



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

Διπλωματική Εργασία

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΩΦΕΛΙΜΗΣ ΖΩΗΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ
ΕΚΤΙΘΕΜΕΝΟΥ ΣΕ ΧΛΩΡΙΟΝΤΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ LIFE 365



ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ ΟΙΚΟΝΟΜΟΥ

Επιβλέπων καθηγητής: Ευστράτιος Μπαδογιάννης, Επίκουρος καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2017

«Η ζωή είναι ένας μεγάλος αγώνας, με δύσκολες και όμορφες στιγμές...

...κάθε δυσκολία δίνει αξία στην όμορφη στιγμή που ακολουθεί...»



A.O. 2017

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η ενασχόληση μου με τις αρχές σχεδιασμού κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος στα μαθήματα «σιδηροπαγές σκυρόδεμα» και «οπλισμένο σκυρόδεμα» όπως και οι εργαστηριακές ασκήσεις δοκιμίων σκυροδέματος που πραγματοποίησα στο μάθημα «εισαγωγή στο σιδηροπαγές σκυρόδεμα» με ώθησαν να ασχοληθώ με την ανάλυση υπολογιστικών μοντέλων ζωής οπλισμένου σκυροδέματος για τη βελτιστοποίηση μελλοντικών κατασκευών με εκτεταμένο χρόνο ζωής.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί το επιστέγασμα μιας προσπάθειας να μελετηθεί διεξοδικά ο τρόπος υπολογισμού ζωής του οπλισμένου σκυροδέματος που εκτίθεται σε χλωριόντα.

Τελειώνοντας την εργασία αυτή ολοκληρώνονται οι προπτυχιακές σπουδές και θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Επίκουρο καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών κύριο Ευστράτιο Μπαδογιάννη για την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, την πολύτιμη βοήθεια του και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το θέμα της διάρκειας ζωής του οπλισμένου σκυροδέματος.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για τη διαρκή τους υποστήριξη κατά τα χρόνια των προπτυχιακών σπουδών στην σχολή Πολιτικών Μηχανικών.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	7
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	9
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	13
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	16
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	17
ABSTRACT	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	21
1.1 Γενικά	21
1.2 Παράγοντες φθοράς σκυροδέματος.....	22
1.3 Το νερό στο σκυρόδεμα.....	24
1.3.1 Το πορώδες του σκυροδέματος.....	27
1.3.2 Επιβλαβές περιβάλλον	29
1.4 Διείσδυση Χλωριόντων	29
1.4.1 Ανθεκτικότητα και χλωριόντα	29
1.4.2 Εμφάνιση χλωριόντων στο σκυρόδεμα και η δράση τους	30
1.4.3 Μορφή χλωριόντων στο σκυρόδεμα	30
1.5 Οριακή συγκέντρωση χλωριόντων	31
1.6 Τρόποι προστασίας οπλισμένου σκυροδέματος.....	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ	41
2.1 Εισαγωγή	41
2.2 Διείσδυση χλωριόντων	44
2.2.1 Διάχυση χλωριόντων	45
2.2.2 Δέσμευση χλωριόντων κατά τη διάχυση.....	48
2.2.3 Συντελεστής Διάχυσης Χλωριόντων	50

2.2.4	Διάχυση χλωριόντων και μεταγωγή	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ		59
3.1	Μοντέλα διάβρωσης	60
3.1.1	Εμπειρικά μοντέλα	62
3.1.2	Πιθανολογικά μοντέλα	63
3.1.3	Φυσικοχημικά μοντέλα	66
3.2	Σύγκριση χρησιμοποιούμενων λογισμικών	68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ LIFE-365 ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΙΘΕΜΕΝΟΥ ΣΕ ΧΛΩΡΙΟΝΤΑ.....		73
4.1	Υπολογισμός διάρκειας ζωής με χρήση των συντελεστών διάχυσης του μοντέλου Life-365 77	
4.1.1	Οπλισμένο σκυρόδεμα με κοινό τύπο χάλυβα Black Steel και μηδενική προστασία έναντι διάβρωσης.....	77
4.1.2	Οπλισμένο σκυρόδεμα με κοινό τύπο χάλυβα Black Steel και χρήση υδατοστεγών μεμβρανών.....	80
4.1.3	Οπλισμένο σκυρόδεμα με κοινό τύπο χάλυβα Black Steel και χρήση στεγανωτικών σκυροδέματος.....	81
4.1.4	Οπλισμένο σκυρόδεμα με χάλυβα Epoxy Coated και μηδενική προστασία έναντι διάβρωσης.....	82
4.1.5	Οπλισμένο σκυρόδεμα με ανοξείδωτο χάλυβα και μηδενική προστασία έναντι διάβρωσης.....	83
4.2	Υπολογισμός διάρκειας ζωής με χρήση πειραματικών τιμών συντελεστών διάχυσης	84
4.2.1	Οπλισμένο σκυρόδεμα με κοινό τύπο χάλυβα Black Steel και μηδενική προστασία έναντι διάβρωσης.....	84
4.2.2	Οπλισμένο σκυρόδεμα με κοινό τύπο χάλυβα Black Steel και χρήση υδατοστεγών μεμβρανών.....	85

4.2.3	Οπλισμένο σκυρόδεμα με κοινό τύπο χάλυβα Black Steel και χρήση στεγανωτικών σκυροδέματος.....	86
4.2.4	Οπλισμένο σκυρόδεμα με χάλυβα Epoxy Coated και μηδενική προστασία έναντι διάβρωσης.....	87
4.2.5	Οπλισμένο σκυρόδεμα με ανοξείδωτο χάλυβα και μηδενική προστασία έναντι διάβρωσης.....	88
4.3	Υπολογισμός διάρκειας ζωής συνθέσεων εφαρμοσμένες στο μοντέλο μέσω του πειραματικού συντελεστή διάχυσης.....	89
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ		91
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		103
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		105
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ		111
A. Καρτέλα Project		111
A.1 Identify Project		112
A.2 Select Structure Type and Dimensions		112
A.3 Define Economic Parameters.....		113
A.4 Define Alternatives		114
B. Καρτέλα Exposure.....		114
B.1 Select Method for Setting External Concentration and Temperature Profile		115
B.2 Chloride Exposure.....		116
B.3 Define Temperature Cycle		117
Γ. Καρτέλα Concrete Mixtures		118
Γ.1 Define Concrete Mixtures		118
Γ.2 Selected mixture		119
Γ.3 Custom Mixture Properties		119
Γ.4 Service Life Graphs.....		120

Δ. Καρτέλα Individual Costs	123
Δ.1 Set Concrete Costs	123
Δ.2 Default Concrete and Repair Costs	124
Ε. Καρτέλα Life-Cycle Cost	124
Ε.1 Life-Cycle Cost	125
Ε.2 Timelines	125
Ε.3 Sensitivity analysis	126
ΣΤ. Καρτέλες Service Life and Life-Cycle Cost Reports	127

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Διαβρωτικές δράσεις στο σκυρόδεμα.....	22
Σχήμα 1.2: Παράγοντες ανθεκτικότητας.....	24
Σχήμα 1.3: Σχέση διαπερατότητας με λόγο νερού προς τσιμέντο (Κόλιας 2011-2012).....	25
Σχήμα 1.4: Μεταβολή πιθανότητας διάβρωσης λόγω ενανθράκωσης.....	26
Σχήμα 1.5: Μεταβολή πιθανότητας διάβρωσης λόγω Cl ⁻	26
Σχήμα 1.6: Εκτιμώμενος Κίνδυνος διάβρωσης εξαιτίας της ύπαρξης χλωριόντων (BRE Digest 444 – 1999).....	36
Σχήμα 2.1: Μοντελοποίηση ωφέλιμου χρόνου ζωής κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα (Tuutti, 1982).....	42
Σχήμα 2.2: Εξάρτηση του συντελεστή Dc από τη θερμοκρασία για διαφορετικές τιμές U kJmol ..	54
Σχήμα 2.3: Εξάρτηση του συντελεστή Dc από το χρόνο.....	54
Σχήμα 2.4: Εξάρτηση του συντελεστή Dc από τη σχετική υγρασία.....	55
Σχήμα 2.5: Σχέση ανάμεσα στο συντελεστή m και στο λόγο νερού προς τσιμέντο (w/c) για διάφορα μείγματα: OPC, 26% PFA, 60% GBFS, 15% SF (Mangat and Molloy, 1994). ..	55
Σχήμα 2.6: Μεταβολή υγρασίας και συγκέντρωσης χλωριόντων στην επιφάνεια σκυροδέματος κατασκευών που υπόκεινται σε κύκλους ύγρανσης ξήρανσης (προσαρμοσμένο από Tuutti, 1993). .	56
Σχήμα 4.1: Διαστάσεις της κατασκευής.....	76
Σχήμα 4.2: Αριθμός και ονόματα συνθέσεων	77
Σχήμα 4.3: Καρτέλα Exposure – Marine spray zone	78
Σχήμα 4.4: Υπολογισμός διάρκειας ζωής για κάθε σύνθεση με χάλυβα οπλισμού Black Steel και μηδενική προστασία έναντι διάβρωσης (Barriers-none).....	79
Σχήμα 4.5: Διάρκεια ζωής της κατασκευής για κάθε σύνθεση με χάλυβα οπλισμού Black Steel και μηδενική προστασία έναντι διάβρωσης (Barriers-none).....	79
Σχήμα 4.6: Διάρκεια ζωής της κατασκευής για κάθε σύνθεση με χάλυβα οπλισμού Black Steel και η προστασία με υδατοστεγείς μεμβράνες έναντι διάβρωσης (Barriers-membrane)	80
Σχήμα 4.7: Διάρκεια ζωής της κατασκευής για κάθε σύνθεση με τύπο χάλυβα Black Steel και προστασία σφραγιστικών έναντι διάβρωσης (Barriers-sealer)	81
Σχήμα 4.8: Διάρκεια ζωής της κατασκευής για κάθε σύνθεση με τύπο χάλυβα Epoxy Coated και μηδενική προστασία από διάβρωση.....	82

Σχήμα 4.9: Διάρκεια ζωής της κατασκευής για κάθε σύνθεση με τύπο χάλυβα 316 Stainless και μηδενική προστασία από διάβρωση.....	83
Σχήμα 4.10: Διάρκεια ζωής της κατασκευής για κάθε σύνθεση με χάλυβα οπλισμού Black Steel, μηδενική προστασία έναντι διάβρωσης και πειραματικό D28	84
Σχήμα 4.11: Διάρκεια ζωής της κατασκευής για κάθε σύνθεση με χάλυβα οπλισμού Black Steel, προστασία υδατοστεγούς μεμβράνης έναντι διάβρωσης και πειραματικό D ₂₈	85
Σχήμα 4.12: Διάρκεια ζωής της κατασκευής για κάθε σύνθεση με τύπο χάλυβα Black Steel και προστασία σφραγιστικών έναντι διάβρωσης με πειραματικό D28	86
Σχήμα 4.13: Διάρκεια ζωής της κατασκευής για κάθε σύνθεση με τύπο χάλυβα Epoxy Coated και μηδενική προστασία από διάβρωση με πειραματικό συντελεστή διάχυσης.....	87
Σχήμα 4.14: Διάρκεια ζωής της κατασκευής για κάθε σύνθεση με χρήση χάλυβα οπλισμού Stainless 316 και μηδενικής προστασίας έναντι διάβρωσης με πειραματικό συντελεστή διάχυσης.....	88
Σχήμα 4.15: Διάρκεια ζωής της κατασκευής με χρήση χάλυβα οπλισμού Black Steel και μηδενικής προστασίας έναντι διάβρωσης, για τις συνθέσεις που εισήχθησαν στο μοντέλο με τον πειραματικό συντελεστή διάχυσης.....	89
Σχήμα 5.1: Διάρκεια ζωής αμιγούς κονιάματος (OPC) για κάθε τύπο χάλυβα οπλισμού και προστασίας έναντι διάβρωσης, για τις 2 περιπτώσεις συντελεστών διάχυσης	92
Σχήμα 5.2: Διάρκειας ζωής κονιάματος MFA10 για κάθε τύπο χάλυβα οπλισμού και προστασίας έναντι διάβρωσης, για τις 2 περιπτώσεις συντελεστών διάχυσης.....	93
Σχήμα 5.3: Διάρκεια ζωής κονιάματος MFA20 για κάθε τύπο χάλυβα οπλισμού και προστασίας έναντι διάβρωσης, για τις 2 περιπτώσεις συντελεστών διάχυσης.....	94
Σχήμα 5.4: Διάρκεια ζωής κονιάματος MSF10 για κάθε τύπο χάλυβα οπλισμού και προστασίας έναντι διάβρωσης, για τις 2 περιπτώσεις συντελεστών διάχυσης.....	95
Σχήμα 5.5: Διάρκεια ζωής κονιάματος GBF10 για κάθε τύπο χάλυβα οπλισμού και προστασίας έναντι διάβρωσης, για τις 2 περιπτώσεις συντελεστών διάχυσης.....	96
Σχήμα 5.6: Διάρκεια ζωής κονιάματος GBF20 για κάθε τύπο χάλυβα οπλισμού και προστασίας έναντι διάβρωσης, για τις 2 περιπτώσεις συντελεστών διάχυσης.....	97
Σχήμα 5.7: Διάγραμμα διάρκειας ζωής κονιάματος με 10% πρόσθετο υλικό, για διάφορους τύπους χάλυβα οπλισμού και προστασίας έναντι διάβρωσης.....	98
Σχήμα 5.8: Διάγραμμα διάρκειας ζωής κονιάματος με 20% πρόσθετο υλικό, για διάφορους τύπους χάλυβα οπλισμού και προστασίας έναντι διάβρωσης.....	99

Σχήμα 5.9: Διάρκεια ζωής συνθέσεων που εισήχθησαν στο μοντέλο μέσω του πειραματικού συντελεστή διάχυσης..... 100

Σχήμα 5.10: Ανάλυση της διάρκειας ζωής της σύνθεσης MK10 για πολλαπλές τιμές του m 101

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Τυπικές τιμές του συντελεστή διάχυσης χλωριόντων	50
Πίνακας 2.2: Τιμές ενέργειας ενεργοποίησης παστών τσιμέντου Portland για διάφορους λόγους νερό προς τσιμέντο	51
Πίνακας 3.1: Δεδομένα μοντέλων υπολογισμού διάρκειας ζωής κατασκευών (Δέμης, 2015)	70
Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα μοντέλων υπολογισμού διάρκειας ζωής κατασκευών (Δέμης, 2015) ...	71
Πίνακας 4.1: Συνθέσεις κονιαμάτων που παρουσιάζονται σαν επιλογή στο λογισμικό.....	74
Πίνακας 4.2: Συνθέσεις κονιαμάτων που δεν παρουσιάζονται σαν επιλογή στο λογισμικό	74
Πίνακας 4.3: Συντελεστής διεύθυνσης των συνθέσεων βάσει πειραματικών αποτελεσμάτων (μέθοδος NT 492)	75
Πίνακας 4.4: Μέση μηνιαία θερμοκρασία τελευταίας δεκαετίας, μετεωρολογικού σταθμού Αεροδρ. Ελ. Βενιζέλος (πηγή: http://weatherdata.aws.gr/getmonthyears/result/12).....	76
Πίνακας 4.5: Ανάλυση της διάρκειας ζωής της σύνθεσης MK10 για πολλαπλές τιμές του m.....	90
Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα υπολογισμού διάρκειας ζωής κάθε σύνθεσης για όλους τους τύπους χάλυβα οπλισμού και προστασίας.....	91

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια προσπάθεια αναλυτικής διερεύνησης και μοντελοποίηση της διείσδυσης των χλωριόντων στο οπλισμένο σκυρόδεμα ώστε να εκτιμηθεί η ωφέλιμη ζωή της κατασκευής.

Αρχικά περιγράφονται η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, οι παράγοντες φθοράς του και οι τρόποι προστασίας του έναντι διάβρωσης από την έκθεση χλωριόντων.

Έπειτα παρουσιάζεται αναλυτικά το μαθηματικό μοντέλο διείσδυσης χλωριόντων, στο οποίο διατυπώνεται η αλληλουχία διάβρωσης ως διεργασία δύο σταδίων, την περίοδο έναρξης και την περίοδο διάδοσης. Για τη δημιουργία του μοντέλου διάχυσης χλωριόντων χρησιμοποιήθηκε ο δεύτερος νόμος του Fick στον οποίο περιγράφονται οι διαδικασίες διάχυσης, δέσμευσης χλωριόντων και μεταφοράς λόγω της μετακίνησης του νερού.

Γίνεται αναφορά και αξιολόγηση σε διάφορα μοντέλα πρόβλεψης διάρκειας ζωής και σε λογισμικά υπολογισμού της. Στη συνέχεια αναλύεται το λογισμικό LIFE365 ως προσφορότερο για τη χρήση υπολογισμού διάρκειας ζωής της κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Η εργασία ολοκληρώθηκε με την αξιολόγηση έξι διαφορετικών συνθέσεων σκυροδέματος και γίνεται σύγκριση αποτελεσμάτων του πειραματικού συντελεστή διάχυσης και του συντελεστή διάχυσης που προκύπτει από το λογισμικό.

Λέξεις κλειδιά: Ωφέλιμη ζωή κατασκευής, μοντέλο ζωής, νόμος του Fick, διάβρωση σκυροδέματος, διάχυση χλωριόντων, διείσδυση χλωριόντων, συντελεστής διάχυσης, LIFE365

ABSTRACT

In this thesis, an attempt is being made to analyze and model the penetration of chlorides in the reinforced concrete in order to assess the service life of a concrete structure.

The durability of the concrete, the corrosion factors and the means of protection against corrosion from chloride exposure are been presented.

Furthermore an analytic presentation of the mathematical chloride diffusion models takes place in which the corrosion sequence is considered as a two-stage process, the initiation stage and a the propagation stage. For the creation of the service life model a modified version of Fick's 2nd law was used, in which the processes of diffusion, chloride binding, and convection due to water movement were taken into account.

Reference is made in various service life models and service life model calculation software. LIFE365 was found to be at the moment, most convenient and user friendly software for the use of lifetime calculations of the reinforced concrete structure.

This thesis is completed with the evaluation of six different mortar compositions. At last the results of the experimental diffusion coefficient use and the use of the diffusion coefficient calculated from LI365FE software are been compared and presented.

Key words: Construction service life, life models, concrete corrosion, chloride penetration, chloride diffusion, Diffusion coefficient, LIFE365

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

1.1 Γενικά

Κοινό χαρακτηριστικό όλων των κατασκευών από σκυρόδεμα είναι η φθορά στο χρόνο. Τα φυσικοχημικά φαινόμενα που πραγματοποιούνται μεταξύ των συστατικών του σκυροδέματος και των συστατικών από το εξωτερικό περιβάλλον δημιουργούν φθορά στο σκυρόδεμα. Ανθεκτικότητα σε διάρκεια ονομάζουμε τον ελάχιστο χρόνο μέσα στον οποίο η κατασκευή έχει την ικανότητα να ανθίσταται στις περιβαλλοντικές επιδράσεις χωρίς να χάνει τις ιδιότητες αντοχής και λειτουργίας της κάτω από ένα αποδεκτό όριο. Παρατίθενται κάποια αίτια φθοράς ενδεικτικά που είναι η διάβρωση του χάλυβα οπλισμού, η παγοπληξία στα ψυχρά κλίματα και οι χημικές αντιδράσεις μεταξύ του ενυδατωμένου τσιμέντου και των διαβρωτικών μέσων. Η φθορά εκδηλώνεται με ρωγμές και εκτονώσεις στην επιφάνεια του σκυροδέματος αλλά και με μείωση της μηχανική του αντοχής και απώλεια μάζας.

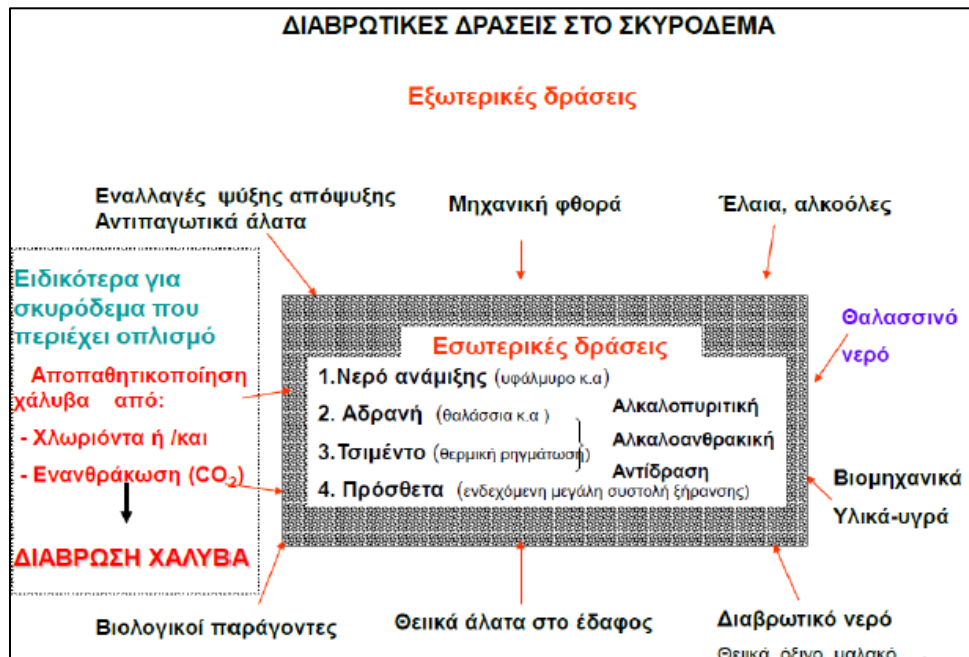
Όπως όλα τα σύνθετα υλικά έτσι και το οπλισμένο σκυρόδεμα έχει πεπερασμένο χρόνο ζωής πέραν του οποίου κρίνεται λειτουργικά ανεπαρκές. Το γεγονός αυτό σε συνάρτηση με το ότι τα έργα από οπλισμένο σκυρόδεμα έχουν κατασκευαστεί πριν από αρκετές δεκαετίες, μας κάνει να αναρωτηθούμε για το ποια είναι η ανθεκτικότητα του οπλισμένου σκυροδέματος σε διάρκεια. Κοινός στόχος των κατασκευών από σκυρόδεμα είναι η επίτευξη της σχεδιασμένης διάρκειας ζωής κατά το μέγιστο. Ο μεγάλος χρόνος διάρκειας ζωής μιας κατασκευής θεωρείται συνώνυμο της ανθεκτικότητας. Για να επιτευχθεί η ανθεκτικότητα σκυροδέματος απαιτείται προσεκτική ανάμιξη μελετημένων αναλογιών των συστατικών του. Κάθε κατασκευή από σκυρόδεμα οφείλει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις αντοχής και λειτουργικότητας στην αναμενόμενη διάρκεια ζωής της. Πιο συγκεκριμένα, το σκυρόδεμα πρέπει να ανθίσταται στις περιβαλλοντικές επιδράσεις (φυσικές ή χημικές) που εκτίθεται κατά τη διάρκεια του χρόνου, χωρίς να παρουσιάζει απώλειες στην ασφάλεια, στη λειτουργικότητα και στην αισθητική εμφάνιση. Αυτή η ικανότητα του σκυροδέματος ονομάζεται ανθεκτικότητα. Η ανθεκτικότητα αποτελεί μεγάλης αξία ποιοτική έννοια και είναι πλήρως εξαρτώμενη με τη βασική ιδιότητα του σκυροδέματος, την αντοχή σε μηχανική καταπόνηση.

Το πρόβλημα της ανθεκτικότητας σε διάρκεια θεωρείται σήμερα από τη διεθνή κοινότητα των μηχανικών σαν το υπ' αριθμόν ένα επιστημονικό και πρακτικό πρόβλημα του σκυροδέματος.

Πέρα από τις προφανείς επιδράσεις στην ασφάλεια και το περιβάλλον, υπάρχει σημαντική οικονομική διάσταση. Ήδη, στις αναπτυγμένες χώρες, το ετήσιο κόστος επισκευών υπερβαίνει κατά πολύ αυτό των νέων κατασκευών. Οι σχεδιαστές των κατασκευών από σκυρόδεμα ενδιαφέρονται ως επί το πλείστον για τα χαρακτηριστικά της αντοχής του υλικού και έτσι είναι καιρός να γίνει συνείδηση η σημαντικότητα της ανθεκτικότητας. Ενώ το σκυρόδεμα που παρασκευάζεται, διαστρώνεται και συντηρείται κατάλληλα μπορεί να είναι ανθεκτικό, κάτω από τις περισσότερες συνθήκες φυσικού και βιομηχανικού περιβάλλοντος εμφανίζονται συχνά περιπτώσεις πρόιμης φθοράς των κατασκευών. Έτσι παρέχονται πολύτιμα μαθήματα για τον έλεγχο των παραγόντων που είναι υπεύθυνοι για την έλλειψη ανθεκτικότητας.

1.2 Παράγοντες φθοράς σκυροδέματος

Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ανθεκτικότητα σε διάρκεια μιας κατασκευής από σκυρόδεμα μπορεί να οφείλονται είτε σε εξωτερικούς είτε σε εσωτερικούς παράγοντες και μπορεί να είναι φυσικές, χημικές ή μηχανικές (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1: Διαβρωτικές δράσεις στο σκυρόδεμα

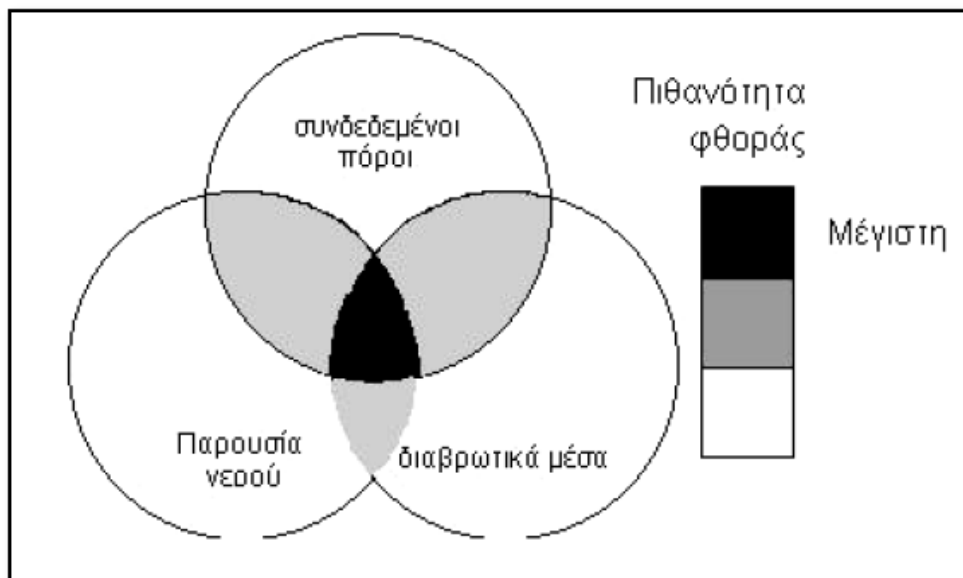
Η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος σχετίζεται άμεσα με τρεις κατηγορίες ρευστών:

- Νερό (με τα διαβρωτικά μέσα που περιέχει)
- Ατμοσφαιρικό αέρα (CO_2 , O_2)
- Ειδικό περιβάλλον που μπορεί να βρίσκεται το σκυρόδεμα (SO_4^{2-} , Cl^- , αλκάλια)

Επίσης εξαρτάται από την ευκολία με την οποία τα ρευστά που αναφέρθηκαν εισέρχονται και μεταφέρονται στο σκυρόδεμα, δηλαδή από τη διαπερατότητα του σκυροδέματος (permeability). Η κίνηση των ρευστών μέσα στο σκυρόδεμα μπορεί να πραγματοποιηθεί διαμέσου ροής σε πορώδες μέσο, μέσω διάχυσης και μέσω απορρόφησης. Οι 3 παράγοντες που επηρεάζουν την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος είναι η παρουσία νερού, η παρουσία συνδεδεμένων πόρων και η έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον.

Η διάβρωση του χάλυβα έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της διατομής της ράβδου κατά την ποσότητα του χάλυβα που μετατρέπεται σε σκουριά. Εκτός όμως από αυτό που είναι και το πιο προφανές η διάβρωση μειώνει επίσης και μάλιστα δυσανάλογα την ολκιμότητα του χάλυβα, γεγονός με πολύ δυσμενείς επιπτώσεις στη σεισμική συμπεριφορά του μέλους. Επιπλέον επειδή η σκουριά έχει 2 έως 6 φορές μεγαλύτερο όγκο από αυτόν του σιδηρού από τον οποίο έχει παραχθεί προκαλεί ρηγμάτωση αποτινάσσοντας την επικάλυψη, μειώνοντας ή και μηδενίζοντας την συνάφεια, και εκθέτοντας ακόμη περισσότερο τη ράβδο σε διάβρωση. Αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι η μείωση της αντοχής, το γεγονός αυτό σε συνάρτηση με το ότι τα κτήρια αυτά έχουν κατασκευαστεί χωρίς τη χρήση αντισεισμικού κανονισμού τα κάνει πιο ευάλωτα και καθιστά την επισκευή ή την ενίσχυση τους αναγκαία.

Κάθε ένας παράγοντας από τους παραπάνω έχει τον ρόλο του στη διάρκεια ζωής του υλικού. Η παρουσία, όμως, συνολικά και των τριών μπορεί να προκαλέσει ταχείες επιπτώσεις στην ανθεκτικότητα του, αφού δρουν κατά συνδυασμό και έτσι ο κίνδυνος φθοράς μεγιστοποιείται όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.2.



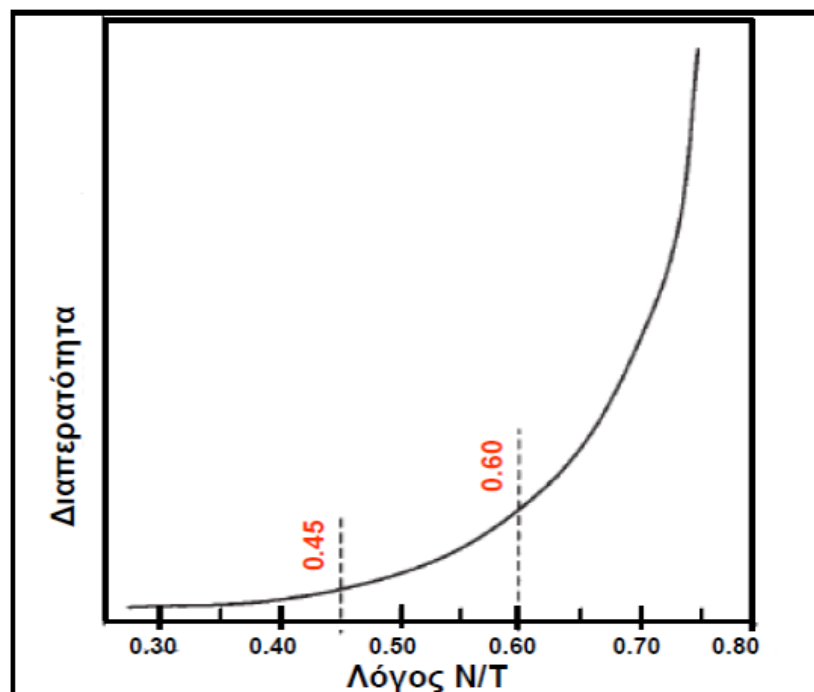
Σχήμα 1.2: Παράγοντες ανθεκτικότητας

1.3 Το νερό στο σκυρόδεμα

Ο πιο καθοριστικός παράγοντας για την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος είναι το νερό. Το σκυρόδεμα είναι ευαίσθητο στις φυσικές και χημικές διαδικασίες φθοράς που σχετίζονται με το νερό λόγω της ικανότητας διείσδυσης του νερού ακόμα και σε εξαιρετικά μικρούς πόρους και κοιλότητες.

Το νερό επηρεάζει το πορώδες καθώς υψηλοί λόγοι νερού προς τσιμέντο αυξάνουν την παρουσία τριχοειδών πόρων. Επομένως αυξάνεται η διαπερατότητα και μειώνεται σημαντικά η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3.

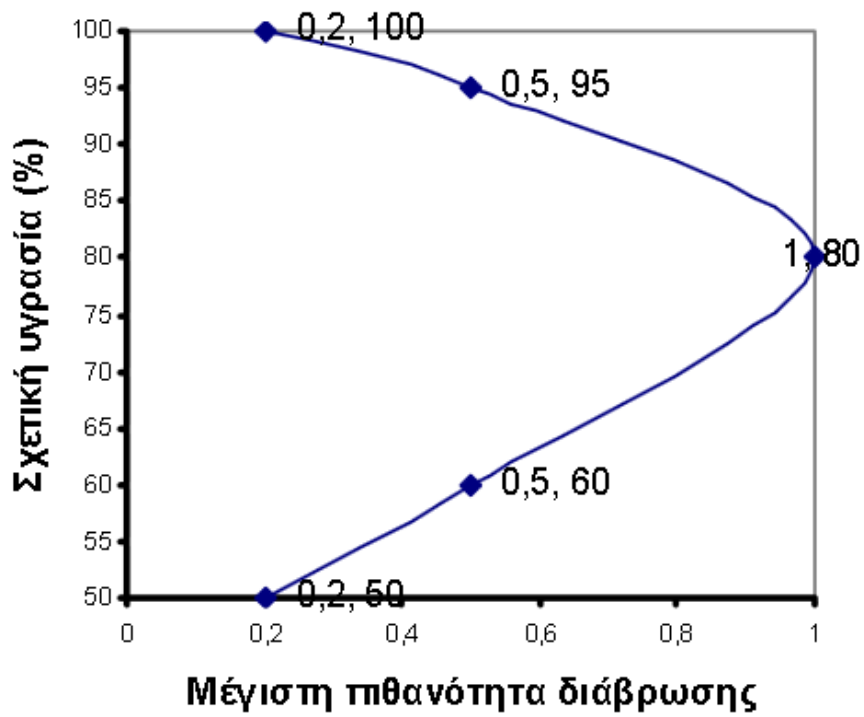
Ακόμη, αποτελεί το μέσο διάχυσης των διαβρωτικών συστατικών στους πόρους του σκυροδέματος. Βέβαια ο βαθμός φθοράς εξαρτάται από το αν η προσβολή των χημικών ουσιών είναι επιφανειακή ή πραγματοποιείται στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Επίσης, το νερό συμμετέχει στην αντίδραση διάβρωσης του οπλισμού και στην καταστροφή της παθητικής του προστασίας. Τέλος, συμμετέχει στην αλκαλοπυριτική αντίδραση και στην εναθράκωση.



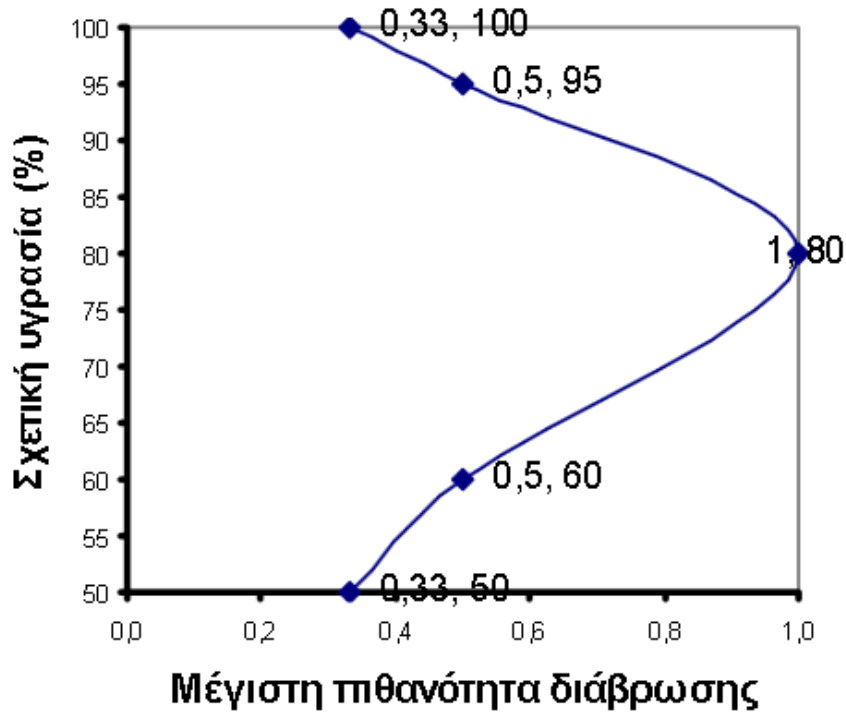
Σχήμα 1.3: Σχέση διαπερατότητας με λόγο νερού προς τσιμέντο (Κόλιας 2011-2012)

Εκτός από τις παραπάνω περιπτώσεις, το νερό είναι ο βασικός παράγοντας που διαμορφώνει την αντοχή του σκυροδέματος στη δοκιμή ψύξης-απόψυξης και σε έντονες θερμοκρασιακές μεταβολές. Ειδικότερα, στον μηχανισμό φθοράς του σκυροδέματος από τους κύκλους ψύξης-απόψυξης το νερό μετατρέπεται σε πάγο και διογκώνεται. Η αύξηση του όγκου του νερού προκαλεί τάσεις στο εσωτερικό του σκυροδέματος που έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία εσωτερικών ρωγμών και κενών μειώνοντας την αντοχή του υλικού.

Το σκυρόδεμα όπως και όλα τα πορώδη υλικά, αποβάλλει το νερό δυσκολότερα από ότι το απορροφά. Έτσι όταν έχουμε αυξομειώσεις της σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντος ή περιοδική διαβροχή, η μέση ποσότητα νερού στους πόρους είναι μεγαλύτερη από τη μέση υγρασία περιβάλλοντος. Η επιπλέον ποσότητα νερού επιβραδύνει την ενανθράκωση, για αυτό και το σκυρόδεμα σε επαφή με το περιβάλλον ενανθρακώνεται σε μικρότερο βαθμό από το αντίστοιχο σε εσωτερικούς χώρους. Συνεπώς η σχετική υγρασία (%) επηρεάζει και τον ρυθμό διάβρωσης. Στα Σχήματα 1.3 και 1.4 φαίνεται η επίδραση της σχετικής υγρασίας (%) στην πιθανότητα διάβρωσης λόγω ενανθράκωσης και χλωριόντων (Cl⁻).



Σχήμα 1.4: Μεταβολή πιθανότητας διάβρωσης λόγω ενανθράκωσης



Σχήμα 1.5: Μεταβολή πιθανότητας διάβρωσης λόγω Cl⁻

1.3.1 Το πορώδες του σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα, όπως και οι φυσικοί λίθοι, δεν είναι υλικό απόλυτα συμπαγές, αλλά περιέχει πλήθος από εσωτερικές κοιλότητες. Οι κοιλότητες αυτές ενδέχεται να περιέχουν αέρα ή νερό και το σύνολό τους αποτελεί το πορώδες του σκυροδέματος.

Ως ολικό πορώδες του σκυροδέματος ορίζεται το κλάσμα του όγκου των πόρων που υπάρχουν στο υλικό προς το συνολικό φαινόμενο όγκο και εκφράζεται επί τις εκατό (%). Οι πόροι αυτοί δημιουργούνται από το νερό της σύνθεσης και τον περιεχόμενο αέρα, κατά τη διάρκεια του μηχανισμού σκλήρυνσης του σκυροδέματος, που πραγματοποιείται με την ενυδάτωση του τσιμέντου.

$$p = \frac{V_k}{V} = \frac{\rho - \rho_\phi}{\rho} \quad 1.1$$

Όπου:

- p : ολικό πορώδες του υλικού
- V_k : ο όγκος των πόρων
- V : ο φαινόμενος όγκος του υλικού
- ρ_ϕ : το φαινόμενο ειδικό βάρος του υλικού
- ρ : το ειδικό βάρος του υλικού

Το πορώδες διακρίνεται ως προς τη μορφή του σε κλειστό, ανοικτό, ανοικτό από το ένα άκρο. Η μεταφορά των ρευστών στο εσωτερικό του σκυροδέματος γίνεται σχεδόν εξ' ολοκλήρου διαμέσου των πόρων και σχετίζεται με το πορώδες στη μάζα του τσιμεντοπολτού αλλά και στη διεπιφανειακή μεταβατική ζώνη τσιμεντοπολτού και αδρανών. Η ροή ξεκινά από την επιφάνεια του υλικού και συνεπώς οι πόροι της επιφάνειας του τσιμέντου και της πάστας στη διεπιφάνεια τσιμέντου και αδρανών, καθορίζουν τον ρυθμό μεταφοράς μάζας και διαβρωτικών μέσων.

Το πορώδες σχετίζεται με πολλές ιδιότητες και χαρακτηριστικά του σκυροδέματος. Η μικροδομή της ενυδατωμένης τσιμεντόπαστας είναι πολύπλοκο και ασταθές σύστημα, το οποίο είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο σε αλλαγές της υγρασίας και της θερμοκρασίας. Έχει βρεθεί ότι το πορώδες μειώνεται με την αύξηση του βαθμού ενυδάτωσης καθώς η αρχική δομή που σχηματίζεται κατά την πήξη του τσιμέντου τροποποιείται με το γέμισμα των πόρων με τα

προϊόντα ενυδάτωσης. Το στέγνωμα για παράδειγμα εισάγει εσωτερικές τάσεις στο υλικό, ενώ έχει αποδειχτεί ότι μπορεί να επηρεάσει και ν' αλλάξει με μη αντιστρεπτό τρόπο τη δομή των πόρων και την κατανομή τους στην ενυδατωμένη τσιμεντόπαστα [Ramachandran V.S., Beaudoin J., 2001].

Το πορώδες εκφράζει το συνολικό ποσοστό των πόρων στο συνολικό όγκο και όχι το είδος των πόρων. Συνεπώς δε μπορεί να υπάρξει οποιαδήποτε αναλογική σχέση μεταξύ συνολικού πορώδους και διαπερατότητας. Αυτό δε μπορεί να συμβεί γιατί η διαπερατότητα αναφέρεται στην ευκολία με την οποία τα ρευστά εισέρχονται μέσα στο σκυροδέμα και η ροή πραγματοποιείται διαμέσου των πόρων του σκυροδέματος. Η σχέση πορώδους και διαπερατότητας χαρακτηρίζεται ως ποιοτική αφού οι πόροι δε συντελούν στην αύξηση της διαπερατότητας όταν είναι ασυνεχείς και καλύπτονται από προσροφημένο νερό ή έχουν μικρό άνοιγμα. Η διαπερατότητα και η διαχυτότητα συχνά χρησιμοποιούνται ως στοιχεία για τον χαρακτηρισμό της ποιότητας του σκυροδέματος ιδιαίτερα όσον αφορά την ανθεκτικότητα σε επιθετικά περιβάλλοντα. Η σχέση πορώδους - διαπερατότητας προκύπτει από το νόμο του Hagen - Poiseville, ενώ η σχέση πορώδους - διαχυτότητας προσδιορίζεται με τη χρήση του πρώτου νόμου του Fick.

Ωστόσο, το αυξημένο πορώδες αυξάνει και την πιθανότητα να αποκτήσουν οι πόροι συνέχεια και να δημιουργηθούν <<κανάλια ροής>> των ρευστών. Αυτό πραγματοποιείται γιατί τόσο η καταπόνηση της κατασκευής όσο και οι θερμοκρασιακές μεταβολές ευνοούν την ανάπτυξη τοπικών τάσεων, οι οποίες διευρύνουν τους πόρους και έχουν ως αποτέλεσμα τη σύνδεση τους. Η σύνδεση των πόρων ευνοείται όταν:

- Υπάρχουν μικρορωγμές στη δομή του τσιμέντου, που προέρχονται είτε από μηχανική καταπόνηση είτε από θερμοκρασιακές μεταβολές
- Λόγω κακής συντήρησης μετά τη διάστρωση του σκυροδέματος ευνοείται το φαινόμενο της εξίδρωσης και η ταυτόχρονη δημιουργία πόρων κατά την άνοδο του νερού στην επιφάνεια
- Παρατηρείται περιορισμένη ομοιογένεια του σκυροδέματος λόγω χαμηλής εργασιμότητας σε συνδυασμό με κακή ή ανεπαρκή μηχανική συμπίκνωση.

Οι περισσότερες από τις ιδιότητες του σκυροδέματος βελτιώνονται, όταν για το ίδιο ολικό πορώδες το μέγεθος των πόρων είναι μικρότερο (επομένως το πλήθος των πόρων, για τον ίδιο

όγκο, είναι μεγαλύτερο), είναι περισσότερο ομοιόμορφα κατανεμημένοι μέσα στο υλικό και το σχήμα τους πλησιάζει το σφαιρικό [Τσίμας και Τσιβιλής, 2004]

1.3.2 Επιβλαβές περιβάλλον

Ένας από τους προφανείς παράγοντες επιρροής της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος είναι το περιβάλλον το οποίο βρίσκεται. Ο χρόνος ζωής μίας κατασκευής μειώνεται σε ένα διαβρωτικό περιβάλλον με έντονες θερμοκρασιακές ή υγροσκοπικές εναλλαγές.

Συνεπώς είναι απαραίτητο να επιλέγονται ορθά όλοι οι παράγοντες φθοράς ανάλογα με το περιβάλλον που εκτίθεται μία κατασκευή και να πραγματοποιούνται όλες οι αναγκαίες ενέργειες για την αποφυγή τους.

1.4 Διείσδυση Χλωριόντων

1.4.1 Ανθεκτικότητα και χλωριόντα

Η διείσδυση χλωριόντων (Cl⁻) στο εσωτερικό της μάζας του σκυροδέματος αποτελεί ένα από τα σπουδαιότερα προβλήματα ανθεκτικότητας, καθώς σχετίζεται άμεσα με τον κίνδυνο διάβρωσης του εγκιβωτισμένου οπλισμού. Η μεταφορά των χλωριόντων διαμέσου του δικτύου πόρων οδηγεί στην αποπαθητικοποίηση της προστατευτικής στρώσης οξειδίων του χάλυβα οπλισμού, επιταχύνοντας έτσι τις χημικές αντιδράσεις που σχετίζονται με το φαινόμενο της διάβρωσης. Έτσι τελικά προκαλείται η απώλεια των μηχανικών αντοχών και της ολκιμότητας του χάλυβα. Δεδομένου ότι οι πηγές χλωριόντων που περιβάλλουν τις συνήθεις κατασκευές είναι αρκετές (παραθαλάσσιο περιβάλλον μέσω άμεση επαφής ή αερομεταφοράς σταγονιδίων, αντιπαγωτικά άλατα προστασίας έναντι χιονοπτώσεων, πυρκαγιά σε χώρους αποθήκευσης υλικών από πολυβινύλιο, κ.λπ.), η ικανότητα του σκυροδέματος να ανθίσταται στη διείσδυση χλωριόντων στο εσωτερικό του, αποτελεί μια ιδιαίτερα ουσιαστική παράμετρο για τη βιωσιμότητα του.

1.4.2 Εμφάνιση χλωριόντων στο σκυρόδεμα και η δράση τους

Οι κατασκευές από σκυρόδεμα έρχονται συχνά σε επαφή με πηγές χλωριόντων, όπως το θαλάσσιο περιβάλλον, τα αντιπαγωτικά άλατα, τα άλατα των υπόγειων νερών ή συστατικών υλικών (αδρανή ή νερό ανάμιξης με υψηλές περιεκτικότητες αλάτων). Το προστατευτικό στρώμα οξειδίου μπορεί να διατηρηθεί τοπικά από χλωριόντα αν η συγκέντρωσή τους υπερβεί το 0.4 έως 0.6 του βάρους του τσιμέντου. Η παρουσία τους στο σκυρόδεμα οφείλεται σε πρωτογενή, αλλά και δευτερογενή αίτια [Σίδερης, 2010]. Πιο συγκεκριμένα:

- Στη φάση κατασκευής
 - Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του εβδομήντα γινόταν ευρεία (σκόπιμη) χρήση επιταχυντών για γρήγορη και φθηνότερη σκυροδέτηση, που περιείχαν χλωριόντα υπό τη μορφή του χλωριούχου ασβεστίου, CaCl_2
 - Χρήση μη καθαρών αδρανών υλικών (contaminated aggregates) από παραθαλάσσιες περιοχές, με περιεκτικότητα σε θαλασσινό νερό
 - Χρήση μη καθαρού, θαλασσινού ή υφάλμυρου, νερού (contaminated water) κατά την ανάμιξη
- Στη φάση λειτουργίας
 - Υψηλή συγκέντρωση στην υγρασία περιβάλλοντος κοντά σε παραθαλάσσιες περιοχές, αερομεταφερόμενα άλατα (airborne salts)
 - Άμεση επαφή ή ανακύκληση της έκθεσης σε θαλασσινό νερό (παφλασμός κυμάτων, παλίρροια)
 - Άμεση επαφή με άλατα που περιέχονται στο υπέδαφος (ground salts)
 - Χρήση αντιπαγωτικών αλάτων (de-icing salts) στο οδικό δίκτυο κατά του χειμερινούς μήνες για τήξη πάγων
 - Ειδικές κατασκευές (σιλό αποθήκευσης αλατιού)

1.4.3 Μορφή χλωριόντων στο σκυρόδεμα

Τα συνολικά χλωριόντα (Cl^-_{total}) που εμπεριέχονται στο σκυρόδεμα χωρίζονται στα ελεύθερα χλωριόντα (Cl^-_{free}) που συναντώνται εντός του πορώδους διαλυμένα στο υδατικό διάλυμα των πόρων του σκυροδέματος και στα δεσμευμένα χλωριόντα στη σκληρυμένη φάση του σκυροδέματος χλωριόντα (Cl^-_{bound}). Αυτά χωρίζονται με τη σειρά τους στα χημικώς δεσμευμένα

και τα φυσικώς δεσμευμένα χλωριόντα [Σίδερης (2010)]. Τα συνολικά χλωριόντα (total chlorides) προσδιορίζονται μέσω διάλυσης του δείγματος σε οξέα, διαδικασία που απομακρύνει όλα τα χλωριόντα από το δείγμα με μόνη εξαίρεση τα χλωριόντα που μπορεί να αποτελούν μέρος της χημικής δομής ορισμένων μη όξινων διαλυτών οργανικών πολυμερών [Taylor et al. (1999)]. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [RILEM TC 178-TMC, 2002], ως περιεκτικότητα σε ελεύθερα χλωριόντα (free chlorides) ορίζεται η ποσότητα εκείνη των χλωριόντων στο δείγμα σκυροδέματος, η οποία μπορεί να ανακτηθεί μέσω της εφαρμογής υψηλών πιέσεων στο δείγμα σκυροδέματος [π.χ. ACI 222.1 (1996)], ενώ ως περιεκτικότητα σε υδατοδιαλυτά χλωριόντα (water-soluble) ορίζεται η ποσότητα των χλωριόντων που μπορούν να εξαχθούν σε θερμοκρασία δωματίου μέσω της διύλισης με νερό [π.χ. ASTM X1218 (2008)].

1.5 Οριακή συγκέντρωση χλωριόντων

Η έννοια ενός επιτρεπτού ορίου χλωριόντων περιλαμβάνει μία εκτεταμένη αβεβαιότητα σχετικά με την καταλληλότητα της οριακής τιμής για διαφορετικά υλικά ή συνθήκες. Για τον λόγο αυτό η οριακή τιμή δεν πρέπει να ορίζεται μονοσήμαντα, αλλά για κάθε ξεχωριστή περίπτωση (υλικών, συνθηκών) πρέπει να λαμβάνει διαφορετικές τιμές [Taylor et al., 1999]. Η έννοια μία οριακής τιμής διαθέτει δύο ξεχωριστά στάδια. Το πρώτο σχετίζεται με την ικανότητα του τσιμέντου Portland και των πρόσθετων τσιμεντοειδών υλικών (ιπτάμενη τέφρα, πυριτική παιπάλη, σκωρία υψικαμίνου, μετακαολίνη, κ.α.) να δεσμεύουν χημικώς τα χλωριόντα, αποκλείοντας τη συμμετοχή τους στην αντίδραση της διάβρωσης [Taylor et al., 1999]. Όσα χλωριόντα δε δεσμευτούν χημικά, είναι ελεύθερα να συμβάλλουν στη διάβρωση του οπλισμού. Το δεύτερο στάδιο απαιτεί την παρουσία ενός ελάχιστου ποσοστού χλωριόντων, το οποίο ακόμα και σε περιβάλλον υψηλού pH θα καταστεί ικανό να προσπελάσει την παθητική στρώση και να ξεκινήσει τη διάβρωση του οπλισμού.

Το εν λόγω ποσοστό χλωριόντων που θα ενεργοποιήσει τους μηχανισμούς διάβρωσης του οπλισμού, δίδεται από τον λόγο χλωριόντων προς τα ιόντα υδροξυλίου. Σύμφωνα με κάποιους ερευνητές [Σίδερης, 2010], η πρώτη προσπάθεια προσδιορισμού του ελάχιστου ικανού ορίου συγκέντρωσης χλωριόντων πραγματοποιήθηκε από τον [Hausmann, 1967], ο οποίος εκτίμησε την οριακή συγκέντρωση, τη στιγμή έναρξης της διάβρωσης όταν η συγκέντρωση των χλωριόντων (Cl^-) ξεπεράσει το 60% της συγκέντρωσης των ιόντων υδροξυλίου (OH^-). Τονίζεται ότι το όριο αυτό σχετίζεται άμεσα με το pH, καθώς οποιαδήποτε έστω και μικρή διαφοροποίηση του pH θα

οδηγήσει σε σημαντική αλλαγή στα (OH). Η παραπάνω τιμή επηρεάζεται επιπλέον από τη θερμοκρασία και την υγρασία του σκυροδέματος, τα πρόσμικτα και τον τύπο του κατιόντος, τα οποία επιδρούν στην ικανότητα δέσμευσης χλωριόντων από το σκυρόδεμα. Άλλα μοντέλα που συναντώνται στη βιβλιογραφία χρησιμοποιούν οριακή συγκέντρωση χλωριόντων για έναρξη της διάβρωσης ίση με το 1,00 % κ.β. του τσιμέντου.

Η οριακή συγκέντρωση χλωριόντων [Glass G.K., Reddy B., Buenfeld N.R., 2000], θεωρείται ως η ποσότητα χλωριόντων που φθάνει στο χάλυβα και είναι αναγκαία προκειμένου να συντηρείται η αποσύνθεση του παθητικού φιλμ στην επιφάνεια του χάλυβα με συνέπεια την έναρξη της διάβρωσης. Συνήθως, δίνεται ως ο λόγος των συνολικών χλωριόντων προς το περιεχόμενο τσιμέντο του σκυροδέματος (εκφραζόμενο ως ποσοστό %). Τυπικές τιμές βρίσκονται μεταξύ 0.2 και 2.5 % κ.β. τσιμέντου [Glass G.K. and Buenfeld N.R., 2000]. Σε διάφορες περιπτώσεις βέβαια έχουν μετρηθεί - όπως προκύπτει και στον πίνακα 1.1 - τιμές είτε πάνω είτε κάτω από τα προαναφερόμενα όρια.

Εξαιτίας των διαφορών στις τιμές των συγκεντρώσεων χλωριόντων για την πρόκληση αποπαθητικοποίησης του χάλυβα έχει διεξαχθεί εκτεταμένη έρευνα. Ωστόσο δεν υπάρχει συμφωνία στις τιμές που έχουν προταθεί. Μία άλλη ερώτηση που απασχολεί τους ερευνητές είναι πως αναγνωρίζεται η αποπαθητικοποίηση. Κάποιοι συγγραφείς υποστηρίζουν ότι συμβαίνει αποπαθητικοποίηση, όταν συμβαίνει μια συγκεκριμένη μεταβολή του δυναμικού, ενώ άλλοι χρησιμοποιούν την οπτική αναγνώριση και αναγνωρίζουν την αποπαθητικοποίηση από την εμφάνιση κηλίδων σκουριάς στην επιφάνεια του χάλυβα. Άλλοι πάλι σχετίζουν την αποπαθητικοποίηση με κάποια συγκεκριμένα επίπεδα ρεύματος διάβρωσης. Σε κάποιες περιπτώσεις, οι δοκιμές για τον προσδιορισμό της οριακής συγκέντρωσης χλωριόντων διεξάγονται όχι στο ελεύθερο δυναμικό διάβρωσης αλλά κάτω από ποτενσιοστατικές συνθήκες ή κάτω από συνθήκες ανοδικής πόλωσης. Έτσι οι τιμές των χλωριόντων μπορεί να διαφέρουν σημαντικά έως και τάξεις μεγέθους (π.χ. 0.15% - 2.5%) [Alonso C. , Andrade C., Castellote M., Castro P., 2000]. Από τους Alonso et al, προτείνονται οι παρακάτω τιμές κατωφλίου ως οι τιμές που επιφέρουν μόνιμη διάβρωση.

Πίνακας 1.1: Οριακές τιμές για την πρόκληση μόνιμης διάβρωσης

Ρεύμα	$> 0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$
Συνολικά χλωριόντα (% κ.β. τσιμέντου)	1.24-3.08
Ελεύθερα χλωριόντα (κ.β. τσιμέντου)	0.39-1.16
Cl^-/OH^- (στο διάλυμα πόρων)	0.66-1.45 (σε κονιάματα και σε συνθετικό διάλυμα πόρων)

Είναι γενικώς αποδεκτό, ότι τα ελεύθερα χλωριόντα προκαλούν διάβρωση του εγκιβωτισμένου στο χάλυβα σκυροδέματος. Αυτή η διεργασία διάβρωσης χαρακτηρίζεται ως διάβρωση με βελονισμούς. Στη διαβρωτική δράση των χλωριόντων αντιτίθεται η δημιουργία και διατήρηση της παθητικής μεμβράνης - φιλμ στην επιφάνεια του χάλυβα. Χρησιμοποιώντας ένα πιθανοτικό μοντέλο ο Hausmann, απέδειξε ότι η διάβρωση μπορεί να ξεκινήσει μόνο όταν ο λόγος των ελεύθερων χλωριόντων προς τα υδροξυλιόντα ξεπεράσει την τιμή του 0.63. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώθηκε πειραματικά από τον Gouda [Angst U., Vennesland O., London 2009]. Έτσι σαν συνέπεια μπορούμε να πούμε ότι η οριακή τιμή των χλωριόντων εξαρτάται από την τιμή του pH του διαλύματος των πόρων, τον τύπο του τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκε, τον τύπο του άλατος που διαχέεται και την ενανθράκωση που μπορεί να συμβαίνει [Saetta A., Scotta R., Vitaliani R., 1993]. Άρα η παράμετρος της οριακής συγκέντρωσης Cl^- επηρεάζεται από μεγάλο αριθμό παραμέτρων όπως:

- χημεία του διαλύματος των πόρων και το pH
- λόγος w / c
- σύνθεση σκυροδέματος (τύπος τσιμέντου, χρήση προσθέτων)
- δομή των πόρων και των τριχοειδών
- περίοδος συντήρησης και θερμοκρασία συντήρησης και έκθεσης

Θα πρέπει να αναφερθεί επίσης, ότι έχει προταθεί η χρήση του λόγου των συγκεντρώσεων χλωριόντων του διαλύματος των πόρων προς τα υδροξυλιόντα αλλά και της συγκέντρωσης των ελεύθερων χλωριόντων σαν ένδειξη της οριακής συγκέντρωσης χλωριόντων. Αυτό βασίζεται στην υπόθεση, ότι μόνο είδη που βρίσκονται διαλυμένα στο διάλυμα (του υγρού των πόρων)

συνιστούν κίνδυνο διάβρωσης. Όμως η υπόθεση αυτή έχει αμφισβητηθεί καθώς δεν υπάρχει απόδειξη συσχέτισης μεταξύ της δέσμευσης χλωριόντων και της οριακής συγκέντρωσης χλωριόντων. Θα πρέπει να αναφερθεί, ότι δεν γίνεται χρήση της συγκέντρωσης ελεύθερων χλωριόντων γιατί αυτά παρουσιάζουν ένα στενό εύρος τιμών της οριακής συγκέντρωσης. Επίσης προκύπτουν, άλλα προβλήματα σχετικά με την περιεχόμενη υγρασία, όταν χρησιμοποιούνται συγκεντρώσεις ως προς το διάλυμα των πόρων [Glass G.K., Reddy B., Buenfeld N.R., 2000].

Πρόσφατα έχει προταθεί ένας νέος δείκτης για την κατάταξη του κινδύνου διάβρωσης. Βασίζεται στα διαλυτά χλωριόντα, τα οποία είναι παρόντα, όταν το pH στο διάλυμα σκυροδέματος μειωθεί και φθάσει στο τέλος του δείκτη φαινολοφθαλείνης. Εκφράζεται ως λόγος mole (mole χλωριόντων Cl^- που ελευθερώνονται / mole υδρογονοκατιόντων που καταναλώνονται). Ένας λόγος 0.01 τυπικά αντιστοιχεί σε περιεχόμενα χλωριόντα 0.5% κ.β τσιμέντου.

Εξαιτίας όσων αναφέρονται στις προηγούμενες παραγράφους δεν έχει ακόμη βρεθεί μοντέλο για τον ορισμό της οριακής συγκέντρωσης Cl^- κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Ο πιο σημαντικός παράγοντας φαίνεται να είναι η παρουσία κενών στο σκυρόδεμα. Αυτά τα κενά θα παρουσιάσουν κίνδυνο διάβρωσης όταν είναι εν μέρει γεμάτα με διάλυμα πόρων. Ωστόσο δεν έχει αναφερθεί ακόμα ο τρόπος της επίδρασης αυτού του παράγοντα. Έτσι μέχρι σήμερα η οριακή συγκέντρωση χλωριόντων είναι καλύτερο να θεωρείται ότι σχετίζεται με την πιθανότητα έναρξης της διάβρωσης.

Διάφοροι άλλοι παράγοντες επηρεάζουν, σε μικρότερο βαθμό, την οριακή συγκέντρωση χλωριόντων. Ανάμεσα στους παράγοντες είναι αυτοί, που σχετίζονται με το εξωτερικό περιβάλλον (υγρασία, θερμοκρασία και πηγή χλωριόντων), το λόγο w/c και το βάθος της επικάλυψης, καθώς και με τις χημικές ιδιότητες του συνδετικού υλικού όπως επίσης και με το ηλεκτροχημικό δυναμικό του χάλυβα. Για παράδειγμα η έναρξη της διάβρωσης μπορεί να εμποδιστεί, όταν το σκυρόδεμα είναι πολύ ξηρό, ενώ σε πολύ υγρά περιβάλλοντα η διάβρωση μπορεί να εμποδιστεί από την περιορισμένη ύπαρξη οξυγόνου.

Επειδή έχει αποδειχθεί ότι είναι ιδιαίτερα δύσκολη η μέτρηση των ελεύθερων χλωριόντων έχει επικρατήσει να δίνονται οι τιμές της οριακής συγκέντρωσης ως επί τις % των συνολικών χλωριόντων.

Όπως είναι φανερό από τον πίνακα 1.3 παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις στις τιμές της οριακής συγκέντρωσης των χλωριόντων. Οι τιμές διαφέρουν επίσης και εξαιτίας του γεγονότος

ότι προκύπτουν από μετρήσεις σε πραγματικές κατασκευές ή πειράματα στο εργαστήριο, των μεθόδων που χρησιμοποιούνται, τις συνθήκες έκθεσης, την ποιότητα του σκυροδέματος αλλά και τον τύπο τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκε [Ferreira Rui Miguel, Guimaraes 2004], και άλλους παράγοντες που έχουν αναφερθεί παραπάνω. Επιπρόσθετα με τους λόγους που έχουν αναφερθεί οι παρακάτω παράγοντες σύμφωνα με τη βιβλιογραφία επηρεάζουν την τιμή της οριακής συγκέντρωσης:

- Κάποια αποτελέσματα προέρχονται από χάλυβα που εκτίθεται σε διάλυμα με χλώριο, ενώ άλλα αναφέρονται σε χάλυβα εγκιβωτισμένο σε σκυρόδεμα ή κονίαμα ή τσιμεντόπαστα. Έχουν αναφερθεί σημαντικά μεγαλύτερες της οριακής συγκέντρωσης στον εγκιβωτισμένο χάλυβα από ότι στον γυμνό και αυτό οφείλεται στη βελτιωμένη αντίσταση του χάλυβα εξαιτίας της αλληλεπίδρασης στη διεπιφάνεια πάστας - χάλυβα και στο σχηματισμό υδροξειδίου του ασβεστίου στη ζώνη της διεπιφάνειας.
- Διαφοροποιήσεις στη δέσμευση χλωριόντων και σχηματισμός οξειδίων του σιδήρου προκύπτουν όταν τα χλωριόντα υπάρχουν κατά τη χύτευση του σκυροδέματος σε σχέση με δοκίμια τα οποία δεν περιέχουν αρχικά ελεύθερα χλωριόντα.
- Το δυναμικό του παθητικοποιημένου χάλυβα και η αλκαλικότητα του διαλύματος των πόρων επηρεάζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό την τιμή της οριακής συγκέντρωσης χλωριόντων.

Το Αμερικανικό Ινστιτούτο σκυροδέματος (ACI), συστήνει τα παρακάτω όρια χλωριόντων (Πίνακας 1.2).

Πίνακας 1.2: Οριακή συγκέντρωση χλωριόντων για νέα κατασκευή (ACI 2002)

Τύπος μέλους	Μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό υδατοδιαλυτών χλωριόντων σε σκυρόδεμα, %κ.β. τσιμέντου
Προεντεταμένο σκυρόδεμα	0.06
Οπλισμένο σκυρόδεμα εκτεθειμένο σε χλώριο	0.15
Οπλισμένο σκυρόδεμα το οποίο θα είναι στεγνό ή προστατευμένο από υγρασία	1.00
Άλλη κατασκευή οπλισμένου σκυροδέματος	0.3

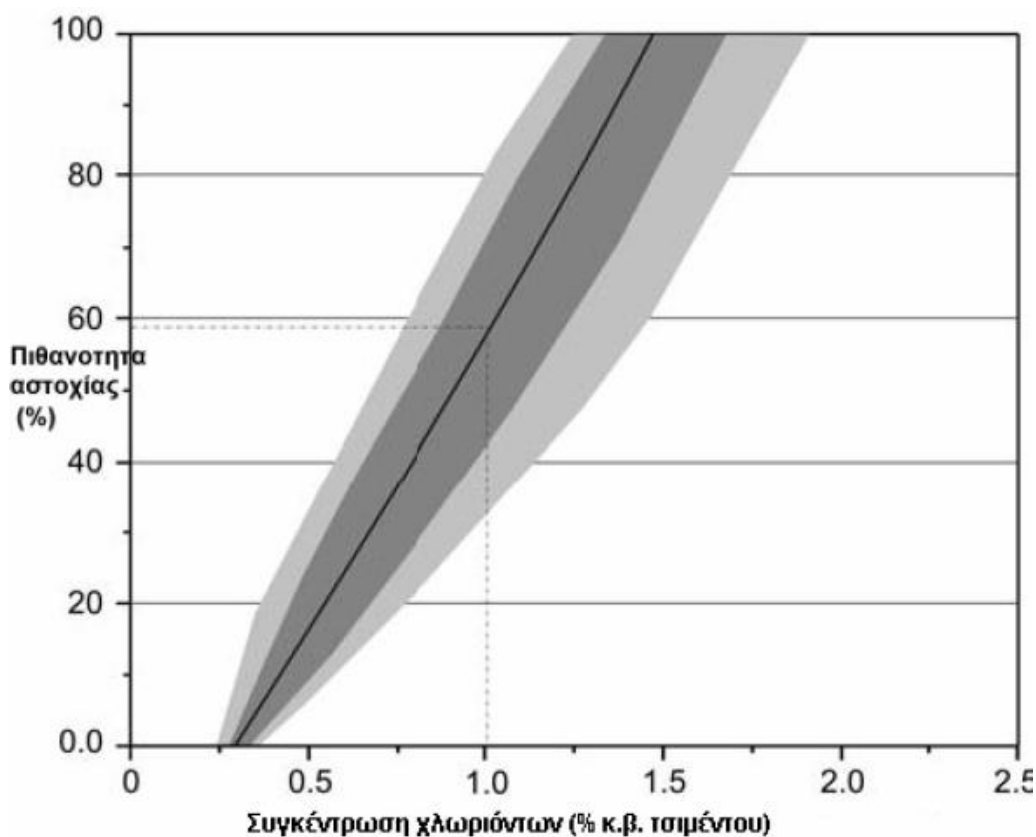
Στη Βρετανία η μέγιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση χλωριόντων για κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος ορίζεται στο 0.4% κ.β. τσιμέντου. Το 1999 αναγνωρίστηκε η πιθανοτική φύση του επιπέδου της οριακής συγκέντρωσης χλωριόντων και υιοθετήθηκε από το BRE Digest 444 Part 2.

Στον πίνακα 1.3 δίνονται οι αντίστοιχες τιμές εκφρασμένες κατά βάρος σκυροδέματος και σε διαφορετικές μονάδες μέτρησης.

Πίνακας 1.3: Οριακή συγκέντρωση χλωριόντων σε διάφορες μονάδες

0.15% κ.β. τσιμέντου	0.023% κ.β. σκυροδέματος	0.53 Kg / m ³	0.9 lb/yd ³	230 ppm κ.β. σκυροδέματος
----------------------	--------------------------	--------------------------	------------------------	---------------------------

Στο Σχήμα 1.6 φαίνεται η πιθανότητα διάβρωσης εξαιτίας χλωριόντων σε μη ενανθρακωμένο σκυρόδεμα [Ferreira Rui Miguel, Guimaraes 2004].



Σχήμα 1.6: Εκτιμώμενος Κίνδυνος διάβρωσης εξαιτίας της ύπαρξης χλωριόντων (BRE Digest 444 – 1999).

1.6 Τρόποι προστασίας οπλισμένου σκυροδέματος

Η εκ των υστερών αντιμετώπιση του προβλήματος της διάβρωσης των οπλισμών απαιτεί όπως είναι προφανές μεγαλύτερο και μάλιστα πολλαπλάσιο κόστος από ότι η εξ' αρχής αντιμετώπιση του με τη χρήση κατάλληλων μέτρων για την αποφυγή ή τον περιορισμό του προβλήματος που θα δημιουργηθεί με το πέρασμα του χρόνου. Η διάφορα κόστους καθιστά, όχι απλά σκόπιμη, αλλά επιβαλλόμενη τη λήψη μέτρων μείωσης του κίνδυνου διάβρωσης κατά το στάδιο της κατασκευής.

Σε συνηθισμένες περιπτώσεις αυτό μπορεί να γίνει σχετικά εύκολα με την κατάλληλη επιλογή του πάχους της επικάλυψης που ορίζουν οι κανονισμοί, τη διάταξη των οπλισμών και δυσκολότερα με τη βελτίωση της ποιότητας του σκυροδέματος. Η σημαντικότερη παράμετρος σχετικά με την ποιότητα του σκυροδέματος είναι η διαπερατότητα, η μείωση της οποίας επιτυγχάνεται με επιλογή χαμηλού λόγου νερό προς τσιμέντο (w/c) και υψηλή περιεκτικότητα τσιμέντου. Στην πράξη το τσιμέντο δεσμεύει, φυσικά ή χημικά, περίπου το 0,4 του βάρους του σε νερό. Για να αυξηθεί όμως η εργασιμότητα συχνά η σχέση αυτή αυξάνεται σε 0,5 ή και 0,6 πολλές φορές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το νερό που δεν είναι δυνατό να δεσμευτεί, να εξατμίζεται και να αφήνει τον όγκο του σαν τριχοειδή και πόρους, που αργότερα θα αποτελέσουν αφετηρία της ενανθράκωσης. Εξίσου σημαντική και αρκετά αποτελεσματική από πλευρά κόστους είναι η καλή συμπίκνωση και η υγρή συντήρηση (με υγρές λινάτσες) για όσο το δυνατό περισσότερες μέρες καθώς και η χρήση καθαρού τσιμέντου Portland είτε η χρήση ποζολονικού τσιμέντου, όπου οι ποζολάνες αντικαθιστούν αδρανή. Δυσμενής για την ποιότητα της επικάλυψης του σκυροδέματος είναι οι μη στεγανοί ξυλότυποι, οι οποίοι επιτρέπουν τη διαρροή τσιμεντοπολτού.

Επειδή η υγρασία καθορίζει τη διάβρωση, η διαμόρφωση των δομικών μελών θα πρέπει να γίνεται έτσι ώστε να αποφεύγεται η συγκράτηση νερού στην επιφάνειά τους, ώστε να μην μπορεί να διείσδυση η υγρασία προς το εσωτερικό του μέλους. Με τα εμφανή σκυροδέματα που χρησιμοποιούνται θα πρέπει να εξασφαλίζεται η ελάχιστη επικάλυψη επιμελώς, μιας και δεν υπάρχει επίχρισμα. Εκτός των παραπάνω στο εξωτερικό έχουν εφαρμοστεί και άλλες λύσεις, με πολύ μεγαλύτερο όμως κόστος. Τέτοιες είναι η χρήση ανοξειδωτων ή γαλβανισμένων ράβδων, ή ράβδων με εποξειδοτική ρητίνη ή μη μεταλλικές ράβδοι, η καθοδική προστασία των οπλισμών, η επικάλυψη των επιφανειών με διαπερατές μεμβράνες ή στρώσεις αδιαπέραστου σκυροδέματος ειδικής σύνθεσης και η χρήση χημικών προσθέτων, γνωστών ως “αναστολείς διάβρωσης”.

Η εκ των υστερών αντιμετώπιση του προβλήματος της διάβρωσης των οπλισμών είναι πολύ πιο δαπανηρή από το να πάρουμε εξ αρχής τα απαραίτητα μέτρα και να τηρήσουμε τις αντίστοιχες κατασκευαστικές λεπτομέρειες. Επιπλέον κατά τη διάρκεια των εργασιών μπορεί να διαταραχθεί η ομαλή λειτουργία του κτηρίου, πράγμα εξαιρετικά δύσκολο σε περιπτώσεις όπως π.χ. αυτές των νοσοκομείων, αφού απαιτείται η αφαίρεση των επικαλύψεων, ακόμα και τμημάτων του στοιχείου. Η επιλογή της επέμβασης εξαρτάται από το αν οι παράγοντες που ευνοούν τη διάβρωση έχουν περιοριστεί στην επικάλυψη ή έχουν φτάσει μέχρι τους οπλισμούς, και αν ναι σε τι βαθμό έχουν φθαρεί.

Στο εμπόριο διατίθενται τα τελευταία χρόνια μια πληθώρα υλικών τα οποία θεωρούνται ότι καθυστερούν την εμφάνιση της διάβρωσης σε νέες κατασκευές ή την επιβραδύνουν στις υφιστάμενες ή προκαλούν ακόμα και επαναπαθητικοποίηση του οπλισμού που έχει αποπαθητικοποιηθεί λόγω ενανθράκωσης ή χλωριόντων. Μερικά από αυτά είτε είναι σε μορφή προσμείκτων (για νέες κατασκευές), είτε με τη μορφή διαλύματος που απλώνεται στην επιφάνεια με σκοπό τον εμποτισμό της μάζας του σκυροδέματος, είτε σαν υλικά επικαλύψεων της επιφάνειάς του ώστε να στεγανοποιηθεί έναντι σε υγρά και αέρια. Δυστυχώς όμως συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητά τους δε μπορούν να εξαχθούν από τα εργαστηριακά πειράματα αλλά μετά από χρόνια χρήσης τους [Μιχαήλ Ν. Φαρδής, 2005].

Ενδεικτικές προστασίες για την είσοδο διαβρωτικών ουσιών στο σκυρόδεμα είναι οι εξής:

➤ Υδατοστεγείς μεμβράνες [Τάσιος Θ. Π. και Αλιγιζάκη Κ., 1993]

Διατίθενται συνήθως σε έτοιμα βιομηχανοποιημένα φύλλα αλλά και σε υγρά υλικά. Τα υγρά υλικά είναι πιο ακριβά αλλά πιο εύχρηστα και πιο ακριβή στην εφαρμογή τους, η δε ποιότητα της μεμβράνης μπορεί να διαφέρει σημαντικά. Οι απαιτήσεις που ικανοποιεί είναι: εύκολη τοποθέτηση, καλή πρόσφυση με το υπόστρωμα, δεν αντιδρά με τα συστατικά του σκυροδέματος, εμποδίζει τη διείσδυση των χλωριόντων και της υγρασίας υπό διάφορες συνθήκες. Η τοποθέτηση των μεμβρανών στο σκυρόδεμα θα πρέπει να γίνεται κάτω από καλές καιρικές συνθήκες και με αυστηρή τήρηση των κατασκευαστικών λεπτομερειών. Οι μεμβράνες κινδυνεύουν από τις φυσαλίδες οι οποίες δημιουργούνται από τη διόγκωση της υγρασίας και των αέριων που παγιδεύονται στο σκυρόδεμα. Αντίθετα αυτές που δημιουργούνται μέσα στην μεμβράνη, δε μειώνουν την προστασία του σκυροδέματος ως προς τη διείσδυση των χλωριόντων ή της υγρασίας. Οι καιρικές συνθήκες το πορώδες και η υγρασία του σκυροδέματος καθορίζουν την εμφάνιση των φυσαλίδων. Εφόσον έχει αποφασιστεί να χρησιμοποιηθούν μεμβράνες θα πρέπει

να γνωρίζουμε ότι δεν έχουν μεγάλη ανθεκτικότητα στο χρόνο και θα πρέπει σε τακτά χρονικά διαστήματα να τις αλλάζουμε, αυτό όμως δεν είναι και τόσο εύκολο πάντα.

Μερικές από τις μεθόδους που τηρούνται προκειμένου να αντιμετωπίσουμε αλλά και να προστατεύσουμε τις υφιστάμενες κατασκευές από τα προβλήματα διάβρωσης είναι:

➤ Προστατευτικά επιστρώματα στο σκυρόδεμα [Τάσιος Θ. Π. και Αλιγιζάκη Κ., 1993]

Τα επιστρώματα γίνονται από ειδικά σκυροδέματα υψηλής ποιότητας και αντοχής. Αυτά είναι Portland ή σκυρόδεμα με πρόσθετα πολυμερή. Σκοπός τους είναι να μειώσουν τη διαπερατότητα που έχει το ήδη υπάρχον σκυρόδεμα.



Εικόνα 1.1: Προστατευτικά επιστρώματα σκυροδέματος (Πηγή: <http://samstroy.com>)

Πριν την κατασκευή τους απαιτείται προετοιμασία του υποστρώματος ώστε να επιτευχθεί η συνεργασία μεταξύ παλιού και νέου υλικού. Η παρασκευή τους γίνεται επί τόπου ενώ πριν την τοποθέτησή τους απαιτείται διαβροχή του υποστρώματος. Το πάχος τους είναι συνήθως 40-50 mm. Είναι απαραίτητη η συντήρησή τους για 72 ώρες γιατί οι υψηλές θερμοκρασίες του περιβάλλοντος προκαλούν πρόωρη ξήρανση του υποστρώματος και συστολή ξήρανσης η οποία αποτελεί τον σοβαρότερο κίνδυνο.

➤ Εμποτισμός του σκυροδέματος με πολυμερή [Τάσιος Θ. Π. και Αλιγιζάκη Κ., 1993]

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται όταν το περιβάλλον είναι πολύ διαβρωτικό ώστε να μειωθεί η διαπερατότητα του σκυροδέματος. Για το σκοπό αυτό γίνεται πλήρωση των κενών με πολυμερή σε βάθος 35-50mm. Η διαδικασία που ακολουθείται περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- Καθαρισμός της επιφάνειας του σκυροδέματος από τυχόν ξένες ουσίες
- Άπλωμα άμμου στο σκυρόδεμα ώστε να αποφευχθεί το θερμικό σοκ του σκυροδέματος κατά την επακολουθούσα εφαρμογή υψηλών θερμοκρασιών

- Ξήρανση του σκυροδέματος που πραγματοποιείται με διατήρηση υψηλών θερμοκρασιών για αρκετό χρονικό διάστημα (120 C° για 8 ώρες)
- Σταδιακή απόψυξη του σκυροδέματος με ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην απορροφηθεί υγρασία από το περιβάλλον (38 C° για 12-36 ώρες)
- Αφαίρεση του αέρα από το σκυρόδεμα με εφαρμογή κενού
- Προσθήκη μονομερούς
- Προσθήκη αδιάβροχων μεμβρανών στην επιφάνεια, ώστε να εμποδίσουμε την εξάτμιση του μονομερούς
- Θερμικός καταλυτικός πολυμερισμός του μονομερούς στους 74 C° για 5 ώρες

Το συνηθέστερο μονομερές είναι το μεθακρυλικό μεθύλιο διότι έχει μικρό ιξώδες, υψηλό σημείο βρασμού, εύκολο πολυμερισμό και δεν είναι τοξικό, έχει όμως υψηλό κόστος. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι εφαρμόζεται σ' όλα τα σκυροδέματα ανεξάρτητα από την ποιότητα ή την σύστασή του. Επίσης βελτιώνει όλες τις ιδιότητές του. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι η ιδιαίτερη προσοχή που πρέπει να δείξουμε κατά τη διάρκεια της ξήρανσης του σκυροδέματος γιατί μπορεί να προκληθεί ρηγμάτωση. Επίσης απαιτείται ειδικός εξοπλισμός και εξειδικευμένο προσωπικό.

➤ Αφαίρεση χλωριόντων από το σκυρόδεμα [Τάσιος Θ. Π. και Αλιγιζάκη Κ., 1993]

Η μέθοδος έχει εφαρμοστεί για την αφαίρεση χλωριόντων από καταστρώματα γεφυρών όπου και αφαιρέθηκαν έως και το 90% των χλωριόντων. Τα χλωριόντα αφαιρούνται ηλεκτροχημικά μιας και η μέθοδος βασίζεται στην αρχή τη ηλεκτροωσμώσεως. Έτσι λοιπόν χρησιμοποιώντας έναν κατάλληλο ηλεκτρολύτη ανταλλαγής ιόντων και ένα μεταλλικό πλέγμα το οποίο απλώνεται στην επιφάνεια του σκυροδέματος, χρησιμεύοντας ως άνοδος ενώ ο σπλισμός δρα ως κάθοδος. Εφαρμόζοντας το δυναμικό τα χλωριόντα έλκονται από τη θετικά φορτισμένη άνοδο με αποτέλεσμα να δεσμευτούν από τη ρητίνη. Η μέθοδος είναι δαπανηρή, απαιτεί την εφαρμογή υψηλού δυναμικού που έχει όμως ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγάλων θερμοκρασιών στο σκυρόδεμα το οποίο κινδυνεύει να ρηγματωθεί. Επιπλέον αυξάνεται η διαπερατότητα του σκυροδέματος κατά πέντε φορές και θα πρέπει να γίνει και εμποτισμός του σκυροδέματος με πολυμερή. Τέλος αν εφαρμόσουμε μεγάλες πυκνότητες ρεύματος μειώνεται η αντοχή συνάφειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ

2.1 Εισαγωγή

Τα φαινόμενα που συνδέονται με την παρουσία των χλωριόντων στο σκυρόδεμα, είναι ιδιαίτερα σύνθετα και δεν έχουν κατανοηθεί πλήρως, παρά την έρευνα που έχει διεξαχθεί στο θέμα αυτό και τον μεγάλο αριθμό άρθρων που έχουν γραφεί.

Τα περισσότερα από τα δημοσιευμένα μοντέλα διάρκειας ζωής της κατασκευής που συνδέονται με τη διάβρωση του χάλυβα στο σκυρόδεμα έχουν ακολουθήσει ένα απλοποιημένο μοντέλο που εισήχθη για πρώτη φορά [Tuutti, 1982], όπου ο μηχανισμός διάβρωσης θεωρείται διαδικασία δύο σταδίων όπως απεικονίζεται στο Σχ. 2.1:

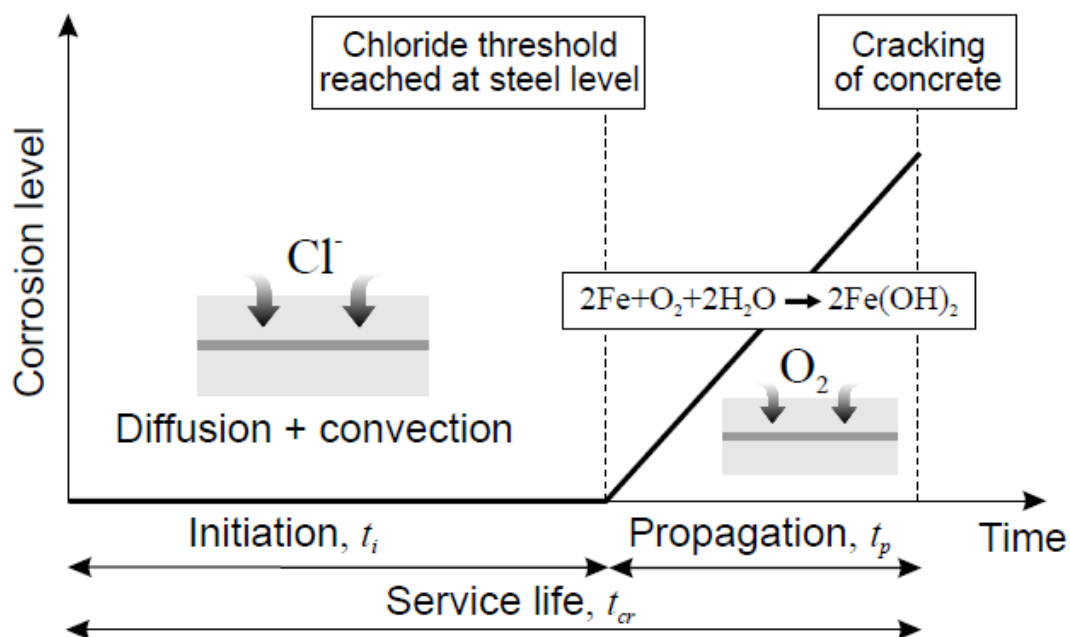
1. Περίοδος έναρξης (t_i), κατά την οποία ο χάλυβας παραμένει σε παθητική προστασία. Η εμφάνιση της διάβρωσης αντιστοιχεί στην αποπαθητικοποίηση του χάλυβα οπλισμού είτε λόγω της ενανθράκωσης της επικάλυψης του σκυροδέματος, είτε λόγω της συσσώρευσης χλωριόντων στην περιοχή του χάλυβα.
2. Περίοδος διάδοσης (t_p), κατά την οποία αποδομείται το σκυρόδεμα λόγω της απώλειας συνάφειας χάλυβα και σκυροδέματος και της συσσώρευσης προϊόντων διάβρωσης γύρω από την επιφάνεια της ράβδου. Αυτή η φάση διαρκεί μέχρι το σκυρόδεμα να φτάσει σε ανεπανόρθωτες φθορές.

Ως εκ τούτου, η συνολική διάρκεια ζωής (t_{cr}) είναι ο χρόνος κατά τον οποίο το κάλυμμα του σκυροδέματος παρουσιάζει ρωγμές ως αποτέλεσμα των θλιπτικών τάσεων που δέχεται από τα προϊόντα διάβρωσης. Δηλαδή είναι ο χρόνος στον οποίο οι εσωτερικές ρωγμές που προκαλούνται λόγω διαστολής του διαβρωμένου χάλυβα, διαδίδονται στην επικάλυψη του σκυροδέματος και εμφανίζονται στην εξωτερική επιφάνεια και ορίζεται ως:

$$t_{cr} = t_i + t_p$$

2.1

Για τη μοντελοποίηση της μεταφοράς χλωριόντων στον χάλυβα οπλισμού (στάδιο έναρξης), χρησιμοποιείται μία τροποποιημένη εκδοχή του 2ου νόμου του Fick, στην οποία περιλαμβάνονται η διεργασία της ιοντικής διάχυσης υδατικού διαλύματος χλωριόντων και η δέσμευση χλωριόντων. Για τη διάβρωση που προκαλείται από τα χλωριόντα, η διάρκεια της περιόδου έναρξης εξαρτάται από τον ρυθμό διείσδυσης των χλωριόντων στο σκυρόδεμα, το πάχος της επικάλυψης σκυροδέματος, την υγρασία του σκυροδέματος καθώς και τη συγκέντρωση χλωριόντων που απαιτείται για την έναρξη της διάβρωσης, γνωστή και ως οριακή συγκέντρωση [Tuutti, 1993]. Μόλις ο χάλυβας αποπαθητικοποιηθεί, ο ρυθμός της διάβρωσης καθορίζει την ταχύτητα φθοράς (Andrade και Alonso, 1996). Οι κρίσιμοι παράγοντες για τον προσδιορισμό του ρυθμού διάβρωσης περιλαμβάνουν το ρυθμό της διάχυσης του οξυγόνου στο χάλυβα, την αντίσταση του διαλύματος των πόρων του σκυροδέματος και τη θερμοκρασία του σκυροδέματος (Tuutti, 1982, L'opez και Gonz'ales, 1993). Όταν προκληθούν ορατές ρωγμές με πλάτος περίπου 0,1 έως 0,2 mm εξαιτίας της διάβρωσης, ο σχεδιασμένος χρόνος ζωής του οπλισμένου σκυροδέματος έχει παρέλθει [Tuutti, 1982]. Έρευνα για τη μεταφορά χλωριόντων στο σκυρόδεμα και τη διάβρωση του χάλυβα έχει δείξει ποιες μεταβλητές επηρεάζουν κάθε στάδιο του μοντέλου που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Μοντελοποίηση ωφέλιμου χρόνου ζωής κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα (Tuutti, 1982).

Τα περισσότερα από τα μαθηματικά μοντέλα που ασχολούνται με τα χλωριόντα που προκαλούν διάβρωση του οπλισμού, έχουν λάβει υπόψη μόνο το στάδιο έναρξης, προσδιορίζοντας το τέλος της διάρκειας ζωής με την έναρξη της αποπαθητικοποίησης του χάλυβα (Browne, 1982; Funahashi, 1990; Maage, 1995; Tang και Nilsson, 1996). Η γενική προσέγγιση στη μοντελοποίηση της διάρκειας ζωής που συνδέεται με τη διάβρωση του οπλισμού, επικεντρώνεται στο στάδιο της έναρξης κατά την εξέταση του σχεδιασμού νέων κατασκευών, προκειμένου να διασφαλιστεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη περίοδο ωφέλιμης ζωής πριν από την αποπαθητικοποίηση του χάλυβα. Ενώ το στάδιο διάδοσης χρησιμοποιείται στην αξιολόγηση κατασκευών που ήδη υπάρχουν αφού έχει αρχίσει η αποπαθητικοποίηση του χάλυβα. Για τη μοντελοποίηση της ενεργής διάβρωσης (στάδιο διάδοσης), ο ρυθμός της διάβρωσης συνδέεται με τα χαρακτηριστικά πόλωσης της ανόδου και της καθόδου καθώς και με τη διαθεσιμότητα οξυγόνου στην κάθοδο. Αυτό προκύπτει ως αποτέλεσμα της αρχής διατήρησης μάζας του οξυγόνου που διαχέεται στο σκυρόδεμα.

Τα διαφορετικά φυσικά και χημικά φαινόμενα που οδηγούν στη διάβρωση του χάλυβα μπορούν επομένως να περιγραφούν από τους μηχανισμούς διάχυσης θερμότητας και υγρασίας μέσω των πόρων του σκυροδέματος, από τη μεταφορά χλωριόντων και οξυγόνου στον χάλυβα και από τα χαρακτηριστικά πόλωσης. Η μαθηματική διατύπωση βασίζεται άμεσα σε βασικούς φυσικούς νόμους, όπως η διατήρηση της μάζας και της ενέργειας. Αυτό καθιστά το μοντέλο εφαρμόσιμο σε ένα ευρύ φάσμα κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, συμπεριλαμβανομένων και εκείνων που κατασκευάζονται από σκυρόδεμα υψηλής ποιότητας για τις οποίες δεν υπάρχουν αρκετά στοιχεία της απόδοσής τους στο χρόνο.

Οι κύριες διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν το φαινόμενο μειώνονται σε ένα σύνολο εξισώσεων διατήρησης με δύο χωρικές μεταβλητές, x και y , και μία χρονική μεταβλητή, t . Επειδή η τρίτη διάσταση (προσανατολισμένη κατά το μήκος της ράβδου οπλισμού) θεωρείται ότι είναι απειρομήκης και υπόκειται σε ομοιόμορφες συνθήκες, αγνοείται, και το πρόβλημα αντιμετωπίζεται σε δύο διαστάσεις, αντί τρεις. Θεωρείται επιπλέον για απλούστευση ότι το σκυρόδεμα δεν είναι ρηγματωμένο.

2.2 Διείσδυση χλωριόντων

Τα χλωριόντα μπορούν να ενσωματωθούν στο σκυρόδεμα από τα συστατικά ανάμειξης στον χρόνο παρασκευής (συσσωματώματα, νερό ανάμειξης, επιταχυντές μείγματος) ή από εξωτερικές πηγές (αντιπαγωτικά άλατα, θαλασσινό νερό, υπόγεια ύδατα). Οι σύγχρονες προδιαγραφές της τεχνολογίας του σκυροδέματος έχουν περιορισμούς σχετικά με τις επιτρεπτές τιμές χλωριόντων που προέρχονται από την παρασκευή του μείγματος. Η συμμόρφωση με αυτές τις προδιαγραφές πρέπει να αποκλείει τη διάβρωση που προκαλείται από χλωριόντα εκτός εάν εισέρχονται από εξωτερικές πηγές και διεισδύσουν στο σκυρόδεμα.

Τα χλωριόντα που προέρχονται από εξωτερικές πηγές διεισδύουν στο σκυρόδεμα με έναν συνδυασμό μηχανισμών μεταφοράς:

- Με ιοντική διάχυση (diffusion) εξαιτίας της ύπαρξης βαθμίδας συγκέντρωσης χλωριόντων ανάμεσα στην εκτιθέμενη επιφάνεια σκυροδέματος και στο διάλυμα πόρων της πάστας του τσιμέντου, με προϋπόθεση ότι το σκυρόδεμα είναι κορεσμένο.
- Με απορρόφηση νερού που περιέχει χλωριόντα μέσα σε μη κορεσμένο σκυρόδεμα (μεταγωγή - convection). Αυτό είναι ένα σύνηθες φαινόμενο σε καταστρώματα γεφυρών όπου εκτίθενται σε αντιπαγωτικά άλατα και το σκυρόδεμα είναι μερικώς κορεσμένο, ή σε ζώνες παλίρροιας και ζώνες κυματισμού λιμενικών κατασκευών.
- Με ροή νερού στο σκυρόδεμα εξαιτίας της ύπαρξης βαθμίδας πίεσης (διαπερατότητα). Αυτός ο τύπος της διείσδυσης χλωριόντων είναι συνήθης στις πλωτές κατασκευές ή στις κατασκευές με υπόγεια επιφάνεια από σκυρόδεμα, όπου η υδροστατική πίεση αυξάνεται με το βάθος.
- Με διασπορά ή διάχυση χλωριόντων εξαιτίας τριχοειδών φαινομένων, διαφοράς υγρασίας μέσα στο σκυρόδεμα ή υδροστατικής πίεσης.
- Με την κίνηση του νερού μέσα στο σκυρόδεμα που εκτίθεται σε νερό στη μια πλευρά του και στην άλλη όχι. Αυτή η περίπτωση είναι τυπική στις σήραγγες.

Επιπλέον, θα πρέπει να αναφερθεί ακόμα μηχανισμός μεταφοράς, που αφορά την μετακίνηση των χλωριόντων μετά την έναρξη της διάβρωσης. Ο μηχανισμός αναφέρεται στη μετακίνηση (migration) των χλωριόντων, η οποία επιβάλλεται μέσω της διαφοράς δυναμικού. Η διαφορά δυναμικού που δημιουργείται μεταξύ διαβρωμένων και μη περιοχών του οπλισμού, προκαλεί τη ροή των αρνητικά φορτισμένα χλωριόντων προς την ήδη διαβρωμένη περιοχή.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία Stanish et al. (1997), Sirinatinanon ang Khatri (1999), Audenaert et al. (2010), ο κυριότερος μηχανισμός προσβολής είναι αυτός της διάχυσης, ειδικά σε περιπτώσεις κορεσμένου περιβάλλοντος. Γενικά, όταν η επιφάνεια του σκυροδέματος είναι εκτεθειμένη σε χλωριόντα, ο μηχανισμός της διάχυσης ενεργοποιείται, λόγω της διαφοράς συγκέντρωσης μεταξύ της επιφάνειας και του εσωτερικού του σκυροδέματος. Τα μοντέλα διάχυσης εφαρμόζονται στις κατασκευές από σκυρόδεμα που βρίσκονται μόνιμα σε υγρό περιβάλλον και δεν λαμβάνουν υπόψη τους τα χλωριόντα που διεισδύουν στις κατασκευές από σκυρόδεμα που υπόκεινται σε κύκλους ύγρανσης αφύγρανσης, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση των ζωνών παλίνρροιας και κυματισμού σε κατασκευές λιμενικών έργων ή έργων οδοποιίας που εφαρμόζονται αντιπαγωτικά άλατα.

Η μεταγωγή, γνωστή και ως προσρόφηση μέσω τριχοειδών πόρων, είναι ένας από τους συνηθέστερους μηχανισμούς προσβολής από χλωριόντα σε περιπτώσεις κύκλων ύγρανσης και ξήρανσης της επιφάνειας του σκυροδέματος (ειδικά σε περιπτώσεις στεγνών επιφανειών). Δεν μπορεί από μόνη της όμως να δημιουργήσει πρόβλημα στον οπλισμό. Μειώνει τη διαθέσιμη απόσταση που χρειάζεται να διανύσουν τα χλωριόντα μέχρι αυτά να φθάσουν τη στάθμη του οπλισμού μέσω διάχυσης. Η διαδικασία της μεταγωγής προσεγγίζει το νόμο της διάχυσης.

Σημειώνεται ότι οι εν λόγω μηχανισμοί δρουν με σημαντικά αργούς ρυθμούς και κατά συνέπεια, η μελέτη του φυσικού φαινομένου δεν είναι δυνατό να εκτιμηθεί σε πραγματικούς χρόνους παρά μόνο μέσω επιταχυνόμενων μεθόδων.

2.2.1 Διάχυση χλωριόντων

Είναι γνωστό ότι διάχυση συμβαίνει όταν υπάρχει διαφορά συγκέντρωσης. Η διάχυση των χλωριόντων στο σκυρόδεμα συμβαίνει, όταν η συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου στο εξωτερικό περιβάλλον είναι υψηλότερη από τη συγκέντρωσή τους στους πόρους του σκυροδέματος.

Η διείσδυση των χλωριόντων στο σκυρόδεμα μπορεί να συμβεί μόνο διαμέσου του διαλύματος των πόρων του σκυροδέματος. Οι αντιδράσεις με την ενυδατωμένη τσιμεντόπαστα συμβαίνουν στο διάλυμα των πόρων και η διάχυση των χλωριόντων αναφέρεται ως ιοντική διάχυση. Σε αυτή τη διεργασία διάχυσης ο βαθμός κορεσμού των πόρων του σκυροδέματος παίζει σημαντικό ρόλο. Η ιοντική διάχυση είναι πιο αποτελεσματική όταν το σκυρόδεμα είναι κορεσμένο, αλλά μπορεί να συμβεί και όταν το σκυρόδεμα είναι μερικώς κορεσμένο.

Υπό την προϋπόθεση ότι το σκυρόδεμα βρίσκεται σε κορεσμένη κατάσταση, τα χλωριόντα διεισδύουν στο σκυρόδεμα με διάχυση λόγω της υπάρχουσας βαθμίδας συγκέντρωσης μεταξύ της εκτεθειμένης επιφάνειας και του διαλύματος πόρων της πάστας τσιμέντου (κινητήρια δύναμη διάχυσης). Αυτή η διαδικασία περιγράφεται μαθηματικά από τον πρώτο νόμο διάχυσης του Fick, σύμφωνα με τον οποίο ο ρυθμός μεταφοράς J_c της διάχυσης χλωριόντων μέσω μίας επιφάνειας κάθετης προς την κατεύθυνση της διάχυσης, είναι ανάλογος προς τη βαθμίδα συγκέντρωσης και για τη μονοδιάστατη ροή δίνεται από τον εξής τύπο:

$$J_c = -D_c \left(\frac{\partial C_{fc}}{\partial x} + \frac{\partial C_{fc}}{\partial y} \right) [kg/m^2 \cdot s] \quad 2.2$$

Όπου:

- J_c = ροή των χλωριόντων εξαιτίας της διάχυσης ($kg/m^2 \cdot s$)
- D_c = συντελεστής διάχυσης χλωριόντων (m^2/s)
- C_{fc} = συγκέντρωση των διαλυμένων χλωριόντων σε διάλυμα πόρων (ελεύθερα χλωριόντα) σε βάθος x και y (kg/m^3 σκυροδέματος)

Το αρνητικό πρόσημο στην εξίσωση δείχνει ότι η διάχυση κατευθύνεται με αντίθετη φορά από αυτήν της αύξησης της συγκέντρωσης.

Στην εξίσωση 2.2 υπάρχει η υπόθεση ότι το σκυρόδεμα είναι ισότροπο υλικό, δηλαδή ο συντελεστής διάχυσης D_c είναι ο ίδιος και ως προς τις 2 κατευθύνσεις x και y . Επίσης ο συντελεστής διάχυσης δίνεται για λόγο συγκεντρώσεως εκφρασμένο σε kg/m^3 σκυροδέματος. Αν η συγκέντρωση των ελευθέρων χλωριόντων εκφραζόταν ως kg/m^3 διαλύματος πόρων η εξίσωση 2.2 θα μετατρέποταν ως εξής:

$$J_c = -\frac{D_c \cdot \omega_e}{\bar{D}_c} \left(\frac{\partial C_{fc}}{\partial x} + \frac{\partial C_{fc}}{\partial y} \right) [kg/m^2 \cdot s] \quad 2.3$$

Όπου:

- ω_e = εξατμιζόμενο περιεχόμενο νερό εκφρασμένο ανά μονάδα όγκου σκυροδέματος και χρησιμοποιείται ως το κλάσμα τριχοειδούς πορώδους το οποίο περιέχει ένα υγρό που δρα ως διαλύτης (Nilsson, 1993; Nilsson et al., 1994).
- C_{fc} = συγκέντρωση των διαλυμένων χλωριόντων σε διάλυμα πόρων (kg/m^3 διαλύματος πόρων)

Θεωρείται ότι μέσω αυτού του νερού πραγματοποιείται η διάχυση [Sergi et al.,1992]. Η διαφορά μεταξύ των δύο συντελεστών είναι ότι το \bar{D}_c αναφέρεται σε ροή χλωριόντων σε μία περιοχή διαλύματος, ενώ το D_c σε ροή χλωριόντων σε μία περιοχή σκυροδέματος.

Στο κορεσμένο σκυρόδεμα ισχύει η αρχή διατήρησης της μάζας των χλωριόντων και ως αποτέλεσμα προκύπτει η εξής εξίσωση:

$$\frac{\partial C_{tc}}{\partial t} = -\frac{\partial J_{cx}}{\partial x} - \frac{\partial J_{cy}}{\partial y} \quad [kg/m^3 \cdot s] \quad 2.4$$

Όπου:

- C_{tc} = συνολική συγκέντρωση χλωριόντων (kg/m^3 σκυροδέματος)
- J_{cx} = ροή των χλωριόντων εξαιτίας της διάχυσης κατά τη διεύθυνση x ($kg/m^2 \cdot s$)
- J_{cy} = ροή των χλωριόντων εξαιτίας της διάχυσης κατά τη διεύθυνση y ($kg/m^2 \cdot s$)

Από τις εξισώσεις 2.3 και 2.4 προκύπτει η κύρια εξίσωση που εκφράζει τον μηχανισμό διάχυσης χλωριόντων στο κορεσμένο σκυρόδεμα (2^{ος} νόμος του Fick):

$$\frac{\partial C_{tc}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_c \cdot \omega_e \cdot \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_c \cdot \omega_e \cdot \frac{\partial C_{fc}}{\partial y} \right) \quad [kg/m^3 \cdot s] \quad 2.5$$

Ο φυσικός μηχανισμός της διάχυσης επηρεάζεται μόνο από τα χλωριόντα που είναι διαλυμένα στο διάλυμα πόρων. Έχοντας ως αρχικές συνθήκες $C_{fc}(x > 0, t = 0) = 0$ και οριακές συνθήκες $C_{fc}(x = 0, t > 0) = C_s$, από την εξίσωση 2.5 προκύπτει η εξίσωση:

$$C_{fc}(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c \cdot t}} \right) \right] \quad [kg/m^3] \quad 2.6$$

Όπου:

- $C_{fc}(x, t)$ είναι η συγκέντρωση ελεύθερων χλωριόντων σε βάθος x μετά από χρόνο t (kg/m^3 διαλύματος πόρων)
- C_s είναι η επιφανειακή συγκέντρωση χλωριόντων $x = 0$ (kg/m^3 διαλύματος),
- erf είναι η συνάρτηση σφάλματος

Η εξίσωση 2.6 εφαρμόζεται μόνο όταν παραμένουν σταθεροί οι όροι του συντελεστή διάχυσης D_c και της επιφανειακής συγκέντρωσης C_s με την πάροδο του χρόνου. Η υπόθεση για σταθερό D_c μπορεί να ισχύσει σε περιπτώσεις κατασκευών που προϋπάρχουν πολύ καιρό. Ενώ όσο αναφορά την επιφανειακή συγκέντρωση χλωριόντων παραμένει σταθερή σε υποθαλάσσιες κατασκευές, όπου επέρχεται ισορροπία μεταξύ του εξωτερικού διαλύματος και του διαλύματος πόρων σκυροδέματος (Amey, 1998). Η εξίσωση 2.6 λειτουργεί χάριν απλούστευσης, καθώς ο συντελεστής διάχυσης D_c μεταβάλλεται ανάλογα με τη θερμοκρασία, την ηλικία του σκυροδέματος και την περιεχόμενη υγρασία, και η επιφανειακή συγκέντρωση χλωριόντων C_s εξαρτάται από την ποιότητα σκυροδέματος και τις συνθήκες έκθεσης.

2.2.2 Δέσμευση χλωριόντων κατά τη διάχυση

Τα χλωριόντα μπορούν να εμφανιστούν στο σκυρόδεμα με τρεις διαφορετικούς τρόπους (Neville, 1995):

- Με χημικούς δεσμούς στα προϊόντα ενυδάτωσης του τσιμέντου.
- Απορροφούμενα από την επιφάνεια των πόρων.
- Διαλυμένα στο διάλυμα πόρων (ελεύθερα χλωριόντα).

Η συνολική ποσότητα των χλωριόντων στο σκυρόδεμα ισούται με το άθροισμα των δεσμευμένων και ελεύθερων χλωριόντων όπως φαίνεται στον εξίσωση 2.7:

$$C_{tc} = C_{bc} + \omega_e C_{fc} \quad [kg/m^3 \text{ σκυροδέματος}] \quad 2.7$$

Όπου:

- C_{tc} = συγκέντρωση των συνολικών χλωριόντων (kg/m^3 σκυροδέματος)
- C_{bc} = συγκέντρωση των δεσμευμένων χλωριόντων (kg/m^3 σκυροδέματος)
- C_{fc} = συγκέντρωση των ελεύθερων χλωριόντων (kg/m^3 σκυροδέματος)

Για τη διατήρηση της μάζας του σκυροδέματος είναι απαραίτητο ότι για κάθε αλλαγή στη ροή διάχυσης χλωριόντων θα αλλάζει και η συνολική ποσότητα χλωριόντων που βρίσκονται στο σκυρόδεμα.

$$\frac{\partial C_{tc}}{\partial t} = \frac{\partial C_{bc}}{\partial t} + \omega_e \frac{\partial C_{fc}}{\partial t} = - \frac{\partial J_c}{\partial x} \quad [kg/(m^3 \cdot s)] \quad 2.8$$

Όπου J_c δίνεται από την εξίσωση 2.2

Προκειμένου να περιγραφεί η δέσμευση των χλωριόντων κατά τη διάχυση, η εξίσωση 2.5 θα πρέπει να μετατραπεί, ώστε να εκφράζει την αλλαγή της συνολικής συγκέντρωσης χλωριόντων με το χρόνο συναρτήσει των ελεύθερων χλωριόντων. Με την εφαρμογή της αρχής διατήρησης της μάζας στην εξίσωση 2.7 αντικαθιστώντας την στην εξίσωση 2.5 προκύπτει ο 2^{ος} τροποποιημένος νόμος του Fick:

$$\frac{\partial C_{fc}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D^*_c \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D^*_c \frac{\partial C_{fc}}{\partial y} \right) \quad [kg/m^3 \cdot s] \quad 2.9$$

όπου

$$D^*_c = \frac{D_c}{1 + \frac{1}{\omega_e} \cdot \frac{\partial C_{bc}}{\partial C_{fc}}} \quad [m^2/s] \quad 2.10$$

- D^*_c = φαινόμενος συντελεστής διάχυσης (m^2/s)
- $\partial C_{bc}/\partial C_{fc}$ = ικανότητα δέσμευσης χλωριόντων του σκυροδέματος (m^3 διαλύματος πόρων/ m^3 σκυροδέματος) όπως όρισε ο Nilsson et al. (1994)

2.2.3 Συντελεστής Διάχυσης Χλωριόντων

Πειραματικά δεδομένα έχουν δείξει ότι ο ρυθμός της διάχυσης των χλωριόντων στο σκυρόδεμα, συνήθως καθορίζεται από τον συντελεστή διάχυσης χλωριόντων D_c . Ο συντελεστής διάχυσης εξαρτάται από εσωτερικές παραμέτρους του υλικού όπως η θερμοκρασία, το πορώδες, ο τύπος τσιμέντου, τα κατιόντα που σχετίζονται με τα χλωριόντα, η περιεχόμενη υγρασία και οι συνθήκες συντήρησης. Λαμβάνοντας υπόψη τα προηγούμενα, ο συντελεστής διάχυσης D_c εκφράζεται ως μία συνάρτηση της θερμοκρασίας του σκυροδέματος T , του βαθμού ενυδάτωσης του τσιμέντου t_e και της σχετικής υγρασίας πόρων h [Saetta, 1993].

$$D_c = D_{c,ref} \cdot f_1(T) \cdot f_2(t_e) \cdot f_3(h) \quad [m^2/s] \quad 2.11$$

Όπου:

- $D_{c,ref}$ είναι μία τιμή αναφοράς, δηλαδή ο συντελεστής διάχυσης που υπολογίζεται σε σταθερές συνθήκες ($T = 23^\circ\text{C}$, $t_e = 28$ μέρες, $h = 100\%$).

Στον πίνακα 2.1 δίνονται τυπικές τιμές του συντελεστή διάχυσης χλωριόντων για διάφορους λόγους νερο προς τσιμέντο.

Πίνακας 2.1: Τυπικές τιμές του συντελεστή διάχυσης χλωριόντων

Source	Material	w/cm	D_c (m^2/s)
Page <i>et al.</i> (1981)	OPC ^a paste	0.5	4.5×10^{-12}
	OPC paste + 30% PFA ^b	0.5	1.5×10^{-12}
	OPC paste + 65% GBFS ^c	0.5	0.4×10^{-12}
McGrath and Hooton (1997)	OPC concrete	0.4	6.30×10^{-12}
	OPC + 8% GBFS concrete	0.4	2.25×10^{-12}
	OPC + 8% PFA concrete	0.4	3.35×10^{-12}
	OPC + 8% SF ^d concrete	0.4	0.88×10^{-12}
	OPC + 40% GBFS + 8% SF concrete	0.31	0.21×10^{-12}
	OPC + 30% PFA + 8% SF concrete	0.31	0.3×10^{-12}

^aordinary Portland cement

^bpulverized-fuel ash

^cgranulated blast-furnace slag

^dsilica fume

Επίδραση της θερμοκρασίας

Η συνάρτηση $f_1(T)$ δείχνει την εξάρτηση της διάχυσης των χλωριόντων από τη θερμοκρασία όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Έχει εκτιμηθεί από πολλούς μελετητές (Saetta, 1993; Berke and Hicks, 1994; Tang and Nilsson, 1996; Amey, 1998) ως εξής:

$$f_1(T) = \exp \left[\frac{U}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad 2.12$$

Όπου:

- U είναι η ενέργεια ενεργοποίησης της διαδικασίας της διάχυσης (kJ/mol)
- R είναι η σταθερά αερίου ($kJ/K \cdot mol$)
- T_{ref} είναι η απολυτή θερμοκρασία αναφοράς στην οποία έχει μετρηθεί το $D_{c,ref}$ (K)
- T είναι η πραγματική απόλυτη θερμοκρασία του σκυροδέματος (K)

Τιμές ενέργειας ενεργοποίησης παστών τσιμέντου Portland για διάφορους λόγους νερό προς τσιμέντο, φαίνονται στον πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2: Τιμές ενέργειας ενεργοποίησης παστών τσιμέντου Portland για διάφορους λόγους νερό προς τσιμέντο

$U(kJ/mol)$	w/c
41,8	0.4
44,6	0.5
32	0.6

Το σκυρόδεμα δε γίνεται να έχει σταθερή θερμοκρασία T , αφού οι κατασκευές εκτίθενται σε θερμοκρασίες κάτω από το μηδέν το χειμώνα και πολύ υψηλότερες το καλοκαίρι. Ο Amey (1998) πρότεινε να χρησιμοποιείται ένας σταθμισμένος μέσος όρος στις μέσες εποχιακές θερμοκρασίες.

Επίδραση του χρόνου έκθεσης

Σύμφωνα με έρευνες ο συντελεστής διάχυσης χλωριόντων μειώνεται με τον χρόνο καθώς αυξάνεται η ωριμότητα του εκτιθέμενου σκυροδέματος. Από πειραματικά δεδομένα κυρίως σε λιμενικά έργα προτάθηκε από διάφορους μελετητές μία περιγραφή του συντελεστή διάχυσης D_c που αλλάζει με την πάροδο του χρόνου όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3 [Mangat and Molloy, 1994; Maage, 1995, 1996; Bamforth, 1998]:

$$D_c = D_{c,ref} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad [m^2/s] \quad 2.13$$

Όπου:

- $D_{c,ref}$ είναι ο πραγματικός συντελεστής διάχυσης (m^2/s) και καθορίζεται σε χρόνο $t_{ref}(s)$
- t είναι ο χρόνος έκθεσης, και m είναι ο μειωτικός παράγοντας λόγω της ηλικίας της κατασκευής
- Η παράμετρος m εξαρτάται από τα συστατικά παρασκευής του σκυροδέματος και από τις συνθήκες ωρίμανσης που εφαρμόζονται στο σκυρόδεμα.

Παρατηρήθηκε ότι η μεγαλύτερη μείωση του συντελεστή D_c παρουσιάστηκε με την χρήση ιπτάμενης τέφρας και σκωρίας υψικαμίνου. Οι Magnat και Molloy (1994) έλαβαν τιμές για το m από διάφορα μείγματα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5, με ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης από πειραματικά δεδομένα σκυροδεμάτων που ήταν εκτεθειμένα κατά τη διάρκεια πέντε ετών. Διατύπωσαν λοιπόν το m ως μία συνάρτηση του λόγου νερό προς τσιμέντο, w/c .

$$m = 2.5 w/c - 0.6 \quad 2.14$$

Παρόμοια έκφραση της εξίσωσης 2.13 χρησιμοποίησε ο Maage et al. (1995, 1996), ο οποίος έκανε ένα διαχωρισμό ανάμεσα στη μείωση της διάχυσης με το πέρασ του χρόνου εξαιτίας των ιδιοτήτων που έχουν τα υλικά (συνεχής ενυδάτωση) και των περιβαλλοντικών συνθηκών.

Ο Tang και Nilsson (1996a, 1996b) μοντελοποίησαν τη μείωση του συντελεστή διάχυσης σε σχέση με τον χρόνο βασισμένοι σε δική τους πειραματική εργασία. Υπέθεσαν ότι μετά από συγκεκριμένο χρόνο t_c ο συντελεστής διάχυσης δεν επηρεάζεται από τον χρόνο όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$f_2(t) = \begin{cases} \left(\frac{t_c}{t} \right)^{\beta_t} & \text{αν } t < t_c \\ 1 & \text{αν } t \geq t_c \end{cases} \quad 2.15$$

Όπου:

- t_c είναι ο χρόνος που σταθεροποιείται η διάχυση, όπου λαμβάνεται 180 μέρες από τους μελετητές
- β_t είναι μία σταθερά που εκτιμάται ότι κινείται στο εύρος από 0.3 έως 0.5

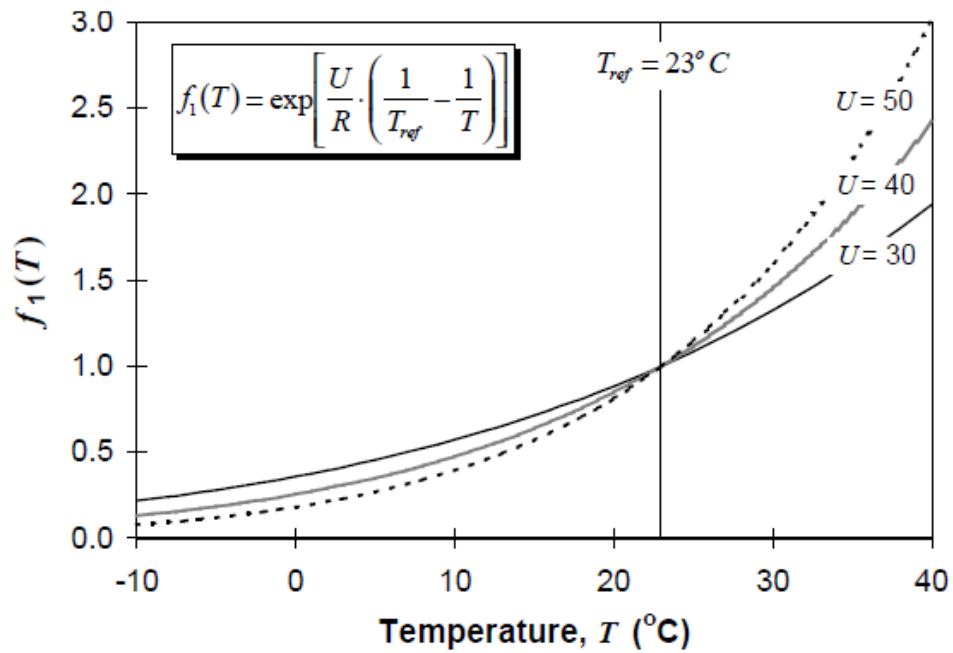
Επίδραση της σχετικής υγρασίας

Η διάχυση χλωριόντων είναι μία διαδικασία που μπορεί να συμβεί μόνο αν υπάρχει νερό στους πόρους του σκυροδέματος. Έτσι η μείωση της περιεχόμενης υγρασίας στην επικάλυψη του σκυροδέματος εμποδίζει τη διαδικασία διάχυσης χλωριόντων προς τον οπλισμό του χάλυβα. Ο Saetta et al. (1993) δημιούργησε ένα μοντέλο διάχυσης χλωριόντων που αποτυπώνει αυτό το φαινόμενο, όπου η διάχυση χλωριόντων μειώνεται με τη μείωση της σχετικής υγρασίας στους πόρους του σκυροδέματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4.

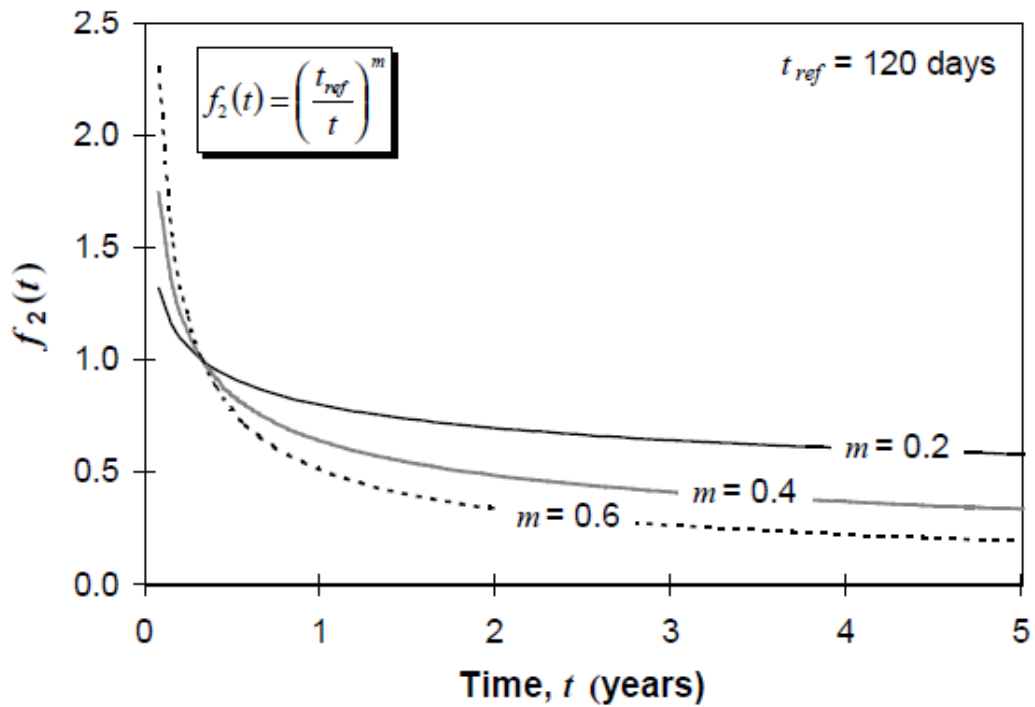
$$f_3(h) = \left[1 + \frac{(1-h)^4}{(1-h_c)^4} \right]^{-1} \quad 2.16$$

Όπου:

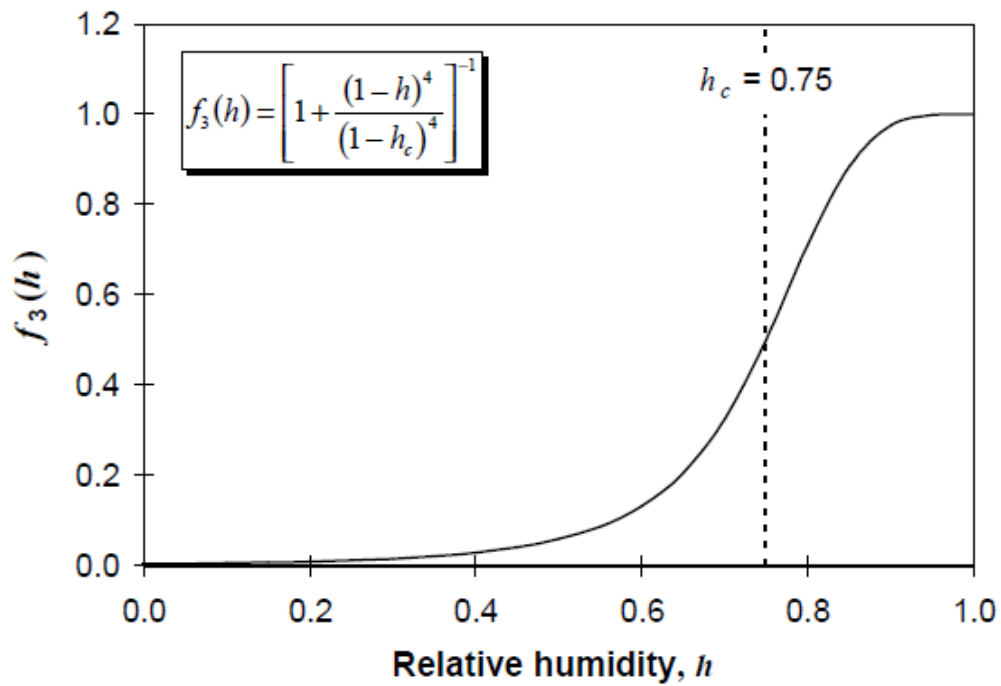
- h είναι η σχετική υγρασία των πόρων του σκυροδέματος
- h_c είναι η υγρασία στην οποία ο συντελεστής D_c βρίσκεται στο μέσο της ελάχιστης και μέγιστης τιμής του και ο οποίος λαμβάνεται 0.75, σύμφωνα με τους Bazant και Najjar (1971)



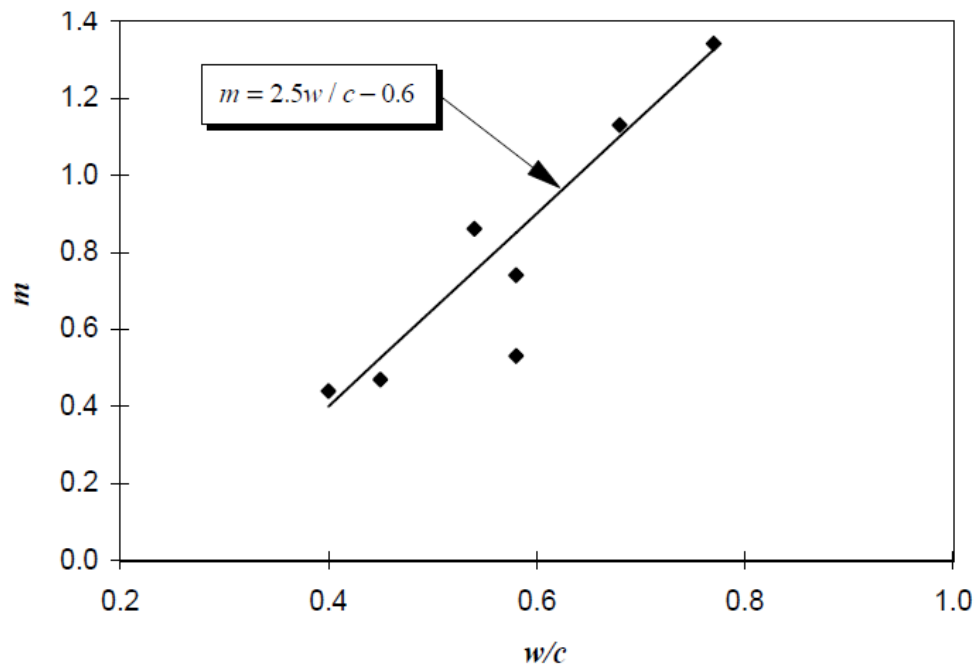
Σχήμα 2.2: Εξάρτηση του συντελεστή D_c από τη θερμοκρασία για διαφορετικές τιμές U (kJ/mol)



Σχήμα 2.3: Εξάρτηση του συντελεστή D_c από το χρόνο



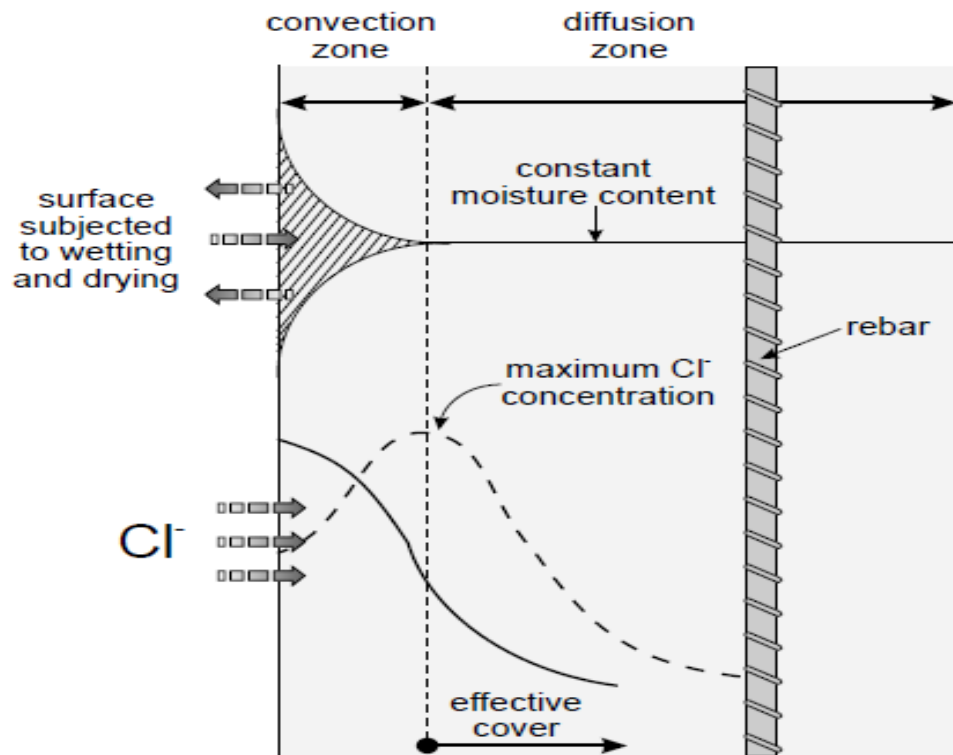
Σχήμα 2.4: Εξάρτηση του συντελεστή D_c από τη σχετική υγρασία



Σχήμα 2.5: Σχέση ανάμεσα στο συντελεστή m και στο λόγο νερού προς τσιμέντο (w/c) για διάφορα μείγματα: OPC, 26% PFA, 60% GBFS, 15% SF (Mangat and Molloy, 1994).

2.2.4 Διάχυση χλωριόντων και μεταγωγή

Η διείσδυση χλωριόντων σε ένα μερικώς κορεσμένο σκυρόδεμα πραγματοποιείται με διάχυση αλλά και με τριχοειδής αναρρόφηση (μεταγωγή), σε περιβάλλον όπου το σκυρόδεμα υπόκειται σε κύκλους ύγρανσης ξήρανσης. Όταν η επιφάνεια ενός μερικώς κορεσμένου σκυροδέματος είναι υγρή, το νερό απορροφάται γρήγορα λόγω της τριχοειδούς αναρρόφησης που μεταφέρει διαλυμένα χλωριόντα. Κατά τη διάρκεια περιόδων ξήρανσης το νερό στην επιφάνεια εξατμίζεται αφήνοντας πίσω τα χλωριόντα στο διάλυμα πόρων του σκυροδέματος. Εξαιτίας αυτών των δύο φαινομένων, η συγκέντρωση των χλωριόντων θα είναι κυμαινόμενη κοντά στην επιφάνεια σκυροδέματος και θα φτάσει στη μέγιστη τιμή της στο εσωτερικό του σκυροδέματος μερικά χιλιοστά μακριά από την επιφάνεια. Με αφορμή αυτές τις παρατηρήσεις, ο Tuutti (1993) έκανε ένα διαχωρισμό ανάμεσα στη ζώνη μεταγωγής και στη ζώνη διάχυσης στην επιφάνεια σκυροδέματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: Μεταβολή υγρασίας και συγκέντρωσης χλωριόντων στην επιφάνεια σκυροδέματος κατασκευών που υπόκεινται σε κύκλους ύγρανσης ξήρανσης (προσαρμοσμένο από Tuutti, 1993).

Ενώ το μοντέλο διάχυσης εφαρμόζεται σε σκυρόδεμα με σταθερό επίπεδο υγρασίας (ζώνη διάχυσης), η διείσδυση χλωριόντων εξαιτίας της ροής του νερού πρέπει να ληφθεί υπ' όψη για το εξωτερικό μέρος όπου οι συνθήκες υγρασίας ποικίλουν με την πάροδο του χρόνου (ζώνη μεταγωγής). Το βάθος της ζώνης μεταγωγής εξαρτάται από την ποιότητα του σκυροδέματος και τις συνθήκες έκθεσης και κυμαίνεται από 10 έως 20 mm σε συνηθισμένα σκυροδέματα [Andrade and Alonso, 1996b].

Η ροή των χλωριόντων εξαιτίας της μεταγωγής J'_c , μπορεί μαθηματικά να εκφραστεί ως το προϊόν της συγκέντρωσης των ελεύθερων χλωριόντων και της ροής της υγρασίας διαμέσου σκυροδέματος J_m [Saetta et al., 1993; Nilsson and Tang, 1996].

$$J'_c = \omega_e \cdot C_{fc} \cdot J_m \quad [kg/m^2 \cdot s] \quad 2.17$$

Η ροή της υγρασίας J_m θα οριστεί παρακάτω.

Η εξίσωση 2.17 κάνει εμφανές το γεγονός ότι τα χλωριόντα διεισδύουν στο σκυρόδεμα με τον ίδιο ρυθμό που διεισδύει και το νερό, έτσι ώστε η συγκέντρωση του αναρροφούμενου διαλύματος να παραμένει σταθερή.

Η συνολική διείσδυση χλωριόντων σε ένα μερικώς κορεσμένο σκυρόδεμα ισούται με το άθροισμα της διείσδυσης χλωριόντων μέσω της διάχυσης και της διείσδυσης μέσω μεταγωγής. Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της μάζας προκύπτει:

$$\frac{\partial C_{tc}}{\partial t} = - \underbrace{\frac{\partial J_{cx}}{\partial x} - \frac{\partial J_{cy}}{\partial y}}_{\text{διάχυση}} - \underbrace{\frac{\partial J'_{cx}}{\partial x} - \frac{\partial J'_{cy}}{\partial y}}_{\text{μεταγωγή}} \quad [kg/m^3 \cdot s] \quad 2.18$$

Όπου:

- J'_{cx} = ροή των χλωριόντων εξαιτίας μεταγωγής στην κατεύθυνση x ($kg/m^2 \cdot s$)
- J'_{cy} = ροή των χλωριόντων εξαιτίας μεταγωγής στην κατεύθυνση y ($kg/m^2 \cdot s$)

Αν λάβουμε υπ' όψη τα δεσμευμένα χλωριόντα στην διαδικασία της διάχυσης προκύπτει η εξής εξίσωση από την τροποποίηση του 2^{ου} νόμου του Fick:

$$\frac{\partial C_{fc}}{\partial t} = - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left(D^*_c \frac{\partial C_{fc}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D^*_c \frac{\partial C_{fc}}{\partial y} \right)}_{\text{διάχυση}} - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} (\omega_e \cdot C_{fc} \cdot J_{mx}) + \frac{\partial}{\partial y} (\omega_e \cdot C_{fc} \cdot J_{my})}_{\text{μεταγωγή}} \quad [kg/m^3 \cdot s] \quad 2.19$$

Όπου:

- J_{mx} = Ροή της υγρασίας στην κατεύθυνση x
- J_{my} = Ροή της υγρασίας στην κατεύθυνση y

Η εξίσωση 2.19 είναι η κύρια εξίσωση της διείσδυσης χλωριόντων σε μερικώς κορεσμένο σκυρόδεμα. Σημειώνεται ότι είναι εκφρασμένη σε όρους ελεύθερων χλωριόντων C_{fc} (kg/m^3 διαλύματος πόρων).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ

Διάρκεια ζωής μιας κατασκευής από οπλισμένο σκυροδέμα ονομάζεται ο ελάχιστος χρόνος στον οποίο η κατασκευή ικανοποιεί τις απαιτήσεις επιτελεστικότητας. Επιτελεστικότητα, καλείται η ταυτόχρονη εκπλήρωση των απαιτήσεων ασφάλειας, λειτουργικότητας και αισθητικής εμφάνισης, οι οποίες σχετίζονται με την κανονική χρήση της κατασκευής. Η διάρκεια ζωής μπορεί να εξασφαλίζεται είτε λόγω καλής αρχικής ποιότητας, είτε λόγω επανειλημμένων επεμβάσεων. Για να οριστεί το πέρας αυτής της διάρκειας, χρησιμοποιούνται οι εξής δύο παράμετροι:

- Η ρηγμάτωση της επικάλυψης του σκυροδέματος
- Η μείωση της φέρουσας ικανότητας

Όταν εμφανίζονται ρηγματώσεις σε μία κατασκευή θεωρούνται απαραίτητες οι επεμβάσεις αποκατάστασης για αισθητικούς λόγους, ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος αποφλοιώσης και συνεπώς υποβάθμισης της φέρουσας ικανότητας. Από το σημείο που ξεκινάει η πρώτη ρηγμάτωση και μετά, θεωρείται ότι μειώνεται η αντοχή. Σύμφωνα με κάποιους ερευνητές όταν το συνολικό ποσό ρηγμάτωσης αντιστοιχεί σε συνολική απώλεια διατομής 100 μm θεωρείται ότι η ρηγμάτωση είναι σημαντική και μπορεί να οδηγήσει σε αποκολλήσεις του σκυροδέματος [Webster Michael Peter, 2000].

Κατά τον πιθανοτικό σχεδιασμό των κατασκευών, ο κύριος παράγοντας της ποιότητας είναι η αξιοπιστία, η οποία συνδέεται με την πιθανότητα επιτυχούς λειτουργίας, για μια δεδομένη διάρκεια ζωής κάτω από συνθήκες, που προσδιορίζονται κατά τη μελέτη. Η ανθεκτικότητα των κατασκευών, είναι ένα δύσκολο πρόβλημα το οποίο δεν περιορίζεται μόνο στην κατάλληλη επιλογή των υλικών και στη σωστή παρασκευή του σκυροδέματος, αλλά συνδέεται ευθέως και με την οικονομικότητα.

Στους περισσότερους, υπάρχοντες κανονισμούς και πρότυπα, η ανθεκτικότητα του οπλισμένου σκυροδέματος αντιμετωπίζεται με την κάλυψη κάποιων απαιτήσεων, όπως ο λόγος νερό προς τσιμέντο (w/c), ο τύπος και η περιεκτικότητα σε τσιμέντο, η θλιπτική αντοχή και η επικάλυψη του σκυροδέματος. Οι απαιτήσεις δίνονται σαν οριακές τιμές εκτός από την επικάλυψη, η οποία δίνεται ως ονομαστική τιμή ή ελάχιστη τιμή ανάλογα με την κατηγορία έκθεσης.

Το νέο Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 206–1, προβλέπει κατηγορίες έκθεσης στο περιβάλλον και έχει στο Παράρτημά του συστάσεις για τις ελάχιστες απαιτήσεις που θα εξασφαλίσουν μεγάλη διάρκεια ζωής των κατασκευών. Συγκεκριμένα ορίζονται οι κατηγορίες έκθεσης XS 1, XS 2, XS 3 για την περίπτωση διάβρωσης λόγω χλωριόντων προερχομένων από θαλασσινό νερό, όπου η έκθεση κατηγοριοποιείται ανάλογα με το εάν το σκυρόδεμα είναι εκτεθειμένο σε μεταφερόμενα με τον αέρα άλατα αλλά όχι σε άμεση επαφή με το θαλάσσιο νερό, με το εάν το σκυρόδεμα είναι μόνιμα βυθισμένο σε νερό και με το εάν επικρατούν παλιρροιακές συνθήκες και υπάρχουν εκτεθειμένες και διαβρεχόμενες ζώνες (XS1, XS2, XS3 αντίστοιχα). Ανάλογα με την κατηγορία έκθεσης δίνονται συνιστώμενες τιμές για το μέγιστο λόγο νερού προς τσιμέντο, την ελάχιστη κατηγορία αντοχής και την ελάχιστη περιεκτικότητα σε τσιμέντο.

Στα Βρετανικά Πρότυπα "Complementary British Standard BS 8500-1: 2002" δίνονται οριακές τιμές για τη σύνθεση και τις ιδιότητες του σκυροδέματος, το οποίο εκτίθεται σε κίνδυνο διάβρωσης του οπλισμού που προκαλείται από θαλάσσιο νερό, για σχεδιαζόμενη λειτουργική διάρκεια ζωής τουλάχιστον 50 ετών, όπως πρότυπη επικάλυψη (εκφραζόμενη σαν ελάχιστη επικάλυψη οπλισμού, προσαυξημένη κατά ένα όριο ανοχής για την ικανοποίηση καθορισμένου επιπέδου ακρίβειας), μέγιστος λόγο νερού προς τσιμέντο, ελάχιστη κατηγορία αντοχής και ελάχιστη περιεκτικότητα σε τσιμέντο. Στην Ελλάδα, το παραπάνω Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 206–1 έχει υιοθετηθεί από τον ΕΛΟΤ το Μάρτιο του 2001 και η εφαρμογή του στα δημόσια έργα είναι υποχρεωτική.

3.1 Μοντέλα διάβρωσης

Τα μοντέλα, που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια, προσεγγίζουν το θέμα της ανθεκτικότητας, λαμβάνοντας υπόψη τις περιβαλλοντικές δράσεις, τις αντίστοιχες ιδιότητες-παραμέτρους των υλικών, αριθμητικά μοντέλα και κριτήρια για συντελεστές ασφαλείας ως παράγοντες, που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό μιας κατασκευής, εκτός από την καθορισμένη με μαθηματικά φέρουσα ικανότητα.

Τα μοντέλα πρόβλεψης της διάρκειας ζωής κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα σε παραθαλάσσιο περιβάλλον, βασίζονται στην πρόβλεψη της διείδυσης χλωριόντων από θαλασσινό νερό και σύγκριση της προβλεπόμενης τιμής με μία οριακή τιμή συγκέντρωσης χλωριόντων, για την έναρξη της διάβρωσης. Σημαντική ανάπτυξη αυτών των μοντέλων υπήρξε

τη δεκαετία του ενενήντα, αλλά παρόλη την πρόοδο που έχει συντελεστεί λείπουν ποιοτικά και μακροπρόθεσμα δεδομένα, όπως επίσης και η πλήρης κατανόηση κάποιων σημαντικών φαινομένων. Η έλλειψη αυτών των δεδομένων και της γνώσης, δημιουργεί αβεβαιότητα στα μοντέλα πρόβλεψης [Nilsson L.O., Paris 2000].

Θα πρέπει να αναφερθεί ωστόσο, ότι και στην πρόβλεψη της διεξόδου χλωριόντων υπεισέρχεται σημαντική αβεβαιότητα, η οποία μπορεί να διακριθεί σε φυσική αβεβαιότητα, στατιστική αβεβαιότητα, αβεβαιότητα του μοντέλου και αβεβαιότητα απόφασης. Η φυσική αβεβαιότητα, οφείλεται στην εγγενή τυχαία φύση βασικών μεταβλητών, όπως για παράδειγμα η διακύμανση της τιμής της επικάλυψης του σκυροδέματος και η διακύμανση των τιμών της επιφανειακής συγκέντρωσης χλωριόντων ή του συντελεστή διάχυσης. Η στατιστική αβεβαιότητα, οφείλεται στην υιοθέτηση ακατάλληλης συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας ή στην εκτίμηση στατιστικών παραμέτρων από περιορισμένο αριθμό δειγμάτων. Η αβεβαιότητα του μοντέλου, προέρχεται από τη χρήση απλοποιημένων φυσικών μοντέλων ή εξισώσεων μεταξύ βασικών μεταβλητών που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση των πραγματικών φαινομένων, όπως για παράδειγμα i) η υπόθεση ότι ο βασικός μηχανισμός μεταφοράς χλωριόντων στο σκυρόδεμα είναι η διάχυση, ii) η χρήση απλουστευμένων μοντέλων για τον υπολογισμό του συντελεστή διάχυσης, iii) η χρήση μεταβλητών χωρίς συσχέτιση και iv) η χρήση απλών επιπέδων οριακής συγκέντρωσης χλωριόντων για τον ορισμό της αντίστασης στη διάβρωση των κατασκευών.

Η αβεβαιότητα απόφασης, σχετίζεται με τον ορισμό κατάλληλων κριτηρίων αστοχίας, όπως αυτό της έναρξης της διάβρωσης, το μέγιστο επιτρεπόμενο αποδεκτό όριο χλωριόντων στο σκυρόδεμα ή τη συνολική ζημιά (ρηγμάτωση, αποφλοιώση, απολέπιση). Τα αποδεκτά επίπεδα ζημιάς ή κριτήρια αστοχίας, βασίζονται στη σπουδαιότητα της κατασκευής, στον κίνδυνο απώλειας ζωής και τραυματισμών, στο κόστος επισκευών και στην επιρροή στους χρήστες γενικότερα [Lounis Z., 2003]. Γίνεται φανερό από τα παραπάνω, ότι ένα καθαρά ντετερμινιστικό μοντέλο πρόβλεψης κρίνεται μάλλον ανεπαρκές εξαιτίας της σημαντικής αβεβαιότητας, που εισάγεται μέσω των χρησιμοποιούμενων παραμέτρων και της απόκρισης της κατασκευής.

Υπάρχουν αρκετά μοντέλα στη διεθνή βιβλιογραφία [Luping, 2008; Demis, 2013; Ehlen, 2009; Ferreira, 2004; Oslakovic, 2010]. 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
- **στοχαστικά** (τα οποία μπορεί να είναι και φυσικοχημικά) τα οποία εκτιμούν την διάρκεια ζωής με τη μορφή μιας συνάρτησης κατανομής πιθανοτήτων

Η διεργασία της διάβρωσης στο σκυρόδεμα αναμένεται να μεταβάλλεται σαν συνάρτηση του χρόνου. Στα περισσότερα μαθηματικά μοντέλα γίνεται αναφορά για το σχεδιασμό λόγω δράσεως από χλωριόντα με εξαίρεση το μοντέλο EUCON όπου μπορεί να εκτιμήσει με ακρίβεια τη διάρκεια ζωής και λόγω δράσεως διοξειδίου του άνθρακα από την ατμόσφαιρα [Papadakis, 1991, Papadakis,1996; Papadakis and Demis,2011; Demis,2013]

3.1.1 Εμπειρικά μοντέλα

Ο Clear [Naus, 2003] διερεύνησε, το χρόνο για την έναρξη της διάβρωσης σε 124 οπλισμένες πλάκες σκυροδέματος σε εξωτερικές συνθήκες. Η πάνω επιφάνεια έκθεσης εμποτίστηκε με διάλυμα χλωριόντων, 2% κ.β.. Βασισμένος στα αποτελέσματα που πήρε ύστερα από 830 ημέρες, πρότεινε την παρακάτω σχέση:

$$SL = \frac{129}{w/c} \cdot \frac{c^{1.22}}{CL^{0.42}} \quad 3.1$$

Όπου:

- SL = η διάρκεια ζωής
- w/c = ο λόγος νερό προς τσιμέντο
- c = πάχος της επικάλυψης
- CL = τα περιεχόμενα χλωριόντα

Το μοντέλο που προτάθηκε από τον Morinaga [Naus, 2003] βασίζεται επίσης σε εμπειρικούς τύπους. Η διάρκεια ζωής ορίζεται από τον βαθμό ζημιάς του οπλισμού ενώ η πρόβλεψη της διάρκειας ζωής υπολογίζεται ως:

$$t = \frac{Q_{cr}}{q} \quad 3.2$$

Όπου:

- t = διάρκεια ζωής σύμφωνα με το σχεδιασμό
- Q_{cr} = ρυθμός διάβρωσης ο οποίος οδηγεί σε ρηγμάτωση του σκυροδέματος (10^{-4} g/cm²)
- q = μέτρο διάβρωσης σε πραγματικό περιβάλλον

$$Q_{cr} = 0.602 \left(1 + \frac{2c}{d}\right)^{0.85} d \quad 3.3$$

Όπου:

- d = διάμετρος οπλισμού
- c = επικάλυψη σκυροδέματος

3.1.2 Πιθανολογικά μοντέλα

Στην περίπτωση της πρόβλεψης της διάβρωσης οπλισμού το διάστημα της τυχαίας μεταβλητής έχει παραμέτρους την επιφανειακή συγκέντρωση χλωριόντων, την οριακή συγκέντρωση χλωριόντων, τον συντελεστή διάχυσης και το πάχος της επικάλυψης του σκυροδέματος αντίστοιχα. Χρησιμοποιώντας την προσομοίωση Monte Carlo, δημιουργείται η κατανομή του χρόνου της έναρξης της διάβρωσης (initiation time). Η μέθοδος ανάλυσης Monte Carlo είναι ευρέως διαδεδομένη τεχνική, που χρησιμοποιείται στην ανάλυση αβεβαιότητας. Η τεχνική αυτή περιλαμβάνει δειγματοληψία τυχαίων μεταβλητών από την κατανομή των δεδομένων, ώστε να προσομοιωθεί τεχνητά μεγάλος αριθμός πειραμάτων, μέχρι να δημιουργηθεί μια στατιστικά σημαντική κατανομή της απόκρισης της κατασκευής. Η απευθείας δειγματοληψία Monte Carlo χρησιμοποιείται συχνά αν και δεν θεωρείται τόσο αποτελεσματική όσο αυτή που βασίζεται σε δειγματοληψία σπουδαιότητας. Πρόκειται για μια ασύμμετρη κατανομή που προσεγγίζεται από λογαριθμοκανονικό μοντέλο με μέση τιμή τα 10.23 χρόνια και συντελεστή μεταβλητότητας 100%. Εάν ο χρόνος t_i προσεγγιστεί από μία λογαριθμοκανονική μεταβολή με μέσο όρο μ_{ti} , προκύπτει η παρακάτω σχέση για την χρονικά εξαρτώμενη πιθανότητα της διάβρωσης του οπλισμού $P_f(t)$:

$$P_f(t) = \frac{1 - erf(\beta_t/2)}{2} \text{ και } \beta_t = \frac{\ln \left[(\mu_{ti}/t) \sqrt{1 + V_{ti}^2} \right]}{\sqrt{\ln(1 + V_{ti}^2)}} \quad 3.4$$

Όσον αφορά στη διάρκεια της περιόδου πολλαπλασιασμού - διάδοσης (propagation time), εκτείνεται από την έναρξη της διάβρωσης μέχρι το χρόνο όπου το σκυρόδεμα φτάνει σε ένα κρίσιμο επίπεδο φθορών ή "οριακή κατάσταση". Αυτές οι οριακές καταστάσεις συμπεριλαμβάνουν τη διάρκεια ζωής (εκτεταμένη ρηγμάτωση, απολέπιση, αποφλοιώση, παραμόρφωση) και τις τελικές οριακές καταστάσεις (καμπτική αστοχία, διατμητική αστοχία, διάτρηση).

Εκτίμηση του χρόνου πολλαπλασιασμού και συνολικής διάρκειας ζωής βασισμένη στις μεθόδους αξιοπιστίας είναι δυνατή, με τη θεώρηση ότι το φορτίο (load) και η αντίσταση (resistance) είναι στοχαστικές διεργασίες. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με τη χρησιμοποίηση μεθόδων ανάλυσης, χρονικά εξαρτώμενης αξιοπιστίας.

Εάν για παράδειγμα η αντίσταση μειώνεται με το χρόνο βάσει κάποιας συνάρτησης $a(t)$, για παράδειγμα $R(t) = a(t)R_0$, η οποία θεωρείται ανεξάρτητη από το ιστορικό φορτίσεων αλλά εξαρτώμενη από το ρυθμό διάβρωσης, τότε η πιθανότητα αστοχίας μπορεί να υπολογισθεί όπως παρακάτω:

$$P_f(T_L) = 1 - \int_0^{\infty} \exp \left[-v \left\{ T_L - \int_0^{T_L} F_S[a(t)R_0] dt \right\} \right] f_{R_0}(r) dr \quad 3.5$$

Όπου:

- $P_f = (T_L)$ η πιθανότητα αστοχίας στο χρονικό διάστημα $[0, T_L]$
- $T_L =$ η διάρκεια ζωής
- $a(t) =$ η συνάρτηση αντίστασης στη φθορά
- $R_0 =$ η αρχική αντίσταση
- $f_{R_0} =$ η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της αρχικής φθοράς
- $F_S =$ η αθροιστική κατανομή του φορτίου
- $v =$ ο ρυθμός εμφάνισης του φορτίου

Τα παραπάνω μοντέλα προτείνονται από τον Lounis (2003) και Lounis et al (2003)

Το μοντέλο Stewart et al (1998) λαμβάνει υπόψη διάφορες παραμέτρους όπως τη ρηγμάτωση, την κρίσιμη συγκέντρωση χλωριόντων, την τυχαία μεταβλητότητα του συντελεστή διάχυσης, τον ρυθμό διάβρωσης, τις ιδιότητες του υλικού, τις διαστάσεις των στοιχείων, την τοποθέτηση του

οπλισμού, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και φορτίσεις. Οι παραπάνω παράμετροι θεωρείται, ότι έχουν στατιστικές κατανομές και ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο συντελεστής διάχυσης έχει λογαριθμοκανονική κατανομή, το ρεύμα διάβρωσης κανονική κατανομή και το κρίσιμο πλάτος ρωγμών ομοιόμορφη κατανομή.

Ο υπολογισμός του χρόνου έναρξης της διάβρωσης, εξετάζεται στην περίπτωση εφαρμογής αντιπαγωτικών αλάτων, όπου το περιεχόμενο χλώριο σε κάποια απόσταση από την επιφάνεια x δίνεται από τη σχέση:

$$C(x, t) = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad 3.6$$

ενώ στην περίπτωση παραθαλάσσιας ζώνης, θεωρείται ότι η συγκέντρωση των χλωριόντων στην επιφάνεια του σκυροδέματος, δίνεται από τη σχέση:

$$C(x, t) = 2W \left\{ \sqrt{\frac{t}{\pi D}} \cdot \exp \left(-\frac{x^2}{4Dt} \right) - \frac{x}{2D} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \right\} \quad 3.7$$

Όπου:

- W = ροή διάχυσης στην επιφάνεια του σκυροδέματος σε $\text{kg}/\text{cm}^2\text{s}$

Η ανάλυση Monte Carlo χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων, την οριακή κατάσταση.

Το μοντέλο που προτείνεται από τους Vu et al (2000), είναι βασισμένο σε αυτό των Stewart et al, αλλά έχει επεκταθεί για να συμπεριλάβει τη διατμητική αστοχία και την επίδραση των προδιαγραφών ανθεκτικότητας στον χρόνο έναρξης της διάβρωσης και στον ρυθμό διάβρωσης. Επίσης για τον υπολογισμό του συντελεστή διάχυσης χρησιμοποιείται το μοντέλο που αναπτύχθηκε από τους Papadakis et al (1991), και ορίζεται ως εξής

$$D = D_{H_2O} \cdot 0.15 \cdot \frac{1 + \rho_c \cdot \frac{c}{w}}{1 + \rho_c \cdot \frac{c}{w} + \frac{\rho_c}{\rho_a} \cdot \frac{a}{c}} \cdot \left(\frac{\rho_c \cdot \frac{w}{c} - 0.85}{1 + \rho_c \cdot \frac{w}{c}} \right)^3 \quad 3.8$$

Όπου:

- $\frac{a}{c}$ = ο λόγος των αδρανών προς το τσιμέντο
- ρ_c = η πυκνότητα του τσιμέντου
- ρ_a = η πυκνότητα των αδρανών
- D_{H_2O} = συντελεστής διάχυσης του χλωριόντων σε διάλυμα άπειρης αραιώσης .

Ο λόγος του νερού προς το τσιμέντο, εκτιμάται από τον τύπο του Bolomey συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής.

Όσον αφορά το ρεύμα διάβρωσης, δίνεται μια εμπειρική εξίσωση συναρτήσει του λόγου νερού προς τσιμέντο και της επικάλυψης του σκυροδέματος, ενώ δίνεται επίσης, μια εμπειρική σχέση του ρεύματος διάβρωσης, συναρτήσει του χρόνου έναρξης της διάβρωσης.

Οι διάφορες παράμετροι και σε αυτό το μοντέλο ακολουθούν κάποιες κατανομές, ενώ η μέθοδος Monte Carlo χρησιμοποιείται και σε αυτήν την περίπτωση για τους υπολογισμούς των πιθανοτήτων

Στο μοντέλο που προτείνεται από τους Engelund et al (1998), δίνονται σαν στοχαστικές μεταβλητές την οριακή συγκέντρωση των χλωριόντων για την έναρξη της διάβρωσης, το πάχος της επικάλυψης, η επιφανειακή συγκέντρωση χλωριόντων και ο συντελεστής διάχυσης. Οι υπολογισμοί βασίζονται σε δεδομένα προφίλ χλωριόντων, ενώ η ολοκλήρωση των τυχαίων μεταβλητών γίνεται με τη μέθοδο ανάλυσης FORM/SORM .

3.1.3 Φυσικοχημικά μοντέλα

Όσον αφορά τον σχεδιασμό για τη δράση χλωριόντων, αξίζει να σημειωθεί, ότι για τον προσδιορισμό της διάρκειας ζωής ενός στοιχείο οπλισμένου σκυροδέματος, 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 (μεταγωγή), είτε με συνδυασμό των δυο αυτών μηχανισμών [Ozbolt et al, 2010; Collepardi et al, 1972]. 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 (ti) στα περισσότερα υπολογιστικά μοντέλα μπορεί να θεωρηθεί ως η ωφέλιμη διάρκεια ζωής της κατασκευής.

Στις περισσότερες ερευνητικές μελέτες, ο ρυθμός διάχυσης των χλωριόντων στο σκυρόδεμα προσομοιώνεται από τον 2ο νόμο του Fick, μη λαμβάνοντας όμως έτσι υπόψη τις φυσικοχημικές αλληλεπιδράσεις των χλωριόντων με τον σκληρημένο τσιμεντοπολλτό και θεωρώντας σταθερό συντελεστή διαχυτότητας με το χρόνο. Είναι όμως τεκμηριωμένο το γεγονός ότι τα χλωριόντα δεσμεύονται από το σκυρόδεμα κατά 30-60% ανάλογα με τη σύσταση και τον τύπο του τσιμέντου μέσω χημικών διεργασιών που περιλαμβάνουν τη δέσμευση χλωριόντων από τα συστατικά της ενυδάτωσης του σκυροδέματος, ανταλλαγές ιόντων, αλλά και τη δημιουργία μιας διπλής ιοντοστοιβάδας [Glasser et al, 2008]. 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 τσιμεντοπολλτό, ο συντελεστής διαχυτότητας μειώνεται [CC&AA, 2009; Luping, 2008]. 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), μεγαλύτερου από τον πραγματικό (intrinsic), συντελεστή διαχυτότητας Cl^- , προσφέροντας έτσι μία υπερεκτίμηση των πραγματικών συνθηκών διείσδυσης και διάχυσης Cl^- , αλλά και διάρκειας ζωής. Στην περίπτωση επίσης που λαμβάνεται υπόψη η δέσμευση χλωριόντων, υπολογίζεται ο πραγματικός συντελεστής διάχυσης που οδηγεί σε πιο 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 [CC&AA, 2009; Luping, 2008]. Ενώ τα φυσικοχημικά μοντέλα, συνήθως μέσω συστημάτων μη-γραμμικών διαφορικών εξισώσεων λαμβάνουν υπόψη τους το πραγματικό μηχανισμό διείσδυσης χλωριόντων στο σκυρόδεμα.

Άρα, 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.

3.2 Σύγκριση χρησιμοποιούμενων λογισμικών

Αμφότεροι οι στόχοι του σχεδιασμού ανθεκτικότητας, δύναται να εκτιμηθούν μέσω υπολογιστικών προσδιοριστικών 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 μία ανάλυση και σύγκριση εφαρμογής των πιο συνήθων χρησιμοποιούμενων υπολογιστικών εργαλείων.

ClinConc

Το ClinConc 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.

Life-365

Το προσδιοριστικό μοντέλο Life-365, θεωρεί σαν μηχανισμό διείσδυσης χλωριόντων στο σκυρόδεμα εξολοκλήρου τη διάχυση τους, σύμφωνα με την απλή μορφή του δεύτερου νόμου του Fick. Λαμβάνει δε υπόψη του τη μεταβολή του συντελεστή διαχυτότητας λόγω χρόνου και θερμοκρασίας μέσω εμπειρικών εξισώσεων.

EUCON

Το EUCON 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 αποπαθητικοποίησης.

Duracon

Το Duracon, βασισμένο στο μοντέλο Duracrete, εκτιμά την 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 τη μεταβλητότητα του συντελεστή διάχυσης Cl^- λόγω χρόνου και θερμοκρασίας.

Στους Πίνακες 3.1 και 3.2 παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά των μοντέλων αυτών με τη μορφή δεδομένων/αποτελεσμάτων.

Πίνακας 3.1: Δεδομένα μοντέλων υπολογισμού διάρκειας ζωής κατασκευών (Δέμης, 2015)

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) περιοχής επιφάνειας) • Λόγος w/c • 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)
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 Διάχυσης 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 Διάχυσης Cl^- (6 months) D_{6m} ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$) • Βαθμός ενυδάτωσης, Concrete porosity * • Time-dependent binding factor $^{*}\text{Cl}$ 	<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$^{*}\text{E5}$ • Cl^- saturation concentration in solid phase$^{*}\text{E6}$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Φαινόμενος Συντελεστής Διάχυσης 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 desiccation • 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 3.2: Αποτελέσματα μοντέλων υπολογισμού διάρκειας ζωής κατασκευών (Δέμης, 2015)

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 Διάχυσης 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 Διάχυσης Cl⁻ (28 days) D28 (x 10⁻¹² m²/s) + COV 	<ul style="list-style-type: none"> • Φαινόμενος Συντελεστής Διάχυσης Cl⁻ (6 months) 	<ul style="list-style-type: none"> • Intrinsic chloride diffusion coefficient * (x 10⁻¹² m²/s) 	

Με βάση την ανάλυση του παραπάνω πίνακα και τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά για τα λογισμικά υπολογισμού διάρκειας ζωής του σκυροδέματος, για την παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Life-365.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ LIFE-365 ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΚΤΙΘΕΜΕΝΟΥ ΣΕ ΧΛΩΡΙΟΝΤΑ

Στο παράρτημα δίνεται μία σύντομη επεξήγηση για το λογισμικό ανάλυσης. Το λογισμικό ονομάζεται Life 365, είναι γραμμένο σε JAVA και αντιπροσωπεύει το μοντέλο ζωής που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 2. Το λογισμικό θα παρουσιαστεί εν συντομία, αλλά περισσότερες λεπτομέρειες για τη χρήση του υπάρχουν στο εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος.

Το μοντέλο Life-365 προβλέπει την περίοδο έναρξης της διάβρωσης, υποθέτοντας ότι η διάχυση είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός χρησιμοποιώντας το μοντέλο ζωής που αναφέρεται στο Κεφάλαιο 3. Υπολογίζει τον συντελεστή διάχυσης χλωριόντων ως μία συνάρτηση που εξαρτάται από τον χρόνο, τη θερμοκρασία και άλλους παράγοντες που αφορούν τη σύνθεση του σκυροδέματος. Η εξάρτηση του χρόνου προκύπτει από την εξίσωση 2.13 που αναφέρεται στην ενότητα 2.2.3.

$$D_c = D_{c,ref} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad [m^2/s]$$

Το m είναι ο παράγοντας χρόνου και εξαρτάται καθαρά από τη σύνθεση του σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα από τις περιεκτικότητες (%) σε ιπτάμενη τέφρα (FA) και σε σκωρία υψικαμίνου (SG) και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$m = 0.2 + 0.4[(\%FA/50) + (\%SG/70)] \quad 4.1$$

Στις περιπτώσεις που οι περιεκτικότητες αυτές είναι μηδενικές λαμβάνεται ίσος με 0.2.

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν πέντε υποθετικές περιπτώσεις για τη διάρκεια ζωής μίας κατασκευής σχετικά με τον τύπο χάλυβα οπλισμού και την προστασία που επιλέχθηκε έναντι διάβρωσης. Για την καλύτερη σύγκριση αποτελεσμάτων δημιουργήθηκαν έξι συνθέσεις

σκυροδέματος (Πίνακας 4.1) για κάθε περίπτωση, με σταθερό λόγο νερό προς τσιμέντο (w/c) ίσο με 0.55. Αυτές οι συνθέσεις παρουσιάζονται ως προκαθορισμένες επιλογές στο πρόγραμμα.

Αναλύθηκαν και τρεις ακόμη συνθέσεις όπου δεν υπήρχαν σαν επιλογές στο λογισμικό Life 365 (Πίνακας 4.2). Με τη βοήθεια των πειραματικών συντελεστών διάχυσης κάθε σύνθεσης έγινε η εισαγωγή τους στο πρόγραμμα και υπολογίστηκε η διάρκεια ζωής τους για κάθε περίπτωση που αφορά τον χάλυβα οπλισμού και την προστασία έναντι διάβρωσης.

Πίνακας 4.1: Συνθέσεις κονιαμάτων που παρουσιάζονται σαν επιλογή στο λογισμικό

Σύνθεση	% κ.β. τσιμέντου τσιμεντοειδούς πρόσθετου	Λόγος νερό/τσιμέντο (w/c)
OPC	Αμιγές κονίαμα	0.55
MFA10	Ιπτάμενη τέφρα 10%	
MFA20	Ιπτάμενη τέφρα 20%	
MSF10	Πυριτική παιπάλη 10%	
GBF10	Σκωρία υψικαμίνου 10%	
GBF20	Σκωρία υψικαμίνου 20%	
MK10	Μετακαολίνης 10%	

Πίνακας 4.2: Συνθέσεις κονιαμάτων που δεν παρουσιάζονται σαν επιλογή στο λογισμικό

Σύνθεση	% κ.β. τσιμέντου τσιμεντοειδούς πρόσθετου	Λόγος νερό/τσιμέντο (w/c)
MK10	Μετακαολίνης 10%	0.55
MK20	Μετακαολίνης 20%	
MSF20	Πυριτική παιπάλη 20%	

Από τα πειραματικά αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου NT 492 στις συνθέσεις, προέκυψαν οι αρχικοί συντελεστές διάχυσης χλωριόντων 28 ημερών D_{28} όπως φαίνονται στο Πίνακα 4.3. Ο συντελεστής διάχυσης όπως και ο παράγοντας χρόνου μπορούν να οριστούν στο μοντέλο Life-365 σε περιπτώσεις που υπάρχουν πειραματικά δεδομένα. Συνεπώς μπορεί να γίνει μία επιπλέον σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ της διάρκειας ζωής που προκύπτει από τον

πειραματικό D_{28} και από το D_{28} που προκύπτει από το μοντέλο Life-365. Στην περίπτωση των τριών συνθέσεων που δεν παρουσιάζονται στο μοντέλο σαν επιλογή θα πραγματοποιηθεί μόνο ανάλυση του χρόνου ζωής τους.

Πίνακας 4.3: Συντελεστής διείσδυσης των συνθέσεων βάσει πειραματικών αποτελεσμάτων (μέθοδος NT 492)

Σύνθεση	Συντελεστής διείσδυσης $D_{nssm}(x10^{-12})$
OPC	20.05
MFA10	13.54
MFA20	6.96
MSF10	6.69
GBF10	15.45
GBF20	9.39
MK10	4.68
MK20	1.34
MFS20	1.31

Κοινή προϋπόθεση και σε όλες τις περιπτώσεις που έγινε ανάλυση διάρκειας ζωής, ήταν οι μηνιαίες θερμοκρασίες που εκτίθεται η κατασκευή. Προέκυψαν ως ο μέσος όρος μηνιαίων θερμοκρασιών της τελευταίας δεκαετίας (πίνακας 4.4).

Πίνακας 4.4: Μέση μηνιαία θερμοκρασία τελευταίας δεκαετίας, μετεωρολογικού σταθμού Αεροδρ. Ελ. Βενιζέλος (πηγή: <http://weatherdata.aws.gr/getmonthyears/result/12>)

Μήνας	Μέση μηνιαία θερμοκρασία °C 2006-2016
Ιανουάριος	13.2
Φεβρουάριος	13.9
Μάρτιος	16.1
Απρίλιος	20.1
Μάιος	25.1
Ιούνιος	29.4
Ιούλιος	32
Αύγουστος	32.1
Σεπτέμβριος	27.6
Οκτώβριος	22.5
Νοέμβριος	18.1
Δεκέμβριος	14.4

Επίσης κοινό χαρακτηριστικό ήταν ο τύπος του φορέα, οι διαστάσεις του (Σχήμα 4.1) καθώς και το περιβάλλον έκθεσης της κατασκευής, που ήταν «έκθεση σε ζώνη ψεκασμού κυμάτων».

Select Structure Type and Dimensions

Type of structure	slabs and walls (1-D) ▼	
Thickness (mm)	200.0	
Reinf. depth (mm)	60.0	
Area (square m)	100	
--> Volume of concrete	20.0 cub. met.	
Chloride concentration units	% wt. conc. ▼	

Σχήμα 4.1: Διαστάσεις της κατασκευής

4.1 Υπολογισμός διάρκειας ζωής με χρήση των συντελεστών διάχυσης του μοντέλου Life-365

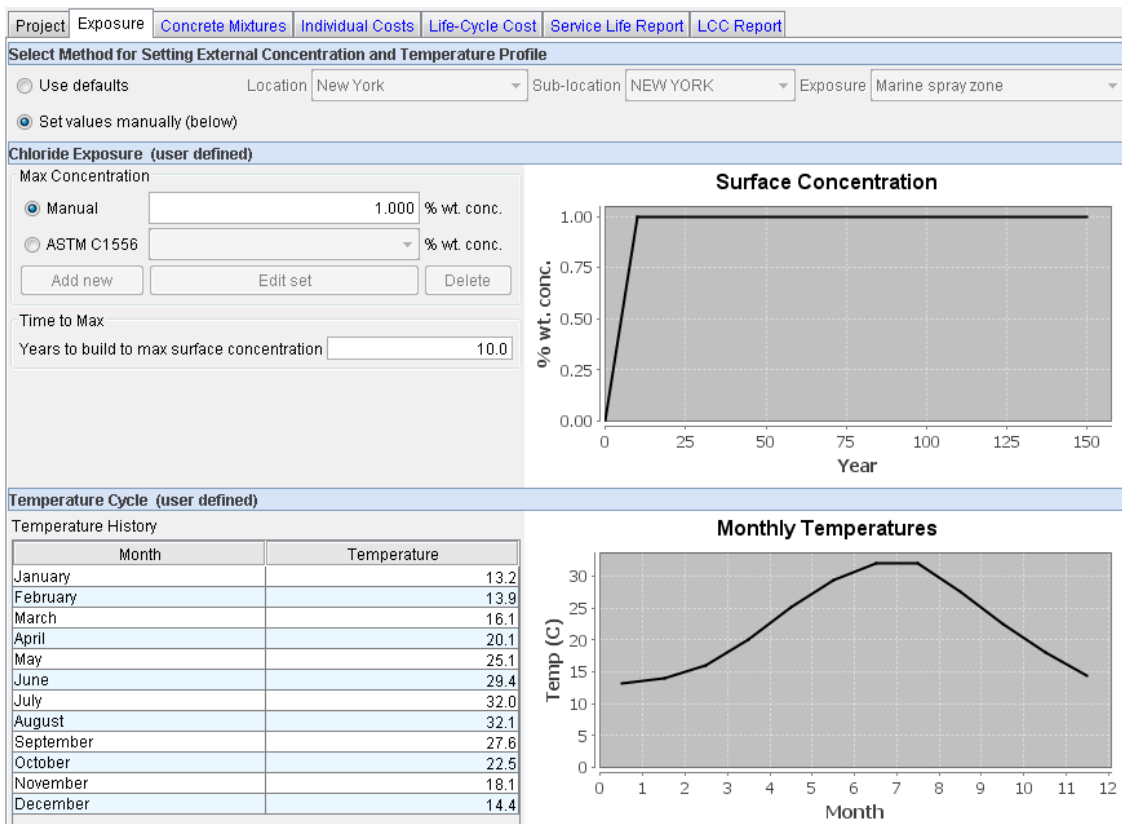
4.1.1 Οπλισμένο σκυρόδεμα με κοινό τύπο χάλυβα Black Steel και μηδενική προστασία έναντι διάβρωσης

Αρχικά στην καρτέλα **Project** ορίστηκαν ο τύπος και οι διαστάσεις της κατασκευής. Επιλέχθηκε ο τύπος: πλάκες και τοιχία (slabs and walls), με πάχος (Thickness) 200 mm και επικάλυψη σκυροδέματος (Reinf. Depth) 60 mm όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Έπειτα ορίστηκαν ο αριθμός και τα ονόματα των συνθέσεων (Σχήμα 4.2).

Define Alternatives (up to 6)	
A maximum of six alternatives can be defined	
Add a new alt	
Delete currently selected alt	
Name (double-click to edit)	Description (double-click to edit)
OPC	ΑΜΙΓΕΣ ΚΟΝΙΑΜΑ
MFA10	ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ 10%
MFA20	ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ 20%
MSF10	ΠΥΡΙΤΙΚΗ ΠΑΙΠΑΛΗ 10%
GBF10	ΣΚΩΡΙΑ ΥΨΙΚΑΜΙΝΟΥ 10%
GBF20	ΣΚΩΡΙΑ ΥΨΙΚΑΜΙΝΟΥ 20%

Σχήμα 4.2: Αριθμός και ονόματα συνθέσεων

Ύστερα στην καρτέλα **Exposure** στην ενότητα **Select Method for Setting External Concentration and Temperature Profile** επιλέγεται το **Use defaults** και στο κελί επιλογών **Exposure** το **Marine spray zone**. Με αυτό τον τρόπο ορίζεται η μέγιστη συγκέντρωση έκθεσης χλωριόντων. Στην ίδια ενότητα επιλέγεται το **Set values manually** ώστε να μπορούν να οριστούν και οι θερμοκρασίες που αναφέρονται στον πίνακα 4.1.



Σχήμα 4.3: Καρτέλα Exposure – Marine spray zone

Στη συνέχεια ορίστηκαν οι συνθέσεις των έξι εναλλακτικών μιγμάτων σύμφωνα με τον πίνακα 4.1. Επιλέχθηκε ο τύπος χάλυβα οπλισμού **Black Steel** και η μηδενική προστασία έναντι διάβρωσης (**Barriers-none**). Για κάθε σύνθεση υπολογίστηκαν ο συντελεστής διάχυσης, ο παράγοντας χρόνου, η συγκέντρωση χλωριόντων, η αρχική περίοδος και η περίοδος διάδοσης και τελικά η διάρκεια ζωής της κατασκευής (Σχήμα 4.4).

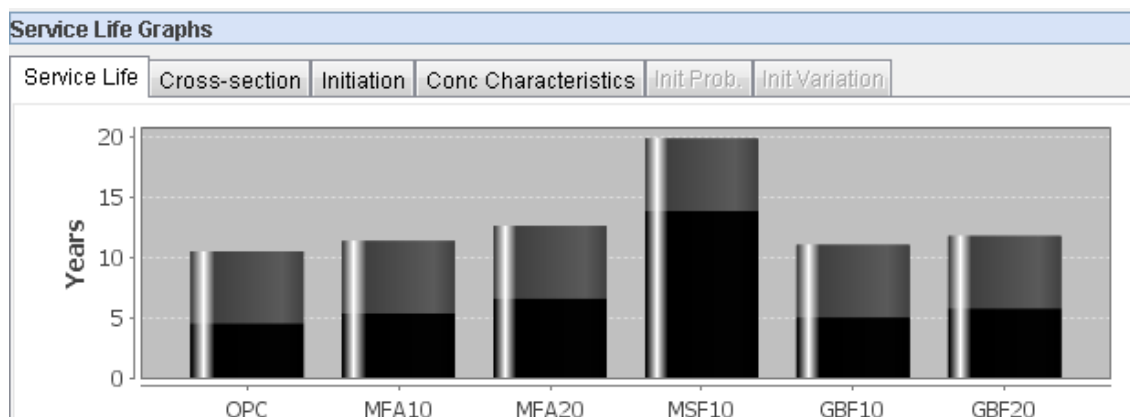
Define Concrete Mixtures (select a mix to edit its properties)							
Name	User Defined	D28 (m*m/sec)	m	Ct (% wt. c...)	Init. (yrs)	Prop. (yrs)	Service Life (yrs) ...
OPC	no	1.8197E-11	0.20	0.050	4.5	6.0	10.5
MFA10	no	1.8197E-11	0.28	0.050	5.3	6.0	11.3
MFA20	no	1.8197E-11	0.36	0.050	6.6	6.0	12.6
MSF10	no	3.4947E-12	0.20	0.050	13.8	6.0	19.8
GBF10	no	1.8197E-11	0.26	0.050	5.0	6.0	11.0
GBF20	no	1.8197E-11	0.31	0.050	5.8	6.0	11.8

Selected mixture: OPC (AMIGES KONIAMA)

Mixture	Rebar	Barriers
w/cm: 0.55	Rebar steel type: Black Steel	<none>
Class F fly ash (%): 0.00%	Rebar % vol. concrete: 1.20%	
Slag (%): 0.00%	Inhibitor: <none>	
Silica fume (%): 0.00%		

Σχήμα 4.4: Υπολογισμός διάρκειας ζωής για κάθε σύνθεση με χάλυβα οπλισμού Black Steel και μηδενική προστασία έναντι διάβρωσης (Barriers-none)

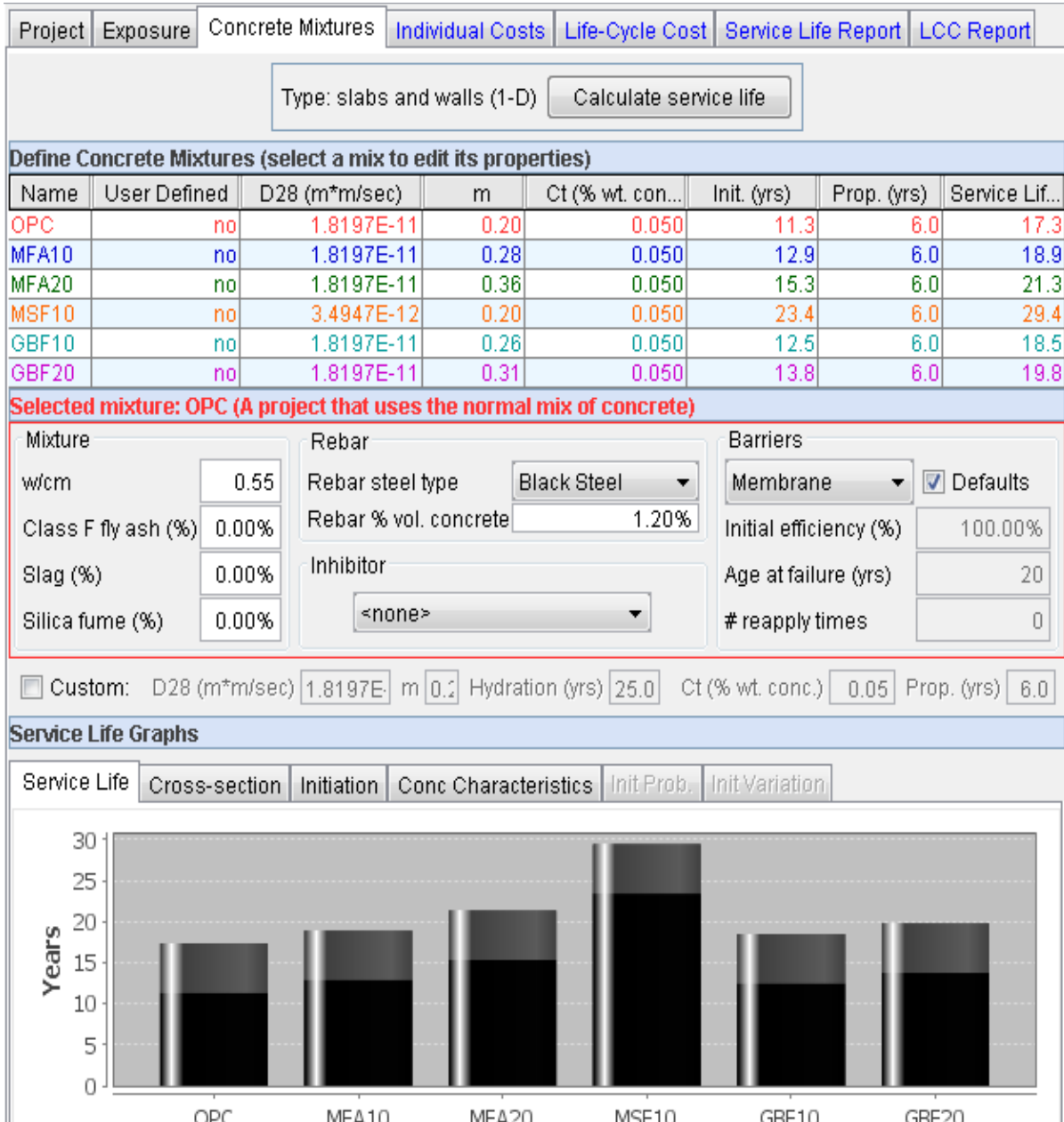
Το πρόγραμμα έχει ως προκαθορισμένη τιμή περιόδου διάδοσης, την τιμή 6 χρόνια. Από τα δεδομένα που ορίστηκαν προκύπτουν τα εξής γραφήματα για τη διάρκεια ζωής όλων των συνθέσεων (Σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5: Διάρκεια ζωής της κατασκευής για κάθε σύνθεση με χάλυβα οπλισμού Black Steel και μηδενική προστασία έναντι διάβρωσης (Barriers-none)

4.1.2 Οπλισμένο σκυρόδεμα με κοινό τύπο χάλυβα Black Steel και χρήση υδατοστεγών μεμβρανών

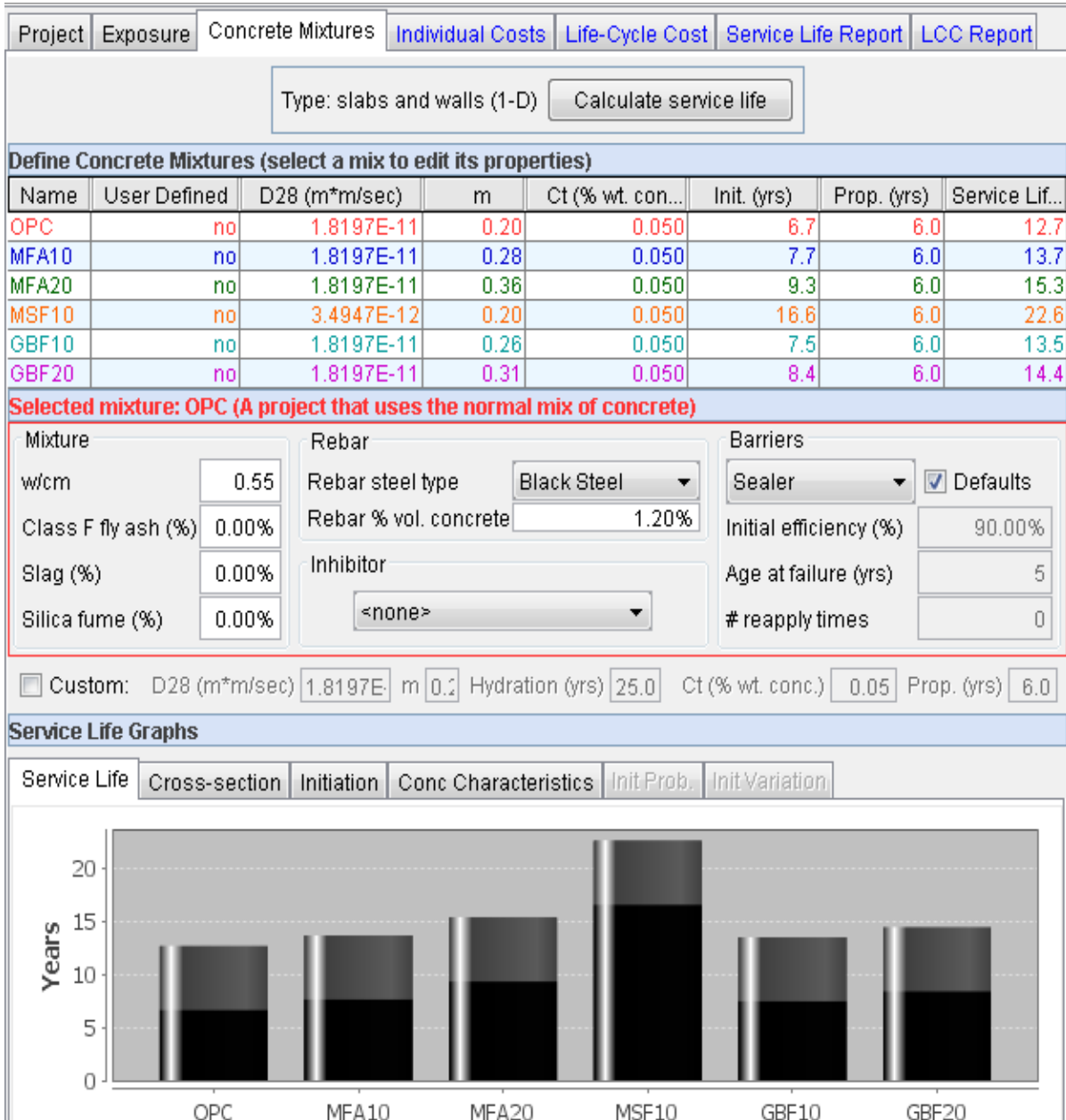
Σε αυτή την ενότητα αναλύεται η διάρκεια ζωής της κατασκευής, ο παράγοντας χρόνου, η συγκέντρωση χλωριόντων, η αρχική περίοδος, η περίοδος διάδοσης και τελικά η διάρκεια ζωής της κατασκευής με χρήση οπλισμού **Black Steel** και υδατοστεγών μεμβρανών **Barriers: Membrane** (Σχήμα 4.6).



Σχήμα 4.6: Διάρκεια ζωής της κατασκευής για κάθε σύνθεση με χάλυβα οπλισμού Black Steel και η προστασία με υδατοστεγείς μεμβράνες έναντι διάβρωσης (Barriers-membrane)

4.1.3 Οπλισμένο σκυρόδεμα με κοινό τύπο χάλυβα Black Steel και χρήση στεγανωτικών σκυροδέματος

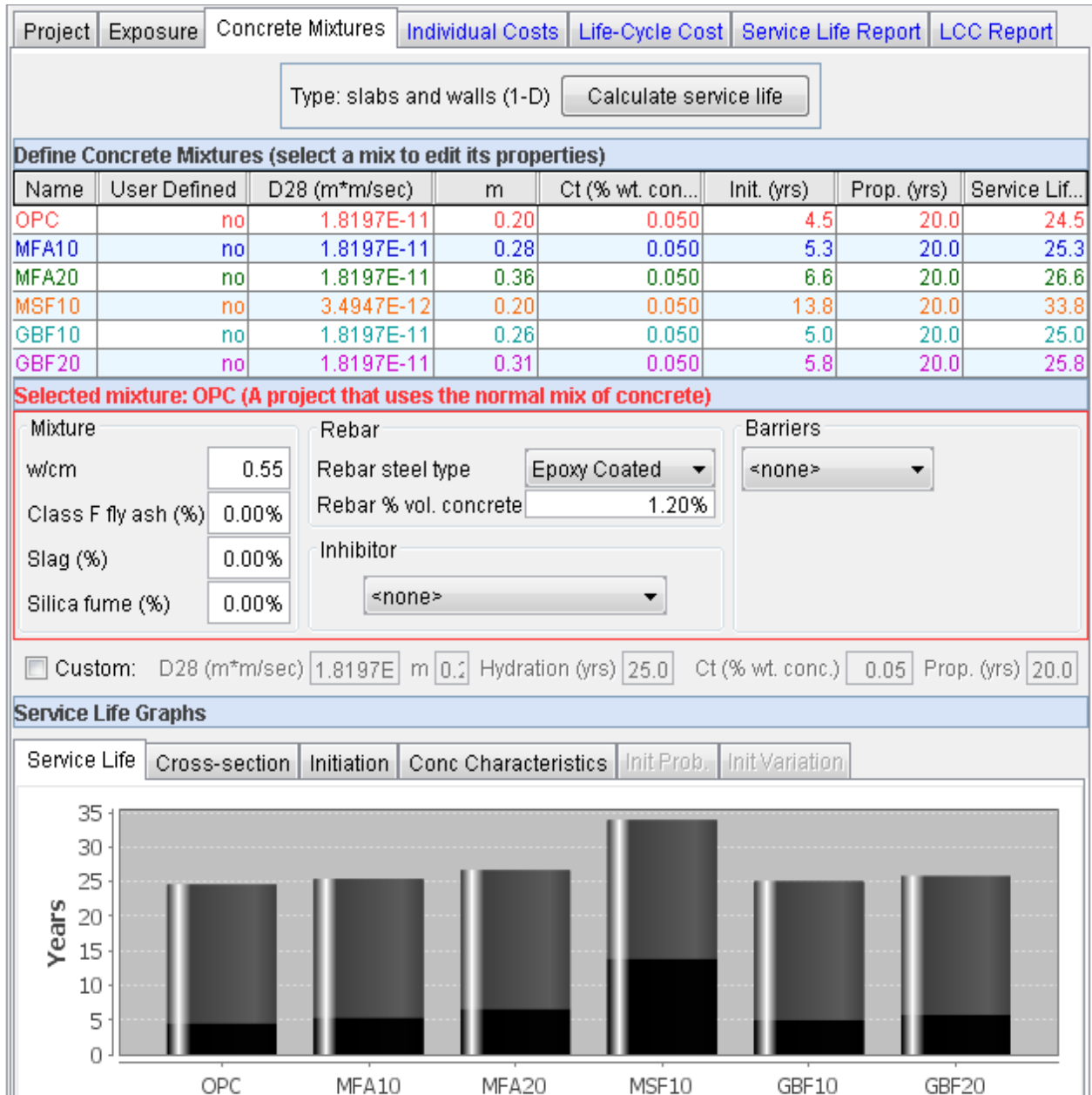
Σε αυτή την ενότητα αναλύεται η διάρκεια ζωής της κατασκευής, ο παράγοντας χρόνου, η συγκέντρωση χλωριόντων, η αρχική περίοδος, η περίοδος διάδοσης και τελικά η διάρκεια ζωής της κατασκευής με χρήση οπλισμού **Black Steel** και προστατευτικά επιστρώματα σκυροδέματος **Sealer** (Σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.7: Διάρκεια ζωής της κατασκευής για κάθε σύνθεση με τύπο χάλυβα Black Steel και προστασία σφραγιστικών έναντι διάβρωσης (Barriers-sealer)

4.1.4 Οπλισμένο σκυρόδεμα με χάλυβα Epoxy Coated και μηδενική προστασία έναντι διάβρωσης

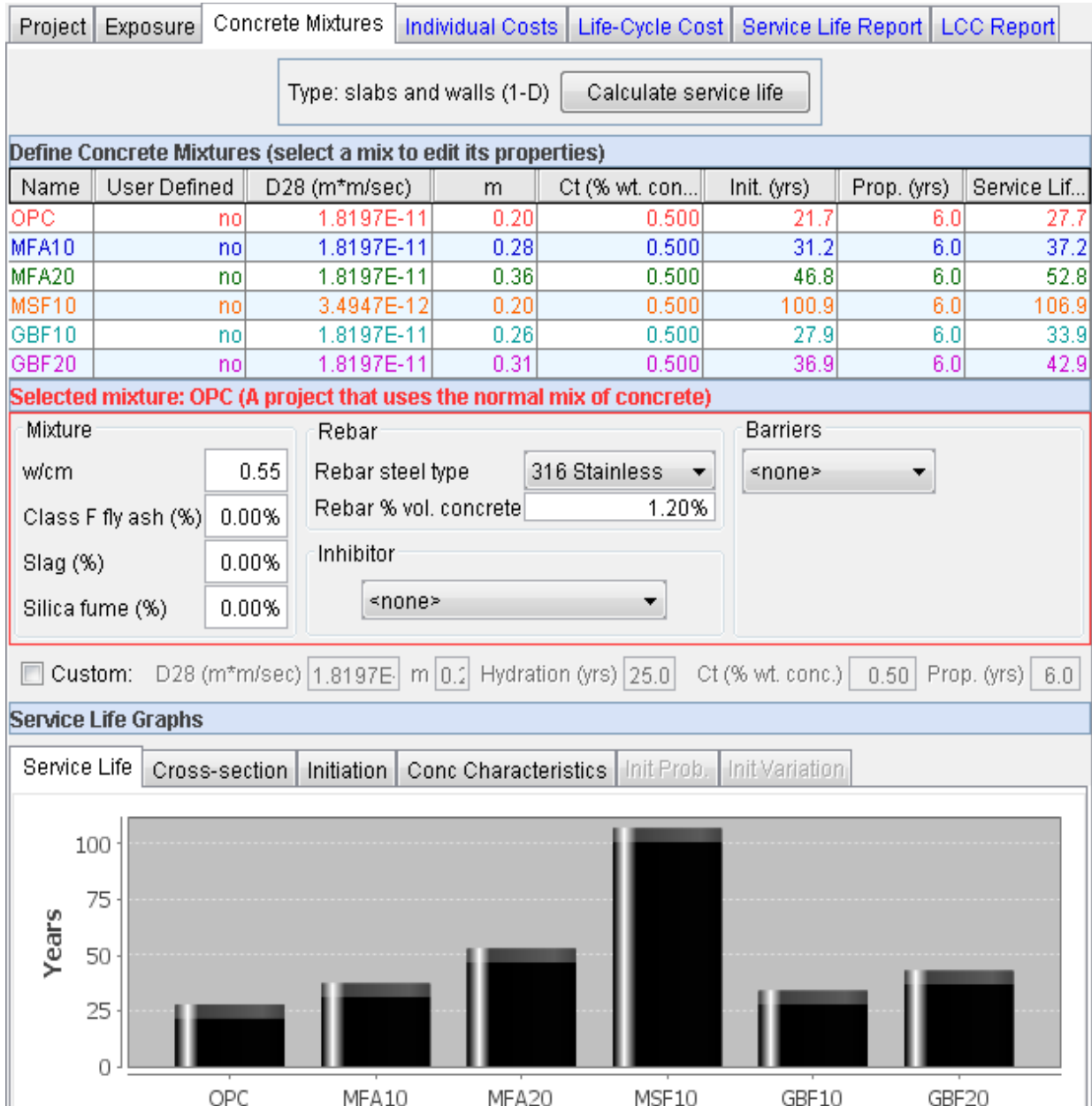
Σε αυτή την ενότητα αναλύεται η διάρκεια ζωής της κατασκευής, ο παράγοντας χρόνου, η συγκέντρωση χλωριόντων, η αρχική περίοδος, η περίοδος διάδοσης και τελικά η διάρκεια ζωής της κατασκευής με χρήση οπλισμού **Epoxy Coated** και μηδενική προστασία έναντι διάβρωσης (Σχήμα 4.8).



Σχήμα 4.8: Διάρκεια ζωής της κατασκευής για κάθε σύνθεση με τύπο χάλυβα Epoxy Coated και μηδενική προστασία από διάβρωση

4.1.5 Οπλισμένο σκυρόδεμα με ανοξείδωτο χάλυβα και μηδενική προστασία έναντι διάβρωσης

Σε αυτή την ενότητα αναλύεται η διάρκεια ζωής της κατασκευής, ο παράγοντας χρόνου, η συγκέντρωση χλωριόντων, η αρχική περίοδος, η περίοδος διάδοσης και τελικά η διάρκεια ζωής της κατασκευής με χρήση οπλισμού **Stainless steel** και μηδενική προστασία έναντι διάβρωσης (Σχήμα 4.9).



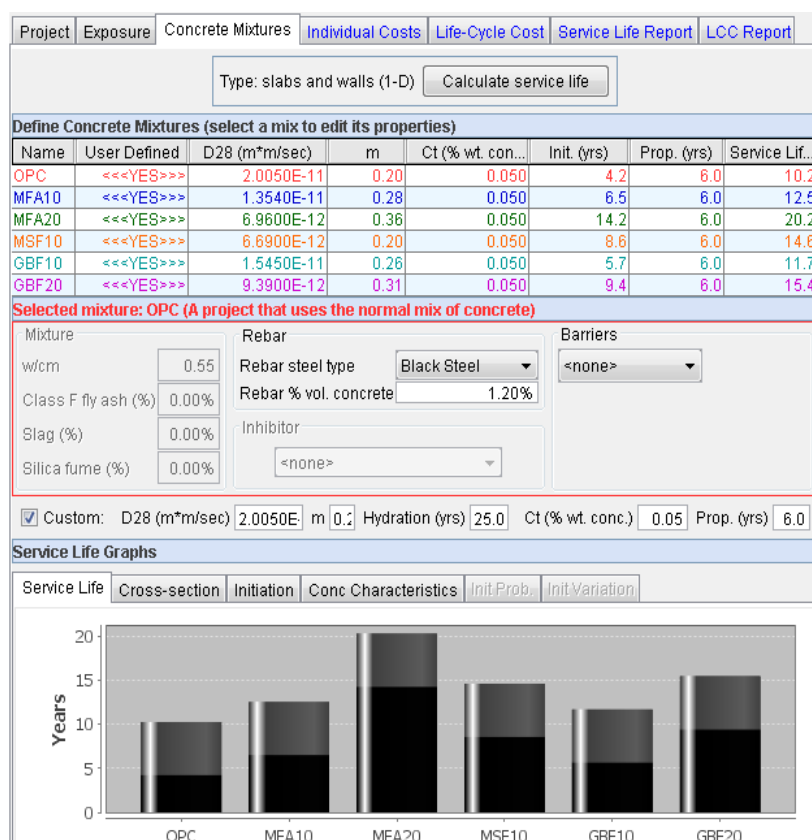
Σχήμα 4.9: Διάρκεια ζωής της κατασκευής για κάθε σύνθεση με τύπο χάλυβα 316 Stainless και μηδενική προστασία από διάβρωση

4.2 Υπολογισμός διάρκειας ζωής με χρήση πειραματικών τιμών συντελεστών διάχυσης

Ακολουθείται για κάθε σύνθεση η ίδια διαδικασία υπολογισμού διάρκειας ζωής με αυτή του κεφαλαίου 4.1 χρησιμοποιώντας όμως πειραματικές τιμές συντελεστή διάχυσης (Πίνακας 4.2) .

4.2.1 Οπλισμένο σκυρόδεμα με κοινό τύπο χάλυβα Black Steel και μηδενική προστασία έναντι διάβρωσης

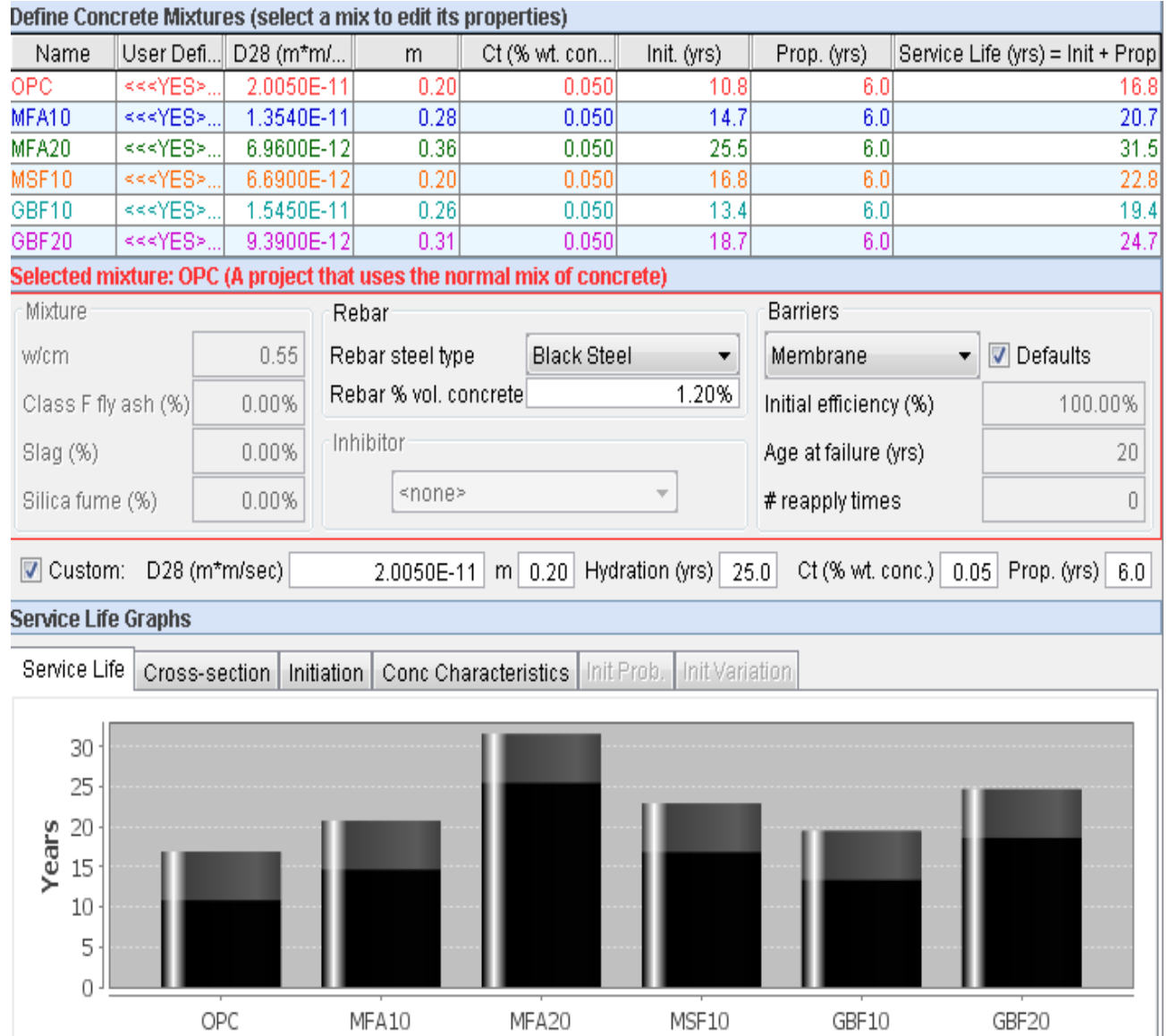
Σε αυτή την ενότητα αναλύεται η διάρκεια ζωής της κατασκευής, ο παράγοντας χρόνου, η συγκέντρωση χλωριόντων, η αρχική περίοδος, η περίοδος διάδοσης και τελικά η διάρκεια ζωής της κατασκευής με χρήση οπλισμού **Black Steel** και μηδενική προστασία έναντι διάβρωσης με πειραματικό συντελεστή διάχυσης D28 (Σχήμα 4.10).



Σχήμα 4.10: Διάρκεια ζωής της κατασκευής για κάθε σύνθεση με χάλυβα οπλισμού Black Steel, μηδενική προστασία έναντι διάβρωσης και πειραματικό D28

4.2.2 Οπλισμένο σκυρόδεμα με κοινό τύπο χάλυβα Black Steel και χρήση υδατοστεγών μεμβρανών

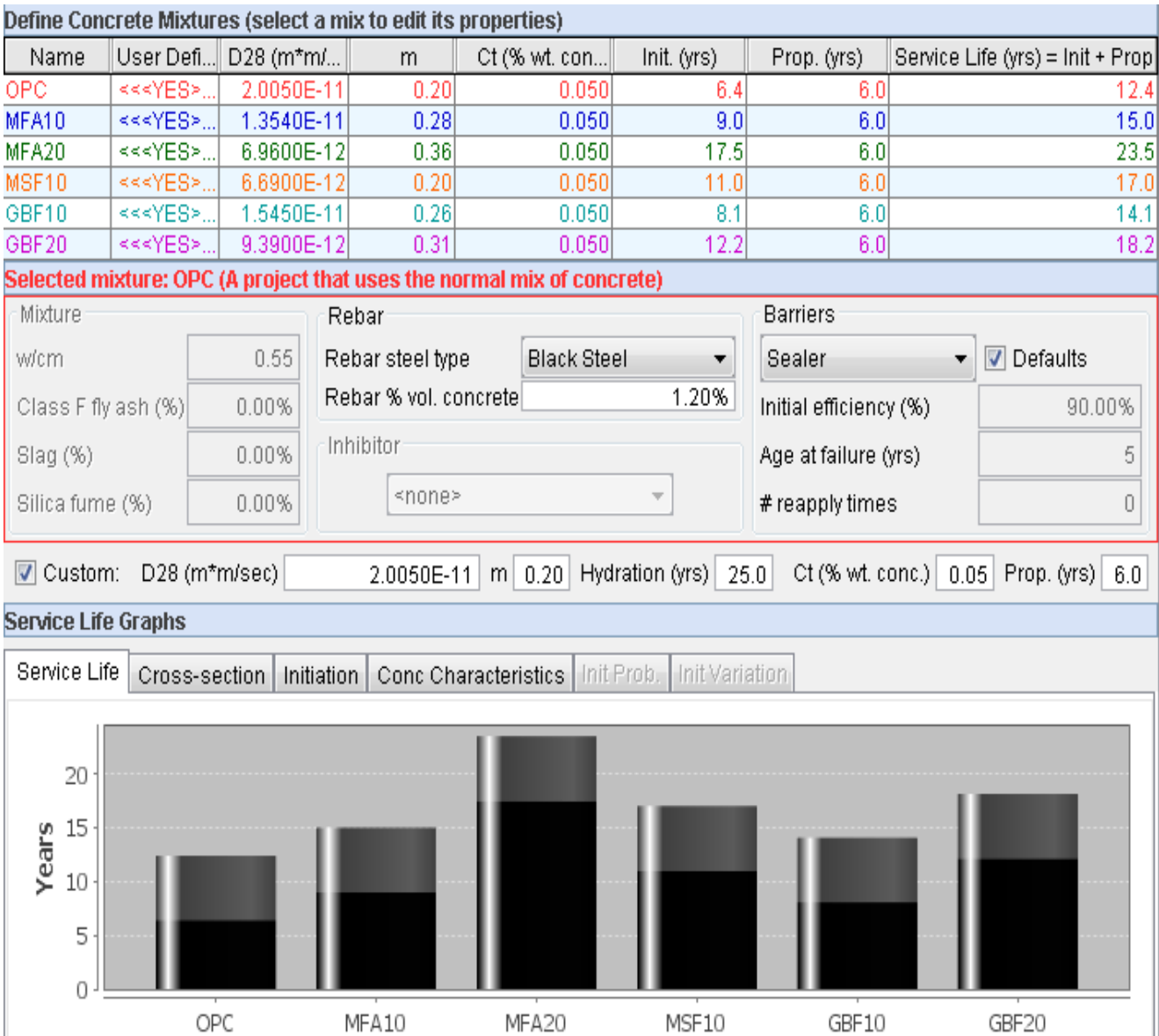
Σε αυτή την ενότητα αναλύεται η διάρκεια ζωής της κατασκευής, ο παράγοντας χρόνου, η συγκέντρωση χλωριόντων, η αρχική περίοδος, η περίοδος διάδοσης και τελικά η διάρκεια ζωής της κατασκευής με χρήση οπλισμού **Black Steel** και προστασία υδατοστεγών μεμβρανών έναντι διάβρωσης με πειραματικό συντελεστή διάχυσης (Σχήμα 4.11).



Σχήμα 4.11: Διάρκεια ζωής της κατασκευής για κάθε σύνθεση με χάλυβα οπλισμού Black Steel, προστασία υδατοστεγούς μεμβράνης έναντι διάβρωσης και πειραματικό D_{28}

4.2.3 Οπλισμένο σκυρόδεμα με κοινό τύπο χάλυβα Black Steel και χρήση στεγανωτικών σκυροδέματος

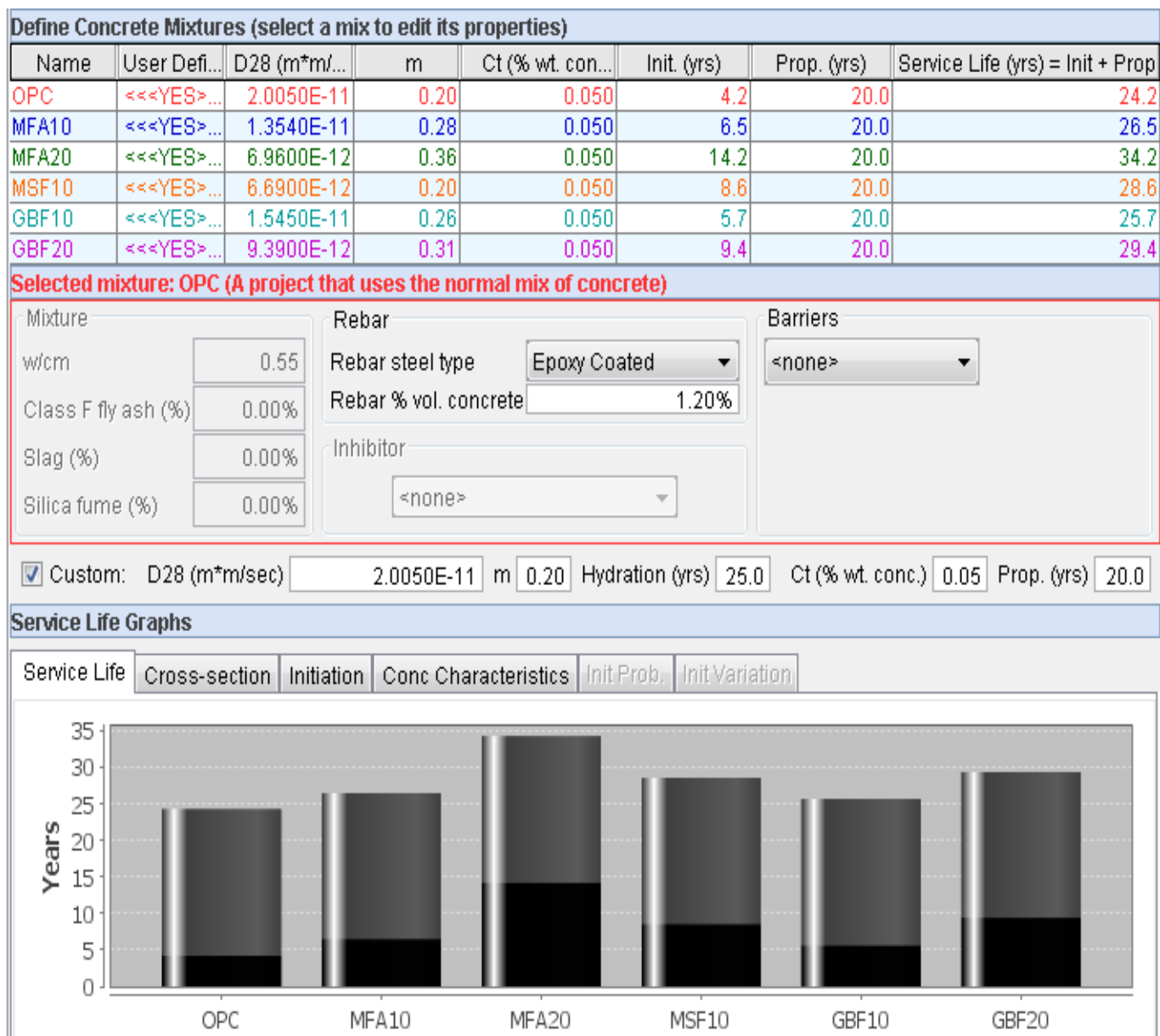
Σε αυτή την ενότητα αναλύεται η διάρκεια ζωής της κατασκευής, ο παράγοντας χρόνου, η συγκέντρωση χλωριόντων, η αρχική περίοδος, η περίοδος διάδοσης και τελικά η διάρκεια ζωής της κατασκευής με χρήση οπλισμού **Black Steel** και προστατευτικών επιστρώματων στο σκυρόδεμα με πειραματικό συντελεστή διάχυσης (Σχήμα 4.12).



Σχήμα 4.12: Διάρκεια ζωής της κατασκευής για κάθε σύνθεση με τύπο χάλυβα Black Steel και προστασία σφραγιστικών έναντι διάβρωσης με πειραματικό D28

4.2.4 Οπλισμένο σκυρόδεμα με χάλυβα Epoxy Coated και μηδενική προστασία έναντι διάβρωσης

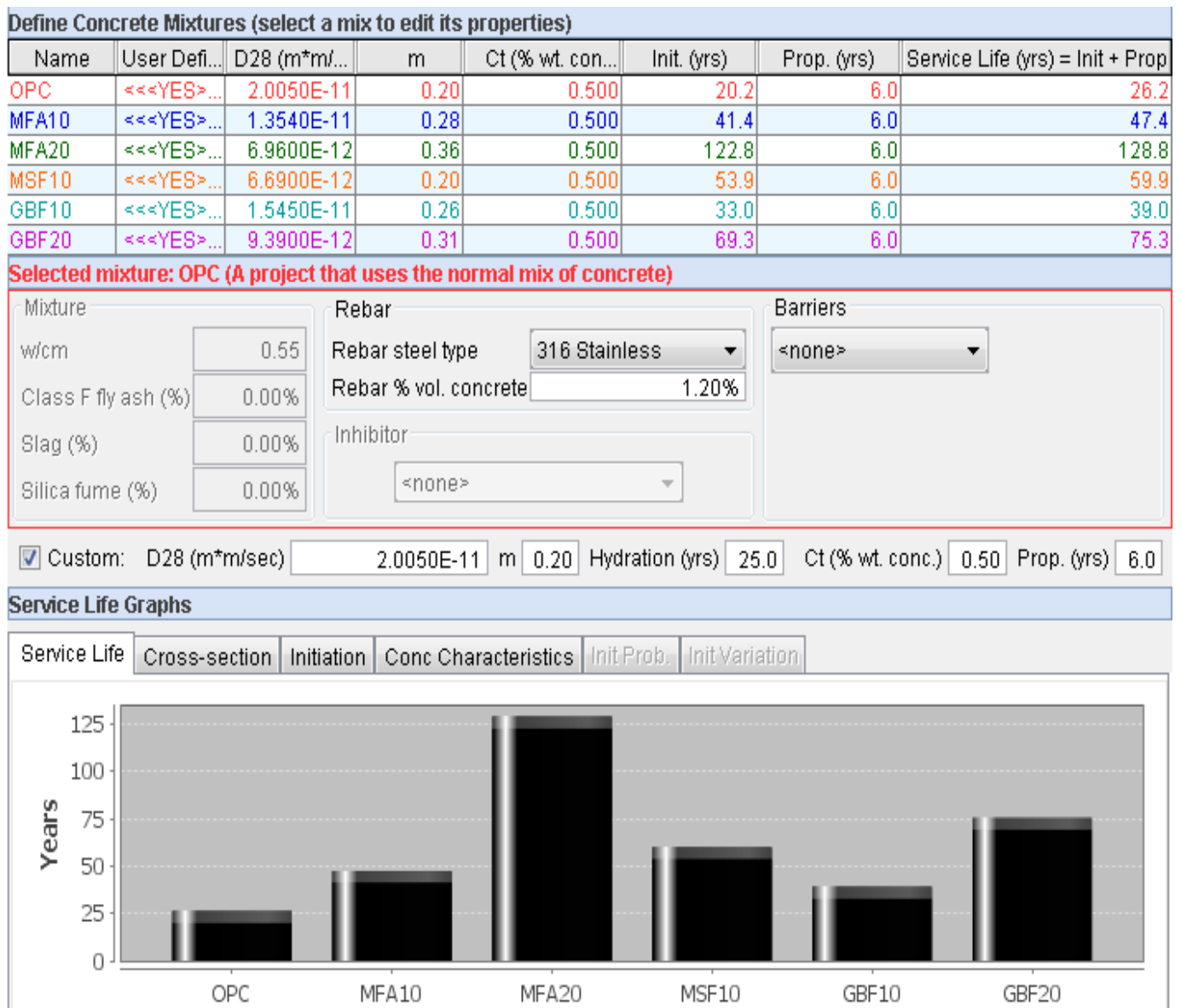
Σε αυτή την ενότητα αναλύεται η διάρκεια ζωής της κατασκευής, ο παράγοντας χρόνου, η συγκέντρωση χλωριόντων, η αρχική περίοδος, η περίοδος διάδοσης και τελικά η διάρκεια ζωής της κατασκευής με χρήση χάλυβα οπλισμού Epoxy Coated και μηδενικής προστασίας έναντι διάβρωσης με πειραματικό συντελεστή διάχυσης (Σχήμα 4.13).



Σχήμα 4.13: Διάρκεια ζωής της κατασκευής για κάθε σύνθεση με τύπο χάλυβα Epoxy Coated και μηδενική προστασία από διάβρωση με πειραματικό συντελεστή διάχυσης

4.2.5 Οπλισμένο σκυρόδεμα με ανοξείδωτο χάλυβα και μηδενική προστασία έναντι διάβρωσης

Σε αυτή την ενότητα αναλύεται η διάρκεια ζωής της κατασκευής, ο παράγοντας χρόνου, η συγκέντρωση χλωριόντων, η αρχική περίοδος, η περίοδος διάδοσης και τελικά η διάρκεια ζωής της κατασκευής με χρήση χάλυβα οπλισμού Stainless 316 και μηδενικής προστασίας έναντι διάβρωσης με πειραματικό συντελεστή διάχυσης (Σχήμα 4.14).



Σχήμα 4.14: Διάρκεια ζωής της κατασκευής για κάθε σύνθεση με χρήση χάλυβα οπλισμού Stainless 316 και μηδενικής προστασίας έναντι διάβρωσης με πειραματικό συντελεστή διάχυσης

4.3 Υπολογισμός διάρκειας ζωής συνθέσεων εφαρμοσμένες στο μοντέλο μέσω του πειραματικού συντελεστή διάχυσης

Το πρόγραμμα Life 365 δίνει τη δυνατότητα συνδυασμών πολλαπλών συνθέσεων με τα εξής τιμωτοειδή προσθετά:

- Ιπτάμενη τέφρα (0% έως 50%)
- Σκωρία υψικαμίνου (0% έως 70%)
- Πυριτική παιπάλη (0% έως 15%)

Οι συνθέσεις με 10% και 20% μετακαολίνη (MK10, MK20) καθώς και η σύνθεση με 20% πυριτική παιπάλη (MFS 20) δεν υπάρχουν σαν επιλογή στο πρόγραμμα. Παρόλα αυτά υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής τους στο μοντέλο χρησιμοποιώντας τον πειραματικό συντελεστή D_{28} των συγκεκριμένων συνθέσεων (Πίνακας 4.2) και τον παράγοντα χρόνου m . Μετά την εισαγωγή τους γίνεται η ανάλυση και προκύπτει η διάρκεια ζωής τους για τις περιπτώσεις τύπου χάλυβα και προστασίας έναντι διάβρωσης που αναφέρθηκαν στα κεφάλαια 4.1 και 4.2. Στο σχήμα 4.15 φαίνεται ενδεικτικά μία από τις αναλύσεις με χρήση χάλυβα οπλισμού Black Steel και μηδενική προστασία έναντι διάβρωσης με $m=0.2$.

Name	User ...	D28 (m ² m/sec)	m	Ct (% wt. conc.)	Init. (yrs)	Prop. (yrs)	Service Life (yrs) = Init + Prop
OPC	<<<Υ...	2.0050E-11	0.20	0.050	4.2	6.0	10.2
MK10	<<<Υ...	4.6800E-12	0.20	0.050	11.2	6.0	17.2
MK20	<<<Υ...	1.3400E-12	0.20	0.050	32.2	6.0	38.2
MSF20	<<<Υ...	1.3100E-12	0.20	0.050	32.8	6.0	38.8

Selected mixture: OPC (AMIGES KONIAMA)

Mixture	Rebar	Barriers
w/cm: 0.55	Rebar steel type: Black Steel	<none>
Class F fly ash (%): 0.00%	Rebar % vol. concrete: 1.20%	
Slag (%): 0.00%	Inhibitor: <none>	
Silica fume (%): 0.00%		

Custom: D28 (m²m/sec) 2.0050E-11 m 0.2 Hydration (yrs) 25.0 Ct (% wt. conc.) 0.05 Prop. (yrs) 6.0

Σχήμα 4.15: Διάρκεια ζωής της κατασκευής με χρήση χάλυβα οπλισμού Black Steel και μηδενικής προστασίας έναντι διάβρωσης, για τις συνθέσεις που εισήχθησαν στο μοντέλο με τον πειραματικό συντελεστή διάχυσης

Για τη σύνθεση με 20% πυριτική παιπάλη ο παράγοντας χρόνου m ορίστηκε ίσος με 0.2, καθώς δεν επηρεάζεται από το συγκεκριμένο τσιμεντοειδές πρόσθετο. Στην περίπτωση των συνθέσεων με 10% και 20% μετακαολίνη δεν υπήρχαν πειραματικά δεδομένα για τον παράγοντα χρόνου m , ούτε όμως και αναφορές στο μοντέλο για το αν επηρεάζεται από τη χρήση μετακαολίνη. Συνεπώς ορίστηκε αρχικά $m=0.2$ και για τις δύο συνθέσεις με μετακαολίνη, και στη συνέχεια για την σύνθεση MK10 (10% μετακαολίνη) πραγματοποιήθηκε ανάλυση της διάρκειας ζωής για πολλαπλές τιμές του m (Πίνακας 4.5).

Πίνακας 4.5: Ανάλυση της διάρκειας ζωής της σύνθεσης MK10 για πολλαπλές τιμές του m

	$m=0.2$	$m=0.25$	$m=0.3$	$m=0.35$	$m=0.4$	$m=0.45$	$m=0.5$	$m=0.55$	$m=0.6$
Black steel	17.2	19.2	21.8	25.7	31.2	38.9	49.70	64.2	83.7
Black steel-sealer	19.7	21.9	24.9	29.2	35.2	43.4	54.5	69.4	89.50
Black steel-membrane	26.1	28.9	32.7	37.6	44.1	52.7	64.4	79.8	100.50
epoxy coated	31.2	33.2	35.8	39.7	45.2	52.9	63.7	78.2	97.7
stainless316	82	105.5	136.85	156+	156+	156+	156+	156+	156+

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

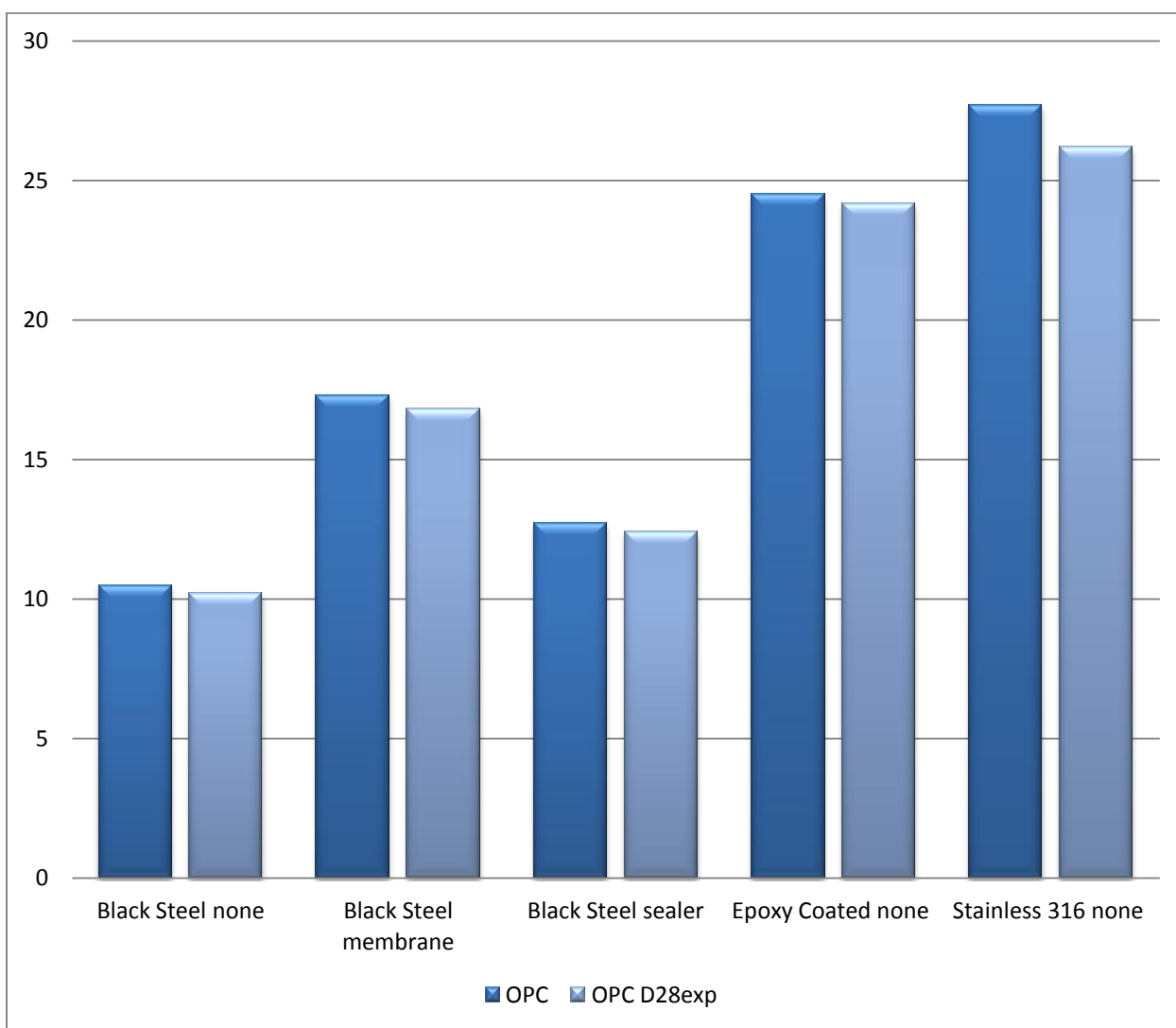
Στον πίνακα 5.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διάρκειας ζωής για όλους τους τύπους οπλισμών και προστασίας, για κάθε σύνθεση. Για όλες τις συνθέσεις σκυροδέματος παρατηρείται ότι η εκτενέστερη διάρκεια ζωής εμφανίζεται στον ανοξειδωτο χάλυβα με μηδενική προστασία έναντι διάβρωσης και στις 2 περιπτώσεις συντελεστών διάχυσης. Επίσης ο απλός χάλυβας οπλισμού (Black Steel) δεν παρουσιάζει μεγάλες διαφορές στη διάρκεια ζωής από το απλό χάλυβα με προστατευτικά επιστρώματα στο σκυρόδεμα έναντι διάβρωσης. Δηλαδή η χρήση τους αυξάνει την διάρκεια ζωής κατά 2 χρόνια περίπου.

Παρατηρείτε επίσης ότι η ιπτάμενη τέφρα υπερτερεί σε σχέση με τη σκωρία υψικαμίνου στα αποτελέσματα διάρκειας ζωής. Επίσης παρατηρείται ότι διπλασιάζοντας το ποσοστό του πρόσθετου υλικού σχεδόν διπλασιάζεται και η διάρκεια ζωής.

Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα υπολογισμού διάρκειας ζωής κάθε σύνθεσης για όλους τους τύπους χάλυβα οπλισμού και προστασίας

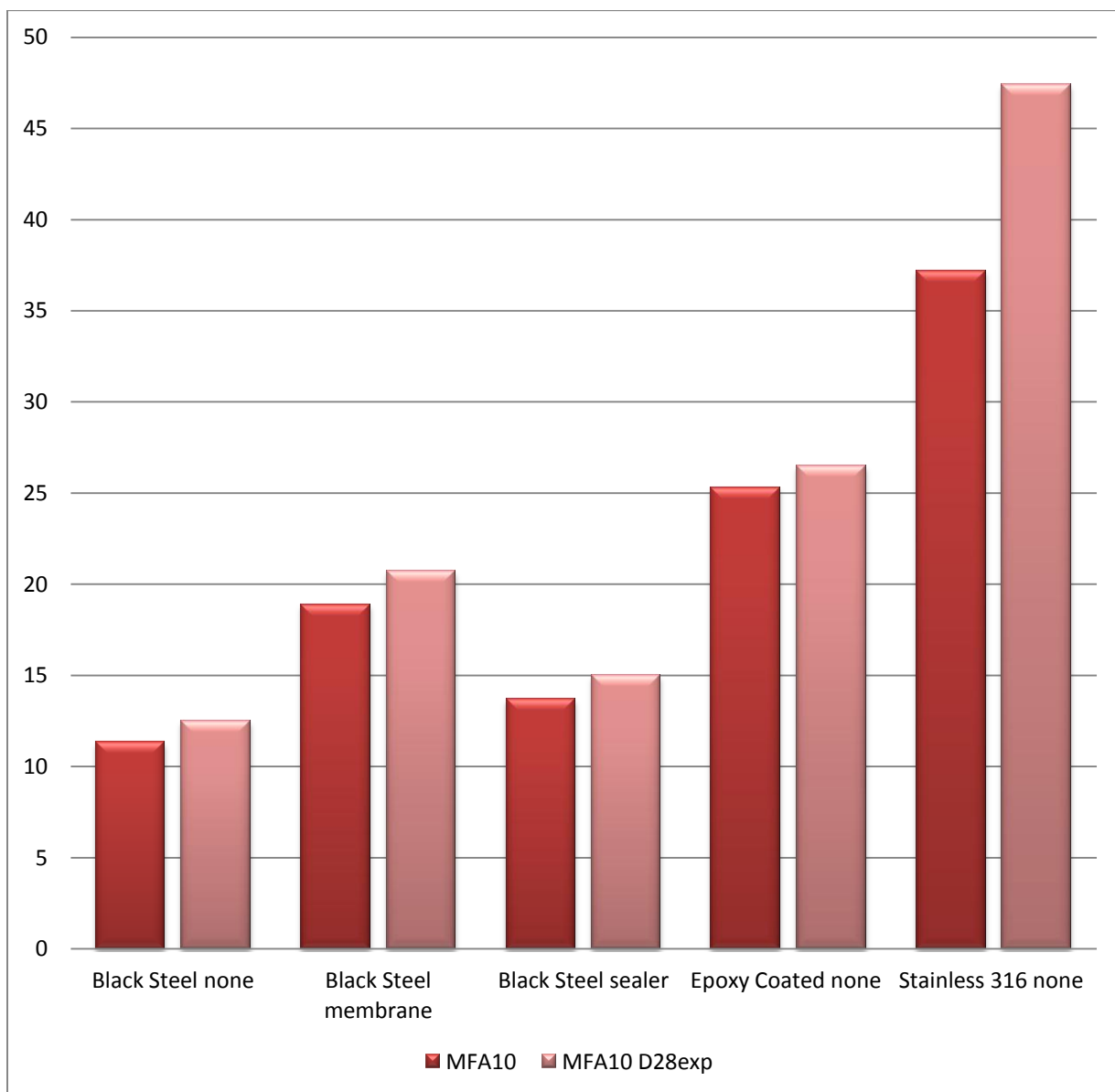
Συνθέσεις	Διάρκεια Ζωής					Διάρκεια Ζωής με Πειραματικό D28				
	Black Steel none	Black Steel membrane	Black Steel sealer	Epoxy Coated none	Stainless 316 none	Black Steel none	Black steel membrane	Black Steel sealer	Epoxy Coated none	Stainless 316 none
OPC	10.5	17.3	12.7	24.5	27.7	10.2	16.8	12.4	24.2	26.2
MFA10	11.3	18.9	13.7	25.3	37.2	12.5	20.7	15	26.5	47.4
MFA20	12.6	21.3	15.3	26.6	52.8	20.2	31.5	23.5	34.2	128.8
MSF10	19.8	29.4	22.6	33.8	106.9	14.6	22.8	17	28.6	59.9
GBF10	11	18.5	13.5	25	33.9	11.7	19.4	14.1	25.7	39
GBF20	11.8	19.8	14.4	25.8	42.9	15.4	24.7	18.2	29.4	75.3

Διαπιστώνεται και φαίνεται διαγραμματικά στο Σχήμα 5.1, ότι στη σύνθεση αμιγούς κονιάματος OPC οι διαφορές στη διάρκεια ζωής της κατασκευής είναι αμελητέες μεταξύ πειραματικού συντελεστή και του συντελεστή του προγράμματος. Μεταξύ των τριών τύπων χάλυβα είναι σαφές ότι την καλύτερη απόδοση με παραπάνω από 25 χρόνια ζωής έχει ο ανοξείδωτος χάλυβας (Stainless), έπειτα ακολουθεί ο χάλυβας με εποξειδωτική ρητίνη (epoxy coated) και τέλος ο συμβατικός χάλυβας. Όσον αφορά στην ύπαρξη προστασίας έναντι διάβρωσης, στον συμβατικό χάλυβα παρατηρείται ότι η επιλογή χρήσης προστατευτικών μεμβρανών αυξάνει τη διάρκεια ζωής πάνω από 5 χρόνια, συγκριτικά με τη χρήση στεγανωτικών.



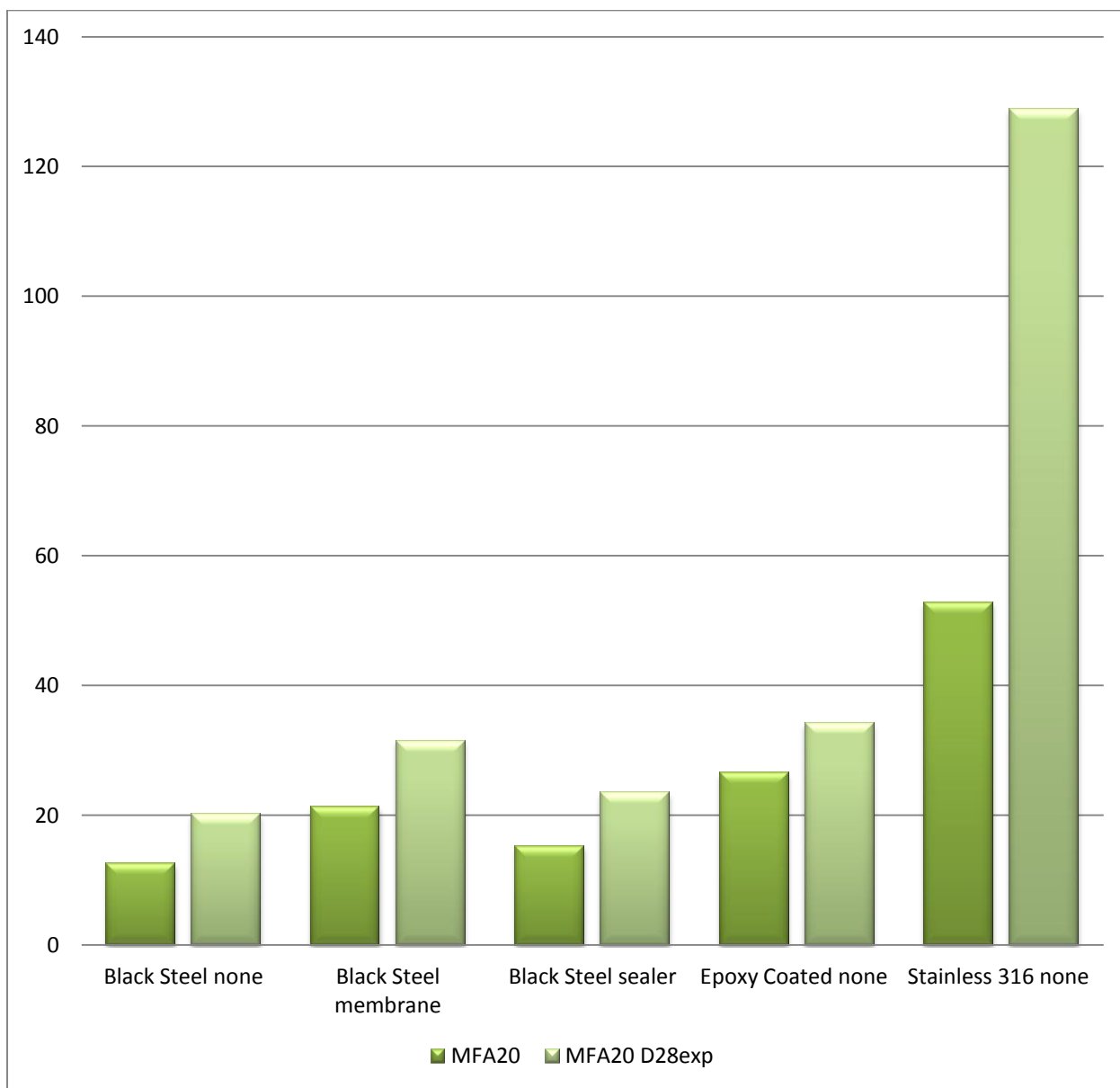
Σχήμα 5.1: Διάρκεια ζωής αμιγούς κονιάματος (OPC) για κάθε τύπο χάλυβα οπλισμού και προστασίας έναντι διάβρωσης, για τις 2 περιπτώσεις συντελεστών διάχυσης

Στο Σχήμα 5.2, αναπαρίσταται γραφικά η διάρκεια ζωής του κονιάματος MFA10 που περιέχει 10% ιπτάμενη τέφρα. Παρατηρείται ότι την καλύτερη απόδοση με παραπάνω από 45 χρόνια ζωής έχει ο ανοξείδωτος χάλυβας. Όσον αφορά στην ύπαρξη προστασίας έναντι διάβρωσης, στον συμβατικό χάλυβα παρατηρείται ότι η επιλογή χρήσης προστατευτικών μεμβρανών αυξάνει τη διάρκεια ζωής, σε χρόνο μεγαλύτερο από 20 χρόνια.



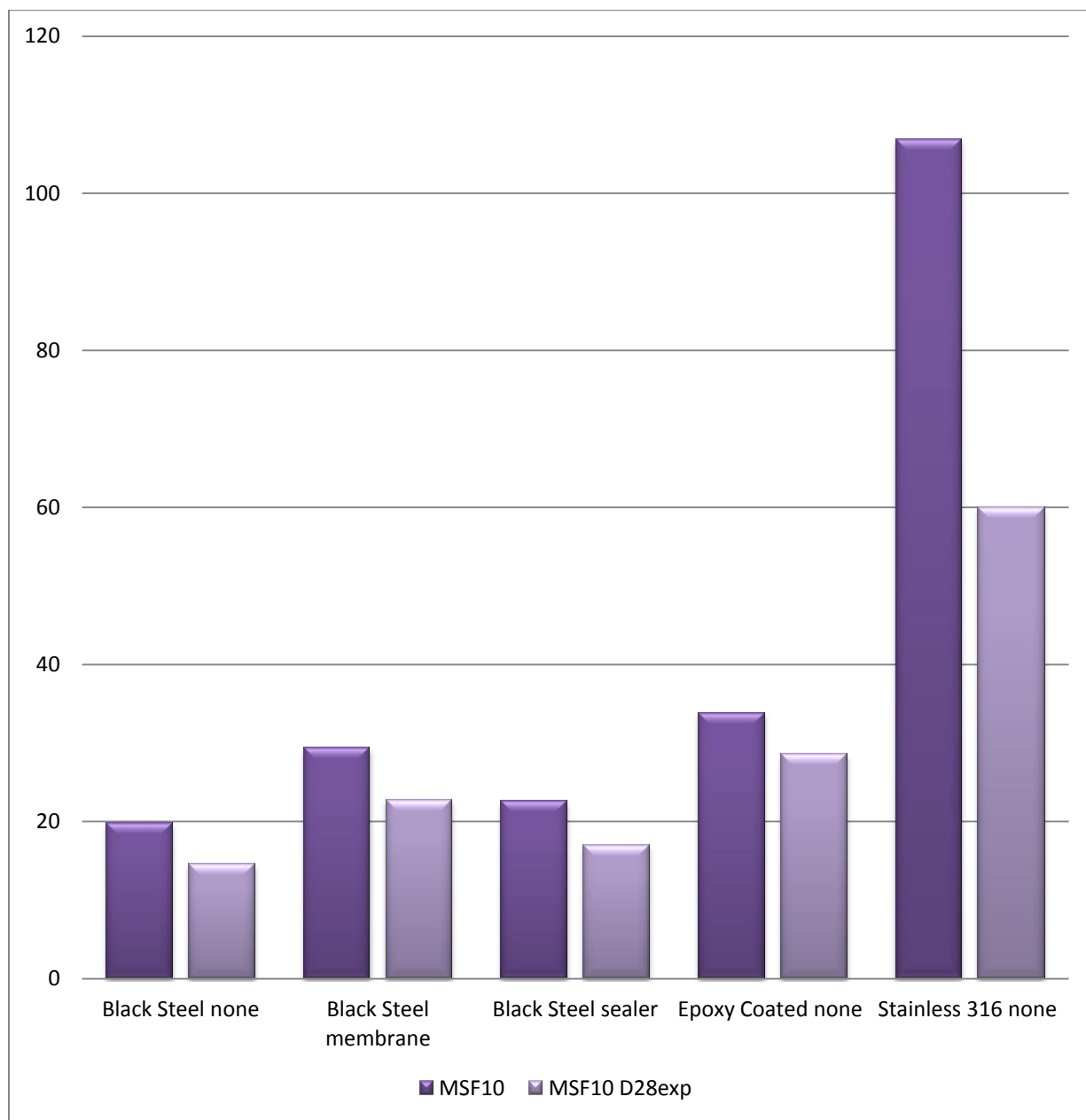
Σχήμα 5.2: Διάρκειας ζωής κονιάματος MFA10 για κάθε τύπο χάλυβα οπλισμού και προστασίας έναντι διάβρωσης, για τις 2 περιπτώσεις συντελεστών διάχυσης

Στο Σχήμα 5.3, αναπαρίσταται γραφικά η διάρκεια ζωής του κονιάματος MFA20 που περιέχει 20% ιπτάμενη τέφρα παρατηρείται ότι την καλύτερη απόδοση με παραπάνω από 120 χρόνια ζωής έχει ο ανοξείδωτος χάλυβας στην περίπτωση του πειραματικού συντελεστή διάχυσης. Ενώ με τη χρήση του συντελεστή διάχυσης που προκύπτει από το πρόγραμμα η διάρκεια ζωής είναι μικρότερη καθώς το πρόγραμμα παράγει συντηρητικά αποτελέσματα για τη συγκεκριμένη σύνθεση.



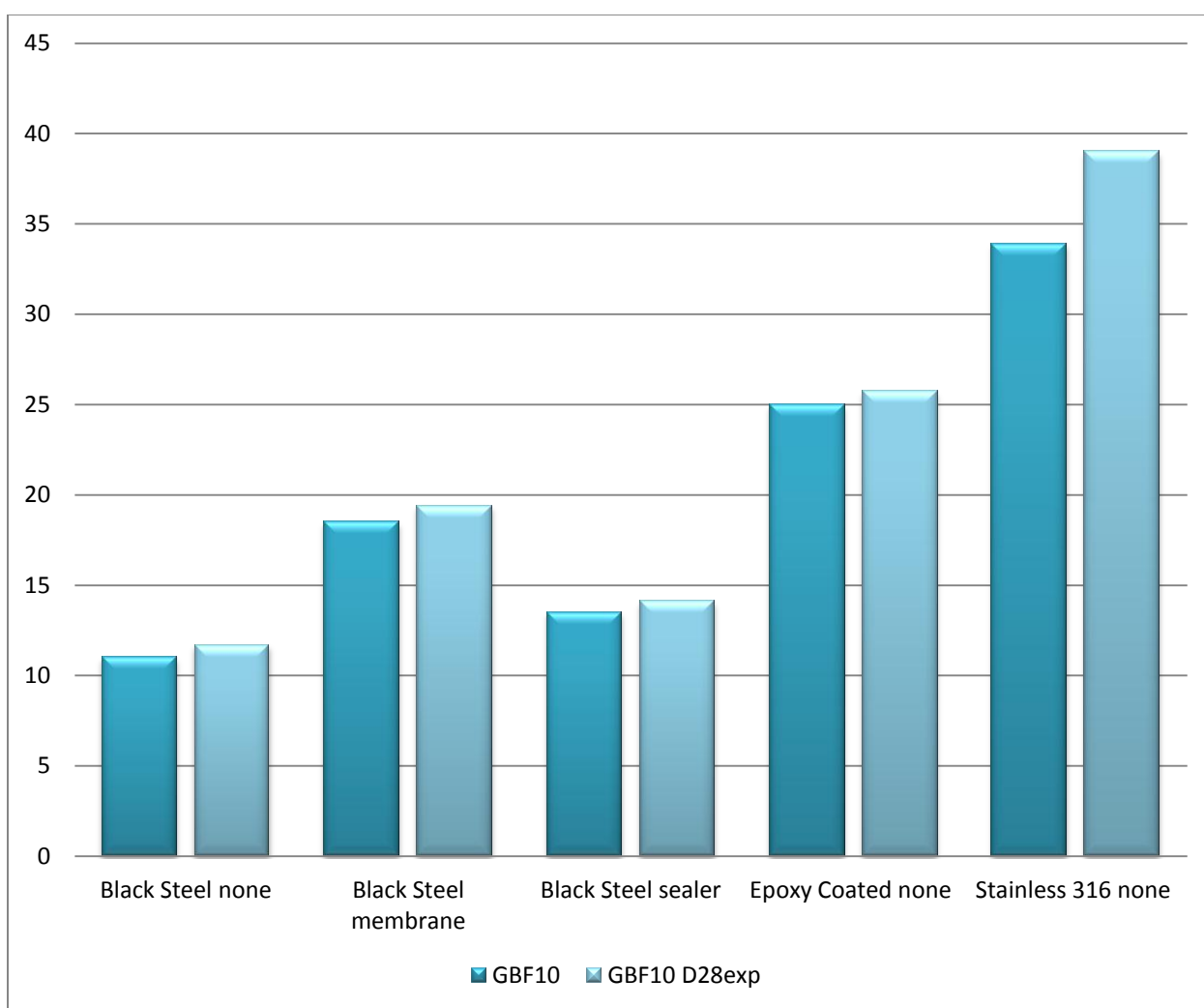
Σχήμα 5.3: Διάρκεια ζωής κονιάματος MFA20 για κάθε τύπο χάλυβα οπλισμού και προστασίας έναντι διάβρωσης, για τις 2 περιπτώσεις συντελεστών διάχυσης

Στο Σχήμα 5.4, αναπαρίσταται γραφικά η διάρκεια ζωής του κονιάματος MSF10 που περιέχει 10% πυριτική παιπάλη, όπου παρατηρείται ότι την καλύτερη απόδοση με παραπάνω από 100 χρόνια ζωής έχει ο ανοξειδωτος χάλυβας. Όσον αφορά στην ύπαρξη προστασίας έναντι διάβρωσης, στον συμβατικό χάλυβα παρατηρείται ότι η επιλογή χρήσης προστατευτικών μεμβρανών αυξάνει τη διάρκεια ζωής, σε χρόνο μεγαλύτερο από 25 χρόνια.



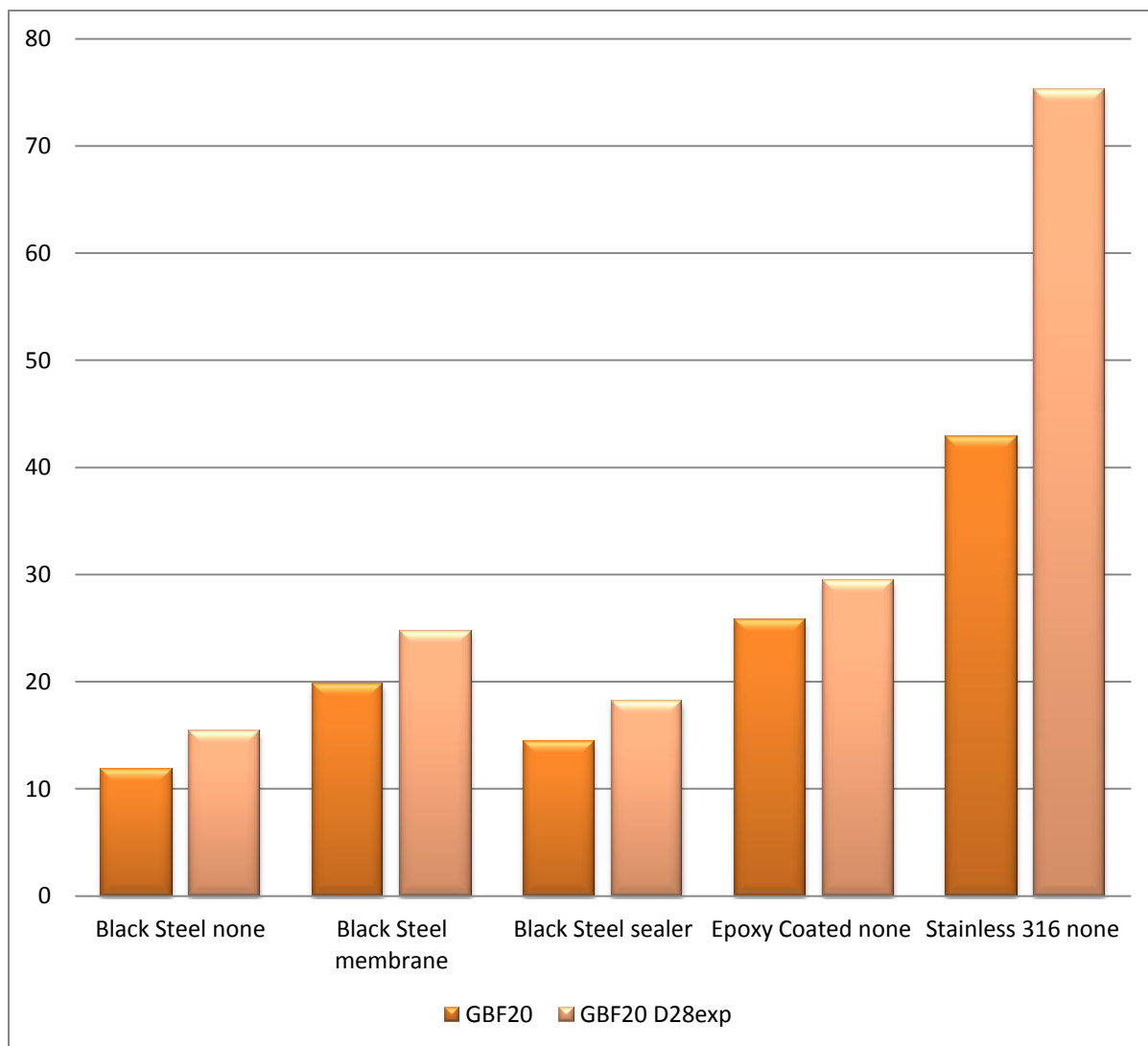
Σχήμα 5.4: Διάρκεια ζωής κονιάματος MSF10 για κάθε τύπο χάλυβα οπλισμού και προστασίας έναντι διάβρωσης, για τις 2 περιπτώσεις συντελεστών διάχυσης

Στο Σχήμα 5.5 αναπαρίσταται γραφικά η διάρκεια ζωής του κονιάματος GBF10 που περιέχει 10% σκωρία υψικαμίνου. Διαπιστώνεται ότι στη συγκεκριμένη σύνθεση οι διαφορές στη διάρκεια ζωής της κατασκευής είναι αμελητέες μεταξύ πειραματικού συντελεστή και του συντελεστή του προγράμματος. Μεταξύ των τριών τύπων χάλυβα υπερισχύει ο ανοξείδωτος χάλυβας, με διάρκεια ζωής πάνω από 35 χρόνια ζωής. Ακολουθεί ο χάλυβας με εποξειδική ρητίνη (epoxy coated) και τέλος ο συμβατικός χάλυβας. Όσον αφορά στην ύπαρξη προστασίας έναντι διάβρωσης, στο συμβατικό χάλυβα παρατηρείται ότι η επιλογή χρήσης προστατευτικών μεμβρανών αυξάνει τη διάρκεια ζωής πάνω από 5 χρόνια, συγκριτικά με τη χρήση στεγανωτικών.



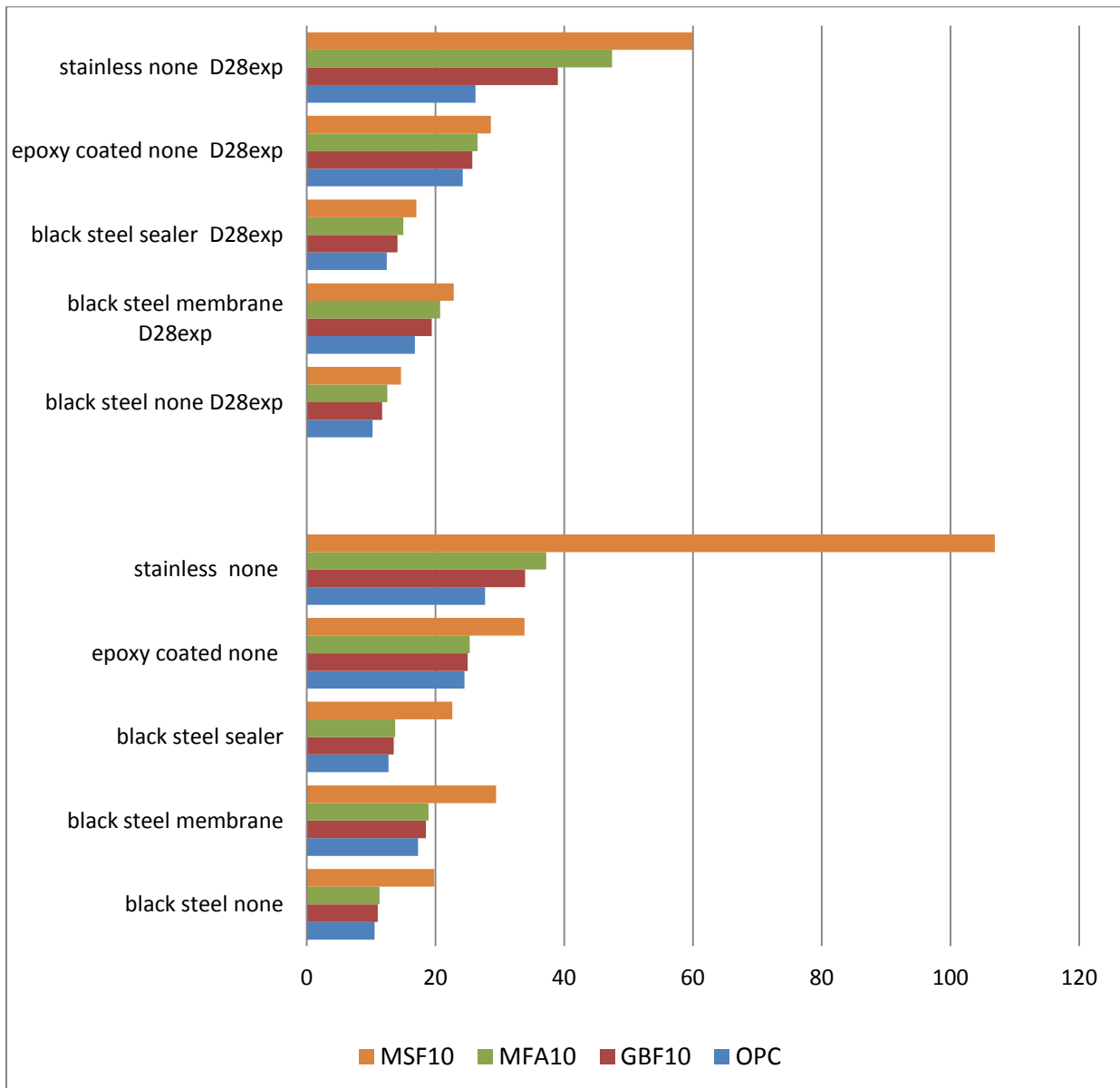
Σχήμα 5.5: Διάρκεια ζωής κονιάματος GBF10 για κάθε τύπο χάλυβα οπλισμού και προστασίας έναντι διάβρωσης, για τις 2 περιπτώσεις συντελεστών διάχυσης

Στο Σχήμα 5.6 αναπαρίσταται γραφικά η διάρκεια ζωής του κονιάματος GBF20 που περιέχει 20% σκωρία υψικαμίνου. Παρατηρείται ότι την καλύτερη απόδοση με παραπάνω από 70 χρόνια ζωής έχει ο ανοξείδωτος χάλυβας. Η χρήση του συντελεστή διάχυσης που προκύπτει από το πρόγραμμα δίνει διάρκεια ζωής μικρότερη από τον πειραματικό συντελεστή διάχυσης συνεπώς το πρόγραμμα παράγει συντηρητικά αποτελέσματα και για τη συγκεκριμένη σύνθεση.



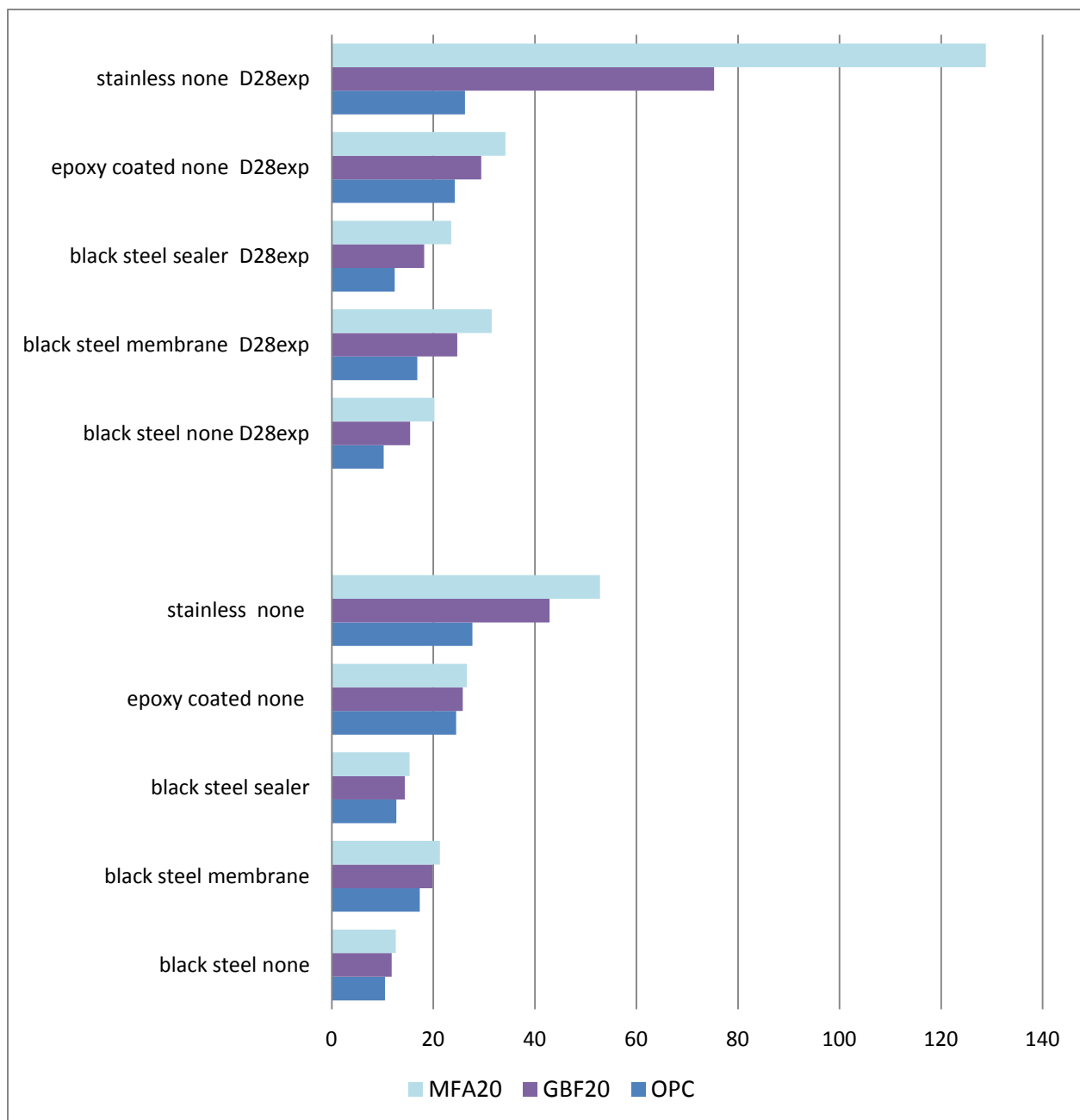
Σχήμα 5.6: Διάρκεια ζωής κονιάματος GBF20 για κάθε τύπο χάλυβα οπλισμού και προστασίας έναντι διάβρωσης, για τις 2 περιπτώσεις συντελεστών διάχυσης

Στο σχήμα 5.7 αναπαρίσταται γραφικά η διάρκεια ζωής των κονιαμάτων μετά από προσθήκη τσιμεντοειδούς προσθέτου σε ποσοστό 10%, για τους διάφορους τύπους χάλυβα οπλισμού και προστασίας έναντι διάβρωσης. Παρατηρείται ότι η σειρά κατάταξης των συνθέσεων με 10% πρόσθετο υλικού στο αμιγές κονίαμα από την βέλτιστη στην χειρότερη είναι, MSF10 > MFA10 > GBF10 > OPC.



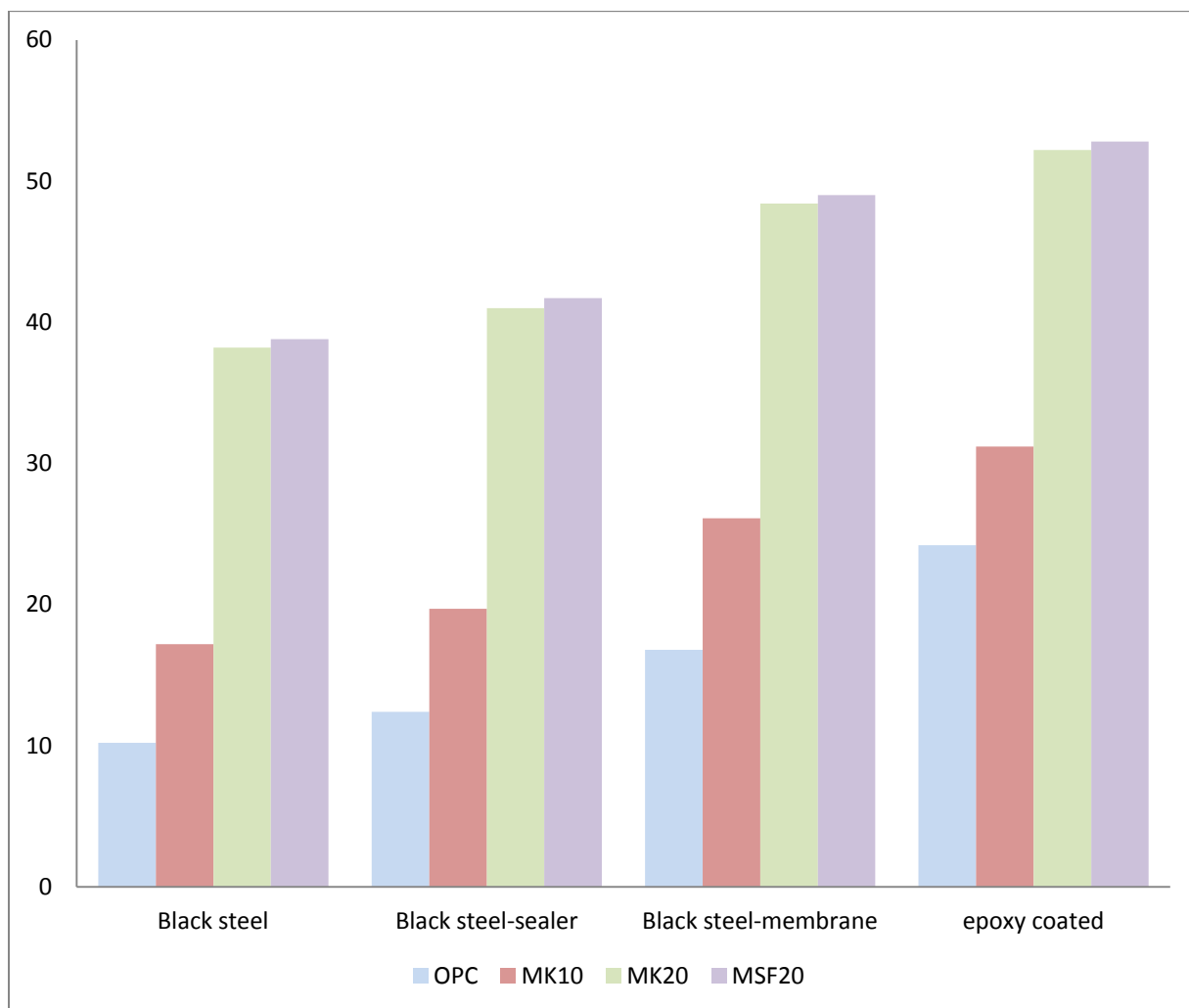
Σχήμα 5.7: Διάγραμμα διάρκειας ζωής κονιάματος με 10% πρόσθετο υλικό, για διάφορους τύπους χάλυβα οπλισμού και προστασίας έναντι διάβρωσης.

Στο Σχήμα 5.8 αναπαρίσταται γραφικά η διάρκεια ζωής των κονιαμάτων μετά από προσθήκη τσιμεντοειδούς προσθέτου σε ποσοστό 20%, για τους διάφορους τύπους χάλυβα οπλισμού και προστασίας έναντι διάβρωσης. Παρατηρείται ότι η σειρά κατάταξης των συνθέσεων με 20% πρόσθετο υλικό από την βέλτιστη στην χειρότερη είναι, MSF20 > MFA20.



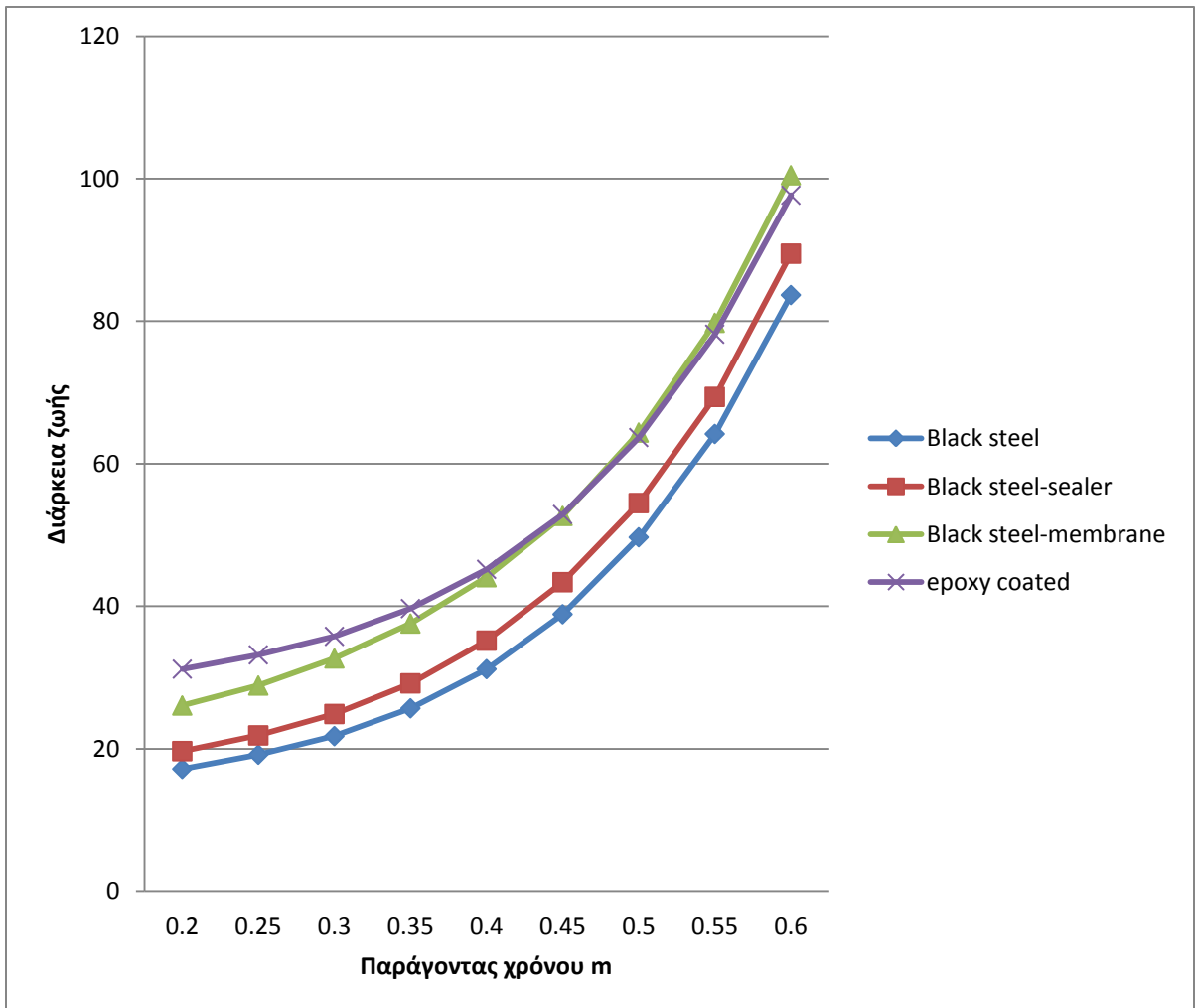
Σχήμα 5.8: Διάγραμμα διάρκειας ζωής κονιάματος με 20% πρόσθετο υλικό, για διάφορους τύπους χάλυβα οπλισμού και προστασίας έναντι διάβρωσης.

Στο Σχήμα 5.9 αναπαρίσταται γραφικά η διάρκεια ζωής των κονιαμάτων MK10 που περιέχει 10% μετακαολίνη, MK20 που περιέχει 20% μετακαολίνη και MFS20 που περιέχει 20% πυριτική παιπάλη όπου εισήχθησαν στο μοντέλο Life-365 μέσω του πειραματικού συντελεστή διάχυσης. Παρατηρείται ότι η χρήση του μετακαολίνη και η χρήση της πυριτικής παιπάλης ως τσιμεντοειδή πρόσθετα σε ποσοστό 20% εξάγουν σχεδόν την ίδια διάρκεια ζωής.



Σχήμα 5.9: Διάρκεια ζωής συνθέσεων που εισήχθησαν στο μοντέλο μέσω του πειραματικού συντελεστή διάχυσης

Στο Σχήμα 5.10 αναπαρίσταται γραφικά η διάρκεια ζωής του κονιάματος MK10 που περιέχει 10% μετακαολίνη για διάφορες τιμές του παράγοντα χρόνου m . Παρατηρείται ότι ο παράγοντας χρόνου m επηρεάζει σημαντικά τη διάρκεια ζωής, συνεπώς είναι ορθότερο να υπολογίζεται πειραματικά ώστε να μην υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις για τη διάρκεια ζωής.



Σχήμα 5.10: Ανάλυση της διάρκειας ζωής της σύνθεσης MK10 για πολλαπλές τιμές του m

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία έγινε μία προσπάθεια να παρουσιαστεί και να προσεγγιστεί, με ένα ολοκληρωμένο τρόπο η διάρκεια ζωής κατασκευών που εκτίθενται σε χλωριόντα. Ο τύπος έκθεσης χλωριόντων που επιλέχθηκε είναι η ζώνη ψεκασμού κυμάτων. Εφαρμόστηκαν πέντε διαφορετικά σενάρια κατασκευής σχετικά με τον τύπο του χάλυβα οπλισμού και με τον τύπο προστασίας έναντι διάβρωσης. Πραγματοποιήθηκε η ανάλυση δεδομένων για την αξιολόγηση της διάρκειας ζωής με τη χρήση του λογισμικού Life-365 για δύο περιπτώσεις συντελεστών διάχυσης. Η πρώτη με τον συντελεστή D28 που προκύπτει από το πρόγραμμα και η δεύτερη με τον πειραματικό συντελεστή διάχυσης που προκύπτει με την μέθοδο NT 492.

Αν χρειαζόταν να επιλεγεί με σειρά προτίμησης ο τύπος χάλυβα οπλισμού συνδυαστικά με τη μέθοδο προστασίας έναντι διάβρωσης, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το κόστος της κατασκευής η κατάταξη θα ήταν ως εξής:

1. Ανοξειδωτος χάλυβας οπλισμού με μηδενική προστασία.
2. Epoxy Coated τύπος χάλυβα με μηδενική προστασία.
3. Black Steel τύπος χάλυβα με υδατοστεγείς μεμβράνες.
4. Black Steel τύπος χάλυβα με προστατευτικά επιστρώματα.
5. Black Steel τύπος χάλυβα με μηδενική προστασία.

Παρουσιάζονται μικρές διαφορές στη διάρκεια ζωής για κάθε σύνθεση, όπως αυτές προκύπτουν από το LIFE-365 με τη χρήση πειραματικών τιμών συντελεστή διάχυσης. Αυτό συμβαίνει κατά κύριο λόγο γιατί ο συντελεστής διάχυσης που προκύπτει από το πρόγραμμα είναι σχεδόν σταθερός και στα πέντε διαφορετικά σενάρια κατασκευής σχετικά με τον τύπο του χάλυβα οπλισμού και με τον τύπο προστασίας έναντι διάβρωσης. Είναι κατανοητό πως η ανάλυση διάρκειας ζωής με τα πειραματικά δεδομένα συντελεστή διάχυσης, οδηγεί σε πιο αντικειμενικά αποτελέσματα σε σχέση με αυτήν που υπολογίζεται από το πρόγραμμα. Παρόλα αυτά οι διαφορές που υπάρχουν μεταξύ των δύο αναλύσεων είναι μικρές για τις συνθέσεις OPC, MFA10, GBF10 και GBF20 και για όλους τους τύπους χάλυβα οπλισμού, με εξαίρεση τον ανοξειδωτο χάλυβα.

Καταλήγοντας λοιπόν, φαίνεται ότι ο χρήστης θα μπορούσε να έχει μία αξιόπιστη εικόνα για τη διάρκεια ζωής μίας κατασκευής και χωρίς τη χρήση πειραματικών δεδομένων.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ACI 222.1, (1996). Provisional Standard Test Method for Water-Soluble Chloride Available for Corrosion of Embedded Steel in Mortar and Concrete Using the Soxhlet Extractor. s.l.:American Concrete Institute.
- ACI 222R, (2010). Protection of Metals in Concrete Against Corrosion. s.l.:American Concrete Institute.
- Alonso C. , Andrade C., Castellote M., Castro P., (2000). Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. Cement and Concrete Research Vol. 30 pp. 1047 – 1055
- Angst U., Vennesland O., (2009), Critical chloride content in reinforced concrete.
- Audenaert K, Yuan Q, & De Schutter G. (2010). On the time dependency of the chloride migration coefficient in concrete. In Construction and Building Materials (Vol. 24, pp. 396-402). Belgium: Elsevier Ltd
- ASTM International. 2011a. ASTM C1556 - 11 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials. 100 Barr Harbour Drive PO Box C700, West Conshohocken, Pennsylvania 19428-2959.
- ASTM International. 2011b. ASTM C670 - 10 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials, 100 Barr Harbour Drive PO Box C-700, West Conshohocken, Pennsylvania 19428-2959, United States, 2011.
- Bazant, Z. P., & Najjar, L. J. (1971). Drying of concrete as a non linear diffusion problem.
- Bazant, Z., and Najjar, L., (1972). Nonlinear water diffusion in non saturated concrete. Materials and Structures, 5(25), 3–20.
- Bazant Z., (1979). Physical model for steel corrosion in concrete sea structures.
- Berke, N., and Hicks, M. (1994). Predicting chloride profiles in concrete. Corrosion Engineering, 50(3), 234–239.
- Browne, R. (1982). Design prediction of the life for reinforced concrete in marine and other chloride environments. Durability of Building Materials, 1(2), 113–125.
- CC&AA, Cement Concrete & Aggregates Australia, 'Chloride Resistance of Concrete', (2009) Chisholm, D. H., Lee, N. P., Chisholm, D., & Lee, N. (2002). Durability prediction for coastal reinforced concrete structures.
- Colleparidi, M., Marcialis, A. and Turriziani, R.,(2011). Penetration of chloride ions into cement pastes and Components.

- Demis, S., Efstathiou, M. P., & Papadakis, V. G. (2014). Computer-aided modeling of concrete service life. *Cement and Concrete Composites*.
- Duracrete - Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures, Document BE95-1347/R17, The European Union - Brite EuRam III, (2000).
- Ehlen, M.E., Thomas, M.D.A. and Bentz, E.C., (Concrete International, 2009). Life-365 service life prediction model.
- Engelund S., Sorensen J., (1998). A probabilistic model for chloride - ingress and initiation of corrosion in reinforced concrete structures.
- Ferreira Rui Miguel, Guimaraes (2004). Probability - based durability analysis of concrete structures in marine environment.
- Funahashi, M. (1990). Predicting corrosion-free service life of a concrete structure in a chloride environment. *ACI Materials Journal*, 87(6), 581–587.
- Glass G.K. and Buenfeld N.R., (2000). Chloride - induced corrosion of steel in concrete, *Progress in Structural Engineering Materials*.
- Glass G.K., Reddy B., Buenfeld N.R., (2000). The participation of bound chloride in passive film breakdown on steel in concrete.
- Glasser, F.P., Marchand, J. and Samson, E., (2008). Durability of concrete- Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions.
- Hausmann, D. (1967). Steel corrosion in concrete: how does it occur? *Materials Protection*, 6(11), 19–23.
- Isgor, O. B., & Razaqpur, A. G. (2004). Finite element modeling of coupled heat transfer, moisture transport and carbonation processes in concrete structures.
- Khitab, A., Anwar, W., & Arshad, M. T. (2017). Predictive Models of Chloride Penetration in Concrete.
- Li, X., Xu, Q., & Chen, S. (2016). An experimental and numerical study on water permeability of concrete.
- Lounis Z., Amleh L.,(2003). Reliability - based prediction of chloride ingress and reinforcement corrosion of aging concrete bridge decks.
- Lounis Z.,(2003). Probabilistic modeling of chloride contamination and corrosion of concrete bridge structures.
- Luping, T.,(2008). Engineering expression of the ClinConc model for prediction of free and total chloride ingress in submerged marine concrete.
- Maage, M., Helland, S., and Carlsen, J. (1995). Practical non-steady chloride transport as a part

- of a model for predicting the initiation period. In L.-O. Nilsson and J. Ollivier (Eds.), *Chloride Penetration Into Concrete* (pp. 398–406).
- Maage, M., Helland, S., Poulsen, E., Vennesland, Ø., and Carlsen, J. (1996). Service life prediction of existing concrete structures exposed to marine environment. *ACI Materials Journal*, 93(6), 602–608.
- Mangat, P., and Molloy, B. (1994). Prediction of long term chloride concentration in concrete. *Materials and Structures*, 27, 338–346.
- Martín-Pérez, B. (1999). Service life modelling of r.c. highway structures exposed to chlorides.
- Miguel, R. (2004). Universidade do Minho Probability-based durability analysis of concrete structures in marine environment. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1822/2675>
- Mohammadi, B. (2013). Development of concrete water absorption testing for quality control.
- Naus D.J., Paris (2003). Life prediction and aging management of concrete structures.
- Nielsen, E. P., & Geiker, M. R. (2003). Chloride diffusion in partially saturated cementitious material. *Cement and Concrete Research*.
- Nilsson, L.-O. (1993). Penetration of chlorides into concrete structures—an introduction and some definitions. In L.-O. Nilsson (Ed.), *Chloride Penetration Into Concrete Structures* (p. 7–17). Goteborg, Sweden.
- Nilsson, L.-O., Massat, M., and Tang, L. (1994). The effect of non-linear chloride binding on the prediction of chloride penetration into concrete structures. In V. Malhotra (Ed.), *Durability of Concrete*, ACI SP–145 (pp. 469–486). Detroit.
- Nilsson L.O., (2000). A numerical model for combined diffusion and convection of chloride in non-saturated concrete.
- Oh, B. H., & Jang, S. Y. (2007). Effects of material and environmental parameters on chloride penetration profiles in concrete structures. *Cement and Concrete Research*.
- Oslakovic, I.S, Bjegovic, D. and Mikulic, D., (2010). Evaluation of service life design models on concrete structures exposed to marine environment
- Ozbolt, J., Balabanic, G., Periskic, G. and Kuster, M., (2010). Modelling the effect of damage on transport processes in concrete
- Papadakis V., Vayenas C., Fardis M., (1991). Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation
- Papadakis VG, Demis S., (2011). Estimation and validation of concrete strength and service life using software packages based on predictive models.
- Papadakis, V.G., M.N. Fardis, and C.G. Vayenas, (1996). Physicochemical processes and mathematical modeling of concrete chlorination.

- Poyet, S. (2013). Determination of the intrinsic permeability to water of cementitious materials
- Ramachandran V.S., Beaudoin J., (2001). Handbook of analytical techniques in concrete science and technology.
- RILEM TC 178-TMC, (2002). Testing and Modelling Chloride Penetration In Concrete: Analysis of total chloride content in concrete. s.l.:Materials and Structures.
- Saetta A., Scotta R., Vitaliani R.,(1993). Analysis of chloride diffusion into partially saturated Concrete.
- Saetta, A., Schrefler, B., and Vitaliani, R. (1993). The carbonation of concrete and the mechanism of moisture, heat and carbon dioxide flow through porous materials. *Cement and Concrete Research*, 23(4), 761–772.
- Sergi, G., Yu, S., and Page, C. (1992). Diffusion of chloride and hydroxyl ions in cementitious materials exposed to a saline environment. *Magazine of Concrete Research*, 44(158), 63–69.
- Shi, X., Xie, N., Fortune, K., & Gong, J. (2012). Durability of steel reinforced concrete in chloride environments.
- Sirivivatnanon V, & Khatri RP. (1999). Characterising chloride penetration resistance of concrete. Australia: CSIRO Division of Building, Construction and Engineering.
- Stanish KD, Hooton RD & Thomas MDA, (1997). Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review. s.l.:FHWA Contract DTFH61-97-R-00022 Prediction of Chloride Penetration in Concrete.
- Stewart M.G., Rosowsky D.V., (1998). Time dependent reliability of deteriorating reinforced concrete bridge decks.
- Tang, L., and Nilsson, L.-O. (1996a). Service life prediction for concrete structures under seawater by a numerical approach. In C. Sjöström (Ed.), *Durability of Building Materials and Components 7 (Volume One)* (pp. 97–106). London, UK: E & FN Spon.
- Tang, L., and Nilsson, L.-O. (1996b). A numerical method for prediction of chloride penetration into concrete structures. In H. Jennings, J. Kropp, and K. Scrivener (Eds.), *The Modelling of Microstructure and Its Potential for Studying Transport Properties and Durability* (pp. 539–552). The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Taylor PC, Whiting DA, & Nagi MA. (1999). Threshold Chloride Content for Corrosion of Steel in Concrete: A Literature Review (R&D Serial Number ed.). Portland Cement Association.
- Tuutti K (1982): Corrosion of steel in concrete, Swedish Cement and Concrete Research Institute, CBI Report fo 82-4, ISSN 0346-6906.
- Tuutti, K. (1993). The effect of individual parameters on chloride induced corrosion. In L.-O. Nilsson (Ed.), *Chloride Penetration Into Concrete Structures* (pp. 18–25). Goteborg, Sweden.

- Vu K.A.T., Stewart M.G., (2000). Structural reliability of concrete bridges including improved chloride - induced corrosion models
- Webster Michael Peter, (2000). The assessment of corrosion - damaged concrete structures
- Xi, Y., & Bazant, Z. P. (1999). Modeling chloride penetration in saturated Concrete. Journal of materials in civil engineering.
- Βούκια Δ., (2013). Διαπερατότητα αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με μετακαολίνη.
- Κορόζης Η., (2015). Μοντελοποίηση της διάχυσης χλωριόντων σε ινοπλισμένο σκυρόδεμα.
- Μπαδογιάννης Σ., (2002). Αξιοποίηση καολινών στην τεχνολογία σκυροδέματος. Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Παπαδάτου Μ., (2014). Ανθεκτικότητα Ινοπλισμένου Σκυροδέματος.
- Σίδερης Κ, (2010). Ανθεκτικότητα κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος.
- Σωτηριάδης Κ. Χ., (2011). Διερεύνηση και ερμηνεία της συμπεριφοράς ασβεστολιθικών τσιμέντων σε συνδυασμένο περιβάλλον χλωριόντων και θειικών ιόντων.
- Τασιος Θ.Π. και Αλιγιζάκη Κ., (1993). Ανθεκτικότητα οπλισμένου σκυροδέματος.
- Τεταγιώτη Δ., (2011). Μελέτη του χρόνου ζωής κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα υπό εναλλασσόμενες διαβρωτικές συνθήκες.
- Τσίμας Σ., Τσιβιλής Σ., (2004). Επιστήμη και τεχνολογία τσιμέντου
- Φαρδής Μ.Ν., (2005). Μαθήματα οπλισμένου σκυροδέματος Μέρος III

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

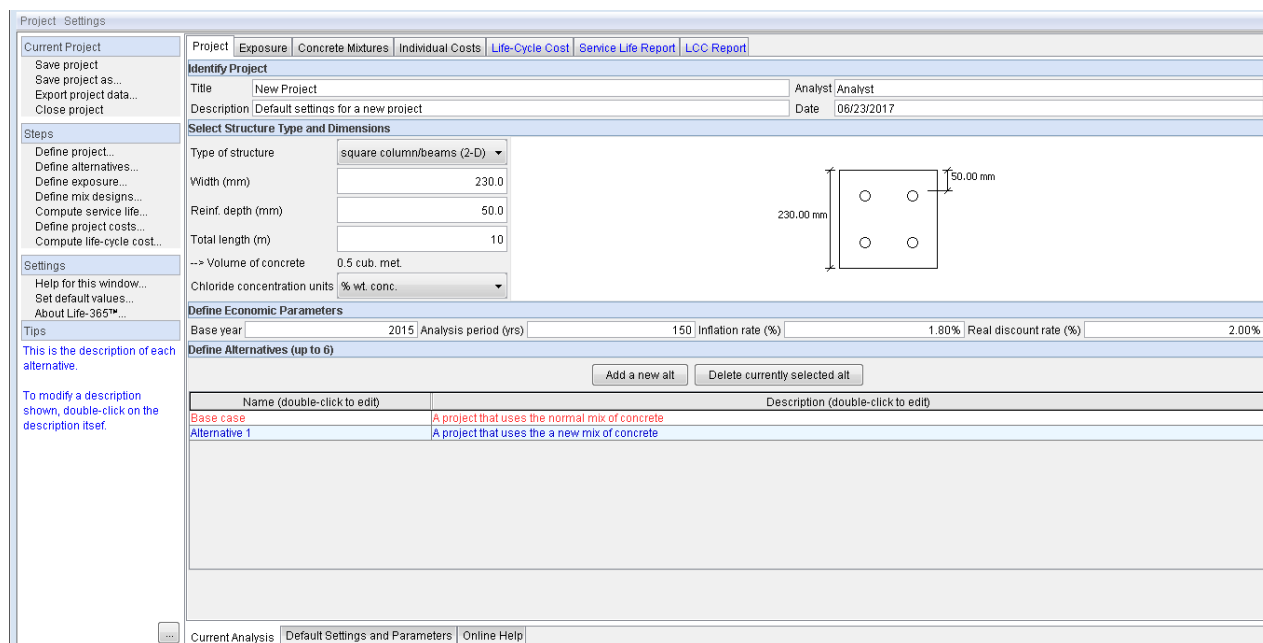
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ LIFE-365

Οι αναλύσεις Life-365 μπορούν να χωριστούν σε τέσσερα διαδοχικά βήματα:

- Πρόβλεψη του χρόνου έναρξης της διάβρωσης του χάλυβα οπλισμού, που κοινώς ονομάζεται περίοδος έναρξης, t_i .
- Πρόβλεψη του χρόνου διάβρωσης έως το σημείο ανεπίτρεπτων βλαβών, που κοινώς ονομάζεται περίοδος διάδοσης, t_p . (Σημειώστε ότι ο χρόνος έως την πρώτη επισκευή, t_r , είναι το άθροισμα αυτών των δύο περιόδων: δηλαδή $t_r = t_i + t_p$).
- Καθορισμός του χρονοδιαγράμματος επισκευής μετά την κατασκευή.
- Εκτίμηση του κόστους κύκλου ζωής βάσει του αρχικού κόστους σκυροδέματος (και της επιπλέον προστασίας) καθώς και τα μελλοντικά έξοδα επισκευής.

A. Καρτέλα Project

Η καρτέλα Project επιτρέπει στον χρήστη να συμπληρώσει το όνομα του έργου και να ορίσει τον τύπο και τις διαστάσεις της κατασκευής, τις παραμέτρους οικονομικής ανάλυσης και τους αριθμούς και τα ονόματα εναλλακτικών έργων (Σχήμα A.1).



Σχήμα A.0.1: Καρτέλα Project

A.1 Identify Project

Σε αυτή την ενότητα (Σχήμα A.2) ο χρήστης μπορεί να ορίσει τίτλο (Title), περιγραφή (Description), αναλυτή (Analyst) και ημερομηνία (Date).

Identify Project			
Title	New Project	Analyst	Analyst
Description	Default settings for a new project	Date	07/01/2017

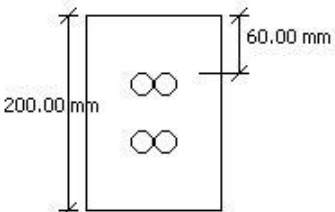
Σχήμα A.0.2: Identify Project

A.2 Select Structure Type and Dimensions

Σε αυτή την ενότητα μπορεί να οριστεί μια σειρά από βασικές παραμέτρους για την ίδια τη δομή (Σχήμα A.3). Με τη χρήση του κελιού **Type of structure** γίνεται η επιλογή του τύπου της κατασκευής όπου είναι προγραμματισμένοι και οι τρόποι διείδυσης χλωριόντων (π.χ. μονοδιάστατη διείδυση). Με το κελί **Thickness** (για 1-D κατασκευές) ή το κελί **Width** (για 2-D κατασκευές) και το κελί **Area or Total Length** ορίζεται ο συνολικός όγκος σκυροδέματος ο οποίος χρησιμοποιείται στο κόστος κατασκευής και η επιφάνεια του σκυροδέματος που εκτίθεται στα χλωριόντα. Στο **Reinf. Depth** ορίζεται η απόσταση που διανύουν τα χλωριόντα από την επιφάνεια σκυροδέματος έως τον οπλισμό χάλυβα. Στο **Chloride concentration units** επιλέγονται οι μονάδες μέτρησης της έκθεσης των χλωριόντων και τα υλικά σύνθεσης

σκυροδέματος (με την επιλογή **SI metric** ή **Centimeter metric** ως **Base unit** (βασική μονάδα), οι επιλογές που δίνουν οι **Concentration units** (μονάδες συγκέντρωσης) είναι **% wt. conc.** και **kg/cub. m.** ενώ αν επιλεγθεί το κελί **US units**, οι επιλογές που δίνουν οι **Concentration units** είναι **% wt. conc.** και **lb/cub yd.**

Select Structure Type and Dimensions	
Type of structure	slabs and walls (1-D) ▼
Thickness (mm)	200.0
Reinf. depth (mm)	60.0
Area (square m)	10000
--> Volume of concrete	2,000.0 cub. met.
Chloride concentration units	% wt. conc. ▼



Life-365 will model service life for depths up to 250.0 mm; see Section ...

Σχήμα A.0.3: Select Structure Type and Dimensions

A.3 Define Economic Parameters

Τέσσερις παράμετροι χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του κόστους κύκλου ζωής (Σχήμα A.4). Αρχικά ορίζεται το **Base year** ως το τρέχον έτος ή το αρχικό έτος που είναι σχετικό με την ανάλυση. Ύστερα ορίζεται το **Analysis period** ως η περίοδος του χρόνου κατά την οποία θα υπολογίζεται το κόστος του κύκλου ζωής του έργου. Το λογισμικό Life-365 επιτρέπει στον χρήστη την επιλογή έως 200 χρόνια, αλλά μία συνηθισμένη περίοδος είναι τα 75 χρόνια. Το κελί **Inflation rate (%)** δηλαδή ο ρυθμός πληθωρισμού, είναι ο ετήσιος ρυθμός με τον οποίο αυξάνονται οι τιμές των αγαθών και των υπηρεσιών κατά την πάροδο του χρόνου. Το **Real discount rate (%)** δηλαδή το πραγματικό προεξοφλητικό επιτόκιο είναι ο ετήσιος ρυθμός με τον οποίο τα μελλοντικά κόστη είναι προεξοφλημένα, καθαρό από το ποσοστό του πληθωρισμού (δεν περιλαμβάνει τις επιδράσεις από τις μεταβολές των τιμών των αγαθών και των υπηρεσιών). Τα ομοσπονδιακά έργα υποδομής χρησιμοποιούν προεξοφλητικό επιτόκιο που δημοσιεύεται στο OMB Circular No. A-94. Το Life-365 εμπεριέχει τα πιο πρόσφατα στοιχεία πληθωρισμού όπως προτείνεται από την εγκύκλιο OMB και όπως δημοσιεύεται στο *Energy Price Indices and Discount Factors for Life-Cycle Cost Analysis* (στους δείκτες τιμών ενέργειας και παράγοντες εκτίμησης για την ανάλυση κόστους ζωής (2006)).

Define Economic Parameters			
Base year	2015	Analysis period (yrs)	150
Inflation rate (%)	1.80%	Real discount rate (%)	2.00%
Define Alternatives (up to 6)			

Σχήμα A.0.4: Define Economic Parameters

A.4 Define Alternatives

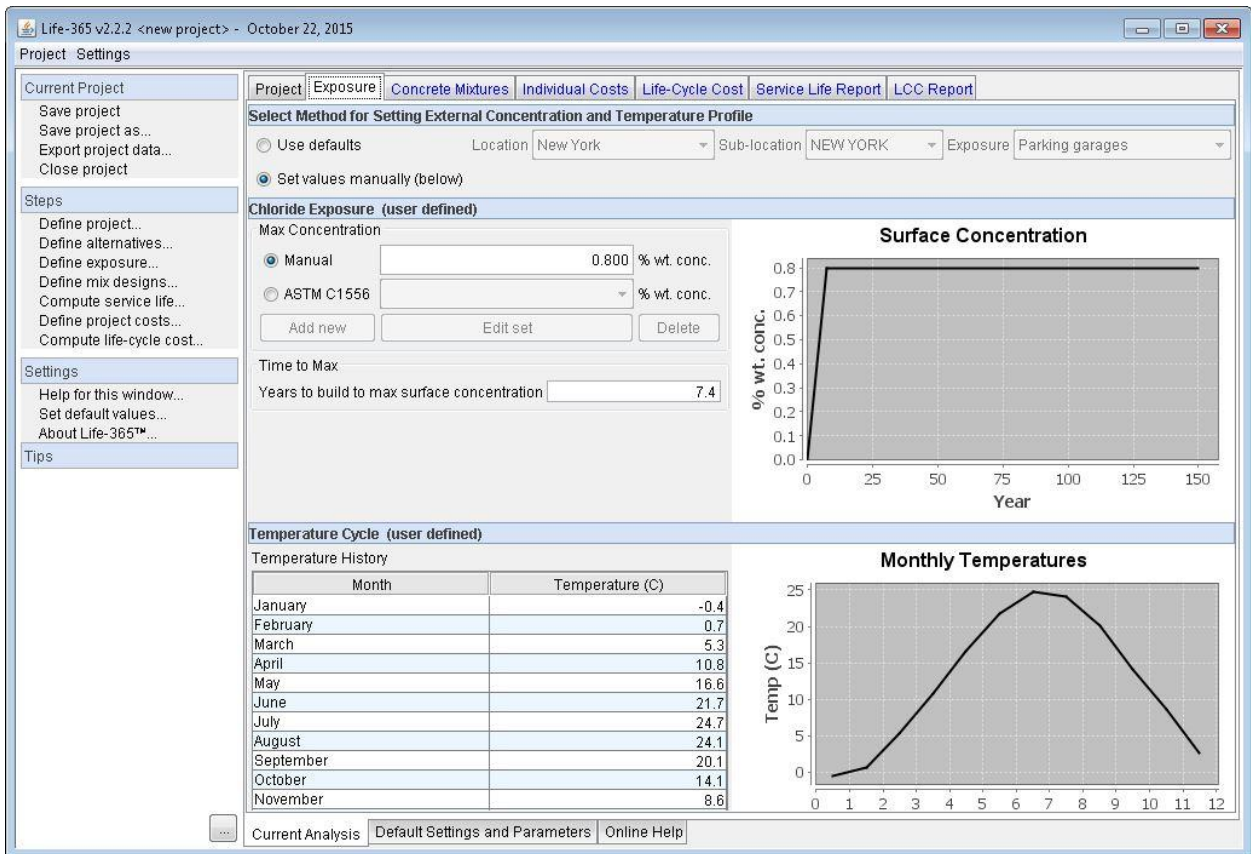
Με την χρήση αυτής της ενότητας μπορείς να συμπληρώσεις τον αριθμό, το όνομα και την περιγραφή των εναλλακτικών που προορίζονται για ανάλυση και σύγκριση αποτελεσμάτων (Σχήμα A.5). Με το κουμπί **Add a new alt** και **Delete currently selected alt** δημιουργούνται και διαγράφονται οι εναλλακτικές. Με διπλό κλικ πάνω στο όνομα ή στην περιγραφή γίνεται η αλλαγή τους.

Define Alternatives (up to 6)	
<input type="button" value="Add a new alt"/> <input type="button" value="Delete currently selected alt"/>	
Name (double-click to edit)	Description (double-click to edit)
Base case	A project that uses the normal mix of concrete
Alternative 1	A project that uses the a new mix of concrete

Σχήμα A.0.5: Define Alternatives

B. Καρτέλα Exposure

Η καρτέλα **Exposure** χρησιμοποιείται για την ρύθμιση της έκθεσης του σκυροδέματος σε χλωριόντα από το εξωτερικό περιβάλλον και για τον ορισμό μηνιαίων θερμοκρασιών στις οποίες εκτίθεται το σκυρόδεμα (Σχήμα B.1).



Σχήμα B.1: Καρτέλα Exposure

B.1 Select Method for Setting External Concentration and Temperature Profile

Όταν είναι επιλεγμένο το κελί **Use defaults**, το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα επιλογής **Location** (τοποθεσία), **Sub-location** (περιοχή) και **Exposure** (τύπο έκθεσης) που αντιστοιχούν κοντά στις συνθήκες περιβάλλοντος του έργου (Σχήμα B.2). Το Life-365 χρησιμοποιώντας την βάση δεδομένων του για την τοποθεσία υπολογίζει το **Max surface conc.** (μεγίστη επιφανειακή συγκέντρωση χλωριόντων) και το **Time to build to max** (ο χρόνος για να γίνει μέγιστη η συγκέντρωση) καθώς και το **Temperature History** (θερμοκρασιακό περιβάλλον).

Όταν δεν είναι επιλεγμένο το κελί **Use defaults**, τότε ο χρήστης είναι υποχρεωμένος να τοποθετήσει ο ίδιος τις τιμές των συγκεντρώσεων και των θερμοκρασιών. Στο Life-365 ο χρήστης μπορεί να τοποθετήσει τις δικές του τιμές για το μέγιστο επίπεδο χλωριόντων χρησιμοποιώντας τιμές μετρημένες σύμφωνα με την μέθοδο ASTM C1556.

Select Method for Setting External Concentration and Temperature Profile

Use defaults
 Location: New York
 Sub-location: NEW YORK
 Exposure: Parking garages

Set values manually (below)

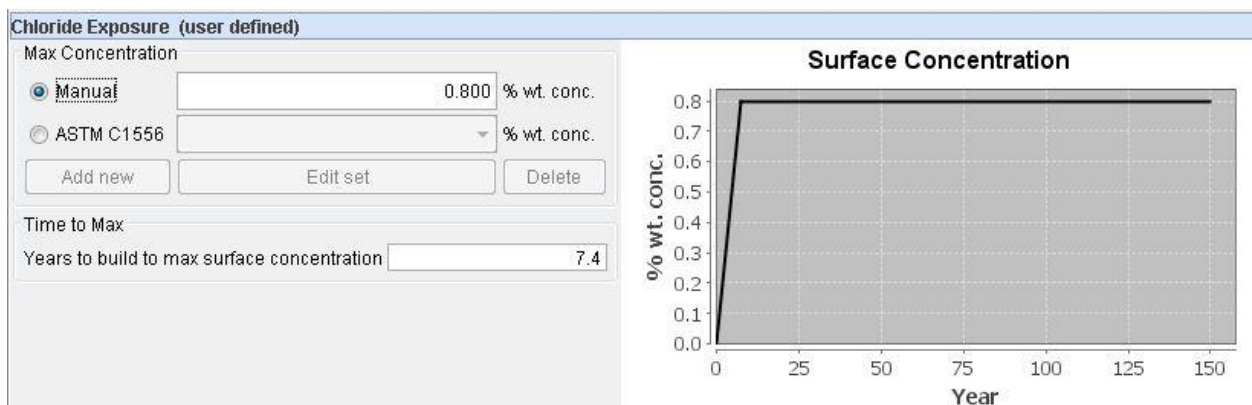
Σχήμα B.2: Select Method for Setting External Concentration and Temperature Profile

B.2 Chloride Exposure

Ο ρυθμός συσσώρευσης και το μέγιστο επίπεδο συγκέντρωσης χλωριόντων από το εξωτερικό περιβάλλον επηρεάζουν το ρυθμό διείδυσης χλωριόντων και τελικά την διάρκεια ζωής του σκυροδέματος. Με την χρήση των ακόλουθων μεταβλητών ορίζονται τα παραπάνω και γίνεται επιβεβαίωση με το γράφημα **Surface Concentration** (επιφανειακής συγκέντρωσης) στα δεξιά (Σχήμα B.3).

Max Surface conc. – το μέγιστο επίπεδο συσσώρευσης όπου η κατασκευή του σκυροδέματος θα βιώσει κατά την διάρκεια της ζωής της. Μετράται είτε % wt. conc. (βάρος τσιμέντου) ή σε kg/cub. m. (SI metric) ή σε lb/cub yd (US units). Η αλλαγή μονάδων γίνεται από το κελί **Default Settings and Parameters – Default Units of Measure – Base Units/ Concentration Units**.

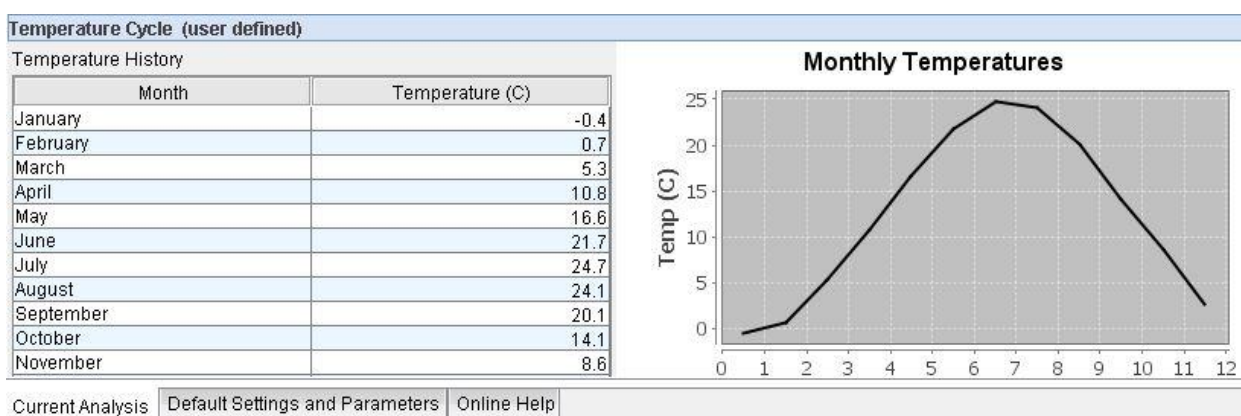
Time to build to max (yrs) – Τα χρόνια που απαιτούνται για την συσσώρευση χλωριόντων ώστε να φτάσουν την μέγιστη συγκέντρωση. Αρχική υπόθεση είναι ότι στην αρχή του φαινομένου η συσσώρευση χλωριόντων στην κατασκευή είναι μηδενική και ότι αυξάνεται γραμμικά.



Σχήμα B.3: Chloride Exposure

B.3 Define Temperature Cycle

Αν το **Use defaults** δεν είναι επιλεγμένο ο χρήστης χρειάζεται να τοποθετήσει τιμές για την ετήσια μεταβολή της θερμοκρασίας στην οποία εκτίθεται η κατασκευή. Αυτές οι θερμοκρασίες λαμβάνουν μέρος στο υπολογιστικό κομμάτι του χρόνου ζωής που καθορίζεται από την επίδραση της θερμοκρασίας στον συντελεστή διάχυσης (Σχήμα B.4). Αναλόγως το σύστημα μονάδων που θα επιλέξει ο χρήστης θα τοποθετηθούν και οι μονάδες για την θερμοκρασία. Για το σύστημα μονάδων **SI Metric** οι μονάδες θερμοκρασίας είναι σε βαθμούς Celsius ($^{\circ}\text{C}$) ενώ για το σύστημα **US units** οι μονάδες θερμοκρασίας είναι βαθμοί Fahrenheit.



Σχήμα B.4: Temperature Cycle

Γ. Καρτέλα Concrete Mixtures

Στην καρτέλα αυτή (Σχήμα Γ.1) ο χρήστης καθορίζει τα συστατικά πρόσμιξης του σκυροδέματος για κάθε εναλλακτική της κατασκευής που ορίστηκε στην καρτέλα **Project**.

The screenshot displays the 'Concrete Mixtures' tab in the Life-365 software. The 'Define Concrete Mixtures' table is as follows:

Name	User Def...	D28 (m*...)	m	Ct (% w...)	Init. (yrs)	Prop. (yrs)	Service Life (yrs) = I...
Base case	no	8.8716E-...	0.20	0.050	9.4	6.0	15.4
Alternativ...	no	8.8716E-...	0.20	0.050	9.4	6.0	15.4

The 'Selected mixture: Base case (A project that uses the normal mix of concrete)' configuration panel shows the following settings:

- Mixture: w/cm: 0.42
- Class F fly ash (%): 0.00%
- Slag (%): 0.00%
- Silica fume (%): 0.00%
- Rebar: Rebar steel type: Black Steel, Rebar % vol. concrete: 1.20%
- Inhibitor: <none>
- Barriers: <none>

The 'Service Life Graphs' section shows a bar chart with 'Years' on the y-axis (0.0 to 15.0) and two bars: 'Base case' and 'Alternative 1'. Both bars show a total service life of approximately 15.4 years, with initiation and propagation phases clearly visible.

Σχήμα Γ.1: Καρτέλα Concrete Mixtures

Γ.1 Define Concrete Mixtures

Η ενότητα αυτή επιτρέπει στον χρήστη να εισάγει δεδομένα σχετικά με τα προϊόντα ανάμιξης και τις στρατηγικές προστασίας διάβρωσης (Σχήμα Γ.2). Ο υπολογισμός της ζωής του σκυροδέματος γίνεται μετά την εισαγωγή της σύνθεσης και τις στρατηγικές προστασίας έναντι της διάβρωσης πατώντας το κελί **Calculate service lives**. Το κελί επιλογής **Compute uncertainty**, μπορεί να επιλέξει ο χρήστης αν θέλει να υπολογίσει την αβεβαιότητα του λειτουργικού χρόνου ζωής για κάθε σύνθεση. Γενικά αυτός είναι ένας υπολογισμός αποκλειστικά για προχωρημένους χρήστες του Life-365. Για την καλύτερη κατανόηση της ανάλυσης αβεβαιότητας (uncertainty analysis) πιάστε το κελί **Help** στα δεξιά.

Define Concrete Mixtures (select a mix to edit its properties)							
Name	User Def...	D28 (m*...	m	Ct (% w...	Init. (yrs)	Prop. (yrs)	Service Life (yrs) = I...
Base case	no	8.8716E-...	0.20	0.050	9.4	6.0	15.4
Alternativ...	no	8.8716E-...	0.20	0.050	9.4	6.0	15.4

Σχήμα Γ.2: Define Concrete Mixtures

Γ.2 Selected mixture

Αυτή η ενότητα παραθέτει τις ιδιότητες του μείγματος του σκυροδέματος που επιλέγονται στο πάνελ **Define Concrete Mixtures**, και επιτρέπει στον χρήστη να τις επεξεργαστεί (Σχήμα Γ.3). Για να δείτε τις ιδιότητες σε κάθε ένα από τα μίγματα σκυροδέματος σας, απλά κάντε κλικ στη σειρά του μείγματος. Χωρίζεται στις παρακάτω υποενότητες.

Mixture: Σε αυτήν την ενότητα ορίζεται ο λόγος νερό/τσιμέντο (w/cm) και το ποσοστό SCMs (Σκωρία, ιπτάμενη τέφρα κατηγορίας F ή πυριτική παιπάλη) που χρησιμοποιούνται.

Rebar and Inhibitors: Σε αυτήν την ενότητα επιλέγεται ο τύπος του χάλυβα οπλισμού που χρησιμοποιείται στην κατασκευή (**Black steel, Epoxy coated** ή **316 Stainless**) όπου επηρεάζει την περίοδο έναρξης και την περίοδο διάδοσης του χρόνου ζωής μίας κατασκευής. Το κελί **Rebar % vol. concrete** χρησιμοποιείται για την εισαγωγή του ποσοστού σκυροδέματος που είναι χάλυβας και υπολογίζει το ολικό κόστος του χάλυβα στην κατασκευή. (Το κόστος του χάλυβα μπορεί να οριστεί πατώντας το κελί **Default Settings and Parameters**). Το κελί **Inhibitor** είναι για να συμπεριλαμβάνονται στο μείγμα τυχόν ανασταλτικοί παράγοντες διάβρωσης που έχουν χρησιμοποιηθεί.

Barriers: Σε αυτήν την ενότητα εισάγονται προστατευτικές μεμβράνες ή σφραγιστικά που εφαρμόζονται στο σκυρόδεμα.

Selected mixture: Base case (A project that uses the normal mix of concrete)		
Mixture	Rebar	Barriers
w/cm	Rebar steel type	<none>
Class F fly ash (%)	Rebar % vol. concrete	
Slag (%)	Inhibitor	
Silica fume (%)		

Σχήμα Γ.3: Selected mixture

Γ.3 Custom Mixture Properties

Αντί να εισάγονται τα φυσικά συστατικά της πάστας σκυροδέματος το πρόγραμμα Life-365 δίνει την δυνατότητα ο χρήστης να εισάγει κατευθείαν τις μεταβλητές του μοντέλου που

υπολογίζουν το χρόνο ζωής. Κάτι τέτοιο ενδεχομένως θα δημιουργήσει αποτελέσματα που παρακάμπτουν μία ή περισσότερες από τις βασικές υποθέσεις μοντέλων του Life-365. Έτσι όταν το κελί **Custom** θα επιλεγθεί, θα εμφανιστεί ένα παράθυρο επιβεβαίωσης ότι ο χρήστης είναι ενήμερος αυτού του γεγονότος. Οι μεταβλητές αυτές που μπορούν να οριστούν κατευθείαν είναι οι εξής:

Initial diffusion coefficient, D28. Εισάγοντας άμεσα τον αρχικό συντελεστή διάχυσης γίνεται παράκαμψη στον υπολογισμό του D28 που βασίζεται στην αναλογία w/cm και το επίπεδο της πυριτικής παιπάλης.

Diffusion decay index, m. Εισάγοντας αυτό το δείκτη αντικαθίσταται άμεσα ο υπολογισμός της m με βάση τα επίπεδα της σκωρίας και της ιπτάμενης τέφρας. Η τιμή του m, ωστόσο θα πρέπει να εξακολουθεί να είναι μεταξύ 0,2 και 0,6.

Hydration years. Από προεπιλογή, στο μοντέλο Life-365 η ενυδάτωση λαμβάνεται 25 χρόνια, όπου οι επιδράσεις της ενυδάτωσης στην ικανότητα διάχυσης του σκυροδέματος διαμορφώνονται από το m.

Οριακή συγκέντρωση χλωριόντων που είναι απαραίτητη για την έναρξη της διάβρωσης, Ct. Με την εισαγωγή αυτής της τιμής γίνεται παράκαμψη του υπολογισμού της από την έναρξη διάβρωσης με βάση τον τύπο χάλυβα οπλισμού (black steel=0.05% wt.concrete, epoxy-coated=0.05% και stainless steel=0.5%)

Propagation period. Με την εισαγωγή αυτής της μεταβλητής γίνεται παράκαμψη του υπολογισμού της περιόδου διάδοσης (propagation period) με βάση τον τύπο του χάλυβα οπλισμού (black steel=6 χρόνια, epoxy-coated=20 χρόνια και stainless steel=6 χρόνια)

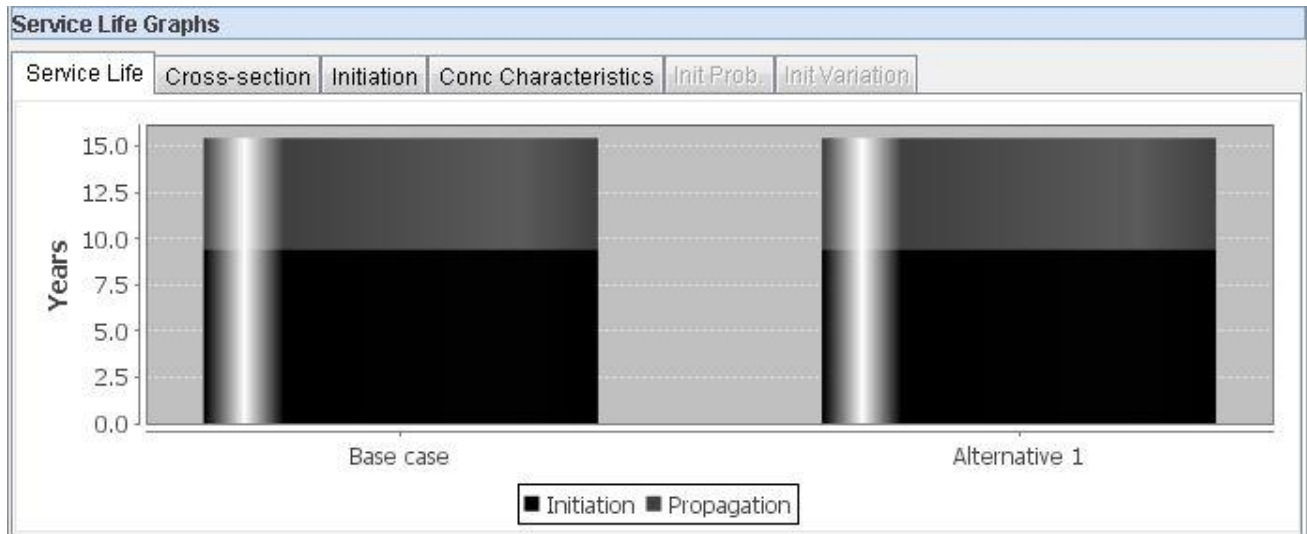
<input checked="" type="checkbox"/> Custom	D28 (m*m/sec)	8.8716E-12	m	0.20	Hydration (yrs)	25.0	Ct (% wt. conc.)	0.05	Prop. (yrs)	6.0
--------------------------------------------	---------------	------------	---	------	-----------------	------	------------------	------	-------------	-----

Σχήμα Γ.4: Custom properties

Γ.4 Service Life Graphs

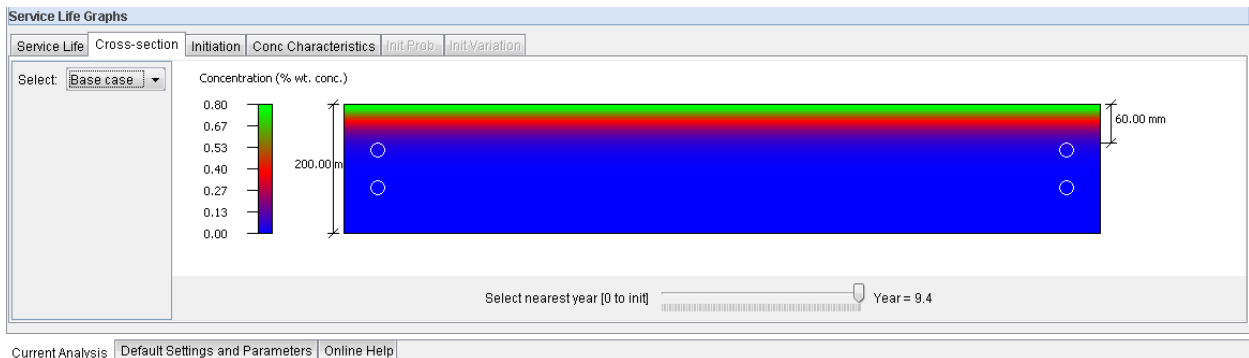
Αυτή η ενότητα περιέχει μία σειρά από γραφήματα που παρουσιάζουν την απόδοση του σκυροδέματος, σε σχέση με το χρόνο και τις διαστάσεις της κατασκευής σκυροδέματος.

Service Life. Σε αυτό το κελί (Σχήμα Γ.5) φαίνεται η διάρκεια της περιόδου έναρξης και της περιόδου διάδοσης σε χρόνια κάθε σύνθεσης, μείγματος σκυροδέματος .



Σχήμα Γ.5: Κελί Service Life

Cross-section. Σε αυτό το κελί (Σχήμα Γ.6) φαίνεται μία εγκάρσια τομή της συγκέντρωσης των χλωριόντων του μείγματος του σκυροδέματος στο σημείο έναρξης της διάβρωσης. Για την επιλογή κάποιας άλλης σύνθεσης από το **Select** επιλέγεται η εναλλακτική. Η κλίμακα της συγκέντρωσης χλωριόντων στα αριστερά αντιστοιχίζει τη διαβάθμιση των χρωμάτων στη συγκέντρωση των Cl⁻.



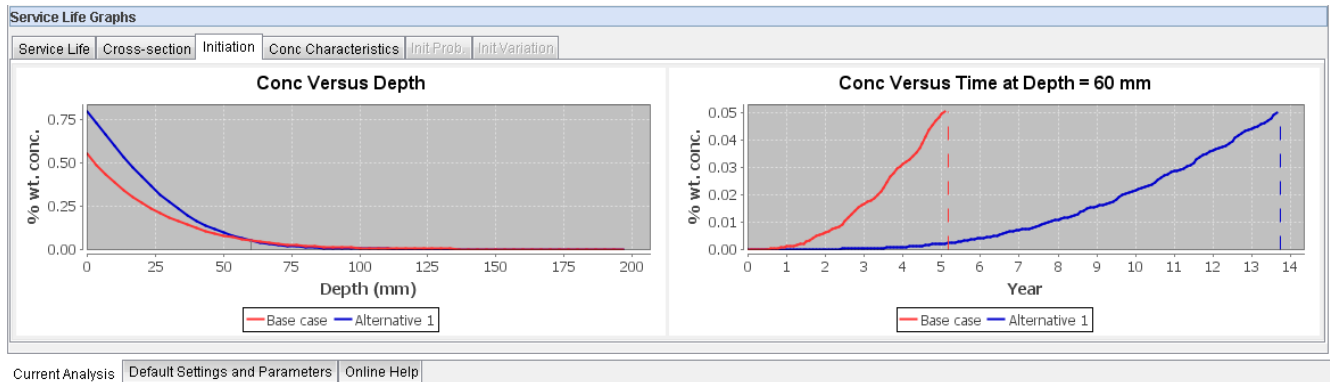
Σχήμα Γ.6: Κελί Cross-section

Initiation. Στο κελί αυτό φαίνονται 2 γραφήματα (Σχήμα Γ.7):

1. Η συγκέντρωση χλωριόντων στον χρόνο έναρξης σε συνάρτηση με το βάθος της κατασκευής (**Conc Versus Depth**)

2. Η συγκέντρωση των χλωριόντων στη στάθμη της ράβδου, σε σχέση με τον χρόνο, από την έναρξη της διάβρωσης (**Conc Versus Time at Depth**)

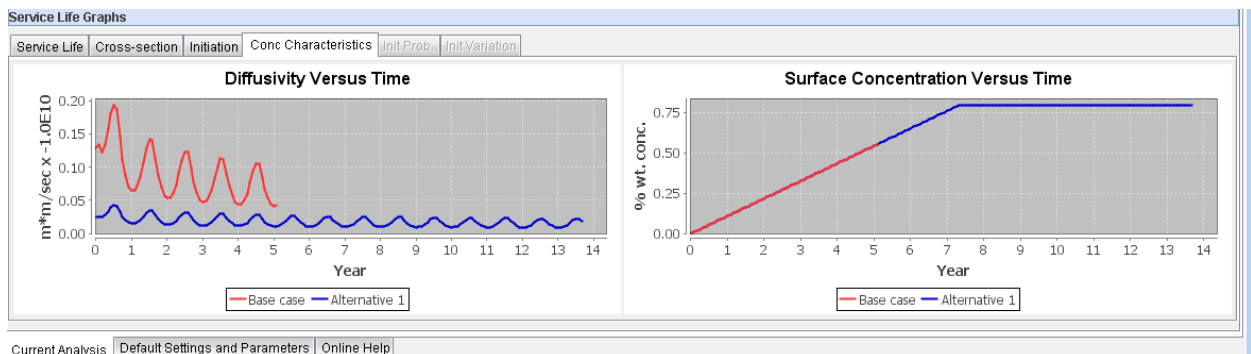
Στο αριστερό διάγραμμα υπάρχει μία κατακόρυφη διακεκομμένη γραμμή που υποδεικνύει το βάθος που βρίσκεται ο οπλισμός ενώ στο δεξί διάγραμμα η κατακόρυφη διακεκομμένη γραμμή υποδεικνύει το έτος έναρξης της διάβρωσης.



Σχήμα Γ.7: Κελί Initiation

Concrete Characteristics. Στο κελί αυτό (Σχήμα Γ.8) εμφανίζονται 2 επιπλέον γραφήματα που βοηθούν στην ερμηνεία της απόδοσης του μείγματος του σκυροδέματος.

1. Το αριστερό γράφημα (**Diffusivity Versus Time**) δείχνει τη μεταβολή του συντελεστή διάχυσης χλωριόντων κατά την διάρκεια της περιόδου έναρξης για κάθε εναλλακτική.
2. Το δεξί διάγραμμα (**Surface Concentration Versus Time**) δείχνει πως μεταβάλλεται η επιφανειακή συγκέντρωση χλωριόντων του σκυροδέματος κατά την διάρκεια της περιόδου έναρξης.



Σχήμα Γ.8: Κελί Conc Characteristics

Οι ταλαντώσεις στο αριστερό γράφημα προκαλούνται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας μέσα στο έτος. Στο γράφημα δεξιά φαίνεται ότι και οι 2 εναλλακτικές έχουν τις ίδιες επιφανειακές συγκεντρώσεις, αυτό δεν θα συνέβαινε αν είχε γίνει εφαρμογή μεμβράνης ή σφραγιστικού σε μία από τις 2.

Δ. Καρτέλα Individual Costs

Σε αυτήν την ενότητα (Σχήμα Δ.1) ο χρήστης μπορεί να προσθέσει συντελεστές και παραμέτρους κόστους και να παρατηρήσει την επιρροή τους στο συνολικό κόστος ζωής της κατασκευής.

The screenshot shows the 'Project Settings' window with the 'Concrete and Repair Unit Costs' tab selected. The 'Set Concrete Costs' section has a table for 'Set Concrete Costs (2,000 cub. met.)' with columns for 'Alternative', '\$/cub. met.', and 'User?'. Below this is a 'Calculate costs' button. The 'Project Costs for Base case' table is as follows:

Cost name	Start year	End year	Interval	Amount	units	\$/sq. m.	Total
Construction cost	0	0	0	10,000	sq. m.	\$38.65	\$386,480
Repair cost	15	150	10	1,000	sq. m.	\$400.00	\$400,000

The 'Cost Timeline for Alternative: Base case' shows a bar chart with 'Construction cost' as a single bar at year 0 and 'Repair cost' as a series of bars from year 15 to 150.

Σχήμα Δ.1: Καρτέλα Individual Costs

Δ.1 Set Concrete Costs

Στην επάνω αριστερή γωνία της οθόνης (Σχήμα Δ.1), η καρτέλα **Set Concrete Costs** επιτρέπει στον χρήστη να ρυθμίσει ειδικές τιμές για τα κόστη του μείγματος του σκυροδέματος. Αρχικά ο πίνακας εμφανίζει την προεπιλεγμένη τιμή για το κόστος του σκυροδέματος που βρίσκεται στην ενότητα **Concrete & Steel** που προκύπτει αν επιλέγει το κελί **Default Settings and Parameters**. Αυτή η προεπιλεγμένη τιμή κόστους αντιπροσωπεύει το κόστος του σκυροδέματος μόνο, χωρίς ανασταλτικούς παράγοντες, φραγμούς (πχ. Προστατευτικές

μεμβράνες) και τον χάλυβα (αυτά τα κόστη χρησιμοποιούνται στην πορεία, στον υπολογισμό του αρχικού κόστους κατασκευής).

Δ.2 Default Concrete and Repair Costs

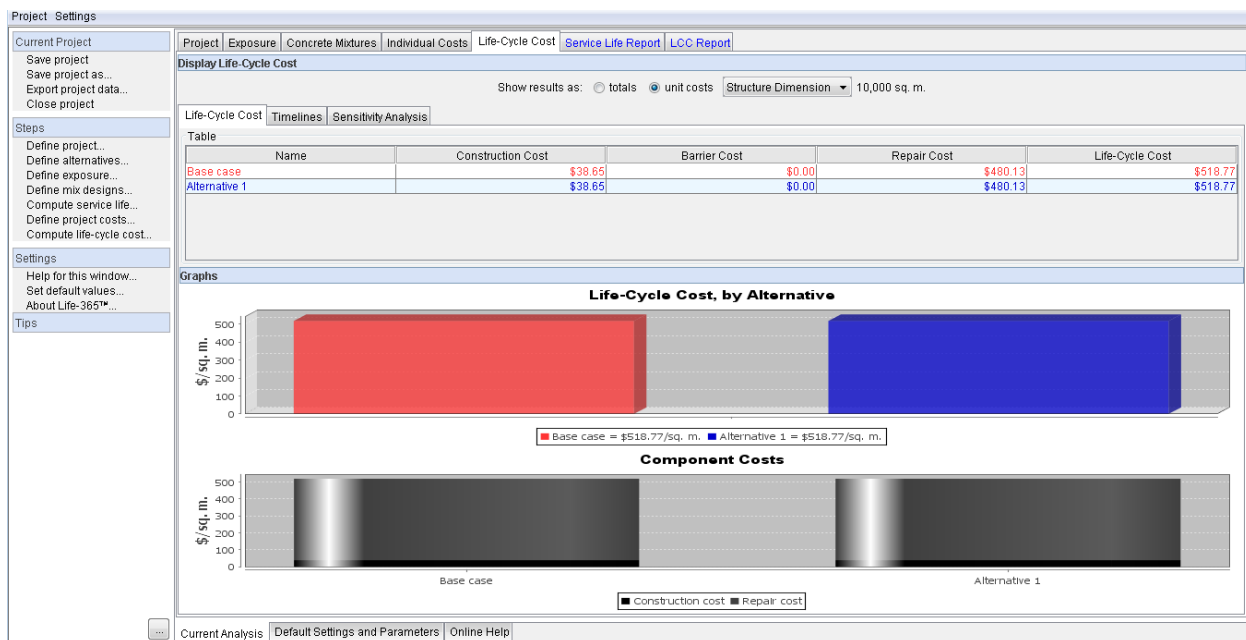
Η καρτέλα αυτή (Σχήμα Δ.2) απαριθμεί τα έξοδα που συνδέονται με 3 κατηγορίες κόστους του έργου: **Concrete & Steel**, **Barriers & Inhib.** και **Repairs**. Όταν ξεκινάει ένα καινούργιο έργο το Life -365 χρησιμοποιεί προκαθορισμένες τιμές για αυτά τα κόστη που βρίσκονται στην καρτέλα **Default Settings and Parameters**. Αν ο χρήστης επιθυμεί να προκαθορίσει αυτές τις τιμές για όλα τα μετέπειτα έργα ώστε να μείνουν σταθερές επιλέγει το κελί **Set as defaults**.

Concrete & Steel		Barriers & Inhib.		Repairs	
Concrete (\$/cub. met)	\$100.00	Memb. (\$/sq. m.)	\$33.00	Repair (\$/sq. m.)	\$400.00
Black stl (\$/kg)	\$1.00	Sealer (\$/sq. m.)	\$7.00	Area to repair (%)	10.00%
Epoxy-coated stl (\$/kg)	\$1.33	Inhibitor (\$/L)	\$1.50	Fixed repair interval (yrs)	10
Stainless stl (\$/kg)	\$6.60				

Σχήμα Δ.2: Default Concrete and Repair Costs

E. Καρτέλα Life-Cycle Cost

Μετά την συμπλήρωση των παραπάνω, τα αποτελέσματα του κόστους ζωής όλων των εναλλακτικών υπολογίζονται και συγκρίνονται στην καρτέλα **Life-cycle Cost** (Σχήμα E.1)



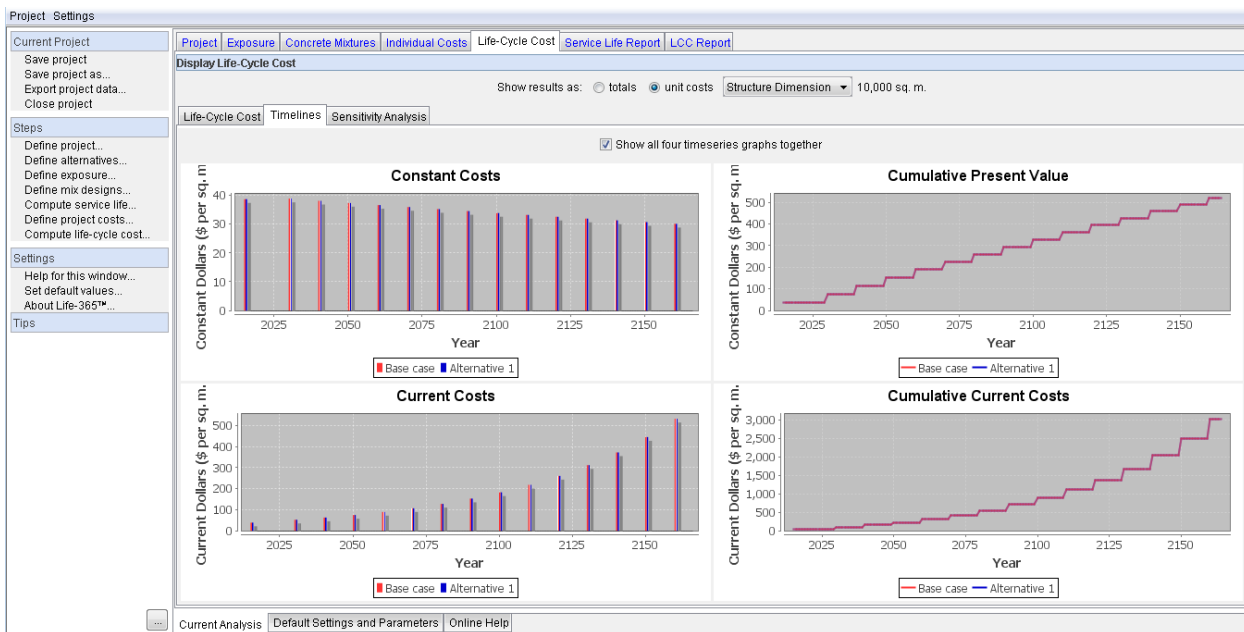
Σχήμα E.1: Καρτέλα Life-Cycle Cost

E.1 Life-Cycle Cost

Εδώ παρουσιάζεται το κόστος του κύκλου ζωής κάθε εναλλακτικής (Σχήμα E.1), σε μορφή πίνακα (**Life- Cycle Cost, by Alternative**) και η ανάλυση κόστους κάθε εναλλακτικής σε κόστος κατασκευής και κόστος επισκευής (**Component Costs**).

E.2 Timelines

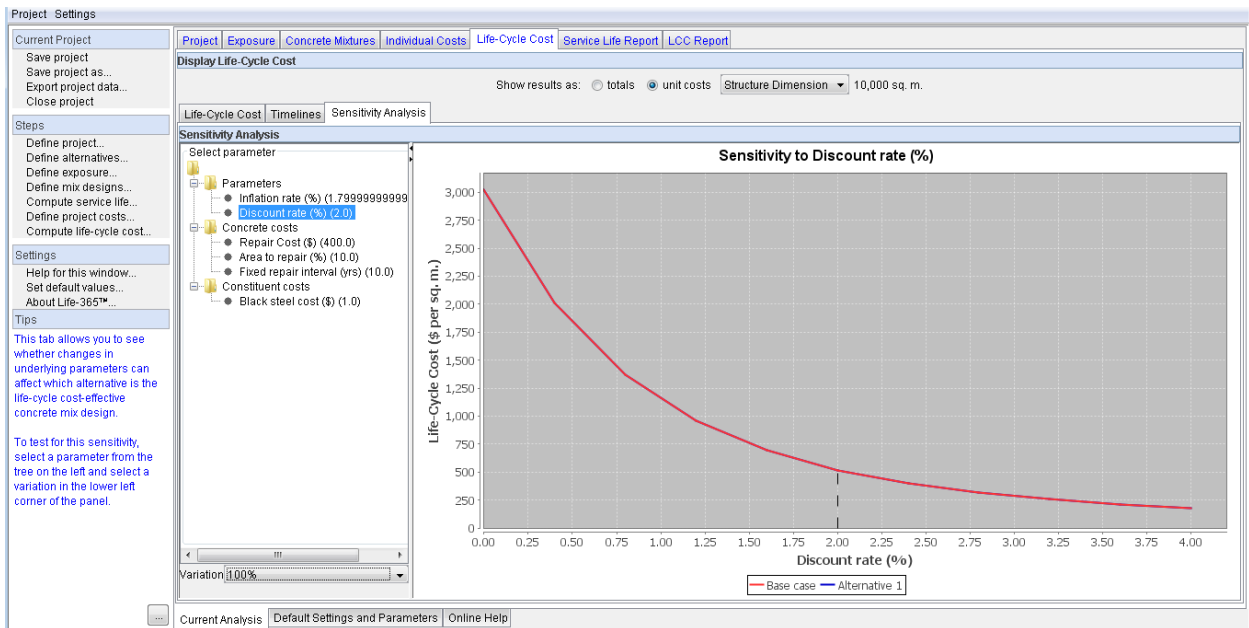
Η καρτέλα αυτή δείχνει τη σύσταση του κόστους με την πάροδο του χρόνου (Σχήμα E.2). Αρχικά δείχνει μόνο ένα από τα 4 χρονοδιαγράμματα αλλά έχει την δυνατότητα να τα εμφανίσει όλα μαζί με τη επιλογή του κελιού **Show all four time series graphs together**. Τα 2 πρώτα γραφήματα εμφανίζουν το σταθερό κόστος και το αθροιστικό κόστος σε δολάρια για κάθε έτος, όπου τα κόστη έχουν προσαρμοστεί λαμβάνοντας υπόψη τις συνέπειες των αυξήσεων των τιμών των υλικών (ρυθμός πληθωρισμού) και τη χρονική αξία του χρήματος. Τα 2 επόμενα γραφήματα δείχνουν το σταθερό και το αθροιστικό κόστος που είναι όμως προσαρμοσμένα μόνο για τον πληθωρισμό.



Σχήμα E.2: Life-Cycle Cost: Timelines

E.3 Sensitivity analysis

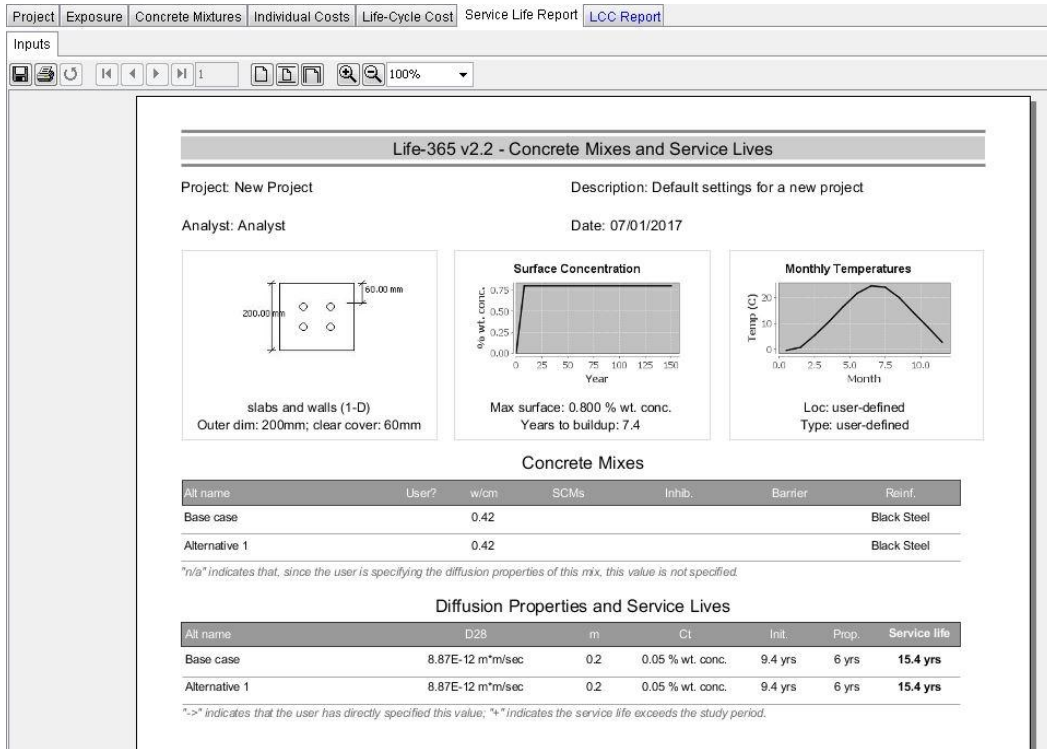
Ένα σημαντικό συστατικό της ανάλυσης του κύκλου ζωής είναι ανάλυση ευαισθησίας, δηλαδή ο καθορισμός της ευαισθησίας των αποτελεσμάτων σε αλλαγές σε οποιαδήποτε από τις βασικές παραδοχές (πχ. σε οικονομικά δεδομένα, κόστος σκυροδέματος, υλικά σύστασης, κόστος επισκευής). Μετά τις πρώτες εκτιμήσεις για αυτές τις παραμέτρους στις προηγούμενες καρτέλες, το πρόγραμμα Life-365 δίνει τουλάχιστον 2 τρόπους ανάλυσης ευαισθησίας. Ο πρώτος είναι ο χρήστης να κάνει αλλαγές σε οποιαδήποτε παράμετρο από τις προηγούμενες καρτέλες και να δει τα αποτελέσματα στο κύκλο ζωής κάθε εναλλακτικής. Ο δεύτερος τρόπος είναι από την καρτέλα **Sensitivity analysis** (Σχήμα E.3). Σε αυτήν την καρτέλα ο ο χρήστης επιλέγει μία από τις προκαθορισμένες παραμέτρους που βρίσκονται στη λίστα αριστερά (στο σχήμα 5.22 είναι επιλεγμένη παράμετρος **Discount rate (%)**) και μετά επιλέγει το εύρος της τιμής αυτής της παραμέτρου από το κελί **Variation** κάτω αριστερά (Σχήμα E.3). Για παράδειγμα αν επιλέγει ως **Variation 100%** σε ένα **Discount rate 3%** θα δημιουργηθεί ένα εύρος για το **Discount rate** από 0% έως 6%. Τότε το Life-365 θα υπολογίσει τον κύκλο ζωής κάθε εναλλακτικής σε αυτό το εύρος τιμών της παραμέτρου και θα συγκρίνει τα αποτελέσματα στο γράφημα στα δεξιά. Οι κατακόρυφες διακεκομμένες γραμμές είναι τοποθετημένες στην τιμή της παραμέτρου που ο χρήστης επέλεξε ως «βέλτιστη επιλογή».



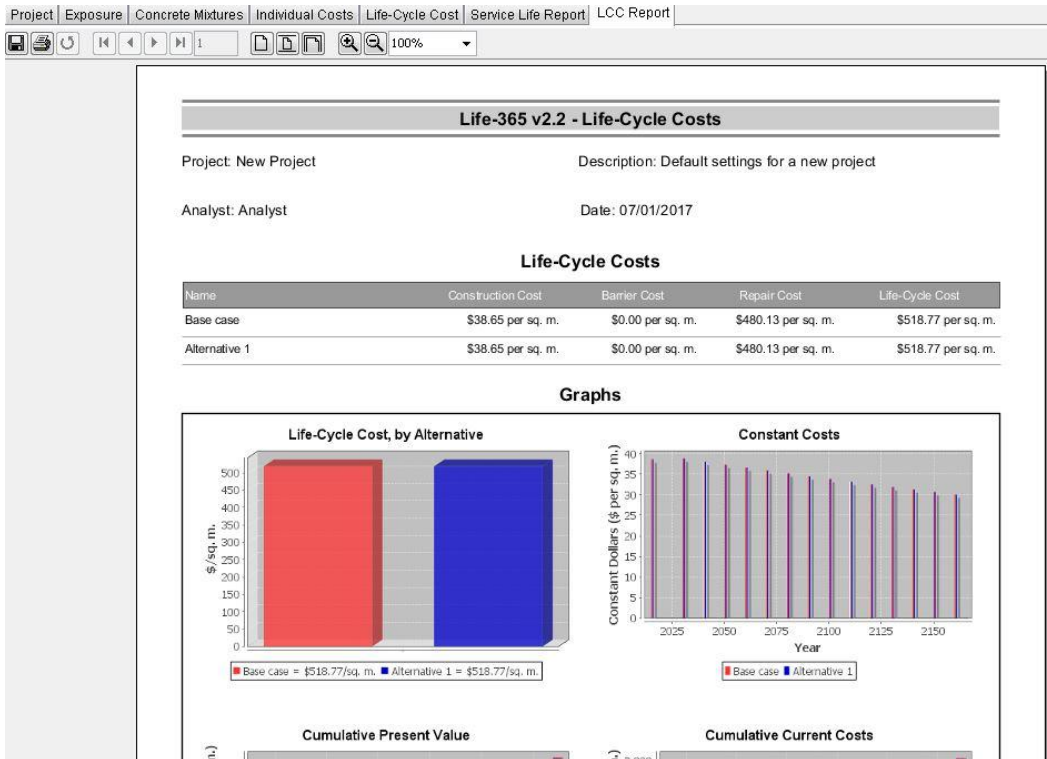
Σχήμα E.3: Life-Cycle Cost: Sensitivity Analysis

ΣΤ. Καρτέλες Service Life and Life-Cycle Cost Reports

Το Life-365 παρέχει στον χρήστη δύο προκαθορισμένες αναφορές για το έργο. Μία αναφορά σχετική με την διάρκεια ζωής του έργου (Service Life Report) και μία αναφορά σχετικά με το κόστος του κύκλου ζωής του έργου (LCC Report). Αυτές οι δύο αναφορές παραθέτουν τις περισσότερες παραμέτρους, αλλά όχι όλες, που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση. Κάθε αναφορά έχει την δυνατότητα να τυπωθεί με την χρήση του εικονιδίου της εκτύπωσης και να αποθηκευτεί σε μορφή PDF (Σχήμα ΣΤ.1 και ΣΤ.2)



Σχήμα ΣΤ.1: Service Life Report



Σχήμα ΣΤ.2: LCC Report