανθεκτικότητα» μιας κατασκευής οπλισμένου σκυροδέματος (ΟΣ) σε διάρκεια (χρόνου) ορίζεται η ικανότητά της να αντιστέκεται σε επιθετικές περιβαλλοντικές δράσεις χωρίς η επιτελεστικότητά της να υποχωρεί κάτω από κάποιο αποδεκτό όριο. Τα σημάδια πρόωρης υποβάθμισης διάρκειας ζωής κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος (ΟΣ), ή με άλλα λόγια η πτώση στάθμης επιτελεστικότητας (Εικόνα 1) του φέρον οργανισμού που παρατηρούνται, ορίζουν σαφώς θέμα ανθεκτικότητας και επιτάσσουν την ανάγκη για έναν εμπειριστατωμένο σχεδιασμό ανθεκτικότητας, ειδικά κατά τα πρώιμα στάδια της μελέτης. Ο σχεδιασμός αυτός κρίνεται απαραίτητος, προκειμένου να αποφευχθούν όσο το δυνατόν πρώιμες φθορές και ρηγματώσεις λόγω επιθετικών περιβαλλοντικών παραγόντων. Στόχος του σχεδιασμού ανθεκτικότητας είναι (και πρέπει να είναι) ο προσδιορισμός της ωφέλιμης διάρκειας ζωής της κατασκευής, ή, στα πλαίσια μίας γενικότερης οικονομικό-τεχνικής ανάλυσης (*Life-cycle analysis*) ο προσδιορισμός του χρονικού σημείου της 1^{ης} επιδιόρθωσης/ενίσχυσης της κατασκευής, που υπόκειται (μεταξύ άλλων) σε περιβαλλοντικές δράσεις υπαίτιες για τη διάβρωση του χάλυβα οπλισμού.



Εικόνα 1. Γραφική απεικόνιση σχέσης επιτελεστικότητας και διάρκειας ζωής κατασκευών ΟΣ.

Όπως είναι γνωστό [1-3], ο "εγκιβωτισμένος" χάλυβας στο σκυρόδεμα, προστατεύεται από την διάβρωση λόγω ύπαρξης ενός λεπτού στρώματος οξειδίων του σιδήρου που δημιουργείται και διατηρείται στην επιφάνεια του λόγω της υψηλής αλκαλικότητας του περιβάλλοντος σκυροδέματος (τιμές pH γύρω στο 13.5).

Αποπαθητικοποίηση του χάλυβα οπλισμού και έναρξη του ηλεκτροχημικού φαινομένου της διάβρωσης προκύπτει είτε όταν τα χλωριόντα διεισδύσουν στο νερό των πόρων του σκυροδέματος και φθάσουν την ράβδο οπλισμού (μέσω υπέρβασης μιας κρίσιμης συγκέντρωσης), είτε όταν το pH του σκυροδέματος πέσει κάτω από 9, σαν αποτέλεσμα της *ενανθράκωσης του σκυροδέματος*, της αντίδρασής του με το CO₂ από την ατμόσφαιρα, που διαχέεται στους πόρους του σκυροδέματος, είτε λόγω συνδυασμού των δύο παραπάνω αναφερόμενων μηχανισμών. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε κατασκευές που βρίσκονται σε θαλάσσιο ή παράκτιο περιβάλλον, ή όπου γίνεται χρήση αλάτων τήξης χιονιού, η διείσδυση χλωριόντων είναι ο κύριος μηχανισμός έναρξης και συντήρησης της διάβρωσης του οπλισμού. Σε δε αστικές και βιομηχανικές περιοχές, πλούσιες σε ρύπους CO₂, η ενανθράκωση του σκυροδέματος είναι ο κύριος μηχανισμός που οδηγεί στην αποπαθητικοποίηση του χάλυβα. Κοινό στοιχείο και των δύο παραπάνω αναφερομένων χαρακτηριστικών αιτιών διάβρωσης είναι το ότι η εξέλιξη του φαινομένου της απαιτεί την παρουσία τόσο υγρασίας όσο και οξυγόνου. Τα αποτελέσματα της διάβρωσης, όπως η απώλεια μάζας και η μείωση διατομής του οπλισμού, η απώλεια συνάφειας μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος καθώς και η επακόλουθη ρηγμάτωση του σκυροδέματος, είναι είδη γνωστά, μελετημένα και δεν χρειάζεται να επεκταθούμε περαιτέρω.

Ο σχεδιασμός ανθεκτικότητας, προκειμένου να αποφευχθούν τα ανωτέρω, θα πρέπει να λαμβάνει με κάποιο τρόπο υπόψη τους παράγοντες που διαδραματίζουν καταλυτικό ρόλο στη συμπεριφορά του σκυροδέματος το οποίο εκτίθεται σε έντονα επιθετικά περιβαλλοντικά αίτια (που δύναται να προκαλέσουν διάβρωση του χάλυβα οπλισμού). Από πλευράς φυσικοχημικών διεργασιών, τέτοιο παράγοντες μπορούν να οριστούν ως, οι συνθήκες περιβαλλοντικής έκθεσης (θερμοκρασία, υγρασία, επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα, συγκέντρωση χλωριόντων) και η σύνθεση σκυροδέματος (ποσότητα, ποιότητα και τύπος επιμέρους συστατικών). Σαφώς ιδιαίτερο ρόλο και εξίσου κρίσιμο, αποτελούν η εκτέλεση, υλοποίηση και συντήρηση της κατασκευής.

Στους εν ισχύ Ευρωπαϊκούς κανονισμούς [4-6] η ανθεκτικότητα της κατασκευής προδιαγράφεται, μέσω του υπολογισμού της ελάχιστης (απαιτούμενης) επικάλυψης σκυροδέματος του χάλυβα οπλισμού καθώς και μέσω αρκετά σημαντικών περιορισμών και ορίων στη μελέτη σύνθεση σκυροδέματος (βάση κατηγορίας επιθετικής περιβαλλοντικής έκθεσης). Προδιαγράφονται επίσης, κριτήρια συμμόρφωσης και ελέγχου ποιότητας των παραγόμενων τσιμέντων και σκυροδεμάτων, καθορίζοντας αρμοδιότητες για τον *σχεδιαστή μηχανικό, τον παραγωγό και τον χρήστη*. Το σκεπτικό είναι, ότι εάν η μελέτη σύνθεσης γίνει σεβόμενοι τους σχετικούς περιορισμούς, τότε η απαιτούμενη επικάλυψη επαρκεί προκειμένου να προστατευθεί ο χάλυβας οπλισμού (να συνεχίσει να βρίσκεται σε παθητικοποιημένη κατάσταση) κατά τη διάρκεια ζωής του έργου. Λόγω του ότι αν και τηρώντας τα παραπάνω, σημάδια υποβάθμισης της ανθεκτικότητας των κατασκευών συνεχίζουν να παρατηρούνται (και εγείρουν ερωτήματα για τη σωστή υλοποίηση και συντήρηση της κατασκευής), κρίνεται σκόπιμος ο περαιτέρω εμπλουτισμός του σχεδιασμού ανθεκτικότητας κατασκευών με τη χρήση υπολογιστικών μοντέλων εκτίμησης της ωφέλιμης διάρκειας ζωής τους. Αυτή η προσπάθεια είναι σύμφωνη, έμμεσα, με τις προδιαγραφές ανθεκτικότητας στους ισχύοντες κανονισμούς, όπου (εκτός των άνω αναφερομένων προδιαγραφών) παρέχετε η δυνατότητα η ανθεκτικότητα κατασκευών να προδιαγραφεί και με μεθόδους που σχετίζονται με την επιτελεστικότητα. Μια

μέθοδος αυτής της μορφής εμπεριέχει (και πρέπει να εμπεριέχει) με ποσοτικό τρόπο κάθε σχετικό μηχανισμό φθοράς, την ωφέλιμη διάρκεια ζωής του στοιχείου ή της κατασκευής, και τα κριτήρια που καθορίζουν το τέλος αυτής.

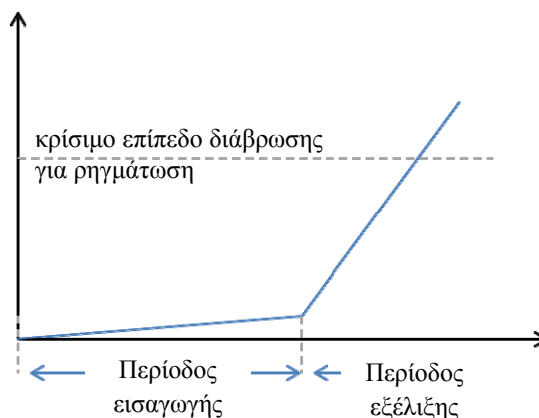
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Συνεπώς, η προσπάθεια ανάπτυξης μαθηματικών προσομοιωμάτων πρόβλεψης πρέπει να στραφεί κυρίως στους *μηχανισμούς έναρξης διάβρωσης του οπλισμού* στο σκυρόδεμα (ενανθράκωση και διείδυση χλωριόντων), και δευτερευόντως σε μηχανισμούς χημικής προσβολής (μέσω οξέων, θεικών ή αλκαλίων). Άλλωστε αυτοί είναι και οι κύριοι μηχανισμοί που απασχολούν το EN 206 [6]. Απαιτούνται λοιπόν αξιόπιστα προσομοιώματα πρόβλεψης των συγκεκριμένων διαδικασιών φθοράς του οπλισμένου σκυροδέματος, που να έχουν συμμορφωθεί με πειραματικά αποτελέσματα σε αντιπροσωπευτικές συνθήκες στην πράξη.

Τέτοιου τύπου μοντέλα στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετά [7-11]. Σε γενικές γραμμές μπορούν να διακριθούν σε

- **εμπειρικά** στα οποία οι προβλέψεις βασίζονται σε εμπειρικές σχέσεις μεταξύ διάρκειας ζωής, σύνθεσης σκυροδέματος και συνθηκών έκθεσης
- **φυσικοχημικά** που βασίζονται σε μαθηματικά μοντέλα φυσικοχημικών διεργασιών του εκάστοτε μηχανισμού φθοράς και
- **στοχαστικά** (τα οποία μπορεί να είναι και φυσικοχημικά) τα οποία εκτιμούν την διάρκεια ζωής με την μορφή μιας συνάρτησης κατανομής πιθανοτήτων.

Κοινό σημείο όλων των μοντέλων είναι ότι η διάρκεια ζωής της κατασκευής ορίζεται σύμφωνα με το μοντέλο του Tuutti [12], σαν το άθροισμα της περιόδου εισαγωγής (t_i) και εξέλιξης (t_p) στη διάβρωση (Σχήμα 2). Σαν περίοδος εισαγωγής στη διάβρωση μπορεί να ληφθεί ο χρόνος που απαιτείται ώστε, α) το βάθος ενανθράκωσης να φθάσει στη περιοχή του οπλισμού, με συνέπεια την αποπαθητικοποίηση του χάλυβα, ή β) η συγκέντρωση χλωριόντων υπερβεί στην περιοχή του οπλισμού μια κρίσιμη τιμή για διάβρωση. Ο δε χρόνος εξέλιξης της διάβρωσης, είναι η χρονική περίοδος που απαιτείται για την εξέλιξη των συνεπειών της διάβρωσης σε μη αποδεκτό βαθμό.



Εικόνα 2. Διάρκεια ζωής κατασκευής σύμφωνα με τον Tuutti [12]

Όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια, τα περισσότερα προσδιοριστικά μοντέλα αναφέρονται στον σχεδιασμό λόγω δράσεως χλωριόντων. Εξαιρέση αποτελεί το μοντέλο EUCON (που έχει αναπτυχθεί και επιβεβαιωθεί από τους Παπαδάκης [13, 14] και Δέμης [8, 15]) το οποίο είναι σε

θέση να εκτιμήσει με ακρίβεια την ωφέλιμη διάρκεια ζωής κατασκευών ΟΣ και λόγω δράσεως διοξειδίου τα άνθρακα από την ατμόσφαιρα.

Όσον αφορά τον σχεδιασμό για τη δράση χλωριόντων αξίζει να σημειωθεί, ότι για τον προσδιορισμό της διάρκειας ζωής ενός στοιχείο ΟΣ, πολύ μεγάλο ειδικό βάρος στη φυσικοχημική διεργασία φθοράς, έχει η μαθηματική προσέγγιση της διείσδυση των χλωριόντων στο σκυρόδεμα. Είναι μια διαδικασία που λαμβάνει χώρα σε πλήρως ή μερικώς γεμάτους πόρους με νερό. Τα χλωριόντα, φθάνοντας στην εξωτερική επιφάνεια ενός δομικού στοιχείου, διεισδύουν στους πόρους του σκυροδέματος είτε μέσω διάχυσης είτε μέσω τριχοειδούς απορρόφησης του επιφανειακού νερού στο οποίο διαλύονται, είτε με συνδυασμό των δυο αυτών μηχανισμών [16, 17]. Επίσης, λόγω του ότι η διαδοχική τους συγκέντρωση στην επιφάνεια χάλυβα δεν επιφέρει κάποια επακόλουθη βλάβη (εφόσον αυτή είναι κάτω από κάποια κρίσιμη στιγμή), ο χρόνος εισαγωγής στη διάβρωση (t_i) στα περισσότερα υπολογιστικά μοντέλα μπορεί να θεωρηθεί σαν η ωφέλιμη διάρκεια ζωής της κατασκευής.

Στις περισσότερες ερευνητικές μελέτες, ο ρυθμός διάχυσης των χλωριόντων στο σκυρόδεμα προσομοιώνεται από τον 2^ο νόμο του Fick, μη λαμβάνοντας όμως έτσι υπόψη τις φυσικοχημικές αλληλεπιδράσεις των χλωριόντων με τον σκληρυμένο τσιμεντοπολτό και θεωρώντας σταθερό συντελεστή διαχυτότητας με το χρόνο [17]. Είναι όμως τεκμηριωμένο το γεγονός ότι τα χλωριόντα δεσμεύονται από το σκυρόδεμα κατά 30-60% ανάλογα με την σύσταση και τον τύπο του τσιμέντου μέσω χημικών διεργασιών που περιλαμβάνουν την δέσμευση χλωριόντων από τα συστατικά της ενυδάτωσης του σκυροδέματος, ανταλλαγές ιόντων, αλλά και την δημιουργία μιας διπλής ιονοστοιβάδας [16, 18]. Επιπλέον, η απλή μορφή του δεύτερου νόμου του Fick υποθέτει σταθερότητα παραγόντων, δηλαδή σταθερή εξωτερική συγκέντρωση χλωριόντων αλλά και σταθερό (με τον χρόνο) συντελεστή διαχυτότητας. Πρόσφατες έρευνες έδειξαν ότι με την πάροδο του χρόνου λόγω της συνεχιζόμενης ενυδάτωσης και των συνεχών χημικών αντιδράσεων με τον τσιμεντοπολτό, ο συντελεστής διαχυτότητας μειώνεται [19, 20]. Οπότε, η όποια προσέγγιση βασίζεται εξολοκλήρου στην παραδοχή του δεύτερου νόμου του Fick (και όχι σε κάποια παραλλαγή της) δύναται να οδηγήσει σε υπολογισμό ενός «φαινόμενου» (apparent) μειωμένου από τον πραγματικό (intrinsic) συντελεστή διαχυτότητας CI , προσφέροντας έτσι μία υπο-εκτίμηση των πραγματικών συνθηκών διείσδυσης και διάχυσης CI , αλλά και διάρκειας ζωής. Στη περίπτωση δε όπου η δέσμευση χλωριόντων λαμβάνεται υπόψη, υπολογίζεται ο πραγματικός συντελεστής διαχυτότητας που οδηγεί σε ποιο ακριβή πρόβλεψη της διάρκειας ζωής.

Τα περισσότερα εμπειρικά μοντέλα, συνήθως βασίζονται σε εκτίμηση των «συνολικών» χλωριόντων (ελεύθερα και δεσμευμένα), λόγω του ότι είναι αρκετά πιο εύκολο να μετρηθούν, κατά τα πειράματα στα οποία βασίζονται. Αυτό όμως εμπεριέχει ένα αρκετά σημαντικό ποσοστό λάθους, λόγω του ότι τα «ελεύθερα» χλωριόντα είναι αυτά που παίζουν καταλυτικό ρόλο στην εξέλιξη του φαινομένου της διάβρωσης [19, 20]. Ενώ τα φυσικοχημικά μοντέλα, συνήθως μέσω συστημάτων μη-γραμμικών διαφορικών εξισώσεων λαμβάνουν υπόψη τους το πραγματικό μηχανισμό διείσδυσης χλωριόντων στο σκυρόδεμα.

Αρα, ένα μοντέλο εκτίμησης διάρκειας ζωής σκυροδέματος, βασιζόμενο σε συγκεκριμένα δεδομένα λαμβάνοντας υπόψη τους συγκεκριμένους περιορισμούς μιας κατασκευής (όπως τοποθεσία, μελέτη σύνθεσης, χρήση κτιρίου, κλπ) μέσω μαθηματικών μοντέλων που προσομοιώνουν τη διείσδυση χλωριόντων στο σκυρόδεμα μπορούν να εκτιμήσουν ένα συγκεκριμένο «προφίλ» συγκέντρωσης χλωριόντων, σε συγκεκριμένο βάθος από την εξωτερική επιφάνεια και σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Συγκρίνοντας το προφίλ αυτό με την κρίσιμη τιμή για την έναρξη της διάβρωσης, η διάρκεια ζωής της κατασκευής μπορεί να εκτιμηθεί. Το

θέμα είναι κατά πόσο αυτή η εκτίμηση είναι αξιόπιστη ή όχι. Ιδιαίτερη βαρύτητα έχει το είδος των χλωριόντων των οποίων εκτιμούμε το προφίλ τους.

Αμφότεροι στόχοι του σχεδιασμού ανθεκτικότητας, δύναται να εκτιμηθούν μέσω υπολογιστικών προσδιορισμικών μοντέλων (στοχαστικών ή όχι) φυσικοχημικών διεργασιών φθοράς κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος έναντι επιθετικών περιβαλλοντικών δράσεων (ενανθράκωση ή διείσδυση χλωριόντων), αρκεί να ορίζονται με ακρίβεια τα όρια εφαρμογής του και να υπάρχει η σχετική πειραματική επιβεβαίωση. Έχοντας αναδείξει την ανάγκη αλλά και τις βασικές αρχές του σχεδιασμού ανθεκτικότητας κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με βάση προσδιοριστικά μοντέλα εκτίμησης διάρκειας ζωής, ακολουθεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής των πιο συνήθων χρησιμοποιούμενων υπολογιστικών εργαλείων.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ

Τα τέσσερα μοντέλα (διεθνώς αναγνωρισμένα) που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της διάρκειας ζωής κατασκευής σκυροδέματος εκτεθειμένη σε περιβάλλον πλούσιο σε χλωριόντα, μπορούν πολύ σύντομα να περιγραφούν ως εξής.

Το ClinConc [7] είναι ένα φυσικοχημικό μοντέλο όπου, μέσω μη-γραμμικών εξισώσεων, λαμβάνει υπόψη του τις διεργασίες δέσμευσης χλωριόντων που συντελούνται στον τσιμεντοπολτό. Το μοντέλο επίσης θεωρεί ότι ο συντελεστής διαχυτότητας χλωριόντων αλλά και η ικανότητα δέσμευσης τους από τον τσιμεντοπολτό μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου. Το προσδιοριστικό μοντέλο Life-365 [9], θεωρεί σαν μηχανισμό διείσδυσης χλωριόντων στο σκυρόδεμα εξολοκλήρου την διάχυση τους, σύμφωνα με την απλή μορφή του δεύτερου νόμου του Fick. Λαμβάνει δε υπόψη του την μεταβολή του συντελεστή διαχυτότητας λόγω χρόνου και θερμοκρασίας μέσω εμπειρικών εξισώσεων. Το EUCON [8, 13-15], εξελιγμένο με βάση μεθόδους προσδιορισμού της ανθεκτικότητας που σχετίζονται με την επιτελεστικότητα (σύμφωνα με το EN 206) βασίζεται σε φυσικοχημικά μοντέλα προσδιορισμού τόσο της δράσης διοξειδίου του άνθρακα από την ατμόσφαιρα, όσο και της δράσης χλωριόντων. Τα μοντέλα αυτά έχουν αναγνωριστεί διεθνώς και έχουν επιβεβαιωθεί. Οι φυσικοχημικές διεργασίες διάχυσης χλωριόντων η ρόφηση και δέσμευσή τους από τον τσιμεντοπολτό περιγράφονται από μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις της συγκέντρωσης Cl⁻ στην υγρή φάση, από τις οποίες η συγκέντρωση των δεσμευμένων Cl⁻ στον τσιμεντοπολτό μπορεί να υπολογισθεί αλγεβρικά. Το σύστημα επιλύεται με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων ή διαφορών, επιτρέποντας έτσι την εκτίμηση του απαιτούμενου χρόνου (κρίσιμη τιμή χρόνου διάβρωσης λόγω χλωριόντων) που η συγκέντρωση χλωριόντων στον χάλυβα θα βρεθεί πάνω από το όριο αποαθητικοποίησης. Το Duracon [10], βασισμένο στο μοντέλο Duracrete [21], εκτιμά τη πιθανότητα εκδήλωσης διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης. Στην ουσία υπολογίζει την απόδοση της κατασκευής για συγκεκριμένη διάρκεια ζωής και για ένα επιθυμητό επίπεδο αξιοπιστίας, χρησιμοποιώντας την εξομοίωση Monte Carlo του δεύτερου νόμου του Fick, λαμβάνοντας υπόψη την μεταβολή του συντελεστή διαχυτότητας Cl⁻ λόγω χρόνου και θερμοκρασίας. Στους Πίνακες 1 και 2 παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά των μοντέλων αυτών με την μορφή δεδομένων/αποτελεσμάτων.

Πίνακας 1. Δεδομένα μοντέλων υπολογισμού διάρκειας ζωής κατασκευών

Life 365	ClinConc	Eucon	Duracon
Ορισμός της Κατασκευής και Χαρακτηριστικά Υλικών			
<ul style="list-style-type: none"> • Τύπος κατασκευής • Πάχος δομικού στοιχείου (mm) • Επικάλυψη (mm) + COV (%) • Λόγος N/T • FA, SF, Slag (%) • Τύπος οπλισμού • Ύπαρξη αναστολέων διάβρωσης • Ύπαρξη μεμβρανών 	<ul style="list-style-type: none"> • Ποσότητα Τσιμέντου, νερού, αδρανών (kg/m^3 σκυρ.) και πυκνότητες (kg/m^3). • Ποσότητα, πυκνότητα και activity coefficients προσθέτων τύπου II (SF, FA, Slag). • Ποσοστό κενών αέρα (%) • Equivalent alkalis (Na_2O) τσιμέντου (%) • Θερμοκρασία συντήρησης ($^{\circ}\text{C}$) 	<ul style="list-style-type: none"> • Τύπος Τσιμέντου (EN 197), Standard Cement Strength Class (MPa) • Ποσότητα Τσιμέντου, νερού, αδρανών (kg/m^3 σκυρ.), τύπος αδρανών και d_{max} και πυκνότητες (kg/m^3). • Ποσότητα, πυκνότητα και activity coefficients προσθέτων τύπου II. • Ποσότητα, τύπος και πυκνότητα προσθέτων τύπου I • Ποσοστό κενών αέρα (%). • Ποσοτική σύσταση Τσιμέντου: Χημική σύσταση Τσιμέντου και πρόσθετων τύπου II (%). 	<ul style="list-style-type: none"> • Επικάλυψη (mm) + COV (%)
Συνθήκες Περιβαλλοντικής Έκθεσης			
<ul style="list-style-type: none"> • Συγκέντρωση Cl^- στην εξωτερική επιφάνεια (kg/m^3 σκυρ.) • Χρόνος για μέγιστη συγκέντρωση Cl^- (years) • Κρίσιμη συγκέντρωση Cl^- (kg/m^3 σκυρ.) + COV(%) • Θερμοκρασία έκθεσης ($^{\circ}\text{C}$) 	<ul style="list-style-type: none"> • Συγκέντρωση Cl^- (free) στην εξωτερική επιφάνεια (g/l) + SD • Αρχική συγκέντρωση Cl^- (%) + SD • Κρίσιμη συγκέντρωση Cl^- • Θερμοκρασία έκθεσης ($^{\circ}\text{C}$)+SD 	<ul style="list-style-type: none"> • Συγκέντρωση Cl^- (free) στην εξωτερική επιφάνεια (kg/m^3 sol) • Αρχική συγκέντρωση Cl^- (kg/m^3 sol) • Κρίσιμη συγκέντρωση Cl^- (kg/m^3 σκυρ.) • Πάχος στοιχείου (mm) 	<ul style="list-style-type: none"> • Συγκέντρωση Cl^- στην εξωτερική επιφάνεια (% σκυρ.) + COV (%) • Αρχική συγκέντρωση Cl^- • Κρίσιμη συγκέντρωση Cl^- • Μέση ετήσια θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$) • Environmental transfer variable
Συντελεστής Διαχυτότητας Χλωριόντων			
<ul style="list-style-type: none"> • Φαινόμενος Συντελεστής Διαχυτότητας Cl^- (28 days) D_{28} ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) + COV (%) • Maturity factor m + COV (%) 	<ul style="list-style-type: none"> • Φαινόμενος Συντελεστής Διαχυτότητας Cl^- (6 months) D_{6m} ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) • Βαθμός ενυδάτωσης, Concrete porosity * • Time-dependent binding factor *C1 	<ul style="list-style-type: none"> • Πραγματικός συντελεστής διάχυσης Cl^- * ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) • Efficiency factor of FA or SF for Cl^- penetration • Concrete porosity*, Equilibrium constant for Cl^- binding*E5 • Cl^- saturation concentration in solid phase*E6 	<ul style="list-style-type: none"> • Φαινόμενος Συντελεστής Διαχυτότητας Cl^- (t days) • Προφίλ Cl^- από το οποίο υπολογίζεται ο παραπάνω •
Παράγοντες Χρόνου			
<ul style="list-style-type: none"> • Propagation Period (years) • Hydration period (years) 	<ul style="list-style-type: none"> • Concrete age at exposure (days), • Age factor (n) due to desiccationC2 • Exposure duration (years) 	<ul style="list-style-type: none"> • Service life (years) that the user wants to estimate the Cl^- profiles in concrete 	<ul style="list-style-type: none"> • Ηλικία κατασκευής όταν εκτέθηκε σε χλωριόντα (days)

Πίνακας 2. Αποτελέσματα μοντέλων υπολογισμού διάρκειας ζωής κατασκευών

Life 365	ClinConc	Eucon	Duracon
Προφίλ χλωριόντων			
<ul style="list-style-type: none"> • Συνολικά Cl⁻ (kg/m³ σκυρ.) κατά βάθος x (mm) • Επίπεδο συγκέντρωσης Cl⁻ στην επιφάνεια του χάλυβα έως την χρονική στιγμή έναρξης της διάβρωσης • Μεταβολή του συντελεστή διαχυτότητας Cl⁻ με το χρόνο έκθεσης 	<ul style="list-style-type: none"> • Συνολικά Cl⁻ (% τσιμ.) κατά βάθος x (mm) • Ελεύθερα Cl⁻ (g/l) κατά βάθος x (mm) 	<ul style="list-style-type: none"> • Συνολικά Cl⁻ (kg/m³ σκυρ.) κατά βάθος x (mm) • Ελεύθερα Cl⁻ (kg/m³ sol.) κατά βάθος x (mm) • Δεσμευμένα Cl⁻ (kg/m³ σκυρ.) κατά βάθος x (mm) 	
Διάρκεια Ζωής			
<ul style="list-style-type: none"> • Χρονική στιγμή έναρξης της διάβρωσης (χρόνια) • Διάρκεια ζωής κατασκευής (χρόνια) 	<ul style="list-style-type: none"> • Διάρκεια ζωής συναρτήσει της απαιτούμενης επικάλυψης 		<ul style="list-style-type: none"> • Πιθανο-στοχαστική εκτίμηση διάρκειας ζωής
Άλλοι παράμετροι			
<ul style="list-style-type: none"> • Φαινόμενος Συντελεστής Διαχυτότητας Cl⁻ (28 days) D₂₈ (x 10⁻¹² m²/s) + COV 	<ul style="list-style-type: none"> • Φαινόμενος Συντελεστής Διαχυτότητας Cl⁻ (6 months) 	<ul style="list-style-type: none"> • Intrinsic chloride diffusion coefficient * (x 10⁻¹² m²/s) 	

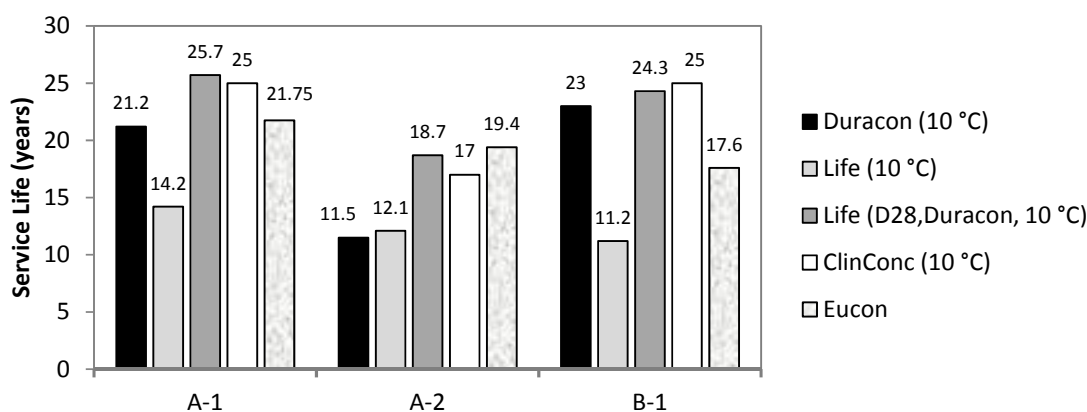
Σε κάθε ένα από τα παραπάνω αναφερόμενα μοντέλα, εισήχθησαν τα ίδια δεδομένα (τριών δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος από παράκτιες τοποθεσίες πλούσιες σε χλωρίοντα (κατηγορία περιβαλλοντικής έκθεσης XS3). Αξίζει να σημειωθεί ότι το δομικό στοιχείο A-1 είναι συνεχώς εκτεθειμένο στα καιρικά φαινόμενα (βροχή), ενώ το A-2 όχι (άρα αναμένονται μεγαλύτερες συγκεντρώσεις χλωριόντων στο εσωτερικό του) καθώς και ότι το δομικό στοιχείο B-2 βρίσκεται σε απόσταση 3.8 m, συνεχώς εκτεθειμένο από την επιφάνεια της θάλασσας. Σε κάθε δομικό μέλος μετρήσεις της επικάλυψης έγιναν επί τόπου, ενώ ο (φαινόμενος) συντελεστής διαχυτότητας χλωριόντων υπολογίστηκε στο εργαστήριο, με βάση δείγματα που πάρθηκαν από αυτές (σύμφωνα με το NT BUILD 492 [22]). Η διάρκεια ζωής τους κατά τη φάση σχεδιασμού τους είχε οριστεί ως 50 έτη, ενώ η πιθανότητα αστοχίας (probability of failure) ως 10%. Χαρακτηριστικές τους τιμές δίνονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Χαρακτηριστικά υπό εξέταση δομικών στοιχείων

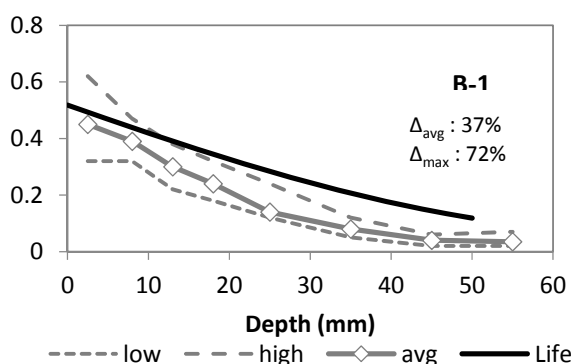
	Δοκίμιο A-1	Δοκίμιο A-2	Δοκίμιο B-1
Επικάλυψη (mm)	48.3 (5.9)		60.8 (1.8)
Τσιμέντο - Ιπτάμενη Τέφρα (kg/m ³) – N/Ta	380 – 19.2 – 0.45		400 – 0 – 0.45
Φαινόμενος Συντελεστής Διαχυτότητας (x10 ⁻¹² m ² /s)	0.948 (0.166)	1.140 (0.162)	1.589 (0.432)
Συγκέντρωση Cl ⁻ στην εξωτερική επιφάνεια (% wt. conc.)	0.555 (0.158)	0.828 (0.079)	0.518 (0.070)
Κρίσιμη Συγκέντρωση Cl ⁻ (% wt. conc.)	0.080 (0.010)	0.080 (0.010)	0.070 (0.010)
Ηλικία της κατασκευής τη στιγμή της έκθεσης (days)	2920		2555
Διάρκεια Ζωής (years)	50		50

Συγκριτική αξιολόγηση της εκτιμώμενης ωφέλιμης διάρκειας ζωής των κατασκευών, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3, δείχνει ότι κάθε μοντέλο έδωσε διαφορετικές τιμές. Μία πιο

προσεχτική ματιά δηλώνει ότι το μοντέλο Life-365 έδωσε τις χαμηλότερες τιμές. Σε σχέση με τις τιμές του Duracon (οι οποίες θεωρούνται σαν οι εκτιμήσεις αναφοράς, λόγω των μετρήσεων της τυπικής απόκλισης που έλαβε χώρα σε κάθε ένα από τα εξεταζόμενα δοκίμια, ειδικά για την πιθανοστοχαστική φύση του μοντέλου αυτού) οι τιμές αυτές είναι μειωμένες έως 51% (από 23 χρόνια μέσω Duracon, σε 11.2 χρόνια μέσω του Life). Επίσης, το προφίλ χλωριόντων το οποίο αποδίδεται μέσω του μοντέλου Life φαίνεται να είναι υπερεκτιμημένο κατά μέσο όρο 37% σε σχέση με τις πειραματικές τιμές (Εικόνα 4). Όταν όμως στο Life εισήχθηκε σαν δεδομένο ο συντελεστής διαχυτότητας που υπολογίστηκε πειραματικά, οι τιμές ήταν σαφώς καλύτερες. Αυτού του είδους η εσφαλμένη (υπέρ) εκτίμηση χλωριόντων που οδηγεί σε λανθασμένη (μειωμένη) εκτίμηση της διάρκειας ζωής της κατασκευής έχει παρατηρηθεί και από άλλους ερευνητές [11]. Οφείλεται μερικός στην υποεκτίμηση του φαινομένου της διείσδυσης των χλωριόντων στο σκυρόδεμα, όταν αυτή καθορίζεται μόνο ως διάχυση, όπως ποσοτικοποιείται από την λύση του δεύτερου νόμου του Fick.



Εικόνα 3. Εκτίμηση διάρκειας ζωής δομικών στοιχείων ΟΣ λόγω δράσης χλωριόντων



Εικόνα 4. Σύγκριση προφίλ χλωριόντων του μοντέλου Life με τις πειραματικές του δοκιμίου B-1.

Τα μοντέλα ClinConc και Eucon έδωσαν παραπλήσια αποτελέσματα, πιο κοντά στις εκτιμήσεις του Duracon (π.χ. 25.7 και 25 χρόνια αντίστοιχα, για το δοκίμιο A-1). Τέτοιου είδους φυσικοχημικά μοντέλα τα οποία λαμβάνουν υπόψη το με πολλή μεγάλη ακρίβεια το πραγματικό τρόπο διείσδυσης των χλωριόντων στο σκυρόδεμα (και την χημική τους δέσμευση από τον

τιμμεντοπολτό), αν και διαφέρουν σημαντικά στην παραμετροποίηση τους (και στον τρόπο υπολογισμού του συντελεστή διαχυτότητας CI -, λαμβάνοντας υπόψη την μεταβολή του με το χρόνο ή όχι) είναι σε θέση να προσδώσουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τόσο την εκτίμηση διάρκειας ζωής, όσο και την συγκέντρωση χλωριόντων σε κάποιο βάθος από την εξωτερική επιφάνεια σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Σε γενικές γραμμές όλα τα μοντέλα δείχνουν ότι υπάρχει πρόβλημα ανθεκτικότητας. Η ωφέλιμη διάρκεια ζωής της κατασκευής από 50 χρόνια που θεωρήθηκε κατά τη φάση σχεδιασμού, στην καλύτερη περίπτωση έχει μειωθεί στο μισό. Δεδομένης της πληθώρας των διαθέσιμων υπολογιστικών μοντέλων, των διαφορετικών τους προσεγγίσεων στην προσομοίωση διείσδυσης CI και στην αρχική τους παραμετροποίηση (αρκετά πολύπλοκη ορισμένες φορές), που οδηγούν σε διαφορετικά αποτελέσματα, τίθεται το σοβαρό θέμα αξιοποίησης τους και ευρείας αποδοχής τους. Ποιο μοντέλο θα πρέπει να επιλέξει ο μελετητής μηχανικός? Μπορεί να αρκестεί σε ένα απλό μοντέλο βασισμένο στο δεύτερο νόμο του Fick για μία πρώτη εκτίμηση? Θα πρέπει να καταφύγει σε ένα επιβεβαιωμένο φυσικοχημικό μοντέλο? Θα πρέπει να λάβει υπόψη του στοχαστικές έννοιες προσδιορισμού της πιθανότητας υπέρβασης ενός συγκεκριμένου επιπέδου αξιοπιστίας?

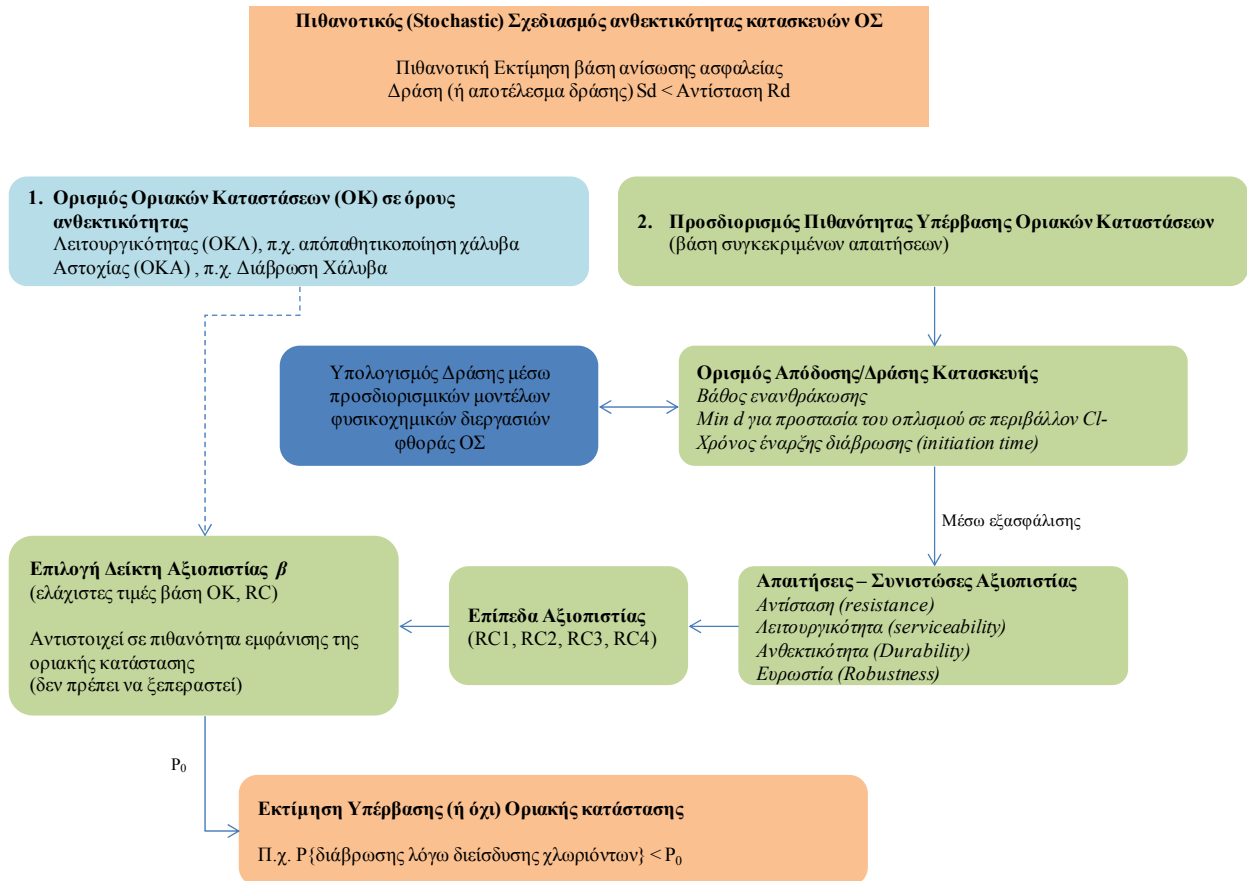
Η απάντηση δεν είναι μονοσήμαντη. Σαφώς το να απευθυνθεί σε ένα υπολογιστικό μοντέλο το οποίο υποεκτιμά τη διάρκεια ζωής, εμπεριέχει κινδύνους. Όταν δε, το θέμα αυτό τεθεί κάτω από το γενικότερο πλαίσιο μίας οικονομοτεχνικής μελέτης (Life-cycle analysis) τίθεται σημαντικό θέμα κόστους. Όπως δηλώνει ο σχεδιασμός ανθεκτικότητας σύμφωνα με το μελλοντικό κανονιστικό πλαίσιο η λύση βρίσκεται στην προσεκτική αξιοποίηση τόσο στοχαστικών μοντέλων όσο και φυσικοχημικών.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ – Η ΕΠΟΜΕΝΗ ΗΜΕΡΑ

Απάντηση στα παραπάνω ερωτήματα δίνει ο νέος κανονισμός «Model Code» [23] της Διεθνούς Ομοσπονδίας Σκυροδέματος (*fib*), όπου η διάρκεια ζωής της κατασκευής (παράγοντας χρόνος) εισέρχεται σαν παράμετρος σχεδιασμού. Η εκτίμηση της δύναται να γίνει πιθανοτικά (stochastic), μέσω του γενικότερου ελέγχου της ανίσωσης ασφαλείας (Δράση ή αποτέλεσμα δράσης $S_d <$ αντίσταση R_d), βασισμένη στην φιλοσοφία σχεδιασμού κατασκευών έναντι υπέρβασης (ή όχι) συγκεκριμένων οριακών καταστάσεων (σε όρους ανθεκτικότητας), όπως ακολουθείται στους σύγχρονους Ευρωπαϊκούς [4] και Ελληνικούς [24] μελετητικούς (design) κανονισμούς (Εικόνα 5).

Με αυτόν τον τρόπο η “απόδοση” (performance) της κατασκευής ή κάποιου μέλους της, όπως αυτή ορίζεται κατά την διάρκεια της μελέτης ανθεκτικότητας (π.χ. ωφέλιμη διάρκεια ζωής) κάτω από ένα επιθετικό εξωγενή παράγοντα (π.χ. διείσδυση χλωριόντων) προδιαγράφεται μέσω της εξασφάλισης συγκεκριμένων απαιτήσεων (αντίσταση *resistance*, λειτουργικότητα *serviceability*, ανθεκτικότητα σε διάρκεια *durability*, ευρωστία *robustness*), οι οποίες αποτελούν τις συνιστώσες αξιοπιστίας (*reliability*) της φέρουσας κατασκευής. Λαμβάνοντας υπόψη (μεταξύ άλλων) τις πιθανές αιτίες, την μορφή και τον τρόπο επίτευξης της οριακής κατάστασης καθώς και τις πιθανές συνέπειες αστοχίας, ορίζονται διαβαθμισμένα επίπεδα (κατηγορίες) αξιοπιστίας (*Reliability classes*, RC1, RC2, RC3) που εξ’ ορισμού συναρτώνται με διαφορετικό επίπεδο συνεπειών σε περίπτωση υπέρβασης της εξεταζόμενης οριακής κατάστασης. Αυτές οι κατηγορίες αξιοπιστίας εκφράζονται πιθανοτικά μέσω του συντελεστή (ή δείκτη) αξιοπιστίας β . Ανάλογα με την κατηγορία αξιοπιστίας (RC1, RC2, RC3) και το είδος της οριακής κατάστασης (λειτουργικότητας ή αστοχίας) προβλέπονται ελάχιστες τιμές του συντελεστή β , που

αντιστοιχούν σε μία πιθανότητα εμφάνισης της συγκεκριμένης οριακής κατάστασης, η οποία βάση της γενικευμένης ανίσωσης ασφαλείας δεν θα πρέπει να ξεπεραστεί.



Εικόνα 5. Αρχές πιθανοτικού (stochastic) σχεδιασμού ανθεκτικότητας κατασκευών ΟΣ

Εν τέλει, η διάρκεια ζωής μιας κατασκευής ΟΣ περιγράφεται μέσω οριακών καταστάσεων λειτουργικότητας (OKΛ) ή αστοχίας (OKΑ), με όρους ανθεκτικότητας, (π.χ. αποπαθητικοποίηση του χάλυβα οπλισμού μπορεί να οριστεί σαν OKΛ, ενώ αστοχία λόγω διάβρωσης σαν OKΑ) και μέσω αντιστοιχών επιπέδων αξιοπιστίας, όπως αυτά διαμορφώνονται και ορίζονται στους αντίστοιχους κανονισμούς. Με αυτό το σκεπτικό για τον υπολογισμό της πιθανότητας διάβρωσης λόγω διείδυσης χλωριόντων η ανίσωση της Εξίσωσης 1 πρέπει να ικανοποιείται.

Σαφώς η εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης της “δράσης “ προϋποθέτει τόσο την εκτίμηση της δράσης όσο και του αποτελέσματος της δράσης αυτής (όπως για παράδειγμα η συγκέντρωση Cl⁻, C_{a,t_{sl}}, σε βάθος a, και χρόνο t_{sl} της Εξίσωσης 1), βάσει επιστημονικά ορθών προσδιοριστικών φυσικοχημικών μοντέλων.

$$p\{\} = p_{dep} = p\{C_{crit} - C_{(a,t_{sl})} < 0\} < p_0 \quad (\text{Εξίσωση 1})$$

όπου $p\{\}$, p_0 , η πιθανότητα διάβρωσης λόγω διείδυσης χλωριόντων (target failure probability), C_{crit} , $C_{(a,t_{sl})}$, η κρίσιμη συγκέντρωση και η συγκέντρωση Cl⁻ σε βάθος a και χρόνο t (% κ.β. τσιμέντου), a η επικάλυψη σκυροδέματος (mm) και t_{sl}, η διάρκεια ζωής (χρόνια).

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, προκειμένου να εκτιμηθεί πιθανοτικά το αποτέλεσμα κάποιας δράσης (σε όρους ανθεκτικότητας), μέσω του υπολογισμού υπέρβασης ή όχι μιας πιθανής οριακής κατάστασης (λειτουργίας ή αστοχίας) σε κάποια συγκεκριμένη χρονική στιγμή (και για ένα συγκεκριμένο επίπεδο και βαθμό αξιοπιστίας), πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ή δράση ενός αριθμού παραγόντων που συνεισφέρουν στην ανθεκτικότητα του δομικού στοιχείου ή της κατασκευής γενικότερα, όπως:

- ο τύπος του δομικού στοιχείου (εξωτερικό υποστύλωμα, ή εσωτερικό δομικό) και της κατασκευής (συνήθης κατασκευές ή κατασκευές ειδικών απαιτήσεων),
- οι κατασκευαστικές διατάξεις (μελέτη σύνθεσης, τοποθέτηση και διάταξη οπλισμού),
- η τοποθεσία της κατασκευής (περιβαλλοντική έκθεση βάση EN 206-1 [6]),
- οι επικρατέστερες ετήσιες (μέσες) περιβαλλοντικές συνθήκες (θερμοκρασία, σχετική υγρασία) καθώς και τα πιθανά επιθετικά περιβαλλοντικά αίτια (που αντικατοπτρίζονται στις κατηγορίες έκθεσης βάση EN 206-1 [6]).

Με αυτό τον τρόπο δίνετε να εκτιμηθεί η διάρκεια ζωής μια κατασκευής ΟΣ έναντι ενανθράκωσης ή διείδυσης Cl⁻.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Δεδομένης της πρόωρης υποβάθμισης της διάρκειας ζωής κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, ώθηση πρέπει να δοθεί στην βηματική προσέγγιση ενός δόκιμου, εμπειριστατωμένου και ακριβή σχεδιασμού ανθεκτικότητας. Στα πλαίσια του σχεδιασμού αυτού ιδιαίτερη βαρύτητα διαδραματίζουν τα μαθηματικά προσομοιώματα εκτίμησης διάρκειας ζωής του σκυροδέματος. Δεδομένων των διαφορετικών τους τύπων (προσδιορισμικά, φυσικοχημικά, στοχαστικά), των διαφορετικών προσεγγίσεων τους στην εξομοίωση του τρόπου διείδυσης των χλωριόντων στο σκυρόδεμα, των απαιτήσεων τους και της παραμετροποίησης τους, οι βασικές τους αρχές και τρόποι (μέσω παραδειγμάτων υπολογισμού) παρουσιάζονται σε αυτή τη μελέτη. Αξιολογώντας τα αποτελέσματα τους, έμφαση δίνεται στην συγκριτική τους αξιοποίηση μέσω του σχεδιασμού ανθεκτικότητας που προτείνεται πλέον από της επόμενης γενιάς κανονισμούς.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Mehta, P.K., “Durability- Critical Issues for the Future”, *Concr. Intern.*, **19**(7), 27 (1997).
- [2] Neville, A.M., *Properties of Concrete*, 4th ed., Longman, Essex (1995).
- [3] Richardson, M.G., *Fundamentals of Durable Reinforced Concrete*, Spon Press, London (2002).
- [4] Ευρωκώδικας 2 “Σχεδιασμός φορέων από Σκυρόδεμα” Μέρος 1-1: Γενικοί Κανόνες και κανόνες για κτίρια, EN 1992-1-1:2004, Ελληνική Έκδοση
- [5] EN 197-1 EN 197-1. European Standard EN 197-1 Cement - Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements. CEN, Brussels, 2000.
- [6] EN 206-1 EN 206-1. European Standard EN 206-1, Concrete - Part 1: Specification, Performance, Production and Conformity. CEN, Brussels, 2000.
- [7] Luping, T., ‘Engineering Expression of the ClinConc model for prediction of free and total chloride ingress in submerged marine concrete’. *Cem. Concr. Res.* 38 (2008) 1092-1097.
- [8] Demis, S., Efstathiou, M.P. and Papadakis, V.G., ‘Computer-aided modeling of concrete service life’, *Cem. Concr. Res.* (2013) DOI:10.1016/j.cemconcomp.2013.11.004
- [9] Ehlen, M.E., Thomas, M.D.A. and Bentz, E.C., ‘Life-365 service life prediction model’, (Concrete International, 2009).
- [10] Ferreira, R.M., ‘Probability based durability analysis of concrete structures in marine environment’, Ph.D. Thesis, University of Minho, Guimarães, (2004)

- [11] Oslakovic, I.S, Bjegovic, D. and Mikulic, D., 'Evaluation of service life design models on concrete structures exposed to marine environment', *Mater. Str.* 43 (2010) 1397-1412.
- [12] Tuutti, K., 'Corrosion of steel in concrete', (CBI Forskning, 1982).
- [13] Papadakis, V.G., C.G. Vayenas, and M.N. Fardis, "Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation", *ACI Mat. J.*, **88**(4), 363 (1991).
- [14] Papadakis, V.G., M.N. Fardis, and C.G. Vayenas, "Physicochemical Processes and Mathematical Modeling of Concrete Chlorination", *Chem. Engng Sci.*, **51**(4), 505 (1996).
- [15] Papadakis VG, Demis S. Estimation and Validation of Concrete Strength and Service Life Using Software Packages based on Predictive Models. In: Freitas VP, Corvacho H, Lacasse M editors. Proceedings of the 12th International Conference on Durability of Building Materials and Components, Porto Portugal, 2011.
- [16] Ozbolt, J., Balabanic, G., Periskic, G. and Kuster, M., 'Modelling the effect of damage on transport processes in concrete', *Constr. Build. Mater.* 24 (2010) 1638–48.
- [17] Collepardi, M., Marcialis, A. and Turriziani, R., 'Penetration of chloride ions into cement pastes and concrete', *J. A. Ceram. Soc.* 55 (10) (1972) 534-535.
- [18] Glasser, F.P., Marchand, J. and Samson, E., 'Durability of concrete- Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions', *Cem. Concr. Res.*, 38(2) (2008) 226-246.
- [19] CC&AA, Cement Concrete & Aggregates Australia, 'Chloride Resistance of Concrete', (2009)
- [20] Luping, T., 'Engineering Expression of the ClinConc model for prediction of free and total chloride ingress in submerged marine concrete'. *Cem. Concr. Res.* 38 (2008) 1092-1097.
- [21] Duracrete - Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures, Document BE95-1347/R17, The European Union - Brite EuRam III, 2000.
- [22] NT BUILD 492, Concrete Mortar and Cement-based Repair Materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, NORDTEST, 1999
- [23] Model Code 2010 fib (2010), *Model Code First Complete Draft, Volumes I and II*, International Federation for Structural Concrete, Brussels.
- [24] ΚΑΝ.ΕΠΕ., Κανονισμός Επεμβάσεων, 1^η Αναθεώρηση, ΦΕΚ 2187/Β/05-09-2013, ΟΑΣΠ, 2013.