

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ



Μεταπτυχιακή διατριβή

ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ
ΖΩΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΛΟΓΩ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Δημήτριος Π. Κοκολάκης

Λεμεσός 2016

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ
ΖΩΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΛΟΓΩ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

της/του

Δημητρίου Π. Κοκολάκη

Λεμεσός 2016

ΕΝΤΥΠΟ ΕΓΚΡΙΣΗΣ

Μεταπτυχιακή διατριβή

[Τίτλος]

Παρουσιάστηκε από

Δημήτριο Π. Κοκολάκη

Επιβλέπων καθηγητής _____

[ιδιότητα και όνομα]

Μέλος επιτροπής _____

[ιδιότητα και όνομα]

Μέλος επιτροπής _____

[ιδιότητα και όνομα]

Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου

[Μάιος, 2016]

Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © Δημήτριος Π. Κοκολάκης, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της μεταπτυχιακής διατριβής από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Κυριάκο Νεοκλέους, για την πολύτιμη βοήθειά του και την καθοδήγηση την οποία μου παρείχε, η οποία σε συνδυασμό με τις χρήσιμες συμβουλές του οδήγησαν στην ολοκλήρωση της συγκεκριμένης διατριβής. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Διόφαντο Χατζημιτσή, για την επιλογή μου στην ένταξη της συγκεκριμένης ερευνητικής ομάδας και τη στήριξη την οποία προσέφερε σε αυτή. Ακόμη, σε αυτό το σημείο θα ήθελα να απευθύνω τις ευχαριστίες μου στον κ. Χρύσανθο Σαββίδη, προϊστάμενο του κλάδου ποιότητας αέρα Κύπρου, του Τμήματος Επιθεώρησης Εργασίας του Υπουργείου Εργασίας, Πρόνοιας και Κοινωνικών Ασφαλίσεων, για την πολύτιμη συνεργασία του και την παροχή, απαραίτητων για την εκπόνηση της παρούσας διατριβής, δεδομένων.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Από την αρχαία εποχή, το φαινόμενο της διάβρωσης των μετάλλων απασχολεί την ανθρωπότητα. Στις μέρες μας η διάβρωση του οπλισμού των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα αποτελεί το μείζον πρόβλημα μηχανικής. Αρκετοί ερευνητές, από διαφορετικά μέρη του κόσμου, έχουν προσπαθήσει να μοντελοποιήσουν, στο παρελθόν, το μηχανισμό της διάβρωσης και να προβούν σε η εκτίμηση της διάρκειας ζωής των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Επιπλέον, άλλοι ερευνητές έχουν μελετήσει την επίδραση των μεθόδων που λαμβάνονται για την προστασία έναντι στη διάβρωση των κατασκευών. Η πολυπλοκότητα όμως του προβλήματος και το πλήθος των τοπικών παραμέτρων (όπως η θερμοκρασία, η περιεκτικότητα σε χλωρίδια του ατμοσφαιρικού αέρα και η σχετική υγρασία κάθε περιοχής) από τις οποίες εξαρτάται το πρόβλημα αυτό, απαιτούν τη χρήση μοντέλων προσαρμοσμένων στις κλιματολογικές συνθήκες έκθεσης της υπό εξέταση περιοχής. Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, η παρούσα μελέτη έχει ως αντικείμενό της, τη συνοπτική παρουσίαση του μηχανισμού της διάβρωσης του οπλισμού Ο.Σ. και των ειδών διάβρωσης στο οπλισμένο σκυρόδεμα, καθώς επίσης και τη αποσαφήνιση του ορισμού σχεδιασμού ανθεκτικότητας κατασκευών Ο.Σ. και του τρόπου με τον οποίο εμπλέκεται με την εκτίμησης διάρκειας ζωής τους. Στη συνέχεια πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση στα διάφορα μοντέλα (φυσικά, εμπειρικά, στοχαστικά) εκτίμησης διάρκειας ζωής καθώς επίσης και στις μεθόδους μέτρησης χλωριόντων. Έπειτα παρατίθενται έρευνες παρεμφερείς με την παρούσα που διεξήχθησαν σε διαφορετικά μέρη του κόσμου. Όσον αφορά το πρακτικό κομμάτι της έρευνας, αξιοποιώντας δεδομένα από κρατικές υπηρεσίες της Κύπρου και από τη βιβλιογραφία, και με τη χρήση ειδικού λογισμικού, πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση των κλιματολογικών συνθηκών της Λεμεσού για διάφορες αποστάσεις από τη θάλασσα. Στη συνέχεια, έγινε η εκτίμηση διάρκειας ζωής δομικών στοιχείων κατασκευών από Ο.Σ. στη Λεμεσό, με τον καθορισμό σεναρίων για το συνδυασμό παραμέτρων όπως η απόσταση από τη θάλασσα, ο λόγος νερού/τσιμέντο και το πάχος της επικάλυψης του οπλισμού. Έπειτα, τα σενάρια αυτά αναλύθηκαν εκ νέου κάνοντας χρήση των μεθόδων για την προστασία έναντι στη διάβρωση που διέθετε το λογισμικό. Έτσι η ολοκλήρωση της μελέτης επήλθε μετά από τη διεξαγωγή συγκριτικής ανάλυσης μεταξύ των αποτελεσμάτων από τις αναλύσεις, όπου συγκρίθηκαν τόσο οι παράμετροι οι οποίες επηρεάζουν την εκτίμηση διάρκειας ζωής, όσο και τα συνήθη μέτρα προστασίας του οπλισμού κατασκευών Ο.Σ.

Λέξεις κλειδιά: Ανθεκτικότητα, εκτίμηση διάρκειας ζωής, διάβρωση, έναρξη διάβρωσης, διάδοση της διάβρωσης

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Ο πίνακας περιεχομένων περιλαμβάνει υπό μορφή λίστας τη δομή του εγγράφου.

Η πτυχιακή εργασία/ διατριβή ξεκινά με λατινική αρίθμηση (i, ii, iii, iv, v, vi). Η αραβική αρίθμηση ξεκινά είτε από την εισαγωγή είτε από το πρώτο κεφάλαιο (ακολουθούνται οι οδηγίες του επιβλέποντος).

Συνίσταται η αυτόματη δημιουργία περιεχομένων μέσω του επεξεργαστή κειμένου ως εξής:

Insert => References => Table of Contents => Insert Table of Contents. Στο σημείο *Show levels* επιλέγετε 3 ή 4 προκειμένου να υπάρχει διαβάθμιση των υποκεφαλαίων μέχρι τον τρίτο ή τέταρτο βαθμό όπως εμφανίζεται παρακάτω. Προκειμένου να είναι σωστά τα περιεχόμενα, θα πρέπει προηγουμένως να έχουν χρησιμοποιηθεί **headings** για τις επικεφαλίδες των κεφαλαίων, υποκεφαλαίων και ενοτήτων.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	vii
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	ix
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	xii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	xiv
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ.....	xx
ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ.....	xxi
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1 Διάβρωση	7
1.1 Ορισμός της διάβρωσης	7
1.2 Τα είδη της διάβρωσης.....	8
1.2.1 Είδη διάβρωσης ανάλογα με τα αίτια που την προκαλούν	8
1.2.2 Είδη διάβρωσης ανάλογα με τη μορφή εμφάνισης	9
1.2.3 Είδη διάβρωσης ανάλογα με το είδος του διαβρωτικού περιβάλλοντος.....	10
1.3 Το βασικό κελί διάβρωσης (corrosion cell)	11
1.4 Διάβρωση του χάλυβα οπλισμού στο οπλισμένο σκυρόδεμα	13

1.4.1	Γενικά στοιχεία.....	13
1.4.2	Παθητική προστασία χάλυβα οπλισμού εντός του οπλισμένου σκυροδέματος	13
1.4.3	Τα στάδια εξέλιξης της διάβρωσης	14
1.4.4	Μηχανισμός της διάβρωσης του χάλυβα οπλισμού του οπλισμένου σκυροδέματος.....	16
1.4.5	Διάβρωση χάλυβα οπλισμού λόγω ενανθράκωσης	18
1.4.6	Διάβρωση χάλυβα οπλισμού λόγω χλωριόντων.....	22
2	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	28
2.1	S. Morinaga “Life prediction of reinforced concrete structures in hot and salt-laden environments”	28
2.2	M.A. Mustafa and K.M. Yusof “Atmospheric chloride penetration into concrete in semitropical marine environment”	38
2.3	G.R. Meira, I. J. Padaratz, C. Alonso, C. Andrade “Atmospheric chloride penetration into concrete in semitropical marine environment”	42
2.4	Σ. Δέμης « Σχεδιασμός ανθεκτικότητας κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος – Εκτίμηση διάρκειας ζωής »	46
3	Εκτίμηση διάρκειας ζωής.....	50
3.1	Γενικά στοιχεία.....	50
3.2	Ανασκόπηση των μοντέλων εκτίμησης της διάρκειας ζωής κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα σε παραθαλάσσιο περιβάλλον.....	54
3.2.1	Ανασκόπηση των μοντέλων διείσδυσης και κυκλοφορίας ανιόντων χλωριδίου	55
3.3	Ανασκόπηση πειραματικών μεθόδων μέτρησης συγκέντρωσης χλωριδίων στο σκυρόδεμα	68
3.3.1	Μέτρηση χλωριδίων στο σκυρόδεμα	68
3.3.2	Μέθοδοι προσδιορισμού της διείσδυσης χλωριδίων στο σκυρόδεμα.	72
4	Μεθοδολογία.....	77

4.1	Πληροφορίες σχετικά με το μοντέλο Life-365.....	77
4.1.1	Πρακτική εφαρμογή του λογισμικού Life-365	78
4.1.2	Οι περιβαλλοντικές συνθήκες έκθεσης ανάλογα με την τοποθεσία της κατασκευής στο λογισμικό.....	78
4.1.3	Εκτίμηση διάρκειας ζωής σύμφωνα με το λογισμικό Life-365	79
4.1.4	Μέθοδοι προστασίας έναντι διάβρωσης στο λογισμικό Life-365.....	80
4.1.5	Μηχανική ανάλυση πληροφοριών.....	81
4.1.6	Ανάλυση κόστους κύκλου ζωής.....	81
4.2	Χρήση του προγράμματος για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης.....	82
4.2.1	Γενική περιγραφή	82
4.3	Παράμετροι και δεδομένα της ανάλυσης	83
4.3.1	Ορισμός κλιματολογικών παραμέτρων	84
4.3.2	Ορισμός της παραμέτρου Rebar % vol. concrete.....	88
4.4	Σενάρια ανάλυσης	89
5	Αποτελέσματα.....	94
5.1	Αποτελέσματα πρώτου σεναρίου	94
5.2	Αποτελέσματα δεύτερου σεναρίου.....	95
5.3	Αποτελέσματα τρίτου σεναρίου	95
5.4	Αποτελέσματα τέταρτου σεναρίου.....	97
5.5	Αποτελέσματα πέμπτου σεναρίου	98
5.6	Αποτελέσματα έκτου σεναρίου	99
5.7	Συγκεντρωτικοί πίνακες αποτελεσμάτων.....	101
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ / ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ.....	112
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	117
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	126

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 : Συγκέντρωση χλωριδίων στην επιφάνεια του σκυροδέματος σε σχέση με την απόσταση από τη θάλασσα (Morinaga, 1992).	32
Πίνακας 2 : Παράγοντες και επίπεδα που χρησιμοποιήθηκαν στην εκτίμηση διάρκειας ζωής (Morinaga, 1992).	33
Πίνακας 3 : Μέγιστος λόγος νερού/τσιμέντο (Morinaga, 1992).	38
Πίνακας 4 : Συγκέντρωση χλωριδίων σε σχέση με την απόσταση από τη θάλασσα (Meira et al., 2003).	44
Πίνακας 5 : Πίνακας δεδομένων που απαιτούνται από κάθε μοντέλο (Δέμης, 2015).	47
Πίνακας 6 : Πίνακας αποτελεσμάτων που εξάγονται από κάθε μοντελό (Δέμης, 2015).	48
Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά της δοκιμής (Δέμης, 2015).	48
Πίνακας 8 : Μέσες μηνιαίες τιμές για τη θερμοκρασία στη Λεμεσό, σύμφωνα με την υπηρεσία ποιότητας αέρα Κύπρου (2009-2014).	86
Πίνακας 9 : Μέσaiες μηνιαίες θερμοκρασίες για την περιοχή του Λος Άντζελες, σύμφωνα με το πρόγραμμα Life-365.	86
Πίνακας 10: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων εκτιμωμένης διάρκειας ζωής για το κάθε σενάριο.	101
Πίνακας 11: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων εκτιμωμένης διάρκειας ζωής για το κάθε σενάριο, έπειτα από προσθήκη αναστολέα διάβρωσης 5L/m ³	104
Πίνακας 12 : Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων εκτιμωμένης διάρκειας ζωής για το κάθε σενάριο, έπειτα από προσθήκη αναστολέα διάβρωσης 10L/m ³	105
Πίνακας 13 : Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων εκτιμωμένης διάρκειας ζωής για το κάθε σενάριο, έπειτα από προσθήκη ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F 5%.	106
Πίνακας 14 : Γραφική απεικόνιση εκτιμωμένης διάρκειας ζωής κάθε σεναρίου, έπειτα από προσθήκη ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F 5%.	107
Πίνακας 15 : Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων εκτιμωμένης διάρκειας ζωής για το κάθε σενάριο, έπειτα από προσθήκη ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F 10%.	108

Πίνακας 16 : Παράμετροι σχεδιασμού που επηρεάζουν τη διάρκεια ζωής στοιχείου οπλισμένου σκυροδέματος σε σχέση με την υποβάθμιση από διάβρωση (Luca Bertolini, 2008).....	133
Πίνακας 17: Κατηγορίες έκθεσης σε σχέση με τη διάβρωση του οπλισμού (κατηγορίες 2, 3 και 4) και διατάξεις για το σκυρόδεμα σύμφωνα με το πρότυπο EN 206-1 του 2001 (Apostolopoulos & Papadakis, 2008).....	134

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Σχέση Επιτελεστικότητας και διάρκειας ζωής κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. (Ρούτουλας, 2012b).....	2
Σχήμα 2 : Φτερωτός χάλκινος τάλος από το δίδραχμο Φαιστού. (Μπάστα & Μπατζιά, 2013)	3
Σχήμα 3 Εισαγωγή της διάβρωσης χάλυβα οπλισμού (Αποστολόπουλος, 2006).....	14
Σχήμα 4: Στάδιο εκκίνησης και διάδοσης της διάβρωσης (Tuutti, 1982).	15
Σχήμα 5: Ο ρυθμός διάβρωσης σε διάφορα είδη σκυροδέματος με διαφορετικό ποσοστό σχετικής υγρασίας περιβάλλοντος (R.H.) (C. Andrade, M. C. Alonso, 1988).	16
Σχήμα 6: Απλοποιημένο προσομοίωμα διάβρωσης χάλυβα οπλισμού (Ρούτουλας, 2012a)..	17
Σχήμα 7: Προσομοίωμα διάβρωσης χάλυβα οπλισμού οπλισμένου σκυροδέματος (Ρούτουλας, 2012a).	17
Σχήμα 8 : Διάρκεια ζωής της κατασκευής (Δέμης, 2015).	19
Σχήμα 9 : Συσχετισμός περιεκτικότητας χλωριόντων σε κατάστρωμα γέφυρας και ποσοστό διαβρωμένου οπλισμού (VASSIE, 1984).	22
Σχήμα 10 : Διάβρωση με δημιουργία τοπικού γαλβανικού στοιχείου (Ζαφειροπούλου, 2014).	25
Σχήμα 11 : Γαλβανικό μακροστοιχείο (Alonso et al., 1988).	26
Σχήμα 12 : Διάβρωση παραθαλάσσιων κατασκευών (Ζαφειροπούλου, 2014).	27
Σχήμα 13 : Διάγραμμα σωρευτικής πιθανότητας για τη συγκέντρωση χλωριδίων στο σκυρόδεμα (Morinaga, 1992).	30
Σχήμα 14: Διάγραμμα σωρευτικής πιθανότητας για το συντελεστή διάχυσης των χλωριδίων στο σκυρόδεμα (Morinaga, 1992).	31
Σχήμα 15 : Επίδραση του πάχους επικάλυψης, της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας για διάφορους λόγους νερού προς τσιμέντο (Morinaga, 1992).	34
Σχήμα 16 : Επίδραση της απόστασης από τη θάλασσα (Morinaga, 1992).	35

Σχήμα 17: σχέση μεταξύ του απαιτούμενου χρόνου ζωής, του πάχους κάλυψης και του λόγου νερού/τσιμέντο για αποστάσεις 0, 50 και 100 μέτρων από τη θάλασσα (Morinaga, 1992)....	37
Σχήμα 18 : Προσέγγιση της περιεκτικότητας σε χλωρίδια μέσω της εξίσωσης του 2ου νόμου του Fick (Mustafa & Yusof, 1994).....	42
Σχήμα 19 : Σχηματική απεικόνιση δοκιμίου (Meira et al., 2003).	44
Σχήμα 20 : Επιρροή της απόστασης από τη θάλασσα στην περιεκτικότητα χλωριδίων σε σχέση με το βάθος από την επιφάνεια του δοκιμίου (Meira et al., 2003).	45
Σχήμα 21 : Σχηματική απεικόνιση εκτίμησης διάρκειας ζωής υπό τη δράση χλωριόντων (Δέμης, 2015).	48
Σχήμα 22: Σχέση επιτελεστικότητας – Διάρκειας ζωής κατασκευών ΟΣ (Παπαδάκης, 2004).	51
Σχήμα 23: Απεικόνιση των φάσεων της διάβρωσης λόγω διείσδυσης χλωριδίων στο Ο.Σ. (Chen & Mahadevan, 2008).	52
Σχήμα 24: Τα στάδια της διαδικασίας της διάβρωσης λόγω χλωριδίων του οπλισμού Ο.Σ.(Chen & Mahadevan, 2008).	53
Σχήμα 25: Διάγραμμα σταδίων διάρκειας ζωής κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα (Δέμης, 2015).	55
Σχήμα 26: Γράφημα των τυπικών Mejlbro Ψ – συναρτήσεων (Frederiksen et al., 1997).	58
Σχήμα 27 : Εξαγωγή του δείγματος με λειοτριβή (Luping Tang et al., 2012).....	70
Σχήμα 28: Σχηματική απεικόνιση δοκιμής NT Build 443 (Τεταγιώτη, 2011).....	73
Σχήμα 29 : Σχηματική απεικόνιση δοκιμής γρήγορης μετανάστευσης (Luping Tang et al., 2012).....	74
Σχήμα 30: Η δοκιμή γρήγορης μετανάστευσης (Luping Tang et al., 2012).	75
Σχήμα 31 : Περιβαλλοντικές συνθήκες έκθεσης ανάλογα με την τοποθεσία της κατασκευής.	79
Σχήμα 32 : Ανάλυση σεναρίων προστασίας από τη διάβρωση (Violetta, 2002).	81
Σχήμα 33 : Ορισμός των παραμέτρων κόστους στο πρόγραμμα Life-365.	82

Σχήμα 34 : Ορισμός συνθηκών έκθεσης στο λογισμικό Life-365.	84
Σχήμα 35 : Σχεδιασμός του υποστυλώματος στο πρόγραμμα.	84
Σχήμα 36 : Αντικατάσταση των τιμών της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας στο πρόγραμμα. .	87
Σχήμα 37 : Καθορισμός συνθηκών έκθεσης στο πρόγραμμα.	87
Σχήμα 38 : Καθορισμός της παραμέτρου Rebar % vol. Concrete.	88
Σχήμα 39 : Καθορισμός πρώτου σεναρίου.	89
Σχήμα 40 : Καθορισμός πέμπτου σεναρίου.	90
Σχήμα 41 : Προσθήκη αναστολέα διάβρωσης στο πρόγραμμα Life-365.	91
Σχήμα 42: Αποτελέσματα πρώτου σεναρίου.	94
Σχήμα 43: Αποτελέσματα δεύτερου σεναρίου.	95
Σχήμα 44: Αποτελέσματα τρίτου σεναρίου.	96
Σχήμα 45: Αποτελέσματα τρίτου σεναρίου.	96
Σχήμα 46: Αποτελέσματα τέταρτου σεναρίου.	97
Σχήμα 47 : Αποτελέσματα τέταρτου σεναρίου.	98
Σχήμα 48: Αποτελέσματα πέμπτου σεναρίου.	99
Σχήμα 49: Αποτελέσματα έκτου σεναρίου.	100
Σχήμα 50: Αποτελέσματα έκτου σεναρίου.	100
Σχήμα 51: Γραφική απεικόνιση εκτιμωμένης διάρκειας ζωής κάθε σεναρίου.	101
Σχήμα 52: Γραφική απεικόνιση της επιρροής της απόστασης από τη θάλασσα στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής, για σταθερό πάχος επικάλυψης 30mm.....	102
Σχήμα 53: Γραφική απεικόνιση της επιρροής του πάχους επικάλυψης στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για σταθερή απόσταση από τη θάλασσα marine spray zone.	102
Σχήμα 54 : Γραφική απεικόνιση εκτιμωμένης διάρκειας ζωής κάθε σεναρίου, έπειτα από προσθήκη αναστολέα διάβρωσης 5L/m ³	104
Σχήμα 55 : Γραφική απεικόνιση εκτιμωμένης διάρκειας ζωής κάθε σεναρίου, έπειτα από προσθήκη αναστολέα διάβρωσης 10L/m ³	105

Σχήμα 56 : Γραφική απεικόνιση εκτιμωμένης διάρκειας ζωής κάθε σεναρίου, έπειτα από προσθήκη ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F 10%.....	108
Σχήμα 57 : Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ των μεθόδων προστασίας για απόσταση marine spray zone και πάχος επικάλυψης 30mm... ..	113
Σχήμα 58 : Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ των μεθόδων προστασίας για απόσταση από τη θάλασσα εντός 0,8km και πάχος επικάλυψης 30mm.	113
Σχήμα 59 : Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ των μεθόδων προστασίας για απόσταση από τη θάλασσα εντός 1.5km και πάχος επικάλυψης 30mm.	113
Σχήμα 60: Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ των μεθόδων προστασίας για απόσταση marine spray zone και λόγο w/c = 0.4.	115
Σχήμα 61: Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ των μεθόδων προστασίας για απόσταση από τη θάλασσα εντός 0,8km και λόγο w/c = 0.4.	115
Σχήμα 62 : Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ των μεθόδων προστασίας για απόσταση από τη θάλασσα εντός 1,5km και λόγο w/c = 0.4.	115
Σχήμα 63: Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ των μεθόδων προστασίας για απόσταση marine spray zone και πάχος επικάλυψης 35mm.	134
Σχήμα 64: Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ των μεθόδων προστασίας για απόσταση από τη θάλασσα εντός 0,8km και πάχος επικάλυψης 35mm.	135
Σχήμα 65 : Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ των μεθόδων προστασίας για απόσταση από τη θάλασσα εντός 1.5km και πάχος επικάλυψης 35mm.	135
Σχήμα 66 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής της απόστασης από τη θάλασσα στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής, για σταθερό πάχος επικάλυψης 35mm.	136
Σχήμα 67: Γραφική απεικόνιση της επιρροής του πάχους επικάλυψης στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για σταθερή απόσταση από τη θάλασσα within 0.8km of the ocean.	136
Σχήμα 68 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής του πάχους επικάλυψης στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για σταθερή απόσταση από τη θάλασσα within 1,5km of the ocean.	137
Σχήμα 69 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής της απόστασης από τη θάλασσα στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής, για σταθερό πάχος επικάλυψης 30mm, με προσθήκη Ca nitrite 5L/m ³	137

Σχήμα 70: Γραφική απεικόνιση της επιρροής της απόστασης από τη θάλασσα στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής, για σταθερό πάχος επικάλυψης 35mm, με προσθήκη Ca nitrite 5L/m ³	138
Σχήμα 71: Γραφική απεικόνιση της επιρροής του πάχους επικάλυψης στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για σταθερή απόσταση από τη θάλασσα marine spray zone με προσθήκη Ca nitrite 5L/m ³	138
Σχήμα 72 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής του πάχους επικάλυψης στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για σταθερή απόσταση από τη θάλασσα within 0.8km of the ocean, με προσθήκη Ca nitrite 5L/m ³	139
Σχήμα 73 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής του πάχους επικάλυψης στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για σταθερή απόσταση από τη θάλασσα within 1,5km of the ocean, με προσθήκη Ca nitrite 5L/m ³	139
Σχήμα 74 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής της απόστασης από τη θάλασσα στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής, για σταθερό πάχος επικάλυψης 30mm, με προσθήκη Ca nitrite 10L/m ³	140
Σχήμα 75 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής της απόστασης από τη θάλασσα στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής, για σταθερό πάχος επικάλυψης 35mm, με προσθήκη Ca nitrite 10L/m ³	140
Σχήμα 76 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής του πάχους επικάλυψης στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για σταθερή απόσταση από τη θάλασσα marine spray zone, με προσθήκη Ca nitrite 10L/m ³	141
Σχήμα 77 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής του πάχους επικάλυψης στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για σταθερή απόσταση από τη θάλασσα within 0.8km of the ocean, με προσθήκη Ca nitrite 10L/m ³	141
Σχήμα 78 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής του πάχους επικάλυψης στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για σταθερή απόσταση από τη θάλασσα within 1,5km of the ocean, με προσθήκη Ca nitrite 10L/m ³	142
Σχήμα 79 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής της απόστασης από τη θάλασσα στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής, για σταθερό πάχος επικάλυψης 30mm, με προσθήκη 5% ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F.....	142

Σχήμα 80 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής της απόστασης από τη θάλασσα στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής, για σταθερό πάχος επικάλυψης 35mm, με προσθήκη 5% ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F.....	143
Σχήμα 81 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής του πάχους επικάλυψης στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για σταθερή απόσταση από τη θάλασσα marine spray zone, με προσθήκη 5% ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F.	143
Σχήμα 82 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής του πάχους επικάλυψης στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για σταθερή απόσταση από τη θάλασσα within 0,8km of the ocean, με προσθήκη 5% ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F.....	144
Σχήμα 83 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής του πάχους επικάλυψης στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για σταθερή απόσταση από τη θάλασσα within 1,5km of the ocean, με προσθήκη 5% ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F.....	144
Σχήμα 84 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής της απόστασης από τη θάλασσα στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής, για σταθερό πάχος επικάλυψης 30mm, με προσθήκη 10% ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F.....	145
Σχήμα 85 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής της απόστασης από τη θάλασσα στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής, για σταθερό πάχος επικάλυψης 35mm, με προσθήκη 10% ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F.....	145
Σχήμα 86 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής του πάχους επικάλυψης στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για σταθερή απόσταση από τη θάλασσα marine spray zone, με προσθήκη 10% ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F.	146
Σχήμα 87 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής του πάχους επικάλυψης στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για σταθερή απόσταση από τη θάλασσα within 0.8km of the ocean, με προσθήκη 10% ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F.....	146
Σχήμα 88 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής του πάχους επικάλυψης στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για σταθερή απόσταση από τη θάλασσα within 1,5km of the ocean, με προσθήκη 10% ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F.....	147

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

Ο.Σ.:	Οπλισμένο Σκυρόδεμα
R.H.:	Relative Humidity
ACI :	American Concrete Institute
ASTM :	American Society for Testing and Materials
LCCA	Life Cycle Cost Analysis
Η.Π.Α.	Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής

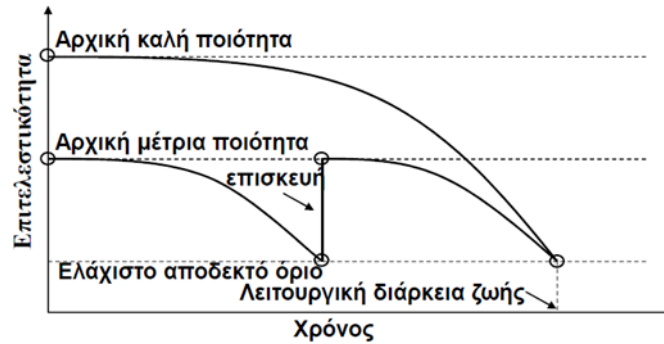
ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ

Corrosion :	Διάβρωση
Carbonation :	Ενανθράκωση
Embedded :	Εμβαπτισμένες
Service life time :	Διάρκεια ζωής
Performance :	Επιτελεστικότητα
Durability :	Ανθεκτικότητα
Pitting corrosion :	Σημειακή διάβρωση
Corrosion initiation :	Έναρξη της διάβρωσης
Corrosion propagation :	Διάδοση της διάβρωσης
Depassivation :	Αποπαθητικοποίηση

Chloride penetration :	Διείσδυση χλωριδίων
Life cycle analysis :	Ανάλυση κύκλου ζωής
Reliability :	Αξιοπιστία
Serviceability :	Λειτουργικότητα
Titration :	Ογκομετρική ανάλυση
Calcium nitrite	Νιτρώδες ασβέστιο
Fly ash	Ιπτάμενη τέφρα
Marine spray zone	Ζώνη ψεκασμού από θαλασσινό νερό

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το οπλισμένο με ράβδους χάλυβα σκυρόδεμα είναι ένα ανθεκτικό, σε ικανοποιητικό βαθμό, υλικό καθώς και ένα από τα πιο οικονομικά αποδοτικά και παγκοσμίως δημοφιλή υλικά κατασκευής (Berke & Hicks, 2004). Η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες εκτίθεται, συμπεριλαμβάνοντας σε αυτές παράγοντες όπως η ενανθράκωση, η διάβρωση, οι αλκαλικές αντιδράσεις, η ψύξη και η απόψυξη (Sakr, 2005). Ακόμη, είναι αποδεδειγμένο πως σε περίπτωση που το σκυρόδεμα υποστεί βλάβη, ο οπλισμός εκτίθεται στην ατμόσφαιρα, συνεπώς και στη διάβρωση, αφού χάνεται η παθητική προστασία του οπλισμού, γεγονός που οδηγεί σε μείωση της διατομής των ράβδων του χάλυβα οπλισμού, υποβαθμίζοντας έτσι τη φέρουσα ικανότητα του οπλισμένου σκυροδέματος (Carozucca, 1995). Ακόμη είναι γνωστό πως η αποτελεσματικότητα του οπλισμένου σκυροδέματος εξαρτάται από τη συνάφεια μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος. Συνεπώς, τα προϊόντα της διάβρωσης που εναποτίθενται μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος οδηγούν σε βαθμιαία απώλεια της συνάφειας με άμεση συνέπεια τη γενικότερη υποβάθμιση του οπλισμένου σκυροδέματος και της ανθεκτικότητάς του (L Bertolini, Elsener, & Pedeferra, 2004; Page & Treadaway, 1982). Νοούμενου ότι, επιτελεσματικότητα είναι « ...η ικανότητα της κατασκευής να επιτελεί τον σκοπό της όσον αφορά την ασφάλεια, την λειτουργικότητα και την εμφάνισή της...» (Ρούτουλας, 2012b) και επιπλέον ότι ως διάρκεια ζωής μιας κατασκευής «...ορίζεται η περίοδος του χρόνου μέσα στην οποία η επιτελεσματικότητα της κατασκευής διατηρείται σε ένα αποδεκτό, σύμφωνα με προδιαγραφές επίπεδο, ακολουθώντας ένα κανονικό πρόγραμμα συντήρησης...» (Ρούτουλας, 2012b), η διάβρωση του χάλυβα οπλισμού του οπλισμένου σκυροδέματος αποτελεί ένα μείζον πρόβλημα πολιτικής μηχανικής καθώς σύμφωνα με τα παραπάνω συντελεί, στην πτώση του βαθμού επιτελεσματικότητας των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος και κατ' επέκταση στη μείωση της διάρκειας ζωής τέτοιου τύπου κατασκευών.



Σχήμα 1: Σχέση Επιτελεστικότητας και διάρκειας ζωής κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. (Ρούτουλας, 2012b)

Συμπερασματικά λοιπόν, από τη στιγμή που η εκτίμηση της διάρκειας ζωής των κατασκευών είναι ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται κατά τη φάση του σχεδιασμού.

Ιστορική αναδρομή

Όμως η διάβρωση δεν είναι ένα φαινόμενο το οποίο άρχισε να απασχολεί μόνο τα τελευταία χρόνια την ανθρωπότητα και τις κατασκευές. Υπάρχουν πέντε βασικοί σταθμοί στην ιστορική εξέλιξη της ερμηνείας και της αντιμετώπισης της διάβρωσης (Βλάχος, 1991).

Η πρώτη αναφορά έγινε κατά τη Μινωική εποχή (2000 π.Χ.) όπου γινόταν εκτεταμένη χρήση χάλκινων αντικειμένων, αρκετά από τα οποία διασώζονται και εκτίθενται στο αρχαιολογικό μουσείο Ηρακλείου. Από εκείνη την υπάρχουν αναφορές για απώλεια της στιλπνότητας, λόγω δημιουργίας οξειδίων στην επιφάνειά τους που αντιμετωπιζόταν με επάλειψη με λάδι, καθώς μεσω της οξύτητάς του διέλυε μερικώς τα οξείδια. Αργότερα γίνονται αναφορές στον Ηρόδοτο (5^ο αιώνα π.Χ.) για επάλειψη με κασίτερο για την αντιδιαβρωτική προστασία του χάλυβα.



Σχήμα 2 : Φτερωτός χάλκινος τάλως από το δίδραχμο Φαιστού. (Μπάστα & Μπατζιά, 2013)

Ο δεύτερος σταθμός λαμβάνει χώρα κατά το 2^ο μ.Χ. αιώνα, όταν ο Πλούταρχος μελετώντας τα ορειχάλκινα αγαλματίδια των Δελφών κάνει βαρυσήμαντες παρατηρήσεις οι οποίες επαληθεύτηκαν το 1958 από τον Wagner. Σε αυτόν αποδίδεται η φράση «...Ο χαλκός αυτός καθ' εαυτόν παλαιούμενος αποπνέει και μεθήσιν τον ιόν...» που μεταφράζεται «...Ο χαλκός εξατμίζεται (εξαχνώνεται, διαχέεται) και δημιουργεί το άνθος (δηλαδή τα οξείδια, τα προϊόντα της διάβρωσης) και μάλιστα αυθόρμητα...» (Βλάχος, 1991).

Ο τρίτος σταθμός είναι το 1900 όταν ο Max Planck διατυπώνει την Κβαντική θεωρία σύμφωνα με την οποία, όπως η ύλη, έτσι και η ενέργεια αποτελείται από ελάχιστα πακέτα ενέργειας, τα κβάντα και διαδίδεται κατά ακέραια πολλαπλάσιά τους. Με αυτό τον τρόπο η διάβρωση επεξηγείται ως μεταφορά ενέργειας από το ένα σημείο του μετάλλου στο άλλο για να επέλθει η ισορροπία του συστήματος.

Ο τέταρτος σταθμός τοποθετείται χρονολογικά μεταξύ 1926 και 1936 μετά την ολοκλήρωση της θεωρίας της « Αταξίας των Στερεών Σωμάτων » από τους Frenkel, Wagner και Schottky. Έτσι άρχισε η ερμηνεία του φαινομένου της διάβρωσης από το Hedvall, στηριζόμενος στην αταξία των στερεών.

Ο πέμπτος σταθμός έγινε το 1958 όταν ο Wagner απέδειξε και ολοκλήρωσε τη θεωρία της Αταξίας και απέδειξε και ερμήνευσε πλήρως το μηχανισμό της διάβρωσης. Το παραβολικό μοντέλο του Wagner εκφράζεται από την εξίσωση 1.1.

$$y^2 = K \cdot t \quad (1.1)$$

Όπου K είναι μια εμπειρική σταθερά, που προκύπτει από τη σταθερά της ταχύτητας του βραδύτερου σταδίου της συνολικής αντίδρασης της διάβρωσης και εξαρτάται από τις

διάφορες μεταβλητές του φαινομένου της διάβρωσης και y το πόσο έχει προχωρήσει η διάβρωση του μεταλλικού αντικειμένου από το χρόνο έναρξης μέχρι τη χρονική στιγμή t .

Από τότε και σήμερα ένας μεγάλος τομέας της επιστήμης από διάφορους κλάδους (χημεία, μεταλλουργία, ηλεκτροφυσική, τεχνολογία υλικών και πολιτική μηχανική) βοηθά ώστε να ερευνηθούν τα είδη διάβρωσης, η προδιάθεση των υλικών, οι συνέπειες και οι τρόποι αντιμετώπισής της.

Οικονομικές συνέπειες της διάβρωσης

Αρκετές έρευνες έχουν αποδείξει πως, η γενικότερη υποβάθμιση του οπλισμένου σκυροδέματος οδηγεί σε κατασκευαστικά προβλήματα, η αποκατάσταση των οποίων έχει σημαντικό οικονομικό αντίκτυπο (Almusallam, 2001a; Sakr, 2005; Wallbank, 1989). Υπολογίζεται ότι το 5% του Ακαθάριστου Εθνικού Προϊόντος ενός εκβιομηχανισμένου κράτους διατίθεται για την πρόληψη φαινομένων διάβρωσης σιδηροοπλισμού και την αποκατάστασή τους (Μπάστα & Μπατζιά, 2013). Επιπλέον εκτιμάται ότι το 11% του συνόλου των μετάλλων και των κραμάτων που παράγονται παγκοσμίως, καταστρέφεται εντελώς από τη διάβρωση (Βλάχος, 1991). Για αυτό το λόγο, η μείωση της ωφέλιμης διάρκειας ζωής κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα κυρίως λόγω της διάβρωσης του οπλισμού αποτελεί κύρια αιτία ανησυχίας της παγκόσμιας οικοδομικής βιομηχανίας.

Το κόστος της διάβρωσης ενδέχεται να είναι άμεσο αλλά και έμμεσο. Ως άμεσο κόστος ορίζεται το σύνολο του κόστους σχεδιασμού – μελέτης, παραγωγής υλικών, κατασκευής, εργατικών, εξοπλισμού αλλά και επίβλεψης. Ενώ ως έμμεσο κόστος δηλώνεται το σύνολο κόστους από τις απώλειες στην παραγωγικότητα και τις καθυστερήσεις κατά τη διάρκεια μη χρήσης και εργασιών επισκευής του έργου. Σύμφωνα με οικονομικά στοιχεία, πάνω από 20 δισεκατομμύρια δολάρια δαπανήθηκαν στις ΗΠΑ για επισκευές δημοσίων οδικών κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος για το έτος 1989 (Παπαδόπουλος, 2007), το αντίστοιχο ποσό για το Ηνωμένο Βασίλειο, ξεπέρασε τα 600 εκατομμύρια στερλίνες κατά το ίδιο έτος (Wallbank, 1989) ενώ για τις ΗΠΑ το ποσό αυτό αυξήθηκε στα 276 δισεκατομμύρια δολάρια το 1997 (Almusallam 2001). Επιπλέον σύμφωνα με άλλες έρευνες, το συνολικό κόστος διάβρωσης στις ΗΠΑ το 1998 άγγιξε τα 121,41 δισεκατομμύρια δολάρια (σχεδόν το 1,4% του ΑΕΠ των ΗΠΑ).

Δυστυχώς για την Ελλάδα και την Κύπρο δεν υπάρχουν παρόμοια στατιστικά δεδομένα, όμως το πρόβλημα παραμένει μεγάλο από τη στιγμή που και οι δύο χώρες περιβάλλονται σε μεγάλο βαθμό από τη θάλασσα, επομένως λόγω ύπαρξης ανιόντων χλωριδίου σε μεγάλο βαθμό στο περιβαλλοντικό φαινόμενο της διάβρωσης λαμβάνει ολόένα και μεγαλύτερες διαστάσεις. Όσο αφορά όμως το κόστος της διάβρωσης στην Ελλάδα αυτό εύκολα διαφαίνεται από το « Νόμο των 5 » του De Sitter : *«...1 € ζοδευμένο κατά την αρχική φάση σχεδιασμού, κατασκευής και ωρίμανσης, ισοδυναμεί με 5 € που ζοδεύονται για παρεμπόδιση των μηχανισμών εισαγωγής στην διάβρωση, ισοδυναμεί με 25 € που ζοδεύονται για παρεμπόδιση των μηχανισμών διάδοσης της διάβρωσης, ισοδυναμεί με 125 € που ζοδεύονται προς αποκατάσταση των εκτεταμένων φθορών της κατασκευής...»* (Παπαδάκης, 2004).

Από τη στιγμή λοιπόν, που το πρόβλημα της διάβρωσης λαμβάνει εκτενείς διαστάσεις, τόσο στον τομέα της ασφάλειας των πολιτών (λόγω της μείωσης της φέρουσας ικανότητας των κατασκευών) όσο και στην οικονομία, κρίνεται σκόπιμο να πραγματοποιηθεί μια εμπειρισταωμένη μελέτη του φαινομένου της διάβρωσης για τα κυπριακά δεδομένα. Η παρούσα διατριβή έχει σκοπό την εκτίμηση της λειτουργικής διάρκειας ζωής κατασκευών από Ο.Σ που επηρεάζονται από διάβρωση. Επομένως, αρχικά ορίζεται η σημασία του όρου λειτουργική διάρκεια ζωής, όπου στην προκειμένη μελέτη, εννοείται το χρονικό διάστημα το οποίο μεσολαβεί έως ότου οι επιπτώσεις από τη διάβρωση όπως ρηγματώσεις, αποκόλληση του σκυροδέματος κάλυψης, απώλεια μάζας του οπλισμού του Ο.Σ. ξεπεράσουν τον αποδεκτό βαθμό. όπως επίσης απαιτείται και μελέτη των μεθόδων που μπορούν να επεκτείνουν τη συνολική διάρκεια ζωής των κατασκευών (χρήση αναστολέων διάβρωσης, προσθήκη ποζολανικών ή προσμίκτων από υψικάμινο όπως η ιπτάμενη τέφρα στο σκυρόδεμα). Ενώ στη συνέχεια παρατίθενται οι κύριοι τύποι διάβρωσης (λόγω ενανθράκωσης και λόγω διείσδυσης χλωριδίων στο σκυρόδεμα) και περιγράφονται οι μηχανισμοί λειτουργίας τους. Στην ακόλουθη ενότητα πραγματοποιείται μια ανασκόπηση στα μοντέλα εκτίμησης διάρκειας ζωής και στις μεθόδους μέτρησις των χλωριδίων. Με βάση όλα τα παραπάνω και με αξιοποίηση πραγματικών δεδομένων αλλά και δεδομένων από τη βιβλιογραφία πραγματοποιείται μοντελοποίηση, σε εξειδικευμένο λογισμικό, των κλιματολογικών συνθηκών της Κύπρου και εκτίμηση της διάρκειας ζωής δομικών στοιχείων

(εξωτερικών τετραγωνικών υποστυλωμάτων) κατασκευών Ο.Σ. Έπειτα η διατριβή ολοκληρώνεται με την εξαγωγή συμπερασμάτων από συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων.

1 Διάβρωση

1.1 Ορισμός της διάβρωσης

Αρκετοί φορείς έχουν προσπαθήσει στο παρελθόν να δώσουν τον ορισμό της διάβρωσης μετάλλων και κραμάτων (π.χ. ορισμός κατά ASTM, κατά ISO κ.λ.π.), όμως ο πλέον αποδεκτός στις μέρες μας είναι αυτός που προέκυψε από τη Διεθνή Επιτροπή Θαλάσσιας Διάβρωσης και Ρύπανσης των Υφάλων Κατασκευών και από άλλα Διεθνή Συνέδρια (Βλάχος, 1991; Σκουλικίδης, Π. Βασιλείου, 2007).

«...Διάβρωση (corrosion) λέγεται κάθε αυθόρμητη κατ' επέκταση εκβιασμένη ηλεκτροχημικής, κατ' επέκταση χημικής, κατ' επέκταση μηχανικής, κατ' επέκταση βιολογικής φύσης αλλοίωση της επιφάνειας των μετάλλων και των κραμάτων που οδηγεί σε απώλεια υλικού...»

Με την τμηματική ανάλυση των επιμέρους στοιχείων του παραπάνω ορισμού, γίνεται πιο κατανοητή η συνολική έννοιά του. Επομένως, η αποσαφήνιση του όρου έχει ως εξής :

- i. **Αυθόρμητη αλλοίωση** : Η διάβρωση αποτελεί αυθόρμητο φαινόμενο καθώς εκδηλώνεται θερμοδυναμικά, από υψηλότερη ενεργειακή στάθμη σε χαμηλότερη ακόμη και υπό κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (φυσικό διαβρωτικό περιβάλλον).
- ii. **Εκβιασμένη αλλοίωση** : Η διάβρωση παραμένει θερμοδυναμικά αυθόρμητη, όμως γίνεται επιταχυνόμενη αλλοίωση λόγω έντονου τεχνητού διαβρωτικού περιβάλλοντος (υψηλή συγκέντρωση χλωριδίων, υψηλή θερμοκρασία, παρουσία χημικών ουσιών κ.λ.π.). Ενδέχεται να υπάρξουν διαφορές όσων αφορά την ταχύτητα και το είδος της διάβρωσης.
- iii. **Μηχανική αλλοίωση** : Κάθε επιφανειακή μηχανική φθορά που αποτελεί αποτέλεσμα τριβής, κρούσης ή υποπίεσης.
- iv. **Βιολογική αλλοίωση** : Κάθε αλλοίωση που προκαλείται από τις εκκρίσεις φυτικών και ζωικών οργανισμών.
- v. **Διάκριση μεταξύ ηλεκτροχημικής και χημικής αλλοίωσης** : Όσον αφορά την ηλεκτροχημική αλλοίωση, απαιτείται το ηλεκτρικό ρεύμα διαπερνά το υλικό ενώ στις χημικές δεν συμβαίνει κάτι τέτοιο. Όμως κατα το οξειδοαναγωγικό στάδιο των

χημικών αλλοιώσεων υπάρχει ανταλλαγή ηλεκτρονίων που δύναται να θεωρηθεί ως ηλεκτρικό ρεύμα.

- vi. **Αλλοίωση της επιφάνειας :** Η έννοια αυτή εκφράζει την αλλοίωση της πραγματικής επιφάνειας που περιλαμβάνει τη γεωμετρική επιφάνεια με τις επιφανειακές ανωμαλίες της και τους πόρους του υλικού. Μόνο σε αυτή συμβαίνει το φαινόμενο της διάβρωσης και όχι απαραίτητα σε όλη τη μάζα του σώματος.
- vii. **Απώλεια υλικού :** Αυτό δε σημαίνει απαραίτητα ότι το υλικό θα είναι ελαφρύτερο. Δύναται να σχηματιστούν ισχυρές ενώσεις στην επιφάνεια του υλικού που να διατηρούν το συνολικό βάρος σταθερό ή και να το αυξάνουν. Έτσι η απώλεια αυτή λαμβάνεται υπόψη σε σχέση με την αρχική μορφή του υλικού. Για παράδειγμα, τα προϊόντα της διάβρωσης του χάλυβα (σκουριά) έχουν διαφορετική μορφή από την αρχική μορφή του χάλυβα και το βάρος τους, όταν αφαιρεθούν, θεωρείται απώλεια υλικού.

1.2 Τα είδη της διάβρωσης

Τα είδη της διάβρωσης μπορούν να διακριθούν με δύο τρόπους ανάλογα με τα αίτια που την προκαλούν, ανάλογα με την μορφή εμφάνισης και τα αποτελέσματά της και ανάλογα με το είδος του διαβρωτικού περιβάλλοντος (Βλάχος, 1991; Σκουλικίδης & Βασιλείου, 2007; Τεταγιώτη, 2011).

1.2.1 Είδη διάβρωσης ανάλογα με τα αίτια που την προκαλούν

- i. **Ηλεκτροχημική (ή γαλβανική) διάβρωση :** Είναι η πιο πολυσύχναστη μορφή διάβρωσης, με κύριο γνώρισμα την διαφορά δυναμικού μεταξύ μετάλλου και περιβάλλοντος και θέσεων στην επιφάνεια του μετάλλου με άλλο δυναμικό. Είναι ηλεκτροχημική δράση που συμβαίνει όταν δύο διαφορετικά μέταλλα έρχονται σε επαφή μεταξύ τους. Καθένα από τα μέταλλα έχει δικό του δυναμικό, όταν όμως έρθουν σε επαφή παρουσία υγρασίας σχηματίζουν ένα ηλεκτροστοιχείο διάβρωσης (γαλβανικό στοιχείο).

Το μέταλλο με το χαμηλότερο δυναμικό διαβρώνεται. Κίνδυνος εμφάνισης τέτοιου είδους διάβρωσης υπάρχει εάν η διαφορά δυναμικού είναι μεγαλύτερη από 50 mV.

- ii. **Ηλεκτρολυτική διάβρωση** : Συμβαίνει εάν εφαρμοστεί άμεσα ρεύμα στην κατασκευή από κάποια εξωτερική πηγή. Για την αποπαθητικοποίηση του χάλυβα απαιτείται ρεύμα έντασης τουλάχιστον 10 mA/m.
- iii. **Χημική διάβρωση** : Προκαλείται από την επίθεση χημικής ένωσης σε μέταλλο, που προξενεί αλλοίωση της επιφάνειας εξαιτίας χημικών αντιδράσεων. Για παράδειγμα η προσβολή σιδήρου (Fe) από υδροχλωρικό οξύ (HCl).
$$\text{Fe} + 2\text{HCl} \rightarrow \text{FeCl}_2 + \text{H}_2 \quad (1.1)$$
- iv. **Μηχανική (φυσική) διάβρωση** : Φθορά της επιφάνειας, λόγω τριβής, που προξενεί απομάκρυνση μικρών σωματιδίων με μηχανικό τρόπο.
- v. **Βιολογική διάβρωση** : Προσβολή των μετάλλων από τις εκκρίσεις φυτικών και ζωικών μικροοργανισμών που προκαλούν διάβρωση.

1.2.2 Είδη διάβρωσης ανάλογα με τη μορφή εμφάνισης

- i. **Ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση** : Είναι η διάβρωση η οποία προκαλεί στην επιφάνεια του μετάλλου ένα ομοιόμορφο σχεδόν ίδιου πάχους στρώμα προϊόντων διάβρωσης ή μία ομοιογενής διάλυση της επιφάνειας εξαιτίας χημικής ή ηλεκτροχημικής διαδικασίας.
- ii. **Τοπική διάβρωση**, η οποία διακρίνεται σε :
 - **Διάβρωση με βελονισμούς (pitting corrosion)**: Η διάβρωση που ο σχηματισμός των προϊόντων της γίνεται τοπικά ή εμφανίζεται τοπική διάλυση της επιφάνειας του μετάλλου, με τη μορφή εσοχών κρατήρων ή σπηλαίων. Αποτελεί την τυπική μορφή εμφάνισης της διάβρωσης και είναι αρκετά επικίνδυνη καθώς δε γίνεται εγκαίρως αντιληπτή, οδηγώντας έτσι σε καταστροφή των μετάλλων γρήγορα και με μικρή απώλεια βάρους.
 - **Μικρορηγματώδης διάβρωση** : Παρόμοιο γεγονός με τη διάβρωση με βελονισμούς, που προκαλείται στο σκυρόδεμα λόγω της επίδρασης ανιόντων

χλωριδίου. Κύρια διαφορά της από τη διάβρωση με βελονισμούς είναι ότι ξεκινά σε μικρορωγμές και κοιλότητες στην επιφάνεια του χάλυβα και όχι σε υγιή επιφάνεια.

- **Διάβρωση μεταξύ κόκκων :** Εμφανίζεται εντός του μετάλλου και όχι στην επιφάνειά του. Λαμβάνει χώρα κυρίως σε κράματα, σε περιοχές όπου διαχωρίζονται τα συστατικά του, εξαιτίας της διαφοράς δυναμικού των παραπλήσιων περιοχών ξεκινά η διάβρωση αυτή με τη μορφή ρωγμής στον πυρήνα του μετάλλου.
- iii. **Ψαθυρή θραύση από διάβρωση με μηχανική καταπόνηση :** Ταυτόχρονη καταπόνηση και διάβρωση, αποτέλεσμα εφαρμογής τάσεων και διαβρωτικού περιβάλλοντος ταυτόχρονα. Ενδέχεται να προκαλέσει καταστροφικά αποτελέσματα ακόμη και σε φορτίσεις της τάξης του 10% του ορίου θραύσης.
- iv. **Σπηλαιώδης μηχανική διάβρωση :** Είναι καθαρά μηχανικής φύσης και πρόκειται για το σχηματισμό εσοχών και σπηλαίων από σημειακή εξάχνωση του υλικού λόγω υποπίεσης. Τέτοιες συνθήκες υπάρχουν σε σωλήνες λόγω γρήγορης ροής. Αποτελεί ακραία περίπτωση διάβρωσης.

1.2.3 Είδη διάβρωσης ανάλογα με το είδος του διαβρωτικού περιβάλλοντος

- i. **Διάβρωση στον αέρα (ξηρό ή υγρό, καθαρό ή ρυπασμένο) :** Αποτελεί τον πιο κοινό τύπο διάβρωσης και οφείλεται στην αντίδραση του οξυγόνου που περιέχεται στον ατμοσφαιρικό αέρα, της υγρασίας και των διαλυμένων σε αυτή ουσιών (ηλεκτρολυτικό διάλυμα) στην επιφάνεια των μετάλλων. Σε περίπτωση ύπαρξης και αλάτων, αυξάνεται η αγωγιμότητα του ηλεκτρολυτικού διαλύματος, συνεπώς η διάβρωση επιταχύνεται. Για αυτό το φαινόμενο της διάβρωσης μετάλλων είναι εντονότερο σε παραθαλάσσιες περιοχές. Επιπλέον, ενώσεις που εντείνουν την οξύτητα της υγρασίας (π.χ. CO₂, SO₂) και υπάρχουν συνήθως σε περιοχές με έντονη ατμοσφαιρική ρύπανση επιταχύνουν περισσότερο τη διάβρωση.
- ii. **Διάβρωση κάτω ή μέσα στο έδαφος (ξηρό ή υγρό, καθαρό ή ρυπασμένο) :** Προξενείται σε μέταλλα που είναι σε διαρκή επαφή με το έδαφος, όπου συναντώνται

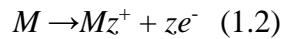
περιπλανώμενα ηλεκτρικά ρεύματα που προκαλούν ηλεκτρολύσεις με τα υπεδάφια μέταλλα στο ρόλο ηλεκτροδίων και το νερό με τα άλατα στο ρόλο ηλεκτρολύτη.

- iii. **Διάβρωση των μετάλλων από διαλύματα (χημική διάβρωση) :** Προκαλείται στα μέταλλα που έρχονται σε επαφή με διαλύματα. Οφείλεται στην χημική αντίδραση μεταξύ των ουσιών που είναι διαλυμένες και των μετάλλων.
- iv. **Διάβρωση στο θαλασσινό νερό (μέσα, πάνω ή κοντά σε αυτό, καθαρό ή ρυπασμένο) :** Προκαλείται λόγω της αυξημένης περιεκτικότητάς του σε άλατα, της μεγάλης αγωγιμότητάς του και επειδή ενδέχεται να περιέχει χημικές ουσίες και μικροοργανισμούς.
- v. **Διάβρωση στο γλυκό νερό (μέσα, πάνω ή κοντά σε αυτό, καθαρό ή ρυπασμένο) :** Η διαβρωτική δράση του γλυκού νερού οφείλεται στην υψηλή περιεκτικότητά του σε οξυγόνο (ο λόγος O_2/N_2 είναι μεγαλύτερος από του αέρα), τα διαλυμένα σε αυτό άλατα, τη θερμοκρασία και το pH του.
- vi. **Διάβρωση από καυσαέρια ή θερμά αέρια (ξηρά ή υπό την παρουσία υγρασίας) :** Η χημική σύσταση και η υψηλή θερμοκρασία των καυσαερίων, τα κάνουν ιδιαίτερος διαβρωτικά τόσο στο σημείο όπου παράγονται όσο και γενικότερα λόγω της ρύπανσης της ατμόσφαιρας.
- vii. **Χημική διάβρωση :** Διάβρωση η οποία οφείλεται στη διαβρωτική επίδραση των χημικών ουσιών, ανάλογα με τη χημική συγγένεια που έχουν με τα μέταλλα που έρχονται σε επαφή.
- viii. **Πυρηνική διάβρωση :** Διάβρωση που οφείλεται στην επίδραση των ραδιενεργών στοιχείων, που ενδέχεται να αλλάξουν τη σύσταση, τη μικροδομή και τις ιδιότητες των μετάλλων που έρχονται σε επαφή.

1.3 Το βασικό κελί διάβρωσης (corrosion cell)

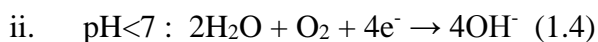
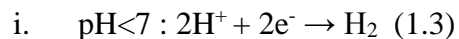
Η διάβρωση συντίθεται από τα τέσσερα εξής μέρη : Την άνοδο όπου συντελείται η διάβρωση, την κάθοδο όπου γίνεται η αναγωγή, τον ηλεκτρικό αγωγό και τον ηλεκτρολύτη (Glasser, Marchand, & Samson, 2008).

Όσον αφορά, το πρώτο στοιχείο του βασικού κελιού διάβρωσης, την άνοδο εκεί συντελείται η διάβρωση με την απώλεια ηλεκτρονίων που πηγάζουν από ηλεκτρικά ουδέτερα άτομα μετάλλου για τη σύνθεση ιόντων. Τα ιόντα είτε παραμένουν στο διάλυμα είτε αντιδρούν παράγοντας προϊόντα διάβρωσης. Η διάβρωση μετάλλου M δίνεται από την παρακάτω απλουστευμένη αντίδραση :



Ο αριθμός των ηλεκτρονίων που αφαιρούνται από το άτομο εξαρτάται από το μέταλλο.

Ενώ, κατά την καθοδική αντίδραση (κάθοδος), πρέπει να χρησιμοποιηθούν τα ηλεκτρόνια της ανοδικής διαδικασίας. Ανάλογα με το pH του διαλύματος υπάρχουν δύο είδη καθόδου :



Επίσης το κελί αποτελείται από τον ηλεκτρολύτη, το διάλυμα που άγει το ρεύμα. Μέσω του ηλεκτρολύτη τα κατιόντα μεταφέρονται από τις ανοδικές περιοχές στις καθοδικές, ενώ τα ανιόντα από τις καθοδικές περιοχές στην ανοδικές. Απαραίτητο όμως στοιχείο για το κελί διάβρωσης είναι και η ηλεκτρική σύνδεση, η οποία συνδέει ηλεκτρικά την άνοδο με την κάθοδο, έτσι ώστε το ρεύμα να ρέει στο κελί διάβρωσης. Χωρίς κάποιο από τα παραπάνω στοιχεία, δε συντελείται η αντίδραση της διάβρωσης.

Συνοπτικά κατά την ηλεκτροχημική διαδικασία της διάβρωσης, στη διεπιφάνεια μετάλλου - υγρού λαμβάνουν χώρα δύο αντιδράσεις : η ανοδική αντίδραση (οξειδωση) και η καθοδική κατά την οποία καταναλώνονται ηλεκτρόνια (αναγωγή). Κατά το βασικό νόμο της διάβρωσης ο ρυθμός της οξειδωσης πρέπει να είναι ίδιος με το ρυθμό αναγωγής και οι δύο αντιδράσεις να συντελούνται ταυτοχρόνως. Καθώς πραγματοποιείται κάθε αντίδραση ημιστοιχείου (άνοδος και κάθοδος) απελευθερώνονται μεγάλα ποσά ενέργειας. Οι συγκεκριμένες αλλαγές της ενέργειας προσφέρουν τη διαφορά δυναμικού που είναι απαραίτητη για τη διάβρωση. Αυτό το δυναμικό αποτελεί μέτρο προδιάθεσης των μετάλλων για διάβρωση και ονομάζεται δυναμικό διάβρωσης.

1.4 Διάβρωση του χάλυβα οπλισμού στο οπλισμένο σκυρόδεμα

1.4.1 Γενικά στοιχεία

Το σκυρόδεμα μόνο του ως υλικό είχε δείξει ικανοποιητικές επιδόσεις στην ανθεκτικότητα ακόμη και υπό δυσμενείς συνθήκες, από τη ρωμαϊκή εποχή (Luca Bertolini, 2008). Έτσι αρχικά είχε υποθεθεί ότι και το οπλισμένο σκυρόδεμα θα μπορούσε να είναι το ίδιο ανθεκτικό. Παρόλα αυτά όμως, ιδίως από το δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα, αποδείχθηκε ότι η αντοχή του σκυροδέματος, έναντι στη φθορά, περιορίζεται σε σημαντικό βαθμό όταν το σκυρόδεμα εκτίθεται σε διαβρωτικό περιβάλλον καθώς ενδέχεται να διαβρωθεί ο το σκυρόδεμα ή ο οπλισμός του (Tuutti, 1982). Επί της ουσίας όμως πρόκειται για δύο απολύτως συσχετιζόμενα είδη διάβρωσης καθώς η εμφάνιση του ενός μετέπειτα οδηγεί στο άλλο (Ζαφειροπούλου, 2014).

Η ποιότητα του σκυροδέματος δύναται να υποβαθμιστεί από ποικίλους παράγοντες, όπως φυσικούς (π.χ. συνεχώς εναλλασσόμενοι κύκλοι ψύξης – θέρμανσης), χημικούς (π.χ. ιόντα χλωριδίου), βιολογικούς (π.χ. διεϊσδυση ριζών από φυτά στο σκυρόδεμα) και μηχανικούς (π.χ. μηχανική καταπόνηση σκυροδέματος).

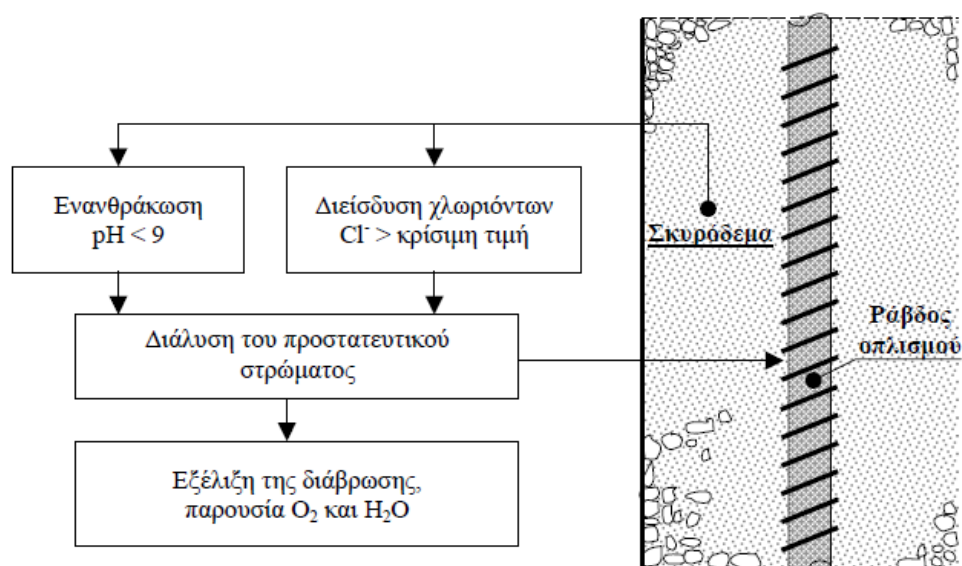
1.4.2 Παθητική προστασία χάλυβα οπλισμού εντός του οπλισμένου σκυροδέματος

Κατά τη διαδικασία της ενυδάτωσης του τσιμεντοπολτού παράγεται ισχυρά αλκαλικό διάλυμα πόρων με τιμή pH που κυμαίνεται από 12,5 έως 13,5 (Luca Bertolini, 2008; Zhang, Castel, & François, 2009; Τάσιος & Αλιγιζάκη, 1993). Το αλκαλικό αυτό διάλυμα αποτελείται κυρίως από μεγάλο ποσοστό υδροξειδίου του ασβεστίου, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, υδροξείδιο του νατρίου NaOH και υδροξείδιο του καλίου KOH στο νερό των πόρων. Υπό αυτές τις συνθήκες, οι μόνες από θερμοδυναμική άποψη, σταθερές ενώσεις του σιδήρου είναι τα οξειδιά του. Έτσι σχηματίζεται ένα λεπτό προστατευτικό στρώμα οξειδίων (παθητικό στρώμα) γύρω από το χάλυβα με πάχος 1nm – 10nm και αποτελείται από οξειδία και υδροξείδια του σιδήρου (Montemor, Cunha, Ferreira, & Sim, 2002). Επομένως, μέσω αυτού του στρώματος μειώνεται αισθητά ο ρυθμός διάβρωσης του χάλυβα καθώς ο χάλυβας καθίσταται ανενεργός έναντι στη διάβρωση. Όμως το στρώμα αυτό παραμένει ασταθές και δύναται να καταστραφεί λόγω διεϊσδυσης ανιόντων χλωριδίου στο σκυρόδεμα είτε λόγω ενανθράκωσης που μειώνει το pH του σκυροδέματος αντίδραση γνωστή και ως αποπαθητικοποίηση (Ζαφειροπούλου, 2014).

1.4.3 Τα στάδια εξέλιξης της διάβρωσης

Στο οπλισμένο σκυρόδεμα, η διάβρωση του οπλισμού χάλυβα εμφανίζεται μετά την καταστροφή του αλκαλικού προστατευτικού στρώματος (αποπαθητικοποίηση). Η αποπαθητικοποίηση προκαλείται (Αποστολόπουλος, 2006):

- i. είτε από τη διείδυση χλωριδίων, τα οποία από το νερό των πόρων του σκυροδέματος προσεγγίζουν την επιφάνεια του χάλυβα,
- ii. είτε από τη διείδυση διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) στο σκυρόδεμα το οποίο αντιδρά με το υδροξείδιο του ασβεστίου ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Το αποτέλεσμα αυτής της αντίδρασης είναι η πτώση του pH του σκυροδέματος κάτω από 9, γεγονός που καταστρέφει το αλκαλικό προστατευτικό στρώμα γύρω από το χάλυβα (ενανθράκωση),
- iii. είτε από ένα συνδυασμό των παραπάνω, κατά τον οποίο η μια περίπτωση δρα επιταχυντικά για την άλλη.



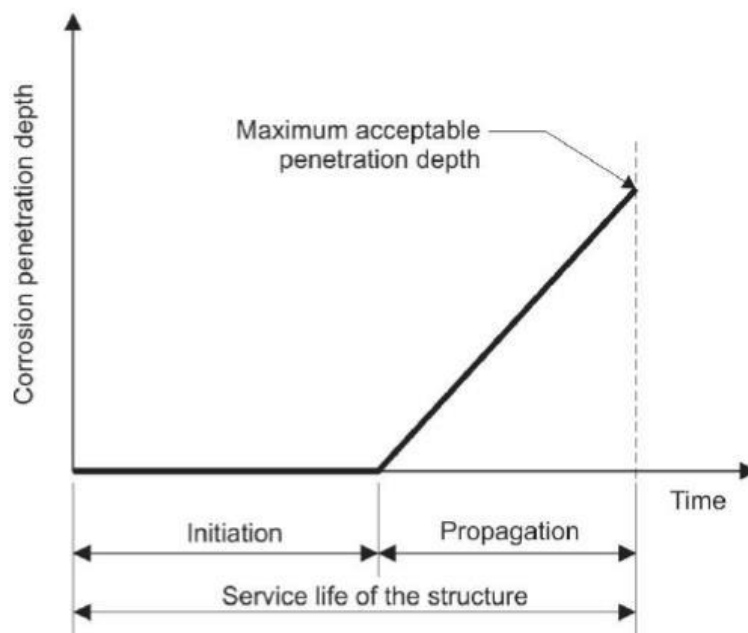
Σχήμα 3 Εισαγωγή της διάβρωσης χάλυβα οπλισμού (Αποστολόπουλος, 2006)

Επομένως, κατά αυτόν τον τρόπο η διάβρωση μπορεί να διακριθεί σε δύο στάδια (Tuutti, 1982) :

- i. **Στάδιο έναρξης, εκκίνησης ή επώασης**, κατά το οποίο λαμβάνει χώρα η αποπαθητικοποίηση του χάλυβα λόγω διείδυσης επιθετικών ουσιών (χλωρίδια ή διοξείδιο του άνθρακα) από την επιφάνεια του σκυροδέματος έως το εσωτερικό του

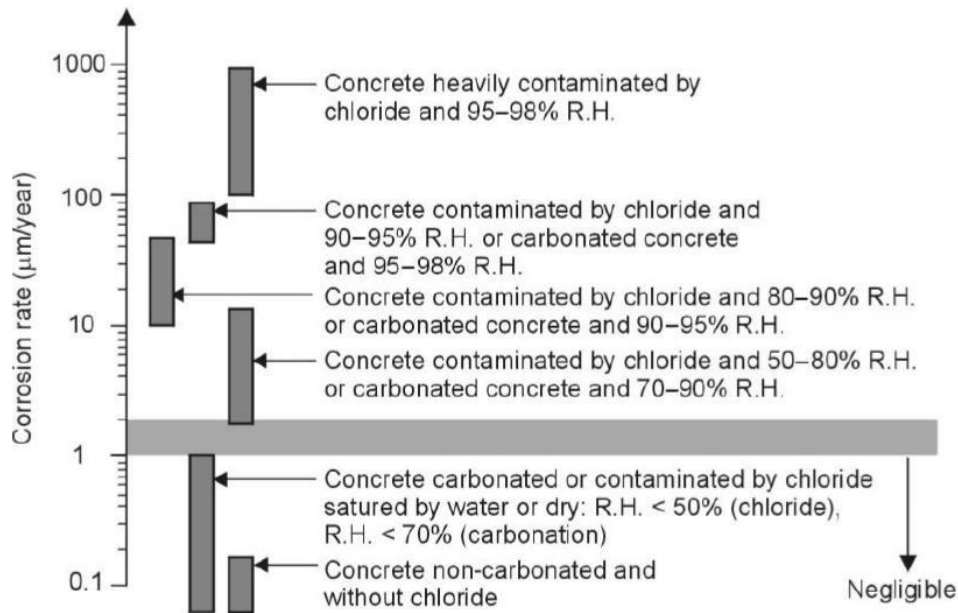
μέρος. Η διάρκεια του συγκεκριμένου σταδίου εξαρτάται από το πάχος του σκυροδέματος επικάλυψης, το ρυθμό διάχυσης των διαβρωτικών ουσιών και από την κατώτατη συγκέντρωση διαβρωτικών ουσιών που απαιτείται για την καταστροφή του προστατευτικού αλκαλικού στρώματος.

- ii. **Στάδιο διάδοσης**, μετά την αποπαθητικοποίηση του χάλυβα για την εμφάνιση διάβρωσης απαιτείται μόνο διάθεση οξυγόνου και υγρασίας στην επιφάνεια των ράβδων χάλυβα του οπλισμού.



Σχήμα 4: Στάδιο εκκίνησης και διάδοσης της διάβρωσης (Tuutti, 1982).

Όσον αφορά το ρυθμό (ή ταχύτητα) διάβρωσης η μονάδα μέτρησής του είναι $\mu\text{m}/\text{y}$ ή σε περιπτώσεις εργαστηριακών μετρήσεων εκφράζεται σε ηλεκτροχημικές μονάδες mA/m^2 ή mA/cm^2 . Συγκεκριμένα για τον χάλυβα, ισχύει ότι $1 \text{ mA}/\text{m}^2$ ή $1000 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ισοδυναμεί σε ρυθμό διάβρωσης σχεδόν $11,7 \mu\text{m}/\text{y}$. Ο ρυθμός διάβρωσης θεωρείται αμελητέος για τιμές χαμηλότερες από $2 \mu\text{m}/\text{y}$, μικρός μεταξύ 2 και $5 \mu\text{m}/\text{y}$, μέτριος ανάμεσα σε 5 και $10 \mu\text{m}/\text{y}$, ενδιάμεσος μεταξύ 10 και $50 \mu\text{m}/\text{y}$, υψηλός ανάμεσα σε 50 και $100 \mu\text{m}/\text{y}$ και αρκετά υψηλός όταν ξεπερνά τα $100 \mu\text{m}/\text{y}$ (Ζαφειροπούλου, 2014).

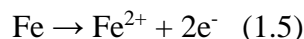


Σχήμα 5: Ο ρυθμός διάβρωσης σε διάφορα είδη σκυροδέματος με διαφορετικό ποσοστό σχετικής υγρασίας περιβάλλοντος (R.H.) (C. Andrade, M. C. Alonso, 1988).

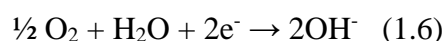
1.4.4 Μηχανισμός της διάβρωσης του χάλυβα οπλισμού του οπλισμένου σκυροδέματος

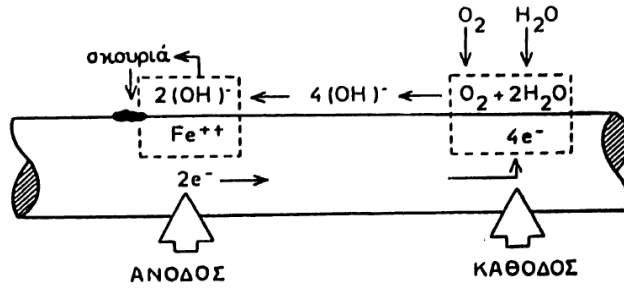
Μετά την αποπαθητικοποίηση του χάλυβα οπλισμού στο οπλισμένο σκυρόδεμα ξεκινά η διάβρωσή του (Τάσιος & Αλιγιζάκη, 1993). Όπως προαναφέρθηκε, η διάβρωση του χάλυβα οπλισμού στο σκυρόδεμα είναι μια ηλεκτροχημική διαδικασία. Αυτό προϋποθέτει την ύπαρξη ανοδικών και καθοδικών περιοχών.

Στην ανοδική περιοχή λαμβάνει χώρα η οξειδωτική διάλυση του σιδήρου, η οποία περιγράφεται από την ακόλουθη αντίδραση :



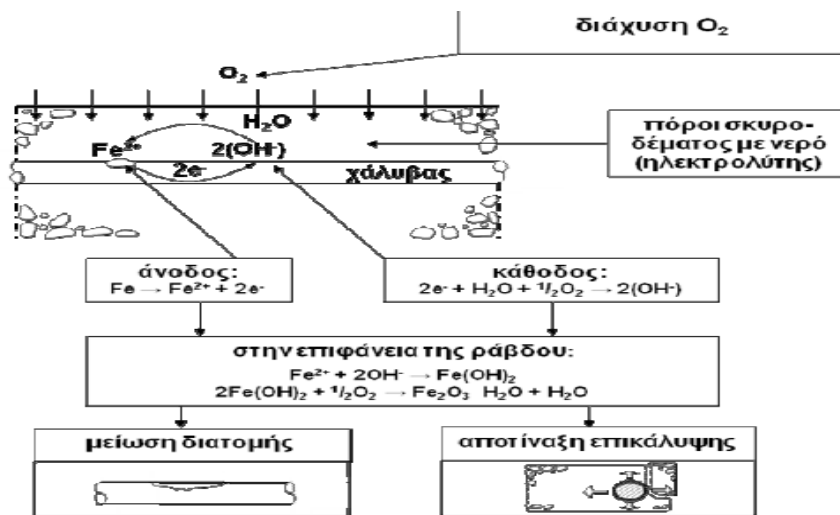
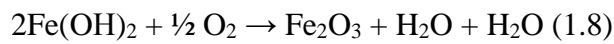
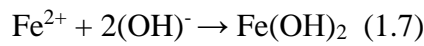
Ενώ στην καθοδική περιοχή, το οξυγόνο που υπάρχει στους πόρους του σκυροδέματος προσεγγίζει την επιφάνεια του οπλισμού και συγκεντρώνει τα ηλεκτρόνια σχηματίζοντας ανιόντα υδροξυλίου σύμφωνα με την αντίδραση :





Σχήμα 6: Απλοποιημένο προσομοίωμα διάβρωσης χάλυβα οπλισμού (Ρούτουλας, 2012a).

Στη συνέχεια, ιόντα υδροξυλίου κινούνται εντός του ηλεκτρολύτη (υγρασία στους πόρους του σκυροδέματος), από την περιοχή της καθόδου προς την άνοδο, όπου θα ενωθούν με τα ιόντα του σιδήρου και θα σχηματίσουν σκουριά, σύμφωνα με τις αντιδράσεις :

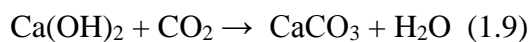


Σχήμα 7: Προσομοίωμα διάβρωσης χάλυβα οπλισμού οπλισμένου σκυροδέματος (Ρούτουλας, 2012a).

1.4.5 Διάβρωση χάλυβα οπλισμού λόγω ενανθράκωσης

1.4.5.1 Γενικά στοιχεία

Η ενανθράκωση του οπλισμένου σκυροδέματος αποτελεί ένα φυσικοχημικό μηχανισμό στον οποίο συμμετέχουν υγρά στερεά αλλά και αέρια (Αποστολόπουλος, 2006). Η διαδικασία μπορεί να περιγραφεί ως εξής : Κατά την πήξη του τσιμέντου παράγεται υδροξείδιο του ασβεστίου (Ca(OH)_2), το οποίο πλεονάζει στο σκυρόδεμα. Όμως το διοξείδιο του άνθρακος (CO_2) διαπερνά την επιφάνεια του μπετόν, διαλυμένο στο νερό της βροχής, συχνά μαζί και με οξείδιο του θείου (SO) (ειδικά σε βιομηχανικές και μολυσμένες περιοχές). Έτσι, το αποτέλεσμα της αντίδρασης του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) με το υδροξείδιο του ασβεστίου (Ca(OH)_2) είναι η βαθμιαία εξουδετέρωση της αλκαλικότητας του σκυροδέματος που παρέχει την παθητική προστασία στο χάλυβα. Η αντίδραση αυτή είναι γνωστή ως ενανθράκωση, οφείλει το όνομά της στο παραγόμενο ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) και μπορεί να αποτυπωθεί από την ακόλουθη εξίσωση :



Η διάχυση του διοξειδίου του άνθρακα στο σκυρόδεμα περιγράφεται από το νόμο του Fick (Ζαφειροπούλου, 2014).

$$\frac{dx}{dt} = D_0 \frac{1}{x} \quad (1.10)$$

Όπου :

x: Η απόσταση (mm),

t: Ο χρόνος (χρόνια),

D_0 : Ο συντελεστής διάχυσης

Από την ολοκλήρωση της πιο πάνω σχέσης, παράγεται η εξίσωση με την οποία προσδιορίζεται το βάθος ενανθράκωσης:

$$d = A\sqrt{t} \quad (1.11)$$

Όπου :

d: το βάθος ενανθράκωσης (mm)

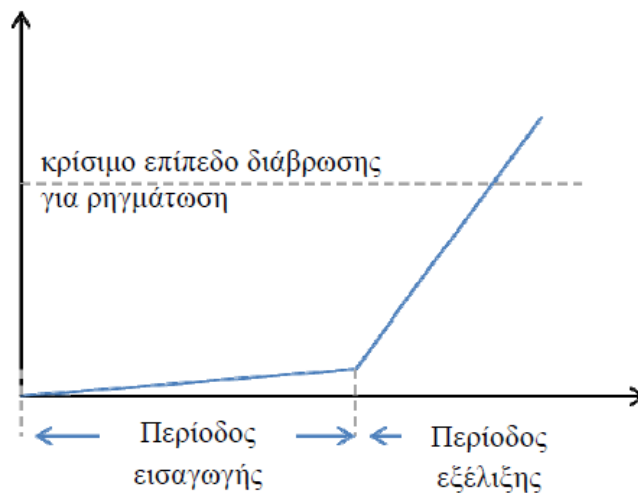
A: συντελεστής διάχυσης ($\text{mm} \cdot \text{year}^{-0.5}$)

t: χρόνος (years)

Υπάρχουν όμως αρκετά εμπειρικά μοντέλα που προσδιορίζουν το βάθος ή το ρυθμό ενανθράκωσης λαμβάνοντας υπόψη το περιβάλλον έκθεσης και την κατηγορία του σκυροδέματος (Broomfield, 2002).

1.4.5.2 Έναρξη και διάδοση της διάβρωσης λόγω ενανθράκωσης

Σύμφωνα με μελέτες (Luca Bertolini, 2008; V. G. Papadakis, 2005; Tuutti, 1982) ως διάρκεια ζωής (service lifetime) μιας κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί να οριστεί το άθροισμα της περιόδου εισαγωγής (ή εκκίνησης ή επώασης) της διάβρωσης (corrosion initiation) (t_i) και της περιόδου διάδοσης ή εξέλιξης της διάβρωσης (corrosion propagation) (t_p) κατά το οποίο η κατασκευή διατηρεί ένα αποδεκτό (σύμφωνα με τα πρότυπα) επίπεδο επιτελεστικότητας.



Σχήμα 8 : Διάρκεια ζωής της κατασκευής (Δέμης, 2015).

Στην περίπτωση της διάβρωσης που προκαλείται από ενανθράκωση ως **περίοδος έναρξης** μπορεί να οριστεί το διάστημα που απαιτείται ώστε βάθος ενανθράκωσης να ισούται με το πάχος του σκυροδέματος επικάλυψης του οπλισμού. Από εκεί και πέρα, δηλαδή από το διάστημα που αποπαθητικοποιείται ο χάλυβας έως ότου η ρηγμάτωση που προκαλείται από

τα προϊόντα της διάβρωσης να υπερβεί την οριακή τιμή για την οποία είναι αποδεκτή, ορίζεται η **περίοδος εξέλιξης** της διάβρωσης (Luca Bertolini, 2008; Παπαδάκης, 2004).

Όσον αφορά την περίοδο έναρξης της διάβρωσης λόγω ενανθράκωσης αξίζει να σημειωθεί ότι επηρεάζεται από αρκετούς παράγοντες όπως το ποσοστό σχετικής υγρασίας, τη διαπερατότητα του σκυροδέματος και τη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Ειδικότερα, σε κορεσμένο από νερό σκυρόδεμα ο ρυθμός ενανθράκωσης είναι αμελητέος καθώς η διάχυση διοξειδίου του άνθρακα παρεμποδίζεται από τους γεμάτους με νερό πόρους του σκυροδέματος. Το ίδιο συμβαίνει και σε ιδιαίτερος ξηρό σκυρόδεμα καθώς η αντίδραση του διοξειδίου του άνθρακα με το υδροξείδιο του ασβεστίου κωλύεται λόγω της έλλειψης νερού (Parrott, 1992). Ενώ ο υψηλότερος ρυθμός διείδυσης της ενανθράκωσης βρίσκεται σε προφυλαγμένο σκυρόδεμα (όπως στο εσωτερικό κτιρίου) με ποσοστό υγρασίας 60% -70%, ενώ ο ρυθμός αυτός μειώνεται εάν η κατασκευή εκτίθεται σε περιοδική διαβροχή. Κατ' επέκταση, η διαπερατότητα επηρεάζει αξιοσημείωτα το ρυθμό ενανθράκωσης, καθώς ένα χαμηλό τριχοειδές πόρων (που είναι συνήθως αποτέλεσμα χαμηλού λόγου νερού/τσιμέντο) στο σκυρόδεμα επιβραδύνει τη διάχυση διοξειδίου του άνθρακα. Επιπροσθέτως, ο ρυθμός ενανθράκωσης επηρεάζεται και από τη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα γι αυτό και είναι υψηλότερος σε βιομηχανικές περιοχές. Ένώ κατά το στάδιο διάδοσης της διάβρωσης λόγω ενανθράκωσης, κύριοι ρυθμιστικοί παράγοντες είναι η διαθεσιμότητα οξυγόνου και το νερό στην επιφάνεια του χάλυβα (Alonso, Andrade, & González, 1988). Συνήθως στα μοντέλα πρόβλεψης του χρόνου εξέλιξης της διάβρωσης, λαμβάνεται η υπόψη η μέση ετήσια τιμή του ρυθμού διάβρωσης, η οποία συγκρίνεται με τη μέγιστη αποδεκτή τιμή ρυθμού διάβρωσης των προτύπων.

Ειδικά για ξηρό περιβάλλον με κατηγορία έκθεσης XC1 και προτεινόμενη σχετική υγρασία $45\% \leq RH \leq 65\%$, με μέση προτεινόμενη υγρασία $RH \geq 55\%$, έχει διατυπωθεί η παρακάτω εμπειρική σχέση για τον υπολογισμό του βάθους ενανθράκωσης (V. G. Papadakis, 2005) :

$$x_c = \sqrt{\frac{2D_{e,CO_2}(CO_2 / 100)t}{0.33CH + 0.214CSH}} \quad (1.12)$$

Όπου :

x_c : Βάθος ενανθράκωσης (m)

T : Χρόνος (s)

CO₂ : Περιεκτικότητα σε διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα που περιβάλλει το σκυρόδεμα (αστικές περιοχές 0,08%, για ύπαιθρο 0,035%)

De,CO₂ : Αποτελεσματική διαχυτότητα του διοξειδίου του άνθρακα στο ενανθρακωμένο σκυρόδεμα (m²/s)

CH : Συγκέντρωση του υδροξειδίου του ασβεστίου στον όγκο του σκυροδέματος (kg/m³)

CSH : Συγκέντρωση του ένυδρου πυρητικού ασβεστίου στον όγκο του σκυροδέματος (kg/m³)

Έτσι ο χρόνος έναρξης $t_{cr,carb}$ (s) που απαιτείται ώστε το μέτωπο της ενανθράκωσης να φτάσει την επιφάνεια του χάλυβα μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (V. G. Papadakis, 2005):

$$t_{cr,carb} = \frac{(0.33CH + 0.214CSH)c^2}{2D_{e,CO_2}(CO_2/100)} \quad (1.13)$$

Όπου :

C : Το πάχος επικάλυψης του οπλισμού (m)

Ενώ η περίοδος εξέλιξης της διάβρωσης λόγω ενανθράκωσης $t_{pr,carb}$ σε έτη δίνεται από τον τύπο (Αποστολόπουλος, 2006) :

$$t_{pr,carb} = [6(1 + 0.2c)^{0.85}] / [65(RH/100) - 35] \quad (1.14)$$

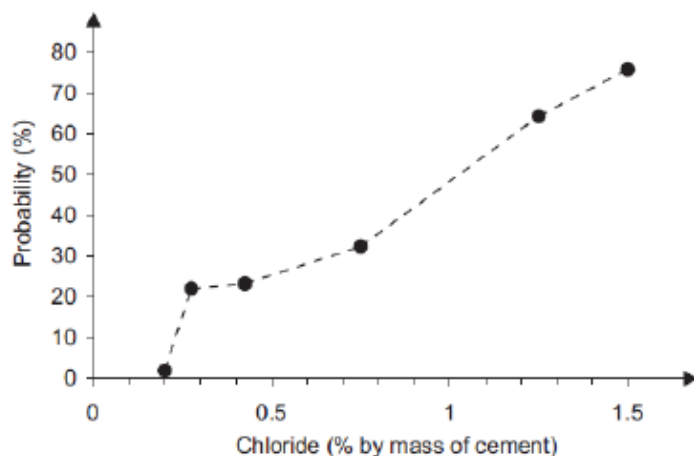
Όπου :

RH : το ποσοστό σχετική υγρασίας περιβάλλοντος

1.4.6 Διάβρωση χάλυβα οπλισμού λόγω χλωριόντων

1.4.6.1 Γενικά στοιχεία

Η παρουσία χλωριόντων στο διάλυμα πόρων του σκυροδέματος, ενδέχεται να καταστρέψει το αλκαλικό προστατευτικό στρώμα (παθητική προστασία) του χάλυβα και να προκαλέσει τοπική διάβρωση του χάλυβα οπλισμού του οπλισμένου σκυροδέματος. Αυτό συμβαίνει όταν η συγκέντρωση χλωριδίων ξεπεράσει την κρίσιμη οριακή τιμή και είναι πλέον ικανή να καταστρέψει το παθητικό στρώμα (Luca Bertolini, 2008). Η κρίσιμη οριακή τιμή συγκέντρωσης χλωριόντων δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με το pH και την περιεκτικότητα σε νερό και οξυγόνο των πόρων του σκυροδέματος. Τα χλωριόντα διεισδύουν στο σκυρόδεμα είτε από την έκθεση των κατασκευών στο περιβάλλον (π.χ. άλατα σε παραθαλάσσιες περιοχές, άλατα αποαποποίησης). Η ανώτατη αποδεκτή τιμή χλωριόντων εντός του σκυροδέματος κατά την παραγωγή, σύμφωνα με το πρότυπο EN 206 είναι 0,4% για οπλισμένο σκυρόδεμα, που περιέχει τσιμέντο τύπου CEM I. Η διάχυση των χλωριόντων στο σκυρόδεμα εξαρτάται από αρκετούς συντελεστές οι κυριότεροι από τους οποίους είναι : το τριχοειδές των πόρων του σκυροδέματος και το μέγεθός τους, η υγρασία που περιέχουν οι πόροι του σκυροδέματος, ο τύπος του του σκυροδέματος και οι περιβαλλοντικές συνθήκες (Ζαφειροπούλου, 2014). Για παράδειγμα σε κατασκευές που εκτίθενται στην ατμόσφαιρα, απαιτείται χαμηλό επίπεδο συγκέντρωσης χλωριόντων για να πραγματοποιηθεί η εκκίνηση της διάβρωσης. Αντιθέτως σε υποθαλάσσιες κατασκευές ή γενικότερα σε περιοχές όπου το σκυρόδεμα είναι κορεσμένο από νερό, απαιτείται υψηλότερο ποσοστό συγκέντρωσης χλωριδίων καθώς παρεμποδίζεται η παροχή οξυγόνου.



Σχήμα 9 : Συσχετισμός περιεκτικότητας χλωριόντων σε κατάσταση γέφυρας και ποσοστό διαβρωμένου οπλισμού (VASSIE, 1984).

1.4.6.2 Διάχυση των χλωριόντων στο σκυρόδεμα

Η διείσδυση χλωριόντων από το περιβάλλον στο σκυρόδεμα, δημιουργεί ένα στρώμα στο σκυρόδεμα το οποίο, στην εξωτερική του επιφάνεια, χαρακτηρίζεται από υψηλή συγκέντρωση χλωριόντων, ενώ στην εσωτερική του, υπάρχει μειωμένη συγκέντρωση χλωριόντων. Η μεταφορά των χλωριόντων από το σκυρόδεμα κάλυψης μπορεί να συμβεί μέσω διάχυσης, τριχοειδούς απορρόφησης, διαπερατότητας και άλλων μηχανισμών ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες (L Bertolini et al., 2004). Η διάχυση συμβαίνει όταν η επιφάνεια του κορεσμένου από νερό σκυροδέματος έρχεται σε επαφή με χλωριούχο διάλυμα. Έτσι τα χλωρίδια διεισδύουν στο σκυρόδεμα από τους γεμάτους με νερό πόρους του σκυροδέματος. Αυτό το φαινόμενο περιγράφεται από το δεύτερο νόμο του Fick (Luca Bertolini, 2008) :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1.15)$$

Όπου :

C : Συγκέντρωση χλωριδίων

t : Χρόνος

x : Βάθος διάχυσης

D : Συντελεστής διάχυσης

Όμως σε παραθαλάσσιες περιοχές και σε περιοχές όπου γίνεται χρήση αλάτων αποπαγοποίησης το στρώμα των χλωριόντων περιγράφεται από την παρακάτω σχέση, η οποία προέρχεται από το δεύτερο νόμο του Fick (Ζαφειροπούλου, 2014) :

$$\frac{C(x,t)}{C_s} = 1 - \operatorname{erf} \left[\frac{x}{(2\sqrt{D \cdot t})} \right] \quad (1.16)$$

Όπου :

C(x,t) : Συγκέντρωση χλωριδίων μετά από σε βάθος x μετά από χρόνο t

C_s : Συγκέντρωση διαχεόμενων ιόντων στην επιφάνεια του σκυροδέματος

t : Χρόνος (σε χρόνια)

x : Βάθος διάχυσης (σε mm)

D : Συντελεστής διάχυσης χλωριόντων

erf : Συνάρτηση σφάλματος που περιγράφει μη σταθερές συνθήκες διάχυσης

$$\text{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} \cdot dt \quad (1.17)$$

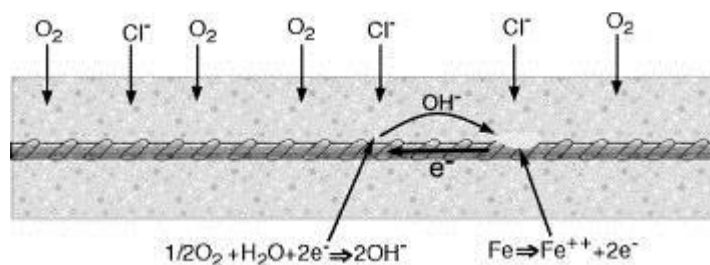
1.4.6.3 Έναρξη και εξέλιξη της διάβρωσης λόγω χλωριόντων

Όπως προαναφέρθηκε η τοπική διάβρωση ξεκινά όταν διεισδύουν χλωριόντα (CL⁻) στο σκυρόδεμα και το ποσοστό συγκέντρωσης χλωριδίων ξεπεράσει την οριακή τιμή στην επιφάνεια του χάλυβα, δηλαδή σε ένα βάθος περίπου ίσο με το πάχος της επικάλυψης (Παπαδάκης, 2004). Ωστόσο, η αξιολόγηση του χρόνου έναρξης της διάβρωσης λόγω χλωριόντων είναι μια πολύπλοκη διαδικασία, λόγω του μεγάλου αριθμού μεταβλητών που επηρεάζουν την τιμή της διείσδυσης χλωριόντων στο σκυρόδεμα. Μόλις ξεκινήσει η διάβρωση, δημιουργείται ένα πολύ επιθετικό περιβάλλον εντός των διαβρωμένων περιοχών, ενώ το παθητικό στρώμα διατηρείται στην υπόλοιπη περιοχή. Έτσι η διάβρωση σε κοιλότητες μέσα στο χάλυβα δύναται να φτάσει σε πολύ υψηλό ποσοστό διείσδυσης (έως και 1 mm/έτος σε ισχυρά μολυσμένες από χλωρίδια περιοχές). Με αυτόν τον τρόπο, μια σημαντική μείωση της διατομής του οπλισμού είναι δυνατό να συμβεί σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα (Luca Bertolini, 2008). Επιπροσθέτως, σε περίπτωση που ο οξειδωμένος χάλυβας συνδεθεί ηλεκτρικά με την παθητική περιοχή, η ανοδική διαδικασία είναι δυνατό να συγκεντρωθεί στο διαβρωμένο τμήμα και η καθοδική στο παθητικό στρώμα, γεγονός το οποίο αυξάνει συνολικά το ρυθμό διάβρωσης.

1.4.6.4 Μηχανισμός της διάβρωσης λόγω χλωριόντων

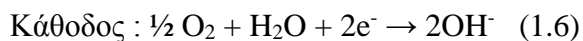
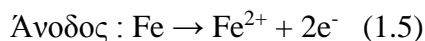
Το αλκαλικό προστατευτικό στρώμα του χάλυβα καταστρέφεται από τα ανιόντα χλωρίου, έτσι ο αποπαθητικοποιημένος πλέον χάλυβας υφίσταται τοπική διάβρωση με βελονισμούς. Στις περιοχές όπου έχει καταστραφεί η παθητική προστασία δρα η ανοδική διαδικασία, ενώ στις περιοχές όπου υπάρχει ακόμη η παθητική προστασία δρα η κάθοδος. Μετά την εκκίνηση της διάβρωσης το περιβάλλον καθίσταται ιδιαίτερος επιθετικό καθώς το ρεύμα που κινείται

από τις ανοδικές στις καθοδικές περιοχές αυξάνει τη συγκέντρωση χλωριόντων (τα χλωριόντα λόγω του αρνητικού τους φορτίου εναποτίθενται στις ανοδικές περιοχές), ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η αλκαλικότητα από τα προϊόντα της διάβρωσης. Από την άλλη πλευρά το ρεύμα ενισχύει το παθητικό στρώμα στις παθητικές περιοχές καθώς απομακρύνει τα χλωρίδια, ενώ συγχρόνως η κάθοδος αυξάνει την αλκαλικότητα. Ο μηχανισμός αυτός αποτελεί τη διάβρωση με δημιουργία τοπικού γαλβανικού στοιχείου (Ζαφειροπούλου, 2014).

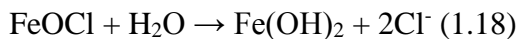


Σχήμα 10 : Διάβρωση με δημιουργία τοπικού γαλβανικού στοιχείου (Ζαφειροπούλου, 2014).

Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάβρωση με δημιουργία τοπικού γαλβανικού στοιχείου είναι οι εξής :



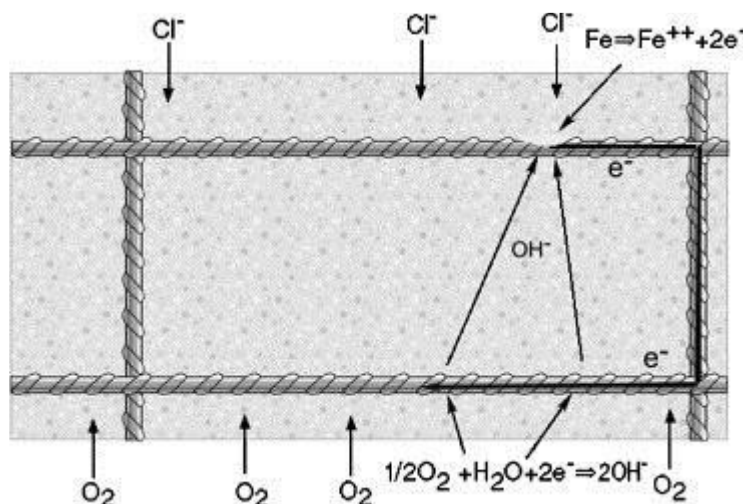
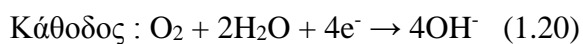
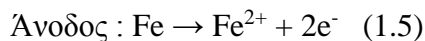
Στη συνέχεια τα ιόντα σιδήρου που παράγει η κάθοδος αντιδρούν με τα χλωρίδια που προσεγγίζουν την επιφάνεια του χάλυβα, δίνοντας διχλωριούχο σίδηρο (FeCl_2), ο οποίος στη συνέχεια αντιδρά με το οξυγόνο και δίνει χλωρίδιο του τρισθενούς σιδήρου (FeOCl). Στη συνέχεια το χλωρίδιο αυτό υδρολύεται με κατά τις αντιδράσεις :



Συνεπώς, η διάβρωση του χάλυβα συνεχίζεται, ακόμη και σε περίπτωση που η διείσδυση χλωριόντων σταματήσει, διότι η συγκέντρωση χλωριόντων στην επιφάνεια του οπλισμού παραμένει αμετάβλητη.

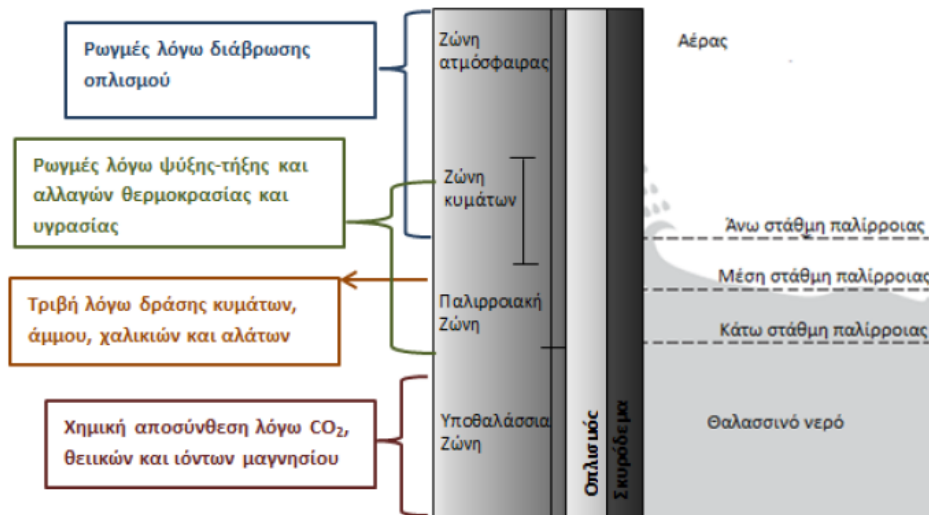
Συνήθως όμως στις κατασκευές λαμβάνει χώρα η διάβρωση με δημιουργία γαλβανικού μακροστοιχείου. Στην πράξη, η διείσδυση των χλωριόντων γίνεται από τη μία μόνο πλευρά της κατασκευής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη συγκέντρωση χλωριδίων στις ράβδους που

βρίσκονται κοντά στην ατμόσφαιρα. Αντιθέτως, στις ράβδους που είναι στην εσωτερική μεριά η συγκέντρωση χλωριδίων είναι ελάχιστη έως αμελητέα (Luca Bertolini, 2008). Ως αποτέλεσμα οι ράβδοι που διαθέτουν μεγαλύτερη συγκέντρωση χλωριδίων λειτουργούν ανοδικά, ενώ αυτές με τη μικρότερη συγκέντρωση λειτουργούν καθοδικά. Κατά συνέπεια δημιουργείται ένα γαλβανικό μακροστοιχείο στο οποίο λαμβάνουν χώρα οι εξής αντιδράσεις (Ζαφειροπούλου, 2014) :



Σχήμα 11 : Γαλβανικό μακροστοιχείο (Alonso et al., 1988).

Στη συνέχεια η αντίδραση του γαλβανικού μακροστοιχείου εξελίσσεται με τον ίδιο τρόπο με τη διάβρωση με τη δημιουργία τοπικού γαλβανικού στοιχείου παράγοντας υδροξείδιο του σιδήρου.



Σχήμα 12 : Διάβρωση παραθαλάσσιων κατασκευών (Ζαφειροπούλου, 2014).

Σε αυτό το σημείο, αξίζει να αναφερθεί ότι αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, αποτελεί η εκτίμηση διάρκειας ζωής κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, που βρίσκονται στη ζώνη ατμόσφαιρας, οι οποίες πλήττονται από διάβρωση του χάλυβα οπλισμού εξαιτίας της διείσδυσης χλωριδίων στο σκυρόδεμα. Στην ενότητα που ακολουθεί θα εισαχθεί η έννοια της εκτίμησης της διάρκειας ζωής για το συγκεκριμένο τύπο διάβρωσης και θα αναλυθούν τα κύρια μοντέλα προσομοίωσής του, καθώς επίσης και οι κύριες μέθοδοι προσδιορισμού των παραμέτρων που απαιτούν τα συγκεκριμένα μοντέλα προσομοίωσης.

2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η εκτίμηση διάρκειας ζωής, η πρόβλεψη των μηχανικών ιδιοτήτων των κύριων δομικών υλικών, όπως ο χάλυβας και το σκυρόδεμα, αλλά και οι μηχανισμοί που οδηγούν στην υποβάθμιση αυτών των ιδιοτήτων, έχουν απασχολήσει κατά καιρούς αρκετούς επίσημους σε διαφορετικές περιοχές του πλανήτη. Λαμβάνοντας υπόψη το συγκεκριμένο γεγονός, η παρούσα ενότητα έχει σκοπό την παρουσίαση σχετικών μελετών που διεξήχθησαν από ποικίλους επιστήμονες τα τελευταία χρόνια σε διάφορες περιοχές της Γης.

2.1 S. Morinaga “Life prediction of reinforced concrete structures in hot and salt-laden environments”

Ο (Morinaga, 1992) σε μια προσπάθεια εκτίμησης της διάρκειας ζωής κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, ερεύνησε ποσοτικά την επίδραση περιβαλλοντικών παραγόντων όπως η σχετική υγρασία, η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η διείδυση χλωριόντων στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος υπό ποικίλες συνθήκες και υπό την επιρροή διάβρωσης του χάλυβα οπλισμού εξαιτίας ενανθράκωσης του σκυροδέματος αλλά και εξαιτίας της διείδυσης ανιόντων χλωριδίου στο σκυρόδεμα. Σε αυτό το σημείο, αξίζει να αναφερθεί ότι μέχρι τότε δεν είχε ποσοτικοποιηθεί επαρκώς, από άλλες μελέτες, η επιρροή των περιβαλλοντικών συνθηκών στην ανθεκτικότητα των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Έτσι με αφορμή το συγκεκριμένο γεγονός και θεωρώντας ότι η διάβρωση του οπλισμού αποτελεί την κύρια αιτία υποβάθμισης των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, ανέπτυξε ένα δικό του μοντέλο εκτίμησης διάρκειας ζωής, σύμφωνα με το οποίο προτείνεται η κατάλληλη τιμή της επικάλυψης του οπλισμού καθώς και του λόγου νερού προς τσιμέντο, που απαιτούνται για δεδομένο λειτουργικό χρόνο ζωής μίας κατασκευής, υπό δεδομένες περιβαλλοντικές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας, για ορισμένες τιμές απόστασης από την ακτογραμμή. Βασική αρχή του Morinaga για την ανάπτυξη του συγκεκριμένου μοντέλου είναι η διάρκεια ζωής μιας κατασκευής Ο.Σ., την οποία όρισε ως το χρόνο που μεσολαβεί μέχρι η συγκέντρωση των προϊόντων της διάβρωσης να αγγίξει μία οριακή τιμή τέτοια που προκαλεί αποφλοιώση της επικάλυψης του σκυροδέματος κατά μήκος του οπλισμού. Για τις ανάγκες ανάπτυξης της συγκεκριμένης μεθόδου πρόβλεψης της διάρκειας ζωής, διερευνήθηκε ο βαθμός διάβρωσης σε ράβδους χάλυβα εμβαπτισμένες σε ενανθρακωμένο σκυρόδεμα και σε σκυρόδεμα με υψηλό ποσοστό

συγκέντρωσης χλωριδίων αντίστοιχα για κάθε τύπο διάβρωσης. Επίσης ερευνήθηκε και η αστοχία της επικάλυψης του σκυροδέματος εξαιτίας της διάβρωσης του χάλυβα. Όταν το μοντέλο εξετάζει περιπτώσεις διάβρωσης λόγω ενανθράκωσης, δεν απαιτείται κάποια τροποποίηση. Όμως όταν χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις διάβρωσης λόγω διείσδυσης ανιόντων χλωριδίου, η τροποποίηση που σχετίζεται με τις συνθήκες άλατος είναι απαραίτητη, καθώς η επιρροή των χλωριδίων στο σκυρόδεμα από το εξωτερικό περιβάλλον δεν λαμβάνεται υπόψη στην αρχική μέθοδο. Για αυτό, πρέπει να διερευνηθεί η συγκέντρωση αλάτων στην επιφάνεια του σκυροδέματος και ο συντελεστής διάχυσης των αλάτων στο σκυρόδεμα. Εάν υποθεθεί ότι η διάχυση των αλάτων στο σκυρόδεμα γίνεται βάσει του πρώτου νόμου του Fick, αυτή εκφράζεται μέσω της παρακάτω εξίσωσης :

$$\frac{\delta N}{\delta t} = k \frac{\delta^2 N}{\delta x^2} \quad (2.1)$$

Όπου :

t : η ηλικία του σκυροδέματος σε χρόνια,

x : το βάθος από την επιφάνεια του σκυροδέματος σε cm,

k : ο συντελεστής διάχυσης του άλατος στο σκυρόδεμα (cm²/έτος) και

N : η συγκέντρωση του άλατος στο σκυρόδεμα σε ηλικία t και βάθος x (kg/m³).

$$\frac{N}{N_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2(kt)^{1/2}}\right) \quad (2.2)$$

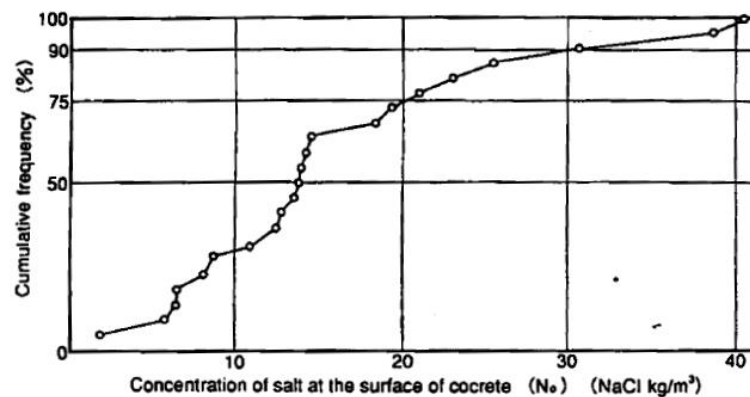
Όπου :

N₀ : η συγκέντρωση του άλατος στην επιφάνεια του σκυροδέματος (x =0) (kg/m³).

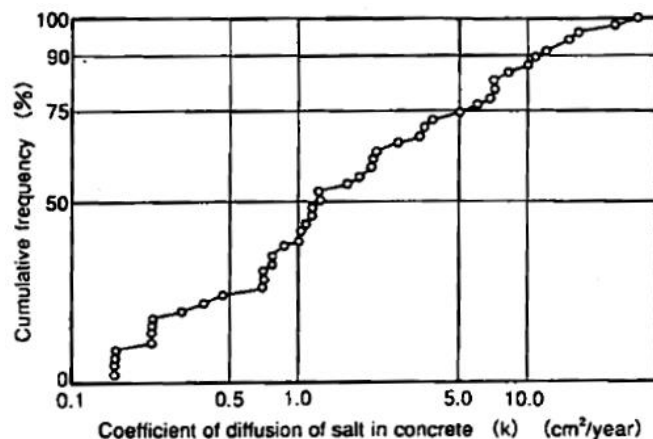
Erf : συνάρτηση σφάλματος. $\operatorname{erf}(u) = \left(\frac{2}{\pi}\right) \int_0^u \exp(-t^2) dt$ (2.3)

Για τη συγκεκριμένη έρευνα ήταν αναγκαίο να προσδιοριστούν οι συνθήκες έκθεσης στο περιβάλλον, όπως η συγκέντρωση χλωριδίων στην επιφάνεια του σκυροδέματος N₀ (kg/m³) και ο συντελεστής διάχυσης των χλωριδίων στο σκυρόδεμα k (cm²/έτος). Ο Morinaga στην παρούσα έρευνα, χρησιμοποίησε βιβλιογραφικά δεδομένα. Πιο συγκεκριμένα διερεύνησε τη σχέση μεταξύ του βάθους από την επιφάνεια του σκυροδέματος και την συγκέντρωσης σε

χλωρίδια, κάνοντας χρήση αποτελεσμάτων 46 δοκιμών που είχαν εκτεθεί σε διάφορες παραθαλάσσιες συνθήκες γύρω από την Ιαπωνία, προσδιορίζοντας έτσι, τους παράγοντες N_0 και k . Τα δοκίμια τα οποία εξετάστηκαν διέφεραν ως προς την ηλικία, την αναλογία των υλικών, τον τύπο του τσιμέντου, το λόγο νερού/τσιμέντου, το μέγεθος του δοκιμίου, τη μέθοδο πήξης του σκυροδέματος καθώς και τις συνθήκες έκθεσης του δοκιμίου στο περιβάλλον. Κάποια από αυτά τα δοκίμια ήταν πυρήνες σκυροδέματος που λήφθηκαν από υπάρχουσες κατασκευές και οι λεπτομέρειες των ιδιοτήτων τους ήταν άγνωστες. Έτσι, δεν χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των δύο παραγόντων που αναφέρθηκαν πριν. Οι παράγοντες αυτοί (N_0 και k) εκφράστηκαν ως διαγράμματα με σωρευτικής πιθανότητας (Σχήματα 13 και 14) που προέκυψαν με κατάλληλη στατιστική ανάλυση.



Σχήμα 13 : Διάγραμμα σωρευτικής πιθανότητας για τη συγκέντρωση χλωριδίων στο σκυρόδεμα (Morinaga, 1992).



Σχήμα 14: Διάγραμμα σωρευτικής πιθανότητας για το συντελεστή διάχυσης των χλωριδίων στο σκυρόδεμα (Morinaga, 1992).

Με στόχο να εκτιμηθεί ο χρόνος ζωής με συντηρητικό τρόπο, επιλέχθηκαν οι υψηλότερες τιμές συγκέντρωσης και διάχυσης που αντιστοιχούν στο 90% της σωρευτικής πιθανότητας.

Έτσι:

- $N_0=30 \text{ kg/m}^3$
- $k=10 \text{ cm}^2/\text{έτος}$

Δεδομένου ότι, η συγκέντρωση του άλατος στην επιφάνεια του σκυροδέματος επηρεάζεται σημαντικά από την απόσταση από τη θάλασσα, στην παρούσα έρευνα θεωρήθηκε πως, η συγκέντρωση χλωριδίων στην επιφάνεια του σκυροδέματος, είναι ανάλογη με τη συγκέντρωση των χλωριδίων που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα. Θεωρείται ότι σε απόσταση από την ακτή ίση με 0 m η συγκέντρωση του άλατος στην επιφάνεια (N_0) είναι ίση με 100% και οι τιμές της συγκέντρωσης σε διάφορες αποστάσεις από την ακτή προσδιορίζονται σε σχέση με δεδομένα που καθορίζονται με τυποποιημένα κριτήρια κατά ISO (πίνακας 4.1). Εάν η επιφανειακή συγκέντρωση άλατος είναι ίση με $N_0=30 \text{ kg/m}^3$ όπως προαναφέρθηκε για μηδενική απόσταση από την ακτή, η συγκέντρωση για τις υπόλοιπες αποστάσεις από την ακτή υπολογίζονται με βάση τα δεδομένα του πίνακα.

Απόσταση από την ακτή (m)	0	50	100	150	200	500	1000	2000
Αναλογία συγκέντρωσης των								

αερομεταφερόμενων χλωριδίων	100	50	25	15	12	7	5	4
Επιφανειακή συγκέντρωση χλωριδίων N_0 (kg/m^3)	30	15	7,5	4,5	3,6	2,1	1,5	1,2

Πίνακας 1 : Συγκέντρωση χλωριδίων στην επιφάνεια του σκυροδέματος σε σχέση με την απόσταση από τη θάλασσα (Morinaga, 1992).

Αξίζει να σημειωθεί πως από τους παράγοντες που χρησιμοποιούνται από το συγγραφέα στη συγκεκριμένη μέθοδο, η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, ο λόγος νερού/τσιμέντο, η επικάλυψη του σκυροδέματος και η συγκέντρωση του άλατος στην επιφάνεια του σκυροδέματος, επηρεάζονται από την απόσταση από την ακτή. Ενώ, σταθεροί παραμένουν οι εξής παράγοντες: συντελεστής διάχυσης ($10cm^2/year$), τύπος τσιμέντου (Portland), συγκέντρωση CO_2 (0.03%) και διάμετρος ράβδων οπλισμού (13mm).

Παράγοντες	Επίπεδα		
Θερμοκρασία ($^{\circ}C$)	15	25	35
Σχετική Υγρασία (%)	50	70	90
Λόγος νερού/τσιμέντο (%)	40	50	60
Πάχος επικάλυψης (mm)	25	50	75
Επιφανειακή συγκέντρωση χλωριδίων N_0	30	15	7.5

(kg/m ³)			
Απόσταση από την ακτή(m)	0	50	100

Πίνακας 2 : Παράγοντες και επίπεδα που χρησιμοποιήθηκαν στην εκτίμηση διάρκειας ζωής (Morinaga, 1992).

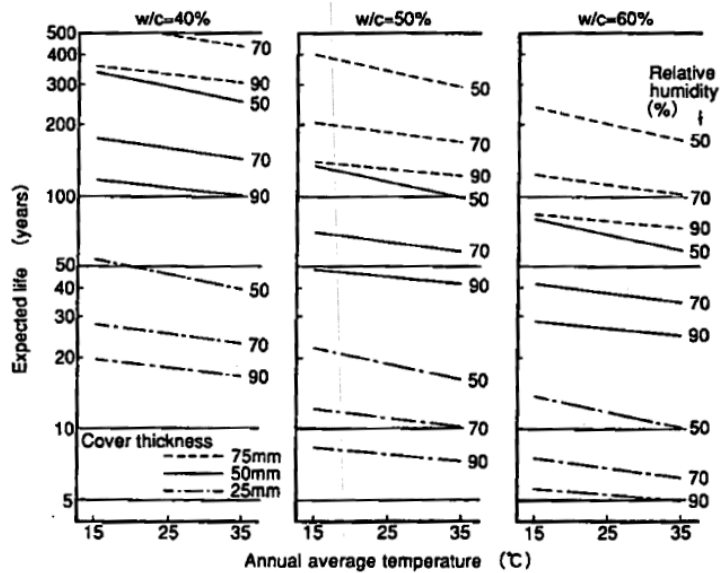
Τα αποτελέσματα της προκείμενης έρευνας είναι τα ακόλουθα :

i. Σύγκριση διάβρωσης χάλυβα εξαιτίας ενανθράκωσης και διείσδυσης ανιόντων χλωριδίων.

Εξάγοντας τα αποτελέσματα της εκτίμησης διάρκειας ζωής κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα για διάβρωση του χάλυβα οπλισμού, προκαλούμενη από ενανθράκωση του σκυροδέματος και διάβρωση προκαλούμενη από διείσδυση ανιόντων χλωριδίου στο σκυρόδεμα, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων. Από εκεί, έγινε εμφανές ότι η συνεισφορά της διείσδυσης χλωριδίων, στη διάβρωση του χάλυβα είναι σημαντικά πιο ισχυρή σε σχέση με τη συνεισφορά της ενανθράκωσης στη διάβρωση του χάλυβα. Για το λόγο αυτό, ο συγγραφέας αναφέρεται περισσότερο στα αποτελέσματα της διάβρωσης λόγω χλωριόντων.

ii. Επίδραση της θερμοκρασίας στη διάρκεια ζωής των κατασκευών.

Στο παρακάτω σχήμα περιγράφεται διαγραμματικά η επίδραση της θερμοκρασίας στη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία τόσο μειώνεται η διάρκεια ζωής της κατασκευής. Ωστόσο, σε γενικές γραμμές ο βαθμός επιρροής της θερμοκρασίας δεν είναι τόσο μεγάλος σε σύγκριση με άλλους παράγοντες που αναφέρονται στη συνέχεια. Έτσι, η θερμοκρασία εφεξής θεωρείται σταθερή και ίση με 35°C ώστε να εκτιμηθεί ο χρόνος ζωής συντηρητικά.



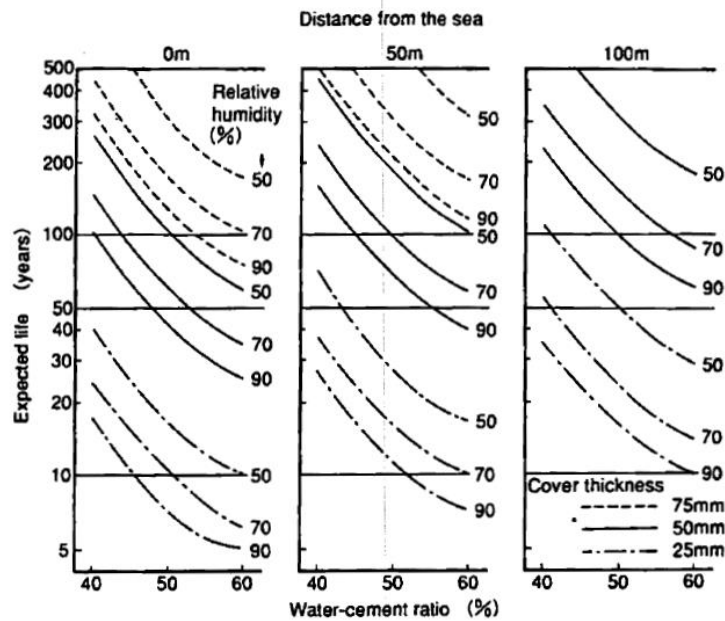
Σχήμα 15 : Επίδραση του πάχους επικάλυψης, της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας για διάφορους λόγους νερού προς τσιμέντο (Morinaga, 1992).

iii. Επίδραση της σχετικής υγρασίας.

Από το παραπάνω σχήμα, φαίνεται ότι η επιρροή της σχετικής υγρασίας είναι μεγαλύτερη από αυτή της θερμοκρασίας. Έτσι αποδυνκνύεται, ότι ο βαθμός της διάβρωσης του χάλυβα αυξάνεται ταχύτατα όσο αυξάνεται η υγρασία και ότι σε θερμά και υγρά περιβάλλοντα, παρά σε θερμά και ξηρά απαιτούνται πιο ακριβείς μετρήσεις.

iv. Επίδραση της απόστασης από τη θάλασσα.

Στο παρακάτω διάγραμμα συγκρίνονται οι εκτιμήσεις διάρκειας ζωής σε απόσταση 0, 50 και 100 m. Όπως διαφάνεται, η κατάσταση κοντά στη θάλασσα είναι αρκετά δυσμενής και αποδυναμώνεται, όσο αυξάνεται η απόσταση από τη θάλασσα. Η κατάσταση ωστόσο παραμένει δυσμενής, έστω και ελαχιστοποιημένη ακόμη και σε απόσταση 100 m από την ακτή.



Σχήμα 16 : Επίδραση της απόστασης από τη θάλασσα (Morinaga, 1992).

v. **Επίδραση του λόγου νερού/τσιμέντο και του πάχους κάλυψης.**

Οι δύο αυτοί παράγοντες διαδραματίζουν κυρίαρχο ρόλο στην εκτίμηση διάρκειας ζωής κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, όπως διαφαίνεται από τα ανωτέρω διαγράμματα.

a. **Αν το πάχος της επικάλυψης είναι 25 mm.**

Στην προκειμένη περίπτωση, δεδομένου ότι ο στοχευόμενος χρόνος ζωής της κατασκευής είναι τα 50 έτη, ο Morinaga καταλήγει στο συμπέρασμα ότι, μία επικάλυψη σκυροδέματος πάχους 25 mm δεν πρέπει να επιτρέπεται σε απόσταση 0 m από τη ακτή, ανεξάρτητα από τη σχετική υγρασία. Εάν η επικάλυψη έχει αυτή την τιμή και ο λόγος νερού/τσιμέντο είναι 60% σε αυτή την απόσταση από την ακτή, ο χρόνος ζωής περιορίζεται μεταξύ 5 και 10 ετών.

Παρόλο που ο χρόνος ζωής αυξάνεται όσο αυξάνει η απόσταση από την ακτή, το πάχος επικάλυψης των 25 mm δεν είναι αρκετό, ακόμη και σε απόσταση 100 m από την ακτή, ακόμη και αν ο λόγος νερού/τσιμέντο είναι μικρότερος από 40% όταν η υγρασία είναι υψηλή.

b. **Αν το πάχος της επικάλυψης είναι 50 mm.**

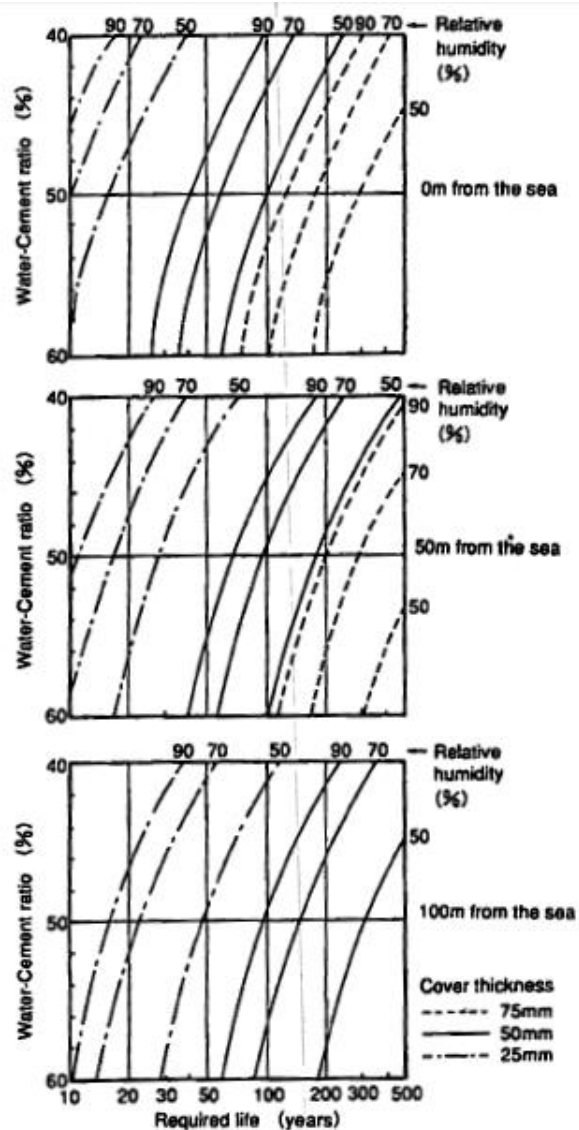
Συμφωνα με το συγγραφέα, εάν το πάχος επικάλυψης αυξηθεί στα 50 mm ο χρόνος ζωής αυξάνεται ικανοποιητικά. Σε απόσταση 100 m από την ακτή ο χρόνος ζωής ξεπερνά τα 50 έτη ακόμη και αν ο λόγος νερού/τσιμέντο είναι 60% και η υγρασία υψηλή. Ωστόσο, σε μηδενική απόσταση από την ακτή, ο

περιορισμός του λόγου νερού/τσιμέντου είναι απαραίτητος όταν η υγρασία είναι υψηλή.

c. Αν το πάχος της επικάλυψης είναι 75 mm

Όταν το πάχος επικάλυψης έχει αυτή την τιμή, η διάρκεια ζωής της κατασκευής εκτιμάται ότι υπερβαίνει τα 50 έτη ανεξαρτήτως του λόγου νερού/τσιμέντο, της απόστασης από την ακτή και των συνθηκών υγρασίας.

Επιπλέον ο Morinaga στη συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζει τη σχέση μεταξύ του απαιτούμενου χρόνου ζωής, του πάχους κάλυψης και του λόγου νερού/τσιμέντο για αποστάσεις 0, 50 και 100 μέτρων από τη θάλασσα. Η σχέση αυτή παρατίθεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 17: σχέση μεταξύ του απαιτούμενου χρόνου ζωής, του πάχους κάλυψης και του λόγου νερού/τσιμέντο για αποστάσεις 0, 50 και 100 μέτρων από τη θάλασσα (Morinaga, 1992).

Επιπλέον στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται τα δεδομένα από το παραπάνω σχήμα, με τρόπο τέτοιο ώστε να διαφαίνεται ο απαραίτητος λόγος νερού/τσιμέντο ώστε να διασφαλιστεί η απαιτούμενη διάρκεια ζωής της κατασκευής υπό ποικίλες συνθήκες. Αξίζει να σημειωθεί πως μέσω της ένδειξης «N» ο συγγραφέας υποδηλώνει ότι το πάχος κάλυψης των 25 χιλιοστών δεν είναι επαρκές για να διασφαλιστεί η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής ακόμη και αν ο λόγος w/c είναι 40%. Ενώ με την ένδειξη «60» υποδεικνύει ότι ο λόγος w/c ελήφθη μεγαλύτερος από 60% για την προβλεπόμενη διάρκεια ζωής. Το υψηλό όμως ποσοστό του συγκεκριμένου λόγου δύναται να προκαλέσει αλλοίωση στην κατασκευή και ως εκ τούτου συνίσταται να τίθεται ένα όριο της τάξης του 60%.

Cover thickness (mm)	Required life (years)	Distance from the sea (m)								
		0			50			100		
		Relative humidity (%)								
		90	70	50	90	70	50	90	70	50
25	50	N	N	N	N	N	43	N	41	49
	100	N	N	N	N	N	N	N	N	41
50	50	47	52	(60)	55	(60)	(60)	(60)	(60)	(60)
	100	40	43	50	45	49	(60)	49	57	(60)
75	50	(60)	(60)	(60)	(60)	(60)	(60)	(60)	(60)	(60)
	100	53	60	(60)	(60)	(60)	(60)	(60)	(60)	(60)

Πίνακας 3 : Μέγιστος λόγος νερού/τσιμέντο (Morinaga, 1992).

Έτσι μέσω της συγκεκριμένης έρευνας αποσαφηνίστηκε η επιρροή της διείσδυσης χλωριδίων στο σκυρόδεμα, έγινε πλέον σαφέστερο ότι οι κατασκευές που βρίσκονται πλησίον της ακτογραμμής απαιτούν ειδική προστασία έναντι της διείσδυσης αλάτων . Επίσης διευκρινίστηκε η επιρροή του λόγου νερού/τσιμέντο και του πάχους της επικάλυψης του οπλισμού στο σκυρόδεμα και προτάθηκαν κατάλληλοι συνδυασμοί ανάλογα με τις συνθήκες έκθεσης του περιβάλλοντος.

2.2 M.A. Mustafa and K.M. Yusof “Atmospheric chloride penetration into concrete in semitropical marine environment”

Στη συγκεκριμένη μελέτη οι (Mustafa & Yusof, 1994) διενέργησαν σειρά μετρήσεων της περιεκτικότητας σε χλωρίδια σε δοκίμια σκυροδέματος τα οποία είχαν ξηρανθεί στην ατμόσφαιρα σε παραθαλάσσιο περιβάλλον στην περιοχή της Μαλαισίας, υπό διαφορετικές συνθήκες έκθεσης. Οι συνθήκες αυτές περιλαμβάνουν συνδυασμό υψηλής συγκέντρωσης χλωριούχων ενώσεων, υψηλές θερμοκρασίες, εναλλαγή ξηρών/υγρών συνθηκών και υψηλή διαπερατότητα του σκυροδέματος και είναι ευρέως γνωστό ότι αποτελούν τις χειρότερες συνθήκες για διάβρωση του οπλισμού κατασκευών από Ο.Σ. Στη συγκεκριμένη έρευνα, το περιεχόμενο των χλωριούχων ενώσεων στην επιφάνεια των δομικών στοιχείων καθώς και οι συντελεστές διάχυσης των ενώσεων αυτών προσδιορίστηκαν χρησιμοποιώντας την εξίσωση

διάχυσης, με βάση τη συγκέντρωση των χλωριούχων ιόντων σε σχέση με το βάθος από την επιφάνεια του σκυροδέματος. Από τη χρονική εξάρτηση των δύο παραμέτρων προκύπτει ότι χρησιμοποιώντας ένα συντελεστή διάχυσης με σταθερή τιμή επιφάνειας, τα προφίλ των χλωριούχων ενώσεων που προβλέπονται από τη σταθερή εξίσωση διάχυσης μπορεί να μην συσχετίζονται καλά με τις μετρήσεις σε πραγματικές κατασκευές σκυροδέματος διαφορετικής ηλικίας. Σύμφωνα με κάποια προκαταρκτικά αποτελέσματα της μελέτης αποδεικνύεται ότι η περιεκτικότητα των χλωριούχων ενώσεων είναι περίπου ίση με 0.06 mg/cm^2 ανά ημέρα, σε απόσταση 30 m από τη θάλασσα. Η περιεκτικότητα αυτή μειώνεται σε απόσταση 100 m έως περίπου 70% και είναι σχεδόν σταθερή για άλλα 400 m. Από 500 έως 1400 m μειώνεται περαιτέρω και στη συνέχεια εκμηδενίζεται. Επιπροσθέτως, μια εξίσωση σημαντική παράμετρος είναι η ύπαρξη διαφορετικών συνθηκών έκθεσης της ίδιας κατασκευής για τα δομικά της μέλη, άρα και η διαφορετική είσοδος ενώσεων στο σκυρόδεμα. Ακόμη και πλησίον της ακτής, δομικά στοιχεία τα οποία προστατεύονται με περιβλήματα έχουν λιγότερη προσβολή από χλωριούχες ουσίες. Για τις ανάγκες της μελέτης οι συγγραφείς θεώρησαν ότι η κρίσιμη συγκέντρωση του χλωριούχου ιόντος στο σκυρόδεμα, η οποία σηματοδοτεί την έναρξη της διάβρωσης, σε τροπικά κλίματα, ισούται με 0.4% του τσιμέντου που έχει μετατραπεί σε περίπου 1.29 kg/m^3 σκυροδέματος. Οι ερευνητές περιέγραψαν στη συγκεκριμένη μελέτη τη διάχυση των χλωριδίων στο σκυρόδεμα μέσω του δεύτερου νόμου του Fick που έχει αναφερθεί σε προηγούμενες ενότητες.

Το πειραματικό μέρος της έρευνας έχει ως εξής : Κατασκευάστηκαν κυβικά δοκίμια με ακμή 10 cm. Οι χλωριούχες ουσίες που μετρήθηκαν ήταν σχεδόν μηδενικής ποσότητας. Ο λόγος νερού/τσιμέντο ήταν 0.50. Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος στις 28 ημέρες ήταν 39 MPa που ικανοποιεί τη χαρακτηριστική αντοχή των 26 MPa. Η απαιτούμενη αντοχή επιτεύχθηκε στις 7 ημέρες μετά τη σκυροδέτηση.

Τα δοκίμια ετοιμάστηκαν σε θερμοκρασία $25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ και σχετική υγρασία 92%. Τα δοκίμια κρατούνταν σε ειδικές συνθήκες περιβάλλοντος (θερμοκρασία και υγρασία) για 24 ώρες, με μηχανική συμπίεση σε δύο στρώσεις. Έγινε χρήση απιονισμένου νερού για τη δημιουργία των συγκεκριμένων δειγμάτων. Αμέσως μετά την τοποθέτηση στα καλούπια και το φινίρισμα της επιφάνειας, τα δοκίμια καλύφθηκαν και αποθηκεύτηκαν, σε ένα θάλαμο στο $18 \pm 4 \text{ }^\circ\text{C}$ και 7 ~ 4% R.H για 24 ώρες. Αφού τα δοκίμια κρατήθηκαν για 27 ημέρες σε αυτές τις συνθήκες μεταφέρθηκαν στο λιμάνι του Dickson, 75 km μακριά από την Kuala Lumpur και αποθηκεύτηκαν χωρισμένα σε 4 ομάδες υπό παραθαλάσσιες συνθήκες.

- Ομάδα Α Σε απόσταση 30 m από την ακτή και σε ύψος περίπου 5 m άνω από τη στάθμη της θάλασσας.
- Ομάδα Β Σε απόσταση 30 m από την ακτή και σε ύψος περίπου 15 m άνω από τη στάθμη της θάλασσας.
- Ομάδα Γ Σε απόσταση 400 m από την ακτή και σε ύψος περίπου 5 m άνω από τη στάθμη της θάλασσας.
- Ομάδα Δ Αποθήκευση όπως και τα δοκίμια της ομάδας Γ αλλά με προστασία από άμεση επαφή με το θαλασσινό νερό.

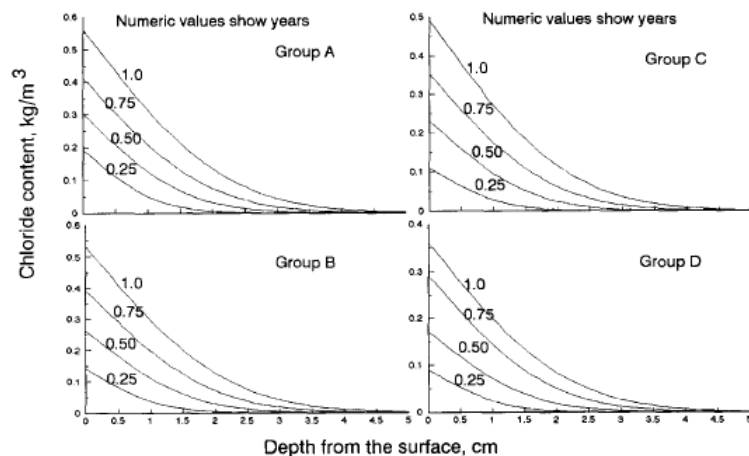
Όσον αφορά τις συνθήκες έκθεσης, ήταν παρόμοιες με αυτές πολλών ξενοδοχείων ή κατοικιών στις ακτές της Μαλαισίας. Τα δοκίμια εκτέθηκαν σε άνεμο και μεταφερόμενη βροχή, αλλά όχι σε άμεσο ψεκασμό θαλασσινού νερού. Ενώ, οι ερευνητές διεξήγαγαν τις δοκιμές ως ακολούθως : Επιλέχθηκε το κριτήριο της ποιότητας της ομοιογένειας και χρησιμοποιήθηκε η μη καταστροφική μέτρηση της πυκνότητας του σκυροδέματος. Συνολικά διενεργήθηκαν 4 ομάδες δοκιμών με συνολικά 96 δοκίμια. Αυτά καλύφθηκαν στις 5 από τις 6 πλευρές του κύβου με πίσσα ώστε η κατεύθυνση της διάχυσης των χλωριούχων ουσιών να είναι μία. Έπειτα από έκθεση 90, 180, 270, και 365 ημερών τα δοκίμια μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο για δοκιμή. Υπήρχαν 6 δοκίμια για κάθε ηλικία που ελέγχθηκε. Σε βάθος 10, 15, 20, 25 και 30 mm ανοίχτηκε μία οπή 4 mm στην επιφάνεια των δοκιμίων. Το υλικό που βγήκε από τη διάνοιξη, από 4 οπές για κάθε βάθος, συγκρίθηκαν ώστε να εξαχθούν αποτελέσματα. Η συγκέντρωση σε χλωρίδια προσδιορίστηκε από την ανάλυση του προϊόντος αυτού (σκόνη από τη διάνοιξη της οπής) με τη μέθοδο Bergman. Τα προφίλ των χλωριούχων ουσιών προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο του στερεάς κατάστασης ηλεκτροδίου (Μοντέλο: ORION 96-17).

Τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξαν ήταν τα ακόλουθα :

- i. Το περιεχόμενο των ιόντων χλωρίου στο σκυρόδεμα αυξάνεται γενικά με το χρόνο έκθεσης και μειώνεται με το βάθος αλλά η ποσότητα των χλωριούχων ενώσεων εξαρτάται από τις συνθήκες αποθήκευσης των δοκιμίων. Η θέση των δοκιμίων

φάνηκε να έχει σημαντική επιρροή στη διείσδυση των χλωριούχων ενώσεων. Τα δοκίμια σκυροδέματος που βρίσκονταν κοντά στην ακτή και δέχονταν κύματα θαλασσινού νερού κατά τη διάρκεια ισχυρών ανέμων παρουσίασαν μεγαλύτερο περιεχόμενο χλωριούχων ενώσεων.

- ii. Το περιεχόμενο των χλωριούχων ενώσεων εξαρτάται επίσης από το βαθμό προστασίας των δοκιμίων. Ακόμη και στην ίδια τοποθεσία, δοκίμια τα οποία προστατεύονταν μερικώς από τον καιρό είχαν μικρότερο περιεχόμενο σε τέτοιου είδους ενώσεις. Η εμφάνιση διαφορών στην είσοδο χλωριούχων ενώσεων υπό όμοιες ατμοσφαιρικές συνθήκες σημαίνει ότι είναι απαραίτητο να εξετάζεται το περιεχόμενο σε χλωριούχες ουσίες κάθε κατασκευής χωριστά, και χωριστά για κάθε δομικό στοιχείο της κατασκευής.
- iii. Το περιεχόμενο σε ιόντα χλωρίου δεν ξεπέρασε γενικά τα 0.376 kg/m^3 σε βάρος σκυροδέματος, που ήταν σχετικά χαμηλό από τα όρια που αναφέρθηκαν για την έναρξη της διάβρωσης.
- iv. Οι τιμές για το περιεχόμενο των ιόντων χλωρίου στην επιφάνεια και του συντελεστή διάχυσης που υπολογίστηκαν με το δεύτερο νόμο του Fick για τη διάχυση ήταν σε σύγκλιση με το γεγονός ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος έκθεσης των δοκιμίων σε τέτοιες συνθήκες, τόσο μεγαλύτερο είναι το περιεχόμενο των χλωριδίων στην επιφάνεια και τόσο μικρότερος είναι ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης. Αυτό δείχνει ότι ένας συντελεστής διάχυσης μαζί με μία σταθερή συγκέντρωση ιόντων χλωρίου στην επιφάνεια του σκυροδέματος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αξιόπιστα για τη εκτίμηση της κίνησης των ουσιών αυτών σε σκυροδέματα διαφορετικής ηλικίας.
- v. Η τιμή των χλωριούχων ουσιών για την έναρξη της διάβρωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του χρόνου έναρξης της διάβρωσης, λαμβάνοντας υπ' όψιν το περιεχόμενο των χλωριούχων ουσιών στην επιφάνεια και το συντελεστή διάχυσης ως μεταβλητές συναρτήσεις στην εξίσωση διάχυσης.

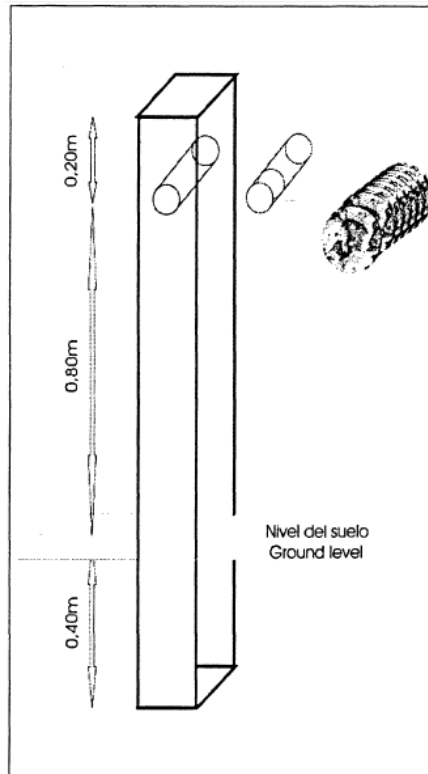


Σχήμα 18 : Προσέγγιση της περιεκτικότητας σε χλωρίδια μέσω της εξίσωσης του 2ου νόμου του Fick (Mustafa & Yusof, 1994).

2.3 G.R. Meira, I. J. Padaratz, C. Alonso, C. Andrade “Atmospheric chloride penetration into concrete in semitropical marine environment”

Η απόσταση κατασκευών σκυροδέματος από τη θάλασσα και η επιβλαβής επιρροή των αλάτων που μεταφέρονται μέσω του αέρα στο σκυρόδεμα ενέπνευσαν τους (Meira, Padaratz, Alonso, & Andrade, 2003) για τη διεξαγωγή της συγκεκριμένης έρευνας. Η μελέτη αυτή αποτελεί μια πειραματική έρευνα που σχετίζεται με την επιθετικότητα των ιόντων χλωρίου που προέρχονται από τη θάλασσα σε σχέση με την απόσταση από την ακτογραμμή. Η συγκεκριμένη έρευνα διεξήχθη στην βορειοανατολική Βραζιλία και βασίστηκε τόσο στην περιεκτικότητα του αέρα σε χλωρίδια όσο και την περιεκτικότητα των δοκιμίων σε ιόντα χλωριδίου σε διάφορες αποστάσεις από τη θάλασσα. Οι συγγραφείς θεωρώντας δεδομένο, ότι η επιθετικότητα των αλάτων που μεταφέρονται μέσω του θαλασσινού νερού και του αέρα, δεν περιορίζεται στις παράκτιες περιοχές, αλλά μεταφέρεται μέχρι μία απόσταση που ανήκει σε μία ζώνη, γνωστή ως παραθαλάσσια ατμοσφαιρική ζώνη επιρροής, μελέτησαν την εναπόθεση χλωριούχων ουσιών από τη μεταφορά τους από τη θάλασσα μέσω του αέρα, σε μία περιοχή τροπικού κλίματος στη βορειοανατολική Βραζιλία, ως μία συνάρτηση της απόστασης από τη θάλασσα.. Οι (Meira et al., 2003) υποστηρίζουν ότι η επίθεση των ιόντων

χλωρίου οφείλεται στον ψεκασμό των κατασκευών με θαλασσινό νερό που μεταφέρεται μέσω του αέρα. Υπογραμμίζουν επίσης ότι το φαινόμενο είναι σοβαρό, όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβαίνει μία συγκεκριμένη τιμή, της τάξεως των 7-11 m/sec. Επίσης στη συγκεκριμένη έρευνα αναφέρεται ότι η συγκέντρωση σε χλωρίδια αυξάνεται με την αύξηση του αέρα γεγονός το οποίο οφείλεται στην αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων και της πυκνότητάς του. Συγκεκριμένα αναφέρουν πως το σώμα της αερομεταφερόμενης μάζας αποτελείται κατά 5-10% από τα μεγάλα σωματίδια, ενώ τα μικρά σωματίδια αποτελούν το 90-95% της συνολικής μάζας. Επιπλέον, αναφορικά με την κίνηση των σωματιδίων στις περιοχές της στεριάς, στη μελέτη αυτή επισημαίνεται ότι εκτός από την επιρροή του ανέμου και την επιρροή της βαρύτητας, η παρουσία εμποδίων και η τριβή συμβάλλει στη μείωση της περιεκτικότητας του αέρα σε χλωρίδια σε ηπειρωτικές περιοχές. Για τις ανάγκες της μελέτης τα κλιματικά δεδομένα (θερμοκρασία, σχετική υγρασία, βροχή, κατεύθυνση και ταχύτητα του ανέμου) συλλέχθηκαν από τους κρατικούς μετεωρολογικούς σταθμούς, ενώ σταθμοί καταγραφής για τη μέτρηση της περιεκτικότητας σε χλωρίδια τοποθετήθηκαν σε απόσταση 10, 100, 200, 500 και 1100 μέτρων από την ακτή. Η περιοχή η οποία επιλέχθηκε ήταν όσο το δυνατόν επίπεδη για να αποφευχθούν μεταβολές στο ύψος, παρουσία εμποδίων και τριβή. Όσον αφορά την πειραματική διαδικασία, την οποία ακολούθησαν, εκείνη έχει ως εξής : Κατασκευάστηκαν πρισματικά δοκίμια σκυροδέματος διαστάσεων 0.15·0.15·1.40 m με χρήση τσιμέντου τύπου CP IV και λόγου νερού/τσιμέντου ίσο προς 0.65. Τα δοκίμια κρατήθηκαν σε υγρό περιβάλλον για 7 ημέρες πριν τοποθετηθούν σε αποστάσεις 10, 100 και 200 m μακριά από τη θάλασσα. Έπειτα από 6 μήνες έκθεσης των δοκιμίων, δείγματα εξήχθησαν από τα δοκίμια ώστε να προσδιορισθούν τα προφίλ των ιόντων χλωρίου στο σκυρόδεμα. Το πρώτο βήμα για τον προσδιορισμό των δειγμάτων ήταν η λήψη ενός πυρήνα διαμέτρου 7.0 cm σε απόσταση 0.80 m από την βάση του εκάστοτε δοκιμίου. Η διεύθυνση του πυρήνα ήταν παράλληλη με την παρατηρηθείσα φορά του ανέμου. Ελήφθησαν επίσης μέτρα για να αποφευχθεί η επιρροή της πλύσης της επιφάνειας των δοκιμίων μέσω αδιάβροχων ταινιών. Το πρώτο χιλιοστό του κάθε πυρήνα τρίβονταν και αυτή η επιφάνεια χρησιμοποιούνταν ως επιφάνεια αναφοράς. Τα επιπλέον δείγματα επίσης τρίβονταν μέχρι το βάθος των 30 mm σε έξι στρώσεις πάχους 5.0 mm. Για κάθε δείγμα προσδιορίστηκε η συνολική περιεκτικότητα σε χλωριούχες ουσίες με ποτενσιομετρική ογκομετρική ανάλυση, βάσει των διαδικασιών που προβλέπονται στις οδηγίες ASTM C1152.

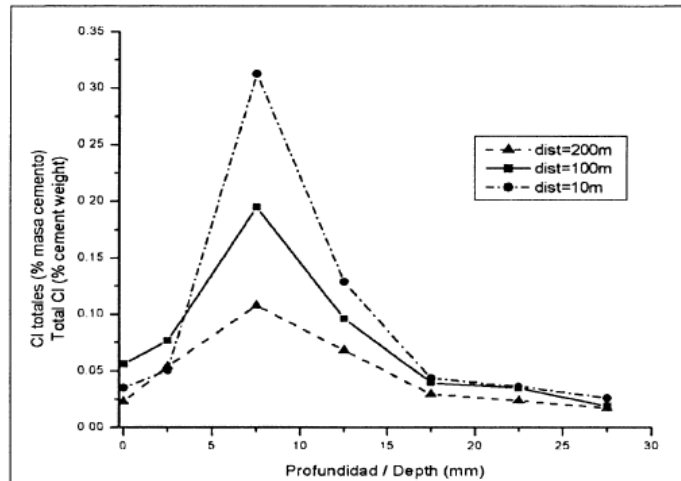


Σχήμα 19 : Σχηματική απεικόνιση δοκιμίου (Meira et al., 2003).

Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας φαίνονται στον παρακάτω πίνακα και το διάγραμμα που ακολουθεί.

Distancia desde el mar <i>Distance from sea</i> (m)	Concentración (mg/m ² .dia) / <i>Concentration (mg/m².day)</i>							
	Ene <i>Jan</i>	Feb <i>Feb</i>	Mar <i>Mar</i>	Abr <i>Apr</i>	May <i>May</i>	Jun <i>Jun</i>	Promedio <i>Average</i>	D.S. <i>S. D. (%)</i>
10	483,56	412,45	438,61	497,85	415,10	473,54	453,52	8,04
100	74,48	69,70	80,68	147,80	89,82	162,11	104,10	38,63
200	9,85	12,20	20,59	13,93	15,14	26,66	16,40	37,68
500	8,92	13,04	15,17	9,29	12,43	12,43	11,88	20,03
1100		5,88	6,02	3,57	5,18	9,29	5,99	34,83

Πίνακας 4 : Συγκέντρωση χλωριδίων σε σχέση με την απόσταση από τη θάλασσα (Meira et al., 2003).



Σχήμα 20 : Επιρροή της απόστασης από τη θάλασσα στην περιεκτικότητα χλωριδίων σε σχέση με το βάθος από την επιφάνεια του δοκιμίου (Meira et al., 2003).

Από τη συγκεκριμένη έρευνα διεξήχθησαν τα εξής συμπεράσματα :

- i. Τα χλωρίδια που περιέχονται στον ατμοσφαιρικό αέρα, μειώνονται αισθητά σε απόσταση 200 m από την ακτή.
- ii. Τα μεγαλύτερα σωματίδια αερολύματος συνεισφέρουν σημαντικά στη συγκέντρωση άλατος στην ατμόσφαιρα. Τα μεγάλα σωματίδια δεν φτάνουν σε μεγάλα ύψη και μεγάλες αποστάσεις από τη ακτή. Τα αποτελέσματα των δοκιμών πεδίου αποδεικνύουν αυτή την υπόθεση, καθώς δείχνουν μία σημαντική μείωση της συγκέντρωσης άλατος μεταξύ των πρώτων 10 και 100 m από την ακτή και μεταξύ των 100 και 200 m. Έπειτα από αυτή την απόσταση η συγκέντρωση άλατος μειώνεται σε χαμηλότερο βαθμό σε μία ζώνη όπου ο αριθμός των μεγάλων σωματιδίων έχει μειωθεί και τα μικρότερα σωματίδια μπορούν να ταξιδέψουν πιο μακριά.
- iii. Στο σκυρόδεμα, η μείωση του περιεχομένου των ιόντων χλωριδίου σε σχέση με την απόσταση από τη θάλασσα εμφανίζεται σε μικρότερο βαθμό, και έτσι δεν μπορεί να διατυπωθεί μία απλή εμπειρική γραμμική σχέση μεταξύ περιεχομένου ιόντων χλωρίου στα αερολύματα και της ποσότητας που εισέρχεται στο σκυρόδεμα. Επομένως, οι κατασκευές σκυροδέματος που βρίσκονται σε παραθαλάσσιο περιβάλλον δέχονται ποικιλία από προσβολές χλωριούχων ενώσεων, γεγονός το οποίο εξαρτάται από την απόσταση από την ακτή και από αρκετούς παράγοντες που

πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, όταν η ανθεκτικότητα της κατασκευής πρέπει να υπολογιστεί κατά το στάδιο του σχεδιασμού.

2.4 Σ. Δέμης « Σχεδιασμός ανθεκτικότητας κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος – Εκτίμηση διάρκειας ζωής »

Η πρόωρη υποβάθμιση κατασκευών από Ο.Π. ώθησε τον (Δέμης, 2015) στην υλοποίηση της παρούσας έρευνας με στόχο τον ενδεδειγμένο σχεδιασμό ανθεκτικότητας των συγκεκριμένων κατασκευών με τη χρήση διαφόρων μοντέλων εκτίμησης διάρκειας ζωής κατασκευών από Ο.Σ. Ο συγγραφέας στη συνέχεια παραθέτει τις αρχές στις οποίες βασίζονται τα μοντέλα εκτίμησης διάρκειας ζωής και τη σημασία τους. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με το συγγραφέα ως ανθεκτικότητα ορίζεται «...η ικανότητα μιας κατασκευής να αντιστέκεται σε επιθετικές περιβαλλοντικές δράσεις χωρίς η επιτελεστικότητά της να υποχωρεί κάτω από κάποιο αποδεκτό όριο...» (Δέμης, 2015). Ο συγγραφέας τονίζει τη σημασία του σχεδιασμού ανθεκτικότητας κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού έτσι ώστε να αποφευχθούν πρόωμες φθορές και ρηγματώσεις. Στη μελέτη αυτή υπογραμμίζεται επίσης, η σημασία των μηχανισμών έναρξης και διάδοσης της διάβρωσης, οι οποίοι είναι απαραίτητοι στα μοντέλα πρόβλεψης της διάρκειας ζωής των κατασκευών Ο.Σ. Κοινή αρχή όλων των μοντέλων, σύμφωνα με την παρούσα έρευνα, η διάρκεια ζωής της κατασκευής, η οποία ορίζεται ως το άθροισμα της περιόδου έναρξης και της περιόδου εξέλιξης της διάβρωσης. Ως περίοδος έναρξης ορίζεται το διάστημα έως ότου είτε το βάθος ενανθράκωσης προσεγγίσει την επιφάνεια του οπλισμού προκαλώντας έτσι την αποπαθητικοποίησή του, είτε η περιεκτικότητα σε χλωρίδια του σκυροδέματος υπερβεί την οριακή τιμή για διάβρωση. Ενώ, περίοδος εξέλιξης είναι το διάστημα έως οι συνέπειες της διάβρωσης υπερβούν τον αποδεκτό βαθμό. Επίσης σύμφωνα με τον ερευνητή, τα περισσότερα μοντέλα προσομοιώνουν τη διάχυση χλωριδίων στο σκυρόδεμα χρησιμοποιώντας το δεύτερο νόμο του Fick. Στη συνέχεια της μελέτης παρατίθεται ένα παράδειγμα εκτίμησης διάρκειας ζωής κατασκευών, το οποίο εφαρμόστηκε, με τις ίδιες παραμέτρους, σε τέσσερα εμπορικά μοντέλα εκτίμησης διάρκειας ζωής (ClinConc, Life-365, EUCON, Duracon). Οι διαφορές μεταξύ των μοντέλων όσον αφορά τα δεδομένα που απαιτούν και τα αποτελέσματα που εξάγουν παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες.

Life 365	ClinConc	Eucon	Duracon
Ορισμός της Κατασκευής και Χαρακτηριστικά Υλικών			
<ul style="list-style-type: none"> • Τύπος κατασκευής • Πάχος δομικού στοιχείου (mm) • Επικάλυψη (mm) + COV (%) • Λόγος N/T • FA, SF, Slag (%) • Τύπος σπλισμού • Υπαρξη αναστολέων διάβρωσης • Υπαρξη μεμβρανών 	<ul style="list-style-type: none"> • Ποσότητα Τσιμέντου, νερού, αδρανών (kg/m^3 σκυρ.) και πυκνότητες (kg/m^3). • Ποσότητα, πυκνότητα και activity coefficients προσθέτων τύπου II (SF, FA, Slag). • Ποσοστό κενών αέρα (%) • Equivalent alkalis (Na_2O) τσιμέντου (%) • Θερμοκρασία συντήρησης ($^{\circ}\text{C}$) 	<ul style="list-style-type: none"> • Τύπος Τσιμέντου (EN 197), Standard Cement Strength Class (MPa) • Ποσότητα Τσιμέντου, νερού, αδρανών (kg/m^3 σκυρ.), τύπος αδρανών και d_{max} και πυκνότητες (kg/m^3). • Ποσότητα, πυκνότητα και activity coefficients προσθέτων τύπου II. • Ποσότητα, τύπος και πυκνότητα προσθέτων τύπου I • Ποσοστό κενών αέρα (%). • Ποσοτική σύσταση Τσιμέντου: Χημική σύσταση Τσιμέντου και πρόσθετων τύπου II (%) 	<ul style="list-style-type: none"> • Επικάλυψη (mm) + COV (%)
Συνθήκες Περιβαλλοντικής Έκθεσης			
<ul style="list-style-type: none"> • Συγκέντρωση Cl^- στην εξωτερική επιφάνεια (kg/m^3 σκυρ.) • Χρόνος για μέγιστη συγκέντρωση Cl^- (years) • Κρίσιμη συγκέντρωση Cl^- (kg/m^3 σκυρ.) + COV(%) • Θερμοκρασία έκθεσης ($^{\circ}\text{C}$) 	<ul style="list-style-type: none"> • Συγκέντρωση Cl^- (free) στην εξωτερική επιφάνεια (g/l) + SD • Αρχική συγκέντρωση Cl^- (%) + SD • Κρίσιμη συγκέντρωση Cl^- • Θερμοκρασία έκθεσης ($^{\circ}\text{C}$)+SD 	<ul style="list-style-type: none"> • Συγκέντρωση Cl^- (free) στην εξωτερική επιφάνεια (kg/m^3 sol) • Αρχική συγκέντρωση Cl^- (kg/m^3 sol) • Κρίσιμη συγκέντρωση Cl^- (kg/m^3 σκυρ.) • Πάχος στοιχείου (mm) 	<ul style="list-style-type: none"> • Συγκέντρωση Cl^- στην εξωτερική επιφάνεια (% σκυρ.) + COV (%) • Αρχική συγκέντρωση Cl^- • Κρίσιμη συγκέντρωση Cl^- • Μέση ετήσια θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$) • Environmental transfer variable
Συντελεστής Διαχυτότητας Χλωριόντων			
<ul style="list-style-type: none"> • Φαινόμενος Συντελεστής Διαχυτότητας Cl^- (28 days) D_{28} ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) + COV (%) • Maturity factor m + COV (%) 	<ul style="list-style-type: none"> • Φαινόμενος Συντελεστής Διαχυτότητας Cl^- (6 months) D_{6m} ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) • Βαθμός ενυδάτωσης, Concrete porosity * • Time-dependent binding factor $^{*}\text{Cl}$ 	<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^{*R5} • Cl^- saturation concentration in solid phase^{*R6} 	<ul style="list-style-type: none"> • Φαινόμενος Συντελεστής Διαχυτότητας Cl^- (t days) • Προφίλ Cl^- από το οποίο υπολογίζεται ο παραπάνω
Παράγοντες Χρόνου			
<ul style="list-style-type: none"> • Propagation Period (years) • Hydration period (years) 	<ul style="list-style-type: none"> • Concrete age at exposure (days), • Age factor (n) due to desiccation Cl^- • 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 5 : Πίνακας δεδομένων που απαιτούνται από κάθε μοντέλο (Δέμης, 2015).

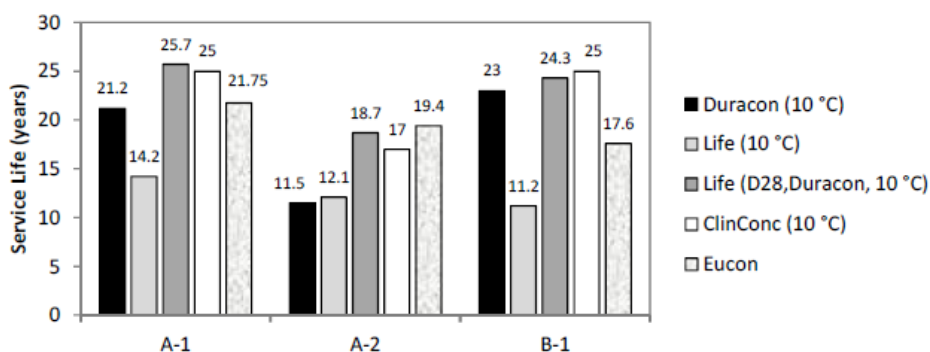
Life 365	ClinConc	Eucon	Duracon
Προφίλ χλωριόντων			
<ul style="list-style-type: none"> • Συνολικά Cl⁻ (kg/m³ σκυρ.) κατά βάθος x (mm) • Επίπεδο συγκέντρωσης Cl⁻ στην επιφάνεια του χάλυβα έως την χρονική στιγμή έναρξης της διάβρωσης • Μεταβολή του συντελεστή διαχυτότητας Cl⁻ με το χρόνο έκθεσης 	<ul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

Πίνακας 6 : Πίνακας αποτελεσμάτων που εξάγονται από κάθε μοντέλο (Δέμης, 2015).

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

Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά της δοκιμής (Δέμης, 2015).

Στη συνέχεια ο συγγραφέας συγκρίνει τα αποτελέσματα από την ανάλυση κάθε μοντέλου σύμφωνα με το ακόλουθο σχήμα :



Σχήμα 21 : Σχηματική απεικόνιση εκτίμησης διάρκειας ζωής υπό τη δράση χλωριόντων (Δέμης, 2015).

Ενώ τα συμπεράσματα στα οποία καταλήγει η έρευνα είναι τα εξής :

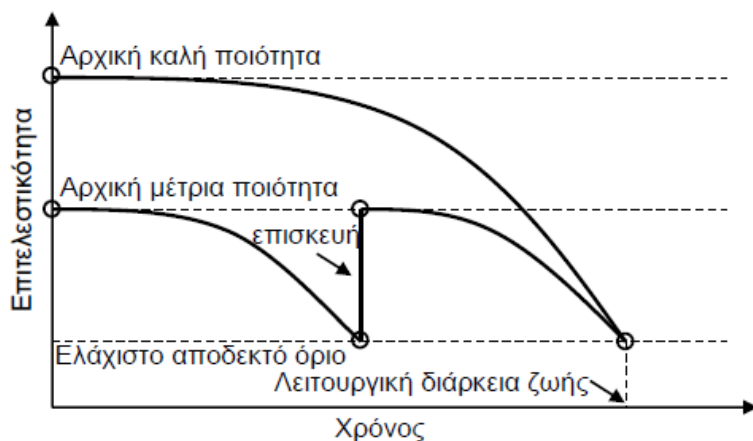
- i. Όλα τα μοντέλα απέδειξαν το πρόβλημα της ανθεκτικότητας, όμως ανάλογα με την παραμετροποίηση του (ειδικά όσον αφορά την προσομοίωση της διάχυσης χλωριδίων) το κάθε μοντέλο έδωσε διαφορετικά αποτελέσματα για τη διάρκεια ζωής και τη συγκέντρωση χλωριδίων σε κάποιο βάθος από την επιφάνεια του σκυροδέματος, επομένως είναι αρμοδιότητα του μηχανικού να επιλέξει πιο ανταποκρίνεται καλύτερα στις συνθήκες που καλείται να αντιμετωπίσει.
- ii. Λόγω της πρόωρης υποβάθμισης των κτηρίων απαιτείται βηματική προσέγγιση ενδεδειγμένου σχεδιασμού ανθεκτικότητας, όπου να συνυπολογίζονται παράγοντες όπως ο τύπος και η θέση του δομικού στοιχείου, η τοποθεσία της κατασκευής και οι περιβαλλοντικές συνθήκες έκθεσης της κατασκευής.

3 Εκτίμηση διάρκειας ζωής

3.1 Γενικά στοιχεία

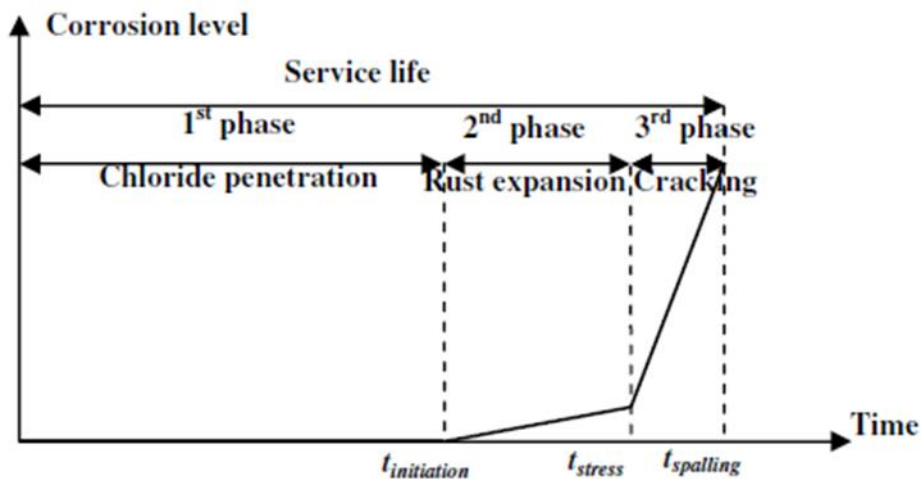
Σε γενικές γραμμές η εκτίμηση διάρκειας ζωής καθώς και η ανάλυση κόστους κύκλου ζωής των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα αποτελούν έννοιες συνυφασμένες με το σχεδιασμό ανθεκτικότητας των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Είναι γνωστό πως διάρκεια ζωής μιας κατασκευής ορίζεται ως το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η κατασκευή διατηρεί την επιτελεστικότητά της σε αποδεκτό επίπεδο έπειτα από κατάλληλη επισκευή (Αποστολόπουλος, 2006). Το τέλος της διάρκειας ζωής επέρχεται με τη ρηγμάτωση του σκυροδέματος κάλυψης του οπλισμού και τη μείωση της φέρουσας ικανότητας. Σύμφωνα με έρευνα, ένα καλό σημείο έναρξης των διορθωτικών επεμβάσεων στις κατασκευές σκυροδέματος είναι μόλις εμφανιστούν οι ρηγματώσεις καθώς με κατάλληλες εργασίες αποκατάστασης προλαμβάνεται η μείωση της φέρουσας ικανότητας του κτιρίου (Τεταγιώτη, 2011). Εργαστηριακά πειράματα έδειξαν πως, η ρηγμάτωση του σκυροδέματος γίνεται εμφανής όταν το ποσοστό απώλειας μάζας της διατομής ισούται με το μισό περίπου του λόγου του πάχους κάλυψης προς τη διάμετρο οπλισμού. Πέρα από εκείνο το σημείο επέρχεται μείωση της αντοχής. Για την καλύτερη όμως κατανόηση του ορισμού της διάρκειας ζωής μιας κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα απαιτείται να διευκρινιστεί πως ως επιτελεστικότητα της κατασκευής ορίζεται « *...Η ικανότητα της κατασκευής να επιτελεί το σκοπό της όσον αφορά τη λειτουργικότητα, την ασφάλεια και την εμφάνισή της...*» (Ρούτουλας, 2012a). Επιπλέον για τον ίδιο λόγο, αξίζει να σημειωθεί πως, σύμφωνα με αρκετούς ερευνητές (Δέμης, 2015; Παπαδάκης, 2004), ως ανθεκτικότητα των κατασκευών Ο.Σ. ορίζεται « *...η ικανότητα μίας κατασκευής να αντιστέκεται σε επιθετικές περιβαλλοντικές δράσεις χωρίς η επιτελεστικότητά της να υποχωρεί κάτω από κάποιο αποδεκτό όριο...*» (Ρούτουλας, 2012a). Επομένως λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω ορισμούς συνεπάγεται ότι φθορά της κατασκευής αποτελεί οποιαδήποτε πτώση του βαθμού επιτελεστικότητας και εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες, όπως φυσικούς, χημικούς, βιολογικούς ή και συνδυασμό τους. Επομένως λόγω της φθοράς των κατασκευών, είτε με τη διάβρωση του οπλισμού, είτε με τα σημάδια πρόωρης υποβάθμισης του σκυροδέματος και γενικότερα με τη διαχείριση κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, γίνεται αναγκαία η ένταξη του σχεδιασμού ανθεκτικότητας στο στάδιο της μελέτης μιας κατασκευής, ούτως ώστε να

προλαμβάνεται η διάβρωση και να αποφεύγονται πρώιμες φθορές και ρηγματώσεις που προκαλούνται από περιβαλλοντικούς και άλλους παράγοντες (Luca Bertolini, 2008; V. G. Papadakis, 2005; Δέμης, 2015).



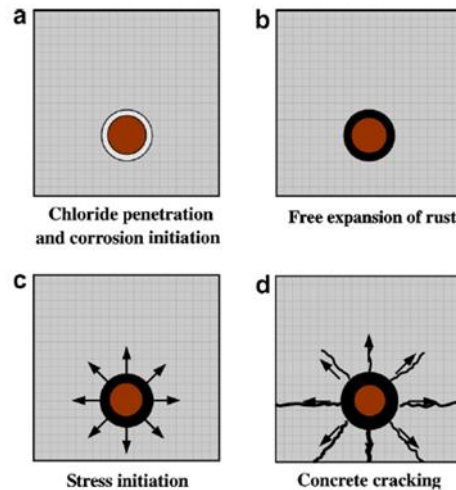
Σχήμα 22: Σχέση επιτελεστικότητας – Διάρκειας ζωής κατασκευών ΟΣ (Παπαδάκης, 2004).

Η ανθεκτικότητα των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος επηρεάζεται από τη διείσδυση χλωριόντων και την ευαισθησία του οπλισμού στη διάβρωση που προκαλείται από χλωριόνταν όταν εκτίθεται σε παραθαλάσσιο περιβάλλον ή σε άλατα αποπαγοποίησης. Μόλις η συγκέντρωση των χλωριόντων στην επιφάνεια το οπλισμού προσεγγίσει την οριακή τιμή και υπάρχει επαρκής παρουσία οξυγόνου και υγρασίας, η διάβρωση του οπλισμού θα ξεκινήσει. Μετά την έναρξη της διάβρωσης, τα προϊόντα της (οξειδία του σιδήρου) καταλαμβάνουν περισσότερο χώρο εντός του σκυροδέματος, καθώς ως γνωστόν, έχουν μικρότερη πυκνότητα. Ενώ η διαδικασία της διάβρωσης βρίσκεται σε εξέλιξη, τα προϊόντα της συσσωρεύονται σε μία περιοχή, μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος, ασκώντας έτσι εκτεταμένη πίεση στο σκυροδέμα που τα περιβάλλει. Η πίεση αυτή, αναπτύσσεται σε τέτοιο βαθμό που προκαλεί την έναρξη ρηγματώσεως του σκυροδέματος και τη διάδοσή της. Επιπλέον, εκτός από τη ρηγματώση του σκυροδέματος, η διάβρωση λόγω χλωριδίων οδηγεί και σε απώλεια της συνάφειας μεταξύ σκυροδέματος και οπλισμού, όπως και μείωση του εμβαδού διατομής του οπλισμού, γεγονός που οδηγεί σε μείωση της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής (Page & Treadaway, 1982). Η συνολική διαδικασία της διάβρωσης οπλισμού λόγω χλωριδίων μπορεί να χωριστεί σε τρεις φάσεις (Chen & Mahadevan, 2008).



Σχήμα 23: Απεικόνιση των φάσεων της διάβρωσης λόγω διείσδυσης χλωριδίων στο Ο.Σ. (Chen & Mahadevan, 2008).

Η πρώτη φάση χαρακτηρίζεται από τη διείσδυση των χλωριδίων στο σκυρόδεμα. Κατά τη συγκεκριμένη φάση τα χλωρίδια που είναι συγκεντρωμένα στην επιφάνεια του σκυροδέματος, διαπερνούν το σκυρόδεμα της επικάλυψης των ράβδων του οπλισμού και καταλήγουν στην επιφάνεια του οπλισμού. Όταν η συγκέντρωση των χλωριδίων φθάσει την οριακή τιμή για την έναρξη της διάβρωσης τη χρονική στιγμή $t_{initiation}$, θεωρείται ότι ξεκινά η δεύτερη φάση. Η δεύτερη φάση χαρακτηρίζεται από τη συσσώρευση των προϊόντων της διάβρωσης (σκουριάς) στην περιοχή μεταξύ σκυροδέματος και οπλισμού. Μόλις πληρωθούν εντελώς τα κενά στη συγκεκριμένη περιοχή σε χρόνο t_{stress} , τα προϊόντα της διάβρωσης θα προκαλούν εκτεταμένη πίεση και κατά συνέπεια ρωγμές στο σκυρόδεμα που τα περιβάλλει, γεγονός το οποίο σηματοδοτεί την έναρξη της τρίτης φάσης. Κατά την τρίτη φάση, οι ρωγμές στο σκυρόδεμα διαδίδονται μέχρι το κρίσιμο σημείο καταστάσεων αστοχίας όπως ο θρυμματισμός και η αποκόλληση του σκυροδέματος κάλυψης του οπλισμού σε χρόνο $t_{spalling}$, κατά τον οποίο ορίζεται και το τέλος της τρίτης φάσης (Chen & Mahadevan, 2008).



Σχήμα 24: Τα στάδια της διαδικασίας της διάβρωσης λόγω χλωριδίων του οπλισμού Ο.Σ.(Chen & Mahadevan, 2008).

Ανάμεσα στις τρεις αυτές φάσεις, η πρώτη συνήθως διαρκεί για ένα μεγάλο χρονικά διάστημα, ανάλογα με την αντοχή έναντι της διάβρωσης του οπλισμού, το πάχος και την ποιότητα του σκυροδέματος της επικάλυψης των ράβδων του οπλισμού και την περιεκτικότητα σε χλωριόντα του περιβάλλοντος έκθεσης. Η δεύτερη φάση είναι αισθητά μικρότερη από την πρώτη και εξαρτάται κυρίως από τη διαπερατότητα του σκυροδέματος. Η τρίτη φάση είναι η πιο σύντομη, νοουμένου ότι οι ρωγμές που προκαλούνται από τα προϊόντα της διάβρωσης διαδίδονται γρήγορα στο σκυρόδεμα.

Λαμβάνοντας υπόψη μόνο τη διάβρωση που προκαλείται από τη διείσδυση χλωριόντων στο σκυρόδεμα, η συνολική διάρκεια ζωής μιας κατασκευής οπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να οριστεί ως το άθροισμα των τριών αυτών φάσεων. Υπό συγκεκριμένες όμως συνθήκες, μπορεί να οριστεί από ένα αποδεκτό επίπεδο διάβρωσης (Chen & Mahadevan, 2008).

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός, ότι κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών διάφορα φυσικά, χημικά αριθμητικά και εμπειρικά μοντέλα έχουν προταθεί με απότερο σκοπό την εκτίμηση της φθοράς που προκαλείται από τη διάβρωση του οπλισμού λόγω διείσδυσης χλωριόντων στο οπλισμένο σκυρόδεμα, αλλά και γενικότερα με σκοπό την εκτίμηση της διάρκειας ζωής κατασκευών που υφίστανται αυτό το είδος φθοράς. Τα κυριότερα από τα συγκεκριμένα μοντέλα θα αναφερθούν στην ακόλουθη ενότητα.

3.2 Ανασκόπηση των μοντέλων εκτίμησης της διάρκειας ζωής κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα σε παραθαλάσσιο περιβάλλον

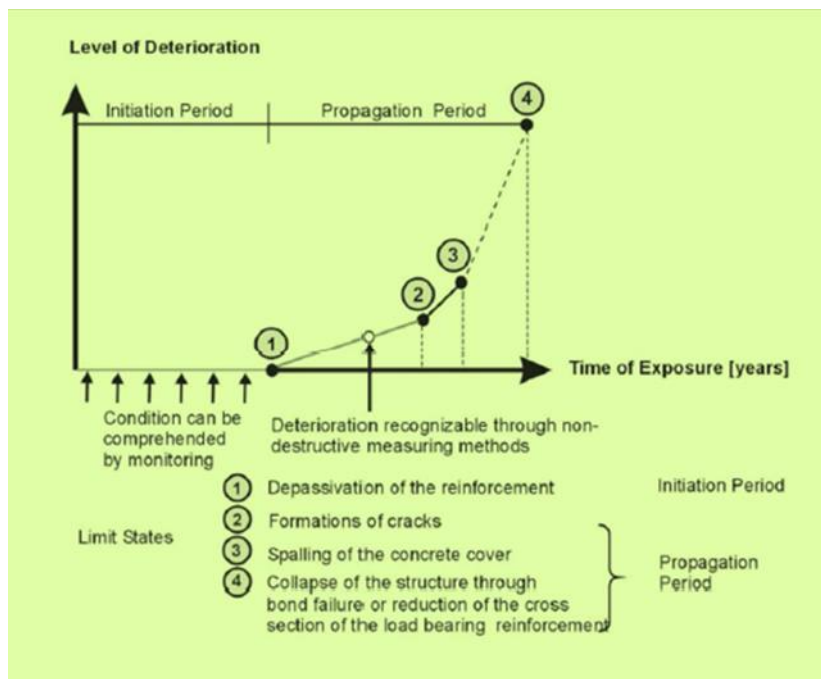
Τα μαθηματικά μοντέλα τα οποία έχουν δημιουργηθεί, όλο αυτό το διάστημα, με σκοπό την εκτίμηση της ανθεκτικότητας των κατασκευών, πέρα από τη φέρουσα ικανότητα, στηρίζονται στους περιβαλλοντικούς παράγοντες, στις ιδιότητες των υλικών και τους συντελεστές ασφαλείας που επηρεάζουν μια κατασκευή και συνεπώς πρέπει να συμπεριλαμβάνονται στη στατική μελέτη μιας κατασκευής.

Όμως, τα μοντέλα εκτίμησης της διάρκειας ζωής κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα σε παραθαλάσσιο περιβάλλον στηρίζονται στην εκτίμηση της διείσδυσης χλωριόντων είτε από την άμεση επαφή με θαλασσινό νερό είτε λόγω της παρουσίας ανιόντων χλωριδίου στον ατμοσφαιρικό αέρα των συγκεκριμένων περιοχών. Επομένως γίνεται σύγκριση της εκτιμώμενης τιμής με μία οριακή τιμή «κατώφλι» περιεκτικότητας χλωριδίων για τον υπολογισμό του χρόνου έναρξης της διάβρωσης (Τεταγιώτη, 2011). Παρόλο που τα τελευταία χρόνια τα μοντέλα αυτά αναπτύσσονται με εκπληκτικό ρυθμό, υπάρχει αβεβαιότητα λόγω έλλειψης δεδομένων και πλήρους κατανόησης κάποιων φαινομένων (Nilsson, 2001). Επιπλέον υπάρχουν σφάλματα ακόμη και στην εκτίμηση της διείσδυσης ανιόντων χλωριδίου τα οποία κατατάσσονται σε κατηγορίες όπως : φυσικά, στατιστικά σφάλματα, αβεβαιότητα του μοντέλου και της απόφασης. Το φυσικό σφάλμα έγκειται στη φύση των μεταβλητών πχ η διακύμανση της τιμής της συγκέντρωσης χλωριδίων ή της τιμής του σκυροδέματος κάλυψης. Στατιστικά σφάλματα οφείλονται στην εκτίμηση στατιστικών παραμέτρων από περιορισμένο αριθμό δειγμάτων, ενώ η αβεβαιότητα των μοντέλων έγκειται στη χρήση απλοποιημένων εξισώσεων μοντελοποίησης φαινομένων όπως η διάχυση των χλωριδίων στο σκυρόδεμα. Η αβεβαιότητα απόφασης οφείλεται στον ορισμό αποδεκτών κριτηρίων αστοχίας (πχ του σημείου έναρξης της διάβρωσης ή της ανωτάτης περιεκτικότητας χλωριδίων στο σκυρόδεμα).

Τα αποδεκτά κριτήρια αστοχίας συνυπολογίζουν τη σπουδαιότητα της κατασκευής, τον κίνδυνο απώλειας ζωής και τραυματισμών, το κόστος επισκευής και το αντίκτυπο στους χρήστες (Z Lounis, 2003).

Τα μοντέλα εκτίμησης διάρκειας ζωής κατατάσσονται σε : φυσικά, εμπειρικά, στοχαστικά (τα οποία στηρίζονται στις πιθανότητες) και σε μοντέλα τα οποία στηρίζονται σε βασικούς φυσικούς νόμους (Τεταγιώτη, 2011).

Όπως προαναφέρθηκε, σύμφωνα με τον (Tuutti, 1982) και άλλους επιστήμονες (Luca Bertolini, 2008; Ferreira, 2004; V. G. Papadakis, 2005; Webster, 2000) ο μηχανισμός της διάβρωσης του χάλυβα οπλισμού κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα αποτελείται από δύο περιόδους : την περίοδο έναρξης (initiation time) και την περίοδο διάδοσης (propagation time).



Σχήμα 25: Διάγραμμα σταδίων διάρκειας ζωής κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα (Δέμης, 2015).

3.2.1 Ανασκόπηση των μοντέλων διείδυσης και κυκλοφορίας ανιόντων χλωριδίου

Για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1970 ο Collepardi περιέγραψε τη διείδυση των χλωριδίων στο σκυρόδεμα, χρησιμοποιώντας τους νόμους του Fick (Collepardi, 1972). Με βάση τη συγκεκριμένη έρευνα, αρκετά μοντέλα που δημιουργήθηκαν αργότερα βασίστηκαν στους νόμους του Fick για τη μοντελοποίηση της διείδυσης χλωριδίων στο σκυρόδεμα. Όμως, ήδη από τη δεκαετία του 1980, αποδείχθηκε ότι τα μοντέλα αυτά δεν απεικονίζουν πραγματικά το φαινόμενο της διείδυσης των χλωριδίων στο σκυρόδεμα, καθώς βασίζονται στην απλουστευτική παραδοχή ότι το σκυρόδεμα είναι ομογενές, ισοτροπικό και αδρανές υλικό,

το οποίο δεν ισχύει (Ferreira, 2004). Ωστόσο, τα συγκεκριμένα μοντέλα συνεχίζουν, στις μέρες μας, να συνιστούν το θεωρικό υπόβαθρο τέτοιων μελετών, καθώς επίσης έχουν εισηγηθεί και προσαρμογές οι οποίες διορθώνουν το πρόβλημα με τις παραδοχές των νόμων του Fick (Τεταγιώτη, 2011).

Για προκαθορισμένες συνοριακές συνθήκες και σταθερό συντελεστή διάχυσης η εφαρμογή του νόμου του Fick, στο μοντέλο που εφαρμόστηκε για πρώτη φορά από τον (Colleparidi, 1972) γνωστό και ως ERFC model (Error Function Complement ή συμπλήρωμα συνάρτησης σφάλματος) (Luping Tang, Utgenannt, Lindvall, & Boubitsas, 2012) έχει ως εξής :

$$C(x, t) = C_I + (C_S - C_I) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (3.1)$$

Με συνοριακές συνθήκες : $C(x,t) = C_S$ για $x = 0$ & $t > 0$

Και : $C(x,t) = C_I$ για $x > 0$ και $t = 0$

Όπου :

$C(x,t)$: Το περιεχόμενο χλώριο σε βάθος x και χρόνο t , σε Kg/m^3

C_I : Το αρχικό περιεχόμενο χλώριο, σε Kg/m^3

C_S : Το περιεχόμενο χλώριο στην επιφάνεια του σκυροδέματος, σε Kg/m^3

x : το βάθος, σε m

t : ο χρόνος, σε s

erf : η συνάρτηση λάθους

D : ο συντελεστής διάχυσης του χλωρίου σε m^2/s

Για να καθοριστεί ο χρόνος που απαιτείται ώστε το περιεχόμενο χλώριο να προσεγγίσει μια κρίσιμη τιμή σε βάθος x , θεωρείται πως $C(x,t) = C_{CR} - C_I$ και η παραπάνω εξίσωση μετασχηματίζεται ως εξής ;

$$t = \frac{\left(\frac{x}{2 \operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{C_{CR} - C_I}{C_S - C_I} \right)} \right)^2}{D} \quad (3.2)$$

Αρχικά ο συντελεστής διάχυσης D είχε θεωρηθεί ανεξάρτητη από το χρόνο παράμετρος, όμως ο (Takewaka, Yamaguchi, & Maeda, 2003) θεώρησε ότι πρέπει να περιγράφεται από εκθετική συνάρτηση σε σχέση με το χρόνο. Μετά από πειράματα σε εργαστήρια από τους (Maage, 2003) και (Mangat & Molloy, 1994) και μετά από μετρήσεις σε πραγματικές κατασκευές από τον (Sandberg, Tang, & Andersen, 1998) αποδείχθη ότι ο συντελεστής διάχυσης και η ηλικία του σκυροδέματος συνδέονται την ακόλουθη σχέση :

$$D(t) = D_R \left(\frac{t_R}{t}\right)^\alpha \quad (3.3)$$

Όπου :

D_R : συντελεστής διάχυσης σε χρόνο t_R , σε m^2/s

t_R : χρόνος κατά τον οποίο μετράται ο συντελεστής D_R , σε s .

α : συντελεστής που δηλώνει την επίδραση της ηλικίας και της ενυδάτωσης του σκυροδέματος στο συντελεστή διάχυσης χλωριδίων στο σκυρόδεμα, δίνεται από πίνακες.

Αναφορικά με την επιφανειακή συγκέντρωση χλωριδίων ορισμένοι επιστήμονες υποστηρίζουν ότι μεταβάλλεται ανάλογα με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου. Σύμφωνα με τον (Ferreira, 2004) η επιφανειακή συγκέντρωση δίνεται από την παρακάτω εξίσωση :

$$C_s = C_0 + S[(t - t_R)D_A \left(\frac{t_R}{t}\right)^\alpha] \quad (3.4)$$

Όπου :

S : Συντελεστής που εξαρτάται από την περιεκτικότητα χλωριδίων και την ποιότητα τσιμέντου

P : Συντελεστής που εξαρτάται από το ρυθμό αύξησης της επιφανειακής συγκέντρωσης χλωριδίων.

Στη συνέχεια παρατίθενται μοντέλα πρόβλεψης της διάβρωσης που προκαλείται λόγω διείσδυσης χλωριόντων στα σκυρόδεμα.

3.2.1.1 Εμπειρικά μοντέλα

- Έρευνες που διεξήχθησαν και ανάλυση πραγματικών δεδομένων απέδειξαν ότι ο συντελεστής διάχυσης δεν είναι σταθερός, συνεπώς δεν αποτελεί ιδιότητα του υλικού και επηρεάζεται από το χρόνο και το περιβάλλον έκθεσης. Έτσι στη Δανία ερευνητές

ανέπτυξαν το παρακάτω μοντέλο γνωστό και ως μοντέλο Mejlbro – Poulsen (Frederiksen, NILSSON, & POULSEN, 1997) :

$$D_a = D_{aex} \left(\frac{t_{ex}}{t} \right)^a \quad (3.5)$$

$$C_S = C_I + S(D_a * t)^p \quad (3.6)$$

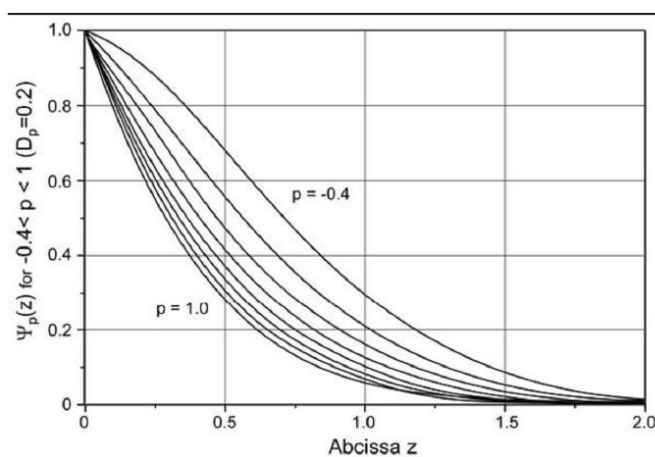
$$C(x, t) = C_I + (C_S - C_I) * \Psi_p * \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a t}} \right) \quad (3.7)$$

Όπου :

t : η ηλικία της κατασκευής, σε χρόνια

t_{ex} : η ηλικία της κατασκευής κατά την έκθεση, σε χρόνια

Ψ : μια σειρά από Γ-συναρτήσεις όπου όταν το Ψ = 0 τότε η εξίσωση (3.7) παίρνει τη μορφή της εξίσωσης (3.1).



Σχήμα 26: Γράφημα των τυπικών Mejlbro Ψ – συναρτήσεων (Frederiksen et al., 1997).

α : συντελεστής (ίσως με 0,64 από πειράματα).

Έτσι ο συντελεστής διάχυσης σε 100 χρόνια D₁₀₀ κυμαίνεται μεταξύ 6,6 εως 7,4 * 10⁻¹⁴ m²/s.

- Ο Clear έπειτα από έρευνα σε 124 πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος σε εξωτερικές συνθήκες, εμποτισμένες με 2% διάλυμα χλωρίου για 830 ημέρες κατέληξε στη δημιουργία της παρακάτω σχέσης για τη διάρκεια ζωής τους :

$$SL = \frac{129}{w/c} * \frac{c^{1.22}}{CL^{0.42}} \quad (3.8)$$

Όπου :

SL : Διάρκεια ζωής

w/c : λόγος νερού προς τσιμέντο

c : πάχος κάλυψης

CL : Συγκέντρωση χλωριδίων

- Ο (Morinaga, 1992) στο εμπειρικό μοντέλο που δημιούργησε συσχέτισε τη διάρκεια ζωής της κατασκευής με το βαθμό ζημιάς του οπλισμού που οδηγεί σε ρηγμάτωση με το μέτρο της διάβρωσης σε πραγματικό περιβάλλον.

$$t = \frac{Q_{cr}}{q} \quad (3.9)$$

Όπου :

t : Η διάρκεια ζωής της κατασκευής σύμφωνα με τη στατική μελέτη

Q_{cr} : Ο βαθμός διάβρωσης που οδηγεί σε ρηγμάτωση του σκυροδέματος (10⁻⁴ g/cm²)

$$Q_{cr} = 0.602(1 + \frac{2c}{d})^{0.85} * d \quad (3.10)$$

c : πάχος κάλυψης, σε mm

d : η διάμετρος των ράβδων του οπλισμού, σε mm

q : το μέτρο της διάβρωσης σε πραγματικό περιβάλλον (10⁻⁴ g/cm²/god.)

- Το μοντέλο του ACI – Life 365

Το συγκεκριμένο μοντέλο αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 2000 στη Βόρεια Αμερική από τους (Thomas & Bentz, 2001). Το μοντέλο χρησιμοποιεί το 2ο νόμο του Fick της εξαρτώμενης από το χρόνο συνάρτησης διάχυσης χλωριδίων και με βασική παράμετρο την ολική περιεκτικότητα σε χλωρίδια.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D(t) \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (3.11)$$

Όπου :

$$D(t) = D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad (3.12)$$

D_{ref} : Ο φαινόμενος συντελεστής διάχυσης κατά τον χρόνο αναφοράς της έκθεσης.

t_{ref} : Ο χρόνος αναφοράς της έκθεσης.

m : σταθερά.

Προκειμένου να αποφευχθεί το γεγονός ο συντελεστής διάχυσης να μειώνεται απείρως με το χρόνο, η σχέση φαίνεται στην εξίσωση (3.11) ισχύει μέχρι και 30 χρόνια. Πέρα από το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα η τιμή η οποία υπολογίστηκε στα τριάντα ακριβώς έτη D_{30} θεωρείται ότι παραμένει σταθερή σε όλο το υπόλοιπο διάστημα της περιόδου ανάλυσης (Luring Tang et al., 2012). Η επίδραση της τοπικής θερμοκρασίας στο συντελεστή διάχυσης έχει επίσης ληφθεί υπόψη στο συγκεκριμένο μοντέλο. Το μοντέλο επιλέγει το ρυθμό συσσώρευσης χλωριδίων και τη μέγιστη περιεκτικότητα χλωριδίων στην επιφάνεια, με βάση τον τύπο της κατασκευής, το περιβάλλον έκθεσης και τη γεωγραφική τοποθεσία της κατασκευής. Επιπλέον το μοντέλο δίνει διάφορες τιμές για προσθήκη ποζολανικών υλικών. Προφανώς το μοντέλο είναι εμπειρικό. Από την άλλη όμως πλευρά, το συγκεκριμένο μοντέλο είναι από τα πιο ολοκληρωμένα καθώς, έχει ενσωματώσει τη διείδυση χλωριδίων στο σκυρόδεμα, την περίοδο έναρξης και διάδοσης της διάβρωσης, το χρονοδιάγραμμα επισκευών και το κόστος κύκλου ζωής της κατασκευής προκειμένου να δώσει στο χρήστη ένα εργαλείο για τον προγραμματισμό της συντήρησης κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Επιπλέον για την ένταξη του χρόνου ακολουθείται μια αριθμητική προσέγγιση, ως εκ τούτου για την εφαρμογή του μοντέλου απαιτείται ειδικό λογισμικό (Luring Tang et al., 2012).

3.2.1.2 Φυσικοχημικά μοντέλα

Μοντέλα τα οποία βασίζονται στην κυκλοφορία και τη δέσμευση χλωριδίων από το σκυρόδεμα με βάση τους νόμους της φυσικής και της χημείας, αποτελούν μια διαφορετική προσέγγιση της εκτίμησης της διείδυσης χλωριδίων στο οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι

προβλέψεις αυτές στηρίζονται σε θεωρητικά μαθηματικά μοντέλα που περιγράφουν κατάλληλα το μηχανισμό της διείσδυσης χλωριδίων στο σκυρόδεμα.

- Το μοντέλο ClinConc (Cl in Concrete) αποτελεί ένα τέτοιου είδους μοντέλο. Αναπτύχθηκε στα μέσα τις δεκαετίας του 1990 από τους (L Tang & Nilsson, 1996). Το συγκεκριμένο μοντέλο αποτελείται από δύο κύριες διαδικασίες : Την προσομοίωση της διείσδυσης των ελεύθερων χλωριόντων στο διάλυμα πόρων του σκυροδέματος και τον υπολογισμό της κατανομής της συνολικής περιεκτικότητας χλωριδίων στο σκυρόδεμα. Απαιτεί ως παραμέτρους που εισάγονται από το χρήστη, τη σύνθεση του μίγματος του οπλισμένου σκυροδέματος και το συντελεστή διάχυσης των χλωριδίων στο σκυρόδεμα. Με αυτά τα δεδομένα το πρόγραμμα κάνει πρόβλεψη της διείσδυσης χλωρίου στο σκυρόδεμα λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμική δέσμευση του χλωρίου στο σκυρόδεμα. Έτσι περιγράφει τη μεταφορά χλωριδίων στο σκυρόδεμα με πιο επιστημονικό τρόπο από τα εμπειρικά μοντέλα. Η συγκέντρωση των ελεύθερων χλωριδίων στο σκυρόδεμα σε βάθος x στο συγκεκριμένο μοντέλο περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση :

$$\frac{C - C_I}{C_S - C_I} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\xi_D D_{6m} \left(\frac{t_{6m}}{t}\right)^n \left[\left(1 + \frac{t_{ex}}{t}\right)^{1-n} - \left(\frac{t_{ex}}{t}\right)^{1-n}\right]_{st}}}\right) \quad (3.13)$$

Όπου :

C : Η συγκέντρωση ελεύθερων χλωριδίων στο διάλυμα πόρων σε βάθος x .

C_I : Η συγκέντρωση ελεύθερων χλωριδίων στο διάλυμα πόρων αρχικά στο σκυρόδεμα.

C_S : Η συγκέντρωση ελεύθερων χλωριδίων στο διάλυμα πόρων στην επιφάνεια του σκυροδέματος.

D_{6m} : Ο συντελεστής διάχυσης που μετρήθηκε σε δοκιμή RCM (δοκιμή σύντομης μετανάστευσης χλωρίου).

t_{ex} : Η ηλικία του σκυροδέματος κατά την έναρξη της έκθεσης σε χλωρίδια.

t : Η διάρκεια της έκθεσης

ξ_D : διορθωτικός συντελεστής του συντελεστή διάχυσης λόγω διαφορών σε πραγματικό περιβάλλον

n : παράγοντας που αντιπροσωπεύει τη μείωση της ικανότητας διάχυσης σε σχέση με το χρόνο.

3.2.1.3 Μοντέλα που στηρίζονται σε θεμελιώδεις φυσικούς νόμους

- Το μοντέλο του οργανισμού DuraCrete (Engelund, Edvardsen, & Mohr, 2000) προτείνει τον υπολογισμό του συντελεστή διάχυσης χλωριδίων στο σκυρόδεμα σύμφωνα με τον εξής τύπο :

$$D_a = k_{e,cl} * k_{c,cl} * D_{RCM,0} * \left(\frac{t_0}{t+t_{ex}}\right)^{n_{cl}} \quad (3.14)$$

Όπου :

$D_{RCM,0}$: Συντελεστής μετανάστευσης χλωριδίων ο οποίος μετράται από τη μέθοδο Nordtest NT BUILD 492 σε περίοδο αναφοράς για σκυρόδεμα $t_0 = 28$ ημέρες.

t_0 : περίοδος αναφοράς για σκυρόδεμα 28 ημέρες.

$k_{e,cl}$: συντελεστής που λαμβάνει υπόψη το περιβάλλον του σκυροδέματος για την διείσδυση των χλωριδίων.

$k_{c,cl}$: συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τη σκλήρυνση του σκυροδέματος για την διείσδυση των χλωριδίων.

n_{cl} : συντελεστής ηλικίας που εκφράζει την εξάρτηση του συντελεστή διάχυσης από την ηλικία του σκυροδέματος.

Όπως παρατηρούμε το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιεί ένα εμπειρικό συντελεστή τον $k_{e,cl}$ ούτως ώστε να γεφυρώσει το χάσμα των διαφορετικών συνθηκών πεδίου και εργαστηρίου. Και πάλι όμως απαιτεί αρκετές εξειδικευμένες παραμέτρους για να καθοριστεί σωστά ο συγκεκριμένος συντελεστής και να υπολογιστεί με ακρίβεια η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής της κατασκευής. Ο συντελεστής $k_{e,cl}$ υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση :

$$k_{e,cl} = \exp\left[b_e \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}}\right)\right] \quad (3.15)$$

Όπου :

b_e : μεταβλητή παλινδρόμησης που κυμαίνεται μεταξύ 3500K και 5500K με μέση τιμή 4800K και τυπική απόκλιση 700K.

T_{ref} : θερμοκρασία αναφοράς κατά την οποία μετράται ο συντελεστής μετανάστευσης χλωριδίων.

T_{real} : πραγματική θερμοκρασία έκθεσης.

Ενώ η έναρξη της διάβρωσης περιγράφεται από τη σχέση :

$$x(t) = 2 * k * \sqrt{D_{RCM,0} * k_{e,cl} * k_{c,cl} * t * \left(\frac{t_0}{t+t_{ex}}\right)^{n_{cl}}} \quad (3.16)$$

$$\text{Με: } k = \text{erf}^{-1}\left(1 - \frac{c_{cr}}{c_s}\right) \quad (3.17)$$

- Οι (Oh & Jang, 2003) στο μοντέλο που ανέπτυξαν θεωρούν ότι η διάχυση χλωρίου στο σκυρόδεμα εξαρτάται από τη θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία και το χρόνο. Για την επίλυση των σχέσεων χρησιμοποίησαν πεπερασμένα στοιχεία. Όσον αφορά τις συνθήκες έκθεσης για κατασκευές εμβαπτισμένες στο νερό θεωρούν σταθερή την περιεκτικότητα ανιόντων χλωριδίου, ενώ για τη ζώνη παλίρροιας θεωρούν ημιτονοειδή τη μεταβολή της περιεκτικότητας σε χλωρίδια με περίοδο μια ημέρα. Η μεταβολή αυτή περιγράφεται από την εξής σχέση :

$$\bar{C}_0 = \frac{C_0^{max} - C_0^{min}}{2} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + \frac{C_0^{max} + C_0^{min}}{2} \quad (3.18)$$

Ενώ η μεταφορά και η αντίδραση των χλωριδίων δίνεται από την εξίσωση :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{D_c}{\gamma} \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{1}{\gamma} \frac{\partial \bar{u} C}{\partial x} \quad (3.19)$$

Όπου :

C : Συνολική ποσότητα χλωριδίων ανά μονάδα βάρους σκυροδέματος (Kg/Kg).

\bar{u} : μέση ταχύτητα κυκλοφορίας της υγρασίας στο σκυρόδεμα (m/s).

D_C : συντελεστής διάχυσης των χλωριόντων (m²/sec).

γ : συντελεστής αντίδρασης των χλωριόντων.

- Οι (Denarié, Conciatori, & Brühwiler, 2003) στο μοντέλο τους προσομοιώνουν τη συνολική ροή χλωριδίων σύμφωνα με την παρακάτω σχέση, συμπεριλαμβάνοντας στους υπολογισμούς του την ωριαία μεταβολή των περιβαλλοντικών συνθηκών :

$$I_{cl} = -D_{cl} w \frac{\partial c_f}{\partial x} - D_w (1 - R_{cl}) c_f \frac{\partial h_r}{\partial x} \quad (3.20)$$

Όπου :

D_{Cl} : Ο συντελεστής διάχυσης των χλωριδίων στο νερό.

c_f : Η περιεκτικότητα σε χλωρίδια του νερού.

D_w : Ο συντελεστής διάχυσης για το νερό.

R_{Cl} : Ο συντελεστής επιβράδυνσης.

w : Το περιεχόμενο νερό.

h_r : Η σχετική υγρασία των πόρων του σκυροδέματος.

- Οι (Mangat & Molloy, 1992) συστήνουν με το μοντέλο τους τη συσχέτιση του συντελεστή διάχυσης με το χρόνο. Το μοντέλο αυτό εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση :

$$C = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2 \sqrt{\frac{D_i}{1-m} t^{(1-m)}}} \right] \right\} \quad (3.21)$$

Όπου :

C_0 : Η συγκέντρωση χλωριδίων στην επιφάνεια του σκυροδέματος.

D_i : Πραγματικός συντελεστής διάχυσης σε χρόνο t

m : Εμπειρικός συντελεστής.

erf : Συνάρτηση λάθους.

- Οι (Saetta, Schrefler, & Vitaliani, 1995) στο δικό τους μοντέλο διερεύνησαν τη διείδυση χλωριόντων στο μερικώς κορεσμένο σκυρόδεμα θέτωντας μεταβλητό συντελεστή διάχυσης. Επιπλέον ερεύνησαν τη διείδυση χλωριόντων σε πολυποίκιλες συνθήκες έκθεσης χρησιμοποιώντας κύκλους διαβροχής και ξήρανσης. Η διείδυση χλωριόντων στο σκυρόδεμα κατά αυτό το μοντέλο προσομοιώνεται σύμφωνα με τον τύπο :

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = -\operatorname{div}[D_\alpha \nabla(C_t)] + \frac{C_t}{\alpha} \frac{\partial w}{\partial t} \quad (3.22)$$

Όπου :

$\frac{\partial C_t}{\partial t}$: Η μεταβολή της ολικής συγκέντρωσης χλωριδίων στο σκυρόδεμα.

α : συντελεστής ικανότητας δέσμησης ενός υλικού που διαχέεται σε πορώδες μέσο.

w : Το περιεχόμενο νερό το οποίο είναι μικρότερο από την ποσότητα νερού που απαιτείται για κορεσμό.

3.2.1.4 Ημι-εμπειρικά μοντέλα

Τα ημι-εμπειρικά μοντέλα συντίθενται από τις ιδιότητες των φυσικοχημικών και εμπειρικών μοντέλων. Έχουν σκοπό να απλοποιήσουν πολύπλοκα μαθηματικά μοντέλα, κάνοντας χρήση παραμέτρων από εργαστηριακές μετρήσεις και πειράματα.

3.2.1.5 Πιθανοτικά μοντέλα

Τα πιθανοτικά μοντέλα στηρίζονται στην πεποίθηση πως η πιθανότητα υπέρβασης ενός γεγονότος $g(x)$, που διαφορετικά ονομάζεται αστοχία (π.χ. η πιθανότητα υπέρβασης του ανώτατου αποδεκτού ορίου περιεκτικότητας χλωριόντων στο σκυρόδεμα) προσομοιώνεται ως εξής :

$$P_f = \iint \dots \int [I[g(x)] \leq 0] f_x(x) dx \quad (3.23)$$

Όπου :

$I[\]$: Συνάρτηση δείκτη η οποία σε περίπτωση που είναι αληθής ισούται με 1 ενώ εάν είναι ψευδής ισούται με 0.

Επιπλέον εάν θεωρηθεί ότι το x_j αντιπροσωπεύει το j th διάνυσμα τυχαίων παρατηρήσεων της f_x τότε απορρέει η εξίσωση :

$$P_f \cong \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I[g(x_j) \leq 0] \quad (3.24)$$

- Οι (Z Lounis, 2003) και (Zoubir Lounis & Amleh, 2003) χρησιμοποιώντας ως μέθοδο ανάλυσης τη μέθοδο Monte Carlo ανέπτυξαν τα παρακάτω μοντέλα.

Για τη χρονικά εξαρτώμενη πιθανότητα διάβρωσης του οπλισμού :

$$P_f(t) = \frac{1 - \text{erf}(\beta t / \sqrt{2})}{2} \quad (3.25)$$

Όπου :

$$\beta_t = \beta(t) = \frac{\ln\left(\frac{\mu t_i}{t}\right) \sqrt{1+v_{ti}^2}}{\sqrt{\ln(1+v_{ti}^2)}} \quad (3.26)$$

Για την εκτίμηση της περιόδου διάδοσης της διάβρωσης και της συνολικής διάρκειας ζωής της κατασκευής θεώρησαν ότι η αντίσταση μειώνεται σε σχέση με το χρόνο με μία συνάρτηση του τύπου :

$$R(t) = a(t)R_0 \quad (3.27)$$

Τότε η πιθανότητα αστοχίας υπολογίζεται ως εξής :

$$P_f(T_L) = 1 - \int_0^\infty \exp[-v\{T_L - \int_0^{T_L} F_S[a(t)R_0]dt\}] f_{R_0}(r) dr \quad (3.28)$$

Όπου :

$P_f(T_L)$: Ηπιθανότητα αστοχίας στο διάστημα $[0, T_L]$.

T_L : Η διάρκεια ζωής.

$a(t)$: Συνάρτησης αντίστασης στη φθορά.

R_0 : Αρχική αντίσταση.

f_{R_0} : Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της αρχικής φθοράς.

F_S : Αθροιστική κατανομή του φορτίου.

v : Ρυθμός εμφάνισης του φορτίου.

- Στο μοντέλο που αναπτύχθηκε από τους (Stewart & Rosowsky, 1998) θεωρείται πως η αντοχή της κατασκευής εξαρτάται από το χρόνο και δηλώνεται ως $R(t)$. Το συγκεκριμένο μοντέλο συμπεριλαμβάνει αρκετούς παράγοντες όπως η ρηγμάτωση, η οριακή συγκέντρωση χλωριδίων, η τοποθέτηση των ράβδων στο σκυρόδεμα, ο ρυθμός διάβρωσης και το περιβάλλον έκθεσης. Έτσι θεωρώντας επίσης, ότι ανεξάρτητα φορτία S_j ασκούνται τυχαία από άποψη χρόνου και έντασης σε διάστημα $(0, t_L)$, η πιθανότητα αστοχίας εκφράζεται από τον τύπο :

$$p_f(t_L) = 1 - \Pr[R(t_1) > S_1 \cap R(t_2) > S_2 \cap \dots \cap R(t_n) > S_n] \quad (3.29)$$

Όπου :

$$t_1 < t_2 < t_3 \dots t_n$$

Κατά αυτό το μοντέλο η συγκέντρωση των χλωριδίων στην επιφάνεια του σκυροδέματος στην περίπτωση χρήσης αποπαγοποιητιών υγρών έχει ως εξής :

$$C(x, t) = C_o \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{tD}} \right) \right] \quad (3.30)$$

Ενώ στην περίπτωση παραθαλάσσιας ζώνης προσομοιώνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$C(x, t) = 2W \left\{ \sqrt{\frac{t}{\pi D}} \exp \left(-\frac{x^2}{4Dt} \right) - \frac{x}{2D} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \right\} \quad (3.31)$$

Όπου :

W : Η ροή διάχυσης στην επιφάνεια του σκυροδέματος σε (kg/cm²s).

- Το παραπάνω μοντέλο των (Stewart & Rosowsky, 1998) βελτιώθηκε από τους (Vu & Stewart, 2000), έτσι ώστε να λαμβάνει υπόψη και την αστοχία λόγω διάτμησης της κατασκευής και την επίδραση των προδιαγραφών ανθεκτικότητας στην περίοδο έναρξης της διάβρωσης και την επίδραση και στο ρυθμό διάβρωσης. Αξίζει να αναφερθεί ότι ο βασικός τύπος του παραπάνω μοντέλου έμεινε σταθερός ενώ άλλαξαν κάποιες παράμετροι όπως το C_o. Στο συγκεκριμένο μοντέλο ο συντελεστής διάχυσης δίνεται από το μοντέλο που ανέπτυξαν οι (V. Papadakis, Vayenas, & Fardis, 1991) :

$$D = D_{H_2O} * 0.15 * \frac{1 + \rho_c \frac{c}{w}}{1 + \rho_c \frac{w}{c} + \frac{\rho_c a}{\rho_a c}} \left(\frac{\rho_c \frac{w}{c} - 0.85}{1 + \rho_c \frac{w}{c}} \right)^3 \quad (\text{cm}^2/\text{s}) \quad (3.32)$$

Όπου :

$$\frac{w}{c} = \frac{27}{f_{cyl} + 13.5} \quad (\text{Τύπος του Bolomey}) \quad (3.33)$$

f_{cyl} : Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σε κύλινδρο, σε Μpa.

a/c : Είναι ο λόγος αδρανών προς τσιμέντο.

ρ_a : Η πυκνότητα μάζας των αδρανών.

ρ_c : Η πυκνότητα μάζας του τσιμέντου.

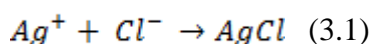
D_{H2O} : Ο συντελεστής διάχυσης σε διάλυμα άπειρης αραιώσης (1,6*10⁻⁵ cm²/s για NaCl).

3.3 Ανασκόπηση πειραματικών μεθόδων μέτρησης συγκέντρωσης χλωριδίων στο σκυρόδεμα

Οι πειραματικές μέθοδοι μέτρησης της συγκέντρωσης χλωριδίων στο σκυρόδεμα παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς τα αποτελέσματά τους έχουν καθοριστικό ρόλο στην εκτίμηση διάρκειας ζωής των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Εξαιτίας όμως των πολλών μηχανισμών κυκλοφορίας των χλωριδίων (διάχυση, τριχοειδής αναρρόφηση και υδροστατική πίεση), η μέτρησή τους αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία. Επιπλέον είναι γνωστό πως η διείσδυση χλωριδίων στο σκυρόδεμα είναι χρονοβόρα διαδικασία και για αυτό το λόγο σε ορισμένες από τις μεθόδους χρησιμοποιείται επιταχυνόμενη διάχυση χλωριδίων. Σκοπός της συγκεκριμένης ενότητας είναι να αναφερθούν οι κύριες μέθοδοι μέτρησης της συγκέντρωσης χλωριδίων στο σκυρόδεμα και μια βασική αναφορά στις κύριες μεθόδους προσδιορισμού της διείσδυσης χλωριδίων στο σκυρόδεμα.

3.3.1 Μέτρηση χλωριδίων στο σκυρόδεμα

Συνήθως στο σκυρόδεμα η μέτρηση των χλωριδίων γίνεται με μεθόδους αργυρομετρίας, οι οποίες είναι οι πιο αποτελεσματικές μέθοδοι ογκομετρικής ανάλυσης. Υπό τον όρο αργυρομετρία αναφέρονται οι μέθοδοι ογκομετρικής ανάλυσης στις οποίες γίνεται χρήση διαλύματος ιόντων Αργύρου (Ag^+). Ο βασικός τρόπος λειτουργίας της αργυρομετρίας έχει ως εξής :

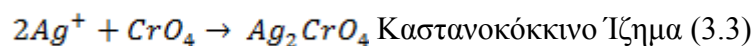
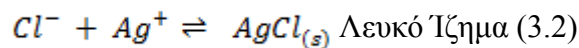


Δηλαδή, τα ανιόντα χλωρίου καθορίζονται με βάση τα δυσδιάλυτα άλατα ($AgCl$) τα οποία παράγουν τα ανιόντα χλωρίου (Cl^-) με τα κατιόντα (Ag^+) που προέρχονται από διάλυμα νιτρικού αργύρου ($AgNO_3$) 0.1 M. Η τεχνική αυτή εφαρμόστηκε για πρώτη φορά από το

Γάλλο χημικό Joseph Louis Gay-Lussac το 1832. Οι κύριες μέθοδοι ογκομετρικής ανάλυσης (titration) είναι οι εξής : η μέθοδος Mohr, η μέθοδος Volhard και η μέθοδος Fajans (Βασιλικιώτης, 1980).

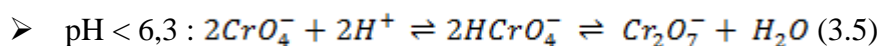
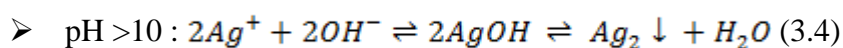
3.3.1.1 Η μέθοδος Mohr

Αποτελεί μία από τις παλαιότερες μεθόδους, αφού δημιουργήθηκε από τον Karl Friedrich Mohr το 1856 (Ζαφειροπούλου, 2014). Λαμβάνει χώρα σε ουδέτερα ή ελαφρώς αλκαλικά διαλύματα. Προσδιορίζει τη συγκέντρωση χλωριδίων μέσω δείγματος νιτρικού αργύρου, παρουσία όξινο ανθρακικού καλίου (K_2CrO_4) ως δείκτη. Ο χλωριούχος άργυρος ($AgCl$) είναι λιγότερο διαλυτός από τον όξινο χρωμικό άργυρο (Ag_2CrO_4). Έτσι τα κατιόντα αργύρου (Ag^+) που προστίθενται καταβυθίζονται ως χλωριούχος άργυρος ($AgCl$) μέχρι το ισοδύναμο σημείο. Πέρα από αυτό το σημείο το πλεόνασμα κατιόντων αργύρου (Ag^+) σχηματίζει όξινο χρωμικό άργυρο (Ag_2CrO_4) που έχει καστανοκόκκινο χρώμα το οποίο είναι διακριτό κατά το τελικό στάδιο της ογκομέτρησης.

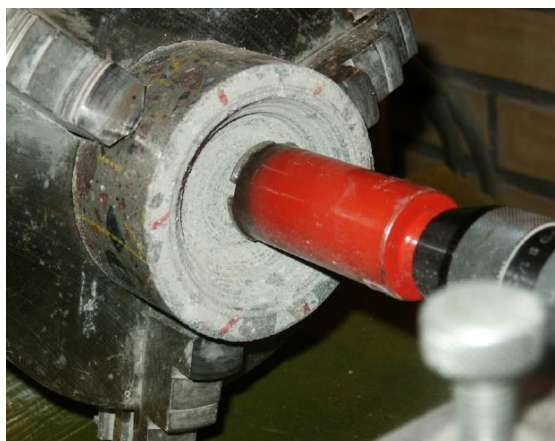


Οι προϋποθέσεις κάτω από τις οποίες εφαρμόζεται η συγκεκριμένη μέθοδος είναι οι εξής :

- Η συγκέντρωση του δείκτη να κυμαίνεται μεταξύ 0,0001 και 0,0003 M.
- Το pH του δείγματος να κυμαίνεται μεταξύ 6,3 και 10, διαφορετικά :



Αξίζει να αναφερθεί πως για την ογκομετρική ανάλυση η εξαγωγή του δείγματος γίνεται με λειοτριβή (grinding) του δείγματος στο επιθυμητό βάθος του δοκιμίου με τη χρήση τόννου.



Σχήμα 27 : Εξαγωγή του δείγματος με λειοτριβή (Luping Tang et al., 2012).

Η διαδικασία εκτέλεσης της συγκεκριμένης μεθόδου έχει ως εξής :

Μετά την εξαγωγή του δείγματος και τη λειοτριβή, με τη χρήση ζυγαριάς ακριβείας, λαμβάνονται πέντε γραμμάρια δείγματος , τα οποία τοποθετούνται σε κωνική φιάλη χωρητικότητας 250 ml μαζί με 50 ml HNO₃ (1N). Στη συνέχεια η φιάλη γεμίζει με απιονισμένο νερό έως το σημείο των 250 ml. Το δείγμα παραμένει βυθισμένο για μία μέρα. Έπειτα με χρήση προχοίδας αφαιρούνται 10 ml δείγματος χωρίς ίζημα, το οποίο τοποθετείται σε κωνική φιάλη όπου γίνεται προσθήκη 90 ml απιονισμένου νερού. Τοποθετείται Υδροξείδιο του Νατρίου (NaOH) (0,1N) έως ότου το pH να φτάσει την τιμή 7. Έπειτα τοποθετείται μικρή ποσότητα δείκτη (όξινου χρωμικού καλίου K₂CrO₄) και γίνεται η ογκομετρική ανάλυση. Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν το διάλυμα πάρει ένα πορτοκαλί χρώμα (Ζαχαροπούλου, 2014).

Η συγκέντρωση δίδεται με βάση τον τύπο (Ζαφειροπούλου, 2014):

$$c = 8.8625 * A \quad (3.6)$$

Όπου :

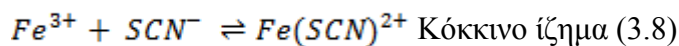
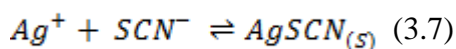
c : Η συγκέντρωση των χλωριόντων στο υπό εξέταση δείγμα (mg/5gr δείγματος).

A : Η ποσότητα (σε ml) AgNO₃ που χρησιμοποιήθηκαν.

3.3.1.2 Η μέθοδος Volhard

Εφαρμόστηκε το 1874 από τον Jacob Volhard. Με τη μέθοδο αυτή υπολογίζονται τα χλωρίδια σε όξινο περιβάλλον, με την προσθήκη περίσσειας νιτρικού αργύρου (AgNO₃). Η περίσσεια υπολογίζεται με την προσθήκη θειοκυανιούχου καλίου (KSCN) με παρουσία Fe³⁺

ως δείκτη. Το τελικό στάδιο της διαδικασίας γίνεται αντιληπτό από το κόκκινο χρώμα της αντίδρασης των Fe^{3+} με τα SCN (Ζαχαροπούλου, 2014).



Προϋποθέσεις για τη χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου είναι :

- Η συγκέντρωση του δείκτη (Fe^{3+}) να είναι περιορισμένη.
- Το διάλυμα του προϊόντος να είναι ισχυρά όξινο.
- Απαγορεύεται η παρουσία οξειδωτικών, ούτως ώστε να μην οξειδωθούν τα SCN .
- Η ογκομετρική ανάλυση πρέπει να γίνεται υπό ισχυρή ανάδευση διότι κοντά στο ισοδύναμο σημείο γίνεται απορρόφηση Ag^+ (από το $AgSCN$), γεγονός το οποίο αυξάνει την κατανάλωση.

Με τη συγκεκριμένη μέθοδο προσδιορίζονται τα κατιόντα αργύρου (Ag^+), συνεπώς εμμέσως υπολογίζονται και τα ανιόντα χλωριδίου (Cl^-).

3.3.1.3 Η μέθοδος Fajans

Η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόστηκε από τον Kazimierz Fajans. Λαμβάνει χώρα σε όξινο ή ουδέτερο περιβάλλον. Λειτουργεί με δείκτη προσρόφησης τη φλουορεσκεΐνη, η οποία σχηματίζει το άλας «φλουορεσκεΐνη- Ag ». Έτσι όταν σε διάλυμα $AgNO_3$ εμφανιστούν χλωρίδια χρωματίζεται κόκκινο και το ίζημα $AgCl$ που σχηματίζεται.

Λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά όλων των παραπάνω μεθόδων ογκομετρικής ανάλυσης, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η μόνη μέθοδος που εφαρμόζεται σε αλκαλικό περιβάλλον είναι η μέθοδος Mohr. Επίσης, έχει αποδειχθεί ότι, η συγκεκριμένη μέθοδος, πέρα από το γεγονός ότι εφαρμόζεται με ευκολία, δίνει και τα πιο ακριβή αποτελέσματα. Συνεπώς, για αυτό το λόγο, αρκετοί ερευνητές (Ζαφειροπούλου, 2014; Ζαχαροπούλου, 2014) χρησιμοποιούν τη μέθοδο Mohr για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης χλωριόντων στο σκυρόδεμα.

3.3.2 Μέθοδοι προσδιορισμού της διείσδυσης χλωριδίων στο σκυρόδεμα.

Από την εκτίμηση της διείσδυσης και της διάχυσης χλωριδίων στο σκυρόδεμα, παράγονται σημαντικές πληροφορίες για την εκτίμηση διάρκειας ζωής μίας κατασκευής από σκυρόδεμα, όπως η πρόβλεψη του συντελεστή διάχυσης, που χρησιμοποιείται σε αρκετά μοντέλα. Η διείσδυση όμως των χλωριδίων, είναι μια χρονοβόρα διαδικασία και για αυτό το λόγο επιταχύνεται πολλές φορές τεχνητά για να αντληθούν δεδομένα που είναι χρήσιμα για το σχεδιασμό. Οι κύριες λοιπόν μέθοδοι είναι οι εξής (Luping Tang et al., 2012; Τεταγιώτη, 2011) :

3.3.2.1 AASHTO T259 Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration

Η πρότυπη μέθοδος δοκιμής της αντίστασης του σκυροδέματος στη διείσδυση ιόντων χλωριδίου AASHTO T259, είναι μια μεγάλης διάρκειας δοκιμή φυσικής βύθισης, με σκοπό τη μέτρηση της διείσδυσης χλωριδίων στο σκυρόδεμα. Είναι αντίστοιχη της ASTM C1543-02 (Standard Test Method for Determining the Penetration of Chloride Ion into Concrete by Ponding). Η μεθοδολογία της έχει ως εξής : 3 πλάκες σκυροδέματος με ελάχιστο πάχος 75 mm και εμβαδό 300 mm² φυλάσσονται σε υγρασία για 14 ημέρες. Έπειτα τοποθετούνται σε ένα δωμάτιο με 50% υγρασία για 28 ημέρες. Αξίζει να σημειωθεί πως οι πλάκες κλείνονται αεροστεγώς περιμετρικά με εκτεθειμένη την πάνω και την κάτω πλευρά τους μόνο. Στη συνέχεια για περίοδο 90 ημερών ένα διάλυμα χλωριούχου νατρίου NaCl 3% καλύπτει την άνω πλευρά, ενώ η κάτω είναι σε επαφή με το περιβάλλον του δωματίου. Κατά τη λήη του χρονικού αυτού διαστήματος οι πλάκες τεμαχίζονται σε φέτες πάχους 0,5 mm, σε κάθε βάθος λαμβάνονται δύο με τρία δείγματα και υπολογίζεται η συγκέντρωση χλωριδίων σε κάθε δείγμα.

Η συγκεκριμένη μέθοδος παρέχει πληροφορίες για τη διείσδυση χλωριδίων λαμβάνοντας υπόψη πέρα από τη διάχυση, τη ρόφηση και τη μεταφορά υδρατμών λόγω του αρχικού ξηρού περιβάλλοντος και του διαφορετικού επιπέδου υγρασίας μεταξύ άνω και κάτω πλευράς. Όμως ο μηχανισμός της διάχυσης δεν περιγράφεται πλήρως από αυτή τη δοκιμή καθώς κάτω από αυτές τις συνθήκες υπάρχει μεγαλύτερη διείσδυση χλωριδίων στο σκυρόδεμα από ότη στη συνολική διάρκεια ζωής μίας κατασκευής. Επιπλέον πρόβλημα μπορεί να δημιουργήσει το γεγονός ότι σε ένα καλής ποιότητας σκυρόδεμα πιθανόν το διάστημα προσβολής 90

ημερών να μην είναι αρκετό ώστε να δημιουργηθεί ένα αντιπροσωπευτικό προφίλ χλωριδίων.

3.3.2.2 NordTest NTBuild 443 Bulk Diffusion Test – Δοκιμή διάχυσης όγκου

Η δοκιμή διάχυσης όγκου είναι και αυτή μια μεγάλης διάρκειας δοκιμή φυσικής βύθισης, που δημιουργήθηκε με σκοπό την εξάλειψη των σφαλμάτων της προαναφερθείσας δοκιμής. Οι αλλαγές που έγιναν με σκοπό τη βελτιστοποίηση είναι οι εξής : Το δείγμα πλέον αντι να είναι εκτεθειμένο για 28 ημέρες είναι κορεσμένο με διάλυμα υδροξειδίου του ασβεστίου. Έτσι παρεμποδίζεται η αρχική ρόφηση χλωρίου μόλις τοποθετηθεί το διάλυμα. Επιπλέον κατα τη συγκεκριμένη δοκιμή είναι εκτεθειμένη η μία μόνο πλευρά των δοκιμίων στο διάλυμα του χλωριούχου νατρίου, το οποίο εναποτίθεται πλέον για 35 ημέρες για κατώτερης ποιότητας σκυρόδεμα και για 90 για καλής ποιότητας σκυρόδεμα. Κατόπιν υπολογίζεται το προφίλ χλωριδίων σε φέτες πάχους 0,5 mm όπως την προηγούμενη διαδικασία (Luring Tang et al., 2012; Τεταγιώτη, 2011).



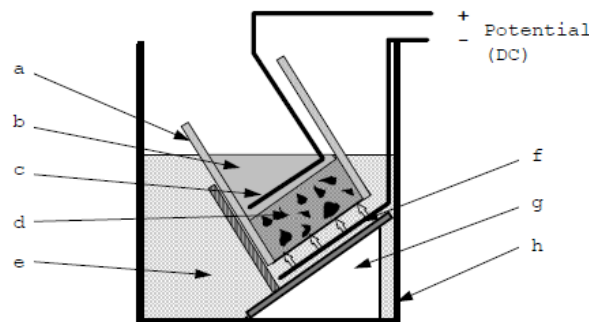
Σχήμα 28: Σχηματική απεικόνιση δοκιμής NT Build 443 (Τεταγιώτη, 2011).

3.3.2.3 Rapid Chloride Migration (RCM) Test – Δοκιμή γρήγορης μετανάστευσης χλωριδίων

Κατά την μέθοδο αυτή ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο χρησιμοποιείται για να επιταχύνει τη διαδικασία μεταφοράς – μετανάστευσης χλωριδίων. Η μέθοδος περιλαμβάνει την εφαρμογή ενός δυναμικού συνεχούς ρεύματος, από 10 έως 60 V, ανάλογα με την ποιότητα του σκυροδέματος. Τα δοκίμια έχουν τις συγκεκριμένες διαστάσεις οι οποίες είναι διάμετρος 100

mm και πάχος 50 mm. Η δοκιμή διαρκεί 24 ώρες. Στη συνέχεια το βάθος διείσδυσης χλωριδίων προσδιορίζεται, χρησιμοποιώντας χρωματομετρικές τεχνικές. Κατόπιν από το βάθος διείσδυσης των χλωριδίων προσδιορίζεται ο συντελεστής μετανάστευσης χλωριδίων, ο οποίος μπορεί μετέπειτα να χρησιμοποιηθεί σε μοντέλα εκτίμησης διάρκειας ζωής κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, όπως το Duracrete. Η μέθοδος λειτουργεί σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία (Luping Tang et al., 2012) :

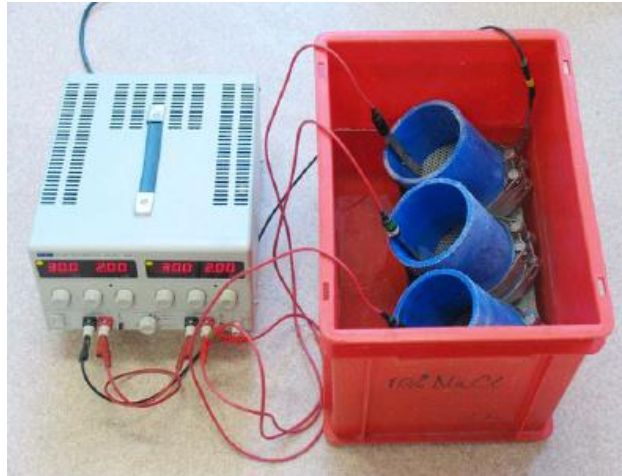
- Το δοκίμιο με διάμετρο 100 mm και πάχος 50 mm τοποθετείται σε ένα περίβλημα από καουτσούκ για να σχηματίσει ένα κελί που θα συγκρατήσει τον ηλεκτρολύτη και την άνοδο.
- Το περίβλημα από καουτσούκ με το δείγμα τοποθετείται πάνω από την κάθοδο σε ένα κουτί μετανάστευσης που περιέχει διάλυμα χλωριούχου, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.
- Στη συνέχεια εφαρμόζεται το εξωτερικό δυναμικό συνεχούς ρεύματος για 24 ώρες.
- Μετά τη δοκιμή μετανάστευσης το δείγμα χωρίζεται σε δύο μέρη και οι επιφάνειες τους ψεκάζονται με ένα διάλυμα νιτρικού αργύρου (0,1 N). Με αυτό τον τρόπο υπολογίζεται το μέσο βάθος διείσδυσης, το οποίο είναι ορατό μέσω της χρωματομετρικής ανάλυσης.



Σχήμα 29 : Σχηματική απεικόνιση δοκιμής γρήγορης μετανάστευσης (Luping Tang et al., 2012).

Όπου :

- | | |
|--------------------------------|---------------------------|
| a : Περιτύλιγμα από καουτσούκ. | e : Ηλεκτρολύτης καθόδου. |
| b : Ηλεκτρολύτης ανόδου. | f : Κάθοδος. |
| c : Άνοδος. | g : Πλαστική βάση. |
| d : Δοκίμιο. | h : Πλαστικό δοχείο. |



Σχήμα 30: Η δοκιμή γρήγορης μετανάστευσης (Luping Tang et al., 2012).

Στη συνέχεια ο συντελεστής μετανάστευσης σε m^2/s δίνεται από τον τύπο :

$$D_{RCM} = \frac{RTL}{zFU} * \frac{x_d^{-\alpha} \sqrt{x_d}}{t} \quad (3.9)$$

Όπου :

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{RTL}{zFU}} * \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right) \quad (3.10)$$

z : Απόλυτη τιμή των ιόντων σθένους για χλώριο $z = 1$.

F : Σταθερά Faraday $F = 9.648 * 10^4$ (J/(V*mol)).

U : Απόλυτη τιμή του δυναμικού που εφαρμόστηκε στο δοκίμιο (V).

L : Πάχος του δοκιμίου (m).

R : Σταθερά του αερίου $R = 8.314$ (J/(K*mol)).

T : Μέση τιμή των αρχικών και τελικών θερμοκρασιών στο διάλυμα του ανοδικού ηλεκτρολύτη (K).

x_d : Μέση τιμή του βάθους διείσδυσης (m).

t : Διάρκεια δοκιμής (s).

erf^{-1} : Αντίστροφο της συνάρτησης σφάλματος.

c_d : Συγκέντρωση χλωριδίων στην οποία οι αλλάζει το χρώμα, $c_d \approx 0,07$ N για σκυρόδεμα.

c_0 : Συγκέντρωση χλωριδίων στο διάλυμα του καθοδικού ηλεκτρολύτη $c_0 \approx 2 \text{ N}$.

4 Μεθοδολογία

Η παρούσα μελέτη έχει σκοπό την εκτίμηση διάρκειας ζωής κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα στην Κύπρο. Για τις ανάγκες της εκτίμησης διάρκειας ζωής των κατασκευών θα χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα Life-365. Η επιλογή του συγκεκριμένου προγράμματος έγινε με γνώμονα τη διεθνή αναγνωρισιμότητά του, την αξιοπιστία του σε περιβάλλοντα έκθεσης παρόμοια με της Κύπρου, την εύκολη χρήση του, καθώς και τη δωρεάν διάθεσή του προς το κοινό. Για τη λειτουργία του συγκεκριμένου μοντέλου θα γίνει συνδυασμός δεδομένων από την Υπηρεσία Ποιότητας Αέρα Κύπρου και δεδομένα για τα οποία δεν διεξάγονται μετρήσεις στην Κύπρο θα ανακτηθούν από τη βιβλιογραφία σχετικών ερευνών.

4.1 Πληροφορίες σχετικά με το μοντέλο Life-365

Το Μάιο του 1998, προτάθηκε η δημιουργία ενός προτύπου μοντέλου κόστους κύκλου ζωής, από μία επιτροπή του Αμερικανικού Ινστιτούτου Σκυροδέματος (ACI). Το Νοέμβριο του 1998, το εθνικό ινστιτούτο προτύπων και τεχνολογίας (NIST) χρηματοδότησε μία ημερίδα με τίτλο «μοντέλα πρόβλεψης του λειτουργικού χρόνου ζωής και του κόστους κύκλου ζωής του χάλυβα στο οπλισμένο σκυρόδεμα». Σε αυτή την ημερίδα αποφασίστηκε ομόφωνα η δημιουργία ενός αντίστοιχου μοντέλου (Violetta, 2002).

Για την ταχεία εκτέλεση των διεργασιών δημιουργήθηκε μία κοινοπραξία που χρηματοδότησε τη δημιουργία ενός λογισμικού. Το «Life-365» είναι το τελικό αποτέλεσμα του μοντέλου που υπολογίζει το λειτουργικό χρόνο ζωής και το κόστος κύκλου ζωής, και το οποίο δημιουργήθηκε από την προαναφερόμενη κοινοπραξία. Πάνω από 20 εθελοντές δοκίμασαν το λογισμικό στη πράξη πριν την δημοσιοποίησή του. Στα πλαίσια μίας πραγματικά συνεργατικής προσπάθειας, οι εθελοντές πρότειναν σημαντικές αλλαγές για το λογισμικό.

Τον Οκτώβριο του 2000 κυκλοφόρησε η 1^η έκδοση του λογισμικού δωρεάν. Το «Life-365» είναι το 1^ο λογισμικό που μπορούν να χρησιμοποιούν οι μηχανικοί, για να σχεδιάζουν βελτιωμένες, αναφορικά με το πρόβλημα της διάβρωσης του χάλυβα, κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος. Το λογισμικό παρέχει στον ιδιοκτήτη πληροφορίες σχετικά με εναλλακτικές λύσεις και κόστη, αναφορικά με την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος και τον αυξημένο λειτουργικό χρόνο ζωής (Bentz & M.D.A. Thomas, 2012).

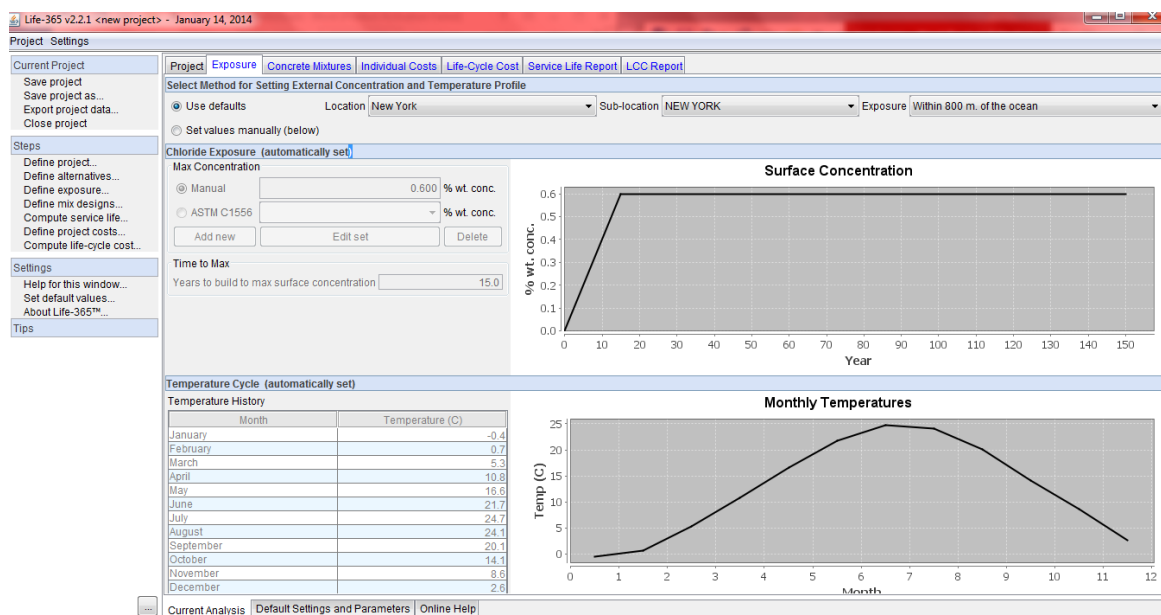
4.1.1 Πρακτική εφαρμογή του λογισμικού Life-365

Το λογισμικό «Life-365» έχει πρακτική εφαρμογή στην πρόβλεψη του χρόνου έναρξης της διάβρωσης και εκτίμησης του χρόνου στον οποίο οι συνέπειες της διάβρωσης ξεπερνούν το αποδεκτό επίπεδο. Επιπλέον, το λογισμικό δύναται να εκτιμήσει το κόστος για τη διάρκεια λειτουργικής ζωής του έργου, συνυπολογίζοντας το αρχικό κόστος της κατασκευής και το προβλεπόμενο κόστος επισκευής. Τα δεδομένα που απαιτούνται από το λογισμικό και πρέπει να δώσει ο χρήστης είναι τα εξής (Violetta, 2002) :

- Η γεωγραφική θέση
- Ο τύπος της κατασκευής και η φύση της έκθεσης (όπως για παράδειγμα μοντέλο μονής κατεύθυνσης (παρκινγκ ή καταστρώματα γεφυρών) ή διπλής κατεύθυνσης (πάσσαλος λιμανιού)).
- Το καθαρό πάχος της επικάλυψης του χάλυβα οπλισμού του σκυροδέματος.
- Οι λεπτομέρειες για κάθε σενάριο προστασίας από διάβρωση, όπως ο λόγος νερού/τσιμέντο, ο τύπος και η ποσότητα της ιπτάμενης τέφρας, η κοκκομετρία της σκωρίας του εδάφους, η πυριτική παιπάλη ή οι αναστολείς διάβρωσης. Ο τύπος του χάλυβα, η προστασία του με ειδικές επιστρώσεις ή όχι και η παρουσία μεμβρανών ή στεγανοποιητικών υλικών.

4.1.2 Οι περιβαλλοντικές συνθήκες έκθεσης ανάλογα με την τοποθεσία της κατασκευής στο λογισμικό

Το λογισμικό, χρησιμοποιώντας μία βάση δεδομένων που προέρχεται από μετεωρολογικά δεδομένα, προσδιορίζει τα ετήσια προφίλ θερμοκρασίας ανάλογα με τη γεωγραφική θέση της κατασκευής. Το λογισμικό υπολογίζει μία μέγιστη συγκέντρωση ιόντων χλωρίου στην επιφάνεια του σκυροδέματος καθώς και το χρόνο που απαιτείται για να φτάσει η συγκέντρωση σε αυτή τη μέγιστη τιμή, ανάλογα με τον τύπο της κατασκευής, τη γεωγραφική της θέση και τις συνθήκες έκθεσης. Για παράδειγμα, εάν ο χρήστης επιλέξει μια κατασκευή εντός 800 μέτρων από τη θάλασσα, για μία αστική περιοχή στη Νέα Υόρκη, το μοντέλο θα χρησιμοποιήσει αυτομάτως τη συγκέντρωση χλωριούχων ενώσεων στην επιφάνεια για καταγραφές που αφορούν αυτή την περιοχή.



Σχήμα 31 : Περιβαλλοντικές συνθήκες έκθεσης ανάλογα με την τοποθεσία της κατασκευής.

4.1.3 Εκτίμηση διάρκειας ζωής σύμφωνα με το λογισμικό Life-365

Η ανάλυση που επιτελεί το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα χωριστά βήματα:

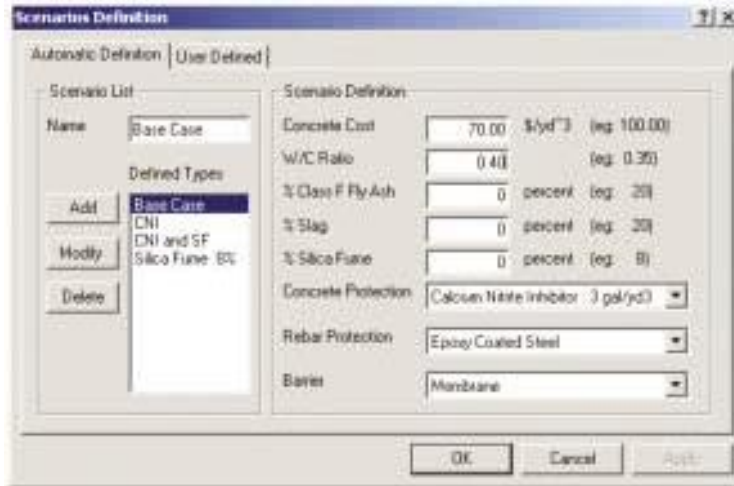
- i. Πρόβλεψη του χρόνου που απαιτείται για την έναρξη της διάβρωσης, που συνήθως ονομάζεται αρχική περίοδος t_i .
- ii. Πρόβλεψη του χρόνου που απαιτείται ώστε η διάβρωση να φτάσει σε ένα μη αποδεκτό επίπεδο, ο οποίος συνήθως ονομάζεται περίοδος διάδοσης t_p . Ο χρόνος για την πρώτη επισκευή t_r είναι το άθροισμα των δύο αυτών περιόδων: $t_r = t_i + t_p$.
- iii. Προσδιορισμός του προγράμματος επισκευών έπειτα από την 1^η επισκευή για τη λειτουργική διάρκεια ζωής της κατασκευής.
- iv. Εκτίμηση του κόστους κύκλου ζωής βασισμένη στο αρχικό κόστος του σκυροδέματος, στο κόστος των συστημάτων προστασίας από διάβρωση και στα μελλοντικά κόστη επισκευών.

Πιο αναλυτικά, η αρχική περίοδος t_i που προαναφέρθηκε, προσδιορίζει το χρόνο που μεσολαβεί ώστε τα ανιόντα χλωριδίου να διαπεράσουν την επικάλυψη του σκυροδέματος και να συσσωρευτούν στην επιφάνεια του χάλυβα, σε μία ποσότητα ικανή να καταστρέψει την προστατευτική στρώση του χάλυβα, ξεκινώντας την ενεργό δράση της διάβρωσης. Η διάρκεια αυτής της περιόδου είναι μία συνάρτηση της ποιότητας του σκυροδέματος, του πάχους επικάλυψης, των συνθηκών έκθεσης (περιλαμβανομένου του επιπέδου χλωριδίων στην επιφάνεια και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος), και της συγκέντρωσης χλωριούχων ενώσεων για την έναρξη της διάβρωσης, C_i . Μία απλή προσέγγιση που χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της περιόδου έναρξης είναι να υποτεθεί ότι η διάχυση ιόντων είναι ο μηχανισμός της μεταφοράς τους και η λύση δίνεται με το δεύτερο νόμο του Fick.

Όσον αφορά, την περίοδο διάδοσης t_p , αυτή εκφράζει τον απαραίτητο χρόνο, ώστε η διάβρωση να φτάσει σε μη αποδεκτά επίπεδα για την καταστροφή μίας κατασκευής ή ενός δομικού στοιχείου. Η διάρκεια αυτής της περιόδου δεν εξαρτάται μόνο από το βαθμό της διαδικασίας διάβρωσης αλλά και από τον ορισμό του επιπέδου της «μη αποδεκτής ζημίας». Αυτό το επίπεδο ζημίας ποικίλει ανάλογα με τις απαιτήσεις του ιδιοκτήτη και τη φύση της κατασκευής. Ένας μεγάλος αριθμός παραγόντων, συμπεριλαμβανομένης της φύσης του μετάλλου του οπλισμού, των ιδιοτήτων του περιβάλλοντος σκυροδέματος, των συστημάτων προστασίας από διάβρωση και των περιβαλλοντικών συνθηκών, επηρεάζουν το βαθμό διάβρωσης.

4.1.4 Μέθοδοι προστασίας έναντι διάβρωσης στο λογισμικό Life-365

Το συγκεκριμένο λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα στο μελετητή να αναλύσει διάφορα ανεξάρτητα σενάρια από συστήματα προστασίας από διάβρωση. Για παράδειγμα, ο συνδυασμός πυριτικής παιπάλης ως αναστολέα διάβρωσης και εποξικής επικάλυψης του χάλυβα μπορεί να συγκριθεί με ένα μικρότερο λόγο νερού/τσιμέντο, με πρόσθετη επικάλυψη του σκυροδέματος και με μία μεμβράνη.



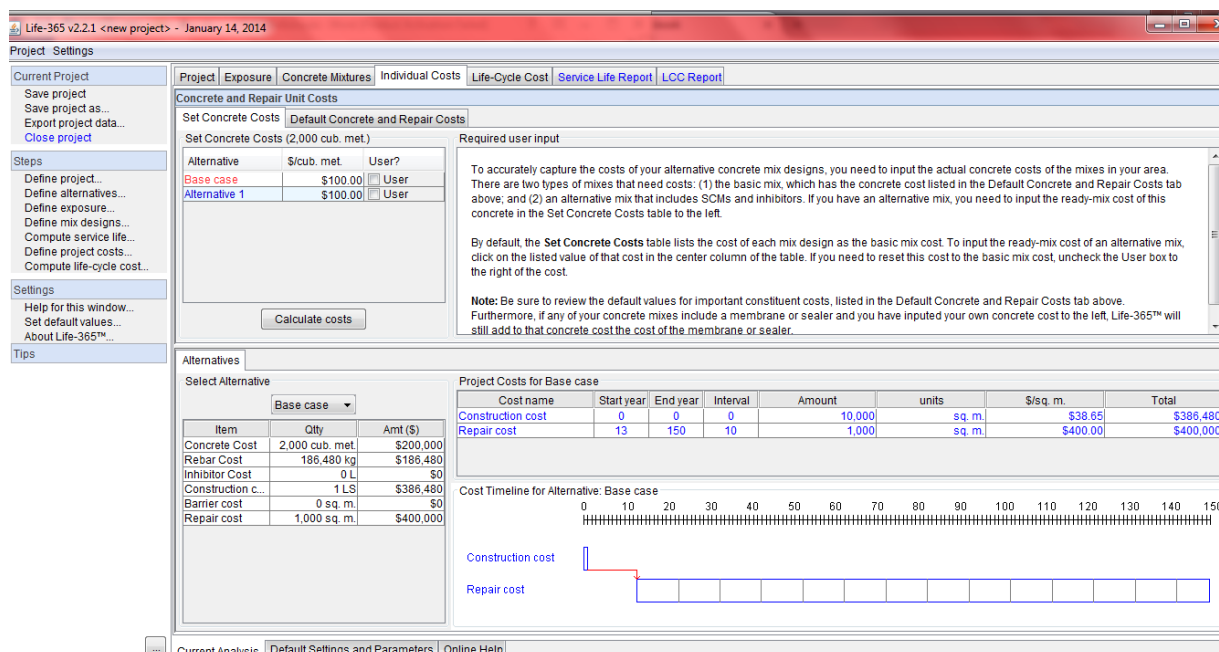
Σχήμα 32 : Ανάλυση σεναρίων προστασίας από τη διάβρωση (Violetta, 2002).

4.1.5 Μηχανική ανάλυση πληροφοριών

Το μοντέλο έχει τη δυνατότητα να αναλύει πληροφορίες για την είσοδο των χλωριούχων ενώσεων για διάφορα σενάρια προστασίας από διάβρωση. Αυτό είναι χρήσιμο όταν αναλύονται περιπτώσεις που περιλαμβάνουν είσοδο ιόντων χλωρίου από δύο πλευρές, όπως σε έναν ορθογωνικό πάσσαλο ενός λιμανιού.

4.1.6 Ανάλυση κόστους κύκλου ζωής

Στο συγκεκριμένο μοντέλο, το συνολικό κόστος κύκλου ζωής ορίζεται ως το άθροισμα του αρχικού κόστους κατασκευής και του υπολογιζόμενου κόστους επισκευής της κατασκευής σε όλη τη διάρκεια ζωής της. Το αρχικό κόστος της κατασκευής περιλαμβάνει το κόστος του σκυροδέματος (συμπεριλαμβανομένου του κόστους για την προστασία από διάβρωση), το κόστος του χάλυβα οπλισμού και το κόστος οποιασδήποτε προστασίας της επιφάνειας. Το λογισμικό τα κόστη αυτά, ανά μονάδα επιφάνειας της κατασκευής ($\$/m^2$). Τα μελλοντικά κόστη επισκευής υπολογίζονται σε «παρούσα αξία» χρησιμοποιώντας έναν συντελεστή για την προσαρμογή αυτής της αξίας. Το «life-365» υπολογίζει όλα τα μελλοντικά προβλεπόμενα κόστη επισκευής στη διάρκεια ζωής της κατασκευής και προσθέτει αυτό το κόστος στο αρχικό κόστος της κατασκευής παρέχοντας με αυτόν τον τρόπο το συνολικό κόστος κύκλου ζωής της κατασκευής.



Σχήμα 33 : Ορισμός των παραμέτρων κόστους στο πρόγραμμα Life-365.

4.2 Χρήση του προγράμματος για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης

4.2.1 Γενική περιγραφή

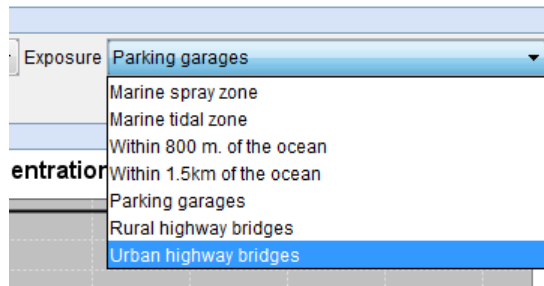
Η παρούσα μελέτη έχει ως κύριο αντικείμενό της, την εκτίμηση της διάρκειας ζωής κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος στην Κύπρο και ειδικότερα στην επαρχία Λεμεσού. Επομένως, για την επίτευξη του στόχου αυτού, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Life-365 σε συνδυασμό από δεδομένα και μετρήσεις που αφορούν τη συγκεκριμένη περιοχή και τις συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες έκθεσης. Οι μετρήσεις προέρχονται είτε από κανονισμούς, είτε παραχωρήθηκαν από κρατικές υπηρεσίες (όπως το Τμήμα Επιθεώρησης Εργασίας του Υπουργείου Εργασίας Πρόνοιας και Κοινωνικών Ασφαλίσεων και συγκεκριμένα ο κλάδος ποιότητας αέρα που παραχώρησε τα δεδομένα για τις μέσες μηνιαίες τιμές θερμοκρασίες και σχετικής υγρασίας μεταξύ των ετών 2009 - 2014), είτε αντλήθηκαν από σχετική βιβλιογραφία. Αξιοσημείωτη παρατήρηση αποτελεί το γεγονός, ότι το συγκεκριμένο λογισμικό βασίζεται στην αρχή, σύμφωνα με την οποία ως διάρκεια ζωής μίας κατασκευής ορίζεται το χρονικό διάστημα μέχρι την πρώτη επιδιόρθωση – επισκευή της κατασκευής. Επομένως, ως αποτέλεσμα της ανάλυσης των δεδομένων θα είναι το χρονικό

διάστημα κατά το οποίο οι ιδιοκτήτες των κατασκευών θα πρέπει να προβούν για πρώτη φορά σε επιδιορθώσεις των δομικών στοιχείων των κατασκευών. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του λογισμικού, ο τύπος των ζημιών που οδηγεί στην πρώτη επιδιόρθωση είναι η ρηγμάτωση του υπό εξέταση δομικού στοιχείου και όχι κάποια πιο εκτεταμένη ζημιά όπως αποκόλληση του σκυροδέματος της επικάλυψης του οπλισμού ή εκτεταμένη απώλεια μάζας του οπλισμού. Επιπλέον πρέπει να αναφερθεί, ότι η διάρκεια ζωής της κατασκευής στο πρόγραμμα προκύπτει ως το άθροισμα της περιόδου έναρξης της διάβρωσης και της περιόδου διάδοσης της διάβρωσης. Ως περίοδος έναρξης, στο μοντέλο που χρησιμοποιείται, ορίζεται το χρονικό διάστημα το οποίο απαιτείται έως ότου τα χλωρίδια διεισδύσουν στο σκυρόδεμα και σπάσουν το παθητικό προστατευτικό στρώμα του χάλυβα οπλισμού του Ο.Σ. Ενώ, ως περίοδος διάδοσης, ορίζεται το χρονικό διάστημα που απαιτείται ώστε λόγω διάβρωσης, να προκληθεί στο δομικό στοιχείο που εξετάζεται κάποια ρηγμάτωση ή ζημιά πάνω από το αποδεκτό επίπεδο.

4.3 Παράμετροι και δεδομένα της ανάλυσης

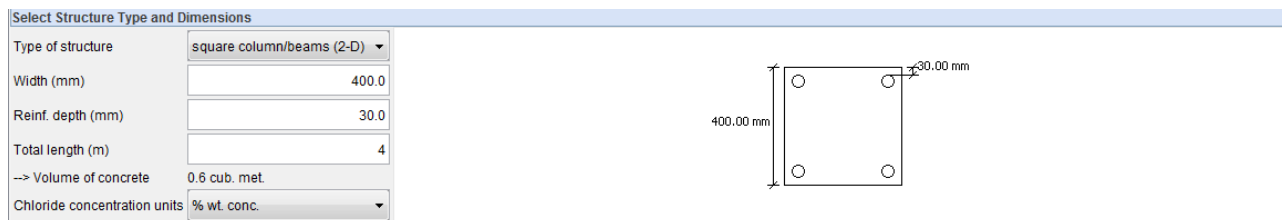
Η συγκεκριμένη έρευνα, έχει ως σκοπό όπως προαναφέρθηκε την εκτίμηση της διάρκειας ζωής κατασκευών στην επαρχία Λεμεσού. Για την καλύτερη μοντελοποίηση του προβλήματος, θεωρήθηκε καλύτερο να αναλυθούν κατασκευές οι οποίες έχουν διαφορετικές αποστάσεις από την ακτογραμμή. Επομένως, οι αποστάσεις των κατασκευών από την ακτή κατηγοριοποιήθηκαν σύμφωνα, με τις επιλογές που παρείχε το λογισμικό, ως εξής :

- i. Στην πρώτη κατηγορία εντάχθηκαν οι κατασκευές οι οποίες βρίσκονται πολύ κοντά στη θάλασσα σε απόσταση από ένα μέτρο και πάνω, οι οποίες βρίσκονται στη ζώνη άμεσου ψεκασμού από θαλασσινό νερό (marine spray zone).
- ii. Στη δεύτερη κατηγορία εντάχθηκαν οι κατασκευές που είχαν ανεγερθεί σε απόσταση εντός οκτακοσίων μέτρων από τη θάλασσα (within 800 m of the ocean).
- iii. Στην τρίτη κατηγορία εντάχθηκαν οι κατασκευές που βρίσκονταν σε απόσταση εντός ενάμιση μέτρου από τη θάλασσα.



Σχήμα 34 : Ορισμός συνθηκών έκθεσης στο λογισμικό Life-365.

Πιο συγκεκριμένα, επειδή από το λογισμικό δίδεται δυνατότητα ανάλυσης ενός μόνο δομικού στοιχείου, αποφασίστηκε η εκτέλεση ανάλυσης για τυπικά εξωτερικά τετραγωνικά υποστυλώματα που συναντώνται ευρέως σε κατασκευές. Αξιοποιώντας πληροφορίες από τον κατασκευαστικό τομέα, αποφασίστηκε η ανάλυση τετραγωνικών υποστυλωμάτων, ύψους τεσσάρων μέτρων (4,00 m) και διαστάσεων 400mm x 400mm, διαστάσεις δηλαδή οι οποίες αφορούν ένα τυπικό υποστύλωμα μιας συνηθισμένης κατασκευής. Ο οπλισμός των υποστυλωμάτων, ήταν 4Φ20 και 4Φ16 με συνδετήρες διαμέτρου 10mm ανά 100mm. Ενώ η περίοδος ανάλυσης της κατασκευής ήταν 50 έτη.



Σχήμα 35 : Σχεδιασμός του υποστυλώματος στο πρόγραμμα.

4.3.1 Ορισμός κλιματολογικών παραμέτρων

Όπως προαναφέρθηκε, εξετάστηκαν περιοχές οι οποίες βρίσκονταν στη θαλάσσια ζώνη ψεκασμού (marine spray zone) όπου οι κατασκευές εκτίθενται σε ψεκασμό από θαλασσινό νερό), σε απόσταση εντός 800 μέτρων από τη θάλασσα και σε απόσταση εντός 1,5 χιλιομέτρου από τη θάλασσα. Από τη στιγμή που το λογισμικό απευθύνεται στην αμερικανική αγορά, δεν διατίθενται πληροφορίες για τις κλιματολογικές συνθήκες της Κύπρου και ειδικότερα της Λεμεσού. Έτσι, για τις ανάγκες της μοντελοποίησης του προβλήματος για την περιοχή της Λεμεσού στο πρόγραμμα, με γνώμονα το γεωγραφικό πλάτος (34,68 για τη Λεμεσό) και τα δεδομένα για τις μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες στη

Λεμεσό που παραχωρήθηκαν από τον κλάδο ποιότητας αέρα Κύπρου του υπουργείου Εργασίας, Πρόνοιας και Κοινωνικών Ασφαλίσεων, επιλέχθηκε η περιοχή του Λος Άντζελες στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ (γεωγραφικό πλάτος 34,68, ενώ οι τιμές για τις μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες παρατίθενται σε σχετικό πίνακα παρακάτω). Δεδομένης της παραδοχής, ότι οι υπόλοιπες κλιματολογικές συνθήκες και τοπικές παράμετροι μεταξύ Λος Άντζελες και Λεμεσού είναι παρόμοιες, πραγματοποιήθηκε αντικατάσταση των μέσων μηνιαίων θερμοκρασιών του Λος Άντζελες, με τις αντίστοιχες της Λεμεσού.

Έτος Μήνας	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Μέση Μηνιαία θερμοκρασί α (°C)
Ιανουάριος	13,5	13,9	13,5	11,7	12,6	14,7	13,4
Φεβρουάριος	13,1	14,1	13,3	11,7	14,6	14,4	13,5
Μάρτιος	14,2	16,3	14,8	13,8	16,1	16,6	15,3
Απρίλιος	18,4	18,9	17,6	18,4	19,5	19,3	18,7
Μάιος	21,9	22,3	21,5	21,6	24,3	21,8	22,2
Ιούνιος	27,4	25,6	25,6	26,4	26,6	26,2	26,3
Ιούλιος	28,8	28,1	28,0	29,8	28,4	28,3	28,6
Αύγουστος	28,9064 5	30,2697 7	28,4514 2	30,0643 8	29,4020 2	28,3608 4	29,2
Σεπτέμβριος	25,841	27,4033 3	26,4281 9	26,905	26,5197 7	25,9617 7	26,5
Οκτώβριος	23,9965	23,2275	21,8726	23,9870	21,9413	22,1958	22,9

	1	5	8	5	9	3	
Νοέμβριος	18,0	20,3	15,9	19,5	19,9	17,5	18,5
Δεκέμβριος	15,4	16,4	13,8	14,9	13,4	16,2	14,9

Πίνακας 8 : Μέσες μηνιαίες τιμές για τη θερμοκρασία στη Λεμεσό, σύμφωνα με την υπηρεσία ποιότητας αέρα Κύπρου (2009-2014).

Μήνας	Μέση μηνιαία θερμοκρασία (°C)
Ιανουάριος	13,8
Φεβρουάριος	14,2
Μάρτιος	14,4
Απρίλιος	15,6
Μάιος	17,1
Ιούνιος	18,7
Ιούλιος	20,6
Αύγουστος	21,4
Σεπτέμβριος	21,1
Οκτώβριος	19,3
Νοέμβριος	16,4
Δεκέμβριος	13,8

Πίνακας 9 : Μέσσιες μηνιαίες θερμοκρασίες για την περιοχή του Λος Άντζελες, σύμφωνα με το πρόγραμμα Life-365.

Temperature Cycle (user defined)	
Temperature History	
Month	Temperature (C)
January	13.4
February	13.5
March	15.3
April	18.7
May	22.2
June	26.3
July	28.6
August	29.2
September	26.5
October	22.9
November	18.5
December	15.0

Current Analysis | Default Settings and Parameters | Online Help

Σχήμα 36 : Αντικατάσταση των τιμών της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας στο πρόγραμμα.

<p>Current Project</p> <p>Save project Save project as... Export project data... Close project</p> <p>Steps</p> <p>Define project... Define alternatives... Define exposure... Define mix designs... Compute service life... Define project costs... Compute life-cycle cost...</p> <p>Settings</p> <p>Help for this window... Set default values... About Life-365™...</p> <p>Tips</p>	<p>Project Exposure Concrete Mixtures Individual Costs Life-Cycle Co</p> <p>Select Method for Setting External Concentration and Temperature Pro</p> <p><input type="radio"/> Use defaults Location California</p> <p><input checked="" type="radio"/> Set values manually (below)</p> <p>Chloride Exposure (user defined)</p> <p>Max Concentration</p> <p><input checked="" type="radio"/> Manual <input type="text" value="30.000"/> kg/cub. m.</p> <p><input type="radio"/> ASTM C1556 <input type="text" value=""/> kg/cub. m.</p> <p>Add new Edit set Delete</p> <p>Time to Max</p> <p>Years to build to max surface concentration <input type="text" value="1.0"/></p>
---	--

Σχήμα 37 : Καθορισμός συνθηκών έκθεσης στο πρόγραμμα.

4.3.2 Ορισμός της παραμέτρου **Rebar % vol. concrete**

Για τον καθορισμό της παραμέτρου **Rebar % vol. Concrete**, που συμβολίζει το ποσοστό επί τοις εκατό του σκυροδέματος το οποίο αποτελείται από χάλυβα, εκτελέστηκε η παρακάτω διαδικασία. Αρχικά υπολογίστηκε ο συνολικός όγκος του υποστυλώματος.

$$\text{Συνολικός όγκος του υποστυλώματος} = 0,4 \times 0,4 \times 4$$

Ο οποίος, όπως προκύπτει ισούται με $0,64 \text{ m}^3$.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο συνολικός όγκος του διαμήκη οπλισμού.

$$\text{Συνολικός όγκος του διαμήκη οπλισμού} = 4 \frac{\pi(0,016^2)}{4} 4 + 4 \frac{\pi(0,02^2)}{4} 4$$

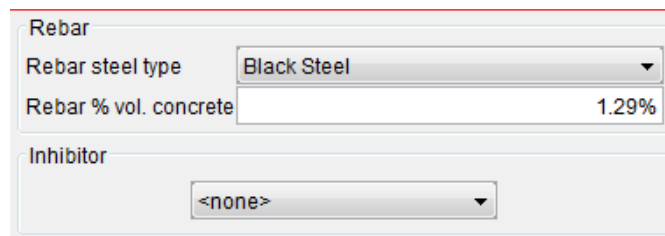
Ο οποίος, όπως προκύπτει ισούται με $0,00824 \text{ m}^3$.

Στη συνέχεια με την εφαρμογή της απλής μεθόδου των τριών, λαμβάνουμε την τιμή της παραμέτρου **Rebar % vol. Concrete**.

$$\frac{0,64}{0,00824} = \frac{100}{\text{Rebar \% vol. Concrete}}$$

$$\text{Rebar \% vol. Concrete} = \frac{100 \times 0,00824}{0,64}$$

Επομένως, **Rebar % vol. Concrete = 1,29%**



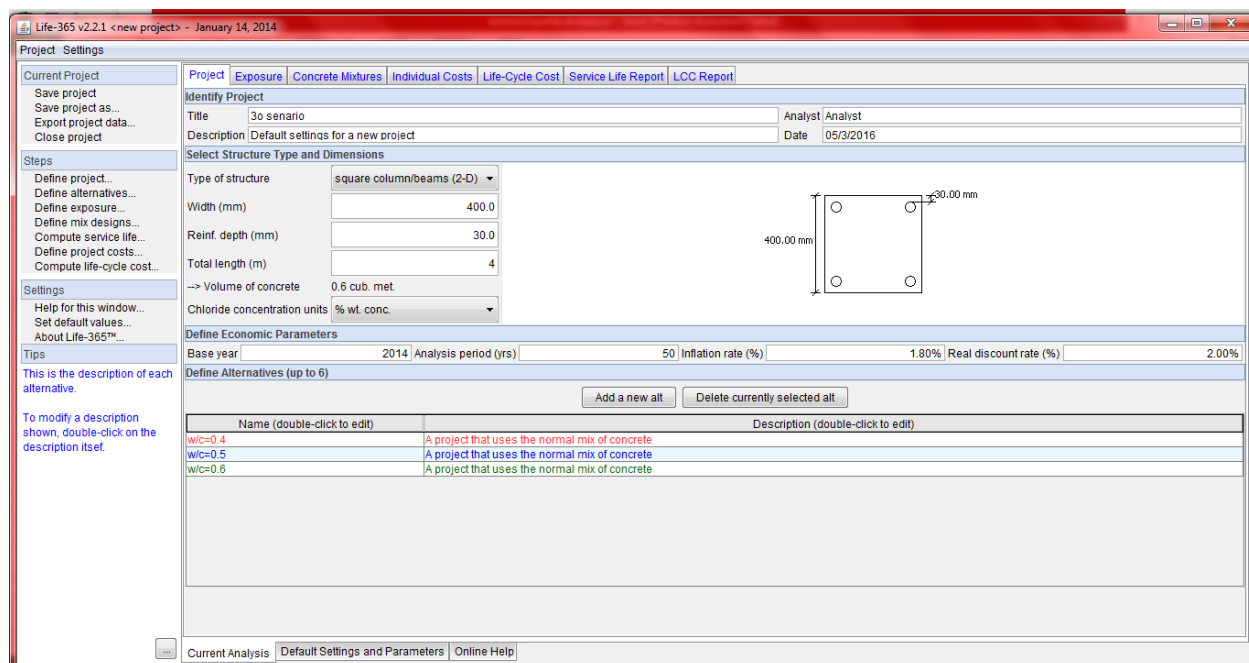
Rebar	
Rebar steel type	Black Steel
Rebar % vol. concrete	1.29%
Inhibitor	<none>

Σχήμα 38 : Καθορισμός της παραμέτρου **Rebar % vol. Concrete**.

4.4 Σενάρια ανάλυσης

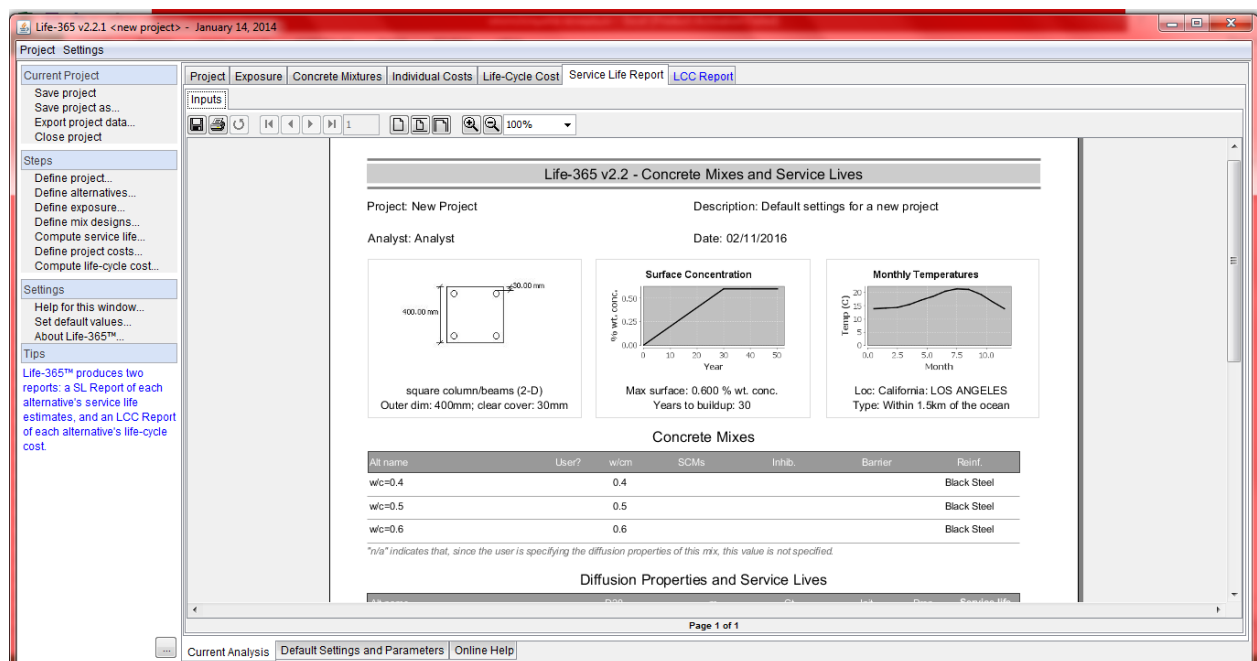
Για την εκτέλεση της ανάλυσης, χρειάστηκε να ληφθούν υπόψη αρκετές οι παράμετροι, οι οποίες αρκετές φορές έπρεπε να διαφέρουν μεταξύ τους. Αυτες λοιπόν, οι παράμετροι ήταν : η απόσταση από τη θάλασσα, ο λόγος νερού/τσιμέντο και το πάχος της επικάλυψης. Συνεπώς για τον καλύτερο συνδυασμό τους, δημιουργήθηκαν ορισμένα σενάρια όπου σε καθένα από αυτά μια παράμετρος διατηρείται σταθερή ενώ οι άλλες δύο μεταβάλλονται. Τα σενάρια τα οποία εξετάστηκαν παρουσιάζονται παρακάτω.

1. Σταθερή απόσταση από τη θάλασσα - marine spray zone, σταθερό πάχος επικάλυψης 30mm, μεταβάλλεται ο λόγος νερού/τσιμέντο 0,4, 0,5, 0,6.



Σχήμα 39 : Καθορισμός πρώτου σεναρίου.

2. Σταθερή απόσταση από τη θάλασσα - marine spray zone, σταθερό πάχος επικάλυψης 35mm, μεταβάλλεται ο λόγος νερού/τσιμέντο 0,4, 0,5, 0,6.
3. Σταθερή απόσταση από τη θάλασσα - within 800m of the ocean, σταθερό πάχος επικάλυψης 30mm, μεταβάλλεται ο λόγος νερού/τσιμέντο 0,4, 0,5, 0,6.
4. Σταθερή απόσταση από τη θάλασσα - within 800m of the ocean, σταθερό πάχος επικάλυψης 35mm μεταβάλλεται ο λόγος νερού/τσιμέντο 0,4, 0,5, 0,6.
5. Σταθερή απόσταση από τη θάλασσα - within 1.5km of the ocean, σταθερό πάχος επικάλυψης 30mm μεταβάλλεται ο λόγος νερού/τσιμέντο 0,4, 0,5, 0,6.

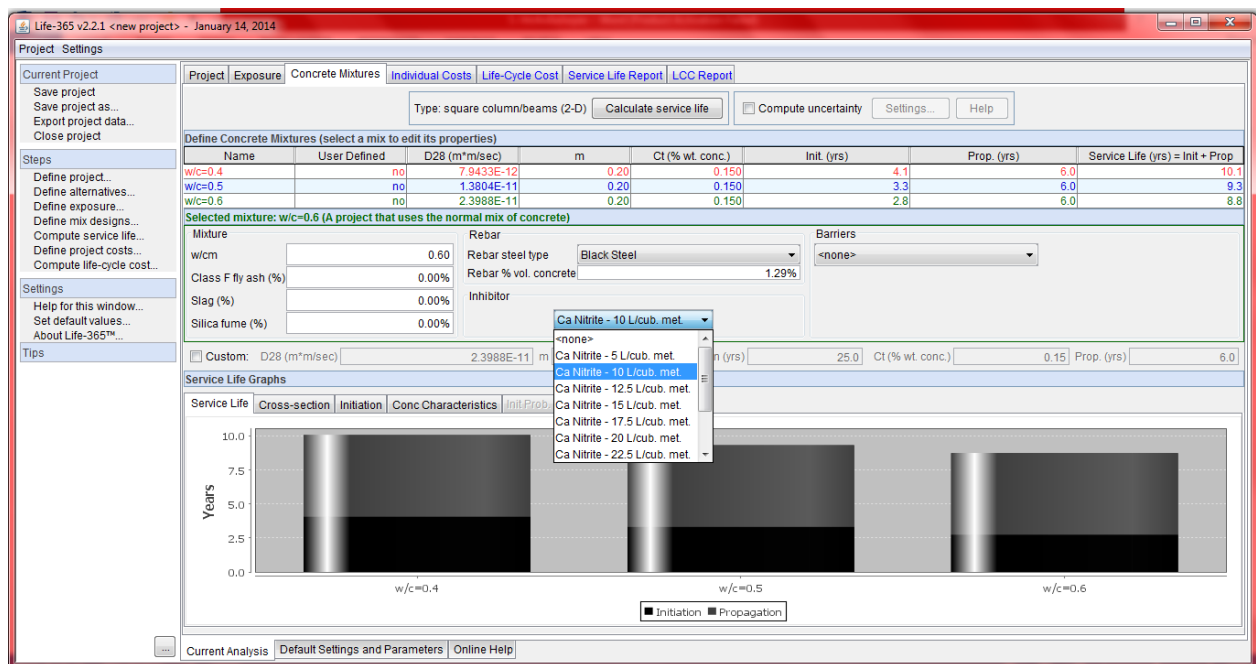


Σχήμα 40 : Καθορισμός πέμπτου σεναρίου.

Στη συνέχεια, για λόγους συγκριτικής ανάλυσης τα ίδια σεναρία, μοντελοποιήθηκαν ξάνα στο πρόγραμμα με τις ίδιες παραμέτρους, αλλά και με την προσθήκη προστατευτικών μέτρων ενάντια στη διάβρωση, όπως η ιπτάμενη τέφρα στο σκυρόδεμα και οι αναστολείς διάβρωσης. Πιο συγκεκριμένα τα σεναρία αυτά αναλύθηκαν ξανά τέσσερις ακόμη φορές.

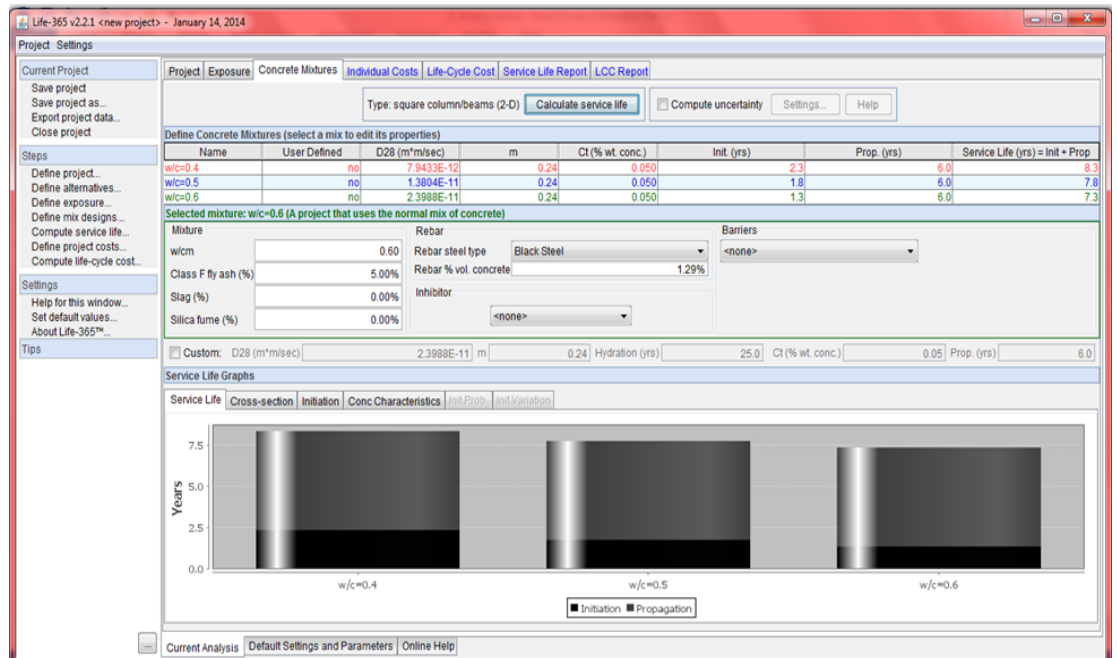
Στις αναλύσεις που ακολούθησαν έγιναν οι παρακάτω τροποποιήσεις :

1. Προσθήκη αναστολέα διάβρωσης Ca Nitrite (νιτρώδες ασβέστιο / $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$) στο σκυρόδεμα, σε αναλογία 5 l/m³ σκυροδέματος.
2. Προσθήκη αναστολέα διάβρωσης Ca Nitrite (νιτρώδες ασβέστιο / $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$) στο σκυρόδεμα, σε αναλογία 10 l/m³ σκυροδέματος.



Σχήμα 41 : Προσθήκη αναστολέα διάβρωσης στο πρόγραμμα Life-365.

3. Προσθήκη ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F στο σκυρόδεμα, σε ποσοστό 5%.
4. Προσθήκη ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F στο σκυρόδεμα, σε ποσοστό 10%.



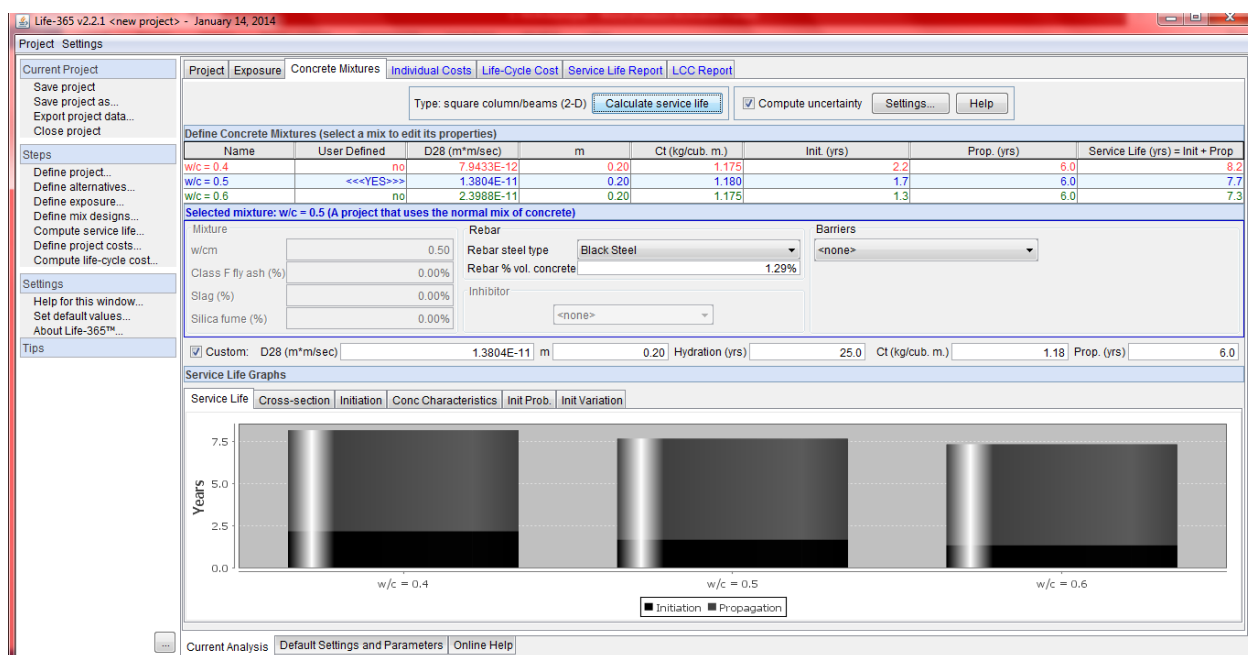
Εικόνα 5.1 : Προσθήκη ποσοστού ιπτάμενης τέφρας στο πρόγραμμα Life-365.

Στην ενότητα που ακολουθεί παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις που διεξήχθησαν.

5 Αποτελέσματα

5.1 Αποτελέσματα πρώτου σεναρίου

Το πρώτο σενάριο περιλαμβάνει τις εξής παραδοχές : Σταθερή απόσταση από τη θάλασσα - marine spray zone, σταθερό πάχος επικάλυψης 30mm, μεταβάλλεται ο λόγος νερού/τσιμέντο 0,4, 0,5, 0,6. Τα αποτελέσματα από το λογισμικό διαφαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν.

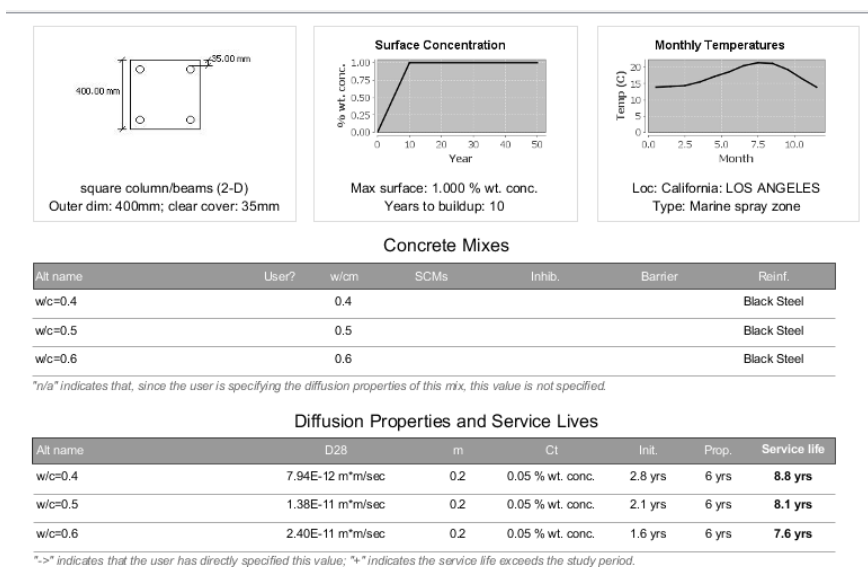


Σχήμα 42: Αποτελέσματα πρώτου σεναρίου.

Ήδη από το πρώτο σενάριο παρατηρείται πως η αύξηση του λόγου w/c οδηγεί σε μείωση της διάρκειας ζωής, γεγονός το οποίο οφείλεται στην αυξημένη ροή χλωριόντων στο σκυρόδεμα λόγω του αυξημένου πορώδους του υλικού.

5.2 Αποτελέσματα δεύτερου σεναρίου

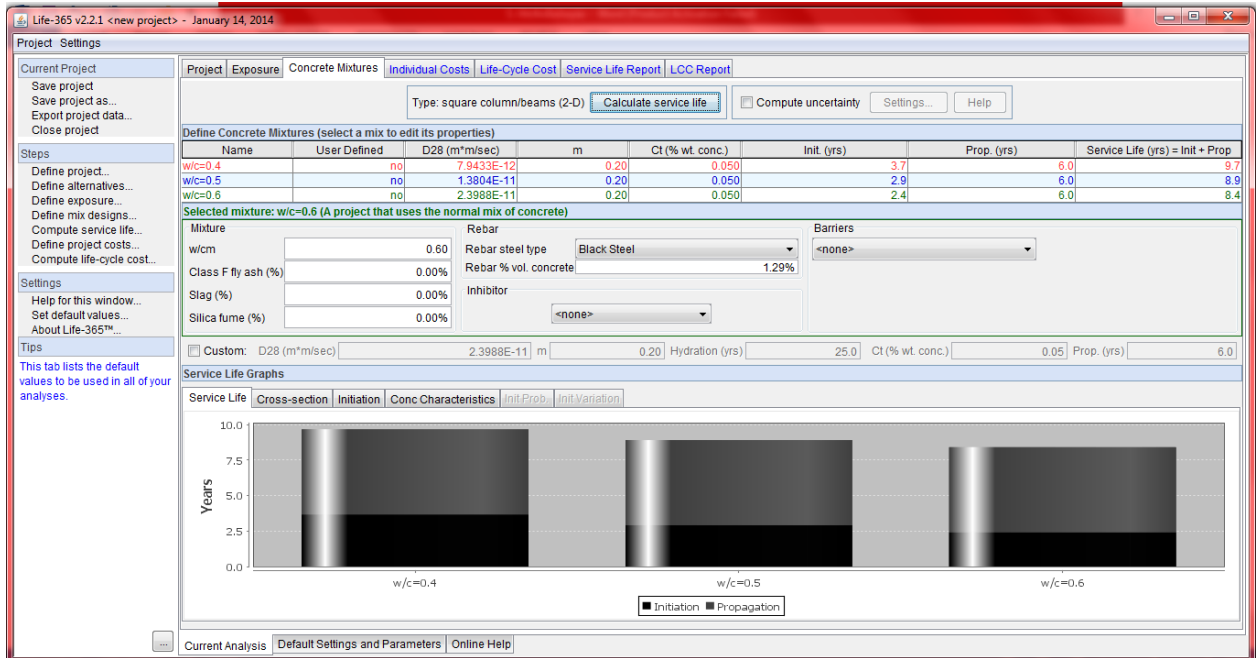
Το δεύτερο σενάριο περιλαμβάνει τις εξής παραδοχές : Σταθερή απόσταση από τη θάλασσα - marine spray zone, σταθερό πάχος επικάλυψης 35mm, μεταβάλλεται ο λόγος νερού/τσιμέντο 0,4, 0,5, 0,6. Τα αποτελέσματα από την επίλυση του σεναρίου στο λογισμικό Life-365 παρατίθενται στις παρακάτω εικόνες.



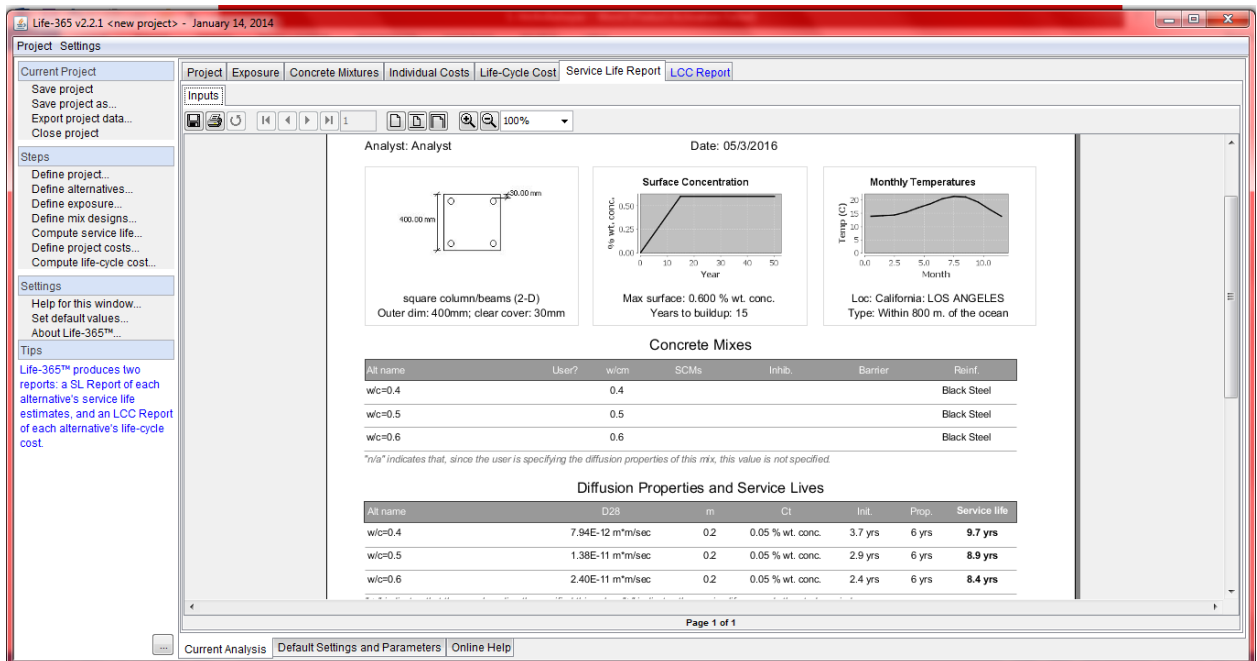
Σχήμα 43: Αποτελέσματα δεύτερου σεναρίου.

5.3 Αποτελέσματα τρίτου σεναρίου

Οι παραδοχές από τις οποίες αποτελείται το τρίτο σενάριο είναι : Σταθερή απόσταση από τη θάλασσα - within 800m of the ocean, σταθερό πάχος επικάλυψης 30mm, μεταβάλλεται ο λόγος νερού/τσιμέντο 0,4, 0,5, 0,6. Τα αποτελέσματα από τη μοντελοποίηση του διακρίνονται στις παρακάτω εικόνες.



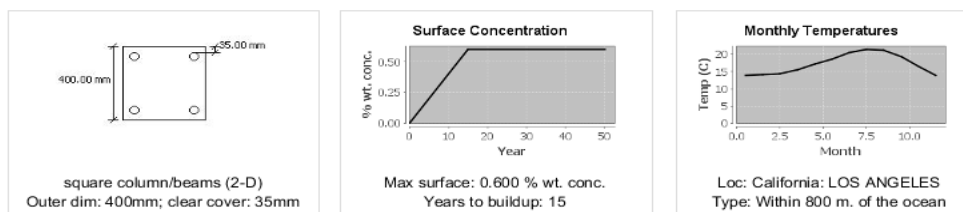
Σχίμα 44: Αποτελέσματα τρίτου σεναρίου.



Σχίμα 45: Αποτελέσματα τρίτου σεναρίου.

5.4 Αποτελέσματα τέταρτου σεναρίου

Στο τέταρτο σενάριο διατηρήθηκε σταθερή απόσταση από τη θάλασσα - within 800m of the ocean, σταθερό πάχος επικάλυψης 35mm, ενώ μεταβάλλεται ο λόγος νερού/τσιμέντο 0,4, 0,5, 0,6. Το μοντέλο του τέταρτου σεναρίου δίνει τα αποτελέσματα που αναφέρονται στα σχήματα που ακολουθούν.



Concrete Mixes

Alt name	User?	w/cm	SCMs	Inhib.	Barrier	Reinf.
w/c=0.4		0.4				Black Steel
w/c=0.5		0.5				Black Steel
w/c=0.6		0.6				Black Steel

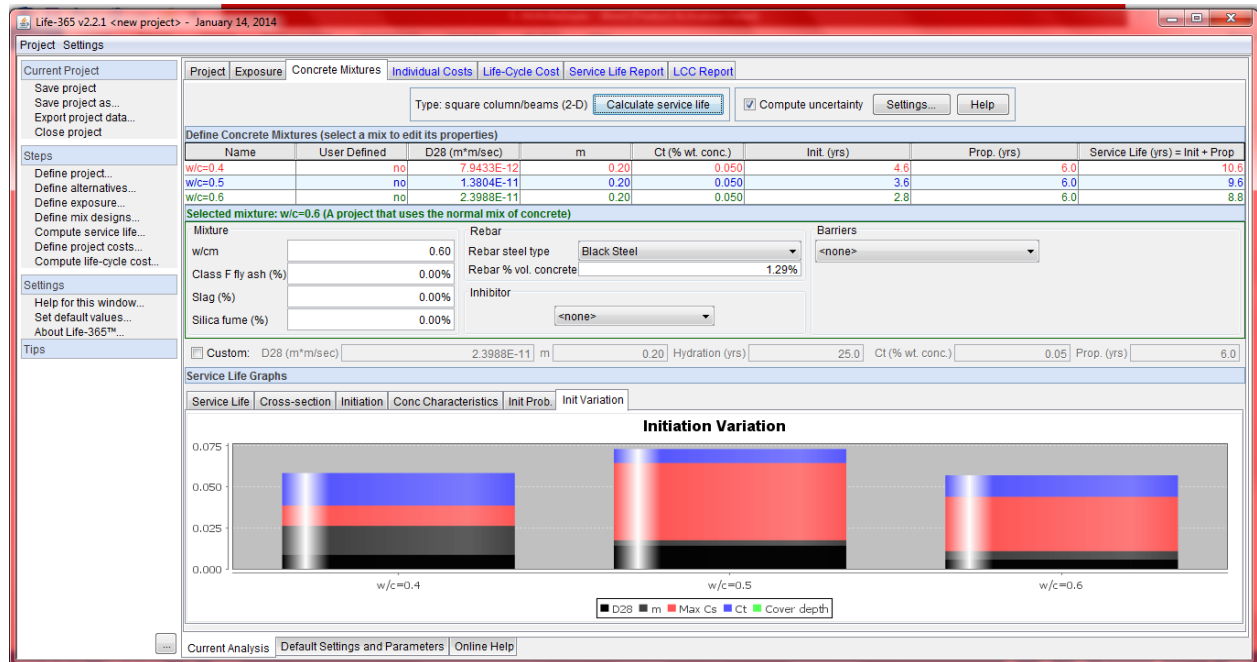
"n/a" indicates that, since the user is specifying the diffusion properties of this mix, this value is not specified.

Diffusion Properties and Service Lives

Alt name	D28	m	Ct	Init.	Prop.	Service life
w/c=0.4	7.94E-12 m ² /sec	0.2	0.05 % wt. conc.	4.6 yrs	6 yrs	10.6 yrs
w/c=0.5	1.38E-11 m ² /sec	0.2	0.05 % wt. conc.	3.6 yrs	6 yrs	9.6 yrs
w/c=0.6	2.40E-11 m ² /sec	0.2	0.05 % wt. conc.	2.8 yrs	6 yrs	8.8 yrs

"->" indicates that the user has directly specified this value; "+" indicates the service life exceeds the study period.

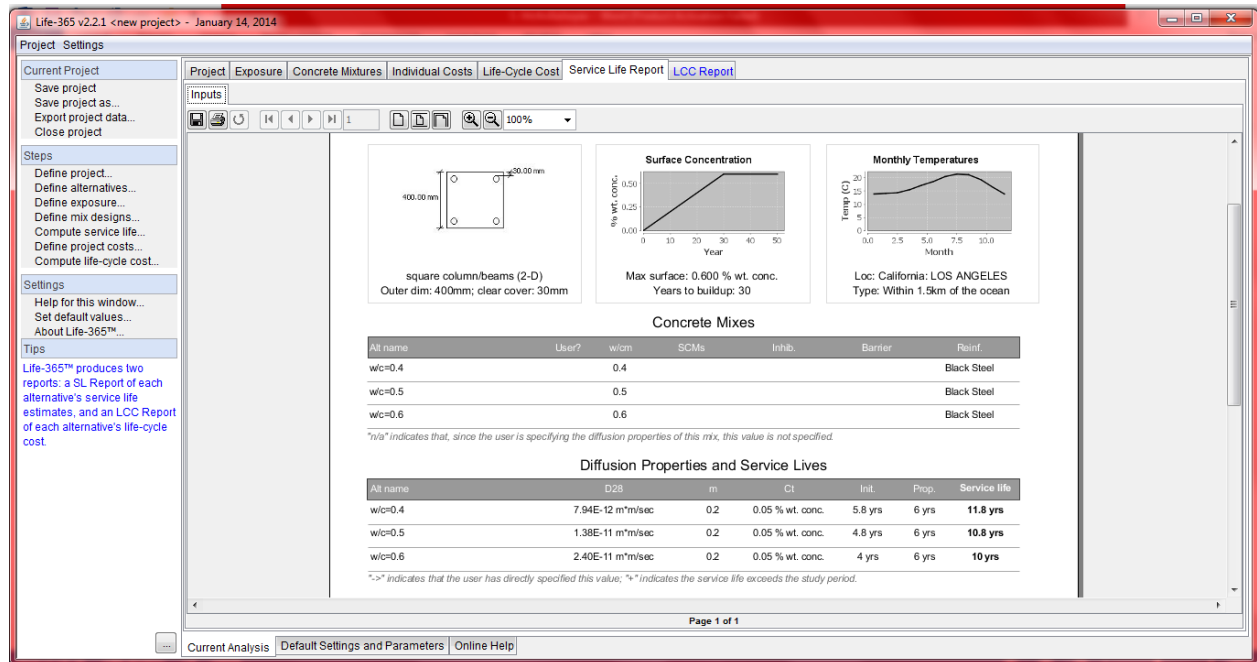
Σχήμα 46: Αποτελέσματα τέταρτου σεναρίου.



Σχήμα 47 : Αποτελέσματα τέταρτου σεναρίου.

5.5 Αποτελέσματα πέμπτου σεναρίου

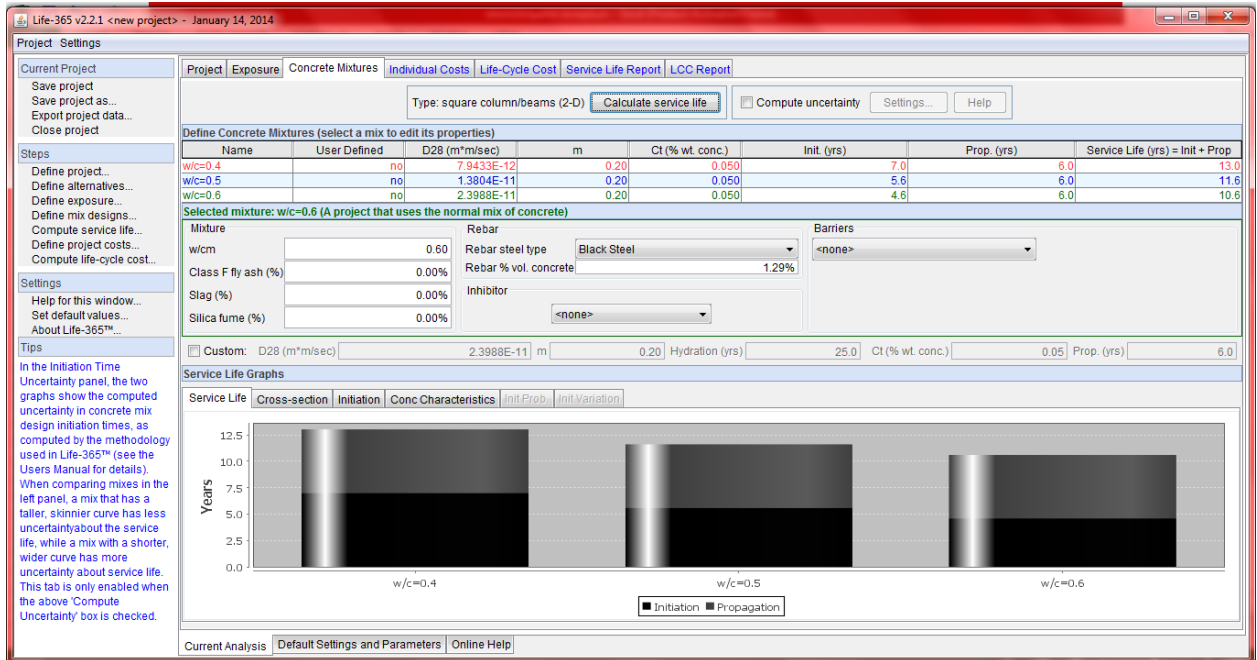
Οι συνιστώσες του πέμπτου σεναρίου είναι : Σταθερή απόσταση από τη θάλασσα - within 1.5km of the ocean, σταθερό πάχος επικάλυψης 30mm, μεταβλητός λόγος νερού/τσιμέντο 0,4, 0,5, 0,6. Απο τη μοντελοποίηση εξήχθησαν τα αποτελέσματα που διαφαίνονται παρακάτω.



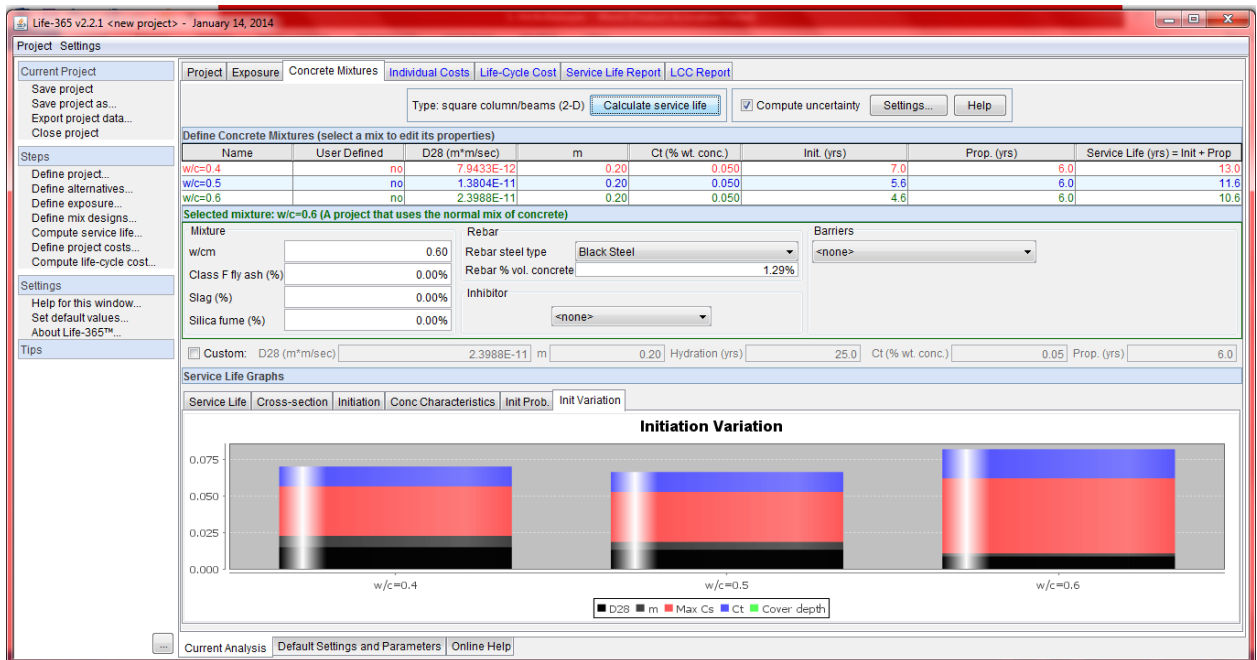
Σχήμα 48: Αποτελέσματα πέμπτου σεναρίου.

5.6 Αποτελέσματα έκτου σεναρίου

Για την εκτέλεση του έκτου σεναρίου έγιναν οι εξής παραδοχές : Σταθερή απόσταση από τη θάλασσα - within 1.5km of the ocean, σταθερό πάχος επικάλυψης 35mm μεταβάλλεται ο λόγος νερού/τσιμέντο 0,4, 0,5, 0,6. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης του σεναρίου στο πρόγραμμα φαίνονται στις παρακάτω εικόνες.



Σχήμα 49: Αποτελέσματα έκτου σεναρίου.



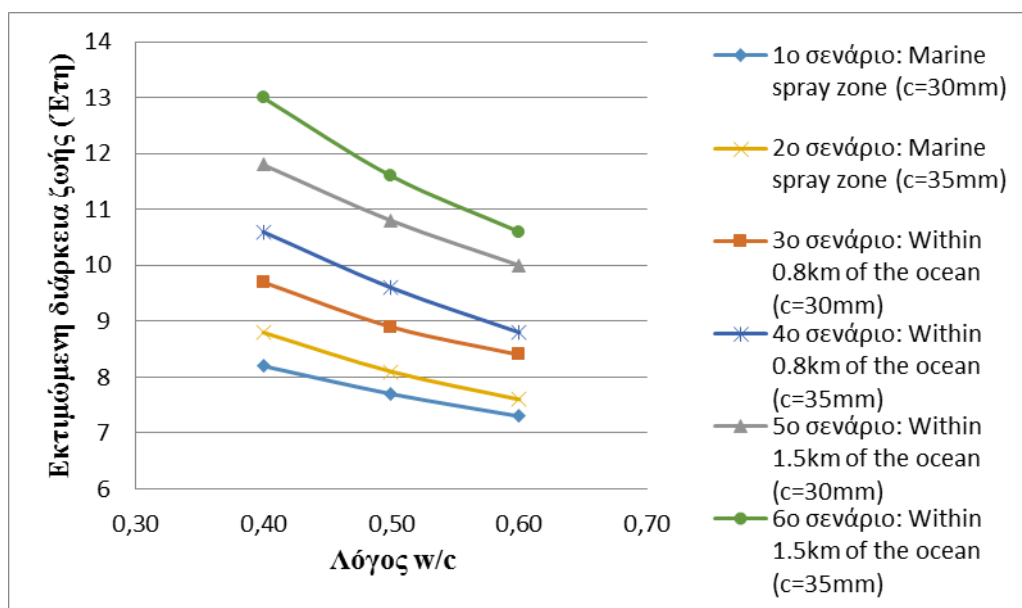
Σχήμα 50: Αποτελέσματα έκτου σεναρίου.

5.7 Συγκεντρωτικοί πίνακες αποτελεσμάτων

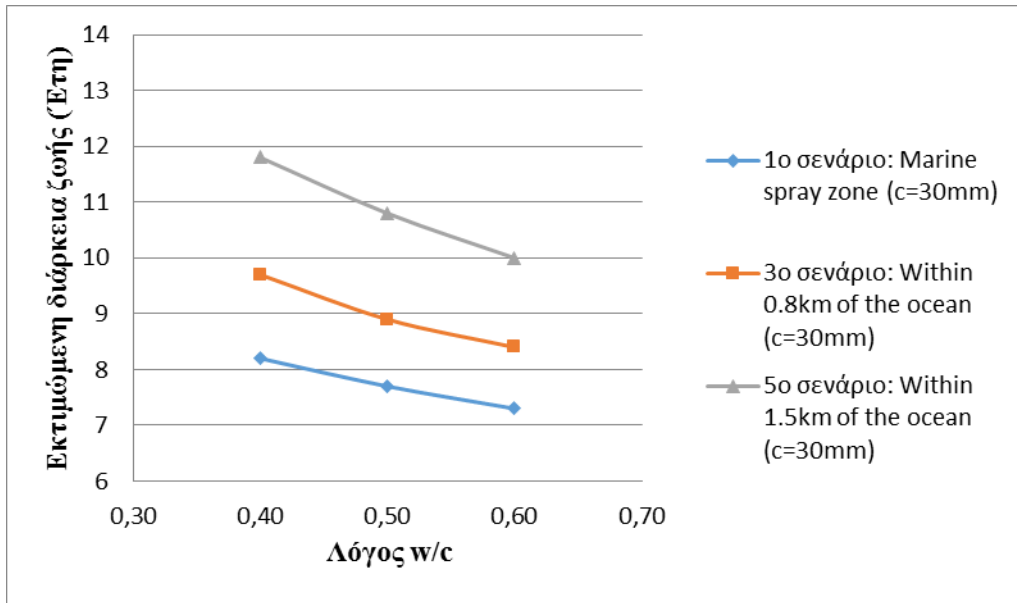
Τα αποτελέσματα από την επίλυση όλων των παραπάνω σεναρίων αποτυπώνονται στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα.

Πίνακας 10: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων εκτιμωμένης διάρκειας ζωής για το κάθε σενάριο.

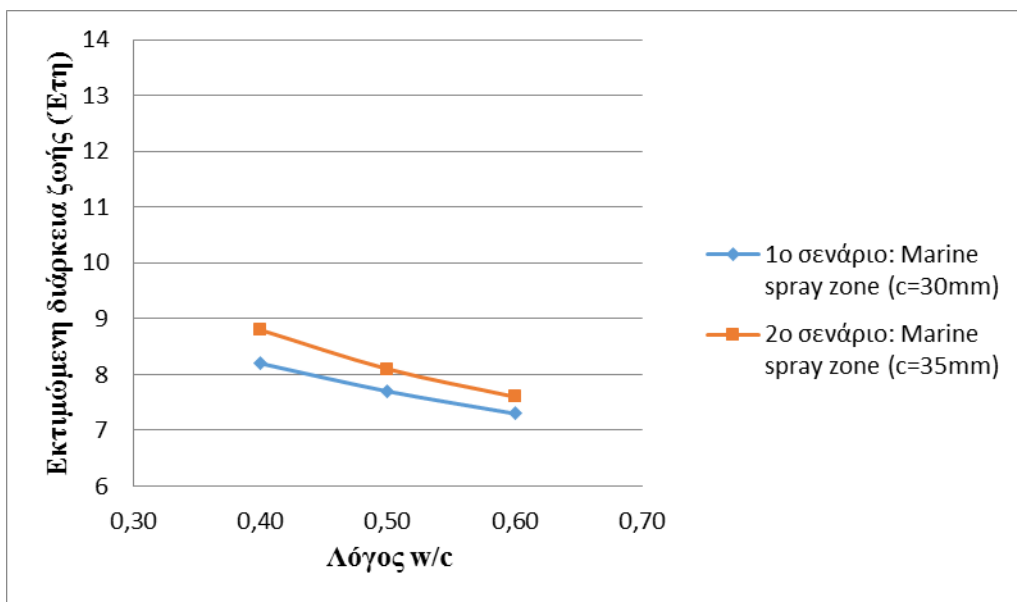
Εκτιμωμένη διάρκεια ζωής (Ετη)						
Λόγος w/c	1° Σενάριο	2° Σενάριο	3° Σενάριο	4° Σενάριο	5° Σενάριο	6° Σενάριο
0.4	8,2	8,8	9,7	10,6	11,8	13
0.5	7,7	8,1	8,9	9,6	10,8	11,6
0.6	7,3	7,6	8,4	8,8	10	10,6



Σχήμα 51: Γραφική απεικόνιση εκτιμωμένης διάρκειας ζωής κάθε σεναρίου.



Σχήμα 52: Γραφική απεικόνιση της επιρροής της απόστασης από τη θάλασσα στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής, για σταθερό πάχος επικάλυψης 30mm



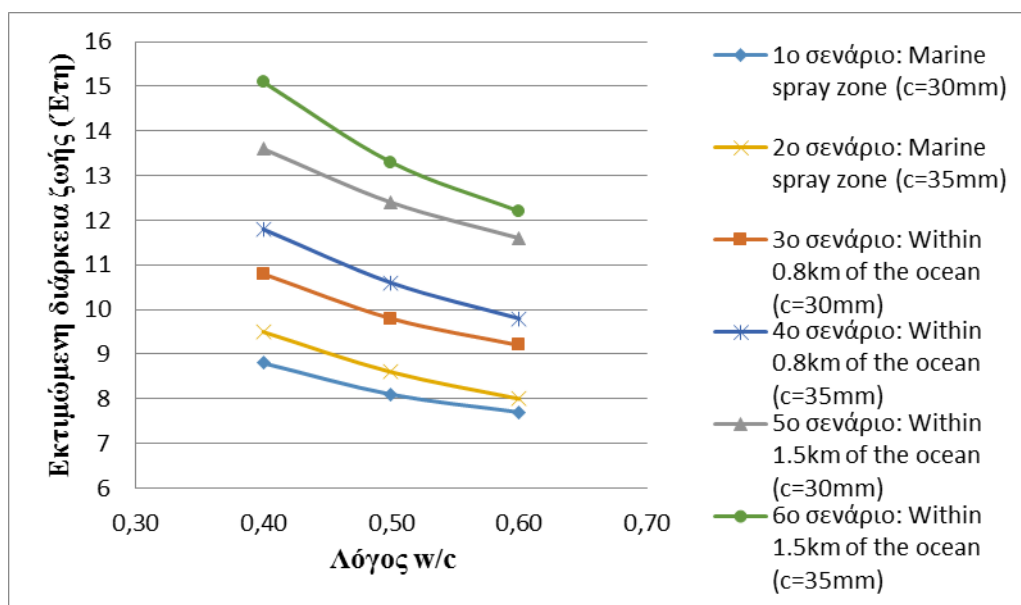
Σχήμα 53: Γραφική απεικόνιση της επιρροής του πάχους επικάλυψης στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για σταθερή απόσταση από τη θάλασσα marine spray zone.

Παρατηρώντας τα πιο πάνω σχήματα, διαπιστώνουμε αρχικά ότι με την αύξηση του λόγου νερού/τσιμέντο μειώνεται η εκτιμώμενη διάρκεια ζωής. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό, νοουμένου ότι με την αύξηση της ποσότητας του νερού στο σκυρόδεμα, επέρχεται αύξηση του πορώδους του σκυροδέματος, φαινόμενο το οποίο κάνει τη διείσδυση των χλωριδίων στο σκυρόδεμα αισθητά ευκολότερη. Παραδείγματος χάρη, στο πρώτο σενάριο μια αύξηση της τάξης του 50% στην τιμή του λόγου νερού/τσιμέντο, επιφέρει μείωση της τάξης του 11% στην προβλεπόμενη διάρκεια ζωής του δομικού στοιχείου της κατασκευής. Από την άλλη πλευρά, για δεδομένο λόγο νερού/τσιμέντο (π.χ. 0,5) και δεδομένη απόσταση από τη θάλασσα (marine spray zone) για μια μεταβολή της τάξης του 16,67% στην τιμή του πάχους επικάλυψης (από 30 mm σε 35 mm) παρατηρούμε μια αύξηση της τάξης του 5,2% στην προβλεπόμενη διάρκεια ζωής (από 7,7 έτη σε 8,1 έτη), η οποία δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη δεδομένης της ακρίβειας της μοντελοποίησης.

Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για προσθήκη αναστολέα διάβρωσης Ca nitrite 5 L/m³ στο σκυρόδεμα.

Πίνακας 11: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων εκτιμώμενης διάρκειας ζωής για το κάθε σενάριο, έπειτα από προσθήκη αναστολέα διάβρωσης 5L/m³.

Εκτιμώμενη διάρκεια ζωής (Ετη)						
Λόγος w/c	1° Σενάριο	2° Σενάριο	3° Σενάριο	4° Σενάριο	5° Σενάριο	6° Σενάριο
0.4	8,8	9,5	10,8	11,8	13,6	15,1
0.5	8,1	8,6	9,8	10,6	12,4	13,3
0.6	7,7	8,0	9,2	9,8	11,6	12,2



Σχήμα 54 : Γραφική απεικόνιση εκτιμώμενης διάρκειας ζωής κάθε σεναρίου, έπειτα από προσθήκη αναστολέα διάβρωσης 5L/m³.

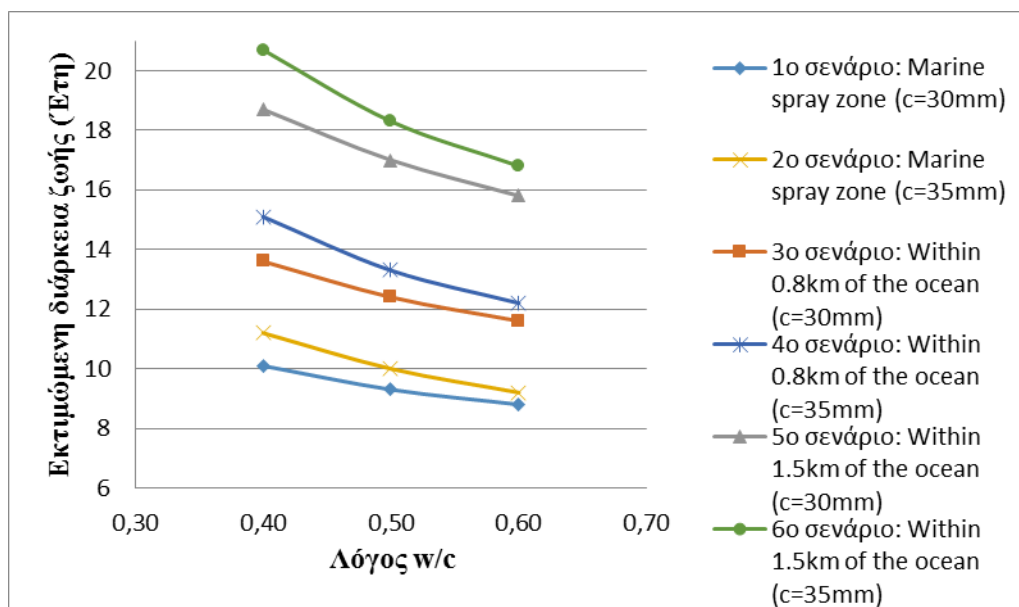
Παρατηρώντας τη συγκεκριμένη γραφική παράσταση και συγκρίνοντάς τη με την προηγούμενη, (η οποία περιέχει τα αποτελέσματα των σεναρίων χωρίς τη λήψη μέτρων προστασίας ενάντια στη διάβρωση), παρατηρούμε ότι ακόμη και η προσθήκη μικρής ποσότητας αναστολέα διάβρωσης (στην προκειμένη περίπτωση νιτρώδες ασβέστιο 5 L/m³) προκαλεί αισθητή αύξηση στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής. Παραδειγματικά, για τέταρτο

σενάριο και με λόγο νερού/τσιμέντο = 0,4, η προσθήκη αναστολέα διάβρωσης 5 L/m³ επέφερε αύξηση της τάξης του 11,3% στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής (από 10,6 έτη σε 11,8 έτη).

Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για προσθήκη αναστολέα διάβρωσης Ca nitrite 10 L/m³ στο σκυρόδεμα.

Εκτιμώμενη διάρκεια ζωής (Ετη)						
Λόγος w/c	1° Σενάριο	2° Σενάριο	3° Σενάριο	4° Σενάριο	5° Σενάριο	6° Σενάριο
0.4	10,1	11,2	13,6	15,1	18,7	20,7
0.5	9,3	10,0	12,4	13,3	17,0	18,3
0.6	8,8	9,2	11,6	12,2	15,8	16,8

Πίνακας 12 : Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων εκτιμωμένης διάρκειας ζωής για το κάθε σενάριο, έπειτα από προσθήκη αναστολέα διάβρωσης 10L/m³.



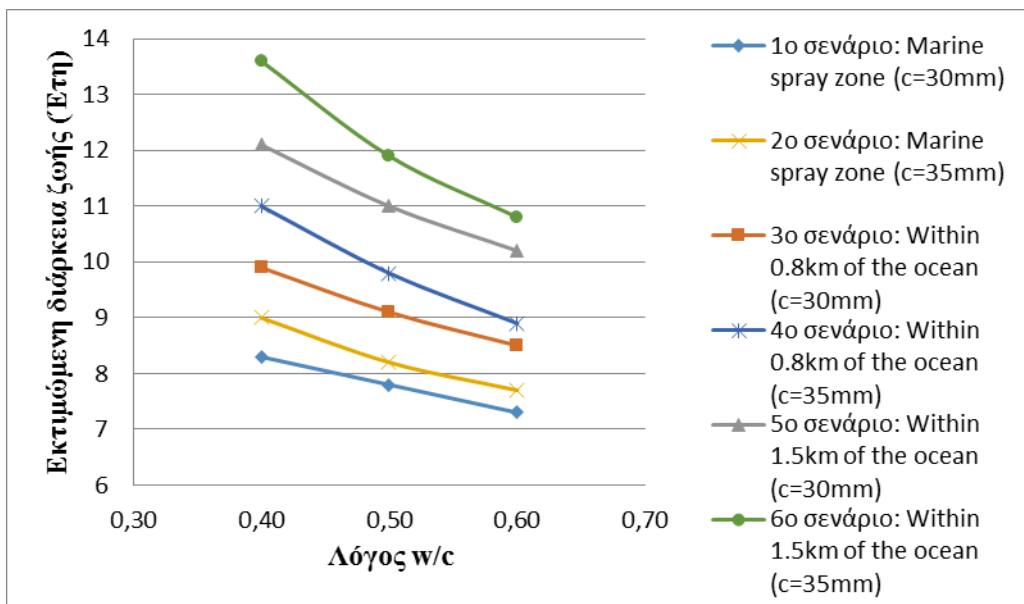
Σχήμα 55 : Γραφική απεικόνιση εκτιμωμένης διάρκειας ζωής κάθε σεναρίου, έπειτα από προσθήκη αναστολέα διάβρωσης 10L/m³.

Όπως διαφαίνεται, έπειτα από σύγκριση των αρχικών τιμών (χωρίς προσθήκη αναστολέων διάβρωσης), ο διπλασιασμός της ποσότητας του αναστολέα διάβρωσης στο σκυρόδεμα προκαλεί θεαματική αύξηση στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής. Για παράδειγμα στο τέταρτο σενάριο, η αύξηση του νιτρώδους ασβεστίου στο σκυρόδεμα από 5 L/m³ σε 10 L/m³ οδηγεί σε αύξηση από 10,6 έτη σε 15,1, δηλαδή μια αύξηση της τάξης του 42,4%. Η σύγκριση της ποσότητας σε αναστολέα 10 L/m³ ακόμη και με το τέταρτο σενάριο με προσθήκη αναστολέα 5 L/m³ πάλι οδηγεί σε συνταρακτική αύξηση της προβλεπόμενης διάρκειας ζωής της τάξης, μάλιστα, του 28% επιπλέον (από 11,8 έτη σε 15,1 έτη).

Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για προσθήκη ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F 5% στο σκυρόδεμα.

Εκτιμώμενη διάρκεια ζωής (Ετη)						
Λόγος w/c	1 ^ο Σενάριο	2 ^ο Σενάριο	3 ^ο Σενάριο	4 ^ο Σενάριο	5 ^ο Σενάριο	6 ^ο Σενάριο
0.4	8,3	9,0	9,9	11	12,1	13,6
0.5	7,8	8,2	9,1	9,8	11,0	11,9
0.6	7,3	7,7	8,5	8,9	10,2	10,8

Πίνακας 13 : Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων εκτιμωμένης διάρκειας ζωής για το κάθε σενάριο, έπειτα από προσθήκη ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F 5%.



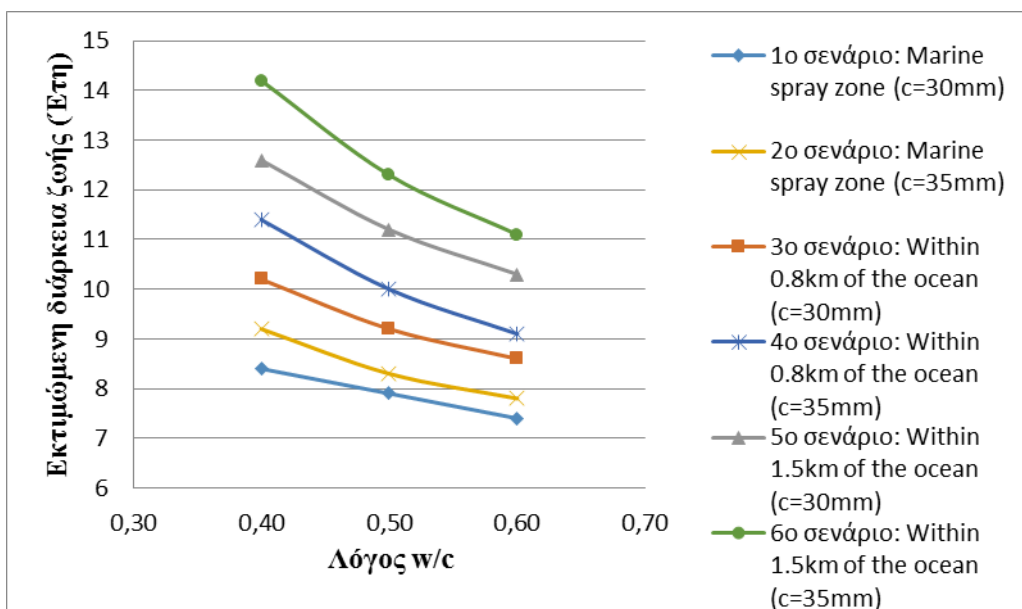
Πίνακας 14 : Γραφική απεικόνιση εκτιμώμενης διάρκειας ζωής κάθε σεναρίου, έπειτα από προσθήκη ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F 5%.

Συγκρίνοντας τις τιμές της εκτιμώμενης διάρκειας ζωής για προσθήκη ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F σε αναλογία 5%, σε σχέση με τις αντίστοιχες για καμία λήψη μέτρων προστασίας, παρατηρούμε ότι δεν επέρχεται καμία σημαντική αύξηση της διάρκειας ζωής. Χαρακτηριστικά, παρατηρούμε για το τέταρτο σενάριο και για το λόγο νερού/τσιμέντο = 0,4, μια μεταβολή της τάξης του 3,7% (από 10,6 έτη σε 11 έτη), η οποία είναι σχεδόν αμελητέα δεδομένης της ακρίβειας των υπολογισμών. Επομένως διακρίνουμε ότι δεν επηρεάζεται αισθητά η εκτιμώμενη διάρκεια ζωής από την προσθήκη χαμηλού ποσοστού ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F.

Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για προσθήκη ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F 10% στο σκυρόδεμα.

Εκτιμώμενη διάρκεια ζωής (Ετη)						
Λόγος w/c	1 ^ο Σενάριο	2 ^ο Σενάριο	3 ^ο Σενάριο	4 ^ο Σενάριο	5 ^ο Σενάριο	6 ^ο Σενάριο
0.4	8,4	9,2	10,2	11,4	12,6	14,2
0.5	7,9	8,3	9,2	10,0	11,2	12,3
0.6	7,4	7,8	8,6	9,1	10,3	11,1

Πίνακας 15 : Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων εκτιμωμένης διάρκειας ζωής για το κάθε σενάριο, έπειτα από προσθήκη ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F 10%..



Σχήμα 56 : Γραφική απεικόνιση εκτιμωμένης διάρκειας ζωής κάθε σεναρίου, έπειτα από προσθήκη ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F 10%.

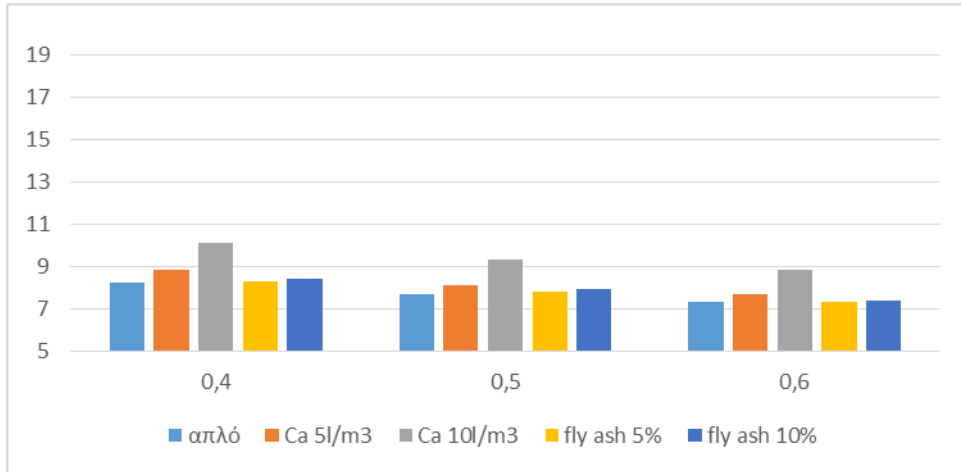
Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης του μοντέλου στο λογισμικό, μετά την προσθήκη ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F, στο σκυρόδεμα σε αναλογία 10%, διαπιστώνεται μια ικανοποιητική αύξηση της διάρκειας ζωής. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση του τέταρτου σεναρίου, για λόγο νερού/τσιμέντο =0,4 όπου με την προσθήκη 10% ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F, επέρχεται μια αύξηση της τάξης του 7,5% (από 10,6 έτη σε 11,4 έτη). Επιπλέον, συγκρίνοντας τη συγκεκριμένη αύξηση με την αύξηση που προκάλεσε η

προσθήκη 5% ιπτάμενης τέφρας (3,7%), διαπιστώνεται ότι ο διπλασιασμός της περιεκτικότητας σε ιπτάμενη τέφρα οδηγεί σε διπλασιασμό του ποσοστού αύξησης της εκτιμώμενης διάρκειας ζωής.

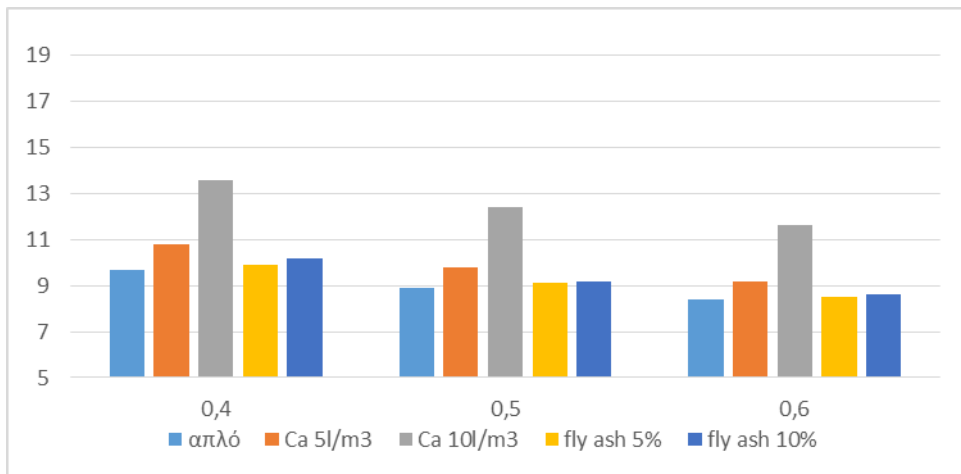
6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ / ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Παρατηρώντας τα παρακάτω διαγράμματα, γίνεται εύκολα αντιληπτό, ότι η απόσταση από τη θάλασσα επηρεάζει σημαντικά την εκτίμηση της διάρκειας ζωής. Το γεγονός αυτό, τονίζεται από την αισθητή αύξηση της προβλεπόμενης διάρκειας ζωής του δομικού στοιχείου μιας κατασκευής, καθώς αυξάνεται η απόσταση της κατασκευής από τη θάλασσα. Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι η απόσταση από τη θάλασσα επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό την εκτίμηση διάρκειας ζωής από το λόγο νερού/τσιμέντο. Παρακολουθώντας την εκτιμώμενη διάρκεια ζωής στις μακρυνές από τη θάλασσα κατασκευές με υψηλό λόγο νερού/τσιμέντο (0,5, 0,6), διαπιστώνεται ότι η τιμή της είναι αισθητά μεγαλύτερη από κατασκευές που φτιάχτηκαν από μίγμα σκυροδέματος με χαμηλό λόγο νερού/τσιμέντο αλλά βρίσκονται πιο κοντά στη θάλασσα (πχ marine spray zone, within 0.8km of the ocean). Το γεγονός αυτό, οφείλεται στη χαμηλότερη περιεκτικότητα του ατμοσφαιρικού αέρα σε χλωρίδια, στις απομακρυσμένες από τη θάλασσα περιοχές.

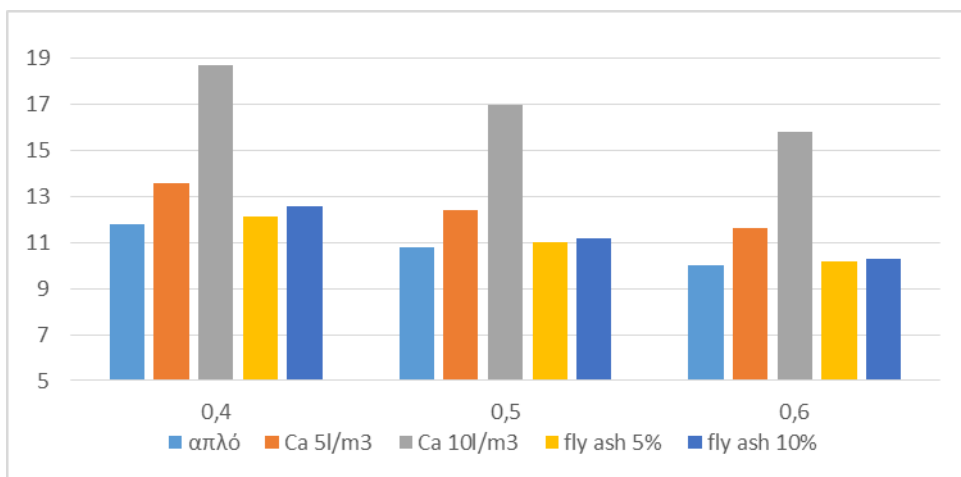
Επιπλέον, συγκρίνοντας τις τιμές για προσθήκη ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F, σε αναλογία 10% στο μίγμα του σκυροδέματος, με τις αντίστοιχες τιμές που δίνει η προσθήκη 5%, στις υψηλές τιμές του δείκτη νερού/τσιμέντο (0,5, 0,6), είναι ορατό ότι δεν απέχουν σημαντικά μεταξύ τους. Επομένως δύναται να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι σε περιπτώσεις κατασκευών σκυροδέματος με μεγάλη περιεκτικότητα σε νερό, η προσθήκη ιπτάμενης τέφρας δεν επιφέρει ικανοποιητική επίδραση στην εκτίμηση διάρκειας ζωής. Επίσης σε κατασκευές κοντά στη θάλασσα ανεξαρτήτως του λόγου νερού προς τσιμέντο τα αποτελέσματα μεταξύ της προσθήκης 5% και 10% ιπτάμενης τέφρας είναι παρόμοια. Επιπροσθέτως, σε κατασκευές που βρίσκονται σε χαμηλή απόσταση από τη θάλασσα, η προσθήκη 5 L/m³ νιτρώδους ασβεστίου (αναστολέα διάβρωσης), επισύρει παραπλήσια αποτελέσματα, με εκείνα της προσθήκης 5% αλλά και 10% ιπτάμενης τέφρας στο σκυρόδεμα.



Σχήμα 57 : Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ των μεθόδων προστασίας για απόσταση marine spray zone και πάχος επικάλυψης 30mm•



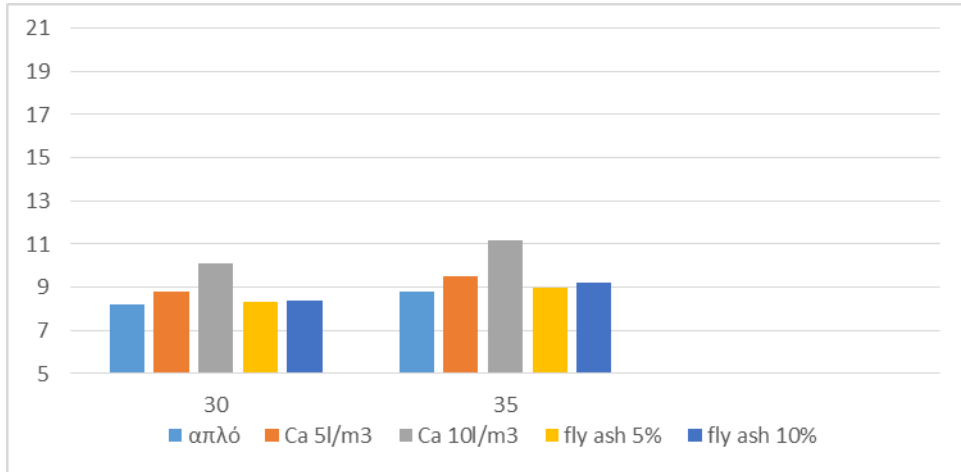
Σχήμα 58 : Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ των μεθόδων προστασίας για απόσταση από τη θάλασσα εντός 0,8km και πάχος επικάλυψης 30mm.



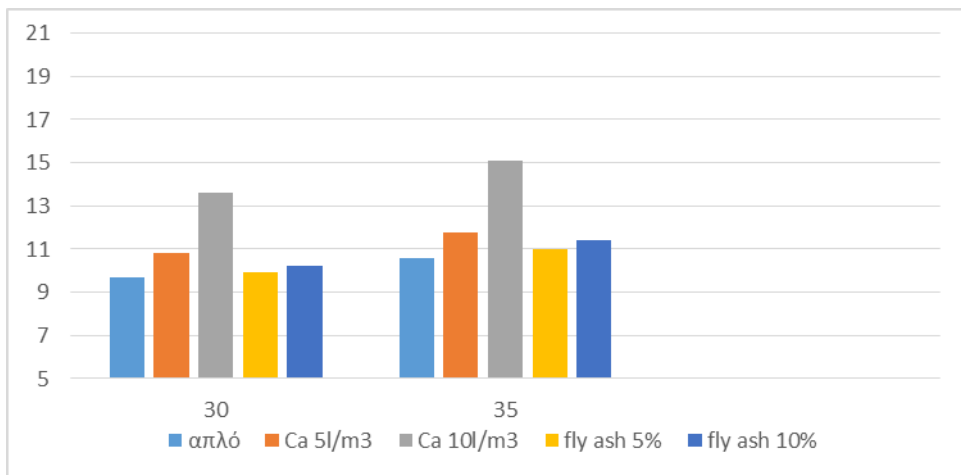
Σχήμα 59 : Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ των μεθόδων προστασίας για απόσταση από τη θάλασσα εντός 1.5km και πάχος επικάλυψης 30mm.

Επίσης, συγκρίνοντας τα παρακάτω διαγράμματα μεταξύ τους, εξάγεται το συμπέρασμα ότι για ακόμη μία φορά η απόσταση από τη θάλασσα είναι ο κύριος παράγοντας επιρροής της εκτιμώμενης διάρκειας ζωής, ακόμη και σε σχέση με το πάχος επικάλυψης του οπλισμού των δομικών στοιχείων κατασκευών από Ο.Σ, με σταθερό λόγο νερού/τσιμέντο (0,4). Οι τιμές, μάλιστα, της προβλεπόμενης διάρκειας ζωής σε περιοχές στη ζώνη ψεκασμού από θαλασσινό νερό είναι σχεδόν διπλάσιες από τις αντίστοιχες τιμές για περιοχές εντός 1,5km από την ακτή, ανεξάρτητα από το πάχος της επικάλυψης του οπλισμού. Η συγκεκριμένη παρατήρηση οφείλεται και πάλι στη μειωμένη περιεκτικότητα του ατμοσφαιρικού αέρα σε χλωρίδια, σε περιοχές μακριά από τη θάλασσα, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι λόγω νομοθεσίας και περιορισμών του προγράμματος η διαφορά στο πάχος επικάλυψης ήταν μόλις 5 χιλιοστά. Όσον αφορά τις παρατηρήσεις που σχετίζονται με τη λήψη μέτρων προστασίας έναντι της διάβρωσης εκείνη προαναφέρθησαν στο σχολιασμό των προηγούμενων διαγραμμάτων. Σε γενικές γραμμές διαπιστώνεται και πάλι η υπεροχή της προσθήκης αναστολέα διάβρωσης νιτρώδους ασβεστίου (Ca nitrite) σε αναλογία 10 L/m³ σκυροδέματος, ο οποίος αυξάνει αισθητά την εκτιμώμενη διάρκεια ζωής. Ακόμη όμως και η συγκεκριμένη προσθήκη ανταπεξέρχεται με δυσκολία σε κατασκευές που βρίσκονται στη ζώνη ψεκασμού από θαλασσινό νερό.

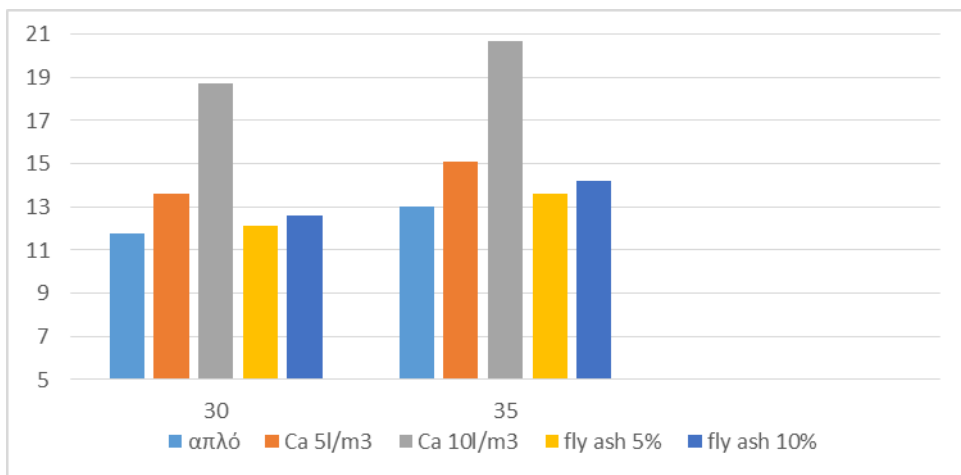
Σε γενικές γραμμές τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας, σχετίζονται σε μεγάλο βαθμό με την πραγματικότητα. Η ακρίβεια όμως της μελέτης αυτής, ειδικά όσον αφορά την εκτίμηση της διάρκειας ζωής κατασκευών Ο.Σ. που βρίσκονται στην Κύπρο και ειδικότερα την περιοχή της Λεμεσού, θα μπορούσε να βελτιωθεί εάν ορισμένα από τα δεδομένα προέκυπταν από πραγματικές μετρήσεις για τη Λεμεσό και όχι από τη βιβλιογραφία από έρευνες σε άλλες παραθαλάσσιες περιοχές (βλέπε Morinaga 1992). Τα δεδομένα αυτά σχετίζονται με την περιεκτικότητα του αέρα σε χλωρίδια, την περιεκτικότητα της επιφάνειας του σκυροδέματος σε χλωρίδια και το χρόνο στον οποίο επιτυγχάνεται η μέγιστη συγκέντρωση χλωριδίων στο σκυρόδεμα. Ακόμη στο συγκεκριμένο λογισμικό θα μπορούσε να λαμβάνεται υπόψη, ο τύπος του τσιμέντου και του χάλυβα που χρησιμοποιείται, καθώς σε προηγούμενη έρευνα έχει αποδειχθεί ότι ο κάθε τύπος χάλυβα συμπεριφέρεται διαφορετικά έναντι στη διάβρωση, ενώ σε κάθε τύπο τσιμέντου αντιστοιχεί διαφορετικός ρυθμός διάχυσης των χλωριόντων, γεγονός το οποίο επηρεάζει τόσο την περίοδο έναρξης όσο και την περίοδο εξέλιξης της διάβρωσης.



Σχήμα 60: Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ των μεθόδων προστασίας για απόσταση marine spray zone και λόγο w/c = 0.4.



Σχήμα 61: Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ των μεθόδων προστασίας για απόσταση από τη θάλασσα εντός 0,8km και λόγο w/c = 0.4.



Σχήμα 62 : Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ των μεθόδων προστασίας για απόσταση από τη θάλασσα εντός 1,5km και λόγο w/c = 0.4.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Almusallam, A. a. (2001a). Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars. *Construction and Building Materials*, 15(8), 361–368. doi:10.1016/S0950-0618(01)00009-5
- Almusallam, A. a. (2001b). Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars. *Construction and Building Materials*, 15(8), 361–368. doi:10.1016/S0950-0618(01)00009-5
- Alonso, C., Andrade, C., & González, J. A. (1988). Relation between resistivity and corrosion rate of reinforcements in carbonated mortar made with several cement types. *Cement and Concrete Research*, 18(5), 687–698. doi:10.1016/0008-8846(88)90091-9
- Apostolopoulos, C. a., & Papadakis, V. G. (2008). Consequences of steel corrosion on the ductility properties of reinforcement bar. *Construction and Building Materials*, 22(12), 2316–2324. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.10.006
- Bentz, E. C., & M.D.A. Thomas. (2012). Life-365 Service Life Prediction Model and Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Cost of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides. Sierra Lane: Silica Fume Association.
- Berke, N. S., & Hicks, M. C. (2004). Predicting long-term durability of steel reinforced concrete with calcium nitrite corrosion inhibitor. *Cement and Concrete Composites*, 26(3), 191–198. doi:10.1016/S0958-9465(03)00038-6
- Bertolini, L. (2008). Steel corrosion and service life of reinforced concrete structures. *Structure and Infrastructure Engineering*, 4(May 2015), 123–137. doi:10.1080/15732470601155490
- Bertolini, L., Elsener, B., & Pedferri, P. (2004). Corrosion of Steel in

Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair, Wiley. Retrieved from https://scholar.google.gr/scholar?q=bertolini+2004+corrosion&btnG=&hl=el&as_sdt=0%2C5#0

Broomfield, J. P. (2002). *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, investigation and repair* (2nd ed.). CRC Press. Retrieved from <https://books.google.com/books?hl=el&lr=&id=7YQJHbLiBJkC&pgis=1>

C. Andrade, M. C. Alonso, J. A. G. (1988). An initial effort to use the corrosion rate measurements for estimating rebar durability. In *Symposium on Corrosion Rate of Reinforcement in Concrete* (pp. 29–37). Baltimore: ASTM. Retrieved from <https://books.google.com/books?hl=el&lr=&id=HvDRrAebuj0C&pgis=1>

Capozucca, R. (1995). Damage to reinforced concrete due to reinforcement corrosion. *Construction and Building Materials*, 9(5), 295–303. doi:10.1016/0950-0618(95)00033-C

Chen, D., & Mahadevan, S. (2008). Chloride-induced reinforcement corrosion and concrete cracking simulation. *Cement and Concrete Composites*, 30(3), 227–238. doi:10.1016/j.cemconcomp.2006.10.007

Collepari, M. (1972). Penetration of chloride ions into cement pastes and concretes. *Journal of the American ...*, 55(10), 534–535. doi:DOI: 10.1111/j.1151-2916.1972.tb13424.x

Denarié, E., Conciatori, D., & Brühwiler, E. (2003). Effect of microclimate on chloride penetration into reinforced concrete. In *International Conference on Durability of Concrete June 1-7*. Thessaloniki, Greece: International Conference on Durability of

Concrete. doi:MCS-CONF-2007-041

- Engelund, S., Edvardsen, C., & Mohr, L. General guidelines for durability design and redesign, DuraCrete (2000). Retrieved from https://scholar.google.gr/scholar?q=General+Guidelines+for+Durability+Design+and+Redesign%E2%80%99%2C+Report+R15%2C+in+%E2%80%98EU+Brite-EuRam+III+project+DuraCrete+%28BE95-1347%29%3A&btnG=&hl=el&as_sdt=0%2C5#0
- Ferreira, R. M. (2004). *Probability-Based Durability Analysis of Concrete Structures under Chloride Attack Environments*. University of Minho School of Engineering.
- Frederiksen, J., NILSSON, L., & POULSEN, E. (1997). *HETEK-A system for estimation of chloride ingress into concrete: Theoretical background. Danish Road Directorate Report No. 83*. Copenhagen. Retrieved from https://scholar.google.gr/scholar?q=HETEK+-+A+system+for+estimation+of+chloride+ingress+into+concrete.+Theoretical+background&btnG=&hl=el&as_sdt=0%2C5#1
- Glasser, F. P., Marchand, J., & Samson, E. (2008). Durability of concrete — Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions. *Cement and Concrete Research*, 38(2), 226–246. doi:10.1016/j.cemconres.2007.09.015
- Lounis, Z. (2003). Probabilistic modeling of chloride contamination and corrosion of concrete bridge structures. In *Fourth International Symposium on Uncertainty Modeling and Analysis, 2003. ISUMA 2003*. (pp. 447–451). IEEE. doi:10.1109/ISUMA.2003.1236199
- Lounis, Z., & Amleh, L. (2003). Reliability-Based Prediction of

Chloride Ingress and Reinforcement Corrosion of Aging Concrete Bridge Decks. In *Life-Cycle Performance of Deteriorating Structures* (pp. 113–122). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. doi:10.1061/40707(240)13

Maage, M. (2003). Carbonation: A Probabilistic Approach to Derive Provisions for Prescriptive Requirements in Codes and Standards. *ACI Special Publication*, 212, 701–720. Retrieved from <http://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&i=12717>

Mangat, P. S., & Molloy, B. T. (1992). Factors influencing chloride-induced corrosion of reinforcement in concrete. *Materials and Structures*, 25(7), 404–411. doi:10.1007/BF02472256

Mangat, P. S., & Molloy, B. T. (1994). Prediction of long term chloride concentration in concrete. *Materials and Structures*, 27(6), 338–346. doi:10.1007/BF02473426

Meira, G. R., Padaratz, I. J., Alonso, C., & Andrade, C. (2003). Effect of distance from sea on chloride aggressiveness in concrete. *MATER CONSTRUCC*, 53(271-272), 179–188. doi:10.3989/mc.2003.v53.i271-272.302

Montemor, M. F., Cunha, M. P., Ferreira, M. G., & Sim, A. M. (2002). Corrosion behaviour of rebars in fly ash mortar exposed to carbon dioxide and chlorides, 24, 45–53.

Morinaga, S. (1992). Life prediction of reinforced concrete structures in hot and salt-laden environments. In *Concrete in hot climates Proceedings of the third international conference held by RILEM* (1st ed., pp. 155–164). Torquay, England: E and F Spon Limited.

Mustafa, M. A., & Yusof, K. M. (1994). Atmospheric chloride penetration into concrete in semitropical marine environment.

Cement and Concrete Research, 24(4), 661–670.
doi:10.1016/0008-8846(94)90190-2

Nilsson, L. (2001). A numerical model for combined diffusion and convection of chloride in non-saturated concrete. In C. Andrade & J. Kropp (Eds.), *PRO 19: 2nd International RILEM Workshop on ...* (1st ed., pp. 261–276). Paris: RILEM Publications. Retrieved from

<https://www.google.com/books?hl=en&lr=&id=6trqR27NQC8C&oi=fnd&pg=PA261&dq=A+numerical+model+for+combined+diffusion+and+convection+of+chloride+in+non-saturated+concrete+,”+Testing+and+Modelling+the+Chloride+Ingress+into+Concrete”,+Proceedings+o>

Oh, B., & Jang, S. (2003). Advanced Analysis of Chloride Diffusion and Convection in Concrete Structures. In R. K. Dhir, M. D. Newlands, & K. A. Paine (Eds.), *Proceeding of the International Symposium Dedicated to Professor Surendra Shah, Northwestern University, USA* (pp. 309–318). Dundee Scotland, United Kingdom: Thomas Telford Limited. Retrieved from <http://trid.trb.org/view.aspx?id=767139>

Page, C. L., & Treadaway, K. W. J. (1982). Aspects of the electrochemistry of steel in concrete. *Nature*, 297(5862), 109–115.
doi:10.1038/297109a0

Papadakis, V. G. (2005). *Estimation of concrete service life - The theoretical background*. Patras.

Papadakis, V., Vayenas, C., & Fardis, M. (1991). Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. *ACI Materials Journal*, 88(4), 363–373. Retrieved from <http://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&i=1863>

- Parrott, L. J. (1992). Carbonation, moisture and empty pores. *Advances in Cement Research*, 4(15), 111–118. doi:10.1680/adcr.1992.4.15.111
- Saetta, A. V., Schrefler, B. A., & Vitaliani, R. V. (1995). 2 — D model for carbonation and moisture/heat flow in porous materials. *Cement and Concrete Research*, 25(8), 1703–1712. doi:10.1016/0008-8846(95)00166-2
- Sakr, K. (2005). Effect of cement type on the corrosion of reinforcing steel bars exposed to acidic media using electrochemical techniques. *Cement and Concrete Research*, 35(9), 1820–1826. doi:10.1016/j.cemconres.2004.10.015
- Sandberg, P., Tang, L., & Andersen, A. (1998). Recurrent studies of chloride ingress in uncracked marine concrete at various exposure times and elevations. *Cement and Concrete Research*, 28(10), 1489–1503. doi:10.1016/S0008-8846(98)00124-0
- Stewart, M. G., & Rosowsky, D. V. (1998). Time-dependent reliability of deteriorating reinforced concrete bridge decks. *Structural Safety*, 20(1), 91–109. doi:10.1016/S0167-4730(97)00021-0
- Takewaka, K., Yamaguchi, T., & Maeda, S. (2003). Simulation Model for Deterioration of Concrete Structures due to Chloride Attack. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(2), 139–146. doi:10.3151/jact.1.139
- Tang, L., & Nilsson, L. (1996). A Numerical Method for Prediction of Chloride Penetration into Concrete Structures. In *The Modelling of Microstructure and its Potential for Studying Transport Properties and Durability* (pp. 539–552). Dordrecht: Springer Netherlands. doi:10.1007/978-94-015-8646-7_29

- Tang, L., Utgenannt, P., Lindvall, A., & Boubitsas, D. (2012). *Validation of models and test methods for assessment of durability of concrete structures in the road environment* (1st ed.). Stockholm, Sweden: CBI Betonginstitutet. Retrieved from <http://publications.lib.chalmers.se/publication/171367-validation-of-models-and-test-methods-for-assessment-of-durability-of-concrete-structures-in-the-roa>
- Thomas, M., & Bentz, D. (2001). Life 365—Computer program for predicting the service life and life-cycle costs of reinforced concrete structures exposed to chlorides. In *Nordic Mini Seminar & fib TG 5.5 Meeting*. Göteborg. Retrieved from https://scholar.google.gr/scholar?q=Life+365+%E2%80%93+Computer+program+for+predicting+the+service+life+and+life-cycle+costs+of+reinforced+concrete+structures+exposed+to+chlorides%E2%80%99&btnG=&hl=en&as_sdt=0%2C5#0
- Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*. Stockholm. Retrieved from <http://trid.trb.org/view.aspx?id=194388>
- VASSIE, P. (1984). REINFORCEMENT CORROSION AND THE DURABILITY OF CONCRETE BRIDGES. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 76(3), 713–723. doi:10.1680/iicep.1984.1207
- Violetta, B. (2002). Life-365 service life prediction model. *Concrete International*, 12(24), 53–57. Retrieved from <http://www.life-365.org/images/service-life-prediction.pdf>
- Vu, K. A. T., & Stewart, M. G. (2000). Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models. *Structural Safety*, 22(4), 313–333. doi:10.1016/S0167-4730(00)00018-7

- Wallbank, E. (1989). The performance of concrete in bridges. A survey of 200 highway bridges. Retrieved from <http://trid.trb.org/view.aspx?id=411940>
- Webster, M. P. (2000). *The Assessment of Corrosion-Damaged Concrete Structures*. University of Birmingham.
- Zhang, R., Castel, A., & François, R. (2009). The corrosion pattern of reinforcement and its influence on serviceability of reinforced concrete members in chloride environment. *Cement and Concrete Research*, 39(11), 1077–1086. doi:10.1016/j.cemconres.2009.07.025
- Αποστολόπουλος, Χ. Α. (2006). Έναρξη, εξέλιξη και συνέπειες διάβρωσης οπλισμού κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. In *15ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ* (pp. 25–27). Αλεξανδρούπολη: ΤΕΕ, ΕΤΕΚ.
- Βασιλικιώτης, Γ. Σ. (1980). Ποσοτική Ανάλυση. In *Αναλυτική χημεία*. Θεσσαλονίκη: Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ.
- Βλάχος, Σ. (1991). *Προστασία χάλυβα από διάβρωση*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Δέμης, Σ. (2015). Σχεδιασμός ανθεκτικότητας κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος - Εκτίμηση διάρκειας ζωής. In *21ο Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές και Ενισχύσεις Κατασκευών* (p. 12). Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.
- Ζαφειροπούλου, Θ. Β. (2014). *Προστασία του οπλισμού στο σκυρόδεμα με τη χρήση οργανικών επικαλύψεων με και χωρίς προϊόντα νανοτεχνολογίας*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Ζαχαροπούλου, Ε. (2014). *Επίδραση προσθέτων στις επισκευές του οπλισμένου σκυροδέματος*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Retrieved from <http://dspace.lib.ntua.gr/handle/123456789/39215>

Μπάστα, Μ., & Μπατζιά, Π. (2013). *Αξιολόγηση συμπεριφοράς χάλυβα σε διαβρωτικό περιβάλλον*. Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο.

Παπαδάκης, Ε. Γ. (2004). Υπολογισμός διάρκειας ζωής οπλισμένου σκυροδέματος λόγω διάβρωσης οπλισμού. In *Ημερίδα Τεχνολογίας Σκυροδέματος και Χαλύβων* (pp. 1–15). Ιωάννινα: ΤΕΕ.

Παπαδόπουλος, Μ. (2007, January 1). Μηχανική συμπεριφορά διαβρωμένων χάλυβων οπλισμού σκυροδέματος. Πάτρα. doi:10.12681/eadd/19073

Ρούτουλας, Α. (2012a). *Έλεγχος ποιότητας και τεχνολογία δομήσιμων υλικών*.

Ρούτουλας, Α. (2012b). *Υπολογισμός Διάρκειας ζωής κατασκευών από σκυρόδεμα και πειραματική επιβεβαίωση*. Πειραιάς.

Σκουλικίδης, Θ., & Βασιλείου, Π. (2007). *Διάβρωση και προστασία υλικών* (3rd ed.). Αθήνα. Retrieved from http://www.bibliohora.gr/41/1/Είδος/Βιβλίο-Φυσικοχημεία/164557/Διάβρωση_και_π

Σκουλικίδης, Π. Βασιλείου, Θ. (2007). *Διάβρωση και Προστασία Υλικών* (3rd ed.). Αθήνα: Εκδόσεις Συμεών. Retrieved from http://scholar.google.gr/scholar?q=%CE%94%CE%B9%CE%AC%CE%B2%CF%81%CF%89%CF%83%CE%B7+%CE%BA%CE%B1%CE%B9+%CE%A0%CF%81%CE%BF%CF%83%CF%84%CE%B1%CF%83%CE%AF%CE%B1+%CE%A5%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CF%8E%CE%BD&btnG=&hl=el&as_sdt=0%2C5#0

Τάσιος, Θ. Π., & Αλιγιζάκη, Κ. (1993). *Ανθεκτικότητα Ωπλισμένου*

Σκυροδέματος (1st ed.). Αθήνα: ΤΕΚΔΟΤΙΚΗ ΣΕΛΚΑ 4Μ.
Retrieved from <http://www.protoporia.gr/anthehtikotita-oplismenoy-skyrodematos-p-119866.html>

Τεταγιώτη, Δ. (2011). *Μελέτη του χρόνου ζωής κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα υπό εναλλασσόμενες διαβρωτικές συνθήκες*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Retrieved from <http://didaktorika.gr/eadd/handle/10442/26286>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Παράμετροι σχεδιασμού που επηρεάζουν τη διάρκεια ζωής στοιχείου οπλισμένου σκυροδέματος σε σχέση με την υποβάθμιση από διάβρωση.		
Χαρακτηριστικά σκυροδέματος	Λόγος Νερού/Τσιμέντο (w/c)	Αποτελεί βασικό παράγοντα για τον καθορισμό του τριχοειδούς πορώδους της πάστας τσιμέντου και της αντίστασης στην διείσδυση επιθετικών ειδών.
	Σκλήρυνση	Η ανεπαρκής σκλήρυνση του σκυροδέματος, εμποδίζει την ενυδάτωση του τσιμέντου και οδηγεί σε υψηλό πορώδες, ειδικά στο σκυρόδεμα κάλυψης. Σύμμεικτα τσιμέντα είναι πιο ευαίσθητα στην κακή σκλήρυνση από τσιμέντο τύπου Portland.

	Τύπος τσιμέντου και προσθετικά	Ποζολανικά ή προϊόντα υψικάμινου ως προσθετικά στο σκυρόδεμα ενδέχεται να βελτιώσουν σημαντικά την αντίσταση έναντι της διείσδυσης επιθετικών ιόντων (ειδικά Cl ⁻ και SO ₄).
	Περιεκτικότητα σε τσιμέντο	Η αύξηση της περιεκτικότητας σε τσιμέντο, για ένα δεδομένο λόγο w/c, επιτρέπει υψηλότερη ποσότητα νερού και επομένως μεγαλύτερη εργασιμότητα του σκυροδέματος. Ωστόσο, η αύξηση περιεκτικότητας σε τσιμέντο, μπορεί να ενισχύσει τον κίνδυνο ρηγμάτωσης είτε λόγω θερμότητας ενυδάτωσης είτε λόγω της συστολής ξήρανσης.
	Πρόσμικτα	Οι υπερρευστοποιητές είναι απαραίτητοι για να εξασφαλιστεί το κατάλληλο εργάσιμο του σκυροδέματος σε περιπτώσεις όπου για λόγους αντοχής απαιτείται χαμηλός λόγος w/c.
	Συνοχή	Η εργασιμότητα του σκυροδέματος θα πρέπει να καθορίζεται κατά τη φάση σχεδιασμού, προκειμένου να

		αποφευχθεί ο κίνδυνος κακής συμπύκνωσης ή ανεξέλεγκτης προσθήκη νερού στο εργοτάξιο.
	Αντοχή	Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος πέρα από τους κατασκευαστικούς λόγους που απαιτείται, συνδέεται και με τις απαιτήσεις ανθεκτικότητας. Μόλις επιλεγεί ο τύπος τσιμέντου, καθορίζεται και ο μέγιστος λόγος w/c, σε σχέση με την ελάχιστη κατηγορία αντοχής.
	Παρασκευή σκυροδέματος	Η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος μπορεί να επιτευχθεί μόνο εάν το σκυρόδεμα αναμιγνύεται, χειρίζεται, τοποθετείται και συμπιέζεται (δονείται) σωστά. Για αυτό το σκοπό απαιτούνται επαρκείς ποιοτικοί έλεγχοι.
	Ειδικοί τύποι σκυροδέματος	Οι ειδικοί τύποι σκυροδέματος μπορεί να έχουν θετική επίδραση στην αντοχή. Το υψηλής απόδοσης σκυρόδεμα (HPC) έχει μια πολύ χαμηλή αναλογία νερού / συνδετικού υλικού και μπορεί να είναι αδιαπέραστο από τα επιθετικά

		είδη. Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (SCC), λόγω της εξαιρετικά υψηλής εργασιμότητας του, δεν απαιτεί καμία δόνηση και μπορεί να βελτιώσει την ομοιογένεια του σκυροδέματος.
Πληροφορίες για το δομικό σχεδιασμό και την κατασκευή		Η ανθεκτικότητα της δομής μπορεί να βελτιωθεί αυτή είναι σχεδιασμένη με τρόπο που να ευνοεί τον έλεγχο και τη συντήρηση, να αποτρέπει την στασιμότητα ή διήθησης των ανιόντων χλωριδίου, να περιορίζει τη ρηγμάτωση και να αποφεύγονται οι περιττές περίπλοκες γεωμετρίες ή της διάταξης του οπλισμού που κάνουν δύσκολη τη συμπίεση, κλπ.
Πάχος κάλυψης		Η αύξηση του πάχους κάλυψης αυξάνει τον χρόνο έναρξης της διάβρωσης. Μεγάλο πάχος κάλυψης (46 - 70 χιλιοστά), ωστόσο, μπορεί να ευνοήσει τη δημιουργία ρωγμών και τελικά να οδηγήσει σε ελλιπή προστασία του οπλισμού. Για αυτό το λόγο, ο έλεγχος της διακύμανσης του πάχους του σκυροδέματος κάλυψης κατά

		τη διάρκεια της κατασκευής είναι πρωταρχικής σημασίας.
Συμπληρωματικές προληπτικές τεχνικές	Ράβδοι οπλισμού από ανοξείδωτο χάλυβα	Οι ανοξείδωτες ράβδοι χάλυβα δεν διαβρώνονται στο ενανθρακωμένο σκυρόδεμα. Όμως σε μολυσμένο, από ανιόντα χλωριδίου σκυρόδεμα, έχουν πολύ υψηλό όριο χλωριδίων. Ανάλογα με τη σύνθεση του ανοξείδωτου χάλυβα, αυτό μπορεί να είναι ακόμη υψηλότερο από το 5% (Nurnberger 1996). Στις περισσότερες συνθήκες έκθεσης, οι ράβδοι ανοξείδωτου χάλυβα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με ράβδους ανθρακούχου χάλυβα, χωρίς τον κίνδυνο γαλβανικής σύζευξης (Bertolini et al. 1998).
	Γαλβανισμένες ράβδοι οπλισμού	Ο γαλβανισμένος χάλυβας έχει χαμηλό ρυθμό διάβρωσης σε ενανθρακωμένο σκυρόδεμα και έτσι μπορεί να αυξήσει το χρόνο διάδοσης. Το όριο χλωριούχων για γαλβανισμένο χάλυβα είναι

		περίπου 1% - 1,5% της μάζας του τσιμέντου.
	Ράβδοι χάλυβα οπλισμού με εποξειδική επικάλυψη	Η εποξειδική επίστρωση μπορεί να προστατεύσει τις ράβδους από τη διείσδυση ανιόντων χλωριδίου στο σκυρόδεμα της κάλυψης.
	Καθοδική πρόληψη	Σε νέες κατασκευές που υποβάλλονται σε διείσδυση του χλωρίου, το κατώτατο όριο χλωριδίων μπορεί να αυξηθεί κατά μία τάξη μεγέθους με την εφαρμογή μικρής καθοδικής πυκνότητας ρεύματος στις ράβδους (1 έως 2 mA). Αυτή η τεχνική απαιτεί την εφαρμογή μιας ανόδου στην επιφάνεια του σκυροδέματος και ένα σύστημα παρακολούθησης.
	Αναστολείς διάβρωσης	Οι αναστολείς διάβρωσης μπορούν να προστεθούν στο σκυρόδεμα για να αυξηθεί η αντίσταση έναντι της διάβρωσης των ενσωματωμένων ράβδων οπλισμού. Ορισμένοι αναστολείς διάβρωσης, όπως το νιτρώδες ασβέστιο, μπορεί να αυξήσει το όριο χλωριδίων στο σκυρόδεμα. Η

		αποτελεσματικότητα τους, ωστόσο, εξαρτάται από την ενεργό χημική ουσία, τη συγκέντρωσή της και τον κίνδυνο απόπλυσης (Elsener 2001).
	Επεξεργασία της επιφάνειας του σκυροδέματος	Οργανικά ή με βάση το τσιμέντο επιχρίσματα μπορούν να προστατεύσουν την επιφάνεια του σκυροδέματος και να παρεμποδίσουν την είσοδο των επιθετικών ειδών. Υδρόφοβες επεξεργασίες μειώνουν την τριχοειδή απορρόφηση του σκυροδέματος, ενώ επιτρέπουν την εξάτμιση του νερού και τη μεταφορά των αερίων. Απαιτείται όμως, περιοδική επανεφαρμογή της επιφανειακής επεξεργασίας.
Προγραμματισμένη επιθεώρηση και συντήρηση		Η τακτική επιθεώρηση της κατασκευής μπορεί να βοηθήσει να διατηρηθεί ένα σταθερό επίπεδο αξιοπιστίας. Οι διαδικασίες επιθεώρησης μπορούν να οριστούν από τη φάση του σχεδιασμού. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να υιοθετηθεί ένα σύστημα παρακολούθησης, με την

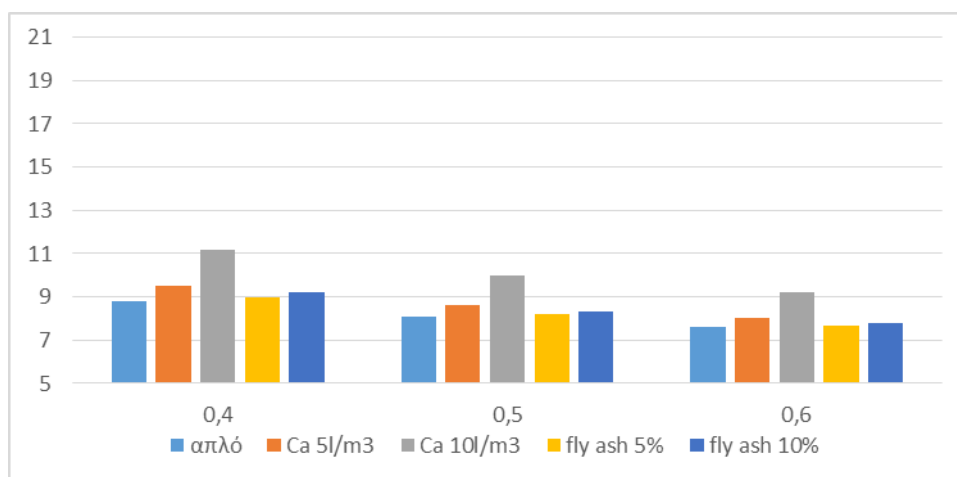
		εφαρμογή αισθητήρων ενσωματωμένων στο σκυρόδεμα, που ανιχνεύουν τη διάβρωση των ραβδών χάλυβα. Συντήρηση μπορεί επίσης να προγραμματιστεί προκειμένου να αντικαταστήσει μη-κρίσιμα τμήματα της δομής.
--	--	---

Πίνακας 16 : Παράμετροι σχεδιασμού που επηρεάζουν τη διάρκεια ζωής στοιχείου οπλισμένου σκυροδέματος σε σχέση με την υποβάθμιση από διάβρωση (Luca Bertolini, 2008).

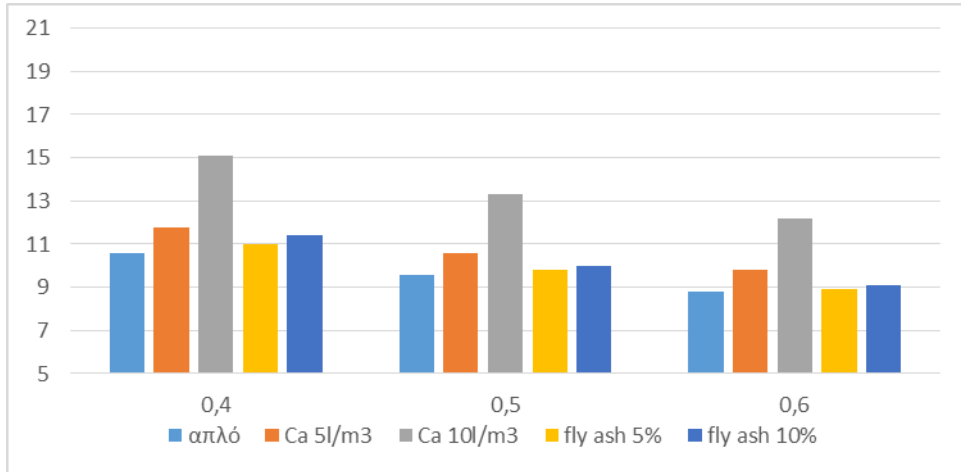
Κατηγορίες έκθεσης σε σχέση με τη διάβρωση του οπλισμού (κατηγορίες 2, 3 και 4) και διατάξεις για το σκυρόδεμα σύμφωνα με το πρότυπο EN 206-1 του 2001.					
Κατηγορία έκθεσης		Περιγραφή περιβάλλοντος έκθεσης	Μέγιστος λόγος w/c	Ελάχιστη κατηγορία αντοχής (MPa)	Ελάχιστη περιεκτικότητα σε τσιμέντο (kg/m ³)
2. Διάβρωση λόγω ενανθράκωσης	XC1	Ξηρό ή μόνιμα υγρό	0.65	C20/25	260
	XC2	Υγρό, σπάνια ξηρό	0.60	C25/30	280
	XC3	Μέτριας υγρασίας	0.55	C30/37	280
	XC4	Επαναλαμβανόμενα υγρό και ξηρό	0.50	C30/37	300
3. Διάβρωση λόγω ανιόντων χλωριδίου	XD1	Μέτριας υγρασίας	0.55	C30/37	300
	XD2	Υγρό, σπάνια ξηρό	0.55	C30/37	300
	XD3	Επαναλαμβανόμενα υγρό και ξηρό	0.45	C35/45	320
4. Διάβρωση	XS1	Έκθεση σε	0.50	C30/37	300

λόγω θαλασσινού νερού		αερομεταφερόμενα άλατα			
	XS2	Μόνιμα βυθισμένο	0.45	C35/45	320
	XS3	Έκθεση σε ζώνες παλίρροιας, παφλασμού και ψεκασμού	0.45	C35/45	340

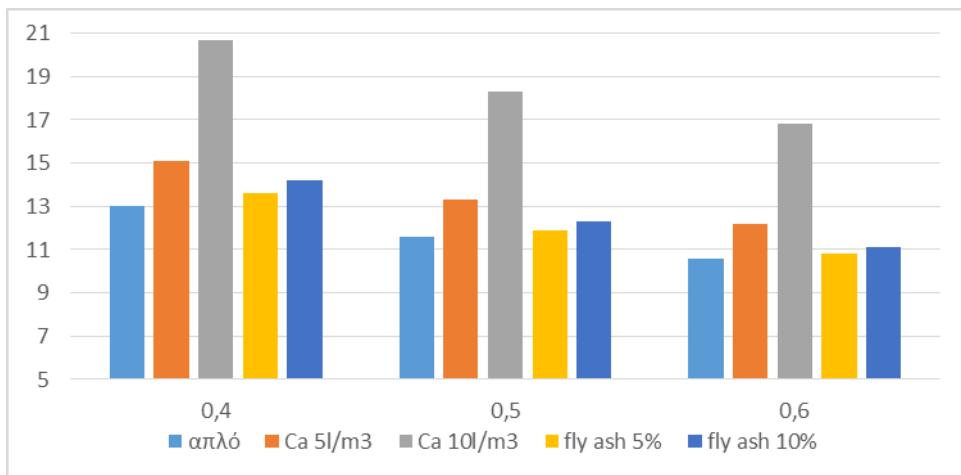
Πίνακας 17: Κατηγορίες έκθεσης σε σχέση με τη διάβρωση του οπλισμού (κατηγορίες 2, 3 και 4) και διατάξεις για το σκυρόδεμα σύμφωνα με το πρότυπο EN 206-1 του 2001 (Apostolopoulos & Papadakis, 2008).



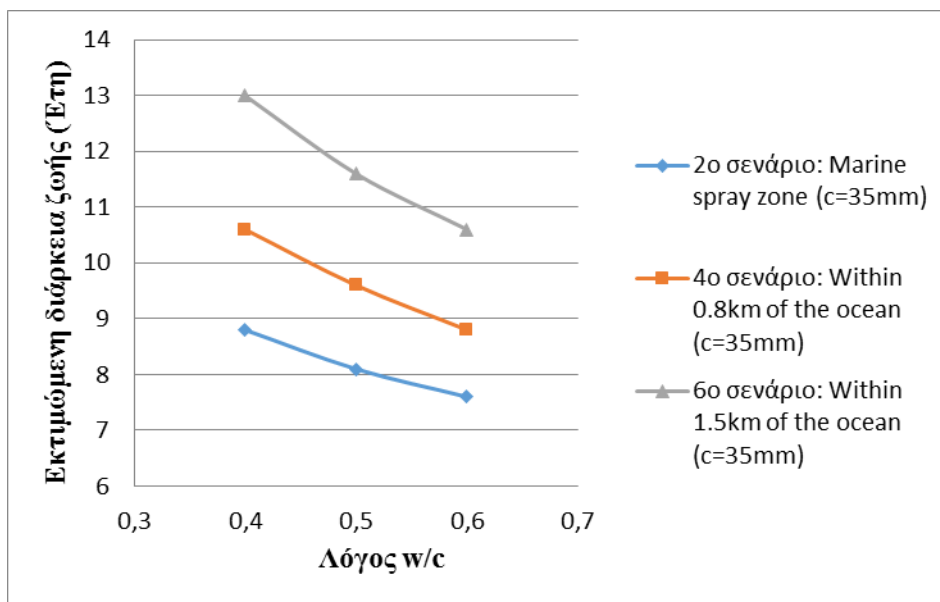
Σχήμα 63: Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ των μεθόδων προστασίας για απόσταση marine spray zone και πάχος επικάλυψης 35mm.



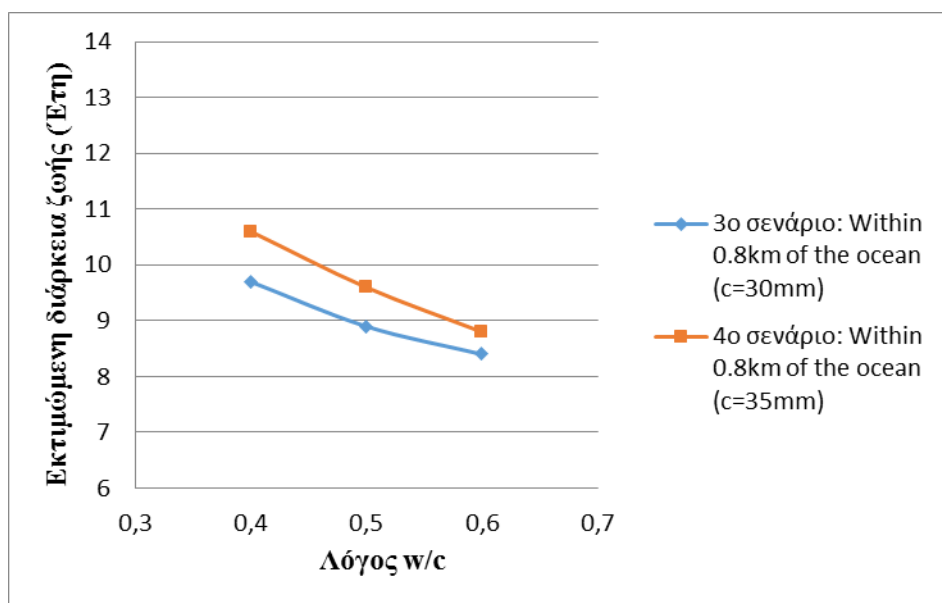
Σχήμα 64: Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ των μεθόδων προστασίας για απόσταση από τη θάλασσα εντός 0,8km και πάχος επικάλυψης 35mm.



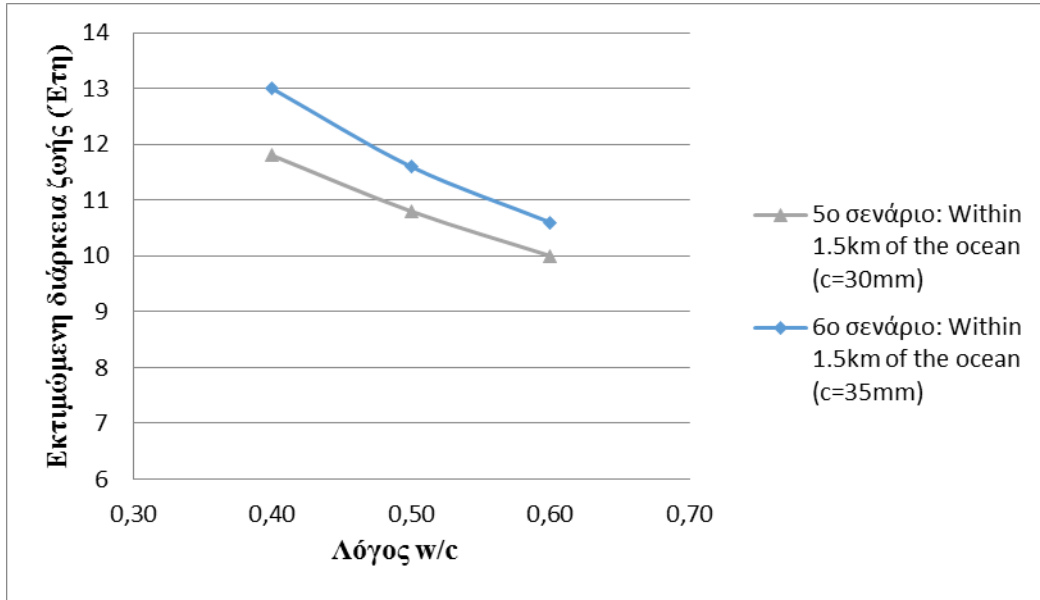
Σχήμα 65 : Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ των μεθόδων προστασίας για απόσταση από τη θάλασσα εντός 1.5km και πάχος επικάλυψης 35mm.



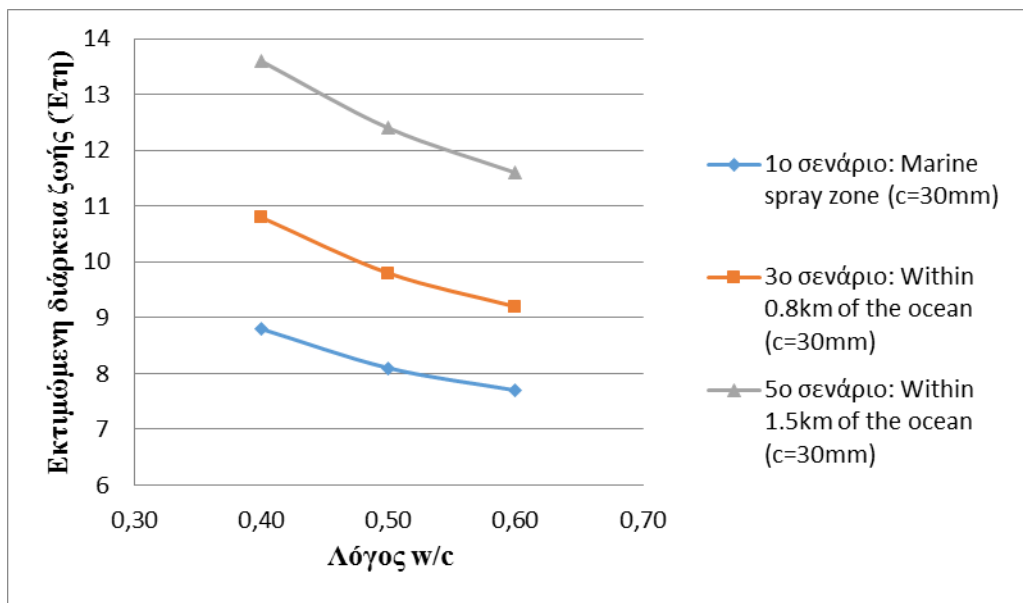
Σχήμα 66 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής της απόστασης από τη θάλασσα στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής, για σταθερό πάχος επικάλυψης 35mm.



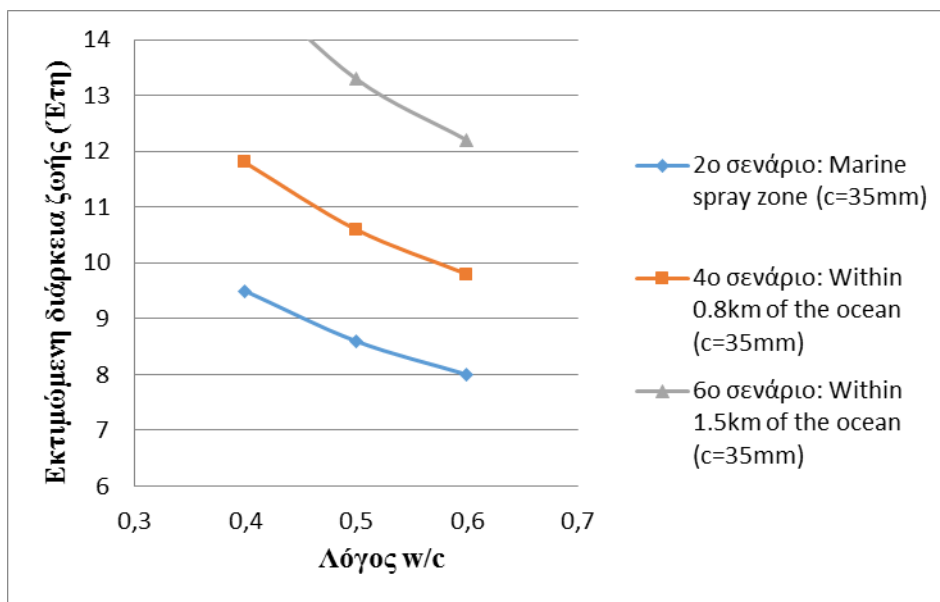
Σχήμα 67: Γραφική απεικόνιση της επιρροής του πάχους επικάλυψης στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για σταθερή απόσταση από τη θάλασσα within 0.8km of the ocean.



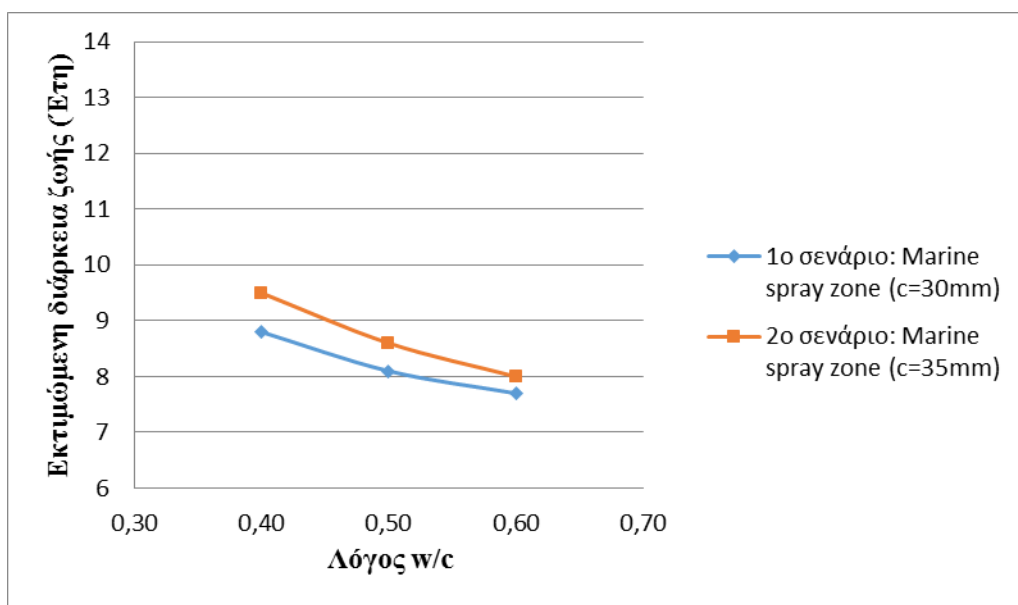
Σχήμα 68 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής του πάχους επικάλυψης στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για σταθερή απόσταση από τη θάλασσα within 1,5km of the ocean.



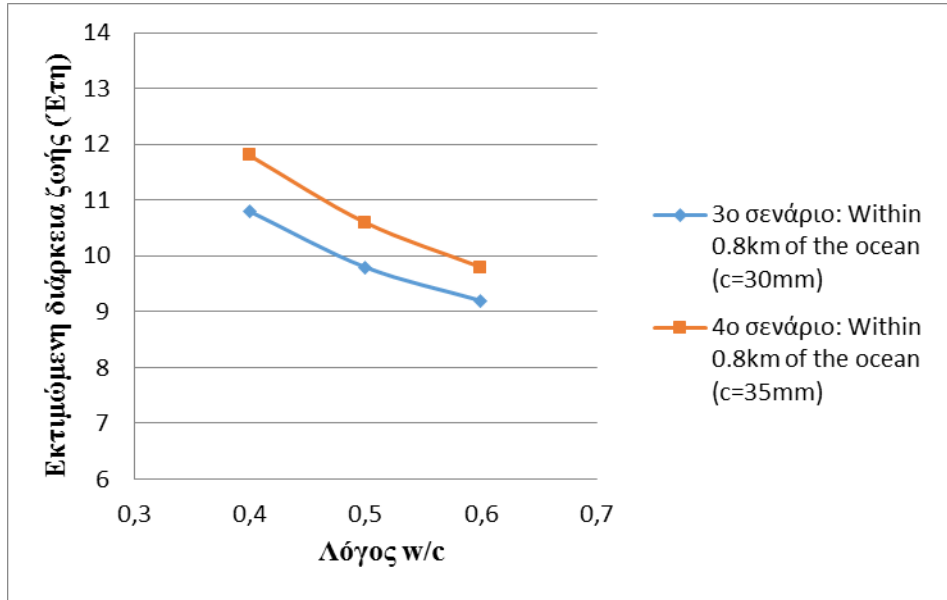
Σχήμα 69 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής της απόστασης από τη θάλασσα στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής, για σταθερό πάχος επικάλυψης 30mm, με προσθήκη Ca nitrite 5L/m³.



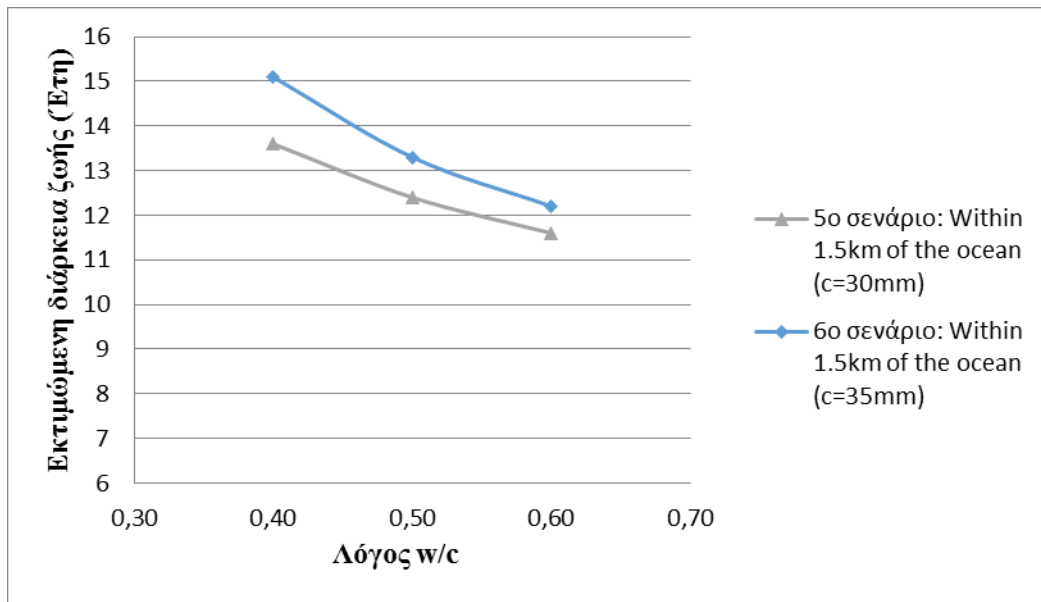
Σχήμα 70: Γραφική απεικόνιση της επιρροής της απόστασης από τη θάλασσα στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής, για σταθερό πάχος επικάλυψης 35mm, με προσθήκη Ca nitrite 5L/m³.



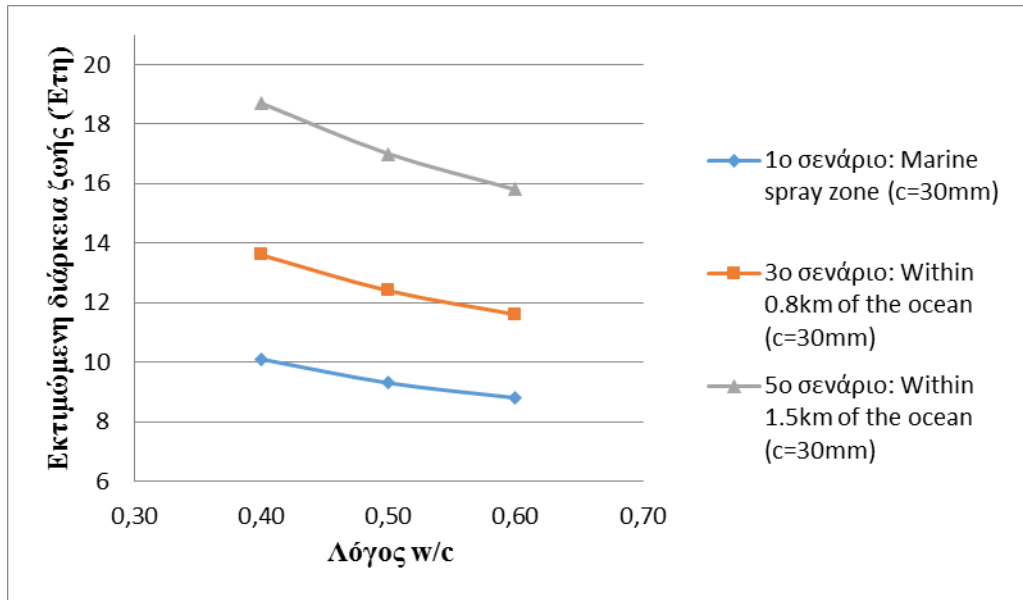
Σχήμα 71: Γραφική απεικόνιση της επιρροής του πάχους επικάλυψης στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για σταθερή απόσταση από τη θάλασσα marine spray zone με προσθήκη Ca nitrite 5L/m³.



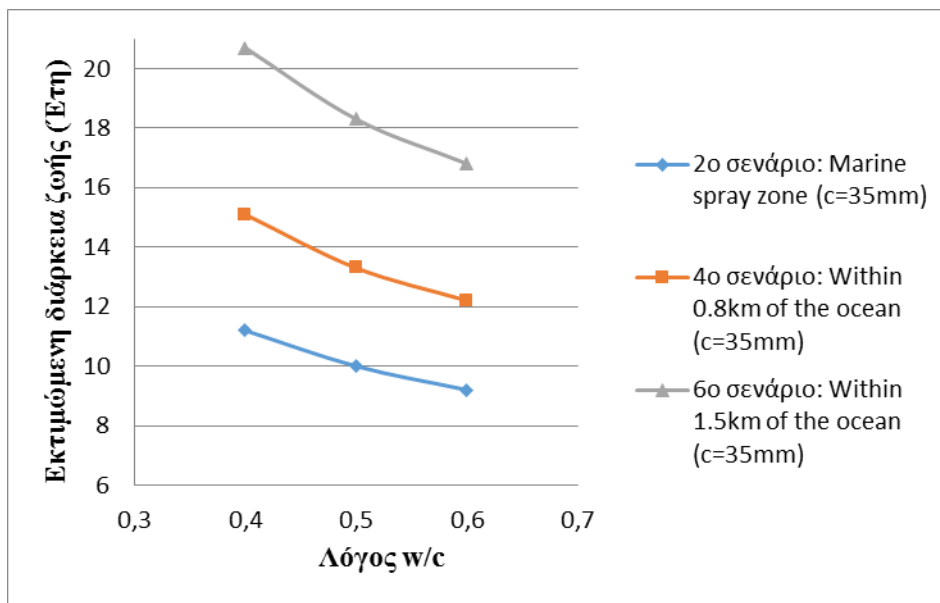
Σχήμα 72 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής του πάχους επικάλυψης στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για σταθερή απόσταση από τη θάλασσα within 0.8km of the ocean, με προσθήκη Ca nitrite 5L/m³.



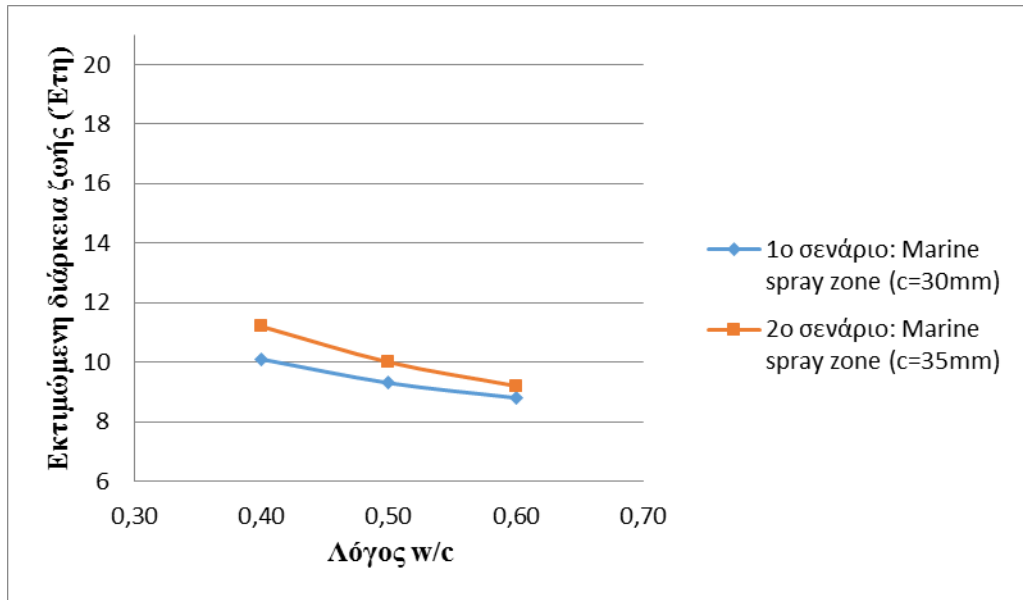
Σχήμα 73 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής του πάχους επικάλυψης στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για σταθερή απόσταση από τη θάλασσα within 1,5km of the ocean, με προσθήκη Ca nitrite 5L/m³.



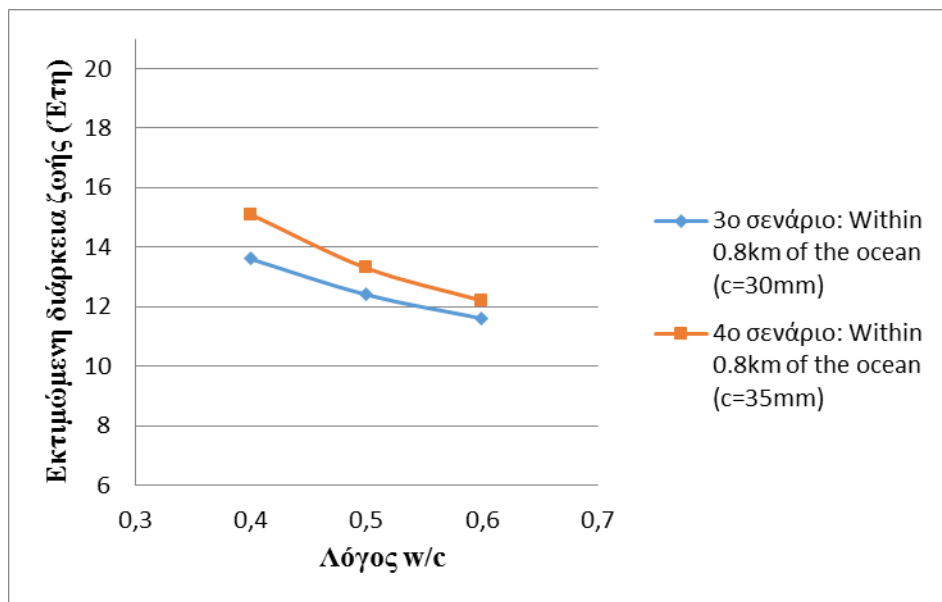
Σχήμα 74 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής της απόστασης από τη θάλασσα στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής, για σταθερό πάχος επικάλυψης 30mm, με προσθήκη Ca nitrite 10L/m³.



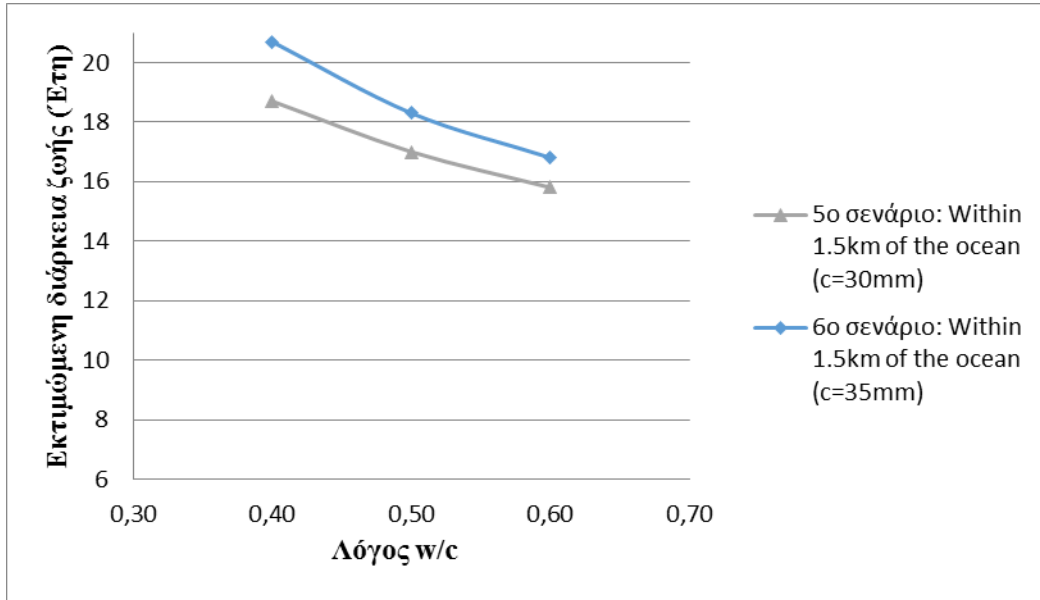
Σχήμα 75 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής της απόστασης από τη θάλασσα στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής, για σταθερό πάχος επικάλυψης 35mm, με προσθήκη Ca nitrite 10L/m³.



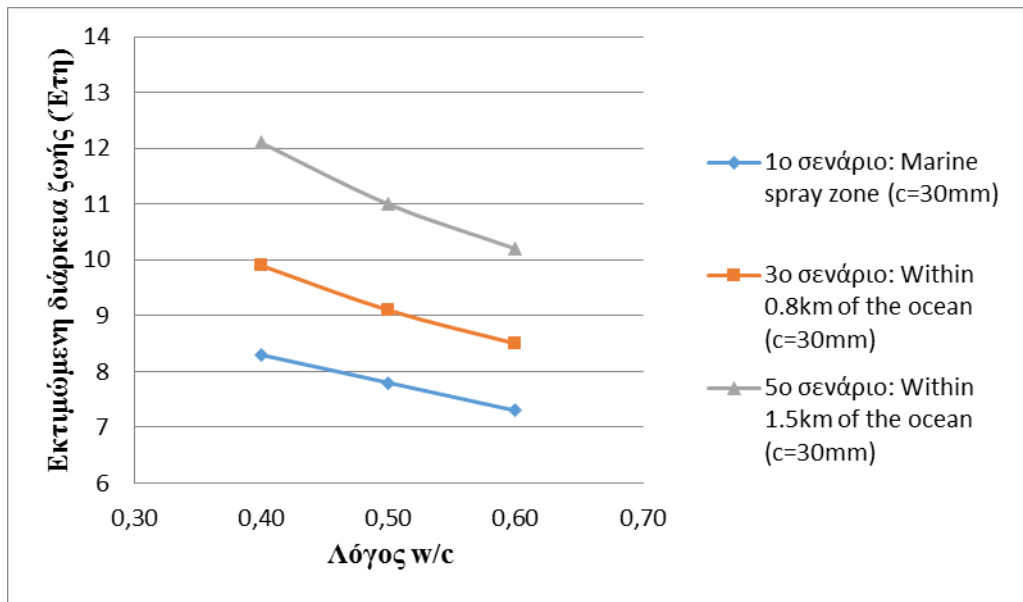
Σχήμα 76 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής του πάχους επικάλυψης στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για σταθερή απόσταση από τη θάλασσα marine spray zone, με προσθήκη Ca nitrite 10L/m³.



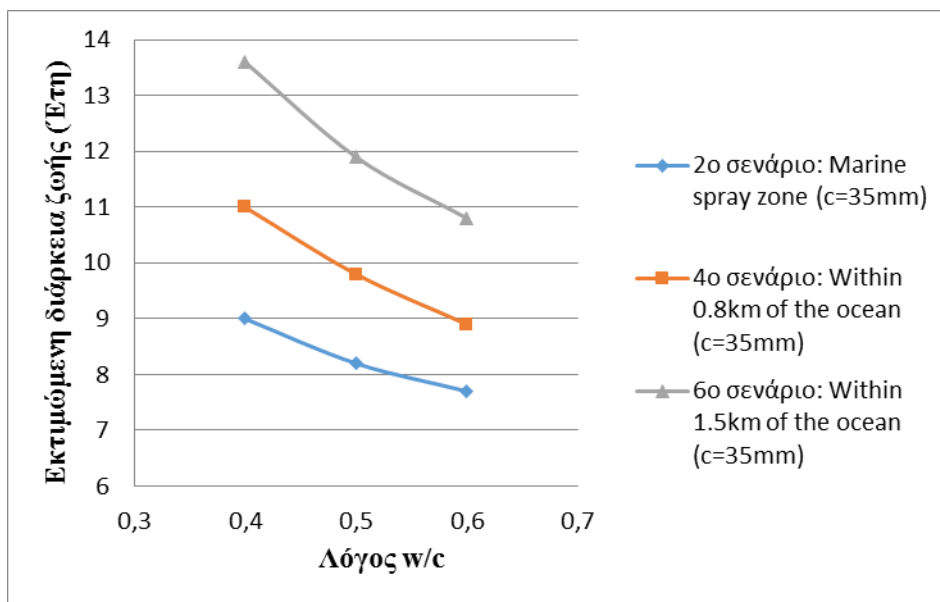
Σχήμα 77 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής του πάχους επικάλυψης στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για σταθερή απόσταση από τη θάλασσα within 0.8km of the ocean, με προσθήκη Ca nitrite 10L/m³.



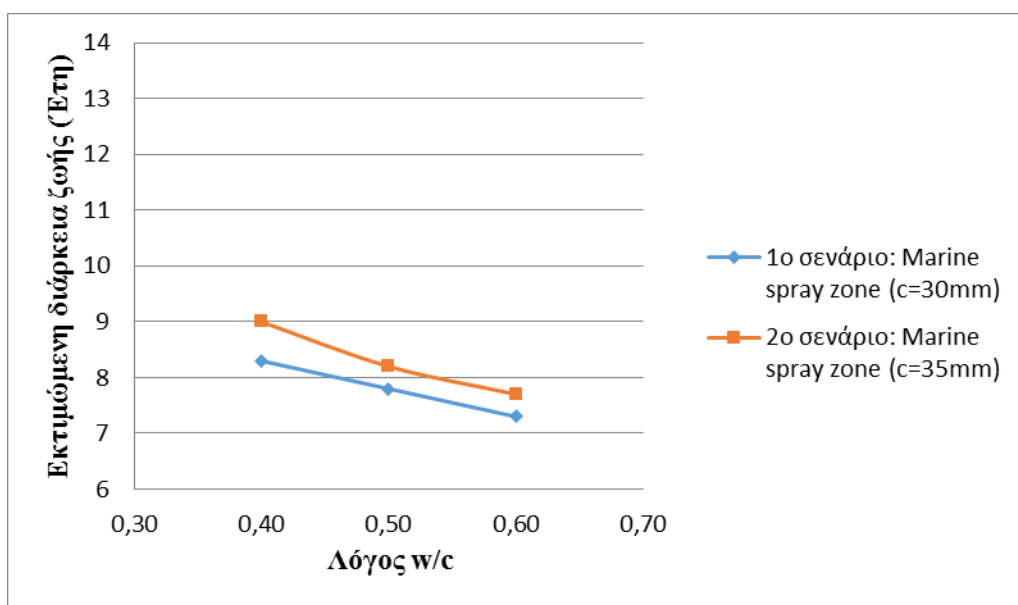
Σχήμα 78 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής του πάχους επικάλυψης στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για σταθερή απόσταση από τη θάλασσα within 1,5km of the ocean, με προσθήκη Ca nitrite 10L/m³.



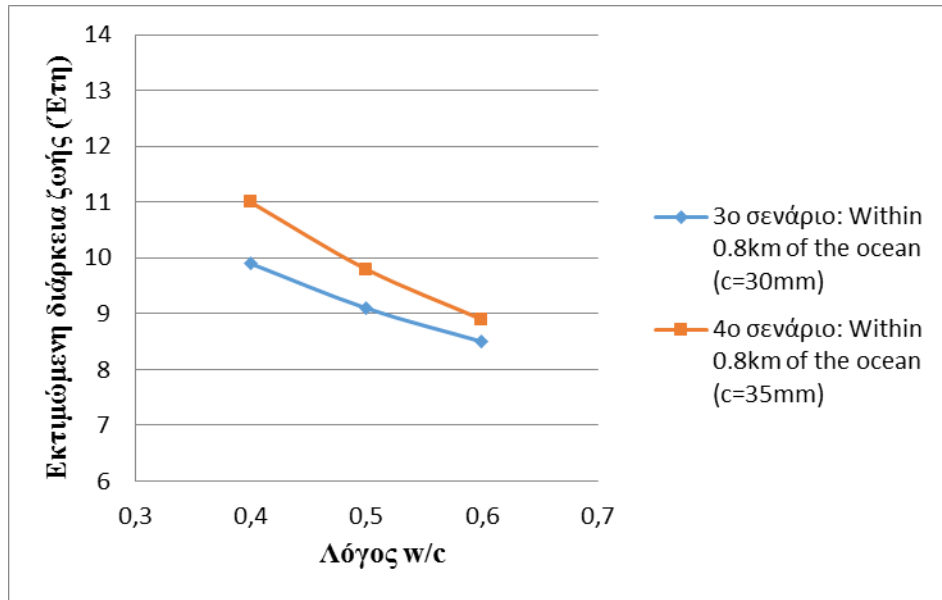
Σχήμα 79 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής της απόστασης από τη θάλασσα στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής, για σταθερό πάχος επικάλυψης 30mm, με προσθήκη 5% ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F.



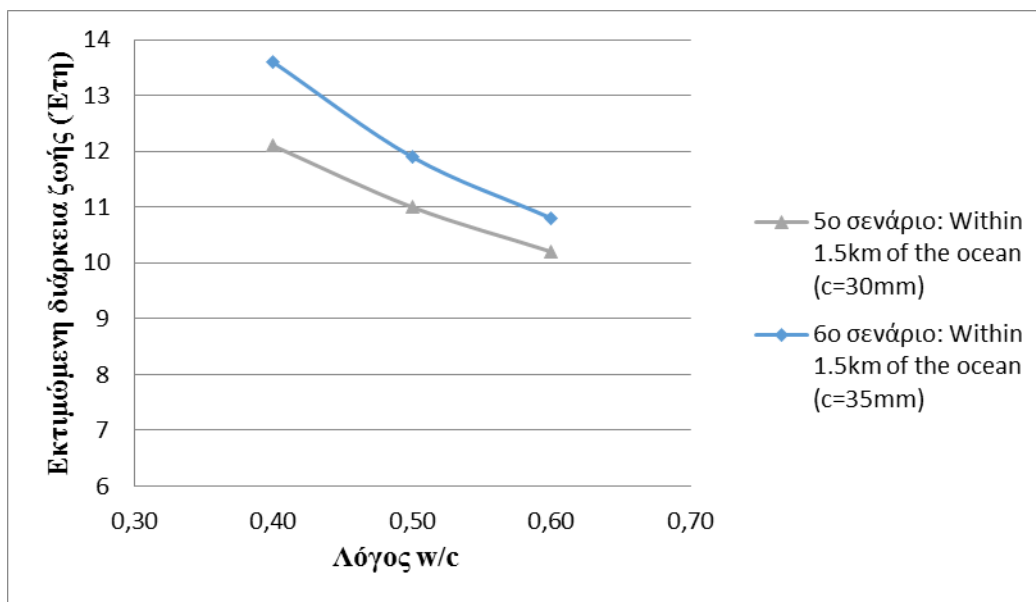
Σχήμα 80 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής της απόστασης από τη θάλασσα στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής, για σταθερό πάχος επικάλυψης 35mm, με προσθήκη 5% ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F.



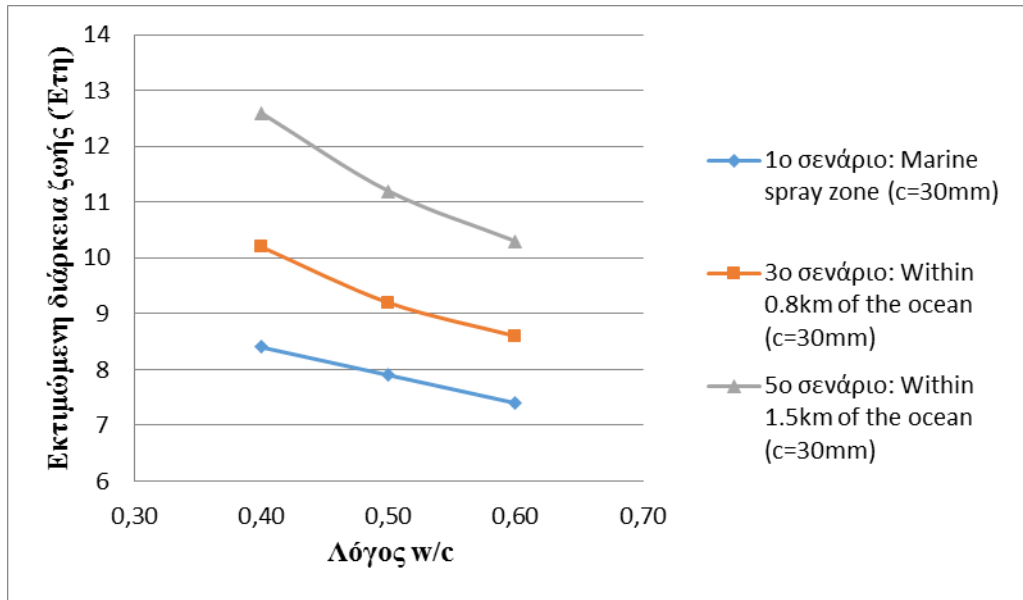
Σχήμα 81 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής του πάχους επικάλυψης στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για σταθερή απόσταση από τη θάλασσα marine spray zone, με προσθήκη 5% ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F.



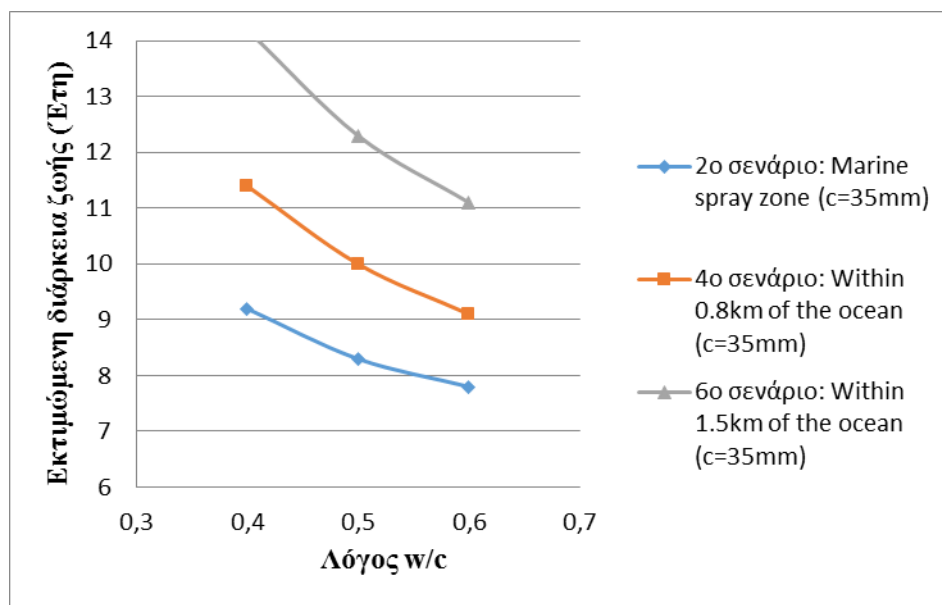
Σχήμα 82 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής του πάχους επικάλυψης στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για σταθερή απόσταση από τη θάλασσα within 0,8km of the ocean, με προσθήκη 5% ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F.



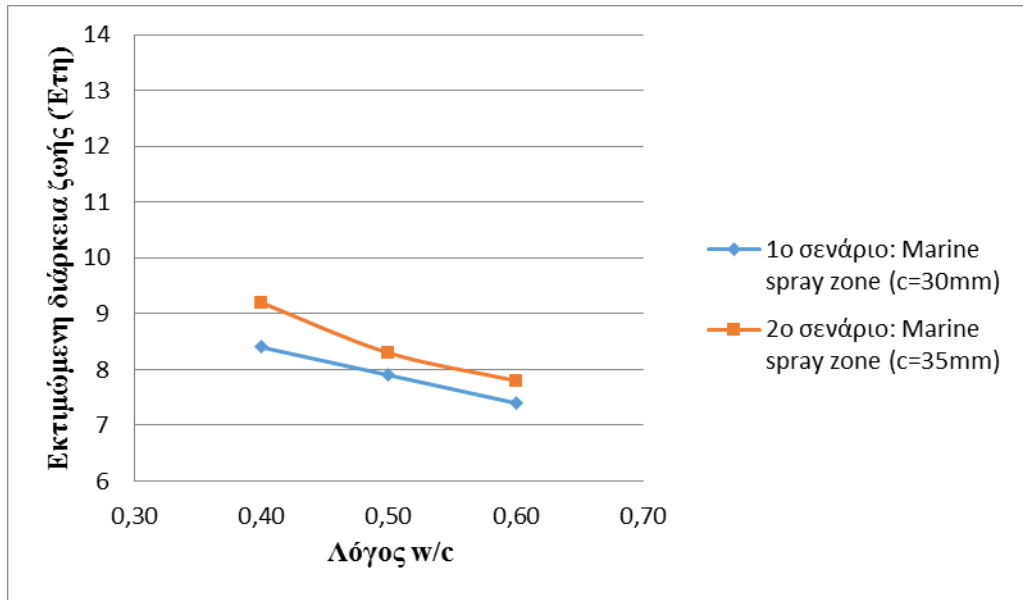
Σχήμα 83 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής του πάχους επικάλυψης στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για σταθερή απόσταση από τη θάλασσα within 1,5km of the ocean, με προσθήκη 5% ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F.



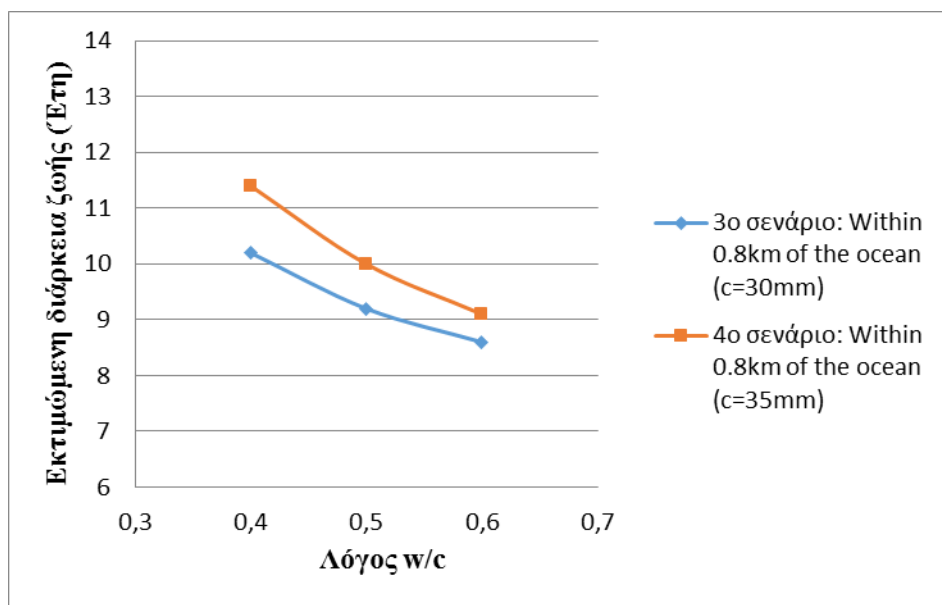
Σχήμα 84 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής της απόστασης από τη θάλασσα στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής, για σταθερό πάχος επικάλυψης 30mm, με προσθήκη 10% ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F.



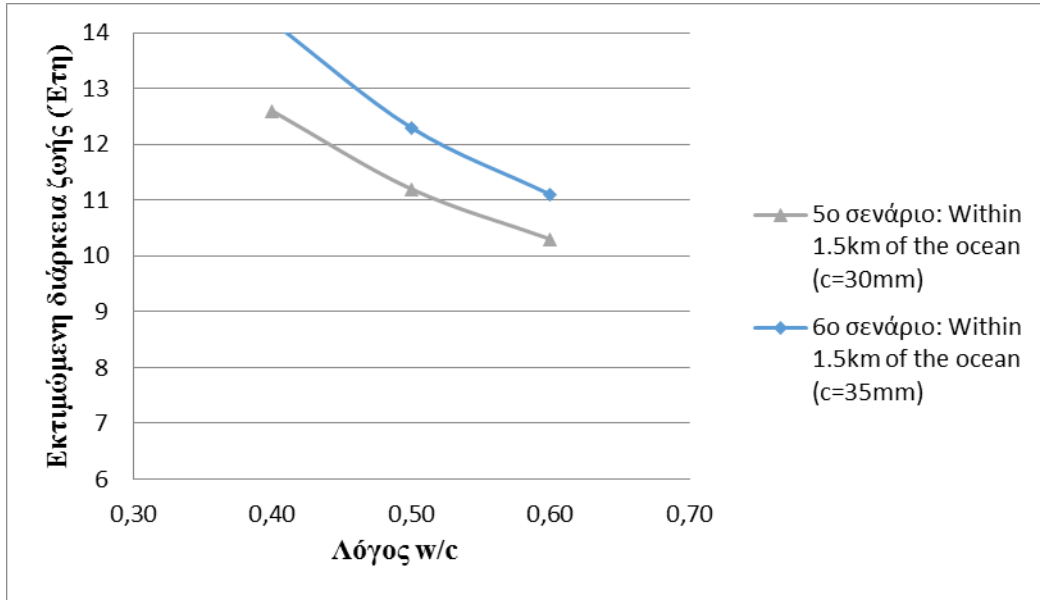
Σχήμα 85 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής της απόστασης από τη θάλασσα στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής, για σταθερό πάχος επικάλυψης 35mm, με προσθήκη 10% ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F.



Σχήμα 86 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής του πάχους επικάλυψης στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για σταθερή απόσταση από τη θάλασσα marine spray zone, με προσθήκη 10% ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F.



Σχήμα 87 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής του πάχους επικάλυψης στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για σταθερή απόσταση από τη θάλασσα within 0.8km of the ocean, με προσθήκη 10% ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F.



Σχήμα 88 : Γραφική απεικόνιση της επιρροής του πάχους επικάλυψης στην εκτιμώμενη διάρκεια ζωής για σταθερή απόσταση από τη θάλασσα within 1,5km of the ocean, με προσθήκη 10% ιπτάμενης τέφρας κατηγορίας F.