



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ

**ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ
ΣΤΗΝ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΩΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΝΑΝΤΙ
ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΙΕΓΕΡΣΕΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Καλημέρη

Επιβλέπων: Σάββας Τριανταφύλλου, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2021

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Σάββα Τριανταφύλλου, Επίκουρο Καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ, για την ανάθεση του θέματος και την επίβλεψή του στην πορεία συγγραφής της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η οποία κατέστη δυνατή, χάρη στην πολύτιμη και διαρκή βοήθεια, καθοδήγηση και υπομονή από μέρους του καθ' όλη την διάρκεια υλοποίησής της.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μελέτη και κατασκευή των γεφυρών συνδέεται άμεσα με την επιστήμη του πολιτικού μηχανικού. Οι υπηρεσίες του όμως δεν περιορίζονται μόνο στα στάδια πριν την έναρξη λειτουργίας της γέφυρας, αλλά είναι απαραίτητες και κατά την διάρκεια ζωής του έργου, μέσω της απαίτησης για συντήρηση. Ο χρόνος ζωής σχεδιασμού μιας γέφυρας, λαμβανόμενης υπόψιν της συντήρησης, κυμαίνεται από τα 40 έως τα 150 χρόνια, ανάλογα από τον τύπο της δομής και την τοποθεσία (Hallberg, 2005). Η διάρκεια αυτή τείνει να περιοριστεί λόγω της εμφάνισης παραγόντων που επιδρούν σταδιακά ή στιγμιαία στην κατασκευή και επιταχύνουν την γήρανση ή ακόμη και την μερική ή ολική αστοχία. Ένας βασικός παράγοντας είναι η διάβρωση σε γέφυρες ωπλισμένου σκυροδέματος, αλλά υπάρχουν και άλλοι εξίσου σημαντικοί όπως ο σεισμός, η κόπωση, οι πυρκαγιές κ.α.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε ένα υπολογιστικό περιβάλλον για την προσομοίωση της εξέλιξης του φαινομένου της διάβρωσης στον οπλισμένο κατασκευών ωπλισμένου σκυροδέματος. Χρησιμοποιώντας το περιβάλλον αυτό, εξετάστηκε η επίδραση της διάβρωσης στην επιτελεστικότητα ενός κτιριακού φορέα και μιας γέφυρας, υπό την επίδραση σεισμικής διέγερσης. Όλοι οι υπολογισμοί και έλεγχοι έγιναν σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab. Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για τον έλεγχο της επιρροής της διάβρωσης είναι πιθανοτική ανάλυση Crude Monte Carlo, ενώ η σεισμική ανάλυση πραγματοποιήθηκε μέσω κατάλληλου προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό OpenSees.

Οι πιθανότητες αστοχίας που προέκυψαν είναι εντός των προβλεπόμενων ορίων για το πλαίσιο, ενώ δεν ικανοποιούν τις απαιτήσεις για την γέφυρα, αποδεικνύοντας ότι η μεθοδολογία είναι δυσμενής για την γέφυρα αλλά και ότι απαιτούνται επιμέρους τροποποιήσεις και βελτιώσεις της μεθόδου ούτως ώστε να αποτελέσει μια τελειοποιημένη μέθοδο για μελλοντική χρήση. Τα αποτελέσματα πάντως, καθιστούν σαφή την ανάγκη μελέτης της διάβρωσης, η οποία σε συνδυασμό με σεισμική διέγερση μπορεί να υποβαθμίσει την αντοχή του έργου, οπότε θα πρέπει να ελέγχεται στον σχεδιασμό αλλά και στις υφιστάμενες κατασκευές.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
1.1	ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	5
1.2	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	6
1.3	ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ	6
1.4	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	7
1.5	ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΟΥ ΤΕΥΧΟΥΣ	8
2	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	10
2.1	ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΜΕΛΩΝ ΩΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	10
2.2	ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ Ω/Σ	16
2.3	ΣΤΑΘΜΕΣ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	19
2.4	ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ	21
2.5	ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	22
3	ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΟΥ-ΣΤΥΛΟΥ	26
3.1	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΙΝΩΝ ΔΟΚΟΥ/ ΣΤΥΛΟΥ	26
3.2	ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	30
3.3	ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΧΑΛΥΒΑ	32
4	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΑΤΛΑΒ	35
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	35
4.2	ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ MONTE CARLO	35
4.3	ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΑΡΧΕΙΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ OPENSEES	39
4.4	ΜΕΤΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ	40
5	ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	42
5.1	ΕΠΙΠΕΔΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	47
5.1.1	<i>Περισφιγμένο σκυρόδεμα διατομής χωρίς απομείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του.</i>	48
5.1.2	<i>Περισφιγμένο σκυρόδεμα διατομής με απομείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του λόγω διάβρωσης.</i>	49
5.2	ΓΕΦΥΡΑ ΤΡΙΩΝ ΑΝΟΙΓΜΑΤΩΝ	68
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ	82

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Περίληψη του προβλήματος

Η μελέτη και κατασκευή των γεφυρών συνδέεται άμεσα με την επιστήμη του πολιτικού μηχανικού. Οι υπηρεσίες του όμως δεν περιορίζονται μόνο στα στάδια πριν την έναρξη λειτουργίας της γέφυρας, αλλά είναι απαραίτητες και κατά την διάρκεια ζωής του έργου, μέσω της απαίτησης για συντήρηση. Ο χρόνος ζωής σχεδιασμού μιας γέφυρας, λαμβανόμενης υπόψιν της συντήρησης, κυμαίνεται από τα 40 έως τα 150 χρόνια, ανάλογα από τον τύπο της δομής και την τοποθεσία (Hallberg, 2005). Η διάρκεια αυτή τείνει να περιοριστεί λόγω της εμφάνισης παραγόντων που επιδρούν σταδιακά ή στιγμιαία στην κατασκευή και επιταχύνουν την γήρανση ή ακόμη και την μερική ή ολική αστοχία. Ένας βασικός παράγοντας είναι η διάβρωση σε γέφυρες ωπλισμένου σκυροδέματος, αλλά υπάρχουν και άλλοι εξίσου σημαντικοί όπως ο σεισμός, η κόπωση, οι πυρκαγιές κ.α.

Προφανώς, η συντήρηση του έργου συνεπάγεται ένα σημαντικό οικονομικό κόστος, όμως, προκύπτει πιο οικονομική η προληπτική μέριμνα όταν πρόκειται για συντήρηση, σε σχέση με την μέριμνα αποκατάστασης έπειτα από κάποια ζημιά ή αστοχία. Η προληπτική συντήρηση επεκτείνει την διάρκεια ζωής του έργου και εντοπίζει τα προβλήματα σε πρώιμο στάδιο, άρα όσο μικρότερο το πρόβλημα τόσο λιγότερο το κόστος. Γενικά, το κόστος της συντήρησης είναι συνάρτηση των διαστάσεων και των υλικών της γέφυρας, της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται από την εκάστοτε υπηρεσία και του βαθμού της πρόληψης ή αποκατάστασης που απαιτείται. Σχετική μελέτη δείχνει ότι η τιμή του συνολικού κόστους ζωής για γέφυρα με κιβωτιοειδή ανωδομή, από την κατασκευή της έως και το 100ο έτος που θεωρείται το τελευταίο έτος συντήρησης, είναι τα 5,98 εκατομμύρια (Grace et al., 2012).

Η συντήρηση ενός υφιστάμενου έργου υποδομής είναι εξαιρετικής σημασίας, πρωτίστως για την ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής από απρόβλεπτες ζημιές ή αστοχίες, όμως η σημαντικότητά της επεκτείνεται και σε κοινωνικό, οικονομικό και περιβαλλοντικό επίπεδο. Ο ρόλος της ύπαρξης ενός έργου υποδομής είναι εν γένει η εξυπηρέτηση και διευκόλυνση του ανθρώπου, επομένως όσο περισσότερο διατηρηθεί στον χρόνο τόσο το καλύτερο για την κοινωνία και τα μέλη της. Θα ήταν εύλογο να αναρωτηθεί κανείς αν συμφέρει οικονομικά να κατασκευάζονται πιο συχνά γέφυρες

χωρίς επιθεώρηση και συντήρηση που αστοχούν πιο γρήγορα από το να ελέγχονται και να συντηρούνται όσο μακροβιότερα γίνεται οι υφιστάμενες γέφυρες. Όπως αναφέρθηκε, η συντήρηση του έργου συνεπάγεται ένα σημαντικό οικονομικό κόστος, αλλά το μεγαλύτερο ποσοστό οφείλεται στο κόστος χρήσης που σύμφωνα με τους Grace et al. (2012) είναι περίπου 4,55 δισεκατομμύρια όταν το συνολικό κόστος είναι 5,98 δισεκατομμύρια. Το κόστος χρήσης περιέχει τα κόστη καθυστέρησης που προκύπτουν κατά την κατασκευή και την συντήρηση του έργου και είναι το άθροισμα του επιπλέον χρόνου οδήγησης, κόστους λειτουργίας και συντήρησης του οχήματος. Άρα προκύπτει το συμπέρασμα ότι θα ήταν πιο κοστοβόρο να περιορίζεται η κυκλοφορία για ένα πολύ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για κατασκευή μιας γέφυρας από την αρχή, συγκριτικά με το μικρότερο αθροιστικά διάστημα για συντήρηση στη διάρκεια ζωής του έργου. Τέλος, δεδομένου ότι μια γέφυρα συνυπάρχει και αλληλεπιδρά πάντοτε με το φυσικό περιβάλλον και τα φαινόμενα του, είναι ξεκάθαρο ότι η συντήρηση είναι συνάρτηση των φυσικών φαινομένων και του χρόνου. Άρα όσο υφίστανται αυτά τα δύο, η συντήρηση θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψιν.

Με γνώμονα τα παραπάνω, προκύπτει επιτακτική η ανάγκη μελέτης της διάβρωσης και η μέριμνα για την ανάλογη λήψη μέτρων, όλων των υφιστάμενων υποδομών που βρίσκονται σε λειτουργία, πόσο μάλλον αυτών που κατασκευάστηκαν τον προηγούμενο αιώνα, με ξεπερασμένη γνώση και τεχνολογία.

1.2 Αντικείμενο της εργασίας

Στην παρούσα εργασία θα γίνει θεωρητική και υπολογιστική ανάπτυξη του προβλήματος της διάβρωσης που προκύπτει στην διάρκεια ζωής της γέφυρας και γενικά των κατασκευών ωπλισμένου σκυροδέματος και οδηγεί στην ανάγκη συντήρησης. Το πρόβλημα της διάβρωσης, που αφορά τον χάλυβα οπλισμού της κατασκευής, θα μελετηθεί σε συνδυασμό με την εμφάνιση σεισμικής καταπόνησης στην κατασκευή ωπλισμένου σκυροδέματος με σκοπό τον έλεγχο των απαιτήσεων επιτελεστικότητας.

1.3 Σκοπός και ερευνητικοί στόχοι

Σκοπός είναι η ανάπτυξη μιας υπολογιστικής μεθοδολογίας, που θα προσαρμόζεται στα δεδομένα μιας υφιστάμενης γέφυρας ωπλισμένου σκυροδέματος και θα δίνει

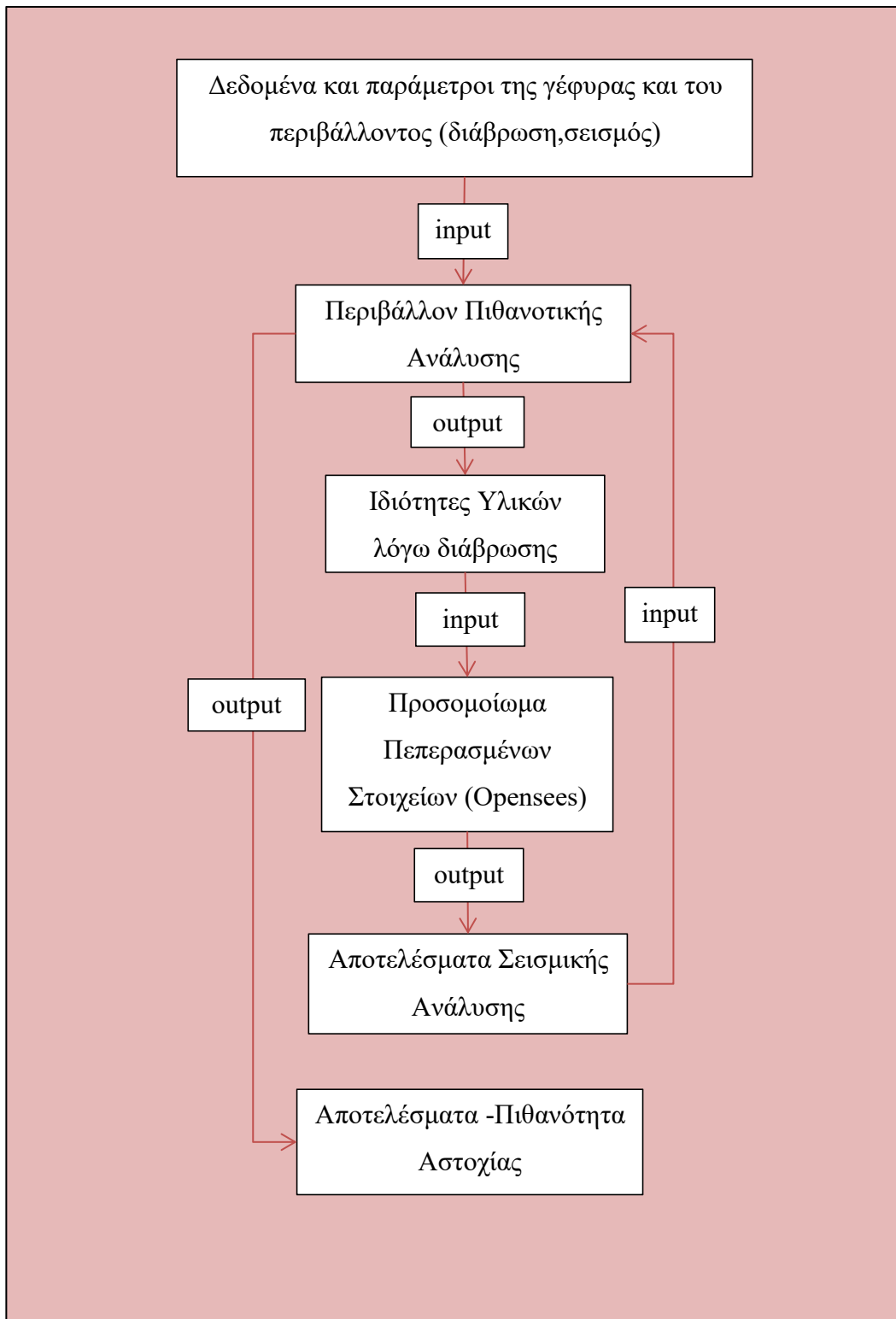
πιθανότητες αστοχίας λόγω της διάβρωσης και του σεισμού, με απώτερο σκοπό την πρόληψη της αστοχίας με κατάλληλα μέτρα συντήρησης και επισκευής.

Οι βασικοί στόχοι της εργασίας είναι :

- Η κατανόηση της σημαντικότητας των φαινομένων της διάβρωσης και του σεισμού στη ζωή μιας γέφυρας, μέσω βιβλιογραφικής έρευνας.
- Η κριτική παρουσίαση όλων των παραμέτρων που επηρεάζουν τα ανωτέρω.
- Η προσομοίωση της επιρροής του σεισμού στην κατασκευή μέσα από κατάλληλο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων που θα υπολογίζει τα εντατικά και παραμορφωσιακά μεγέθη της ανάλυσης.
- Η δημιουργία κατάλληλου περιβάλλοντος πιθανοτικής ανάλυσης που θα λαμβάνει υπόψιν τις αβεβαιότητες της διάβρωσης και θα μεταβάλλει τις ιδιότητες που επηρεάζονται λόγω αυτής, καταλήγοντας τελικά στον υπολογισμό της πιθανότητας αστοχίας της υφιστάμενης γέφυρας.
- Η συλλογή συμπερασμάτων από τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

1.4 Μεθοδολογία

Η διαδικασία επίλυσης του προβλήματος έχει ως αφετηρία την κωδικοποίηση των δεδομένων της κατασκευής σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab, που αποτελεί και το περιβάλλον της πιθανοτικής ανάλυσης. Στο πλαίσιο αυτού του περιβάλλοντος υπολογίζεται ο χρόνος έναρξης της διάβρωσης, όπου ακολουθείται από το προσομοίωμα της σεισμικής ανάλυσης της κατασκευής. Η μοντελοποίηση του σεισμού γίνεται μέσω κατάλληλου λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων (OpenSees) που καλείται από το Matlab. Τα εντατικά και παραμορφωσιακά μεγέθη που προκύπτουν από την ανάλυση συγκρίνονται με τις απαιτήσεις των ελέγχων και προκύπτει η πιθανότητα αστοχίας λόγω διάβρωσης και σεισμού.



Σχ. 1: Διάγραμμα μεθοδολογίας

1.5 Περίληψη της δομής του τεύχους

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται όλο το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο βασίστηκε η μαθηματική επίλυση και το οποίο αφορά το πρόβλημα της διάβρωσης, την σεισμική

ανάλυση, τους ελέγχους με βάση την επιτελεστικότητα και την μέθοδο της πιθανοτικής ανάλυσης. Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα πεπερασμένα στοιχεία ινών δοκού-στύλου με τα οποία γίνεται η μη γραμμική ανάλυση κατασκευών, στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η διαδικασία υπολογισμού της πιθανότητας αστοχίας, στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών και η πιθανότητα αστοχίας και στο κεφάλαιο 6 αναπτύσσονται τα συμπεράσματα των αποτελεσμάτων.

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

2.1 Διάβρωση μελών Ωπλισμένου Σκυροδέματος

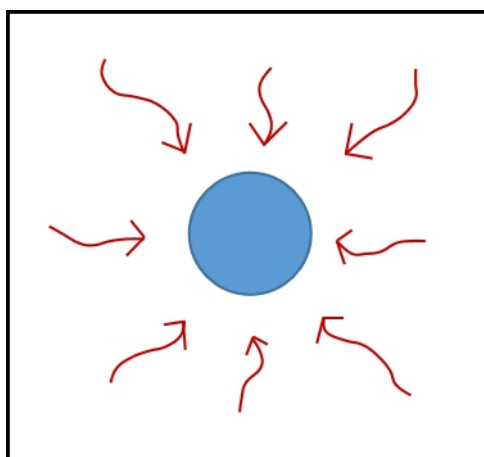
Η διάβρωση είναι το αποτέλεσμα της διάχυσης ιόντων χλωρίου (χλωριόντα) μέσω του σκυροδέματος στο χάλυβα, με συνέπεια την υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα και στη συνέχεια και του σκυροδέματος. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται όταν υπάρχει χρόνια έκθεση του σκυροδέματος σε ιόντα χλωρίου, σε συνδυασμό με υγρασία και οξυγόνο. Τα χλωριόντα μπορεί να προέρχονται είτε από το εσωτερικό του σκυροδέματος, αν έχουν χρησιμοποιηθεί συλλεκτά αδρανή από παραλίες ή θαλασσινό νερό μείξης (νησιωτική Ελλάδα), ή από πρόσμικτα βελτιωτικά του σκυροδέματος που περιέχουν χλωριούχα άλατα, είτε από το εξωτερικό φυσικό περιβάλλον (θαλασσινό περιβάλλον στην περιοχή της γέφυρας, είτε από τα άλατα που χρησιμοποιούνται για την αποπαγοποίηση του χιονιού). Φυσικά, η εμφάνιση της διάβρωσης επιταχύνεται σε παραθαλάσσιες περιοχές όπου το χλωριούχο νάτριο ευδοκμεί, γι' αυτό και οι θαλάσσιες γέφυρες είναι αυτές που εμφανίζουν συχνότερα και συντομότερα διάβρωση, αλλά και λόγω της χρήσης αλατιού για αποπαγοποίηση του χιονιού. Η διαδικασία της διάβρωσης του οπλισμού πραγματοποιείται μέσω των πόρων του σκυροδέματος, αλλά όταν υπάρχει ταυτόχρονη ύπαρξη ρωγμών στο σκυρόδεμα η διαδικασία επιταχύνεται σημαντικά. Οι ρωγμές αυτές εμφανίζονται κύριως λόγω κόπωσης από αυξημένους κύκλους φόρτισης, αλλά και από τις ακραίες μεταβολές θερμοκρασίας από ψύχος σε ζέστη (Bastidas-Arteaga, 2018). Η διαδικασία εμφάνισης της διάβρωσης αναπτύσσεται στην συνέχεια.

Αρχικά το σκληρυμένο σκυρόδεμα έχει μεγάλη αλκαλικότητα χάρη στο υδροξείδιο του ασβεστίου Ca(OH)_2 , το οποίο δημιουργεί ένα λεπτό στρώμα ένυδρου οξειδίου του σιδήρου στην επιφάνεια του οπλισμού και έτσι ο χάλυβας προστατεύεται από την διάβρωση. Το αλκαλικό περιβάλλον όμως καταστρέφεται όταν διοξείδιο του άνθρακα CO_2 από την ατμόσφαιρα αντιδράσει με το Ca(OH)_2 . Αυτή η διαδικασία ονομάζεται ενανθράκωση και σε συνδυασμό με την παρουσία NaCl , το οποίο μπορεί να προέλθει από το εσωτερικό ή εξωτερικό περιβάλλον, οδηγεί στην διάβρωση (Papadakis, 1989). Το NaCl , το γνωστό μας αλάτι, είναι χημική ένωση διαλυτή στο νερό, οπότε όταν εισέλθει νερό στους πόρους του σκυροδέματος διασπά το NaCl σε ιόντα νατρίου και χλωρίου. Έτσι το νερό συνεχίζει να κινείται στους πόρους προς το εσωτερικό μεταφέροντας πλέον χλωριόντα Cl^- τα οποία, όταν φθάσουν στον

χαλύβδινο οπλισμό, προκαλούν νέους ιοντικούς δεσμούς με το σίδηρο διατρυπώντας εύκολα το προστατευτικό οξείδιο και προκαλώντας την διάβρωση.

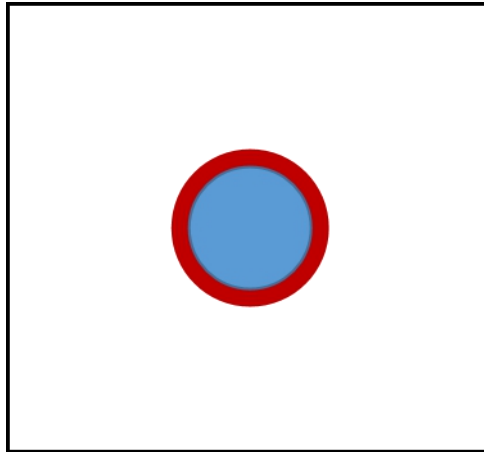
Η διάβρωση του οπλισμού διακρίνεται σε τρεις χρονικές φάσεις (Choe et al., 2008):

1η φάση: Ξεκινάει με την διείσδυση των ιόντων χλωρίου στο σκυρόδεμα και τη διάχυσή τους έως την διεπιφάνεια σκυροδέματος-οπλισμού. Η πρώτη φάση ολοκληρώνεται την χρονική στιγμή που η συγκέντρωση ιόντων στην επιφάνεια του οπλισμού φτάσει μία κρίσιμη τιμή.



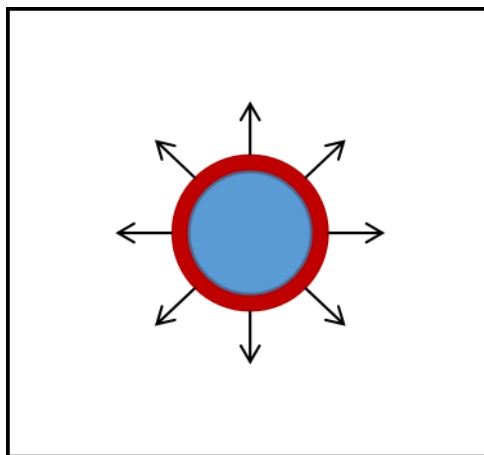
Σχ. 2: Διείσδυση των χλωριόντων προς το εσωτερικό του σκυροδέματος έως την διεπιφάνεια χάλυβα-σκυροδέματος.

2η φάση: Έναρξη της διάβρωσης. Τα προϊόντα της διάβρωσης (σκουριά) αρχίζουν να καταλαμβάνουν τον χώρο γύρω από την διεπιφάνεια χάλυβα-σκυροδέματος έως ότου γεμίσουν όλα τα κενά. Από την στιγμή αυτή χάνεται η συνάφεια μεταξύ χάλυβα-σκυροδέματος και κάθε επιπρόσθετη συγκέντρωση σκουριάς δημιουργεί πιέσεις στο σκυρόδεμα γύρω από τον οπλισμό.

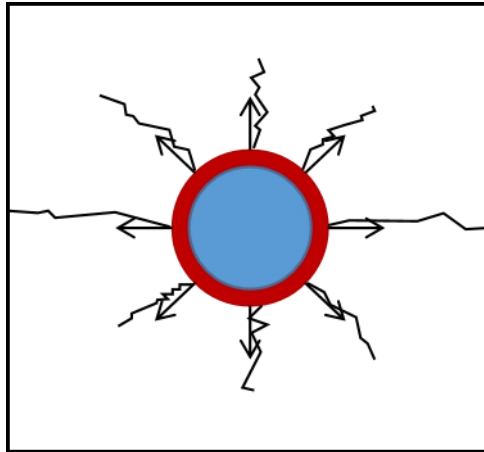


Σχ. 3: Διάχυση της σκουρίας στην διεπιφάνεια σκυροδέματος-χάλυβα.

3η φάση: Η συνεχώς αυξανόμενη πίεση στο σκυρόδεμα έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία και διάδοση ρωγμών στο σκυρόδεμα γύρω από τον οπλισμό, που σύντομα οδηγεί σε κάποιας μορφής αστοχία του σκυροδέματος, όπως αποφλοίωση ή αποκόλληση.



Σχ. 4: Αυξανόμενη πίεση από την διεπιφάνεια προς το σκυρόδεμα



Σχ. 5: Διάδοση ρωγμών στο σκυρόδεμα

Για να καταστεί δυνατός ο υπολογισμός των επιπτώσεων της διάβρωσης στον χάλυβα και το σκυρόδεμα, βασική προϋπόθεση αποτελεί ο υπολογισμός του χρόνου έναρξης της διάβρωσης από την αρχή ζωής του έργου. Δυστυχώς, η έναρξη της διάβρωσης είναι συνάρτηση μεταβλητών με πολλές αβεβαιότητες για τις οποίες δεν υπάρχουν επαρκή δεδομένα επί του παρόντος, όπως οι περιβαλλοντικές συνθήκες, η ποσότητα και ο ρυθμός διάχυσης των χλωριόντων από την επιφάνεια στα εσωτερικά της κατασκευής, η γήρανση της κατασκευής και άλλα. Επομένως δεν υπάρχει αναλυτική λύση της συνάρτησης και για αυτόν τον λόγο η διαδικασία που ακολουθείται για τον υπολογισμό του χρόνου έναρξης της διάβρωσης είναι πιθανοτική.

Μια πιθανοτική μεθοδολογία έχει ως κύριο χαρακτηριστικό της, τον υπολογισμό των τυχαίων μεταβλητών μέσα από πιθανοτικές κατανομές, δίνοντας έτσι την πληροφορία ως προς τις παραπάνω αβεβαιότητες. Η ακρίβεια της μεθοδολογίας αυτής έγκειται στην πραγματοποίηση πολυάριθμων επαναλήψεων ούτως ώστε το αποτέλεσμα να είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβές.

Οι πληροφορίες για το πιθανοτικό μοντέλο που εφαρμόστηκε σε αυτήν την εργασία αντλήθηκαν από το άρθρο των Chen et al. (2008), σύμφωνα με το οποίο, από τον δεύτερο νόμο του Fick, η συγκέντρωση C των χλωριόντων σε βάθος x από την επιφάνεια και σε χρόνο t δίνεται ως εξής:

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

Όπου C_s είναι η συγκέντρωση χλωριόντων στην επιφάνεια, $erf(\cdot)$ είναι η συνάρτηση του σφάλματος και D ο συντελεστής διάχυσης.

Θεωρώντας ότι η διάβρωση αρχίζει την χρονική στιγμή T_{corr} (σε έτη) που η συγκέντρωση χλωριόντων σε βάθος ίσο με την επικάλυψη d_c έχει φτάσει την κρίσιμη τιμή της, C_{cr} , δηλαδή $C(d_c, T_{corr}) = C_{cr}$, και προσδιορίζοντας το $D = D(t) = k_e k_t k_c D_0 (t_0 / t)^n$, τελικά η χρονική στιγμή T_{corr} υπολογίζεται σύμφωνα με το ακόλουθο πιθανοτικό μοντέλο λαμβάνοντας έτσι υπόψιν τις υπάρχουσες αβεβαιότητες (DuraCrete, 2000):

$$T_{corr} = X_1 \left[\frac{d_c^2}{4k_e k_t k_c D_0 (t_0)^n} \left[\text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{cr}}{C_s} \right) \right]^{-2} \right]^{1/(1-n)} \quad (\text{Εξ. 1})$$

Όπου X_1 ο συντελεστής αβεβαιότητας της μεθόδου που προέκυψε από τον δεύτερο νόμο του Fick, k_e είναι ο συντελεστής περιβάλλοντος, k_t συντελεστής επιρροής των δοκιμαστικών μεθόδων από τις οποίες προέκυψε ο εμπειρικός συντελεστής διάχυσης D_0 για περίοδο αναφοράς t_0 , k_c παράμετρος που αντιπροσωπεύει την επιρροή της σκλήρυνσης, n είναι ο εμπειρικός συντελεστής γήρανσης ο οποίος λαμβάνει υπόψη την επίδραση του λόγου νερού/ συνδετικό υλικό στον χρόνο έναρξης της διάβρωσης, C_s είναι η συγκέντρωση χλωριόντων στην επιφάνεια και ορίζεται από την γραμμική συνάρτηση $C_s = A_{cs} (w/b) + \varepsilon_{cs}$ της μεταβλητής του λόγου νερό προς το συνδετικό υλικό w/b , η οποία θεωρείται ως μια μεταβλητή και τα A_{cs} και ε_{cs} είναι παράμετροι της συνάρτησης. Όλες οι μεταβλητές της Εξ.1 ακολουθούν μια κατανομή πιθανότητας ώστε να επιλυθεί το πιθανοτικό μοντέλο. Από αυτήν την χρονική στιγμή και έπειτα ξεκινάει η σταδιακή υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος και του χάλυβα, καθώς και η σταδιακή μείωση της αντοχής της κατασκευής.

Η αντοχή μειώνεται με την σταδιακή εμφάνιση πλαστικών αρθρώσεων στα μέλη της κατασκευής, επομένως στον μετέπειτα έλεγχο της αντοχής, η διάβρωση θα θεωρείται ότι επιδρά στις διατομές των πλαστικών αρθρώσεων. Κύρια σημεία εμφάνισης

πλαστικών αρθρώσεων είναι τα άκρα των υποστυλωμάτων, οπότε σε αυτά τα σημεία θα μεταβάλλονται οι μηχανικές ιδιότητες συναρτήσει του χρόνου λόγω διάβρωσης.

Η υποβάθμιση του υλικού λόγω διάβρωσης σχετίζεται με το επίπεδο διάβρωσης, το οποίο εκφράζεται σε λόγο απώλειας βάρους λόγω διάβρωσης, χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση (Ou et al., 2013):

$$\Delta w = \frac{(d_{bo}^2 - d_{br}^2)}{d_{bo}^2} \quad (\text{Εξ. 2})$$

Όπου Δw ο βαθμός διάβρωσης, d_{bo} η αρχική διάμετρος του οπλισμού και d_{br} η διάμετρος του διαβρωμένου οπλισμού.

Από την έναρξη διάβρωσης η διάμετρος d_{br} του οπλισμού υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (Choe et al., 2008):

$$d_{br} = d_{bo} - \frac{1.0508(1 - w/c)^{-1.64}}{d_c} (t_{corr} - T_{corr})^{0.71} \quad (\text{Εξ. 3})$$

Όπου t_{corr} είναι ο χρόνος, σε έτη, μετά την έναρξη της διάβρωσης, d_{bo} η αρχική διάμετρος του οπλισμού σε mm την χρονική στιγμή $t_{corr} = 0$, d_c το βάθος επικάλυψης σε mm και T_{corr} είναι ο χρόνος έναρξης της διάβρωσης σε έτη, από την έναρξη ζωής της γέφυρας.

Οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα λόγω διάβρωσης μεταβάλλονται ως εξής (Lee and Cho, 2009):

$$\sigma_y = (1 - 1.98\Delta w)\sigma_{yo}$$

$$\sigma_u = (1 - 1.57\Delta w)\sigma_{uo}$$

$$E_s = (1 - 1.15\Delta w)E_{so}$$

$$\varepsilon_u = (1 - 2.59\Delta w)\varepsilon_{uo}$$

όπου σ_y η τάση διαρροής, σ_u η τάση θραύσης, E_s το μέτρο ελαστικότητας και ε_u η παραμόρφωση θραύσης. Το Δw είναι ο βαθμός διάβρωσης, τα σ_{yo} , σ_{uo} , E_{so} , ε_{uo} είναι

η τάση διαρροής, η τάση θραύσης, το μέτρο ελαστικότητας και η οριακή παραμόρφωση, του μη διαβρωμένου οπλισμού αντίστοιχα.

Η διάβρωση του χάλυβα οδηγεί στην υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων, αρχικά του απερίσφικτου σκυροδέματος και έπειτα του περισιφισμένου. Η κράτυνση του σκυροδέματος λαμβάνεται υπόψιν μέσω του συντελεστή κράτυνσης ζ (Hsu, T. T., 2017):

$$\zeta = \frac{0.9}{\sqrt{1+600\varepsilon_r}}, \text{ όπου}$$

$$\varepsilon_r = \frac{\sum w_{cr}}{b_o}, \text{ η εφελκυστική παραμόρφωση,}$$

b_o είναι η περιφέρεια της διατομής σκυροδέματος και το πλάτος ρωγμής w_{cr} υπολογίζεται από την εξίσωση (Molina et al., 1993):

$$w_{cr} = \pi(V_{rs} - 1)2x$$

Η σχέση τάσης παραμόρφωσης του σκυροδέματος είναι η ακόλουθη (Hsu, T. T., 1993):

$$\text{Ανερχόμενος κλάδος} \quad \sigma = \zeta f'_c \left[2 \left(\frac{\varepsilon}{\zeta \varepsilon_o} \right) - \left(\frac{\varepsilon}{\zeta \varepsilon_o} \right)^2 \right]$$

$$\text{Φθίνων κλάδος} \quad \sigma = \zeta f'_c \left[1 - \left(\frac{\frac{\varepsilon}{\zeta \varepsilon_o} - 1}{\frac{2}{\zeta} - 1} \right)^2 \right]$$

2.2 Μέθοδοι ανάλυσης και αποτίμησης κατασκευών Ω/Σ

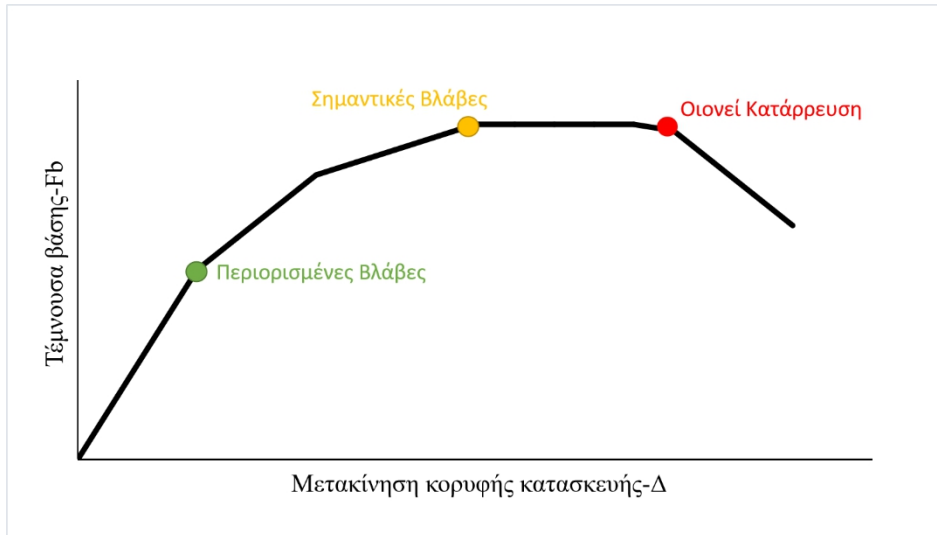
Για την αξιολόγηση της αντοχής και της σεισμικής συμπεριφοράς των γεφυρών, οι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί αποδέχονται δύο μεθόδους μη γραμμικής ανάλυσης: την ανελαστική δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας, που επιτρέπεται σε όλες τις κατασκευές και την ανελαστική στατική ανάλυση, που μπορεί να εφαρμοστεί μόνο υπό ορισμένες προϋποθέσεις. Οι αναλύσεις που εφαρμόζονται στις γέφυρες από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι μη γραμμικές αριθμητικές μέθοδοι λόγω της μη

γραμμικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος και του αντισεισμικού εξοπλισμού που ενίοτε χρησιμοποιείται στις γέφυρες, όπως οι υδραυλικοί αποσβεστήρες στα εφένδρανα της υποδομής.

Για την μη γραμμική δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας η βιβλιογραφία (Gavin, 2001) αναφέρει διάφορες μεθόδους, όπως την μέθοδο Κεντρικών Διαφορών, την μέθοδο Newmark και την μέθοδο Hilbert–Huang transform (HHT). Για την μη γραμμική στατική ανάλυση η μέθοδος λέγεται Pushover, η οποία εφαρμόστηκε στην εργασία και παρουσιάζεται στην συνέχεια.

Η ανελαστική στατική ανάλυση Pushover που προτείνεται στους σύγχρονους κανονισμούς είναι αρκετά εύχρηστη σε κατασκευές στις οποίες είναι σημαντική μόνο η πρώτη ιδιομορφή στην σεισμική απόκριση του φορέα ενώ μπορεί να παράσχει μια προσεγγιστική εκτίμηση των απαιτούμενων παραμορφώσεων των κρίσιμων διατομών καθώς και την σειρά με την οποία αστοχεί το καθένα.

Ο έλεγχος γίνεται σε επίπεδο διατομών και σε όρους παραμορφωσιακών μεγεθών, όπως πλαστική στρόφη χορδής και καμπυλότητα, για την ικανοποίηση των απαιτήσεων επιτελεστικότητας που θα αναλυθούν παρακάτω. Ο έλεγχος της αντοχής της γέφυρας προϋποθέτει την δημιουργία της καμπύλης αντίστασης (ή καμπύλη ικανότητας) η οποία εκφράζει την μη γραμμική σχέση μεταξύ του επιβαλλόμενου οριζόντιου φορτίου και της μετατόπισης κορυφής (στο κέντρο μάζας της πλάκας καταστρώματος). Η καμπύλη αντίστασης της κατασκευής δημιουργείται από τις επιμέρους καμπύλες ικανότητας των κρίσιμων δομικών στοιχείων, οι οποίες δίνουν την πληροφορία ως προς τη σειρά και τα σημεία εμφάνισης των πλαστικών αρθρώσεων, τα οποία τελικά μορφώνουν την καμπύλη αντίστασης όλης της γέφυρας. Πάνω στην καμπύλη ικανότητας ορίζονται οι στάθμες επιτελεστικότητας της κατασκευής (Περιορισμένες Βλάβες, Σημαντικές Βλάβες, Οιονεί Κατάρρευση) ενώ γίνονται οι απαιτούμενοι έλεγχοι επιτελεστικότητας στο επίπεδο των επιμέρους δομικών στοιχείων.



Σχ. 6: Η καμπύλη ικανότητας της κατασκευής και οι στάθμες επιτελεστικότητας.

Τελικά, η στοχευόμενη μετατόπιση κορυφής που αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη σεισμική διέγερση θα πρέπει να ικανοποιεί τον απαιτούμενο έλεγχο επιτελεστικότητας που έχει οριστεί από τον μελετητή.

Δύο βασικές στρατηγικές επίλυσης υπάρχουν για την κατασκευή της καμπύλης αντίστασης της κατασκευής. Η πρώτη είναι η μη γραμμική υπερωθητική ανάλυση με έλεγχο των δυνάμεων και δεύτερη η μη γραμμική υπερωθητική ανάλυση με έλεγχο των μετατοπίσεων, η οποία εφαρμόστηκε εδώ.

Στην μη γραμμική υπερωθητική ανάλυση με έλεγχο των μετατοπίσεων, χρειάζεται να ορίσουμε μια μετατόπιση ελέγχου (Antoniou & Pinho, 2004), δηλαδή να διαλέξουμε έναν κόμβο και μια διεύθυνση της οποίας τη μετατόπιση θα παρακολουθούμε κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Επομένως, η λύση προκύπτει από αυτή τη μετατόπιση και όχι από συγκεκριμένα επιβαλλόμενα φορτία όπως στην ανάλυση με έλεγχο δυνάμεων. Ζητούμενο είναι να βρούμε την τιμή του φορτίου που πρέπει να επιβληθεί στην κατασκευή ούτως ώστε η μετατόπιση στον κόμβο ελέγχου να λάβει την επιθυμητή τιμή. Για το σκοπό αυτό πρέπει να ορίσουμε την μέγιστη μετατόπιση ελέγχου u_{max}^m , που θέλουμε να έχει ο κόμβος ελέγχου και έναν αριθμό επαυξητικών βημάτων N_{incr} , ούτως ώστε σε κάθε επαυξητικό βήμα η μετατόπιση στον κόμβο να είναι συγκεκριμένη και ίση με $\Delta u^m = \frac{u_{max}^m}{N_{incr}}$. Έχοντας αυτά δεδομένα και με εφαρμογή της επαυξητικής εξίσωσης κίνησης, για κάθε βήμα βρίσκουμε τον επαυξητικό φορτιστικό

συντελεστή $\Delta\lambda$, που δίνει την τιμή του φορτίου που πρέπει να επιβάλλουμε στην κατασκευή ούτως ώστε η μετατόπιση στον κόμβο ελέγχου να λάβει την επιθυμητή τιμή.

2.3 Στάθμες επιτελεστικότητας

Η κάθε στάθμη επιτελεστικότητας οριοθετεί τον βαθμό βλάβης που δημιουργείται στην κατασκευή λόγω αστοχίας των μελών της. Στην παρούσα εργασία τόσο η αστοχία όσο και η στάθμες επιτελεστικότητας εκφράζονται σε όρους καμπυλοτήτων των διατομών. Είναι αρμοδιότητα του Κύριου του Έργου να επιλέξει την στάθμη επιτελεστικότητας για την οποία θα γίνει έλεγχος της αντοχής της κατασκευής και η επιλογή αυτή εξαρτάται κυρίως από την σπουδαιότητα της κατασκευής αλλά και από την συνάρτηση ασφάλειας-κόστους.

Οι στάθμες επιτελεστικότητας ορίζονται σε όρους ροπών-καμπυλοτήτων ($M-\theta$) κάθε δομικού στοιχείου, ώστε να συγκριθούν με την στοχευόμενη μετατόπιση του σεισμού σχεδιασμού.

Υπάρχουν τρεις στάθμες επιτελεστικότητας σε κάθε καμπύλη $M-\theta$ ενός δομικού στοιχείου και ορίζονται σύμφωνα με την γωνία στροφής χορδής, ή αντίστοιχο παραμορφωσιακό μέγεθος ως εξής:

- Περιορισμένες Βλάβες (A)

Ο φέρων οργανισμός του κτιρίου έχει υποστεί μόνο ελαφριές βλάβες, με τα δομικά στοιχεία να μην έχουν διαρρεύσει σε σημαντικό βαθμό και να διατηρούν την αντοχή και την δυσκαμψία τους. Οι μόνιμες σχετικές μετακινήσεις ορόφων είναι αμελητέες. Ο έλεγχος που πρέπει να πληρείται σε όρους γωνίας στροφής χορδής είναι ο εξής:

$$\theta < \theta_A = \theta_y$$

- Σημαντικές Βλάβες (B)

Ο φέρων οργανισμός του κτιρίου έχει υποστεί σημαντικές, εκτεταμένες αλλά επισκευάσιμες βλάβες, ενώ τα δομικά στοιχεία διαθέτουν εναπομένονσα αντοχή και δυσκαμψία και είναι σε θέση να παραλάβουν τα προβλεπόμενα κατακόρυφα φορτία. Οι μόνιμες σχετικές μετακινήσεις ορόφων είναι μετρίου μεγέθους. Ο φέρων

οργανισμός μπορεί να αντέξει μετασεισμικούς μέτριας έντασης. Ο έλεγχος που πρέπει να πληρείται σε όρους γωνίας στροφής χορδής είναι ο εξής:

$$\theta < \theta_B = \frac{(\theta_y + \theta_u)}{2\gamma_{Rd}} \text{ για πρωτεύοντα μέλη}$$

$$\theta < \theta_B = \frac{(\theta_y + \theta_u)}{2} \text{ για δευτερεύοντα μέλη}$$

- Οιονεί κατάρρευση (Γ)

Ο φέρων οργανισμός του κτιρίου έχει υποστεί εκτεταμένες και σοβαρές ή βαριές (μη επισκευάσιμες κατά πλειονότητα) βλάβες. Οι μόνιμες σχετικές μετακινήσεις ορόφων είναι μεγάλες. Ο φέρων οργανισμός έχει ακόμη την ικανότητα να φέρει τα προβλεπόμενα κατακόρυφα φορτία (κατά, και για ένα διάστημα μετά, τον σεισμό), χωρίς πάντως να διαθέτει άλλο ουσιαστικό περιθώριο ασφαλείας έναντι ολικής ή μερικής κατάρρευσης, ακόμη και για μετασεισμικούς μέτριας έντασης. Ο έλεγχος που πρέπει να πληρείται σε όρους γωνίας στροφής χορδής είναι ο εξής:

$$\theta < \theta_\Gamma = \frac{\theta_u}{\gamma_{Rd}} \text{ για πρωτεύοντα μέλη}$$

$$\theta < \theta_\Gamma = \theta_u \text{ για δευτερεύοντα μέλη}$$

Η αποτίμηση μιας υφιστάμενης κατασκευής με βάση την επιτελεστικότητα εξαρτάται από την σπουδαιότητα της κατασκευής. Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ (ΕΠΕ, Κ., 2017) ορίζει τις στάθμες επιτελεστικότητας του Πίνακα 1 με βάση τον οποίο, μια κρίσιμη κατασκευή σπουδαιότητας ΙΙΙ θα πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις Α3, Β2, Γ1.

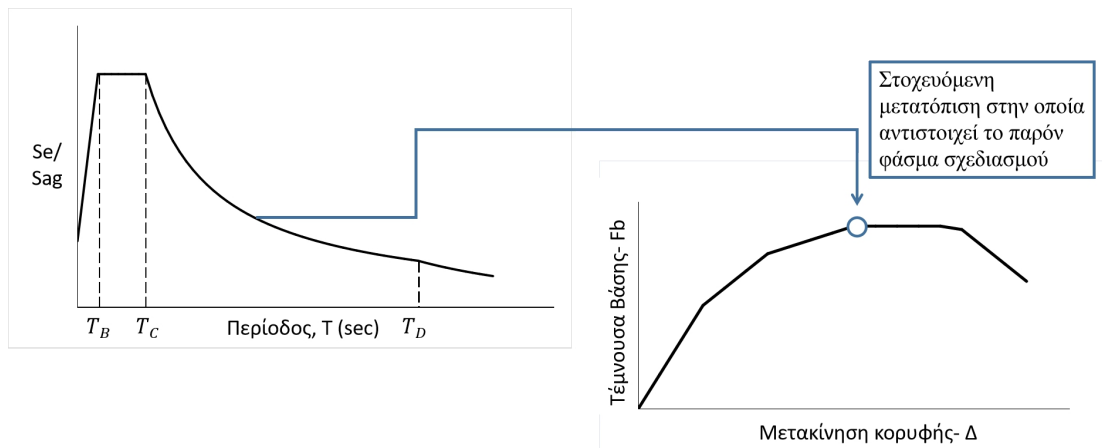
Περίοδος Τ(έτη)	Πιθανότητα υπέρβασης εντός 50 ετών	Α/Α	Στάθμη επιτελεστικότητας			
			Περιορισμένες Βλάβες	Σημαντικές Βλάβες	Οιονεί Κατάρρευση	ag

975	5%/50	0	○A ₀	○B ₀	○Γ ₀	0.203	KAN.EΠE Πιν.2.1
475	10%/50	1	○A ₁	○B ₁	●Γ ₁	0.16	
72	50%/50	2	○A ₂	●B ₂	●Γ ₂	0.085	
31	80%/50	3	●A ₃	●B ₃	●Γ ₃	0.064	
Ορολογία EC8			DL	SD	NC		

Πίνακας 1: Στάθμες Επιτελεστικότητας.

2.4 Στοχευόμενη Μετατόπιση

Κάθε σεισμός αντιστοιχεί σε μια στοχευόμενη μετατόπιση η οποία απεικονίζεται στην καμπύλη αντίστασης.



Σχ. 7: Αντιστοιχία σεισμού με στοχευόμενη μετατόπιση και καμπύλη αντίστασης κατασκευής.

Η στοχευόμενη μετατόπιση μπορεί να υπολογιστεί με δύο μεθόδους, την μέθοδο του EC8 (Μέθοδος N2) και την μέθοδο του ΚΑΝ.ΕΠΕ (Μέθοδος των συντελεστών), η οποία εφαρμόστηκε στην εργασία.

Σύμφωνα με την μέθοδο των συντελεστών η στοχευόμενη μετατόπιση της κορυφής υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\delta_i = C_0 C_1 C_2 C_3 \left(\frac{T e^2}{4\pi^2} \right) S_{e(T)} \quad (\text{Εξ. 4})$$

Όπου $S_{e(T)}$ η ελαστική φασματική ψευδοεπιτάχυνση από το φάσμα του ΕΚ8-1 (Code, P., 2005), που αντιστοιχεί στην ισοδύναμη ιδιοπερίοδο της κατασκευής T_e και C_0, C_1, C_2 και C_3 διορθωτικοί συντελεστές που ορίζονται ως εξής:

C_0 : Συντελεστής που συνδέει την πραγματική μετακίνηση κορυφής δ_t , με τη φασματική μετακίνηση S_d του ισοδύναμου ελαστικού φορέα. Οι τιμές που παίρνει ο συντελεστής C_0 μπορεί να λαμβάνονται ίσες με 1.0, 1.2, 1.3, 1.4 και 1.5 για αριθμό ορόφων 1, 2, 3, 5 και ≥ 10 αντίστοιχα.

C_1 : Συντελεστής που συνδέει τη μετακίνηση ανελαστικού συστήματος με αυτή του αντίστοιχου ελαστικού, σύμφωνα με τα παρακάτω:

$$C_1 = 1.0 \quad \text{για } T_e \geq T_c, \text{ και}$$

$$C_1 = \frac{1 + (R-1) \frac{T_c}{T_e}}{R} \quad \text{για } T_e \leq T_c,$$

όπου T_c η τιμή στην οποία αρχίζει ο κατιών κλάδος του φάσματος σχεδιασμού και $R = V_{el}/V_y$ ο λόγος της ελαστικής απαίτησης προς την αντίσταση διαρροής του φορέα.

C_2 : Συντελεστής που λαμβάνει υπόψιν την επιρροή του σχήματος του βρόχου υστέρησης στη μέγιστη μετακίνηση. Οι τιμές του μπορεί να λαμβάνονται από τον Πίνακα Σ5.1 του ΚΑΝ.ΕΠΕ. Για τιμές T_e μεταξύ 0.1s και T_c πρέπει να γίνεται γραμμική παρεμβολή.

C_3 : Συντελεστής που λαμβάνει υπόψιν την αύξηση των μετακινήσεων λόγω φαινομένων 2ας τάξεως (P -Δ). Στη συνήθη (για κτίρια από ΩΣ και από τοιχοποιία) περίπτωση, όπου ο δείκτης σχετικής μεταθετότητας $\theta < 0.1$, λαμβάνεται $C_3 = 1.0$.

2.5 Μέθοδοι υπολογισμού πιθανότητας αστοχίας

Οι αριθμητικές μέθοδοι υπολογισμού της πιθανότητας αστοχίας εφαρμόζονται όταν δεν υπάρχει αναλυτική λύση του προβλήματος. Στην περίπτωση του φαινομένου της διάβρωσης, η μελέτη εξαρτάται από αρκετές άγνωστες παραμέτρους, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει μια καθολική λύση σχετικά με την επίδρασή της στον χάλυβα

οπλισμού της κατασκευής. Παρόμοιες αβεβαιότητες παρουσιάζονται σε διάφορα άλλα προβλήματα που χρήζουν μελέτης και για τον σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί οι μέθοδοι πιθανοτικής ανάλυσης, προσεγγίζοντας έτσι όσο το δυνατόν καλύτερα την πραγματική λύση. Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε χρήση της πιθανοτικής ανάλυσης Crude Monte Carlo.

Η Monte Carlo είναι μια αριθμητική μέθοδος που κάνει χρήση τυχαίων μεταβλητών για επίλυση ολοκληρωμάτων, δίνοντας μια διαφορετική προσέγγιση για την επίλυση ενός ολοκληρώματος. Οι τυχαίες μεταβλητές παρόλο που προδίδουν ότι δεν γίνεται να προβλέψει κανείς την τιμή τους, γίνεται να ακολουθούν μια γνωστή κατανομή. Η κατανομή μιας τυχαίας μεταβλητής δίνει την πιθανότητα μιας δεδομένης τιμής. Η διαθέσιμη βιβλιογραφία από τους Terejanu and Gabriel (2009) μας δίνει ακριβείς πληροφορίες σχετικά με την δομή της μεθόδου. Οι τυχαίοι αριθμοί επιλέγονται με βάση τη συνάρτηση κατανομής πυκνότητας πιθανότητας $p(x)$, όπου x μια συνεχής τυχαία μεταβλητή στο διάστημα (a,b) . Για την $p(x)$ ισχύουν:

- $p(x) > 0$,
- $\int_{-\infty}^{\infty} p(x)dx = 1$.

Η μέση τιμή και η διακύμανση της κατανομής δίνονται από τους τύπους, αντίστοιχα:

$$E[x] = \mu = \int_a^b xp(x)dx \quad (\text{Εξ. 5})$$

$$Var[x] = \sigma^2 = \int_a^b (x - \mu)^2 p(x)dx. \quad (\text{Εξ. 6})$$

Έστω $f(x)$ μια τυχαία συνεχής συνάρτηση και $y = f(x)$, η νέα τυχαία μεταβλητή.

Τότε η μέση τιμή και η διακύμανση του y είναι:

$$E[y] = E[f(x)] = \int_a^b f(x)p(x)dx, \quad (\text{Εξ. 7})$$

$$Var[y] = Var[f(x)] = \int_a^b (f(x) - E[f(x)])^2 p(x)dx.$$

Στόχος είναι να υπολογίσουμε την Εξ.19 χωρίς να υπολογίσουμε το ολοκλήρωμα και αυτό επιτυγχάνεται μέσω της Crude Monte Carlo. Έτσι η Εξ.19 μπορεί να υπολογιστεί παράγοντας n δείγματα $x_i \sim q(x)$, για $i = 1 \dots n$, και υπολογίζοντας την εξίσωση:

$$I = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(x_i)$$

Η οποία είναι η μέθοδος Crude Monte Carlo και η ακρίβειά της βασίζεται στα δύο ακόλουθα θεωρήματα:

Νόμος των μεγάλων αριθμών: Σύμφωνα με το θεώρημα, ο δειγματικός μέσος μιας ακολουθίας ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών που ακολουθούν μία κοινή κατανομή συγκλίνει σχεδόν βεβαίως προς τον θεωρητικό μέσο (τη μέση τιμή) της κατανομής. Έστω ότι επιλέγουμε n τυχαίες μεταβλητές x_i με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $p(x)$. Ως εκ τούτου προκύπτει:

$$I = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(x_i) \rightarrow E[f(x)] = \int_a^b f(x)p(x)dx$$

Κεντρικό οριακό θεώρημα: Αν από έναν πληθυσμό που ακολουθεί οποιαδήποτε κατανομή με μέση τιμή μ και διασπορά σ^2 , επιλέξουμε όλα τα δυνατά τυχαία δείγματα z_i μεγέθους n και υπολογίσουμε τους μέσους τους, τότε για μεγάλα N (θεωρητικά $n \rightarrow \infty$), η κατανομή αυτών των δειγματικών μέσων είναι κατά προσέγγιση κανονική κατανομή με μέση τιμή επίσης μ και διασπορά $\frac{\sigma^2}{N}$. Ως εκ τούτου ισχύει:

$$\frac{\sum_{i=1}^n z_i - n\mu}{\sigma\sqrt{n}} \rightarrow \mathcal{N}(0,1) \text{ as } n \rightarrow \infty$$

Το σφάλμα της μεθόδου είναι:

$$\begin{aligned}
error &\equiv |I - E[f(x)]| \\
&= \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(x_i) - E[f(x)] \right| \\
&= \frac{\sqrt{Var[f(x)]}}{\sqrt{n}} \left| \frac{\sum_{i=1}^n f(x_i) - nE[f(x)]}{\sqrt{Var[f(x)]}\sqrt{n}} \right| \\
&= \frac{\sqrt{Var[f(x)]}}{\sqrt{n}} | \mathcal{N}(0,1) |
\end{aligned}$$

3 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΟΥ-ΣΤΥΛΟΥ

Η ανάλυση της απόκρισης της κατασκευής υπό σεισμική διέγερση πραγματοποιήθηκε σε κατάλληλο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων. Η ορθότητα και ευστάθεια της ανάλυσης εξαρτάται από την επιλογή των στοιχείων που συνθέτουν το προσομοίωμα αλλά και από τους καταστατικούς νόμους υλικών που τα διέπουν. Το προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων για την μελέτη της σεισμικής απόκρισης της κατασκευής έγινε με το λογισμικό Opensees (Mazzoni et al., 2006).

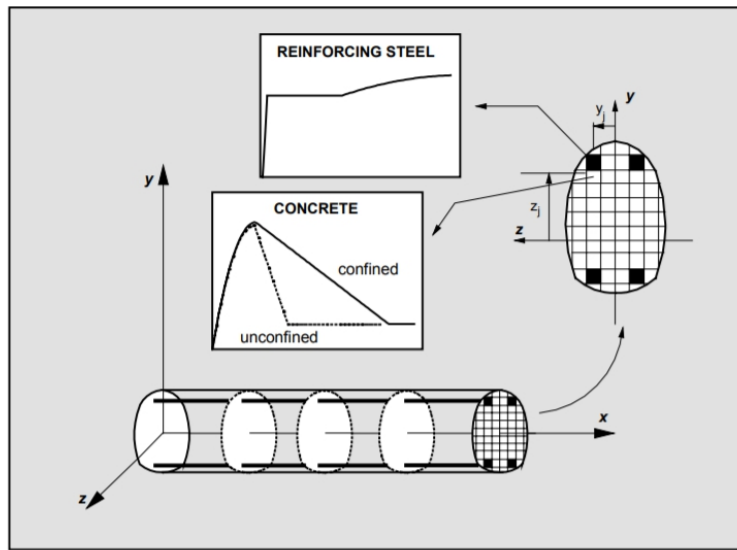
3.1 Στοιχεία ιών δοκού/ στύλου

Στην περίπτωση μελών ωπλισμένου σκυροδέματος που υπόκεινται σε κυκλική φόρτιση, έχει αποδειχθεί Taucer et al (1991) ότι τα στοιχεία που παρουσιάζουν αξιοπιστία και μαθηματική αποτελεσματικότητα είναι τα στοιχεία ιών δοκού-στύλου και άρα εφαρμόζονται στο παρόν προσομοίωμα.

Οι ακόλουθες πληροφορίες που αφορούν αυτού του είδους πεπερασμένα στοιχεία αντλήθηκαν από το άρθρο των Taucer et al. (1991). Κύριο χαρακτηριστικό του στοιχείου αυτού είναι ότι αποτελείται από επιμέρους διαμήκεις ίνες κατά μήκος, οπότε η σχέση δύναμης-παραμόρφωσης της κάθε διατομής προκύπτει από την ολοκλήρωση της έκφρασης της μονοαξονικής τάσης-παραμόρφωσης των ιών που την συνθέτουν. Το στοιχείο βασίζεται στην υπόθεση ότι οι παραμορφώσεις είναι πολύ μικρές και οι επίπεδες διατομές παραμένουν επίπεδες καθ' όλη την διάρκεια παραμόρφωσης του στοιχείου, με αποτέλεσμα να απλοποιείται η γεωμετρική σχέση μεταξύ των γενικευμένων παραμορφώσεων του στοιχείου και των παραμορφώσεων των ιών. Αυτή η θεώρηση δεν έχει ρεαλιστικά αποτελέσματα στην περίπτωση εμφάνισης ρωγμών ή ολίσθησης στην διεπιφάνεια χάλυβα-σκυροδέματος και δεν λαμβάνονται υπόψιν στην παρούσα εργασία. Το στοιχείο ιών δοκού-στύλου φαίνεται στο επόμενο σχήμα.

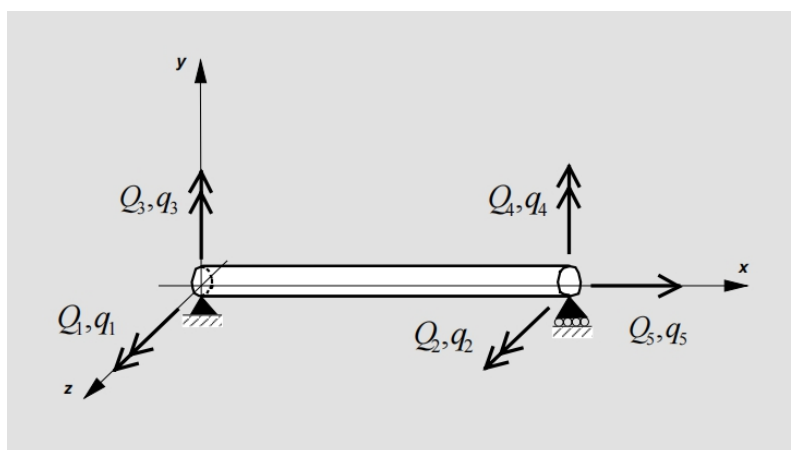
Η διαμόρφωση του στοιχείου βασίζεται στην μικτή μέθοδο του στοιχείου δοκού στύλου: Η συνάρτηση παρεμβολής δύναμης επιλέγεται ώστε να εκφράζει γραμμική ροπή κάμψης και σταθερή αξονική, ενώ το πεδίο παραμορφώσεων του στοιχείου βασίζεται σε συναρτήσεις σχήματος εξαρτώμενες από την ευκαμψία και οδηγεί σε

απλούστευση των εξισώσεων. Έτσι η γενική μεικτή μέθοδος απλοποιείται στην μέθοδο ευκαμψίας.



Σχ. 8: Υποδιαίρεση στοιχείου σε διατομές και διακριτοποίηση διατομής σε ίνες (Taucer et al., (1991))

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ίνας είναι οι συντεταγμένες της στους τοπικούς άξονες y, z και η επιφάνειά της A_{fib} . Κάθε διατομή χωρίζεται σε $n(x)$ ίνες και είναι συναρτήσει του x γιατί ο διαμήκης οπλισμός μπορεί να διαφέρει ανά διατομή. Η καταστατική σχέση της διατομής προκύπτει από την ολοκλήρωση της απόκρισης των ινών, οι οποίες ακολουθούν την σχέση μονοαξονικής τάσης-παραμόρφωσης του κάθε υλικού, δηλαδή του χάλυβα και του σκυροδέματος.



Σχ. 9: Στοιχείο δοκού στο τοπικό σύστημα αναφοράς (Taucer et al., (1991)).

Στο στοιχείο του Σχ.9 οι παραμορφώσεις είναι πέντε, μια αξονική q_5 και τέσσερις στροφικές q_1, q_2, q_3, q_4 . Αντίστοιχα και οι δυνάμεις είναι πέντε, μία αξονική δύναμη Q_5 και τέσσερις καμπτικές ροπές Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 αντίστοιχα.

$$Q = \begin{Bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \end{Bmatrix} \quad q = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \end{Bmatrix}$$

Στην διατομή οι παραμορφώσεις είναι τρεις, η αξονική $\varepsilon(x)$ κατά μήκος του στοιχείου και δύο καμπυλότητες $\mathcal{X}_z(x)$ και $\mathcal{X}_y(x)$. Αντίστοιχα οι δυνάμεις είναι μία αξονική $N(x)$ και δύο καμπτικές ροπές $M_z(x)$ και $M_y(x)$.

$$D(x) = \begin{Bmatrix} M_z(x) \\ M_y(x) \\ N(x) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} D_1(x) \\ D_2(x) \\ D_3(x) \end{Bmatrix} \quad d(x) = \begin{Bmatrix} \mathcal{X}_z(x) \\ \mathcal{X}_y(x) \\ \varepsilon(x) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} d_1(x) \\ d_2(x) \\ d_3(x) \end{Bmatrix}$$

Η δυσκαμψία $k(x)$ της διατομής συντίθεται από την δυσκαμψία των ινών και αντιστρέφεται για να δώσει το μητρώο ευκαμψίας της διατομής $f(x) = k(x)^{-1}$. Η νέα

$$\text{ευκαμψία του στοιχείου είναι } F = \int_0^L b^T(x) \cdot f(x) \cdot b(x) \cdot dx.$$

Σύμφωνα με την γενική μικτή μέθοδο ορίζονται οι συναρτήσεις παρεμβολής δύναμης $b(x)$ ώστε οι δύο κάμψεις M_z, M_y να είναι γραμμικές και η αξονική σταθερή.

$$b(x) = \begin{bmatrix} \left(\frac{x}{L}-1\right) & \left(\frac{x}{L}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{x}{L}-1\right) & \left(\frac{x}{L}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{και} \quad D^i(x) = b(x) \cdot Q^i$$

Το πεδίο παραμορφώσεων του στοιχείου αντιπροσωπεύεται από τις συναρτήσεις σχήματος $a(x)$, εξαρτώμενες από την ευκαμψία, οι οποίες βοηθούν στον υπολογισμό της παραμόρφωσης κατά μήκος του στοιχείου.

$$a(x) = f^{i-1}(x) \cdot b(x) \cdot [F^{i-1}]^{-1}$$

$$\Delta d^i(x) = a(x) \cdot \Delta q^i$$

$$\Delta D^i(x) = b(x) \cdot \Delta Q^i$$

Ο δείκτης i δηλώνει τον αριθμό της επανάληψης Newton-Raphson, που εφαρμόζεται στους βαθμούς ελευθερίας της κατασκευής μέχρι η ισορροπία μεταξύ των επιβαλλόμενων φορτίων και των εσωτερικών δυνάμεων αντίστασης να ικανοποιείται. Εντός της επανάληψης i γίνεται άλλη επαναληπτική διαδικασία σε επίπεδο στοιχείου ώστε να υπολογιστούν οι εσωτερικές δυνάμεις αντίστασης του στοιχείου που αντιστοιχούν στις παραμορφώσεις του q^i . Η μη γραμμικότητα του στοιχείου προκύπτει εξ ολοκλήρου από τις σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων των ινών (μη γραμμικότητα υλικών). Για να υπολογιστούν οι εσωτερικές δυνάμεις αντίστασης του στοιχείου χρειάζεται η σχέση δύναμης-παραμόρφωσης της διατομής η οποία προκύπτει από τη σχέση τάσης-παραμόρφωσης των ινών. Επομένως η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων εξαρτάται από την ακρίβεια των μοντέλων των ινών, που στην περίπτωση μας είναι αυτά του σκυροδέματος και του χάλυβα. Εδώ η συμπεριφορά του μοντέλου είναι μονοαξονική οπότε απλοποιείται η κατάσταση. Τα μοντέλα χάλυβα που εφαρμόζονται είναι αυτά που αναφέρει ο Filippou et al. (1983), ενώ για το σκυρόδεμα των Mander et al (1988).

Η σχέση που συνδέει τις παραμορφώσεις της διατομής με αυτές της ίνας είναι $e(x) = I(x) \cdot d(x)$, όπου I είναι το μητρώο συμβατότητας:

$$I(x) = \begin{bmatrix} -y_1 & z_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -y_{ifib} & z_{fib} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -y_n & z_n & 1 \end{bmatrix}$$

$$e(x) = \left\{ \begin{array}{c} \varepsilon_1(x, y_1, z_1) \\ \vdots \\ \varepsilon_{ifib}(x, y_{ifib}, z_{ifib}) \\ \vdots \\ \varepsilon_n(x, y_n, z_n) \end{array} \right\}$$

Οι τάσεις των ινών είναι οι εξής:

$$E(x) = \left\{ \begin{array}{c} \sigma_1(x, y_1, z_1) \\ \vdots \\ \sigma_{ifib}(x, y_{ifib}, z_{ifib}) \\ \vdots \\ \sigma_n(x, y_n, z_n) \end{array} \right\}$$

3.2 Καταστατικά προσομοιώματα σκυροδέματος

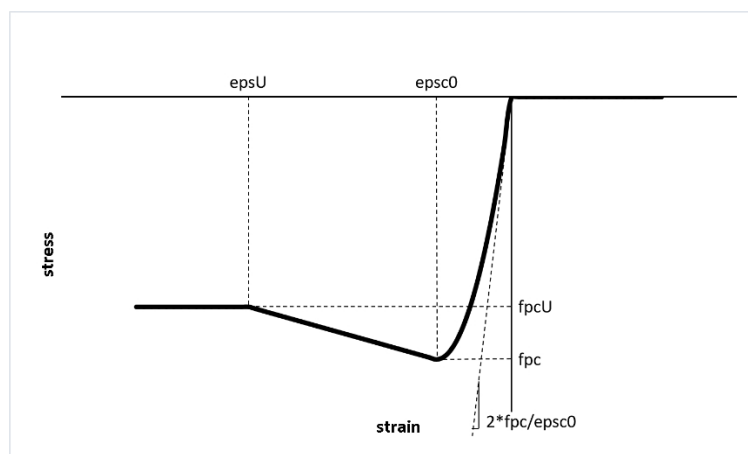
Τα προσομοιώματα σκυροδέματος που χρησιμοποιούνται κατά την σεισμική ανάλυση είναι δύο και στο Opensees καλούνται με τις ονομασίες concrete01 και concrete02.

Το καταστατικό προσομοίωμα του concrete01 αφορά το μονοαξονικό καταστατικό μοντέλο Kent-Scott-Park (1971), με απομειούμενη γραμμική δυσκαμψία κατά τους κύκλους αποφόρτισης-επαναφόρτισης και μηδενική εφελκυστική αντοχή. Η μη γραμμική καμπύλη της μονοαξονικής θλίψης περιγράφεται από τον παρακάτω τύπο:

$$f_c = f_c' \left[\frac{2\varepsilon}{\varepsilon_c'} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c'} \right)^2 \right] \quad \text{όταν } \varepsilon \leq \varepsilon_c'$$

Όπου f_c , ε , f_c' και ε_c' είναι η τάση, η αντίστοιχη παραμόρφωση, η θλιπτική αντοχή και η αντίστοιχη της παραμόρφωση αντίστοιχα. Η κράτυνση υπολογίζεται γραμμικά.

Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνεται η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης, ενώ ο συμβολισμός των μεγεθών γίνεται σύμφωνα με την γραφή που χρησιμοποιεί το λογισμικό Opensees. Στο σχήμα, fpc , $eps0$, $fpcu$, $epsU$ η θλιπτική αντοχή, η αντίστοιχη παραμόρφωση, η τάση θραύσης και η παραμόρφωση θραύσης, αντίστοιχα. Η αρχική κλίση του προσομοιώματος είναι $2 \times fpc / eps0$.



Σχ. 10: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης του υλικού concrete01 (Εικόνα από: Silvia Mazzoni για το <https://opensees.berkeley.edu>)

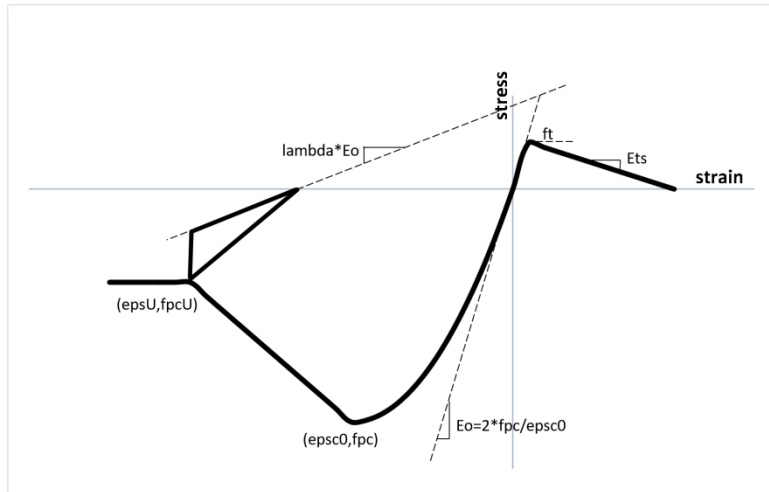
Το καταστατικό προσομοίωμα του concrete02, που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την εργασία, αφορά το μονοαξονικό μοντέλο του Yassin (1994), με μη γραμμική υστερητική συμπεριφορά και μη μηδενική αντοχή σε εφελκυσμό. Οι σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης που περιγράφουν το υλικό είναι οι εξής:

$$\sigma = f_{cs} \left[2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cs}} \right) - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cs}} \right)^2 \right], \text{ όπου } \varepsilon \leq \varepsilon_{cs}$$

$$\sigma = \frac{\varepsilon - \varepsilon_{cs}}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{cs}} (f_{cu} - f_{cs}) + f_{cs}, \text{ όπου } \varepsilon_{cs} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cu}$$

$$\sigma = f_{cu}, \text{ όπου } \varepsilon > \varepsilon_{cu}$$

Όπου σ , ε η θλιπτική τάση και αντίστοιχη παραμόρφωση, f_{cs} , ε_{cs} η θλιπτική αντοχή και αντίστοιχη παραμόρφωση αντοχής και f_{cu} , ε_{cu} η αντοχή θραύσης και η αντίστοιχη μέγιστη παραμόρφωση. Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνεται η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης, ενώ ο συμβολισμός των μεγεθών γίνεται σύμφωνα με την γραφή που χρησιμοποιεί το λογισμικό Opensees.



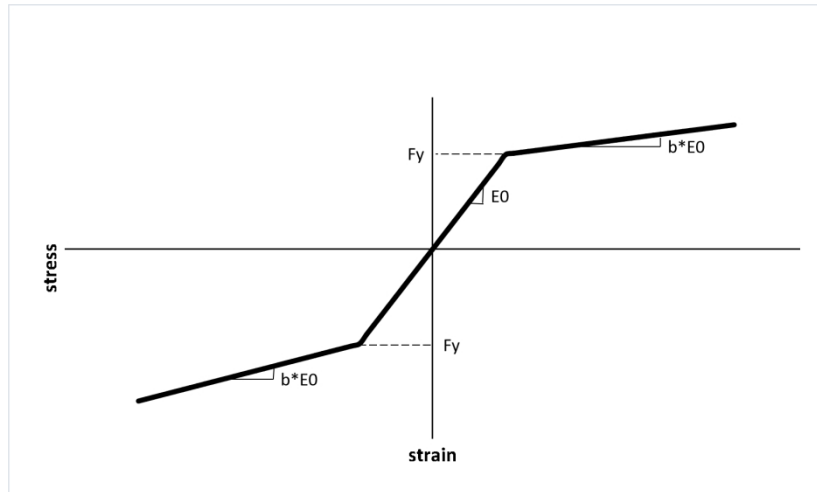
Σχ. 11: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης του υλικού concrete02 (Εικόνα από: Silvia Mazzoni για το <https://opensees.berkeley.edu>)

Όπου, fpc , $epsc0$ η θλιπτική αντοχή, η αντίστοιχη παραμόρφωση, $fpcu$, $epsU$ η τάση θραύσης και η μέγιστη παραμόρφωση, $lamda$ ο λόγος μεταξύ της κλίσης αποφόρτισης στο $epsU$ και της αρχικής κλίσης, ft η αντοχή σε εφελκυσμό και Ets η κλίση της κράτυνσης σε εφελκυσμό. Η αρχική κλίση του προσομοιώματος είναι $2 \times fpc / epsc0$.

3.3 Καταστατικά προσομοιώματα χάλυβα

Αντιστοίχως, τα προσομοιώματα χάλυβα σπλισμού που χρησιμοποιήθηκαν κατά την σεισμική ανάλυση είναι δύο και στο Opensees καλούνται με τις ονομασίες steel01 και steel02.

Το προσομοίωμα steel01, το οποίο και εφαρμόστηκε στην εργασία, αφορά ένα μονοαξονικό διγραμμικό υλικό χάλυβα με κινηματική κράτυνση, όπου σύμφωνα με το Opensees (FEDEAS, 2015) και το επόμενο διάγραμμα, Fy η τάση διαρροής, E_0 η αρχική κλίση του ελαστικού κλάδου και b ο λόγος της κλίσης του μετελαστικού κλάδου προς την αρχική κλίση.



Σχ. 12: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης με κινηματική κράτνση για το μοντέλο χάλυβα steel01 (Εικόνα από: Silvia Mazzoni για το <https://opensees.berkeley.edu>)

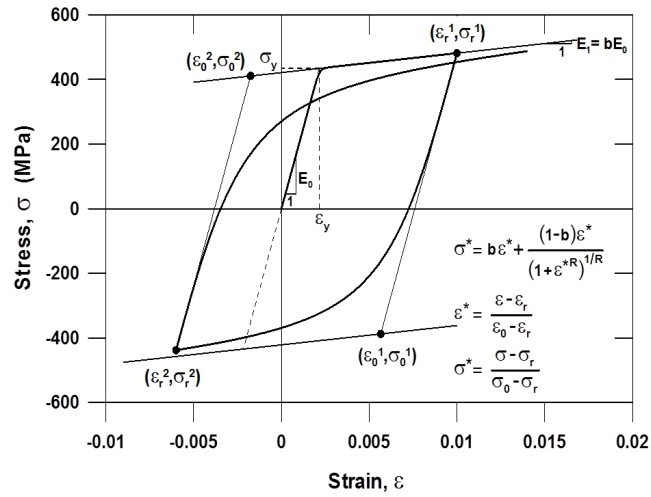
Το προσομοίωμα steel02 αφορά το μονοαξονικό υλικό χάλυβα με ισότροπη κράτνση για το οποίο η σχέση τάσης-παραμόρφωσης δίνεται από το μοντέλο των Menegotto-Pinto (1973) ως εξής:

$$\sigma^* = b\varepsilon^* + \frac{(1-b)\varepsilon^*}{(1+\varepsilon^{*R})^{1/R}} \quad (\text{Εξ. 8})$$

$$\varepsilon^* = \frac{\varepsilon - \varepsilon_r}{\varepsilon_0 - \varepsilon_r}$$

$$\sigma^* = \frac{\sigma - \sigma_r}{\sigma_0 - \sigma_r}$$

Σύμφωνα με το Σχ.13, η Εξ.20 εκφράζει την μετάβαση από μια ασυμπτωτική καμπύλη με κλίση E_0 σε μία άλλη ασυμπτωτική με κλίση bE_0 , σ_0 και ε_0 είναι η τάση και παραμόρφωση στο σημείο τομής των δύο ασύμπτωτων, ενώ σ_r και ε_r είναι η τάση και η παραμόρφωση στο σημείο όπου συνέβη η τελευταία αντιστροφή παραμόρφωσης με τάση ίδιου προσήμου. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η καμπύλη της σχέσης τάσης-παραμόρφωσης ενός κύκλου φόρτισης με ισότροπη κράτνση.



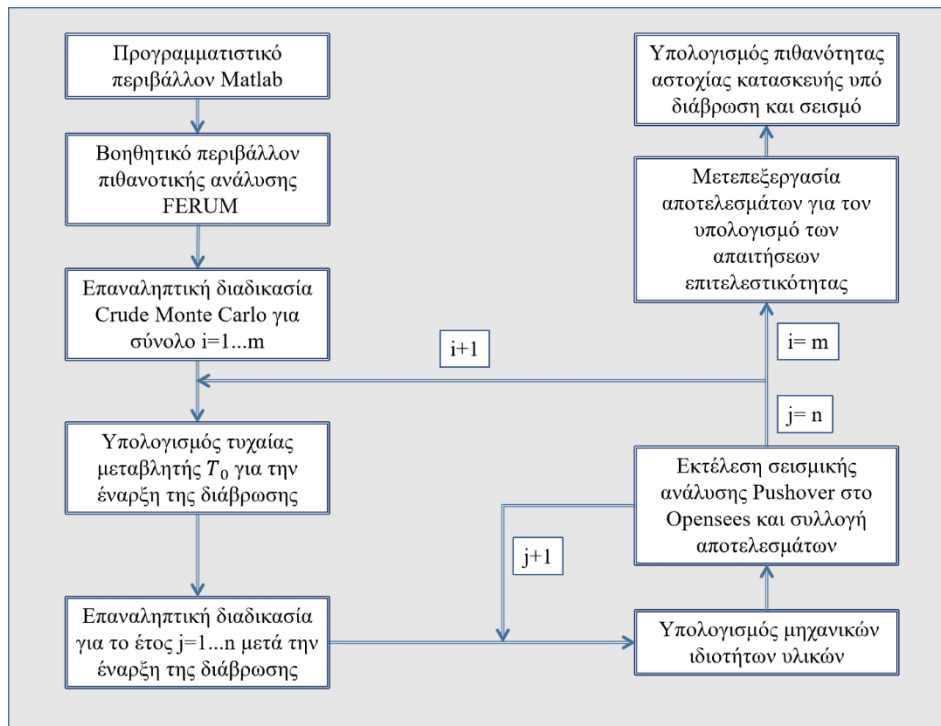
Σχ. 13: Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων με ισότροπη κράτνυση για το μοντέλο χάλυβα steel02

(Εικόνα από: <https://opensees.berkeley.edu/wiki/images/4/43/SteelMPF.png>)

4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ MATLAB

4.1 Εισαγωγή

Η πιθανοτική ανάλυση αστοχίας της γέφυρας πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον της γλώσσας προγραμματισμού Matlab, μέσω μιας σειράς επαναληπτικών διαδικασιών. Τα βήματα φαίνονται συνοπτικά στο Σχ.14 και αναλύονται στις επόμενες ενότητες.



Σχ. 14: Διάγραμμα ροής πιθανοτικής ανάλυσης.

4.2 Πιθανοτική Ανάλυση Monte Carlo

Η ανάγκη για την μελέτη της αξιοπιστίας των κατασκευών με υπολογισμό της πιθανότητας αστοχίας οδήγησε στην ανάπτυξη και χρήση ενός βοηθητικού κώδικα, το FERUM (Finite Element Reliability Using Matlab), το οποίο δημιουργήθηκε το 1999 στο πανεπιστήμιο Berkeley της Καλιφόρνια από τους Der Kiureghian et al., (2006). Ο κώδικας αποτελείται από μια εργαλειοθήκη Matlab ανοιχτού κώδικα και παρουσιάζει μεθόδους δομικής αξιοπιστίας, παρέχοντας έτσι ένα κατανοητό και εύκολο εργαλείο τόσο για διδακτική όσο και για ερευνητική χρήση. Η μέθοδος υπολογισμού της πιθανότητας αστοχίας που εμπεριέχεται στον κώδικα και εφαρμόστηκε στην εργασία είναι η Crude Monte Carlo.

Σύμφωνα με τον οδηγό χρήστη που έχει δημοσιευτεί από τον Bourinet, J. M. (2010), η δομή του FERUM θεωρεί προβλήματα ανεξάρτητα του χρόνου, στα οποία η ζητούμενη πιθανότητα της ανεπιθύμητης κατάστασης, στην περίπτωσή μας η πιθανότητα αστοχίας, εκφράζεται σε όρους ενός

διανύσματος X τυχαίων μεταβλητών μέσω της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας $f_x(x, \theta_f)$, όπου θ_f το διάνυσμα των παραμέτρων κατανομής. Η αστοχία ορίζεται ως η συνάρτηση $g(x)$, όπου x μια τιμή της τυχαίας μεταβλητής X . Η συνάρτηση $g(x)$ χωρίζει το πεδίο των τυχαίων μεταβλητών σε ασφαλές πεδίο όπου $g(x) > 0$ και σε πεδίο αστοχίας όπου $g(x) < 0$. Επομένως η πιθανότητα αστοχίας εκφράζεται ως:

$$p_f = \int_{g(x, \theta_f) \leq 0} f_x(x, \theta_f) dx,$$

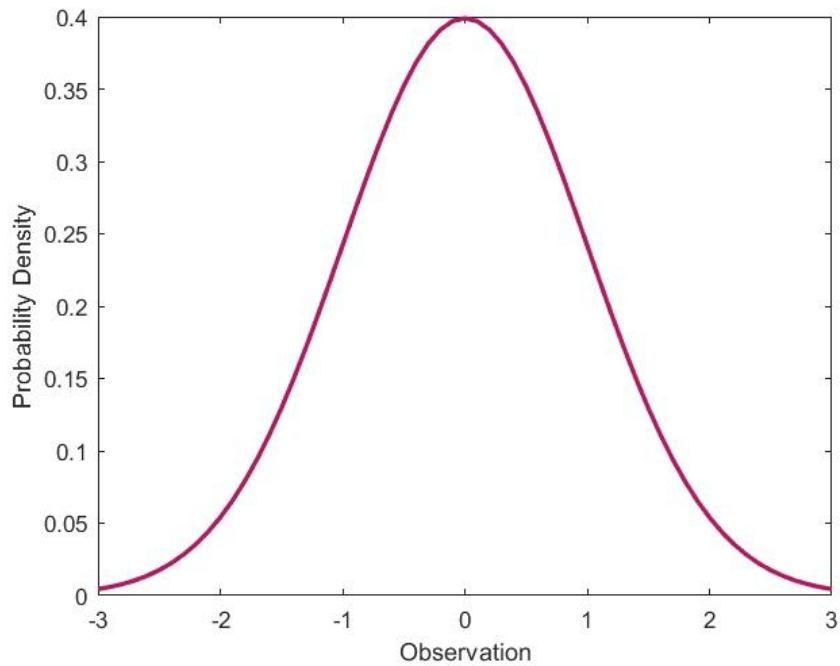
με βάση την οποία εφαρμόζεται η μέθοδος Crude Monte Carlo. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $f(x)$ συνήθως δεν είναι γνωστή, οπότε αντικαθίσταται από μια συνάρτηση που ορίζεται από κατανομές πιθανότητας και έτσι προκύπτουν οι άγνωστες μεταβλητές.

Στην περίπτωση της διάβρωσης, οι άγνωστοι συντελεστές που περιέχονται στην Εξ.1 του χρόνου έναρξης της διάβρωσης T_0 , παίρνουν τιμές με βάση την κατανομή που ορίζεται για τον κάθε ένα συντελεστή και αυτό επαναλαμβάνεται σε κάθε επανάληψη Monte Carlo. Το FERUM διαθέτει μια βιβλιοθήκη με αρκετά μοντέλα κατανομής πιθανότητας. Κάποιες κατανομές παρουσιάζονται ενδεικτικά εδώ:

Κανονική κατανομή

Λέμε ότι τυχαία μεταβλητή X , ακολουθεί την Κανονική Κατανομή με παραμέτρους την μέση τιμή μ και την τυπική απόκλιση σ , αν έχει την εξής συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad -\infty < x < \infty$$



Σχ. 15: Καμπύλη κανονικής κατανομής.

Λογαριθμική κανονική κατανομή

Η λογαριθμοκανονική κατανομή μιας τυχαίας μεταβλητής X με μέση τιμή μ και τυπική απόκλιση σ , έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

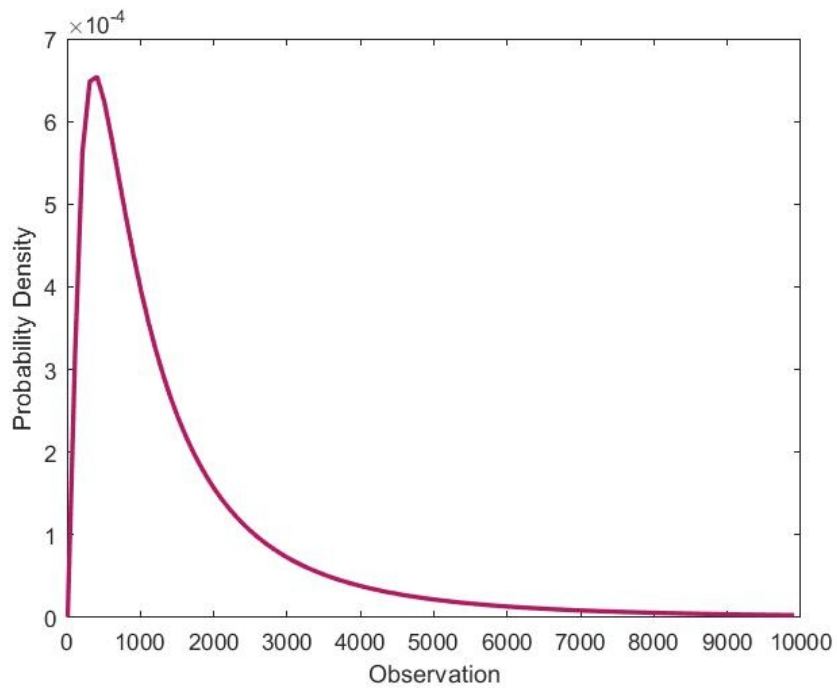
$$f_X(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-\mu}{\sigma}\right)^2}, \quad 0 < x < \infty$$

Όπου

$$\sigma = \sqrt{\ln\left(\left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^2 + 1\right)}$$

Και

$$\mu = \ln(\mu) - \frac{1}{2}\sigma^2.$$



Σχ. 16: Καμπύλη λογαριθμικής κανονικής κατανομής.

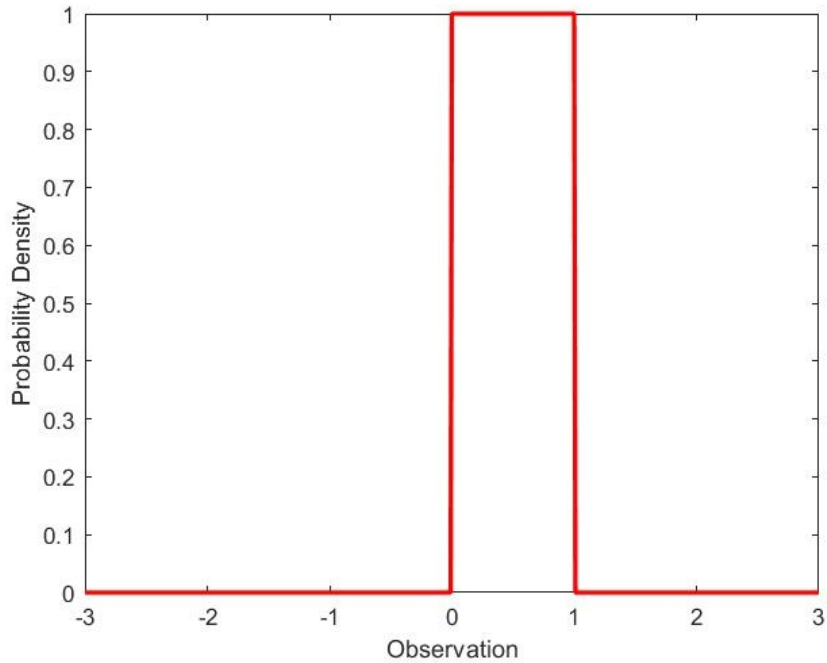
Ομοιόμορφη κατανομή

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της συνεχούς ομοιόμορφης κατανομής

$$\text{είναι: } \begin{cases} \frac{1}{b-a} & , a \leq x \leq b, \\ 0 & , x < a \text{ ή } x > b \end{cases}$$

$$\mu = \frac{a+b}{2} \quad ,$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{12}(a+b)^2$$



Σχ. 17: Καμπύλη ομοιόμορφης κατανομής.

Μέσα σε κάθε επανάληψη Crude Monte Carlo παράχθηκε αρχικά μια τυχαία τιμή για κάθε μεταβλητή της διάβρωσης, σύμφωνα με την κατανομή που ακολουθεί η κάθε μια και στην συνέχεια από την Εξ.1 αντικαθιστώντας την τιμή των μεταβλητών υπολογίστηκε το έτος έναρξης της διάβρωσης T_{corr} . Από τη χρονική στιγμή T_{corr} και για κάθε επόμενο έτος αρχίζουν να απομειώνονται οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών λόγω διάβρωσης.

4.3 Προετοιμασία αρχείων δεδομένων OPENSEES

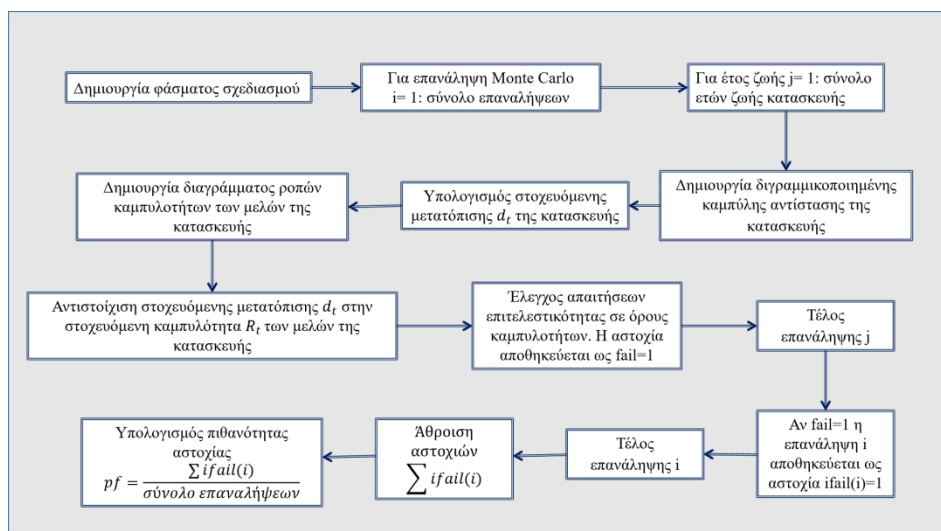
Έχοντας πλέον ως δεδομένο το έτος έναρξης της διάβρωσης, αρχίζει η διαδικασία απομείωσης των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών. Για κάθε επόμενο έτος από την έναρξη της διάβρωσης το FERUM καλεί το λογισμικό Opensees για την σεισμική ανάλυση με τις νέες απομειωμένες ιδιότητες των υλικών. Το Opensees είναι ένα πλαίσιο λογισμικού που εκτελεί σεισμική ανάλυση σε κατασκευές με εφαρμογή πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι, στο πλαίσιο της εργασίας δημιουργεί το προσομοίωμα της σεισμικής απόκρισης της κατασκευής υπό μη γραμμική στατική ανάλυση Pushover. Το αρχείο δεδομένων που εισάγεται στο Opensees για την σεισμική ανάλυση είναι σε μορφή γλώσσας προγραμματισμού C++ και στην εργασία η σύνταξη του αρχείου έγινε με την βοήθεια του λογισμικού MSBridge (Almutairi et al., 2018), στο οποίο ο χρήστης εισάγει τα δεδομένα της γέφυρας, των υλικών και την επιλεγμένη μέθοδο ανάλυσης και εκτελώντας το λογισμικό παράγεται το αρχείο Opensees και τα ζητούμενα αποτελέσματα. Στην εργασία η χρήση του MSBridge αφορά την σύνταξη του αρχείου δεδομένων του Opensees, ούτως ώστε να γίνει η σεισμική ανάλυση στο πλαίσιο του Matlab. Τα αποτελέσματα της σεισμικής ανάλυσης

εισάγονται στο επόμενο βήμα για μετεπεξεργασία με σκοπό τον έλεγχο των απαιτήσεων επιτελεστικότητας.

Πίνακας 2: Δεδομένα των κατασκευών της πιθανοτικής ανάλυσης.

4.4 Μετεπεξεργασία αποτελεσμάτων και υπολογισμός πιθανότητας αστοχίας

Εφόσον ολοκληρωθεί η επαναληπτική διαδικασία Crude Monte Carlo και έχουν αποθηκευτεί τα εντατικά και παραμορφωσιακά μεγέθη από τις σεισμικές αναλύσεις του Opensees που απαιτούνται, ακολουθεί η επεξεργασία τους ώστε να βρεθεί η ζητούμενη πιθανότητα αστοχίας, η οποία σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ πρέπει να ικανοποιεί τις στάθμες A3, B2, Γ1 του Πιν.1 με όρια 50%, 10% και 10% αντίστοιχα. Γίνεται η θεώρηση υπέρ της ασφαλείας ότι η κατασκευή αστοχεί όταν εμφανιστεί η πρώτη αστοχία σε κάποια διατομή.



Σχ. 18: Διάγραμμα ροής υπολογισμού πιθανότητας αστοχίας.

Στο Σχ.18 απεικονίζεται η διαδικασία υπολογισμού της πιθανότητας αστοχίας ως εξής:

1. Παράγεται το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού κατά ΕΚ8 με βάση τα χαρακτηριστικά του σεισμού.
2. Για κάθε μια από τις επαναλήψεις Monte Carlo που έτρεξε το πρόγραμμα:
 - i. Υπολογίζεται η στοχευόμενη μετατόπιση κορυφής που αντιστοιχεί στον σεισμό σχεδιασμού
 - ii. παράγεται η διγραμμικοποιημένη καμπύλη ικανότητας της κατασκευής για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης έως και το τελευταίο έτος ζωής που έχει οριστεί στην Matlab.
 - iii. Παράγονται τα διαγράμματα ροπών καμπυλοτήτων των μελών της κατασκευής, βάσει μιας απλοποιητικής σταθερής αξονικής δύναμης.

- iv. Γίνεται αντιστοίχιση της στοχευόμενης μετατόπισης με την στοχευόμενη καμπυλότητα των μελών ώστε να γίνουν οι έλεγχοι σε όρους καμπυλότητας.
 - v. Γίνεται έλεγχος της αντοχής των μελών ως προς την επιτελεστικότητα, σε όρους καμπυλοτήτων.
3. Γίνεται άθροιση των επαναλήψεων που εμφάνισαν αστοχία.
 4. Το άθροισμα διαιρείται με τις συνολικές επαναλήψεις και προκύπτει η πιθανότητα αστοχίας της κατασκευής υπό διάβρωση και σεισμό.

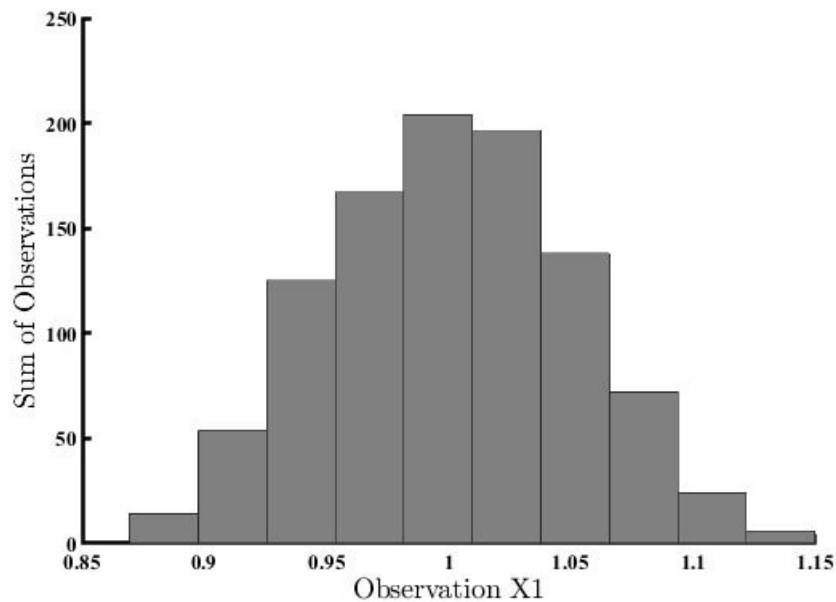
Στην εργασία, αυτή η διαδικασία ακολουθήθηκε για μια γέφυρα ωπλισμένου σκυροδέματος τριών ανοιγμάτων. Για την καλύτερη εποπτεία και κατανόηση της μεθοδολογίας η ίδια διαδικασία έγινε αρχικά για ένα απλό επίπεδο πλαίσιο και στην συνέχεια για την γέφυρα.

	<i>Επίπεδο Πλαίσιο</i>		<i>Γέφυρα</i>	
	10		493	
Άνοιγμα(m)	10		493	
	<i>Στύλος 1-Στύλος 2</i>		<i>Βάθρο 1</i>	<i>Βάθρο 2</i>
Ύψος (m)	5	5	110	32
$B \times H$ (mm)	250 × 500	250 × 500	8000 × 8000	2300 × 8000
E_s (MPa)	200	200	200	200
A_s (mm ²)	153,9	153,9	616	616
f_{ck} (MPa)	25	25	40	40
f_{sk} (MPa)	500	500	500	500

5 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

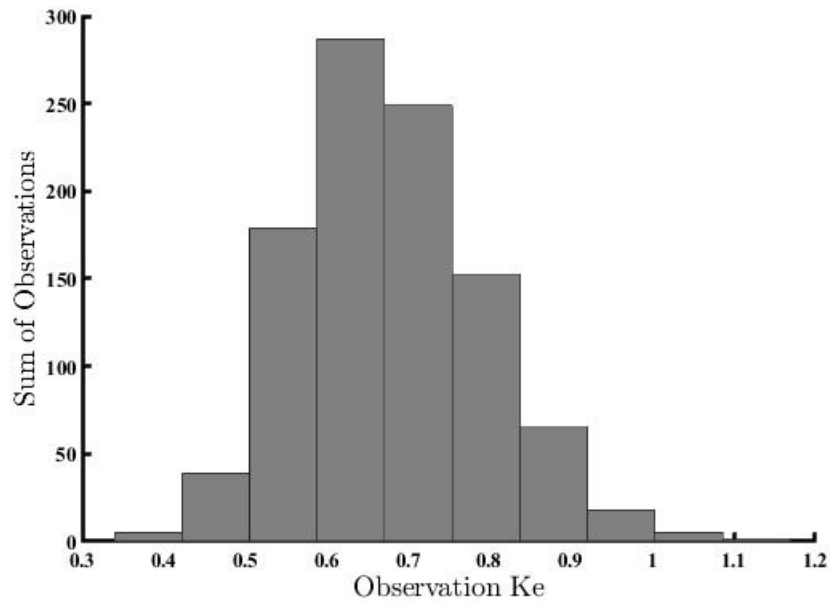
Η ανάλυση του πλαισίου και της γέφυρας έγινε με την μέθοδο της μη γραμμικής στατικής υπερωθητικής ανάλυσης Pushover με έλεγχο μετατοπίσεων. Οι εννέα μεταβλητές που λαμβάνονται υπόψιν στην διάβρωση μέσω της μεθόδου Crude Monte Carlo ακολουθούν τις εξής πιθανοτικές κατανομές (DuraCrete, 2000):

1. Ο συντελεστής αβεβαιότητας X_1 για την εξιδανίκευση του δεύτερου νόμου του Fick, με κανονική κατανομή.



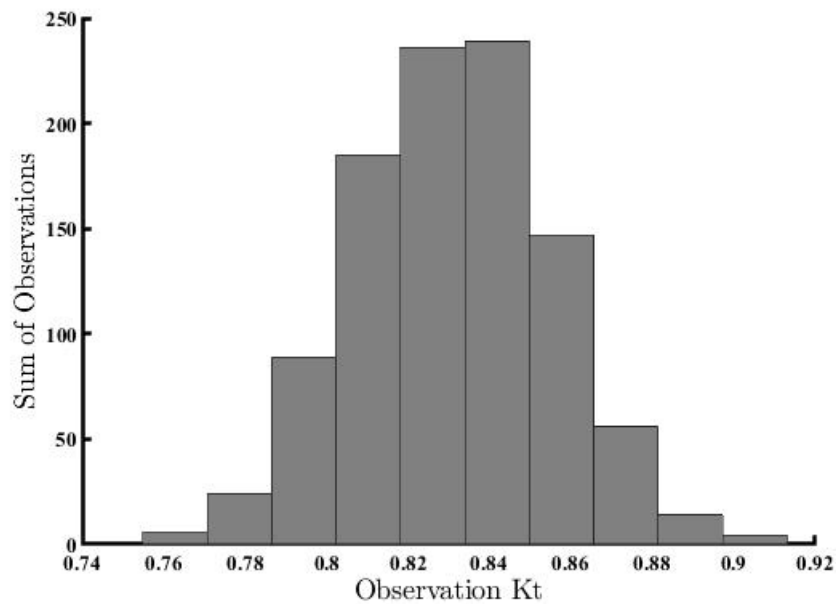
Σχ. 19: Μεταβλητή X_1

2. Ο συντελεστής περιβάλλοντος, k_e με γάμμα κατανομή.



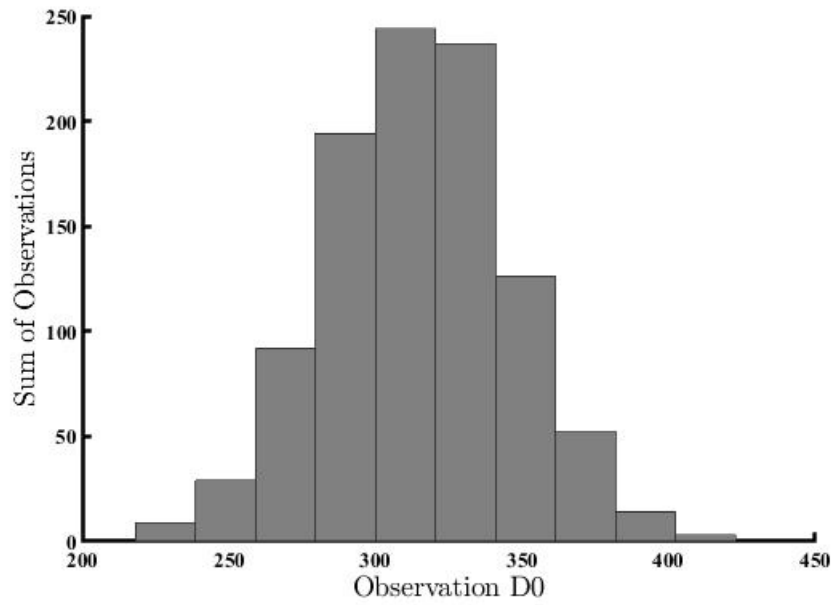
Σχ. 20: Μεταβλητή Ke

3. Ο συντελεστής επιρροής k_i των δοκιμαστικών μεθόδων για να προκύψει το D_0 , με κανονική κατανομή.



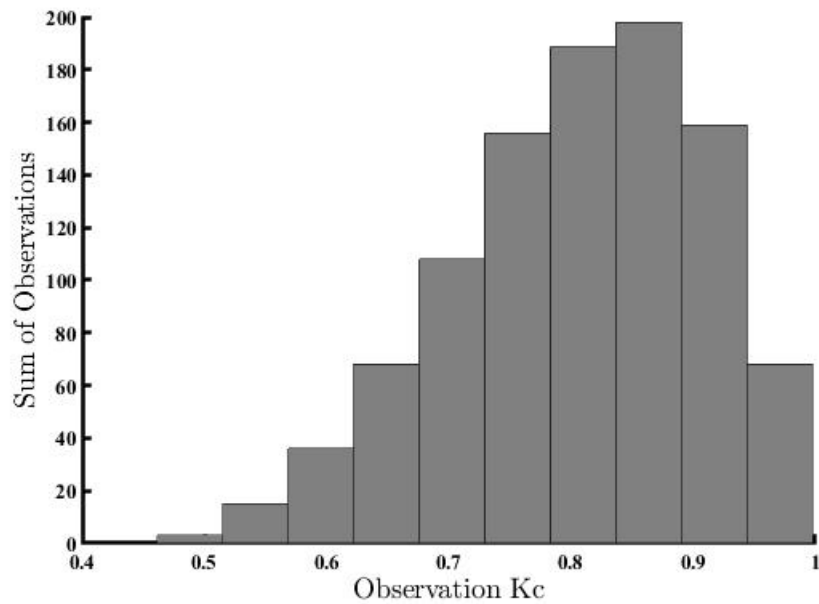
Σχ. 21: Μεταβλητή Kt

4. Ο εμπειρικός συντελεστής διάχυσης, D_0 με κανονική κατανομή.



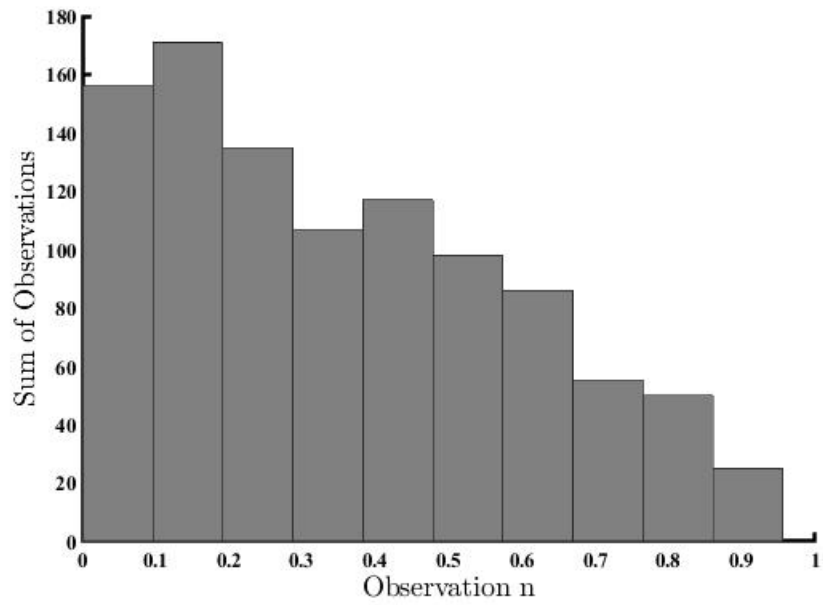
Σχ. 22: Μεταβλητή D0

5. Παράμετρος που αντιπροσωπεύει την επιρροή της σκλήρυνσης, k_c με κατανομή βήτα.



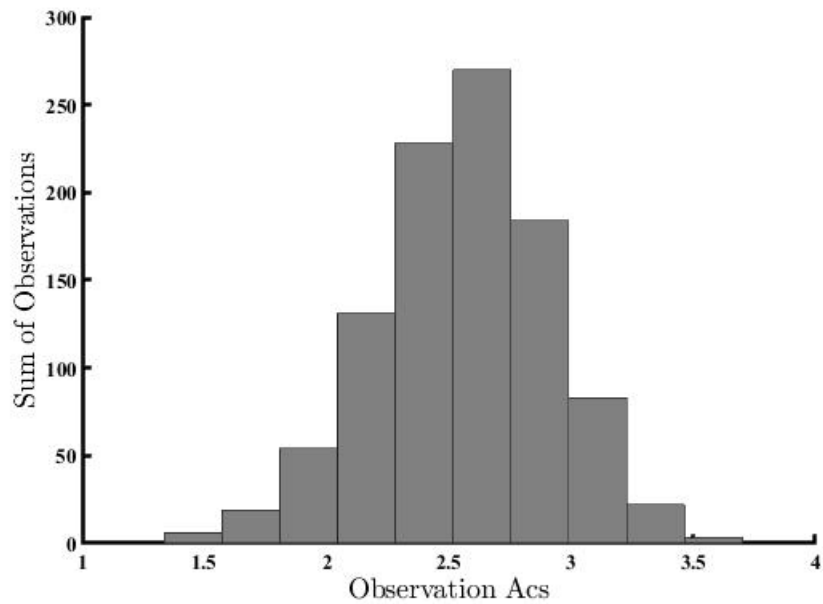
Σχ. 23: Μεταβλητή Kc.

6. Ο εμπειρικός συντελεστής γήρανσης, n με κατανομή βήτα.



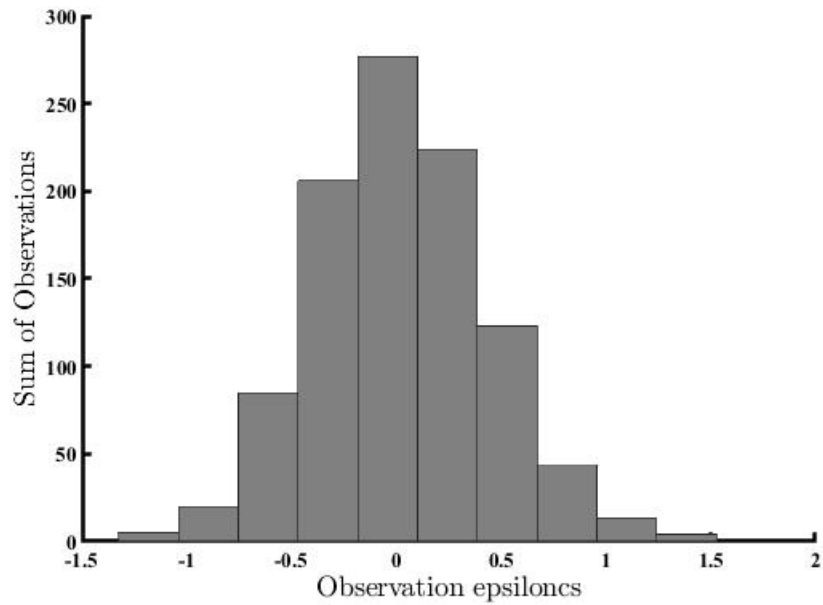
Σχ. 24: Μεταβλητή n.

7. Παράμετρος της συνάρτησης, A_{cs} με κανονική κατανομή.



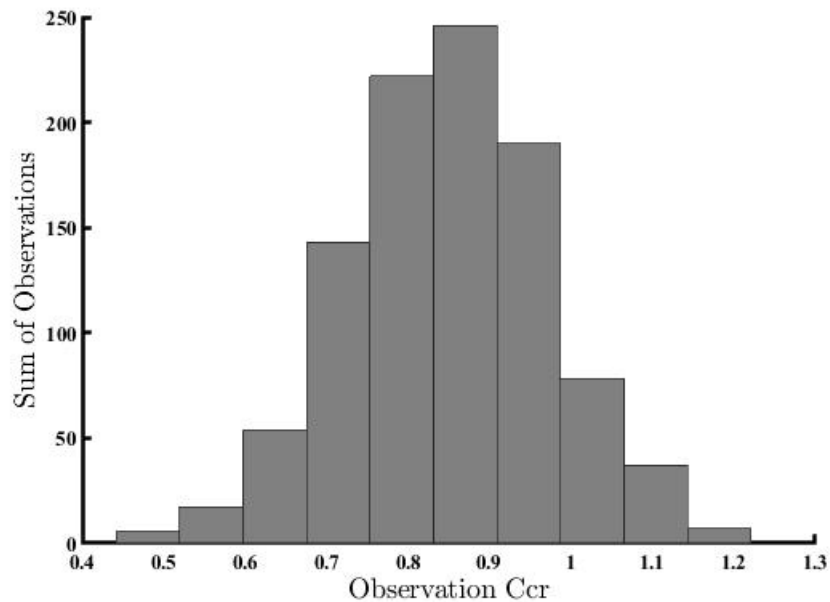
Σχ. 25: Μεταβλητή Acs.

8. Παράμετρος της συνάρτησης, ε_{cs} με κανονική κατανομή.



Σχ. 26: Μεταβλητή epsilons.

9. Η κρίσιμη συγκέντρωση χλωριόντων σε βάθος ίσο με την επικάλυψη, C_{cr} με κανονική κατανομή.

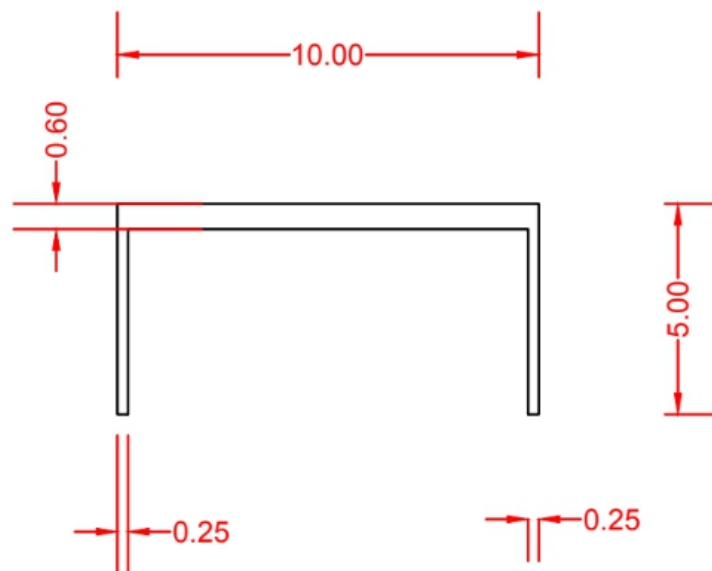


Σχ. 27: Μεταβλητή Ccr.

Οι έλεγχοι επιτελεσματικότητας έγιναν σύμφωνα με την απαίτηση A3, B2, Γ1 του ΚΑΝ.ΕΠΕ (Πίνακας 1) ενώ έγινε η θεώρηση ότι η κατασκευή αστοχεί όταν ένα τουλάχιστον κρίσιμο μέλος αστοχήσει. Τελικά,

το άθροισμα των αστοχιών διαιρούμενο με το σύνολο των επαναλήψεων έδωσε την ζητούμενη πιθανότητα αστοχίας, που αποτελεί και το τελικό στάδιο της διαδικασίας.

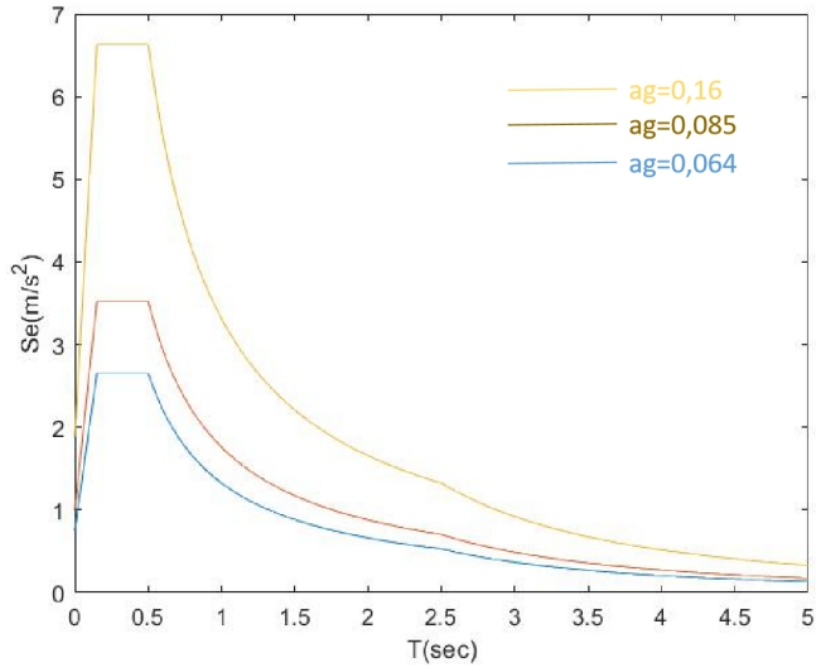
5.1 Επίπεδο πλαίσιο



Σχ. 28: Όψη επίπεδου πλαισίου.

Το επίπεδο πλαίσιο του σχήματος αναλύθηκε για σεισμό ασκούμενο στην διεύθυνση x του άξονά του, για διάρκεια ζωής τα 65 έτη. Το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού (EK8) υπολογίστηκε για ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Z1, κατηγορία σπουδαιότητας II και απόσβεση 5%. Ο έλεγχος επιτελεστικότητας έγινε συντηρητικά για την περίπτωση κρίσιμων κατασκευών, δηλαδή για τις στάθμες A3, B2, Γ1 του Πίνακα 1, με όρια πιθανότητας αστοχίας 50%, 10% και 10% σύμφωνα με τον Πιν. 2.1 του ΚΑΝ.ΕΠΕ, υπέρ της ασφαλείας. Η εδαφική επιτάχυνση αναφοράς για την στάθμη Γ1 είναι $a_g = 0,16$ και ορίζεται από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ, ενώ οι εδαφικές επιταχύνσεις αναφοράς για τις στάθμες A3 και B2, προκύπτουν από τον ακόλουθο τύπο (Parazachos, 1997), με μια απομείωση των τιμών περίπου στο 20% ούτως ώστε να υπάρχει συμφωνία με την στάθμη B2:

$$\text{Log(PGA)} = 0.277 \log(T_0) + 1.579$$



Σχ. 29: Φάσματα σχεδιασμού για κάθε περίπτωση απαίτησης.

Για να επικυρωθεί η εγκυρότητα της μεθόδου Crude Monte Carlo που εφαρμόστηκε, πραγματοποιήθηκαν αρχικά 1000 επαναλήψεις από τις οποίες προέκυψε η πιθανότητα αστοχίας και εν συνεχεία 5000 επαναλήψεις δίνοντας πάλι την πιθανότητα αστοχίας, με στόχο οι δύο πιθανότητες να έχουν πολύ μικρή απόκλιση, αποδεικνύοντας έτσι την ορθότητα της μεθόδου.

Η κατασκευή εξετάστηκε για δύο ενδεχόμενα που σχετίζονται με το περισφιγμένο σκυρόδεμα των διατομών: (α) περίπτωση στην οποία το περισφιγμένο σκυρόδεμα (πυρήνας) δεν επηρεάζεται από την διάβρωση διατηρώντας τις αρχικές του μηχανικές ιδιότητες, (β) περίπτωση στην οποία το περισφιγμένο σκυρόδεμα επηρεάζεται από την διάβρωση και οι μηχανικές του ιδιότητες απομειώνονται με τον χρόνο.

5.1.1 Περισφιγμένο σκυρόδεμα διατομής χωρίς απομείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του.

Αναλυτικότερα, από τις πρώτες 1000 επαναλήψεις προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

0 αστοχίες για την στάθμη Άμεση Χρήση, άρα πιθανότητα αστοχίας 0%.

0 αστοχίες για την στάθμη Προστασία Ζωής, άρα πιθανότητα αστοχίας 0%.

0 αστοχίες για την στάθμη Οιονεί Κατάρρευση, άρα πιθανότητα αστοχίας 0%.

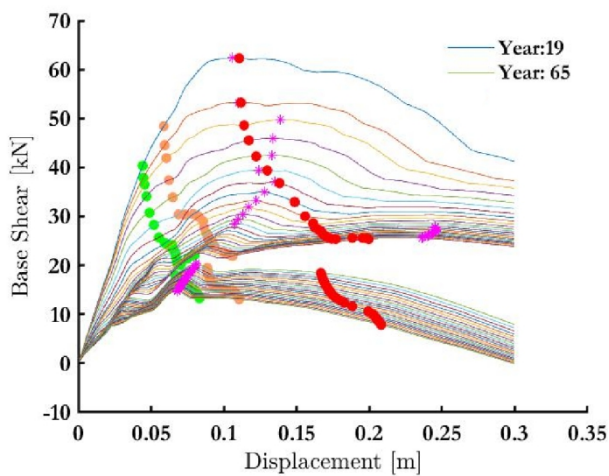
Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, το πλαίσιο δεν αστόχησε καμία φορά και άρα η διάβρωση δεν επηρέασε την κατασκευή στην περίπτωση που επιδρά μόνο στο απερίσφικτο σκυρόδεμα και τον

οπλισμό. Είναι συνεπώς λογικό να μην γίνει επαλήθευση για 5000 επαναλήψεις καθώς δεν υπάρχει κάποια τιμή αστοχίας για να επαληθευτεί.

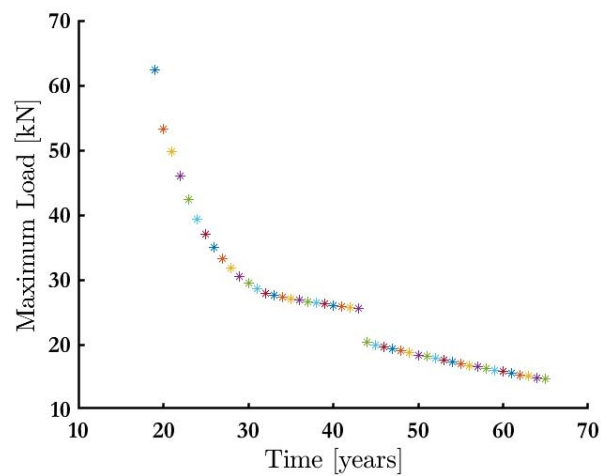
5.1.2 Περισφιγμένο σκυρόδεμα διατομής με απομείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του λόγω διάβρωσης.

Για κάθε επανάληψη Monte Carlo δημιουργήθηκε η καμπύλη ικανότητας του πλαισίου, πάνω στην οποία φαίνεται η δύναμη διαρροής με ροζ και η στοχευόμενη μετατόπιση με πράσινο, πορτοκαλί και κόκκινο για κάθε σεισμό σχεδιασμού αντίστοιχα. Χάριν ευκολίας και οικονομίας χρόνου, από τις 1000 επαναλήψεις, επιλέχθηκαν μεμονωμένα κάποιες αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις για παρουσίαση των αποτελεσμάτων τους, ώστε να κατανοήσουμε καλύτερα τη διαδικασία και το τελικό αποτέλεσμα.

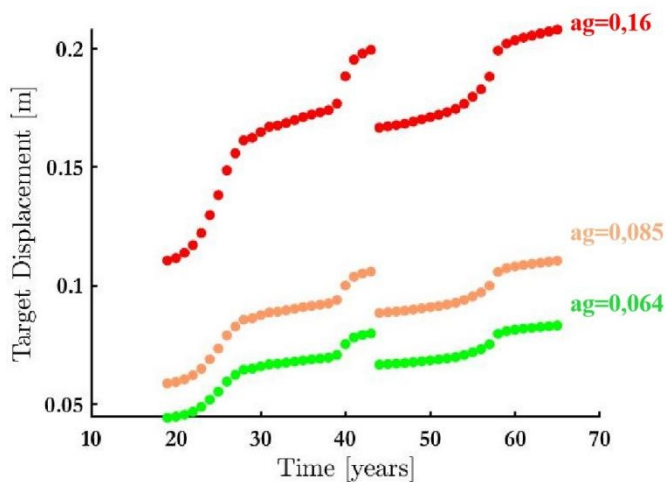
Ενδεικτικά για την επανάληψη 10 η καμπύλη ικανότητας αρχίζει να μεταβάλλεται από το 19ο έτος που αρχίζει η διάβρωση όπως φαίνεται και στο Σχ. 30(α). Αρχικά απομειώνονται οι ιδιότητες της επικάλυψης και του οπλισμού και την χρονική στιγμή που αρχίζει να απομειώνεται και η αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος, η καμπύλη παρουσιάζει ένα άλμα και έπειτα συνεχίζει να φθίνει ομαλά έως τα 65 έτη ζωής.



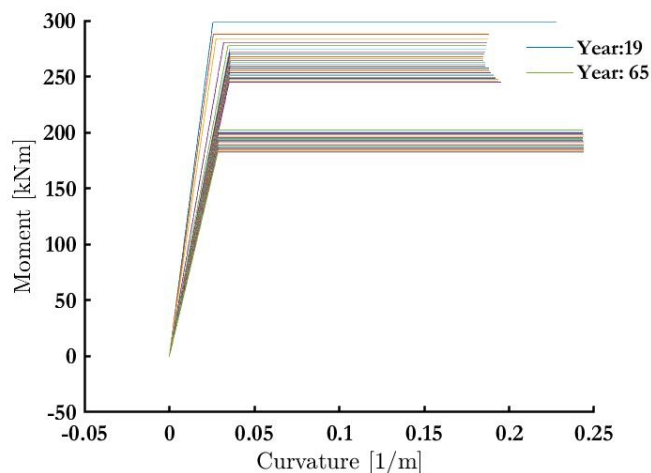
(α)



(β)



(γ)



(δ)

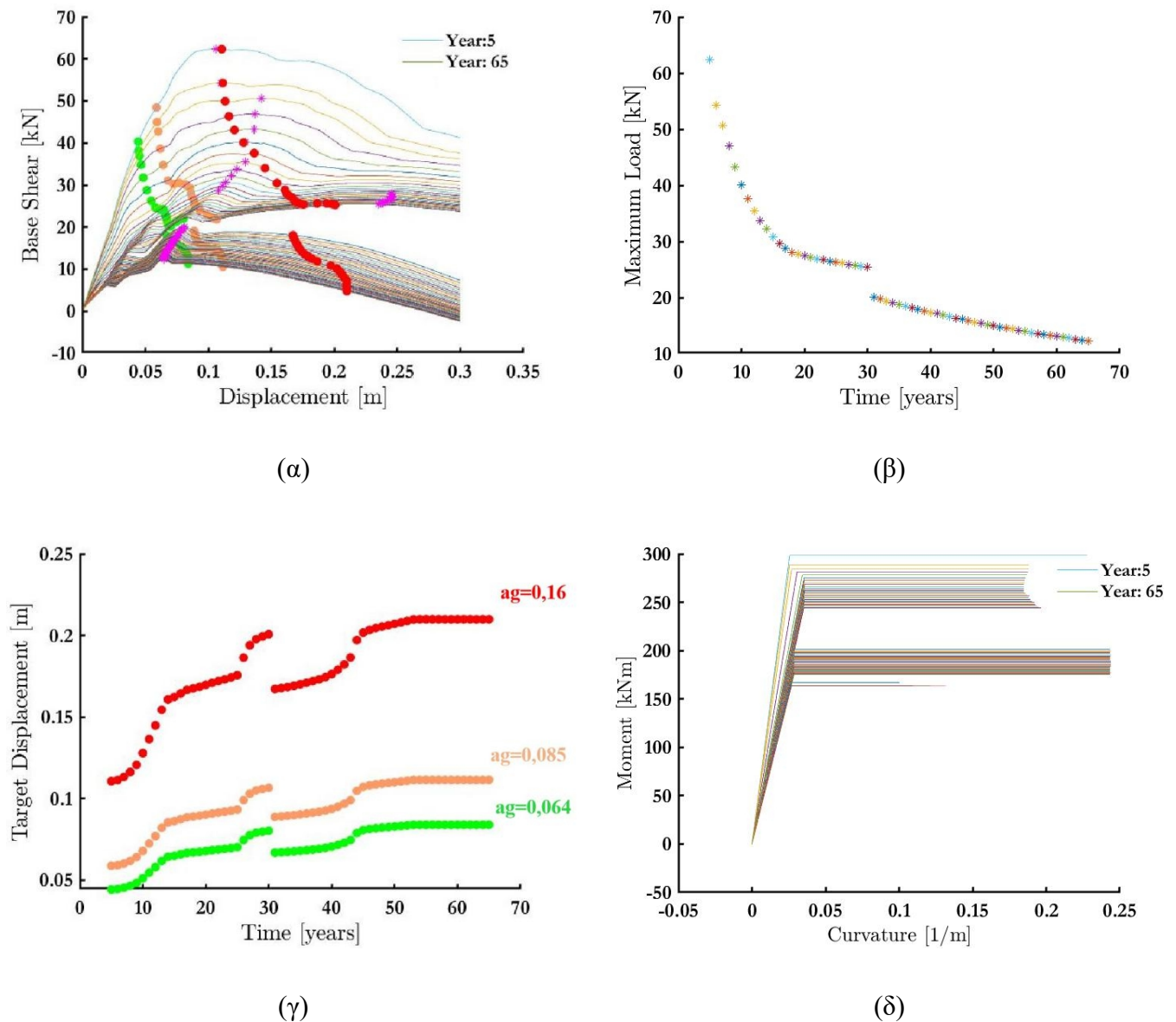
Σχ. 30: Επανάληψη 10. (α) Καμπύλη ικανότητας για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης. (β) Μέγιστο φορτίο βάσης συναρτήσει του χρόνου. (γ) Στοχευόμενη μετατόπιση συναρτήσει του χρόνου για τις τρεις περιπτώσεις σεισμού. (δ) Διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης.

Όπως φαίνεται και από το Σχ. 30(α) η καμπύλη φθίνει ως προς την δύναμη βάσης με τα χρόνια, άρα και η αντίστοιχη μέγιστη δύναμη κάθε φορά. Η μεταβολή της μέγιστης δύναμης για την επανάληψη 10 απεικονίζεται στο Σχ. 30(β). Το άλμα της καμπύλης αντιστοιχεί στην ίδια χρονική στιγμή με το άλμα στην καμπύλη ικανότητας. Αντιθέτως, η στοχευόμενη μετατόπιση αρχίζει να αυξάνεται, παρουσιάζει μειωτικό άλμα και στην συνέχεια αυξάνεται πάλι ομαλά συναρτήσει του έτους Σχ. 30(γ). Για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων σε όρους καμπυλοτήτων δημιουργήθηκαν οι καμπύλες ροπών καμπυλοτήτων των διατομών. Στο επίπεδο πλαίσιο οι δύο διατομές των υποστυλωμάτων είναι πανομοιότυπες οπότε τα διαγράμματα είναι ίδια Σχ. 30(δ).

Με βάση τα στοιχεία του διαγράμματος υπολογίστηκαν οι απαιτήσεις επιτελεστικότητας σε όρους καμπυλοτήτων, οπότε για να γίνει σύγκριση με την στοχευόμενη μετατόπιση βρέθηκε η στοχευόμενη καμπυλότητα στην οποία αυτή αντιστοιχεί και ακολούθησαν οι απαραίτητοι έλεγχοι για Περιορισμένες Βλάβες, Σημαντικές Βλάβες και Οιονεί Κατάρρευση. Όπως έδειξαν τα αποτελέσματα για την επανάληψη 10, 41 έτη μετά την έναρξη της διάβρωσης εμφανίστηκε αστοχία για την στάθμη Περιορισμένες Βλάβες, δηλαδή στο 60ο έτος ζωής της γέφυρας, ενώ δεν αστόχησε για κάποια άλλη στάθμη.

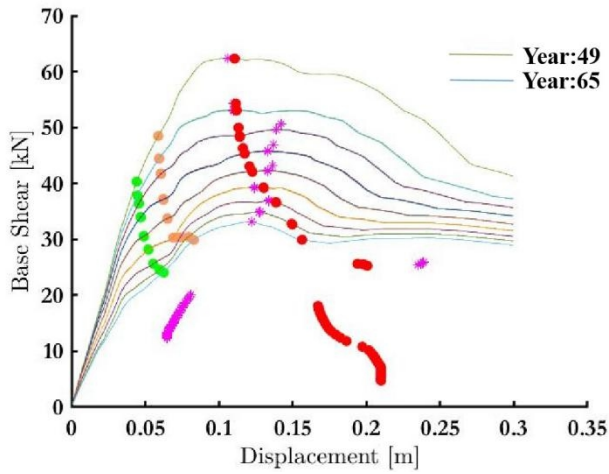
Αυτή η διαδικασία έγινε για κάθε επανάληψη Monte Carlo, 1000 φορές συνολικά και τελικά το άθροισμα των επαναλήψεων που αστόχησαν διαιρέθηκε με το 1000 δίνοντας την ζητούμενη πιθανότητα αστοχίας της κατασκευής. Για να αποδειχθεί η ορθότητα της μεθόδου, αυτή η πιθανότητα συγκρίνεται αργότερα με την πιθανότητα που προέκυψε από τις 5000 επαναλήψεις Monte Carlo.

Ενδεικτικά παρατίθενται τα διαγράμματα από κάποιες επαναλήψεις της ανάλυσης Monte Carlo.

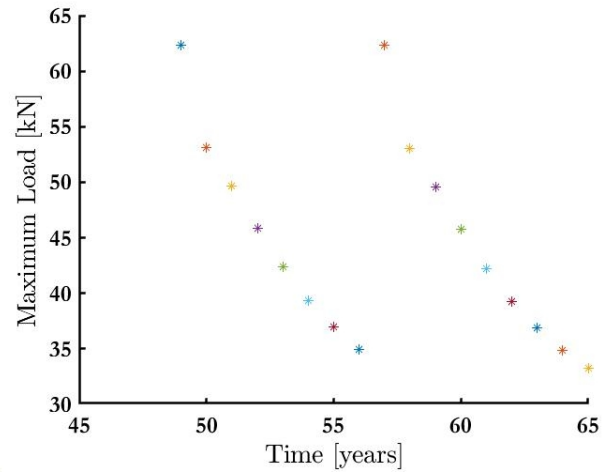


Σχ. 31: Επανάληψη 11. (α) Καμπύλη ικανότητας για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης. (β) Μέγιστο φορτίο βάσης συναρτήσει του χρόνου. (γ) Στοχευόμενη μετατόπιση συναρτήσει του χρόνου για τις τρεις περιπτώσεις σεισμού. (δ) Διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης.

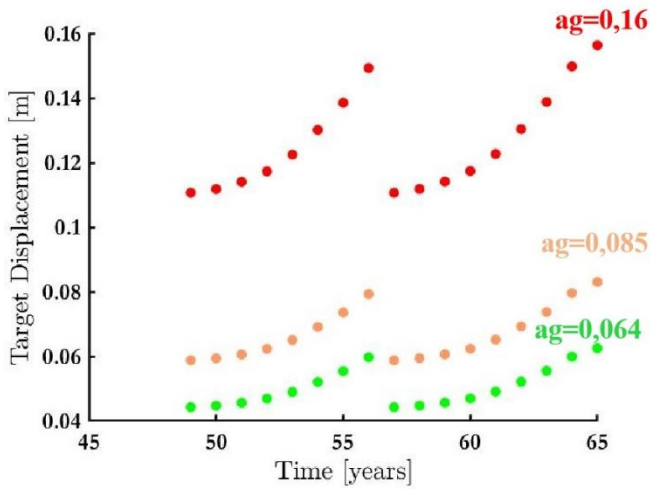
Για την επανάληψη 11 η διάβρωση ξεκίνησε το 5ο έτος και το πλαίσιο αστόχησε μόνο για την στάθμη Περιορισμένες Βλάβες, 37 έτη μετά την έναρξη της διάβρωσης, δηλαδή το 42ο έτος ζωής της κατασκευής.



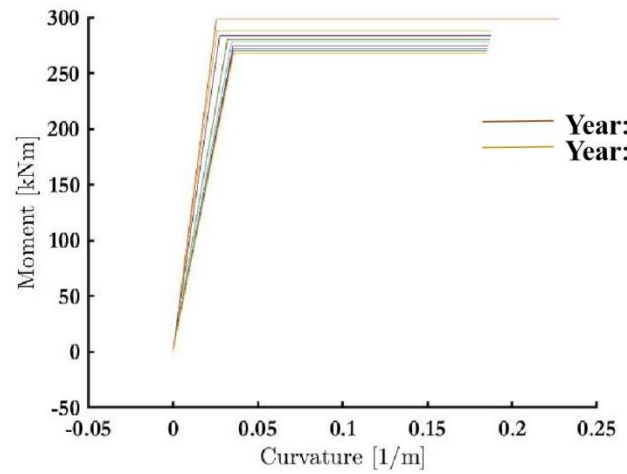
(α)



(β)



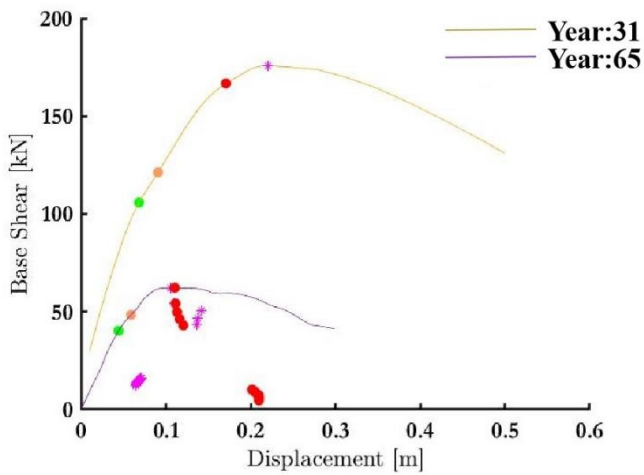
(γ)



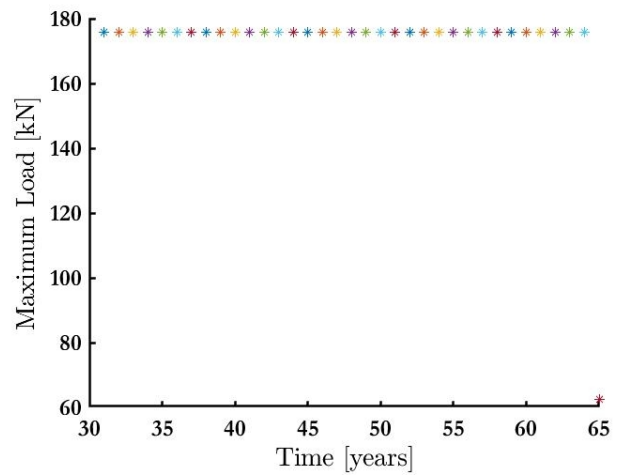
(δ)

Σχ. 32: Επανάληψη 21. (α) Καμπύλη ικανότητας για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης. (β) Μέγιστο φορτίο βάσης συναρτήσει του χρόνου. (γ) Στοχευόμενη μετατόπιση συναρτήσει του χρόνου για τις τρεις περιπτώσεις σεισμού. (δ) Διάγραμμα ροπών καμυλωτήτων για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης.

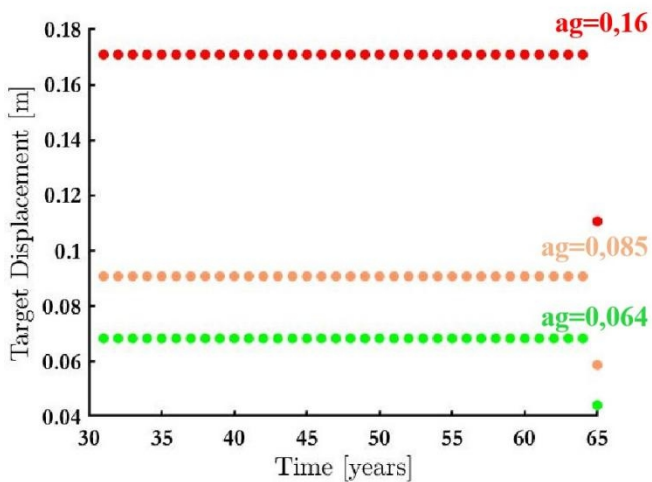
Στην επανάληψη 21 η διάβρωση ξεκίνησε το 49ο έτος και δεν εμφανίστηκε αστοχία για καμία στάθμη.



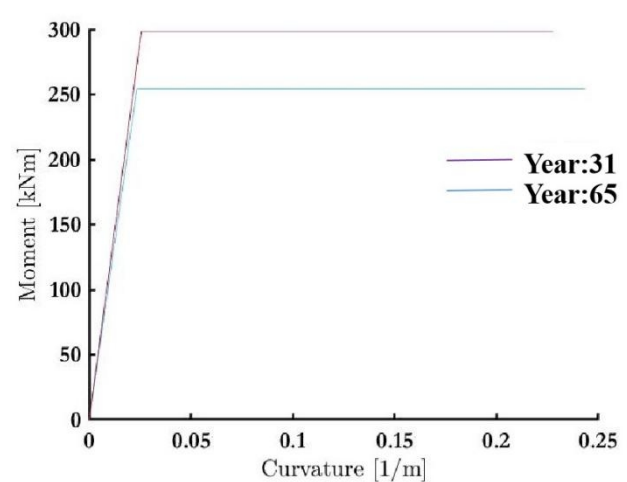
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχ. 33: Επανάληψη 43. (α) Καμπύλη ικανότητας για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης. (β) Μέγιστο φορτίο βάσης συναρτήσεϊ του χρόνου. (γ) Στοχευόμενη μετατόπιση συναρτήσεϊ του χρόνου για τις τρεις περιπτώσεις σεισμού. (δ) Διάγραμμα ροπών καμυλοτήτων για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης.

Στην επανάληψη 43 η διάβρωση ξεκίνησε το 31ο έτος εμφανίστηκε αστοχία μόνο για την στάθμη Περιορισμένες Βλάβες από το πρώτο κιάλας έτος της διάβρωσης.

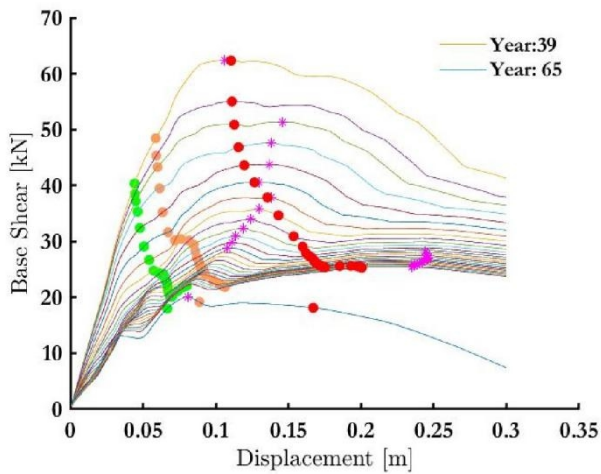
Τέλος έγιναν οι έλεγχοι της επιτελεστικότητας και προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

233 αστοχίες για τη στάθμη Περιορισμένες Βλάβες, άρα πιθανότητα αστοχίας 23,25%.

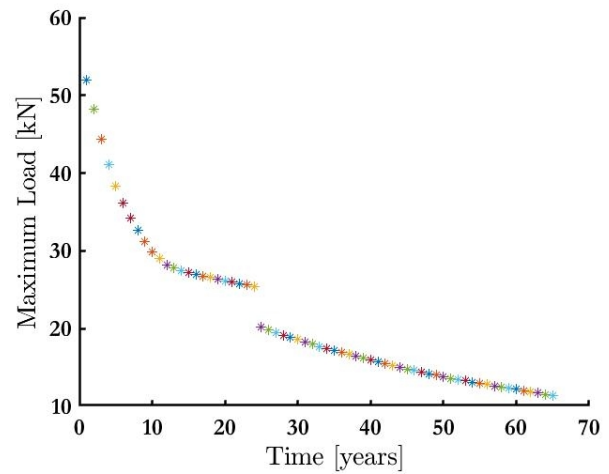
10 αστοχίες για τη στάθμη Σημαντικές Βλάβες, άρα πιθανότητα αστοχίας 1%.

0 αστοχίες για τη στάθμη Οιονεί Κατάρρευση, άρα πιθανότητα αστοχίας 0%.

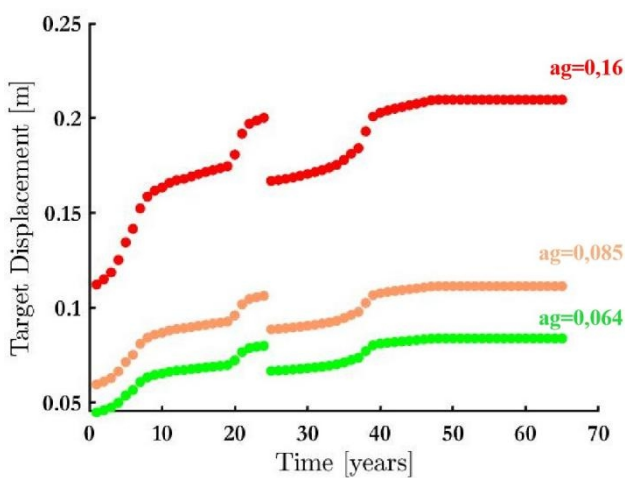
Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για 5000 επαναλήψεις και προέκυψαν τα αντίστοιχα διαγράμματα και τελικά η πιθανότητα αστοχίας. Ομοίως με πριν, παρατίθενται διαγράμματα από διάφορες επαναλήψεις καθώς και το αν εμφάνισαν αστοχία.



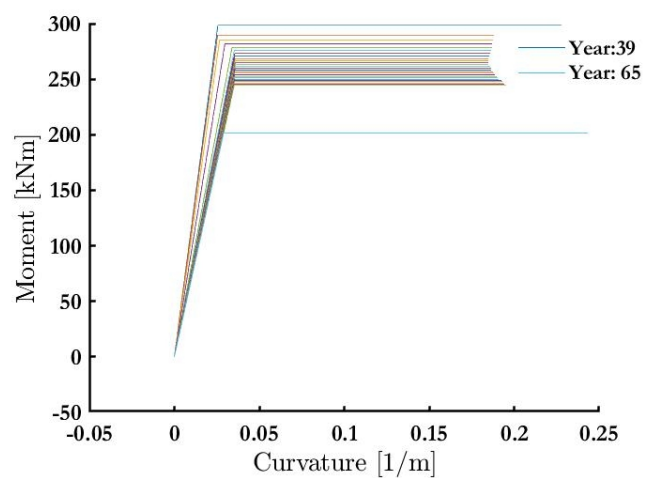
(α)



(β)



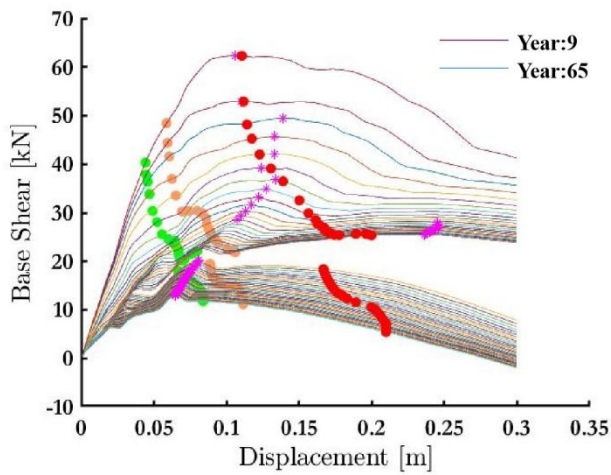
(γ)



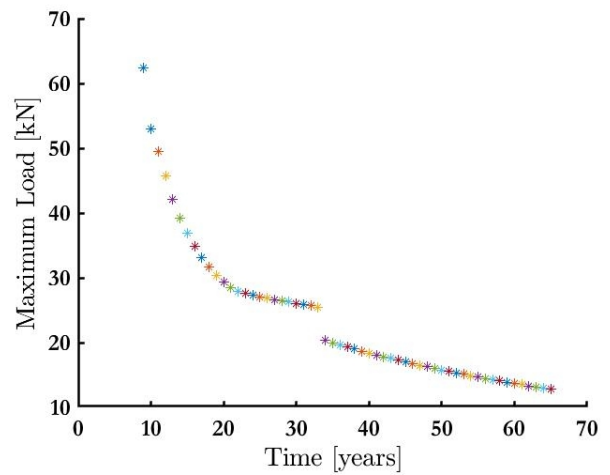
(δ)

Σχ. 34: Επανάληψη 18. (α) Καμπύλη ικανότητας για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης. (β) Μέγιστο φορτίο βάσης συναρτήσει του χρόνου. (γ) Στοχευόμενη μετατόπιση συναρτήσει του χρόνου για τις τρεις περιπτώσεις σεισμού. (δ) Διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης.

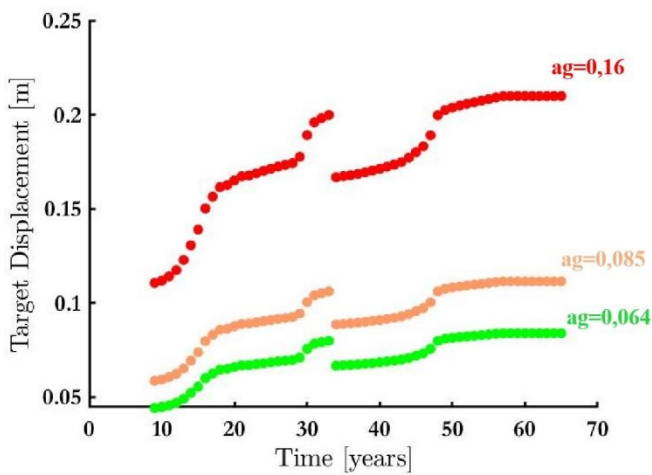
Για την επανάληψη 18 του Σχ.34 η διάβρωση ξεκίνησε το 39ο έτος και η κατασκευή δεν εμφάνισε αστοχία για καμία στάθμη επιτελεστικότητας.



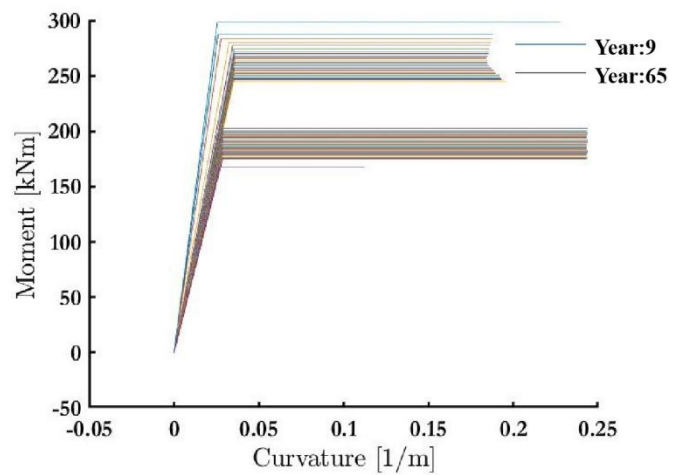
(α)



(β)



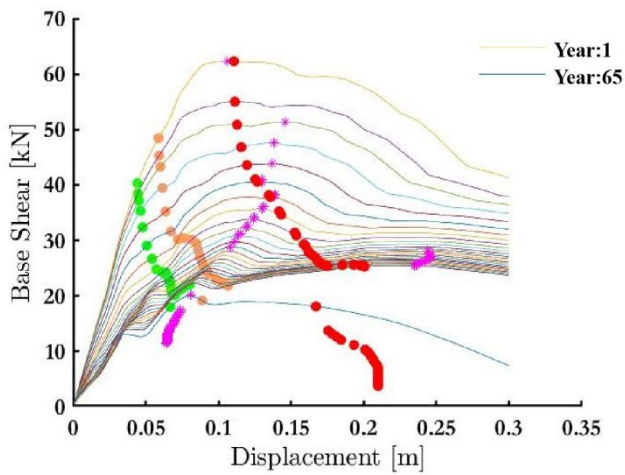
(γ)



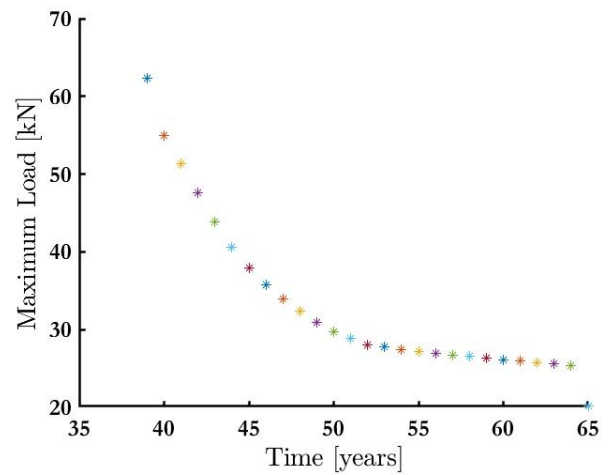
(δ)

Σχ. 35: Επανάληψη 100. (α) Καμπύλη ικανότητας για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης. (β) Μέγιστο φορτίο βάσης συναρτήσει του χρόνου. (γ) Στοχευόμενη μετατόπιση συναρτήσει του χρόνου για τις τρεις περιπτώσεις σεισμού. (δ) Διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης.

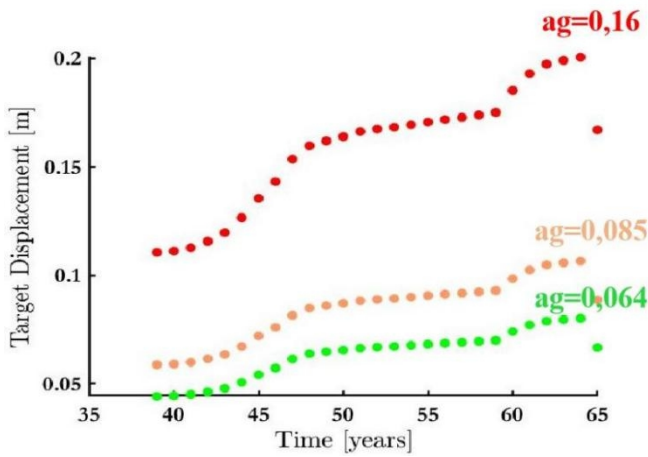
Για την επανάληψη 100 η διάβρωση ξεκίνησε το 9ο έτος και το πλαίσιο αστόχησε μόνο για την στάθμη Περιορισμένες Βλάβες, 42 χρόνια μετά την έναρξη της διάβρωσης, δηλαδή στο 51ο έτος ζωής του.



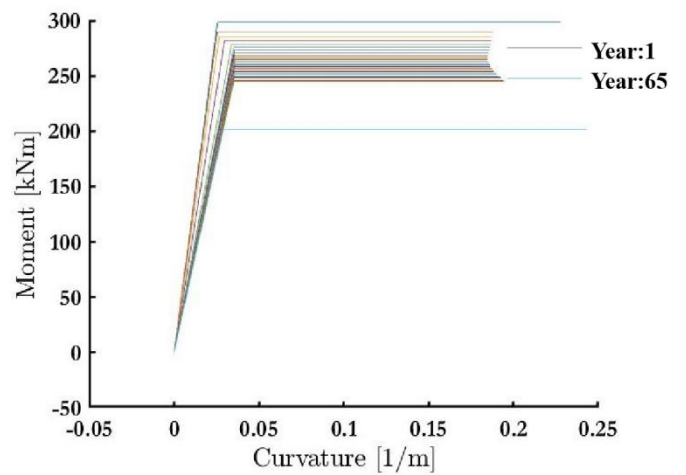
(α)



(β)



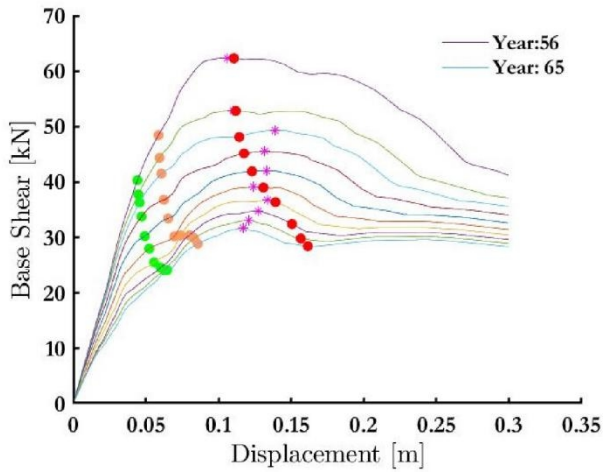
(γ)



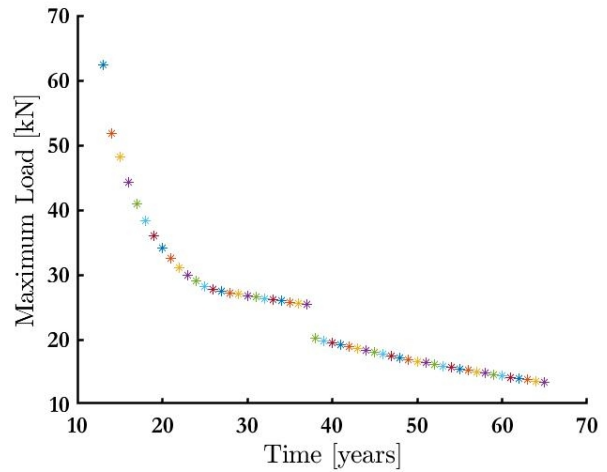
(δ)

Σχ. 36: Επανάληψη 1003. (α) Καμπύλη ικανότητας για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης. (β) Μέγιστο φορτίο βάσης συναρτήσει του χρόνου. (γ) Στοχευόμενη μετατόπιση συναρτήσει του χρόνου για τις τρεις περιπτώσεις σεισμού. (δ) Διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης.

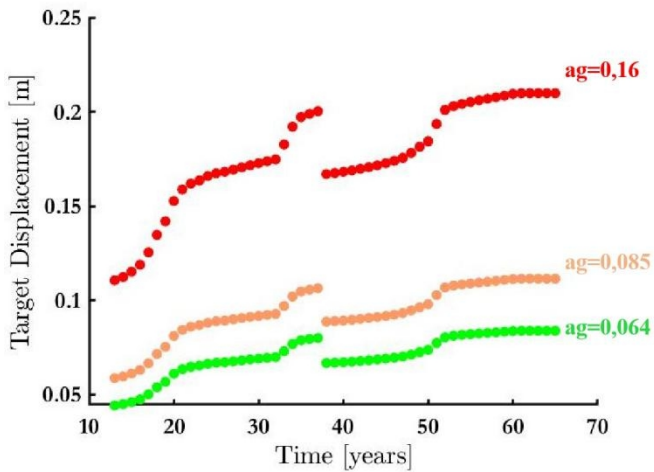
Για την επανάληψη 1003 η διάβρωση ξεκίνησε το 1ο έτος και η κατασκευή αστόχησε μόνο για την στάθμη Περιορισμένες Βλάβες, 36 έτη μετά την έναρξη της διάβρωσης, δηλαδή στο 37ο έτος ζωής της κατασκευής.



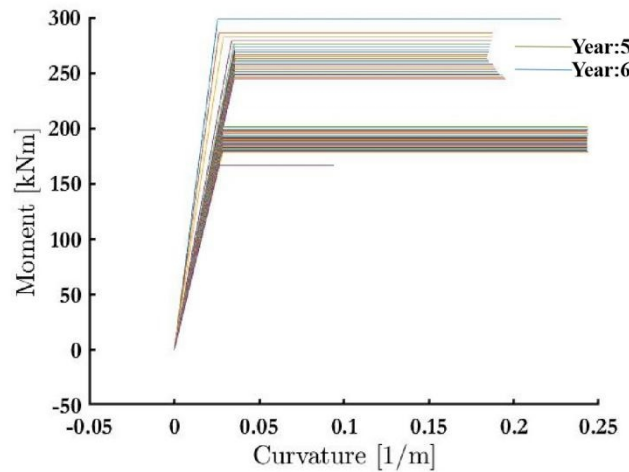
(α)



(β)



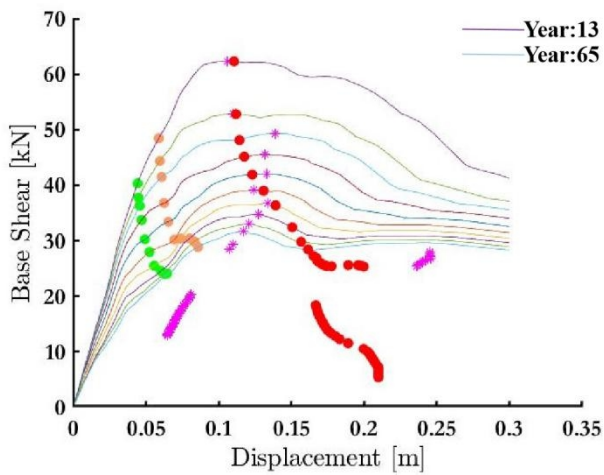
(γ)



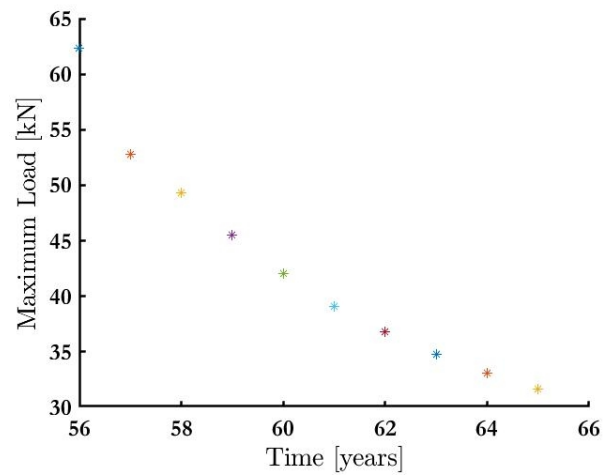
(δ)

Σχ. 37: Επανάληψη 1020. (α) Καμπύλη ικανότητας για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης. (β) Μέγιστο φορτίο βάσης συναρτήσει του χρόνου. (γ) Στοχευόμενη μετατόπιση συναρτήσει του χρόνου για τις τρεις περιπτώσεις σεισμού. (δ) Διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης.

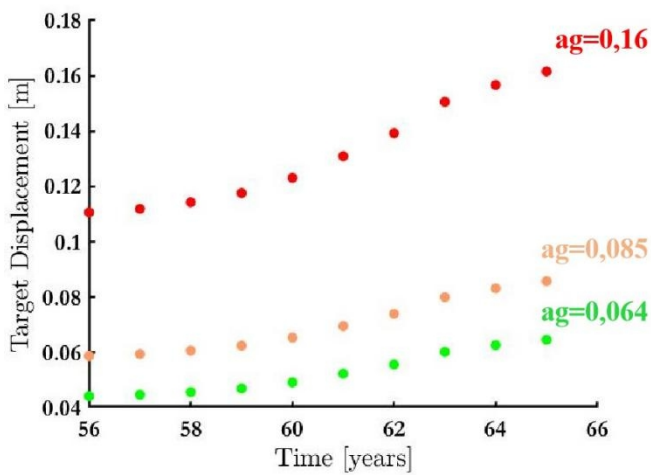
Για την επανάληψη 1020 η διάβρωση ξεκίνησε το 56ο έτος και δεν εμφανίστηκε καμία αστοχία.



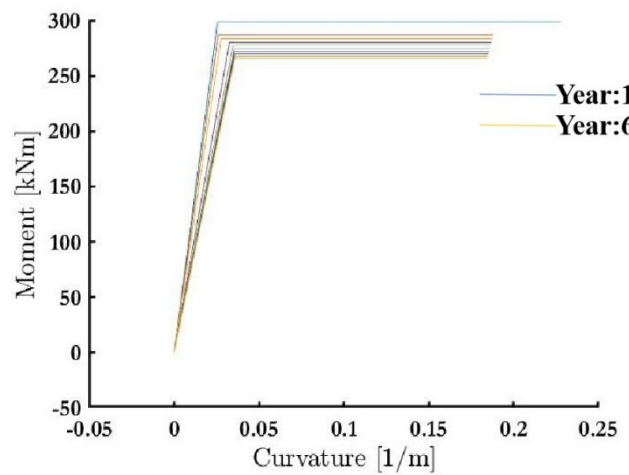
(α)



(β)



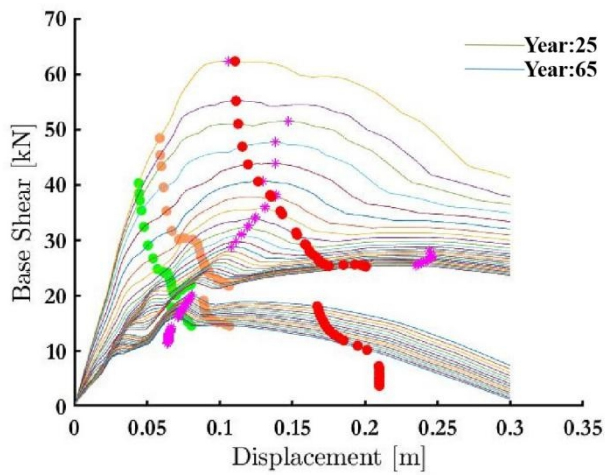
(γ)



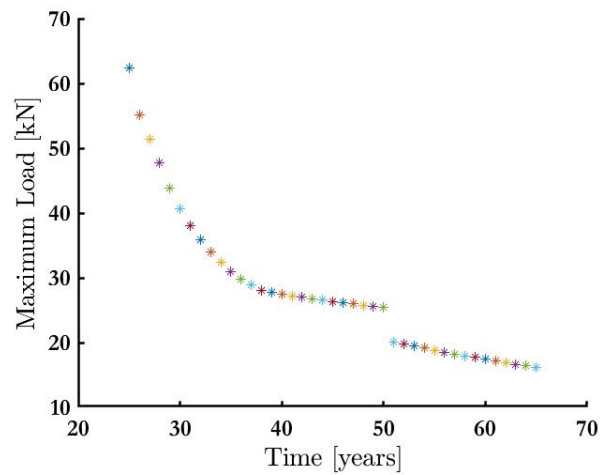
(δ)

Σχ. 38: Επανάληψη 1025. (α) Καμπύλη ικανότητας για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης. (β) Μέγιστο φορτίο βάσης συναρτήσει του χρόνου. (γ) Στοχευόμενη μετατόπιση συναρτήσει του χρόνου για τις τρεις περιπτώσεις σεισμού. (δ) Διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης.

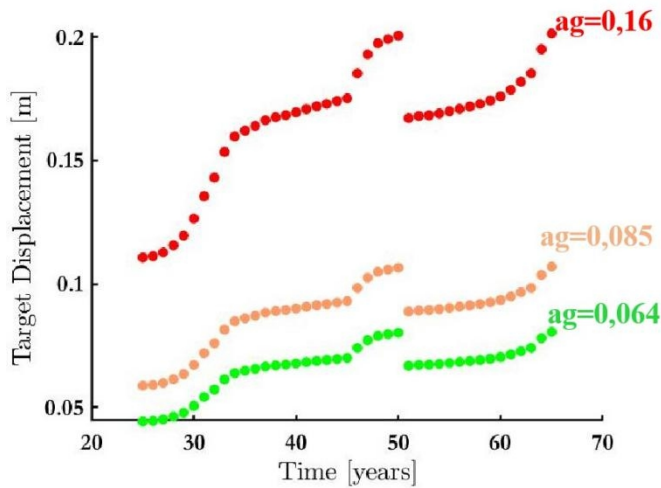
Για την επανάληψη 1025 η διάβρωση ξεκίνησε το 13ο έτος και η κατασκευή αστόχησε μόνο για την στάθμη Περιορισμένες Βλάβες, 42 χρόνια μετά την έναρξη της διάβρωσης, δηλαδή στο 55ο έτος ζωής της.



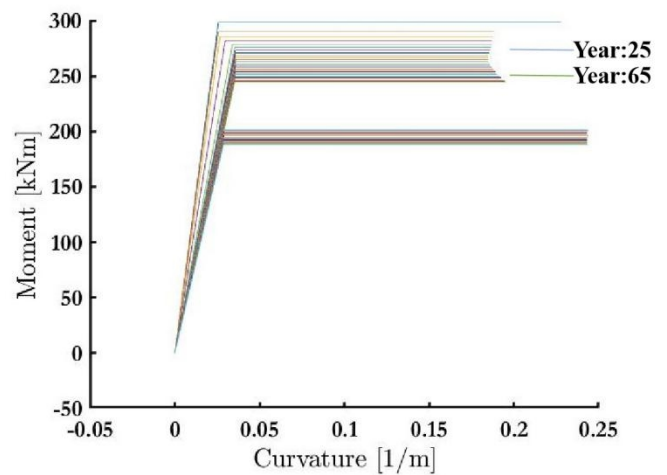
(α)



(β)



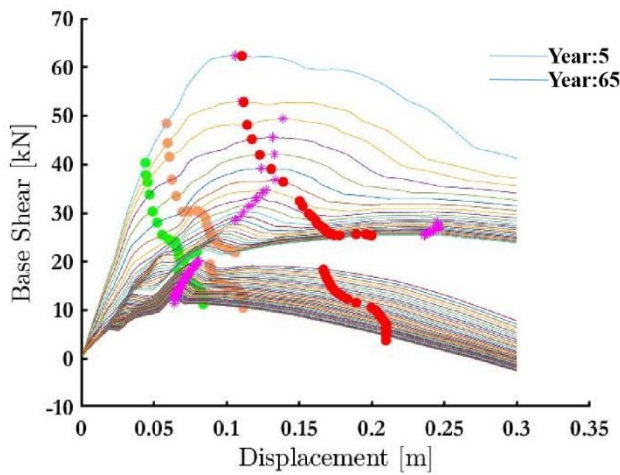
(γ)



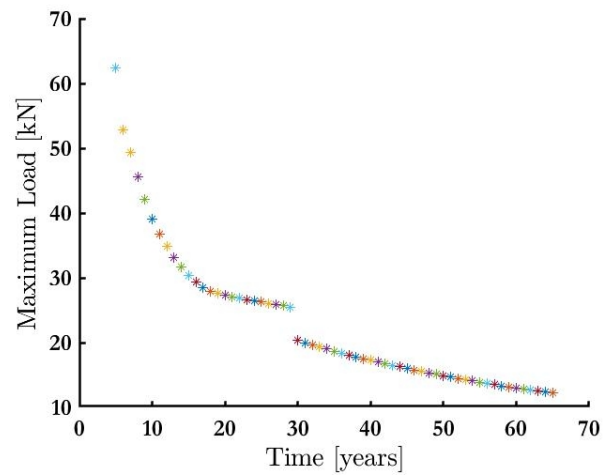
(δ)

Σχ. 39: Επανάληψη 2600. (α) Καμπύλη ικανότητας για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης. (β) Μέγιστο φορτίο βάσης συναρτήσει του χρόνου. (γ) Στοχευόμενη μετατόπιση συναρτήσει του χρόνου για τις τρεις περιπτώσεις σεισμού. (δ) Διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης.

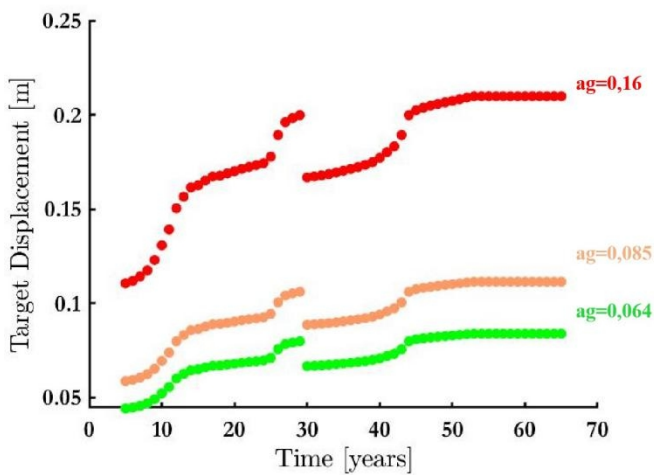
Για την επανάληψη 2600 η διάβρωση ξεκίνησε το 25ο έτος και δεν εμφανίστηκε καμία αστοχία για αυτή την επανάληψη.



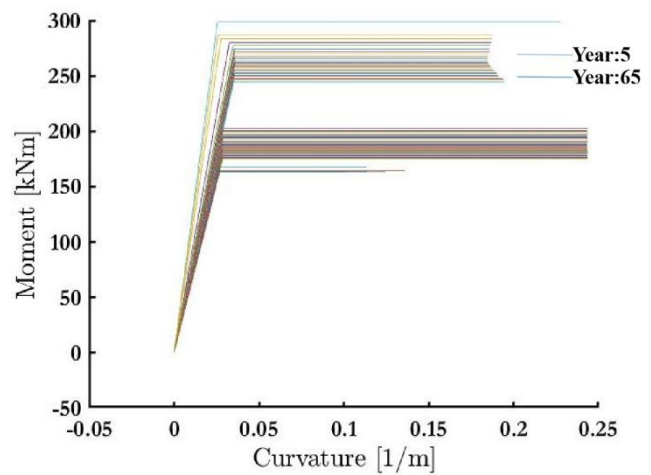
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχ. 40: Επανάληψη 3613. (α) Καμπύλη ικανότητας για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης. (β) Μέγιστο φορτίο βάσης συναρτήσεσι του χρόνου. (γ) Στοχευόμενη μετατόπιση συναρτήσεσι του χρόνου για τις τρεις περιπτώσεις σεισμού. (δ) Διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης.

Για την επανάληψη 3613 η διάβρωση ξεκίνησε το 5ο έτος και η κατασκευή αστόχησε μόνο για την στάθμη Περιορισμένες Βλάβες, 38 χρόνια μετά την έναρξη της διάβρωσης, δηλαδή στο 43ο έτος ζωής της.

Οι αστοχίες που προέκυψαν είναι οι εξής:

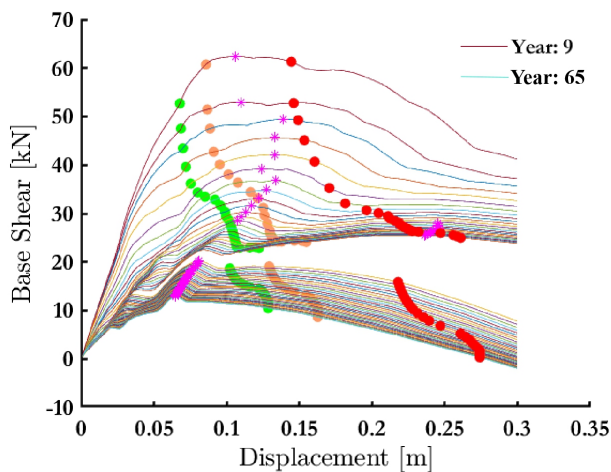
1096 αστοχίες για την στάθμη περιορισμένες βλάβες, με πιθανότητα αστοχίας 21,91%.

58 αστοχίες για την στάθμη σημαντικές βλάβες, με πιθανότητα αστοχίας 1,16%.

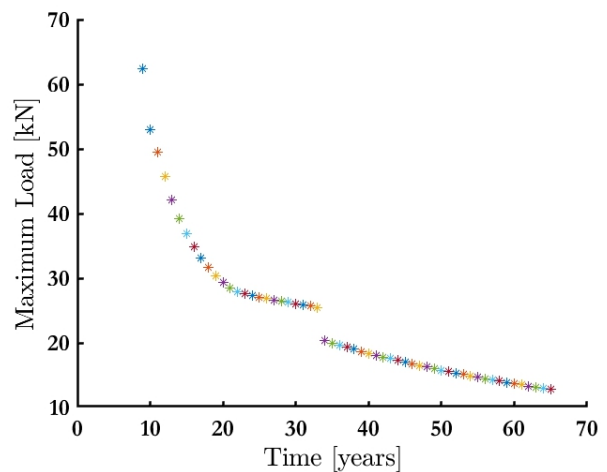
0 αστοχίες για την στάθμη Οιονεί κατάρρευση, με πιθανότητα αστοχίας 0%.

Ο υπολογισμός της αστοχίας έγινε σύμφωνα με τις εδαφικές επιταχύνσεις αναφοράς που μας δίνει ο ΕΑΚ. Τελικά η απόκλιση μεταξύ των πιθανοτήτων των 1000 και 5000 επαναλήψεων είναι 2,06% για τις Περιορισμένες Βλάβες και 0,16% για τις Σημαντικές Βλάβες και άρα φαίνεται ότι η μέθοδος είναι ορθότερο να γίνεται για μεγάλο αριθμό επαναλήψεων γιατί όσο μειώνεται, αρχίζει να υπάρχει απόκλιση μεταξύ των τιμών. Βέβαια για την παρούσα περίπτωση δεν επηρεάζεται πολύ το αποτέλεσμα, ιδίως αφού με τις 5000 επαναλήψεις η πιθανότητες μειώθηκαν.

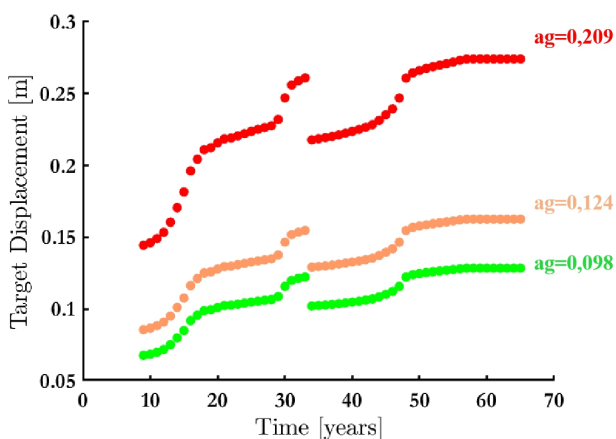
Τέλος, οι ίδιες επαναλήψεις Crude Monte Carlo ελέγχθηκαν για τις εδαφικές επιταχύνσεις αναφοράς κατά Papazachos (1997), ώστε να συλλεχθεί περισσότερη πληροφορία για τα συμπεράσματα. Έτσι έγινε πάλι η δημιουργία των απαιτούμενων διαγραμμάτων και παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποια για τυχαίες επαναλήψεις.



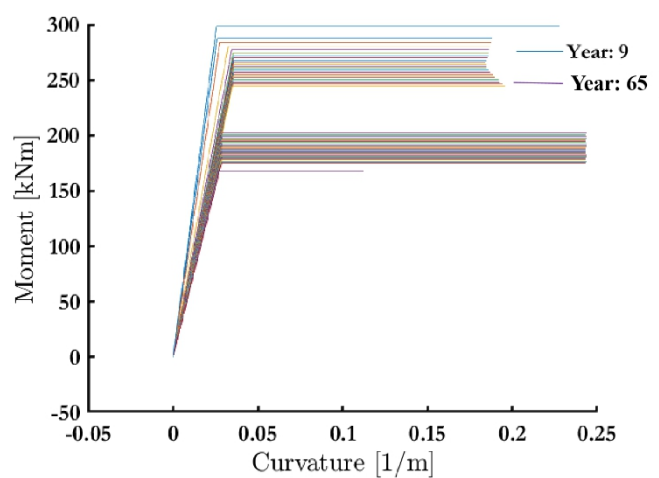
(α)



(β)



(γ)

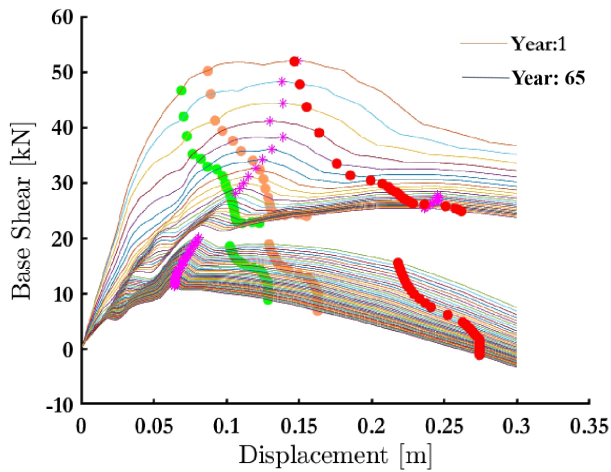


(δ)

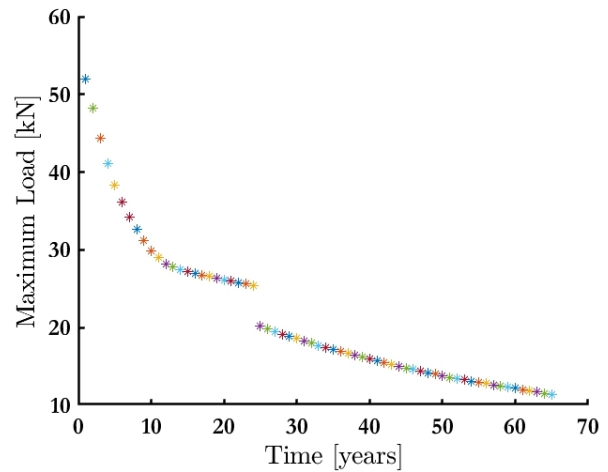
Σχ. 41: Επανάληψη 100. (α) Καμπύλη ικανότητας για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης. (β) Μέγιστο φορτίο βάσης συναρτήσεϊ του χρόνου. (γ) Στοχευόμενη μετατόπιση συναρτήσεϊ του χρόνου για

τις τρεις περιπτώσεις σεισμού. (δ) Διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης.

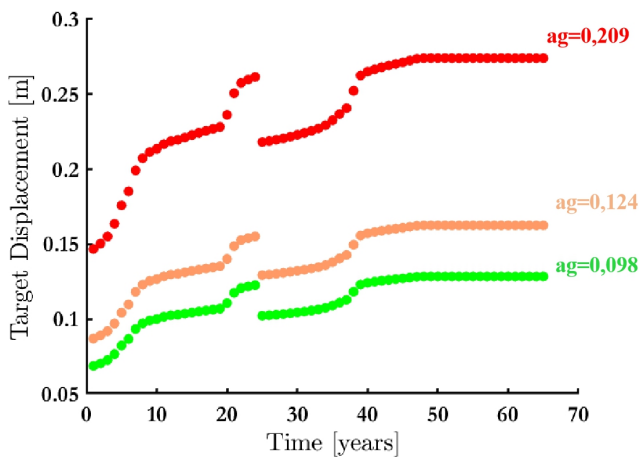
Για την επανάληψη 100 η διάβρωση ξεκίνησε το 9ο έτος και το πλαίσιο αστόχησε μόνο για την στάθμη Περιορισμένες Βλάβες 22 έτη μετά.



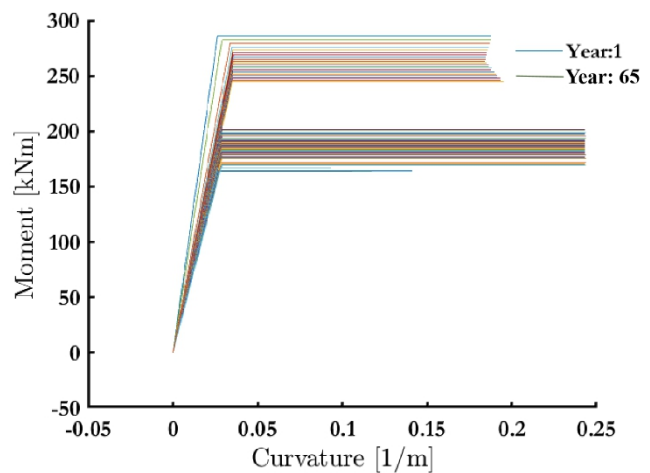
(α)



(β)



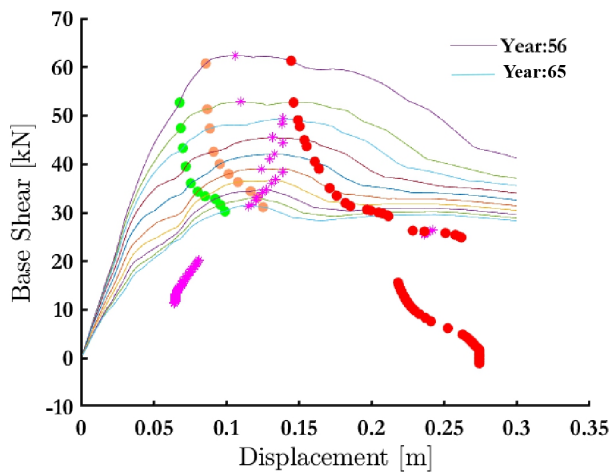
(γ)



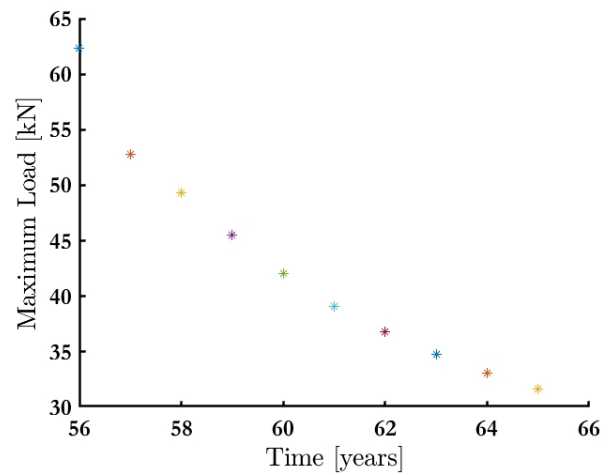
(δ)

Σχ. 42: Επανάληψη 1003. (α) Καμπύλη ικανότητας για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης. (β) Μέγιστο φορτίο βάσης συναρτήσει του χρόνου. (γ) Στοχευόμενη μετατόπιση συναρτήσει του χρόνου για τις τρεις περιπτώσεις σεισμού. (δ) Διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης.

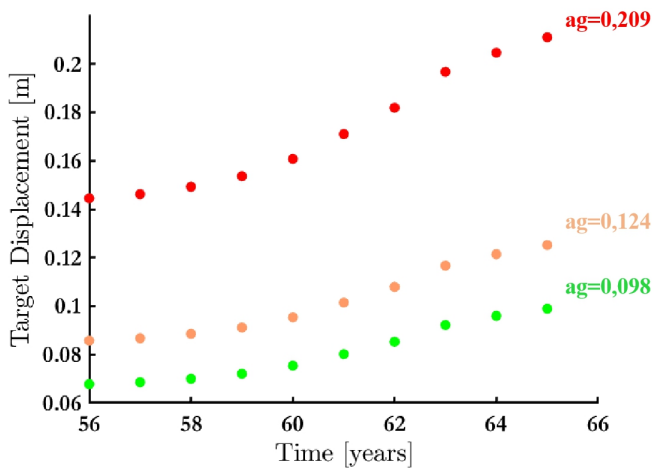
Για την επανάληψη 1003 η διάβρωση ξεκίνησε το 1ο έτος, ενώ το πλαίσιο αστόχησε 14 έτη μετά για τις Περιορισμένες Βλάβες, 47 έτη μετά για τις Σημαντικές Βλάβες και 47 έτη μετά για την Οιονεί Κατάρρευση.



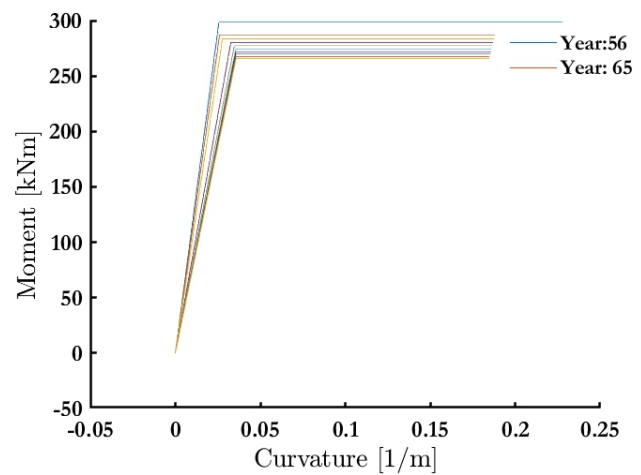
(α)



(β)



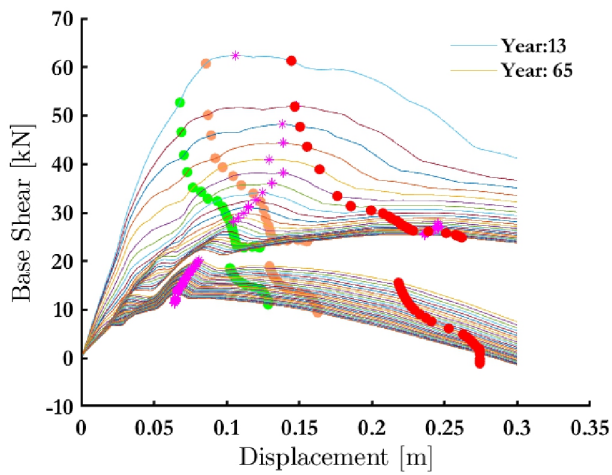
(γ)



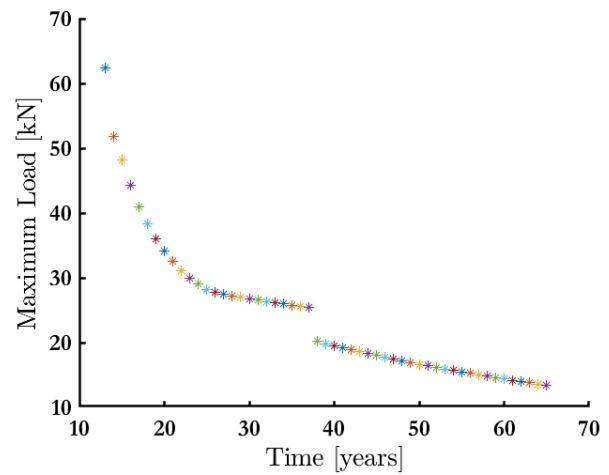
(δ)

Σχ. 43: Επανάληψη 1020. (α) Καμπύλη ικανότητας για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης. (β) Μέγιστο φορτίο βάσης συναρτήσει του χρόνου. (γ) Στοχευόμενη μετατόπιση συναρτήσει του χρόνου για τις τρεις περιπτώσεις σεισμού. (δ) Διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης.

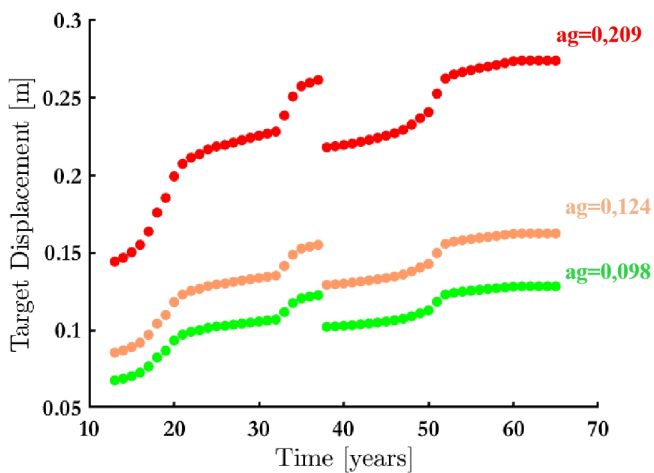
Για την επανάληψη 1020 η διάβρωση ξεκίνησε το 56ο έτος, ενώ το πλαίσιο δεν αστόχησε για καμία στάθμη.



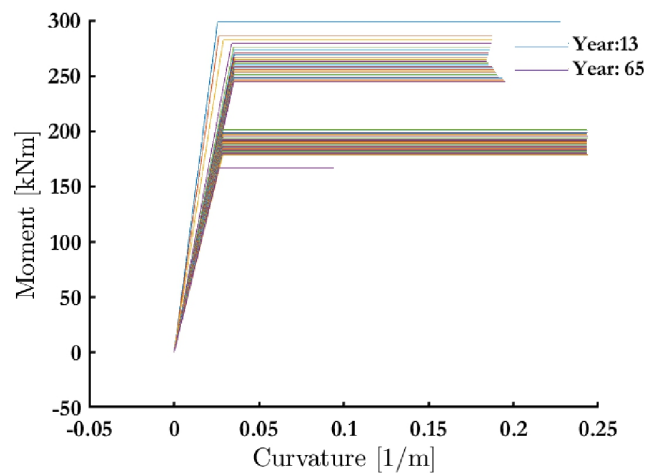
(α)



(β)



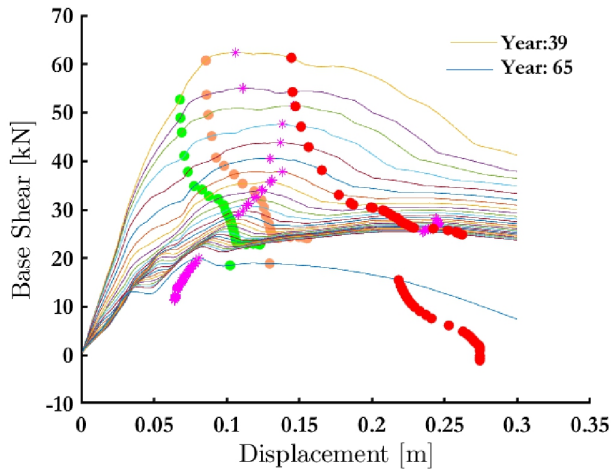
(γ)



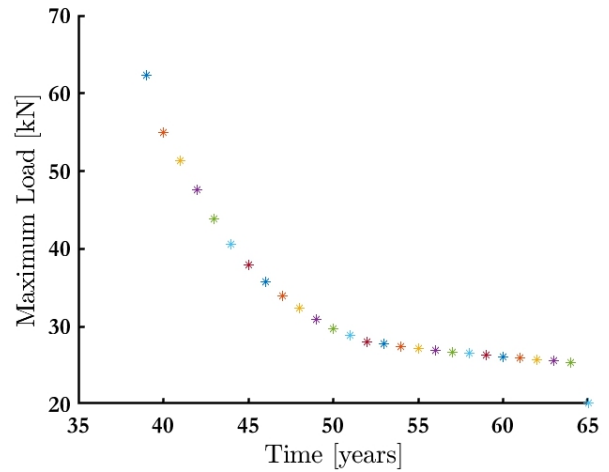
(δ)

Σχ. 44: Επανάληψη 1025. (α) Καμπύλη ικανότητας για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης. (β) Μέγιστο φορτίο βάσης συναρτήσει του χρόνου. (γ) Στοχευόμενη μετατόπιση συναρτήσει του χρόνου για τις τρεις περιπτώσεις σεισμού. (δ) Διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης.

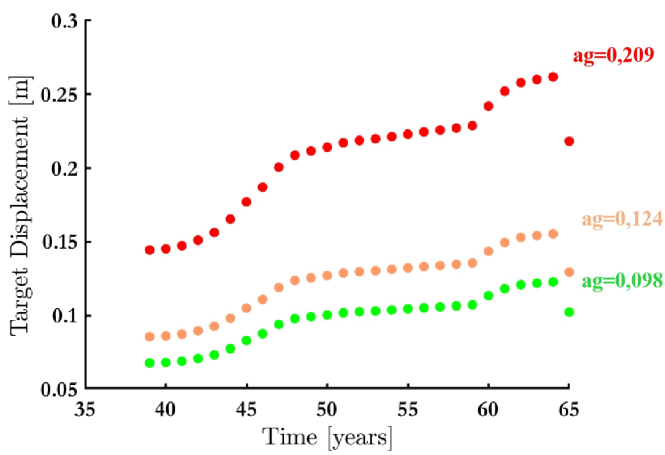
Για την επανάληψη 1025 η διάβρωση ξεκίνησε το 13ο έτος και η κατασκευή αστόχησε για την πρώτη στάθμη 22 έτη μετά, για την δεύτερη στάθμη 52 έτη μετά και για την τρίτη στάθμη 52 έτη μετά την έναρξη της διάβρωσης.



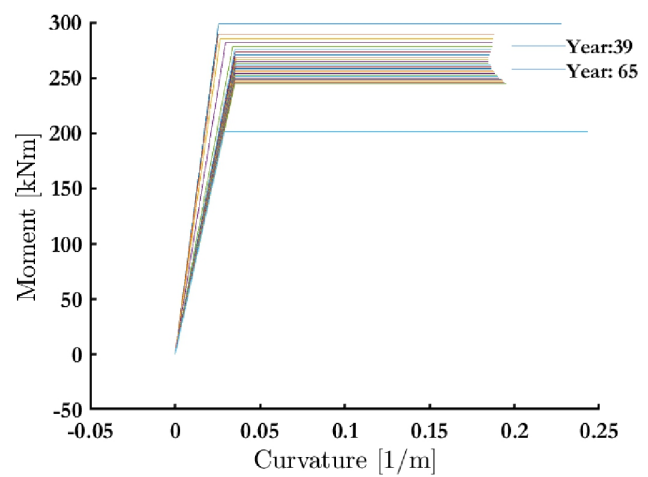
(α)



(β)



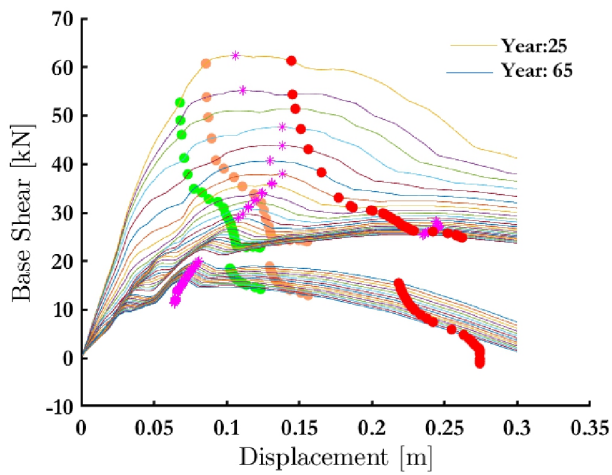
(γ)



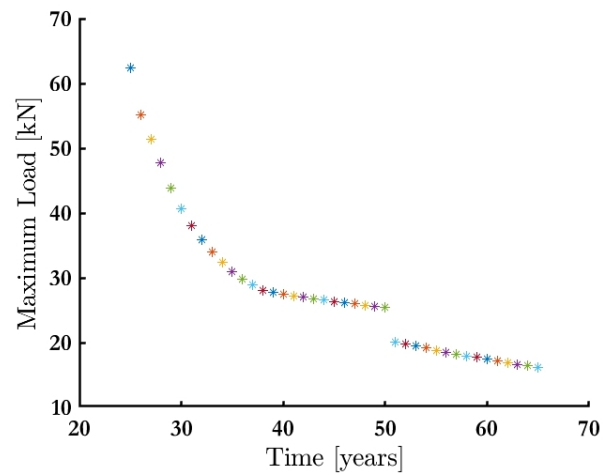
(δ)

Σχ. 45: Επανάληψη 18. (α) Καμπύλη ικανότητας για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης. (β) Μέγιστο φορτίο βάσης συναρτήσει του χρόνου. (γ) Στοχευόμενη μετατόπιση συναρτήσει του χρόνου για τις τρεις περιπτώσεις σεισμού. (δ) Διάγραμμα ροπών καμψυλοτήτων για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης.

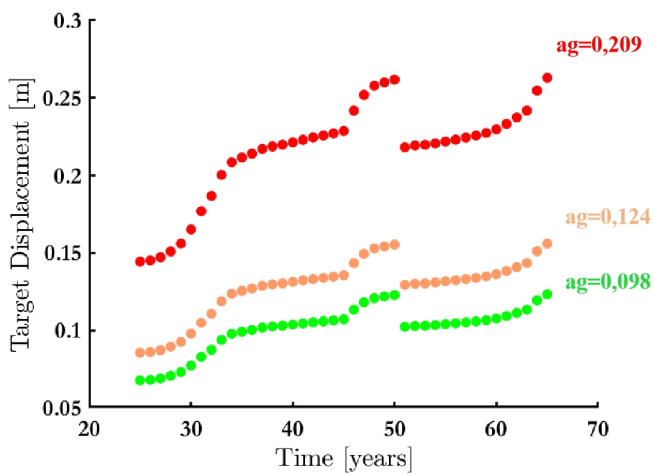
Στην επανάληψη 18 η διάβρωση ξεκίνησε το 39ο έτος και η κατασκευή αστόχησε μόνο για την πρώτη στάθμη 23 έτη μετά.



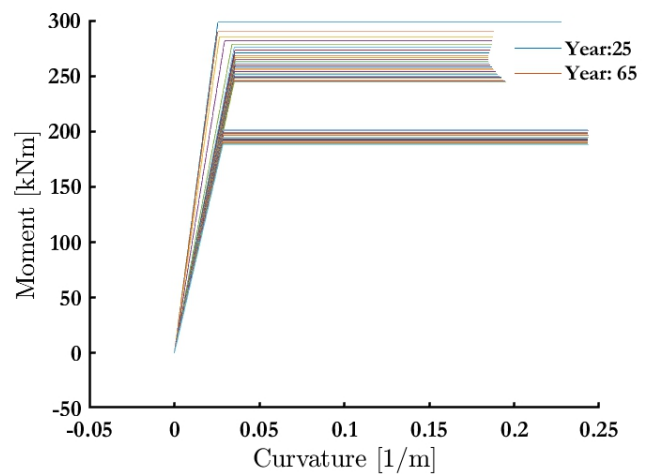
(α)



(β)



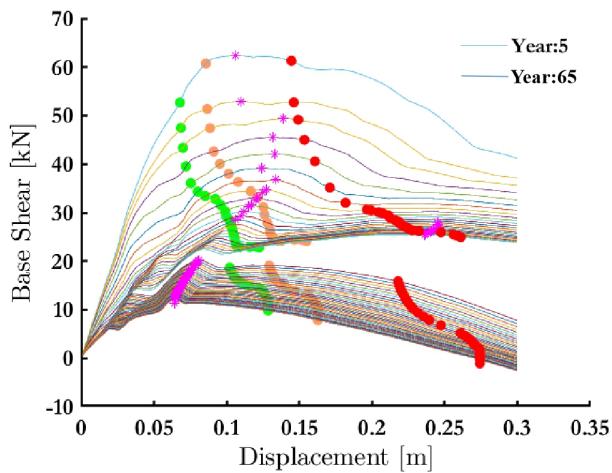
(γ)



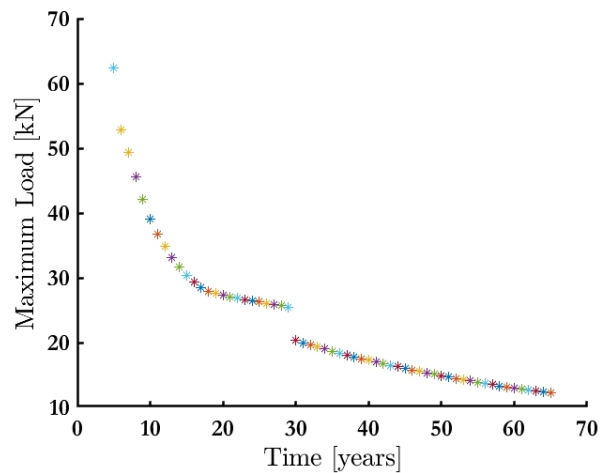
(δ)

Σχ. 46: Επανάληψη 2600. (α) Καμπύλη ικανότητας για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης. (β) Μέγιστο φορτίο βάσης συναρτήσει του χρόνου. (γ) Στοχευόμενη μετατόπιση συναρτήσει του χρόνου για τις τρεις περιπτώσεις σεισμού. (δ) Διάγραμμα ροπών καμψυλοτήτων για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης.

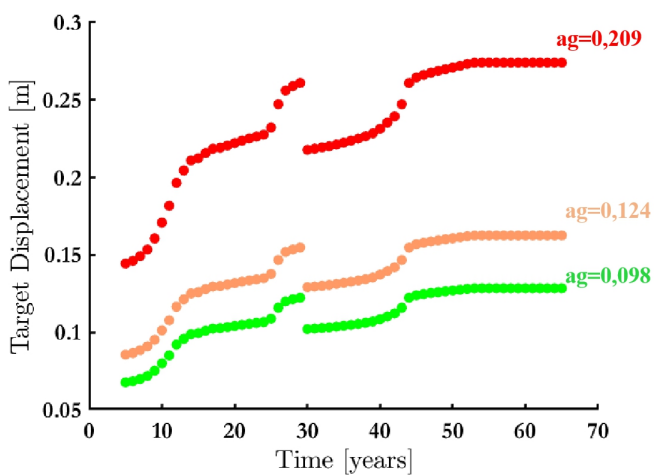
Για την επανάληψη 2600 η διάβρωση ξεκίνησε το 25 έτος, ενώ το πλαίσιο αστόχησε μόνο για την πρώτη στάθμη 23 έτη μετά.



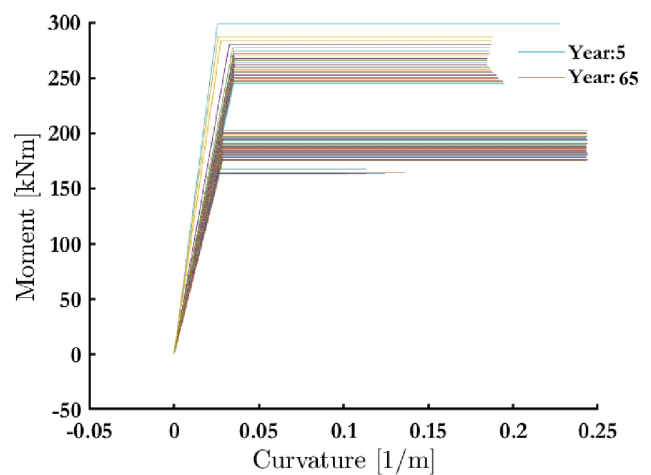
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχ. 47: Επανάληψη 3613. (α) Καμπύλη ικανότητας για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης. (β) Μέγιστο φορτίο βάσης συναρτήσεσι του χρόνου. (γ) Στοχευόμενη μετατόπιση συναρτήσεσι του χρόνου για τις τρεις περιπτώσεις σεισμού. (δ) Διάγραμμα ροπών καμψυλοτήτων για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης.

Στην επανάληψη 3613 η διάβρωση ξεκίνησε το 5ο έτος και το πλαίσιο αστόχησε για την πρώτη στάθμη 18 έτη μετά την έναρξη, ενώ για την δεύτερη 54 έτη μετά. Δεν αστόχησε για την στάθμη Οιονεί Κατάρρευση.

Τελικά έγιναν οι έλεγχοι για κάθε υποστύλωμα και κάθε απαίτηση και προέκυψαν:

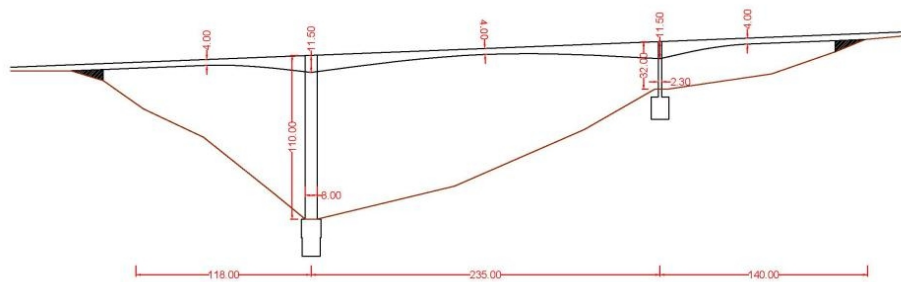
1643 αστοχίες για στάθμη Περιορισμένες Βλάβες και πιθανότητα αστοχία 32,85%.

430 αστοχίες για στάθμη Σημαντικές Βλάβες και πιθανότητα αστοχία 8,6%.

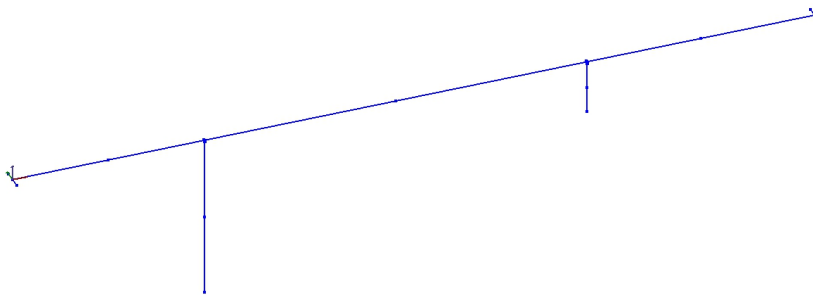
211 αστοχίες για Οιονεί κατάρρευση και πιθανότητα αστοχίας 4,2%.

5.2 Γέφυρα τριών ανοιγμάτων

Η γέφυρα που εξετάζεται στην εργασία φαίνεται στο Σχ.48, ενώ το προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων που δημιουργήθηκε στο OpenSees φαίνεται στο Σχ.49. Η πιθανοτική ανάλυση της γέφυρας έγινε για 1000 επαναλήψεις χάριν οικονομίας χρόνου χωρίς να επηρεάζεται το αποτέλεσμα και για διάρκεια ζωής τα 150 έτη. Το φάσμα σχεδιασμού και η φασματική επιτάχυνση υπολογίσθηκαν για ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Z1, κατηγορία σπουδαιότητας III και απόσβεση 5%. Ο έλεγχος επιτελεστικότητας έγινε για την περίπτωση κρίσιμων κατασκευών, δηλαδή για τις στάθμες A3, B2, Γ1 του Πίνακα 1 και για τις τιμές των εδαφικών επιταχύνσεων αναφοράς κατά ΕΑΚ. Στην πρώτη περίπτωση έγινε η θεώρηση ότι η γέφυρα αστοχεί όταν τουλάχιστον ένα βάθρο αστοχήσει ως προς τις απαιτήσεις επιτελεστικότητας και στην δεύτερη όταν αστοχήσουν και τα δύο βάθρα.

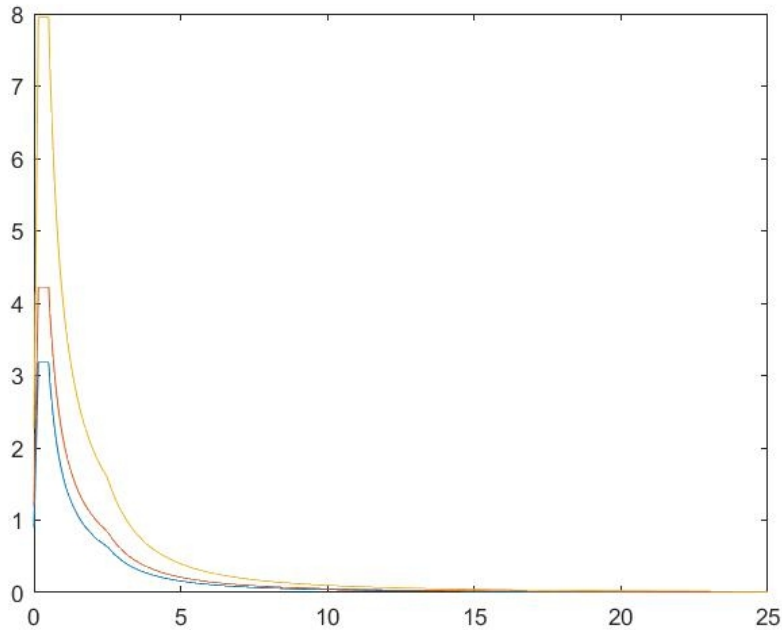


Σχ. 48: Μηκοτομή της γέφυρας.



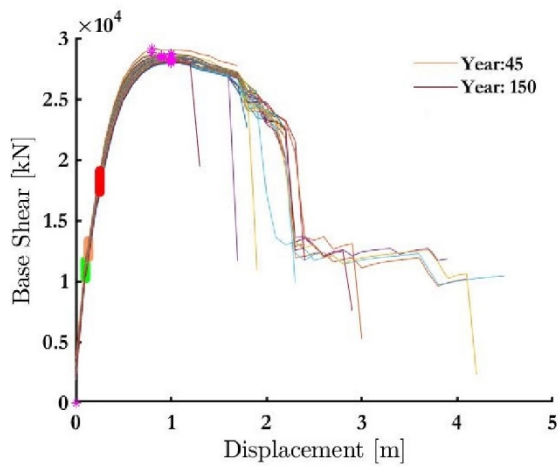
Σχ. 49: Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων της γέφυρας.

Ομοίως με το επίπεδο πλαίσιο, αρχικά παράχθηκε το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού για κάθε μία από τις επιταχύνσεις αναφοράς και έγινε υπολογισμός της φασματικής επιτάχυνσης.

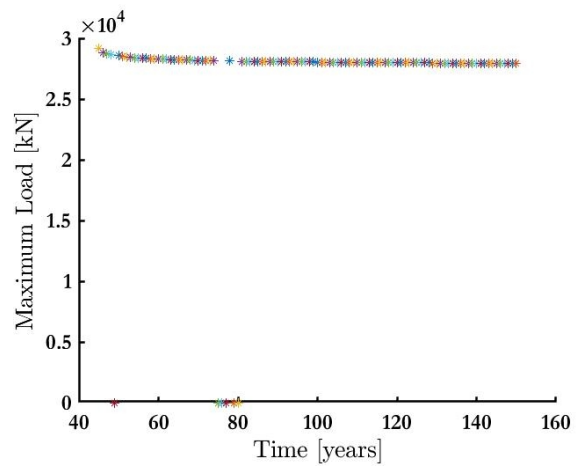


Σχ. 50: Ελαστικό φάσμα σχεδιασμού για ag1, ag2, ag3.

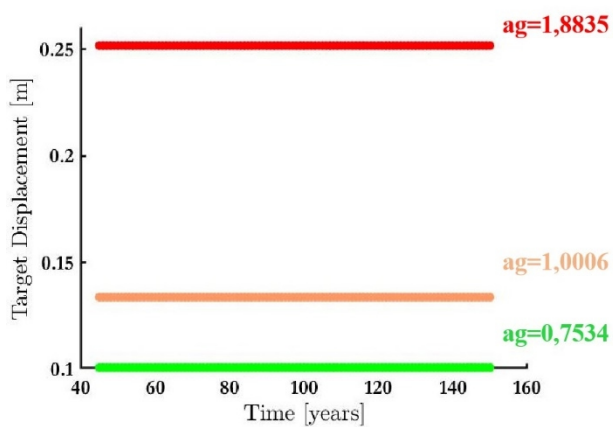
Στην συνέχεια έγινε ο υπολογισμός της στοχευόμενης μετατόπισης και δημιουργήθηκαν οι καμπύλες ικανότητας της γέφυρας, πάνω στις οποίες σημειώθηκε η στοχευόμενη μετατόπιση με πράσινο, πορτοκαλί και κόκκινο για τις στάθμες Περιορισμένες Βλάβες, Σημαντικές Βλάβες και Οιονεί Κατάρρευση αντίστοιχα και η μέγιστη τέμνουσα δύναμη με ροζ. Ένα παράδειγμα από τις καμπύλες αντίστασης φαίνεται στο Σχ. 51 (α) για την επανάληψη 115, στο οποίο η πρώτη καμπύλη αντιστοιχεί στον χρόνο έναρξης της διάβρωσης, τα 45 έτη και κάθε επόμενη καμπύλη σε κάθε επόμενο έτος έως τα 150. Με βάση τις καμπύλες αντίστασης προκύπτουν τα Σχ. 51 (β), (γ) με τα διαγράμματα μέγιστου φορτίου βάσης συναρτήσεως του χρόνου και στοχευόμενης μετατόπισης συναρτήσεως του χρόνου. Για να γίνει ο έλεγχος σε όρους καμπυλοτήτων και σε επίπεδο διατομών δημιουργήθηκε το διάγραμμα ροπών-καμπυλοτήτων των βάθρων (στην γέφυρα το βάθρο που εμφάνισε τελικά αστοχία είναι το αριστερό, οπότε όλα τα διαγράμματα ροπών-καμπυλοτήτων αφορούν αυτό, όπως στο Σχ. 51 (δ)) και έγινε ο υπολογισμός των στάθμεων επιτελεστικότητας αυτών. Τελικά έγιναν οι έλεγχοι επιτελεστικότητας για κάθε στάθμη και προέκυψε ότι για την επανάληψη 115 η γέφυρα αστόχησε 84 έτη μετά την έναρξη της διάβρωσης για τις στάθμες Περιορισμένες Βλάβες και Σημαντικές Βλάβες.



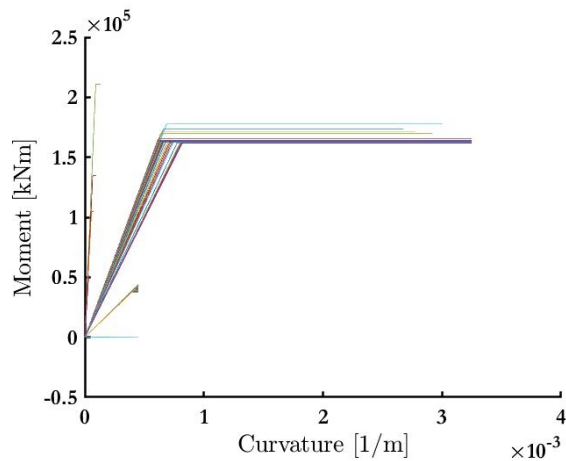
(α)



(β)



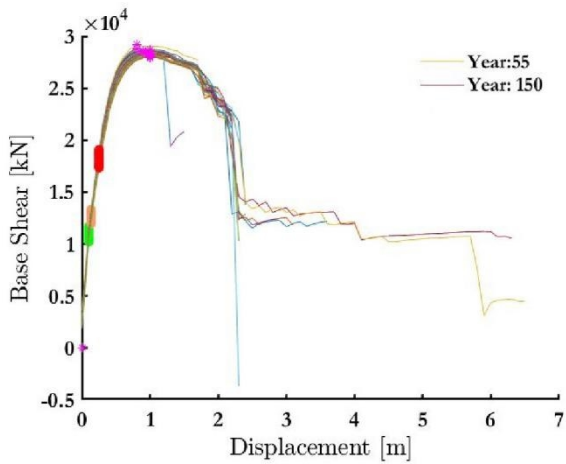
(γ)



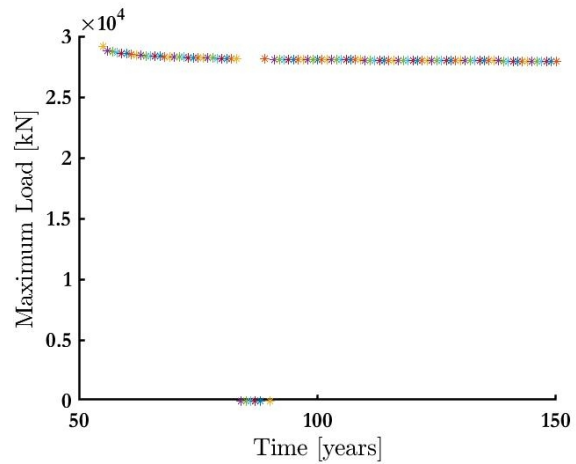
(δ)

Σχ. 51: Επανάληψη 115. (α) Καμπύλη ικανότητας για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης. (β) Μέγιστο φορτίο βάσης συναρτήσει του χρόνου. (γ) Στοχευόμενη μετατόπιση συναρτήσει του χρόνου για τις τρεις περιπτώσεις σεισμού. (δ) Διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης.

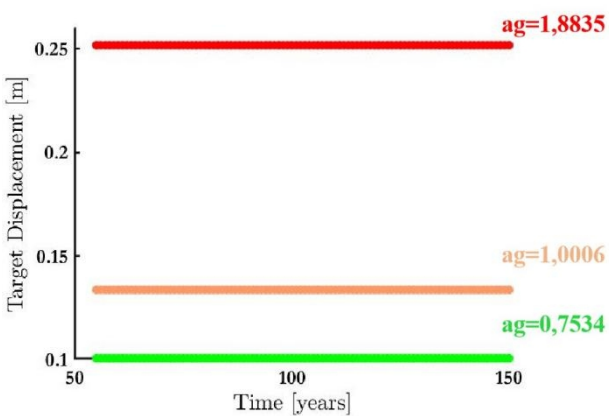
Ενδεικτικά παρατίθενται τα σχήματα από κάποιες από τις 1000 επαναλήψεις καθώς και το αν εμφάνισαν αστοχία.



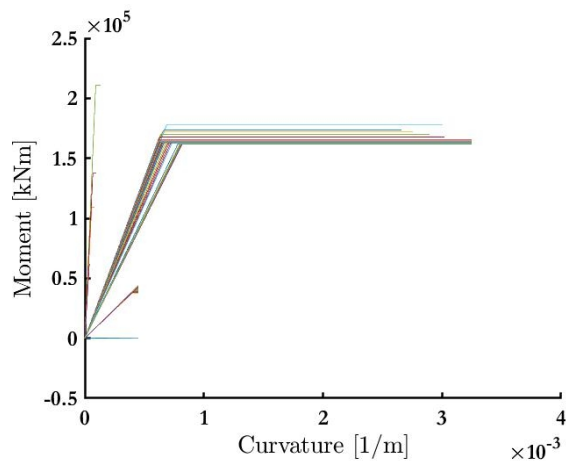
(α)



(β)



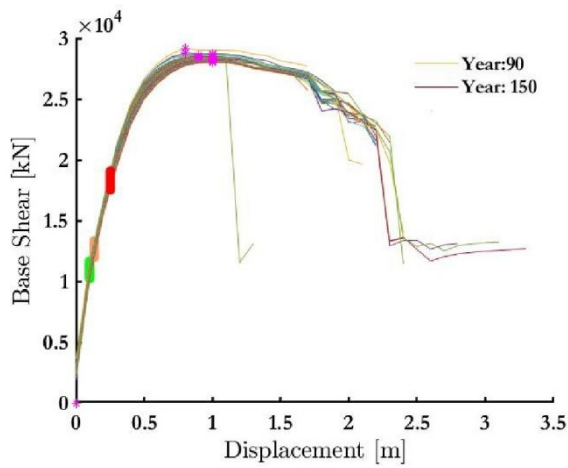
(γ)



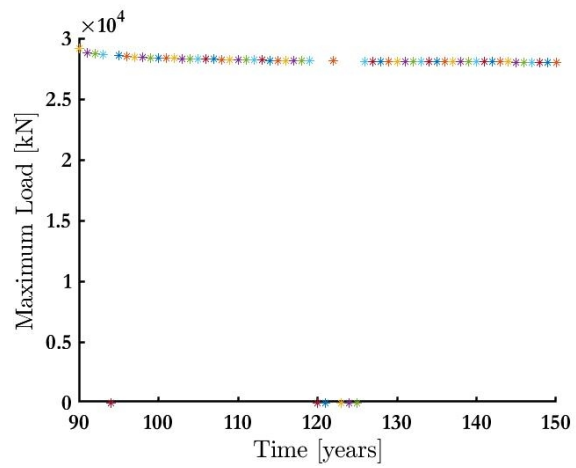
(δ)

Σχ. 52: Επανάληψη 120. (α) Καμπύλη ικανότητας για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης. (β) Μέγιστο φορτίο βάσης συναρτήσει του χρόνου. (γ) Στοχευόμενη μετατόπιση συναρτήσει του χρόνου για τις τρεις περιπτώσεις σεισμού. (δ) Διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης.

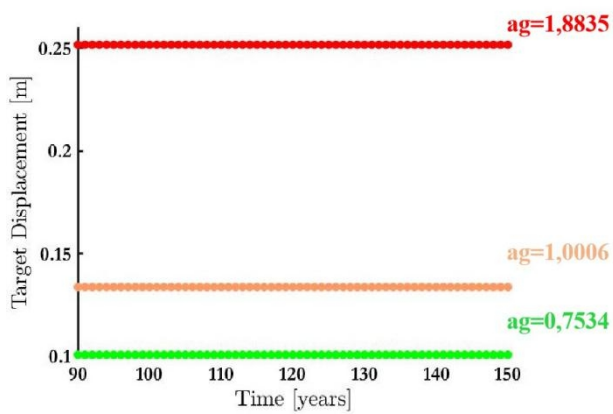
Για την επανάληψη 120 η διάβρωση ξεκίνησε το 55ο έτος και εμφανίστηκε αστοχία 85 χρόνια μετά την έναρξη της διάβρωσης για τις δύο πρώτες στάθμες, δηλαδή το 140ο έτος.



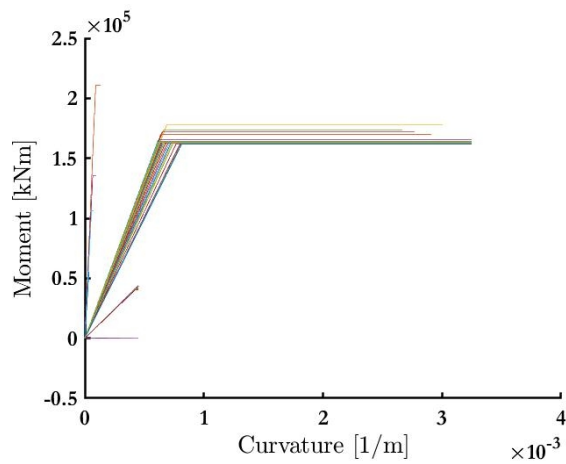
(α)



(β)



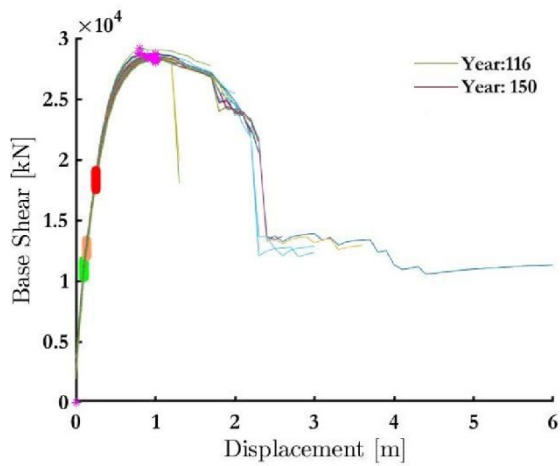
(γ)



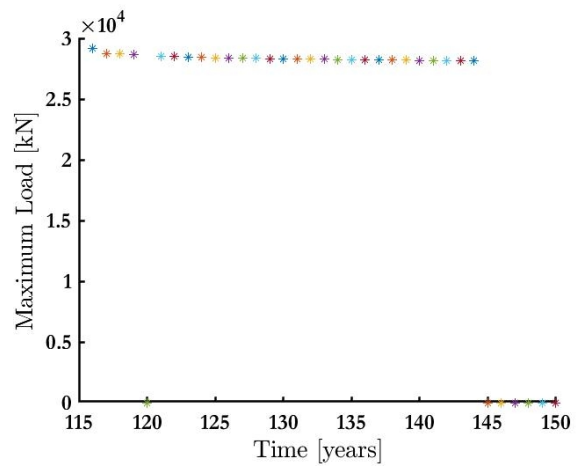
(δ)

Σχ. 53: Επανάληψη 145. (α) Καμπύλη ικανότητας για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης. (β) Μέγιστο φορτίο βάσης συναρτήσει του χρόνου. (γ) Στοχευόμενη μετατόπιση συναρτήσει του χρόνου για τις τρεις περιπτώσεις σεισμού. (δ) Διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης.

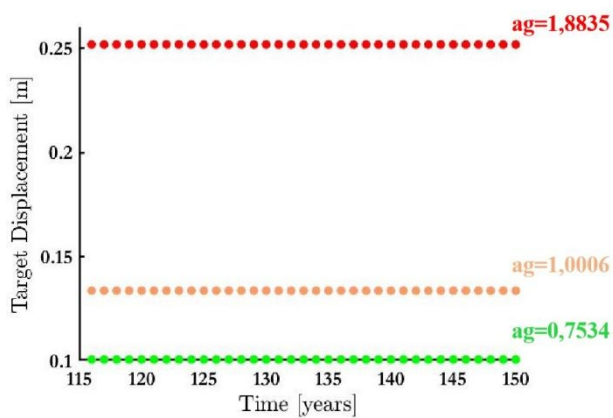
Για την επανάληψη 145 η διάβρωση ξεκίνησε το 55ο έτος και εμφανίστηκε αστοχία 22 χρόνια μετά την έναρξη της διάβρωσης για τις δύο πρώτες στάθμες, δηλαδή το 77ο έτος.



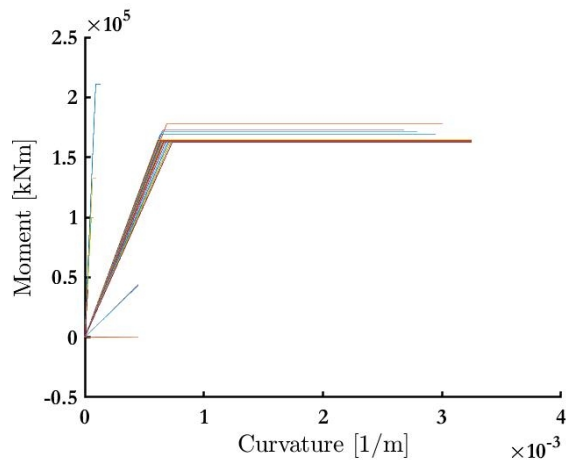
(α)



(β)



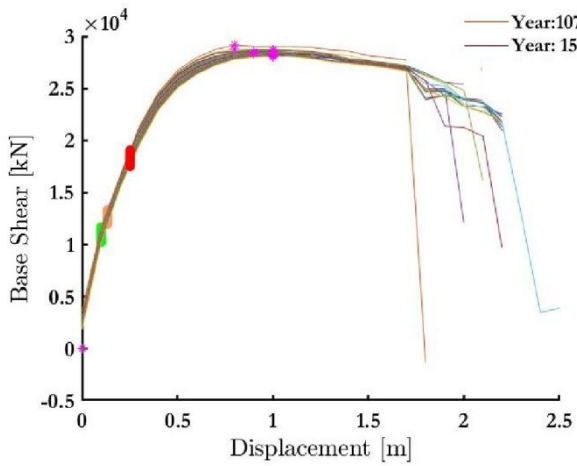
(γ)



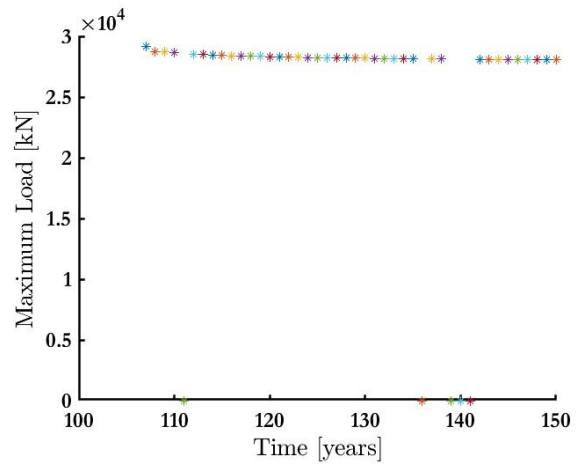
(δ)

Σχ. 54: Επανάληψη 221. (α) Καμπύλη ικανότητας για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης. (β) Μέγιστο φορτίο βάσης συναρτήσει του χρόνου. (γ) Στοχευόμενη μετατόπιση συναρτήσει του χρόνου για τις τρεις περιπτώσεις σεισμού. (δ) Διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης.

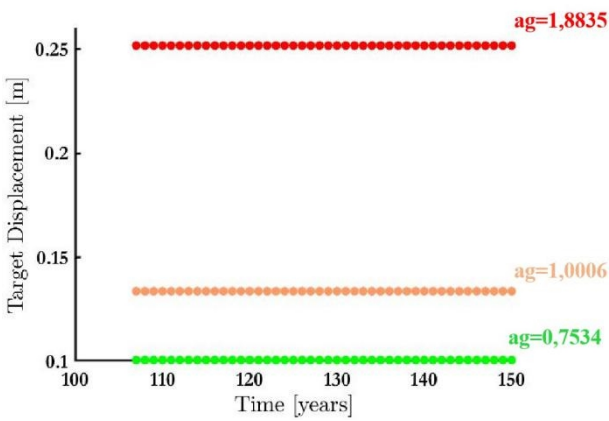
Για την επανάληψη 221 η διάβρωση ξεκίνησε το 116ο έτος και εμφανίστηκε αστοχία το ίδιο έτος με το έτος έναρξης της διάβρωσης για τις δύο πρώτες στάθμες.



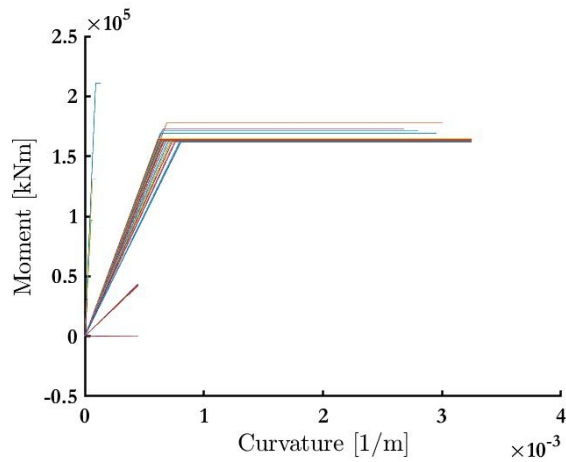
(α)



(β)



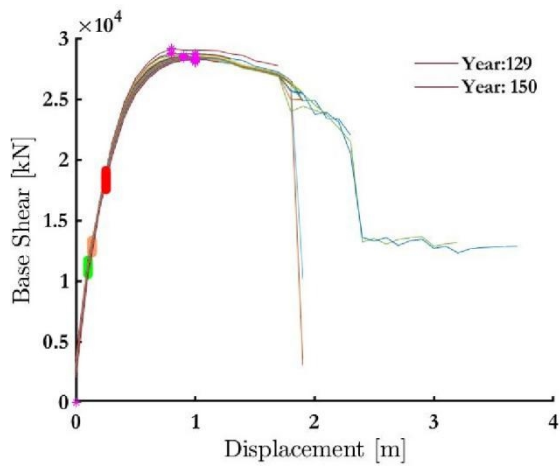
(γ)



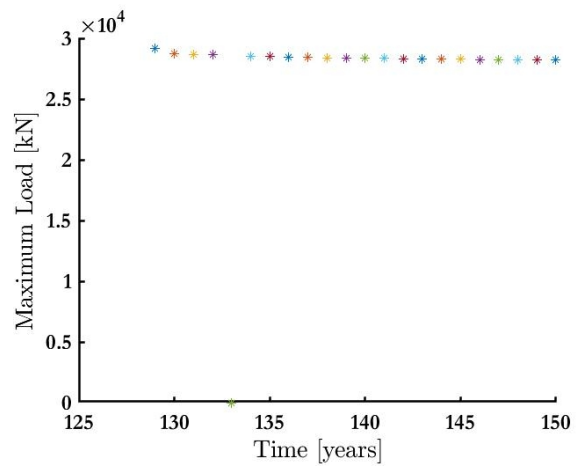
(δ)

Σχ. 55: Επανάληψη 270. (α) Καμπύλη ικανότητας για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης. (β) Μέγιστο φορτίο βάσης συναρτήσει του χρόνου. (γ) Στοχευόμενη μετατόπιση συναρτήσει του χρόνου για τις τρεις περιπτώσεις σεισμού. (δ) Διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης.

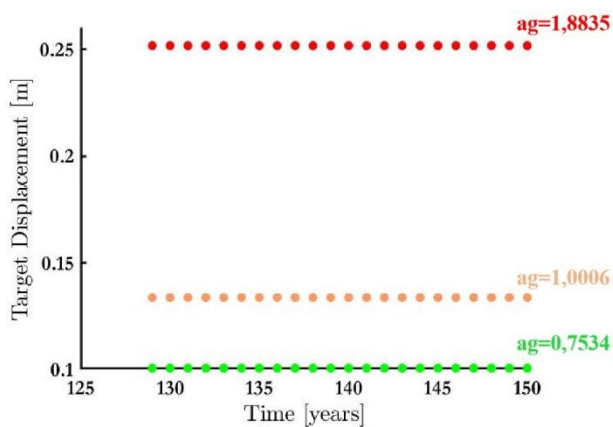
Για την επανάληψη 270 η διάβρωση ξεκίνησε το 107ο έτος και εμφανίστηκε αστοχία 35 χρόνια μετά την έναρξη της διάβρωσης για τις δύο πρώτες στάθμες, δηλαδή το 142ο έτος.



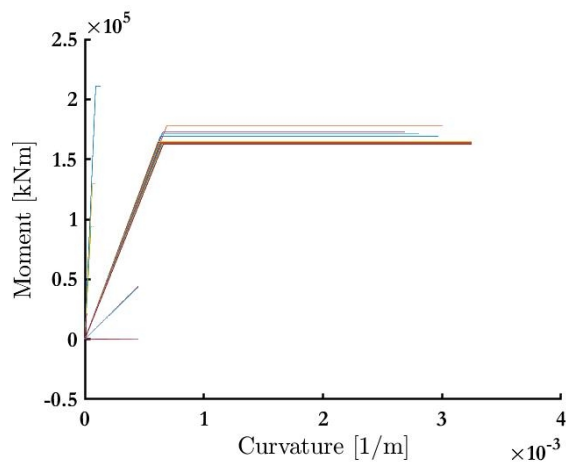
(α)



(β)



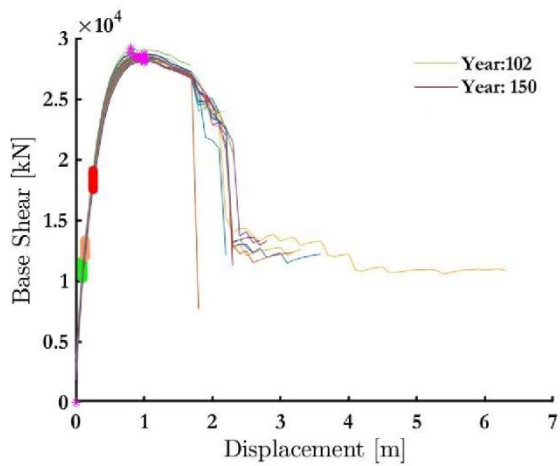
(γ)



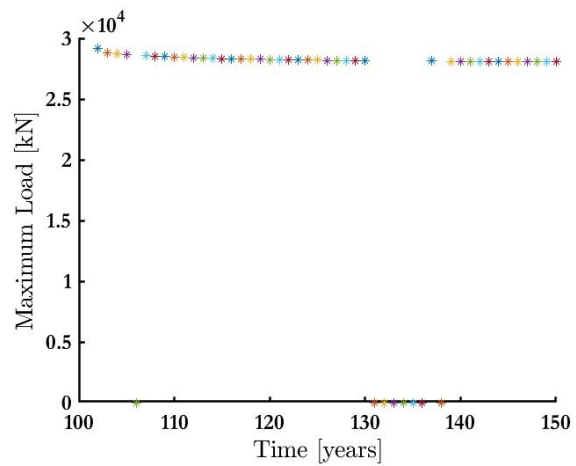
(δ)

Σχ. 56: Επανάληψη 370. (α) Καμπύλη ικανότητας για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης. (β) Μέγιστο φορτίο βάσης συναρτήσει του χρόνου. (γ) Στοχευόμενη μετατόπιση συναρτήσει του χρόνου για τις τρεις περιπτώσεις σεισμού. (δ) Διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης.

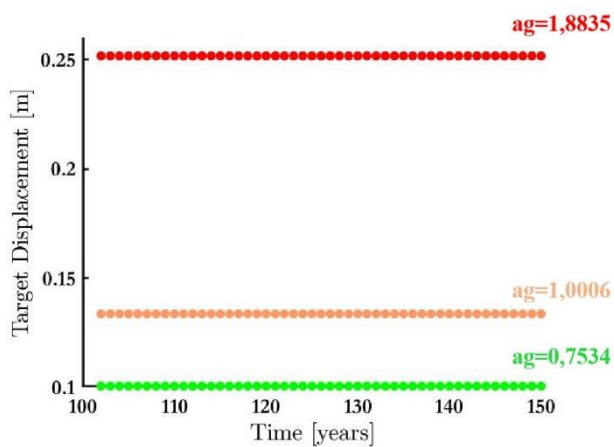
Για την επανάληψη 370 η διάβρωση ξεκίνησε το 129ο έτος και εμφανίστηκε αστοχία την χρονιά έναρξης της διάβρωσης για τις δύο πρώτες στάθμες.



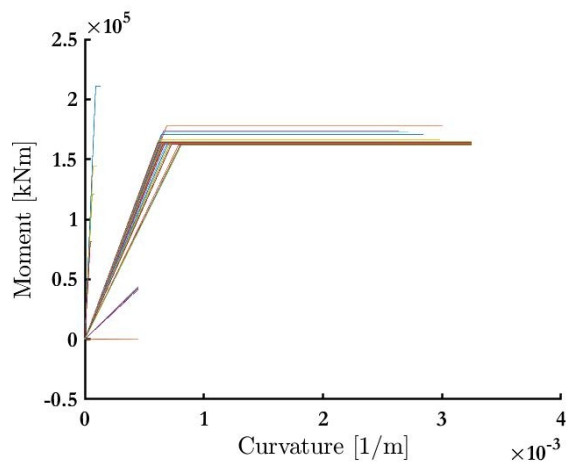
(α)



(β)



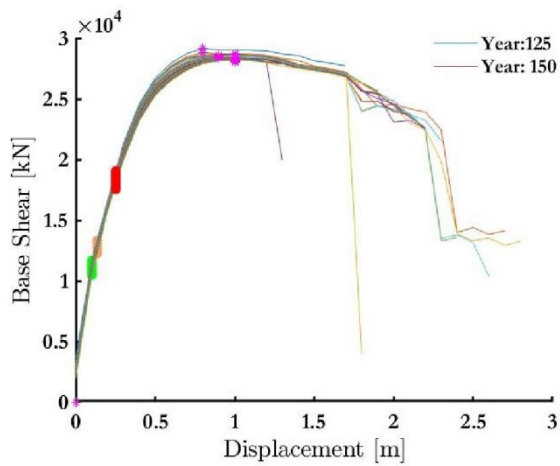
(γ)



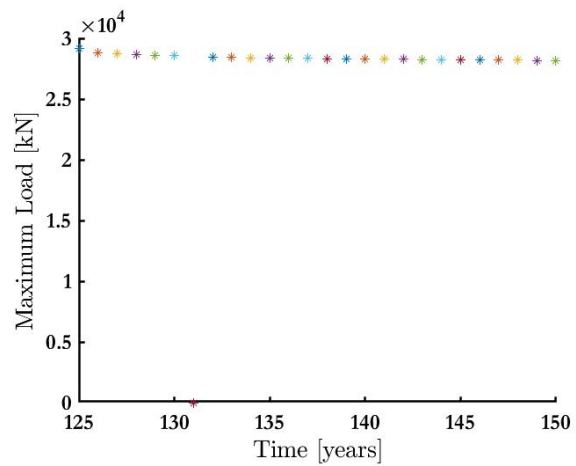
(δ)

Σχ. 57: Επανάληψη 480. (α) Καμπύλη ικανότητας για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης. (β) Μέγιστο φορτίο βάσης συναρτήσει του χρόνου. (γ) Στοχευόμενη μετατόπιση συναρτήσει του χρόνου για τις τρεις περιπτώσεις σεισμού. (δ) Διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης.

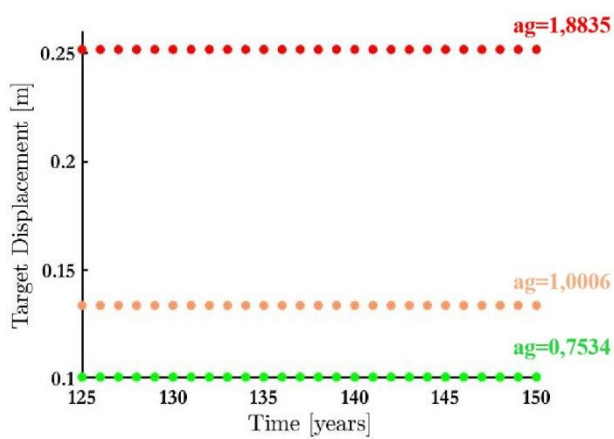
Για την επανάληψη 480 η διάβρωση ξεκίνησε το 102ο έτος και εμφανίστηκε αστοχία 35 χρόνια μετά την έναρξη της διάβρωσης για τις δύο πρώτες στάθμες, δηλαδή το 137ο έτος.



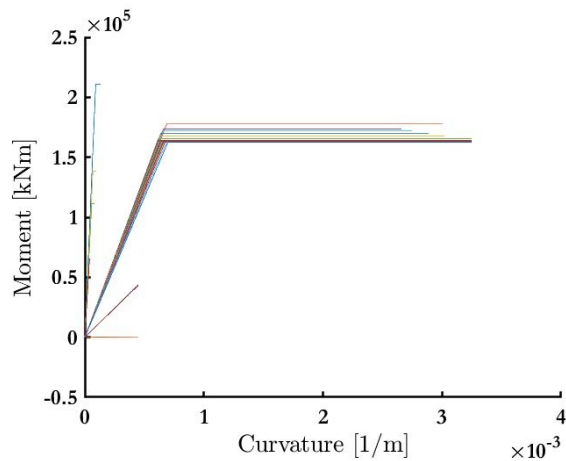
(α)



(β)



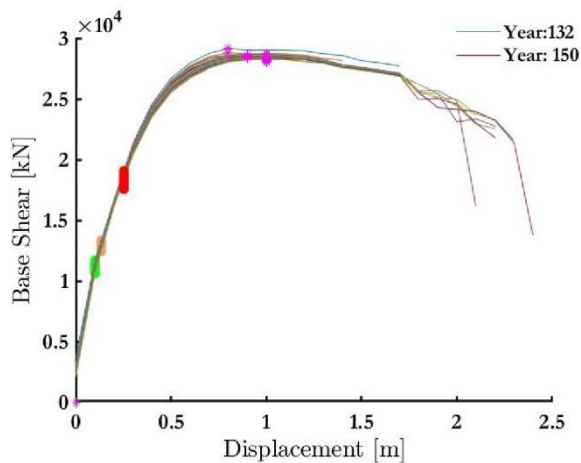
(γ)



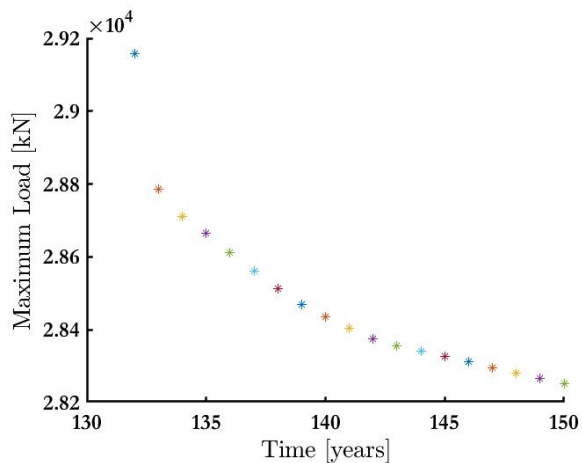
(δ)

Σχ. 58: Επανάληψη 555. (α) Καμπύλη ικανότητας για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης. (β) Μέγιστο φορτίο βάσης συναρτήσει του χρόνου. (γ) Στοχευόμενη μετατόπιση συναρτήσει του χρόνου για τις τρεις περιπτώσεις σεισμού. (δ) Διάγραμμα ροπών καμψυλοτήτων για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης.

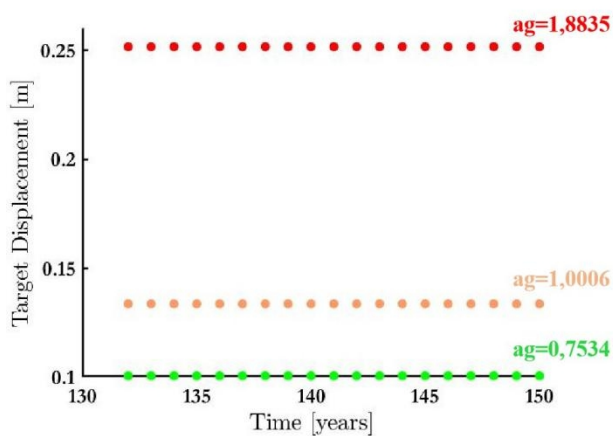
Για την επανάληψη 555 η διάβρωση ξεκίνησε το 125ο έτος και εμφανίστηκε αστοχία την χρονιά εμφάνισης της διάβρωσης για τις δύο πρώτες στάθμες.



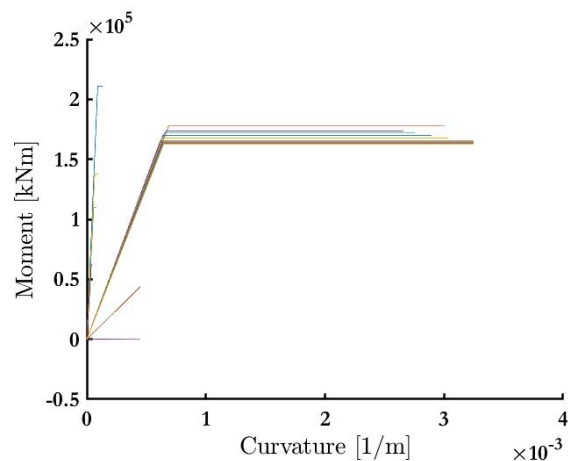
(α)



(β)



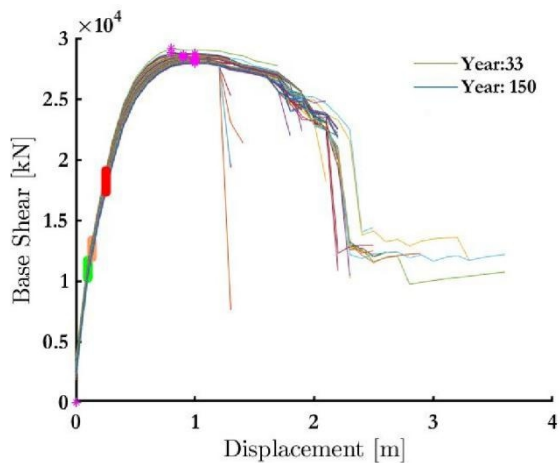
(γ)



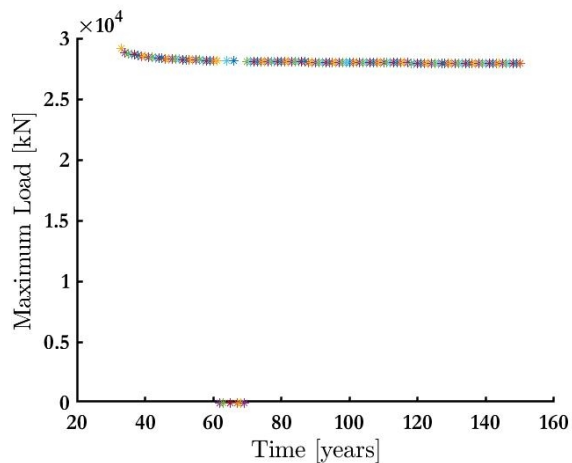
(δ)

Σχ. 59: Επανάληψη 850. (α) Καμπύλη ικανότητας για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης. (β) Μέγιστο φορτίο βάσης συναρτήσει του χρόνου. (γ) Στοχευόμενη μετατόπιση συναρτήσει του χρόνου για τις τρεις περιπτώσεις σεισμού. (δ) Διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης.

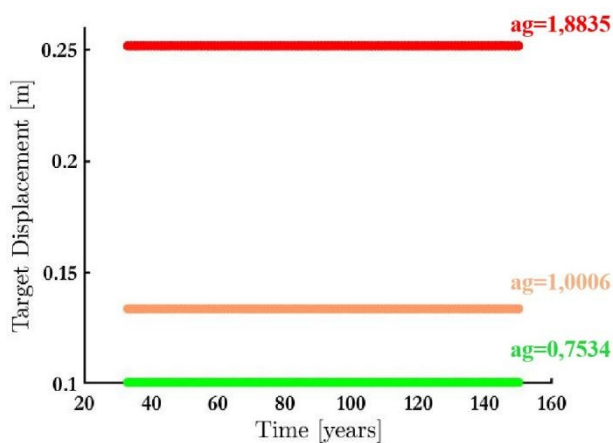
Για την επανάληψη 850 η διάβρωση ξεκίνησε το 132ο έτος και εμφανίστηκε αστοχία την χρονιά εμφάνισης της διάβρωσης για τις δύο πρώτες στάθμες.



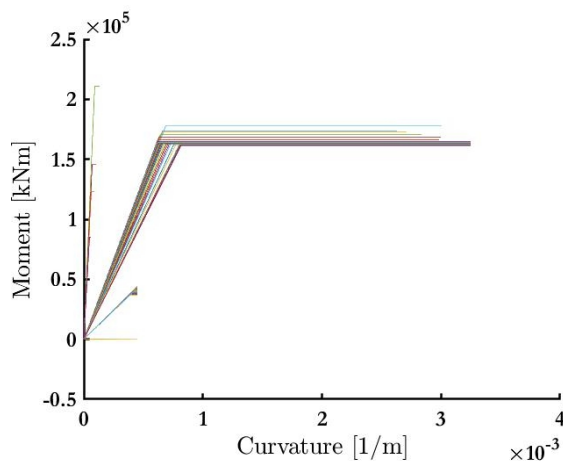
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχ. 60: Επανάληψη 925. (α) Καμπύλη ικανότητας για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης. (β) Μέγιστο φορτίο βάσης συναρτήσει του χρόνου. (γ) Στοχευόμενη μετατόπιση συναρτήσει του χρόνου για τις τρεις περιπτώσεις σεισμού. (δ) Διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης.

Για την επανάληψη 925 η διάβρωση ξεκίνησε το 33ο έτος και εμφανίστηκε αστοχία 84 έτη μετά την εμφάνιση της διάβρωσης για τις δύο πρώτες στάθμες, δηλαδή το 117ο έτος.

Εφόσον ολοκληρώθηκαν οι έλεγχοι για κάθε μια από τις 1000 επαναλήψεις, ακολούθησε το τελικό βήμα που είναι ο υπολογισμός της πιθανότητας αστοχίας για κάθε μια στάθμη επιτελεστικότητας και τα αποτελέσματα είναι τα εξής:

144 αστοχίες από τις 1000 επαναλήψεις, για στάθμη Περιορισμένες Βλάβες και πιθανότητα αστοχίας 14,37 %.

144 αστοχίες από τις 1000 επαναλήψεις, για στάθμη Σημαντικές Βλάβες και πιθανότητα αστοχίας 14,37%.

0 αστοχίες από τις 1000 επαναλήψεις, για την στάθμη Οιονεί Κατάρρευση και πιθανότητα αστοχίας 0%.

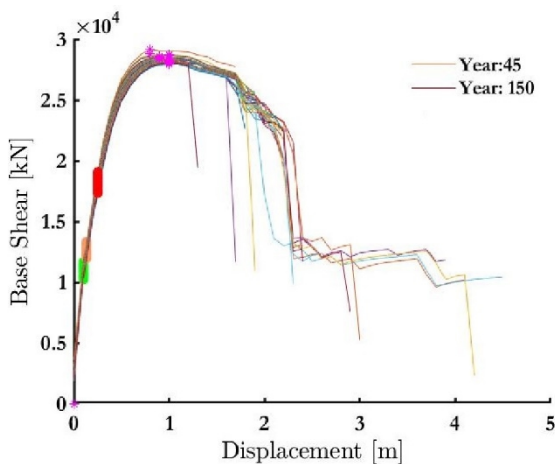
Έως τώρα οι έλεγχοι έγιναν με την θεώρηση ότι η γέφυρα αστοχεί με το που εμφανιστεί η πρώτη αστοχία σε κάποια διατομή, υπόθεση αρκετά συντηρητική ειδικά αν το μέλος εμφάνισε αστοχία μόνο για την πρώτη στάθμη Περιορισμένες Βλάβες. Στην παρούσα γέφυρα η πρώτη αστοχία εμφανίστηκε πάντα στο αριστερό βάθρο. Οπότε στην συνέχεια εξετάστηκε και η περίπτωση στην οποία η κατασκευή θεωρείται ότι αστόχησε αν και τα δύο βάρη εμφανίσουν αστοχία για κάποια στάθμη επιτελεστικότητας. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης είναι τα εξής:

0 αστοχίες από τις 1000 επαναλήψεις, για στάθμη Περιορισμένες Βλάβες και πιθανότητα αστοχίας 0 %.

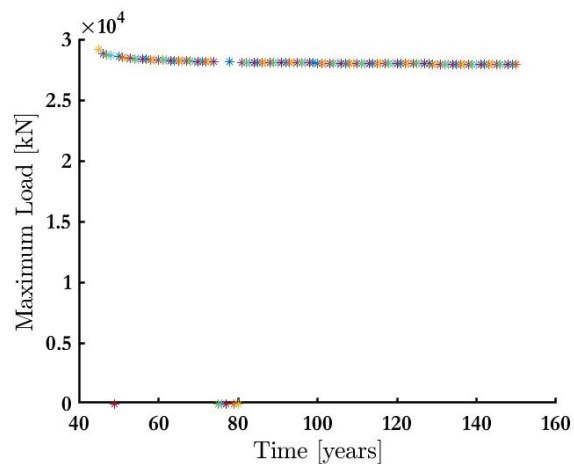
0 αστοχίες από τις 1000 επαναλήψεις, για στάθμη Σημαντικές Βλάβες και πιθανότητα αστοχίας 0%.

0 αστοχίες από τις 1000 επαναλήψεις, για την στάθμη Οιονεί Κατάρρευση και πιθανότητα αστοχίας 0%.

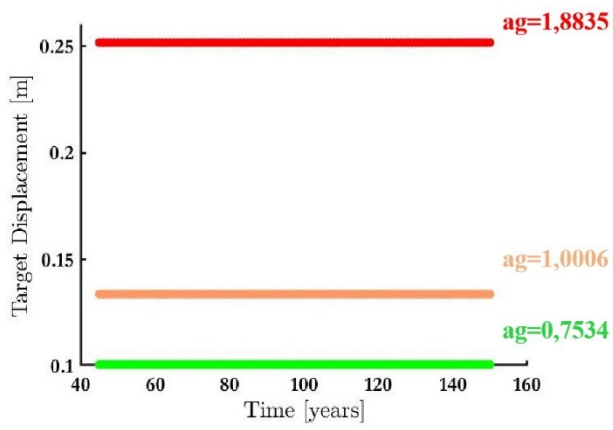
Επιλέγοντας πάλι την επανάληψη 115 όπως πριν παίρνουμε τα Σχ.61 που είναι ίδια με αυτά του Σχ.51 καθώς το μόνο που άλλαξε είναι η απαίτηση για την θεώρηση αστοχίας της γέφυρας. Πάλι η έναρξη διάβρωσης είναι τα 45 έτη και η καμπύλη αντίστασης συνεχίζει να μεταβάλλεται έως τα 150 έτη. Σε αυτή την περίπτωση όμως οι νέοι έλεγχοι ικανοποιήθηκαν και δεν εμφανίστηκε αστοχία στην γέφυρα.



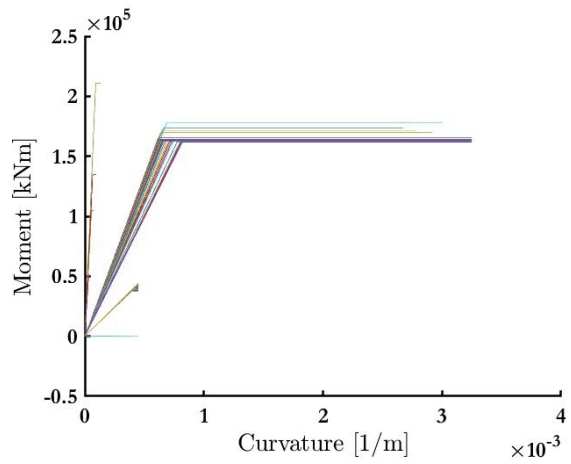
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχ. 61: Επανάληψη 115. (α) Καμπύλη ικανότητας για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης. (β) Μέγιστο φορτίο βάσης συναρτήσει του χρόνου. (γ) Στοχευόμενη μετατόπιση συναρτήσει του χρόνου για τις τρεις περιπτώσεις σεισμού. (δ) Διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων για κάθε έτος μετά την έναρξη της διάβρωσης.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Από την ανάλυση του επίπεδου πλαισίου για 1000 και 5000 επαναλήψεις προέκυψε αρχικά το συμπέρασμα ότι η μέθοδος Crude Monte Carlo μέσω του κώδικα του FERUM, είναι αξιόπιστη για την εκτέλεση πιθανοτικής ανάλυσης για διάβρωση ενός κτιριακού φορέα, με μικρή απόκλιση της πιθανότητας αστοχίας μεταξύ των δύο αναλύσεων και μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και στις δύο περιπτώσεις. Φυσικά η μέθοδος τείνει στην ακριβή λύση όσο ο αριθμός των επαναλήψεων αυξάνεται.

ΕΠΙΠΕΔΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα κατά ΕΑΚ η ανάλυση για την περίπτωση που δεν απομειώνονται οι ιδιότητες του περισφιγμένου σκυροδέματος, δίνει μηδενική αστοχία, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η διάβρωση δεν παίζει σημαντικό ρόλο στην κατασκευή, όταν δεν επηρεάζεται και ο πυρήνας των διατομών, πράγμα που επιβεβαιώνεται και από την θεωρία, σύμφωνα με την οποία όταν ξεκινάει η διάβρωση στον οπλισμό αρχίζει να υποβαθμίζεται η ποιότητα του σκυροδέματος γύρω από αυτόν.

Για την περίπτωση που μεταβάλλονται οι μηχανικές ιδιότητες και του πυρήνα, το πιο ασφαλές είναι να βγάλουμε συμπεράσματα από τις 5000 επαναλήψεις, μιας που τείνουν στην παραγματική λύση με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα κατά ΕΑΚ για 5000 επαναλήψεις Crude Monte Carlo προέκυψαν:

- Πιθανότητα αστοχίας 21,91% για την στάθμη Περιορισμένες βλάβες.
- Πιθανότητα αστοχίας 1,16% για την στάθμη Σημαντικές βλάβες.
- Πιθανότητα αστοχίας 0% για την στάθμη Οιονεί κατάρρευση.

Κρίνοντας αποκλειστικά εκ των αποτελεσμάτων βλέπουμε ότι:

Αρχικά, οι τιμές για τις δύο πρώτες στάθμες δεν ξεπερνάνε το 50% και το 10% που ορίζεται από την θεωρία άρα δεν προκύπτει ανάγκη για άμεση επέμβαση, παρά μόνον η τήρηση της προβλεπόμενης οπτικής επιθεώρησης. Τέλος, για την στάθμη Οιονεί Κατάρρευση η πιθανότητα αστοχίας είναι μηδενική, άρα δεν απαιτούνται άμεσες ενέργειες παρά μόνο η προβλεπόμενη οπτική επιθεώρηση του έργου.

Επίσης, όπως αποδείχθηκε από την ανάλυση, η εμφάνιση διάβρωσης στη ζωή της κατασκευής, δεν σημαίνει απαραίτητα ότι κάποια στιγμή θα προκαλέσει αστοχία σε συνδυασμό με σεισμό. Όπως φάνηκε και από το Σχ.39(α), η διάβρωση ξεκίνησε στα 25 έτη ζωής αλλά οι έλεγχοι έδειξαν ότι δεν αστόχησε για καμία στάθμη.

Για το πλαίσιο έγιναν πάλι οι έλεγχοι επιτελεστικότητας με τις εδαφικές επιταχύνσεις αναφοράς κατά Papazachos (1997) και με τα εξής αποτελέσματα:

- Πιθανότητα αστοχία 32,85% για στάθμη Περιορισμένες Βλάβες.
- Πιθανότητα αστοχία 8,6% για στάθμη Σημαντικές Βλάβες.
- Πιθανότητα αστοχίας 4,2% για Οιονεί κατάρρευση.

Όπως είναι λογικό, οι πιθανότητες αυξήθηκαν σε σχέση με πριν, αφού οι εδαφικές επιταχύνσεις αναφοράς αυξήθηκαν, αλλά και πάλι ικανοποιούνται τα όρια επιτελεστικότητας. Βέβαια η δεύτερη στάθμη πλησιάζει αρκετά κοντά στο όριο του 10% ενώ η τρίτη στάθμη δεν είναι πια μηδενική, οπότε εκτός από την επιθεώρηση, ίσως χρειάζεται και προληπτική συντήρηση ώστε να μειωθεί και άλλο η πιθανότητα. Σχετικά με την προληπτική συντήρηση υπάρχουν πολυάριθμες ενέργειες κατά της διάβρωσης, όπως ενέσεις εποξικής ρητίνης (Böhni, 2005), αλλά οι αναλυτικές προτάσεις δεν αποτελούν κομμάτι αυτής της εργασίας, θα μπορούσαν βέβαια να αποτελέσουν συνέχεια της παρούσας. Επίσης στην περίπτωση που δεν μιλάμε για υφιστάμενη κατασκευή αλλά για το στάδιο του σχεδιασμού, εφόσον προκύψει αυτή η μεγαλύτερη πιθανότητα, μια λύση θα ήταν η επαναδιαστασιολόγηση του οπλισμού των υποστρωμάτων, αλλά και πάλι η πρόταση είναι ενδεικτική και απαιτεί περαιτέρω εμβάθυνση.

Βέβαια τα συμπεράσματα μόνο εκ του αποτελέσματος δεν αρκούν για να δώσουν μια ολοκληρωμένη εικόνα και πρόταση, γι' αυτό και θα πρέπει να σχολιαστεί και η ορθότητα των επιμέρους βημάτων και σχέσεων που δόμησαν την μελέτη. Αποτελεί γεγονός το ότι η μεθοδολογία βασίστηκε σε κάποιες συντηρητικές θεωρήσεις που επηρέασαν τα αποτελέσματα. Μια τέτοια θεώρηση είναι ότι η κατασκευή αστοχεί όταν τουλάχιστον ένα κρίσιμο μέλος αστοχήσει ακόμη και για την πρώτη στάθμη Περιορισμένες Βλάβες. Επίσης οι έλεγχοι έγιναν για τον δυσμενή συνδυασμό απαιτήσεων που αφορά κρίσιμες κατασκευές, ενώ για το επίπεδο πλαίσιο θα μπορούσε να γίνει και για τον συνδυασμό των συνήθων κατασκευών, δηλαδή Β3, Γ2 του Πίνακα 1, που αντιστοιχεί σε όριο 80% και 50% για Σημαντικές Βλάβες και Οιονεί Κατάρρευση, αντίστοιχα.

Επίσης, όλα τα απλοποιητικά βήματα που εφαρμόστηκαν χάριν οικονομίας χρόνου, είναι πολύ πιθανό να προκάλεσαν σημαντικές αποκλίσεις στις πιθανότητες ως προς τις πραγματικές τιμές τους. Τέτοιες απλοποιήσεις ήταν η επιλογή ραβδωτού φορέα στην μη γραμμική σεισμική ανάλυση και η δημιουργία του διαγράμματος ροπών-καμπυλοτήτων με τη θεώρηση σταθερής αξονικής δύναμης,

Η ανάλυση της γέφυρας έγινε για 1000 επαναλήψεις χάριν οικονομίας χρόνου χωρίς να επηρεάζεται το αποτέλεσμα και για τις τιμές των εδαφικών επιταχύνσεων αναφοράς κατά ΕΑΚ. Όπως και για το πλαίσιο, έγινε η θεώρηση ότι η γέφυρα αστοχεί όταν ένα τουλάχιστον δομικό μέλος αστοχήσει και οι τιμές που προέκυψαν είναι:

- Πιθανότητα αστοχίας 17,34% για στάθμη Περιορισμένες Βλάβες.
- Πιθανότητα αστοχίας 17,34% για στάθμη Σημαντικές Βλάβες.
- Πιθανότητα αστοχίας 0% για την στάθμη Οιονεί Κατάρρευση.

Για την πρώτη στάθμη, η πιθανότητα 17,34% δεν προκαλεί προβληματισμό, καθώς η εμφάνιση ρωγμών που αντιστοιχούν σε αυτήν την στάθμη, είναι σχετικά αποδεκτή σε σύγκριση με ένα κτιριακό πλαίσιο και το όριο για την στάθμη Περιορισμένες Βλάβες αντιστοιχεί σε υπέρβαση 50%, αλλά η ίδια πιθανότητα για την δεύτερη στάθμη Σημαντικές βλάβες, απαιτεί αναλυτικότερη διερεύνηση μιας που ξεπερνάει το όριο 10% της απαίτησης και οι βλάβες αυτές αν και επισκευάσιμες, επηρεάζουν σημαντικά την ψυχολογία του χρήστη. Η πρώτη παρατήρηση είναι ότι το βάθρο που αστόχησε είναι υποδιαστασιολογημένο ως προς την γεωμετρία ή τον οπλισμό, οπότε θα απαιτούνταν αντίστοιχες ενέργειες ενίσχυσής του, ή επαναδιαστασιολόγησης του αν βρίσκεται στο στάδιο του σχεδιασμού.

Ισχύει ότι οι απαιτήσεις για τις γέφυρες είναι πιο ευέλικτες από αυτές των κτιριακών έργων και γι' αυτό στην συνέχεια επιλέχθηκε να γίνει η ανάλυση θεωρώντας ως αστοχία της γέφυρας την περίπτωση που αστοχούν και τα δύο βάθρα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι δεν εμφανίστηκε καμία αστοχία στον φορέα για αυτήν την θεώρηση, καταλήγοντας έτσι στο συμπέρασμα ότι το δεύτερο βάθρο δεν αστόχησε καθόλου και είναι ο λόγος που ικανοποιήθηκαν οι έλεγχοι. Επομένως ενισχύεται ακόμα περισσότερο η πρώτη σκέψη ότι το αριστερό βάθρο παρουσιάζει ανεπάρκεια οπλισμού και θα πρέπει να εξεταστεί περαιτέρω.

Βέβαια, όπως και για το επίπεδο πλαίσιο τα συμπεράσματα μόνο εκ του αποτελέσματος δεν αρκούν για να δώσουν μια ολοκληρωμένη εικόνα και πρόταση, γι' αυτό και θα πρέπει να σχολιαστεί και η ορθότητα των επιμέρους βημάτων και σχέσεων που δόμησαν την μελέτη.

Ακολούθως, εκφράζεται η παρατήρηση ότι η μέθοδος που επιλέχθηκε για την επίδραση της διάβρωσης στο φορέα μεταβάλλει τις αντοχές των διατομών και όχι τα ελαστικά χαρακτηριστικά τους και άρα οι καμπύλες ικανότητας έχουν σχεδόν όμοιο ελαστικό κλάδο, οπότε η στοχευόμενη μετατόπιση που εξαρτάται από τα ελαστικά χαρακτηριστικά της καμπύλης ικανότητας δεν μεταβάλλεται καθόλου, γι' αυτό φαίνονται σταθερές στα σχήματα του κεφαλαίου 5.2 αλλά δίνουν και ίδιες πιθανότητες αστοχίας για τις δύο πρώτες στάθμες επιτελεστικότητας. Σε περίπτωση που εφαρμόζονταν διαφορετική μέθοδος

που να λαμβάνει υπόψιν την απομείωση των ελαστικών χαρακτηριστικών, τότε οι τιμές των στοχευόμενων μετατοπίσεων θα αυξάνονταν και πιθανόν οι τιμές των πιθανοτήτων να είχαν τελείως διαφορετική εικόνα, αν επίσης σκεφτεί κανείς ότι όσο μεγαλύτερη η επικάλυψη της διατομής (διπλάσια από αυτή του πλαισίου) τόσο μεγαλύτερη είναι η απομείωση της διατομής όταν επέλθει διάβρωση. Η ίδια μέθοδος εφαρμόστηκε και για το πλαίσιο, αλλά εκεί η πρώτη αστοχία μέλους επέρχονταν πολύ νωρίς, οπότε ο ελαστικός κλάδος ήταν πολύ σύντομος και το συμπέρασμα αυτό δεν ήταν εμφανές.

Επίσης, όπως και για το πλαίσιο όλα τα απλοποιητικά βήματα που εφαρμόστηκαν χάριν οικονομίας χρόνου, είναι πολύ πιθανό να προκάλεσαν σημαντικές αποκλίσεις στις πιθανότητες ως προς τις πραγματικές τιμές τους.

Έχοντας συγκεντρώσει τις παραπάνω παρατηρήσεις, προκύπτει αρχικά το συμπέρασμα ότι η διάβρωση υπό ταυτόχρονη σεισμική διέγερση είναι ένας συνδυασμός που πρέπει να ελέγχεται σε βάθος γιατί είναι ικανός να υποβαθμίσει τις μηχανικές ιδιότητες του φορέα μέχρι ακόμη και την ολική αστοχία. Ακόμη, η μέθοδος που εφαρμόστηκε για την επιρροή της διάβρωσης σύμφωνα με το Κεφάλαιο 2.1, υπό ταυτόχρονη σεισμική διέγερση, αποδείχθηκε ικανοποιητική για ένα κτήριο με μικρή επικάλυψη, δε ελλιπής για φορείς μεγαλύτερης επικάλυψης και θα έπρεπε να συνδυαστεί με την απομείωση των ελαστικών χαρακτηριστικών και της απομείωσης της γεωμετρίας λόγω διάβρωσης. Είναι ακόμη συντηρητική για την γέφυρα στην περίπτωση που η αστοχία προκύπτει από το πρώτο βάθρο που αστόχησε ενώ αντιθέτως κατά της ασφαλείας στην περίπτωση που η αστοχία προκύπτει από την αστοχία και των δύο βάρων. Τελικά οι πραγματικές πιθανότητες και για τις δύο κατασκευές βρίσκονται κάπου στην μέση, αν λάβουμε υπόψιν τις συντηρητικές αλλά και τις απλοποιητικές θεωρήσεις σύμφωνα με τις οποίες δομήθηκε όλη η διαδικασία επίλυσης και γι' αυτό η μεθοδολογία επιδέχεται περαιτέρω βελτίωσης και διόρθωσης. Σε κάθε περίπτωση τα αποτελέσματα θα πρέπει να επιβεβαιωθούν και με άλλες μεθόδους, όπως με συνδυαστική εφαρμογή μιας μη γραμμικής μεθόδου χρονοϊστορίας ούτως ώστε να είναι ασφαλής η λήψη αποφάσεων σε μελλοντικές αντίστοιχες καταστάσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Hallberg, D. (2005). *Development and adaptation of a life cycle management system for constructed work (Doctoral dissertation, KTH)*.
- Grace, N. F., Jensen, E. A., Eamon, C. D., & Shi, X. (2012). Life-cycle cost analysis of carbon fiber-reinforced polymer reinforced concrete bridges. *ACI Structural Journal*, *109*(5), 697-704.
- Bastidas-Arteaga, E. (2018). Reliability of reinforced concrete structures subjected to corrosion-fatigue and climate change. *International journal of concrete structures and materials*, *12*(1), 1-13.
- Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., & Fardis, M. N. (1989). A reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation. *AIChE Journal*, *35*(10), 1639-1650.
- Choe, D. E., Gardoni, P., Rosowsky, D., & Haukaas, T. (2008). Probabilistic capacity models and seismic fragility estimates for RC columns subject to corrosion. *Reliability Engineering & System Safety*, *93*(3), 383-393.
- Chen, D., & Mahadevan, S. (2008). Chloride-induced reinforcement corrosion and concrete cracking simulation. *Cement and Concrete Composites*, *30*(3), 227-238.
- Ou, Y. C., Fan, H. D., & Nguyen, N. D. (2013). Long-term seismic performance of reinforced concrete bridges under steel reinforcement corrosion due to chloride attack. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, *42*(14), 2113-2127.
- DuraCrete. (2000). Statistical quantification of the variables in the limit state functions. *The European Union-Brite EuRam III-Contract BRPR-CT95-0132-Project BE95-1347/R9*.
- Lee, H. S., & Cho, Y. S. (2009). Evaluation of the mechanical properties of steel reinforcement embedded in concrete specimen as a function of the degree of reinforcement corrosion. *International journal of fracture*, *157*(1-2), 81-88.
- Hsu TTC. (1993). *Unified Theory of einforced Concrete*. CRC-Press Inc., Boca Raton, FL.
- Molina, F. J., Alonso, C., & Andrade, C. (1993). Cover cracking as a function of rebar corrosion: Part 2—Numerical model. *Materials and structures*, *26*(9), 532-548.
- Gavin, H. (2001). Numerical integration for structural dynamics. *Department of Civil and Environmental Engineering, Duke University: Durham, NC, USA*.

Antoniou, S., & Pinho, R. (2004). Development and verification of a displacement-based adaptive pushover procedure. *Journal of earthquake engineering*, 8(05), 643-661.

ΕΠΕ, Κ. (2017). Κανονισμός Επεμβάσεων, 2η αναθεώρηση, ΟΑΣΠ. *ΟΑΣΠ, Αθήνα*.

Code, P. (2005). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. *Brussels: European Committee for Standardization*.

Terejanu, G. A. (2009). Tutorial on Monte Carlo Techniques. *Department of Computer Science and Engineering. University at Buffalo*.

Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H., & Fenves, G. L. (2006). OpenSees command language manual. *Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center*, 264.

Taucer, F., Spacone, E., & Filippou, F. C. (1991). *A fiber beam-column element for seismic response analysis of reinforced concrete structures* (Vol. 91). Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California.

Filippou, F. C., Popov, E. P., & Bertero, V. V. (1983). Effects of bond deterioration on hysteretic behavior of reinforced concrete joints.

Mander, J. B., Priestley, M. J., & Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of structural engineering*, 114(8), 1804-1826.

Kent, D.C. and Park, R. (1971). Flexural Members with Confined Concrete. ASCE, *Journal of Structural Division, Proceedings, Vol. 97*, pp. 1969-1991.

Yassin, M. H. M. (1994). *Nonlinear analysis of prestressed concrete structures under monotonic and cyclic loads* (Doctoral dissertation, University of California, Berkeley).

FEDEAS. (2015). <http://www.ce.berkeley.edu/~filippou/Research/Fedeas/material.html>.

Menegotto, M. (1973). Method of analysis for cyclically loaded RC plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending. In *Proc. of IABSE symposium on resistance and ultimate deformability of structures acted on by well defined repeated loads* (pp. 15-22).

Der Kiureghian, A., Haukaas, T., & Fujimura, K. (2006). Structural reliability software at the University of California, Berkeley. *structural safety*, 28(1-2), 44-67.

Bourinet, J. M. (2010). Ferum 4.1 user's guide. *Institute Français de Mécanique Avancée (IFMA), Clermont-Ferrand, France.*

Almutairi, A., Lu, J., Elgamal, A., & Mackie, K. (2018). MSBridge: OpenSees pushover and earthquake analysis of multi-span bridges-user manual. *Report No. SSRP-16/05.*

Papazachos, B. C., & Papazachou, K. (1997). The earthquakes of Greece: Thessaloniki. *Greece, Greece Ziti Publ.*

Böhni, H. (Ed.). (2005). *Corrosion in reinforced concrete structures.* Elsevier.