

**Εκτίμηση Διάρκειας Ζωής Κατασκευών Οπλισμένου  
Σκυροδέματος της Αραβικής Χερσονήσου μέσω  
Φυσικοχημικών Μαθηματικών Προσομοιωμάτων**  
**Service Life Estimation of Reinforced Concrete Structure in  
the Arabian Peninsula**

**Σωτήρης ΔΕΜΗΣ<sup>1</sup>, Ευάγγελος Γ. ΠΑΠΑΔΑΚΗΣ<sup>2</sup>**

*Λέξεις κλειδιά: Εκτίμηση Διάρκειας Ζωής, Αραβική Χερσόνησος, Ενανθράκωση,  
Δράση Χλωριόντων*

*Keywords: Service Life Estimation, Arabian Peninsula, Carbonation, Chlorides*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Οι ιδιαίτερες περιβαλλοντικές συνθήκες των χωρών της Αραβικής Χερσονήσου, αποτελούν έναν αρκετά ισχυρό επιθετικό παράγοντα για τις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος (ΟΣ). Στα πλαίσια του νεοσύστατου κανονισμού “*Guide for the Design of Concrete Structures in the Arabian Peninsula*” του Concrete Society, υιοθετείται η χρήση μαθηματικών προσομοιώματων εκτίμησης της διάρκειας ζωής. Στην παρούσα μελέτη, αναδεικνύοντας την ανάγκη ενός δομημένου σχεδιασμού ανθεκτικότητας κατασκευών ΟΣ για τις ιδιαιτερότητες της Αραβικής Χερσονήσου, συγκρίνονται τα αποτελέσματα της στοχαστικής εκτίμησης διάρκειας ζωής συγκεκριμένης κατασκευής, με αυτά που προκύπτουν από τη χρήση ενός επιβεβαιωμένου φυσικοχημικού μαθηματικού προσομοιώματος (ΦΜΠ). Με αυτό το τρόπο δείχνεται ότι ένα ενδεδειγμένο για το επιθετικό περιβάλλον ΦΜΠ, με σωστή αρχική παραμετροποίηση, μπορεί να αποτελέσει μία αξιόπιστη λύση εκτίμησης διάρκειας ζωής, όπου αν εμπλουτισθεί περαιτέρω με συντελεστές ασφαλείας μπορεί να οδηγήσει στην ημι-στοχαστική μέθοδο εκτίμησης διάρκειας ζωής.

**ABSTRACT:** Given the extreme environmental conditions of the Arabian Peninsula, emphasis should be paid on the durability design process of reinforced concrete (RC) structures in this region. Under the scope of the newly imposed Regulation “*Guide for the Design of Concrete Structures in the Arabian*

---

<sup>1</sup> Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Πατρών, email: [sdemis@upatras.gr](mailto:sdemis@upatras.gr)

<sup>2</sup> Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων, email: [vgpapadakis@upatras.gr](mailto:vgpapadakis@upatras.gr)

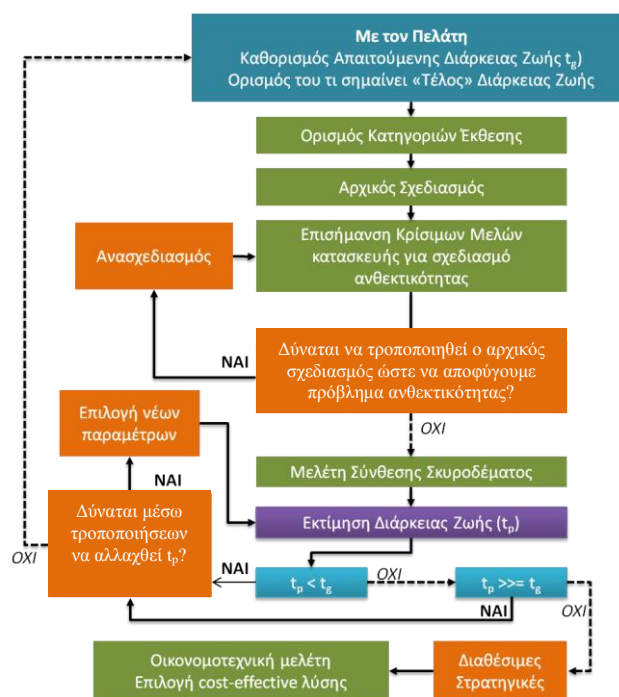
*Peninsula*” by the Concrete Society, utilization of service life estimation is prescribed. In the current study, upon presenting the basic principles of a structured durability design process addressing the particularities of the Arabian Peninsula environment, a comparison between stochastically and deterministically derived service life values of a newly erected structure is taking place. It is shown that a deterministic approach can provide valid estimates, which if further enhanced with partial safety factors to account for the probabilistic nature of the problem will lead to the semi-probabilistic service life estimation.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε προηγούμενη μελέτη (Δέμης & Παπαδάκης 2016, Demis & Papadakis 2017) διαπραγματεύτηκε η ανάγκη και παρουσιάστηκαν οι βασικές αρχές ενός δομημένου σχεδιασμού ανθεκτικότητας κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος (ΟΣ) εκτιθέμενων σε ιδιαίτερα επιθετικά περιβάλλοντα (**Σχήμα 1**), όπου η διάρκεια ζωής της κατασκευής εισέρχεται άμεσα σαν παράμετρος σχεδιασμού, έξω από τα στενά πλαίσια της μεθόδου “Deemed-to-satisfy” όπως ορίζεται στους σχετικούς Ευρωπαϊκούς Κανονισμούς (EN1992, 2004; EN1990, 2005; EN206, 2014). Η εκτίμηση της δίνετε να γίνει μέσω μαθηματικών προσομοιωμάτων των διαδικασιών φθοράς που λαμβάνουν χώρα στο σκυρόδεμα μετά από έκθεση του σε κάποιο επιθετικό παράγοντα (όπως η δράση διοξειδίου του άνθρακα από την ατμόσφαιρα, ή χλωριόντων που ενδέχεται να οδηγήσουν σε διάβρωση του χάλυβα οπλισμού).

Προς αυτή τη κατεύθυνση, σήμερα, τείνει να καθιερωθεί (fib bulletin 34, 2006; fib bulletin 53, 2010) η στοχαστική εκτίμηση διάρκειας ζωής, μέσω υπολογισμού του συντελεστή αξιοπιστίας της κατασκευής (ή του δομικού στοιχείου) ή της πιθανότητας υπέρβασης κάποιου ορισμένου κατά τη διάρκεια της προμελέτης επιθετικού σεναρίου (όπως αποπαθητικοποίηση του χάλυβα οπλισμού ή εμφάνιση ρωγμών λόγω διάβρωσης). Αν και αυτή η αντιμετώπιση δίνει αρκετά έγκυρα αποτελέσματα, προβληματισμοί έχουν κατά καιρούς εκφραστεί λόγω της δυσκολίας στη αποτελεσματική χρησιμοποίηση της (Demis & Papadakis 2017; fib bulletin 53, 2010). Φαίνεται ότι (α) δεν είναι αρκετά εύκολο (ή πάντα εφικτό) να εκφραστεί μαθηματικά η αβεβαιότητα των σχετικών αρχικών παραμέτρων των εργαλείων αυτών (όπως μεταξύ άλλων η διακύμανση/στατιστική κατανομή επικάλυψης, συγκέντρωσης χλωριόντων), καθώς επίσης (β) η υπάρχουσα διαδικασία παραμετροποίησης του επιθυμητού συντελεστή αξιοπιστίας της κατασκευής όπως παρουσιάζεται σήμερα στους Ευρωκώδικες (EN1990, 2005), δεν είναι εύκολο να ακολουθηθεί και θα πρέπει να εμπλουτιστεί περαιτέρω. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα παραπάνω θέματα, οι σχετικοί κανονισμοί

της fib (fib bulletin 34, 2006; fib bulletin 53, 2010; fib Model Code, 2012) αφήνουν ανοιχτό το ενδεχόμενο να χρησιμοποιηθούν επιβεβαιωμένα φυσικοχημικά μαθηματικά εργαλεία κατάλληλα για το επιθετικό περιβάλλον που αντιμετωπίζει η κατασκευή. Προκειμένου να εξαλειφθεί στο μέγιστο δυνατό βαθμό τυχόν αβεβαιότητες (στον υπολογισμό των αρχικών παραμέτρων τους, αλλά και στα αποτελέσματα τους), ενδείκνυται ο εμπλουτισμός τους με συντελεστές ασφάλειας, τόσο από την πλευρά δράσεων όσο και από την πλευρά των αποτελεσμάτων τους, για κάθε επιθετικό περιβάλλον. Οδηγούμαστε λοιπόν στην λύση της ημι-πιθανοτικής εκτίμησης διάρκειας ζωής κατασκευών ΟΣ, όπου αν και έχει προταθεί για τη δράση της ενανθράκωσης (fib bulletin 34, 2006), το ίδιο δεν έχει γίνει για τη δράση χλωριόντων.



**Σχήμα 1.** Διαδικασία δομημένου σχεδιασμού ανθεκτικότητας κατασκευών ΟΣ (μετά από επεξεργασία fib bulletin 53, 2010)

Υπό αυτό το σκεπτικό και προς την κατεύθυνση της ημι-στοχαστικής εκτίμησης διάρκειας ζωής κατασκευών ΟΣ εκτιθέμενων σε ιδιαίτερα επιθετικό περιβάλλον χλωριόντων, στην παρούσα μελέτη συγκρίνονται τα αποτελέσματα της στοχαστικής εκτίμησης διάρκειας ζωής συγκεκριμένης υπό έγερση κατασκευής, εκτιθέμενη στο έντονα επιθετικό περιβάλλον της Αραβικής Χερσονήσου, με αυτά που προκύπτουν από τη χρήση συγκεκριμένου αναγνωρισμένου διεθνώς

φυσικοχημικού μαθηματικού υπολογιστικού εργαλείου. Με αυτό το τρόπο δείχνεται ότι ένα ενδεδειγμένο (για το επιθετικό περιβάλλον) και επιβεβαιωμένο φυσικοχημικό εργαλείο με βάση τη σωστή αρχική του παραμετροποίηση μπορεί να αποτελέσει μία αξιόπιστη λύση εκτίμησης διάρκειας ζωής. Αν δε εμπλουτιστεί περαιτέρω με συντελεστές ασφαλείας, σύμφωνα με την ημι-στοχαστική μέθοδο, λαμβάνοντας έτσι υπόψη την τυχών αβεβαιότητα στη λήψη των αρχικών παραμέτρων του, τότε η αξιοπιστία του μεγεθύνεται ακόμα περισσότερο.

### **Ανθεκτικότητα Κατασκευών και οι ιδιαιτερότητες της Αραβικής Χερσονήσου**

Η ιδιαιτερότητα του περιβάλλοντος των χωρών της Αραβικής Χερσονήσου (*hot dessert climate*) έγκειται τόσο στη σημαντική διακύμανση (έως 20 °C) των αρκετά υψηλών θερμοκρασιών της περιοχής και των συνθηκών σχετικής υγρασίας (κυμαίνονται από 2% τη νύχτα, έως 85% κατά τη διάρκεια της ημέρας), όσο και στη συνύπαρξη επιθετικών για το σκυρόδεμα παραγόντων, όπως υψηλές συγκεντρώσεις χλωριόντων (αερομεταφερόμενα, ή στο υπέδαφος σε υπόγεια ύδατα) και θεικών (CYRIA, 2002; CS163, 2008). Οι παράγοντες αυτοί συντελούν στο να παρουσιάζονται σημάδια πρόωρης υποβάθμισης της στάθμης επιτελεστικότητας νέων κατασκευών σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα (10 χρόνια) μετά την έναρξη τους.

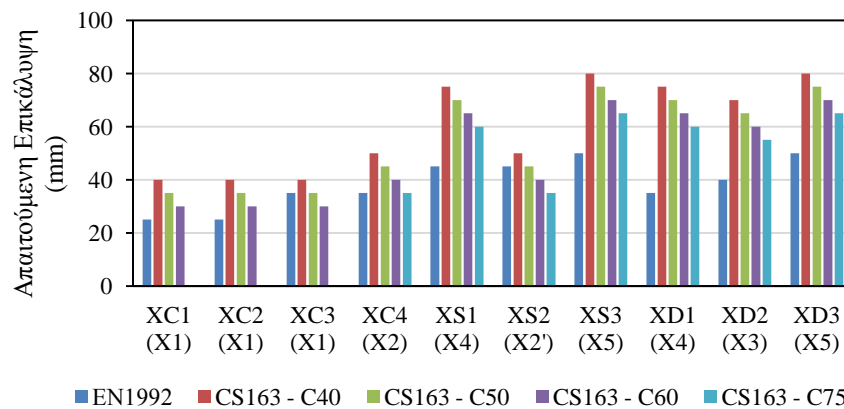
Η έντονη ερευνητική δραστηριότητα (Song et al., 2008; Tamini et al., 2008) των τελευταίων ετών προκειμένου να αντιμετωπισθεί το πρόβλημα της ανθεκτικότητας κατασκευών, συντέλεσε στη δημιουργία και εφαρμογή του σχετικά νεοσύστατου κανονισμού “*Guide for the Design of Concrete Structures in the Arabian Peninsula*” του Concrete Society (CS163, 2008). Υπό το πλαίσιο του, ο σχεδιασμός για ανθεκτικότητα κατασκευών Ο.Σ, σύμφωνα με τις αρχές όπως παρουσιάστηκαν στις Δέμης & Παπαδάκης (2016), Demis & Papadakis (2017) αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα του αρχικού (conceptual stage) δομοστατικού σχεδιασμού, κατά τη διάρκεια του οποίου ορίζονται τόσο η διάρκεια ζωής της κατασκευής (άμεση παράμετρος σχεδιασμού), όσο και οι συνθήκες που συντελούν στο τέλος αυτής. Στον κανονισμό, αν και προδιαγράφεται η γνωστή “Deemed-to-satisfy” διαδικασία σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 (EN1992, 2004), αρκετά αναθεωρημένη με βάση την ιδιαίτερη επιθετικότητα των τοπικών περιβαλλοντικών συνθηκών, ενδείκνυται για συνήθεις κατασκευές (στην ενδοχώρα). Με βάση κατά κύριο λόγο την απαιτούμενη διάρκεια ζωής (μεγαλύτερη των 30 ετών), τη σπουδαιότητα και την τοποθεσία της κατασκευής ως προς την δράση συγκεκριμένων επιθετικών αιτιών, οι κατασκευές μπορούν να χαρακτηρισθούν και ως «ειδικού τύπου». Σε αυτές, οι συνιστώμενες προδιαγραφές ενδέχεται να μην μπορούν να διασφαλίσουν την ανθεκτικότητα της

κατασκευής οπότε απαιτείται ιδιαίτερος σχεδιασμός ανθεκτικότητας, όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια (CS163, 2008).

Αξίζει να σημειωθεί, ότι στις χώρες της Μέσης Ανατολής, ιδιαίτερο ρόλο διαδραματίζει η τοποθεσία της κατασκευής, όπου λόγω των μοναδικών περιβαλλοντικών συνθηκών έχει σημαντική βαρύτητα στο προσδιορισμό των επιθετικών παραγόντων. Παράκτιες κατασκευές εκτίθενται σε αερομεταφερόμενα χλωριόντα, ενώ τμήματα τους κάτω από την επιφάνεια του εδάφους σε άλατα, θειικά και υγρασία (λόγω του ότι ο υδροφόρος ορίζοντας είναι αρκετά κοντά στην επιφάνεια). Κατασκευές (ή τμήματα τους) μέσα στη θάλασσα είναι εκτιθέμενες σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις αλάτων, όπου σε συνδυασμό με τις επίσης υψηλές θερμοκρασίες τις περιοχής οδηγούν σε σημαντικές συγκεντρώσεις χλωριόντων στην εξωτερική επιφάνεια των δομικών στοιχείων. Αποτέλεσμα της έκθεσης σε αυτά τα επιθετικά αίτια είναι η διάβρωση του χάλυβα οπλισμού. Για τον λόγο αυτό, τα επιθετικά περιβάλλοντα διαβαθμίζονται ανάλογα με τις συνθήκες υγρασίας, αλλά και με βάση την ακριβή τοποθεσία του δομικού στοιχείου (π.χ. ύψος από την επιφάνεια του εδάφους), σε δύο επίπεδα επιθετικότητας (ήπιο X1, μεσαίο X2) όσον αφορά την ενανθράκωση και σε τέσσερα (μεσαίο X2, επιθετικό X3, έντονα επιθετικό X4, ιδιαίτερα έντονα επιθετικό X5) όσον αφορά τη δράση χλωριόντων. Όσον αφορά την έκθεση σε θειικά (όπως στο υπέδαφος) ο κανονισμός, δίνοντας συγκεκριμένες οδηγίες για την λήψη και τον αριθμό μετρήσεων μέσων τιμών χλωριόντων (mg/l) και θειικών ιόντων ( $SO_4$  mg/l), υιοθετεί τέσσερις κατηγορίες έκθεσης και προδιαγράφει ανάλογα την ποιότητα σκυροδέματος (CS163, 2008). Ο γενικός κανόνας σε περίπτωση συνύπαρξης των παραπάνω παραγόντων είναι, λόγω του υψηλότερου ρυθμού διείσδυσης  $Cl^-$  στο σκυροδέμα (σε σχέση με τα θειικά), να θεωρείται πιο επιθετική (ως προς την εμφάνιση διάβρωσης οπλισμού) η δράση χλωριόντων.

Στα πλαίσια της μεθόδου “Deemed-to-satisfy”, εκτός από την ελάχιστη απαιτούμενη επικάλυψη προτείνονται μία σειρά μέτρων, όπως (α) η χρήση τσιμέντων (CEM II/CEM III) με αρκετά υψηλές περιεκτικότητες σε πυριτική παυπάλη (SF), σκωρία υψικαμίνων (GGBS), ή ιπτάμενη τέφρα (FA), (β) χρησιμοποίηση τριπλών μιγμάτων τσιμέντου (OPC/PFA/MS ή OPC/GGBS/MS, που δεν καλύπτεται από τα Ευρωπαϊκά πρότυπα), και (γ) άλλα προστατευτικά μέτρα όπως μεμβράνες, ειδικοί τύποι οπλισμού, χρήση corrosion-inhibiting admixtures ή ακόμα και εγκατάσταση συστημάτων καθοδικής προστασίας. Όσον αφορά τον υπολογισμό της απαιτούμενης επικάλυψης, τόσο η ελάχιστη επικάλυψη  $c_{min}$ , όσο και η απόκλιση της  $\Delta c_{dev}$ , είναι αρκετά υψηλότερες από τις τιμές του Ευρωκώδικα 2 (EN1992, 2004), όπως ενδεικτικά απεικονίζεται στο Σχήμα 2. Η απόκλιση  $\Delta c_{dev}$ , μπορεί να λάβει τιμές από 15 mm έως και πάνω από 50 mm (όπως στην περίπτωση διαφραγματικών τοιχωμάτων σε επαφή με υπόγεια

ύδατα), σε αντίθεση με τα 10 mm που προδιαγράφονται στους Ευρωπαϊκούς Κανονισμούς (EN1992, 2004).



**Σχήμα 2.** Σύγκριση της απαιτούμενης επικάλυψης σκυροδέματος για το περιβάλλον χωρών της Μέσης Ανατολής με αυτές των Ευρωπαϊκών κανονισμών

Ειδικά για της κατασκευές «ειδικού τύπου» ο κανονισμός (CS163, 2008), δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στους τρόπους υπολογισμού του συντελεστή διαπερατότητας των επιθετικών ουσιών στο σκυρόδεμα, αφήνει περιθώρια στον μελετητή μηχανικό να προσφύγει σε μαθηματικά προσομοιώματα επιβεβαίωσης της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης μελέτης σύνθεσης, άρα της διάρκειας ζωής της κατασκευής ΟΣ. Όσον αφορά τη δράση χλωριόντων προτείνεται η στοχαστική εκτίμηση της διάρκειας ζωής, με βάση συγκεκριμένο βαθμό αξιοπιστίας της κατασκευής και υποθέτοντας ότι η διείσδυση χλωριόντων λαμβάνει χώρα μόνο μέσω διάχυσης σύμφωνα με το 2<sup>ο</sup> Νόμο του Fick (με τον συντελεστή διαχυτότητας τους να μειώνεται με το χρόνο έκθεσης). Ο σκοπός είναι να προβλεφθεί το προφίλ συγκέντρωσης χλωριόντων από την εξωτερική επιφάνεια του δομικού στοιχείου σε βάθος χρόνου. Αν και η παραπάνω υπόθεση είναι συνήθη πρακτική στα στοχαστικά υπολογιστικά εργαλεία, αξίζει να σημειωθεί ότι ενδέχεται να οδηγήσει σε υποεκτίμηση της διάρκειας ζωής (Δέμης & Παπαδάκης, 2016).

Με βάση της παραπάνω προδιαγραφές έγινε μελέτη ανθεκτικότητας της κατασκευής που παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, δείχνεται πως μπορεί να επιβεβαιωθεί, αλλά και να τροποποιηθεί κατάλληλα, η μελέτη αυτή βασιζόμενοι σε εκτίμηση της διάρκειας ζωής της κατασκευής μέσω φυσικοχημικών μαθηματικών προσομοιωμάτων.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Η προς μελέτη κατασκευή αποτελεί τμήμα του υπόγειου και υπέργειου σιδηροδρομικού δικτύου (μετρό) χώρας της Μέσης Ανατολής. Σύμφωνα με τις απαιτήσεις του πελάτη, η μελέτη σύνθεσης θα πρέπει να στοχεύει σε σκυρόδεμα υψηλής ποιότητας και χαμηλής διαπερατότητας, ενώ η μελέτη ανθεκτικότητας και η εκτίμηση διάρκειας ζωής, θα πρέπει να γίνει για κάθε κρίσιμο δομικό στοιχείο (ALYSJ, 2014). Σύμφωνα με τους σχετικούς κανονισμούς (CYRIA 2002, CS163, 2008) οι προδιαγραφές για το ιδιαίτερο αυτό επιθετικό περιβάλλον, όπως ορίστηκαν κατά τη διάρκεια της αρχικής μελέτης, υιοθετούν διάρκεια ζωής της κατασκευής 120 χρόνια, μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος και πάχη επικάλυψης σύμφωνα με τις τιμές των Πινάκων 1 και 2, για τρεις κατηγορίες δομικών στοιχείων (Α, Β και Γ).

Η στοχαστική εκτίμηση της διάρκειας ζωής, άρα και η επιβεβαίωση του προτεινόμενου σχεδιασμού, έγινε σύμφωνα με τα δεδομένα του Πίνακα 3. Τα αποτελέσματα της στοχαστικής ανάλυσης δομικού στοιχείου της ομάδας Α (τοιχίου σκυροδέματος σε επαφή με υπόγεια ύδατα, πάχους 1.2 m) έδειξαν (ALYSJ, 2014) ότι με βάση την προτεινόμενη μελέτη σύνθεσης και τη χρήση προστατευτικής μεμβράνης, ο συντελεστής αξιοπιστίας του δομικού στοιχείου στα 120 χρόνια διάρκειας ζωής παραμένει πάνω από 1.3. Άρα το προσδιοριζόμενο πάχος επικάλυψης των 50 mm κρίνεται επαρκές τόσο για τη δράση χλωριόντων όσο και για τη δράση της ενανθράκωσης.

**Πίνακας 1.** Μελέτη Σύνθεσης Σκυροδέματος (ALYSJ, 2014, CS163, 2008)

|                            | Σκυρόδεμα δομικών<br>στοιχείων σε επαφή<br>με το έδαφος<br>(Ομάδα Α) | Σκυρόδεμα δομικών<br>στοιχείων όχι σε<br>επαφή με το έδαφος<br>(Ομάδα Β) | Σκυρόδεμα υψηλής<br>αντοχής, εσωτερικές<br>κολώνες<br>(Ομάδα Γ) |
|----------------------------|--|--|---|
| Κατηγορία αντοχής          | C40/50   | C40/50   | C60/75  |
| Τριπλό μίγμα               |  | 25% OPC, 70% GGBS, 5% SF   |   |
| min T (kg/m <sup>3</sup> ) | 400  | 400  | 420   |
| max N/T                    | 0.35   | 0.35   | 0.33  |
| d <sub>max</sub> (mm)      | 20   | 20   | 20  |
| Πρόσθετα μέτρα             | Αδιάβροχη μεμβράνη   | Κανένα   | Κανένα  |
| Επιθετικό Αίτιο            | Χλωριόντα  | Ενανθράκωση  | Ενανθράκωση   |

**Πίνακας 2.** Προδιαγραφές Επικάλυψης Σκυροδέματος (ALYSJ, 2014, CS163, 2008)

|  | <b>Δομικό Στοιχείο</b>                              | <b>Επικάλυψη (mm)</b> |
|--|---|-----------------------|
| Επιφάνεια σκυροδέματος σε επαφή με το καλούπι ή με νερό      |   | 75                    |
|  | Εσωτερική πρόσοψη σκυροδέματος                      | 50                    |
| Σκυρόδεμα εκτεθειμένο σε καιρικές συνθήκες < 3.0m από έδαφος |   | 70                    |
| Σκυρόδεμα εκτεθειμένο σε καιρικές συνθήκες > 3.0m από έδαφος |   | 50                    |
|  | Εσωτερικές πλάκες, δοκοί, κολώνες, τοίχοι, κλίμακες | 50                    |

**Πίνακας 3.** Παράμετροι Στοχαστικής Εκτίμησης Διάρκειας Ζωής (ALYSJ, 2014)

|  | <b>Παράμετρος</b>  | <b>Μέση Τιμή</b>   | <b>SD</b> | <b>Τιμή</b> | <b>Κατανομή</b> |
|--|--|--------------------|-----------|-------------|-----------------|
|  | Συγκ. Cl στα υπόγεια ύδατα (mg/l)                          | 1477               | 315       | -           | Λογαριθμική     |
| Αρχική συγκ. Cl στο σκυρόδεμα (% κβ τσιμέντου) |  | -                  | -         | 0/0.1       | Binary          |
|  | Κρίσιμη συγκ. Cl (% κ.β. τσιμέντου)                        | 0,4                | -         | -           | Σταθερή         |
|  | Χρονική στιγμή έκθεσης σε Cl (εβδομάδες)                   | 1040* <sup>1</sup> | -         | -           | Σταθερή         |
|  | Χρονική στιγμή ελέγχου κατασκευής (εβδομάδες)              | 8                  | -         | -           | Σταθερή         |
|  | Διάρκεια ζωής (χρόνια)                                     | 114                | -         | -           | Σταθερή         |
|  | Επικάλυψη (m)  | 0.04               | -         | -           | Σταθερή         |
|  | Πάχος δομικού στοιχείου (m)                                | 1.2                | -         | -           | Σταθερή         |
|  | Θερμοκρασία (K)  | 306                | 5         | -           | Γραμμική        |
|  | Φαινόμενος συντελεστής διαχυτότητας Cl (m <sup>2</sup> /2) | 1.5E-12            | 3E-12     | -           | Γραμμική        |

\*<sup>1</sup> η δράση της προστατευτικής μεμβράνης υπολογίζεται συντηρητικά σαν 20 χρόνια.

### **Εκτίμηση διάρκειας ζωής μέσω ντετερμινιστικών προσεγγίσεων – Αρχική Παραμετροποίηση**

Η εκτίμηση της διάρκειας ζωής της κατασκευής έγινε με τη χρήση του φυσικοχημικού μαθηματικού εργαλείου EUCON. Πρόκειται περί ενός υπολογιστικού εργαλείου εκτίμησης διάρκειας ζωής σκυροδέματος βασισμένο σε μεθόδους προσδιορισμού της ανθεκτικότητας που σχετίζονται με την επιτελεσματικότητα (σύμφωνα με το EN 206) ανεπτυγμένο και επιβεβαιωμένο από τους συγγραφείς αυτής της μελέτης (Demis et al., 2013; Papadakis et al., 1991; Papadakis et al., 1996). Ξεκινώντας από τη κατάστρωση της μελέτης σύνθεσης, υπολογίζονται τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά από τα οποία εξαρτάται ο ρυθμός των διεργασιών φθοράς. Στην συνέχεια και ανάλογα των περιβαλλοντικών συνθηκών (κατηγορίες έκθεσης) προσδιορίζεται ο ρυθμός προόδου των μηχανισμών φθοράς που αφορούν αυτό το περιβάλλον, και τελικά εκτιμάται η διάρκεια χρήσιμης ζωής της κατασκευής. Ο προσδιορισμός της τελευταίας γίνεται μέσω φυσικοχημικών μαθηματικών μοντέλων εξομοίωσης της δράσης διοξειδίου του άνθρακα από την ατμόσφαιρα, και χλωριόντων στο σκυρόδεμα. Ιδιαίτερα όσον αφορά τη δράση των τελευταίων, οι φυσικοχημικές



διεργασίες διάχυσης τους καθώς και η ρόφιση και δέσμευσή τους από τον τσιμεντοπολτό περιγράφονται από μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις συγκέντρωσης Cl<sup>-</sup> στην υγρή φάση, από τις οποίες η συγκέντρωση των δεσμευμένων Cl<sup>-</sup> στον τσιμεντοπολτό μπορεί να υπολογισθεί αλγεβρικά. Επίλυση του συστήματος επιτρέπει τον προσδιορισμό του προφίλ χλωριόντων σε βάθος  $d$  από την εξωτερική επιφάνεια του δομικού στοιχείου, σε χρόνο  $t$ , καθώς και την εκτίμηση του απαιτούμενου χρόνου (κρίσιμη τιμή χρόνου διάβρωσης) που η συγκέντρωση Cl<sup>-</sup> στον χάλυβα θα βρεθεί πάνω από το όριο αποπαθητικοποίησης.

Οι αρχικές παράμετροι του υπολογιστικού εργαλείου EUCON παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

**Πίνακας 4.** Αρχικά δεδομένα του υπολογιστικού εργαλείου EUCON

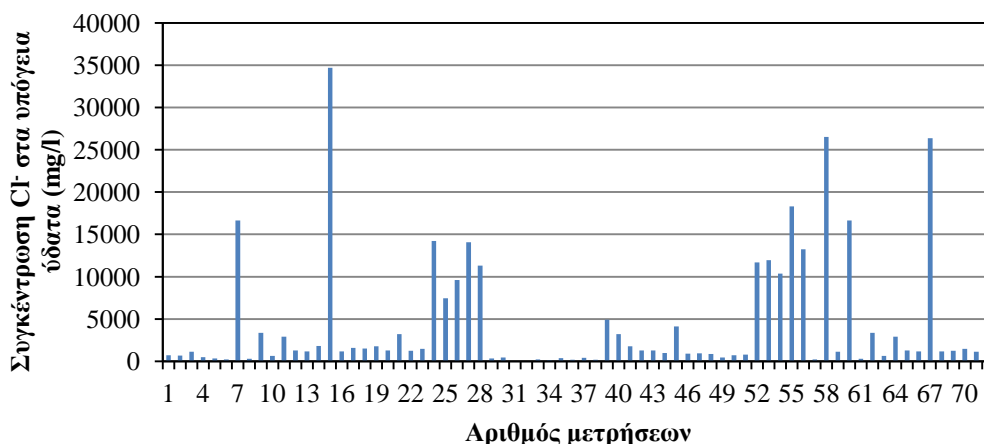
|  |
|--|
| <b>Ορισμός Κατασκευής και Υλικών</b>   |
| Τύπος Τσιμέντου: CEM III/B 42.5 R (Clinker 25%, SCM 75%, SCM = 70% GGBS + 5% SF)<br>Συστατικά Σκυροδέματος: Τσιμέντο 400 kg/m <sup>3</sup> , Πυκνότητα 2820 kg/m <sup>3</sup> , N/T 0.35, d <sub>max</sub> : 20 mm<br>Χημική σύσταση υλικών: Clinker (SiO <sub>2</sub> 21.2%, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 5%, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 3.1%, CaO 66.8%, SO <sub>3</sub> 0.5)<br>GGBS (SiO <sub>2</sub> 36.5%, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 13.8%, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.33%, CaO 39%, SO <sub>3</sub> 0.7)<br>(Λόγος δραστηρότητας πυριτίας SiO <sub>2</sub> , γ <sub>S</sub> , γ <sub>a</sub> = 90%)<br>(Λόγος δραστηρότητας αλουμίνας Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , γ <sub>a</sub> = 90%) |
| Επικάλυψη σκυροδέματος: 50 mm  |
| <b>Συνθήκες Περιβαλλοντικής Έκθεσης (Ενανθράκωση)</b>  |
| Επιθετικό Περιβάλλον: XC3 (moderate humidity)<br>Συγκέντρωση CO <sub>2</sub> : 0.08%<br>RH: 70%, 75%, 80%  |
| <b>Συνθήκες Περιβαλλοντικής Έκθεσης (Χλωριόντα)</b>  |
| Επιθετικό Περιβάλλον: XD2 (wet, rarely dry)<br>Συγκέντρωση Cl <sup>-</sup> στην εξωτερική επιφάνεια: 8.36 kg/m <sup>3</sup> sol. / 4.35 kg/m <sup>3</sup> sol.<br>Βαθμός έκθεσης στο επιθετικό περιβάλλον: 1 (όχι προστασία) / 0.833 (προστασία)<br>Συντελεστής αποδοτικότητας SCM ως προς δέσμευση Cl <sup>-</sup> : 2.2<br>Αρχική Cl <sup>-</sup> : 0 kg/m <sup>3</sup> conc.<br>Κρίσιμη συγκέντρωση Cl <sup>-</sup> για έναρξη διάβρωσης: 1.48 kg/m <sup>3</sup> conc.  |
| <b>Παράγοντες Χρόνου</b>   |
| Διάρκεια ζωής (χρόνια) 120   |

Σημαντική βαρύτητα στον ορισμό της μελέτης σύνθεσης σκυροδέματος στο υπολογιστικό εργαλείο EUCON, αποτελεί ο ορισμός της χημικής σύστασης οξειδίων του χρησιμοποιούμενου τσιμέντου. Στην εξεταζόμενη κατασκευή χρησιμοποιήθηκε τριπλό μίγμα τσιμέντου 25% OPC, 70% GGBS και 5% PFA. Υποθέτοντας κατηγορία τσιμέντου CEM III-B (στο οποίο η σύσταση του τσιμέντου είναι 20-34% Portland κλίνκερ, σκωρία υψικαμίνων 66-80% και δευτερεύοντα συστατικά 0-5%) μπορούμε να ορίσουμε τη χημική σύσταση του

τριπλού μίγματος σαν αυτή δύο διαφορετικών συστατικών, του (α) Portland κλίνκερ και (β) του δεύτερου υλικού το οποίο αποτελείται κατά 70% από σκωρία υψικαμίνων και κατά 5% από πυριτική παιπάλη, σύμφωνα με τις τιμές του Πίνακα 4. Με τον τρόπο αυτό η πυκνότητα του τριπλού μίγματος μπορεί σύμφωνα με τις αναλογίες των επιμέρους συστατικών και των πυκνοτήτων τους να υπολογισθεί ως  $0.25 \times 3125 + 0.7 \times 2755 + 0.05 \times 2160 = 2820 \text{ kg/m}^3$ .

Σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση των δομικών στοιχείων (Πίνακας 1) τα δομικά στοιχεία της ομάδας Α υπόκεινται σε δράση χλωριόντων (και όχι σε ενανθράκωση λόγω της υψηλής σχετικής υγρασίας από την επαφή με το έδαφος), ενώ τα δομικά στοιχεία των ομάδων Β και Γ υπόκεινται σε ενανθράκωση.

Όσον αφορά τη δράση της ενανθράκωσης, η περιεκτικότητα  $\text{CO}_2$  του αέρα επιλέχθηκε σαν 0.08% (ή 800 ppm), ενώ με βάση τη μέση σχετική υγρασία της περιοχής που κυμαίνεται από 68 – 78,5%, εξετάστηκε το εύρος τιμών 70%, 75% και 80%. Όσον αφορά τη δράση χλωριόντων, η συγκέντρωσή τους στην εξωτερική επιφάνεια των δομικών στοιχείων υπολογίστηκε σύμφωνα με τις μετρήσεις από την προμελέτη στα υπόγεια ύδατα (ALYSJ, 2014). Φαίνεται (Σχήμα 3) ότι οι μετρήσεις παρουσιάζουν σημαντική διακύμανση των τιμών τους (από αρκετά χαμηλές σε πολύ υψηλές) και ότι η κατανομή τους είναι λογαριθμική. Στην υπάρχουσα μελέτη ανθεκτικότητας ο μέσος όρος όλων των μετρήσεων ήταν  $4346.9 \text{ mg/l} = 4.35 \text{ kg/m}^3 \text{ solution}$ , ενώ ο γεωμετρικός μέσος όρος ίσος με  $1447.77 \text{ mg/l} = 1.45 \text{ kg/m}^3 \text{ solution}$ . Υπολογίστηκαν επίσης, οι γεωμετρικοί μέσοι όροι τριών ομάδων τιμών (α) χαμηλών συγκεντρώσεων, (β) μέσων συγκεντρώσεων και (γ) υψηλών συγκεντρώσεων, ως (0.29, 1.25, 8.36  $\text{kg/m}^3 \text{ solution}$ ). Στο EUCON επιλέχτηκε να χρησιμοποιηθεί η υψηλότερη συγκέντρωση χλωριόντων μιας και αντιπροσωπεύει το δυσμενέστερο σενάριο. Η κρίσιμη τιμή συγκέντρωσης χλωριόντων για την έναρξη της διάβρωσης υπολογίστηκε ως 1.48 kg ολικών χλωριόντων/  $\text{m}^3$  σκυροδέματος, αρκετά κοντά στη τιμή (0.4% τσιμέντου) που χρησιμοποιήθηκε στην υπάρχουσα μελέτη. Ο συντελεστής αποδοτικότητας (*k*-value) των ποζολανικών υλικών ως προς τη διείσδυση χλωριόντων, σύμφωνα με προηγούμενη μελέτη (Papadakis, 2000) ορίστηκε σαν 2.2. Τέλος, ο αποτελεσματικός συντελεστής διαχυτότητας χλωριόντων στο σκυρόδεμα υπολογίστηκε ως  $0.4738 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ . Αξίζει να σημειωθεί ότι ο συντελεστής αυτός είναι ο «πραγματικός» και όχι ο φαινόμενος (όπως υπολογίστηκε στην υπάρχουσα μελέτη ανθεκτικότητας) λόγω του ότι λαμβάνει υπόψη του εκτός από τη διάχυση χλωριόντων και όλες τις χημικές αντιδράσεις με τα στερεά συστατικά του τσιμεντοπολτού.



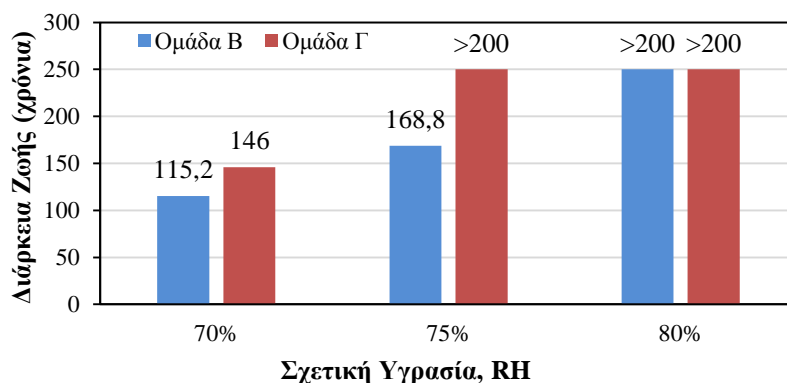
**Σχήμα 3.** Μετρήσεις συγκέντρωσης χλωριόντων στα υπόγεια ύδατα

Με βάση της παραμέτρους του Πίνακα 5, εκτιμήθηκε η διάρκεια ζωής των δομικών στοιχείων της ομάδας Α για δράση χλωριόντων και των δομικών στοιχείων των ομάδων Β και Γ για δράση ενανθράκωσης.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

### Δράση Ενανθράκωσης

Τα αποτελέσματα της εκτίμησης διάρκειας ζωής για δράση ενανθράκωσης των δομικών στοιχείων των ομάδων Β και Γ για το εύρος τιμών σχετικής υγρασίας από 70% έως 80% απεικονίζονται στο Σχήμα 4. Φαίνεται ότι η διάρκεια ζωής είναι αρκετά μεγαλύτερη της επιθυμητής (120 έτη), εκτός (οριακά) για το δομικά στοιχεία της ομάδας Β για 70% συνθήκες σχετικής υγρασίας. Σε αυτή τη περίπτωση η απαιτούμενη επικάλυψη είναι 50.9 mm (Πίνακας 5) ελάχιστα μεγαλύτερη από την προβλεπόμενη των 50 mm. Για την πιο αναμενόμενη τιμή σχετικής υγρασίας (75%), δεδομένου ότι οι απαιτούμενες επικαλύψεις σκυροδέματος είναι 45 mm και 37.2 mm (για τα στοιχεία των ομάδων Β και Γ, αντίστοιχα) η επικάλυψη των 50 mm σύμφωνα με το σχεδιασμό του έργου κρίνεται αρκετή.

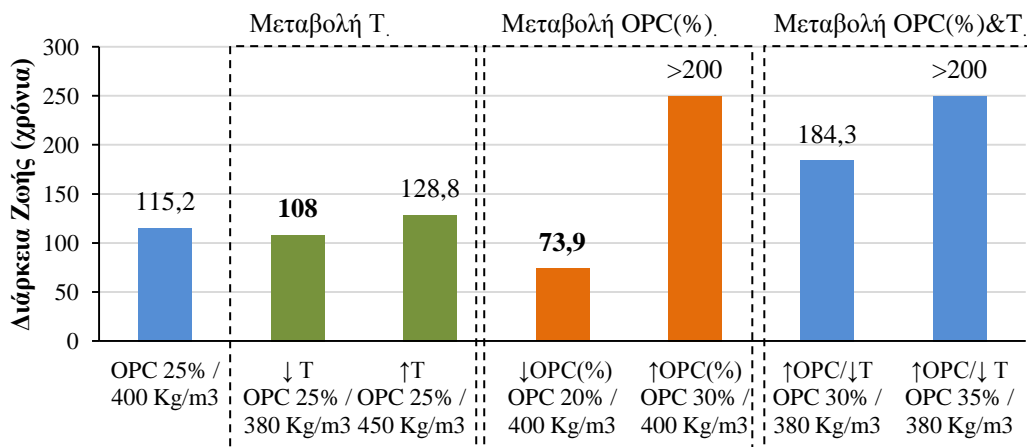


**Σχήμα 4.** Διάρκεια ζωής δομικών στοιχείων για δράση ενανθράκωσης

**Πίνακας 5.** Απαιτούμενη επικάλυψη (mm) δοκιμίων σκυροδέματος για διάρκεια ζωής 120 ετών υπό δράση ενανθράκωσης

| Απαιτούμενη Επικάλυψη Σκυροδέματος (mm)                      | Σχετική Υγρασία (RH) |      |      |
|--|----------------------|------|------|
|  | 70%                  | 75%  | 80%  |
| Ομάδα Β  | 50.9                 | 45   | 32.9 |
| Ομάδα Γ  | 45,3                 | 37,2 | 29,1 |
| <b>Ομάδα Β-Control (OPC 25% - T 400 Kg/m<sup>3</sup>)</b>    | 50.9                 |      |      |
| ↓ T (OPC 25% - T <b>380</b> Kg/m <sup>3</sup> )              | 52.9                 |      |      |
| ↑ T (OPC 25% - T <b>450</b> Kg/m <sup>3</sup> )              | 48.3                 |      |      |
| ↓ OPC (OPC <b>20%</b> - T 400 Kg/m <sup>3</sup> )            | 64.6                 |      |      |
| ↑ OPC (OPC <b>30%</b> - T 400 Kg/m <sup>3</sup> )            | 36.2                 |      |      |
| ↑ OPC/↓ T (OPC <b>30%</b> - T <b>380</b> Kg/m <sup>3</sup> ) | 40.1                 |      |      |
| ↑ OPC/↓ T (OPC <b>35%</b> - T <b>380</b> Kg/m <sup>3</sup> ) | 30.8                 |      |      |

Μεταβολή της ποσότητας τσιμέντου (μείωση από 400 σε 380 kg/m<sup>3</sup>, αλλά και αύξηση του σε 450 kg/m<sup>3</sup>) του τριπλού μίγματος δεν επιφέρει σημαντικές μεταβολές στο βάθος ενανθράκωσης ή στη διάρκεια ζωής της κατασκευής (Σχήμα 5). Μείωση της ποσότητας οδηγεί σε αύξηση του βάθους ενανθράκωσης και μικρή μείωση της διάρκειας ζωής (108 έτη) με αποτέλεσμα να απαιτείται επικάλυψη 52.9 mm, ενώ αύξηση του οδηγεί επίσης σε μικρή αύξηση της διάρκειας ζωής (128.8 έτη) καθώς και σε μικρή μείωση της απαιτούμενης επικάλυψης (48.3 mm).

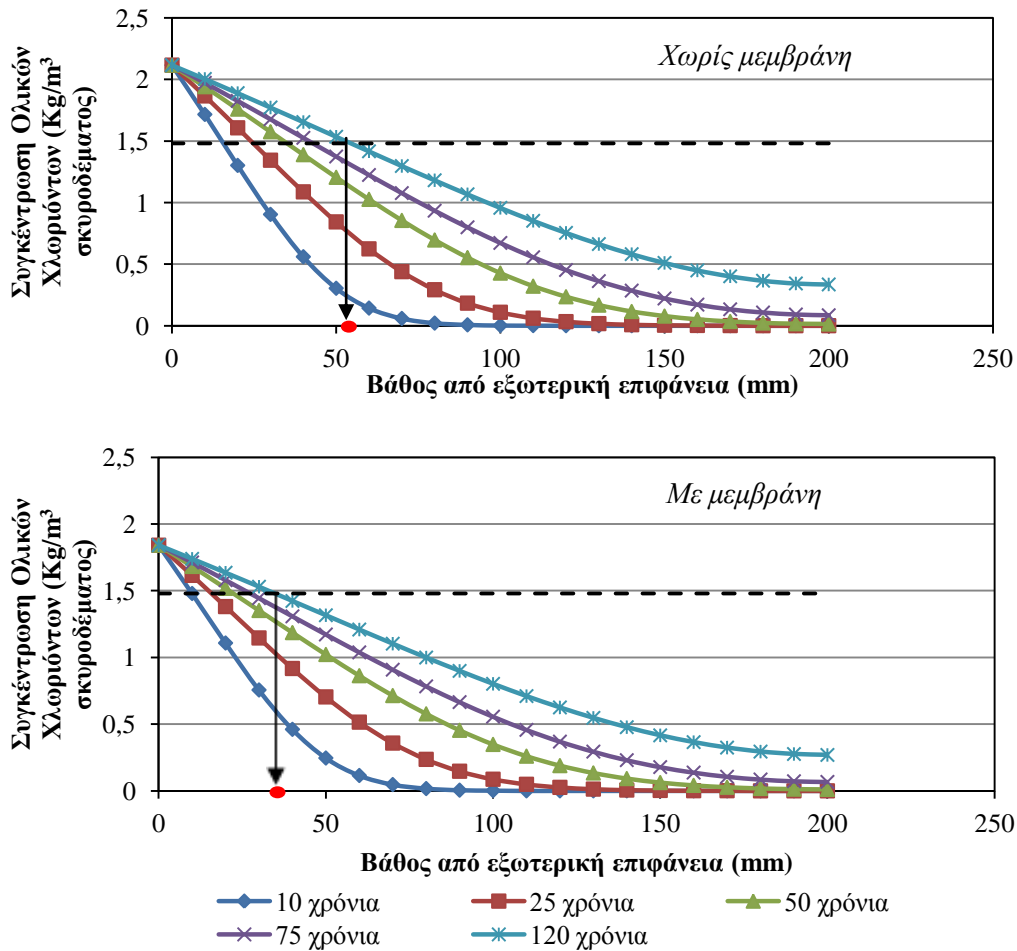


**Σχήμα 5.** Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης εκτίμησης διάρκειας ζωής δομικών στοιχείων για δράση ενανθράκωσης

Σημαντική διακύμανση της διάρκειας ζωής παρουσιάζεται όταν διαφοροποιηθεί η ποσότητα του OPC στο τριπλό μίγμα. Αύξηση του ποσοστού τσιμέντου στο τριπλό μίγμα στο 30%, (και άρα 65% GGBS, 5% SF, σε σχέση με το αρχικό 25% OPC - 70% GGBS - 5% SF) οδηγεί σε πολύ μεγάλη αύξηση της διάρκειας ζωής της κατασκευής (με 50 mm επικάλυψη σκυροδέματος). Με αυτή τη σύνθεση τσιμέντου η απαιτούμενη επικάλυψη για διάρκεια ζωής 120 ετών προκύπτει 36.2 mm. Υπό αυτό το σκεπτικό δοκιμάστηκε η αποτελεσματικότητα της περαιτέρω αύξησης της ποσότητας τσιμέντου στο τριπλό μίγμα με ταυτόχρονη μείωση της ποσότητας τσιμέντου (binder content) στα 380 kg/m<sup>3</sup>. Με βάση τα αποτελέσματα (Πίνακας 5, Σχήμα 5) φαίνεται ότι και τα δύο τριπλά μίγματα που δοκιμάστηκαν (30% OPC – 65% GGBS – 5% SF και 35% OPC – 60% GGBS – 5% SF) δείχνουν να είναι πιο αποτελεσματικά από αυτό που επιλέχθηκε στη μελέτη, μιας και οδηγούν σε σημαντική αύξηση της διάρκειας ζωής της κατασκευής με 50 mm επικάλυψη.

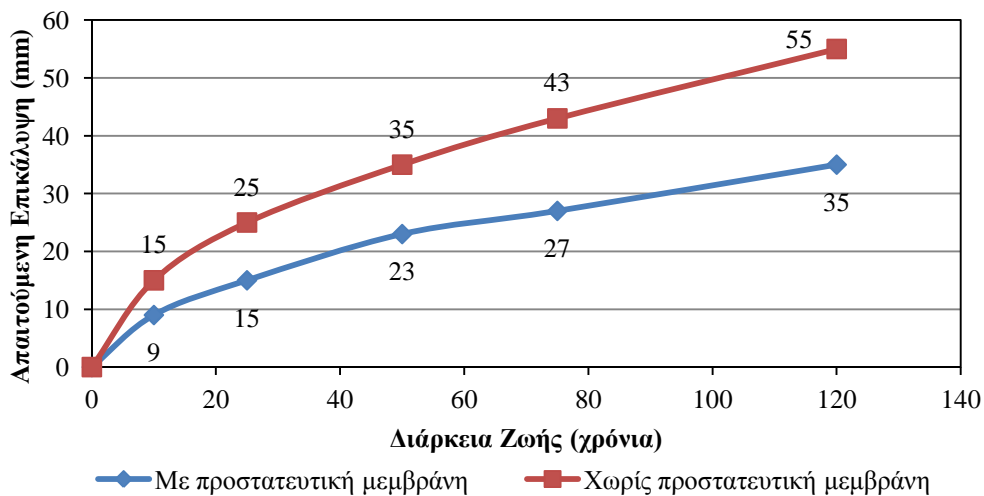
### Δράση Χλωριόντων

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του έργου και την προτεινόμενη μελέτη ανθεκτικότητας (ALYSJ, 2014), στα δομικά στοιχεία της ομάδας Α θα τοποθετηθεί προστατευτική μεμβράνη, με διάρκεια ζωής, σύμφωνα με τον κατασκευαστή, 20 έτη. Για το λόγο αυτό κατά την εκτίμηση της διάρκειας ζωής των στοιχείων αυτών λόγω δράσης χλωριόντων, εκτιμήθηκε το προφίλ συγκέντρωσης χλωριόντων σε βάθος χρόνου (έως 120 έτη) με τη χρήση μεμβράνης αλλά και χωρίς, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6.



**Σχήμα 6.** Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης εκτίμησης διάρκειας ζωής δομικών στοιχείων για δράση ενανθράκωσης

Με βάση τα παραπάνω προφίλ και τη κρίσιμη τιμή συγκέντρωσης χλωριόντων για την έναρξη της διάβρωσης, φαίνεται ότι η χρήση προστατευτικής μεμβράνης μειώνει το απαιτούμενο πάχος επικάλυψης για διάρκεια ζωής 120 έτη, από 55 mm στα 35 mm (Σχήμα 7).



**Σχήμα 7.** Απαιτούμενη επικάλυψη δομικών στοιχείων ομάδας Α για δράση χλωριόντων (σε βάθος χρόνου έως 120 έτη).

Η μεταβολή της ποσότητας τσιμέντου (σε 380 ή 450 kg/m<sup>3</sup> από 400 kg/m<sup>3</sup>) δεν επηρεάζει τη συμπεριφορά του δομικού στοιχείου έναντι της δράσης χλωριόντων (Πίνακας 6).

**Πίνακας 6.** Απαιτούμενη επικάλυψη (mm) δοκιμίων σκυροδέματος για διάρκεια ζωής 120 ετών υπό δράση χλωριόντων

| Απαιτούμενη Επικάλυψη Σκυροδέματος (mm)                       | Με μεμβράνη | Χωρίς μεμβράνη |
|---|-------------|----------------|
| <b>Ομάδα Α - Control</b> (OPC 25% - T 400 Kg/m <sup>3</sup> ) | 35          | 55             |
| ↓T (OPC 25% - T <b>380</b> Kg/m <sup>3</sup> )                | 35          | -              |
| ↑T (OPC 25% - T <b>450</b> Kg/m <sup>3</sup> )                | 33          | -              |
| ↓OPC (OPC <b>20%</b> - T 400 Kg/m <sup>3</sup> )              | 77          | -              |
| ↑OPC (OPC <b>30%</b> - T 400 Kg/m <sup>3</sup> )              | 11          | -              |
| ↑OPC/↓T (OPC <b>30%</b> - T <b>380</b> Kg/m <sup>3</sup> )    | 15          | -              |
| ↑OPC/↓T (OPC <b>30%</b> - T <b>380</b> Kg/m <sup>3</sup> )    | -           | 29             |
| ↑OPC/↓T (OPC <b>35%</b> - T <b>380</b> Kg/m <sup>3</sup> )    | -           | 13             |

Αντίθετα, η μεταβολή της ποσότητας του OPC στο τριπλό μίγμα OPC/GGBS/SF έχει αρκετά σημαντική επίδραση. Μείωση του ποσοστού τσιμέντου από 25% σε 20% επιφέρει σημαντική αύξηση στην απαιτούμενη επικάλυψη σκυροδέματος (από 35 mm σε 77 mm) ακόμα και με τη χρήση προστατευτικής μεμβράνης, ενώ αύξηση του σε 30% οδηγεί σε μόλις 11 mm απαιτούμενη επικάλυψη για διάρκεια ζωής 120 ετών. Όπως και στη περίπτωση της ενανθράκωσης, αποδεικνύεται ότι η ταυτόχρονη αύξηση της ποσότητας

τσιμέντου στο μίγμα (από 20% σε 30% ή 35%) με την παράλληλη μείωση της ποσότητας του (από 400 kg/m<sup>3</sup> σε 380 kg/m<sup>3</sup>) ακόμα και χωρίς τη χρήση της προστατευτικής μεμβράνης οδηγεί σε πολύ καλύτερη συμπεριφορά (απαιτούνται 29 mm και 13 mm επικάλυψη, αντίστοιχα, για διάρκεια ζωής 120 έτη).

Η ικανότητα του σκυροδέματος να αντιστέκεται στη διείσδυση χλωριόντων, όπως είναι γνωστό, οφείλεται κατά κύριο λόγο στο ρυθμό δέσμευσης χλωριόντων από τα στερεά ενυδατωμένα συστατικά του (Demis et al., 2014). Πρόσφατα αποτελέσματα δείχνουν ότι τσιμέντα πλούσια σε ποζολάνες (Hosam et al., 2010), σκωρία υψικαμίνων (Kaid et al., 2009) και πυριτική παιπάλη (Elahi et al., 2010) έδειξαν σημαντική μείωση του συντελεστή διαχυτότητας χλωριόντων σε σχέση με δείγματα από OPC. Τσιμέντα τύπου CEM III, τα οποία έχουν αρκετά υψηλό λόγο Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SO<sub>3</sub>, συντελώντας έτσι στη δημιουργία περισσότερων AFm φάσεων (και όχι AFt), οδηγούν σε αύξηση της δημιουργίας άλατος του Friedel και στη χημική δέσμευση χλωριόντων.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνεται ότι η εκτίμηση της διάρκειας ζωής των τριών ομάδων (Α, Β και Γ) των δομικών στοιχείων της κατασκευής, μέσω φυσικοχημικών μαθηματικών προσομοιωμάτων, εκτιθέμενη στο ιδιαίτερα επιθετικό περιβάλλον της Αραβικής Χερσονήσου επιβεβαιώνει αυτά της στοχαστικής εκτίμησης. Στην ουσία επιβεβαιώνεται ο σχεδιασμός ανθεκτικότητας για τη συγκεκριμένη κατασκευή. Μέσω της παραμετρικής ανάλυσης που έγινε για τη δράση και των δύο επιθετικών αιτιών, όσον αφορά τη μεταβολή της ποσότητας τσιμέντου και την μεταβολή της ποσότητας τσιμέντου OPC στο τριπλό μίγμα OPC/GGBA/SF, τα αποτελέσματα δείχνουν την ευεργετική δράση της τελευταίας παραμέτρου. Με αυτό το σκεπτικό η προτεινόμενη μελέτη σύνθεσης για το συγκεκριμένο έργο θα μπορούσε να αναπροσαρμοσθεί σύμφωνα με τον Πίνακα 7, χωρίς τη χρήση άλλων προστατευτικών μέσων.

**Πίνακας 7.** Προτεινόμενη Μελέτη Σύνθεσης Σκυροδέματος

|                            | Σκυρόδεμα δομικών στοιχείων σε επαφή με το έδαφος (Ομάδα Α) | Σκυρόδεμα δομικών στοιχείων όχι σε επαφή με το έδαφος (Ομάδα Β) | Σκυρόδεμα υψηλής αντοχής, εσωτερικές κολώνες (Ομάδα Γ) |
|----------------------------|---|---|--|
| Κατηγορία αντοχής          | C40/50  | C40/50  | C60/75   |
| Τριπλό μίγμα               | 25% OPC (35%) - 70% GGBS (60%) - 5% SF (5%)                 |   |  |
| min T (kg/m <sup>3</sup> ) | 400 (380)   | 400 (380)   | 420 (380)  |
| max N/T                    | 0.35  | 0.35  | 0.33   |
| d <sub>max</sub> (mm)      | 20  | 20  | 20   |
| Πρόσθετα μέτρα             | Αδιάβροχη μεμβράνη (Χωρίς μεμβράνη)                         | Κανένα  | Κανένα   |
| Επιθετικό Αίτιο            | Χλωριόντα   | Ενανθράκωση   | Ενανθράκωση  |



Αναλογιζόμενοι, την αποτελεσματικότητα της φυσικοχημικής εκτίμησης διάρκειας ζωής, όπως αποδείχθηκε στη παρούσα μελέτη, καθώς και τις κατά καιρούς ενστάσεις που έχουν εκφρασθεί σχετικά με την εφαρμογή των στοχαστικών αναλύσεων (Demis and Papadakis, 2017), φαίνεται ότι ένα σωστά παραμετροποιημένο και επιβεβαιωμένο φυσικοχημικό υπολογιστικό εργαλείο, εμπλουτισμένο με στοχαστικές παραμέτρους θα μπορούσε να αποτελέσει μία αρκετά αξιόπιστη λύση, γεφυρώνοντας έτσι της όποιες διαφορές ανάμεσα στη ντετερμινιστική και στοχαστική καθαρά εκτίμηση της. Στην ουσία, όπως έχει αναφερθεί από τους Demis and Papadakis (2017), η αβεβαιότητα της μέτρησης και υπολογισμού των όποιων παραμέτρων αντισταθμίζεται με την υιοθέτηση και ενσωμάτωση συντελεστών ασφαλείας στο φυσικοχημικό μαθηματικό εργαλείο, όπως έχει διατυπωθεί και αποδειχθεί πειραματικά για τη δράση της ενανθράκωσης (fib bulletin 34 2006). Οδηγούμαστε με αυτό τον τρόπο στην ημι-στοχαστική εκτίμηση διάρκειας ζωής. Αυτό είναι το ζητούμενο για έναν πρακτικό σχεδιασμό ανθεκτικότητας λόγω δράσης χλωριόντων σε ένα έντονα επιθετικά περιβάλλον όπως αυτό των χωρών της Μέσης Ανατολής.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μελέτη παρουσιάστηκαν οι βασικές αρχές ενός δομημένου σχεδιασμού ανθεκτικότητας κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, όπου η διάρκεια ζωής της κατασκευής αποτελεί άμεσο παράγοντα σχεδιασμού. Ο σχεδιασμός αυτός επιβάλλεται για ιδιαίτερα επιθετικά περιβάλλοντα, όπως αυτό των χωρών της Αραβικής Χερσονήσου, όπου τα στενά πλαίσια των προδιαγραφών της μεθόδου “Deemed-to-satisfy” συνήθως δεν διασφαλίζουν την ανθεκτικότητα της κατασκευής. Στα πλαίσια αυτά κινείται ο σχετικά νεοσύστατος κανονισμός “*Guide for the Design of Concrete Structures in the Arabian Peninsula*” του Concrete Society, στον οποίο υιοθετείται η χρήση μαθηματικών προσομοιώματων εκτίμησης της διάρκειας ζωής κατασκευών ΟΣ. Δεδομένης της καθιέρωσης των στοχαστικών αναλύσεων διάρκειας ζωής, στη παρούσα εργασία συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα στοχαστικής εκτίμησης διάρκειας ζωής υπάρχουσας κατασκευής, με αυτά που προκύπτουν μέσω φυσικοχημικών μαθηματικών προσεγγίσεων. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τον αρχικό σχεδιασμό ανθεκτικότητας και μέσω συγκεκριμένων παραμετρικών αναλύσεων προτείνουν άλλη βέλτιστη λύση που θα μπορούσε να ακολουθηθεί. Δείχνεται ότι με βάση τη σωστή παραμετροποίηση η φυσικοχημική εκτίμηση μπορεί να δώσει δόκιμα αποτελέσματα και ότι η στοχαστική δεν είναι μονόδρομος. Αν δε η πρώτη εμπλουτισθεί περαιτέρω με συντελεστές ασφαλείας, όπως για τη δράση της ενανθράκωσης, οδηγούμαστε στην ημι-στοχαστική εκτίμηση διάρκειας ζωής.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ALYSJ, Doha Metro: Gold Line- Structural Concrete Durability Assessment M006-GDB-STR-RTP-00016 (2014).

CIRIA Guide to the Construction of Reinforced Concrete in the Arabian Peninsula, Construction Industry Research and Information Association C577-02 (2002)

CS163 Guide for the Design of Concrete Structures in the Arabian Peninsula, Concrete Society (2008)

Δέμης, Σ. & Παπαδάκης, Ε.Γ., “Σχεδιασμός Ανθεκτικότητας Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος από Πρακτική Σκοπιά – Προβλήματα και Προοπτικές”, 17ο Πανελλήνιο Συνέδριο Σκυροδέματος (Θεσσαλονίκη, 10-12 Νοεμβρίου 2016), ΕΠΕΣ, ΤΕΕ/TKM, Θεσσαλονίκη (2016)

Demis, S. & Papadakis, V.G., “Durability design process of reinforced concrete structures - Service life estimation, problems and perspectives”, *Construction and Building Materials (in press)* (2017)

Demis, S., Efstathiou, M.P. & Papadakis, V.G., “Computer-aided modeling of concrete service life”. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 47 (2014) 9-18.

Elahi, A., Basheer, P.A.M., Nanukuttan, S.V. & Khan, Q.U.Z., “Mechanical and durability properties of high performance concretes containing supplementary cementitious materials”. *Construction & Building Materials*, Vol. 24 (2010) 292–299.

EN 1992-1-1, Eurocode 2: Design of concrete structures - part 1-1: General rules and rules for buildings, European Committee for Standardization, Brussels, (2004).

EN 1990:2002+A1, Eurocode – Basis of structural design, European Committee for Standardization, Brussels, (2005).

EN 206:2013, Concrete - Specification, Performance, Production and Conformity, European Committee for Standardization, Brussels, (2014).

EN 197-1, Cement. Composition, specifications and conformity criteria for common cements, European Committee for Standardization, Brussels (2011).

fib Bulletin 53, Structural Concrete – Textbook on behavior, design and performance Volume 3, International Federation for Structural Concrete (fib), (2010).

fib Model Code, Model Code 2010 Final Draft, International Federation for Structural Concrete (fib), (2012).

fib Bulletin 34, Model Code for Service Life Design, International Federation for Structural Concrete (fib), (2006).

fib bulletin 59, Condition control and assessment of reinforced concrete structures, International Federation for Structural Concrete (fib), (2011).

Hosam, E.D.H.S., Rashad, A.M. & El-Sabbagh, B.A., "Durability and Strength Evaluation of High-Performance Concrete in Marine Structures". *Construction & Building Materials*, Vol. 21 (2010) 878-884.

Kaid, N., Cyr, M., Julien, S. & Khelafi, H., "Durability of Concrete Containing a Natural Pozzolan as Defined by a Performance-Based Approach". *Construction & Building Materials*, Vol. 23 (2009) 3457-3467.

Papadakis, V.G., Fardis, M.N. & Vayenas, C.G., "Physicochemical Processes and Mathematical Modeling of Concrete Chlorination", *Chemical Engineering Science*, Vol. 51, No. 4 (1996) 505.

Papadakis, V.G., Fardis, M.N. & Vayenas, C.G., "Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation", *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No. 4 (1991) 363.

Papadakis, V.G. "Effect of Supplementary Cementing Materials on Concrete Resistance Against Carbonation and Chloride Ingress, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 2 (2000) 291-299.

Song, H.W., Lee, C.H. & Ann, K.Y. "Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments" *Cement & Concrete Composites*, Vol. 30 (2008) 113-121

Tamini, A.K., Abdalla, J.A. & Sakka, Z.I. "Prediction of long term chloride diffusion of concrete in harsh environment" *Construction and Building Materials*, Vol. 22 (2008) 829-836