

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ



## Μεταπτυχιακή διατριβή

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΧΑΛΥΒΑ ΣΕ  
ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ  
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΜΕΛΙΝΑ ΚΟΜΠΙΟΥ

Λεμεσός 2015



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

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΧΑΛΥΒΑ ΣΕ  
ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ  
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

της  
Μελίνας Κόμπου

Λεμεσός 2015

**ΕΝΤΥΠΟ ΕΓΚΡΙΣΗΣ**

Μεταπτυχιακή διατριβή

**Επίδραση διάβρωσης χάλυβα σε υφιστάμενες  
κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος**

Παρουσιάστηκε από

Μελίνα Κόμπου

Επιβλέπων καθηγητής:

.....

Μέλος επιτροπής:

.....

Μέλος επιτροπής:

.....

Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σεπτέμβρης, 2015

## **Πνευματικά δικαιώματα**

Copyright © Μελίνα Κόμπου, 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Κρίστη Χρυσοστόμου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση της διπλωματικής αυτής εργασίας, για την καθοδήγηση που μου πρόσφερε για την εκπόνηση της. Παράλληλα θερμές ευχαριστίες στον ερευνητικό συνεργάτη κ. Νικόλα Κυριακίδη για τον χρόνο και την βοήθεια που μου πρόσφερε που χωρίς αυτόν θα ήταν δύσκολη η εκπόνηση της μεταπτυχιακής διατριβής. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που ήταν δίπλα μου το διάστημα αυτό.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η αποτίμηση της σεισμικής τρωτότητας υφιστάμενου κτηρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα, λαμβάνοντας υπόψη τη γήρανση των υλικών με τη χρήση ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης. Σκοπός είναι να καθοριστεί κατά πόσον τα υφιστάμενα κτίρια τα οποία έχουν διανύσει περίπου 50 χρόνια ζωής παρουσιάζουν σημαντική μείωση της σεισμικής τους επάρκειας και είναι δυνατόν να έχουν σημαντικές ζημιές σε συχνούς σεισμούς. Επίσης θα καθοριστεί η αναμενόμενη επιδείνωση της κατάστασης στα επόμενα 25 χρόνια και κατά πόσο αυτή θα φέρει την κατασκευή κοντά στην μοναδική λύση της αντικατάστασης.

Αναλύονται οι παράγοντες οι οποίοι δρουν αρνητικά στο οπλισμένο σκυρόδεμα και έχουν ως αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής των μελών. Το πολύπλοκο φαινόμενο της διάβρωσης, η ύπαρξη ή η δημιουργία ρωγμών, τά αίτια τους καθώς επίσης οι συνέπειες που προκαλούν είτε στο σκυρόδεμα είτε στον οπλισμό προσεγγίζονται θεωρητικά. Για την αποτίμηση της συμπεριφοράς, προσομοιώθηκε ένα υφιστάμενο κτήριο στο λογισμικό SAP2000 έτσι ώστε για διάφορες σεισμικές διεγέρσεις και για 3 διαφορετικές χρονικές περιόδους να εκτιμηθεί η ευπάθεια του κτηρίου. Οι 3 χρονικές περιόδους ανάλυσης καλύπτουν πριν και μετά την διάβρωση για 0,50 και 75 χρόνια ζωής του κτηρίου. Για την εύρεση του χρόνου έναρξης της διάβρωσης, στο υπο μελέτη κτήριο έγινε χρήση ενός πιθανολογικού μοντέλου το οποίο προτάθηκε από την FIB-CEB Task Group 5.6 (2006) που λαμβάνει υπόψη την εισχώρηση των χλωριόντων στο σκυρόδεμα. Στην συνέχεια έγιναν ανελαστικές δυναμικές αναλύσεις χρονοιστορίας, οι οποίες επιτυγχάνονται με τη χρονική εξέλιξη του σεισμού μέσω επιταχυνσιογραφημάτων. Τέλος, εξάχθηκαν αποτελέσματα για τις μέγιστες μετακινήσεις των κόμβων του πλαισιωτού κτηρίου καθώς επίσης ο σχηματισμός καμπύλων τρωτότητας, οι οποίες έχουν ως στόχο τον καθορισμό της πιθανότητας να ξεπεράσει το κτήριο ένα καθορισμένο επίπεδο βλάβης. Τα συμπεράσματα της ανάλυσης είναι ότι η αύξηση της τρωτότητας σε σχέση με την αυξημένη ύπαρξη διάβρωσης φαίνεται να είναι σημαντική και είναι ικανή να μειώσει την αντοχή του κτιρίου σε σεισμική φόρτιση και να προκαλέσει σημαντικές αστοχίες ακόμα και σε συχνούς σεισμούς. Επομένως η απόφαση συντήρησης και ενίσχυσης του κτιρίου μετά την πάροδο των 50 ετών (χρονική περίοδος ζωής πλείστον υφιστάμενων κτιρίων Οπλισμένου σκυροδέματος) κρίνεται επιτακτική όχι μόνο για να αντισταθεί σε μεγάλους σεισμούς αλλά και σε συχνούς με μικρή περίοδο επανάληψης.

## **ABSTRACT**

The purpose of this thesis is the assessment of the seismic vulnerability of existing reinforced concrete buildings, taking into account the degradation over time due to aging effects using inelastic dynamic analysis. The factors that act negatively to reinforced concrete, and have effect on reducing the resistance of the members are described. As well as the complicated phenomenon of corrosion, the existence or the formation of cracking, their causes and also the consequences that occur on reinforcement bars and concrete are approached theoretically. To assess the vulnerability, an existing building it is simulated into SAP2000 software for various earthquake excitations and for three different time periods. These three periods of analysis cover before and after the performance of corrosion 0 ,50,75 years of lifetime of the building. Chloride induced corrosion is taken into account based on probabilistic modeling of corrosion initiation time and corrosion rate proposed by FIB-CEB Task Group 5.6 (2006). Afterwards inelastic dynamic analysis (time history) was performed using accelograms. Finally the results of maximum displacements were exported, and fragility curves based on these displacements are derived for determining the probability of the structure to exceed a certain damage limit state.



# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	v
ABSTRACT.....	vi
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	ix
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	xi
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	xii
1. Διάβρωση.....	1
2. Παράγοντες που επηρεάζουν την μείωση αντοχής μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα.....	3
2.1 Ενανθράκωση σκυροδέματος.....	3
2.2 Διάβρωση οπλισμού από την παρουσία χλωριόντων.....	4
2.2.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την διάβρωση .....	5
2.3 Ρηγματώσεις.....	7
2.3.1 Αίτια δημιουργίας ρωγμών.....	7_Toc430059188
3. Επιπτώσεις παραγόντων μείωσης της αντοχής μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα...	9
3.1 Διάβρωση οπλισμού .....	9
3.2 Ενανθράκωση.....	9
3.3 Ρηγματώσεις.....	9
4. Μοντέλο διάβρωσης .....	11
4.1 Πιθανολογικό μοντέλο χρόνου έναρξης της διάβρωσης.....	11
4.2 Βαθμός διάβρωσης.....	12
5. Ανελαστική δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας (Time History).....	13
6. Προσομοίωση υφιστάμενου κτηρίου για την αποτίμηση της σεισμικής επάρκειας διαμέσω του χρόνου.....	14

6.1 Περιγραφή κτηρίου .....	14
6.2 Σχεδιασμός στο λογισμικό Πρόγραμμα SAP2000.....	17
6.3 Ορισμός φορτίσεων κτηρίου .....	20
6.3.1 Υπολογισμός φορτίων κτηρίου .....	21
6.3.2 Υπολογισμός αξονικών δυνάμεων υποστυλωμάτων.....	22
6.4 Υπολογισμός χρόνου έναρξης και βαθμού διάβρωσης.....	24
6.5 Ορισμός πορείας πλαστικοποίησης.....	29
6.5.1 Υπολογισμός ροπών διαρροής .....	30
6.5.2 Υπολογισμός σταθμών επιτελεστικότητας.....	33
6.6 Ορισμός δυναμικής ανελαστικής ανάλυσης (Time History) .....	42
6.7 Ανάλυση δισδιάστατου 7όροφου κτηρίου .....	45
7. Αποτελέσματα αναλύσεων .....	47
7.1 Δημιουργία και παρουσίαση καμπυλών τρωτότητας.....	56
8. Συμπεράσματα .....	59
Βιβλιογραφία .....	64

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Σχηματική απεικόνιση της ηλεκτροχημικής διαδικασίας της διάβρωσης οπλισμένου σκυροδέματος .....	2
Σχήμα 2: Σχηματική απεικόνιση της ενανθράκωσης.....	4
Σχήμα 3: Διαδικασία διάβρωσης οπλισμού με την ύπαρξη CO <sub>2</sub> και χλωριόντων.....	6
Σχήμα 4: Σχηματική απεικόνιση δημιουργίας ρωγμών και αποκόλληση επικάλυψης λόγω διάβρωσης.....	10
Σχήμα 5: Καταγραφή Imperial Valley 1979- Bonds Corner Συνιστώσα 140 .....	13
Σχήμα 6: Τρισδιάστατη απεικόνιση 7-όροφου κτηρίου .....	14
Σχήμα 7: Πλάγια όψη 7-όροφου κτηρίου .....	15
Σχήμα 8: Κάτοψη 7-όροφου κτηρίου .....	16
Σχήμα 9: Συμπλήρωση ιδιοτήτων σκυροδέματος.....	17
Σχήμα 10: α) Ορισμός ιδιοτήτων υποστρωμάτων και β) ορισμός ιδιοτήτων δοκών.....	18
Σχήμα 11: Ορισμός δισδυστάτου πλαισίου σε κάρναβο στο λογισμικό SAP2000 .....	18
Σχήμα 12: Απεικόνιση πακτώσεων στους κόμβους της βάσης του δισδυστάτου πλαισίου..	19
Σχήμα 13: Ορισμός μόνιμων και κινητών φορτίων.....	20
Σχήμα 14: Απεικόνιση φορτίσεων δοκών στο δισδυστάτο πλαίσιο .....	20
Σχήμα 15: Απεικόνιση του τρόπου με τον οποίο μεταφέρονται τα φορτία από τις πλάκες στις δοκούς.....	21
Σχήμα 16: Καθορισμός πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα κάθε δομικού στοιχείου.....	29
Σχήμα 17: Ορισμός πλαστικών αρθρώσεων, ροπών διαρροής και σταθμών επιτελεστικότητας .....	41
Σχήμα 18: Friuli 1976, σταθμός Tolmezzo (Ιταλία).....	42
Σχήμα 19: Montenegro 1979, σταθμός Hercegnovi (Μαυροβούνιο).....	43
Σχήμα 20: Καλαμάτα 1986, σταθμός Δημαρχείου (Ελλάδα) .....	43
Σχήμα 21: Σεισμός Loma Prieta 1989, σταθμός Capitola (ΗΠΑ).....	43
Σχήμα 22: Imperial Valley 1979, σταθμός Bonds Corner (ΗΠΑ).....	44
Σχήμα 23: Imperial Valley 1940, σταθμός El Centro Array #9 (ΗΠΑ) .....	44
Σχήμα 24: Απεικόνιση παραμέτρων για τον ορισμό της ανελαστικής συνθήκης ιστορίας .....	45
Σχήμα 25: Απεικόνιση ανάλυσης στο λογισμικό SAP2000 με την ιδιοπερίοδο της κατασκευής.....	46

Σχήμα 26: Απεικόνιση παραμορφωμένου φορέα όταν υποβλήθηκε σε εδαφική επιτάχυνση 0.05g.....	48
Σχήμα 27: Γραφική απεικόνιση μετακινήσεων κόμβων για εδαφική επιτάχυνση 0.05g .....	48
Σχήμα 28: Απεικόνιση παραμορφωμένου φορέα όταν υποβλήθηκε σε εδαφική επιτάχυνση 0.1g.....	49
Σχήμα 29: Γραφική απεικόνιση μετακινήσεων κόμβων για εδαφική επιτάχυνση 0.1g .....	49
Σχήμα 30: Απεικόνιση παραμορφωμένου φορέα όταν υποβλήθηκε σε εδαφική επιτάχυνση 0.15g.....	50
Σχήμα 31: Γραφική απεικόνιση μετακινήσεων κόμβων για εδαφική επιτάχυνση 0.15g .....	50
Σχήμα 32: Απεικόνιση παραμορφωμένου φορέα όταν υποβλήθηκε σε εδαφική επιτάχυνση 0.2g.....	51
Σχήμα 33: Γραφική απεικόνιση μετακινήσεων κόμβων για εδαφική επιτάχυνση 0.2g .....	51
Σχήμα 34: Απεικόνιση παραμορφωμένου φορέα όταν υποβλήθηκε σε εδαφική επιτάχυνση 0.25g.....	52
Σχήμα 35: Γραφική απεικόνιση μετακινήσεων κόμβων για εδαφική επιτάχυνση 0.25g .....	52
Σχήμα 36: Καμπύλη τρωτότητας για t=0 χρόνια .....	57
Σχήμα 37: Καμπύλη τρωτότητας για t=50 χρόνια .....	58
Σχήμα 38: Καμπύλη τρωτότητας για t=75 χρόνια .....	58

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Αξονικά φορτία ακραίων υποστυλωμάτων .....	23
Πίνακας 2: Αξονικά φορτία μεσαίων υποστυλωμάτων .....	23
Πίνακας 3: Παράμετροι διείσδυσης γλωριόντων στο σκυρόδεμα με βάσει στατιστικά δεδομένα .....	25
Πίνακας 4: Ροπές διαρροής υποστυλωμάτων και δοκών για χρονική περίοδο $t=0$ .....	32
Πίνακας 5: Ροπές διαρροής υποστυλωμάτων και δοκών για χρονική περίοδο $t=50$ .....	32
Πίνακας 6: Ροπές διαρροής υποστυλωμάτων και δοκών για χρονική περίοδο $t=75$ .....	33
Πίνακας 7: Τιμές συντελεστών εμπιστοσύνης για τα αντίστοιχα επίπεδα γνώσης .....	36
Πίνακας 8: Αποτελέσματα σταθμών επιτελεστικότητας ακραίων υποστυλωμάτων για $t=0$ ..	37
Πίνακας 9: Αποτελέσματα σταθμών επιτελεστικότητας μεσαίων υποστυλωμάτων για $t=0$ ...	37
Πίνακας 10: Αποτελέσματα σταθμών επιτελεστικότητας δοκών για $t=0$ .....	38
Πίνακας 11: Αποτελέσματα σταθμών επιτελεστικότητας ακραίων υποστυλωμάτων για $t=50$ .....	38
Πίνακας 12: Αποτελέσματα σταθμών επιτελεστικότητας μεσαίων υποστυλωμάτων για $t=50$ .....	39
Πίνακας 13: Αποτελέσματα σταθμών επιτελεστικότητας δοκών για $t=50$ .....	39
Πίνακας 14: Αποτελέσματα σταθμών επιτελεστικότητας ακραίων υποστυλωμάτων για $t=75$ .....	40
Πίνακας 15: Αποτελέσματα σταθμών επιτελεστικότητας μεσαίων υποστυλωμάτων για $t=75$ .....	40
Πίνακας 16: Αποτελέσματα σταθμών επιτελεστικότητας δοκών για $t=75$ .....	41
Πίνακας 17: Μέγιστες μετακινήσεις για χρονική περίοδο μελέτης $t=0$ .....	53
Πίνακας 18: Μέγιστες μετακινήσεις για χρονική περίοδο μελέτης $t=50$ .....	54
Πίνακας 19: Μέγιστες μετακινήσεις για χρονική περίοδο μελέτης $t=75$ .....	55
Πίνακας 20: Ποσοστό μείωσης ροπών διαρροής για περίοδο μελέτης 50 χρόνια .....	60
Πίνακας 21: Ποσοστό μείωσης ροπών διαρροής για περίοδο μελέτης 75 χρόνια .....	61
Πίνακας 22: Μέσες τιμές εδαφικών επιταχύνσεων ανάλογα με το δείκτη βλάβης για κάθε χρονική περίοδο .....	62

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το φαινόμενο της διάβρωσης του οπλισμένου σκυροδέματος αποτελεί ίσως την κύρια αιτία αλλοίωσης των κατασκευών με αποτέλεσμα τον υποβιβασμό της ασφάλειας της ανθεκτικότητας και της καταλληλότητας τους. Κατά το φαινόμενο αυτό πραγματοποιείται μια σειρά από φυσικοχημικές δράσεις που λαμβάνουν μέρος στα στοιχεία της κατασκευής με επίπτωση την ελλάτωση της αντοχής, της λειτουργικότητας και της αισθητικής εμφάνισης.

Παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την διάβρωση είναι είτε φυσικοί κυρίως με τις κλιματολογικές συνθήκες είτε εξωγενείς με τον κακό σχεδιασμό των κατασκευών. Αφενός το πρόβλημα της διάβρωσης του οπλισμένου σκυροδέματος, απασχολεί τους ερευνητές και τους μηχανικούς καθώς θα πρέπει να μελετήσουν την ανθεκτικότητα της κατασκευής που οφείλεται κυρίως από το φαινόμενο αυτό. Ως ανθεκτικότητα ορίζεται η αντίσταση του οπλισμένου σκυροδέματος στην απώλεια της αντοχής του και την αύξηση της διαπερατότητας του στη διάρκεια του χρόνου.

Διάβρωση μπορεί να προκληθεί κυρίως από την ενανθράκωση και την εισχώρηση των χλωριόντων στο σκυρόδεμα, διαδικασίες οι οποίες είναι αλληλένδετες μεταξύ τους και μπορούν να προκαλέσουν την μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων του οπλισμού και του σκυροδέματος διαμέσω του χρόνου ακόμη και μικρορηγματώσεις στην διατομή του σκυροδέματος. Κατά συνέπεια, η ασφάλεια και η λειτουργικότητα των κτηρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα μπορούν να επηρεαστούν κάτω από τη δράση των σεισμικών φορτίων και την ταυτόχρονη επίδραση της διάβρωσης στα δομικά μέλη, διακυβεύοντας την ικανότητα τους να αντέξουν τα φορτία για τα οποία έχουν σχεδιαστεί.

Είναι γεγονός ότι οι σεισμικές δράσεις οι οποίες μπορούν να εκδηλωθούν αναπάντεχα, αναπτύσσεται ο κίνδυνος για την απώλεια ανθρώπινης ζωής αλλά και ζημιών σε κοινωνικό και οικονομικό επίπεδο ανάλογα βέβαια με τα χαρακτηριστικά του σεισμού αλλά και της κατασκευής.

Η Κύπρος αποτελεί σεισμογενή χώρα και ως επι το πλείστον, τα υφιστάμενα κτήρια κυρίως αυτά που έχουν μελετηθεί μετά το 1974, αποτελούν μεγάλο πρόβλημα, αφού έχουν κατασκευαστεί με παλιούς κανονισμούς και παράλληλα έχουν σχεδιαστεί με ανεπαρκείς κανονισμούς έναντι των σεισμικών δράσεων. Γίνεται αντιληπτό ότι τα κτήρια αυτά αποτελούν πεδίο μελέτης και ελέγχου ώστε να εκτιμηθεί η ικανότητα ανάληψης των σεισμικών δυνάμεων. Παράλληλα, τα υφιστάμενα αυτά κτήρια, με το πέρας των χρόνων

έχουν υποστεί και κάποιο βαθμό διάβρωσης, έτσι η ανάγκη αποτίμησης της συμπεριφοράς τους κρίνεται αναγκαία.

Αναγνωρίζοντας την σημαντικότητα του θέματος της διάβρωσης στις κατασκευές, διάφορα πιθανολογικά μοντέλα έχουν προταθεί για την εκτίμηση της ευπάθειας διαβρωμένων πλαισιωτών κτηρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα διαμέσω του χρόνου (Ghosh and Padgett 2010, Fotopoulou et al.2012, Choe et al 2010).

Σκοπός της μελέτης αυτής είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς ενός υφιστάμενου κτηρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα αφού έχει υποστεί διάβρωση για 2 χρονικές περιόδους ανάλυσης και τελικά την αποτίμηση του έναντι κάποιων σεισμικών δράσεων.

# 1. Διάβρωση

Κατά την διάρκεια ζωής τους οι κατασκευές δεν παραμένουν ανεπηρέαστες από το χρόνο αντίθετα υφίστανται διάφορες μορφές υποβάθμισης, όπως η διάβρωση η οποία συνδέεται με τις περιβαλλοντικές και λειτουργικές συνθήκες. Αυτού του είδους η φθορά επέρχεται με αργούς και προοδευτικούς ρυθμούς και οδηγεί σε διάφορες επιπτώσεις, έτσι που επηρεάζεται τόσο η δυναμική απόκριση της κατασκευής όσο και η τρωτότητα.

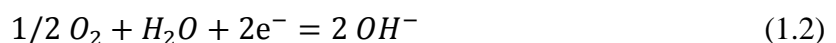
Ο οπλισμός στο σκυρόδεμα κάτω από κανονικές συνθήκες προστατεύεται από την διάβρωση εξ αιτίας της ισχυρά αλκαλικής φύσης του σκυροδέματος που οφείλεται στο υδροξείδιο του ασβεστίου, προϊόν της ενυδατώσεως του τσιμέντου. Το πολύ λεπτό παθητικό στρώμα οξειδίων σιδήρου που δημιουργείται χάρη στην υψηλή αλκαλικότητα του σκυροδέματος εμποδίζει την ανάπτυξη της διάβρωσης. Όταν όμως το προστατευτικό αυτό στρώμα καταστραφεί είτε από μείωση αλκαλικότητας του σκυροδέματος λόγω της αντίδρασης του διοξειδίου του άνθρακα με τα αλκάλια που υπάρχουν στο σκυρόδεμα είτε από την διάτρηση του παθητικού στρώματος από τα χλωριόντα τότε ξεκινά η διαδικασία της διάβρωσης με τον αρχικό σχηματισμό επιφανειών σκουριάς στην επιφάνεια του χάλυβα.

Η διάβρωση είναι διεργασία ηλεκτρολυτικής φύσης και πραγματοποιείται όταν ο χάλυβας έρθει σε επαφή με διάλυμα που περιέχει ιόντα δηλαδή ένα ηλεκτρολύτη. Για να υπάρξει μηχανισμός διάβρωσης πρέπει τα σημεία ανόδου και τα σημεία καθόδου να συνδέονται ηλεκτρολυτικά και ηλεκτρικά. Σε αυτή την περίπτωση το ρόλο του ηλεκτρολύτη παίρνει το σκυρόδεμα το οποίο περιέχει υγρασία στους πόρους του ενώ ο χάλυβας παρέχει την ηλεκτρική σύνδεση.

Ως ανόδος συμπεριφέρεται το τμήμα του χάλυβα που έχει καταστραφεί το προστατευτικό στρώμα οξειδίων, όπου τα άτομα σιδήρου μετατρέπονται σε ιόντα ελευθερώνοντας ηλεκτρόνια με την ακόλουθη αντίδραση



Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που δημιουργούνται από την πιο πάνω αντίδραση κινούνται μέσω του χάλυβα σε κάποιο άλλο σημείο του και έτσι δημιουργείται η κάθοδος όπου τα ηλεκτρόνια καταναλώνονται με βάση την αντίδραση





Ως κάθοδος συμπεριφέρεται το τμήμα του χάλυβα όπου υπάρχει νερό και οξυγόνο, χωρίς να είναι απαραίτητο να έχει καταστραφεί το προστατευτικό στρώμα οξειδίων.

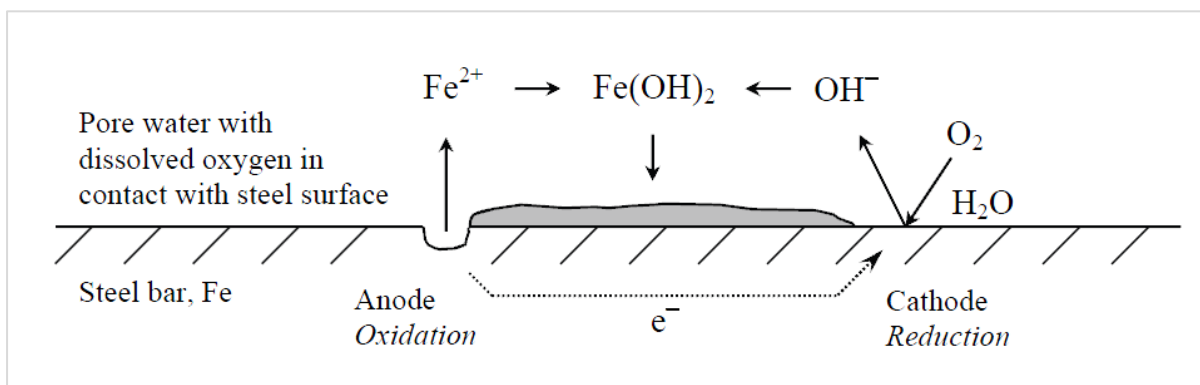
Τα ιόντα αυτά κινούνται προς την άνοδο όπου αντιδρούν με τα οξείδια του σιδήρου με βάση την αντίδραση



Σύμφωνα με την Εξίσωση 1.3 πιο πάνω το σχηματιζόμενο  $Fe(OH)_2$  είναι αδιάλυτο και σχηματίζει μικρής συνάφειας πορώδες και ογκώδες στρώμα δηλαδή την σκουριά πάνω στην επιφάνεια του χάλυβα. Το στρώμα  $Fe(OH)_2$  δεν προσφέρει καμία προστασία στον οπλισμό καθώς είναι πορώδες και ελάχιστα συμπαγές, με αποτέλεσμα η διάβρωση να προχωρά μέχρι την ολοσχερή μετατροπή του σιδήρου σε υδροξείδιο.

Το σχηματιζόμενο υδροξείδιο του δισθενούς σιδήρου με την παρουσία οξυγόνου μετατρέπεται σε υδροξείδιο του τρισθενούς σιδήρου  $Fe(OH)_3$  με αποτέλεσμα την απώλεια της μάζας του οπλισμού.

Πιο κάτω στο Σχήμα 1 απεικονίζεται ο τρόπος με τον οποίο η ανοδική και καθοδική διαδικασία λαμβάνει μέρος κατά την οξείδωση του οπλισμού, όπου η άνοδος αφήνει ηλεκτρόνια στο χάλυβα και αυτά καταναλώνονται σε άλλη περιοχή με την διαδικασία της καθόδου με την αντίδραση με το οξυγόνο και την ταυτόχρονη παρουσία νερού.

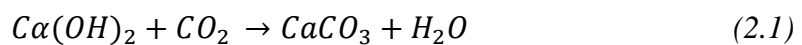


**Σχήμα 1: Σχηματική απεικόνιση της ηλεκτροχημικής διαδικασίας της διάβρωσης οπλισμένου σκυροδέματος**

## 2. Παράγοντες που επηρεάζουν την μείωση αντοχής μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα

### 2.1 Ενανθράκωση σκυροδέματος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην προηγούμενη ενότητα ο οπλισμός προστατεύεται από την διάβρωση μέσω ενός λεπτού στρώματος οξειδίων του σιδήρου, λόγω της υψηλής αλκαλικότητας του σκυροδέματος που τον περιβάλλει, με την αλκαλικότητα να χαρακτηρίζεται με μια τιμή του pH περίπου στο 12.5. Όταν η τιμή αυτή πέσει σε τιμές κάτω από 9.0 τότε ο χάλυβας αποπαθητικοποιείται και έτσι προκαλείται διάβρωση του οπλισμού. Η μείωση αυτή οφείλεται στην αντίδραση του υδροξειδίου του ασβεστίου ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) του νερού των πόρων με το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) της ατμόσφαιρας. Το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) σταδιακά αφομοιώνεται από το σκυρόδεμα. Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα την μετατροπή του  $\text{Ca(OH)}_2$  σε ανθρακικό ασβέστιο ( $\text{CaCO}_3$ ) σύμφωνα με την αντίδραση



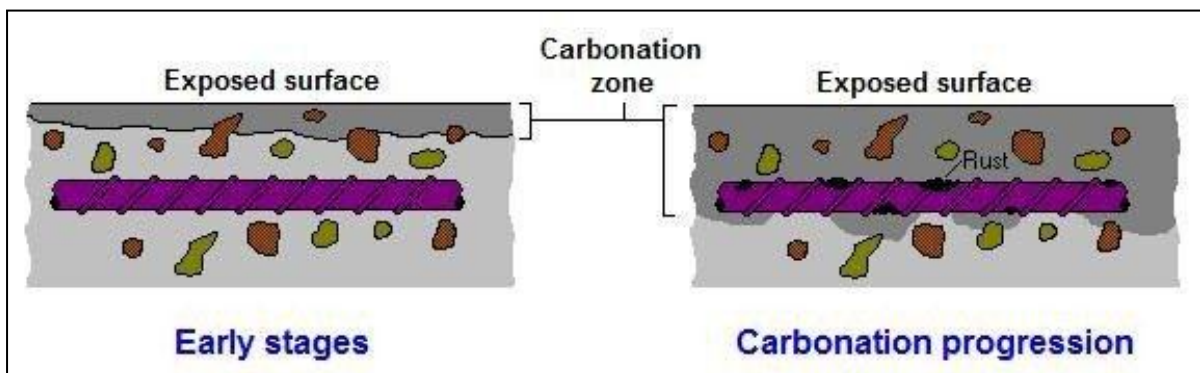
Το νερό που δημιουργείται μετά την αντίδραση διαχέεται στο εσωτερικό του σκυροδέματος όπως και του διοξειδίου του άνθρακα μέσω της αέριας φάσης των πόρων με αποτέλεσμα την μείωση του Ph. Το διοξείδιο του άνθρακα διαπερνάει ανεμπόδιστα το ενανθρακωμένο στρώμα και είναι διαθέσιμο για την αντίδραση με το επόμενο στρώμα  $\text{Ca(OH)}_2$ . Επομένως με αυτό τον τρόπο η ενανθράκωση μπορεί να διεισδύσει σε βάθος στο σκυρόδεμα και τελικά μέρος της να φτάσει στον οπλισμό προκαλώντας την αποπαθητικοποίηση του, με αποτέλεσμα να αρχίσει η διάβρωση του οπλισμού.

Η όλη διαδικασία ονομάζεται ενανθράκωση και συμβαίνει σε όλες τις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η ενανθράκωση είναι το φαινόμενο που μπορεί να μείνει απαραίτητο για αρκετά χρόνια εκτός αν ο οπλισμός οξειδωθεί και παρατηρηθούν αρχικά τριχοειδείς ρωγμές λόγω της αύξησης του όγκου του.

Η ενανθράκωση επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες οι οποίοι δρούν είτε θετικά με την βελτίωση και την καθυστέρηση της διαδικασίας είτε αρνητικά με την επίσπευση της.

Τέτοιοι παράγοντες είναι :

1. Η αυξημένη περιεκτικότητα του τσιμέντου στο σκυροδέμα αυξάνει την πυκνότητα του σκυροδέματος και έτσι μειώνεται το πορώδες με αποτέλεσμα την μείωση της ταχύτητας της ενανθράκωσης.
2. Όσο πιο χαμηλή είναι η διαπερατότητα τόσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση στην εισχώρηση του διοξειδίου του άνθρακα στο σκυροδέμα με αποτέλεσμα την μείωση της ταχύτητας της ενανθράκωσης
3. Οι ρωγμές του σκυροδέματος αποτελούν το μέσο για τη εισχώρηση διαβρωτικών ουσιών στο σκυροδέμα με αποτέλεσμα την επιτάχυνση της διαδικασίας ενανθράκωσης
4. Όσο πιο ψηλό είναι το ποσοστό της σχετικής υγρασίας του αέρα τόσο μικρότερο είναι το ποσοστό της ενανθράκωσης για σχετική υγρασία μεγαλύτερη από 75% οιο πόροι του σκυροδέματος γεμίζουν με νερό με αποτέλεσμα η διάχυση των διαβρωτικών ουσιών να δυσκολεύεται



Σχήμα 2: Σχηματική απεικόνιση της ενανθράκωσης

## 2.2 Διάβρωση οπλισμού από την παρουσία χλωριόντων

Αρκετοί ερευνητές (CEB,1989; Neville,1995a, Tuutti,1982;) υποδεικνύουν ότι η ύπαρξη χλωριόντων και η διείσδυση τους είναι ο κύριος λόγος διάβρωσης του οπλισμένου σκυροδέματος σε κατασκευές.

Τα χλωριόντα που καταστρέφουν το προστατευτικό στρώμα οξειδίων του οπλισμού μπορεί να προέρχονται είτε από το φυσικό περιβάλλον με την ύπαρξη χλωριούχων αλάτων στον ατμοσφαιρικό αέρα είτε από το εσωτερικό του σκυροδέματος αν έχουν χρησιμοποιηθεί πρόσμικτα ή αδρανή υλικά από θαλάσσιες περιοχές είτε σε περιπτώσεις όπου γίνεται χρήση αλάτων τήξης χιονιού. Τα χλωριόντα μπορούν να διαπεράσουν το προστατευτικό αυτό

στρώμα μέσω των τριχοειδών πόρων του σκυροδέματος και των μικρορωγμών αποπαθητικοποιώντας το προστατευτικό αυτό στρώμα, επιταχύνοντας έτσι τις χημικές αντιδράσεις της διάβρωσης και της περαιτέρω υποβάθμισης του σκυροδέματος.

Οι δύο διαδικασίες, της ενανθράκωσης και της προσβολής από τα χλωριόντα δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους αφού η πρώτη επιταχύνει την δεύτερη. Όταν το υδροξείδιο του ασβεστίου ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) του σκληρυμένου σκυροδέματος αντιδράσει με τα χλωριόντα (CL) τότε τα δεσμεύει και περιορίζει την ποσότητα που διαχέονται στον οπλισμό. Αντίθετα όμως όταν αντιδράσει με την ενανθράκωση και μετατραπεί σε ανθρακικό ασβέστιο ( $\text{CaCO}_3$ ) τα χλωριόντα που είχε δεσμεύσει ελευθερώνονται με αποτέλεσμα να προσβάλουν τον οπλισμό.

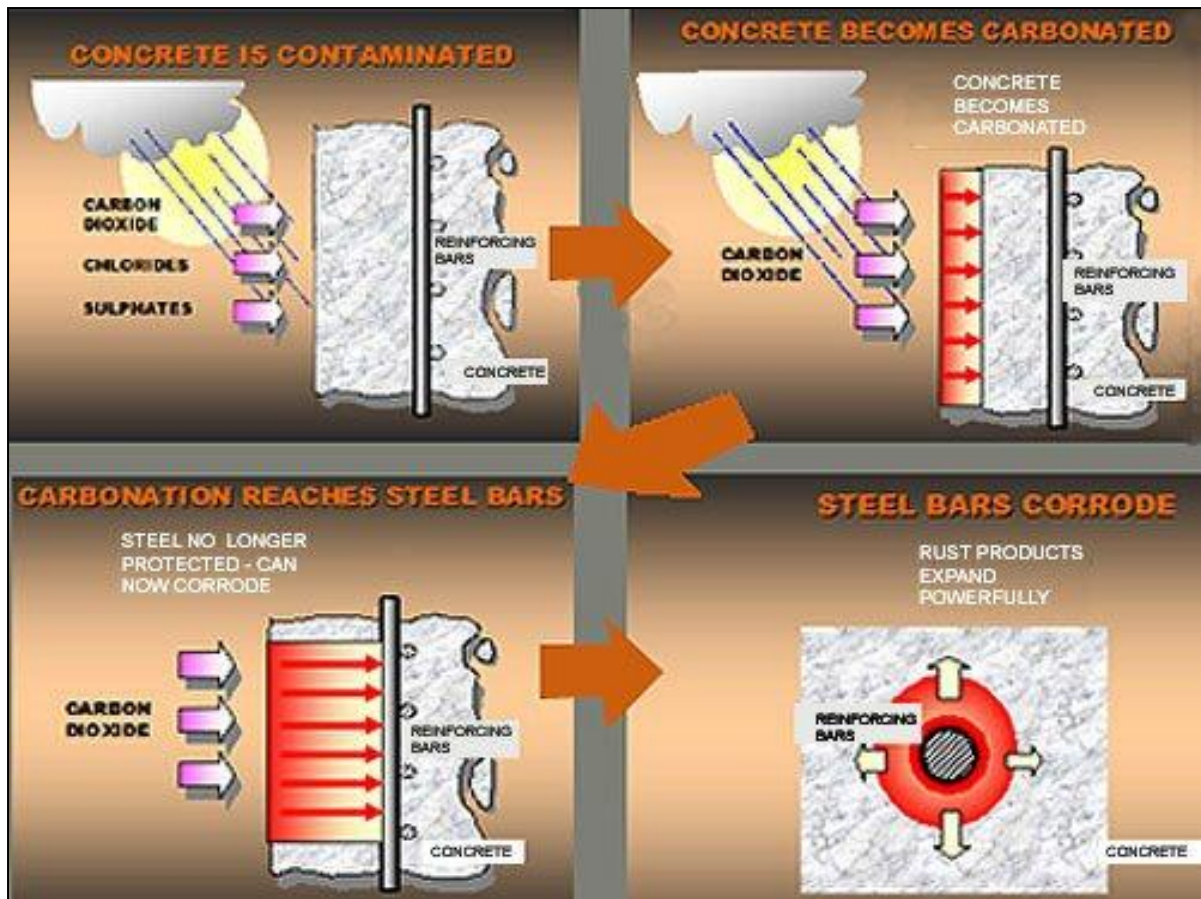
Ο ρυθμός της διάβρωσης δεν επηρεάζεται μόνο από την παρουσία χλωριόντων αλλά και από την διαθεσιμότητα τόσο σε νερό (υγρασία) όσο και σε οξυγόνο. Η ποιότητα και το πάχος της επικάλυψης του οπλισμού, το νερό και τα αδρανή παραγωγής του σκυροδέματος, τα πρόσμικτα καθώς και το περιβάλλον το οποίο είναι εκτεθειμένο το οπλισμένο σκυρόδεμα καθιστούν τους κύριους παράγοντες που επηρεάζουν την διάβρωση λόγω ύπαρξης χλωριόντων στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα.

### **2.2.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την διάβρωση**

Η διάβρωση του οπλισμού από την ύπαρξη χλωριόντων επηρεάζεται από :

1. Ο μικρός λόγος νερού προς τσιμέντο, με μεγάλη περιεκτικότητα του τσιμέντου σε σχέση με το νερό, το σκυρόδεμα γίνεται πιο πυκνό με αποτέλεσμα η διαπερατότητα να είναι μικρότερη και έτσι η ποσότητα των χλωριόντων που μπορεί να εισχωρήσουν στο σκυρόδεμα να είναι μικρότερη
2. Η χρήση των αδρανών και του νερού που προέρχονται από θαλάσσιες περιοχές προκαλούν διάβρωση του οπλισμού από την ύπαρξη χλωριόντων
3. Το είδος του τσιμέντου επηρεάζει την διάβρωση. Η χρήση τσιμέντων με σκωρίες υψικαμίνων και ποζολάνες μειώνουν το pH όμως μειώνουν την διαπερατότητα του σκυροδέματος αλλάζοντας το πορώδες με αποτέλεσμα η διείσδυση των χλωριόντων καθίσταται δυσκολότερη σε αντίθεση με το τσιμέντο τύπου Portland. Τα αερακτικά τσιμέντα, μειώνουν την απαιτούμενη ποσότητα σε νερό παράλληλα και την διαπερατότητα έτσι μειώνουν τον κίνδυνο διάχυσης των χλωριόντων στο σκυρόδεμα

4. Η διάβρωση λόγω ύπαρξης χλωριόντων μπορεί να γίνει είτε σε περιβάλλον με μεγάλο ποσοστό υγρασίας αέρα είτε σε ξηρό περιβάλλον. Η πιο διαδεδομένη μορφή διάβρωσης συναντάται σε υγρό περιβάλλον.



Σχήμα 3 : Διαδικασία διάβρωσης οπλισμού με την ύπαρξη CO2 και χλωριόντων

## 2.3 Ρηγματώσεις

Η ύπαρξη ρωγμών στα μέλη από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι αποτέλεσμα διαφόρων αιτιών που προκαλούν την ανάπτυξη τάσεων και παραμορφώσεων. Είναι ένα φαινόμενο το οποίο εμφανίζεται σε όλες τις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα και προκαλεί αλλαγές τόσο στην εμφάνιση όσο και στην υποβάθμιση της αντοχής του φέροντος δομικού στοιχείου δηλαδή στην ικανότητα να φέρει με ασφάλεια τα φορτία για τα οποία έχει σχεδιαστεί. Οι ρωγμές αποτελούν το μέσο με το οποίο οι διαβρωτικές ουσίες, διοξείδιο του άνθρακα και χλωριόντα, εισχωρούν στο σκυρόδεμα με επίπτωση τη επιτάχυνση της διαδικασίας διάβρωσης.

### 2.3.1 Αίτια δημιουργίας ρωγμών

#### 1. Σεισμικές φορτίσεις

Ο σχεδιασμός των φορέων από οπλισμένο σκυρόδεμα γίνεται με βάση την αντοχή τους σε μεγάλες σεισμικές φορτίσεις παρ'όλα αυτά σε όλες τις κατασκευές δημιουργούνται ρηγματώσεις εξαιτίας του σεισμού.

#### 2. Διάβρωση σκυροδέματος

Οι ρηγματώσεις που σχηματίζονται στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου μπορεί να οφείλονται στην εισχώρηση του διοξειδίου του άνθρακα στο εσωτερικό του σκυροδέματος με αποτέλεσμα το προστατευτικό στρώμα οξειδίων που περιβάλλει τον χάλυβα να καταστραφεί και έτσι ο χάλυβας αρχίζει να διαβρώνεται και να σχηματίζει σκουριά στην επιφάνεια του. Οι εσωτερικές τάσεις στο σκυρόδεμα που αναπτύσσονται από την κατάσταση αυτή προκαλούν ρηγματώσεις οι οποίες φτάνουν και μέχρι την επιφάνεια του σκυροδέματος.

#### 3. Συστολή ξήρανσης

Όταν το σκυρόδεμα μετά την αρχική περίοδο συντήρησης του υποστεί απότομη ξήρανση αναπτύσσει παραμορφώσεις συστολής, οι οποίες είναι δυνατόν να προκαλέσουν ρηγματώσεις. Όταν η επιφάνεια του σκυροδέματος ξηραίνεται και συστέλλεται ενώ το εσωτερικό του σκυροδέματος που ο ρυθμός ξήρανσης του είναι μικρότερος από την επιφάνεια δεν συστέλλεται, παρεμποδίζει τις παραμορφώσεις συστολής της επιφάνειας με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται τάσεις εφελκυσμού που οδηγούν τελικά σε ρηγματώση.

#### 4. Παγετός

Υποβάθμιση του σκυροδέματος από τον παγετό μπορεί να συμβεί όταν το σκυρόδεμα είναι κορεσμένο δηλ όταν το 91% των πόρων του είναι γεμάτα με νερό. Όταν το νερό παγώσει τότε καταλαμβάνει 9% περισσότερο όγκο απ'ότι το νερο. Όταν δεν υπάρχει χώρος για την αύξηση του όγκου, τότε ο παγετός μπορεί να προκαλέσει την ρηγμάτωση και κατά συνέπεια την θραύση του σκυροδέματος.

#### 5. Πυρκαγιά

Η έκθεση του οπλισμένου σκυροδέματος σε πολύ ψηλές θερμοκρασίες, μπορεί να προκαλέσει την μείωση της εφελκυστικής αντοχής του οπλισμού καθώς και την αύξηση των τάσεων στο σκυρόδεμα. Η μείωση αυτή προκαλεί την ρηγμάτωση του σκυροδέματος, την εκτίναξη της επικάλυψης ή ακόμη και την θραύση του μέλους από οπλισμένο σκυρόδεμα.

#### 6. Ερπυσμός

Η προοδευτική με την πάροδο του χρόνου παραμόρφωση του σκυροδέματος όταν υπόκειται σε σταθερή θλιπτική τάση ονομάζεται ως ερπυσμός.

#### 7. Καθίζηση

Η καθίζηση των θεμελίων λόγω της παραμόρφωσης του εδάφους είτε η ολίσθηση προκαλούν ρηγματώσεις στα δομικά στοιχεία

#### 8. Κατασκευαστικά λάθη

Η ύπαρξη ρωγμών προέρχεται από τη μη πρόβλεψη αρμών διαστολής, την λανθασμένη ή ανεπαρκή στατική μελέτη, από την σκυροδέτηση και την συντήρηση καθώς και σε προβλήματα σύνθεσης του σκυροδέματος.

### **3. Επιπτώσεις παραγόντων μείωσης της αντοχής μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα**

#### **3.1 Διάβρωση οπλισμού**

Η διάβρωση του οπλισμού επιφέρει αρνητικά αποτελέσματα στο σκυρόδεμα με την κύρια επίπτωση, την μείωση της ενεργού διατομής του χάλυβα κατά ποσότητα ίση με αυτή που μετατρέπεται σε σκουριά με αποτέλεσμα την μείωση της στατικής επάρκειας του δομικού στοιχείου.

Κατά τα πρώτα στάδια εκδήλωσης του φαινομένου παρατηρούνται λεκέδες καφέ χρώματος στις ελεύθερες επιφάνειες των δομικών στοιχείων. Σε μεταγενέστερο στάδιο τα προϊόντα σκουριάς που εναποτίθενται στην επιφάνεια του χάλυβα, λόγω του μεγαλύτερου όγκου τους σε σχέση με τον χάλυβα ασκούν αποσχιστικές πιέσεις στο περιβάλλον σκυρόδεμα προκαλώντας τελικά την ρηγμάτωση του κατά μήκος του χάλυβα. Οι ρηγματώσεις αυτές εμφανίζονται στην επιφάνεια του σκυροδέματος, όταν η επικάλυψη του σκυροδέματος είναι πολύ μικρή, που τελικά οδηγεί στην αποτίναξη της εκθέτοντας έτσι ακόμη περισσότερο την ράβδο σε διάβρωση.

#### **3.2 Ενανθράκωση**

Η διάβρωση λόγω ενανθράκωσης του σκυροδέματος κατά συνέπεια μπορεί να μειώσει την ολκιμότητα του χάλυβα γεγονός το οποίο επιφέρει δυσμενείς επιπτώσεις στην σεισμική συμπεριφορά του μέλους.

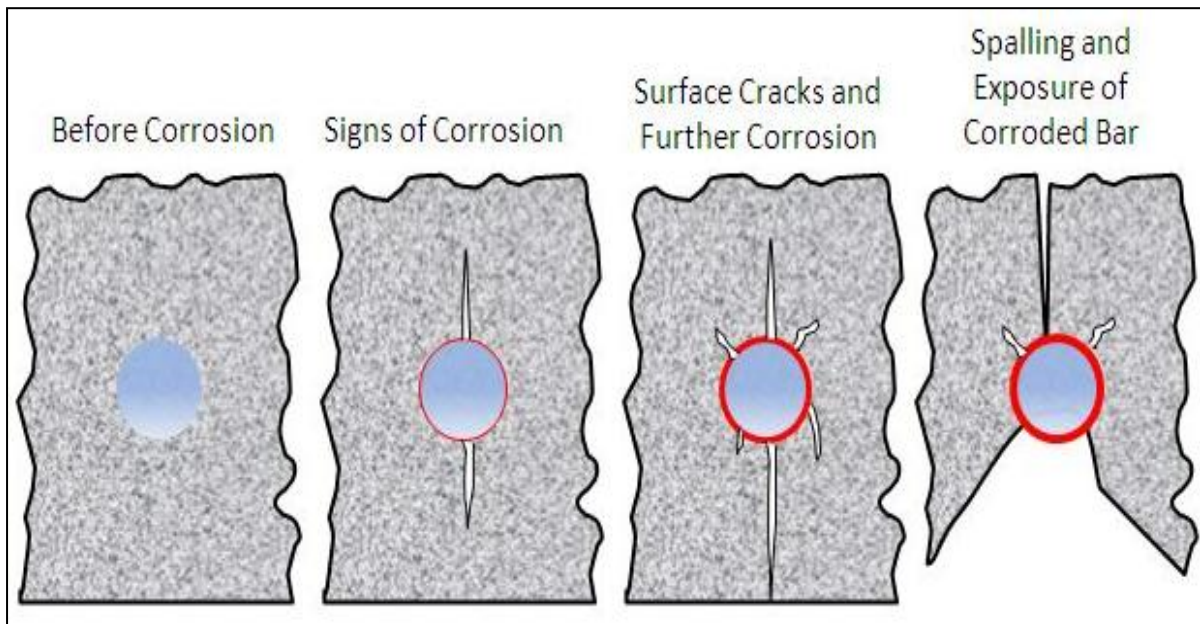
Η ενανθράκωση δεν επιφέρει αρνητικές συνέπειες στο σκυρόδεμα σε αντίθεση όμως στο οπλισμένο σκυρόδεμα όπου μειώνει το pH και έτσι το προστατευτικό στρώμα οξειδίων καταστρέφεται με συνέπεια την έναρξη της διάβρωσης του οπλισμού.

#### **3.3 Ρηγματώσεις**

Οι ρηγματώσεις που προκαλούνται από την διάβρωση του χάλυβα, από τις σεισμικές φορτίσεις, από τις θερμοκρασιακές μεταβολές, από τον ερπυσμό την συστολή ξήρανσης ή ακόμη και από κατασκευαστικά λάθη επιφέρουν δυσμενή αποτελέσματα στην αντοχή των μελών. Κατά κύριο λόγο, προκαλούν την κατάργηση μερικώς ή ολοκληρωτικώς της



μεταφοράς των τάσεων από το ένα υλικό στο άλλο μέσω του μηχανισμού της συνάφειας. Φυσικό επακόλουθο είναι η υποβάθμιση της φέρουσας και παραμορφωσιακής ικανότητας των μελών ως προς τους μηχανισμούς κάμψης, διάτμησης και αγκύρωσης περιορίζοντας την σεισμική αντίσταση του δομήματος.



**Σχήμα 4: Σχηματική απεικόνιση δημιουργίας ρωγμών και αποκόλληση επικάλυψης λόγω διάβρωσης**

## 4. Μοντέλο διάβρωσης

Για τον υπολογισμό της διάβρωσης στον σχεδιασμό, τη κατασκευή, στην ανάλυση αστάθειας και στη συντήρηση κτηρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα (Duracrete 1998). Στην παρούσα μελέτη λήφθηκε υπόψη η διάβρωση των οπλισμών λόγω της εισχώρησης των χλωριόντων στο σκυρόδεμα, ως ένα από τους πιο σημαντικούς μηχανισμούς διάβρωσης και υποβάθμισης των κτηρίων.

### 4.1 Πιθανολογικό μοντέλο χρόνου έναρξης της διάβρωσης

Το πιθανολογικό μοντέλο του χρόνου έναρξης της διάβρωσης που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη αυτή λόγω της ύπαρξης χλωριόντων προτείνεται από την FIB-CEB Task Group 5.6 (2006) και εκφράζεται με την πιο κάτω σχέση

$$T_{ini} = \left( \frac{\alpha^2}{4 \cdot k_e \cdot k_t \cdot D_{RCM,0} \cdot (t_0)^n} \cdot \left( erf^{-1} \cdot \left( 1 - \frac{C_{crit}}{C_s} \right) \right)^{-2} \right)^{\left( \frac{1}{1-n} \right)} \quad (4.1)$$

Όπου,

$T_{ini}$  = χρόνος έναρξης διάβρωσης (χρόνια)

$\alpha$  = πάχος επικάλυψης (mm)

$K_e$  = περιβαλλοντικός συντελεστής

$K_t$  = συντελεστής πειραματικών δοκιμών

$D_{RCM,0}$  = συντελεστής μετάδοσης χλωριόντων ( $m^2/s$ )

$t_0$  = σημείο αναφοράς χρόνου (χρόνια)

$erf$  = συνάρτηση σφάλματος του Gauss

$C_{crit}$  = κρίσιμη περιεκτικότητα σε χλωριόντα (νερό προς τσιμέντο %)

$C_s$  = η ισορροπούμενη περιεκτικότητα χλωριόντων στην επιφάνεια του σκυροδέματος (νερό προς τσιμέντο %)

$n$  = εκθέτης γήρανσης

## 4.2 Βαθμός διάβρωσης

Θεωρείται ότι οι επιπτώσεις της διάβρωσης κατανέμονται ομοιόμορφα στην περίμετρο και κατά μήκος των μελών σκυροδέματος. Μετά από την συνεχή εισχώρηση των χλωριόντων στο σκυρόδεμα, το προστατευτικό παθητικό στρώμα γύρω από τον οπλισμό καταστρέφεται και έτσι ξεκινά η διαδικασία της διάβρωσης, που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της επιφάνειας του οπλισμού ανάλογα με τον χρόνο, η οποία εκφράζεται με την πιο κάτω σχέση (Ghosh and Padgett 2010)

$$A(t) = \begin{cases} n \cdot D_i^2 \cdot \frac{\pi}{4} & \text{Για } t \leq T_{ini} \\ \max \left[ n \cdot (D(t))^2 \cdot \frac{\pi}{4}, 0 \right] & \text{Για } t \geq T_{ini} \end{cases} \quad (4.2)$$

Όπου,

$n$  = αριθμός ραβδών οπλισμού

$D_i$  = αρχική διάμετρος ραβδών οπλισμού

$t$  = χρόνος μελέτης (Χρόνια)

Η διάμετρος των ραβδών οπλισμού στον χρόνο μελέτης εκφράζεται με την πιο κάτω σχέση

$$D(t) = D_i - i_{corr} \cdot k \cdot (t - T_{ini}) \quad (4.3)$$

Όπου,

$i_{corr}$  = ρυθμός διάβρωσης (Ma/cm<sup>2</sup>)

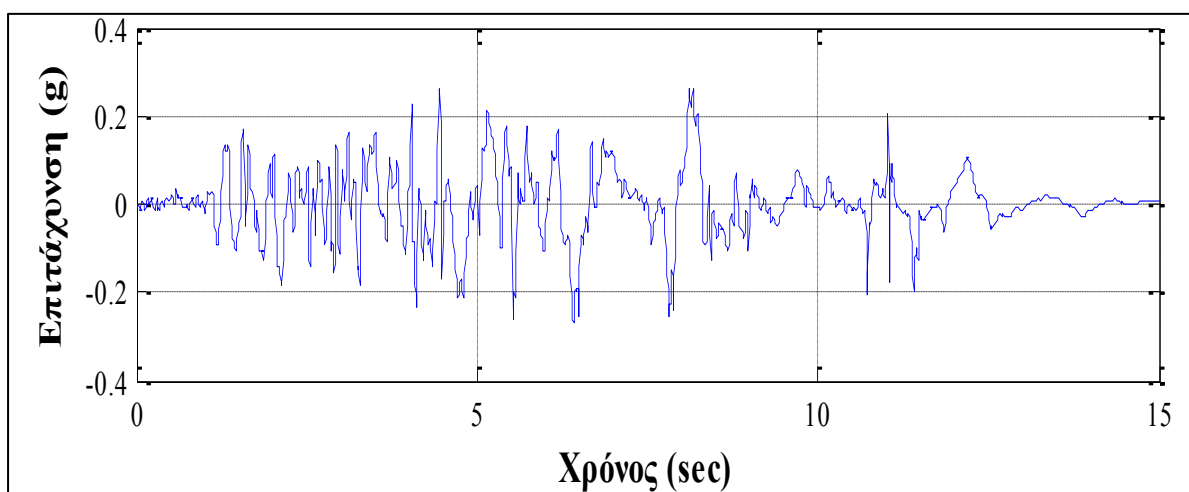
$k$  = διεύθυνση διάβρωσης (μm/χρόνο)

## 5.Ανελαστική δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας (Time History)

Στόχος της παρούσας μελέτης είναι η αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς ενός υφιστάμενου κτηρίου μετά την επίδραση της διάβρωσης στα μέλη του. Η αποτίμηση αποτελεί την εκτίμηση της υπάρχουσας κατάστασης και τον έλεγχο της επάρκειας του κτηρίου έναντι συγκεκριμένων σεισμικών δράσεων. Για την αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς των κτηρίων μπορούν να εφαρμοστούν είτε ελαστικές είτε ανελαστικές μέθοδοι ανάλυσης. Διακρίνονται δύο είδη ανελαστικών αναλύσεων η ανελαστική δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας ή Time History και η ανελαστική στατική ανάλυση ή αλλιώς Pushover.

Στην μελέτη αυτή επιλέχθηκε να εφαρμοστεί η ανελαστική δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας, η οποία επιτυγχάνεται με τη χρονική εξέλιξη του σεισμού μέσω επιταχυνσιογραφημάτων.

Η δυναμική αυτή ανάλυση προσεγγίζει την ανελαστική απόκριση της κατασκευής κατά την διάρκεια της σεισμικής διέγερσης έτσι ώστε ένα σύνολο από επιλεγμένες εδαφικές διεγέρσεις να δώσουν πιο σαφή εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης της κατασκευής. Η απόκριση του φορέα υπολογίζεται με επαναλήψεις και με την χρήση χρονικών βημάτων.



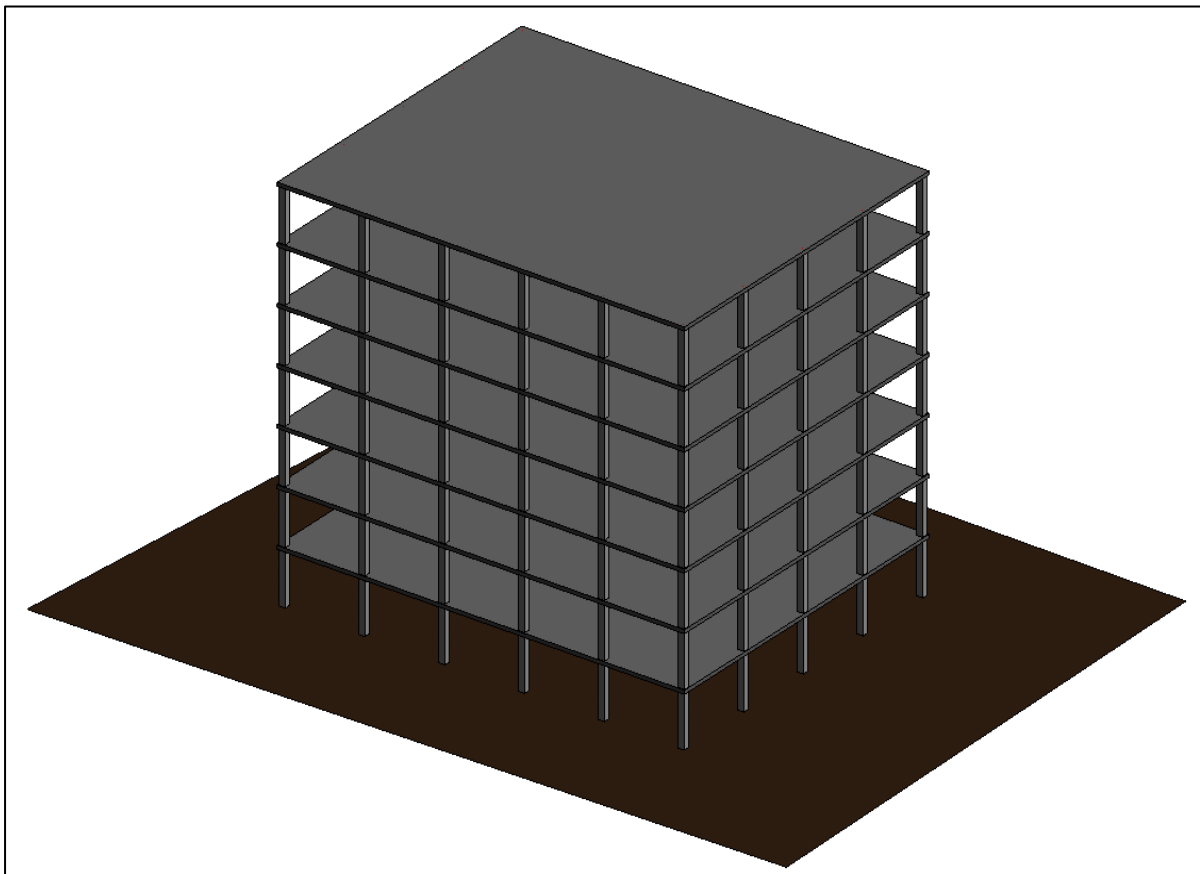
Σχήμα 5: Καταγραφή Imperial Valley 1979- Bonds Corner Συνιστώσα 140

## 6. Προσομοίωση υφιστάμενου κτηρίου για την αποτίμηση της σεισμικής επάρκειας διαμέσω του χρόνου

### 6.1 Περιγραφή κτηρίου

Το ιδεατό κτήριο που αναλύεται στα επόμενα κεφάλαια για την αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς του, μετά από την επίδραση, της εισχώρησης των χλωριόντων στο σκυρόδεμα, δια μέσω του χρόνου, αντιπροσωπεύει γενικώς τα κτήρια που κατασκευάστηκαν μετά το 1974 στις παραλιακές πόλεις της Κύπρου.

Ο αρχικός φορέας, είναι ένα 7όροφο κτήριο όπως φαίνεται στο Σχήμα 6, που αποτελείται από 5 πλαίσια 5 ανοιγμάτων με 5.0 m το καθένα παράλληλα στην Διεύθυνση X και από 4 πλαίσια 4 ίσων ανοιγμάτων με 5.0m, παράλληλα στην Διεύθυνση Ψ.

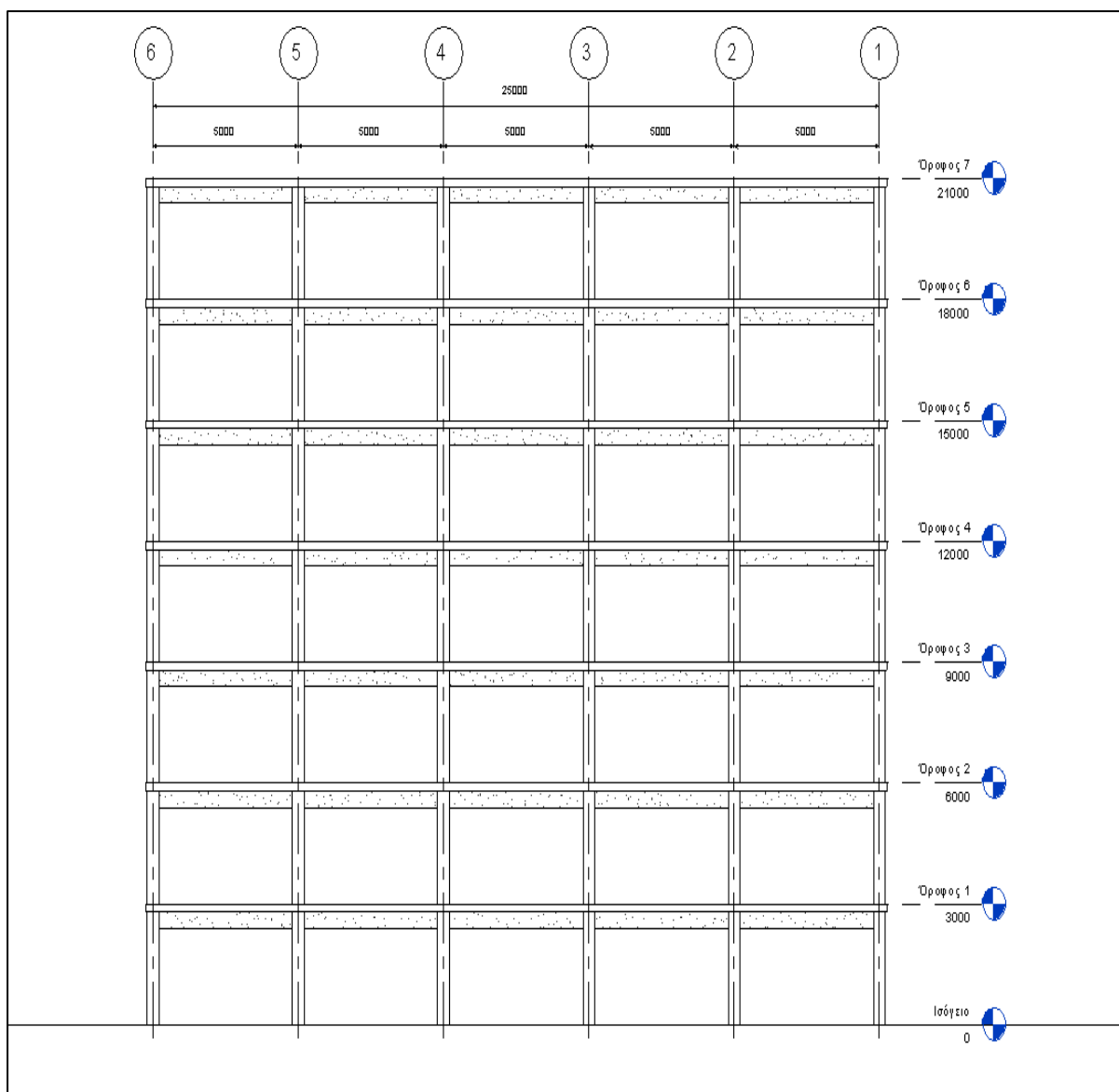


Σχήμα 6: Τρισδιάστατη απεικόνιση 7-όροφου κτηρίου

Το ύψος κάθε ορόφου από πλάκα σε πλάκα είναι 3.0m όπως φαίνεται στο Σχήμα 7. Τα υποστυλώματα έχουν διαστάσεις 40cmx40cm, οι δοκοί είναι διαστάσεων 30cm x 60cm και οι πλάκες έχουν πάχος 20cm.

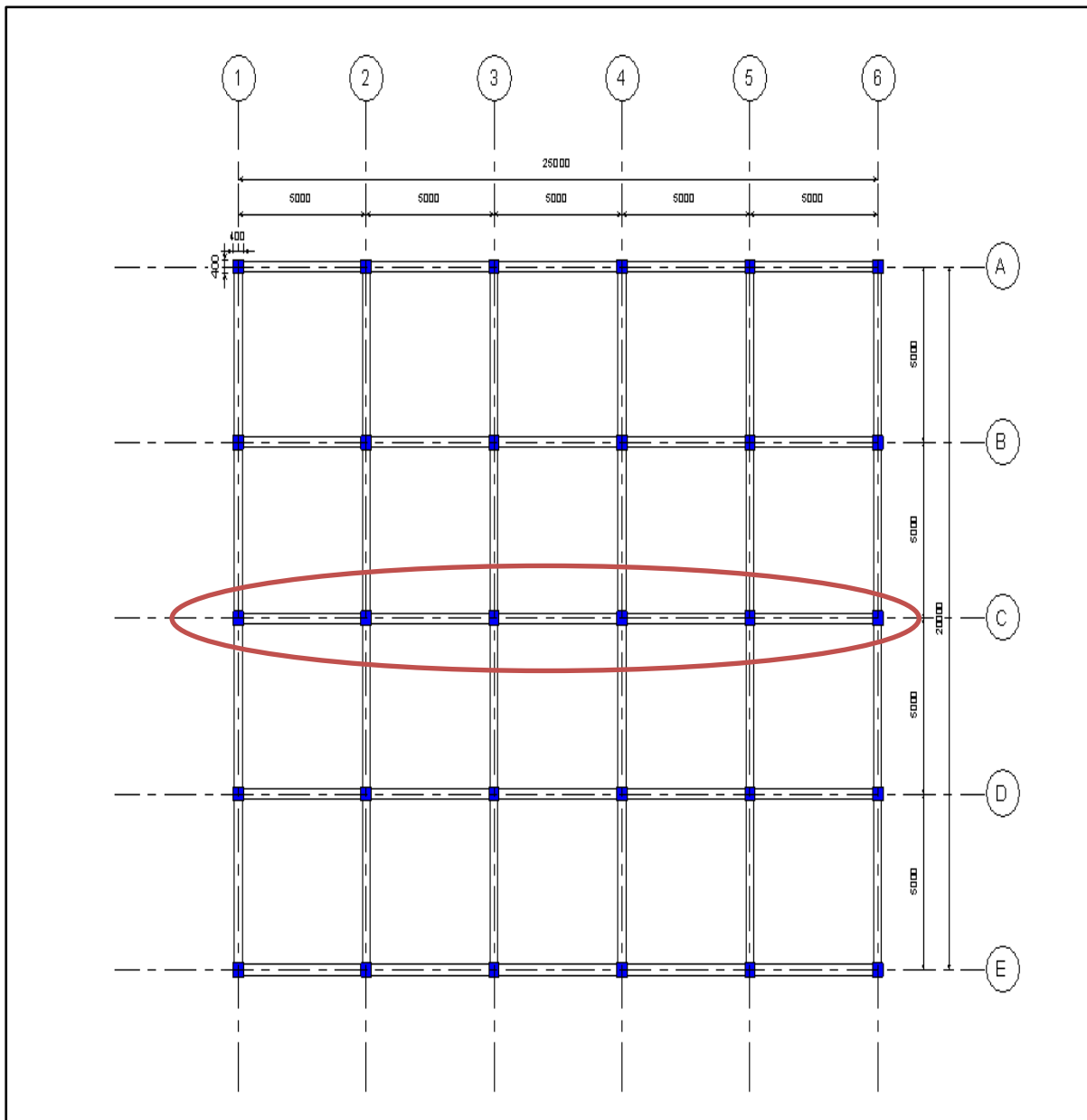
Όσο αφορά την χαρακτηριστική αντοχή του σκυροδέματος είναι C16/20, και του χάλυβα  $f_{yk}$  410.

Τα υποστυλώματα είναι οπλισμένα με 12Φ18, οι δοκοί είναι οπλισμένες με 4Φ18 εφελκόμενο οπλισμό και 4Φ18 θλιβόμενο οπλισμό, και οι συνδετήρες είναι Φ8 ανά 20cm. Η επικάλυψη των οπλισμών έχει πάχος ίσο με 20mm.



Σχήμα 7: Πλάγια όψη 7-όροφου κτηρίου

Όσο αφορά την ανάλυση που θα γίνει στο λογισμικό SAP2000, θα γίνει δισδιάστατα, με την επιλογή ενός εσωτερικού πλαισίου στον άξονα C όπως φαίνεται στο Σχήμα 8 και το οποίο θα δώσει τα δυσμενέστερα αποτελέσματα από θέμα φορτίων.



Σχήμα 8: Κάτοψη 7-όροφου κτηρίου

## 6.2 Σχεδιασμός στο λογισμικό Πρόγραμμα SAP2000

Ο σχεδιασμός του δισδιάστατου πλαισίου έχει γίνει με την χρήση του λογισμικού SAP2000. Για την προσομοίωση του φορέα έχουν γίνει μια σειρά από ενέργειες οι οποίες αναλύονται στην συνέχεια.

Αρχικά ορίστηκε η κάνναβος με επίπεδο xz, στην συνέχεια ορίστηκαν οι ιδιότητες του σκυροδέματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 9, με χαρακτηριστική αντοχή  $F_{ck}=16 \text{ MPa}$  (C16/20) και βάρος οπλισμένου σκυροδέματος  $25 \text{ KN/m}^3$ .

The screenshot shows the 'Material Property Data' dialog box in SAP2000. The dialog is organized into several sections:

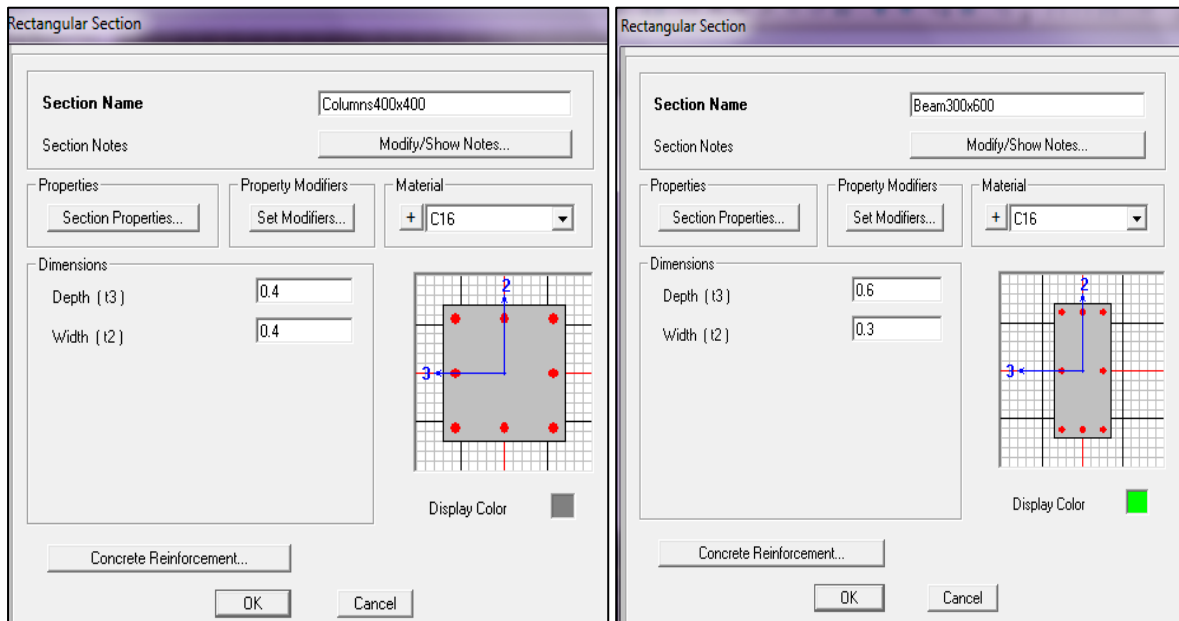
- General Data:**
  - Material Name and Display Color: C16
  - Material Type: Concrete
  - Material Notes: Modify/Show Notes...
- Weight and Mass:**
  - Weight per Unit Volume: 25
  - Mass per Unit Volume: 2.5493
- Units:**
  - Units: KN, m, C
- Isotropic Property Data:**
  - Modulus of Elasticity, E: 29000000
  - Poisson's Ratio, U: 0.2
  - Coefficient of Thermal Expansion, A: 1.000E-05
  - Shear Modulus, G: 12083333
- Other Properties for Concrete Materials:**
  - Specified Concrete Compressive Strength, f'c: 16000
  - Lightweight Concrete
  - Shear Strength Reduction Factor: [Empty field]

At the bottom of the dialog, there is a checkbox for 'Switch To Advanced Property Display' and 'OK' and 'Cancel' buttons.

Σχήμα 9: Συμπλήρωση ιδιοτήτων σκυροδέματος

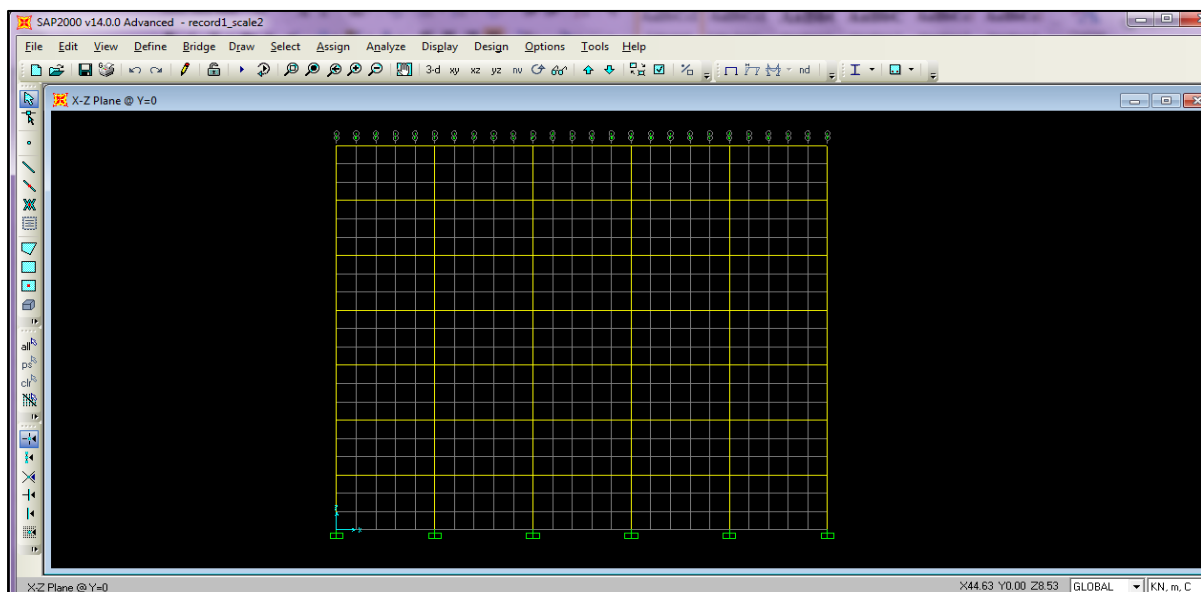


Έπειτα ορίστηκαν οι ιδιότητες των διατομών όπως φαίνεται στο Σχήμα 10, για τα υποστυλώματα και για τις δοκούς συμπληρώθηκαν οι διαστάσεις τους 0.4m x 0.4m και 0.3m x 0.6m αντίστοιχα με την επιλογή του σκυροδέματος όπως ορίστηκε παραπάνω.



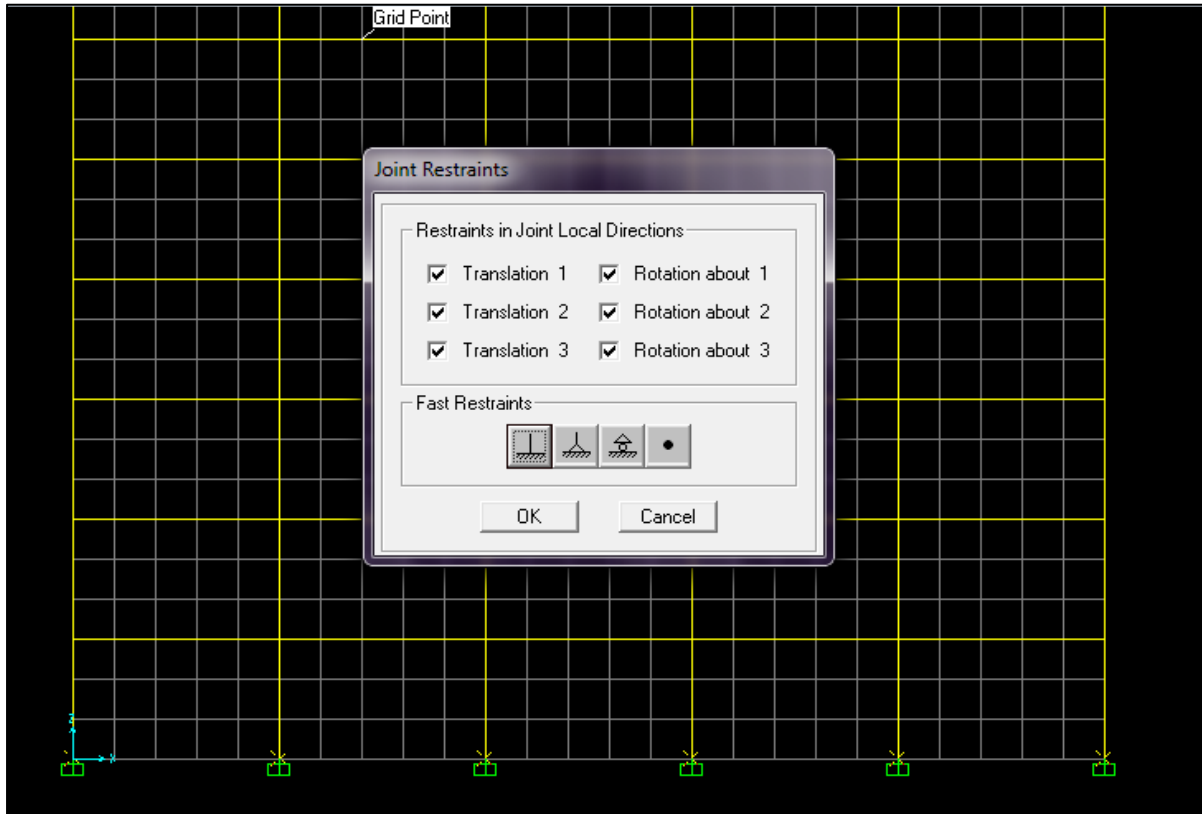
Σχήμα 10: α) Ορισμός ιδιοτήτων υποστυλωμάτων και β) ορισμός ιδιοτήτων δοκών

Ακολούθως αφού ορίστηκαν οι διατομές σχεδιάστηκε ο φορέας πάνω στην κάνναβο, με την επιλογή της αντίστοιχης διατομής για τα υποστυλώματα και τις δοκούς όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 11.



Σχήμα 11: Ορισμός δισδιάστατου πλαισίου σε κάνναβο στο λογισμικό SAP2000

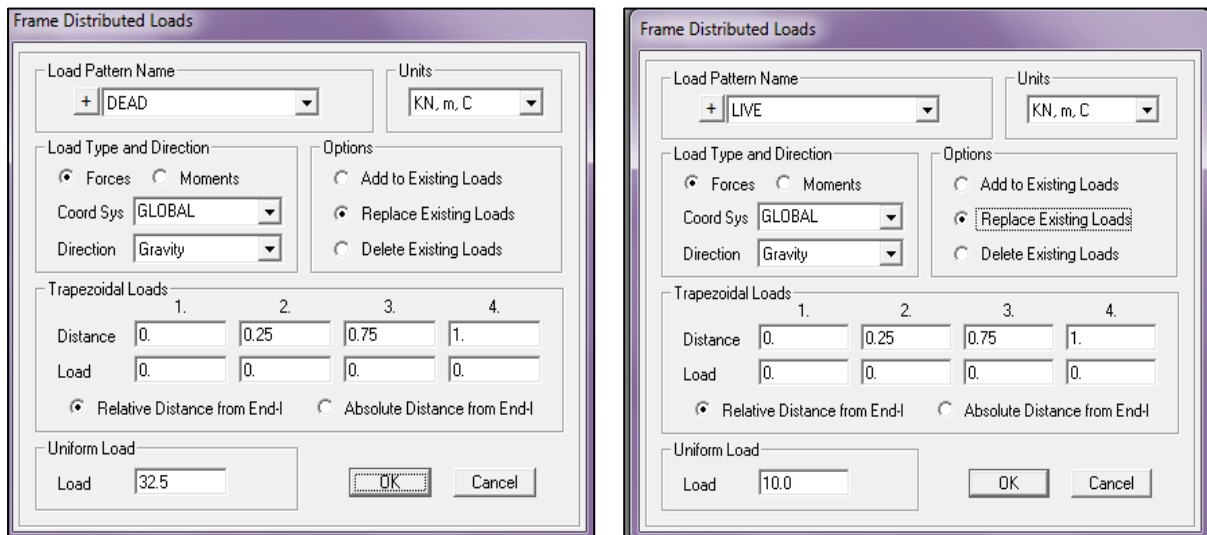
Τέλος επιλέχθηκαν όλοι οι κόμβοι της βάσης του δισδιάστατου πλαισίου και δεσμεύτηκαν όλοι οι βαθμοί ελευθερίας τους (πακτώσεις) όπως φαίνεται στο Σχήμα 12.



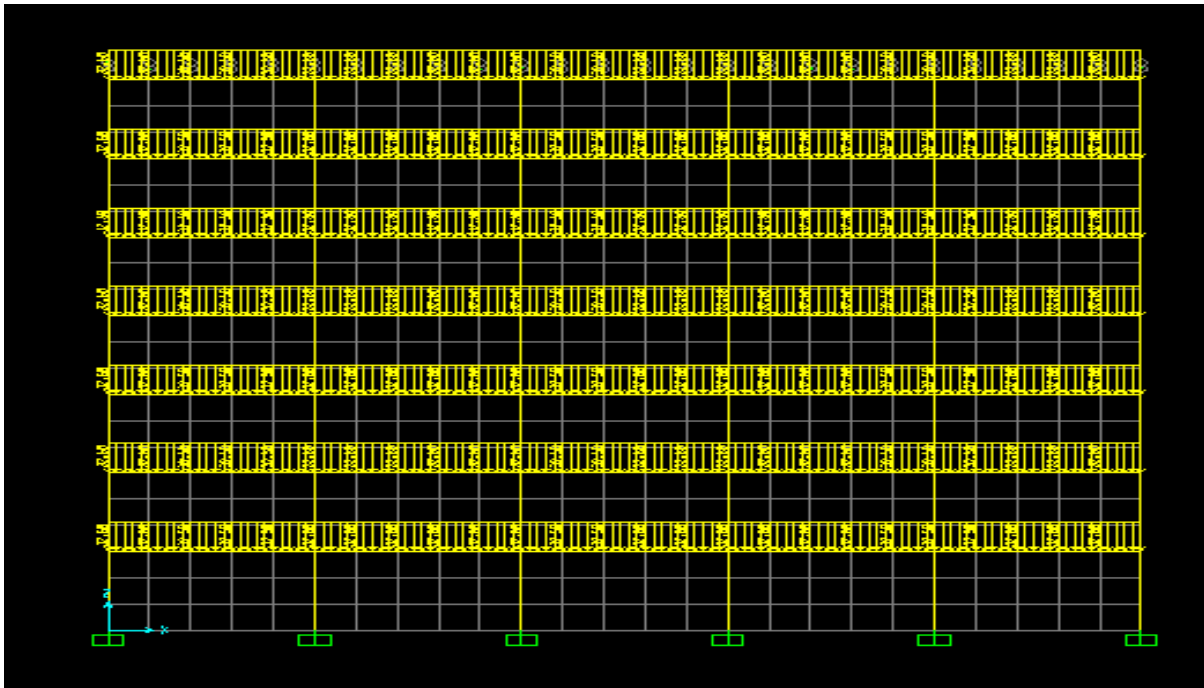
Σχήμα 12: Απεικόνιση πακτώσεων στους κόμβους της βάσης του δισδιάστατου πλαισίου

### 6.3 Ορισμός φορτίσεων κτηρίου

Κατά τον ορισμό των φορτίσεων του κτηρίου, προσδιορίστηκαν οι τύποι των φορτίων (Load Patterns), μόνιμο (Dead load) και κινητό (Live Load). Ακολούθως για κάθε δοκό ορίστηκαν τα ομοιόμορφα και κατανεμημένα φορτία όπως έχουν υπολογιστεί, τα οποία αναφέρονται στο Κεφάλαιο 6.3.1. Όσο αφορά τον υπολογισμό των αξονικών δυνάμεων των υποστυλωμάτων γίνεται αναφορά στο Κεφάλαιο 6.3.2.



Σχήμα 13: Ορισμός μόνιμων και κινητών φορτίων



Σχήμα 14: Απεικόνιση φορτίσεων δοκών στο δισδύστατο πλαίσιο

### 6.3.1 Υπολογισμός φορτίων κτηρίου

Το κτήριο φέρει κατακόρυφα φορτία στις πλάκες των ορόφων,  $6.5 \text{ KN/m}^2$  μόνιμο φορτίο συμπεριλαμβανομένου του ίδιου βάρους και  $2 \text{ KN/m}^2$  κινητό φορτίο.

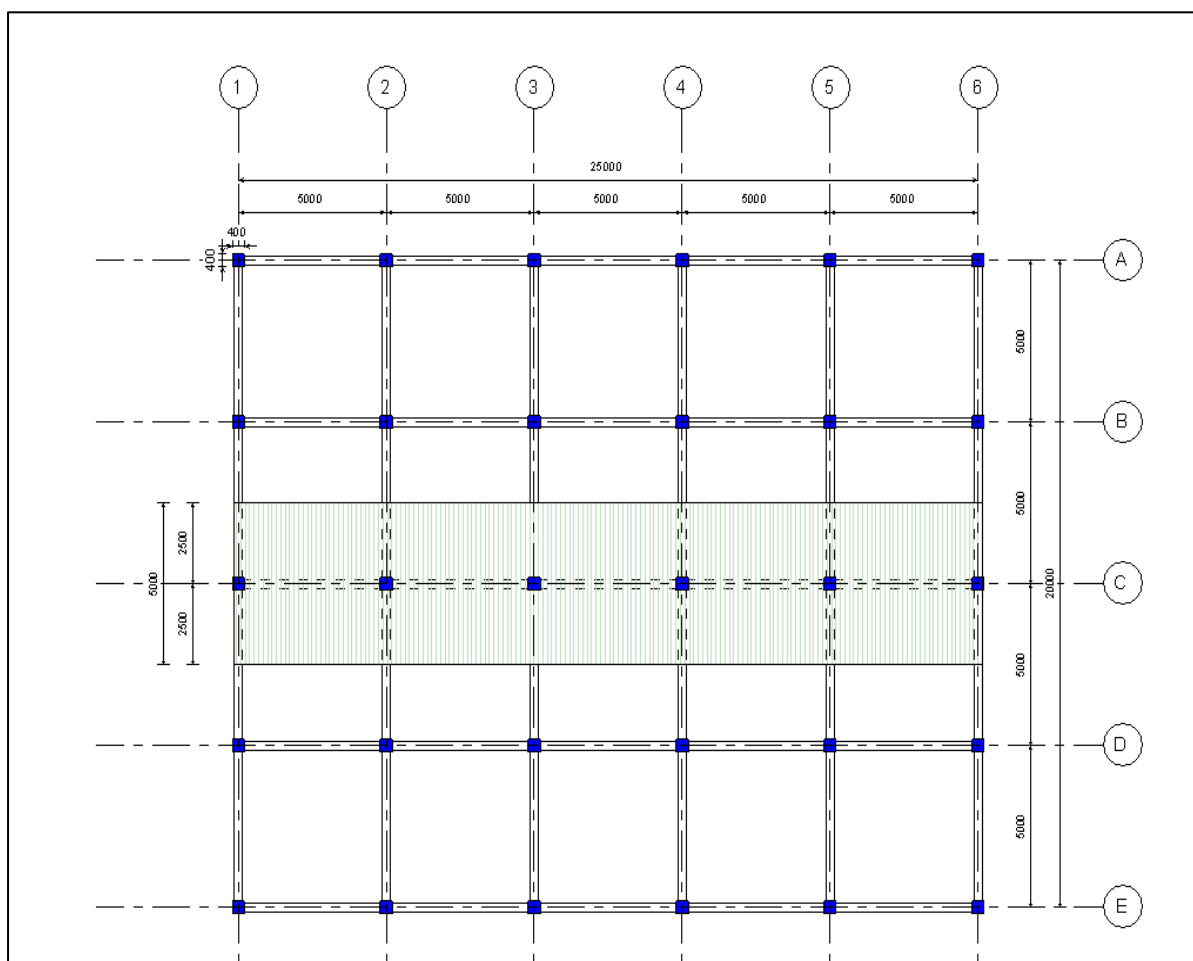
Οι δοκοί φέρουν ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο λόγω της μεταφοράς των φορτίων των πλακών σε αυτές. Για τον υπολογισμό αυτό, θεωρήθηκε ότι μεταφέρεται μισό φορτίο από την πλάκα δεξιά, και μισό φορτίο αριστερά στις δοκούς όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 13. Τα φορτία προκύπτουν ως εξής:

- Μόνιμο φορτίο στις δοκούς

$$6.5 \text{ KN/m}^2 \times 5.0 \text{ m} = 32.5 \text{ KN/m}$$

- Κινητό φορτίο στις δοκούς

$$2.0 \text{ KN/m}^2 \times 5.0 \text{ m} = 10.0 \text{ KN/m}$$



Σχήμα 15: Απεικόνιση του τρόπου με τον οποίο μεταφέρονται τα φορτία από τις πλάκες στις δοκούς

### 6.3.2 Υπολογισμός αξονικών δυνάμεων υποστυλωμάτων

Για τον υπολογισμό των αξονικών δυνάμεων των υποστυλωμάτων υπολογίστηκε το φορτίο που μεταφέρεται από τις δοκούς σ'αυτά και ταυτόχρονα συνυπολογίζεται η δράση του ίδιου βάρους των υποστυλωμάτων. Ο υπολογισμός τους θα χρησιμοποιηθεί για τον ορισμό των πλαστικών αρθρώσεων, κατά τον οποίο θα γίνει αναφορά σε επόμενο κεφάλαιο.

Ο υπολογισμός των αξονικών φορτίων για τα υποστυλώματα βρέθηκε με την πιο κάτω διαδικασία :

- 1) Αρχικά βρέθηκε το φορτίο των δοκών που προκύπτει από τον συνδυασμό φορτίσεων για σεισμό  $1G + 0.3Q$  επί την απόσταση του ανοίγματος  $x$  (όπου  $G$  το μόνιμο φορτίο και  $Q$  το κινητό)

Επομένως προκύπτει :

$$1 \times 6.5 + 0.3 \times 2 = 7.1 \text{ KN/m}^2 \times 5.0 \text{ m} = 35.5 \text{ KN/m}$$

Παράλληλα το φορτίο των δοκών για να κατανεμηθεί σαν αξονικό φορτίο στα υποστυλώματα πολλαπλασιάζεται με την απόσταση της μισής δοκού δηλ. 2.5m για τα ακριανά υποστυλώματα, ενώ για τα μεσαία υποστυλώματα πολλαπλασιάζεται με την απόσταση 5.0m αφού παραλαμβάνει μισό φορτίο δοκού από την αριστερή και μισό φορτίο δοκού από την δεξιά πλευρά του.

- 2) Ακολούθως υπολογίζεται το ίδιο βάρος των υποστυλωμάτων με την πιο κάτω σχέση

$$\text{Ίδιο βάρος} = b \cdot d \cdot \gamma \cdot x \quad (6.1)$$

Όπου,

$b$  = πλάτος υποστυλώματος

$d$  = βάθος υποστυλώματος

$\gamma$  = ειδικό βάρος οπλισμένου σκυροδέματος ( $\text{KN/m}^3$ )

$x$  = το ύψος επιρροής υποστυλώματος (1.5m για ακραίους κόμβους και 3.0m για μεσαίους)

- Για τα υποστυλώματα από τον κόμβο 2 (1<sup>ος</sup> όροφος) μέχρι τον κόμβο 7 (6<sup>ος</sup> όροφος) το ίδιο βάρος τους προκύπτει να είναι ίσο με :

$$0.4\text{m} \times 0.4\text{m} \times 25 \text{ KN/m}^3 \times 3\text{m} = 12 \text{ KN}$$

- Για τα υποστυλώματα στον κόμβο 1 (Βάση) και στον κόμβο 8 (7<sup>ος</sup> όροφος) το ίδιο βάρος τους προκύπτει να είναι ίσο με :

$$0.4\text{m} \times 0.4\text{m} \times 25 \text{ KN/m}^3 \times 1.5\text{m} = 6 \text{ KN}$$

- 3) Τέλος, ακολουθεί ο υπολογισμός των αξονικών δυνάμεων όλων των υποστυλωμάτων των ακραίων και των μεσαίων όπως φαίνεται στον Πίνακα 1 και Πίνακα 2 αντίστοιχα

**Πίνακας 1: Αξονικά φορτία ακραίων υποστυλωμάτων**

Κόμβος	Υπολογισμός Αξονικών Φορτίων (KN)
Κόμβος 8 (7 <sup>ος</sup> όροφος)	$35.5 \times 2.5 + 6 = 94.75$
Κόμβος 7 (6 <sup>ος</sup> όροφος)	$35.5 \times 2.5 + 12 + 94.75 = 195.5$
Κόμβος 6 (5 <sup>ος</sup> όροφος)	$35.5 \times 2.5 + 12 + 195.5 = 296.25$
Κόμβος 5 (4 <sup>ος</sup> όροφος)	$35.5 \times 2.5 + 12 + 296.25 = 397.00$
Κόμβος 4 (3 <sup>ος</sup> όροφος)	$35.5 \times 2.5 + 12 + 397.00 = 497.75$
Κόμβος 3 (2 <sup>ος</sup> όροφος)	$35.5 \times 2.5 + 12 + 497.75 = 598.50$
Κόμβος 2 (1 <sup>ος</sup> όροφος)	$35.5 \times 2.5 + 12 + 598.50 = 699.25$
Κόμβος 1 (Βάση)	$699.25 + 6 = 705.25$

**Πίνακας 2: Αξονικά φορτία μεσαίων υποστυλωμάτων**

Κόμβος	Υπολογισμός Αξονικών Φορτίων (KN)
Κόμβος 8 (7 <sup>ος</sup> όροφος)	$35.5 \times 5.0 + 6 = 183.50$
Κόμβος 7 (6 <sup>ος</sup> όροφος)	$35.5 \times 5.0 + 12 + 183.50 = 373.00$
Κόμβος 6 (5 <sup>ος</sup> όροφος)	$35.5 \times 5.0 + 12 + 373.00 = 562.50$
Κόμβος 5 (4 <sup>ος</sup> όροφος)	$35.5 \times 5.0 + 12 + 562.50 = 752.00$
Κόμβος 4 (3 <sup>ος</sup> όροφος)	$35.5 \times 5.0 + 12 + 752.00 = 941.50$
Κόμβος 3 (2 <sup>ος</sup> όροφος)	$35.5 \times 5.0 + 12 + 941.50 = 1131.00$
Κόμβος 2 (1 <sup>ος</sup> όροφος)	$35.5 \times 5.0 + 12 + 1131.00 = 1320.50$
Κόμβος 1 (Βάση)	$1320.50 + 6 = 1326.50$

## 6.4 Υπολογισμός χρόνου έναρξης και βαθμού διάβρωσης

Στο κεφάλαιο αυτό, όπως έχει ήδη αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο (4.1) θα γίνει χρήση της εξίσωσης που προτείνει η FIB-CEB Task Group 5.6 (2006) κατά την οποία μπορεί να βρεθεί ο χρόνος έναρξης της διάβρωσης των μελών οπλισμένου σκυροδέματος μετά από την επίδραση στην εισχώρηση των χλωριόντων σε αυτά. Θεωρήθηκε ότι τα παραλιακά κτήρια της Κύπρου μετά το 1974 μέχρι σήμερα διανήνουν περίπου το 40ό έτος τους, έτσι ώστε κρίθηκε να μελετηθεί η αποτίμηση τους έναντι του σεισμού μετά από την επίδραση του περιβάλλοντος, στα 50 και 75 χρόνια ζωής τους.

Για τον λόγο αυτό, υπολογίστηκε ο χρόνος έναρξης της διάβρωσης καθώς επίσης ο βαθμός διάβρωσης για  $t=50$  και  $t=75$  χρόνια, του κτηρίου που μελετάται έτσι ώστε οι τιμές που θα δώσει να συνυπολογιστούν σε μεταγενέστερο στάδιο όταν θα γίνει η ανάλυση του κτηρίου για τις πιο πάνω χρονικές στιγμές.

Όσο αφορά τους υπολογισμούς ακολουθήθηκε η διαδικασία η οποία αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4.1 και 4.2. Στην συνέχεια, ακολουθεί η διαδικασία υπολογισμού:

### Υπολογισμός χρόνου έναρξης διάβρωσης

$$T_{ini} = \left( \frac{a^2}{4 \cdot k_e \cdot k_t \cdot D_{RCM,0} \cdot (t_0)^n} \cdot \left( erf^{-1} \cdot \left( 1 - \frac{C_{crit}}{C_s} \right) \right)^{-2} \right)^{\left( \frac{1}{1-n} \right)}$$

Όπου,

$a$  (πάχος επικάλυψης)= 20mm

$k_e$  (περιβαλλοντικός συντελεστής)= 0.67

$k_t$  (συντελεστής πειραματικών δοκιμών)= 1.25

$D_{rcm,0}$  (συντελεστής μετάδοσης χλωριόντων για νερό προς τσιμέντο 0.55)=643.33 mm<sup>2</sup>/yr

$t_0$  (σημείο αναφοράς χρόνου)= 28/365=0.0767

$n$  (εκθέτης γήρανσης)= 0.362

$C_{crit}$  (κρίσιμη περιεκτικότητα σε χλωριόντα για νερό προς τσιμέντο 0.55)= 0.6

$C_s$  (η ισορροπούμενη περιεκτικότητα χλωριόντων στην επιφάνεια του σκυροδέματος (νερό προς τσιμέντο 0.55%) = 1.41075

Έτσι προκύπτει,

$$T_{ini} = \left( \frac{20^2}{4 \cdot 0.67 \cdot 1.25 \cdot 643.33 \cdot (0.0767)^{0.362}} \cdot \left( erf^{-1} \cdot \left( 1 - \frac{0.6}{1.41075} \right) \right)^{-2} \right)^{\left( \frac{1}{1-0.362} \right)}$$

**$T_{ini} = 2.93$  χρόνια**

Βρέθηκε ότι ο χρόνος έναρξης της διάβρωσης για δεδομένο λόγο νερού προς τσιμέντου ίσο με 0.55, είναι τα 2.93 χρόνια από την χρονολογία κατασκευής του κτηρίου.

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εφαρμογή της εξίσωσης για την εύρεση του χρόνου έναρξης της διάβρωσης δίνονται ποσοτικά στον πίνακα που ακολουθεί βάσει στατιστικών δεδομένων.

**Πίνακας 3: Παράμετροι διείσδυσης χλωριόντων στο σκυρόδεμα με βάσει στατιστικά δεδομένα**

Parameter	water to cement ratio w/c						Distribution	Reference	
	0.4		0.5		0.6				
	Mean	cov	Mean	cov	Mean	cov			
Cover Depth (mm) x	25	0.32	25	0.32	25	0.32	Lognormal	FIB- CEB Task Group 5.6 (2006)	
Regression variable $b_s$ [K]	4800.00	0.15	4800.00	0.15	4800.00	0.15	Normal		
Temperature of the structural element or the ambient air ( $T_{real}$ ) [K]	286	0.20	286	0.20	286	0.20	Normal		
Chloride migration Coefficient ( $D_{RCM,0}$ ) ( $m^2/s$ )	8.9E-12	0.2	1.58E-11	0.2	2.5E-11	0.2	Normal		
Aging exponent n	0.3	cov=0.4 , a=0.0, b=1.0	0.3	cov=0.4 , a=0.0, b=1.0	0.3	cov=0.4 , a=0.0, b=1.0	Beta		
Critical Chloride Concentration ( $C_{cr}$ ) wt % cement	0.6	cov=0.25, a= 0.2, b=2.0	0.6	cov=0.25, a= 0.2, b=2.0	0.6	cov=0.25, a= 0.2, b=2.0	Beta		
Surface Chloride Concentration ( $C_s$ ) wt % cement	1.026	0.2	1.2825	0.2	1.539	0.2	Normal		Choe et al. (2009)
Rate of Corrosion ( $i_{corr}$ ) mA/cm <sup>2</sup>	Low corrosion Level	0.1	0.25	0.1	0.25	0.1	0.25	Normal	Stewart (2004)
	Medium corrosion Level	1		1		1			
	High corrosion Level	10		10		10			



Αφού υπολογίστηκε ο χρόνος έναρξης της διάβρωσης, υπολογίζεται επίσης και ο βαθμός διάβρωσης, η επίπτωση δηλαδή που προκαλεί η εισχώρηση των χλωριόντων στο σκυρόδεμα, με την απώλεια της διατομής του οπλισμού.

Η διαδικασία που ακολουθεί, για την εύρεση της μείωσης της διατομής του οπλισμού εξηγήθηκε στο Κεφάλαιο 4.2. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η εξίσωση με την οποία μπορούμε να υπολογίσουμε την μείωση αυτή είναι η εξής:

$$D(t) = D_i - i_{corr} \cdot k \cdot (t - T_{ini})$$

Ο υπολογισμός της μείωσης της διαμέτρου για t=50 χρόνια προκύπτει :

$$D(t) = D_i - i_{corr} \cdot k \cdot (t - T_{ini})$$

Όπου,

$$D_i \text{ (διάμετρος οπλισμού)} = 18\text{mm}$$

$$i_{cor} \text{ (ρυθμός διάβρωσης)} = 10 \text{ mA/cm}^2$$

$$k \text{ (διείσδυση διάβρωσης)} = 11.6 \text{ μm/χρόνο}$$

Έτσι προκύπτει:

$$D(t) = 18 - 10 \cdot 0.0116 \cdot (50 - 2.93) = \mathbf{12.5 \text{ mm}}$$

Με την μείωση της διατομής του οπλισμού το ποσοστό μείωσης της επιφάνειας των σιδέρων των υποστυλωμάτων προκύπτει να είναι:

$$A(t) = \begin{cases} n \cdot D_i^2 \cdot \frac{\pi}{4} & \text{for } t \leq T_{ini} \\ \max \left[ n \cdot (D(t))^2 \cdot \frac{\pi}{4}, 0 \right] & \text{for } t \geq T_{ini} \end{cases}$$

Όπου,

n (αριθμός ραβδών οπλισμού) = 12

$D_i$  (αρχική διάμετρος ραβδών οπλισμού) = 18mm

t (χρόνος μελέτης, Χρόνια) = 50 χρόνια

έτσι προκύπτει,

$$A(t) = \max \left[ 12 \cdot (12.5)^2 \cdot \frac{\pi}{4}, 0 \right] = 1481.97 \text{ mm}^2$$

$$A = 12 \cdot (18)^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 3053.63 \text{ mm}^2$$

Το ποσοστό μείωσης της διαμέτρου του οπλισμού προκύπτει από τη διαφορά της αρχικής επιφάνειας με την ολική επιφάνεια μετά την μείωση του οπλισμού επί της εκατό με το αποτέλεσμα να είναι:

$$\text{Ποσοστό μείωσης} = \frac{3053.63 - 1481.97}{3053.63} \cdot 100 = 51.47\%$$

Ο υπολογισμός της μείωσης της διαμέτρου για t=75 χρόνια προκύπτει :

$$D(t) = D_i - i_{corr} \cdot k \cdot (t - T_{ini})$$

Όπου,

$D_i$  (διάμετρος οπλισμού) = 18mm

$i_{cor}$  (ρυθμός διάβρωσης) = 10 mA/cm<sup>2</sup>

k (δειξήτρια διάβρωσης) = 11.6 μm/χρόνο

Έτσι η νέα μειωμένη διάμετρος προκύπτει να είναι ίση με:

$$D(t) = 18 - 10 \cdot 0.0116 \cdot (75 - 2.93) = 9.6 \text{ mm}$$

Με την μείωση της διατομής του οπλισμού το ποσοστό μείωσης της επιφάνειας των σιδέρων των υποστυλωμάτων προκύπτει να είναι:

$$A(t) = \begin{cases} n \cdot D_i^2 \cdot \frac{\pi}{4} & \text{Για } t \leq T_{ini} \\ \max \left[ n \cdot (D(t))^2 \cdot \frac{\pi}{4}, 0 \right] & \text{Για } t \geq T_{ini} \end{cases}$$

Όπου,

n (αριθμός ραβδών οπλισμού) = 12

$D_i$  (αρχική διάμετρος ραβδών οπλισμού) = 18

t (χρόνος μελέτης, Χρόνια) = 75 χρόνια

επομένως,

$$A(t) = \max \left[ 12 \cdot (9.6)^2 \cdot \frac{\pi}{4}, 0 \right] = 875.77 \text{ mm}^2$$

$$A = 12 \cdot (18)^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 3053.63 \text{ mm}^2$$

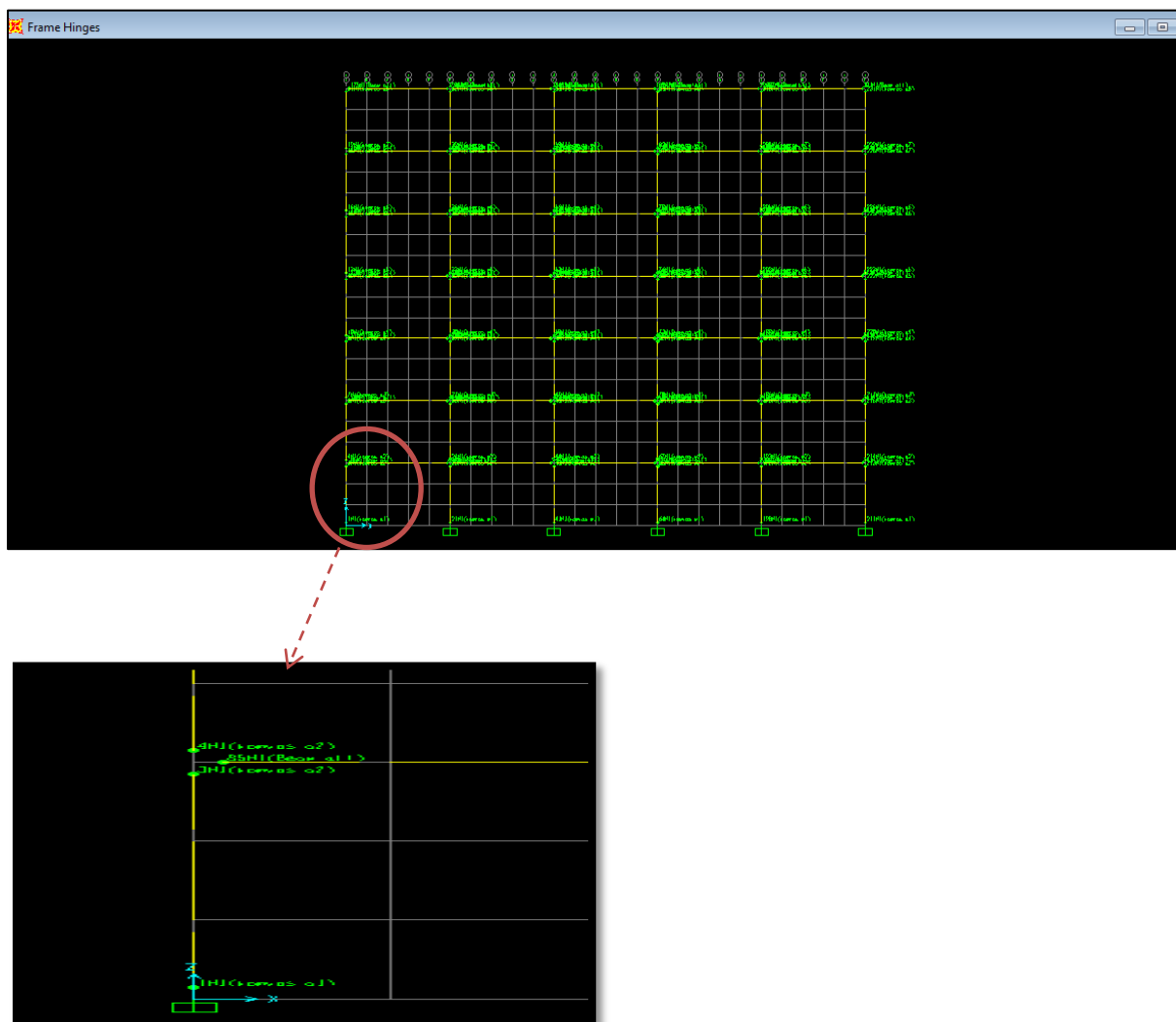
Έτσι το ποσοστό μείωσης του οπλισμού από την επίδραση της διάβρωσης μετά από 75 χρόνια προκύπτει να είναι ίσο με:

$$\text{Ποσοστό μείωσης} = \frac{3053.63 - 875.77}{3053.63} \cdot 100 = \mathbf{71.32\%}$$

## 6.5 Ορισμός πορείας πλαστικοποίησης

Κατά την επιβολή μιας σεισμικής διέγερσης σε μια κατασκευή, τα μέλη της διαρρέουν και αναπτύσσουν ανελαστικές παραμορφώσεις. Η απορρόφηση της σεισμικής ενέργειας εξασφαλίζεται μέσω των πλαστικών αρθρώσεων. Όταν τεθούν πλαστικές αρθρώσεις ροπών στους κόμβους των μελών παρατηρείται ότι οι κόμβοι συμπεριφέρονται άκαμπτα μέχρι την ροπή διαρροής, όπου από εκεί και πέρα αναπτύσσεται η στροφή μέχρι την αστοχία του μέλους.

Για τον ορισμό των πλαστικών αυτών αρθρώσεων, για κάθε διατομή ορίστηκαν τα χαρακτηριστικά πλαστικοποίησης δηλαδή οι ροπές διαρροής των υποστυλωμάτων και των δοκών στα σημεία αρχής και τέλους τους, καθώς επίσης ορίστηκαν παράλληλα και οι αντίστοιχες στάθμες επιτελεστικότητας σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8.



Σχήμα 16: Καθορισμός πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα κάθε δομικού στοιχείου

### 6.5.1 Υπολογισμός ροπών διαρροής

Για τον υπολογισμό και κατ'επέκταση τη χρησιμοποίηση των ροπών διαρροής των υποστυλωμάτων και δοκών στον ορισμό των πλαστικών αρθρώσεων των μελών έγιναν χρήση οι πιο κάτω εξισώσεις.

Υπολογισμός  $f_c$ :

$$f_c = f_{ck} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^2 \right] \quad \text{Για } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} \quad (6.2)$$

$$f_c = f_{ck} \quad \text{Για } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2} \quad (6.3)$$

Υπολογισμός εμβαδού επιφάνειας:

$$A = f_{ck} \cdot \left( \frac{\varepsilon_c^2}{\varepsilon_{c2}} - \frac{\varepsilon_c^3}{3 \cdot \varepsilon_{c2}^2} \right) \quad \text{Για } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} \quad (6.4)$$

$$A = \frac{2}{3} \cdot f_{ck} \cdot \varepsilon_{c2} + f_{ck} \cdot (\varepsilon_c - \varepsilon_{c2}) \quad \text{Για } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2} \quad (6.5)$$

1<sup>η</sup> Ροπή της επιφάνειας:

$$1^{\eta} \text{ Ροπή} = f_{ck} \cdot \left[ \frac{2}{3} \cdot \frac{\varepsilon_c^3}{\varepsilon_{c2}} - \frac{\varepsilon_c^4}{4 \cdot \varepsilon_{c2}^2} \right] \quad \text{Για } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} \quad (6.6)$$

$$1^{\eta} \text{ Ροπή} = \frac{5}{12} \cdot f_{ck} \cdot \varepsilon_{c2}^2 + \frac{1}{2} f_{ck} \cdot (\varepsilon_c^2 - \varepsilon_{c2}^2) \quad \text{Για } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2} \quad (6.7)$$

Υπολογισμός μέσου παράγοντα τάσης  $\alpha$

$$\alpha = \frac{\text{εμβαδόν}}{\sigma_c \cdot \varepsilon_c} = \frac{\int_0^{\varepsilon_c} f_c \cdot d\varepsilon_c}{f_c \cdot \varepsilon_c} \quad (6.8)$$

Υπολογισμός παράγοντα κέντρου βάρους  $\gamma$

$$\gamma = 1 - \frac{\text{Ροπή Εμβαδού}}{\varepsilon_c \cdot \text{εμβαδόν}} = 1 - \frac{\int_0^{\varepsilon_c} f_c \cdot \varepsilon_c \cdot d\varepsilon_c}{\varepsilon_c \cdot \int_0^{\varepsilon_c} f_c \cdot d\varepsilon_c} \quad (6.9)$$

### Υπολογισμός ύψους ουδέτερου άξονα x

$$C - T = N$$

$$a \cdot f_c \cdot b \cdot x - E_s \cdot \frac{d-x}{x} \cdot \varepsilon_c \cdot A_s = N \quad \text{Για } \varepsilon_s > \varepsilon_y \quad (6.10)$$

$$a \cdot f_c \cdot b \cdot x - A_s \cdot f_{yk} = N \quad \text{Για } \varepsilon_s < \varepsilon_y \quad (6.11)$$

### Υπολογισμός εφελκυσμού/θλίψης

$$F_s = F_c = E_s \cdot \varepsilon_s \cdot A_s \quad \text{Για } \varepsilon_s < \varepsilon_y \quad (6.12)$$

$$F_s = f_{yk} \cdot A_s \quad \text{Για } \varepsilon_s > \varepsilon_y \quad (6.13)$$

### Υπολογισμός ροπής M

$$M = \left[ F_s \cdot \left( \frac{h}{2} - d' \right) + a \cdot f_c \cdot b \cdot x \cdot \left( \frac{h}{2} - \gamma \cdot x \right) \right] / 10^6 \quad (6.14)$$

Οι παράμετροι των πιο πάνω εξισώσεων ορίζονται ως:

$f_c$  = τάση σκυροδέματος

$f_{ck}$  = χαρακτηριστική αντοχή σκυροδέματος

$\varepsilon_c$  = ανηγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος

$\varepsilon_{c2}$  = ανηγμένη παραμόρφωση στην αντίστοιχη θλιπτική αντοχή σκυροδέματος

$\varepsilon_{cu2}$  = ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας σκυροδέματος

$b$  = πλάτος διατομής

$E_s$  = μέτρο ελαστικότητας χάλυβα

$A_s$  = εμβαδό εφελκόμενου οπλισμού

$f_{yk}$  = χαρακτηριστική αντοχή χάλυβα

$\varepsilon_s$  = ανηγμένη παραμόρφωση χάλυβα

$\varepsilon_y$  = ανηγμένη παραμόρφωση διαρροής

$h$  = βάθος διατομής

$d'$  = απόσταση του κέντρου βάρους του οπλισμού από την ακραία ίνα

Οι εξισώσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν στην ανάπτυξη ενός excel αρχείου για τον υπολογισμό των ροπών διαρροής για τα υποστυλώματα και τις δοκούς, για τις τρεις χρονικές στιγμές μελέτης  $t = 0$ ,  $t = 50$ ,  $t = 75$ . Στον υπολογισμό αυτό λήφθηκε υπόψη, η μείωση της διαμέτρου του οπλισμού λόγω της διάβρωσης όπως βρέθηκε με τις εξισώσεις που αναλύθηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο 6.4. Επομένως για κάθε χρονική στιγμή χρησιμοποιήθηκε διαφορετική διάμετρος οπλισμού για τον υπολογισμό των ροπών διαρροής.

Οι πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζουν την εξαγωγή των αποτελεσμάτων από το excel αρχείο που δημιουργήθηκε για τον σκοπό της εύρεσης της ροπής διαρροής.

**Πίνακας 4: Ροπές διαρροής υποστυλωμάτων και δοκών για χρονική περίοδο  $t=0$**

Για χρονική περίοδο $t=0$			
Κόμβοι	Ροπές διαρροής (KNm)		
	Ακραία Υποστυλώματα	Μεσαία Υποστυλώματα	Δοκοί
Κόμβος 1 (Βάση)	205.85	151.27	206.5
Κόμβος 2 (1 <sup>ος</sup> όροφος)	206.36	151.84	
Κόμβος 3 (2 <sup>ος</sup> όροφος)	207.64	169.21	
Κόμβος 4 (3 <sup>ος</sup> όροφος)	203.76	185.79	
Κόμβος 5 (4 <sup>ος</sup> όροφος)	198.47	201.91	
Κόμβος 6 (5 <sup>ος</sup> όροφος)	191.41	206.59	
Κόμβος 7 (6 <sup>ος</sup> όροφος)	182.42	196.81	
Κόμβος 8 (7 <sup>ος</sup> όροφος)	172.62	181.55	

**Πίνακας 5: Ροπές διαρροής υποστυλωμάτων και δοκών για χρονική περίοδο  $t=50$**

Για χρονική περίοδο $t=50$			
Κόμβοι	Ροπές διαρροής		
	Ακραία Υποστυλώματα	Μεσαία Υποστυλώματα	Δοκοί
Κόμβος 1 (Βάση)	157.29	142.46	170.00
Κόμβος 2 (1 <sup>ος</sup> όροφος)	157.03	142.88	
Κόμβος 3 (2 <sup>ος</sup> όροφος)	150.56	155.23	
Κόμβος 4 (3 <sup>ος</sup> όροφος)	142.21	166.04	
Κόμβος 5 (4 <sup>ος</sup> όροφος)	132.91	159.89	
Κόμβος 6 (5 <sup>ος</sup> όροφος)	121.16	147.84	
Κόμβος 7 (6 <sup>ος</sup> όροφος)	109.25	129.96	
Κόμβος 8 (7 <sup>ος</sup> όροφος)	96.27	108.01	

**Πίνακας 6: Ροπές διαρροής υποστυλωμάτων και δοκών για χρονική περίοδο t=75**

Για χρονική περίοδο t=75			
Κόμβοι	Ροπές διαρροής		
	Ακραία Υποστυλώματα	Μεσαία Υποστυλώματα	Δοκοί
Κόμβος 1 (Βάση)	133.87	136.90	150.5
Κόμβος 2 (1 <sup>ος</sup> όροφος)	132.90	137.23	
Κόμβος 3 (2 <sup>ος</sup> όροφος)	125.16	146.13	
Κόμβος 4 (3 <sup>ος</sup> όροφος)	114.81	146.50	
Κόμβος 5 (4 <sup>ος</sup> όροφος)	104.05	136.87	
Κόμβος 6 (5 <sup>ος</sup> όροφος)	92.12	121.74	
Κόμβος 7 (6 <sup>ος</sup> όροφος)	79.10	101.82	
Κόμβος 8 (7 <sup>ος</sup> όροφος)	65.03	77.70	

### 6.5.2 Υπολογισμός σταθμών επιτελεστικότητας

Η μέθοδος των σταθμών επιτελεστικότητας εφαρμόζεται κυρίως στον έλεγχο και την ενίσχυση των υφιστάμενων κατασκευών ούτως ώστε να καθοριστεί το αποδεκτό επίπεδο βλαβών. Στην παρούσα μελέτη ο έλεγχος της αποτίμησης του κτηρίου γίνεται σύμφωνα με τις στάθμες επιτελεστικότητας, που καθορίζονται κατά τον ορισμό των πλαστικών αρθρώσεων. Ο Ευρωκώδικας 8 ορίζει τρεις στάθμες επιτελεστικότητας ανάλογα με το επίπεδο βλαβών, οι οποίες αναφέρονται πιο κάτω:

#### Περιορισμού Βλαβών (Limit State of Damage Limitation DL)

Είναι μια κατάσταση κατά την οποία αναμένεται ότι καμία λειτουργία του κτηρίου δεν διακόπτεται κατά τη διάρκεια και μετά τον σεισμό σχεδιασμού, εκτός ενδεχομένως από δευτερεύουσας σημασίας λειτουργίες. Στην κατασκευή αυτή ενδεχομένως να δημιουργηθούν μερικές τριχοειδές ρωγμές στον φέροντα οργανισμό πράγμα το οποίο δεν επηρεάζει την ικανότητα της κατασκευής να φέρει τα φορτία καθώς επίσης κίνδυνος απώλειας ή τραυματισμού ανθρώπινης ζωής καθίσταται αμελητέος.

Ο ορισμός της στάθμης εφαρμόστηκε με τον υπολογισμό της γωνίας στροφής χορδής στη διαρροή  $\theta_y$  που προκύπτει από την σχέση

$$\Theta_y = \Theta_{um} - \Theta_{um}^{pl} \quad (6.15)$$



### Σοβαρές Βλάβες (Limit State of Significant Damage SD)

Είναι μια κατάσταση κατά την οποία αναμένεται να παρουσιαστούν επισκευάσιμες βλάβες στον φέροντα οργανισμό του κτηρίου κατά τον σεισμό σχεδιασμού. Στην κατάσταση αυτή δεν συμβαίνει θάνατος ή σοβαρός τραυματισμός ατόμων εξαιτίας των βλαβών.

Ο ορισμός της στάθμης εφαρμόστηκε με μειωμένο ποσοστό της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία που προκύπτει από τη σχέση

$$\frac{3}{4} \theta_{um} \quad (6.16)$$

### Οιονεί κατάρρευση (Limit State of near Collapse NC)

Είναι μια κατάσταση κατά την οποία κατά τον σεισμό σχεδιασμού αναμένεται να παρουσιαστούν εκτεταμένες σοβαρές ή βαριές δηλ μη επισκευάσιμες βλάβες στον φέροντα οργανισμό ο οποίος όμως έχει την ικανότητα να φέρει τα προβλεπόμενα φορτία, κατά την διάρκεια του σεισμού ή ένα διάστημα μετά , χωρίς να διαθέτει άλλο περιθώριο ασφαλείας έναντι ολικής ή μερικής κατάρρευσης.

Ο ορισμός της στάθμης εφαρμόστηκε με τον υπολογισμό της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία  $\theta_{um}$

Όσο αφορά τον υπολογισμό της συνολικής ικανότητας στροφής της χορδής μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα στην αστοχία υπο ανακυκλιζόμενη φόρτιση όπως προτείνει ο Ευρωκώδικας 8-Μέρος 3 εκφράζεται με την εξής σχέση:

$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_{el}} \cdot 0.016 \cdot (0.3^v) \cdot \left[ \frac{\max(0.01; \omega')}{\max(0.01; \omega')} \cdot f_c \right]^{0.225} \cdot \left[ \min \left( 9, \frac{L_v}{h} \right) \right]^{0.35} \cdot 25^{\left( \alpha \cdot \rho_{sx} \cdot \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} (1.25^{100 \rho_d}) \quad (6.17)$$

Το πλαστικό μέρος της ικανότητας στροφής της χορδής των μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα υπο ανακυκλιζόμενη φόρτιση εκφράζεται με την εξής σχέση:

$$\theta_{um}^{pl} = \frac{1}{\gamma_{el}} \cdot 0.0145 \cdot 0.25^v \cdot \left[ \frac{\max(0.01; \omega)}{\max(0.01; \omega)} \right]^{0.3} \cdot f_c^{0.2} \cdot \left[ \min \left( 9, \frac{L_v}{h} \right) \right]^{0.35} \cdot 25^{\left( \alpha \rho_{sx} \cdot \frac{f_{yw}}{f_c} \right)} \cdot 1.275^{100 \rho_d} \quad (6.18)$$

Οι παράμετροι των πιο πάνω εξισώσεων περιγράφονται πιο κάτω:

$\gamma_{ei} = 1.5$  για πρωτεύοντα στοιχεία (για  $\Theta_{um}$ )

$\gamma_{ei} = 1.8$  για πρωτεύοντα στοιχεία (για  $\Theta_{um}^{pl}$ )

$\nu = \frac{N}{b \cdot h \cdot f_c}$ , ανηγμένο στη διατομή αξονικό φορτίο όπου  $b$  το πλάτος της διατομής,  $h$  το ύψος διατομής και  $f_c$  η θλιπτική αντοχή σκυροδέματος

$\omega = \frac{A_s}{b \cdot d} \cdot \frac{f_y}{f_c}$ , το ποσοστό εφελκόμενου οπλισμού, όπου  $d$  το στατικό ύψος διατομής και  $f_y$  η αντοχή διαρροής χάλυβα

$\omega' = \frac{A_s'}{b \cdot d} \cdot \frac{f_y}{f_c}$ , το ποσοστό θλιβόμενου οπλισμού

$L_v = M/V$  μήκος διάτμησης

$a = \left(1 - \frac{s_h}{2 \cdot b_0}\right) \cdot \left(1 - \frac{s_h}{2 \cdot h_0}\right) \cdot \left(1 - \frac{\sum b_i^2}{6 \cdot h_0 \cdot b_0}\right)$ , συντελεστής αποδοτικότητας περίσφυξης

Όπου,

$s_h$  = απόσταση συνδετήρων

$b_0$  = απόσταση μέχρι το κέντρο του συνδετήρα

$h_0$  = απόσταση μεταξύ των συνδετήρων

$b_i$  = απόσταση μεταξύ 2 διαμήκων ράβδων οπλισμού που συγκρατούνται από συνδετήρα στη περίμετρο της διατομής

$\rho_{sx} = \frac{A_{sw}}{b_w \cdot s_h}$ , γεωμετρικό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού παράλληλα στη διεύθυνση της φόρτισης όπου  $b_w$  πλάτος διατομής και  $S_h$  η απόσταση των συνδετήρων

$f_{yw}$  = αντοχή διαρροής συνδετήρων

$\rho_d$  = ποσοστό διαγώνιου οπλισμού

Όσο αφορά τις αντοχές των υλικών θα πρέπει να εφαρμοστούν διορθωτικοί συντελεστές ανάλογα με το επίπεδο γνώσης. Ανάλογα με την ποσότητα και την ποιότητα των πληροφοριών που έχουν συλλεχθεί για την αποτίμηση της κατασκευής υπάρχουν 3 επίπεδα

γνώσης όπου γίνεται η χρήση των αντίστοιχων συντελεστών εμπιστοσύνης, η περιορισμένη γνώση (KL 1), η συνήθης γνώση (KL 2), και η πλήρης γνώση (KL 3).

Οι τιμές των συντελεστών εμπιστοσύνης δίνονται στον πιο κάτω πίνακα συναρτήσει του επίπεδου γνώσης. Οι συντελεστές εμπιστοσύνης χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των υλικών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό της ικανότητας και έχουν σκοπό στην κάλυψη των αβεβαιοτήτων που υπάρχουν κατά την συλλογή των πληροφοριών.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή έγινε χρήση του συντελεστή εμπιστοσύνης CF 1.35 αφού το επίπεδο γνώσης των πληροφοριών σχετικά με το κτήριο είναι περιορισμένο.

**Πίνακας 7: Τιμές συντελεστών εμπιστοσύνης για τα αντίστοιχα επίπεδα γνώσης**

Επίπεδο Γνώσης	Γεωμετρία	Λεπτομέρειες	Υλικά	Ανάλυση	CF
KL1	Από τα αρχικά σχέδια κατασκευής και δειγματοληπτική <b>οπτική</b> έρευνα <b>ή</b> από <b>πλήρη</b> έρευνα	Προσομοίωση σχεδιασμού με βάση την πρακτική κατά τον χρόνο κατασκευής <b>και</b> από <b>περιορισμένη</b> επί τόπου επιθεώρηση	Προκαθορισμένες τιμές σύμφωνα με τα πρότυπα που ίσχυαν κατά τον χρόνο κατασκευής <b>και</b> από <b>περιορισμένες</b> επί τόπου δοκιμές	LF - MRS	1,35
KL2		Από μη-πλήρη αρχικά λεπτομερή κατασκευαστικά σχέδια και <b>περιορισμένη</b> επί τόπου επιθεώρηση <b>ή</b> από <b>εκτεταμένη</b> επί τόπου επιθεώρηση	Από τις αρχικές προδιαγραφές σχεδιασμού και <b>περιορισμένες</b> επί τόπου δοκιμές <b>ή</b> από <b>εκτεταμένες</b> επί τόπου δοκιμές	Όλες	1,20
KL3		Από τα αρχικά λεπτομερή κατασκευαστικά σχέδια και <b>περιορισμένη</b> επί τόπου επιθεώρηση <b>ή</b> από <b>διεξοδική</b> επί τόπου επιθεώρηση	Από τις αρχικές αναφορές δοκιμών και <b>περιορισμένες</b> επί τόπου δοκιμές <b>ή</b> από <b>διεξοδικές</b> επί τόπου δοκιμές	Όλες	1,00

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη δημιουργία ενός excel αρχείου για τον υπολογισμό των  $\theta_{um}$ ,  $\Theta_y$  για τα υποστυλώματα και τις δοκούς για τις χρονικές περιόδους  $t=0$ ,  $t=50$ ,  $t=75$  χρόνια συνοψίζονται στους πιο κάτω πίνακες.

**Πίνακας 8: Αποτελέσματα σταθμών επιτελεστικότητας ακραίων υποστυλωμάτων για t=0**

Για χρονική περίοδο t=0			
Κόμβοι	Ακραία Υποστυλώματα		
	$\Theta_y$ Περιορισμού Βλαβών	$3/4\Theta_{um}$ Σοβαρών Βλαβών	$\Theta_{um}$ Οιονεί Κατάρρευση
Κόμβος 1 (Βάση)	0.006119115	0.013634295	0.018179059
Κόμβος 2 (1 <sup>ος</sup> όροφος)	0.006653186	0.014841161	0.019788214
Κόμβος 3 (2 <sup>ος</sup> όροφος)	0.006956377	0.015821525	0.021095367
Κόμβος 4 (3 <sup>ος</sup> όροφος)	0.007269178	0.01686665	0.022488867
Κόμβος 5 (4 <sup>ος</sup> όροφος)	0.007591428	0.017980813	0.023974417
Κόμβος 6 (5 <sup>ος</sup> όροφος)	0.007922893	0.019168574	0.025558099
Κόμβος 7 (6 <sup>ος</sup> όροφος)	0.00826326	0.020434796	0.027246394
Κόμβος 8 (7 <sup>ος</sup> όροφος)	0.008612124	0.02178466	0.029046213

**Πίνακας 9: Αποτελέσματα σταθμών επιτελεστικότητας μεσαίων υποστυλωμάτων για t=0**

Για χρονική περίοδο t=0			
Κόμβοι	Μεσαία Υποστυλώματα		
	$\Theta_y$ Περιορισμού Βλαβών	$3/4\Theta_{um}$ Σοβαρών Βλαβών	$\Theta_{um}$ Οιονεί Κατάρρευση
Κόμβος 1 (Βάση)	0.004578168	0.008903662	0.011871549
Κόμβος 2 (1 <sup>ος</sup> όροφος)	0.004998005	0.010003831	0.013338442
Κόμβος 3 (2 <sup>ος</sup> όροφος)	0.005464051	0.011282841	0.015043789
Κόμβος 4 (3 <sup>ος</sup> όροφος)	0.005963982	0.012725376	0.016967168
Κόμβος 5 (4 <sup>ος</sup> όροφος)	0.006498311	0.014352341	0.019136455
Κόμβος 6 (5 <sup>ος</sup> όροφος)	0.00706705	0.016187317	0.02158309
Κόμβος 7 (6 <sup>ος</sup> όροφος)	0.007669562	0.018256899	0.024342532
Κόμβος 8 (7 <sup>ος</sup> όροφος)	0.008304376	0.020591081	0.027454774

**Πίνακας 10: Αποτελέσματα σταθμών επιτελεστικότητας δοκών για t=0**

Για χρονική περίοδο t=0			
Κόμβοι	Δοκοί		
	$\Theta_y$ Περιορισμού Βλαβών	$3/4\Theta_{um}$ Σοβαρών Βλαβών	$\Theta_{um}$ Οιονεί Κατάρρευση
Κόμβος 1 (Βάση)	0.009042999	0.023382291	0.031176388
Κόμβος 2 (1 <sup>ος</sup> όροφος)			
Κόμβος 3 (2 <sup>ος</sup> όροφος)			
Κόμβος 4 (3 <sup>ος</sup> όροφος)			
Κόμβος 5 (4 <sup>ος</sup> όροφος)			
Κόμβος 6 (5 <sup>ος</sup> όροφος)			
Κόμβος 7 (6 <sup>ος</sup> όροφος)			
Κόμβος 8 (7 <sup>ος</sup> όροφος)			

**Πίνακας 11: Αποτελέσματα σταθμών επιτελεστικότητας ακραίων υποστυλωμάτων για t=50**

Για χρονική περίοδο t=50			
Κόμβοι	Ακραία Υποστυλώματα		
	$\Theta_y$ Περιορισμού Βλαβών	$3/4\Theta_{um}$ Σοβαρών Βλαβών	$\Theta_{um}$ Οιονεί Κατάρρευση
Κόμβος 1 (Βάση)	0.006100170	0.013592081	0.018122774
Κόμβος 2 (1 <sup>ος</sup> όροφος)	0.006650894	0.014836048	0.019781397
Κόμβος 3 (2 <sup>ος</sup> όροφος)	0.006953980	0.015816075	0.021088100
Κόμβος 4 (3 <sup>ος</sup> όροφος)	0.007266674	0.016860840	0.022481120
Κόμβος 5 (4 <sup>ος</sup> όροφος)	0.007588813	0.017974619	0.023966158
Κόμβος 6 (5 <sup>ος</sup> όροφος)	0.007920164	0.019161971	0.025549294
Κόμβος 7 (6 <sup>ος</sup> όροφος)	0.008260414	0.020427756	0.027237008
Κόμβος 8 (7 <sup>ος</sup> όροφος)	0.008609157	0.021777155	0.029036207

**Πίνακας 12: Αποτελέσματα σταθμών επιτελεστικότητας μεσαίων υποστρωμάτων για t=50**

Για χρονική περίοδο t=50			
Κόμβοι	Μεσαία Υποστρώματα		
	$\Theta_y$ Περιορισμού Βλαβών	$3/4\Theta_{um}$ Σοβαρών Βλαβών	$\Theta_{um}$ Οιονεί Κατάρρευση
Κόμβος 1 (Βάση)	0.004576591	0.008900594	0.011867459
Κόμβος 2 (1 <sup>ος</sup> όροφος)	0.004996284	0.010000385	0.013333847
Κόμβος 3 (2 <sup>ος</sup> όροφος)	0.005462169	0.011278955	0.015038606
Κόμβος 4 (3 <sup>ος</sup> όροφος)	0.005961927	0.012720992	0.016961323
Κόμβος 5 (4 <sup>ος</sup> όροφος)	0.006496072	0.014347397	0.019129862
Κόμβος 6 (5 <sup>ος</sup> όροφος)	0.007064616	0.016181741	0.021575654
Κόμβος 7 (6 <sup>ος</sup> όροφος)	0.007666919	0.018250609	0.024334146
Κόμβος 8 (7 <sup>ος</sup> όροφος)	0.008301515	0.020583987	0.027445316

**Πίνακας 13: Αποτελέσματα σταθμών επιτελεστικότητας δοκών για t=50**

Για χρονική περίοδο t=50			
Κόμβοι	Δοκοί		
	$\Theta_y$ Περιορισμού Βλαβών	$3/4\Theta_{um}$ Σοβαρών Βλαβών	$\Theta_{um}$ Οιονεί Κατάρρευση
Κόμβος 1 (Βάση)	0.009031612	0.023352847	0.031137129
Κόμβος 2 (1 <sup>ος</sup> όροφος)			
Κόμβος 3 (2 <sup>ος</sup> όροφος)			
Κόμβος 4 (3 <sup>ος</sup> όροφος)			
Κόμβος 5 (4 <sup>ος</sup> όροφος)			
Κόμβος 6 (5 <sup>ος</sup> όροφος)			
Κόμβος 7 (6 <sup>ος</sup> όροφος)			
Κόμβος 8 (7 <sup>ος</sup> όροφος)			

**Πίνακας 14: Αποτελέσματα σταθμών επιτελεστικότητας ακραίων υποστυλωμάτων για t=75**

Για χρονική περίοδο t=75			
Κόμβοι	Ακραία Υποστυλώματα		
	$\Theta_y$ Περιορισμού Βλαβών	$3/4\Theta_{um}$ Σοβαρών Βλαβών	$\Theta_{um}$ Οιονεί Κατάρρευση
Κόμβος 1 (Βάση)	0.006090076	0.013569591	0.018092789
Κόμβος 2 (1 <sup>ος</sup> όροφος)	0.00664967	0.014833318	0.019777758
Κόμβος 3 (2 <sup>ος</sup> όροφος)	0.006952701	0.015813165	0.02108422
Κόμβος 4 (3 <sup>ος</sup> όροφος)	0.007265337	0.016857738	0.022476984
Κόμβος 5 (4 <sup>ος</sup> όροφος)	0.007587416	0.017971312	0.023961749
Κόμβος 6 (5 <sup>ος</sup> όροφος)	0.007918707	0.019158445	0.025544594
Κόμβος 7 (6 <sup>ος</sup> όροφος)	0.008258894	0.020423998	0.027231997
Κόμβος 8 (7 <sup>ος</sup> όροφος)	0.008607573	0.021773149	0.029030865

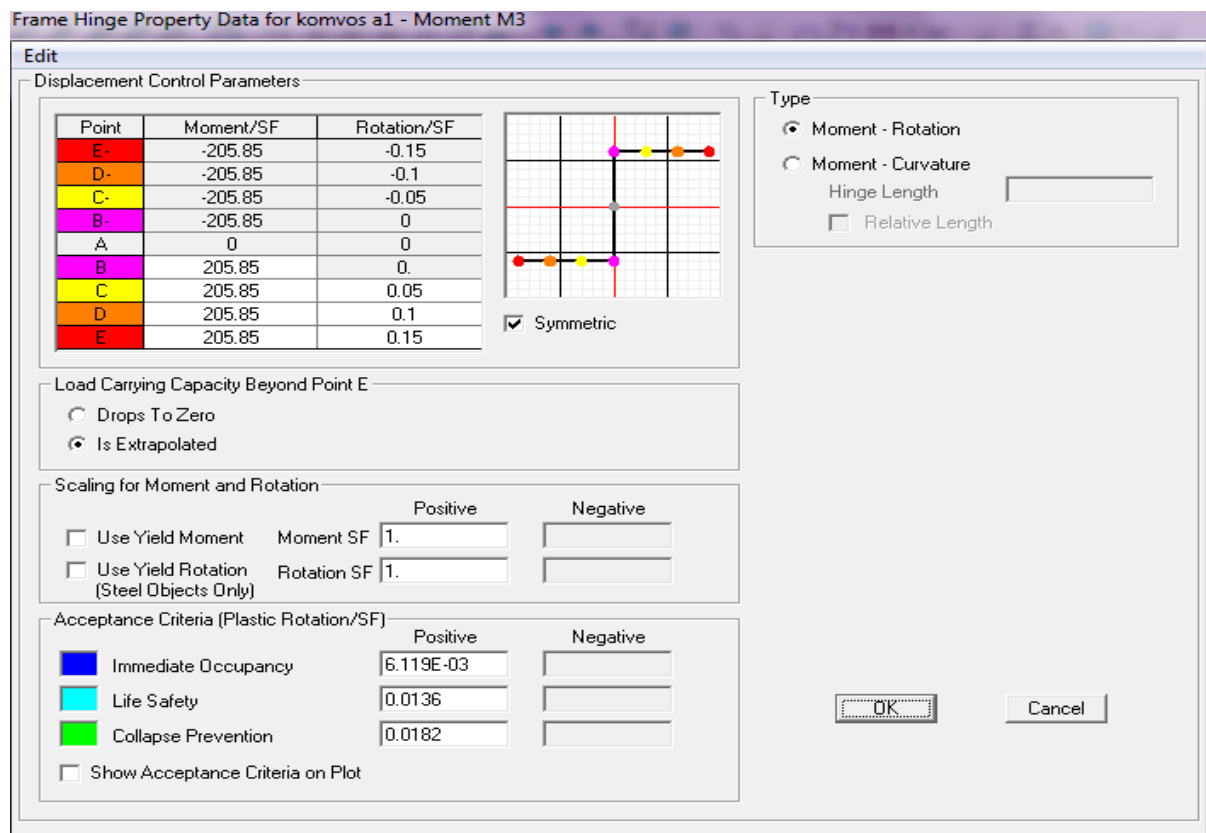
**Πίνακας 15: Αποτελέσματα σταθμών επιτελεστικότητας μεσαίων υποστυλωμάτων για t=75**

Για χρονική περίοδο t=75			
Κόμβοι	Μεσαία Υποστυλώματα		
	$\Theta_y$ Περιορισμού Βλαβών	$3/4\Theta_{um}$ Σοβαρών Βλαβών	$\Theta_{um}$ Οιονεί Κατάρρευση
Κόμβος 1 (Βάση)	0.004575749	0.008898957	0.011865276
Κόμβος 2 (1 <sup>ος</sup> όροφος)	0.004995364	0.009998545	0.013331393
Κόμβος 3 (2 <sup>ος</sup> όροφος)	0.005461164	0.01127688	0.015035839
Κόμβος 4 (3 <sup>ος</sup> όροφος)	0.005960831	0.012718652	0.016958202
Κόμβος 5 (4 <sup>ος</sup> όροφος)	0.006494877	0.014344757	0.019126343
Κόμβος 6 (5 <sup>ος</sup> όροφος)	0.007063316	0.016178764	0.021571685
Κόμβος 7 (6 <sup>ος</sup> όροφος)	0.007665509	0.018247252	0.024329669
Κόμβος 8 (7 <sup>ος</sup> όροφος)	0.008299988	0.0205802	0.027440267

Πίνακας 16: Αποτελέσματα σταθμών επιτελεστικότητας δοκών για t=75

Για χρονική περίοδο t=75			
Κόμβοι	Δοκοί		
	$\Theta_y$ Περιορισμού Βλαβών	$3/4\Theta_{um}$ Σοβαρών Βλαβών	$\Theta_{um}$ Οιονεί Κατάρρευση
Κόμβος 1 (Βάση)	0.00902555	0.023337174	0.031116232
Κόμβος 2 (1 <sup>ος</sup> όροφος)			
Κόμβος 3 (2 <sup>ος</sup> όροφος)			
Κόμβος 4 (3 <sup>ος</sup> όροφος)			
Κόμβος 5 (4 <sup>ος</sup> όροφος)			
Κόμβος 6 (5 <sup>ος</sup> όροφος)			
Κόμβος 7 (6 <sup>ος</sup> όροφος)			
Κόμβος 8 (7 <sup>ος</sup> όροφος)			

Ο ορισμός των πλαστικών αρθρώσεων, οι ροπές διαρροής και οι στάθμες επιτελεστικότητας τοποθετήθηκαν στο λογισμικό SAP2000 σύμφωνα με το Σχήμα 16 που ακολουθεί.



Σχήμα 17: Ορισμός πλαστικών αρθρώσεων, ροπών διαρροής και σταθμών επιτελεστικότητας

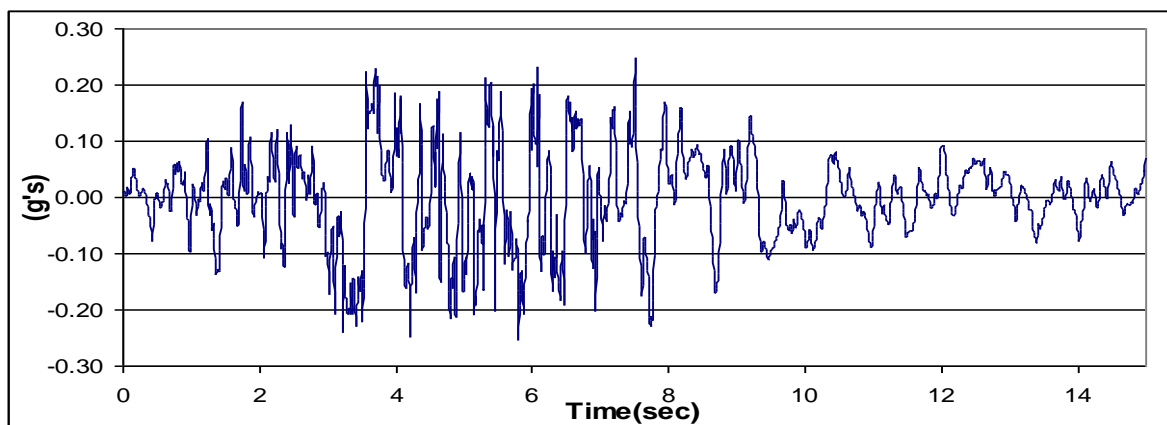


## 6.6 Ορισμός δυναμικής ανελαστικής ανάλυσης (Time History)

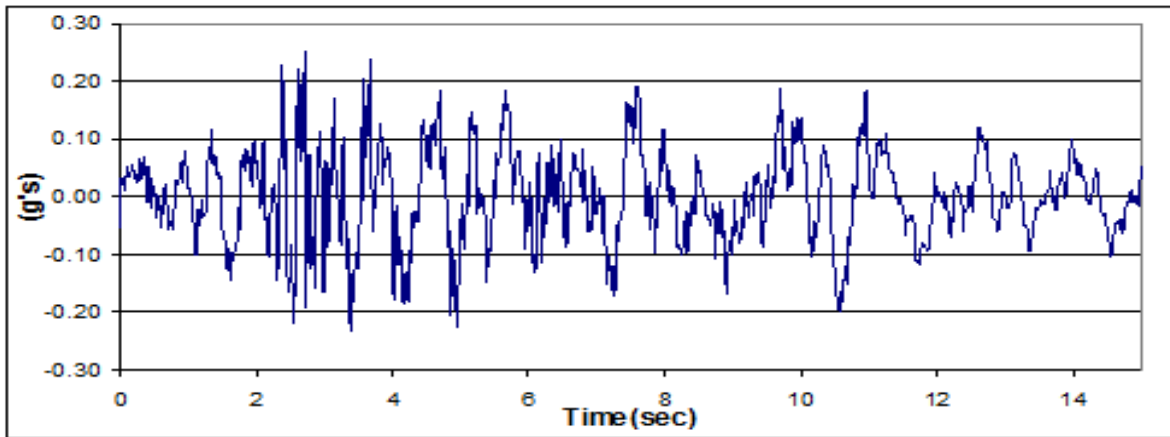
Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο σημείο, η ανάλυση που χρησιμοποιήθηκε για την αποτίμηση της αντοχής της κατασκευής, διαμέσου του χρόνου, είναι η δυναμική ανελαστική ανάλυση χρονοιστορίας. Βάση της οποίας χρησιμοποιήθηκαν 6 διαφορετικά επιταχυνσιογραφήματα, σύμφωνα με τη έρευνα Δέσμη 2008, με θέμα την σεισμική τρωτότητα και ενίσχυση υφιστάμενων ιδιωτικής χρήσης κτηρίων, του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου. Τα επιταχυνσιογραφήματα που ορίστηκαν είναι τα εξής:

1. Σεισμός Friuli 1976, σταθμός Tolmezzo (Ιταλία)
2. Σεισμός Montenegro 1979, σταθμός Hercegnovi (Μαυροβούνιο)
3. Σεισμός Καλαμάτας 1986, σταθμός Δημαρχείου (Ελλάδα)
4. Σεισμός Loma Prieta 1989, σταθμός Capitola (ΗΠΑ)
5. Σεισμός Imperial Valley 1979, σταθμός Bonds Corner (ΗΠΑ)
6. Σεισμός Imperial Valley 1940, σταθμός El Centro Array #9 (ΗΠΑ)

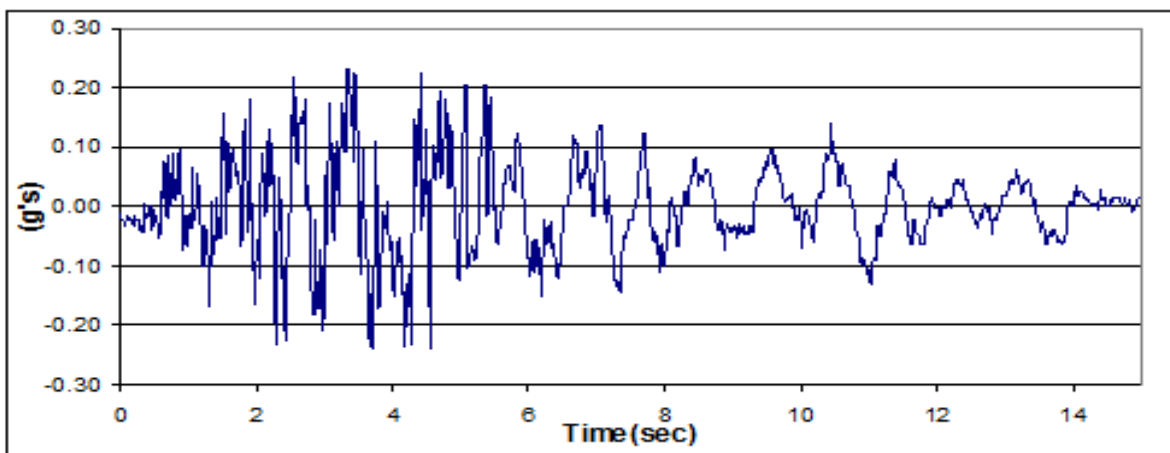
Τα διάφορα επιταχυνσιογραφήματα παρουσιάζονται στα πιο κάτω σχήματα:



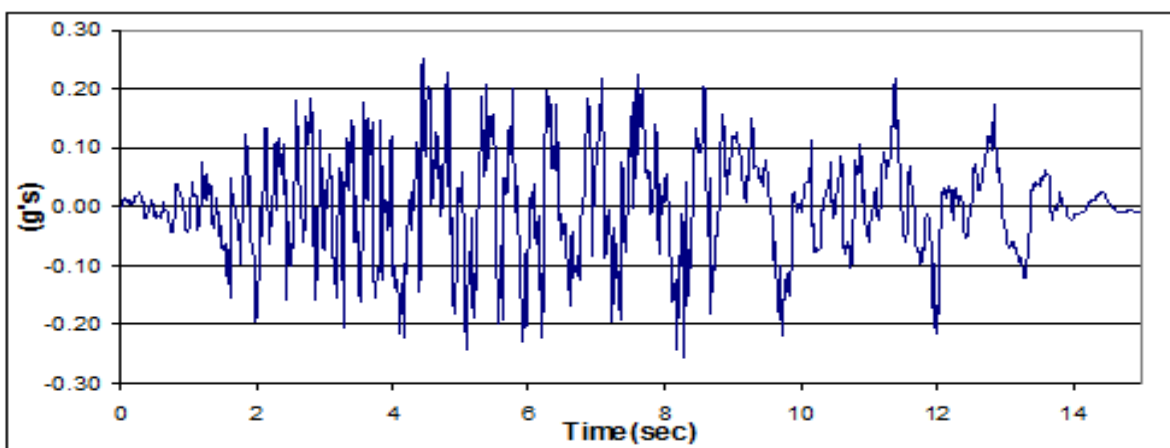
Σχήμα 18: Friuli 1976, σταθμός Tolmezzo (Ιταλία)



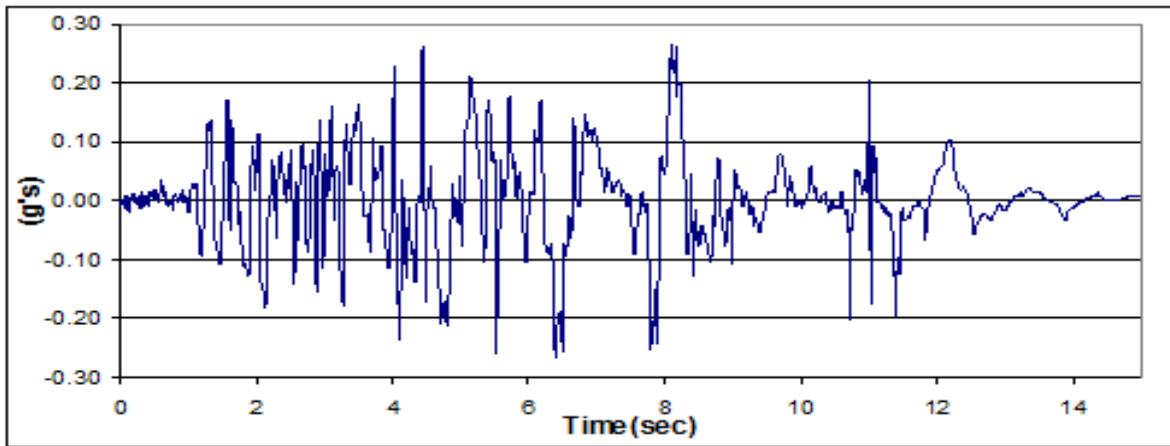
Σχήμα 19: Montenegro 1979, σταθμός Hercegovi (Μαυροβούνιο)



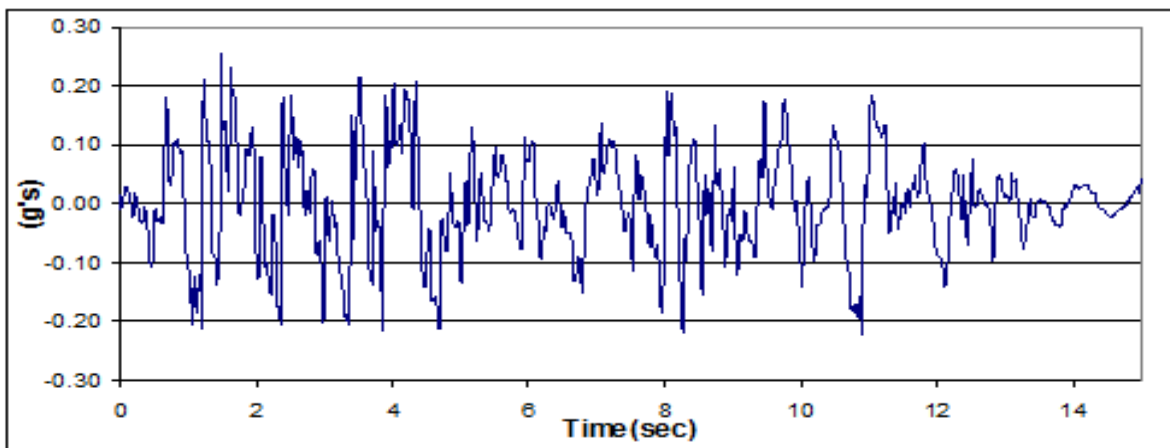
Σχήμα 20: Καλαμάτα 1986, σταθμός Δημαρχείου (Ελλάδα)



Σχήμα 21: Σεισμός Loma Prieta 1989, σταθμός Capitola (ΗΠΑ)



Σχήμα 22: Imperial Valley 1979, σταθμός Bonds Corner (ΗΠΑ)



Σχήμα 23: Imperial Valley 1940, σταθμός El Centro Array #9 (ΗΠΑ)

Για την ανάλυση του κτηρίου και την αποτίμηση έναντι του σεισμού στο λογισμικό SAP2000, ορίστηκε η συνθήκη time history όπως φαίνεται και στο Σχήμα 22, κατά την οποία για κάθε διαφορετικό επιταχυνσιογράφημα ο συντελεστής κλίμακας (scale factor) αλλάζει μέχρι να ξεπεραστεί το κριτήριο «οιωνεί κατάρρευση» που τέθηκε κατά τον ορισμό των σταθμών επιτελεστικότητας στα δομικά στοιχεία. Στην συνθήκη αυτή, καθορίζεται η ανελαστική ανάλυση καθώς και ο χρόνος διεκπαιρέωσης της ανάλυσης, 20 δευτερόλεπτα που ισοδυναμεί με 2000 βήματα (steps) έτσι ώστε να καλύπτουν όλα τα επιταχυνσιογραφήματα τα οποία είναι δείγματα 15 δευτερολέπτων.

**Load Case Data - Nonlinear Direct Integration History**

Load Case Name:   Notes:

Load Case Type:

Initial Conditions:  
 Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State  
 Continue from State at End of Nonlinear Case   
 Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Analysis Type:  
 Linear  
 Nonlinear

Time History Type:  
 Modal  
 Direct Integration

Modal Load Case:  
 Use Modes from Case

Geometric Nonlinearity Parameters:  
 None  
 P-Delta  
 P-Delta plus Large Displacements

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	RECORD1	2.
Accel	U1	RECORD1	2.

Show Advanced Load Parameters

Time Step Data:  
 Number of Output Time Steps:   
 Output Time Step Size:

Time History Motion Type:  
 Transient  
 Periodic

Other Parameters:  
 Damping:    
 Time Integration:    
 Nonlinear Parameters:

Σχήμα 24: Απεικόνιση παραμέτρων για τον ορισμό της ανελαστικής συνθήκης χρονοϊστορίας

## 6.7 Ανάλυση δισδυάστατου 7όροφου κτηρίου

Αφού έγινε η προσομοίωση του κτηρίου στο λογισμικό SAP2000, ακολουθεί η ανάλυση. Κατά την οποία όπως ήδη αναφέρθηκε για τις διάφορες χρονικές στιγμές μελέτης  $t_0=0, t_0=50, t_0=75$  και για όλα τα 6 επιταχυνσιογράφημα, ο συντελεστής κλίμακας αλλάζει ανάλογα με το αν τα δομικά στοιχεία υπερβούν το όριο που τέθηκε κατά τον ορισμό των πλαστικών αρθρώσεων, της κατάστασης «οιονεί κατάρρευση». Οι κλίμακες που χρησιμοποιήθηκαν ξεκινούν από 4 μέχρι και το 20. Συντελεστές κλίμακας 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 νοείται για εδαφική επιτάχυνση 0.05g, 0.1g, 0.15g, 0.20g, 0.25g, 0.30g, 0.35g,

0.4g, 0.45, 0.50g αντίστοιχα. Συνολικά για την ανάλυση της χρονικής περιόδου t=0 έγιναν 30 αναλύσεις, για t=50 έγιναν 31 αναλύσεις και για t=75 έγιναν 30 αναλύσεις.

Η ιδιοπερίοδος της κατασκευής από την ανάλυση βρέθηκε να είναι ίση με T=1.88s όπως φαίνεται στο Σχήμα 25 που ακολουθεί. Από την ανάλυση εξάγονται τα αποτελέσματα των μέγιστων μετατοπίσεων του κτηρίου και την εμφάνιση της σειράς των πλαστικών αρθρώσεων των μελών της κατασκευής που διακρίνονται με τα διάφορα χρώματα που τέθηκαν κατά τον ορισμό των σταθμών επιτελεστικότητας.

```

record1_scale2.LOG
TIME FOR DETERMINING EVENTS = 0.00
TIME FOR UPDATING STATE = 0.08
TOTAL TIME FOR THIS ANALYSIS = -----
                                0.48

ELEMENT FORMATION 17:38:53

LINEAR EQUATION SOLUTION 17:38:53
FORMING STIFFNESS AT THE END OF CASE: GRAVITY_SEISMIC
TOTAL NUMBER OF EQUILIBRIUM EQUATIONS = 798
NUMBER OF NON-ZERO STIFFNESS TERMS = 4251
NUMBER OF EIGENVALUES BELOW SHIFT = 0

EIGEN MODAL ANALYSIS 17:38:53
CASE: MODAL
USING STIFFNESS AT THE END OF CASE: GRAVITY_SEISMIC
NUMBER OF STIFFNESS DEGREES OF FREEDOM = 798
NUMBER OF MASS DEGREES OF FREEDOM = 532
MAXIMUM NUMBER OF EIGEN MODES SOUGHT = 12
MINIMUM NUMBER OF EIGEN MODES SOUGHT = 1
NUMBER OF RESIDUAL-MASS MODES SOUGHT = 0
NUMBER OF SUBSPACE VECTORS USED = 24
RELATIVE CONVERGENCE TOLERANCE = 1.00E-09
FREQUENCY SHIFT (CENTER) (CYC/TIME) = .000000
FREQUENCY CUTOFF (RADIUS) (CYC/TIME) = -INFINITY-
ALLOW AUTOMATIC FREQUENCY SHIFTING = YES

Original stiffness at shift : EV= 0.0000000E+00, f= .000000, T= -INFINITY-
Number of eigenvalues below shift = 0
Found node 1 of 12: EV= 1.1065661E+01, f= 0.529430, T= 1.888823
Found node 2 of 12: EV= 9.8407959E+01, f= 1.578830, T= 0.633381
Found node 3 of 12: EV= 2.9447371E+02, f= 2.731136, T= 0.366148
Found node 4 of 12: EV= 6.5427628E+02, f= 4.070996, T= 0.245640
Found node 5 of 12: EV= 1.1508485E+03, f= 5.399197, T= 0.185213
Found node 6 of 12: EV= 1.1752470E+03, f= 5.456130, T= 0.183280
Found node 7 of 12: EV= 1.2270713E+03, f= 5.575130, T= 0.179368
Found node 8 of 12: EV= 1.4175227E+03, f= 5.992184, T= 0.166884
Found node 9 of 12: EV= 1.7450336E+03, f= 6.648475, T= 0.150410
Found node 10 of 12: EV= 1.8097799E+03, f= 6.770691, T= 0.147695
Found node 11 of 12: EV= 1.9466722E+03, f= 7.022092, T= 0.142408
Found node 12 of 12: EV= 2.1365928E+03, f= 7.356666, T= 0.135931

NUMBER OF EIGEN MODES FOUND = 12
NUMBER OF ITERATIONS PERFORMED = 20
NUMBER OF STIFFNESS SHIFTS = 0

NONLIN DIRECT HISTORY ANALYSIS 17:38:54
CASE: TIME HISTORY
CONTINUING FROM THE END OF CASE: GRAVITY_SEISMIC
TYPE OF GEOMETRIC NONLINEARITY = NONE
INCLUDE ELASTIC MATERIAL NONLINEARITY = YES
INCLUDE INELASTIC MATERIAL NONLINEARITY = YES
Page 2

```

Σχήμα 25: Απεικόνιση ανάλυσης στο λογισμικό SAP2000 με την ιδιοπερίοδο της κατασκευής

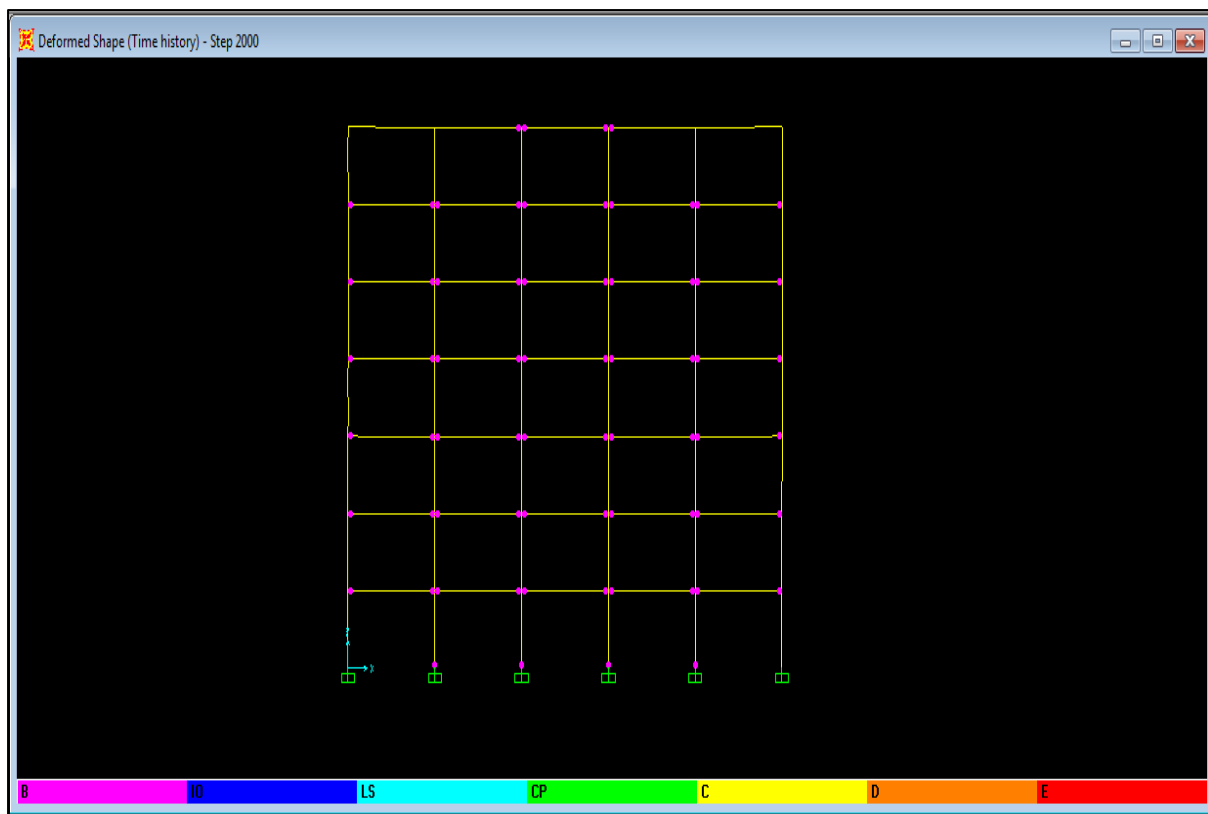
## 7. Αποτελέσματα αναλύσεων

Αφού έγιναν όλες οι αναλύσεις προέκυψαν αποτελέσματα σχετικά με την μέγιστη μετακίνηση των κόμβων του κτηρίου και η σειρά σχηματισμού των πλαστικών αρθρώσεων, με την υπέρβαση των ορίων που τέθηκαν κατά την στάθμη επιτελεστικότητας.

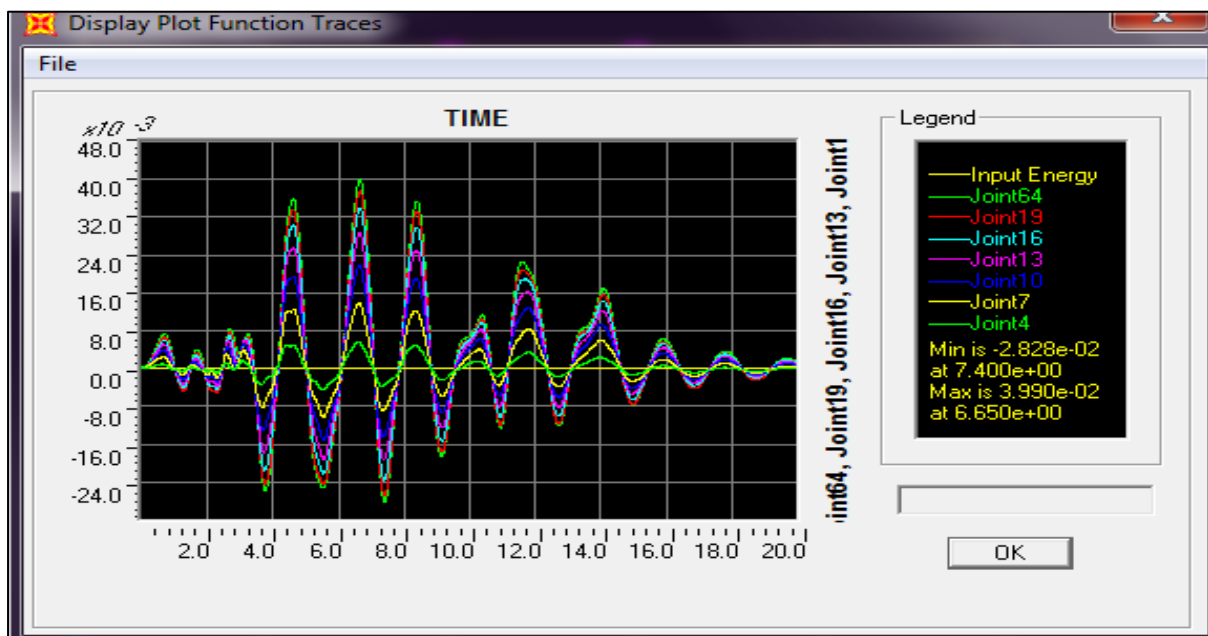
Κατά την ανάλυση, τα αποτελέσματα που προκύπτουν στον παραμορφωμένο φορέα και που εμφανίζονται με την αλλαγή των χρωμάτων αντιστοιχούν στην υπέρβαση των κριτηρίων που τέθηκαν κατά τον ορισμό των σταθμών επιτελεστικότητας σύμφωνα με την στροφή χορφής κατά τον Ευρωκώδικα 8–Μέρος 3. Οι συμβολισμοί των σημείων αυτών εκφράζονται ως εξής:

- Με ρόζ χρώμα σημείου εκφράζεται ότι η στροφή χορδής των άκρων των δομικών στοιχείων δεν έχει υπερβεί την πρώτη στάθμη επιτελεστικότητας
- Με μπλέ χρώμα σημείου εκφράζεται η υπέρβαση της στάθμης επιτελεστικότητας «Περιορισμού Βλαβών» κατά Ευρωκώδικα 8-Μέρος 3 κάποιου άκρου δομικού στοιχείου.
- Με γαλάζιο χρώμα σημείου εκφράζεται η υπέρβαση της στάθμης επιτελεστικότητας «Σημαντικών Βλαβών» κατά Ευρωκώδικα 8-Μέρος 3 κάποιου άκρου δομικού στοιχείου.
- Με πράσινο χρώμα σημείου εκφράζεται η υπέρβαση της στάθμης επιτελεστικότητας «Οιονεί Κατάρρευση» κατά Ευρωκώδικα 8-Μέρος 3 κάποιου άκρου δομικού στοιχείου.

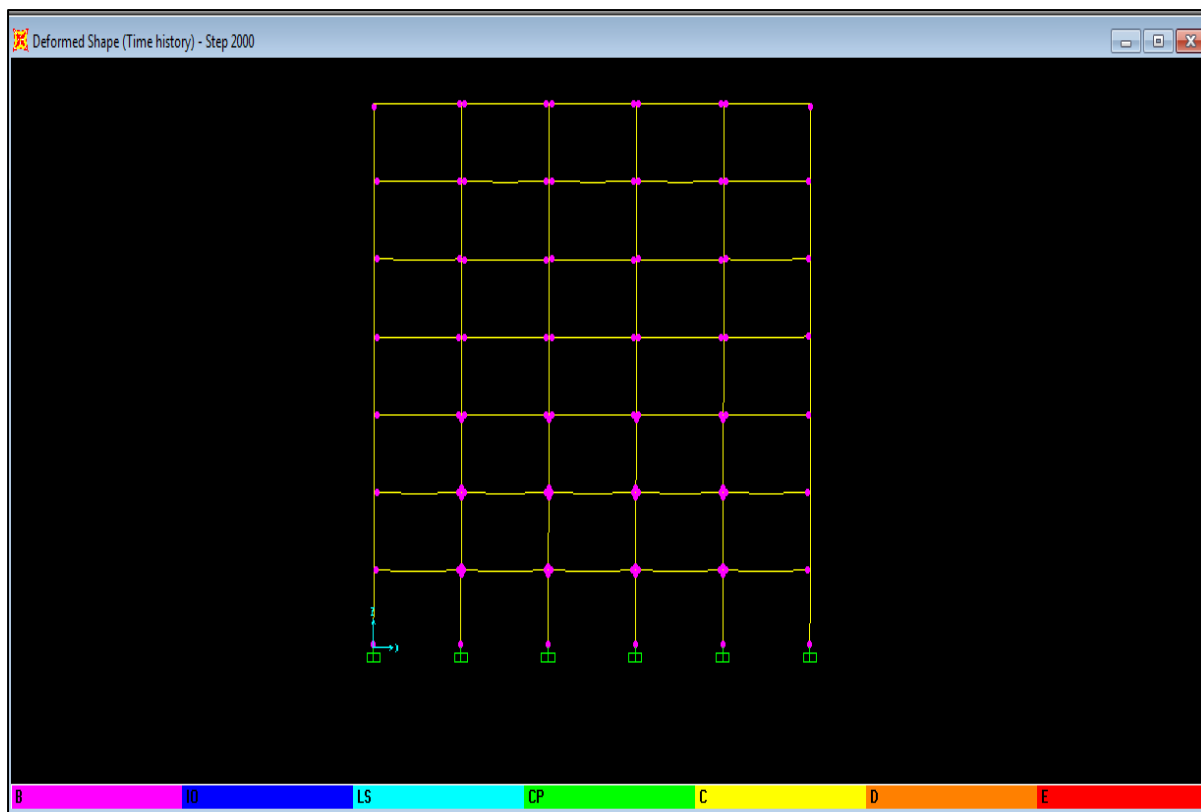
Παράδειγμα παραμορφωμένου φορέα με την εφαρμογή του επιταχυνσιογραφήματος του Σεισμού Loma Prieta 1989, σταθμός Capitola (ΗΠΑ) με την εναλλαγή των εδαφικών επιτάχυνσεων 0.05g, 0.1g, 0.15g, 0.20g, 0.25g καθώς επίσης η αλληλουχία των πλαστικών αρθρώσεων και οι μέγιστες μετακινήσεις των κόμβων φαίνονται στα επόμενα σχήματα που ακολουθούν.



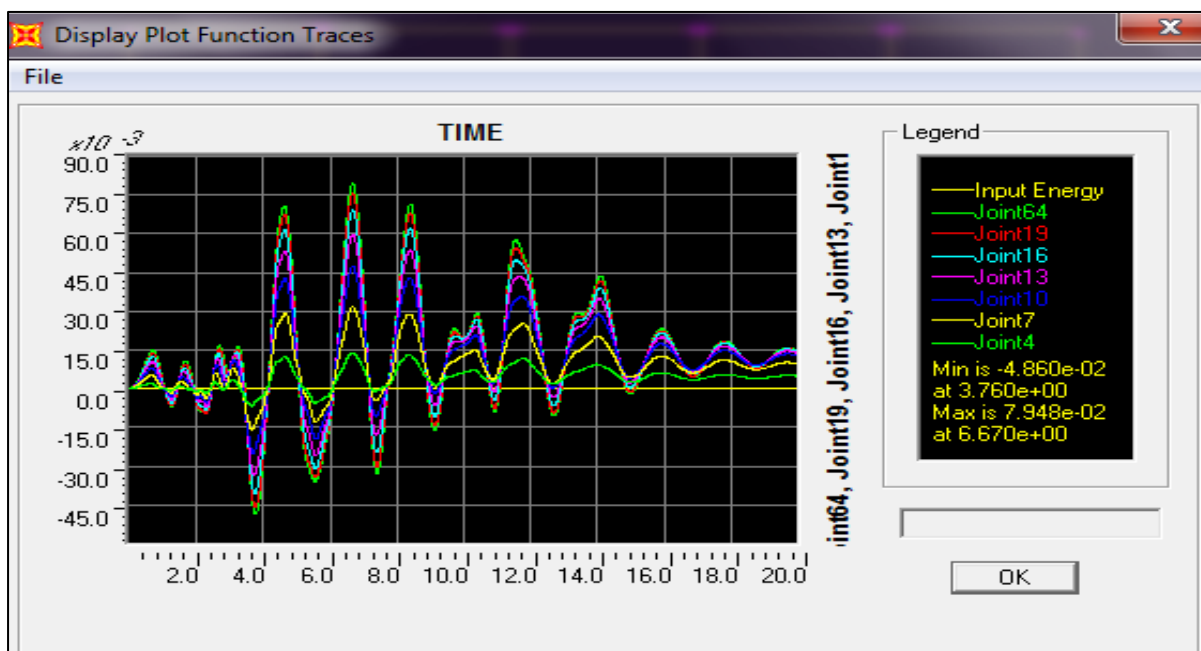
Σχήμα 26: Απεικόνιση παραμορφωμένου φορέα όταν υποβλήθηκε σε εδαφική επιτάχυνση 0.05g



Σχήμα 27: Γραφική απεικόνιση μετακινήσεων κόμβων για εδαφική επιτάχυνση 0.05g

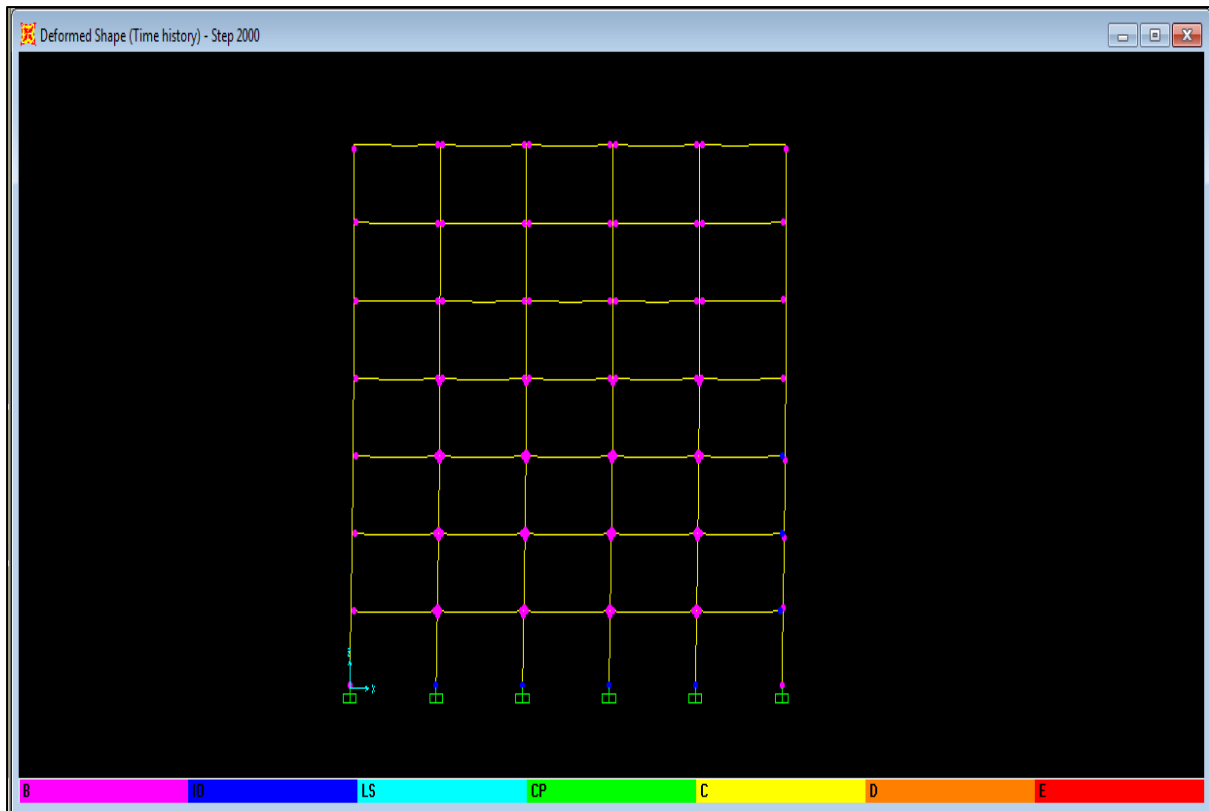


Σχήμα 28: Απεικόνιση παραμορφωμένου φορέα όταν υποβλήθηκε σε εδαφική επιτάχυνση 0.1g

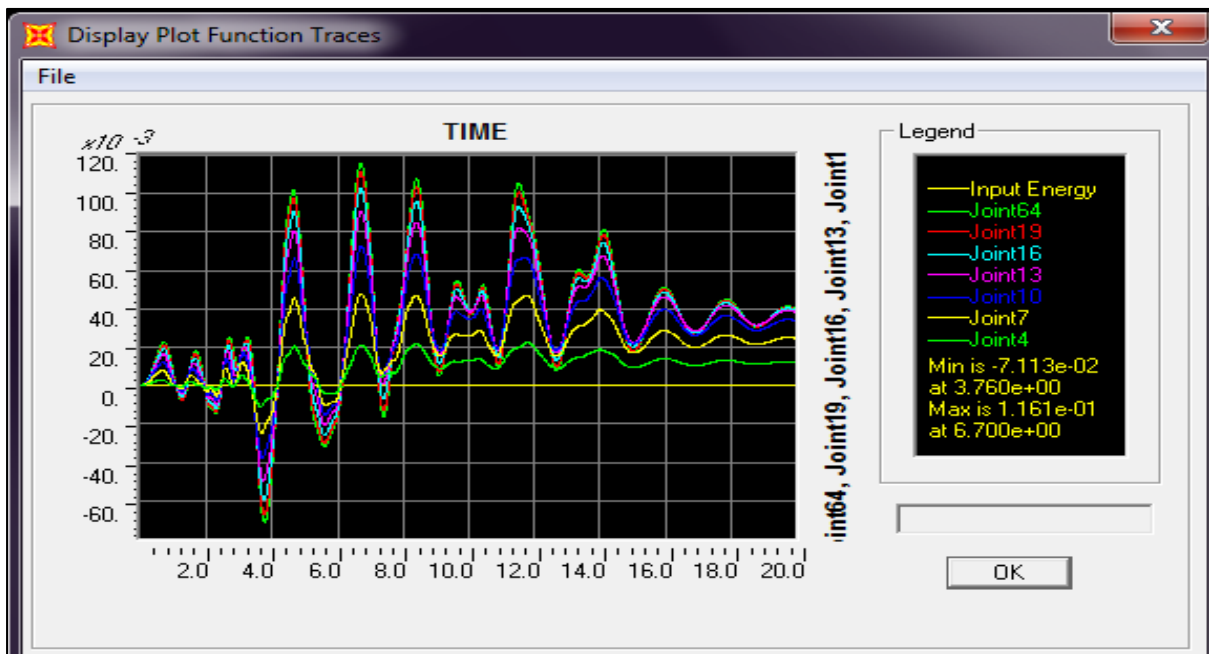


Σχήμα 29: Γραφική απεικόνιση μετακινήσεων κόμβων για εδαφική επιτάχυνση 0.1g

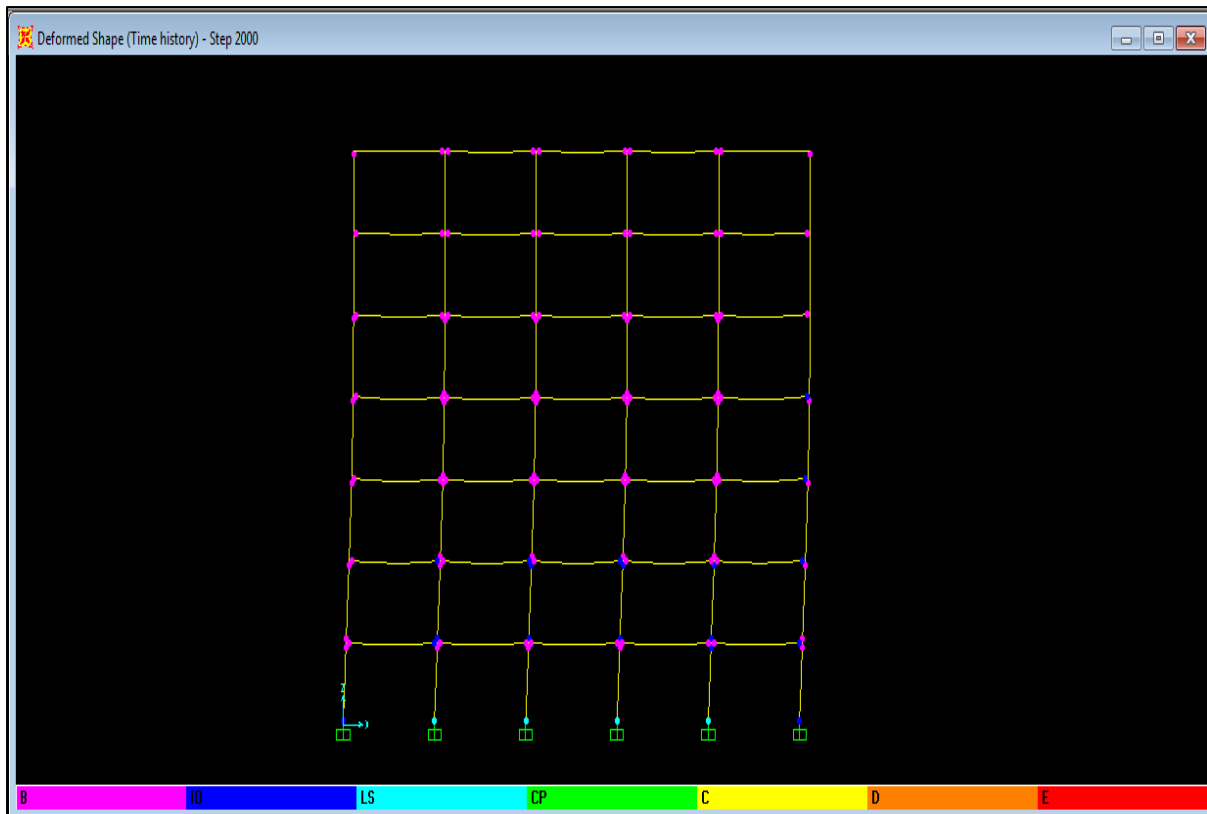




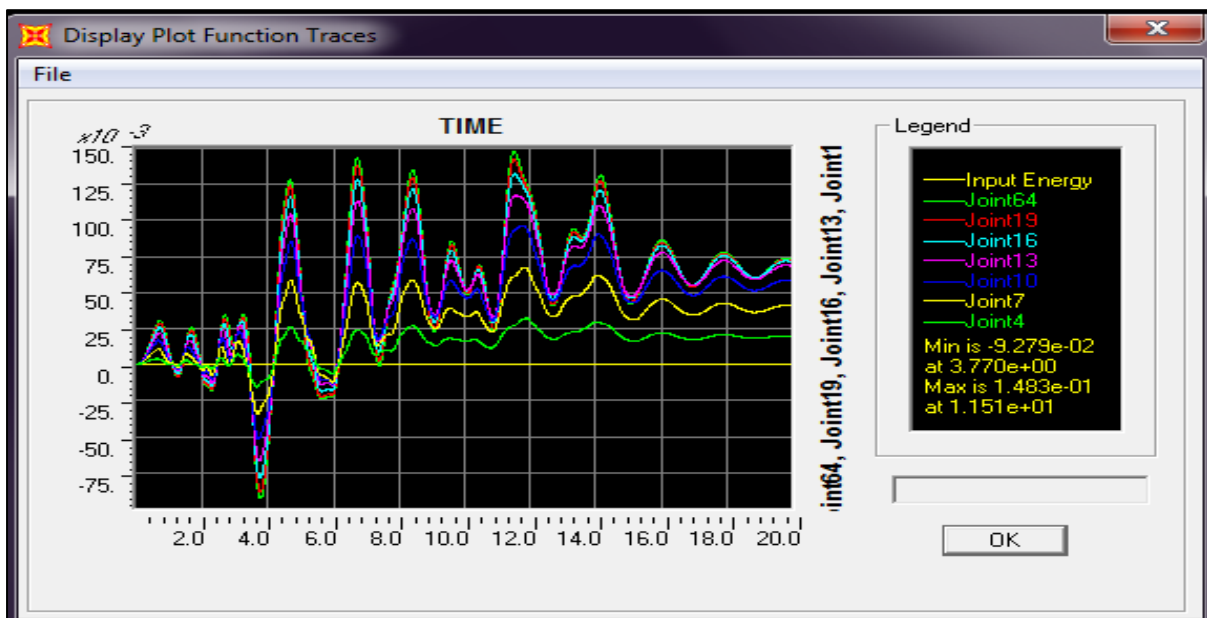
Σχήμα 30: Απεικόνιση παραμορφωμένου φορέα όταν υποβλήθηκε σε εδαφική επιτάχυνση 0.15g



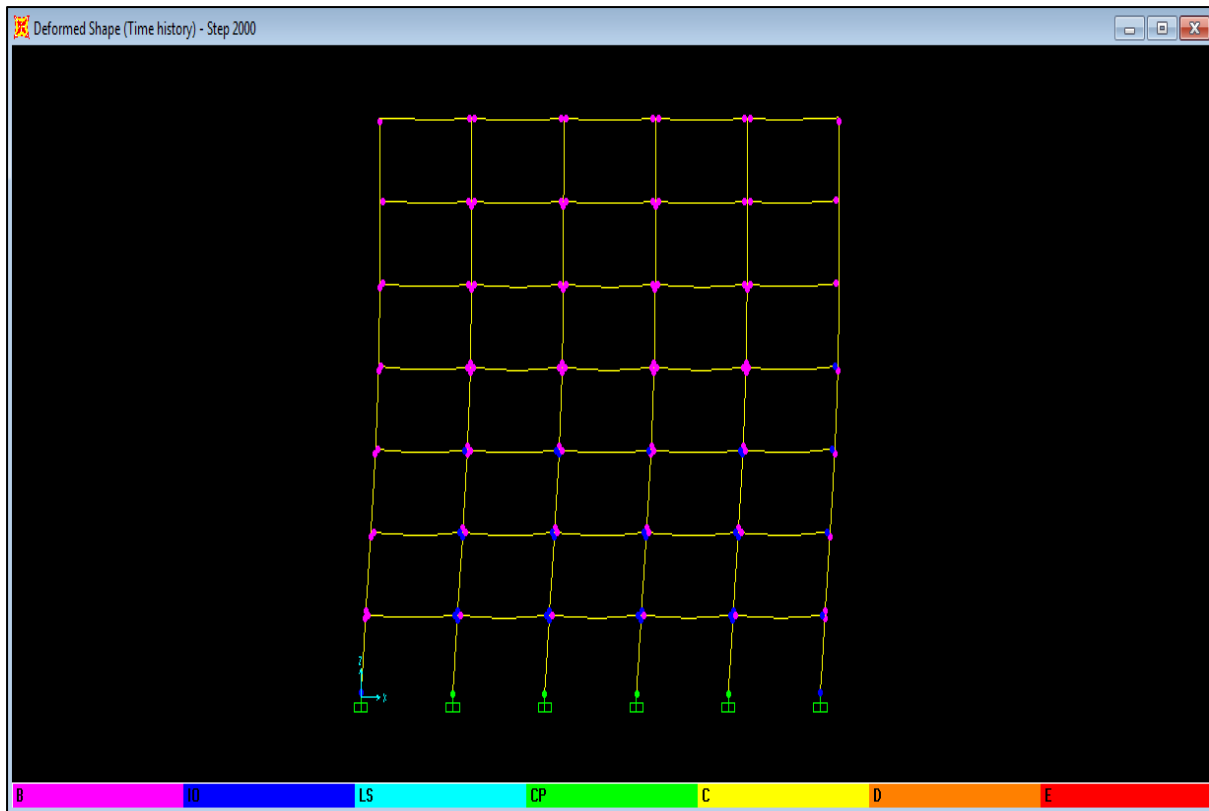
Σχήμα 31: Γραφική απεικόνιση μετακινήσεων κόμβων για εδαφική επιτάχυνση 0.15g



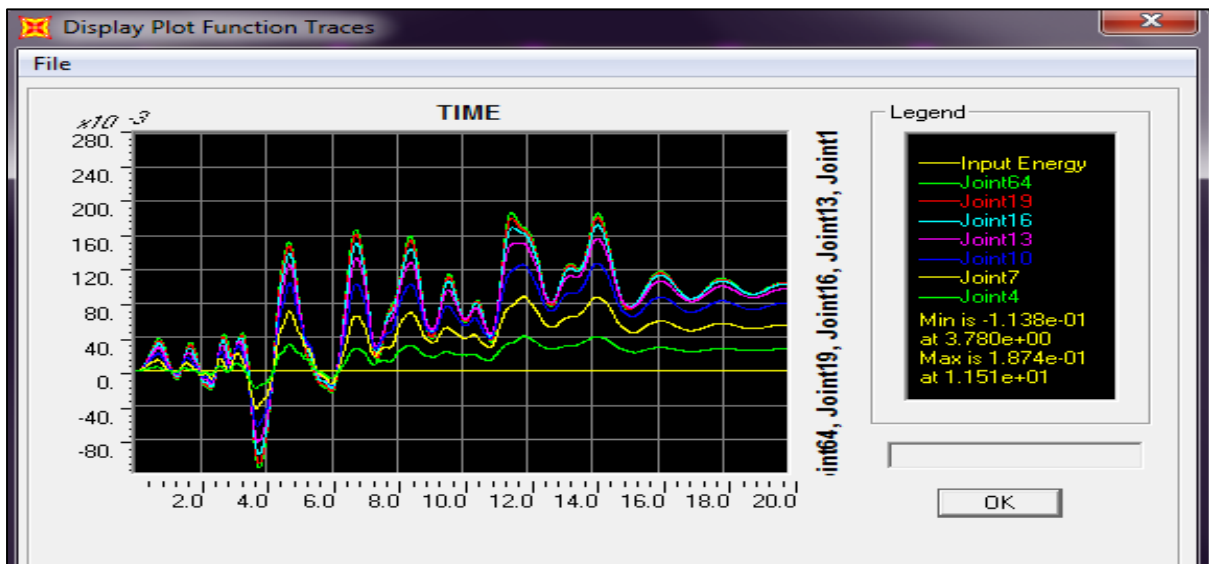
Σχήμα 32: Απεικόνιση παραμορφωμένου φορέα όταν υποβλήθηκε σε εδαφική επιτάχυνση 0.2g



Σχήμα 33: Γραφική απεικόνιση μετακινήσεων κόμβων για εδαφική επιτάχυνση 0.2g



Σχήμα 34: Απεικόνιση παραμορφωμένου φορέα όταν υποβλήθηκε σε εδαφική επιτάχυνση 0.25g



Σχήμα 35: Γραφική απεικόνιση μετακινήσεων κόμβων για εδαφική επιτάχυνση 0.25g

Πίνακας 17: Μέγιστες μετακινήσεις για χρονική περίοδο μελέτης t=0

Συγκεντρωτικός πίνακας με τις μέγιστες μετακινήσεις									
			Θγ -Περιορισμός Βλαβών	3/4 Θum Σοβαρές Βλάβες	Θum-Οιονεί Κατάρρευση				
Record 1	PGA 0.05	0.05597							
	PGA 0.10		0.1148						
	PGA 0.15							0.1947	
	PGA 0.20								
Record 2	PGA 0.05	0.03907							
	PGA 0.10								
	PGA 0.15		0.09847						
	PGA 0.20							0.2187	
Record 3	PGA 0.05	0.0399							
	PGA 0.10								
	PGA 0.15		0.1161						
	PGA 0.20						0.1483		
	PGA 0.25								0.1874
Record 4	PGA 0.05	0.04552							
	PGA 0.10								
	PGA 0.15		0.1332						
	PGA 0.20								0.1771
Record 5	PGA 0.05	0.04248							
	PGA 0.10								
	PGA 0.15								
	PGA 0.20		0.1332						
	PGA 0.25								
	PGA 0.30								
	PGA 0.35						0.1937		
	PGA 0.40								
	PGA 0.45								
PGA 0.50								0.2369	
Record 6	PGA 0.05	0.04506							
	PGA 0.10								
	PGA 0.15		0.1338						
	PGA 0.20								0.1727
		Mean	0.044666667	Mean	0.121595	Mean	0.171	Mean	0.197916667
		st.deviation	0.005589775	st.deviation	0.013098643	st.deviation	0.0227	st.deviation	0.022883066

Πίνακας 18: Μέγιστες μετακινήσεις για χρονική περίοδο μελέτης t=50

Συγκεντρωτικός πίνακας με τις μέγιστες μετακινήσεις									
				θγ-Περιορισμός βλαβών		3/4 Θum Σοβαρές βλάβες		Θum-Οιονεί Κατάρρευση	
Record 1	PGA 0.05	0.05587							
	PGA 0.10			0.118					
	PGA 0.15							0.2014	
	PGA 0.20								
Record 2	PGA 0.05	0.03927							
	PGA 0.10								
	PGA 0.15			0.1025					
	PGA 0.20							0.282	
Record 3	PGA 0.05	0.03991							
	PGA 0.10								
	PGA 0.15			0.1147					
	PGA 0.20					0.153			
	PGA 0.25								
	PGA 0.30							0.2417	
Record 4	PGA 0.05	0.04499							
	PGA 0.10								
	PGA 0.15			0.1324					
	PGA 0.20							0.179	
Record 5	PGA 0.05	0.04231							
	PGA 0.10								
	PGA 0.15								
	PGA 0.20			0.1288					
	PGA 0.25								
	PGA 0.30								
	PGA 0.35								
	PGA 0.40					0.2034			
	PGA 0.45								
	PGA 0.50							0.2276	
Record 6	PGA 0.05	0.04524							
	PGA 0.10								
	PGA 0.15			0.1331					
	PGA 0.20							0.1724	
		Mean	0.044598333	Mean	0.121583333	Mean	0.1782	Mean	0.21735
		st deviation	0.00605349	st.deviation	0.012050795	st.deviation	0.035638182	st.deviation	0.041528869

Πίνακας 19: Μέγιστες μετακινήσεις για χρονική περίοδο μελέτης t=75

Συγκεντρωτικός πίνακας με τις μέγιστες μετακινήσεις									
				Θγ -Περιορισμός βλαβών		3/4 Θυμ Σοβαρές βλάβες		Θυμ-Οιονεί Κατάρρευση	
Record 1	PGA 0.05	0.05651		0.1223				0.2063	
	PGA 0.10								
	PGA 0.15								
	PGA 0.20								
Record 2	PGA 0.05	0.03932						0.1184	
	PGA 0.10								
	PGA 0.15								
	PGA 0.20								
Record 3	PGA 0.05	0.04		0.1126				0.2372	
	PGA 0.10								
	PGA 0.15								
	PGA 0.20								
	PGA 0.25								
	PGA 0.30								
Record 4	PGA 0.05	0.04518		0.1319				0.1818	
	PGA 0.10								
	PGA 0.15								
	PGA 0.20								
Record 5	PGA 0.05	0.04224		0.128				0.2209	
	PGA 0.10								
	PGA 0.15								
	PGA 0.20								
	PGA 0.25								
	PGA 0.30								
	PGA 0.35								
	PGA 0.40								
	PGA 0.45								
	PGA 0.50								
Record 6	PGA 0.05	0.02614		0.1326				0.2014	
	PGA 0.10								
	PGA 0.15								
	PGA 0.20								
		Mean	0.041565	Mean	0.12548	Mean	0.198	Mean	0.194333333
		st.deviation	0.009821372	st.deviation	0.008280519	st.deviation	0.001414214	st.deviation	0.041615942

## 7.1 Δημιουργία και παρουσίαση καμπυλών τρωτότητας

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η μεθοδολογία βάσει της οποίας υπολογίστηκαν οι καμπύλες τρωτότητας για τον αρχικό φορέα ( $t=0$  χρόνια), χωρίς την επίδραση του φαινομένου της διάβρωσης και για τους φορείς όπου η διάβρωση έχει επηρεάσει την δυναμική απόκριση του κτηρίου ( $t=50$  και  $t=75$  χρόνια). Ο υπολογισμός των καμπυλών τρωτότητας έχουν γίνει σύμφωνα με τους δείκτες βλάβης που ορίστηκαν σύμφωνα με τον προηγούμενο καθορισμό των επιπέδων επιτελεστικότητας.

Όσο αφορά τις καμπύλες τρωτότητας, πρόκειται για τυπικές αθροιστικές λογαριθμικές συναρτήσεις πιθανότητας που περιγράφουν την πιθανότητα να φτάσει η να ξεπεράσει η κατασκευή ένα καθορισμένο επίπεδο βλάβης για δεδομένη παράμετρο καταπόνησης.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχουν οριστεί 4 δείκτες βλάβης, περιορισμένες βλάβες, σημαντικές βλάβες, οιονεί κατάρρευση και κατάρρευση. Οι δείκτες βλάβης έχουν τα εξής κριτήρια :

- Δείκτης «περιορισμού βλαβών»: Όσες μετακινήσεις είναι μικρότερες ή ίσες από την μέση τιμή της μετακίνησης που προκύπτει από την υπέρβαση της στάθμης επιτελεστικότητας περιορισμού βλαβών.
- Δείκτης «σημαντικών βλαβών»: Όσες μετακινήσεις είναι μικρότερες ή ίσες από την μέση τιμή της μετακίνησης που προκύπτει από την υπέρβαση της στάθμης επιτελεστικότητας σημαντικών βλαβών.
- Δείκτης «οιονεί κατάρρευση»: Όσες μετακινήσεις είναι μικρότερες ή ίσες από την μέση τιμή της μετακίνησης που προκύπτει από την υπέρβαση της στάθμης επιτελεστικότητας οιονεί κατάρρευση.
- Δείκτης «κατάρρευσης»: Όσες μετακινήσεις είναι μεγαλύτερες από την μέση τιμή των μετακινήσεων που προκύπτουν από την υπέρβαση της στάθμης επιτελεστικότητας οιονεί κατάρρευση.

Συνεπώς, η πιθανότητα υπο δεδομένη επιτάχυνση εδάφους (PGA) ένα κτήριο να βρίσκεται ή να υπερβαίνει τη στάθμη βλάβης δίνεται από τη σχέση (FEMA-NIBS 2003)

$$P[d_s \geq d_{si}/PGA] = \Phi \left[ \frac{1}{\beta_{d_{si}}} \ln \left( \frac{PGA}{PGA_{d_{si}}} \right) \right] \quad (7.1)$$

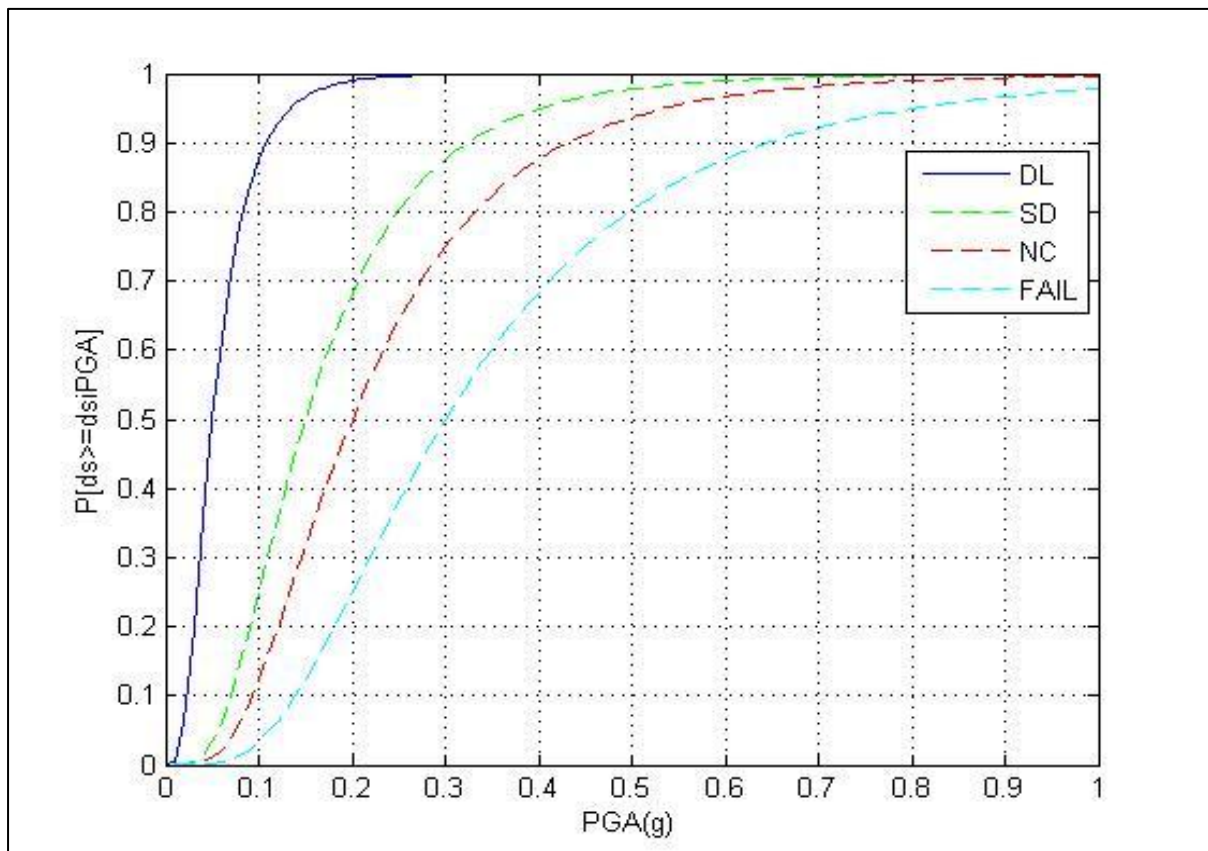
Όπου,

$\overline{PGA}, d_{si}$  = είναι η μέση τιμή της PGA για την οποία το κτήριο εισέρχεται στη στάθμη βλάβης  $d_{si}$

$\beta_{d_{si}}$  = είναι η τυπική απόκλιση του φυσικού λογαρίθμου της PGA που αντιστοιχεί στη στάθμη βλάβης  $d_{si}$

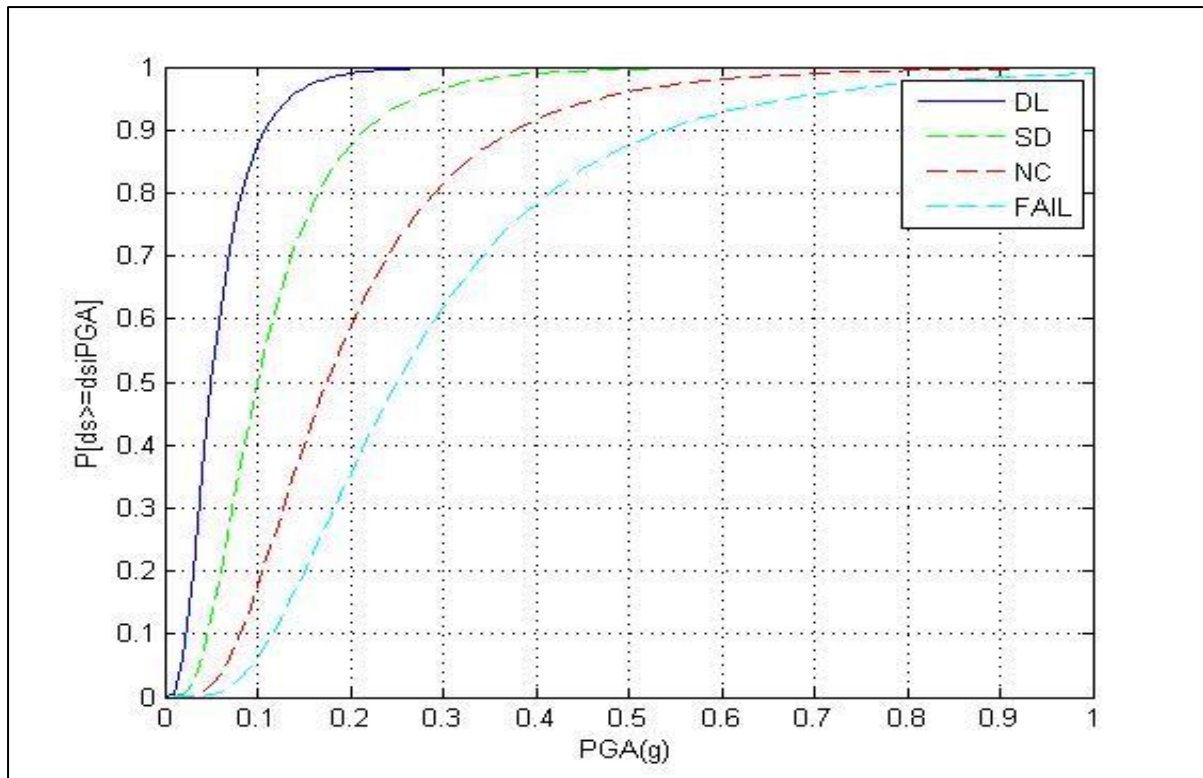
$\Phi$  = είναι η χαρακτηριστική συνάρτηση της κανονικής κατανομής

Στα σχήματα που ακολουθούν διακρίνονται οι καμπύλες τρωτότητας για τις περιόδους  $t=0$  χρόνια,  $t=50$  χρόνια και  $t=75$  χρόνια.

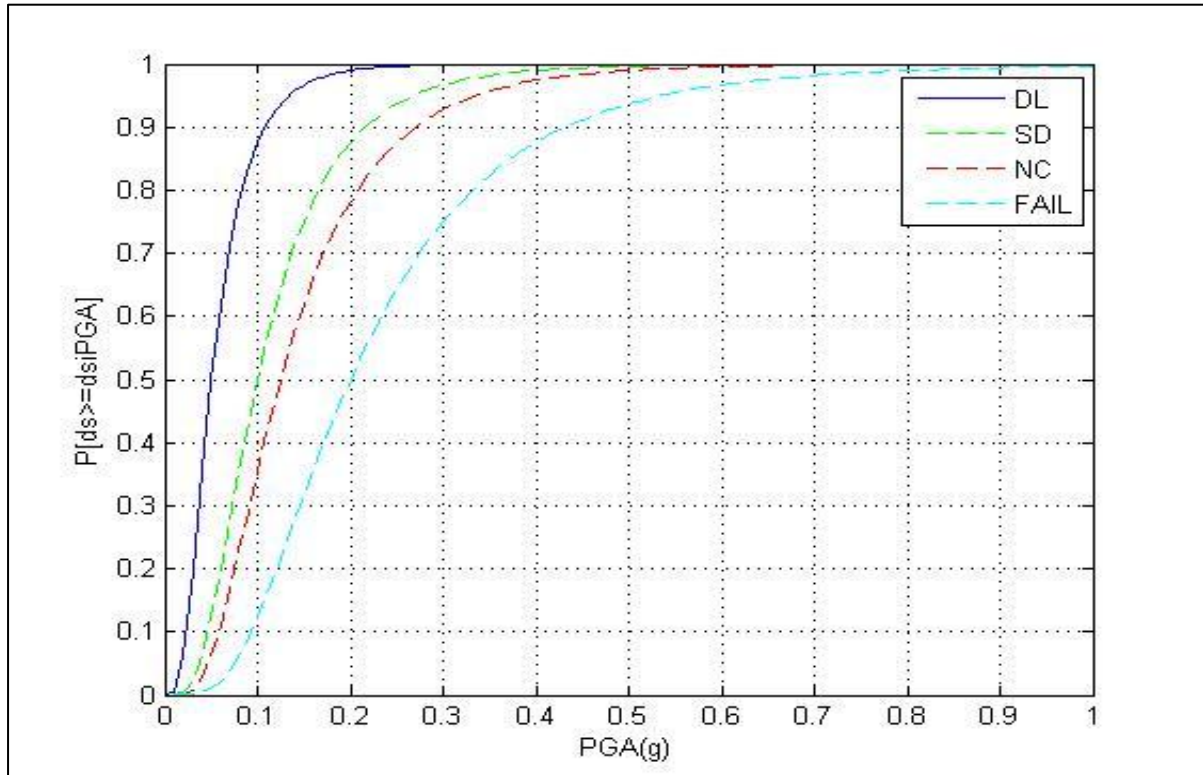


Σχήμα 36: Καμπύλη τρωτότητας για  $t=0$  χρόνια





Σχήμα 37: Καμπύλη τρωτότητας για  $t=50$  χρόνια



Σχήμα 38: Καμπύλη τρωτότητας για  $t=75$  χρόνια

## 8. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία όπως έγινε αντιληπτό εκτιμήθηκε η απόκριση ενός υφιστάμενου κτηρίου για την χρονικά μεταβαλλόμενη τρωτότητα του λόγω φαινομένου γήρανσης όπως η διάβρωση του οπλισμού.

- Διάβρωση

Κατά την εφαρμογή του πιθανολογικού μοντέλου διάβρωσης για να ληφθεί υπόψη η εισχώρηση των χλωριόντων στο σκυρόδεμα εφαρμόστηκε η διαδικασία υπολογισμού όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4. Κατά την εφαρμογή του, παρατηρείται ότι ο χρόνος έναρξης της διάβρωσης εκτιμάται να είναι τα 2.93 χρόνια. Η εκτίμηση αυτή έγινε σύμφωνα με τον καθορισμό ότι ο λόγος νερού προς τσιμέντου είναι ίσος με 0.55. Όσο μειώνεται ο λόγος νερού προς τσιμέντου ο χρόνος έναρξης της διάβρωσης αυξάνεται αφού οι παράγοντες που συμβάλλουν στον υπολογισμό της εξίσωσης προκύπτουν με βάση την αναλογία νερού προς τσιμέντου. Στην περίπτωση αυτή, ο λόγος νερού προς τσιμέντου κατά την δεκαετία του 70 ήταν πιο ψηλός σε σχέση με την σημερινή εποχή, με αποτέλεσμα η διάβρωση να αρχίζει από την νεαρή ηλικία της κατασκευής πράγμα που φαίνεται και στην μελέτη αυτή.

Παρατηρείται επίσης ότι η διάβρωση λόγω της διείσδυσης των χλωριόντων επηρεάζει σημαντικά την απόκριση της κατασκευής πράγμα το οποίο είναι λογικό αφού κατά την διάρκεια της ζωής των κτηρίων δεν παραμένουν ανεπηρέαστα από το χρόνο. Η διάβρωση οδηγεί σε μείωση της ενεργού διατομής του οπλισμού με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η δυναμική απόκριση όσο και η τρωτότητα του κτηρίου. Κατά το σενάριο ανάλυσης για χρονική περίοδο 50 χρόνια η διάμετρος του οπλισμού από Φ18 βρέθηκε να είναι ίση με Φ12,5 πράγμα το οποίο σε ποσοστό μείωσης οπλισμού για τα υποστυλώματα και τις δοκούς να ανέρχεται στο 51.47 % δηλαδή περισσότερο από την μισή επιφάνεια του οπλισμού χάνεται από την επίδραση της διάβρωσης. Όσο αφορά το σενάριο ανάλυσης για χρονική περίοδο 75 χρόνια η διάμετρος του οπλισμού από Φ18 γίνεται Φ9.6 με το ποσοστό μείωσης της επιφάνειας του οπλισμού να είναι της τάξης του 71.32 %. Η μείωση αυτή επηρεάζει σημαντικά την δυναμική απόκριση του κτηρίου με αποτέλεσμα μερικά μέλη να αστοχούν κατά την επιβολή των σεισμικών διεγέρσεων.

Όσο αφορά το επίπεδο διάβρωσης του οπλισμού θεωρήθηκε ψηλό με την εισαγωγή της παραμέτρου για τον ρυθμό διάβρωσης  $10 \text{ mA/cm}^2$  σύμφωνα με τον Stewart (2004), πράγμα το οποίο καθιστά τα αποτελέσματα αυξημένα για την μείωση της διαμέτρου του

οπλισμού σε σχέση με το αν χρησιμοποιούταν μικρό ή μέτριο επίπεδο διάβρωσης. Η θεώρηση αυτή βασίστηκε για την πλήρη αντιπροσώπευση των περιβαλλοντικών συνθηκών που επικρατούν στις παραλιακές πόλεις της Κύπρου. Εκτός από τον ρυθμό αύξησης της διάβρωσης, θεωρήθηκε επίσης ομοιόμορφη κατανομή απώλειας του οπλισμού σε όλη την επιφάνεια και το μήκος των δομικών στοιχείων με την υπόθεση γενικευμένης διάβρωσης όπου απαιτεί σύμφωνα με τον νόμο του Faraday την ομοιόμορφη εισχώρηση του φαινομένου με  $k=11.66\mu\text{m}/\text{year}$ . Η παραδοχή αυτή δεν αποδίδει με ρεαλιστικό τρόπο την εξέλιξη και τις συνέπειες του φαινομένου, αφού η διάβρωση έχει πιο τοπικό παρά ομοιόμορφα κατανομημένο χαρακτήρα, με αποτέλεσμα να δώσει δυσμενέστερα αποτελέσματα στην μείωση του οπλισμού και γενικότερα στην απόκριση του κτηρίου σχέση με την πραγματική εικόνα.

- Ορισμός πλαστικών αρθρώσεων

Κατά τον υπολογισμό των ροπών διαρροής που υπολογίστηκαν για τον προσδιορισμό των πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα των δομικών στοιχείων φαίνεται ότι με την πάροδο του χρόνου κάτω από την επίδραση της διάβρωσης οι τιμές μειώνονται. Το ποσοστό μείωσης κυρίως των υποστυλωμάτων, τα κρίσιμα δομικά στοιχεία του κτηρίου, φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί σύμφωνα με την αρχικές τιμές πριν την διάβρωση.

**Πίνακας 20: Ποσοστό μείωσης ροπών διαρροής για περίοδο μελέτης 50 χρόνια**

Ποσοστό μείωσης ροπών διαρροής για $t=50$ χρόνια		
Κόμβοι	Ακραία Υποστυλώματα	Μεσαία Υποστυλώματα
Κόμβος 1 (Βάση)	23.6%	5.8%
Κόμβος 2 (1 <sup>ος</sup> όροφος)	23.9%	5.9%
Κόμβος 3 (2 <sup>ος</sup> όροφος)	27.5%	8.3%
Κόμβος 4 (3 <sup>ος</sup> όροφος)	30.2%	10.6%
Κόμβος 5 (4 <sup>ος</sup> όροφος)	33.0%	20.8%
Κόμβος 6 (5 <sup>ος</sup> όροφος)	36.7%	28.4%
Κόμβος 7 (6 <sup>ος</sup> όροφος)	40.1%	34.0%
Κόμβος 8 (7 <sup>ος</sup> όροφος)	44.2%	40.5%

**Πίνακας 21: Ποσοστό μείωσης ροπών διαρροής για περίοδο μελέτης 75 χρόνια**

Ποσοστό μείωσης ροπών διαρροής για t=75 χρόνια		
Κόμβοι	Ακραία Υποστυλώματα	Μεσαία Υποστυλώματα
Κόμβος 1 (Βάση)	35.0%	9.5%
Κόμβος 2 (1 <sup>ος</sup> όροφος)	35.6%	9.6%
Κόμβος 3 (2 <sup>ος</sup> όροφος)	39.7%	13.6%
Κόμβος 4 (3 <sup>ος</sup> όροφος)	43.7%	21.1%
Κόμβος 5 (4 <sup>ος</sup> όροφος)	47.6%	32.2%
Κόμβος 6 (5 <sup>ος</sup> όροφος)	51.9%	41.1%
Κόμβος 7 (6 <sup>ος</sup> όροφος)	56.6%	48.3%
Κόμβος 8 (7 <sup>ος</sup> όροφος)	62.3%	57.2%

Συμπερασματικά λοιπόν, απο τους πιο πάνω πίνακες φαίνεται ότι με την μείωση της διαμέτρου του οπλισμού, λόγω της επίδρασης στην εισχώρηση των χλωριόντων στο σκυρόδεμα, οι ροπές διαρροής μειώνονται αισθητά. Όσο αυξάνεται η μείωση της διαμέτρου του οπλισμού μειώνονται και οι ροπές διαρροής με αποτέλεσμα τα δομικά μέλη να φτάνουν στο όριο διαρροής τους και να παραμορφώνεται πιο γρήγορα ο φορέας με αποτέλεσμα να οδηγηθεί μέχρι την τελική κατάρρευση του.

Στην περίπτωση όπου ορίστηκαν οι στάθμες επιτελεστικότητας με βάση την γωνία στροφής χορδής στην αστοχία και τη γωνία στροφής χορδής στη διαρροή κατά τους υπολογισμούς παρατηρήθηκε πολύ μικρή μείωση των τιμών για την περίοδο 50 χρόνων και αντίστοιχα για την περίοδο των 75 χρόνων αφού ο η μείωση αυτή εναπόκειται στην μείωση της διαμέτρου του οπλισμού. Η πολύ μικρή μείωση οφείλεται στο γεγονός ότι ο οπλισμός δεν παίζει καθοριστικό ρόλο στην εξίσωση υπολογισμού των γωνιών στροφής χορδής.

- Μετακινήσεις

Όσο αφορά τα αποτελέσματα των μετακινήσεων του κτηρίου και συγκρίνοντας τους πίνακες 17, 18, 19 παρατηρείται μικρή μείωση στις τιμές με την πάροδο του χρόνου. Αυτό ίσως να οφείλεται στο γεγονός ότι οι τιμές των γωνιών στροφής χορδής όπως ορίζονται στον Ευρωκώδικα 8 δεν μειώνονται σε μεγάλο βαθμό με την αβεβαιότητα ότι το πρόβλημα έγκειται στο γεγονός του μοντέλου του Ευρωκώδικα 8 αφού δεν λαμβάνει υπόψη την διάβρωση του οπλισμού στις σχέσεις που ορίζει. Επιπρόσθετα, ένας λόγος ο οποίος δεν δίνει αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα είναι το μικρό εύρος εδαφικών επιταχύνσεων στις

αναλύσεις. Θα μπορούσε κανείς να αναλύσει το προσομοίωμα σε πιο μεγάλο εύρος για να εξαχθούν πιο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα όσο αφορά τις μετακινήσεις του κτηρίου.

- Μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις

Με την πάροδο του χρόνου παρατηρείται επίσης ότι το κτήριο θα υποστεί σοβαρές βλάβες στα 50 και 75 χρόνια ζωής του για πιο μικρή εδαφική επιτάχυνση για 0.1g πράγμα το οποίο συμβαίνει πιο συχνά για τα δεδομένα της Κύπρου. Η περίοδος εμφάνισης του σεισμού με εδαφική επιτάχυνση 0.1g είναι τα 20 χρόνια πράγμα το οποίο βλέπει κανείς ότι στα υφιστάμενα κτήρια θα συμβούν αναπόφευκτα σοβαρές βλάβες, με αποτέλεσμα η ανάγκη για συντήρηση και ενίσχυση των μελών να κρίνεται αναγκαία. Χωρίς τις ενέργειες ενίσχυσης η κατασκευή δεν θα φέρει τα φορτία τα οποία έχει σχεδιαστεί με το πέρας των χρόνων και τους παράγοντες της διάβρωσης να επιδρούν στο οπλισμένο σκυρόδεμα με αποτέλεσμα η όλη κατασκευή να αστοχήσει. Βέβαια η ενίσχυση εναπόκειται στον ιδιοκτήτη ή στο φυσικό πρόσωπο που διαχειρίζεται ένα κτήριο, αφού ανάλογα με τις ζημιές που προκλήθηκαν κατά την διάρκεια ζωής του κτηρίου είναι οικονομικά εφικτό να γίνει. Σε περίπτωση, που το κόστος επισκευής είναι μεγαλύτερο από την ανοικοδόμηση της κατασκευής τότε η λύση αυτή κρίνεται αντιοικονομική με αποτέλεσμα να μην υπάρχει λύση στο πρόβλημα εκτός από την κατεδάφιση του. Στον πίνακα 22 που ακολουθεί φαίνονται οι μέσες τιμές των επιταχύνσεων ανάλογα με το δείκτη βλάβης για κάθε χρονική περίοδο από όπου παρατηρείται ότι με την πάροδο του χρόνου οι βλάβες που μπορεί να προκληθούν στο κτήριο είναι περισσότερες αφού για μικρότερες εδαφικές επιταχύνσεις οι στάθμες βλάβης ξεπερνούνται πιο γρήγορα.

**Πίνακας 22: Μέσες τιμές εδαφικών επιταχύνσεων ανάλογα με το δείκτη βλάβης για κάθε χρονική περίοδο**

Χρονική Περίοδος (Χρόνια)	Μέση τιμή εδαφικών επιταχύνσεων (PGA)			
	Δείκτης Βλάβης Περιορισμού Βλαβών (DL)	Δείκτης Βλάβης Σοβαρών Βλαβών (SD)	Δείκτης Βλάβης Οιονεί Κατάρρευση (NC)	Δείκτης Βλάβης Κατάρρευση (Fail)
t=0 Χρόνια	0.05	0.15	0.2	0.3
t=50 Χρόνια	0.05	0.1	0.175	0.25
t=75 Χρόνια	0.05	0.1	0.125	0.2

- Καμπύλες τρωτότητας

Όπως διακρίνουμε στις καμπύλες τρωτότητας για παράδειγμα για εδαφική επιτάχυνση σεισμού 0.1g η πιθανότητα το κτήριο μετά τα 50 χρόνια να ξεπεράσει τη στάθμη βλάβης «Σοβαρές Βλάβες» είναι περίπου 0.5 ενώ για να ξεπεράσει την στάθμη βλάβης «Οιονεί κατάρρευση» είναι 0.2 ενώ για την χρονική περίοδο 75 χρόνια η πιθανότητα το κτήριο να υπερβεί την στάθμη βλάβης οιονεί κατάρρευση φαίνεται να είναι μικρότερη με πιθανότητα 0.35. Επομένως όσο περνά ο χρόνος, αυξάνονται οι πιθανότητες υπέρβασης των σταθμών βλάβης με το συμπέρασμα ότι η διάβρωση επιδρά αρνητικά στην ευστάθεια του κτηρίου, και τον υποβιβασμό της ασφάλειας και της λειτουργικότητας του κτηρίου.

## Βιβλιογραφία

CEB Durable concrete structures, CEB Design Guide Bulletin d' Information No. 182, Lausanne (1989)

CEB-FIB Task Group 5.6 (2006). Model for Service Life Design, *federation internationale du beton* (fib)

Comité Euro-International du Béton, CEB-FIP Model Code 1990, Design Code, Thomas Telford, London 1993.

Choe, D.E., Gardoni, P., Rosowsky, D. and Haukaas, T. (2009). Seismic fragility estimates for reinforced concrete bridges subject to corrosion. *Structural Safety* 31: 275-283.

DuraCrete (1998): "Modelling of deterioration", BRITE EURAM, Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures, document BE95-1347/R4-5.

Eurocode 8, Design of Structures for earthquake resistance, Part 3, June 2005

FEMA-NIBS, 2003. Multi-hazard Loss Estimation Methodology - Earthquake Model: HAZUS@MH Technical Manual, Washington DC.

Fotopoulou, S.D., Karapetrou, S.T. and Pitilakis, K.D. (2012). Seismic vulnerability of RC buildings considering SSI and aging effects, *Proceedings of the 15WCEE International Conference*, Lisboa.

Ghosh, J. and Padgett, J.E. (2010). Aging considerations in the development of time-dependent seismic fragility curves. *Journal of Structural Engineering* 136(12), 1497-1511.

Neville, A.M., «Properties of concrete», Longman, Essex (1995a)

SAP2000: Integrated Software for Structural Analysis and Design. Computers and structures Inc., Berkeley, USA.

Stewart, M. (2004), Spatial variability of pitting corrosion and its influence on structural fragility and reliability of RC beams in flexure, *Structural Safety*, 26, 453– 470.

Tuutti, K., (1982) "Corrosion of Steel in Concrete", Swedish Cem. and Concr. Res. Inst., Fo4, Stockholm

Δέσμη Εργασίας 4, (2008). Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής, Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου, Σεισμική Τρωτότητα και Ενίσχυση Υφιστάμενων Ιδιωτικής Χρήσης Κτιρίων, Λεμεσός