



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ**

**«ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ
ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»**

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΜΙΑΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΕ ΕΝΤΟΝΑ ΔΙΑΒΡΩΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ



ΙΩΑΝΝΗΣ Δ. ΠΑΛΜΟΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΙΧΑΗΛ ΦΡΑΓΚΙΑΔΑΚΗΣ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2024

Copyright © ΠΑΛΜΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια της συγγραφέως. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τη συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © PALMOS IOANNIS, 2024

All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε με σκοπό τη μελέτη μιας συμβατικής γέφυρας οπλισμένου σκυροδέματος υπό σεισμική φόρτιση όταν ταυτόχρονα είναι εκτεθειμένη σε διαβρωτικό περιβάλλον χλωριόντων. Για καλύτερη κατανόηση του φαινομένου έγινε σύντομη περιγραφή του μηχανισμού και των ειδών διάβρωσης στο οπλισμένο σκυροδέμα. Ταυτόχρονα, παρουσιάστηκαν διάφορα μοντέλα προσομοίωσης της διάβρωσης που έχουν δημοσιευθεί κατά καιρούς στην αντίστοιχη βιβλιογραφία. Για την επίτευξη του στόχου της εργασίας έγινε χρήση του λογισμικού OpenSeesPy, μέσω του οποίου προσομοιώθηκε η διάβρωση χλωριόντων στον φορέα. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας έτσι ώστε να καθοριστούν οι κρισιμότερες παράμετροι αναφορικά με την διάβρωση, με συγκριτικά αποτελέσματα που προέκυψαν μέσω ανελαστικής στατικής ανάλυσης (Pushover). Τέλος, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων ανάμεσα σε φορέα χωρίς διάβρωση και σε διαβρωμένο φορέα, μέσω καμπυλών τρωτότητας.

Στη συνέχεια περιγράφεται η δομή της διατριβής ανά κεφάλαιο σύνταξης της και παρουσιάζεται το περιεχόμενο τους.

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μια εισαγωγή στο περιεχόμενο και τον σκοπό της παρούσας εργασίας, τη μελέτη δηλαδή μιας συμβατικής γέφυρας οπλισμένου σκυροδέματος υπό σεισμική φόρτιση όταν ταυτόχρονα είναι εκτεθειμένη σε διαβρωτικό περιβάλλον χλωριόντων. Επίσης, τονίζεται η ανάγκη κατανόησης του φαινομένου της διάβρωσης έτσι ώστε να υπάρχει έγκαιρη και έγκυρη αντιμετώπιση των προβλημάτων σε υφιστάμενα έργα που έχουν κατασκευαστεί με ελλιπή σχεδιασμό αλλά και να υπάρχει πρόληψη σε καινούρια έργα.

Στο Κεφάλαιο 2 δίνεται ο ορισμός της διάβρωσης και ο μηχανισμός της, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται εν συντομία τα είδη της διάβρωσης.

Στο Κεφάλαιο 3 το πρόβλημα της διάβρωσης συγκεκριμενοποιείται στο οπλισμένο σκυροδέμα και τις κυριότερες αιτίες που ευθύνονται για το φαινόμενο. Σαν τις δύο συνηθέστερες επιλέχθηκαν η ενανθράκωση και η διείδυση χλωριόντων, οι οποίες και περιγράφονται, με πιο λεπτομερή αναφορά στα χλωριόντα τα οποία αποτελούν το αντικείμενο διερεύνησης της παρούσας εργασίας.

Το Κεφάλαιο 4 απαρτίζεται από διάφορα μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης της διάβρωσης λόγω διείδυσης χλωριόντων, τα οποία εντοπίστηκαν ύστερα από αναδρομή στη σχετική βιβλιογραφία.

Στο Κεφάλαιο 5 εισάγεται η έννοια της τρωτότητας και των παραμέτρων που την επηρεάζουν. Παρατίθενται κάποιες από τις βασικές αναλυτικές μεθόδους μέσω των οποίων εξάγονται οι καμπύλες τρωτότητας έτσι ώστε να εκτιμηθεί η τρωτότητα της κατασκευής. Παράλληλα, δίνεται έμφαση στην επιρροή που έχει η διάβρωση στη τρωτότητα μιας κατασκευής. Ενώ τέλος, ακολουθώντας μια αναγωγική πορεία ξεκινώντας από το υλικό και περνώντας στη συνέχεια σε επίπεδο διατομής και έπειτα σε επίπεδο μέλους εξάγεται το πόρισμα για τη τρωτότητα της κατασκευής.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η γέφυρα η οποία διερευνάται και δίνονται λεπτομέρειες για τα γεωμετρικά της στοιχεία. Αναφέρονται οι αναγκαίες παραδοχές που έγιναν για τη προσομοίωση,

ενώ δίνονται και τα φορτία που λήφθηκαν για τη μελέτη. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε ώστε να προσομοιωθεί η διάβρωση. Τέλος, περιγράφεται η προσομοίωση του μοντέλου της γέφυρας με τη χρήση του λογισμικού OpenSeesPy.

Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται λεπτομερώς οι αναλύσεις του φορέα της γέφυρας. Αρχικά, παρουσιάζεται η ιδιομορφική ανάλυση του φορέα με τις τιμές των σημαντικών ιδιοπεριόδων και ιδιομορφών. Στη συνέχεια, υλοποιείται ανάλυση ευαισθησίας με τη χρήση της ανελαστικής στατικής ανάλυσης (Pushover), εξετάστηκε ο φορέας για διάφορες τιμές επικάλυψης του σκυροδέματος και πραγματοποιήθηκε σύγκριση αποτελεσμάτων. Τέλος, έγινε αποτίμηση της σεισμικής τρωτότητας της γέφυρας με χρήση καμπυλών τρωτότητας, οι οποίες παράχθηκαν με τη μέθοδο SPO2IDA και τις απαιτούμενες στάθμες επιτελεστικότητας.

Στο Κεφάλαιο 8 παρατίθενται τα συμπεράσματα της διερεύνησης και συγχρόνως γίνεται μία σύντομη πρόταση για μελλοντικές διερευνήσεις ώστε να υπάρξει εκτενέστερη βιβλιογραφία.

ABSTRACT

The present master thesis was carried out in order to investigate the behavior of a typical RC bridge under seismic load while subjected to ageing and corrosion due to chlorides penetration. In order to understand better the corrosion process, the corrosion mechanism was described and the types of corrosion were presented. Subsequently, a plethora of simulation models concerning the infusion of chloride in reinforced concrete were displayed. The numerical model and bridge analysis were carried out using OpenSeesPy, a software developed by the University of Berkeley. In order to define the critical parameters that affect the corrosion due to chlorides, sensitivity analysis was conducted by comparison with different results from pushover analysis. Finally, comparisons between uncorroded and corroded bridge were made using fragility curves.

The analytical structure of this study is given below.

In Chapter 1, there is an introduction to the subject of the thesis, the behavior of a typical RC bridge under seismic load while subjected to ageing and corrosion due to chlorides penetration. Moreover, the significance of understanding the effects of corrosion is underlined, so that the damage on structures that have been built with unsatisfying design can be treated effectively and in the right time. In this way, prevention of corrosion in new infrastructure is also possible.

In Chapter 2, the definition of corrosion is given, as well as its mechanism and the most common types of corrosion.

In Chapter 3, corrosion is focused on structures of reinforced concrete. Usually, corrosion in reinforced concrete is caused by carbonation and chlorides penetration. Those two causes are explained in this chapter, with a more thorough review of the second one as it is the center of this particular study.

In Chapter 4, a variety of simulation models that was found in the corresponding literature, concerning the corrosion due to chlorides are displayed.

In Chapter 5, the term fragility is introduced, as well as the parameters that affect it. More specifically, there is a reference in certain methods through which fragility curves are exported. Meanwhile, the significance of corrosion's influence in a structure's fragility is underlined. Last but not least, the conclusion about the structure's fragility is being drawn through a gradual process that starts with the material of the structure, continues with the behavior of the cross section and the members and finally concludes with the results of aging in the structure.

In Chapter 6, the selected bridge is extensively described, from its geometry, cross-sections to the reinforcement. Also, the necessary acknowledgments are listed, as well as the loads and the material model of corrosion that were used. In the end of this chapter, the simulation of the bridge using the OpenSeesPy software is described.

In Chapter 7, the analyses that took place are shown in detail. First, the modal analysis is displayed as well as the values of the eigen periods and the modes. Secondly, sensitivity analysis through pushover analysis took place, in which different values of concrete cover were examined and compared. Finally, the selected bridge's fragility assessment was performed through the fragility curves that were exported using the SPO2IDA method and the mandated limit states.

In Chapter 8, conclusions are drawn and suggestions are made for possible research in the future.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή κο Μιχαήλ Φραγκιαδάκη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου τη παρούσα διπλωματική. Η στήριξη του και η επιστημονική καθοδήγηση ήταν αστείρευτη τόσο κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, όσο και καθ' όλο των κύκλο των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Δρ. Σπυρίδων Διαμαντόπουλο, ο οποίος καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής ήταν πάντα πρόθυμος να ακούσει, να βοηθήσει και να καθοδηγήσει.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου που με στηρίζει σε κάθε μου προσπάθεια, ακαδημαϊκή και μη.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

| | |
|---|-----|
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ | x |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ | xiv |
| 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 1 |
| 1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ | 1 |
| 2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ | 3 |
| 2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ | 3 |
| 2.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ | 4 |
| 2.3 ΕΙΔΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ | 6 |
| 2.3.1 ΓΕΝΙΚΗ Ή ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ (GENERAL OR UNIFORM CORROSION) | 6 |
| 2.3.2 ΓΑΛΒΑΝΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ Ή ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ (GALVANIC OR TWO METALS CORROSION) | 7 |
| 2.3.3 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΜΕ ΒΕΛΟΝΙΣΜΟΥΣ (PITTING CORROSION) | 7 |
| 2.3.4 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΧΑΡΑΓΗΣ (CREVICE CORROSION) | 8 |
| 2.3.5 ΠΕΡΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ (INTERGRANURAL CORROSION) | 8 |
| 2.3.6 ΕΚΛΕΚΤΙΚΗ ΠΡΟΣΒΟΛΗ Ή ΕΚΠΛΥΣΗ (SELECTIVE LEACHING OR DEALLOYING) | 9 |
| 2.3.7 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΜΕ ΑΠΟΞΕΣΗ (EROSION CORROSION) | 9 |
| 2.3.8 ΕΡΓΟΔΙΑΒΡΩΣΗ (STRESS CORROSION) | 10 |
| 3. ΑΙΤΙΕΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ | 11 |
| 3.1 ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ | 11 |
| 3.2 ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ | 12 |
| 3.2.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ | 12 |
| 3.2.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΠΡΟΣΒΟΛΗΣ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ | 14 |
| 4. ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΩΝ ΜΕΛΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ | 16 |
| 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 16 |
| 4.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ | 16 |
| 5. ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ | 28 |
| 5.1 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ | 28 |
| 5.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ | 30 |
| 5.2.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΛΩΡΙΔΩΝ | 30 |
| 5.2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΝΕΦΟΥΣ | 30 |

| | |
|--|-----------|
| 5.2.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ..... | 30 |
| 5.2.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΡΟΖΙΔΑ..... | 31 |
| 5.3 ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ | 32 |
| 6. ΜΟΡΦΩΣΗ ΓΕΦΥΡΑΣ | 33 |
| 6.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ..... | 33 |
| 6.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΦΟΡΕΑ | 36 |
| 6.2.1 ΒΑΘΡΑ | 36 |
| 6.2.2 ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑ | 39 |
| 6.2.3 ΕΦΕΔΡΑΝΑ..... | 39 |
| 6.2.4 ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ | 40 |
| 6.3 ΦΟΡΤΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ | 41 |
| 6.3.1 ΓΕΝΙΚΑ | 41 |
| 6.3.2 ΜΟΝΙΜΑ ΦΟΡΤΙΑ..... | 41 |
| 6.3.3 ΚΙΝΗΤΑ ΦΟΡΤΙΑ..... | 42 |
| 6.3.4 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | 42 |
| 6.4 ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΦΟΡΕΑ..... | 42 |
| 6.4.1 ΑΠΟΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΟΛΚΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΟΠΛΙΣΜΩΝ | 43 |
| 6.4.2 ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ | 44 |
| 6.4.3 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ | 44 |
| 6.5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΕΦΥΡΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ OPENSEESPY | 46 |
| 6.5.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΦΟΡΕΑ | 46 |
| 6.5.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕΛΩΝ ΦΟΡΕΑ | 46 |
| 7. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ | 48 |
| 7.1 ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ | 48 |
| 7.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΗ-ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ – PUSHOVER | 51 |
| 7.2.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΓΙΑ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ $c=50\text{mm}$ | 53 |
| 7.2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΓΙΑ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ $c=40\text{mm}$ | 58 |
| 7.2.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΓΙΑ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ $c=20\text{mm}$ | 62 |
| 7.3 ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ..... | 66 |
| 7.3.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΤΟΜΗΣ | 67 |
| 7.3.2 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ $c=50\text{mm}$ | 68 |
| 7.3.3 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ $c=40\text{mm}$ | 72 |

| | |
|---|----|
| 7.3.4 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ $c=20\text{mm}$ | 75 |
| 7.3.5 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ | 78 |
| 7.3.6 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ..... | 82 |
| 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 83 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ | 85 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 97 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1. Οι δύο διακριτές φάσεις της διάρκειας ζωής των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα μέσω διαγράμματος διάβρωσης-χρόνου . (initiation & propagation time).

Σχήμα 2.2. Η διαδικασία της διάβρωσης στην επιφάνεια του χάλυβα οπλισμένου σκυροδέματος.

Σχήμα 2.3. Συσχέτιση του όγκου του σιδήρου και των οξειδίων του.

Σχήμα 2.4. Γενική ή Ομοιόμορφη διάβρωση.

Σχήμα 2.5. Γαλβανική διάβρωση.

Σχήμα 2.6. Διάβρωση με βελονισμούς.

Σχήμα 2.7. Διάβρωση χαραγής.

Σχήμα 2.8. Περικρυσταλλική διάβρωση.

Σχήμα 2.9. Εκλεκτική Προσβολή ή Έκπλυση.

Σχήμα 2.10. Διάβρωση με απόξεση.

Σχήμα 2.11. Εργοδιάβρωση ή δυναμοδιάβρωση.

Σχήμα 3.1. Εξέλιξη του φαινομένου της ενανθράκωσης και εκκίνηση της διάβρωσης.

Σχήμα 3.2. Μέλος σκυροδέματος ύστερα από διάβρωση λόγω διείδυσης χλωριόντων.

Σχήμα 3.3. Μηχανισμός προσβολής χλωριόντων σε οπλισμένο σκυρόδεμα.

Σχήμα 4.1. Το μοντέλο των Shekhar, Ghosh & Padgett για εκτίμηση του κόστους του κύκλου ζωής γεφυρών αυτοκινητόδρομων συνεκτιμώντας τις παραμέτρους που το επηρεάζουν.

Σχήμα 4.2. Παράδειγμα προσομοίωσης φορέα γέφυρας με εφέδρανα και επιρροή της διάβρωσης στα βάθρα.

Σχήμα 4.3. Απομείωση των διατομών χάλυβα με a) ομοιόμορφη διάβρωση και b), c) διάβρωση με βελονισμούς.

Σχήμα 5.1. Σχηματική απεικόνιση καμπυλών τρωτότητας.

Σχήμα 5.2. Παράμετροι καμπυλών τρωτότητας $\mu = \mu_{InEDP}$ και $\beta = \sigma_{InEDP}$.

Σχήμα 6.1. Αεροφωτογραφία της εξεταζόμενης γέφυρας.

Σχήμα 6.2. Άποψη της γέφυρας μετά τις πλημμύρες του Σεπτεμβρίου 2023.

Σχήμα 6.3. Άποψη της γέφυρας και της γεωμετρίας του φορέα από διάφορες οπτικές.

Σχήμα 6.4. Χάρτης Σεισμικής Επικινδυνότητας.

Σχήμα 6.5. Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας (ΖΔΥΚΠ) Θεσσαλίας.

Σχήμα 6.6. Διαμήκης τομή της γέφυρας.

Σχήμα 6.7. Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης διατομής βάρων.

Σχήμα 6.8. Ελαστομεταλλικά εφέδρανα.

Σχήμα 6.9. Συνθήκες έκθεσης των βάρων στο θαλάσσιο περιβάλλον.

Σχήμα 6.10. Προσομοίωση διατομής μεσοβάρων με Fiber Section.

Σχήμα 6.11. Παράδειγμα χρήσης της εντολής Section Aggregator.

Σχήμα 7.1. 1^η (κυρίαρχη) Ιδιομορφή , μεταφορική κατά Y

Σχήμα 7.2. 2^η (κυρίαρχη) Ιδιομορφή , μεταφορική κατά X

Σχήμα 7.3. 3^η (κυρίαρχη) Ιδιομορφή , στροφική

Σχήμα 7.4. Καμπύλη ικανότητας γέφυρας κατά τη διαμήκη διεύθυνση

Σχήμα 7.5. Καμπύλη ικανότητας γέφυρας κατά την εγκάρσια διεύθυνση

Σχήμα 7.6. Καμπύλη ικανότητας γέφυρας με $c=50\text{mm}$ και $T=75\text{years}$ (α) στην διαμήκη διεύθυνση και (β) στην εγκάρσια διεύθυνση.

Σχήμα 7.7. Καμπύλη ικανότητας γέφυρας με $c=50\text{mm}$ και $T=100\text{years}$ (α) στην διαμήκη διεύθυνση και (β) στην εγκάρσια διεύθυνση.

Σχήμα 7.8. Καμπύλη ικανότητας γέφυρας με $c=50\text{mm}$ και $T=125\text{years}$ (α) στην διαμήκη διεύθυνση και (β) στην εγκάρσια διεύθυνση.

Σχήμα 7.9. Καμπύλη ικανότητας γέφυρας με $c=50\text{mm}$ και $T=150\text{years}$ (α) στην διαμήκη διεύθυνση και (β) στην εγκάρσια διεύθυνση.

Σχήμα 7.10. Καμπύλη ικανότητας γέφυρας με $c=40\text{mm}$ και $T=75\text{years}$ (α) στην διαμήκη διεύθυνση και (β) στην εγκάρσια διεύθυνση.

Σχήμα 7.11 Καμπύλη ικανότητας γέφυρας με $c=40\text{mm}$ και $T=100\text{years}$ (α) στην διαμήκη διεύθυνση και (β) στην εγκάρσια διεύθυνση.

Σχήμα 7.12. Καμπύλη ικανότητας γέφυρας με $c=40\text{mm}$ και $T=125\text{years}$ (α) στην διαμήκη διεύθυνση και (β) στην εγκάρσια διεύθυνση.

Σχήμα 7.13. Καμπύλη ικανότητας γέφυρας με $c=40\text{mm}$ και $T=150\text{years}$ (α) στην διαμήκη διεύθυνση και (β) στην εγκάρσια διεύθυνση.

Σχήμα 7.14. Καμπύλη ικανότητας γέφυρας με $c=20\text{mm}$ και $T=75\text{years}$ (α) στην διαμήκη διεύθυνση και (β) στην εγκάρσια διεύθυνση.

Σχήμα 7.15. Καμπύλη ικανότητας γέφυρας με $c=20\text{mm}$ και $T=100\text{years}$ (α) στην διαμήκη διεύθυνση και (β) στην εγκάρσια διεύθυνση.

Σχήμα 7.16. Καμπύλη ικανότητας γέφυρας με $c=20\text{mm}$ και $T=125\text{years}$ (α) στην διαμήκη διεύθυνση και (β) στην εγκάρσια διεύθυνση.

Σχήμα 7.17. Καμπύλη ικανότητας γέφυρας με $c=20\text{mm}$ και $T=150\text{years}$ (α) στην διαμήκη διεύθυνση και (β) στην εγκάρσια διεύθυνση.

Σχήμα 7.18. Τριγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας.

Σχήμα 7.19. Καμπύλες IDA.

Σχήμα 7.20. Διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας για τη διατομή των μεσόβαθρων της γέφυρας σε αρχική και διαβρωμένη κατάσταση.

Σχήμα 7.21. Καμπύλες IDA για $c=50\text{mm}$ στις στάθμες επιτελεστικότητας (α) LS1 και (β) LS4.

Σχήμα 7.22. Καμπύλες τρωτότητας γέφυρας με $c=50\text{mm}$ και LS1 για χρονική διάρκεια (α) $T=100\text{years}$, (β) $T=125\text{years}$ και (γ) $T=150\text{years}$.

Σχήμα 7.23. Καμπύλες τρωτότητας γέφυρας με $c=50\text{mm}$ και LS4 για χρονική διάρκεια (α) $T=100\text{years}$, (β) $T=125\text{years}$ και (γ) $T=150\text{years}$.

Σχήμα 7.24. Καμπύλες IDA για $c=40\text{mm}$ στις στάθμες επιτελεστικότητας (α) LS1 και (β) LS4.

Σχήμα 7.25. Καμπύλες τρωτότητας γέφυρας με $c=40\text{mm}$ και LS1 για χρονική διάρκεια (α) $T=100\text{years}$, (β) $T=125\text{years}$ και (γ) $T=150\text{years}$.

Σχήμα 7.26. Καμπύλες τρωτότητας γέφυρας με $c=40\text{mm}$ και LS4 για χρονική διάρκεια (α) $T=100\text{years}$, (β) $T=125\text{years}$ και (γ) $T=150\text{years}$.

Σχήμα 7.27. Καμπύλες IDA για $c=20\text{mm}$ στις στάθμες επιτελεστικότητας (α) LS1 και (β) LS4.

Σχήμα 7.28. Καμπύλες τρωτότητας γέφυρας με $c=20\text{mm}$ και LS1 για χρονική διάρκεια (α) $T=100\text{years}$, (β) $T=125\text{years}$ και (γ) $T=150\text{years}$.

Σχήμα 7.29. Καμπύλες τρωτότητας γέφυρας με $c=20\text{mm}$ και LS4 για χρονική διάρκεια (α) $T=100\text{years}$, (β) $T=125\text{years}$ και (γ) $T=150\text{years}$.

Σχήμα 7.30. Καμπύλες τρωτότητας γέφυρας με $c=50\text{mm}$ και LS1 για (α) $i_{\text{corr}}=0.1 \frac{\mu\text{A}}{\text{cm}^2}$, και (β) $i_{\text{corr}}=5 \frac{\mu\text{A}}{\text{cm}^2}$.

Σχήμα 7.31. Καμπύλες τρωτότητας γέφυρας με $c=50\text{mm}$ και LS4 για (α) $i_{\text{corr}}=0.1 \frac{\mu\text{A}}{\text{cm}^2}$, και (β) $i_{\text{corr}}=5 \frac{\mu\text{A}}{\text{cm}^2}$.

Σχήμα 7.32. Καμπύλες τρωτότητας γέφυρας με $c=20\text{mm}$ και LS1 για (α) $i_{\text{corr}}=0.1 \frac{\mu\text{A}}{\text{cm}^2}$, και (β) $i_{\text{corr}}=5 \frac{\mu\text{A}}{\text{cm}^2}$.

Σχήμα 7.33. Καμπύλες τρωτότητας γέφυρας με $c=20\text{mm}$ και LS4 για (α) $i_{\text{corr}}=0.1 \frac{\mu\text{A}}{\text{cm}^2}$, και (β) $i_{\text{corr}}=5 \frac{\mu\text{A}}{\text{cm}^2}$.

Σχήμα 7.34. Καμπύλες τρωτότητας γέφυρας με $i_{\text{corr}}=5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, $T=150\text{years}$ για (α) LS1 και (β) LS4.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1. Στατιστικά μεγέθη των παραμέτρων που επηρεάζουν την διάβρωση σύμφωνα με το μοντέλο Duracrete.

Πίνακας 6.1. Τιμές αντοχών και παραμορφώσεων βάρων.

Πίνακας 6.2. Τιμές δυστένειας, δυτμησίας και δυσκαμψίας ελαστομεταλλικών εφεδράνων.

Πίνακας 6.3. Κατακόρυφη δυσκαμψία ελατηρίων kz.

Πίνακας 6.4. Χαρακτηριστικές τιμές φορτίων για το μοντέλο LM1.

Πίνακας 6.5. Στατιστικά δεδομένα των παραμέτρων που επηρεάζουν τη διάβρωση λόγω χλωριόντων.

Πίνακας 7.1. Κυρίαρχες Ιδιομορφές

Πίνακας 7.2. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ιδιομορφικής ανάλυσης

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα από τα βασικότερα προβλήματα που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι επιστήμονες στο τομέα των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος είναι οι βλάβες που προκαλούνται λόγω γήρανσης. Η φθορά στο χρόνο είναι αναπόφευκτη και οι διαβρωτικοί παράγοντες που απορρέουν από τις περιβαλλοντικές συνθήκες έκθεσης της κατασκευής, οδηγούν σε διεργασίες και αντιδράσεις μεταξύ των συστατικών του σκυροδέματος. Ενδεικτικά, κάποιιοι από τους περιβαλλοντικούς παράγοντες που επηρεάζουν το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι η έκθεση στο διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) της ατμόσφαιρας (ενανθράκωση), η διάβρωση του οπλισμού παρουσία χλωριόντων σε παράκτιες ή παραποτάμιες ζώνες, οι κύκλοι ψύξης-απόψυξης σε ψυχρά κλίματα που δημιουργείται παγετός, καθώς επίσης και η χημική προσβολή του σκυροδέματος από τυχόν εργοστασιακά απόβλητα-λύματα. Οι πιο συχνές βλάβες που δημιουργούνται λόγω των παραπάνω συνθηκών έκθεσης είναι η εμφάνιση ρωγμών ή/και διογκώσεων στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Ωστόσο, αν κανείς αμελήσει τις παραπάνω βλάβες και δε δοθούν λύσεις επισκευής και αποκατάστασης των προβλημάτων, τίθεται κίνδυνος λειτουργικότητας ακόμα και ασφάλειας της κατασκευής, καθώς σε βάθος χρόνου θα επηρεαστούν και οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών.

Η ικανότητα των υλικών να αντιστέκονται στην αλλοίωση των φυσικών, μηχανικών και χημικών χαρακτηριστικών τους υπό τη δράση κλιματικών συνθηκών της ατμόσφαιρας και εν γένει περιβαλλοντικών επιδράσεων περιγράφεται με τον όρο ανθεκτικότητα (durability), μέσω της οποίας εξασφαλίζεται η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής χωρίς την απώλεια των ιδιοτήτων κάτω από ένα αποδεκτό όριο. Οι κατασκευές ανάλογα με τη χρήση ,τη λειτουργία τους και το περιβάλλον έκθεσης, απαιτούν διαφορετικό βαθμό ανθεκτικότητας προκειμένου να ανταποκρίνονται στις επιθυμητές απαιτήσεις. Είναι εμφανές ότι πρόκειται για ένα αρκετά σύνθετο θέμα καθώς ακόμα και σε περιπτώσεις που το σκυρόδεμα παρασκευάζεται, διαστρώνεται και συντηρείται κατάλληλα μπορεί να εμφανιστούν συνθήκες πρόωμης φθοράς.

Το θέμα της ανθεκτικότητας των κατασκευών είναι ένα πολυδιάστατο ζήτημα, στο οποίο σημαίνοντα ρόλο λαμβάνει και ο οικονομικός παράγοντας, καθώς συχνά το κόστος επισκευών ξεπερνά αυτό των νέων κατασκευών. Εκτιμάται ότι, στις βιομηχανικά αναπτυγμένες χώρες, το 40% των συνολικών πόρων της κατασκευαστικής βιομηχανίας χρησιμοποιείται για την επισκευή και συντήρηση των υπαρχουσών κατασκευών και μόνο το 60% για νέες εγκαταστάσεις. Επίσης, είναι εμφανής η τάση για ενίσχυση και αποκατάσταση υφιστάμενων κατασκευών, κυρίως λόγω των κακών οικονομικών συνθηκών που επικρατούν στη χώρα μας αλλά και παγκοσμίως.

Ταυτόχρονα, όντας σε μια χώρα με μεγάλη σεισμικότητα όπως η Ελλάδα, ο επαρκής σχεδιασμός των κατασκευών έναντι σεισμού είναι ένα μείζον και πολυδιάστατο ζήτημα που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι Πολιτικοί Μηχανικοί. Ιδιαίτερα σε μεγάλα τεχνικά έργα όπως π.χ. οι γέφυρες, οι οποίες σχεδιάζονται με διάρκεια ζωής έργου τα 100 χρόνια, είναι σημαντικό η κατασκευή να μπορεί να φέρει επιτυχώς τα φορτία για τα οποία έχει σχεδιαστεί, χωρίς να επηρεάζεται ο χρόνος ζωής από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τις φθορές που προκαλούν.

1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στόχος της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας είναι η μελέτη μιας συμβατικής γέφυρας οπλισμένου σκυροδέματος υπό σεισμική φόρτιση όταν ταυτόχρονα είναι εκτεθειμένη σε

διαβρωτικό περιβάλλον χλωριόντων. Για την επίτευξη του στόχου της εργασίας έγινε χρήση του λογισμικού OpenSeesPy, μέσω του οποίου προσομοιώθηκε η διάβρωση χλωριόντων στον φορέα. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας έτσι ώστε να καθοριστούν οι κρισιμότερες παράμετροι αναφορικά με την διάβρωση, με συγκριτικά αποτελέσματα που προέκυψαν μέσω ανελαστικής στατικής ανάλυσης (Pushover). Τέλος, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων ανάμεσα σε φορέα χωρίς διάβρωση και σε διαβρωμένο φορέα, μέσω καμπυλών τρωτότητας.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ

Ύστερα από βιβλιογραφική ανασκόπηση, μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι παλαιότερα στον σχεδιασμό αλλά και στην έρευνα η ανθεκτικότητα του οπλισμένου σκυροδέματος θεωρούνταν κατά έναν μεγάλο βαθμό δεδομένη. Ωστόσο, μία κατασκευή στο κύκλο ζωής της πέραν των μηχανικών καταπονήσεων που δέχεται, έρχεται αντιμέτωπη και με δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες, οι οποίες επιτίθενται τόσο στο σκυρόδεμα όσο και στο χάλυβα οπλισμού. Το μεγαλύτερο πρόβλημα που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι μηχανικοί στον τομέα των υφιστάμενων κατασκευών, άμεσα συνυφασμένο με την ανθεκτικότητα, είναι η διάβρωση του οπλισμού. Οι βλάβες λόγω διάβρωσης είναι καθοριστικές για την ανθεκτικότητα και την ασφάλεια της κατασκευής, ενώ ταυτόχρονα η επισκευή τέτοιων βλαβών έχει αποδειχθεί σημαντικά κοστοβόρα και σε πολλές περιπτώσεις ασύμφορη. Για την αποφυγή του προβλήματος, είναι αναγκαία η λεπτομερής μελέτη και κατανόηση του μηχανισμού της διάβρωσης και των αιτιών, έτσι ώστε να είναι σε θέση οι μηχανικοί να βρουν την βέλτιστη λύση για τα υφιστάμενα κτίρια αλλά και να μεριμνήσουν για τη πρόληψη έναντι διάβρωσης στις νέες κατασκευές.

2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

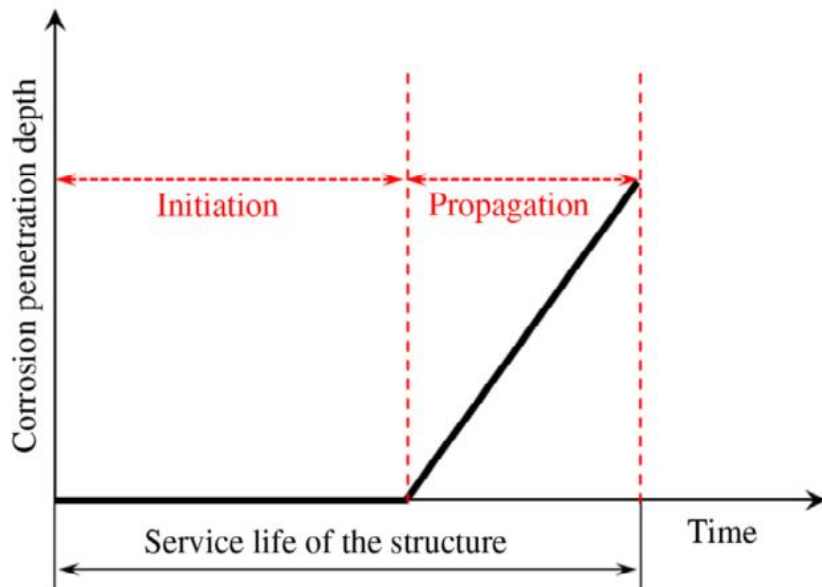
Η διάβρωση του χάλυβα οπλισμού είναι αυτή τη στιγμή σε παγκόσμιο επίπεδο, η κυριότερη αιτία υποβάθμισης των υφιστάμενων κατασκευών. Αυτό συμβαίνει γιατί η πλειοψηφία των υφιστάμενων κτιρίων που σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν στο παρελθόν, δε βασίζονταν σε κανονισμούς που λάμβαναν σημαντικά υπόψιν το φαινόμενο της διάβρωσης λόγω ελλιπούς έρευνας και πληροφορίας. Ωστόσο, η βιβλιογραφία και οι έρευνες που γίνονται τα τελευταία χρόνια, θα βοηθήσουν σημαντικά στην αντιμετώπιση και το καλύτερο χειρισμό του φαινομένου.

Αν ανατρέξει κανείς στη βιβλιογραφία θα διαπιστώσει ότι έχουν δοθεί πολλοί ορισμοί για το φαινόμενο της διάβρωσης, ωστόσο δύο είναι αυτοί που έχουν επικρατήσει και παρουσιάζονται παρακάτω:

- A. Διάβρωση είναι η αλληλεπίδραση ενός μετάλλου με το περιβάλλον του, που έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή ιδιοτήτων του μετάλλου και που συχνά μπορεί να καταλήξει στην υποβάθμιση της λειτουργίας του μετάλλου, του περιβάλλοντος ή του τεχνικού συστήματος, που αυτά αποτελούν τμήμα του. **(ISO 8044:1986)**
- B. Διάβρωση 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. **(Συζητήσεις στα πλαίσια της Διεθνούς Επιτροπής Θαλάσσιας Διάβρωσης και Ρύπανσης των Υφάλων Κατασκευών και Διεθνών Συνεδρίων)**

Πιο περιεκτικά, διάβρωση είναι μια ηλεκτροχημική διεργασία κατά την οποία ένα μέταλλο αντιδρά με χημικά στοιχεία του περιβάλλοντος, όπως το οξυγόνο και το νερό και στη συνέχεια σχηματίζουν μία χημική ένωση.

Η έννοια της διάβρωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε πιο ευρύ πεδίο, όπου συμπεριλαμβάνεται και η επίθεση σε μη μεταλλικά υλικά, αλλά τέτοιου είδους περιπτώσεις διάβρωσης είναι εκτός της οπτικής γωνίας της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



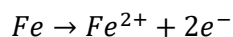
Σχήμα 2.1. Οι δύο διακριτές φάσεις της διάρκειας ζωής των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα μέσω διαγράμματος διάβρωσης-χρόνου . (initiation & propagation time).

2.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

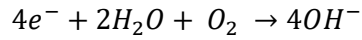
Μία πολύ χρήσιμη ιδιότητα του σκυροδέματος που πρέπει να αναφερθεί λόγω της άμεσης σύνδεσης της με τη διάβρωση είναι η υψηλή αλκαλικότητα του. Πιο συγκεκριμένα, κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου σχηματίζεται υδροξείδιο του ασβεστίου $\text{Ca}(\text{OH})_2$, το οποίο προσδίδει στο τσιμέντο αλκαλικές ιδιότητες. Το υδροξείδιο του ασβεστίου, παρουσία υγρασίας, διαλύεται και παράγονται ιόντα υδροξυλίου, η παρουσία των οποίων οδηγεί στις υψηλές τιμές pH (12.5-13.5) του σκυροδέματος. Λόγω των προαναφερθεισών τιμών pH, σχηματίζεται στην επιφάνεια των χαλύβδινων οπλισμών ένα λεπτό προστατευτικό στρώμα ένυδρων οξειδίων σιδήρου, το οποίο δρα ως παθητικός υμένας και προστατεύει το μέταλλο από διάβρωση. Το προστατευτικό στρώμα οξειδίων γύρω από τον οπλισμό μπορεί να καταστραφεί κυρίως λόγω των εξής:

- Μείωση του pH του σκυροδέματος κοντά στην επιφάνεια των οπλισμών, λόγω του διοξειδίου του άνθρακα της ατμόσφαιρας, φαινόμενο που περιγράφεται με τον όρο ενανθράκωση
- Εισχώρηση χλωριόντων στο στρώμα

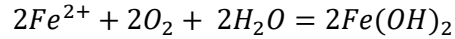
Μόλις το παθητικό στρώμα αποσυντίθεται, ξεκινάει να σχηματίζονται διαβρωμένες περιοχές στην επιφάνεια των χαλύβδινων ράβδων οπλισμού. Η χημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα είναι η ίδια είτε αν πρόκειται για διάβρωση λόγω ενανθράκωσης είτε λόγω εισχώρησης χλωριόντων. Πιο συγκεκριμένα, μόλις ο χάλυβας ξεκινήσει να διαβρώνεται, διαλύεται στο ενδοπορικό νερό του σκυροδέματος και οξειδώνεται σε κατιόντα Fe^{2+} βάσει της παρακάτω αντίδρασης οξειδωσης:



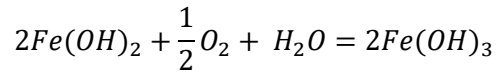
Τα ηλεκτρόνια που παράγονται από την παραπάνω αντίδραση θα πρέπει να απορροφηθούν, έτσι ώστε να διατηρηθεί η ηλεκτρική ουδετερότητα στην επιφάνεια του οπλισμού. Παρουσία νερού και οξυγόνου, πραγματοποιείται η παρακάτω αντίδραση αναγωγής:



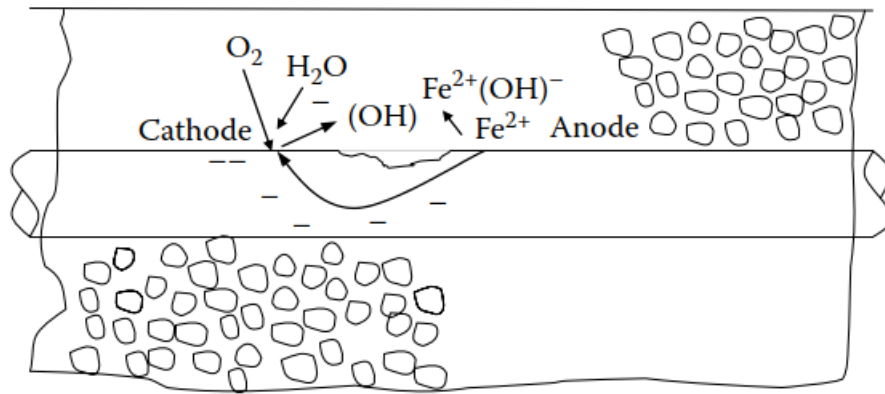
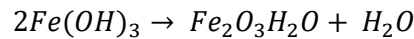
Προσθέτοντας τις δύο αντιδράσεις έχουμε το πρώτο στάδιο σχηματισμού της σκουριάς:



Στη συνέχεια, το υδροξείδιο του σιδήρου (II) οξειδώνεται από το οξυγόνο προς υδροξείδιο του σιδήρου (III):

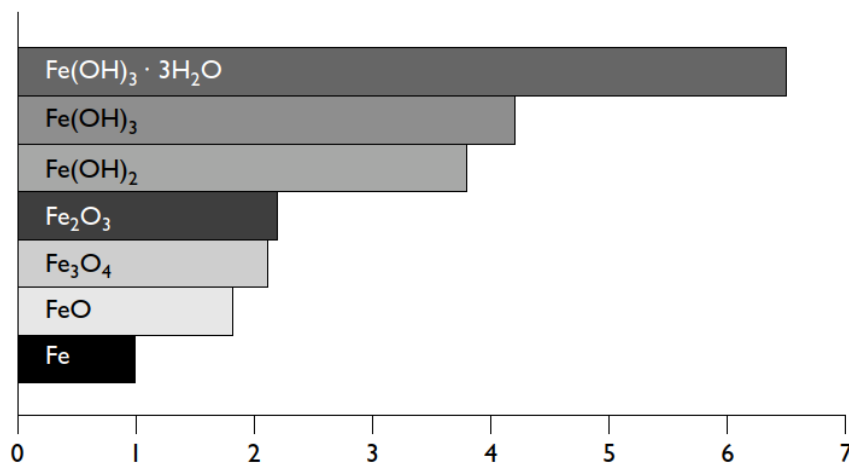


Το τελικό προϊόν όταν ξηραθεί δίνει ένυδρο οξείδιο του σιδήρου (III), τη κοινή σκουριά.



Σχήμα 2.2. Η διαδικασία της διάβρωσης στην επιφάνεια του χάλυβα οπλισμένου σκυροδέματος.

Το άνυδρο οξείδιο του σιδήρου Fe_2O_3 έχει περίπου το διπλάσιο όγκο σε σχέση με τον αρχικό οπλισμό, ενώ όταν ενυδατωθεί διογκώνεται ακόμα περισσότερο και γίνεται πορώδες, με αποτέλεσμα στη διεπιφάνεια χάλυβα σκυροδέματος ο τελικός όγκος να είναι περίπου 6-10 φορές μεγαλύτερος από την αρχική διατομή. Απόρροια των παραπάνω, είναι η δημιουργία ρωγμών και η αποφλοίωση στο σκυροδέμα, όπως επίσης και οι λεκέδες σκουριάς που παρατηρούνται στις ρωγμές.



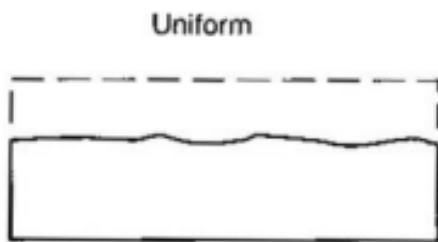
Σχήμα 2.3. Συσχέτιση του όγκου του σιδήρου και των οξειδίων του.

2.3 ΕΙΔΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Η διάβρωση αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία τόσο εξ ορισμού όσο και βάσει του μηχανισμού της, καθώς μπορεί να εκδηλωθεί και να εξαπλωθεί σε διάφορες κατευθύνσεις ανάλογα με τις συνθήκες έκθεσης του μετάλλου. Συνεπώς, το ίδιο πολύπλοκη είναι και η κατηγοριοποίηση των διαφορετικών τύπων διάβρωσης. Βάσει του τρόπου και της μορφής που διαβρώνονται τα μέταλλα, οι Fontana & Green πρότειναν οκτώ βασικές κατηγορίες, οι οποίες είναι οι πλέον διαδεδομένες και χαίρουν ευρείας αποδοχής με κάποιες ίσως παραλλαγές σε ορισμένες περιπτώσεις. Οι ως άνω κατηγορίες διάβρωσης παρουσιάζονται συνοπτικά στη συνέχεια αυτής της ενότητας.

2.3.1 ΓΕΝΙΚΗ Ή ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ (GENERAL OR UNIFORM CORROSION)

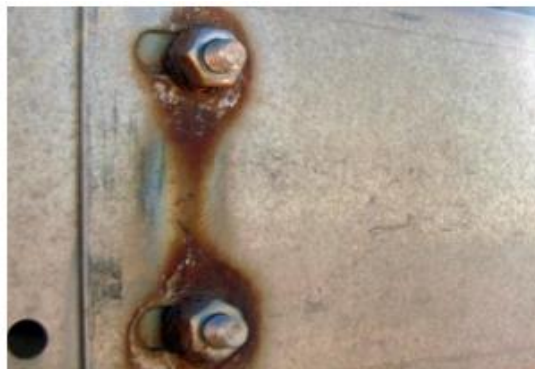
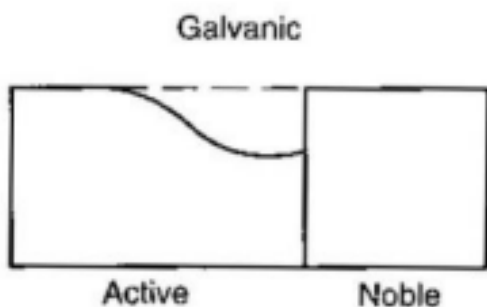
Η ομοιόμορφη διάβρωση είναι η πιο συχνή μορφή διάβρωσης που παρατηρείται. Γίνεται εύκολα αντιληπτή, καθώς σχηματίζεται στην επιφάνεια του μετάλλου ένα σχετικά ομοιόμορφο στρώμα προϊόντων διάβρωσης, πρόκειται για τη κοινή σκουριά με το χαρακτηριστικό καφέ χρώμα. Σημειώνεται ότι στην ομοιόμορφη διάβρωση δε παρατηρούνται λάκκοι, ρωγμές ή σχισμές στην επιφάνεια του διαβρωμένου μετάλλου, γεγονός που διευκολύνει τον προσδιορισμό του ρυθμού της διάβρωσης λόγω της ομοιόμορφης απώλειας του σιδήρου και καθιστά δυνατόν τον υπολογισμό του ποσοστού της διατομής που έχει διαβρωθεί. Υπάρχουν δύο μέθοδοι προκειμένου να προσδιοριστεί το ποσοστό διάβρωσης των μετάλλων από ομοιόμορφη διάβρωση. Η απώλεια πάχους ανά μονάδα χρόνου και η απώλεια βάρους του μετάλλου ανά μονάδα χρόνου και επιφάνειας. Στην Αμερική είναι πιο διαδεδομένη η πρώτη μέθοδος, ενώ στην Ευρώπη χρησιμοποιείται κυρίως η δεύτερη. Πιο αναλυτικά για τη δεύτερη μέθοδο, αρχικά χρησιμοποιείται ένα δοκίμιο όπου γίνεται καταγραφή των χαρακτηριστικών του όπως το βάρος του και η επιφάνεια του και στην συνέχεια αφού ολοκληρωθεί η έκθεση του δοκιμίου σε διαβρωτικό περιβάλλον για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, καθαρίζεται από τα προϊόντα διάβρωσης και επαναλαμβάνονται οι μετρήσεις για να υπολογιστεί η απώλεια υλικού.



Σχήμα 2.4. Γενική ή Ομοιόμορφη διάβρωση.

2.3.2 ΓΑΛΒΑΝΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ Ή ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ (GALVANIC OR TWO METALS CORROSION)

Η γαλβανική διάβρωση είναι ένα φαινόμενο που παρατηρείται όταν δύο μέταλλα με διαφορετικές ιδιότητες έρχονται σε επαφή όντας σε ένα αγώγιμο περιβάλλον όπως το βρόχινο νερό, τα υπόγεια ύδατα ή το αλμυρό νερό. Ουσιαστικά τα μόρια του ενός μετάλλου έλκονται προς το άλλο μέταλλο, οδηγώντας σε διάβρωση μόνο το ένα από τα δύο μέταλλα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το λιγότερο ανθεκτικό μέταλλο να διαβρωθεί πιο γρήγορα συγκριτικά με το πιο ανθεκτικό μέταλλο.

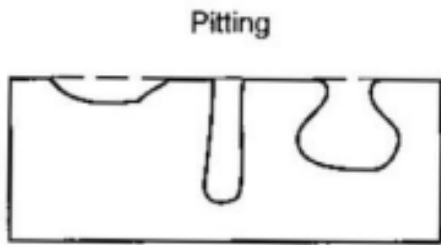


Σχήμα 2.5. Γαλβανική διάβρωση.

2.3.3 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΜΕ ΒΕΛΟΝΙΣΜΟΥΣ (PITTING CORROSION)

Η διάβρωση με βελονισμούς είναι μια τοπικά περιορισμένη μορφή διάβρωσης, η οποία εμφανίζεται σε συγκεκριμένα σημεία του υλικού υπό μορφή οπών. Είναι μία εξαιρετικά επικίνδυνη μορφή διάβρωσης καθώς διαδίδεται γρήγορα δημιουργώντας υποεπιφανειακές οπές χωρίς να γίνεται αισθητή η διάβρωση του αντικειμένου, ενώ παρατηρείται ελάχιστη απώλεια μάζας του υλικού.

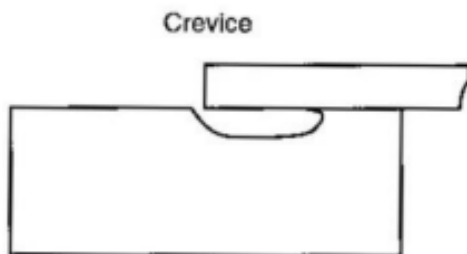
Πολλοί παράγοντες συμβάλλουν στην εμφάνιση της διάβρωσης με βελονισμούς, συμπεριλαμβανομένων των περιβαλλοντικών συνθηκών, της σύνθεσης του μετάλλου και της παρουσίας διαβρωτικών ουσιών. Υλικά όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας και τα κράματα αλουμινίου είναι ευάλωτα στη σημειακή διάβρωση υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Η τακτική επιθεώρηση και η συντήρηση είναι κρίσιμες για τον εντοπισμό και την αντιμετώπιση του φαινομένου εγκαίρως.



Σχήμα 2.6. Διάβρωση με βελονισμούς.

2.3.4 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΧΑΡΑΓΗΣ (CREVICE CORROSION)

Η διάβρωση χαραγής αποτελεί και αυτή μία τοπική μορφή διάβρωσης, εκδηλώνεται σε ρωγμές όπου το μέγεθος του κενού της ρωγμής είναι αρκετά ευρύ, επιτρέποντας στο υγρό να εισχωρεί μέσα στη ρωγμή, ενώ παράλληλα το κενό είναι αρκετά στενό ώστε να παραμένει το υγρό στάσιμο. Είναι αποτέλεσμα διαφοράς συγκεντρώσεων σε οξυγόνο, σε συνδέσεις, σε κοχλίες, εκεί γενικά που ευνοείται η συγκέντρωση και η στασιμότητα των υγρών. Η διάβρωση χαραγής μπορεί δυνητικά να εμφανιστεί σε οποιοδήποτε μέταλλο ή περιβάλλον, ωστόσο πιο ευάλωτα είναι τα μέταλλα που έχουν προηγουμένως παθητικοποιηθεί ή έχουν τάση να παθητικοποιούνται όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας ή το αλουμίνιο. Όταν αυτά εκτίθενται σε διαβρωτικό περιβάλλον όπως το χλώριο, μπορεί να προκληθεί αστοχία στο προστατευτικό στρώμα του μετάλλου, επιτρέποντας στο υγρό να διεισδύσει στη ρωγμή και να έρθει σε άμεση επαφή με το μέταλλο.

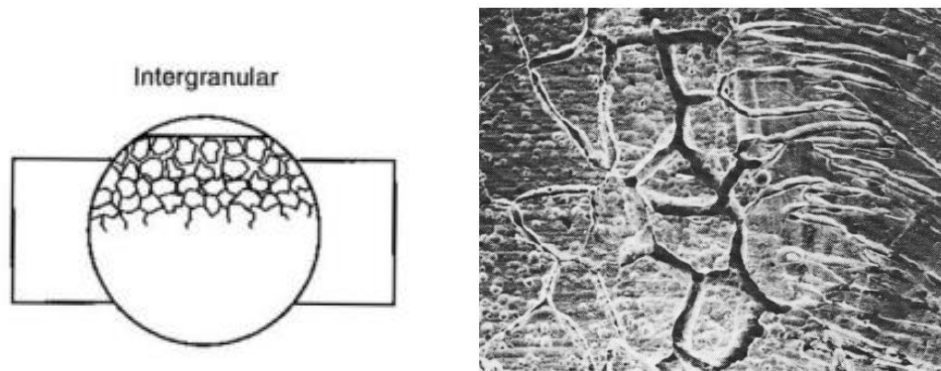


Σχήμα 2.7. Διάβρωση χαραγής.

2.3.5 ΠΕΡΙΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ (INTERGRANULAR CORROSION)

Η περικρυσταλλική διάβρωση εμφανίζεται κυρίως στα περατωτικά στοιχεία των κόκκων και επηρεάζει ελάχιστα τον υπόλοιπο όγκο του υλικού. Με τη διάδοση του φαινομένου επηρεάζονται και οι γύρω περιοχές και κατά συνέπεια το σύνολο του μετάλλου. Κατά την περικρυσταλλική διάβρωση επέρχεται διαχωρισμός των κόκκων του μετάλλου και σε ορισμένες περιπτώσεις προκαλείται απόσπαση των κόκκων με αποτέλεσμα την δημιουργία κοιλοτήτων. Η σημαντικότερη συνέπεια αυτού του είδους διάβρωσης είναι η μείωση της δυσθραυστότητας του υλικού, μια μείωση που δυνητικά μπορεί να οδηγήσει και στη θραύση του. Η περικρυσταλλική

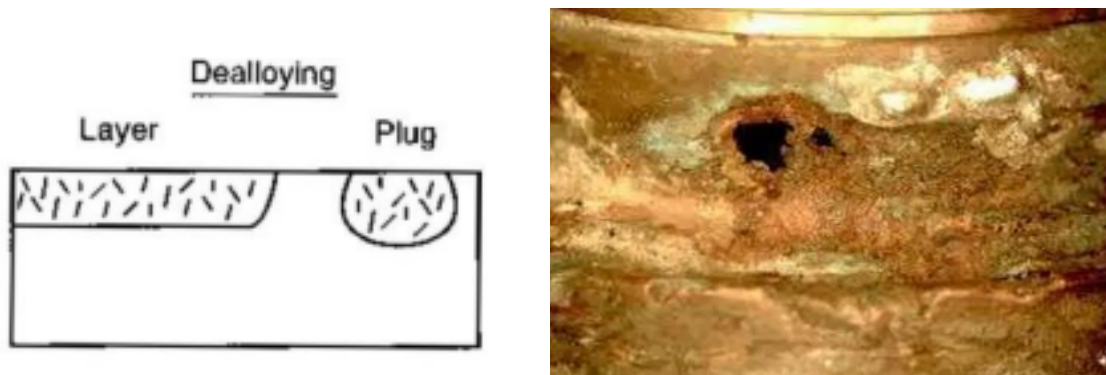
διάβρωση εμφανίζεται συνήθως σε κράματα που περιλαμβάνουν νικέλιο, χρώμιο, χαλκό, ψευδάργυρο και αλουμίνιο, καθώς και σε ανοξείδωτους χάλυβες.



Σχήμα 2.8. Περικρυσταλλική διάβρωση.

2.3.6 ΕΚΛΕΚΤΙΚΗ ΠΡΟΣΒΟΛΗ Ή ΕΚΠΛΥΣΗ (SELECTIVE LEACHING OR DEALLOYING)

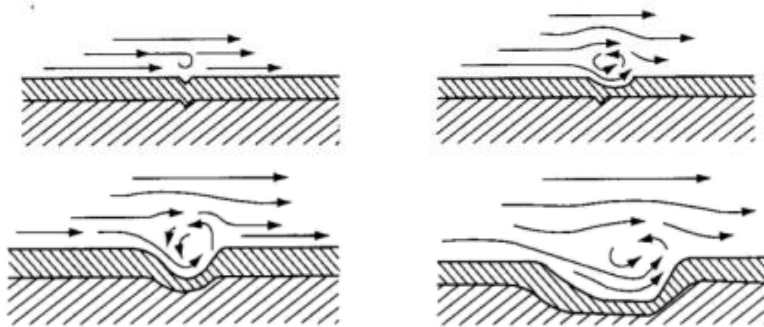
Η εκλεκτική προσβολή ή έκπλυση αναφέρεται στη διαδικασία απομάκρυνσης ενός συγκεκριμένου στοιχείου από ένα ετερογενές στερεό κράμα. Αυτό το είδος διάβρωσης παρουσιάζεται σε κράματα όπου δύο ή περισσότερα μέταλλα δημιουργούν στερεό διάλυμα. Κατά τη διαβρωτική διαδικασία μόνο το ευγενές μέταλλο διαλύεται, ενώ το υπόλοιπο διατηρεί τη μεταλλική του μορφή με ταυτόχρονη μείωση της μηχανικής του αντοχής. Η πιο συνηθισμένη περίπτωση αυτού του είδους διάβρωσης είναι η αποψευδαργύρωση, δηλαδή η εκλεκτική απομάκρυνση του ψευδάργυρου από τον ορείχαλκο.



Σχήμα 2.9. Εκλεκτική Προσβολή ή Έκπλυση.

2.3.7 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΜΕ ΑΠΟΞΕΣΗ (EROSION CORROSION)

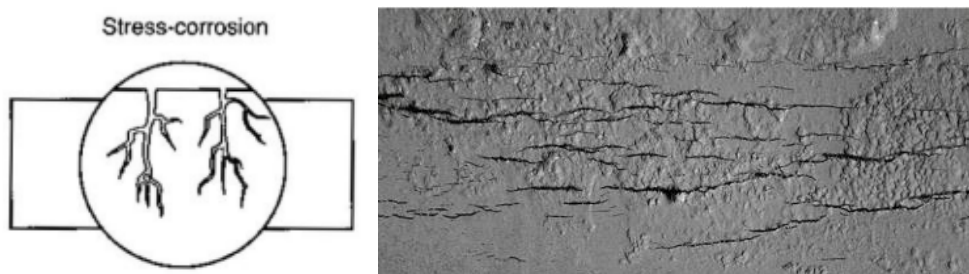
Η διάβρωση με απόξεση είναι μια μορφή μηχανικής διάβρωσης και σχετίζεται με την αύξηση του ρυθμού διάβρωσης λόγω της επαφής ενός μετάλλου με ένα κινούμενο ρευστό. Αυτό το είδος της διάβρωσης συναντάται συχνά σε αγωγούς και σωληνώσεις. Επιπλέον, ροές με υψηλή ταχύτητα και διακυμάνσεις (τυρβώδης ροή) μπορούν επίσης να σχηματίσουν οπές στην επιφάνεια του μετάλλου δημιουργώντας σοβαρότερα προβλήματα διάβρωσης.



Σχήμα 2.10. Διάβρωση με απόξεση.

2.3.8 ΕΡΓΟΔΙΑΒΡΩΣΗ (STRESS CORROSION)

Εργοδιάβρωση ή αλλιώς δυναμοδιάβρωση ορίζεται η ανάπτυξη ρωγμών λόγω της ταυτόχρονης δράσης εφελκυστικών τάσεων και διαβρωτικού περιβάλλοντος. Με την εμφάνιση αυτού του είδους διάβρωσης δημιουργούνται λεπτές ρωγμές που προχωρούν στο εσωτερικό του μετάλλου με κατεύθυνση κάθετη στη διεύθυνση της μηχανικής τάσης ακολουθώντας περικρυσταλλική ή ενδοκρυσταλλική πορεία. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι πολλές φορές αυτές οι ρωγμές είναι δύσκολο να παρατηρηθούν ακόμα και μικροσκοπικά, γεγονός που καθιστά την εργοδιάβρωση ένα άκρως επικίνδυνο φαινόμενο για τη κατασκευή και την ακεραιότητα της.



Σχήμα 2.11. Εργοδιάβρωση ή δυναμοδιάβρωση.

3. ΑΙΤΙΕΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι σημαντικότερες αιτίες που προκαλούν την διάβρωση στις κατασκευές.

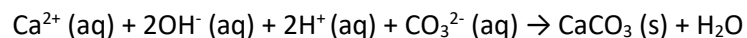
3.1 ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Με τον όρο ενανθράκωση περιγράφεται η αλληλεπίδραση του αερίου διοξειδίου του άνθρακα της ατμόσφαιρας με τα αλκαλικά υδροξείδια στο σκυρόδεμα. Πιο αναλυτικά, οι ενώσεις ασβεστίου που βρίσκονται στο σκυρόδεμα, τείνουν να αντιδράσουν με το αέριο διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας, με αποτέλεσμα να μειώνεται η αλκαλικότητα του και οι ράβδοι οπλισμού να εκτίθενται σε κίνδυνο διάβρωσης. Η κυριότερη ένωση ασβεστίου, η οποία αντιδρά με το διοξείδιο του άνθρακα CO_2 , είναι το διοξείδιο του ασβεστίου Ca(OH)_2 , ένα από τα προϊόντα ενυδάτωσης του τσιμέντου. Το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας εισέρχεται στο σκυρόδεμα μέσω των πόρων, εκεί παρουσία υγρασίας παράγεται ανθρακικό οξύ. Στη συνέχεια το ανθρακικό οξύ αντιδρά με το διοξείδιο του ασβεστίου και παράγεται ανθρακικό ασβέστιο CaCO_3 , το οποίο καθιζάνει με αποτέλεσμα την πτώση του pH του σκυροδέματος.

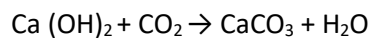
Η ακριβής σειρά αντιδράσεων που συμβαίνουν είναι η εξής:

- $\text{Ca(OH)}_2 (\text{s}) \rightarrow \text{Ca}^{2+} (\text{aq}) + 2\text{OH}^- (\text{aq})$
- $\text{CO}_2 (\text{g}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCO}_3^- (\text{aq}) + \text{H}^+ (\text{aq})$
- $\text{HCO}_3^- (\text{aq}) \rightarrow \text{CO}_3^{2-} (\text{aq}) + \text{H}^+ (\text{aq})$

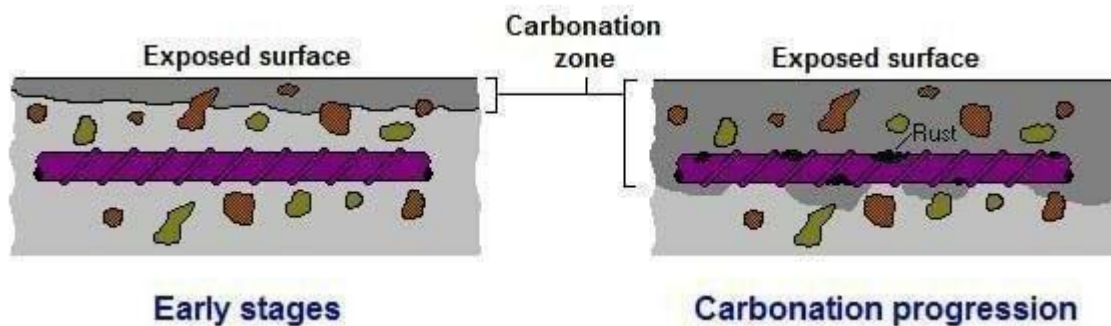
Ενώ η διαδικασία της ενανθράκωσης ολοκληρώνεται με την παρακάτω αντίδραση εξουδετέρωσης



Συνηθέστερα βέβαια η ενανθράκωση περιγράφεται πιο συνοπτικά ως :



Πρακτικά, το διαθέσιμο CO_2 που υπάρχει στην ατμόσφαιρα εισχωρεί στο σκυρόδεμα, το οποίο αρχίζει να ενανθρακώνεται, με αποτέλεσμα την μείωση της αλκαλικότητας. Η τιμή pH του ενδοπορικού νερού στο σκληρυμένο σκυρόδεμα που ήταν περίπου 13, θα μειωθεί αρχικά περίπου στο 9.0, ενώ όταν το σκυρόδεμα έχει ενανθρακωθεί πλήρως και έχει αντιδράσει όλο το διαθέσιμο διοξείδιο του ασβεστίου Ca(OH)_2 , το pH θα πάρει τιμές γύρω στο 8. Η μείωση του pH προκαλεί την καταστροφή του παθητικού στρώματος γύρω από το χάλυβα, το οποίο διατηρείται για τιμές pH άνω του 9 και έτσι ο οπλισμός είναι εκτεθειμένος σε διάβρωση και ξεκινάει να εμφανίζονται στην επιφάνεια του σημεία σκουριάς.



Σχήμα 3.1. Εξέλιξη του φαινομένου της ενανθράκωσης και εκκίνηση της διάβρωσης.

Η ενανθράκωση του σκυροδέματος συνδέεται άμεσα με το πορώδες του σκυροδέματος καθώς και με την σχετική υγρασία. Τα μεγαλύτερα ποσοστά ενανθράκωσης έχουν παρατηρηθεί σε περιβάλλον με σχετική υγρασία 50%- 75%. Για μικρότερα ποσοστά σχετικής υγρασίας, οι πόροι του σκυροδέματος τείνουν να αποξηραθούν, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει το απαραίτητο νερό για την διάλυση του διοξειδίου του άνθρακα και του διοξειδίου του ασβεστίου και έτσι δεν δύναται να πραγματοποιηθεί ενανθράκωση. Αντιθέτως, για μεγάλα ποσοστά σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντος, οι πόροι του σκυροδέματος είναι γεμάτοι με νερό και η διάχυση του διοξειδίου του άνθρακα γίνεται με πολύ αργούς ρυθμούς. Τέλος, μερικοί ακόμα παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο της ενανθράκωσης και τη διάδοσή του, είναι συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, η θερμοκρασία, η επικάλυψη του σκυροδέματος, ο λόγος N/T, η χρονική διάρκεια έκθεσης στο διοξείδιο του άνθρακα και ο προσανατολισμός της κατασκευής.

3.2 ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ

3.2.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ

Πολλές έρευνες έχουν δείξει ότι τα ιόντα χλωρίου Cl^- , τα οποία προέρχονται κυρίως από τα αντιπαγωτικά άλατα ή από το θαλασσινό νερό είναι η κυριότερη αιτία της διάβρωσης του χάλυβα οπλισμού ειδικά σε κατασκευές ευρισκόμενες σε παράκτια περιβάλλοντα ή σε έργα υποδομών όπως οι οδικές γέφυρες. Τα χλωριόντα που μεταφέρονται μέσω των πόρων ή των μικρών ρωγμών στο σκυρόδεμα έχουν ως αποτέλεσμα να αποπαθητικοποιούν το προστατευτικό στρώμα γύρω από τον χάλυβα οπλισμού και να επιταχύνουν τη διάβρωση. Στις παράκτιες περιοχές οι ζώνες με την μεγαλύτερη επικινδυνότητα για παρουσίαση διάβρωσης θεωρούνται η ζώνη παλίρροιας και η ζώνη ψεκασμού, ενώ λόγω αερομεταφοράς τα χλωριόντα μπορούν να φτάσουν παρασυρμένα από τον άνεμο και σε πιο απομακρυσμένες από την ακτή κατασκευές και να προκαλέσουν φθορές. Ωστόσο ενδιαφέρον προκαλεί το γεγονός ότι το σκυρόδεμα το οποίο είναι μόνιμως βυθισμένο στην θάλασσα και παρουσιάζει μεγάλη διείσδυση χλωριόντων, δεν κινδυνεύει στον ίδιο βαθμό καθώς δεν υπάρχει επαρκές οξυγόνο για την έναρξη της ηλεκτροχημικής αντίδρασης που έχει απαραίτητη προϋπόθεση την παρουσία υγρασίας και

οξυγόνου. Συμπερασματικά, η διείσδυση χλωριόντων είναι μια διαδικασία που λαμβάνει χώρα σε πόρους γεμάτους ή εν μέρει γεμάτους με νερό. Αυτός είναι και ο λόγος που η διαδικασία εξελίσσεται με πιο αργούς ρυθμούς από αυτή της ενανθράκωσης, κατά την οποία τα μόρια του διοξειδίου του άνθρακα μπορούν να εισχωρήσουν γρηγορότερα μέσω πόρων που είναι γεμάτοι αέρα.



Σχήμα 3.2. Μέλος σκυροδέματος ύστερα από διάβρωση λόγω διείσδυσης χλωριόντων.

Αξίζει να αναφερθεί ότι εκτός των εξωγενών παραγόντων όπως τα αντιπαγωτικά άλατα και το θαλάσσιο νερό τα οποία αναφέρθηκαν παραπάνω, κάποιες φορές η παρουσία και η προσβολή χλωριόντων γίνεται από το εσωτερικό του σκυροδέματος. Ιόντα χλωρίου συχνά εντοπίζονται στο ίδιο το σκυρόδεμα είτε σε πρόσμικτα όπως οι υπερρευστοποιητές είτε εάν σε παράκτιες περιοχές με περιορισμό στην προμήθεια υλικών έχουν χρησιμοποιηθεί αδρανή της περιοχής ή θαλασσινό νερό για την ανάμιξη.

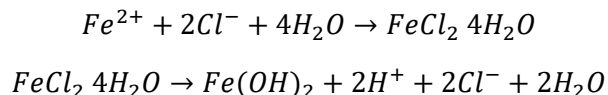
Όπως συμβαίνει και στο φαινόμενο της ενανθράκωσης, ο ρυθμός εισροής των χλωριόντων ακολουθεί τον δεύτερο νόμο διάχυσης του Fick, ωστόσο η προσέγγιση αυτή είναι μάλλον εμπειρική καθώς υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψιν. Σε αρχικό στάδιο η εισροή των χλωριόντων πραγματοποιείται μέσω αναρρόφησης, ειδικά σε ξηρές επιφάνειες, λόγω του τριχοειδούς φαινομένου, με αποτέλεσμα το θαλασσινό νερό να απορροφάται άμεσα από το ξηρό σκυρόδεμα. Στη συνέχεια λαμβάνει χώρα η μεταφορά του νερού μέσω των πόρων του σκυροδέματος και ξεκινάει η διάχυση. Ωστόσο, πρέπει να ληφθούν υπόψιν και μηχανισμοί οι οποίοι επιβραδύνουν την πορεία των χλωριόντων λόγω χημικών αντιδράσεων, με αποτέλεσμα να συγκρατείται ένα μέρος τους λόγω απορρόφησης στις επιφάνειες των πόρων.

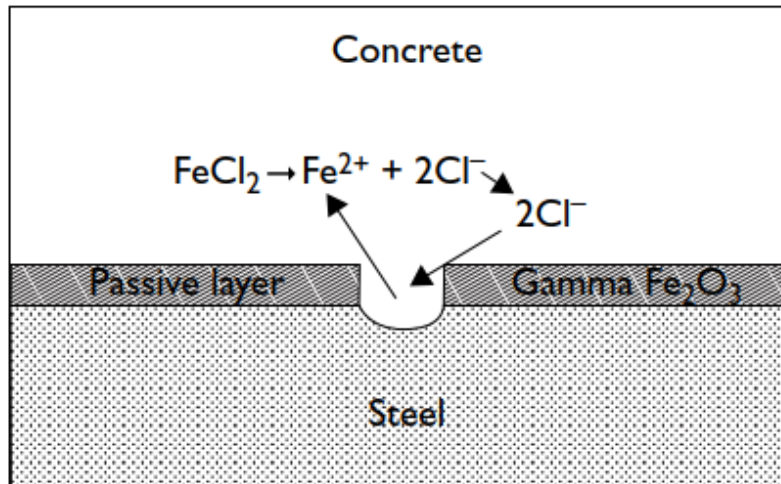
Προβληματισμούς αναφορικά με το ρυθμό εισροής των χλωριόντων, εγείρει και ο καθορισμός της αρχικής συγκέντρωσης, καθώς η διάχυση των χλωριόντων γίνεται σε βαθμίδες και όχι σε μέτωπα, όπως συμβαίνει στη περίπτωση της ενανθράκωσης και το προσδιορισμό τους βάθους της επηρεασμένης περιοχής. Για αυτό το λόγο, συχνά χρησιμοποιούνται διαγράμματα συγκέντρωσης-βάθους, γνωστά και ως προφίλ, για καλύτερη περιγραφή των δεδομένων. Επισημαίνεται ότι μπορεί να παρατηρηθούν αυξημένες τιμές συγκεντρώσεων σε μικρά βάθη σκυροδέματος, κοντά στην εξωτερική επιφάνεια, γεγονός που τεκμαίρεται λόγω της εξάτμισης.

3.2.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΠΡΟΣΒΟΛΗΣ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ

Ο μηχανισμός προσβολής από χλωριόντα διαφέρει σε σύγκριση με τον μηχανισμό της ενανθράκωσης. Και σε αυτή τη περίπτωση, όπως και στην ενανθράκωση, τα χλωριόντα επιτίθενται στο παθητικό στρώμα που περικλείει τον οπλισμό, χωρίς ωστόσο να παρατηρείται καθολική πτώση του pH. Στην ουσία τα ιόντα χλωρίου συμπεριφέρονται ως καταλύτες της διάβρωσης, καθώς δεν καταναλώνονται κατά τη διάρκεια αλλά καταστρέφουν το παθητικό στρώμα, αφήνοντας τον χάλυβα εκτεθειμένο και αυξάνοντας τον ρυθμό της διάβρωσης. Τα ιόντα χλωρίου καταστρέφουν τοπικά το προστατευτικό στρώμα οξειδίων που βρίσκεται στην επιφάνεια του οπλισμού και συνεπώς όντας ακάλυπτος ο οπλισμός υπόκεινται σε τοπική διάβρωση με βελονισμούς. Οι περιοχές στις οποίες το στρώμα οξειδίων έχει διαλυθεί δρουν ως άνοδοι ενώ οι γειτονικές περιοχές του χάλυβα με το προστατευτικό στρώμα λειτουργούν ως κάθοδοι όπου λαμβάνει χώρα η κατανάλωση οξυγόνου. Μετά την έναρξη της διαβρωτικής διαδικασίας το περιβάλλον γίνεται ιδιαίτερα επιθετικό ειδικά γύρω από την περιοχή που έχουν σχηματιστεί τα προϊόντα διάβρωσης. Το ρεύμα που ρέει από τις ανοδικές στις καθοδικές περιοχές, αυξάνει τη συγκέντρωση των χλωριόντων και μειώνει την αλκαλικότητα, ενώ ταυτόχρονα ενισχύεται το προστατευτικό φιλμ στη γειτονική παθητική περιοχή λόγω εξάλειψης των χλωριόντων και η καθοδική αντίδραση σε αυτές τις περιοχές αυξάνει την αλκαλικότητα. Όπως φαίνεται, υπάρχει μια επανακυκλοφορία των ιόντων χλωρίου, γεγονός που καθιστά την αντιμετώπιση και την εξάλειψη τους μια αρκετά δύσκολη διαδικασία.

Η όλη διαδικασία σε μορφή εξίσωσης μπορεί να εκφραστεί εν συντομία ως εξής:





Σχήμα 3.3. Μηχανισμός προσβολής χλωριόντων σε οπλισμένο σκυρόδεμα.

4. ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΩΝ ΜΕΛΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην σύγχρονη εποχή, οι μηχανικοί για να προσομοιώσουν το φαινόμενο της διάβρωσης στις κατασκευές, χρησιμοποιούν κάποια προσεγγιστικά μοντέλα με σκοπό τον υπολογισμό των απομειωμένων μηχανικών ιδιοτήτων των μελών τους. Πιο συγκεκριμένα, για να γίνει πιο κατανοητή η συμπεριφορά ενός φορέα που έχει υποστεί διάβρωση λόγω διείσδυσης χλωριόντων, πρέπει αρχικά να εξεταστεί η επιρροή της σε καθένα από τα στοιχεία του. Για παράδειγμα, στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, το πρώτο άμεσο αποτέλεσμα της διάβρωσης είναι η απομείωση της διατομής των ράβδων οπλισμού. Κατά την διαδικασία της διάβρωσης, παράγονται οξείδια του σιδήρου που δημιουργούν έναν συγκεντρωμένο όγκο μεγαλύτερο από τον αντίστοιχο του χάλυβα. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα να προκληθούν εσωτερικές τάσεις στο σκυρόδεμα που πιθανόν να οδηγήσουν σε ρηγματώσεις ή ακόμα και σε αποκόλληση της επικάλυψης του οπλισμού. Επιπλέον αυτού, οι ιδιότητες των υλικών (σκυρόδεμα, χάλυβας) μεταβάλλονται στις θέσεις των οπλισμών διαμορφώνοντας έτσι ένα περιβάλλον κακής συνάφειας μεταξύ τους. Επιπρόσθετα, το φαινόμενο της διάβρωσης μπορεί να επηρεάσει την ολκιμότητα του χάλυβα. Αναλυτικότερα, μειώνει την επιμήκυνση των ράβδων κατά τη μέγιστη φόρτιση το οποίο έχει ως αποτέλεσμα στην μείωση της πλαστιμότητας ολόκληρης της κατασκευής.

Ο ρυθμός εμφάνισης και τα αποτελέσματα τέτοιων φαινομένων είναι συνάρτηση διαφόρων παραγόντων όπως είναι ο συντελεστής διάβρωσης i_{corr} , η υγρασία και οι περιβαλλοντικές συνθήκες, η χρονική περίοδος από την στιγμή διάδοσης της διάβρωσης καθώς και από τα υλικά και τις λεπτομέρειες κατασκευής του εκάστοτε φορέα. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά από τα μοντέλα της διάβρωσης όπως παρουσιάζονται στην βιβλιογραφία τα οποία συμπεριλαμβάνουν τους παραπάνω παράγοντες.

4.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Σε γέφυρες από οπλισμένο σκυρόδεμα οι οποίες έχουν κατασκευαστεί σε παράκτιο περιβάλλον, τα ιόντα χλωρίου μεταφέρονται και συσσωρεύονται στην επιφάνεια της γέφυρας μέσω του ατμοσφαιρικού αέρα. Στη συνέχεια, λόγω της διαφορετικής συγκέντρωσης χλωριόντων στην επιφάνεια και στο εσωτερικό του σκυροδέματος, ξεκινάει η διάχυση των χλωριόντων προς το εσωτερικό της κατασκευής, όπου εντοπίζεται η αρχή του φαινομένου της διάβρωσης.

Γενικά, η διείσδυση των ιόντων χλωρίου στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα αντιπροσωπεύεται από το 2^ο νόμο του Fick για τη διάχυση μέσω της παρακάτω εξίσωσης:

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = -D_c \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2}$$

Όπου:

D_c είναι ο συντελεστής διάχυσης

C είναι η συγκέντρωση ιόντων χλωρίου

x είναι το βάθος διείσδυσης στο σκυρόδεμα από την επιφάνεια

t είναι ο χρόνος σε έτη

Εμβαθύνοντας περισσότερο στην βιβλιογραφία πάνω στο 2^ο νόμο του Fick, βρίσκουμε τον συντελεστή διάχυσης Ψ μέσω του οποίου λαμβάνεται υπόψη ο λόγος νερού προς τσιμέντο του σκυροδέματος και παράλληλα συνυπολογίζεται η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Ο συντελεστής Ψ περιγράφεται από τη σχέση:

$$\Psi = 11.146 + 31.025 \left(\frac{w}{c}\right) - 1.941\varphi + 38.212 \left(\frac{w}{c}\right)^2 + 4.48 \left(\frac{w}{c}\right)\varphi + 0.024\varphi^2$$

Όπου:

φ είναι η τοπική θερμοκρασία περιβάλλοντος

w/c είναι ο λόγος νερού προς τσιμέντο

Σύμφωνα με τους Stewart & Rosowsky (1998) [1], ο χρόνος έναρξης της διάβρωσης του οπλισμού στα βάθρα μιας γέφυρας οπλισμένου σκυροδέματος δίνεται από τη παρακάτω σχέση:

$$T_i = \frac{d_c^2}{4D_c} \left[\operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{c_s - c_{cr}}{c_s} \right) \right]^{-2}$$

Όπου:

d_c είναι η επικάλυψη του σκυροδέματος

D_c είναι ο συντελεστής διάχυσης

c_s και c_{cr} είναι η συγκέντρωση των χλωριόντων στην επιφάνεια του σκυροδέματος και στο εσωτερικό του αντίστοιχα

Μετά την περίοδο έναρξης, έχοντας περάσει στη φάση διάδοσης του φαινομένου της διάβρωσης, τα προϊόντα που παράγονται λόγω διάβρωσης όπως το αδιάλυτο υδροξείδιο του σιδήρου, προσκαλούνται στην επιφάνεια του οπλισμού με αποτέλεσμα να μειώνεται ο ρυθμός εξέλιξης της διάβρωσης. Οι Vu & Stewart (2000) [2], πρότειναν τις παρακάτω εμπειρικές σχέσεις, εξαρτώμενες από τον χρόνο, για τον προσδιορισμό του βαθμού διάβρωσης του οπλισμού:

$$i_{corr}(t_i) = 0.85 i_{corr,0} t_i^{-0.29}$$

$$i_{corr,0} = \frac{37.8 \left(1 - \frac{w}{c}\right)^{-1.64}}{d_c}$$

Όπου:

t_i είναι οποιαδήποτε χρονική στιγμή μετά την έναρξη της διάβρωσης

$i_{corr,0}$ είναι ο βαθμός της διάβρωσης κατά την έναρξη του φαινομένου

w/c είναι ο λόγος νερού προς τσιμέντο (N/T)

d_c είναι το βάθος διάβρωσης

Στη συνέχεια ο Du (2005) [3] πρότεινε δύο σχέσεις για τον υπολογισμό της απομειωμένης διατομής του χάλυβα αλλά και του απομειωμένου ορίου διαρροής αντίστοιχα :

$$d_s(t_i) = \sqrt{1 - Q_{corr}(t_i)} \times d_{s0}$$

$$f_y(t_i) = (1 - \beta_y Q_{corr}(t_i)) f_{y0}$$

Όπου:

$d_s(t_i)$ και $f_y(t_i)$ είναι η διάμετρος του χάλυβα και το όριο διαρροής αντίστοιχα, σε χρόνο t_i μετά την έναρξη της διάβρωσης

d_{s0} και f_{y0} είναι η αρχική διάμετρος του χάλυβα και το αρχικό όριο διαρροής αντίστοιχα

β_y είναι ο συντελεστής μείωσης του ορίου διαρροής

$Q_{corr}(t_i)$ είναι το ποσοστό της διαβρωμένης μάζας του οπλισμού σε σύγκριση με την αρχική μάζα

Το ποσοστό της διαβρωμένης μάζας σε σύγκριση με την αρχική μάζα του χάλυβα οπλισμού μπορεί να υπολογιστεί μέσω του παρακάτω προσομοιώματος των Vu & Stewart (2000) [3]:

$$Q_{corr}(t_i) = \frac{4x_{corr}(t_i)}{d_{s0}} \times \left(1 - \frac{x_{corr}(t_i)}{d_{s0}}\right) = \frac{2.10 \left(1 - \frac{w}{c}\right)^{-1.64}}{d_c d_{s0}} t_i^{0.71} - \frac{1.10 \left(1 - \frac{w}{c}\right)^{-3.28}}{d_c^2 d_{s0}^2} t_i^{1.42}$$

Όπου:

x_{corr} είναι το βάθος διάβρωσης του οπλισμού και λογίζεται ίσο με :

$$x_{corr} = 0.0116 i_{corr} t_i$$

Συνεπώς, μέσω των παραπάνω εξισώσεων μπορούν να υπολογιστούν σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή του κύκλου ζωής της κατασκευής η απομειωμένη λόγω διάβρωσης διατομή, καθώς και το αντίστοιχο όριο διαρροής του χάλυβα οπλισμού.

Μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους κατά το φαινόμενο της διάβρωσης των μελών οπλισμένου σκυροδέματος, είναι ο χρόνος έναρξης του φαινομένου (corrosion initiation time), η χρονική στιγμή δηλαδή κατά την οποία η συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου κοντά στις ράβδους οπλισμού φτάσει στη κρίσιμη τιμή C_{cr} . Για τον ορθό υπολογισμό του χρόνου έναρξης της διάβρωσης, είναι απαραίτητο να γίνει αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας διάχυσης των χλωριόντων μέσα στο σκυρόδεμα και να υπολογιστεί η συγκέντρωση χλωριόντων σε διαφορετικά βάθη των μελών. Παρακάτω παρουσιάζεται μία πιθανοτική μέθοδος (DuraCrete) πρόβλεψης της συγκέντρωσης των χλωριόντων στο σκυρόδεμα, στην οποία έχουν ληφθεί υπόψη τα χαρακτηριστικά της διάχυσης τα οποία είναι εξαρτώμενα από τον χρόνο, καθώς επίσης και οι αβεβαιότητες που έχουν τα μοντέλα πρόβλεψης τέτοιων διεργασιών. Η

συγκέντρωση χλωριόντων λοιπόν σε βάθος x μετά από χρονικό διάστημα t , μπορεί να εκφραστεί ως [4] :

$$C(x, t) = C_{cs} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{k_e k_t k_c D_0 (t_0)^n (t)^{1-n}}} \right) \right]$$

Όπου:

$\operatorname{erf}(\theta) = \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \right) \int_0^\theta e^{-t^2} dt$, η συνάρτηση σφάλματος

D_0 είναι ο εμπειρικός συντελεστής διάχυσης

k_e είναι συντελεστής περιβάλλοντος

k_t εκφράζει την επιρροή των προσεγγιστικών μεθόδων στον υπολογισμό του D_0

k_c είναι ο συντελεστής που σχετίζεται με την ξήρανση

t_0 είναι η αντίστοιχη περίοδος για το D_0

n είναι ο παράγοντας γήρανσης

C_{cs} είναι η συγκέντρωση των χλωριόντων στην επιφάνεια του σκυροδέματος και υπολογίζεται ως:

$$C_{cs} = A_{cs} \left(\frac{w}{b} \right) + \varepsilon_{cs}$$

Όπου:

w/b είναι ο λόγος νερό/τσιμέντο

A_{cs} και ε_{cs} είναι παράμετροι του μοντέλου

Στη περίπτωση που η επικάλυψη του σκυροδέματος d_c είναι γνωστή, ο χρόνος εκκίνησης της διάβρωσης δίνεται από τη παρακάτω σχέση [4]:

$$T_{cor} = \left\{ \frac{d_c^2}{4k_e k_t k_c D_0 (t_0)^n} \left[\operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{C_{cs} - C_{cr}}{C_{cs}} \right) \right]^{-2} \right\}^{\left(\frac{1}{1-n} \right)}$$

Σε περίπτωση που η διάβρωση δεν είναι ομοιόμορφη στο μέλος, αλλά πρόκειται για διάβρωση με βελονισμούς (pitting corrosion), οι Val & Melchers [4] απλοποίησαν τη γεωμετρία των βελονισμών σε τετράπλευρο, έτσι ώστε να υπολογίσουν την μείωση της διατομής των χαλύβδινων οπλισμών. Συγκεκριμένα, η απομειωμένη διατομή μιας ράβδου οπλισμού λόγω διάβρωσης με βελονισμούς υπολογίζεται ως:

$$A_{res}(t) = [1 - Q_{cor}(t)]A_0 = [A_0 - A_{cor,p}(t)]$$

Όπου:

$Q_{cor}(t)$ είναι το ποσοστό απώλειας μάζας των διαβρωμένων χαλύβδινων ράβδων συναρτήσει του χρόνου

A_0 είναι η αρχική διατομή των ράβδων

$A_{cor,p}(t)$ είναι η επιφάνεια της διάβρωσης με βελονισμούς στις χαλύβδινες ράβδους, η οποία είναι χρονικά εξαρτώμενη και μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$A_{cor,p}(t) = \begin{cases} A_1 + A_2, & P(t) \leq \frac{d_{s0}}{\sqrt{2}} \\ \frac{\pi d_{s0}^2}{4} - A_1 + A_2, & \frac{d_{s0}}{\sqrt{2}} < P(t) \leq d_{s0} \\ \frac{\pi d_{s0}^2}{4}, & P(t) > d_{s0} \end{cases}$$

$$A_1 = \frac{1}{2} \left[\theta_1 \left(\frac{d_{s0}}{2} \right)^2 - \frac{b}{2} \sqrt{d_{s0}^2 - b^2} \right]$$

$$A_2 = \frac{1}{2} \left[\theta_2 P(t)^2 - \frac{b P(t)^2}{d_{s0}} \right]$$

$$\theta_1 = 2 \arcsin \left(\frac{b}{d_{s0}} \right)$$

$$\theta_2 = 2 \arcsin \left(\frac{b}{2P(t)} \right)$$

$$b = 2P(t) \sqrt{1 - \left(\frac{P(t)}{d_{s0}} \right)^2}$$

Όπου:

d_{s0} είναι η αρχική διάμετρος των ράβδων οπλισμού

$P(t)$ είναι το βάθος της διάβρωσης με βελονισμούς (pitting depth) συναρτήσει του χρόνου και εκφράζεται ως:

$$P(t) = R \int_{T_{cor}}^t \lambda(t) dt$$

Όπου:

$\lambda(t)$ είναι ο ρυθμός της ομοιόμορφης διάβρωσης

R είναι συντελεστής που αφορά τη διάβρωση με βελονισμούς και εκφράζει τον λόγο του μέγιστου βάθους της διάβρωσης με βελονισμούς προς το μέσο βάθος της ομοιόμορφης διάβρωσης.

Βασιζόμενος στο μοντέλο των Vu & Stewart, ο Cui μαζί με συνεργάτες του [4] πρότειναν ένα νέο βελτιωμένο μοντέλο προσομοίωσης, χρονικά εξαρτώμενο, το οποίο προσομοιώνει την ομοιόμορφη διάβρωση και παρουσιάζεται παρακάτω:

$$\lambda(t) = \begin{cases} \frac{(t - T_{cr})[4.5 - 26\lambda'(T_{Wcr})]\lambda'(T_{Wcr}) + (T_{Wcr} - t)\lambda'(T_{cr})}{T_{Wcr} - T_{cr}}, & T_{cor} < t \leq T_{cr} \\ [4.5 - 26\lambda'(t)]\lambda'(t), & T_{cr} < t \leq T_{Wcr} \\ & T_{Wcr} > t \end{cases}$$

$$\lambda'(t) = 0.0116 \times 0.85 \times \frac{37.8(1 - \frac{w}{c})^{-1.64}}{d_c} \times (t - T_{cor})^{-0.29}$$

Όπου:

w/c είναι ο λόγος νερό/τσιμέντο

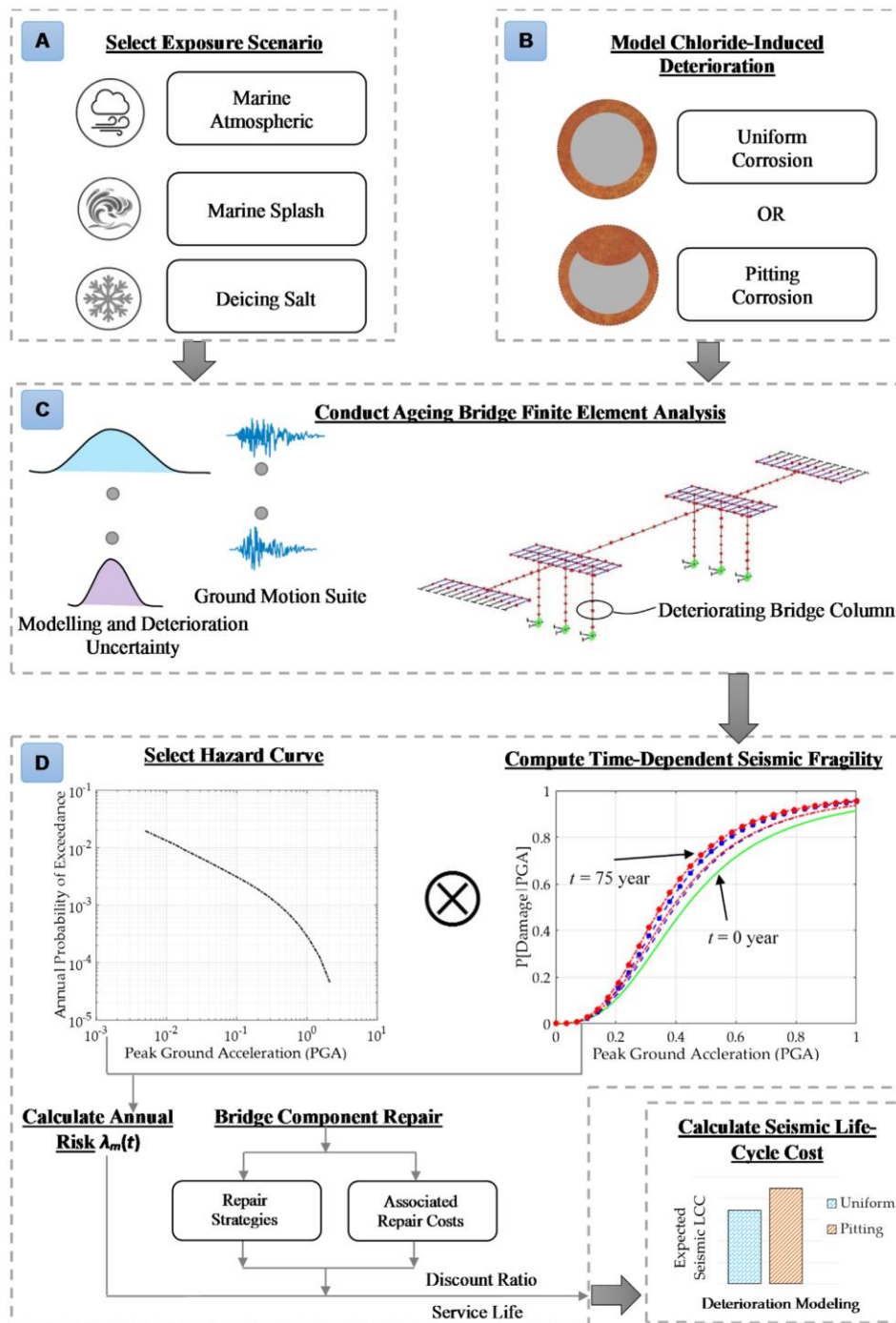
T_{cr} και T_{Wcr} είναι ο χρόνος έναρξης των ρηγματώσεων και των κρίσιμων ρηγματώσεων αντίστοιχα.

Παρακάτω δίνονται σε μορφή πίνακα στατιστικά δεδομένα για τις παραμέτρους της διάβρωσης βάσει του μοντέλου DuraCrete.

Πίνακας 4.1. Στατιστικά μεγέθη των παραμέτρων που επηρεάζουν την διάβρωση σύμφωνα με το μοντέλο Duracrete.

| Parameter | Distribution type | Atmospheric | | Splash | | Tidal | | Submerged | |
|---------------------|--------------------------|-------------|-------|--------|-------|-------|-------|-----------|-------|
| | | Mean | Std. | Mean | Std. | Mean | Std. | Mean | Std. |
| D_0 (w/b = 0.4) | Normal | 220 | 25.4 | 220 | 25.4 | 220 | 25.4 | 220 | 25.4 |
| D_0 (w/b = 0.45) | Normal | 315.6 | 32.5 | 315.6 | 32.5 | 315.6 | 32.5 | 315.6 | 32.5 |
| D_0 (w/b = 0.5) | Normal | 473 | 43.2 | 473 | 43.2 | 473 | 43.2 | 473 | 43.2 |
| n | Beta (A = 0.0, B = 0.98) | 0.362 | 0.245 | 0.362 | 0.245 | 0.362 | 0.245 | 0.362 | 0.245 |
| A_{cs} | Normal | 2.565 | 0.356 | 7.758 | 1.36 | 7.758 | 1.36 | 10.348 | 0.714 |
| ε_{cs} | Normal | 0 | 0.58 | 0 | 1.105 | 0 | 1.105 | 0 | 0.405 |
| C_{cr} | Normal | 0.9 | 0.15 | 0.9 | 0.15 | 0.9 | 0.15 | 1.6 | 0.2 |
| k_f | Normal | 0.832 | 0.024 | 0.832 | 0.024 | 0.832 | 0.024 | 0.832 | 0.024 |
| k_c | Gamma | 0.676 | 0.114 | 0.265 | 0.045 | 0.924 | 0.155 | 0.325 | 0.223 |
| k_c (t = 1 days) | Beta (A = 1.0, B = 4.0) | 2.4 | 0.7 | 2.4 | 0.7 | 2.4 | 0.7 | 2.4 | 0.7 |
| k_c (t = 3 days) | Beta (A = 1.0, B = 4.0) | 1.5 | 0.3 | 1.5 | 0.3 | 1.5 | 0.3 | 1.5 | 0.3 |
| k_c (t = 7 days) | Determined value | 1 | - | 1 | - | 1 | - | 1 | - |
| k_c (t = 28 days) | Beta (A = 0.4, B = 1.0) | 0.8 | 0.1 | 0.8 | 0.1 | 0.8 | 0.1 | 0.8 | 0.1 |

Οι Shekhar, Ghosh & Padgett [5] θέλοντας να εκτιμήσουν το κόστος για τον κύκλο ζωής γεφυρών αυτοκινητόδρομων συνεκτιμώντας την γήρανση, τη διάβρωση αλλά και τις βλάβες λόγω σεισμών μέσω αναλύσεων, κατασκεύασαν ένα γενικό πλαίσιο ώστε να συμπεριλάβουν όλες τις παραπάνω παραμέτρους. Πρώτο βήμα, είναι ο καθορισμός των συνθηκών έκθεσης, αν δηλαδή η διάδοση των χλωριόντων γίνεται μέσω του ατμοσφαιρικού αέρα ή μέσω άμεσης επαφής με το θαλασσινό νερό ή ψύξης-απόψυξης. Σε δεύτερο στάδιο, μελετάται η μορφή της διάβρωσης των μελών, αν δηλαδή είναι ομοιόμορφη ή με βελονισμούς. Στη συνέχεια, πραγματοποιούνται μη γραμμικές αναλύσεις ιστορίας χρησιμοποιώντας διάφορες εδαφικές κινήσεις σε διάφορες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής των γεφυρών. Στην επόμενη φάση, μέσω καμπυλών τρωτότητας και των καμπυλών σεισμικής επικινδυνότητας ανά περιοχή, υπολογίζεται το ετήσιο ρίσκο των βλαβών λόγω σεισμού. Στη συνέχεια, συνεκτιμώντας διαφορετικές στρατηγικές αποτίμησης και ενίσχυσης των υπό μελέτη γεφυρών, καταλήγει στο κόστος του κύκλου ζωής του έργου συμπεριλαμβανομένων των παραπάνω παραμέτρων. Παρακάτω, η διαδικασία παρουσιάζεται και σχηματικά.

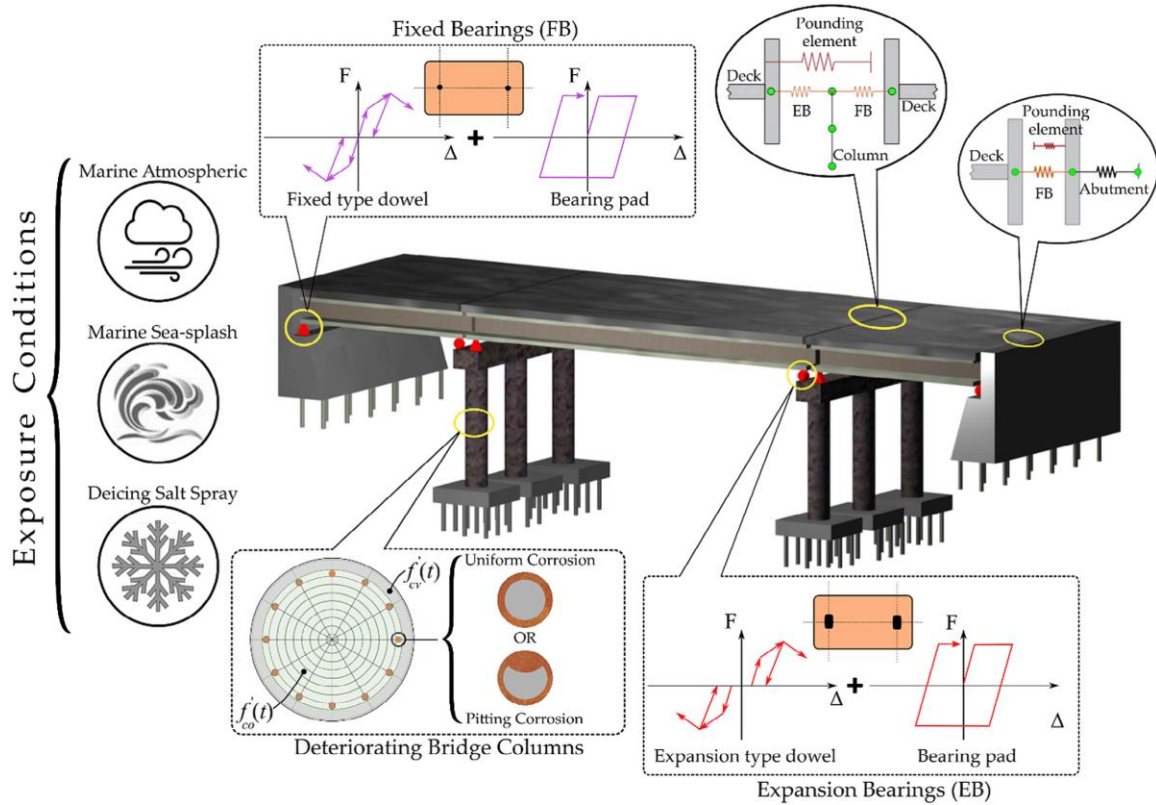


Σχήμα 4.1. Το μοντέλο των Shekhar, Ghosh & Padgett για εκτίμηση του κόστους του κύκλου ζωής γεφυρών αυτοκινητόδρομων συνεκτιμώντας τις παραμέτρους που το επηρεάζουν.

Στην ίδια μελέτη οι Shekhar, Ghosh & Padgett [5], επέλεξαν για την έρευνα τους μία γέφυρα τριών ανοιγμάτων, το κατ'αστρωμα της οποίας εδράζεται σε πέντε παράλληλες δοκούς για κάθε άνοιγμα. Η μεταφορά των φορτίων από την ανωδομή στην υποδομή, γίνεται μέσω ελαστομερών μεταλλικών βλήτρων τοποθετημένων εναλλάξ στη κορυφή των ακρόβαθρων. Μέσω του

λογισμικού OpenSees πραγματοποιήθηκε τρισδιάστατη ανάλυση του μοντέλου τόσο για την αρχική κατάσταση της γέφυρας όσο και για τη διαβρωμένη κατασκευή ύστερα από έκθεση σε διαβρωτικά περιβάλλοντα όπως η διάδοση χλωριόντων στον ατμοσφαιρικό αέρα, η διάβρωση λόγω επαφής με θαλασσινό νερό ή λόγω κύκλων ψύξης-απόψυξης λόγω παγετού. Η μελέτη επικεντρώνεται στα βάθρα της γέφυρας, ενώ εξετάζονται δύο μορφές διάβρωσης, η ομοιόμορφη και αυτή με βελονισμούς.

Για τη μη γραμμική ανάλυση της κατασκευής πριν τη διάβρωση λήφθηκε υπόψιν η οδηγία των Nielson & DesRoches (2007) κατά την οποία η πλαστικότητα εκτείνεται στο μήκος του μέλους.



Σχήμα 4.2. Παράδειγμα προσομοίωσης φορέα γέφυρας με εφέδρανα και επιρροή της διάβρωσης στα βάθρα

Τη λογική της απομειωμένης διατομής των ράβδων οπλισμού λόγω ομοιόμορφης διάβρωσης ακολουθούν και οι Enright & Frangopol (1998) [5], οι οποίοι πρότειναν τις εξής σχέσεις για τον υπολογισμό της απομειωμένης διατομής:

$$A_U(t) = \begin{cases} \frac{\pi d_i^2}{4}, & t \leq T_i \\ \frac{\pi \left[D_i - 2 \int_{T_i}^t r_{corr}(t_p) dt_p \right]^2}{4}, & T_i < t \leq D_i/2 \\ 0, & t > D_i/2 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} & \int_{T_i}^t r_{corr}(t_p) dt_p \\ & \int_{T_i}^t r_{corr}(t_p) dt_p \end{aligned}$$

Όπου:

D_i είναι η αρχική διάμετρος του σπλισμού πριν τη διάβρωση

T_i είναι ο χρόνος εκκίνησης της διάβρωσης βάσει των συνθηκών έκθεσης χλωριόντων

$r_{corr}(t_p)$ είναι ο ρυθμός διάβρωσης σε χρόνο t_p μετά την έναρξη της διάβρωσης

Για τον υπολογισμό της απομειωμένης διατομής σε περίπτωση διάβρωσης με βελονισμούς (pitting corrosion) οι Broomfield (2006) & Ghosh & Sood (2016) υιοθέτησαν τη παρακάτω σχέση:

$$A_p(t) = \left[1 - \frac{a(t)}{2D_i}\right] [A_U(t) - A_i] + A_{DP}(t)$$

Όπου:

A_i η μη διαβρωμένη περιοχή των σπλισμών

$a(t)$ το πλάτος του βελονισμού (pit)

$A_{DP}(t)$ η εναπομένουσα διατομή αφαιρώντας τη περιοχή των βελονισμών

Οι δύο τελευταίες παράμετροι υπολογίζονται ως εξής:

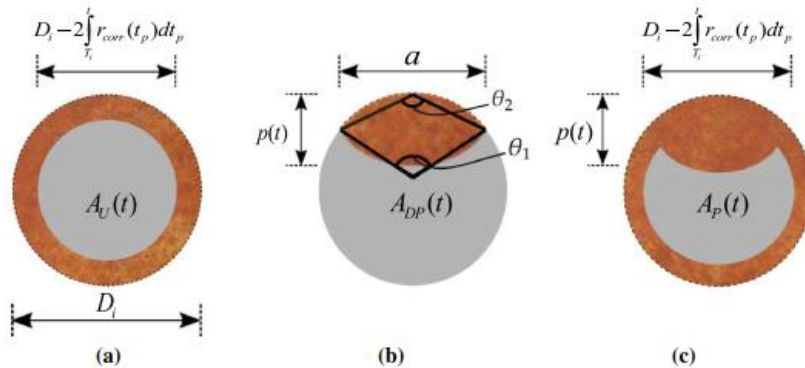
$$\alpha(t) = 2p(t) \sqrt{1 - \left(\frac{p(t)}{D_i}\right)^2}$$
$$A_{DP}(t) = \begin{cases} A_i - (A_1 - A_2), & p(t) \leq \frac{D_i}{\sqrt{2}} \\ A_1 - A_2, & D_i > p(t) \geq \frac{D_i}{\sqrt{2}} \end{cases}$$

Ενώ οι αναλυτικά τα παραπάνω μεγέθη υπολογίζονται ως εξής:

$$p(t) = R \int_{T_i}^T r_{corr}(t_p) dt_p$$
$$A_1 = 0.5 \left[\theta_1 (0.5D_i)^2 - a(t) \left| 0.5D_i - \frac{p(t)^2}{D_i} \right| \right]; \theta_1 = 2 \arcsin \left[\frac{a(t)}{D_i} \right]$$
$$A_2 = 0.5 \left[\theta_2 p(t)^2 - a(t) \frac{p(t)^2}{D_i} \right]; \theta_2 = 2 \arcsin \left[\frac{a(t)}{2p(t)} \right]$$

R είναι συντελεστής που αφορά τη διάβρωση με βελονισμούς και εκφράζει τον λόγο του μέγιστου βάθους της διάβρωσης με βελονισμούς προς το μέσο βάθος της ομοιόμορφης διάβρωσης.

Παρακάτω, παρουσιάζεται σχηματικά η απομείωση των διατομών χάλυβα ανάλογα με το τύπο της διάβρωσης, ομοιόμορφης ή με βελονισμούς.



Σχήμα 4.3. Απομείωση των διατομών χάλυβα με α) ομοιόμορφη διάβρωση και β), γ) διάβρωση με βελονισμούς.

Σύμφωνα με τους Choe et al ο υπολογισμός της μείωσης της διατομής των ράβδων σπλισμού υλοποιείται με την παρακάτω εξίσωση:

$$d_b(t|T_{corr}) = \begin{cases} d_{b0}, & t \leq T_{corr} \\ d_{b0} - \frac{1.0508 \left(1 - \frac{w}{c}\right)^{-1.64}}{d_c} (t - T_{corr})^{0.71}, & T_{corr} < t \leq T_f \\ 0, & t > T_f \end{cases}$$

Όπου:

d_{b0} είναι η διάμετρος των ράβδων σπλισμού τη χρονική στιγμή $t=0$

T_f είναι η χρονική στιγμή όταν θεωρητικά η τιμή $d_b(t|T_{corr})$ προσεγγίσει την τιμή 0 και υπολογίζεται από τη σχέση

$$T_f = T_{corr} + d_{bi} \left\{ \frac{d}{1.0508 \left(1 - \frac{w}{c}\right)^{-1.64}} \right\}^{\frac{1}{0.71}}$$

Πέρα όμως από τις επιπτώσεις της διάβρωσης στις ράβδους σπλισμού, πρέπει να συνυπολογιστεί η επιρροή της και στο σκυρόδεμα. Λόγω του αυξημένου όγκου του διαβρωμένου χάλυβα δημιουργούνται μικρές ρωγμές στην επικάλυψη του σπλισμού μειώνοντας έτσι τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Με το πέρασμα του χρόνου, τέτοιες ρωγμές μπορεί να ενωθούν οδηγώντας έτσι σε ενιαία ρηγμάτωση και τελικά σε θρυμματισμό του σκυροδέματος. Με βάση τους Coronelli και Gambarova (2004) [5] και τους Rao, Lerech, Kiremidjian και Sun (2017) [5] μπορεί να εκτιμηθεί η μείωση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος επικάλυψης ως:

$$f'_{cv}(t) = \frac{f'_{cv}(0)}{1 + \kappa \frac{\varepsilon^*(t)}{\varepsilon_{cv}}}$$

Όπου:

$f'_{cv}(0)$ είναι η αρχική θλιπτική αντοχή της επικάλυψης σκυροδέματος τη χρονική στιγμή $t=0$ έτη κ είναι μία παράμετρος που εξαρτάται από τη ράβδο οπλισμού και την τραχύτητα (λαμβάνει την τιμή 0.1 για μέτρια διαμέτρου ράβδο και τραχύτητα σύμφωνα με τους Vecchio και Collins (1986)

ε_{cv} είναι θλιπτική παραμόρφωση του σκυροδέματος που αναλογεί στην $f'_{cv}(0)$

$\varepsilon^*(t)$ είναι η μέση εφελκυστική παραμόρφωση στην εγκάρσια διεύθυνση που οδηγεί στο σχηματισμό των μικρορωγμών λόγω διάβρωσης και δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon^*(t) = \frac{n_{bars} w_{cr}(t)}{D_{col}}$$

n_{bars} είναι ο αριθμός των διαβρωμένων ράβδων στην διατομή του υποστυλωμάτων (βάθρων)

D_{col} είναι η αρχική διάμετρος του υποστυλώματος

$w_{cr}(t)$ είναι το συνολικό πάχος της ρωγμής που έχει σχηματιστεί σε χρόνο t για δεδομένο στάδιο διάβρωση που με βάση τους Molina, Alonso και Andrale (1993) [5] και τους Rao et al. (2017) [5] υπολογίζεται από:

$$w_{cr}(t) = 4\pi(v_{rs} - 1)d_{rs}(t)$$

$d_{rs}(t)$ είναι το βάθος της διάβρωσης ή η μείωση της ακτίνας των ράβδων οπλισμών και υπολογίζεται ξεχωριστά για ομοιόμορφη διάβρωση και για μεμονωμένες θέσεις τοπικής διάβρωσης

v_{rs} είναι η αναλογία της ογκομετρικής διόγκωσης των προϊόντων της διάβρωσης συγκριτικά με τον αρχικό όγκο του μη διαβρωμένου χάλυβα, συνήθως λαμβάνει την τιμή 2.

Εκτός από την απομείωση της αντοχής του σκυροδέματος στην επικάλυψη των οπλισμών, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως υπάρχει απομείωση της αντοχής και στο σκυρόδεμα που βρίσκεται στον πυρήνα της διατομής. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην αλλοίωση της διατομής του εγκάρσιου οπλισμού δηλαδή των συνδετήρων. Σύμφωνα με τους Mander, Priestley και Park (1988) [5] σε κυκλικά βάρη γεφυρών η μείωση της αντοχής του περισφιγμένου σκυροδέματος μπορεί να υπολογιστεί από:

$$f'_{c0}(t) = f'_c \left(2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f_i(t)}{f'_c}} - 2 \frac{f_i(t)}{f'_c} - 1.254 \right)$$

Όπου:

$f'_{c0}(t)$ είναι η εξαρτημένη από το χρόνο θλιπτική αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος

f'_c είναι η θλιπτική αντοχή του απερίσφικτου σκυροδέματος

$f_l(t)$ είναι η εξαρτημένη από το χρόνο ενεργή πλευρική περισφιγμένη τάση κατανεμημένη στην επιφάνεια του πυρήνα του σκυροδέματος. Στα περισσότερα μοντέλα τάσης παραμόρφωσης για περισφιγμένο σκυρόδεμα θεωρούν ότι αυτή η τάση είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη στην επιφάνεια του σκυροδέματος κάτι το οποίο είναι αποδεκτό στη θεώρηση ομοιόμορφης απομείωσης λόγω διάβρωσης.

Επιπρόσθετα των παραπάνω, μια ακόμη επίπτωση της διάβρωσης είναι η μεταβολές στις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα. Σύμφωνα με τους Du et al. (2005) [5] προτείνεται ένα γραμμικό μοντέλο μείωσης του ορίου διαρροής και του ορίου θραύσης του χάλυβα ως συνάρτηση της μάζας του χάλυβα που χάνεται λόγω διάβρωσης με βελονισμούς.

$$f_y(t) = f_y(0)[1 - 0.005\psi(t)]$$

$$f_u(t) = f_u(0)[1 - 0.005\psi(t)]$$

Όπου:

$f_y(t)$, $f_u(t)$ είναι τα όρια διαρροής και θραύσης αντίστοιχα των διαβρωμένων ράβδων αντίστοιχα σε χρόνο t

$f_y(0)$, $f_u(0)$ είναι τα αρχικά όρια διαρροής και θραύσης αντίστοιχα

$\psi(t)$ είναι το ποσοστό της μάζας του χάλυβα που χάνεται κατά τη διάβρωση

Επικεντρώνοντας το ενδιαφέρον στην ομοιόμορφη διάβρωση, θεωρείται πως η επιρροή της στις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική.

5. ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

Οι μελετητές προκειμένου να εκτιμήσουν τις απώλειες μιας κατασκευής που υπόκειται σε μια σεισμική διέγερση, εισάγουν την έννοια της σεισμικής τρωτότητας. Με σκοπό να γίνει καλύτερα κατανοητή η τρωτότητα των κατασκευών θα πρέπει πρώτα να οριστούν οι έννοιες όπως η αποτίμηση ενός φορέα, η σεισμική διακινδύνευση και η σεισμική επικινδυνότητα. Οι μηχανικοί, με τον όρο αποτίμηση (assessment), αποσκοπούν στην εκτίμηση του βαθμού της βλάβης μια κατασκευής που υπόκειται σε ένα δεδομένο σεισμικό φορτίο. Ο όρος σεισμική διακινδύνευση (seismic risk) συνδέεται με τον προσδοκώμενο βαθμό απωλειών, είτε άμεσων δηλαδή ανθρώπινες απώλειες, τραυματισμοί και βλάβες των κατασκευών, είτε έμμεσων δηλαδή οικονομικές, κοινωνικές και πολιτιστικές συνέπειες της περιοχής. Τέλος, η σεισμική επικινδυνότητα (seismic hazard) ορίζεται ως η πιθανότητα που λαμβάνει μία συγκεκριμένη παράμετρος της σεισμικής εδαφικής ταλάντωσης ώστε να υπερβεί μια δεδομένη τιμή σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα και αφορά μια θέση ή μια περιοχή μικρής ή μεγάλης έκτασης. Επιπλέον, για να ποσοτικοποιηθεί το μέτρο της σεισμικής επικινδυνότητας, μπορεί να οριστεί η τιμή της παραμέτρου της εδαφικής ταλάντωσης (εδαφική επιτάχυνση, ταχύτητα, μετακίνηση ή ακόμη και φασματικές τιμές αυτών) για την οποία υπάρχει μια προκαθορισμένη πιθανότητα υπέρβασης σε ορισμένη χρονική περίοδο. Γενικά, οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η σεισμική επικινδυνότητα μιας περιοχής είναι οι εξής:

- από την τοπική γεωλογία και τις τοπικές εδαφικές συνθήκες
- από την σεισμικότητα της στενής ή και της ευρύτερης γεωγραφικά περιοχής όπως και τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του κάθε σεισμογόνου χώρου και
- από το μέσο διάδοσης και την επικεντρική απόσταση

Έχοντας λοιπόν ορίσει τα παραπάνω, ως σεισμική τρωτότητα ονομάζεται ο αναμενόμενος βαθμός απωλειών ενός φορέα λόγω εμφάνισης σεισμικού φαινομένου. Η σεισμική τρωτότητα (vulnerability) [V] συνδέεται με την σεισμική επικινδυνότητα [H] και την σεισμική διακινδύνευση [R] με την παρακάτω σχέση:

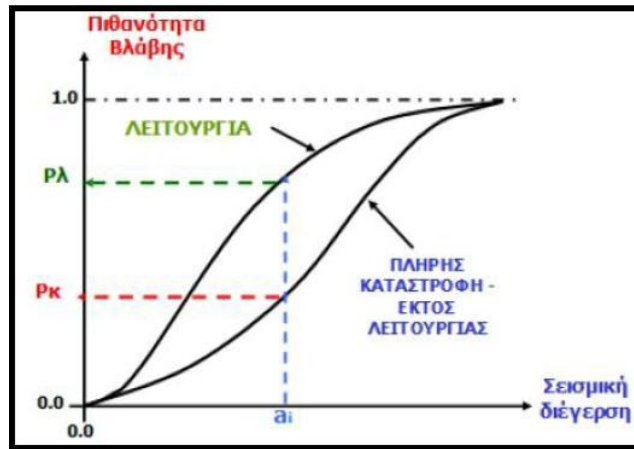
$$[R] = [H] \cdot [V]$$

Με βάση τα παραπάνω συμπεραίνεται πως για να επιτευχθεί μείωση της διακινδύνευσης μιας κατασκευής απαιτείται μείωση της τρωτότητας της. Πιο συγκεκριμένα, απαιτείται σωστός σχεδιασμός με βάση τους ισχύοντες κανονισμούς και κατάλληλη συντήρηση της μετά την ολοκλήρωση του έργου. Στις επόμενες παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται οι τρόποι με τους οποίους ελέγχεται η τρωτότητα των κατασκευών και η σημαντικότητα της επιρροής της διάβρωσης σε αυτήν.

5.1 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ

Χρήσιμα εργαλεία για την αποτίμηση της τρωτότητας μιας κατασκευής αποτελούν οι καμπύλες τρωτότητας. Πιο συγκεκριμένα, με την χρήση αυτών μπορεί να απεικονιστεί γραφικά η πιθανότητα υπέρβασης δομικών ή μη δομικών επίπεδων βλάβης για ένα συγκεκριμένο μέγεθος

σεισμικής διέγερσης. Με άλλα λόγια, με την τρωτότητα αντιπροσωπεύεται η σύνδεση μιας συγκεκριμένης παραμέτρου σεισμού με το επίπεδο της βλάβης που θα εμφανιστεί.



Σχήμα 5.1. Σχηματική απεικόνιση καμπυλών τρωτότητας.

Γενικά, η τρωτότητα των κατασκευών μπορεί να αποδοθεί με την παρακάτω σχέση:

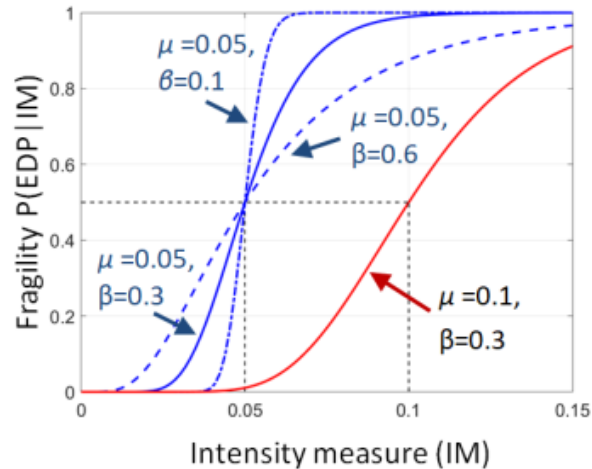
$$F_R(IM) = P(EDP > edp|IM)$$

Όπου EDP (Engineering Demand Parameter) είναι η Μηχανική Παράμετρος Σεισμικής Απαίτησης χαρακτηρίζουν την απόκριση του φορέα, ενώ IM (Intensity Measure) αφορά το μέτρο της έντασης που εξετάζεται. Οι EDPs συνήθως συνδέονται με την στοιχεία που δείχνουν την συμπεριφορά της κατασκευής όπως για παράδειγμα η τιμή στροφής των πλαστικών αρθρώσεων στα σημεία που εμφανίζονται ή για ένα κτίριο η μέγιστη μετακίνηση μεταξύ των ορόφων (Interstorey Drift Ratio, IDR). Και οι δύο αυτές παράμετροι σχετίζονται με τις στάθμες επιτελεστικότητας που προβλέπουν οι κανονισμοί. Αναφορικά με το μέτρο έντασης, προτιμότερες τιμές θεωρούνται οι μεγίστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) ή επίσης η φασματική επιτάχυνση στην τιμή της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου $S_a(T_1, 5\%)$.

Η πιθανότητα υπέρβασης μιας δεδομένης τιμής με βάση τις στάθμες επιτελεστικότητας (edp) μπορεί να εκφραστεί με την παρακάτω σχέση αν οι τιμές EDP είναι γνωστές για δεδομένο επίπεδο του μέτρου έντασης και με την θεώρηση ότι τα δεδομένα ακολουθούν λογαριθμοκανονική κατανομή.

$$P(EDP \leq edp|IM) = \Phi \left[\frac{\ln(EDP) - \mu_{\ln EDP}}{\sigma_{\ln EDP}} \right]$$

Όπου Φ είναι η τυπική αθροιστική συνάρτηση κατανομής, $\sigma_{\ln EDP}$ είναι η λογαριθμική τυπική απόκλιση των τιμών EDP και $\mu_{\ln EDP}$ είναι η μέση τιμή των λογαρίθμων των EDP. Για να γίνει καλύτερα κατανοητή η παραπάνω σχέση, στο σχήμα 5.2 που ακολουθεί παρουσιάζονται διάφορα παραδείγματα καμπυλών τρωτότητας με διαφορετικές τιμές της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης.



Σχήμα 5.2. Παράμετροι καμπυλών τρωτότητας $\mu = \mu_{InEDP}$ και $\beta = \sigma_{InEDP}$.

5.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ

Για τον εξαγωγή των καμπυλών τρωτότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές μέθοδοι υπολογισμού, καθεμία από τις οποίες προσφέρει διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ανάλογα με τις ανάγκες του μηχανικού. Οι βασικότερες από αυτές παρουσιάζονται παρακάτω.

5.2.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΛΩΡΙΔΩΝ

Αρχικά, για την εφαρμογή της μεθόδου η κατασκευή υποβάλλεται σε μια σειρά επιταχυνσιογραφημάτων που έχουν προκύψει προηγούμενες σεισμικές καταγραφές. Στη συνέχεια με τη μέθοδο των πολλαπλών λωρίδων εξάγονται οι καμπύλες τρωτότητας περιλαμβάνοντας την κορύφωση των διαφόρων σεισμικών διεγέρσεων που δρουν πάνω στην κατασκευή σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο έντασης. Λόγω αυτού δημιουργούνται κάποιες λωρίδες των παραμέτρων απαιτήσεων (EDP) οι οποίες επιτρέπουν τον εύκολο υπολογισμό της μέσης (50%) καμπύλης ικανότητας όπως και των ποσοστών 16% και 84% των καμπυλών ικανότητας σε όρους του μέτρου έντασης.

5.2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΝΕΦΟΥΣ

Μία άλλη μέθοδος υπολογισμού των καμπυλών τρωτότητας είναι η ανάλυση νέφους. Η χρήση της προτείνεται σε περιπτώσεις όπου τα δεδομένα δεν μπορούν να σχηματίσουν λωρίδες αλλά είναι διασκορπισμένα στο επίπεδο EDP-IM. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν οι κινήσεις του εδάφους διατηρούνται χωρίς κάποια κλιμάκωση ή όταν όλες οι κινήσεις κλιμακώνονται με τον ίδιο συντελεστή. Με γραμμική θεώρηση μπορεί να υπολογιστεί η μέση τιμή των λογαρίθμων και μια σταθερή τιμή για την διασπορά.

5.2.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ

Η μέθοδος της εκτίμησης της μέγιστης πιθανότητας μπορεί να εφαρμοστεί είτε τα δεδομένα σχηματίζουν λωρίδες είτε όταν σχηματίζουν κάποιο νέφος στο επίπεδο EDP-IM. Με τη χρήση της μπορεί να προσεγγιστεί η αθροιστική συνάρτηση κατανομής (CDF) μιας λογαριθμοκανονικής

κατανομής των δεδομένων EDP-IM με αποτέλεσμα ο υπολογισμός των καμπυλών τρωτότητας να μπορεί να εκφραστεί από την παρακάτω σχέση:

$$F_R = P(EDP \geq edp) = \Phi \left[\frac{\log(EDP/\theta_\alpha)}{\beta_\alpha} \right]$$

Όπου θ_α και β_α είναι η μέση τιμή και η διασπορά που καθορίζονται από την συνάρτηση της μέγιστης πιθανότητας.

5.2.4 ΜΕΘΟΔΟΣ SPO2IDA

Μία επίσης σημαντική μέθοδος ανάλυσης για τον υπολογισμό των καμπυλών τρωτότητας είναι μέσω του εργαλείου SPO2IDA (Static Pushover to Incremental Dynamic Analysis). Για να γίνει όμως πιο κατανοητή η χρήση της μεθόδου πρέπει πρώτα να οριστεί η Προσαυξητική Δυναμική Ανάλυση (IDA). Με την IDA, ο φορέας υποβάλλεται σε μια σειρά από χρονοϊστορίες σεισμού καθεμία από τις οποίες κλιμακώνεται σε πληθώρα επιπέδων έντασης. Στη συνέχεια, μετά από την επαύξηση της εδαφικής κίνησης, παράγονται οι καμπύλες ικανότητας σε όρους απαίτησης έναντι σεισμικής έντασης. Με τη μέθοδο SPO2IDA, οι Fragiadakis & Vamvatsikos πρότειναν ένα τρόπο εκτίμησης της μέσης καμπύλης ικανότητας που προκύπτει από την Προσαυξητική Δυναμική Ανάλυση χρησιμοποιώντας την καμπύλη από τη μη-γραμμική στατική ανάλυση. Με τον ίδιο τρόπο μπορούν να εκτιμηθούν οι καμπύλες ικανότητας που αντιστοιχούν στα ποσοστά 16% και 84% αντίστοιχα. Έτσι, με βάση τα παραπάνω μπορούν στη συνέχεια εύκολα να υπολογιστούν οι καμπύλες τρωτότητας. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την γρήγορη εκτίμηση των καμπυλών τρωτότητας με αποτέλεσμα να διευκολύνεται η σύγκριση τους σε φορείς που έχουν υποστεί διάβρωση χωρίς μεγάλο υπολογιστικό κόστος.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται η υλοποίηση της μη-γραμμικής στατικής ανάλυσης (pushover) και η εξαγωγή της καμπύλης. Στην συνέχεια, η καμπύλη αυτή τριγραμμικοποιείται προκειμένου να καθοριστεί το θεωρητικό σημείο διαρροής και θραύσης της κατασκευής. Αυτή η τριγραμμικοποίηση της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης (F-d) μετατρέπεται σε καμπύλη (F*-d*) ενός ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή (ESDOF) χρησιμοποιώντας τη μέθοδο N2. Η δύναμη F* και η μετατόπιση d* του ESDOF σχετίζονται με την τέμνουσα βάσης του συνολικού φορέα και τη μετατόπιση οροφής, στην περίπτωση που εξετάζεται κάποιο κτίριο, με την βοήθεια του συντελεστή συμμετοχής πρώτης ιδιομορφής Γ_1 . Αφού εξαχθεί η καμπύλη F*-d* του ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή, η διάμεσος και τα τμήματα που αντιστοιχούν στα ποσοστά 16% και 84% των καμπυλών IDA υπολογίζονται με τη χρήση της μεθόδου SPO2IDA. Οι καμπύλες αυτές προκύπτουν κανονικοποιημένες σε όρους R-μ. R είναι ο μειωτικός συντελεστής της αντοχής και προκύπτει από το λόγο $S_a(T1, 5\%) / S_a^{yield}(T1, 5\%)$, όπου $S_a^{yield}(T1, 5\%)$ είναι οι τιμές της πρώτης φασματικής επιτάχυνσης που προκαλεί την πρώτη διαρροή. Η πλαστιμότητα μ , εκφράζει τη μέγιστη δυνατή μετακίνηση του ESDOF κανονικοποιημένη με την μετακίνηση διαρροής.

Θεωρώντας τις απαραίτητες στάθμες επιτελεστικότητας και την αντίστοιχη μηχανική παράμετρο σεισμικής απαίτησης, οι καμπύλες τρωτότητας υπολογίζονται από τις καμπύλες IDA. Πιο αναλυτικά, από τις καμπύλες IDA υπολογίζεται για κάθε επίπεδο του μέτρου έντασης η μέση τιμή μ_{lnEDP} και η τυπική απόκλιση σ_{lnEDP} από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\mu_{lnEDP} = \ln(S_{a,f,50\%})$$

$$\sigma_{lnEDP} = \ln(S_{a,f,50\%}/S_{a,f,16\%})$$

Όπου $S_{a,f,x\%}$ είναι το $x\%$ τμήμα της έντασης που προκαλεί την υπέρβαση μιας στάθμης επιτελεστικότητας. Γνωρίζοντας τελικά την μέση τιμή και την τυπική απόκλιση εξάγονται οι καμπύλες τρωτότητας.

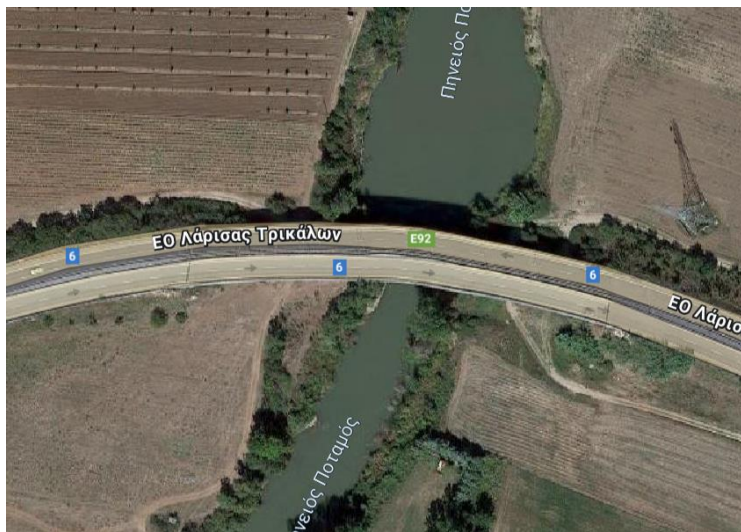
5.3 ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΔΙΑΒΡΩΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Η τρωτότητα μιας κατασκευής συνδέεται άμεσα με τα σεισμικά φαινόμενα και τα χαρακτηριστικά τους αλλά επιπλέον επηρεάζεται καθοριστικά από τη γήρανση των υλικών. Πιο συγκεκριμένα, η τρωτότητα εξαρτάται από το χρόνο. Παρόλα αυτά, στις συνήθεις μελέτες θεωρείται πως οι κατασκευές διατηρούνται αναλλοίωτες με το πέρασμα του χρόνου. Έτσι, αγνοούνται τα φαινόμενα φθοράς που μπορεί να έχουν υποστεί τα μέλη τους όπως επίσης και οι συνέπειες τους στην αντοχή τους. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να εξετάσει την επιρροή της διάβρωσης ξεκινώντας μικροσκοπικά από το επίπεδο του υλικού. Στη συνέχεια, αναλύοντας το επίπεδο της διατομής και προχωρώντας στο εκάστοτε μέλος του φορέα έως τελικά διερευνώντας μακροσκοπικά το σύνολο της κατασκευής. Το τελευταίο στάδιο επιτυγχάνεται εξάγοντας την καμπύλη *rushover* της κατασκευής και τις καμπύλες τρωτότητας. Με τη σύγκριση των καμπυλών μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για τη σημαντικότητα της διάβρωσης στους φορείς αλλά και τον τρόπο επιθεώρησης και αντιμετώπισης της.

6. ΜΟΡΦΩΣΗ ΓΕΦΥΡΑΣ

6.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής για τη διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης γέφυρας από οπλισμένο σκυρόδεμα σε έντονα διαβρωτικό περιβάλλον επιλέχθηκε γέφυρα στην περιοχή της Φαρκαδόνας, η οποία ενώνει το Κουτσόχερο με τη Πηνειάδα και η οποία αποτελείται από δύο στατικά ανεξάρτητους κλάδους μονής κατευθύνσεως, κατασκευασμένους σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Ο νεότερος κλάδος αποτελείται από μονόστυλα κυλινδρικά μεσόβαθρα μεγάλης διαμέτρου, ενώ ο παλαιότερος κλάδος απαρτίζεται από μεσόβαθρα αποτελούμενα το καθένα από τέσσερα κυλινδρικά βάθρα μικρότερης διαμέτρου σε ευθεία διάταξη. Το κατάστρωμα και στις δύο περιπτώσεις είναι από προεντεταμένες προκατασκευασμένες δοκούς και εδράζεται στα μεσόβαθρα. Στη παρούσα διπλωματική μελετάται ο παλαιότερος κλάδος με τα πολύστυλα μεσόβαθρα. Στη συγκεκριμένη γέφυρα, η έδραση του καταστρώματος στα μεσαία ανοίγματα αλλά και στα ακρόβαθρα γίνεται μέσω ελαστομεταλλικών εφεδράνων στη δοκό έδρασης.



Σχήμα 6.1. Αεροφωτογραφία της εξεταζόμενης γέφυρας.

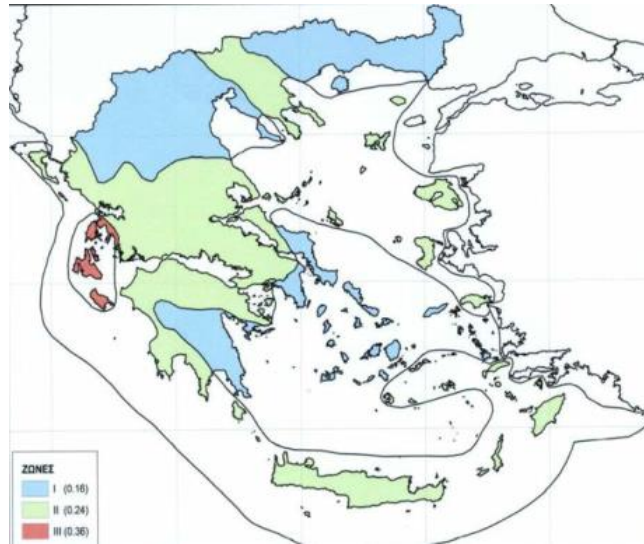


Σχήμα 6.2. Άποψη της γέφυρας μετά τις πλημμύρες του Σεπτεμβρίου 2023.

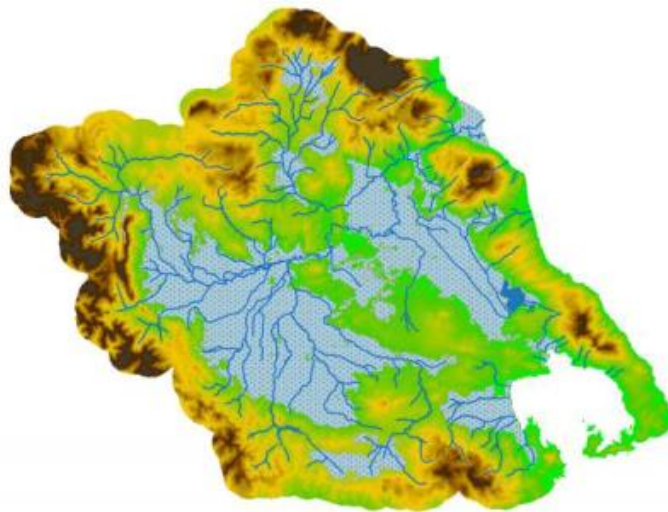


Σχήμα 6.3. Άποψη της γέφυρας και της γεωμετρίας του φορέα από διάφορες οπτικές.

Η περιοχή της Θεσσαλίας όπου βρίσκεται η γέφυρα ανήκει στη Ζώνη Σεισμικότητας II, ενώ ταυτόχρονα χαρακτηρίζεται και από μεγάλη επικινδυνότητα πλημμύρας όπως παρουσιάζεται στους παρακάτω χάρτες, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τις πλημμύρες του περασμένου Σεπτεμβρίου. Όπως εύκολα καταλαβαίνει κανείς, οι γέφυρες της περιοχής είναι εκτεθειμένες σε περιβάλλον πολλαπλής διακινδύνευσης και στην υπαρκτή πιθανότητα να συμβούν δύο φυσικές καταστροφές διαδοχικά σε μικρό χρονικό διάστημα.



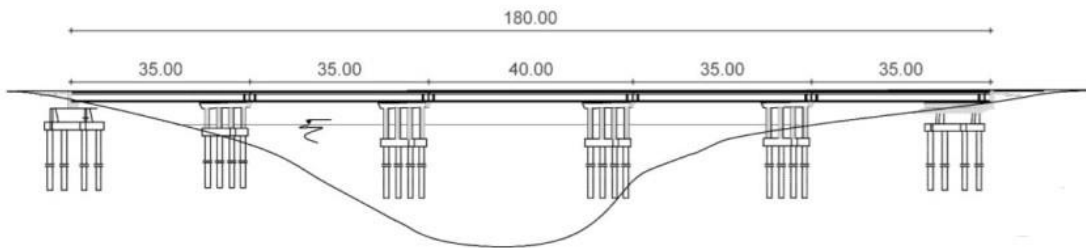
Σχήμα 6.4. Χάρτης Σεισμικής Επικινδυνότητας.



Σχήμα 6.5. Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας (ΖΥΚΠ) Θεσσαλίας.

6.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΦΟΡΕΑ

Η εξεταζόμενη γέφυρα έχει συνολικό μήκος 180 μέτρα και αποτελείται από πέντε ανοίγματα, τα τέσσερα εκ των οποίων είναι ίσα ανοίγματα μήκους 35 μέτρων ενώ το μεσαίο άνοιγμα είναι και το μεγαλύτερο με μήκος 40 μέτρα. Το κατάστρωμα της γέφυρας είναι κατασκευασμένο από προκατασκευασμένες προεντεταμένες δοκούς που εδράζονται απλά στα δύο ακρόβαθρα και στα τέσσερα πολύστυλα βάθρα.



Σχήμα 6.6. Διαμήκης τομή της γέφυρας.

6.2.1 ΒΑΘΡΑ

6.2.1.1 ΜΕΣΟΒΑΘΡΑ

Το κάθε μεσόβαθρο απαρτίζεται από τέσσερις πανομοιότυπους στύλους σταθερής διαμέτρου ίση με 0,90 μ. Λόγω ελλιπούς πληροφoρίας αναφορικά με τον τρόπο και τα υλικά κατασκευής, υιοθετήθηκαν δεδομένα από άλλη γέφυρα της γύρω περιοχής με παρόμοια γεωμετρία και στατικό σύστημα, η οποία κατασκευάστηκε το 1984 με σκοπό οι παραδοχές που έγιναν να είναι εύλογες και να προσεγγίζουν τη πραγματική εικόνα του φορέα. Συνοψίζοντας, τα βάθρα εξετάστηκαν λαμβάνοντας υπόψη ποιότητα σκυροδέματος C16/20, ποσοστό του διαμήκους οπλισμού ίσο με $\rho_l=0,2\%$ και επιλέχθηκαν 15Φ20, εγκάρσιο οπλισμό Φ10/200 και ποιότητα χάλυβα καθολικά S400.

Προκειμένου να συνυπολογιστεί η αντοχή της περισφιγμένης διατομής των βάθρων, υιοθετείται η μέθοδος των Mander et al. (1988) με βάση τους οποίους η θλιπτική αντοχή υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$f'_{cc} = f'_{co} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94f'_l}{f'_{co}}} - 2 \frac{f'_l}{f'_{co}} \right)$$

Όπου,

f'_{cc} είναι η θλιπτική αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος

f'_{co} είναι η θλιπτική αντοχή του απερίσφικτου σκυροδέματος

f'_l είναι η ενεργός πλευρική τάση περίσφιξης η οποία αναπτύσσεται από τον εγκάρσιο οπλισμό, θεωρείται ότι κατανέμεται ομοιόμορφα πάνω στην επιφάνεια του πυρήνα του σκυροδέματος και δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$f'_{l} = \frac{1}{2} k_e \rho_s f_{yh}$$

Όπου,

f_{yh} είναι η τάση διαρροή του εγκάρσιου οπλισμού συνδετήρες

k_e είναι ο συντελεστής αποτελεσματικότητας περίσφιξης ο οποίος για κυκλικά σπιδάλ ορίζεται ως:

$$k_e = \frac{1 - \frac{s'}{2d_s}}{1 - \rho_{cc}}$$

Όπου,

s' είναι η καθαρή απόσταση μεταξύ των σπιδάλ ή των συνδετήρων

d_s είναι η διάμετρος των σπιδάλ

ρ_{cc} είναι ο λόγος του εμβαδού των διαμήκων ράβδων προς το εμβαδόν του πυρήνα της διατομής

Οι Mander et al. (1988) πρότειναν τον λόγο του όγκου του εγκάρσιου οπλισμού περίσφιξης προς τον όγκο του περισφιγμένου πυρήνα της διατομής, ρ_s που δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_s = \frac{4A_{sp}}{d_s s}$$

Όπου,

A_{sp} είναι το εμβαδόν του εγκάρσιου οπλισμού

s είναι η απόσταση των σπιδάλ

Η παραμόρφωση στη θέση της μέγιστης θλιπτικής αντοχής f'_{cc} δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right]$$

Όπου,

ε_{co} είναι η παραμόρφωση που αναλογεί στην αντοχή του απερίσφικτου σκυροδέματος f'_{co} .

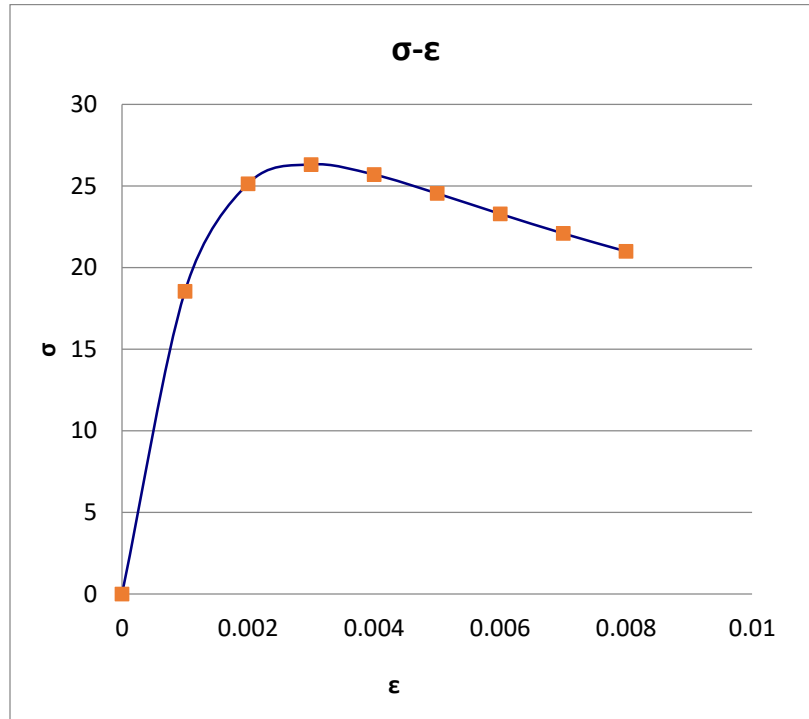
Τέλος, η παραμόρφωση θραύσης υπολογίζεται ως:

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4 \rho_s f_{yh} \varepsilon_{su}}{f'_{cc}}$$

Όπου,

ε_{su} είναι η παραμόρφωση αστοχίας του οπλισμού περίσφιξης

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης της περισφιγμένης διατομής των βάρων.



Σχήμα 6.7. Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης διατομής βάρων.

Πίνακας 6.1. Τιμές αντοχών και παραμορφώσεων βάρων.

| | | | |
|-----------------------|------------|------------------------|----------|
| D | 0.9 | k_e | 0.883 |
| c | 0.05 | f_l' | 0.347 |
| s | 0.2 | f_c | 16 |
| f_y | 400 | f_{co}' | 24 |
| e_{co} | 0.002 | f_{cc}' | 26.32 |
| Φ_w | 0.01 | ε_{cc} | 0.00297 |
| A_{sw} | 7.854E-05 | E_{sec} | 8866.6 |
| Φ_L | 0.02 | E_c | 24494.90 |
| A_{sl} | 0.00031416 | r | 1.57 |
| ρ_{cc} | 0.009375 | e_{cu} | 0.0082 |
| ρ_s | 0.0019635 | e_{su} | 0.1 |

6.2.1.2 ΑΚΡΟΒΑΘΡΑ

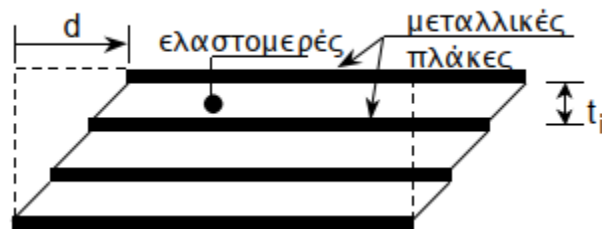
Ο φορέας του καταστρώματος στηρίζεται στα ακρόβαθρα μέσω αντίστοιχων ελαστομεταλλικών εφεδράνων με τα μεσόβαθρα. Η στήριξη αυτή επιτρέπει την ελεύθερη οριζόντια μετακίνηση της γέφυρας μέχρι ένα συγκεκριμένο σημείο που είναι το πλάτος του αρμού. Επιπλέον, η ύπαρξη του αρμού αποσκοπεί στην αποφυγή δημιουργίας εντατικών μεγεθών στα μέλη της γέφυρας λόγω είτε θερμοκρασιακών μεταβολών είτε συστολής ξήρανσης του σκυροδέματος.

6.2.2 ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑ

Το κατάστρωμα της γέφυρας θεωρήθηκε ότι αποτελείται από μία πλάκα καταστρώματος από σκυρόδεμα πάχους 0.30m η οποία μεταφέρει τα κατακόρυφα φορτία σε 4 υψίκορμες προεντεταμένες δοκούς σε κάθε άνοιγμα. Οι προεντεταμένες δοκοί συνδέονται με τα μεσόβαθρα μέσω 4 ελαστομεταλλικών εφεδράνων. Η έδραση υλοποιείται πάνω στις δοκούς έδρασης του φορέα. Λόγω έλλειψης των απαραίτητων πληροφοριών θεωρήθηκε ενιαία διατομή καταστρώματος με εμβαδόν $A=7.31\text{m}^2$. Η προένταση των δοκών αυτών δεν προσομοιώθηκε κατά την ανάλυση αφού δεν επηρεάζει την απόκριση της γέφυρα κατά τη δράση των σεισμικών φορτίων. Έτσι, θεωρήθηκε ελαστική συμπεριφορά του φορέα του καταστρώματος με το ενδιαφέρον να επικεντρώνεται στα βάθρα για την δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων.

6.2.3 ΕΦΕΔΡΑΝΑ

Όπως αναφέρθηκε οι προεντεταμένες δοκοί του καταστρώματος στηρίζονται μέσω εφεδράνων στις δοκούς έδρασης των βάθρων. Τα εφέδρανα που χρησιμοποιήθηκαν συγκαταλέγονται στα συνήθη ελαστομεταλλικά εφέδρανα, δηλαδή σε αυτά που έχουν χαμηλή απόσβεση (Low Damping Rubber Bearings – LDRB) κατά το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 1337-3:2005. Οι οριζόντιες διαστάσεις των εφεδράνων της γέφυρας επιλέχτηκαν 300x500 (mm). Αποτελούνται από 4 στρώσεις ελαστομερούς υλικού μεταξύ των οποίων παρεμβάλλονται μεταλλικές πλάκες και έχουν συνολικό πάχος $t_r=50\text{mm}$.



Σχήμα 6.8. Ελαστομεταλλικά εφέδρανα.

Το μέτρο διάτμησης του υλικού του ελαστομερούς θεωρείται ίσο με 1400kPa. Παρακάτω παρουσιάζονται οι σχέσεις για το υπολογισμό της δυστένειας της δυτμησίας και της δυσκακμψιάς των εφεδράνων.

$$\text{Δυστένεια: } K_V = \frac{E_c A}{t_r}$$

$$\text{Δυστμησία: } K_H = K_{eff} = \frac{G A}{t_r}$$

Δυσκαμψία: $K_b = \frac{E I_{eff}}{t_r} = 0.329 \frac{E_c I}{t_r}$

Πίνακας 6.2. Τιμές δυστένειας, δυτμησίας και δυσκαμψίας ελαστομεταλλικών εφεδράνων.

| | |
|---------------------|----------------|
| Kv(kN/m) | 2333130 |
| Kh(kN/m) | 4773 |
| Kbx(kNm/rad) | 12851 |
| Kby(kNm/rad) | 4626 |

6.2.4 ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ

Η θεμελίωση των βάθρων υλοποιείται με πασσάλους ίδιας διατομής με τα βάθρα (D=0.9m). Σε κάθε μεσόβαθρο υπάρχουν 4 πάσσαλοι (συνολικά 16) με βάθος έμπηξης 20m. Για τον υπολογισμό των δυσκαμψιών των ελατηρίων που εφαρμόζονται στους πασσάλους και προσομοιώνουν την αντίσταση του εδάφους, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Matlock για την χάραξη μη-γραμμικών καμπυλών p-γ. Θεωρήθηκε σταθερή οριζόντια δυσκαμψία k_{hor} των ελατηρίων και ίση με 5000kN/m. Τέλος, παρουσιάζεται πίνακας για την κατακόρυφη δυσκαμψία των ελατηρίων ανά 0.5m βάθος.

Πίνακας 6.3. Κατακόρυφη δυσκαμψία ελατηρίων k_z .

| z(m) | k_z (kN/m) |
|-------------|--------------------------------|
| 0.5 | 314.16 |
| 1 | 332.11 |
| 1.5 | 350.06 |
| 2 | 368.02 |
| 2.5 | 385.97 |
| 3 | 403.92 |
| 3.5 | 421.87 |
| 4 | 439.82 |
| 4.5 | 457.77 |
| 5 | 475.73 |
| 5.5 | 493.68 |
| 6 | 511.63 |
| 6.5 | 529.58 |
| 7 | 547.53 |
| 7.5 | 565.49 |
| 8 | 583.44 |
| 8.5 | 601.39 |
| 9 | 619.34 |
| 9.5 | 637.29 |
| 10 | 664.22 |

| | |
|------|----------|
| 10.5 | 682.17 |
| 11 | 700.13 |
| 11.5 | 718.08 |
| 12 | 736.03 |
| 12.5 | 753.98 |
| 13 | 771.9342 |
| 13.5 | 789.8862 |
| 14 | 807.8381 |
| 14.5 | 825.7901 |
| 15 | 843.742 |
| 15.5 | 861.694 |
| 16 | 879.6459 |
| 16.5 | 897.5979 |
| 17 | 915.5499 |
| 17.5 | 933.5018 |
| 18 | 951.4538 |
| 18.5 | 969.4057 |
| 19 | 987.3577 |
| 19.5 | 1005.31 |

6.3 ΦΟΡΤΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

6.3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1, η διαστασιολόγηση των κατασκευών επιτυγχάνεται με την επιβολή των απαραίτητων φορτίων σε αυτές. Ο κάθε φορέας θα πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να μπορεί να παραλάβει με ασφάλεια όλες τις απαιτούμενες δράσεις και τον συνδυασμό αυτών καθώς επίσης να πληροί και τις διάφορους ελέγχους κατά τη φάση λειτουργίας του. Οι δράσεις αυτές ανάλογα με την διακύμανση που έχουν στον χρόνο διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Μόνιμες Δράσεις (G): περιλαμβάνουν το ίδιο βάρος του φορέα, επιστρώσεις δαπέδων, τοιχοποιία κατασκευής
- Μεταβλητές Δράσεις (Q): περιλαμβάνουν τα επιβαλλόμενα φορτία στα δάπεδα του φορέα (κινητό φορτίο), φορτία ανέμων, φορτία χιονιού
- Τυχηματικές Δράσεις (A): περιλαμβάνουν φορτία σεισμού, εκρήξεις, πυρκαγιά

6.3.2 ΜΟΝΙΜΑ ΦΟΡΤΙΑ

Ως μόνιμο φορτίο της κατασκευής που μελετήθηκε λήφθηκε το ίδιο βάρος της, με μοναδικό υλικό το σκυρόδεμα και ειδικό βάρος σκυροδέματος τα 25 kN/m³.

6.3.3 ΚΙΝΗΤΑ ΦΟΡΤΙΑ

Τα κινητά φορτία αφορούν τα βάρη λόγω καθημερινής χρήσης της κατασκευής. Στη προκειμένη περίπτωση πρόκειται για γέφυρα και τα κινητά φορτία προκύπτουν από την κυκλοφορία οχημάτων σε αυτήν όπως προβλέπει ο Ευρωκώδικας. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1 και το Εθνικό Προσάρτημα, υπάρχουν τέσσερις υποπεριπτώσεις για τα κινητά φορτία στις γέφυρες (LM 1, LM2, LM3, LM4) που εξαρτώνται από το είδος των οχημάτων αλλά και από τον κυκλοφοριακό φόρτο. Στη παρούσα τα φορτία λήφθηκαν θεωρώντας κατηγορία LM1, στην οποία συμπεριλαμβάνονται τόσο συγκεντρωμένα όσο και ομοιόμορφα κατανεμημένα φορτία, τα οποία καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος των επιπτώσεων της κυκλοφορίας φορτηγών και αυτοκινήτων. Το συγκεκριμένο μοντέλο LM1 ενδείκνυται για γενικούς και τοπικούς ελέγχους και οι τιμές των φορτίων λαμβάνονται από τον πίνακα 4.2, ο οποίος φαίνεται παρακάτω.

Πίνακας 6.4. Χαρακτηριστικές τιμές φορτίων για το μοντέλο LM1.

| Location | Tandem system <i>TS</i> | <i>UDL</i> system |
|-----------------------------|--------------------------|--|
| | Axle loads Q_{ik} (kN) | $\boxed{AC1} q_{ik}$ (or q_{rk}) (kN/m ²) $\boxed{AC1}$ |
| Lane Number 1 | 300 | 9 |
| Lane Number 2 | 200 | 2,5 |
| Lane Number 3 | 100 | 2,5 |
| Other lanes | 0 | 2,5 |
| Remaining area (q_{rk}) | 0 | 2,5 |

Πιο συγκεκριμένα, λήφθηκαν υπόψιν μόνο ομοιόμορφα κατανεμημένα φορτία και όχι συγκεντρωμένα. Η γέφυρα προσομοιώθηκε με δύο λωρίδες κυκλοφορίας και μία λωρίδα έκτακτης ανάγκης (ΛΕΑ), ενώ το εναπομένον τμήμα πρόκειται για τα κράσπεδα εκατέρωθεν της γέφυρας. Συνεπώς, το συνολικό κινητό φορτίο της γέφυρας υπολογίστηκε βάσει του Πίνακα 2 ίσο με $9,00 + 3 \times 2,50 = 16,50$ kN/m². Προσεγγιστικά το συνολικό πλάτος του καταστρώματος λήφθηκε ίσο με 12,00 μ. και το φορτίο υπολογίζεται ως $16,50 \times 12,00 \times 180,00 = 35640$ kN.

6.3.4 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Ως συνδυασμός φόρτισης στη μελέτη λήφθηκε ο οιωνεί-μόνιμος συνδυασμός, δηλαδή:

$$E_d = \Sigma G_{k,j} + \Sigma \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Όπου βάσει του κανονισμού λήφθηκε $\psi_2 = 0,2$.

6.4 ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΦΟΡΕΑ

Με σκοπό τον καθορισμό της επιρροής της διάβρωσης στη γέφυρα, υιοθετήθηκε η παραδοχή ότι τα μέλη που πλήττονται από το φαινόμενο είναι τα βάθρα της γέφυρας και πραγματοποιήθηκε αναλυτική διερεύνηση σε αυτά καθώς είναι τα μέλη που καταπονούνται στο μεγαλύτερο βαθμό

από τα σεισμικά φορτία, ενώ στα υπόλοιπα μέλη η επιρροή θεωρήθηκε αμελητέα. Επιπλέον, ως κρίσιμη αιτία διάβρωσης θεωρήθηκε η διείδυση χλωριόντων ως μία από πιο σημαντικές μορφές εκτεταμένης φθοράς των υλικών του φορέα, λαμβάνοντας υπόψιν τις συνθήκες έκθεσης της κατασκευής. Σημειώνεται ότι πολλές κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος είναι εκτεθειμένες σε συνθήκες με εισροή χλωριόντων, κάτι που συμπεριλαμβάνεται και στον Ευρωκώδικα για τον σχεδιασμό των κατασκευών μέσω των κατηγοριών έκθεσης όπως οι XD1, XD2, XD3, XS1, XS2, XS3 (ΕΛΟΤ EN 206-1).

Υπάρχουν πολλά προσεγγιστικά μοντέλα για τη παραμετροποίηση της διάβρωσης, όπως αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 4. Στην παρούσα μελέτη θεωρήθηκε ομοιόμορφη διάβρωση γύρω από την περίμετρο των ράβδων οπλισμών και κατά μήκος των μελών από οπλισμένο σκυροδέμα. Επιπλέον, έγινε χρήση του μοντέλου DuraCrete για τον προσδιορισμό του χρόνου εκκίνησης T_{cor} της διάβρωσης (initiation time).

$$T_{cor} = \left\{ \frac{d_c^2}{4k_e k_t k_c D_0 (t_0)^n} \left[erf^{-1} \left(\frac{C_{cs} - C_{cr}}{C_{cs}} \right) \right]^{-2} \right\}^{\left(\frac{1}{1-n} \right)} \quad [6.1]$$

Όπου $erf(\theta) = \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \right) \int_0^\theta e^{-t^2} dt$ είναι η συνάρτηση σφάλματος, D_0 είναι ο εμπειρικός συντελεστής διάχυσης, k_e είναι συντελεστής περιβάλλοντος, το k_t εκφράζει την επιρροή των προσεγγιστικών μεθόδων στον υπολογισμό του D_0 , k_c είναι ο συντελεστής που σχετίζεται με την ξήρανση, t_0 είναι η αντίστοιχη περίοδος για το D_0 , n είναι ο παράγοντας γήρανσης και C_{cs} είναι η συγκέντρωση των χλωριόντων στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Για τη χρήση της παραπάνω σχέσης απαιτείται η γνώση της επικάλυψης του σκυροδέματος d_c .

Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω, το αποτέλεσμα της διάβρωσης στα μέλη της γέφυρας διερευνήθηκε μέσω των εξής τριών παραμέτρων : 1) την απομείωση της διαμέτρου των ράβδων οπλισμού, 2) τη μείωση της θλιπτικής αντοχής στην επικάλυψη και 3) τη μείωση της ολκιμότητας των οπλισμών μέσω της μείωσης της παραμόρφωσης θραύσης του χάλυβα.

6.4.1 ΑΠΟΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΟΛΚΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΟΠΛΙΣΜΩΝ

Η λογική της απομειωμένης διατομής των ράβδων οπλισμού λόγω διάβρωσης προσομοιώθηκε μέσω των Enright & Frangopol (1998), οι οποίοι πρότειναν τις εξής σχέσεις για τον υπολογισμό της απομειωμένης διατομής:

$$A(t) = \begin{cases} nD_i^2 \frac{\pi}{4}, & t \leq T_i \\ n[D(t)]^2 \frac{\pi}{4}, & T_i < t \leq T_i + D_i/r_{corr} \\ 0, & t \geq T_i + D_i/r_{corr} \end{cases} \quad [6.2]$$

Όπου n είναι το πλήθος των ράβδων οπλισμού, D_i είναι η αρχική διάμετρος του οπλισμού, r_{corr} ο βαθμός διάβρωσης, $D(t)$ η διάμετρος του οπλισμού σε χρόνο $t - T_i$ όπου δίνεται από την σχέση :

$$D(t) = D_i - r_{corr} \times (t - T_i) \quad [6.3]$$

Ο βαθμός διάβρωσης r_{corr} δίνεται από τη σχέση:

$$r_{corr} = 0,116i_{corr} \quad [6.4]$$

Εκφράζεται σε $mm/year$, ενώ το i_{corr} έχει ως μονάδα μέτρησης τα $\mu A/cm^2$ και είναι άμεσα συνυφασμένος από τη διαθεσιμότητα νερού και οξυγόνου στην επιφάνεια του οπλισμού. Αναφορικά με τον παράγοντα 0,116, πρόκειται για συντελεστή μετατροπής των $\mu A/cm^2$ σε $mm/year$ που σχετίζεται με το υλικό του χάλυβα.

Η απομείωση της πλαστιμότητας του χάλυβα λαμβάνεται υπόψιν μέσω της μείωσης της παραμόρφωσης θραύσης του χάλυβα. Η μείωση της παραμόρφωσης του χάλυβα ε_{su} , υπολογίστηκε κάνοντας χρήση των πειραματικών αποτελεσμάτων των Rodríguez & Andrade και αντιστοιχεί σε ένα εύρος από 30% έως 50%, ενώ ταυτόχρονα το ποσοστό απώλειας της διατομής του χάλυβα είναι 15-28%. Για τιμές μικρότερες του 15%, συμπεραίνεται γραμμική μείωση. Πιο αναλυτικά, εάν η απώλεια διατομής αντιστοιχεί σε 22,5%, το ποσοστό μείωσης της παραμόρφωσης ε_{su} λογίζεται ίσο με 40%, ενώ εάν παρατηρείται απώλεια διατομής 7,5% τότε, το ποσοστό μείωσης της παραμόρφωσης ε_{su} λογίζεται ίσο με 15%.

6.4.2 ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Στη παρούσα διπλωματική επιλέχθηκε το μοντέλο των Coronelli & Gambarova (2004) για τον υπολογισμό της μείωσης της θλιπτικής αντοχής στην επικάλυψη του σκυροδέματος, σύμφωνα με το οποίο:

$$f_c^* = \frac{f_{cv}'(0)}{1 + K \frac{\varepsilon^*(t)}{\varepsilon_{cv}}} \quad [6.5]$$

Όπου K είναι συντελεστής που σχετίζεται με τη διάμετρο των ράβδων οπλισμού και τη τραχύτητα και λογίζεται ίσος με 0,1 για μεσαίας διαμέτρου χαλύβδινες ράβδους με νευρώσεις, $\varepsilon^*(t)$ είναι η μέση εφελκυστική τάση στο ρηγματωμένο σκυρόδεμα και υπολογίζεται ως :

$$\varepsilon^*(t) = \frac{n_{bars} w_{cr}(t)}{D_{col}} \quad [6.6]$$

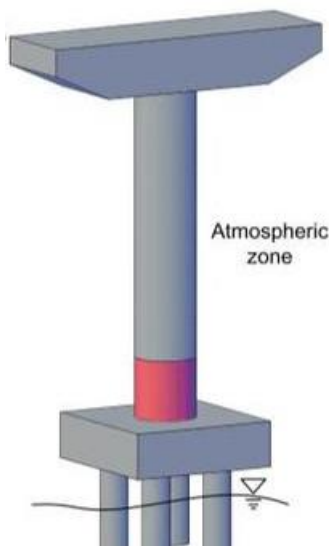
Όπου D_{col} είναι η διάμετρος των βάρων της γέφυρας, n_{bars} το πλήθος των ράβδων της διατομής και $w_{cr}(t)$ το εύρος της ρωγμής για δεδομένο επίπεδο διάβρωσης και υπολογίζεται ως:

$$w_{cr}(t) = 2\pi(v_{rs} - 1)d_c \quad [6.7]$$

Ως v_{rs} ορίζεται η ογκομετρική αναλογία των προϊόντων διάβρωσης σε σύγκριση με την αρχική διατομή και λογίζεται ίσος με 2 σύμφωνα με τη Simioni. Ως d_c ορίζεται το βάθος της βαλλόμενης από διάβρωση περιοχής που ισούται πρακτικά με την απομείωση της διαμέτρου του οπλισμού.

6.4.3 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Σε πρώτη φάση επιλέχθηκε η παραδοχή ότι η διάβρωση περιορίζεται στα βάρνα της γέφυρας, τα οποία και διερευνήθηκαν αριθμητικά. Θεωρήθηκε παραθαλάσσιο περιβάλλον, με τα βάρνα ωστόσο να είναι σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα και όχι σε άμεση επαφή με νερό (atmospheric zone).



Σχήμα 6.9. Συνθήκες έκθεσης των βάθρων στο θαλάσσιο περιβάλλον.

Εν συνεχεία, η θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα θεωρήθηκε 20 °C. Αναφορικά με το σκυρόδεμα, επιλέχθηκε τύπος τσιμέντου CEM I και λόγος νερού προς τσιμέντου $N/T=0,50$. Οι παραπάνω παραδοχές καθορίζουν τις παραμέτρους που εντοπίζονται στο μοντέλο διάβρωσης και σχετίζονται άμεσα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά της κατασκευής κατά την έναρξη της διάβρωσης. Παρακάτω, δίνονται πινακοποιημένα τα στατιστικά μεγέθη των παραμέτρων της διάβρωσης.

Πίνακας 6.5. Στατιστικά δεδομένα των παραμέτρων που επηρεάζουν τη διάβρωση λόγω χλωριόντων.

| <u>Παράμετρος</u> | <u>Μέση τιμή</u> | <u>Τυπική Απόκλιση (COV)</u> | <u>Κατανομή</u> |
|---------------------------|------------------|------------------------------|-------------------|
| k_e | 0.676 | 0.17 | Κατανομή Γάμμα |
| k_t | 1.25 | 0.28 | Κανονική Κατανομή |
| $D_{RCM,0}$ (m^2/sec) | 1.58E-11 | 0.2 | Κανονική Κατανομή |
| t_0 (years) | 0.0767 | - | Προσδιοριστική |
| n | 0.362 | 0.677 | Κατανομή Βήτα |
| C_{crit} (wt % cement) | 0.6 | 0.25 | Κατανομή Βήτα |
| C_S (wt % cement) | 1.2825 | 0.35 | Κανονική Κατανομή |

Με σκοπό την εξαγωγή ασφαλούς συμπεράσματος για την επιρροή της διάβρωσης λόγω χλωριόντων διαμέσου αποτίμησης της τρωτότητας της κατασκευής, είναι σημαντικό να προσδιοριστούν οι παράμετροι που επηρεάζουν άμεσα την εκκίνηση αλλά και την εξέλιξη του φαινομένου της διάβρωσης. Για αυτό το σκοπό, υπολογίστηκε ο χρόνος εκκίνησης T_{cor} μέσω της σχέσης 6.1, ενώ η απομειωμένη διατομή του οπλισμού και η απομειωμένη θλιπτική αντοχή στην

επικάλυψη του σκυροδέματος υπολογίστηκαν μέσω των σχέσεων 6.2 και 6.5 αντίστοιχα. Σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς η ελάχιστη επικάλυψη σκυροδέματος στα βάρθρα γεφυρών είναι τα 50 mm. Επιπλέον, διερευνήθηκε επικάλυψη 40 mm για ερευνητικούς σκοπούς, λαμβάνοντας έτσι υπόψιν τυχόν κατασκευαστικές ατέλειες και επικάλυψη 20 mm για περαιτέρω έρευνα αλλά και για να ληφθούν υπόψιν έργα υποδομών που έχουν κατασκευαστεί αρκετά παλαιότερα με απουσία επαρκών κανονισμών οι οποίοι προέβλεπαν μικρές επικαλύψεις. Οι τιμές των T_{corr} υπολογίστηκαν αντίστοιχα για τις παραπάνω επικαλύψεις ίσες με 64.55, 32.07 και 3.65 years.

Όπως αναφέρθηκε η διεργασία της διάβρωσης είναι αρκετά περίπλοκη στη προσομοίωση, έτσι για να μπορέσουν να εξαχθούν πιο ολοκληρωμένα και σφαιρικά συμπεράσματα, έγιναν δοκιμές στο μοντέλο για διάφορες τιμές του i_{corr} , δοκιμάζοντας δηλαδή διαφορετικά επίπεδα διάβρωσης. Επιλύσεις έγιναν για $i_{corr} = 0,1 \mu A/cm^2$, $i_{corr} = 1 \mu A/cm^2$, $i_{corr} = 2 \mu A/cm^2$ και $i_{corr} = 5 \mu A/cm^2$, δηλαδή για χαμηλή, για μέτρια, για σημαντική και για πολύ σημαντική επιρροή της διάβρωσης στο φορέα, σύμφωνα με τον Stewart (2004). Τέλος, με βάση τους ισχύοντες κανονισμούς η διάρκεια ζωής μια γέφυρας απαιτείται να είναι τα 100 χρόνια. Για το λόγο αυτό, εξετάστηκε η σεισμική συμπεριφορά της κατασκευής για χρονική διάρκεια $t=0, 75, 100, 125, 150$ χρόνια μετά την κατασκευή της με σκοπό να διερευνηθούν τα αποτελέσματα της διάβρωσης στη σεισμική τρωτότητα της.

6.5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΕΦΥΡΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ OPENSEESPY

Η ανάλυση της γέφυρας υλοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού OpenSeesPy. Το λογισμικό προσφέρει στους χρήστες μεγάλο εύρος επιλογών σε μοντελοποίηση, προσομοίωση και αναλύσεις καθώς έχει open source περιβάλλον. Ο κώδικας γράφεται σε γλώσσα προγραμματισμού Python, μία από τις πιο διαδεδομένες γλώσσες.

6.5.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΦΟΡΕΑ

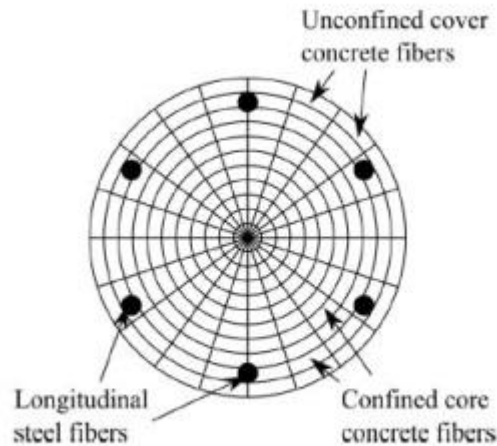
Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 6.4, κατά την ανάλυση θα εξεταστεί η επιρροή της διάβρωσης στα μέλη των μεσοβάθρων. Για το λόγο αυτό, δύναται να οριστούν κατάλληλα υλικά για την προσομοίωση της διατομής των βάρθρων με βάση τα οποία θα μπορεί να παραμετροποιηθεί η γήρανση τους. Πιο συγκεκριμένα για το σκυρόδεμα της επικάλυξης του οπλισμού των βάρθρων επιλέγεται το υλικό Concrete04 (Poronics) με βάση το οποίο εύκολα μπορούν να οριστούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του άοπλου σκυροδέματος. Για το περισφιγμένο σκυρόδεμα του πυρήνα της διατομής χρησιμοποιείται το υλικό Concrete01 ενώ για τις ράβδους οπλισμού χρησιμοποιήθηκε το υλικό ReinforcingSteel.

Αναφορικά με τα υπόλοιπα μέλη της γέφυρας, θεωρούνται ότι θα συμπεριφερθούν ελαστικά και έτσι ορίζονται με ελαστική διατομή. Τέλος, δεν προσομοιώνεται η προένταση των δοκών του καταστρώματος καθώς δεν επηρεάζει την απόκριση της γέφυρα κατά τη δράση των σεισμικών φορτίων.

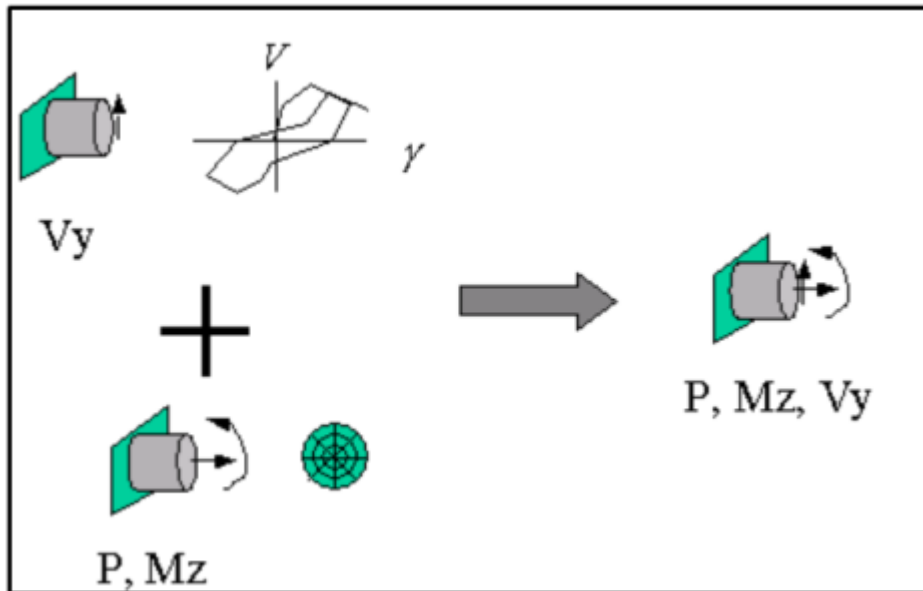
6.5.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕΛΩΝ ΦΟΡΕΑ

Για την ανάλυση της γέφυρας, δίνεται έμφαση στη μοντελοποίηση των μεσοβάθρων καθώς σε αυτά αναμένεται η δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων. Πιο συγκεκριμένα, αναμένεται

εμφάνιση πλαστικών αρθρώσεων στις κορυφές και στις βάσεις των βάρων ανάλογα και τη διεύθυνση του σεισμού. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται fibers στη διατομή των βάρων για να προσεγγιστεί η συμπεριφορά της κατασκευής. Τα μεσόβαθρα προσομοιώθηκαν με τη χρήση του Force Based Beam Column Element (κατανεμημένη πλαστικότητα) και στις πιθανές θέσεις σχηματισμών πλαστικών αρθρώσεων χρησιμοποιήθηκε Beam Integration «HingeRadau» με το οποίο ορίζονται 2 σημεία ολοκλήρωσης, ένα στο τέλος του στοιχείου και ένα στα 8/3 του μήκους της πλαστικής άρθρωσης. Αναφορικά με τη διατομή των βάρων, ορίστηκε ελαστική συμπεριφορά για την αξονική καταπόνηση τους και πλάστικη συμπεριφορά για καταπόνηση σε κάμψη. Αυτό γίνεται εφικτό μέσω του section Aggregator.



Σχήμα 6.10. Προσομοίωση διατομής μεσοβάρων με Fiber Section.



Σχήμα 6.11. Παράδειγμα χρήσης της εντολής Section Aggregator.

7. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, παρακάτω παρουσιάζονται με λεπτομέρεια οι αναλύσεις που σημειώθηκαν στο φορέα της γέφυρας και τα αντίστοιχα αποτελέσματα τους.

7.1 ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

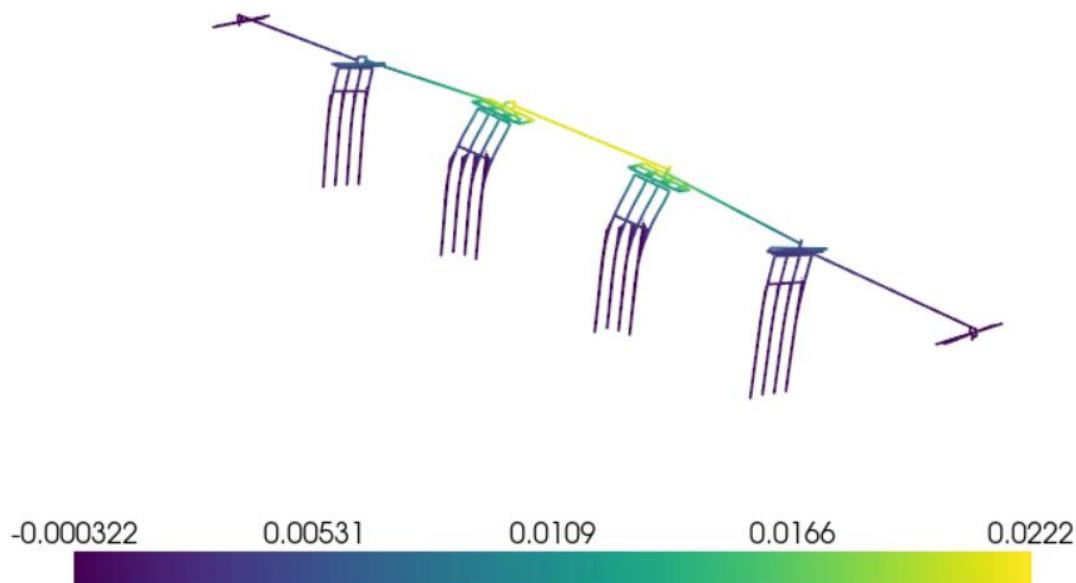
Η ιδιομορφική (modal) ανάλυση της γέφυρας πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψιν την μάζα λόγω κατακόρυφων φορτίων $G+0,2Q$ όπως ορίζουν οι κανονισμοί. Κατά την επίλυση του φορέα ορίστηκαν τόσες ιδιομορφές έτσι ώστε το άθροισμα των δρυσών ιδιομορφικών μαζών να συμπληρώνει το 90% της συνολική ταλαντευόμενης μάζας του συστήματος.

Για να επιτευχθεί το επιθυμητό ποσοστό μάζας και στις δύο διευθύνσεις χρειάστηκαν 6 ιδιομορφές.

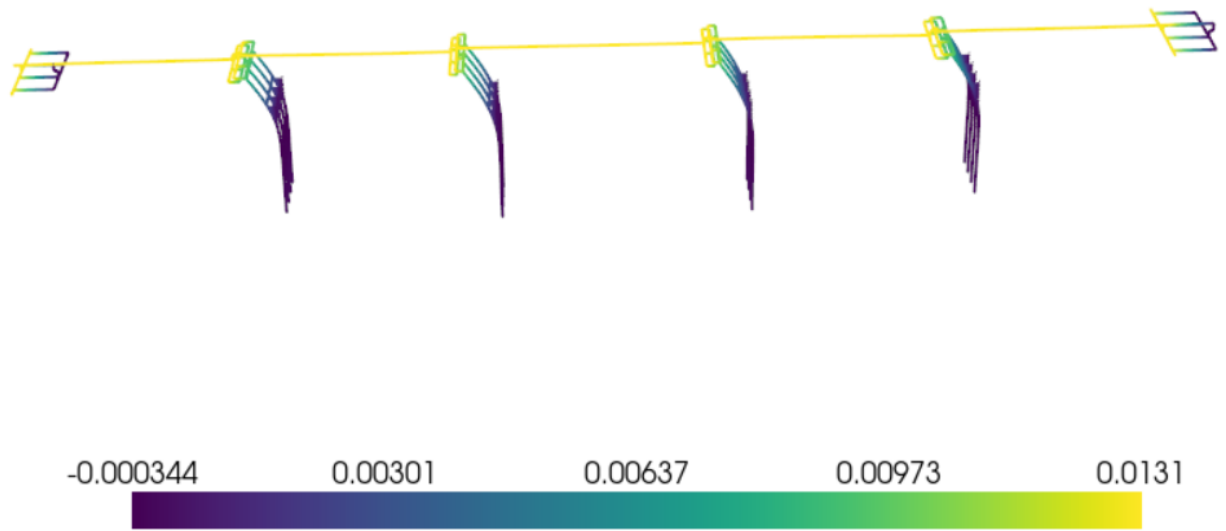
Πίνακας 7.1. Κυρίαρχες Ιδιομορφές

| Ιδιομορφή | Ιδιοπερίοδος | Ιδιομορφική Μάζα |
|-----------------------------|--------------|------------------|
| 1 ^η Μεταφορική Y | 2.02 sec | 64.1 % |
| 2 ^η Μεταφορική X | 1,89 sec | 98.4 % |
| 3 ^η Στροφική | 1,67 sec | 42 % |

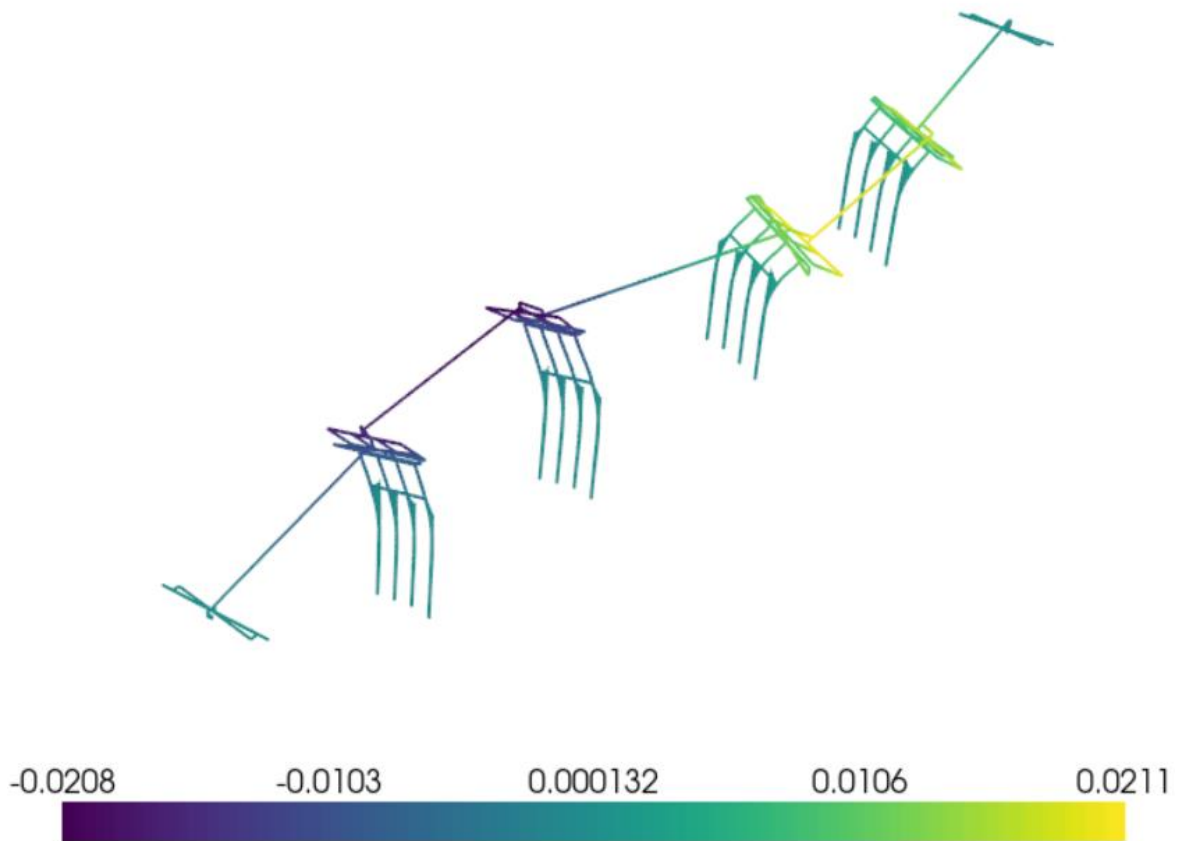
Με βάση τα αποτελέσματα προκύπτουν οι δύο πρώτες κυρίαρχες ιδιομορφές να είναι μεταφορικές κατά Y και X αντίστοιχα ενώ η τρίτη στροφική. Επιπλέον, παρατηρούνται υψηλές τιμές των ιδιοπεριοδών του φορέα οι οποίες τον καθιστούν εύκαμπτο.



Σχήμα 7.1. 1^η (κυρίαρχη) Ιδιομορφή, μεταφορική κατά Y



Σχήμα 7.2. 2^η (κυρίαρχη) Ιδιομορφή , μεταφορική κατά Χ



Σχήμα 7.3. 3^η (κυρίαρχη) Ιδιομορφή , στροφική

Πίνακας 7.2. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ιδιομορφικής ανάλυσης

MODAL ANALYSIS REPORT

* 1. DOMAIN SIZE:

This is the size of the problem: 1 for 1D problems, 2 for 2D problems, 3 for 3D problems.
3

* 2. EIGENVALUE ANALYSIS:

| # | MODE | LAMBDA | OMEGA | FREQUENCY | PERIOD |
|---|-------|---------|---------|-----------|---------|
| # | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |
| | 1 | 9.70019 | 3.11451 | 0.49569 | 2.01739 |
| | 2 | 11.0721 | 3.32747 | 0.529583 | 1.88828 |
| | 3 | 14.1003 | 3.75503 | 0.597632 | 1.67327 |
| | 4 | 19.6893 | 4.43726 | 0.706212 | 1.416 |
| | 5 | 27.2458 | 5.21975 | 0.830749 | 1.20373 |
| | 6 | 34.3915 | 5.86443 | 0.933352 | 1.07141 |

* 3. TOTAL MASS OF THE STRUCTURE:

The total masses (translational and rotational) of the structure
including the masses at fixed DOFs (if any).

| # | MX | MY | MZ | RMX | RMY | RMZ |
|---|---------|---------|---------|--------|-------------|-------------|
| # | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |
| | 6082.66 | 6082.66 | 6082.66 | 6450.3 | 1.64893e+07 | 1.64887e+07 |

* 4. TOTAL FREE MASS OF THE STRUCTURE:

The total masses (translational and rotational) of the structure
including only the masses at free DOFs.

| # | MX | MY | MZ | RMX | RMY | RMZ |
|---|---------|---------|---------|--------|-------------|-------------|
| # | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |
| | 6082.66 | 6082.66 | 6082.66 | 6450.3 | 1.64893e+07 | 1.64887e+07 |

* 5. CENTER OF MASS:

The center of mass of the structure, calculated from free masses.

| # | X | Y | Z |
|---|---------|--------------|---------|
| # | ----- | ----- | ----- |
| | 90.1032 | -6.35251e-07 | 1.36378 |

* 6. MODAL PARTICIPATION FACTORS:

The participation factor for a certain mode 'a' in a certain direction 'i'
indicates how strongly displacement along (or rotation about)
the global axes is represented in the eigenvector of that mode.

| # | MODE | MX | MY | MZ | RMX | RMY | RMZ |
|---|-------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| # | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |
| | 1 | 1.73017e-05 | 1.3863 | -0.000281555 | -0.13864 | -0.00492712 | -0.0952655 |
| | 2 | 1.01267 | -8.30266e-06 | -0.000116615 | 8.3836e-07 | 0.356141 | -0.000105098 |
| | 3 | 5.32712e-06 | -0.00246332 | 0.000253737 | 0.000243983 | 0.004434 | 55.4192 |
| | 4 | -6.93786e-07 | -0.766757 | -9.2397e-05 | 0.0981573 | -0.00149042 | 0.00686445 |
| | 5 | 7.34164e-07 | 0.0263117 | 0.000717734 | -0.00367581 | 0.00931857 | -58.3983 |
| | 6 | 1.13184e-08 | 0.499328 | 0.00029824 | -0.0686193 | 0.00241391 | 2.65059 |

* 7. MODAL PARTICIPATION MASSES:

The modal participation masses for each mode.

| # | MODE | MX | MY | MZ | RMX | RMY | RMZ |
|---|------|---------|-----------|-------------|-------------|------------|-------------|
| 1 | | 0 | 3900.03 | 0.000160872 | 39.006 | 0.0492651 | 18.4172 |
| 2 | | 5988.29 | 0 | 7.94108e-05 | 0 | 740.65 | 6.44997e-05 |
| 3 | | 0 | 0.0136835 | 0.000145186 | 0.000134237 | 0.0443351 | 6.92591e+06 |
| 4 | | 0 | 1145.18 | 1.66292e-05 | 18.7673 | 0.00432688 | 0.0917842 |
| 5 | | 0 | 0.776267 | 0.000577617 | 0.0151502 | 0.0973669 | 3.82397e+06 |
| 6 | | 0 | 304.144 | 0.000108503 | 5.74381 | 0.00710807 | 8570.24 |

* 8. MODAL PARTICIPATION MASSES (cumulative):

The cumulative modal participation masses for each mode.

| # | MODE | MX | MY | MZ | RMX | RMY | RMZ |
|---|------|---------|---------|-------------|---------|-----------|-------------|
| 1 | | 0 | 3900.03 | 0.000160872 | 39.006 | 0.0492651 | 18.4172 |
| 2 | | 5988.29 | 3900.03 | 0.000240282 | 39.006 | 740.699 | 18.4173 |
| 3 | | 5988.29 | 3900.05 | 0.000385469 | 39.0061 | 740.743 | 6.92593e+06 |
| 4 | | 5988.29 | 5045.22 | 0.000402098 | 57.7734 | 740.748 | 6.92593e+06 |
| 5 | | 5988.29 | 5046 | 0.000979714 | 57.7886 | 740.845 | 1.07499e+07 |
| 6 | | 5988.29 | 5350.14 | 0.00108822 | 63.5324 | 740.852 | 1.07585e+07 |

* 9. MODAL PARTICIPATION MASS RATIOS (%):

The modal participation mass ratios (%) for each mode.

| # | MODE | MX | MY | MZ | RMX | RMY | RMZ |
|---|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | | 9.98706e-09 | 64.1172 | 2.64476e-06 | 0.604716 | 2.98771e-07 | 0.000111696 |
| 2 | | 98.4485 | 6.61775e-09 | 1.30553e-06 | 0 | 0.00449171 | 3.91175e-10 |
| 3 | | 1.05208e-09 | 0.000224959 | 2.38689e-06 | 2.08111e-06 | 2.68872e-07 | 42.004 |
| 4 | | 0 | 18.8269 | 2.73388e-07 | 0.290952 | 2.62406e-08 | 5.56649e-07 |
| 5 | | 0 | 0.012762 | 9.49611e-06 | 0.000234876 | 5.90487e-07 | 23.1914 |
| 6 | | 0 | 5.00018 | 1.7838e-06 | 0.0890472 | 4.31072e-08 | 0.0519765 |

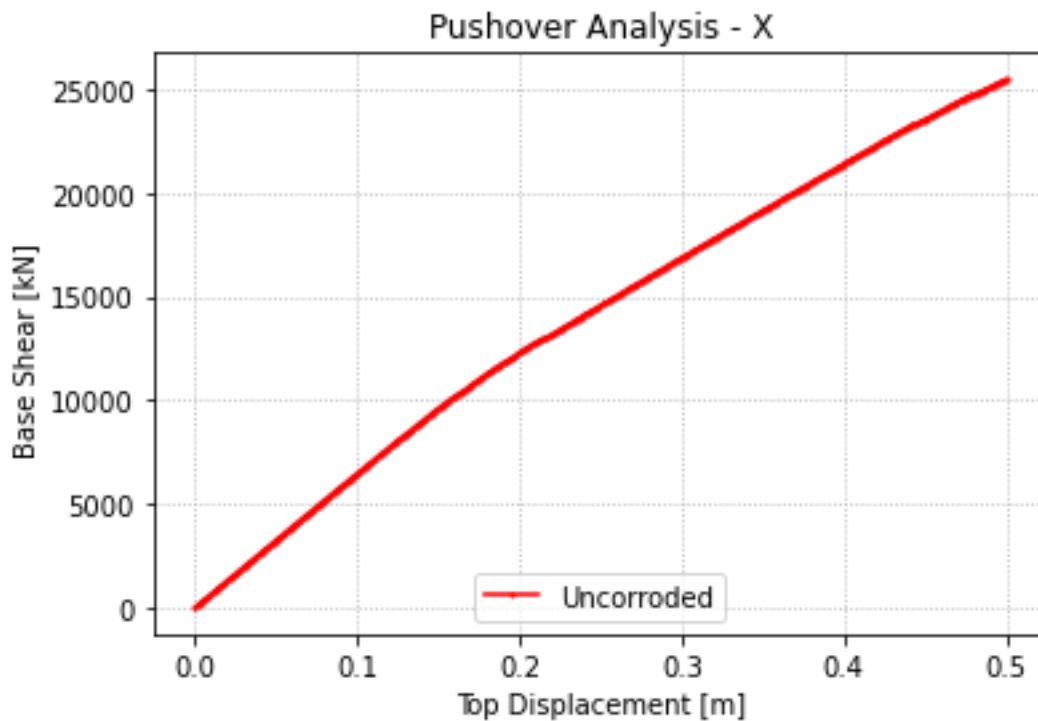
* 10. MODAL PARTICIPATION MASS RATIOS (%) (cumulative):

The cumulative modal participation mass ratios (%) for each mode.

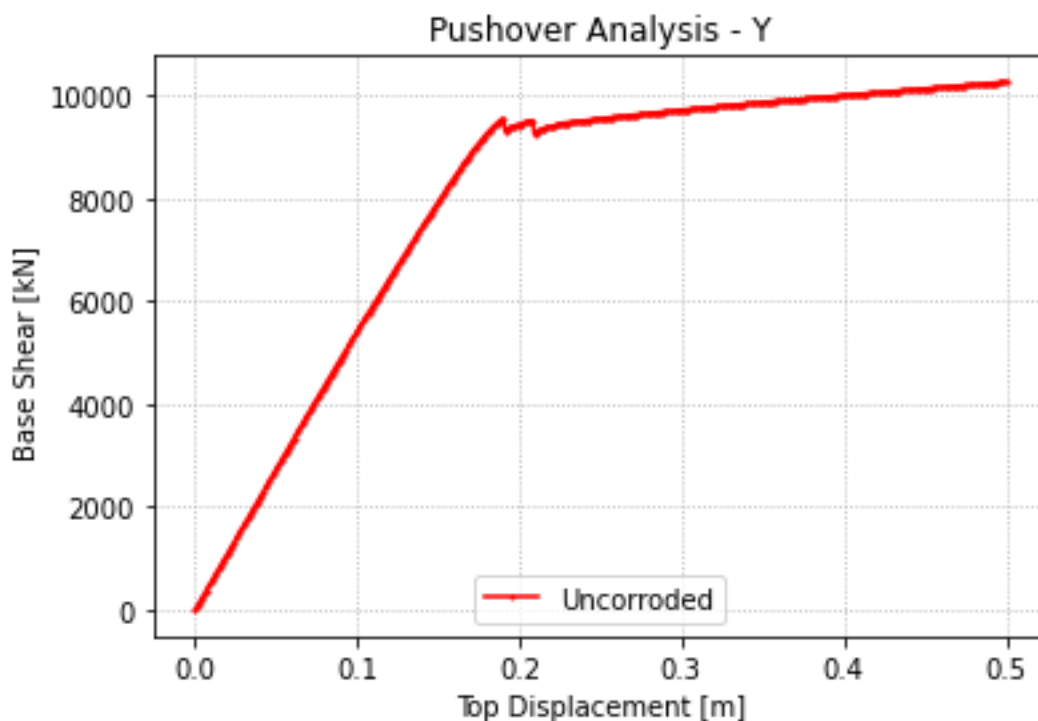
| # | MODE | MX | MY | MZ | RMX | RMY | RMZ |
|---|------|-------------|---------|-------------|----------|-------------|-------------|
| 1 | | 9.98706e-09 | 64.1172 | 2.64476e-06 | 0.604716 | 2.98771e-07 | 0.000111696 |
| 2 | | 98.4485 | 64.1172 | 3.95028e-06 | 0.604716 | 0.00449201 | 0.000111696 |
| 3 | | 98.4485 | 64.1174 | 6.33717e-06 | 0.604718 | 0.00449228 | 42.0041 |
| 4 | | 98.4485 | 82.9443 | 6.61056e-06 | 0.895671 | 0.0044923 | 42.0041 |
| 5 | | 98.4485 | 82.9571 | 1.61067e-05 | 0.895906 | 0.00449289 | 65.1956 |
| 6 | | 98.4485 | 87.9573 | 1.78905e-05 | 0.984953 | 0.00449294 | 65.2476 |

7.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΗ-ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ – PUSHOVER

Αρχικά, στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι καμπύλες ικανότητας του φορέα της γέφυρας στην διαμήκη και την εγκάρσια διεύθυνση όπως προέκυψαν από τη μη γραμμική στατική ανάλυση (pushover).



Σχήμα 7.4. Καμπύλη ικανότητας γέφυρας κατά τη διαμήκη διεύθυνση



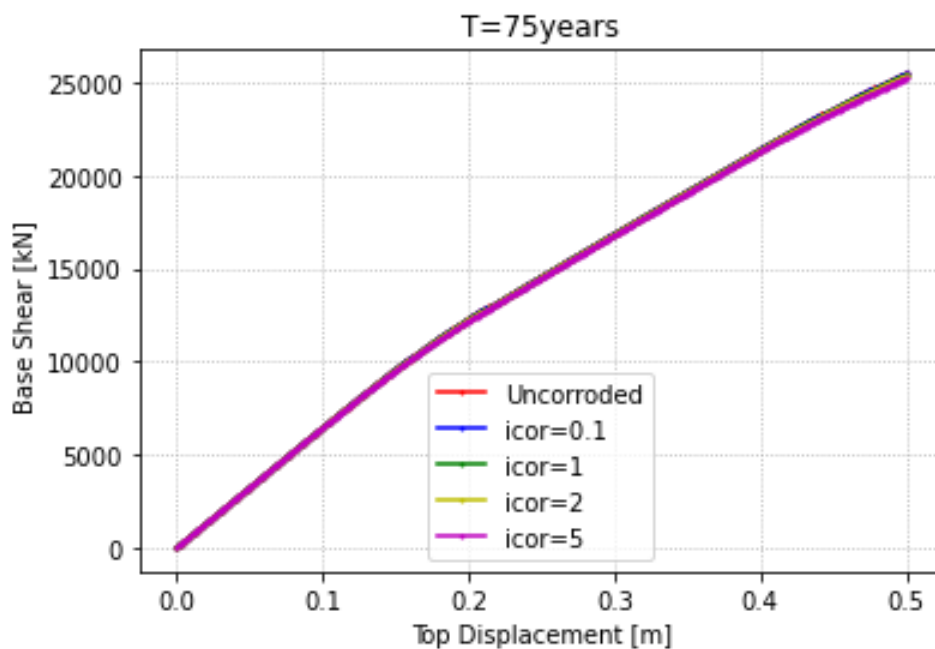
Σχήμα 7.5. Καμπύλη ικανότητας γέφυρας κατά την εγκάρσια διεύθυνση

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 6.4, υλοποιήθηκαν στη συνέχεια κάποιες παραμετρικές μελέτες για να διερευνηθεί η επιρροή της διάβρωσης στη γέφυρα αναλύοντας αρχικά τα

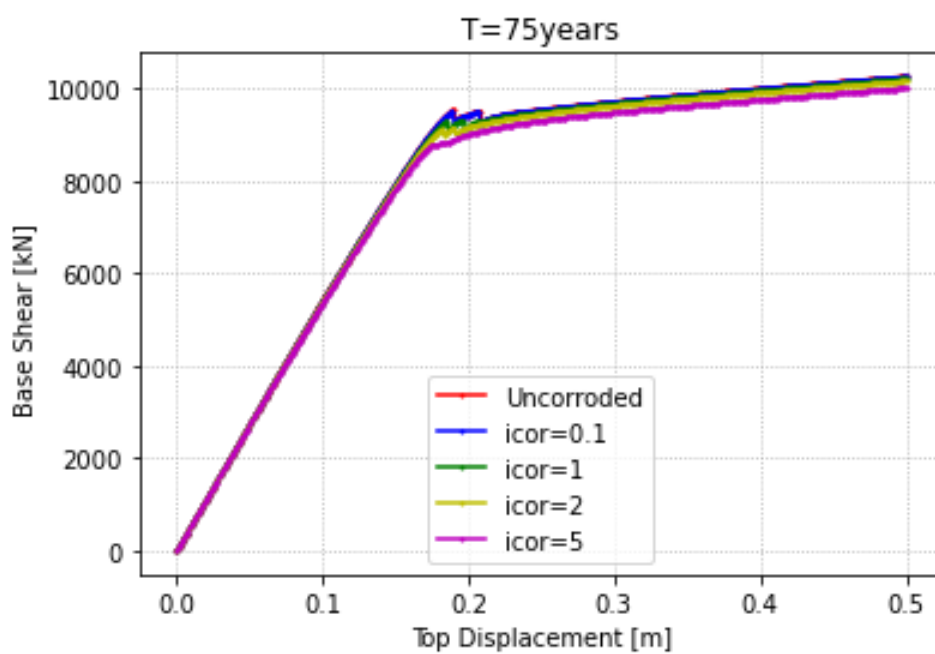
αποτελέσματα που προκύπτουν από την εξαγωγή των καμπυλών ικανότητας. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για $i_{corr} = 0.1 \mu A/cm^2$, $i_{corr} = 1 \mu A/cm^2$, $i_{corr} = 2 \mu A/cm^2$ και $i_{corr} = 5 \mu A/cm^2$, για χρονική διάρκεια $t=0, 75, 100, 125, 150$ χρόνια μετά την κατασκευή και επικάλυψη σκυροδέματος $c=50mm$, $c=40mm$ και $c=20mm$.

7.2.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΓΙΑ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ $c=50mm$

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η καμπύλη ικανότητας του φορέα της γέφυρας για επικάλυψη σκυροδέματος $c=50mm$ και για τις διάφορες τιμές του συντελεστή διάβρωσης i_{corr} παράλληλα με την χρονική διάρκεια T_{years} .

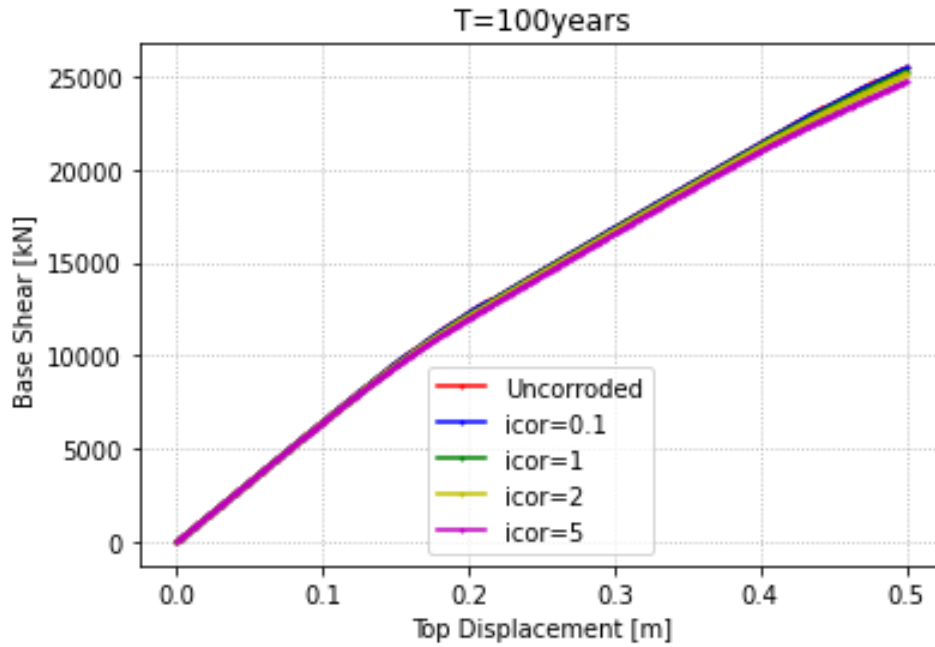


(α)

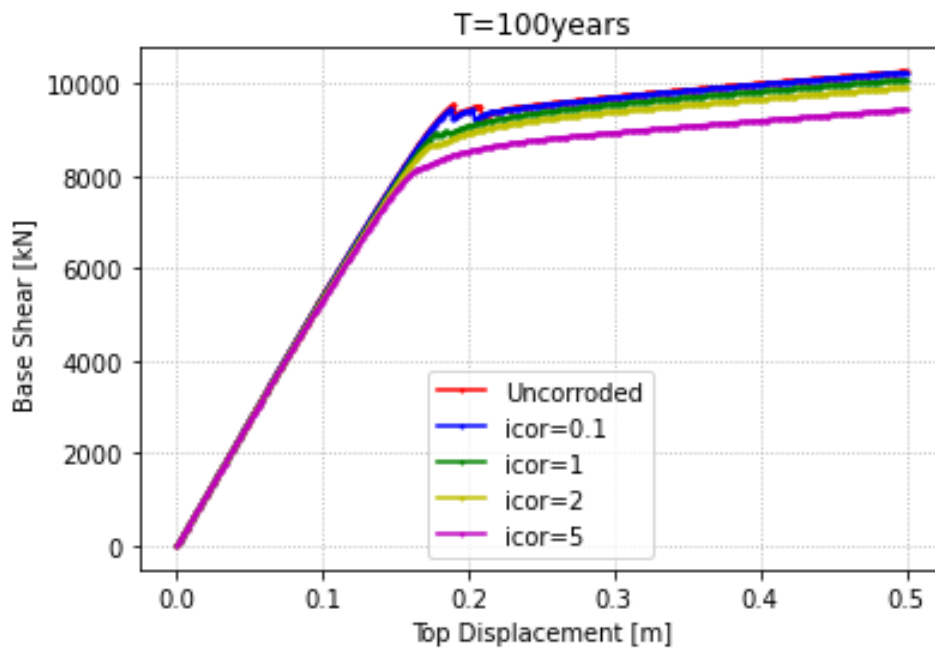


(β)

Σχήμα 7.6. Καμπύλη ικανότητας γέφυρας με $c=50\text{mm}$ και $T=75\text{years}$ (α) στην διαμήκη διεύθυνση και (β) στην εγκάρσια διεύθυνση.

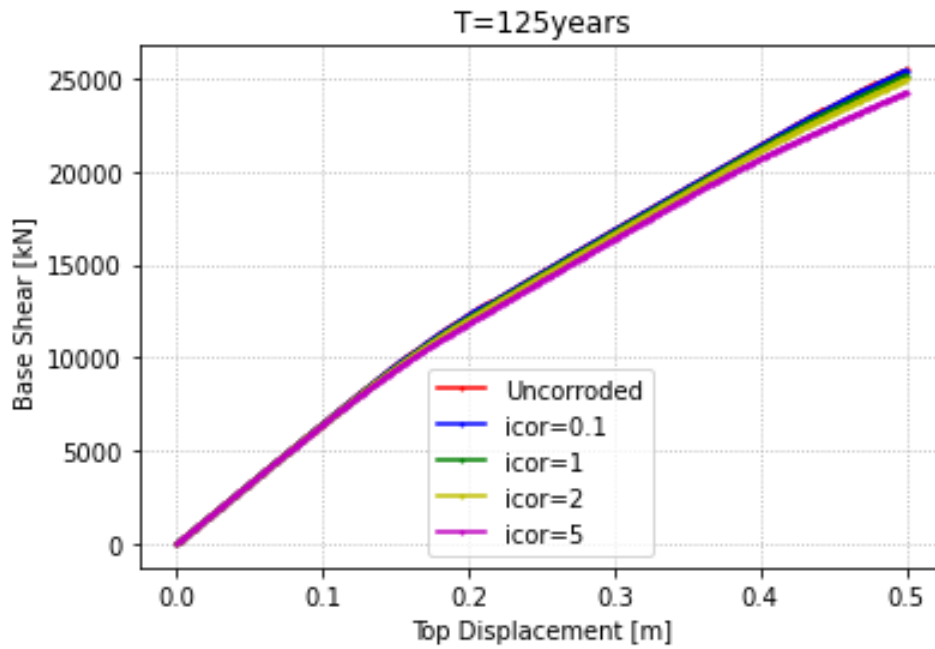


(α)

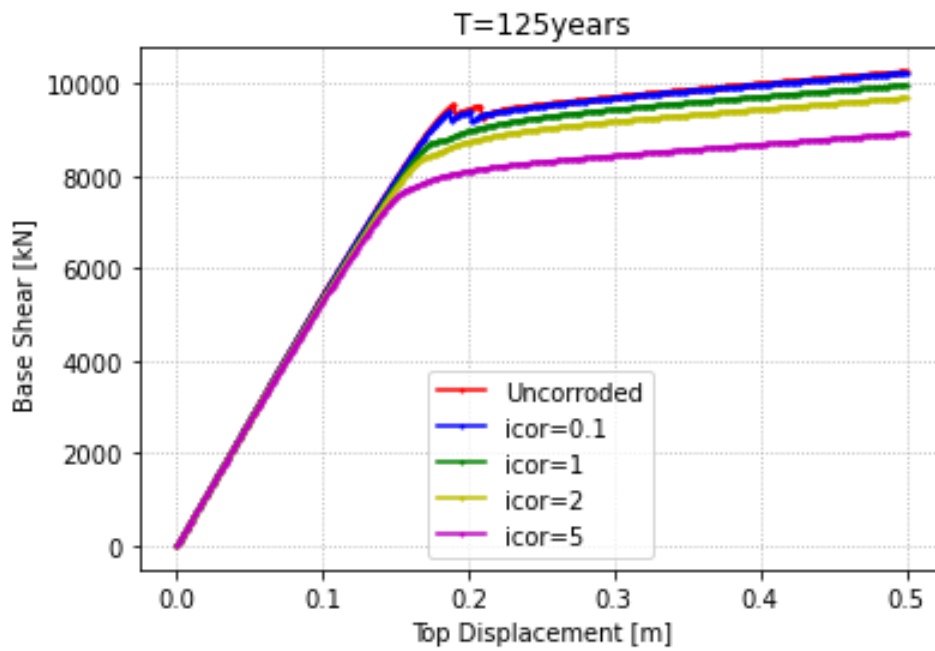


(β)

Σχήμα 7.7. Καμπύλη ικανότητας γέφυρας με $c=50\text{mm}$ και $T=100\text{years}$ (α) στην διαμήκη διεύθυνση και (β) στην εγκάρσια διεύθυνση.

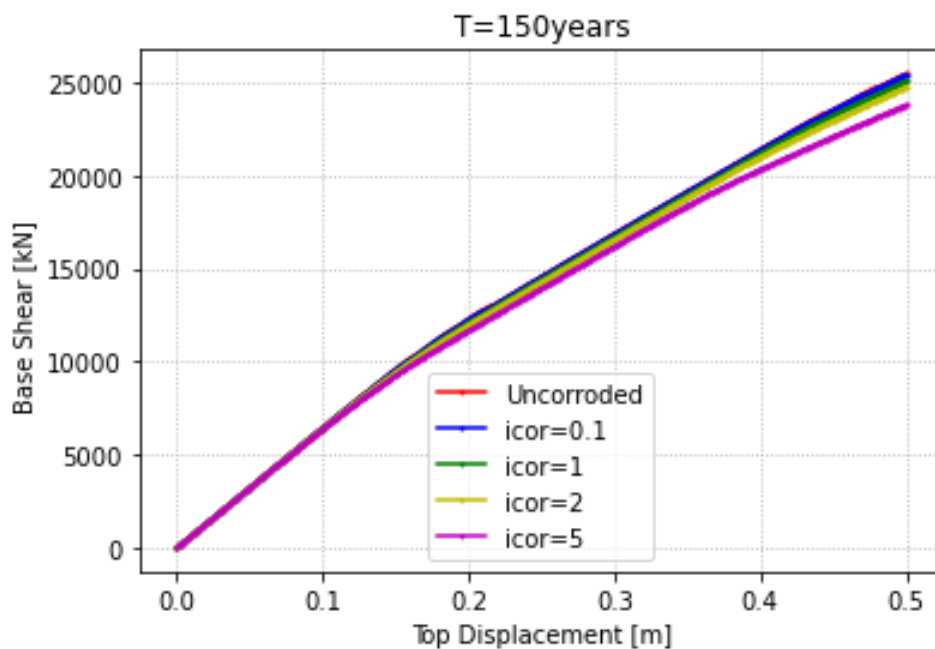


(α)

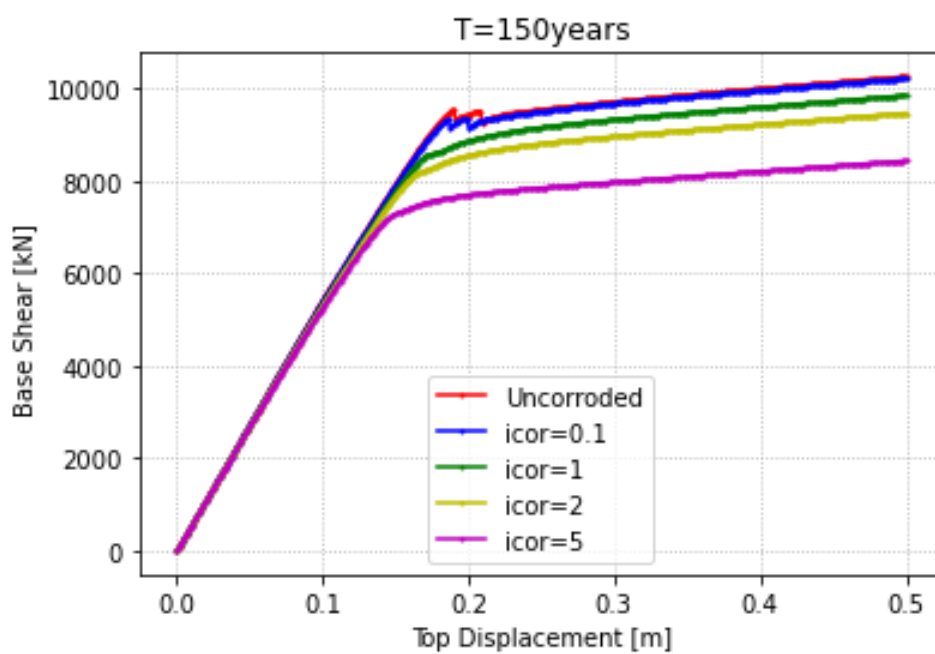


(β)

Σχήμα 7.8. Καμπύλη ικανότητας γέφυρας με $c=50\text{mm}$ και $T=125\text{years}$ (α) στην διαμήκη διεύθυνση και (β) στην εγκάρσια διεύθυνση.



(α)

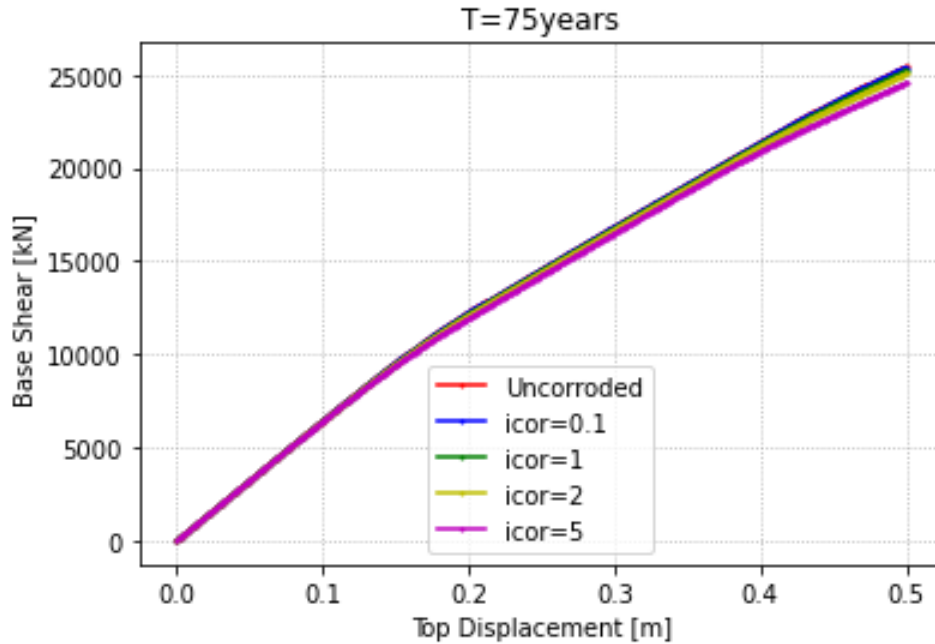


(β)

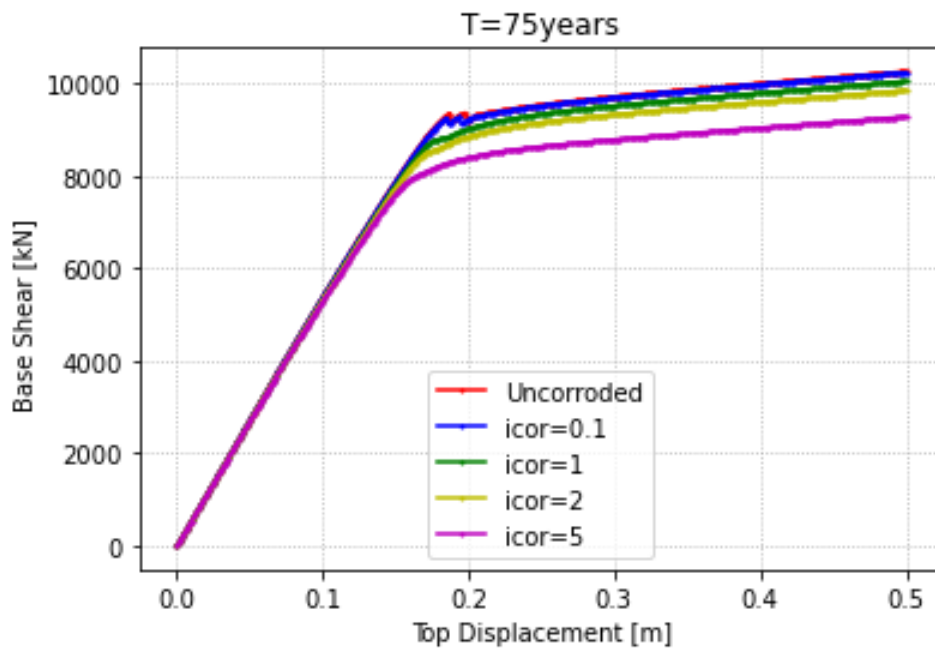
Σχήμα 7.9. Καμπύλη ικανότητας γέφυρας με $c=50\text{mm}$ και $T=150\text{years}$ (α) στην διαμήκη διεύθυνση και (β) στην εγκάρσια διεύθυνση.

7.2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΓΙΑ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ $c=40\text{mm}$

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η καμπύλη ικανότητας του φορέα της γέφυρας για επικάλυψη σκυροδέματος $c=40\text{mm}$ και για τις διάφορες τιμές του συντελεστή διάβρωσης i_{cor} παράλληλα με την χρονική διάρκεια T_{years} .

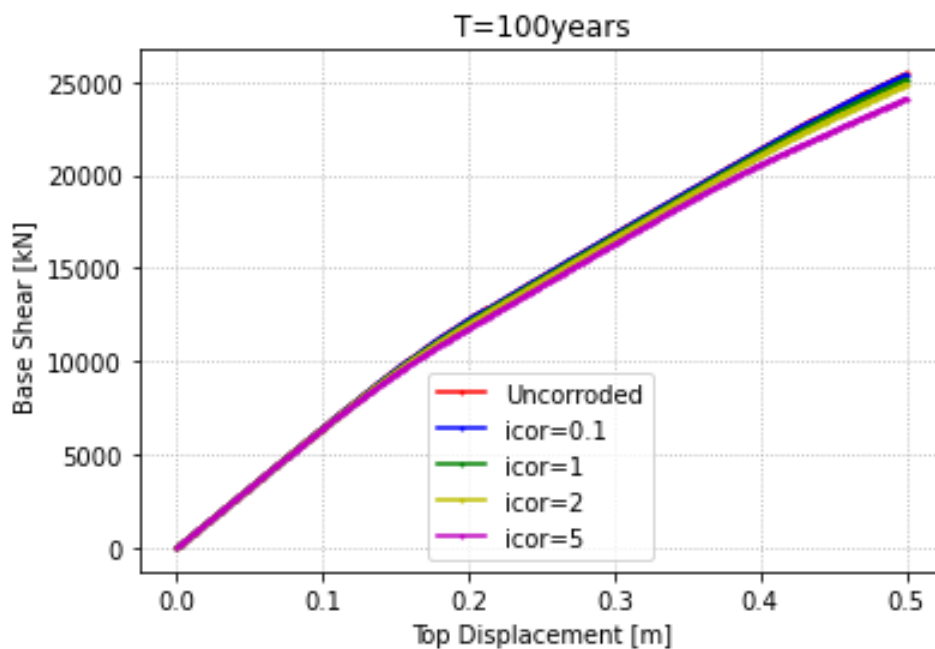


(α)

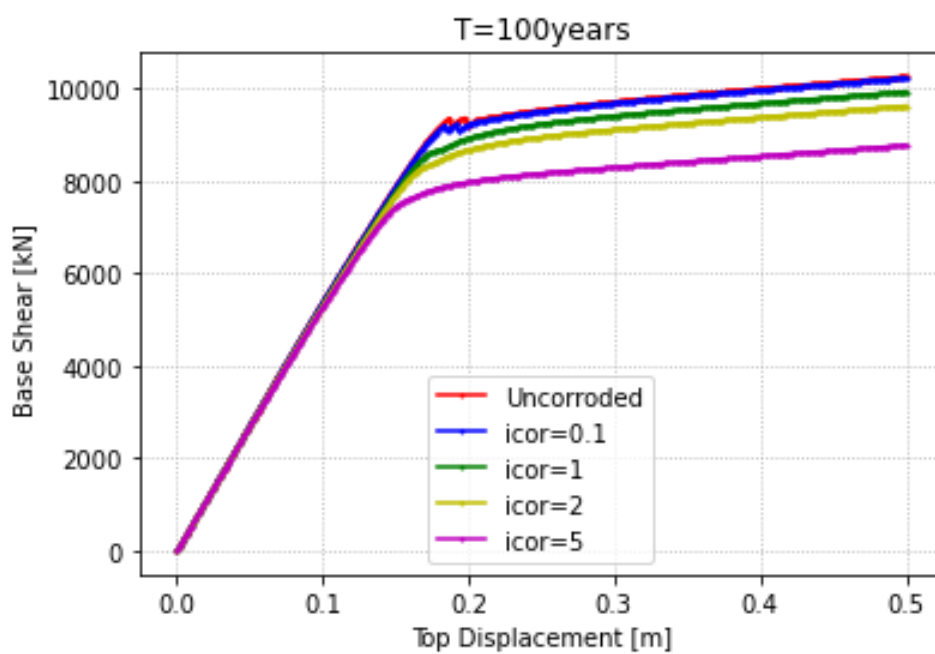


(β)

Σχήμα 7.10. Καμπύλη ικανότητας γέφυρας με $c=40\text{mm}$ και $T=75\text{years}$ (α) στην διαμήκη διεύθυνση και (β) στην εγκάρσια διεύθυνση.

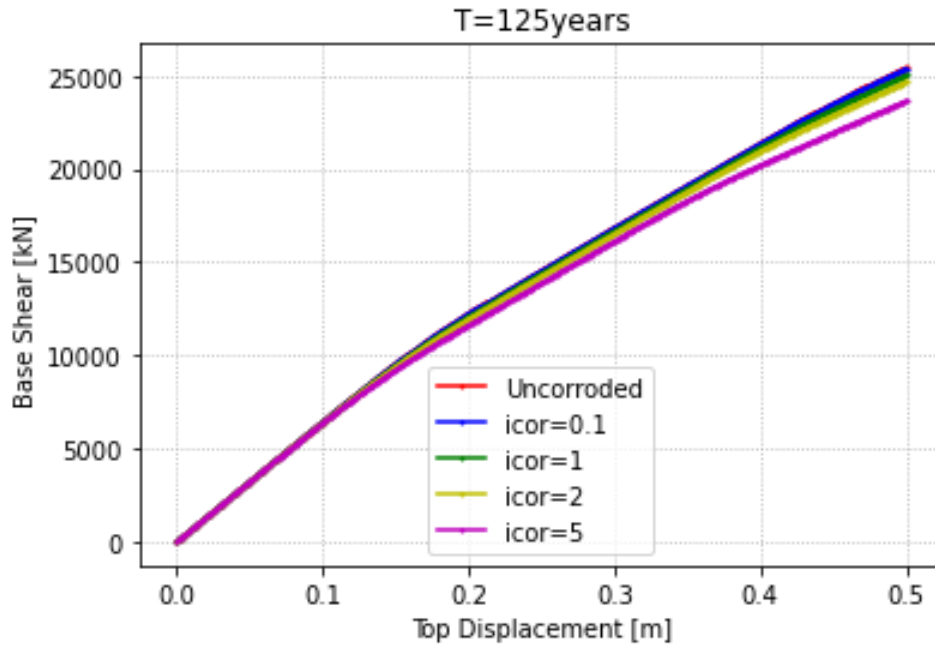


(α)

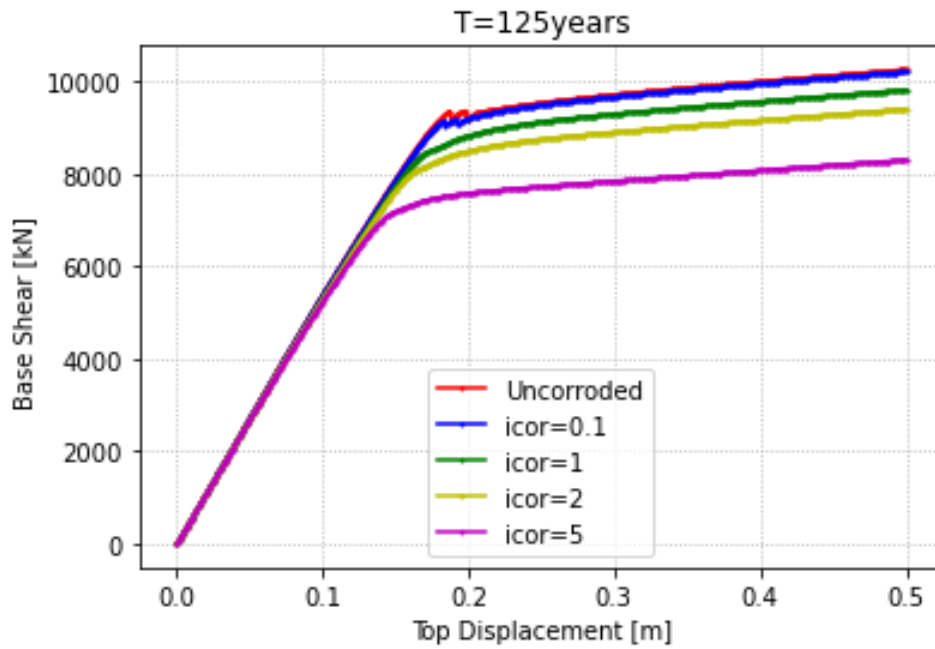


(β)

Σχήμα 7.11 Καμπύλη ικανότητας γέφυρας με $c=40\text{mm}$ και $T=100\text{years}$ (α) στην διαμήκη διεύθυνση και (β) στην εγκάρσια διεύθυνση.

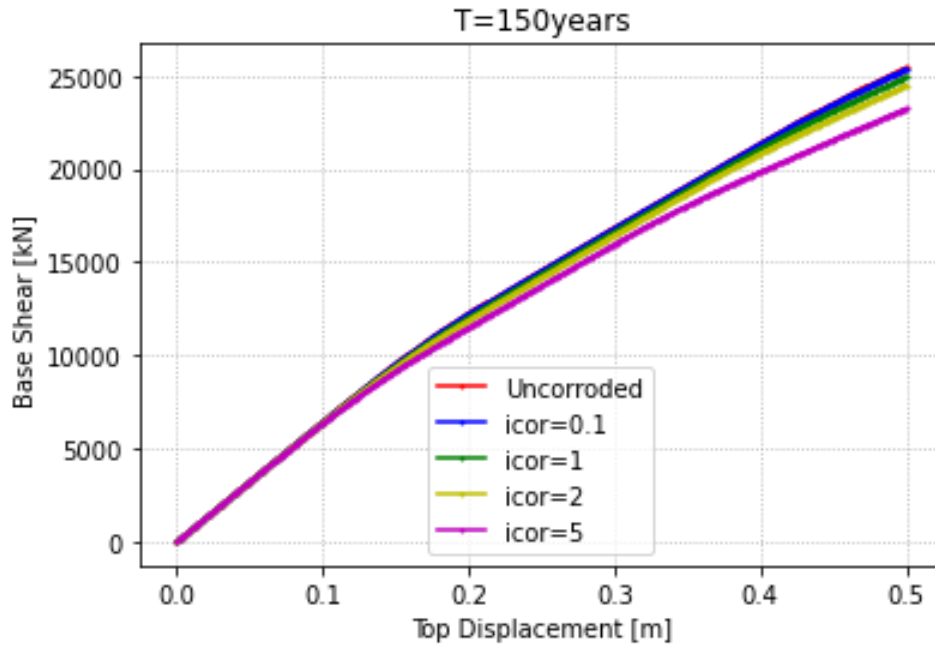


(α)

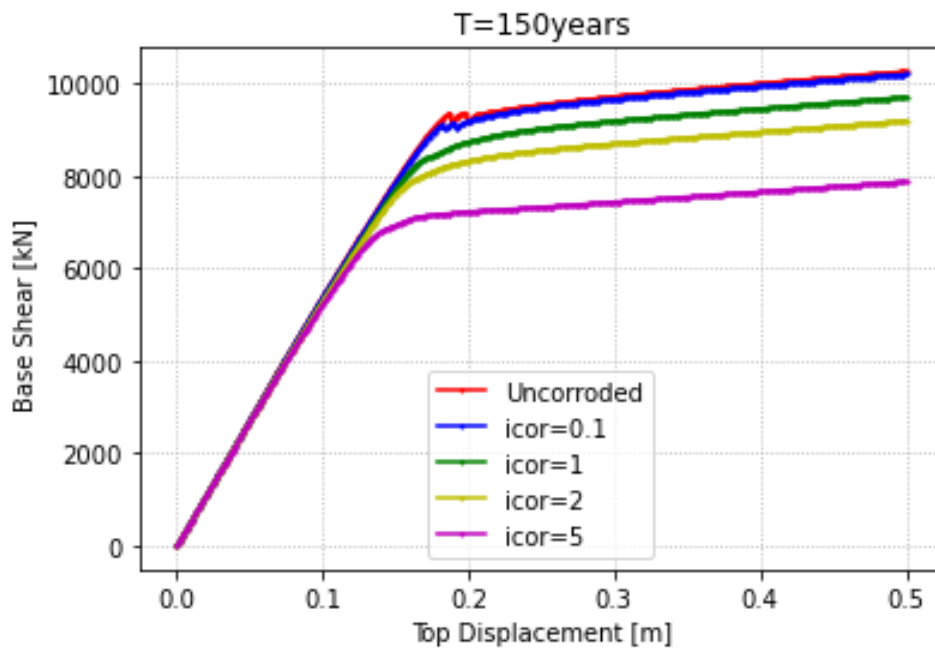


(β)

Σχήμα 7.12. Καμπύλη ικανότητας γέφυρας με $c=40\text{mm}$ και $T=125\text{years}$ (α) στην διαμήκη διεύθυνση και (β) στην εγκάρσια διεύθυνση.



(α)

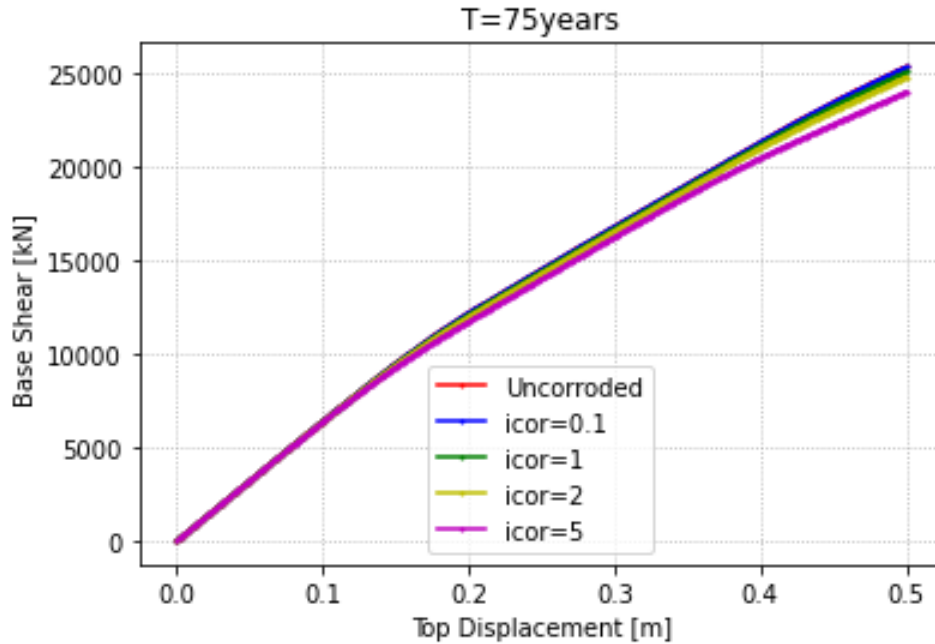


(β)

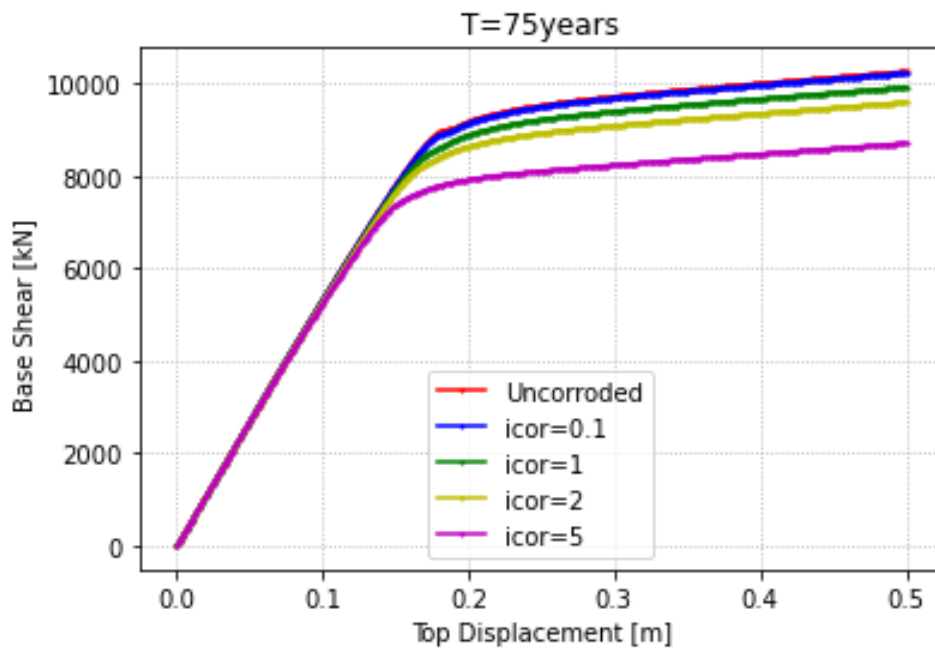
Σχήμα 7.13. Καμπύλη ικανότητας γέφυρας με $c=40\text{mm}$ και $T=150\text{years}$ (α) στην διαμήκη διεύθυνση και (β) στην εγκάρσια διεύθυνση.

7.2.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΓΙΑ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ $c=20\text{mm}$

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η καμπύλη ικανότητας του φορέα της γέφυρας για επικάλυψη σκυροδέματος $c=20\text{mm}$ και για τις διάφορες τιμές του συντελεστή διάβρωσης i_{cor} παράλληλα με την χρονική διάρκεια T_{years} .

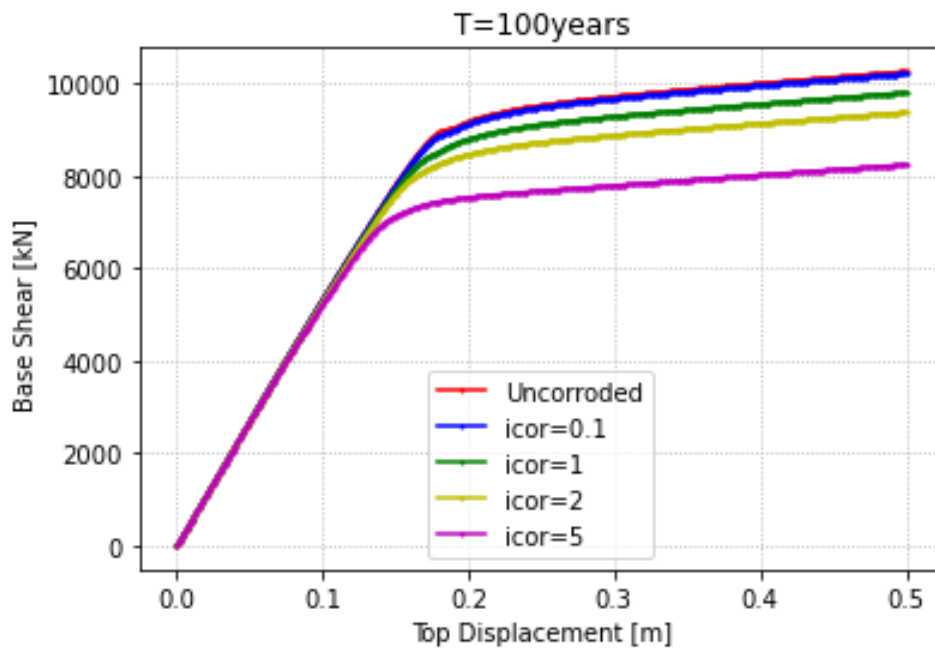
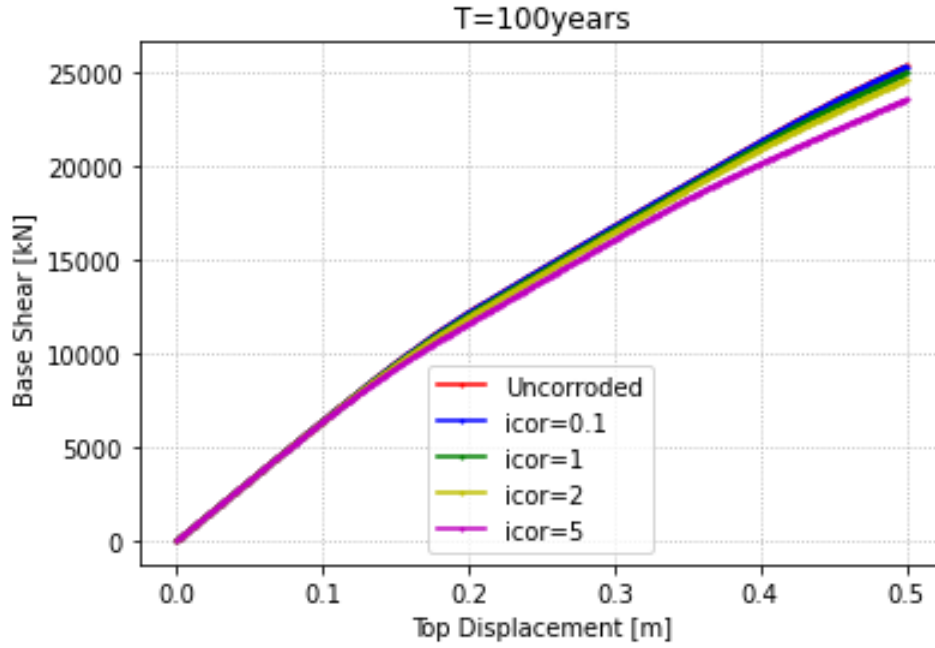


(α)

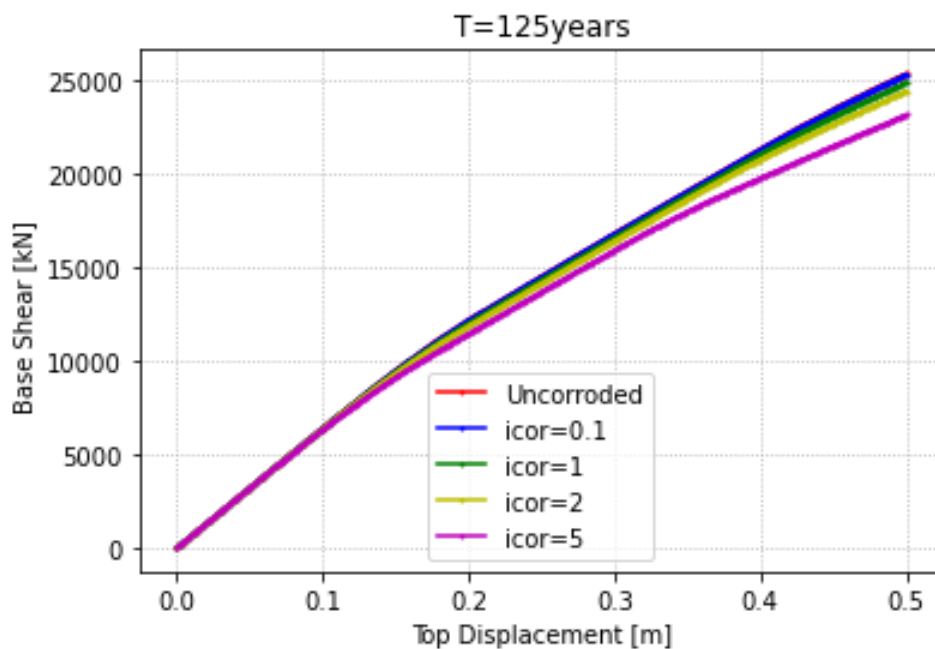


(β)

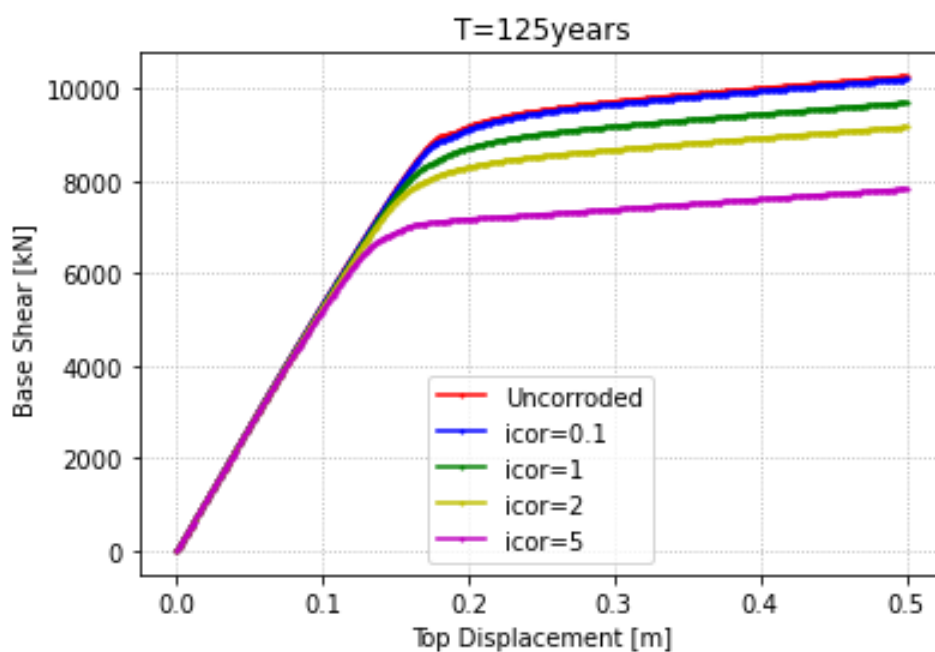
Σχήμα 7.14. Καμπύλη ικανότητας γέφυρας με $c=20\text{mm}$ και $T=75\text{years}$ (α) στην διαμήκη διεύθυνση και (β) στην εγκάρσια διεύθυνση.



Σχήμα 7.15. Καμπύλη ικανότητας γέφυρας με $c=20\text{mm}$ και $T=100\text{years}$ (α) στην διαμήκη διεύθυνση και (β) στην εγκάρσια διεύθυνση.

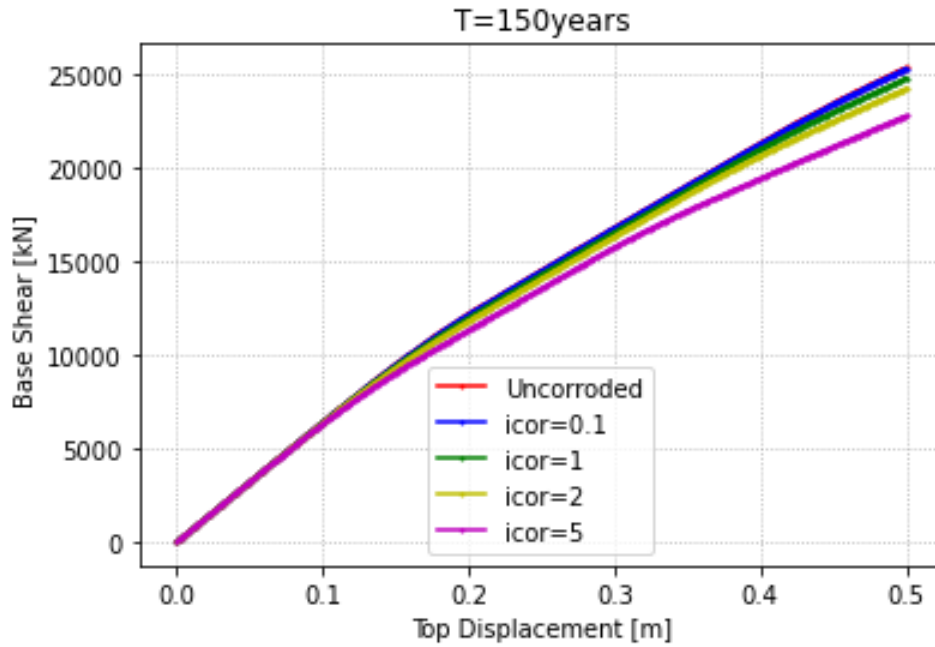


(α)

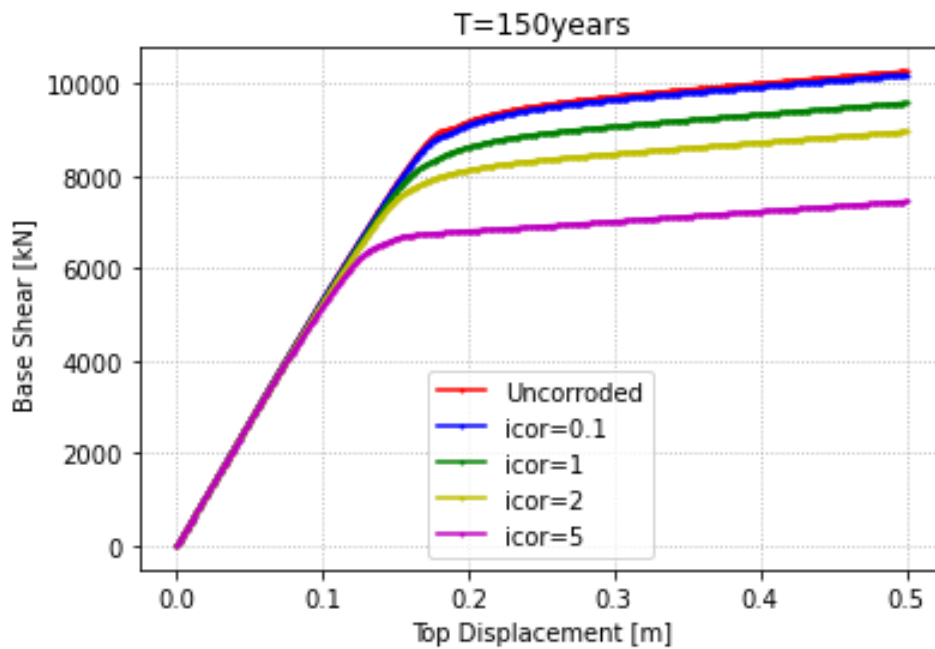


(β)

Σχήμα 7.16. Καμπύλη ικανότητας γέφυρας με $c=20\text{mm}$ και $T=125\text{years}$ (α) στην διαμήκη διεύθυνση και (β) στην εγκάρσια διεύθυνση.



(α)



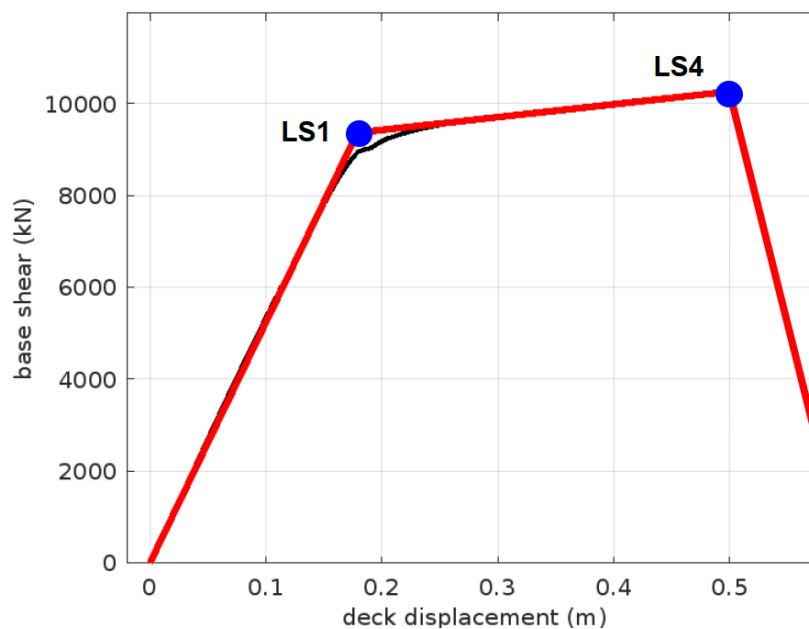
(β)

Σχήμα 7.17. Καμπύλη ικανότητας γέφυρας με $c=20\text{mm}$ και $T=150\text{years}$ (α) στην διαμήκη διεύθυνση και (β) στην εγκάρσια διεύθυνση.

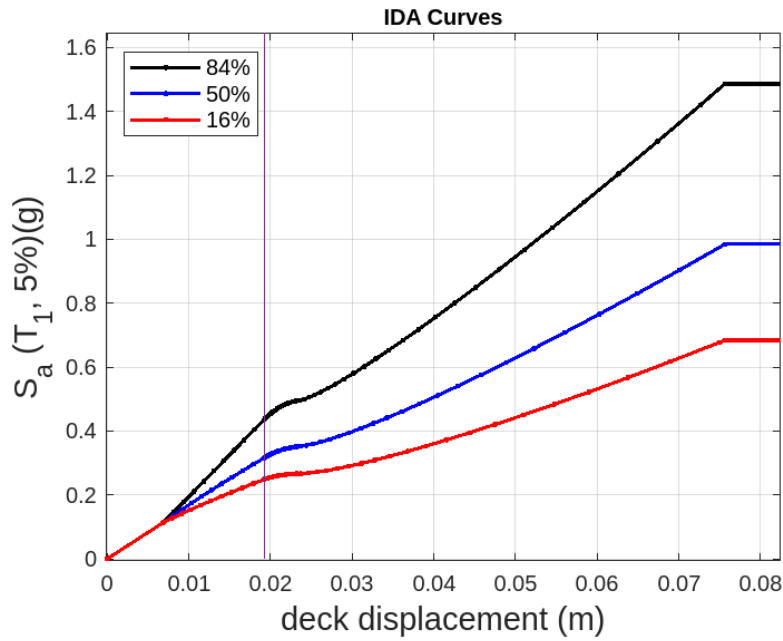
7.3 ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Σε συνέχεια των αναλύσεων υλοποιείται αποτίμηση της σεισμικής τρωτότητας της γέφυρας με εξαγωγή και σύγκριση των καμπυλών τρωτότητας. Για τον προσδιορισμό τους επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το εργαλείο SPO2IDA. Επιπλέον, η σεισμική συμπεριφορά του φορέα κρίνεται απαραίτητο να εκτιμηθεί για $t=0, 100, 125$ και 150 έτη μετά την κατασκευή του με σκοπό να διερευνηθούν οι συνέπειες της γήρανσης στη σεισμική τρωτότητα καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του έργου. Επιπρόσθετα, επιλέγεται να προσδιοριστεί η τρωτότητα της κατασκευής για την εγκάρσια διεύθυνση σεισμού από τις καμπύλες ικανότητας του κεφαλαίου 7.2 προέκυψε, σε αυτήν κρισιμότερη η επιρροή της διάβρωσης.

Σύμφωνα με το κεφάλαιο 5, για να εξαχθούν οι καμπύλες πρέπει πρώτα να οριστούν κατάλληλοι παράμετροι για με το Μέτρο Έντασης (IM) και για τη Μηχανική Παράμετρο Σεισμικής Απαιτήσης (EDP). Για το λόγο αυτό σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν ως IM ορίστηκε η φασματική επιτάχυνση της πρώτης ιδιομορφής, $S_a(T_1, 5\%)$ και ως EDP ορίστηκε η μέγιστη μετακίνηση του φορέα του καταστώματος. Ακόμα, ακολουθώντας τους κανονισμούς ορίζονται κατάλληλες στάθμες επιτελεστικότητας με βάση τον βαθμό των βλαβών που έχει υποστεί η κατασκευή. Οι καμπύλες τρωτότητας που παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους εστιάζουν στην στάθμη που αναλογεί σε περιορισμένες βλάβες στην κατασκευή (LS1), η οποία ανταποκρίνεται για καταπόνηση του φορέα μέχρι την μετακίνηση διαρροής (d_v) και στην στάθμη που αναλογεί σε οιωνεί κατάρρευση του φορέα (LS4), η οποία ανταποκρίνεται σε καταπόνηση του φορέα έως την μετακίνηση θραύσης (d_u). Η μετακίνηση διαρροής εντοπίστηκε με τη χρήση των διαγραμμάτων της καμπύλης ικανότητας ενώ η μετακίνηση θραύσης εκτιμήθηκε κάνοντας ανάλυση της διατομής των μεσόβαθρων. Τέλος, προκειμένου να γίνει χρήση του εργαλείου SPO2IDA απαιτείται να τριγωνικοποιηθεί η καμπύλη pushover. Έτσι, θεωρείται πως μετά την μετακίνηση θραύσης των μεσόβαθρων, δηλαδή κατά την αστοχία, η καμπύλη αποκτά ένα καθοδικό κλάδο με κλίση 150%.



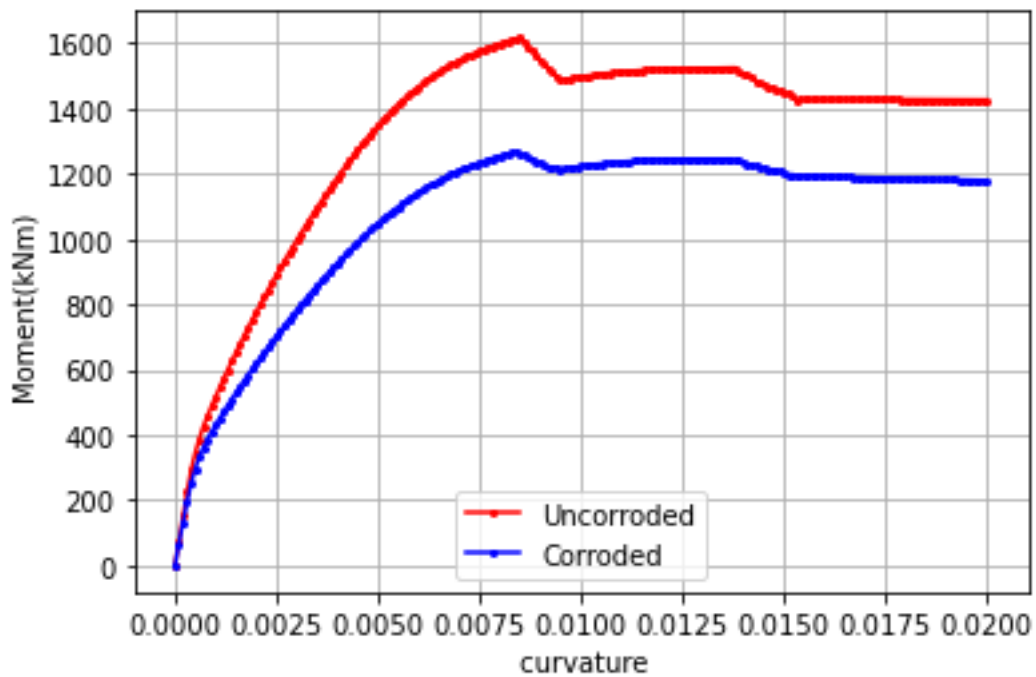
Σχήμα 7.18. Τριγωνικοποίηση καμπύλης ικανότητας.



Σχήμα 7.19. Καμπύλες IDA.

7.3.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα Μ-φ της διατομής των μεσόβαθρων προκειμένου να διερευνηθεί η πλαστιμότητα του φορέα στην αρχική και στην διαβρωμένη κατάσταση.

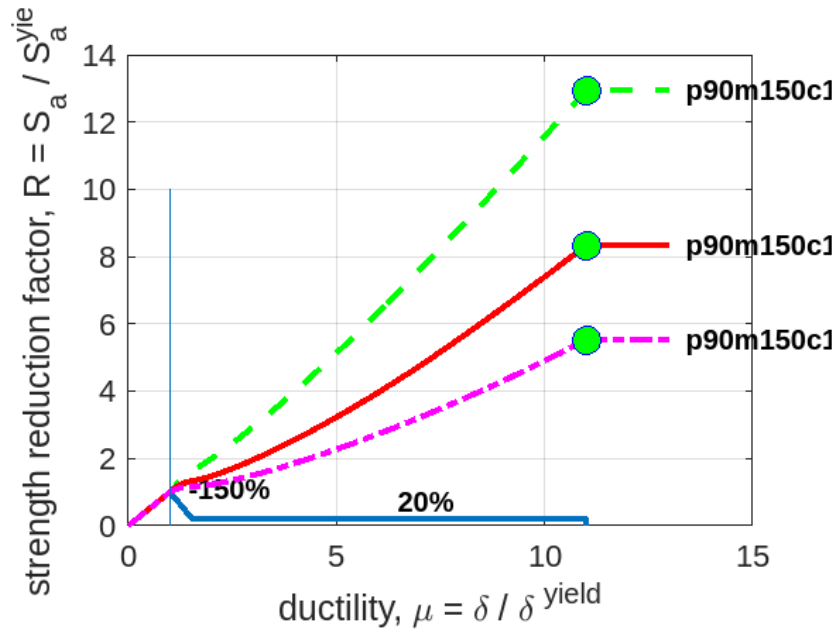


Σχήμα 7.20. Διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας για τη διατομή των μεσόβαθρων της γέφυρας σε αρχική και διαβρωμένη κατάσταση.

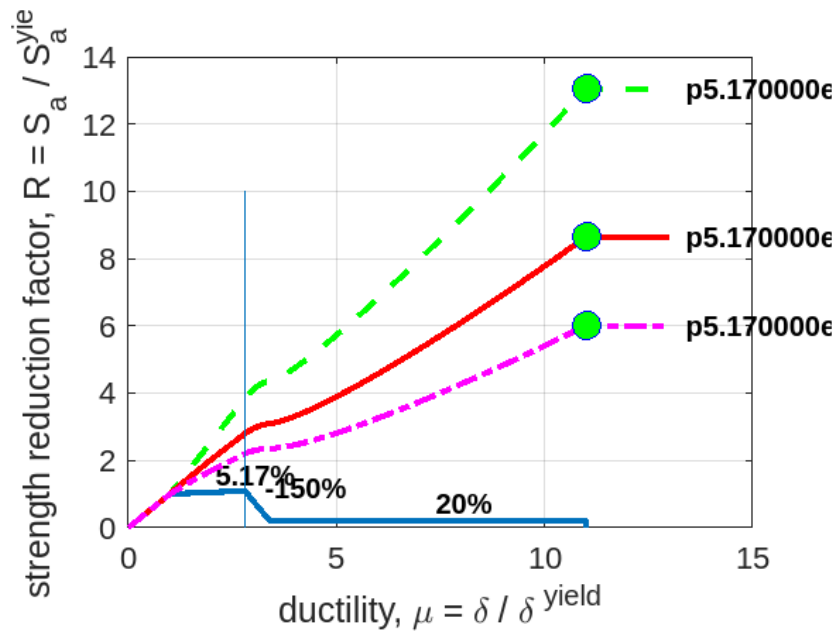
Με βάση το σχήμα παρατηρείται πως η επιρροή της διάβρωσης επηρεάζει σημαντικά την αντοχή της διατομής αλλά όχι τόσο την πλαστιμότητα της. Για το λόγο αυτό, η τιμή της πλαστιμότητας λήφθηκε σταθερή και ίση με 3 ($\mu=3$) για όλες τις περιπτώσεις που διερευνήθηκαν.

7.3.2 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ $c=50\text{mm}$

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι καμπύλες IDA και οι καμπύλες τρωτότητας του φορέα της γέφυρας για επικάλυψη σκυροδέματος $c=50\text{mm}$, για τις διάφορες τιμές του συντελεστή διάβρωσης i_{corr} παράλληλα με την χρονική διάρκεια T_{years} και για τις στάθμες επιτελεστικότητας LS1 και LS4.

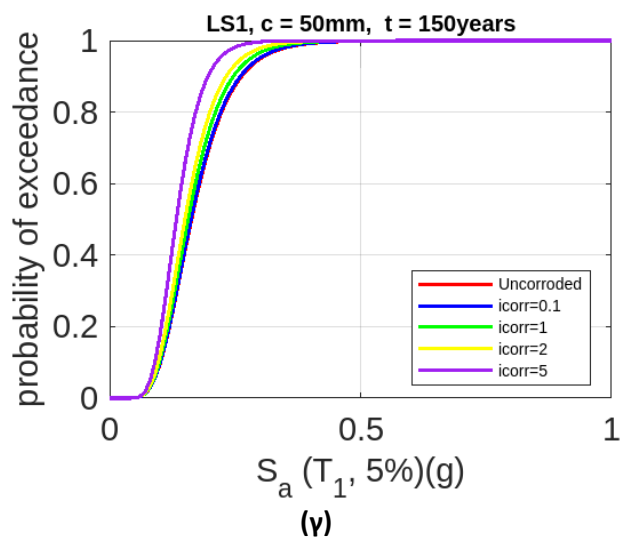
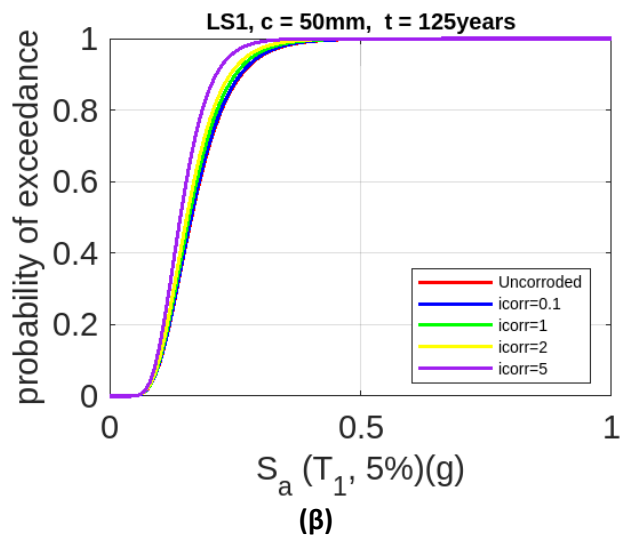
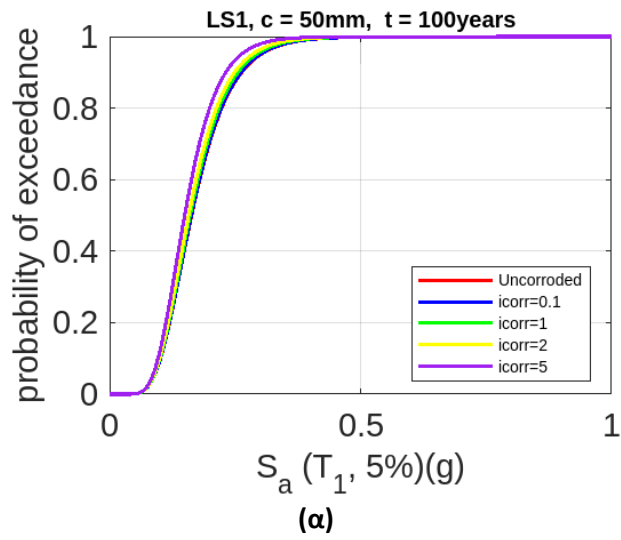


(α)

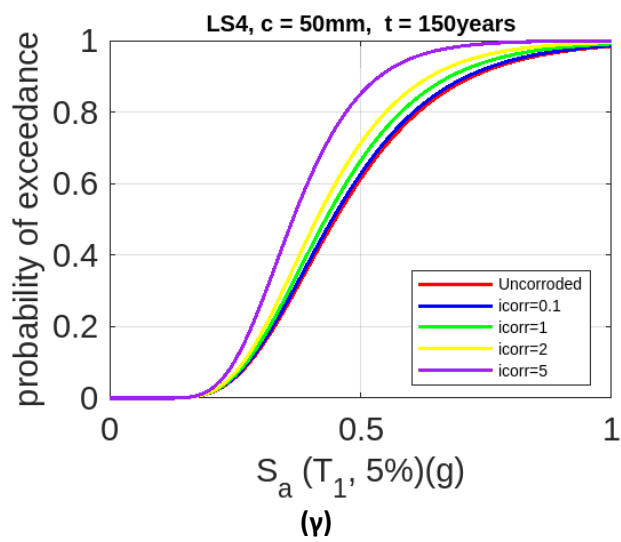
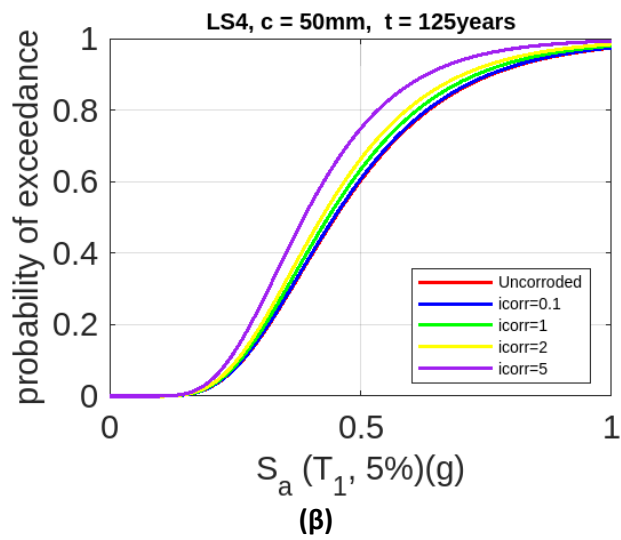
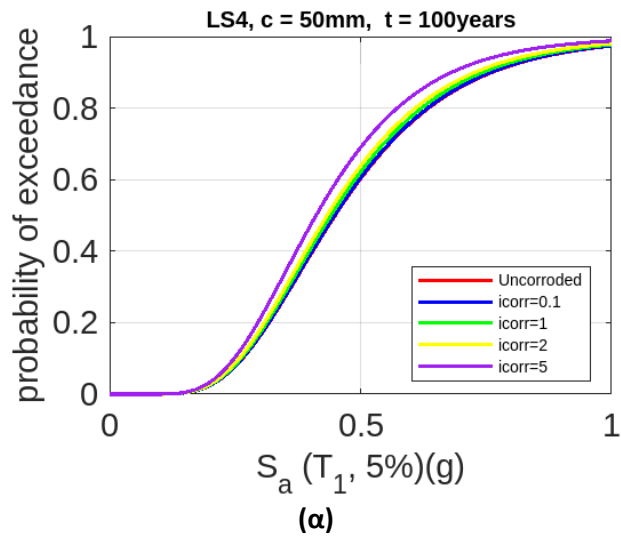


(β)

Σχήμα 7.21. Καμπύλες IDA για $c=50mm$ στις στάθμες επιτελεσιμότητας (α) LS1 και (β) LS4.



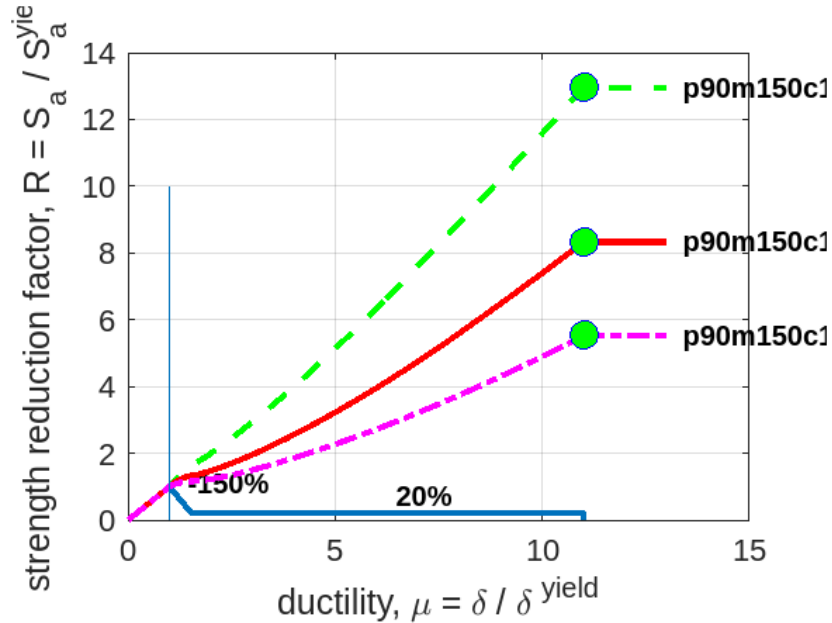
Σχήμα 7.22. Καμπύλες τρωτότητας γέφυρας με $c=50mm$ και LS1 για χρονική διάρκεια (α) $T=100years$, (β) $T=125years$ και (γ) $T=150years$.



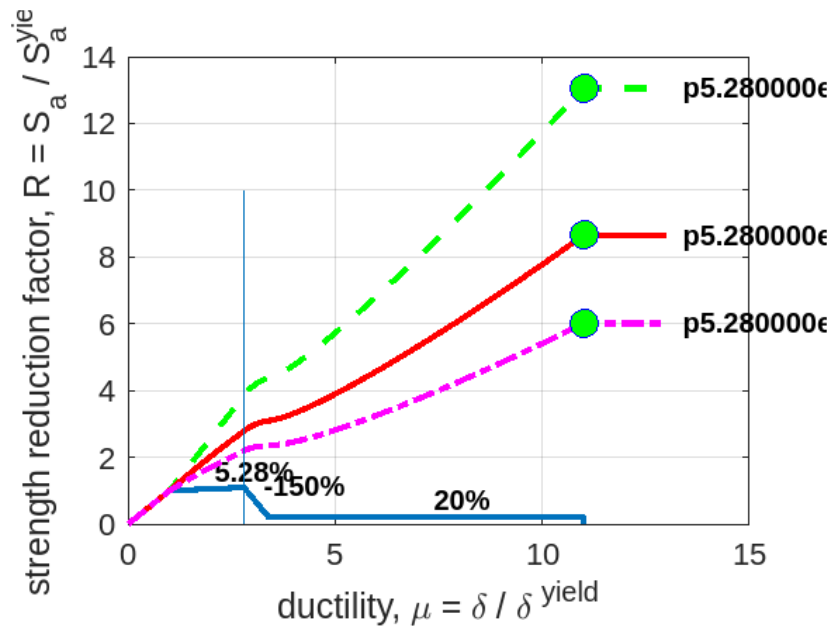
Σχήμα 7.23. Καμπύλες τρωτότητας γέφυρας με $c=50mm$ και LS4 για χρονική διάρκεια (α) $T=100years$, (β) $T=125years$ και (γ) $T=150years$.

7.3.3 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ $c=40\text{mm}$

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι καμπύλες IDA και οι καμπύλες τρωτότητας του φορέα της γέφυρας για επικάλυψη σκυροδέματος $c=40\text{mm}$, για τις διάφορες τιμές του συντελεστή διάβρωσης i_{corr} παράλληλα με την χρονική διάρκεια T_{years} και για τις στάθμες επιτελεστικότητας LS1 και LS4.

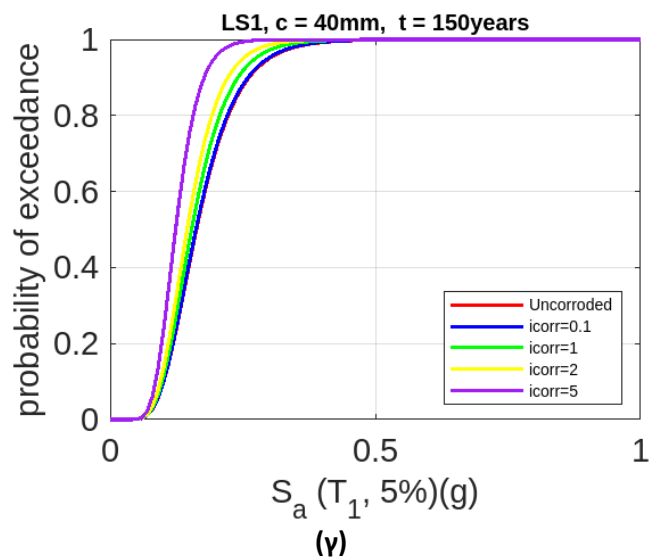
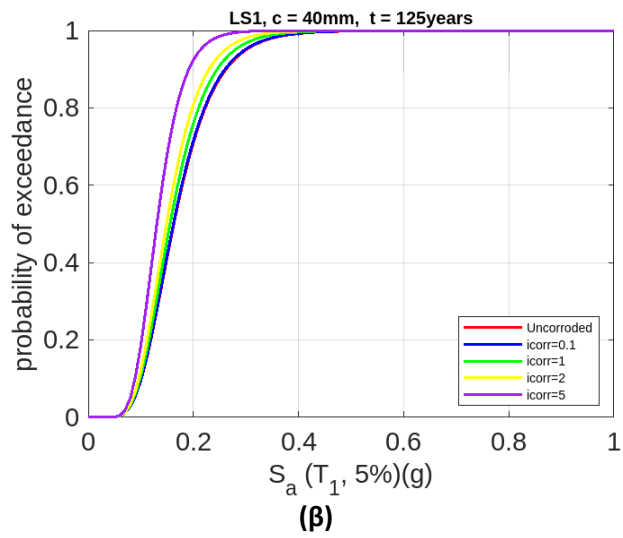
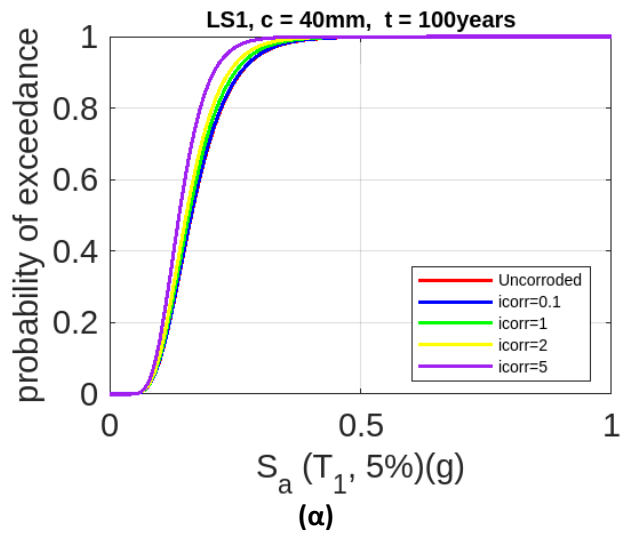


(α)

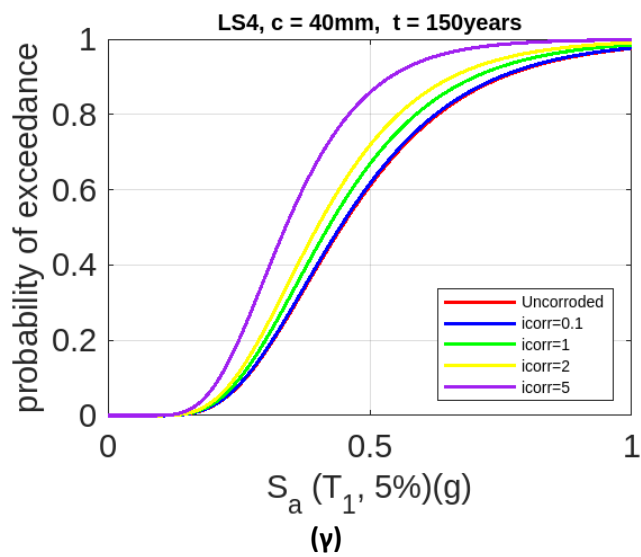
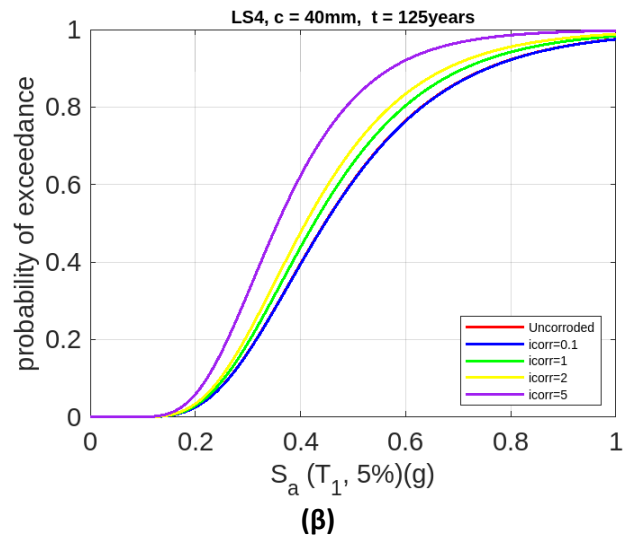
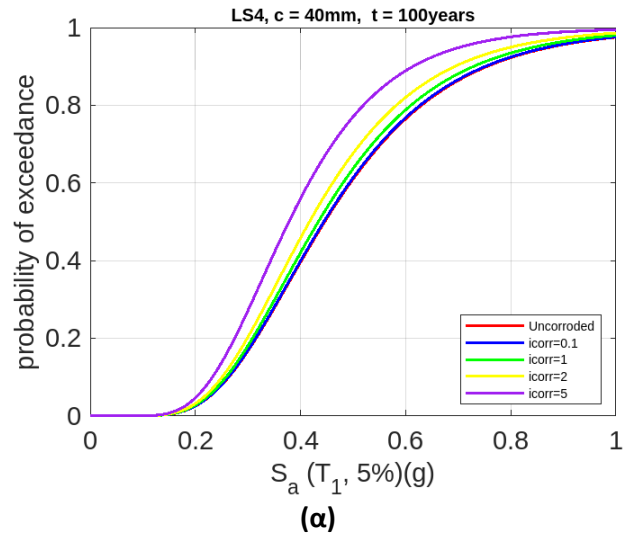


(β)

Σχήμα 7.24. Καμπύλες IDA για $c=40\text{mm}$ στις στάθμες επιτελεστικότητας (α) LS1 και (β) LS4.



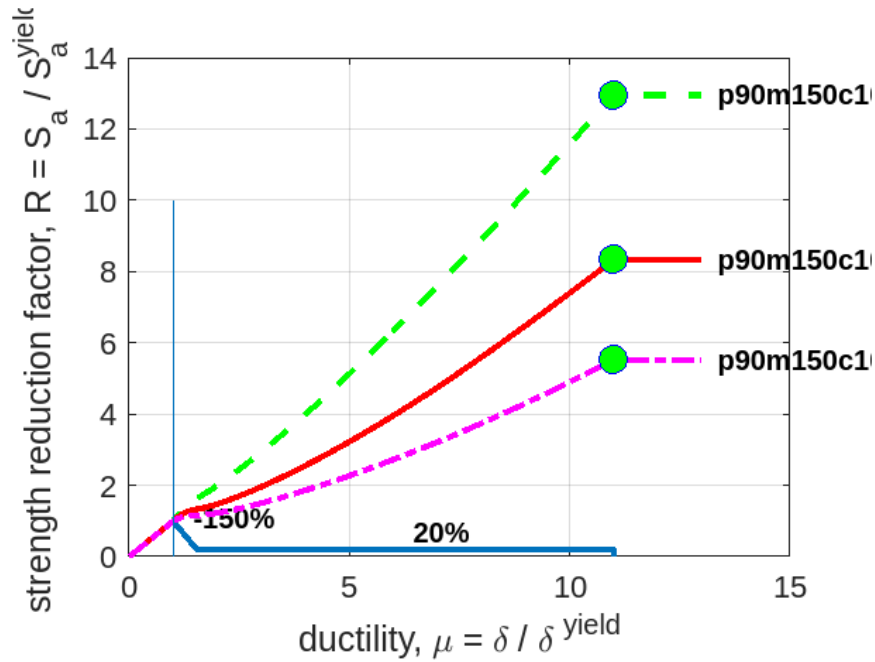
Σχήμα 7.25. Καμπύλες τρωτότητας γέφυρας με $c=40mm$ και LS1 για χρονική διάρκεια (α) $T=100years$, (β) $T=125years$ και (γ) $T=150years$.



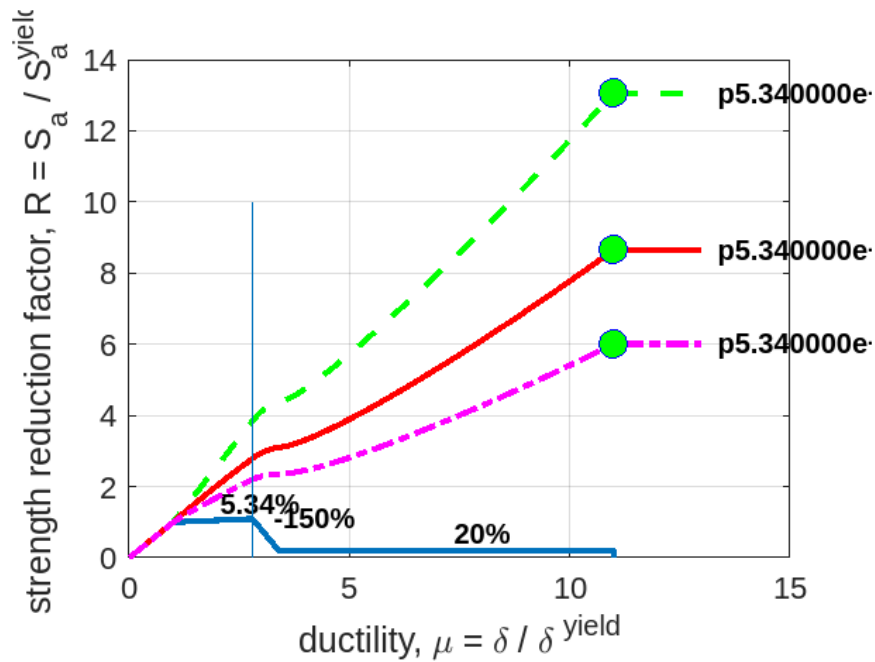
Σχήμα 7.26. Καμπύλες τρωτότητας γέφυρας με $c=40mm$ και LS4 για χρονική διάρκεια (α) $T=100years$, (β) $T=125years$ και (γ) $T=150years$.

7.3.4 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ $c=20\text{mm}$

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι καμπύλες IDA και οι καμπύλες τρωτότητας του φορέα της γέφυρας για επικάλυψη σκυροδέματος $c=20\text{mm}$, για τις διάφορες τιμές του συντελεστή διάβρωσης i_{corr} παράλληλα με την χρονική διάρκεια T_{years} και για τις στάθμες επιτελεστικότητας LS1 και LS4.

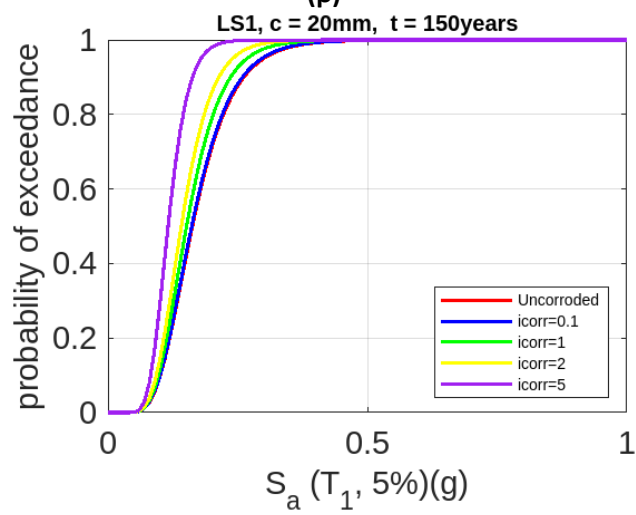
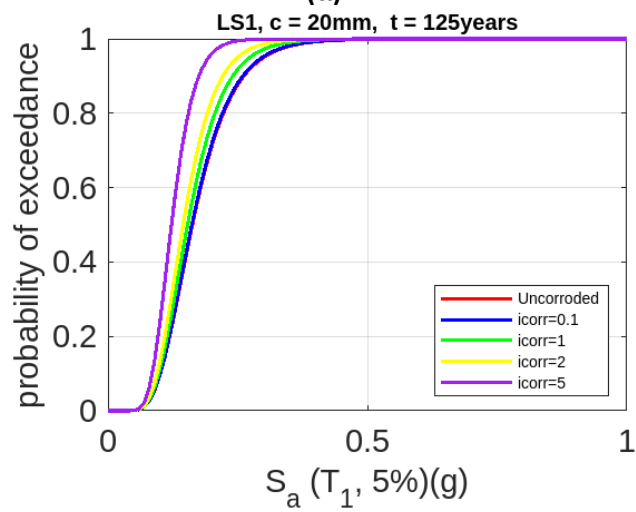
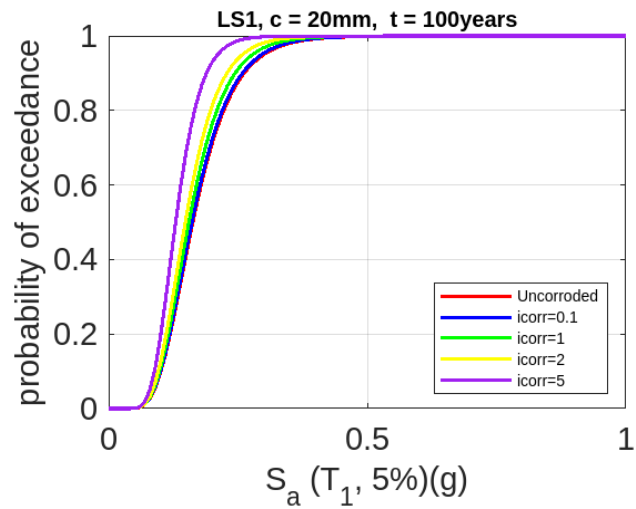


(α)

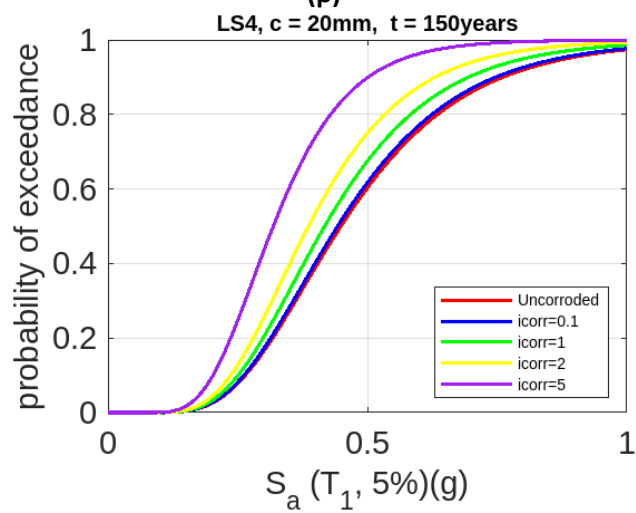
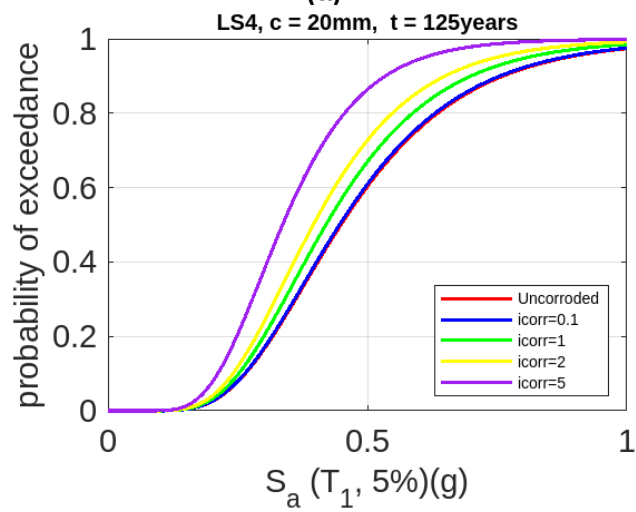
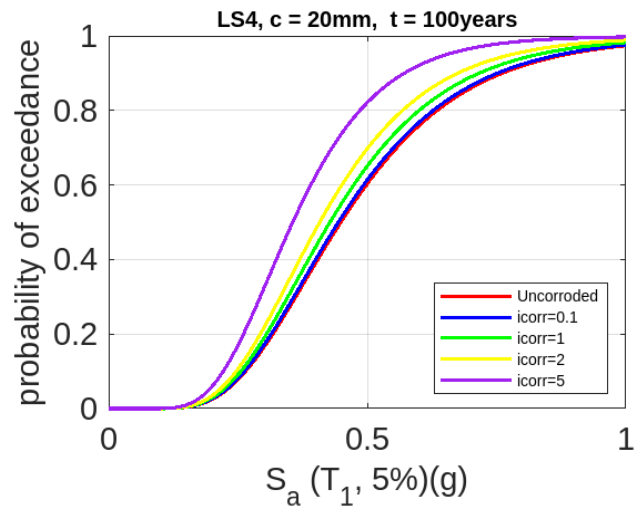


(β)

Σχήμα 7.27. Καμπύλες IDA για $c=20\text{mm}$ στις στάθμες επιτελεστικότητας (α) LS1 και (β) LS4.



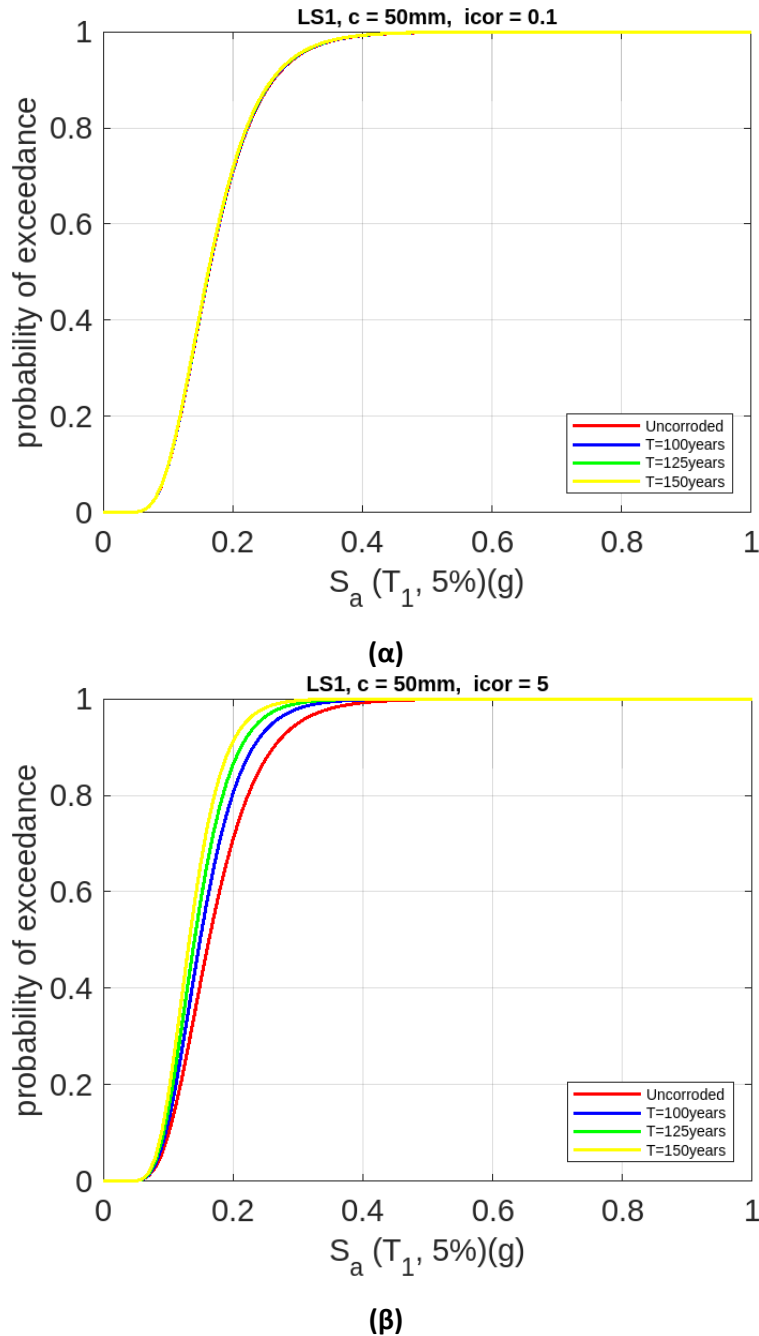
Σχήμα 7.28. Καμπύλες τρωτότητας γέφυρας με $c=20mm$ και LS1 για χρονική διάρκεια (α) $T=100years$, (β) $T=125years$ και (γ) $T=150years$.



Σχήμα 7.29. Καμπύλες τρωτότητας γέφυρας με $c=20mm$ και LS4 για χρονική διάρκεια (α) $T=100years$, (β) $T=125years$ και (γ) $T=150years$.

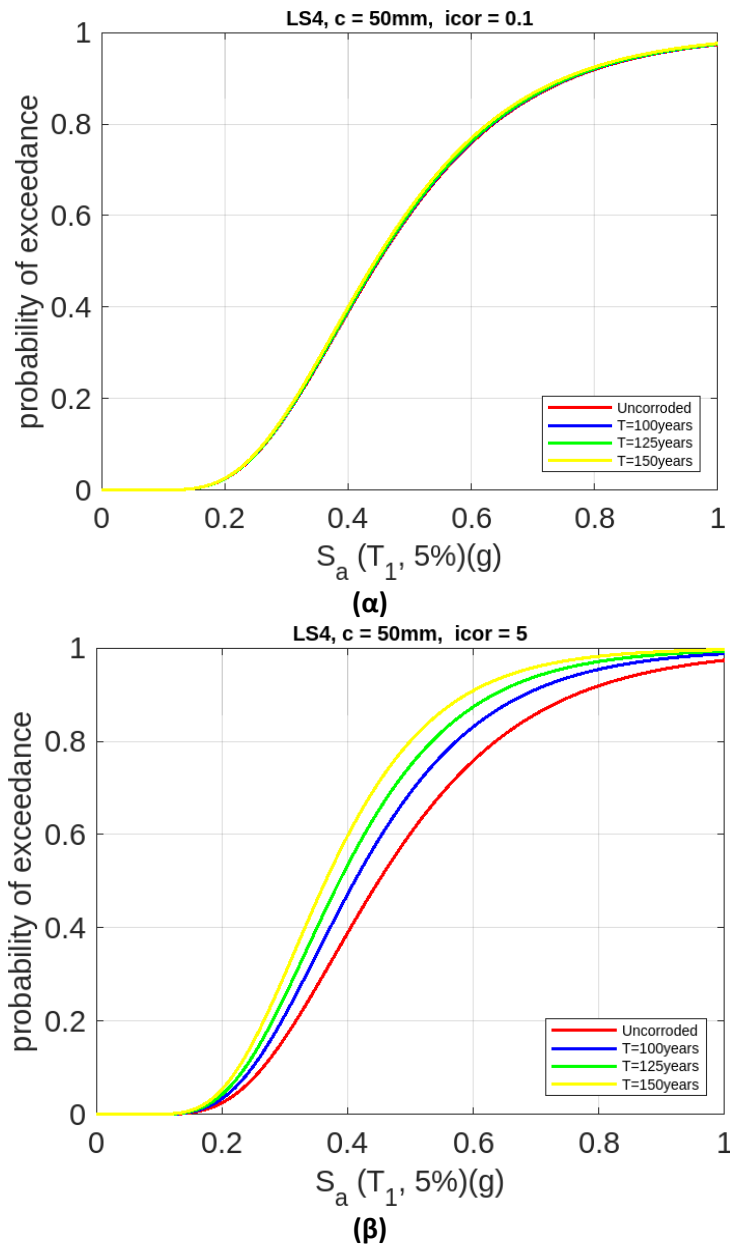
7.3.5 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι καμπύλες τρωτότητας του φορέα της γέφυρας για επικάλυψη σκυροδέματος $c=50\text{mm}$ και $c=20\text{mm}$, για τις τιμές του συντελεστή διάβρωσης $i_{\text{corr}}=0.1 \frac{\mu\text{A}}{\text{cm}^2}$, $i_{\text{corr}}=5 \frac{\mu\text{A}}{\text{cm}^2}$ και υλοποιείται σύγκριση αποτελεσμάτων με παράμετρο τη χρονική διάρκεια για τις στάθμες επιτελεστικότητας LS1 και LS4.

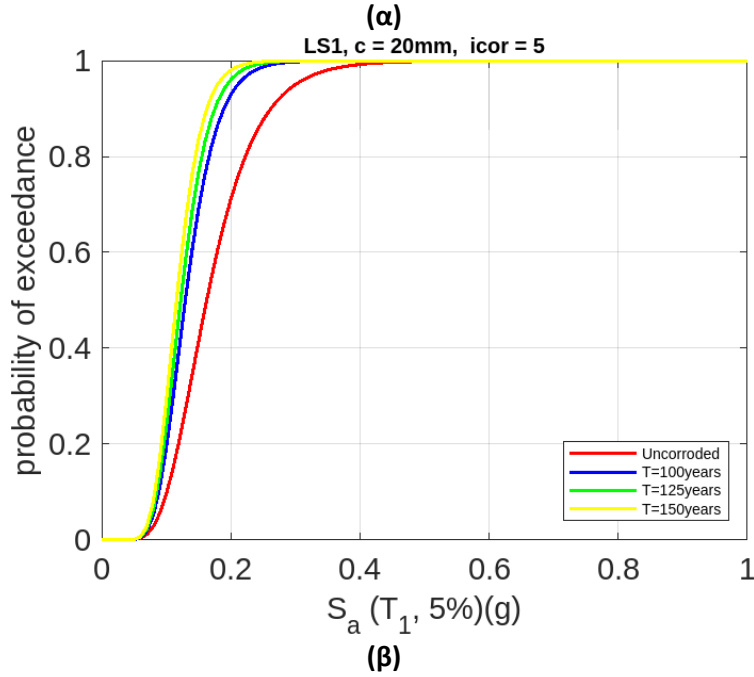
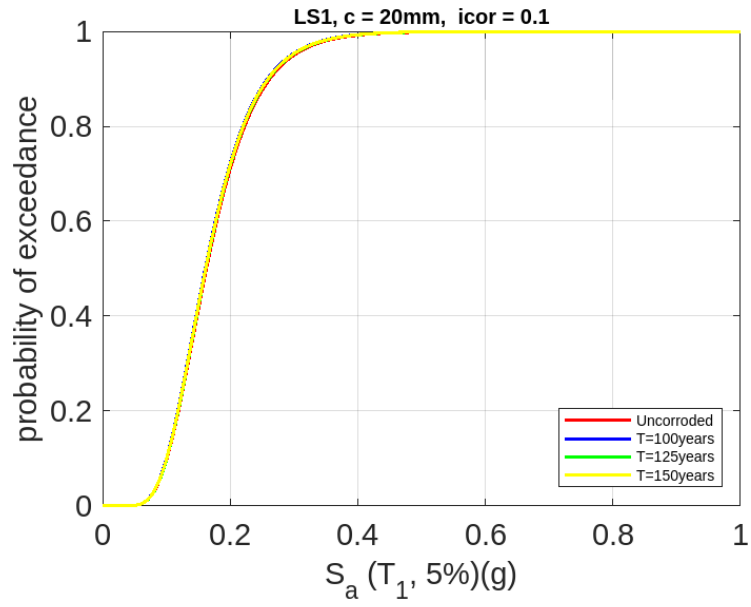


Σχήμα 7.30. Καμπύλες τρωτότητας γέφυρας με $c=50\text{mm}$ και LS1 για

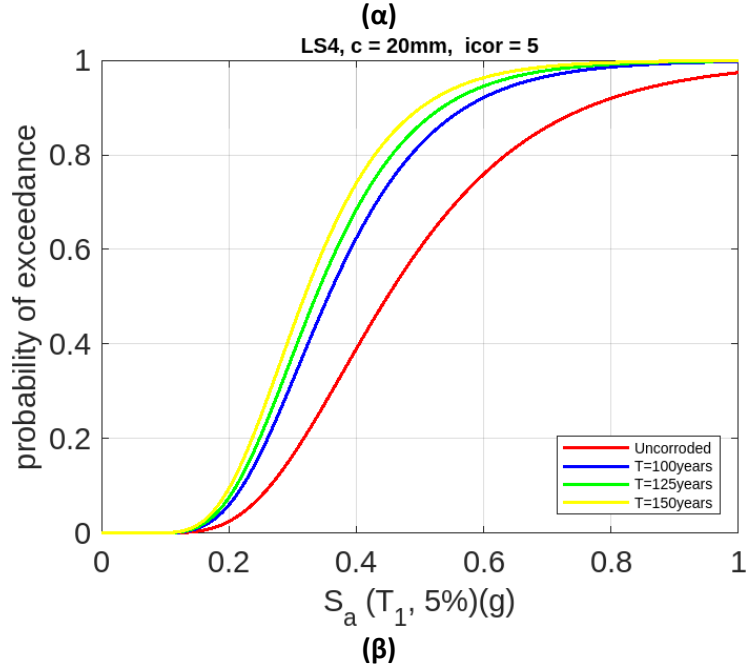
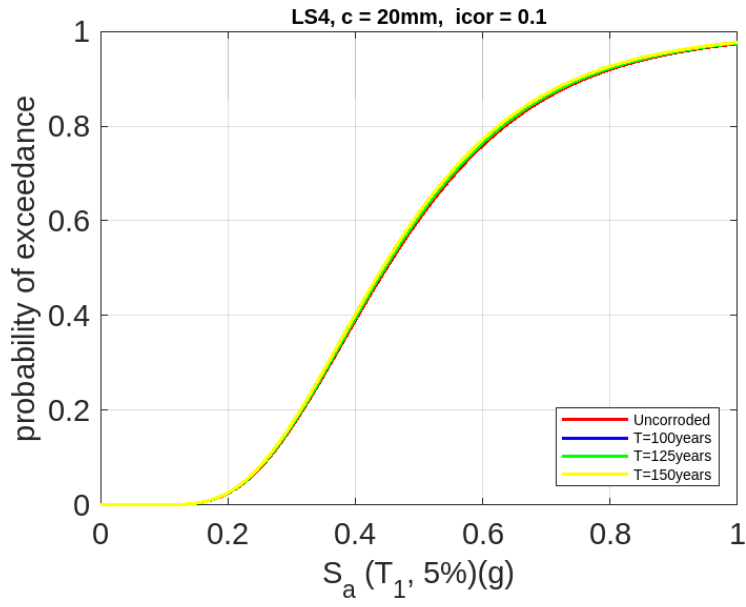
(α) $i_{\text{corr}}=0.1 \frac{\mu\text{A}}{\text{cm}^2}$, και (β) $i_{\text{corr}}=5 \frac{\mu\text{A}}{\text{cm}^2}$.



Σχήμα 7.31. Καμπύλες τρωτότητας γέφυρας με $c=50mm$ και LS4 για
 (α) $i_{corr}=0.1 \mu A/cm^2$, και (β) $i_{corr}=5 \mu A/cm^2$.



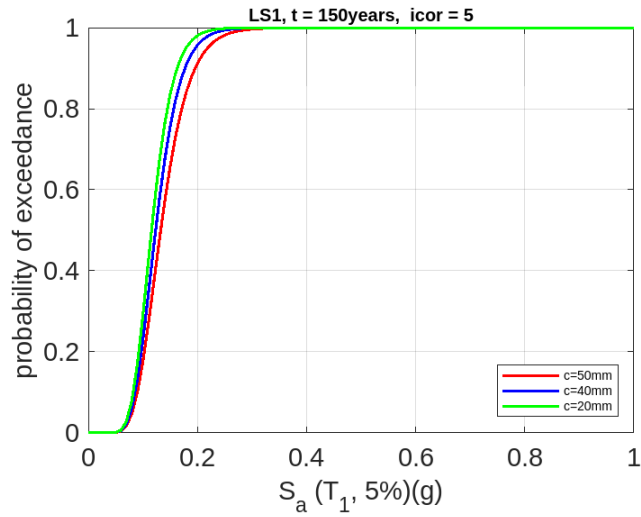
Σχήμα 7.32. Καμπύλες τρωτότητας γέφυρας με $c=20\text{mm}$ και $LS1$ για
 (α) $i_{\text{corr}}=0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, και (β) $i_{\text{corr}}=5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.



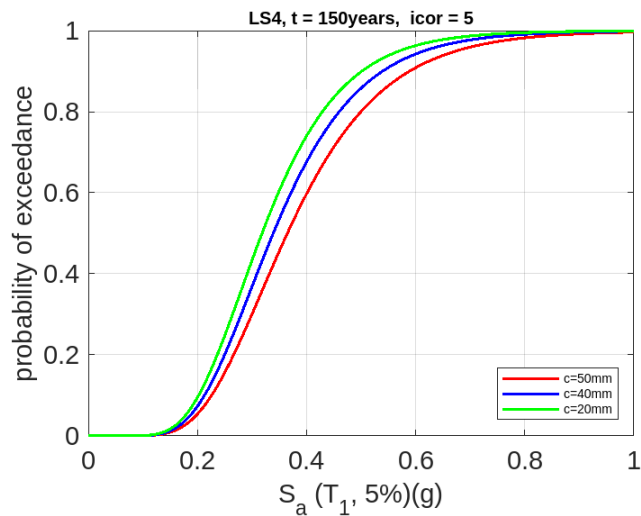
Σχήμα 7.33. Καμπύλες τρωτότητας γέφυρας με $c=20\text{mm}$ και $LS4$ για
 (α) $i_{\text{corr}}=0.1 \frac{\mu\text{A}}{\text{cm}^2}$, και (β) $i_{\text{corr}}=5 \frac{\mu\text{A}}{\text{cm}^2}$.

7.3.6 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι καμπύλες τρωτότητας του φορέα της γέφυρας για συντελεστή διάβρωσης $i_{corr}=5 \mu A/cm^2$, χρονική διάρκεια $T=150years$ και υλοποιείται σύγκριση αποτελεσμάτων με παράμετρο την επικάλυψη σκυροδέματος $c=50mm$, $c=40mm$ και $c=20mm$ για τις στάθμες επιτελεστικότητας LS1 και LS4.



(α)



(β)

Σχήμα 7.34. Καμπύλες τρωτότητας γέφυρας με $i_{corr}=5 \mu A/cm^2$, $T=150years$ για (α) LS1 και (β) LS4.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε αναλυτική διερεύνηση της επιρροής της γήρανσης στην σεισμική συμπεριφορά μιας γέφυρας οπλισμένου σκυροδέματος κατά τη διάρκεια ζωής της. Πραγματοποιήθηκαν μη-γραμμικές στατικές αναλύσεις, προσδιορίστηκαν οι καμπύλες τρωτότητας και έγιναν συγκρίσεις αποτελεσμάτων. Παρακάτω παρουσιάζονται τα σημαντικότερα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Αρχικά, μέσω των καμπυλών ικανότητας προέκυψε ότι η επιρροή της διάβρωσης δεν ήταν σημαντική στην διαμήκη διεύθυνση. Ακόμα και στη δυσμενέστερη περίπτωση με πολύ ισχυρό συντελεστή διάβρωσης ($i_{corr}=5$), χρονική διάρκεια $T_{years}=150$ και μικρή επικάλυψη οπλισμών ($c=20\text{mm}$) η απομείωση της αντοχής του φορέα δεν ξεπέρασε το 5%. Το γεγονός αυτό θεωρείται ότι οφείλεται κυρίως στην δυσκαμψία των εφεδράνων, καθώς στην διεύθυνση x είναι αρκετά σημαντικότερη από την διεύθυνση y (περίπου τριπλάσια). Έτσι, αφού η έρευνα επικεντρώθηκε στην επιρροή της διάβρωσης μόνο στα βάρθρα, δεν προέκυψε μεγάλη απόκλιση των αποτελεσμάτων.

Επιπλέον, για τις διάφορες τιμές του συντελεστή διάβρωσης i_{corr} , παρατηρήθηκε πως οι καμπύλες τρωτότητας και οι καμπύλες pushover επηρεάστηκαν σε σημαντικό βαθμό ανεξάρτητα από την διάρκεια ζωής του έργου. Πιο συγκεκριμένα, για τις κατασκευές που βρίσκονται σε χαμηλό διαβρωτικό περιβάλλον δεν απαιτείται περαιτέρω έλεγχος έναντι διάβρωσης στη σεισμική τους συμπεριφοράς. Αντίθετα, στις περιπτώσεις με υψηλότερο συντελεστή διάβρωσης ($i_{corr}=2, 5$) υπήρξε σημαντική επιρροή η οποία αυξανόταν με την αύξηση της διάρκειας ζωής. Αναλυτικότερα, στις δυσμενέστερες περιπτώσεις παρατηρείται απομείωση της αντοχής που προσεγγίζει το 25% σύμφωνα με τις καμπύλες pushover και αύξηση της πιθανότητας υπέρβασης κατά 20%, 30% ακόμα και 40%. Αξίζει να σημειωθεί ότι, παρόλο που πιο κρίσιμα φαίνονται τα αποτελέσματα για τις μεγαλύτερες διάρκειες ζωής, σημαντικές αποκλίσεις παρατηρούνται επίσης για $T_{years}=75$.

Επιπρόσθετα, εξετάστηκε η επιρροή της επικάλυψης σκυροδέματος στην συμπεριφορά του φορέα. Προτού αναλυθούν τα αποτελέσματα, υπογραμμίζεται πως ο χρόνος έναρξης διάδοσης της διάβρωσης μειώνεται εκθετικά με την μείωση της επικάλυψης του οπλισμού. Δηλαδή, για μικρές επικαλύψεις προκύπτει έναρξη της διάβρωσης σε λιγότερο από 4 έτη. Στη συνέχεια, φαίνεται πως οι μεγαλύτερες επικαλύψεις σκυροδέματος βελτιώνουν σημαντικά την συμπεριφορά του φορέα έναντι διάβρωσης, καθώς και στις δύο στάθμες επιτελεστικότητας που εξετάστηκαν προέκυψε χαμηλότερη πιθανότητα υπέρβασης για $c=50\text{mm}$ έναντι των αντίστοιχων καμπυλών για $c=40\text{mm}$ και $c=20\text{mm}$. Επίσης, για την LS1 δεν σημειώθηκαν σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των περιπτώσεων $c=50\text{mm}$ και $c=40\text{mm}$. Τέλος, με βάση τις καμπύλες τρωτότητας μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η διασπορά των μέσων τιμών τους μειώνεται καθώς η επικάλυψη σκυροδέματος αυξάνει καθώς προκύπτει καλύτερη συμπεριφορά της γέφυρας.

Συμπερασματικά, όπως φαίνεται η ποσοτικοποίηση της επιρροής της γήρανσης στις γέφυρες απαιτεί σύνθετη ανάλυση με διάφορες παραμέτρους. Με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας αποσαφηνίζεται η σημαντικότητα του πάχους της επικάλυψης του σκυροδέματος και η σωστή εφαρμογή των νέων κανονισμών των κατασκευών ως οι κυριότεροι λόγοι αποφυγής της μείωσης της σεισμικής τρωτότητας. Παρόλα αυτά, περαιτέρω έρευνα απαιτείται η οποία να

συμπεριλαμβάνει την επιρροή της διάβρωσης στα εφέδρανα μιας γέφυρας αλλά και κατά πόσο συνδυαστικά με τα βάθρα επηρεάζεται συνολικά η κατασκευή. Επιπλέον, προτείνεται η περαιτέρω μελέτη συνδυαστικών φαινομένων διάβρωσης και πλημμύρας σε αντίστοιχες γέφυρες με σκοπό την καλύτερη κατανόηση των πραγματικών συνθηκών που τις καταπονούν. Εν κατακλείδι, με γνώμονα τα ευρήματα αυτής της εργασίας, κρίνεται απαραίτητη η επιθεώρηση υφιστάμενων γεφυρών που προσεγγίζουν τη διάρκεια ζωής τους και είναι κατασκευασμένες με παλαιότερους κανονισμούς καθώς μικρές επικαλύψεις και φθορές λόγω διάβρωσης θα είναι ζητήματα που οι μηχανικοί θα κληθούν να αντιμετωπίσουν για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια των πολιτών κατά τη χρήση τους.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΚΩΔΙΚΑΣ OPENSEESPY

ΔΙΑΤΟΜΗ ΜΕΣΟΒΑΘΡΩΝ

```

if name == ' main ':
    bridge = Bridge()
    bridge.construct_model(1, 1, 1)
    bridge.solve_gravity()
    # vfo.plot_model(show_nodes='yes',
show nodetags='no', show eletags='no')
## P A R A M E T E R S ##

Con01 = 123456

Con04 = 1234567

RS = 12345678

As_reduced = As_reduced_value

fc_cover_reduced =
fc_cover_reduced_value

esu_reduced = esu_reduced_value

# uniaxialMaterial('Concrete04', matTag,
fc, epsc, epscu, Ec, fct, et, beta)

ops.uniaxialMaterial('Concrete04', Con04,
-16000*fc_cover_reduced, -0.0021, -0.0035,
28460548.93, 1900, 0.005)

# uniaxialMaterial('ReinforcingSteel',
matTag, fy, fu, Es, Esh, eps_sh, eps_ult, '-
GABuck', lsr, beta, r, gamma, '-DMBuck', lsr,
alpha=1.0, '-CMFatigue', Cf, alpha, Cd, '-
IsoHard', a1=4.3, limit=1.0, '-MPCurveParams',
R1=0.333, R2=18.0, R3=4.0)

ops.uniaxialMaterial('ReinforcingSteel',
RS, 400000, 500000, 200000000, 20000000,
0.005, esu_reduced*0.075)

# uniaxialMaterial('Concrete01', matTag,
fpc, epsc0, fpcu, epsU)

ops.uniaxialMaterial('Concrete01', Con01,
-25299, -0.0025, -21500, -0.0064)

# ops.uniaxialMaterial('Concrete01',
Con01, -26326, -0.0025, -21000, -0.0082)

#section('Fiber', secTag, '-GJ', GJ)
ops.section('Fiber', 12345, '-GJ',
10000000000)

# patch('circ', matTag, numSubdivCirc,
numSubdivRad, *center, *rad, *ang)

ops.patch('circ', Con01, 10, 10,
*[0.0,0.0],[0,0.40], *[0.0,360.0])

ops.patch('circ', Con04, 10, 10,
*[0.0,0.0],[0.40,0.42], *[0.0,360.0])

# layer('circ',
matTag,numFiber,areaFiber,*center,radius,*a
ng=[0.0,360.0-360/numFiber])

```

```
ops.layer('circ', RS,15,  
0.00031415926*As_reduced, *[0.0,0.0], 0.39,  
*[0.0,360.0-360/15])
```

```
# section('Aggregator', secTag, *mats, '-  
section', sectionTag
```

```
ops.section('Aggregator', ColSecTagM1b,  
ColMatTagAxial, 'P','-section', 12345)
```

ΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ PUSHOVER

```
##### # xlim=[0, 1], ylim=[0, 1], ax=False)
#####

# MODAL ANALYSIS #

##### plt.title(f'Mode {modeNo}')
#####

numEigen = 6 plt.show()

#eigenValues = ops.eigen('-fullGenLapack',
numEigen) # displ normalization maxU = 1

eigenValues = ops.eigen('-genBandArpack', sfac = 1000
numEigen) modeNo = 2

ops.modalProperties('-print', '-file', #opsv.plot_mode_shape(modeNo, sfac, 19,
'ModalReport.txt', '-unorm') az_el=(106., 46.))

sfac = 1000 vfo.plot_modeshape(modenumber=2,
scale=500, contour='x', line_width=2)

modeNo = 1 plt.title(f'Mode {modeNo}')

#opsv.plot_mode_shape(modeNo, sfac, 19, plt.show()
az_el=(106., 46.))

vfo.plot_modeshape(modenumber=1, sfac = 1000
scale=500, contour='y', line_width=2)

# opsv.anim_mode(1, sfac=300, nep=17, modeNo = 3
unDefoFlag=1, #opsv.plot_mode_shape(modeNo, sfac, 19,
az_el=(106., 46.))

# fmt_defo={'color': 'blue', 'linestyle': vfo.plot_modeshape(modenumber=3,
'solid', 'linewidth': 1.2, 'marker': '', 'markersize': scale=500, contour='y', line_width=2)
1},

# fmt_undefo={'color': 'green', plt.title(f'Mode {modeNo}')
'linestyle': (0, (1, 5)), 'linewidth': 1.2, 'marker':
'', 'markersize': 1},

# interpFlag=1, endDispFlag=1, Eo=0, plt.show()
az_el=(-60.0, 30.0), fig_wi_he=False,
fig_lbrt=False,
```

```

sfac = 1000
modeNo = 4
#opsv.plot_mode_shape(modeNo, sfac, 19,
az_el=(106., 46.))

vfo.plot_modeshape(modenumber=4,
scale=500, contour='y', line_width=2)
plt.title(f'Mode {modeNo}')

plt.show()

sfac = 1000
modeNo = 5
#opsv.plot_mode_shape(modeNo, sfac, 19,
az_el=(106., 46.))

vfo.plot_modeshape(modenumber=5,
scale=500, contour='y', line_width=2)
plt.title(f'Mode {modeNo}')

plt.show()

sfac = 1000
modeNo = 6
#opsv.plot_mode_shape(modeNo, sfac, 19,
az_el=(106., 46.))

vfo.plot_modeshape(modenumber=6,
scale=500, contour='y', line_width=2)
plt.title(f'Mode {modeNo}')

plt.show()

lamda1 = eigenValues[0]
lamda2 = eigenValues[1]
lamda3 = eigenValues[2]
lamda4 = eigenValues[3]

omega1 = pow(lamda1,0.5)
omega2 = pow(lamda2,0.5)
omega3 = pow(lamda3,0.5)
omega4 = pow(lamda4,0.5)

import math

T1 = 2*math.pi/omega1
T2 = 2*math.pi/omega2
T3 = 2*math.pi/omega3
T4 = 2*math.pi/omega4

print("T1 =",T1)
print("T2 =",T2)
print("T3 =",T3)
print("T4 =",T4)

#####
#####
# PUSHOVER ANALYSIS #
#####
#####

# Define lateral load - Longitudinal Direction

```

```

P = 1
ops.timeSeries('Linear', 33333333)
ops.pattern('Plain', 102, 33333333)
ops.load(66, P, 0, 0, 0, 0, 0)
ops.load(593, P, 0, 0, 0, 0, 0)
ops.load(594, P, 0, 0, 0, 0, 0)
ops.load(595, P, 0, 0, 0, 0, 0)
ops.load(959, P, 0, 0, 0, 0, 0)
ops.load(119, P, 0, 0, 0, 0, 0)
ops.load(596, P, 0, 0, 0, 0, 0)
ops.load(597, P, 0, 0, 0, 0, 0)
ops.load(598, P, 0, 0, 0, 0, 0)
ops.load(963, P, 0, 0, 0, 0, 0)
ops.load(151, P, 0, 0, 0, 0, 0)
ops.load(599, P, 0, 0, 0, 0, 0)
ops.load(595, P, 0, 0, 0, 0, 0)
ops.load(600, P, 0, 0, 0, 0, 0)
ops.load(601, P, 0, 0, 0, 0, 0)
ops.load(967, P, 0, 0, 0, 0, 0)
ops.load(183, P, 0, 0, 0, 0, 0)
ops.load(602, P, 0, 0, 0, 0, 0)
ops.load(603, P, 0, 0, 0, 0, 0)
ops.load(604, P, 0, 0, 0, 0, 0)
ops.load(1181, P, 0, 0, 0, 0, 0)
ops.load(432, P, 0, 0, 0, 0, 0)
ops.load(605, P, 0, 0, 0, 0, 0)
ops.load(606, P, 0, 0, 0, 0, 0)
ops.load(607, P, 0, 0, 0, 0, 0)
ops.load(974, P, 0, 0, 0, 0, 0)

#ops.recorder('Node', '-file', 'pushover-xx-
Tyears-0-uncorroded.txt', '-time', '-node', 600,
'-dof', 1, 'disp')

ControlNode = 600
ControlDOF = 1
DisplIncr = 0.001

ops.initialize()
ops.system("ProfileSPD")
ops.numberer("RCM")
ops.constraints("Plain")
ops.integrator("DisplacementControl",
ControlNode, ControlDOF, DisplIncr)
ops.algorithm("Newton")
ops.test('NormUnbalance', 0.2, 5000)
ops.analysis("Static")
NstepsPush = 500
# ops.analyze(NstepsPush)

dataPush1 = np.zeros((NstepsPush + 1, 2))
for j in range(NstepsPush):
    ops.analyze(1)
    dataPush1[j + 1, 0] =
ops.nodeDisp(ControlNode, 1)
    dataPush1[j + 1, 1] = ops.getTime()*26

#####
#Plot Curve#
#####

```



```

ops.load(183, 0, P, 0, 0, 0, 0)
ops.load(602, 0, P, 0, 0, 0, 0)
ops.load(603, 0, P, 0, 0, 0, 0)
ops.load(604, 0, P, 0, 0, 0, 0)
ops.load(1181, 0, P, 0, 0, 0, 0)
ops.load(432, 0, P, 0, 0, 0, 0)
ops.load(605, 0, P, 0, 0, 0, 0)
ops.load(606, 0, P, 0, 0, 0, 0)
ops.load(607, 0, P, 0, 0, 0, 0)
ops.load(974, 0, P, 0, 0, 0, 0)

#ops.recorder('Node', '-file', 'pushover-yy-
Tyears-0-uncorroded.txt', '-time', '-node', 600,
'-dof', 2, 'disp')

ControlNode = 600
ControlDOF = 2
DispIncr = 0.001

ops.initialize()
ops.system("ProfileSPD")
ops.numberer("RCM")
ops.constraints("Plain")
ops.integrator("DisplacementControl",
ControlNode, ControlDOF, DispIncr)
ops.algorithm("Newton")
ops.test('NormUnbalance', 0.06, 10000)
ops.analysis("Static")
NstepsPush = 500
#ops.analyze(NstepsPush)

dataPush6 = np.zeros((NstepsPush + 1, 2))
for j in range(NstepsPush):
    ops.analyze(1)
    dataPush6[j + 1, 0] =
ops.nodeDisp(ControlNode, 2)
    dataPush6[j + 1, 1] = ops.getTime()*26

#####
#Plot Curve#
#####

plt.plot(dataPush6[:, 0], dataPush6[:, 1],
color='r', marker='o', ms='1',
label='Uncorroded')

plt.plot(dataPush7[:, 0], dataPush7[:, 1],
color='b', marker='o', ms='1', label='icor=0.1')

plt.plot(dataPush8[:, 0], dataPush8[:, 1],
color='g', marker='o', ms='1', label='icor=1')

plt.plot(dataPush9[:, 0], dataPush9[:, 1],
color='y', marker='o', ms='1', label='icor=2')

plt.plot(dataPush10[:, 0], dataPush10[:, 1],
color='m', marker='o', ms='1', label='icor=5')

MaxDisp = 1
# plt.xlim(0, 1)
legend = plt.legend(loc='lower center')
plt.title('T=125years')
plt.grid(linestyle='dotted')
plt.xlabel('Top Displacement [m]')
plt.ylabel('Base Shear [kN] ')
plt.show()
print("OK-Y")

```

ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

```
import openseespy.opensees as ops
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import math

ops.wipe()
ops.model('basic', '-ndm', 2, '-ndf', 3)

Con01 = 123456
Con04 = 1234567
RS = 12345678

As_reduced = 1
fc_cover_reduced = 1
esu_reduced = 1

# uniaxialMaterial('Concrete04', matTag, fc,
eps_c, eps_cu, E_c, fct, et, beta)
ops.uniaxialMaterial('Concrete04', Con04, -
16000*fc_cover_reduced, -0.0021, -0.0035,
28460548.93, 1900, 0.005)

# uniaxialMaterial('ReinforcingSteel', matTag,
fy, fu, Es, Esh, eps_sh, eps_ult, '-GABuck', lsr,
beta, r, gamma, '-DMBuck', lsr, alpha=1.0, '-
CMFatigue', Cf, alpha, Cd, '-IsoHard', a1=4.3,
limit=1.0, '-MPCurveParams', R1=0.333,
R2=18.0, R3=4.0)
ops.uniaxialMaterial('ReinforcingSteel', RS,
400000, 500000, 200000000, 20000000, 0.005,
esu_reduced*0.075)

# uniaxialMaterial('Concrete01', matTag, fpc,
eps_c0, fpcu, eps_u)
ops.uniaxialMaterial('Concrete01', Con01, -
25299, -0.0025, -21500, -0.0064)

EACol = 18106601.23
ColMatTagAxial = 3333 # assign a tag number
to the column axial behavior

ops.uniaxialMaterial('Elastic', ColMatTagAxial,
EACol)

#section('Fiber', secTag, '-GJ', GJ)
ops.section('Fiber', 12345, '-GJ', 10000000000)

# patch('circ', matTag, numSubdivCirc,
numSubdivRad, *center, *rad, *ang)
ops.patch('circ', Con01, 10, 10,
*[0.0,0.0],[0.0,0.40],[0.0,360.0])

ops.patch('circ', Con04, 10, 10,
*[0.0,0.0],[0.40,0.45],[0.0,360.0])

# layer('circ',
matTag,numFiber,areaFiber,*center,radius,*a
ng=[0.0,360.0-360/numFiber])
ops.layer('circ', RS,15,
0.00031415926*As_reduced, *[0.0,0.0], 0.39,
*[0.0,360.0-360/15])

# section('Aggregator', secTag, *mats, '-
section', sectionTag
ops.section('Aggregator', 1, ColMatTagAxial,
'P','-section', 12345)
```

```

numIncr = 200

ops.node(1,0,0)
ops.node(2,0,0)

ops.fix(1,1,1,1)
ops.fix(2,0,1,0)

ops.element('zeroLengthSection',1,1,2,1)

ops.timeSeries('Constant', 1)
ops.pattern('Plain', 1, 1)
ops.load(2, P, 0, 0)

# Define analysis parameters
ops.integrator('LoadControl', 0.0)
ops.system('SparseGeneral', '-piv')
ops.test('NormUnbalance', 1e-9, 10)
ops.numberer('Plain')
ops.constraints('Plain')
ops.algorithm('Newton')
ops.analysis('Static')
ops.analyze(1)

# Define reference moment
ops.timeSeries('Linear', 2)
ops.pattern('Plain',2, 2)
ops.load(2, 0.0, 0.0, 1.0)

# Use displacement control at node 2 for
section analysis
ops.integrator('DisplacementControl',
2,3,0.0001)

# Do the section analysis
#ops.analyze(numIncr)

data1 = np.zeros((numIncr+1,2))
for j in range(numIncr):
    ops.analyze(1)
    data1[j+1,0] = ops.nodeDisp(2,3)
    data1[j+1,1] = ops.getLoadFactor(2)

ops.wipe()

Con01 = 123456
Con04 = 1234567
RS = 12345678

As_reduced = 0.5
fc_cover_reduced = 0.5
esu_reduced = 0.5

# uniaxialMaterial('Concrete04', matTag, fc,
eps_c, eps_s_c, Ec, fct, et, beta)
ops.uniaxialMaterial('Concrete04', Con04, -
16000*fc_cover_reduced, -0.0021, -0.0035,
28460548.93, 1900, 0.005)

# uniaxialMaterial('ReinforcingSteel', matTag,
fy, fu, Es, Esh, eps_sh, eps_ult, '-GABuck', lsr,

```

```

beta, r, gamma, '-DMBuck', lsr, alpha=1.0, '-
CMFatigue', Cf, alpha, Cd, '-IsoHard', a1=4.3,
limit=1.0, '-MPCurveParams', R1=0.333,
R2=18.0, R3=4.0)

ops.uniaxialMaterial('ReinforcingSteel', RS,
400000, 500000, 200000000, 20000000, 0.005,
esu_reduced*0.075)

# uniaxialMaterial('Concrete01', matTag, fpc,
epsC0, fpcu, epsU)

ops.uniaxialMaterial('Concrete01', Con01, -
25299, -0.0025, -21500, -0.0064)

EACol = 18106601.23

ColMatTagAxial = 3333 # assign a tag number
to the column axial behavior

ops.uniaxialMaterial('Elastic', ColMatTagAxial,
EACol)

#section('Fiber', secTag, '-GJ', GJ)

ops.section('Fiber', 12345, '-GJ', 10000000000)

# patch('circ', matTag, numSubdivCirc,
numSubdivRad, *center, *rad, *ang)

ops.patch('circ', Con01, 10, 10,
*[0.0,0.0],*[0.0,0.40], *[0.0,360.0])

ops.patch('circ', Con04, 10, 10,
*[0.0,0.0],*[0.40,0.45], *[0.0,360.0])

# layer('circ',
matTag,numFiber,areaFiber,*center,radius,*a
ng=[0.0,360.0-360/numFiber])

ops.layer('circ', RS,15,
0.00031415926*As_reduced, *[0.0,0.0], 0.39,
*[0.0,360.0-360/15])

# section('Aggregator', secTag, *mats, '-
section', sectionTag

ops.section('Aggregator', 1, ColMatTagAxial,
'P','-section', 12345)

numIncr = 200
maxk = 0.05

ops.node(1,0,0)
ops.node(2,0,0)

ops.fix(1,1,1,1)
ops.fix(2,0,1,0)

ops.element('zeroLengthSection',1,1,2,1)

ops.timeSeries('Constant', 1)
ops.pattern('Plain', 1, 1)
ops.load(2, P, 0, 0)

# Define analysis parameters
ops.integrator('LoadControl', 0.0)
ops.system('SparseGeneral', '-piv')
ops.test('NormUnbalance', 1e-9, 10)

ops.numberer('Plain')
ops.constraints('Plain')
ops.algorithm('Newton')
ops.analysis('Static')
ops.analyze(1)

# Define reference moment

```

```

ops.timeSeries('Linear', 2)                                plt.show()
ops.pattern('Plain',2, 2)
ops.load(2, 0.0, 0.0, 1.0)

# Use displacement control at node 2 for
section analysis

ops.integrator('DisplacementControl',
2,3,0.0001)

# Do the section analysis
#ops.analyze(numIncr)

data2 = np.zeros((numIncr+1,2))
for j in range(numIncr):
    ops.analyze(1)
    data2[j+1,0] = ops.nodeDisp(2,3)
    data2[j+1,1] = ops.getLoadFactor(2)

plt.plot(data1[:,0], data1[:,1],c = 'r',marker =
'o',ms = '2', label='Uncorroded')

plt.plot(data2[:,0], data2[:,1],c = 'b',marker =
'o',ms = '2', label='Corroded')

#plt.hlines(P/5, 0, 1,colors = 'r',linestyle
='dashdot',label = 'buckling load')

#plt.legend(["load path", "buckling load"], loc
="lower right")

#plt.xlim(0,0.026 )

legend = plt.legend(loc='lower center')

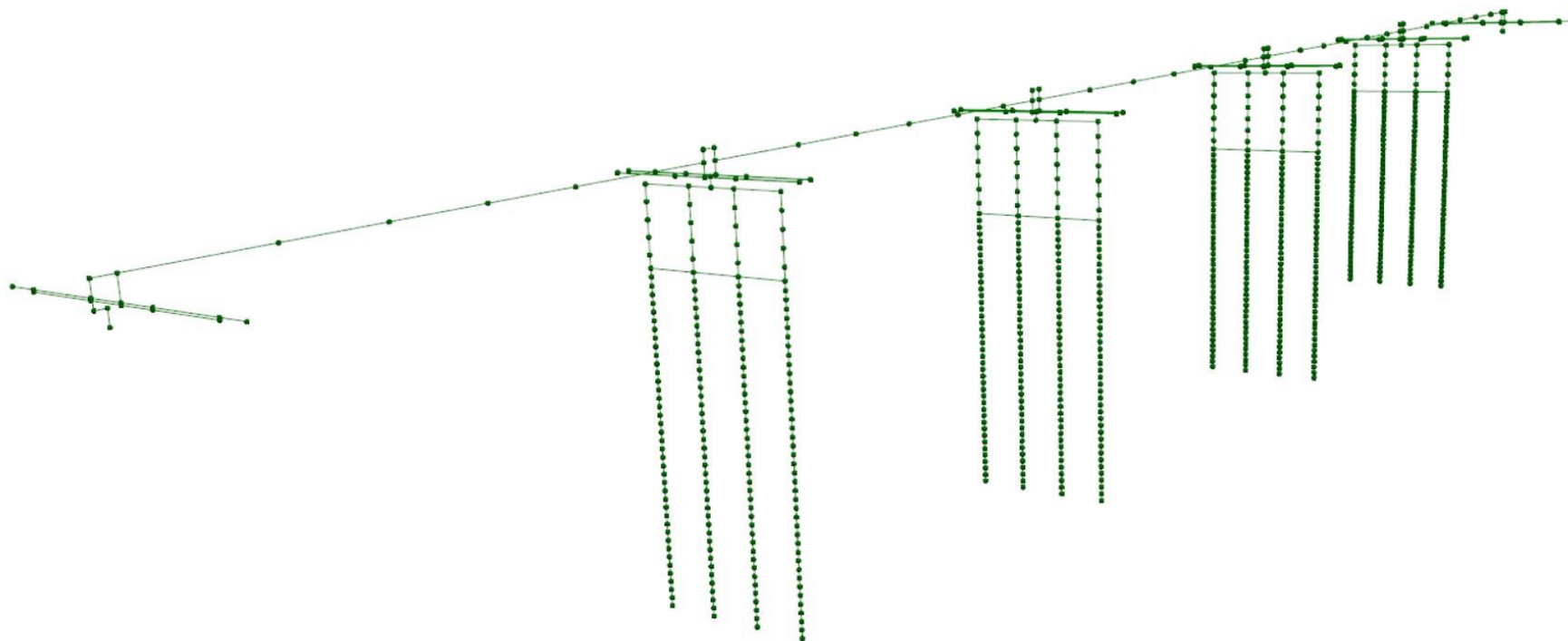
plt.grid(True)

plt.xlabel(' curvature')

plt.ylabel('Moment(kNm)')

```

ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΦΟΡΕΑ ΓΕΦΥΡΑΣ



BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Jayadipta Ghosh & Jamie E. Padgett, 2010, "Aging Considerations in the Development of Time-Dependent Seismic Fragility Curves", ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 136, No. 12, December 1, 2010. ©ASCE, ISSN 0733-9445/2010/12-1497–1511/\$25.00
2. Do-Eun Choe, Paolo Gardoni, David Rosowsky, Terje Haukaas, 2008," Seismic fragility estimates for reinforced concrete bridges subject to corrosion", Elsevier.
3. Chao Li, Hong Hao, Kaiming Bi, & Hongnan Li, 2014, "Life-Cycle Seismic Response Analysis of RC Bridges Considering Chloride Induced Corrosion", Australian Earthquake Engineering Society 2014 Conference
4. Sicong Hu , Zheyang Wang, Yu Guo & Gui Xiao, 2021, "Life-Cycle Seismic Fragility Assessment of Existing RC Bridges Subject to Chloride-Induced Corrosion in Marine Environment", Hindawi, Advances in Civil Engineering Volume 2021, Article ID 9640521
5. Shivang Shekhar, Jayadipta Ghosh & Jamie E. Padgett, 2018, "Seismic life-cycle cost analysis of ageing highway bridges under chloride exposure conditions: modelling and recommendations", Structure and Infrastructure Engineering Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance, ISSN: 1573-2479.
6. Daniel Herrera and Dante Tolentino, 2023, "Fragility Assessment of RC Bridges Exposed to Seismic Loads and Corrosion over Time", Materials 2023, 16, 1100
7. Fengkun Cui, Haonan Zhang, Michel Ghosnb & Yue Xu, 2018, "Seismic fragility analysis of deteriorating RC bridge substructures subject to marine chloride-induced corrosion", Engineering Structures, Volume 155, 15 January 2018, Pages 61-72, Elsevier Ltd
8. Michael P. Enright and Dan M. Frangopol, 1998, "Probabilistic analysis of resistance degradation of reinforced concrete bridge beams under corrosion", Engineering Structures, Vol. 20, No. 11, pp. 960–971, 1998 Published by Elsevier Science Ltd
9. Yu Liu, Hong Hao & Yifei Hao, 2018, "Blast fragility analysis of RC columns considering chloride-induced corrosion of steel reinforcement", Structural Safety Volume 96, May 2022, Published by Elsevier Science Ltd
10. Zhen Cui & Alice Alipour, 2017, "Concrete cover cracking and service life prediction of reinforced concrete structures in corrosive environments", Construction and Building Materials 159 (2018) 652–671, Elsevier Ltd
11. M. R. Seify Asghshahr & A. R. Rahai, 2018, "Pushover Analysis of Reinforced Concrete Bridges under Chloride-Induced Corrosion", Amirkabir Journal of Civil Engineering, 50(1) (2018) pg:27-30
12. Kaveh Andisheh, Allan Scott & Alessandro Palermo, 2016, "Seismic Behavior of Corroded RC Bridges: Review and Research Gaps", Hindawi Publishing Corporation, International Journal of Corrosion
13. Jayadipta Ghosh & Piyush Sood, 2016, "Consideration of time-evolving capacity distributions and improved degradation models for seismic fragility assessment of aging highway bridges", Reliability Engineering and System Safety 154 (2016) 197–218, Elsevier Ltd
14. R. Kumar, P. Gardoni & M. Sanchez-Silva, 2008, "Effect of cumulative seismic damage and corrosion on the life-cycle cost of reinforced concrete bridges", Wiley InterScience

15. Taner Yilmaz & Onur Cem Aygin, 2019, "Time-dependent seismic risk of regular highway bridges under the effect of structural deterioration", Conference: Earthquake risk and engineering towards a resilient world, London
16. Xiaoxiao Liu, Wenbin Zhang, Peng Sun & Ming Liu, 2022, "Time-Dependent Seismic Fragility of Typical Concrete Girder Bridges under Chloride-Induced Corrosion", *Materials* 2022, 15, 5020
17. Tran Luu, 2021, "Corrosion prevention & solutions in system of pipelines", Centria University of Applied Sciences : Environmental Engineering and Chemical Technology Programme
18. Zhicheng Gao, Robert Y. Liang & Anil K. Patnaik, 2017, "Probabilistic lifetime performance and structural capacity analysis of continuous reinforced concrete slab bridges", *Int J Adv Struct Eng* (2017) 9:231–245.
19. John P. Broomfield, 2007, "Corrosion of Steel in Concrete", pg:16-30
20. Kefei Li, 2016, "Durability Design of Concrete Structures", pg: 29-55
21. Mark G. Richardson, 2002, "Fundamentals of Durable Reinforced Concrete", pg: 77-132
22. Thomas Dyer, 2014, "Concrete Durability", pg:183-238, CRC Press
23. Auchib Reza, Musawer Ahmad Saqif, Saifa Anzum & Arif Mohammad Aziz, 2018, "Review of Corrosive Behavior and Possible Protective Measures for Reinforcing Bars", *International Journal of Engineering & Technology*
24. Schießl, P., Bamforth, P., Baroghel-Bouny, V., Corley, G., Faber, M., Gehlen, C., Helland, S., Ishida, T., Helene, P., Markeset, G., Nilsson, L.-O., & Rostam, S., 2006, *fib bulletin 34: Model Code for Service Life Design*, The International Federation for Structural Concrete
25. Stuart L. Matthews, *fib Bulletin 53: Structural Concrete – Textbook on behaviour, design and performance*, vol. 3, The International Federation for Structural Concrete
26. Mark G. Stewart, 2004, "Spatial variability of pitting corrosion and its influence on structural fragility and reliability of RC beams in flexure", *Structural Safety* 26 (2004) 453–470, Elsevier
27. J.B. Mander, M.J.N Priestley & R.Park, 1988, "Theoretical stress-strain model for confined concrete", *Journal of structural engineering*, vol. 114, no. 8, asce
28. D. Vamvatsikos & M. Fragiadakis, 2006, "Seismic performance sensitivity of a 9-story steel frame to plastic hinge modeling uncertainties", *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (a joint event of the 13th ECEE & 30th General Assembly of the ESC)*, Geneva, Switzerland, 3-8 September 2006, Paper Number: 657
29. K. D. Pitilakis , S. T. Karapetrou & S. D. Fotopoulou, 2013, "Consideration of aging and SSI effects on seismic vulnerability assessment of RC buildings", *Bulletin of Earthquake Engineering*
30. Sotiria P. Stefanidou & Andreas J. Kappos, 2018, "Bridge-specific fragility analysis: when is it really necessary?", *Bulletin of Earthquake Engineering*
31. Sotiria P. Stefanidou & Andreas J. Kappos, 2017, "Methodology for the development of bridge-specific fragility curves", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 46(1), pp. 73-93
32. Sotiria Stefanidou, Olga Markogiannaki, Ioannis Mikes & Michalis Fragiadakis, "Multiple hazard assessment of bridges considering interdependencies", *ce/papers* 6 (2023), No. 5
33. GEOSICA & Torroja Institute, "A validated Users Manual for assessing the residual service life of concrete structures", Innovation Project CONTECVET (IN309021)

34. Μάργαρης, Β. (ΙΤΣΑΚ-ΟΑΣΠ), Κλήμης, Ν. (Δ.Π.Θ.), Σέξτος, Α. (Ε.Τ.Α.Μ.), 2022, “Σεισμική ακολουθία Θεσσαλίας, Μάρτιος 2021 Τεχνική Έκθεση
35. Θεόδωρος Αγγελόπουλος, 2021, “Ανάλυση σεισμικής απόκρισης υποστυλώματος σε διαβρωτικό περιβάλλον”, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών
36. Αναστάσιος Κοτσαμπόπουλος, 2009, “Διάβρωση με βελονισμούς συγκολλήσεων και μη ελασμάτων: μηχανισμοί δημιουργίας και επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες”, Ε.Μ.Π., Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών
37. Παπαδάκη Ελίνα-Μαργαρίτα, 2017, “Αξιολόγηση της σεισμικής απόκρισης και διερεύνηση εναλλακτικού σχεδιασμού σιδηροδρομικής γέφυρας με χρήση του λογισμικού OpenSees”, Ε.Μ.Π., Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
38. Νικόλαος Τσουλός, 2021, “Η καθοδική προστασία ως μέθοδος αντιμετώπισης της διάβρωσης του χάλυβα σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος”, Ε.Α.Π., Σχολή Θετικών Επιστημών & Τεχνολογίας, Πρόγραμμα Σπουδών: «Διαχείριση Τεχνικών Έργων»
39. Φιλιππάτος Λάμπρος, 2021, “Διερεύνηση σεισμικής απόκρισης γέφυρας από σκυρόδεμα με λικνιζόμενα βάρθρα”, Ε.Μ.Π., Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών: «Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών»
40. Γιώργος Νασιόπουλος, 2018, “Σεισμική Τρωτότητα Γεφυρών Συνεκτιμώντας τη Γήρανση των Υλικών και την Αλληλεπίδραση Εδάφους – Κατασκευής”, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή - Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών «Αειφόρος Σχεδιασμός Τεχνικών Έργων έναντι σεισμού και άλλων φυσικών κινδύνων»
41. Ερμιόνη Μ. Μανουσέλη, 2012, “Ανάλυση της εγκάρσιας φόρτισης πασσάλου σε συνεκτικά εδάφη με αριθμητικές μεθόδους”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών