

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ

Ευάγγελος Γ. Παπαδάκης

Δρ. Χημικός Μηχανικός

Ε.Γ. Παπαδάκης & Συνεργάτες – Τεχνολογία & Ανθεκτικότητα Κατασκευών

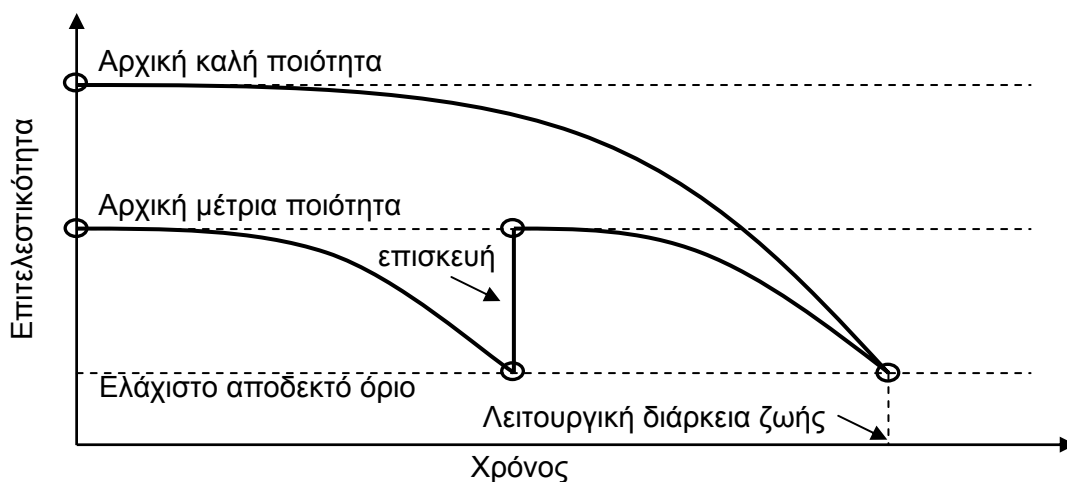
ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΠΑΤΡΩΝ Α.Ε.

vgr@psp.org.gr

1. ΒΑΣΙΚΟΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΦΘΟΡΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Στην Ελλάδα τα τελευταία χρόνια παρατηρούνται έντονα προβλήματα μη ικανοποιητικής ανθεκτικότητας (γήρανσης) των κατασκευών, με την διάβρωση του οπλισμού να αναδεικνύεται ως το σημαντικότερο πρόβλημα στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα όχι μόνον 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, όπως ο σεισμός.

Ο τύπος και ο ρυθμός των διεργασιών φθοράς του σκυροδέματος και του οπλισμού του καθορίζει την αντίσταση των υλικών, των στοιχείων και των τμημάτων που συνθέτουν την κατασκευή. Αυτό ανακλάται στην ασφάλεια, την λειτουργικότητα και την εμφάνιση της κατασκευής, δηλαδή στην **επιτελεστικότητα** της (performance). Ως **διάρκεια χρήσιμης ζωής** (ή **λειτουργική ζωή** ή απλώς **διάρκεια ζωής**, working life, service lifetime) μιας κατασκευής ορίζεται η περίοδος του χρόνου μέσα στην οποία η επιτελεστικότητα της κατασκευής διατηρείται σε ένα αποδεκτό, σύμφωνα με προδιαγραφές επίπεδο, ακολουθώντας ένα κανονικό πρόγραμμα συντήρησης. Μια επιθυμητή διάρκεια ζωής μπορεί να επιτευχθεί είτε λόγω καλής αρχικής ποιότητας κατασκευής είτε λόγω συνεχών σοβαρών επισκευών μιας κακής αρχικής ποιότητας κατασκευής (Σχ. 1). Αντικείμενο του άρθρου αυτού είναι η παροχή πληροφοριών σε θέματα προσομοίωσης των μηχανισμών φθοράς και ποσοτικής εκτίμησης της διάρκειας ζωής των κατασκευών από σκυρόδεμα.



Σχήμα 1. Σχέση επιτελεστικότητας – διάρκειας ζωής κατασκευών από σκυρόδεμα.

Ως **ανθεκτικότητα** (durability) μιας κατασκευής σε διάρκεια ορίζεται η ικανότητά της να αντιστέκεται σε περιβαλλοντικές επιδράσεις χωρίς η επιτελεστικότητά της να υποχωρεί κάτω από ένα ελάχιστο αποδεκτό όριο. Τρεις κύριοι παράγοντες καθορίζουν την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος στον χρόνο: η *σύνθεση σκυροδέματος* (ποιότητα και σχετική ποσότητα των συστατικών του σκυροδέματος), ο *σχεδιασμός*, η *υλοποίηση και η συντήρηση της κατασκευής* και οι *περιβαλλοντικές συνθήκες* στις οποίες εκτίθεται. Ως **φθορά** (deterioration) μιας κατασκευής στον χρόνο ορίζεται κάθε απώλεια επιτελεστικότητας και είναι αποτέλεσμα διαφόρων *περιβαλλοντικών δράσεων*: *μηχανικών, φυσικών, χημικών και βιοχημικών διεργασιών*. Το τελικό αποτέλεσμα όλων αυτών των μηχανισμών είναι συνήθως ρηγμάτωση ή/και διάβρωση του σκυροδέματος [1-5].

Στις **μηχανικές διεργασίες** που προκαλούν ρηγμάτωση περιλαμβάνονται η αρχική συστολή, η αρχική καθίζηση, η άμεση φόρτιση και οι επιβαλλόμενες παραμορφώσεις. Η μηχανική απόξεση ή σπηλαίωση προκαλεί διάβρωση του σκυροδέματος.

Στις **φυσικές διεργασίες** που προκαλούν ρηγμάτωση περιλαμβάνονται οι θερμοκρασιακές διαφορές, η συστολή ξήρανσης, και η επίδραση του παγετού.

Οι **χημικές διεργασίες** που προκαλούν φθορά του σκυροδέματος διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, σε αυτές που επιδρούν στο σκυροδέμα και σε αυτές που επιδρούν στον χαλύβδινο οπλισμό του σκυροδέματος. Στην πρώτη υποκατηγορία ανήκει η *χημική δράση επιβλαβών ουσιών* (μορίων ή ιόντων) στο σκυροδέμα, που στην πράξη οι πιο συνήθεις είναι: η *επίδραση οξέων* (συμπεριλαμβανομένων των αλάτων αμμωνίου και μαγνησίου καθώς και του μαλακού νερού), η *επίδραση θεικών* και η *αλκαλοπυριτική αντίδραση*.

Οι ράβδοι οπλισμού στο σκυροδέμα προστατεύονται από την διάβρωση μέσω ενός λεπτού στρώματος οξειδίου του σιδήρου που σχηματίζεται στην επιφάνειά τους (παθητικοποίηση χάλυβα) λόγω της υψηλής αλκαλικότητας (pH περίπου 12.6) του περιβάλλοντος σκυροδέματος. Η *διάβρωση* μπορεί να αρχίσει όταν καταστραφεί αυτό το προστατευτικό στρώμα:

- είτε λόγω *διείσδυσης χλωριόντων (Cl⁻)* και υπέρβασης μιας κρίσιμης συγκέντρωσης,
- είτε λόγω *μείωσης του pH* του νερού των πόρων σε τιμές κάτω του 9. Αυτή η μείωση της αλκαλικότητας είναι αποτέλεσμα της *ενανθράκωσης του σκυροδέματος*, δηλαδή της αντίδρασής του με το CO₂ που διαχέεται στους πόρους του από το περιβάλλον.

Σε θαλάσσιο περιβάλλον, παράκτιες περιοχές και εκεί που γίνεται χρήση αλάτων τήξης χιονιού, η διείσδυση χλωριόντων είναι ο κύριος μηχανισμός έναρξης και συντήρησης της διάβρωσης του οπλισμού. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, και ιδίως σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές πλούσιες σε εκπομπές CO₂, η ενανθράκωση του σκυροδέματος είναι ο κύριος μηχανισμός που οδηγεί σε αποπαθητικοποίηση του οπλισμού. Πάντως, και στις δύο περιπτώσεις η *διεργασία αυτής καθαυτής της διάβρωσης απαιτεί την παρουσία τόσο υγρασίας όσο και οξυγόνου για να προχωρήσει ποσοτικά*.

Τέλος, αρκετές **βιοχημικές διεργασίες**, όπως η ανάπτυξη μικροοργανισμών στις επιφάνειες σκυροδέματος, με εξέχουσα την βιολογική δράση σε συστήματα αποχέτευσης, οδηγούν σε βαθμιαία διάβρωση του σκυροδέματος.

2. ΤΟ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ EN 206 ΚΑΙ ΘΕΜΑΤΑ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Το νέο *Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 206 [6]*, το οποίο σύντομα θα ισχύσει και στην χώρα μας αντικαθιστώντας τον ΚΤΣ-97, προδιαγράφει απαιτήσεις για τα συστατικά υλικά του σκυροδέματος, τις ιδιότητες του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος, τους περιορισμούς στην σύνθεση σκυροδέματος, τα τεχνικά χαρακτηριστικά σκυροδέματος, την παραλαβή νωπού σκυροδέματος, την διαδικασία ελέγχου παραγωγής, τα κριτήρια συμμόρφωσης και την επιθεώρηση συμμόρφωσης. Καθορίζει αρμοδιότητες για τον *σχεδιαστή μηχανικό, τον παραγωγό και τον χρήστη*.

Σύμφωνα με το EN 206, περιβαλλοντικές δράσεις είναι εκείνες οι χημικές και φυσικές δράσεις στις οποίες εκτίθεται το σκυρόδεμα και επιδρούν σε αυτό ή τον οπλισμό του, και δεν θεωρούνται ως τυπικά φορτία κατά τον δομικό σχεδιασμό. Οι κύριες δράσεις φθοράς που λαμβάνονται υπόψη είναι η διάβρωση του οπλισμού προκαλούμενη είτε μέσω ενανθράκωσης είτε επίδρασης χλωριόντων, η δράση παγετού και η χημική προσβολή. Οι περιβαλλοντικές δράσεις ταξινομούνται σε διάφορες **κατηγορίες έκθεσης** και παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Η επιλογή της κατηγορίας έκθεσης σκυροδέματος εξαρτάται από τις διατάξεις που ισχύουν στον τόπο χρήσης του σκυροδέματος.

Πίνακας 1. Κατηγορίες έκθεσης σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 206.

Κατηγορία	Περιγραφή του περιβάλλοντος	Ενδεικτικά παραδείγματα
1 Χωρίς κίνδυνο διάβρωσης ή άλλης προσβολής		
X0	Για άοπλο σκυρόδεμα: Όλες οι εκθέσεις, εκτός εάν υπάρχει δράση παγετού, απότριψη ή χημική προσβολή Για σκυρόδεμα με οπλισμό ή άλλα ενσωματωμένα μέταλλα: Πολύ ξηρό	Σκυρόδεμα εσωτερικών χώρων με πολύ χαμηλή υγρασία αέρα
2 Διάβρωση που προκαλείται μέσω ενανθράκωσης		
Όταν σκυρόδεμα με οπλισμό ή άλλα ενσωματωμένα μέταλλα εκτίθεται σε ατμοσφαιρικό αέρα και υγρασία, η έκθεση να κατηγοριοποιείται ως ακολούθως:		
XC1	Ξηρό ή μόνιμα υγρό	Σκυρόδεμα εσωτερικών χώρων με χαμηλή υγρασία αέρα, σκυρόδεμα μόνιμα βυθισμένο σε νερό
XC2	Υγρό, σπάνια ξηρό	Επιφάνειες σκυροδέματος εκτεθειμένες σε μακροχρόνια επαφή με νερό, πολλές θεμελιώσεις
XC3	Μέτρια υγρασία	Σκυρόδεμα εσωτερικών χώρων με μέτρια ή υψηλή υγρασία αέρα, σκυρόδεμα εξωτερικών χώρων προφυλαγμένο από την βροχή
XC4	Κυκλική εναλλαγή ύγρανσης-ξηράνσης	Επιφάνειες σκυροδέματος εκτεθειμένες σε επαφή με νερό, εκτός κατηγορίας έκθεσης XC2
3 Διάβρωση που προκαλείται μέσω χλωριόντων εκτός θαλάσσιου νερού		
Όταν σκυρόδεμα με οπλισμό ή άλλα ενσωματωμένα μέταλλα εκτίθεται σε επαφή με νερό που περιέχει χλωριόντα περιλαμβάνοντας τα αντιπαγωτικά άλατα, από πηγές άλλες εκτός θαλάσσιου νερού, η έκθεση να κατηγοριοποιείται ως ακολούθως:		
XD1	Μέτρια υγρασία	Επιφάνειες σκυροδέματος εκτεθειμένες σε χλωριόντα μεταφερόμενα μέσω αέρα
XD2	Υγρό, σπάνια ξηρό	Πισίνες, σκυρόδεμα εκτεθειμένο σε βιομηχανικά νερά που περιέχουν Cl ⁻
XD3	Κυκλική εναλλαγή ύγρανσης-ξηράνσης	Τμήματα γεφυρών εκτεθειμένα σε σταγονίδια που περιέχουν Cl ⁻ , πεζοδρόμια, δάπεδα χώρων στάθμευσης
4 Διάβρωση που προκαλείται μέσω χλωριόντων θαλάσσιου νερού		
Όταν σκυρόδεμα με οπλισμό ή άλλα ενσωματωμένα μέταλλα εκτίθεται σε επαφή με χλωριόντα από θαλάσσιο νερό ή αέρα που μεταφέρει άλατα θαλάσσιου νερού, η έκθεση να κατηγοριοποιείται ως ακολούθως:		
XS1	Εκτεθειμένο σε άλατα μεταφερόμενα μέσω αέρα αλλά όχι σε άμεση επαφή με θαλάσσιο νερό	Παραθαλάσσιες κατασκευές
XS2	Μόνιμα βυθισμένο σε νερό	Τμήματα θαλασσίων κατασκευών
XS3	Ζώνη διαβροχής	Τμήματα θαλασσίων κατασκευών

Πίνακας 1. (συνεχίζεται)

Κατηγορία	Περιγραφή του περιβάλλοντος	Ενδεικτικά παραδείγματα
5 Δράση παγετού με ή χωρίς αντιπαγωτικά μέσα		
Όταν σκυρόδεμα εκτίθεται σε σημαντική δράση παγετού παρουσία υγρασίας, η έκθεση να κατηγοριοποιείται ως ακολούθως:		
XF1	Μέτριος κορεσμός σε νερό, χωρίς αντιπαγωτικά μέσα	Κατακόρυφες επιφάνειες σκυροδέματος εκτεθειμένες σε βροχή και παγετό
XF2	Μέτριος κορεσμός σε νερό, με αντιπαγωτικά μέσα	Κατακόρυφες επιφάνειες σκυροδέματος σε έργα οδοποιίας εκτεθειμένες σε παγετό και σε αντιπαγωτικά άλατα μεταφερόμενα μέσω αέρα
XF3	Υψηλός κορεσμός σε νερό, χωρίς αντιπαγωτικά μέσα	Οριζόντιες επιφάνειες σκυροδέματος εκτεθειμένες σε βροχή και παγετό
XF4	Υψηλός κορεσμός σε νερό, με αντιπαγωτικά μέσα ή θαλασσίνο νερό	Οδοί και καταστρώματα γεφυρών εκτεθειμένα σε αντιπαγωτικά άλατα. Επιφάνειες σκυροδέματος εκτεθειμένες σε παγετό και άμεση διαβροχή που περιέχει αντιπαγωτικά άλατα. Ζώνη διαβροχής θαλασσίων κατασκευών που εκτίθεται σε παγετό
6 Χημική προσβολή		
Όταν σκυρόδεμα εκτίθεται σε χημική προσβολή από φυσικά εδάφη και υπόγεια νερά όπως δίνεται στον Πίνακα 2, η έκθεση να κατηγοριοποιείται ως ακολούθως: Σημείωση: Μια ειδική μελέτη χρειάζεται για να καθορίσει τις σχετικές συνθήκες έκθεσης όπου υπάρχουν όρια εκτός του Πίνακα 2, άλλα δραστικά χημικά, χημικά μολυσμένο έδαφος ή νερό, και υψηλή ταχύτητα νερού σε συνδυασμό με τα χημικά του Πίνακα 2.		
XA1	Ασθενώς δραστικό χημικά, περιβάλλον, σύμφωνα με τον Πίνακα 2	
XA2	Μέτρια δραστικό χημικά, περιβάλλον, σύμφωνα με τον Πίνακα 2	
XA3	Ισχυρά δραστικό χημικά, περιβάλλον, σύμφωνα με τον Πίνακα 2	

Πίνακας 2. Οριακές τιμές για κατηγορίες έκθεσης χημικής προσβολής από φυσικά εδάφη και υπόγεια νερά.

Χημικά χαρακτηριστικά	Μέθοδος δοκιμής αναφοράς	XA1	XA2	XA3
Υπόγεια νερά				
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	EN 196-2	200 – 600	600 – 3000	3000 – 6000
pH	ISO 4316	5.5 – 6.5	4.5 – 5.5	4.0 – 4.5
CO ₂ (mg/l)	prEN 13577	15 – 40	40 – 100	100 – κορεσμός
NH ₄ ⁺ (mg/l)	ISO 7150	15 – 30	30 – 60	60 – 100
Mg ²⁺ (mg/l)	ISO 7980	300 – 1000	1000 – 3000	3000 – κορεσμός
Έδαφος				
SO ₄ ²⁻ tot(mg/kg)	EN 196-2	2000 – 3000	3000 – 12000	12000 – 24000
Οξύτητα (ml/kg)	DIN 4030-2	> 200	Δεν παρουσιάζονται στην πράξη	

Η ανάπτυξη του EN 206 και τα σχετικά μέρη του *σχεδιαστικού κώδικα Eurocode 2*, όπως η επικάλυψη οπλισμού, παρέχουν για πρώτη φορά σοβαρές τεχνικές προδιαγραφές σχεδιασμού για ανθεκτικότητα κατασκευών από σκυρόδεμα. Η ανθεκτικότητα προδιαγράφεται είτε μέσω της παραδοσιακής πρακτικής των **οριακών τιμών στην σύνθεση σκυροδέματος** είτε μέσω **μεθόδων που σχετίζονται με την επιτελεστικότητα**. Οι απαιτήσεις πρέπει να λαμβάνουν υπόψη την επιθυμούμενη διάρκεια ζωής της κατασκευής.

2.1 Οριακές τιμές για σύνθεση σκυροδέματος

Λόγω έλλειψης Ευρωπαϊκών Προτύπων για απόλυτη μέτρηση της επιτελεστικότητας του σκυροδέματος, οι απαιτήσεις προδιαγραφών ώστε το σκυρόδεμα να αντιστέκεται των περιβαλλοντικών δράσεων δίνονται στο EN 206 υπό την *μορφή καθιερωμένων ιδιοτήτων σκυροδέματος και οριακών τιμών για σύνθεση σκυροδέματος* (επιτρεπόμενοι τύποι και κατηγορίες συστατικών υλικών, μέγιστος λόγος νερού/τσιμέντο, ελάχιστη περιεκτικότητα σε τσιμέντο, ελάχιστη κατηγορία αντοχής, και εάν σχετικό, ελάχιστη περιεκτικότητα σε αέρα).

Λόγω επίσης έλλειψης εμπειρίας, πως η ταξινόμηση των περιβαλλοντικών δράσεων ανακλάται στις τοπικές διαφορές στις ίδιες ονομαστικές κατηγορίες έκθεσης, συγκεκριμένες οριακές τιμές δίνονται μέσω διατάξεων (εθνικών προσαρτημάτων) που ισχύουν στην εκάστοτε θέση χρήσης του σκυροδέματος. Μια **σύσταση** για την επιλογή οριακών τιμών για σύνθεση σκυροδέματος δίνεται ως Παράρτημα F (πληροφοριακό) στο EN 206 και παρουσιάζεται στον Πίνακα 3. Αυτές οι τιμές βασίζονται στην υπόθεση μιας επιθυμούμενης λειτουργικής ζωής της κατασκευής 50 ετών, και αφορούν χρήση τσιμέντου τύπου CEM I σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 197 [7].

Οι διατάξεις που ισχύουν σε κάθε τοποθεσία χρήσης σκυροδέματος πρέπει να περιλαμβάνουν απαιτήσεις για **προσδοκώμενη διάρκεια ζωής τουλάχιστον 50 έτη** υπό κανονικό πρόγραμμα συντήρησης. Για λιγότερη ή περισσότερη διάρκεια ζωής, αντίστοιχα, χαλαρότερες ή αυστηρότερες απαιτήσεις είναι αναγκαίες. Σε αυτές τις περιπτώσεις ή για συγκεκριμένες συνθέσεις σκυροδέματος ή ειδικά μέτρα προστασίας, *πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ειδικές διαδικασίες από τον σχεδιαστή μηχανικό ή από εθνικές διατάξεις*.

Εάν το σκυρόδεμα βρίσκεται σε συμμόρφωση με τις οριακές τιμές, θεωρείται ότι ικανοποιεί τις απαιτήσεις ανθεκτικότητας για την συγκεκριμένη χρήση στο συγκεκριμένο περιβάλλον, αρκεί:

- ✓ το σκυρόδεμα να έχει χυτευθεί κανονικά, συμπυκνωθεί και συντηρηθεί σύμφωνα με το ENV 13670, ή άλλο σχετικό πρότυπο,
- ✓ το σκυρόδεμα να έχει την ελάχιστη επικάλυψη οπλισμού σύμφωνα με σχετικό σχεδιαστικό πρότυπο που απαιτείται στις συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες, π.χ., το ENV 1992,
- ✓ να έχει επιλεγεί η σωστή κατηγορία έκθεσης
- ✓ να εφαρμόζεται ένα κανονικό πρόγραμμα συντήρησης.

2.2 Μέθοδοι σχεδιασμού σχετιζόμενες με την επιτελεστικότητα

Οι απαιτήσεις που σχετίζονται με τις κατηγορίες έκθεσης είναι δυνατόν να ικανοποιηθούν χρησιμοποιώντας *μεθόδους προσδιορισμού της ανθεκτικότητας* που σχετίζονται με όρους επιτελεστικότητας, π.χ., βαθμονόμηση του σκυροδέματος σε κάποια δοκιμή υποβολής σε κύκλους πήξης/τήξης, κλπ. Οδηγίες εφαρμογής τέτοιων μεθόδων δίνονται στο Παράρτημα J (πληροφοριακό) του EN 206, και η εφαρμογή τους εξαρτάται από τις *ισχύουσες κατά τόπο διατάξεις*.

Πίνακας 3. Συνιστώμενες οριακές τιμές για την σύνθεση και τις ιδιότητες του σκυροδέματος (ενδεικτικές κατά EN 206).

	Κατηγορίες έκθεσης																	
	Χωρίς διάβρωση ή προσβολή	Διάβρωση που προκαλείται μέσω ενανθράκωσης				Διάβρωση που προκαλείται μέσω Cl ⁻ θαλάσσιου νερού			Διάβρωση που προκαλείται μέσω Cl ⁻ εκτός θαλάσσιου νερού			Δράση παγετού				Χημικώς δραστικό περιβάλλον		
		X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2
Μέγιστος λόγος νερού/τσιμέντο	---	0.65	0.60	0.55	0.50	0.50	0.45	0.45	0.55	0.55	0.45	0.55	0.55	0.50	0.45	0.55	0.50	0.45
Ελάχιστη κατηγορία αντοχής	C 12/15	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 30/37	C 30/37	C 35/45	C 35/45	C 30/37	C 30/37	C 35/45	C 30/37	C 25/30	C 30/37	C 30/37	C 30/37	C 30/37	C 35/45
Ελάχιστη περιεκτ. σε τσιμέντο (kg/m ³)	---	260	280	280	300	300	320	340	300	300	320	300	300	320	340	300	320	360
Ελάχιστη περιεκτ. σε αέρα (%)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	4.0	4.0	4.0	---	---	---
Άλλες απαιτήσεις												Αδρανή σε συμμόρφωση με το prEN 12620 με επαρκή αντίσταση σε κύκλο πήξης/τήξης					Τσιμέντο ανθεκτικό στα θειικά	

Μια μέθοδος που σχετίζεται με επιτελεσματικότητα εμπεριέχει με ποσοτικό τρόπο κάθε μηχανισμό φθοράς, την λειτουργική διάρκεια ζωής του στοιχείου ή της κατασκευής, και τα κριτήρια που καθορίζουν το τέλος αυτής της ζωής. *Τέτοια μέθοδος μπορεί να βασίζεται σε:*

- *ικανοποιητική εμπειρία, με τοπικές πρακτικές σε τοπικά περιβάλλοντα,*
- *σε δεδομένα μίας καθιερωμένης μεθόδου δοκιμής, ή*
- *σε χρήση αξιόπιστων προσομοιωμάτων πρόβλεψης.*

Ο προσανατολισμός της παρούσας εργασίας είναι προς της κατεύθυνση της ανάπτυξης μεθόδων σχετιζόμενων με επιτελεσματικότητα μέσω **αναλυτικών προβλεπτικών προσομοιωμάτων**, που βεβαίως να έχουν συμμορφωθεί με πειραματικά αποτελέσματα σε αντιπροσωπευτικές συνθήκες στην πράξη.

Κρίνουμε ότι **μια τέτοια προσέγγιση επιβάλλεται**, πέραν ενός επανελέγχου της μεθόδου των οριακών τιμών, κυρίως στα παρακάτω πεδία όπου υπάρχει κενό, όπως όταν:

- απαιτείται μια διάρκεια ζωής σημαντικά διαφορετική των 50 ετών,
- το περιβάλλον είναι αόριστο ή ιδιαίτερα επιθετικό,
- χρησιμοποιούνται νέα ή διαφορετικά συστατικά υλικά σκυροδέματος,
- χρησιμοποιείται μια αναβαθμισμένη μέθοδος προστασίας
- πρόκειται να αναγερθούν ειδικές κατασκευές ή σημαντικός αριθμός πολλών παρόμοιων κατασκευών,
- η μέθοδος των οριακών τιμών έχει αποτύχει στην πράξη,
- επιχειρείται τεχνοοικονομική αριστοποίηση.

3. ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Παραδοσιακά, ο υπολογισμός της διάρκειας ζωής των κατασκευών από σκυροδέμα γίνεται με βάση την κρίση του σχεδιαστή, ο οποίος λαμβάνει υπόψη του την εμπειρία πορείας παρομοίων κατασκευών σε παρόμοια περιβάλλοντα. Με το πέρασμα των ετών, αυτή η εμπειρία έχει επιτρέψει στους μηχανικούς να αναπτύξουν γενικές οδηγίες που διαμορφώθηκαν σε κώδικες και κανονισμούς για σχεδιασμό ανθεκτικών κατασκευών, όπως τώρα γίνεται με το EN 206. Τελευταία, αναπτύσσονται υπολογιστικά, επιστημονικά, μοντέλα που προβλέπουν την χρήσιμη ζωή μιας κατασκευής, και που μπορούν να χρησιμοποιηθούν με μεγαλύτερη εμπιστοσύνη από τις προηγούμενες γενικές οδηγίες. Τέτοια μοντέλα επιπλέον μπορεί να οδηγήσουν σε αριστοποίηση της σύνθεσης σκυροδέματος και των μέτρων προστασίας ανάλογα με το περιβάλλον που θα εκτεθεί η κατασκευή. Επί του παρόντος βέβαια, η χρήση αυτών των μοντέλων περιορίζεται από το γεγονός ότι δεν υπάρχουν *ακριβείς κανονιστικές διατάξεις* που να επιτρέπουν ευρεία χρήση των. Τα μοντέλα υπολογισμού της διάρκειας ζωής των κατασκευών διακρίνονται σε τρεις κύριες κατηγορίες:

α. Εμπειρικά μοντέλα. Οι προβλέψεις βασίζονται σε προηγούμενες παρατηρήσεις σχέσεων μεταξύ διάρκειας ζωής, σύνθεσης σκυροδέματος και συνθηκών έκθεσης, χωρίς να περιέχεται μια βαθιά κατανόηση των επιστημονικών λόγων αυτών των σχέσεων.

β. Μηχανιστικά (ή φυσικοχημικά) μοντέλα. Οι προβλέψεις βασίζονται σε θεωρητικά μαθηματικά μοντέλα που περιγράφουν με σχετική ακρίβεια τα φαινόμενα που περιλαμβάνει ο συγκεκριμένος μηχανισμός φθοράς.

γ. Ημι-εμπειρικά μοντέλα. Συνδυάζουν χαρακτηριστικά και των δύο ανωτέρω τύπων. Ουσιαστικά τείνουν να απλοποιήσουν πολύπλοκα μαθηματικά μοντέλα, χρησιμοποιώντας απλούστερες εκφράσεις που περιέχουν παραμέτρους που προσδιορίζονται από πειράματα πεδίου ή εργαστηρίου.

Τα ανωτέρω μοντέλα επιπλέον μπορεί να είναι και στοχαστικά, δίνοντας την διάρκεια ζωής με την μορφή μιας συνάρτησης κατανομής πιθανοτήτων. Ένα οποιοδήποτε μοντέλο από τις παραπάνω κατηγορίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην πράξη, αρκεί να ορίζονται με ακρίβεια τα όρια εφαρμογής του και να υπάρχει η σχετική πειραματική επιβεβαίωση.

Στο Σχ. 2 συνοψίζονται οι διάφορες πιθανές αιτίες φθοράς σκυροδέματος και δίνεται μια προσεγγιστική ένδειξη του αναμενόμενου χρόνου κατά τον οποίον θα εμφανισθούν ρηγματώσεις/φθορές στο σκυρόδεμα.

ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ	αρχ. συστολή						
	αρχ. καθίζηση						
		άμεση φόρτιση επιβαλλόμενες παραμορφώσεις					
ΦΥΣΙΚΟΙ		θερμοκρασιακές διαφορές					
			συστολή ξήρανσης				
		δράση παγετού					
ΧΗΜΙΚΟΙ					δράση οξέων θεικών, αλκαλίων		
					διάβρωση οπλισμού		
ΒΙΟΧΗΜΙΚΟΙ					ανάπτυξη μικροοργαν.		
					δράση H ₂ S		
		ΩΡΑ	ΗΜΕΡΑ	ΕΒΔΟΜΑΔΑ	ΜΗΝΑΣ	ΕΤΟΣ	ΑΙΩΝΑΣ

Σχήμα 2. Μηχανισμοί φθοράς και πιθανός χρόνος εμφάνισης ρωγμών στο σκυρόδεμα.

Όπως παρατηρείται στο Σχ. 2, όλοι οι φυσικοί και μηχανικοί μηχανισμοί φθοράς σκυροδέματος, εκτός άμεσης φόρτισης και επιβαλλόμενων παραμορφώσεων, είναι δυνατόν να συμβούν κατά το πρώτο έτος της ζωής του σκυροδέματος. Οι χημικοί και βιοχημικοί μηχανισμοί στην πραγματικότητα ξεκινούν πολύ ενωρίς, δείχνουν όμως τα επιζήμια αποτελέσματά τους μετά το πρώτο έτος.

Στην πλειονότητα των κατασκευών σκυροδέματος χρησιμοποιείται οπλισμός. Στο οπλισμένο σκυρόδεμα, οι πιο σοβαροί μηχανισμοί φθοράς είναι αυτοί που οδηγούν σε διάβρωση του οπλισμού, ήτοι η ενανθράκωση και η διείδυση χλωριόντων [1-5]. Σχεδόν όλοι οι άλλοι μηχανισμοί φθοράς μπορούν να ελεγχθούν κατά τον αρχικό σχεδιασμό σκυροδέματος και την χύτευση [1], για παράδειγμα:

- έναντι δράσης παγετού: χρήση αερακτικών υλικών,
- αλκαλοπυριτική αντίδραση: αρχικός έλεγχος της δραστηριότητας αδρανών,
- δράση θεικών: χρήση τσιμέντου ανθεκτικού στα θειικά, κλπ.

Συνεπώς, κρίνεται ότι 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]. Τώρα, το βασικό **λογικό διάγραμμα** μιας γενικευμένης μεθόδου προσδιορισμού ανθεκτικότητας πρέπει να περιλαμβάνει:

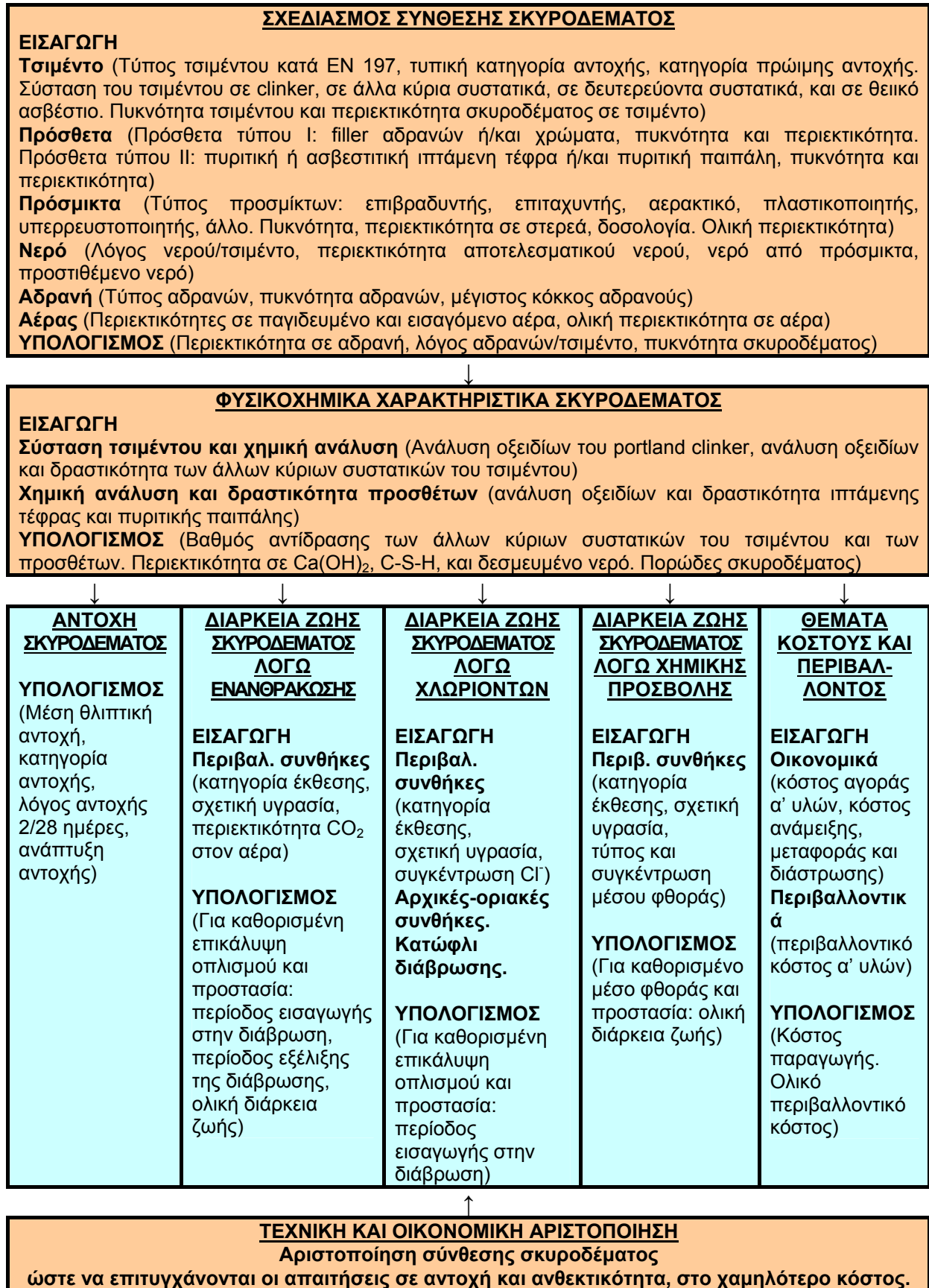
- Αρχική προσέγγιση της μελέτης σύνθεσης σκυροδέματος που να ικανοποιεί τις δομικές απαιτήσεις, π.χ., κατηγορία αντοχής.
- Καθορισμός των περιβαλλοντικών συνθηκών στις οποίες θα εκτεθεί η κατασκευή.
- Χρήση δοκιμασμένων θεωρητικών μαθηματικών μοντέλων που να προσομοιώνουν αξιόπιστα τους μηχανισμούς φθοράς και τον ρυθμό τους.
- Υπολογισμός διάρκειας ζωής της κατασκευής και βελτίωση αρχικής σύνθεσης, εάν απαιτείται.
- Τεχνοοικονομική αριστοποίηση.

Τα τελευταία 50 χρόνια έχει δαπανηθεί μια τεράστια ποσότητα ενέργειας σε *εργαστηριακές και πειραματικές μελέτες* σε θέματα ανθεκτικότητας σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας είναι ακόμα είτε διασκορπισμένα σε επιστημονικά περιοδικά και πρακτικά συνεδρίων είτε αναφέρονται συνοπτικά σε εξειδικευμένα βιβλία [π.χ., 1-5]. Επιπρόσθετα, θεωρητικές προσεγγίσεις των μηχανισμών φθοράς, με ισχυρά προβλεπτικό χαρακτήρα, είναι περιορισμένες σε κάποια πολύπλοκα και δύσχρηστα στην πράξη μαθηματικά μοντέλα.

Ένα σημαντικό βήμα προόδου σε αυτό το θέμα είναι η ανάπτυξη κατάλληλου λογισμικού για υπολογισμούς με την βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή, που να περιλαμβάνει τα πλέον αξιόπιστα και αποδεδειγμένα μοντέλα, ενισχυμένο με μια καλή βάση πειραματικών δεδομένων. Σε αυτά τα πλαίσια, **έχει ήδη αναπτυχθεί ένα τέτοιο λογισμικό [EUCON[®], 8], κάνοντας χρήση αξιόπιστων προσομοιωμάτων πρόβλεψης [9-13]**. Στο Σχ. 3, παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα που ακολουθήθηκε κατά την ανάπτυξη του προγράμματος EUCON[®]. Το λογισμικό, αυτό αναπτυγμένο σε φιλική προς τον χρήστη μορφή, καταρχήν ξεκινά με την κατάσταση της **μελέτης σύνθεσης**, δηλαδή τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των συστατικών του σκυροδέματος, ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη από το έργο **κατηγορία αντοχής** σκυροδέματος. Κατόπιν υπολογίζονται τα φυσικοχημικά εκείνα 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**. Τέλος, δίνονται **στοιχεία κόστους**, αλλά και περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ώστε να είναι δυνατή μια τεχνοοικονομική βελτιστοποίηση.

Οι κύριοι μηχανισμοί φθοράς που εξετάζονται είναι η διάβρωση του σιμента προκαλούμενη είτε από ενανθράκωση είτε από διείσδυση χλωριόντων (θαλάσσιου νερού ή άλλων πηγών), και η χημική προσβολή (οξέων, θεικών και αλκαλίων). Έχουν χρησιμοποιηθεί βασικές *θεμελειώδεις αρχές Χημικής Μηχανικής και Μηχανικής Υλικών* ώστε να προσομοιωθούν οι φυσικοχημικές διεργασίες μέσω μαθηματικών μοντέλων για σχεδιασμό και πρόβλεψη. Η δομή του βρίσκεται σε πλήρη συμφωνία με τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα για το σιμента, EN 197 (27 διαφορετικοί τύποι σιμέντου), και για το σκυροδέμα, EN 206 (επιπλέον χρήση προσθέτων όπως ιπτάμενη τέφρα και πυριτική παιπάλη, χρήση βελτιωτικών ή χημικών προσμίκτων, κλπ.). Επίσης δίνεται η δυνατότητα εξέτασης κλασσικών ή μη τρόπων προστασίας και επιμήκυνσης του χρόνου ζωής, π.χ., επιχρίσματα, υλικά μείωσης διαπερατότητας, επικάλυψης, κλπ.

Αμέσως παρακάτω δίνονται τυπικά αποτελέσματα που αφορούν τον Ελληνικό χώρο σε ζώνες ενδοχώρας και παραθαλάσσιες περιοχές, και για τις τιμές που προτείνει το EN 206. Στο τέλος παρατίθενται τυπικές πειραματικές επιβεβαιώσεις του μοντέλου από μετρήσεις πεδίου. Για επιπλέον περιπτώσεις κατηγοριών έκθεσης και άλλων μηχανισμών φθοράς, βλ. [8,14].



Σχήμα 3. Λογικό διάγραμμα προγράμματος EUCON®.

3.1 Διάβρωση οπλισμού προκαλούμενη μέσω ενανθράκωσης

Οι κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα απαιτούν επισκευή σοβαρού βαθμού, όταν η διάβρωση του οπλισμού έχει **προκαλέσει γενικευμένη ρηγμάτωση** του σκυροδέματος που τον επικαλύπτει, ενώ παράλληλα η **απομένουσα διατομή χάλυβα είναι ανεπαρκής** για την ασφάλεια της κατασκευής. Αυτή η χρονική στιγμή μπορεί να ληφθεί ως το **τέλος της χρήσιμης ζωής της κατασκευής**. Ο χρόνος αυτός είναι το άθροισμα δύο επιμέρους χρονικών περιόδων. Το πρώτο τμήμα είναι ο χρόνος που απαιτείται ώστε το βάθος ενανθράκωσης να φθάσει στο **πάχος επικάλυψης του οπλισμού, c** , με συνέπεια την αποπαθητικοποίηση του χάλυβα (**περίοδος εισαγωγής ή επώασης της διάβρωσης, t_{cr}**). Το δεύτερο τμήμα που ακολουθεί είναι ο χρόνος που απαιτείται ώστε η στοιβάδα σκουριάς να σχηματισθεί γύρω από την ράβδο οπλισμού σε τέτοιο πάχος που να προκαλέσει επιμήκεις ρωγμές και αποτίναξη του σκυροδέματος που επικαλύπτει τον οπλισμό (**περίοδος εξέλιξης της διάβρωσης, t_{pr}**).

Σύμφωνα με πολλούς ερευνητές [3,4,9], όταν η σχετική υγρασία περιβάλλοντος είναι μεγάλη (>75%), εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα έστω και μικρή διαπερατότητα σε οξυγόνο, ο ρυθμός διάβρωσης σε ένα ενανθρακωμένο σκυρόδεμα είναι εξαιρετικά μεγάλος ώστε η άφιξη του βάθους ενανθράκωσης στην περιοχή του οπλισμού ακολουθείται σύντομα από ρηγμάτωση και αποτίναξη του σκυροδέματος επικάλυψης. Συνεπώς, σε αυτές τις περιπτώσεις, ο χρόνος t_{cr} που απαιτείται ώστε το βάθος ενανθράκωσης να φθάσει στο πάχος επικάλυψης c μπορεί να θεωρηθεί ως το ελάχιστο κατώτατο όριο χρήσιμης ζωής της κατασκευής. Για χαμηλότερες υγρασίες περιβάλλοντος, η δεύτερη περίοδος γίνεται αρκετά εκτεταμένη, παρόλο που η ενανθράκωση προχωρά με ταχύτερους ρυθμούς [9].

Τα ανωτέρω έχουν ληφθεί υπόψιν, με ικανοποιητικό τρόπο, κατά τον καθορισμό των κατηγοριών έκθεσης στο **πρότυπο EN 206**. Παρά ταύτα, η περιγραφική παράθεση των κατηγοριών έκθεσης δεν βοηθά ιδιαίτερα τον σχεδιαστή μηχανικό ώστε να επιλέξει την κατάλληλη κατηγορία ανά εφαρμογή και τοποθεσία. Για να ξεπεραστεί αυτή η αοριστία, προτείνουμε **μια συσχέτιση των κατηγοριών έκθεσης με μετρήσιμα χαρακτηριστικά**, όπως είναι η **μέση ετήσια σχετική υγρασία περιβάλλοντος (RH, %)**.

Για να εξετάσουμε τις συνιστώμενες οριακές τιμές του EN 206 (Πίνακας 3) ή να προτείνουμε διαφορετικές για επιθυμητή διάρκεια ζωής της κατασκευής που εκτίθεται σε τέτοιο περιβάλλον, έχουμε χρησιμοποιήσει το ανωτέρω **λογισμικό** [8], και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4. Εξετάζουμε δύο συνήθεις τύπους τσιμέντου που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα, CEM I 42.5N και CEM II/B-M 32.5 N, για παρασκευή σκυροδέματος με συνήθη θραυστά αδρανή μέγιστου κόκκου 31.5mm. Το σκυρόδεμα θεωρούμε ότι είναι **ανεπίχριστο** και ότι εκτίθεται σε **αστικό περιβάλλον** (CO₂: 0.08% - μια παράμετρος που θα έπρεπε να είχε ληφθεί υπόψιν στον EN 206).

Στην περίπτωση της **κατηγορίας έκθεσης XC1 και ξηρό περιβάλλον** (προτείνουμε 45%≤RH<65%, με προτεινόμενη μέση τιμή: 55%), η ενανθράκωση βρίσκεται στο μέγιστο ρυθμό της [1,4,9], όμως ο ρυθμός διάβρωσης οπλισμού ενανθρακωμένου σκυροδέματος είναι ιδιαίτερα χαμηλός λόγω της ανεπαρκούς υγρασίας. Έτσι παρόλο που ο χρόνος t_{cr} είναι εξαιρετικά μικρός για τις παραμέτρους σχεδιασμού του Πίνακα 4, ο χρόνος που απαιτείται για την εξέλιξη της διάβρωσης, t_{pr} , σε σημείο που να προκαλέσει ρηγματώσεις είναι πολύ μεγάλος. Αξίζει να τονισθεί ότι κατά Parrot [15], το κρίσιμο βάθος διάβρωσης οπλισμού που προκαλεί ορατή φθορά είναι 100 μm, και επειδή σε αυτή την περιοχή υγρασιών ο ρυθμός διάβρωσης είναι περίπου 0.3 μm/yr [4,15], ο χρόνος t_{pr} είναι >100 χρόνια. Συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί ότι οι παράμετροι σχεδιασμού που δίνονται στον Πίνακα 4 εξασφαλίζουν διάρκεια ζωής μεγαλύτερη από 100 χρόνια, για όλα τα εξεταζόμενα πάχη επικάλυψης οπλισμού και τύπους τσιμέντου. Τυπικό παράδειγμα αυτής της περίπτωσης είναι στοιχεία σκυροδέματος εσωτερικών χώρων όπου η RH παραμένει χαμηλή για όλη την διάρκεια ζωής των. Στην περίπτωση της **κατηγορίας έκθεσης X0** (πολύ ξηρό περιβάλλον, RH<45%), λόγω ανεπαρκούς

υγρασίας για τις αντιδράσεις, ο ρυθμός ενανθράκωσης είναι χαμηλός και ο ρυθμός διάβρωσης είναι μηδενικός – συνεπώς δεν υπάρχει καμία περίπτωση διάβρωσης.

Πίνακας 4. Εκτιμώμενη συνολική διάρκεια ζωής κατασκευής από σκυρόδεμα για διάφορους τύπους τσιμέντου και διάφορες κατηγορίες έκθεσης σε περίπτωση διάβρωσης οπλισμού που προκαλείται μέσω μηχανισμού ενανθράκωσης [8].

Χαρακτηριστικά σύνθεσης/ σχεδιασμού	XC1 (ξηρό)	XC1 (μ.υγρό)	XC2	XC3	XC4	
Τύπος τσιμέντου CEM I 42.5N						
Μέγιστος λόγος W/C	0.65	0.65	0.60	0.55	0.50	0.50
Ελάχιστη περιεκτικότη. C (kg/m ³)	260	260	280	280	300	300
Ελάχιστη κατηγορία αντοχής	C20/25	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37
t _{cr} (χρόνια) για c = 15 mm	5	>100	>100	22	34	84
t _{cr} (χρόνια) για c = 20 mm	8	>100	>100	38	61	>100
t _{cr} (χρόνια) για c = 25 mm	12	>100	>100	60	95	>100
Τύπος τσιμέντου CEM II/B-M(W-P-LL) 32.5N						
Μέγιστος λόγος W/C	0.65	0.65	0.60	0.55	0.50	0.50
Ελάχιστη περιεκτικότη. C (kg/m ³)	260	260	280	280	300	300
Ελάχιστη κατηγορία αντοχής	C20/25	C20/25	C20/25	C25/30	C25/30	C25/30
t _{cr} (χρόνια) για c = 15 mm	2	>100	77	9	13	32
t _{cr} (χρόνια) για c = 20 mm	4	>100	>100	16	23	57
t _{cr} (χρόνια) για c = 25 mm	6	>100	>100	25	36	89

W/C: λόγος νερού/τσιμέντο κατά βάρος, C: περιεκτικότητα σκυροδέματος σε τσιμέντο (kg/m³), c: πάχος επικάλυψης οπλισμού (mm), t_{cr}: διάρκεια της περιόδου εισαγωγής στην διάβρωση μέσω ενανθράκωσης.

Για την ίδια τώρα **κατηγορία έκθεσης XC1 αλλά μονίμως υγρό περιβάλλον** (προτείνουμε RH≥98%, με προτεινόμενη μέση τιμή: 98%), η ενανθράκωση σχεδόν παρεμποδίζεται πλήρως λόγω των γεμάτων πόρων με νερό που μειώνουν δραστικά την διάχυση CO₂, και επίσης η διεργασία της διάβρωσης είναι εξαιρετικά αργή λόγω δραστικής μείωσης της διάχυσης O₂. Οι προβλέψεις των μοντέλων [8], για τις παραμέτρους σχεδιασμού του Πίνακα 4, δίνουν t_{cr}>100 χρόνια. Τυπικό παράδειγμα αυτής της περίπτωσης είναι στοιχεία σκυροδέματος βυθισμένα συνεχώς σε νερό.

Στην περίπτωση της **κατηγορίας έκθεσης XC2** (υγρό - σπάνια ξηρό περιβάλλον, προτείνουμε 90%≤RH<98%, με προτεινόμενη μέση τιμή: 90%), τόσο ο ρυθμός ενανθράκωσης όσο και διάβρωσης είναι μεγαλύτεροι από τους αντίστοιχους της κατηγορίας XC1 (μόνιμα υγρό περιβάλλον), ιδιαίτερα ο ρυθμός διάβρωσης που χαρακτηρίζεται ως μέγιστος [4,15]. Όμως όπως δείχνουν τα αποτελέσματα τρεξιμάτων των μοντέλων [8] για τις παραμέτρους σχεδιασμού του Πίνακα 4, η περίοδος εισαγωγής στην διάβρωση (και συνεπώς η ολική διάρκεια ζωής) είναι σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις >100 χρόνια. Ως μικρή παρατήρηση, στην περίπτωση τύπου τσιμέντου CEM II/B-M για 100 χρόνια διάρκεια ζωής πρέπει να επιλεγεί ένα πάχος επικάλυψης μεγαλύτερο από 20 mm. Τυπικά παραδείγματα αυτής της περίπτωσης είναι δεξαμενές σκυροδέματος και υδατικοί πύργοι, πλήρως γεμάτοι σχεδόν συνεχώς, καθώς και πολλές θεμελιώσεις κάτω από την επιφάνεια της γης.

Στην περίπτωση της **κατηγορίας έκθεσης XC3** (μέτρια υγρασία περιβάλλοντος, προτείνουμε 65%≤RH<85%, με προτεινόμενη μέση τιμή: 70%), ο ρυθμός ενανθράκωσης είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο της κατηγορίας XC2 και μικρότερος από αυτόν της XC1 (ξηρό περιβάλλον). Πράγματι όπως φαίνεται στον Πίνακα 4, μετά από τρέξιμο των μοντέλων [8] για τις συγκεκριμένες παραμέτρους σχεδιασμού (προτάσεις EN 206), η περίοδος εισαγωγής στην διάβρωση, t_{cr}, για επικάλυψη οπλισμού c=25mm, και τύπο τσιμέντου CEM I είναι 60 χρόνια, ενώ για τύπο τσιμέντου CEM II/B-M είναι

σημαντικά μικρότερη, 25 χρόνια. *Ενδιάμεση είναι η κατάσταση για τον τύπο CEM II/A-M 42.5N (40 χρόνια) και χειρότερα για τσιμέντο τύπου CEM IV/B 32.5 N (15 χρόνια) [8].* Αξίζει να σημειωθεί ότι για τέτοιο περιβάλλον σχετικά υψηλής υγρασίας ο ρυθμός διάβρωσης είναι αρκετά ταχύς, περίπου 5-20 μμ/γρ [4,15], γεγονός που δίνει διάρκεια της περιόδου εξέλιξης της διάβρωσης της τάξης των 5-20 χρόνων (λόγω κρίσιμου βάθους διάβρωσης οπλισμού που προκαλεί ορατή φθορά: 100 μμ). Άλλοι ερευνητές [16] έχουν μετρήσει ακόμα συντομότερο στάδιο της τάξης των 2 ετών! Συνεπώς στην τελευταία περίπτωση του CEM II/B-M, η ολική διάρκεια ζωής παραμένει κάτω των 50 χρόνων. Αξίζει όμως να σημειωθεί ότι σε **περίπτωση εφαρμογής τυπικού επιχρίσματος**, πάχους 20mm και πλούσιου σε άσβεστο, υπάρχει μια επιμήκυνση της περιόδου εισαγωγής κατά 30 χρόνια [11] οπότε και καλύπτεται επαρκώς το όριο της συνολικής ζωής των 50 χρόνων, όχι όμως των 100 χρόνων.

Επειδή οι συνθήκες κατηγορίας έκθεσης XC3 είναι *αρκετά συνηθισμένες* (κατηγορία 2 συνθηκών περιβάλλοντος ΕΚΩΣ 2000- σκυρόδεμα εξωτερικών χώρων προφυλαγμένο από την βροχή, σκυρόδεμα εσωτερικών χώρων με μέτρια ή υψηλή υγρασία αέρα), και επειδή δομικά στοιχεία που έστω και ένα τμήμα τους βρίσκεται σε αυτές τις συνθήκες πρέπει να *σχεδιάζονται ολόκληρα για την δυσμενέστερη κατηγορία*, πρέπει να δοθεί *ιδιαίτερη σημασία σε αυτήν την κατηγορία έκθεσης. Προτείνουμε λοιπόν μείωση του μέγιστου λόγου νερού/τσιμέντο στο 0.50 και αύξηση της ελάχιστης περιεκτικότητας σε τσιμέντο στο 300 kg/m³*. Για τις τιμές αυτές και πάχος επικάλυψης 25 mm ο τύπος τσιμέντου CEM I δίνει διάρκεια του σταδίου εισαγωγής 95 χρόνια και ο τύπος CEM II/B-M 36 χρόνια. Για πάχος επικάλυψης 30 mm ο τελευταίος τύπος βελτιώνει τον συγκεκριμένο χρόνο στα 53 χρόνια [8]. Σε παρόμοια συμπεράσματα κατάληξαν και οι *Hobbs et al. [17]* προτείνοντας για την κατηγορία αυτή μείωση του μέγιστου λόγου νερού/τσιμέντο στο 0.50 και περαιτέρω αύξηση της αντοχής σκυροδέματος, ώστε να επιτευχθεί ο στόχος των 100 ετών που θέτει το Βρετανικό Πρότυπο BS 8500. Αξίζει τέλος να σημειωθεί ότι το **BS 8500 επιτρέπει μια συνδιαλλαγή μεταξύ σύνθεσης σκυροδέματος και πάχους επικάλυψης αρκεί να επιτυγχάνεται η επιθυμητή διάρκεια ζωής.**

Για την τελευταία περίπτωση της **κατηγορίας έκθεσης XC4** (κυκλική εναλλαγή υγρού –ξηρού περιβάλλοντος, προτείνουμε $75\% \leq RH < 90\%$, με προτεινόμενη μέση τιμή: 80%), ο ρυθμός ενανθράκωσης είναι σε μέτρια επίπεδα, επειδή το σκυρόδεμα λαμβάνει από το περιβάλλον υγρασία πολύ ταχύτερα από όταν την χάνει και έτσι η εσωτερική του υγρασία είναι σε σχετικά υψηλότερα επίπεδα- προκαλώντας μείωση της διάχυσης του CO₂. Αυτή η υψηλότερη υγρασία επιταχύνει σημαντικά τον ρυθμό διάβρωσης μειώνοντας της περίοδο εξέλιξης στην τάξη περίπου των 2 χρόνων [4,15,16]. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4, για τις παραμέτρους που προτείνει ο EN 206, στην περίπτωση του CEM I δεν υπάρχει κανένα πρόβλημα προβλέποντας διάρκεια ζωής μεγαλύτερη από 100 χρόνια. Στην περίπτωση όμως του CEM II/B-M θα πρέπει το πάχος επικάλυψης να είναι αυστηρά τουλάχιστον της τάξης των 25 mm, όπως άλλωστε προβλέπει ο ΕΚΩΣ 2000. Αξίζει τέλος να σημειωθεί ότι εάν υιοθετηθούν οι προτεινόμενες βελτιώσεις για την κατηγορία έκθεσης XC3, οι δύο κατηγορίες (XC3 και XC4) πλέον ταυτίζονται, όπως άλλωστε και έχει προταθεί από τους Hobbs et al. [17].

3.2 Διάβρωση οπλισμού προκαλούμενη από χλωριόντα θαλάσσιου νερού

Παρόμοια στην περίπτωση αυτή διακρίνονται τα ίδια δύο στάδια όπως προηγουμένως, η περίοδος που απαιτείται ώστε να διεισδύσουν τα χλωριόντα (Cl⁻) στο σκυρόδεμα και η συγκέντρωσή τους να υπερβεί στην περιοχή του οπλισμού μια κρίσιμη τιμή για διάβρωση (**περίοδος εισαγωγής ή επώασης της διάβρωσης, t_{cr}**), και η ακόλουθη δεύτερη περίοδος κύριας διάβρωσης έως ρηγματώση και αποτίναξη του σκυροδέματος που επικαλύπτει τον οπλισμό (**περίοδος εξέλιξης της διάβρωσης, t_{pr}**). Εδώ παρόμοια, η υγρασία του περιβάλλοντος και η διακύμανσή της έχει καθοριστική σημασία, επειδή σε τελείως κορεσμένο σκυρόδεμα είναι μεν ταχεία η διείσδυση Cl⁻ (που γίνεται στο νερό των πόρων) είναι όμως αργή η διάχυση του απαραίτητου για την διεργασία της διάβρωσης οξυγόνου. Αντίθετα σε μερικώς κορεσμένους πόρους επιβραδύνεται η διείσδυση Cl⁻ ενώ επιταχύνεται η διάχυση O₂. Τα ανωτέρω έχουν πάλι ληφθεί υπόψιν, ικανοποιητικά, κατά τον καθορισμό των κατηγοριών

έκθεσης στο **πρότυπο EN 206**. Εδώ όμως δεν απαιτείται συσχέτιση των κατηγοριών έκθεσης με μετρήσιμα χαρακτηριστικά επειδή η περιγραφή του περιβάλλοντος είναι πιο σαφής, παρά τις αναπόφευκτες γενικότητες.

Για να εξετάσουμε τις συνιστώμενες οριακές τιμές του EN 206 (Πίνακας 3) ή να προτείνουμε διαφορετικές για επιθυμητή, μεγαλύτερη ίσως, διάρκεια ζωής της κατασκευής που εκτίθεται σε τέτοιο περιβάλλον, έχουμε χρησιμοποιήσει το **λογισμικό** [8] και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5. Εξετάζουμε πάλι δύο συνήθεις τύπους τσιμέντου που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα, CEM I 42.5N και CEM II/B-M 32.5 N, για παρασκευή σκυροδέματος με συνήθη θραυστά αδρανή μέγιστου κόκκου 31.5mm (λόγω των χαμηλών W/C έχει υποθεθεί μια μέση περιεκτικότητα σε αέρα 3%). Το σκυροδέμα θεωρούμε ότι είναι **ανεπίχριστο, δεν έχει ληφθεί κανένα μέτρο προστασίας (επικαλύψεις σκυροδέματος ή οπλισμού, αναστολές διάβρωσης, καθοδική προστασία, κλπ.)** και ότι εκτίθεται σε **περιβάλλον Μεσογείου** (συγκέντρωση Cl⁻ στο θαλασσινό νερό [Cl⁻(aq)]: 20 kg/m³ - μια παράμετρος που επίσης θα έπρεπε να είχε ληφθεί υπόψιν στον EN 206, επειδή, π.χ., στην Βαλτική Θάλασσα η συγκέντρωση Cl⁻ είναι 4 kg/m³, στην Βόρεια Θάλασσα 16 kg/m³, κλπ.).

Ένας καθιερωμένος τρόπος έκφρασης της κρίσιμης συγκέντρωσης Cl⁻ για διάβρωση (κατώφλι διάβρωσης) είναι ως ολικά χλωριόντα % κατά βάρος του τσιμέντου, παρόλο που τα ελεύθερα χλωριόντα είναι αυτά στα οποία οφείλεται η διάβρωση. Είναι γενικά παραδεκτό [1,3,4,9], ότι το χαμηλότερο επίπεδο, που σηματοδοτεί αποπληθιστική οπλίσωση του οπλισμού και έναρξη της διεργασίας της κυρίας διάβρωσης, είναι το 0.4% ολικά χλωριόντα κατά βάρος τσιμέντου (ελάχιστο κατώφλι διάβρωσης). Έχει όμως εκτενώς αποδειχθεί [9,18] ότι αυτό είναι αρκετά μεγαλύτερο προσεγγίζοντας την τιμή 0.8% ολικά χλωριόντα κατά βάρος τσιμέντου (μέγιστο κατώφλι διάβρωσης). Στην παρούσα εργασία προτείνουμε και χρησιμοποιούμε μια μέση τιμή της τάξης των **0.6% ολικά χλωριόντα κατά βάρος τσιμέντου (μέσο κατώφλι διάβρωσης)**.

Στην περίπτωση της **κατηγορίας έκθεσης XS1** (παραθαλάσσιες κατασκευές που εκτίθενται σε άλατα μεταφερόμενα μέσω αέρα αλλά όχι σε άμεση επαφή με θαλάσσιο νερό), τόσο ο ρυθμός διείσδυσης χλωριόντων όσο και ο ρυθμός διάβρωσης οπλισμού (όταν έχει ξεπερασθεί το κατώφλι διάβρωσης) είναι χαμηλοί λόγω της ανεπαρκούς υγρασίας. Δεχόμενοι όμως παραθαλάσσιο υγρό περιβάλλον η σχετική υγρασία είναι υψηλή (μέση τιμή 80%) με αποτέλεσμα ταχύτερους ρυθμούς των διεργασιών φθοράς. Τρέχοντας το μοντέλο διείσδυσης χλωριόντων [8] για την περίπτωση αυτή παίρνουμε τα αποτελέσματα που δίνονται στον Πίνακα 5, για τις προτεινόμενες παραμέτρους σχεδιασμού του EN 206. Παρατηρούμε μια ικανοποιητική μακρά περίοδος εισαγωγής στην διάβρωση, στην οποία εάν προστεθεί η περίοδος κύριας διάβρωσης γίνεται ακόμα εκτενέστερη **ξεπερνώντας το όριο των 100 χρόνων συνολικής διάρκειας ζωής**. Αυτό που παρατηρείται επίσης είναι μια **σημαντικά καλύτερη εικόνα στην περίπτωση χρήσης τσιμέντου τύπου CEM II/B-M** (αντίθετα από ότι συμβαίνει στην διεργασία της ενανθράκωσης), γεγονός που φαίνεται καλύτερα στην κατηγορία έκθεσης XS2. Το μόνο που πρέπει να σημειωθεί εδώ είναι ότι σε μια **μικρή ζώνη απόστασης περίπου 100 m από την ακτή** αναμένεται υψηλότερη υγρασία (ζώνη πλούσια σε σταγονίδια θαλάσσιου νερού) και συνεπώς η διείσδυση χλωριόντων θα είναι ταχύτερη. Η υποπερίπτωση αυτή θα πρέπει να υπαχθεί στην κατηγορία έκθεσης XS3 όπως άλλωστε συζητείται στο BS 8500.

Στην περίπτωση της **κατηγορίας έκθεσης XS2** (τμήματα θαλασσίων κατασκευών μόνιμα βυθισμένα σε θαλάσσιο νερό), ο ρυθμός διείσδυσης χλωριόντων είναι μέγιστος, ο ρυθμός όμως διάβρωσης οπλισμού (όταν έχει ξεπερασθεί το κατώφλι διάβρωσης) είναι πάλι χαμηλός λόγω της ανεπαρκούς παρουσίας οξυγόνου. Όπως παρατηρείται στον Πίνακα 5, που παρατίθενται αποτελέσματα από τρεξίματα του μοντέλου διείσδυσης χλωριόντων [8] σε πλήρως κορεσμένους με νερό πόρους σκυροδέματος, η περίοδος εισαγωγής στην διάβρωση, t_{cr} , για πάχος επικάλυψης οπλισμού 40 mm είναι περίπου 50 χρόνια για τσιμέντο τύπου CEM I. Παραταύτα η συνολική διάρκεια ζωής θα είναι αρκετά εκτενέστερη, λόγω σημαντικής έλλειψης οξυγόνου. Αξίζει να τονισθεί **η συγκριτικά καλύτερη συμπεριφορά του τύπου τσιμέντου CEM II/B-M** που δίνει $t_{cr}=67$ χρόνια για

c=40 mm. Αυτό οφείλεται στην παρουσία της ιπτάμενης τέφρας και των ποζολανών του CEM II τύπου τσιμέντου που παρεμποδίζουν σημαντικά την κίνηση των ιόντων Cl⁻ στο πορώδες σύστημα του σκυροδέματος [συντελεστής δραστηκότητας για αντίσταση έναντι Cl⁻ για Ελληνικές ιπτάμενες τέφρες, k=2, έναντι k=1 του τσιμέντου portland, 9,13]. Έτσι συνολικά και για τα πάχη επικάλυψης που υπαγορεύει ο ΕΚΩΣ 2000, οι προτεινόμενες τιμές του EN 206 εξασφαλίζουν μια διάρκεια ζωής της τάξης των 100 χρόνων.

Τέλος, στην περίπτωση της **κατηγορίας έκθεσης XS3** (τμήματα θαλασσίων κατασκευών ευρισκόμενα στην ζώνη διαβροχής), ο ρυθμός διείσδυσης χλωριόντων είναι επίσης μέγιστος, καθώς και ο ρυθμός διάβρωσης οπλισμού (όταν έχει ξεπερασθεί το κατώφλι διάβρωσης), λόγω της ταυτόχρονης παρουσίας οξυγόνου και υγρασίας. Όπως παρατηρείται στον Πίνακα 5, τα σχετικά αποτελέσματα του μοντέλου [8] για τις προτεινόμενες τιμές του EN 206, δίνουν μια περίοδο εισαγωγής στην διάβρωση, t_{cr} , για πάχος επικάλυψης οπλισμού 40 mm, περίπου 60 χρόνια. Στην περίπτωση όμως αυτή η διάρκεια του σταδίου εξέλιξης της διάβρωσης είναι συντομότερη με αποτέλεσμα, εάν επιδιώκεται διάρκεια ζωής μεγαλύτερη των 100 χρόνων, να πρέπει να επιλεγεί μεγαλύτερο πάχος επικάλυψης (50 mm).

Πίνακας 5. Εκτιμώμενη συνολική διάρκεια ζωής κατασκευής από σκυρόδεμα για διάφορους τύπους τσιμέντου και διάφορες κατηγορίες έκθεσης σε περίπτωση διάβρωσης οπλισμού που προκαλείται μέσω διείσδυσης χλωριόντων θαλάσσιου νερού [8].

Χαρακτηριστικά σύνθεσης/ σχεδιασμού	XS1	XS2	XS3
Τύπος τσιμέντου CEM I 42.5N			
Μέγιστος λόγος W/C	0.50	0.45	0.45
Ελάχιστη περιεκτικότητα τσιμ. C (kg/m ³)	300	320	340
Ελάχιστη κατηγορία αντοχής	C30/37	C35/45	C35/45
t_{cr} (χρόνια) για c = 30 mm	63	25	32
t_{cr} (χρόνια) για c = 35 mm	80	35	46
t_{cr} (χρόνια) για c = 40 mm	100	48	58
t_{cr} (χρόνια) για c = 45 mm	>100	58	70
t_{cr} (χρόνια) για c = 50 mm	>100	69	81
Τύπος τσιμέντου CEM II/B-M(W-P-LL) 32.5N			
Μέγιστος λόγος W/C	0.50	0.45	0.45
Ελάχιστη περιεκτικότητα τσιμ. C (kg/m ³)	300	320	340
Ελάχιστη κατηγορία αντοχής	C25/30	C30/37	C30/37
t_{cr} (χρόνια) για c = 30 mm	70	38	35
t_{cr} (χρόνια) για c = 35 mm	100	50	48
t_{cr} (χρόνια) για c = 40 mm	>100	67	60
t_{cr} (χρόνια) για c = 45 mm	>100	84	75
t_{cr} (χρόνια) για c = 50 mm	>100	100	95

W/C: λόγος νερού/τσιμέντο κατά βάρος, C: περιεκτικότητα σκυροδέματος σε τσιμέντο (kg/m³), c: πάχος επικάλυψης οπλισμού, t_{cr} : διάρκεια της περιόδου εισαγωγής στην διάβρωση μέσω διείσδυσης χλωριόντων.

3.3 Σύγκριση προβλέψεων με πραγματικές μετρήσεις

Όπως φαίνεται στους κάτωθι πίνακες, παρατηρείται μια εξαιρετική συμφωνία μεταξύ των προβλέψεων διαφόρων χαρακτηριστικών ανθεκτικότητας που δίνει το πρόγραμμα EUCON® και των μετρήσεων σε πραγματικές οικοδομές και κατασκευές από σκυρόδεμα, ηλικίας έως 70 ετών.

Κτίριο/ Κατασκευή	Ηλικία (έτη)	Βάθος ενανθράκωσης Πρόβλεψη (mm)	Βάθος ενανθράκωσης Μέτρηση (mm)
Πύργος ψύξης ΔΕΗ Μεγαλόπολης εσωτερικά εξωτερικά	25 (1995)	2 16.9	2 18
Παλαμαϊκή Σχολή Μεσολογγίου	66 (1998)	43.1	45
Γενικό Νοσοκομείο Ληξουρίου	51 (2004)	40.6	43
Χαρτοποιία Λαδόπουλος, Πάτρα ανεπίχριστο επιχρισμένο	70 (2005)	19 6	20 8
Δημαρχείο Βοιών Λακωνίας	38 (2005)	32	35

Κτίριο/ Κατασκευή	Βάθος ενανθράκωσης Πρόβλεψη (mm)	Διάρκεια ζωής λόγω χλωριόντων Πρόβλεψη
Γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου Octagon (splash zone)	20.4 (120 έτη)	> 120 έτη
Oresund Link, Δανία-Σουηδία (Bridge - splash zone)	7.7 (100 έτη)	> 150 έτη

Εκτενέστερη σύγκριση μεταξύ προβλέψεων και πραγματικών μετρήσεων, σε θέματα ενανθράκωσης σκυροδέματος, διείσδυσης χλωριόντων, διάβρωσης χάλυβα, κλπ., δίνονται αναλυτικά στα συνοδευτικά επιστημονικά άρθρα του πακέτου EUCON® [9-13].

4. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν άρθρο παρουσιάζεται ένα πρόγραμμα υπολογιστή (EUCON®) για υπολογισμό της διάρκειας ζωής κατασκευών από σκυρόδεμα, και δευτερευόντως της αντοχής και του κόστους παραγωγής. Το λογισμικό αυτό βασίζεται σε αποδεδειγμένα μοντέλα πρόβλεψης, έχει επιβεβαιωθεί στην πράξη, και μπορεί να περιληφθεί στις μεθόδους που σχετίζονται με την επιτελεσματικότητα για πρόβλεψη της ανθεκτικότητας κατά EN 206. Η δομή του βρίσκεται σε πλήρη συμφωνία με τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα για το τσιμέντο, EN 197 (27 διαφορετικοί τύποι τσιμέντου), και για το σκυρόδεμα, EN 206 (επιτρέποντας επιπλέον χρήση προσθέτων όπως ιπτάμενη τέφρα και πυριτική παιπάλη, χρήση βελτιωτικών ή χημικών προσμίκτων, κλπ.). Επίσης δίνεται η δυνατότητα εξέτασης κλασικών ή μη τρόπων προστασίας και επιμήκυνσης του χρόνου ζωής, π.χ., επιχρίσματα, υλικά μείωσης διαπερατότητας, επικάλυψης, κλπ. Συγκρίνοντας τις προβλέψεις του λογισμικού αυτού με τις συστάσεις του EN 206 για συνήθεις κατηγορίες έκθεσης, παρατηρείται μια γενική συμφωνία, με κάποιες ωστόσο διαφοροποιήσεις:

- **Το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 206 είναι ένα νέο εξαιρετικό εργαλείο σχεδιασμού ανθεκτικών κατασκευών από σκυρόδεμα.** Δίνει την δυνατότητα για πρώτη φορά και στην Ελλάδα να σχεδιάζει τις κατασκευές της για διάρκεια ζωής **της τάξης των 100 ετών**, προτείνοντας πέραν των άλλων αυστηρές συνθέσεις σκυροδέματος στην πλειονότητα των κατηγοριών έκθεσης περιβάλλοντος. Οι Έλληνες Μηχανικοί πρέπει να υιοθετήσουν αυστηρά τους κανόνες καθορισμού των **περιβαλλοντικών συνθηκών και σχεδιασμού συνθέσεων σκυροδέματος**, ταυτόχρονα με τις ισχύουσες προδιαγραφές **σχεδιασμού, υλοποίησης και συντήρησης της κατασκευής**, που είναι απαραίτητες για την διατήρηση της αρχικά σχεδιαζόμενης διάρκειας ζωής.
- Υπάρχουν παρά ταύτα **σημεία που θα πρέπει να βελτιωθούν στις προτάσεις του EN 206**, ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερα ο ανωτέρω στόχος, όπως:
 - ✓ Για τον συνήθη, σε **συνθήκες ενδοχώρας (αστικές ή υπαίθριες), μηχανισμό διάβρωσης μέσω ενανθράκωσης**, θα πρέπει να καθορισθούν με περισσότερο σαφήνεια και με μετρήσιμα μεγέθη οι κατηγορίες έκθεσης XC1-XC4, όπως π.χ. μέση σχετική υγρασία αέρα. Επιπλέον, σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές ή χώρους ιδιαίτερης συνάθροισης ανθρώπων, ο σχεδιασμός θα πρέπει να είναι αυστηρότερος έναντι περιοχών υπαίθρου, λόγω υψηλότερης περιεκτικότητας σε ατμοσφαιρικό CO₂. Για την κρίσιμη **κατηγορία έκθεσης XC3 θα πρέπει να υιοθετηθούν αυστηρότερες οριακές τιμές σύνθεσης σκυροδέματος** (μέγιστο W/C: 0.50, ελάχιστη περιεκτικότητα σε τσιμέντο C τουλάχιστον 300 kg/m³) και συνεπώς να υπάρχει **ενοποίηση με την κατηγορία έκθεσης XC4**. Όταν επιπλέον γίνεται χρήση τσιμέντων **τύπου CEM II – CEM V** θα πρέπει το πάχος επικάλυψης οπλισμού να ανέρχεται αυστηρά στα 30 mm. Πιθανόν, να πρέπει να **επιτρέπεται μια συνδιαλλαγή μεταξύ σύνθεσης σκυροδέματος, πάχους επικάλυψης και μέτρων προστασίας**, αρκεί να επιτυγχάνεται η επιθυμητή διάρκεια ζωής.
 - ✓ Στην περίπτωση των **παράκτιων και θαλάσσιων περιοχών, με κύριο μηχανισμό φθοράς την διάβρωση του οπλισμού που εισάγεται μέσω διείσδυσης χλωριόντων**, οι προτάσεις του EN 206 δίνουν μια διάρκεια ζωής της τάξης των 100 ετών. Θα πρέπει όμως μια **μικρή ζώνη απόστασης περίπου 100 m από την ακτή** να υπαχθεί στην κατηγορία έκθεσης XS3 λόγω της σημαντικά ταχύτερης διείσδυσης Cl⁻. Επίσης για τις κατηγορίες έκθεσης XS1, XS2 και XS3 θα πρέπει **να συνιστάται η χρήση τσιμέντων τύπου CEM II έναντι CEM I**.
 - ✓ Για άλλες κατηγορίες έκθεσης και στις περιπτώσεις που για παράδειγμα απαιτείται μια διάρκεια ζωής σημαντικά διαφορετική των 50, το περιβάλλον είναι αόριστο ή ιδιαίτερα επιθετικό, χρησιμοποιούνται νέα ή διαφορετικά συστατικά υλικά σκυροδέματος, χρησιμοποιείται μια αναβαθμισμένη μέθοδος προστασίας, πρόκειται να αναγεθούν ειδικές κατασκευές ή σημαντικός αριθμός πολλών παρόμοιων κατασκευών, η μέθοδος των οριακών τιμών έχει αποτύχει στην πράξη, είτε επιχειρείται τεχνοοικονομική αριστοποίηση, θα πρέπει να **εφαρμόζονται αξιόπιστα και γενικώς αποδεκτά προσομοιώματα πρόβλεψης**, βλ. [14,8].

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. CEB, "Durable Concrete Structures - CEB Design Guide", *Bulletin d' Information*, **182**, Lausanne (1989).
2. Mehta, P.K., "Durability- Critical Issues for the Future", *Concr. Intern.*, **19(7)**, 27 (1997).
3. Neville, A.M., *Properties of Concrete*, 4th ed., Longman, Essex (1995).
4. Richardson, M.G., *Fundamentals of Durable Reinforced Concrete*, Spon Press, London (2002).
5. Illston, J.M. and P.L.J. Domone, *Construction Materials – Their Nature and Behaviour*, 3rd ed., Spon Press, London (2001).

6. European Standard EN 206-1, "Concrete – Part 1: Specification, Performance, Production and Conformity", CEN, Brussels (2000).
7. European Standard EN 197-1, "Cement – Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements", CEN, Brussels (2000).
8. Papadakis, V.G. and M.P. Efstathiou, "**EUCON**: Computer Software for Estimation of Concrete Service Life", Patras Science Park S.A., Patras, 2005.
9. Papadakis, V.G., " Estimation of Concrete Service Life – The Theoretical Background", Patras Science Park S.A., Patras, 2005.
10. 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).
11. Papadakis, V.G., M.N. Fardis, and C.G. Vayenas, "Effect of Composition, Environmental Factors and Cement-Lime Mortar Coating on Concrete Carbonation", *Materials and Structures*, **25**, 293 (1992).
12. 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).
13. Papadakis, V.G., "Effect of Supplementary Cementing Materials on Concrete Resistance Against Carbonation and Chloride Ingress", *Cement and Concrete Research*, **30**(2), 291-299 (2000).
14. Papadakis, V.G. and M.P. Efstathiou, "Computer Modelling of Concrete Service Life", *6th International Congress: Global Construction – Ultimate Concrete Opportunities*, Dundee, Scotland, 5-7 July 2005.
15. Parrot, L., "Design for Avoiding Damage due to Carbonation-Induced Corrosion", *Proceedings of 3rd International Conference on Durability of Concrete*, ACI SP-145, 283, Nice (1994).
16. Morinaga, S., "Prediction of Service Lives of Reinforced Concrete Buildings based on Corrosion Rate of Reinforcing Steel", *Proceedings of the 5th International Conference on Durability of Building Materials and Components*, Brighton, U. K., November 1990; Edited by J.M. Baker, P.J. Nixon, A.J. Majumdar, and H. Davies, pp. 5-16, E. & F.N. SPON, London 1991.
17. Hobbs, D., B. Marsh, J. Matthews, and S. Petit, "Minimum Requirements for Concrete to Resist Carbonation-Induced Corrosion of Reinforcement", in *Minimum Requirements for Durable Concrete*, D.W. Hobbs (ed.), pp. 11-42, British Cement Association, London 1998.
18. Sandberg, P., *Chloride Initiated Reinforcement Corrosion in Marine Concrete*, Report TVBM-1015, Lund Institute of Technology, Division of Building Materials, Lund (1998).