



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**"Συγκριτική Διερεύνηση της επιρροής λικνιζόμενων προκατασκευασμένων τοιχείων με ανελαστική συμπεριφορά στη σεισμική απόκριση μονώροφων πλαισίων από Ω.Σ."**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κορωνίδης Α. Μάριος

Επιβλέπων: Ψυχάρης Ιωάννης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2017





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**"Συγκριτική Διερεύνηση της επιρροής λικνιζόμενων προκατασκευασμένων τοιχείων με ανελαστική συμπεριφορά στη σεισμική απόκριση μονώροφων πλαισίων από Ω.Σ."**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κορωνίδης Α. Μάριος

Επιβλέπων: Ψυχάρης Ιωάννης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 25<sup>η</sup> Ιουλίου 2017.

.....  
Ψυχάρης Ιωάννης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Μουζάκης Χαράλαμπος  
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ταφλαμπάς Ιωάννης  
Ε.Ε.ΔΙ.Π. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2017

.....  
Μάριος Α. Κορωνίδης

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π

Copyright © Μάριος Α. Κορωνίδης, 2017  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

# Περίληψη

---

Η αναγκαιότητα του περιορισμού των ζημιών έπειτα από ένα ισχυρό σεισμό, έχει δώσει κίνητρα για περαιτέρω διερεύνηση των λικνιζόμενων μελών στα οικοδομήματα. Τέτοια μέλη πλεονεκτούν σε σχέση με τα συμβατικά επειδή έχουν την δυνατότητα σε ένα σεισμό να παραμορφωθούν αποκολλώντας από την βάση τους, και μετά το πέρας του σεισμού να επιστρέψουν στην αρχική τους θέση με ελάχιστες ζημιές.

Η έρευνα για τα λικνιζόμενα μέλη δεν έχει φτάσει σε ικανοποιητικό επίπεδο και για αυτό τον λόγο υπάρχουν ελάχιστες εφαρμογές των λικνιζόμενων στοιχείων μέχρι σήμερα. Οι περισσότερες εκ των οποίων έγιναν σε υφιστάμενα (ή προκατασκευασμένα) κτήρια για βελτίωση της αντισεισμικής προστασίας, καθώς ανακουφίζουν τα υποστυλώματα. Τα λικνιζόμενα μέλη αποκτούν τη μέγιστη αντοχή τους στην αρχή της λικνιστικής κίνησης τους, οδηγώντας έτσι σε περιορισμό των σεισμικών δυνάμεων, οι οποίες μεταβιβάζονται στην υπόλοιπη κατασκευή, εν αντιστοιχία με τα μέλη που διαρρέουν.

Η παρούσα εργασία αφορά μέρος της διδακτορικής διατριβής του Βαγγέλη Αυγενάκη διδακτορικού φοιτητή του εργαστηρίου αντισεισμικής τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Μέσα από αυτή έχει αναπτυχθεί ένα μακρο-στοιχείο (macro-element) το οποίο αντικατοπτρίζει πλήρως τη συμπεριφορά ενός λικνιζόμενου στοιχείου λαμβάνοντας υπόψη τη παραμόρφωση του στοιχείου καθ' ύψος αλλά και την παραμορφωσιμότητα της βάσης.

Πιο συγκεκριμένα στη παρούσα εργασία θα ελεγχθεί κατά πόσο η ποιότητα του σκυροδέματος επηρεάζει τη συμπεριφορά μίας κατασκευής με λικνιζόμενο τοίχιο. Επιπλέον θα μελετηθεί η επιρροή του πλάτους του λικνιζόμενου τοιχείου σε ένα πλαίσιο. Η διερεύνηση γίνεται σε μονώροφο πλαίσιο ενός ανοίγματος τα οποία ενισχύονται με λικνιζόμενο τοίχιο στο μέσο. Τα υπό μελέτη πλαίσια είναι διαστασιολογημένα είτε με συντελεστή συμπεριφοράς 3 είτε με συντελεστή συμπεριφοράς 6, τα οποία τελευταία αναφέρονται σε υποδιαστασιολογημένη κατασκευή. Επίσης εξετάζεται η συμπεριφορά του πλαισίου σε δύο περιπτώσεις σεισμών σχεδιασμού. Ο πρώτος είναι ο σεισμός σχεδιασμού που αντιστοιχεί ζώνη σε επικινδυνότητας Z2 με εδαφική επιτάχυνση  $\alpha_g = 0.24g$ , ενώ ο δεύτερος αντιστοιχεί σε ζώνη σεισμική επικινδυνότητας Z3, με εδαφική επιτάχυνση  $\alpha_g = 0.36g$ .

Μέσα από τις προαναφερθείσες διερευνήσεις λήφθηκαν χρήσιμα συμπεράσματα όσο αφορά την επιρροή του τοιχείου στην γενική πλαστιμότητα του πλαισίου και στην τοπική πλαστιμότητα των υποστυλωμάτων πριν και μετά την τοποθέτηση του τοιχείου. Σημαντικά συμπεράσματα που απορρέουν είναι η μεταβολή των καμπυλοτήτων, των παραμορφώσεων και της παραμορφωμένης ζώνης στη βάση του τοιχείου τόσο όταν αυτό είναι ελαστικό όσο και όταν είναι ανελαστικό. Τέλος αναπόσπαστο κομμάτι της εργασίας αποτελεί η παρακολούθηση της μεταβλητότητας των εντατικών μεγεθών τόσο στα υποστυλώματα όσο και στην δοκό, ανάλογα με την ποιότητα σκυροδέματος και το πλάτος του λικνιζόμενου τοιχείου.

**Λέξεις κλειδιά:** *Λικνισμός, Μακρο-στοιχείο, Μη γραμμική ανάλυση, Ανελαστική απόκριση, Ανθεκτικότητα κατασκευής*



# Abstract

---

The necessity for the reduction of the losses, after an earthquake, has motivated society for further research in rocking elements. These elements have advantages compared to the conventional ones, because they are capable of deforming their shape by getting detached from their initial base. Once the earthquake stops, the rocking members can return to their initial position without significant damages.

The research regarding rocking elements has not reached a sufficient level and therefore there are limited numbers of applications of rocking members so far. Most of these applications were implemented for strengthening existing buildings by enhancing their ant seismic protection, as rocking members relieve the columns of the frame. The rocking members reach their maximum resistance levels, when the rocking motion initiates. Once they do so, they are reducing the seismic forces which are being transferred to the remaining construction, in correspondence on elements yielding.

This dissertation is referred to a part of the doctoral thesis of Evangelos Avgenakis, a PhD student of Laboratory of earthquake engineering in National Technical University of Athens. Through this thesis, a macro-element was developed showing the behavior of a rocking element and it is able to take into account the deformation along the height of the body and along the contact areas.

More specifically, this thesis examines whether the quality of the concrete influence the behavior of a construction with rocking elements. This thesis will also investigate whether the width of a rocking shear wall impacts the structure. The research is done on an one-bay one-storey frame which is reinforced with rocking wall in the middle. The investigated frames are designed with reduction factors either equal to 3 or 6, which the latter refers to an underestimate design. Moreover, the structure's response is examined in two different cases of earthquakes. The first is the designing spectrum corresponds to seismic zone Z2 with ground acceleration  $\alpha_g = 0.24g$  and the second designing spectrum corresponds to the seismic zone Z3 with ground acceleration  $\alpha_g = 0.36g$ .

Due to the above-mentioned investigations, significant conclusions have been taken concerning the influence of the rocking wall to the global ductility of the frame and to the local ductility of the columns before and after the placement of the rocking element. Some of the most important conclusions taken are associated with the alteration of curvatures, deformations and the compressed zone of the base of the rocking element either when it is elastic or inelastic. Finally, an indispensable part of the dissertation, concerns the observations of the changes of the forces, both for the columns and the beam depending to the quality of the concrete and the length of the rocking member.

**Keywords:** *Rocking, Macroelement, Nonlinear analysis, Inelastic response, Resilient structures*





# Ευχαριστίες

---

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου, σε όσους βοήθησαν κατά την διάρκεια της εκπόνησής της.

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα της πτυχιακής μου Καθηγητή κ. Ψυχάρη Ιωάννη για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου κατά την ανάθεση αυτής της άκρως ενδιαφέρουσας εργασίας, για την καθοδήγηση, καθώς και για την άψογη συνεργασία καθ' όλη τη διάρκεια, ως την περάτωσή της.

Επίσης ευχαριστώ ιδιαιτέρως τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Αυγενάκη Ευάγγελο για την πρόθυμη καθοδήγηση και στήριξη του, καθώς και για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου για την διαρκή στήριξη που μου πρόσφεραν κατά την διάρκεια των σπουδών μου.



# Πίνακας Περιεχομένων

---

## Κεφάλαιο 1:

<b>Εισαγωγή</b> .....	<b>15</b>
1.1 Γενική περιγραφή λικνιζόμενου στοιχείου .....	15
1.2 Συμπεριφορά λικνιζόμενου μέλους .....	16
1.3 Άκαμπτο λικνιζόμενο στοιχείο .....	17
1.4 Ελαστικό λικνιζόμενο στοιχείο .....	19
1.5 Ανελαστικό λικνιζόμενο στοιχείο .....	21
1.6 Παραδείγματα εφαρμογών .....	22
1.7 Τα πλαίσια που θα μελετηθούν .....	22
1.8 Μοντελοποίηση .....	22
1.9 Σειρά επιβολής φορτίων .....	23
1.10 Παραδοχές μοντελοποίησης .....	23

## Κεφάλαιο 2:

<b>Ελαστικές αναλύσεις μονώροφου πλαισίου χωρίς περιορισμό μετακινήσεων και παραμετροποιημένες ως προς την ποιότητα σκυροδέματος</b> .....	<b>25</b>
2.1 Εισαγωγή .....	25
2.2 Γεωμετρία .....	25
2.3 Παραμετροποίηση ως προς την ποιότητα σκυροδέματος του λικνιζόμενου τοιχείου με σταθερό μέτρο ελαστικότητας .....	27
2.3.1 Καμπύλες ικανότητας .....	27
2.3.2 Αντιδράσεις στη στήριξη του λικνιζόμενου τοιχείου .....	30
2.3.3 Εντατικά μεγέθη στα μέλη του πλαισίου .....	32
2.3.4 Διαγράμματα εντατικών μεγεθών .....	34
2.3.5 Συμπέρασμα από ελαστικές αναλύσεις με σταθερό μέτρο ελαστικότητας ...	44
2.4 Παραμετροποίηση ως προς την ποιότητα σκυροδέματος του λικνιζόμενου τοιχείου με μεταβλητό μέτρο ελαστικότητας σύμφωνα με τον κανονισμό σκυροδέματος .....	45
2.4.1 Καμπύλες ικανότητας .....	46
2.4.2 Συμπέρασμα του μέτρου ελαστικότητας ως προς την ακρίβεια των αναλύσεων	57
2.5 Συμπέρασματα από τις ελαστικές αναλύσεις .....	57

## Κεφάλαιο 3:

<b>Ανελαστικές αναλύσεις μονώροφου πλαισίου χωρίς περιορισμό μετακινήσεων και παραμετροποιημένες ως προς την ποιότητα σκυροδέματος</b> .....	<b>59</b>
3.1 Εισαγωγή .....	59
3.2 Γεωμετρία .....	59
3.3 Αποτελέσματα και παρατηρήσεις της ανάλυσης Pushover .....	60
3.3.1 Καμπύλες ικανότητας .....	60

3.3.2	Σειρά δημιουργίας πλαστικών αρθρώσεων .....	62
3.3.3	Αντιδράσεις στήριξης του λικνιζόμενου τοιχείου .....	65
3.3.4	Διγάρματα εντατικών μεγεθών των μελών του πλαισίου .....	68
3.3.5	Συμπεράσμα από ανελαστικές αναλύσεις .....	78

#### Κεφάλαιο 4:

<b>Παρουσίαση μεθόδου atc-40 .....</b>	<b>81</b>
4.1 Εισαγωγή στην μέθοδο atc-40.....	81
4.2 Ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα .....	83
4.3 Η μέθοδος atc-40 σε βήματα.....	87
4.4 Τροποποίηση της μεθόδου atc-40.....	90
4.4.1 Πρόβλημα σύγκλισης που εμφάνισε η μέθοδος atc-40 .....	90
4.4.2 Τρόπος επίλυσης του προβλήματος σύγκλισης.....	92

#### Κεφάλαιο 5:

<b>Ανελαστικές αναλύσεις μονώροφου πλαισίου υπό το σεισμό σχεδιασμού παραμετροποιημένες ως προς την ποιότητα σκυροδέματος του λικνιζόμενου τοιχείου ..</b>	<b>95</b>
5.1 Εισαγωγή .....	95
5.2 Γεωμετρία πλαισίου .....	96
5.3 Αναλύσεις για καινούρια πλαίσια διστασιολογημένα με συντελεστή συμπεριφοράς $q=3$ .....	97
5.3.1 Υπολογισμός στοχευόμενων μετατοπίσεων, ενεργού απόσβεσης και διγραμμικοποίηση της καμπύλης ικανότητας .....	97
5.3.2 Αντιδράσεις, καμπυλότητα και παραμόρφωση που αναπτύσσονται στη βάση του λικνιζόμενου τοιχείου λόγω σεισμού σχεδιασμού .....	104
5.3.3 Διερεύνηση επιρροής λικνιζόμενου τοιχείου στα υποστυλώματα, τη δοκό και στις πλαστιμότητες.....	107
5.3.4 Συμπεράσματα ως προς την ενίσχυση πλαισίου με αρχική πλαστιμότητα ίση με 3.....	113
5.4 Αναλύσεις για καινούρια πλαίσια διστασιολογημένα με συντελεστή συμπεριφοράς $q=6$ .....	114
5.4.1 Υπολογισμός στοχευόμενων μετατοπίσεων, ενεργού απόσβεσης και διγραμμικοποίηση της καμπύλης ικανότητας .....	115
5.4.2 Αντιδράσεις, καμπυλότητα και παραμόρφωση στη βάση του λικνιζόμενου τοιχείου λόγω σεισμού σχεδιασμού .....	121
5.4.3 Διερεύνηση επιρροής λικνιζόμενου τοιχείου στα υποστυλώματα, τη δοκό και στις πλαστιμότητες.....	124
5.4.4 Συμπεράσματα ως προς την ενίσχυση πλαισίου με αρχική πλαστιμότητα ίση με 6 .....	129
5.4.5 Συμπεράσματα ως προς την σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων που έγιναν για πλαίσια που διστασιολογηθήκαν με συντελεστή συμπεριφοράς 3 και 6.	130

5.5 Έλεγχος επιρροής ποιότητας σκυροδέματος του τοιχείου όταν στο πλαίσιο ο σεισμό που αντιστοιχεί σε ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Z3.....	138
--	-----

## Κεφάλαιο 6:

<b>Ανελαστικές αναλύσεις μονώροφου πλαισίου χωρίς περιορισμό μετακινήσεων και παραμετροποιημένες ως προς το πλάτος του τοιχείου .....</b>	<b>141</b>
6.1 Εισαγωγή.....	141
6.2 Γεωμετρία και παραδοχές .....	141
6.3 Καμπύλες ικανότητας.....	142
6.4 Σειρά δημιουργίας πλαστικών αρθρώσεων .....	145
6.5 Αντιδράσεις στη στήριξη του λικνιζόμενου τοιχείου.....	146
6.6 Διγάρματα εντατικών μεγεθών των μελών του πλαισίου .....	148
6.6.1 Ροπές υποστυλωμάτων .....	148
6.6.2 Τέμνουσες δυνάμεις υποστυλωμάτων .....	151
6.6.3 Αξονικές δυνάμεις υποστυλωμάτων .....	152
6.6.4 Ροπές κάμψης των δοκών .....	153
6.6.5 Τέμνουσες δυνάμεις των δοκών.....	155
6.6.6 Αξονικές δυνάμεις των δοκών .....	157
6.7 Συμπεράσματα .....	159

## Κεφάλαιο 7:

<b>Ανελαστικές αναλύσεις μονώροφου πλαισίου υπό το σεισμό σχεδιασμού παραμετροποιημένες ως προς την ποιότητα σκυροδέματος του λικνιζόμενου τοιχείου</b>	<b>161</b>
7.1 Εισαγωγή.....	161
7.2 Γεωμετρία και παραδοχές .....	162
7.3 Αναλύσεις για πλαίσια διστασιολογημένα με συντελεστή συμπεριφοράς $\eta=3$ ...	163
7.3.1 Υπολογισμός στοχευόμενων μετατοπίσεων, ενεργούς απόσβεσης και διγραμμικοποίηση της καμπύλης ικανότητας.....	164
7.3.2 Αντιδράσεις, καμπυλότητα και παραμόρφωση που αναπτύσσονται στη βάση του λικνιζόμενου τοιχείου λόγω σεισμού σχεδιασμού .....	168
7.3.3 Διερεύνηση επιρροής μήκους λικνιζόμενου τοιχείου στα υποστυλώματα, τη δοκό και στις πλαστιμότητες.....	171
7.3.4 Συμπεράσματα ως προς την επιρροή στο πλαίσιο αρχικής πλαστιμότητας 3 από την αύξηση του μήκους του λικνιζόμενου τοιχείου.....	178
7.4 Αναλύσεις για πλαίσια διστασιολογημένα με συντελεστή συμπεριφοράς $\eta=6$	180
7.4.1 Υπολογισμός στοχευόμενων μετατοπίσεων και ενεργούς απόσβεση καθώς και διγραμμικοποίηση της καμπύλης ικανότητας.....	180
7.4.2 Αντιδράσεις, καμπυλότητα και παραμόρφωση που αναπτύσσονται στη βάση του λικνιζόμενου τοιχείου λόγω σεισμού σχεδιασμού .....	184
7.4.3 Διερεύνηση επιρροής λικνιζόμενου τοιχείου στα υποστυλώματα, τη δοκό και στις πλαστιμότητες.....	185
7.4.4 Συμπεράσματα ως προς την επιρροή στο πλαίσιο αρχικής πλαστιμότητας 6 από την αύξηση του μήκους του λικνιζόμενου τοιχείου.....	191

7.4.5	Συμπεράσματα ως προς την σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων που έγιναν για καινούρια πλαίσια και παλαιά πλαίσια. ....	192
7.5	Αναλύσεις πλαισίων υπό το σεισμικό φάσμα σχεδιασμού της ζώνης σεισμικής επικινδυνότητας Z3 και σύγκριση με τα αποτελέσματα του σεισμού σχεδιασμού που αντιστοιχεί στη ζώνη Z2 .....	198
7.5.1	Υπολογισμός στοχευόμενων μετατοπίσεων .....	198
7.5.2	Επιρροή του μεγέθους του σεισμού ως προς την απόσβεση .....	203
7.5.3	Επιρροή της διαρροής των μελών με την αύξηση της εδαφικής επιτάχυνσης.....	204
7.5.4	Εντατικά μεγέθη υποστυλωμάτων.....	206
7.5.5	Επίδραση του μεγέθους του σεισμού στη τοπική πλαστιμότητα των υποστυλωμάτων .....	211
7.5.6	Επίδραση του μεγέθους του σεισμού στη γενική πλατιμότητα των πλαισίων.....	212
7.5.7	Επίδραση του μεγέθους του σεισμού στα εντατικά μεγέθη και στην κατανομή των τάσεων στη βάση του τοιχείου.....	215
7.5.8	Επίδραση του μεγέθους του σεισμού στα εντατικά μεγέθη της δοκού .....	221
7.5.9	Συμπεράσματα.....	225

## **Κεφάλαιο 8:**

<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>227</b>
8.1 Κύρια συμπεράσματα.....	227
8.2 Θέματα προς περαιτέρω μελέτη .....	233

<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>235</b>
---------------------------	------------

## **Παραρτήματα:**

<b>Κώδικες μοντελοποίηση πλαισίων στο Opensees .....</b>	<b>237</b>
Π1 Ανελαστικά πλαίσια χωρίς ενίσχυση .....	237
Π2 Ανελαστικά ενισχυμένα πλαίσια παραμετροποιημένα ως προς το πλάτος του λικνιζόμενου τοιχείου. ....	243

## Εισαγωγή

### 1.1 Γενική περιγραφή λικνιζόμενου στοιχείου

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί η ανάγκη βιωσιμότητας και ανθεκτικότητας των κατασκευών έπειτα από ένα σεισμικό γεγονός. Ιδανικό θα ήταν μετά από μία σημαντική διέγερση οι ζημιές που θα γίνονται να είναι μικρές και εύκολα επισκευάσιμες χωρίς μεγάλο κόστος. Έχουν εφαρμοστεί διάφορες μέθοδοι πάνω σε αυτή την ιδέα, για παράδειγμα η μετά-τάνυση κάποιων στοιχείων ώστε να μπορούν να αυτοεπαναφέρονται στην αρχική τους θέση (re-centering). Σε αυτή ακριβώς την φιλοσοφία κυμαίνεται και η εφαρμογή των λικνιζόμενων (rocking) τοιχείων. Τέτοια τοιχεία σε σημαντικούς σεισμούς, αποκολλώνται από την βάση τους κάνοντας λικνιστική κίνηση και μετά το πέρας του σεισμού αυτοεπαναφέρονται στην αρχική τους θέση χωρίς μεγάλες ζημιές.

Σημαντική εφαρμογή στο μέλλον που θα έχουν λικνιζόμενα τοιχεία θα είναι σε υφιστάμενες κατασκευές στις οποίες ο εκάστοτε αντισεισμικός κανονισμός δεν προέβλεπε τους υψηλούς συντελεστές αντισεισμικότητας που υπάρχουν σήμερα. Έτσι σε περίπτωση ενίσχυσης της κατασκευής με σκοπό να καλυφθούν οι απαιτήσεις του σύγχρονου αντισεισμικού κανονισμού, τα λικνιζόμενα τοιχεία πλεονεκτούν έναντι των συμβατικών για τον λόγο που αναφέρθηκε στην πιο πάνω παράγραφο.

Η προσδοκώμενη χρήση των λικνιζόμενων στοιχείων για επίτευξη σεισμικής μόνωσης των κατασκευών έχει επισημανθεί από πολιτικούς μηχανικούς από την δεκαετία του 70 (Housner 1963; Meek 1978). Υπήρξαν παρατηρήσεις μετά από καταστροφικούς σεισμούς όπως αυτούς στη Χιλή το 1960 και στη Μεγάλη Αλάσκα το 1964, ότι φαινομενικά ευάλωτες κατασκευές επιβίωσαν σχετικά αβλαβής από τους σεισμούς λόγω τυχαίας ύπαρξης λικνισμού.

Το φαινόμενο του λικνισμού χαρακτηρίζεται από έντονη μη γραμμικότητα, ευαισθησία και περιπλοκότητα. Διάφορα μοντέλα έχουν προταθεί από ερευνητές για να περιγράψουν την συμπεριφορά του λικνιζόμενου στοιχείου, παρόλα αυτά δεν επαληθεύτηκαν από πειράματα. Παλαιότερες έρευνες φανερώνουν ότι ο λικνισμός αυξάνει την θεμελιώδη ιδιοπερίοδο της κατασκευής, καθώς επίσης οι ιδιοπεριόδοι ανωτέρων ιδιομορφών έχουν μικρή επίδραση (Chopra and Yim 1985; Jennings and Bielak 1973). Όταν το στοιχείο προβεί σε λικνισμό, η δυσκαμψία της κατασκευής μειώνεται ξαφνικά και έχει ως αποτέλεσμα η κατασκευή να δέχεται μειωμένη τέμνουσα βάση και επιτάχυνση από το σεισμό.

Μέχρι σήμερα τα περισσότερα μοντέλα λικνισμού θεωρούσαν το στοιχείο ως απαρμόρφωτο, αλλά και μερικά που θεωρούσαν ότι παραμορφωνόταν καθ' ύψος

αγνοούσαν την παραμόρφωση στη βάση του στοιχείου. Αυτή η προσέγγιση είναι λανθασμένη αφού στη βάση υπάρχει έντονη μη γραμμικότητα τόσο στις στάσεις όσο και στην διατομή στην οποία δεν ισχύει η επιπεδότητα. Με άλλα λόγια η παραμορφωσιμότητα στη βάση είναι αυτή που καθορίζει με ακρίβεια τη συμπεριφορά του τοιχείου. Τα τελευταία χρόνια έχει προταθεί από τον Β. Αυγενάκη, υποψήφιο διδάκτορα του εργαστηρίου αντισεισμικής τεχνολογίας του Εθνικού Μέτσόβιου Πολυτεχνίου, ένα μακροστοιχείο το οποίο λαμβάνει υπόψη τόσο την μη γραμμικότητα καθ' ύψος αλλά και την παραμορφωσιμότητα στη βάση, με τα αποτελέσματα να είναι άκρως ικανοποιητικά.

## 1.2 Συμπεριφορά λικνιζόμενου μέλους

Όταν στο στοιχείο ασκηθεί μια αρκούντως μεγάλη πλευρική δύναμη, αυτό αποκολλάται από την βάση του. Στα μέλη με τέτοια έλλειψη περιορισμού ή με ύπαρξη μερικού περιορισμού στην βάση τους, αναπτύσσεται σε ένα μέρος αυτής θλίψη, ενώ η υπόλοιπη διατομή δεν δέχεται κάποιο εντατικό μέγεθος (στην πραγματικότητα αναπτύσσεται σε ένα πολύ μικρό τμήμα στη βάση του εφελκυσμός). Λόγω του λικνισμού η συμπεριφορά του μέλους (πχ τοιχείου) διαφοροποιείται από την συμπεριφορά των συμβατικών μελών όπου η δέσμευση στην βάση των τοιχείων προκαλεί την ανάπτυξη όλων των εντατικών μεγεθών σε όλο το μήκος της βάσης.

Η γενική ιδέα στην οποία βασίζεται το μακρο-στοιχείο<sup>1</sup> ως προτεινόμενη προσέγγιση είναι η ανάπτυξη συμπιεστικών τάσεων μόνο στο μήκος της διεπιφάνειας του στοιχείου με εξωτερικά στοιχεία (Εικόνα 1.1b) καθώς και η θεώρηση του ως ισοδύναμος πρόβολος μερικώς φορτιζόμενος στην ελεύθερη επιφάνεια του με την ίδια κατανομή τάσεων (Εικόνα 1.1c). Η μελέτη του πρόβολου αυτού επιτεύχθηκε επιλύοντας το πρόβλημα κατανομής των τάσεων μιας ημιάπειρης λωρίδας με τη μέθοδο που αναπτύχθηκε από τους Gaydon and Shepherd (1964)<sup>2</sup>. Η μέθοδος αυτή προβλέπει τον υπολογισμό της εσωτερικής κατανομής λόγω αυτοϊσορροπούμενων τάσεων στη διεπιφάνεια.

Ο καθορισμός των τάσεων στη διεπιφάνεια πραγματοποιείται αναλύοντας τις τάσεις που προέρχονται ξεχωριστά από αξονική δύναμη, τέμνουσα δύναμη και ροπή λαμβάνοντας υπόψη τη τεχνική θεωρία δοκών καθώς επίσης και προσθέτωντας τις τάσεις ίσες με τις αυτοϊσορροπούμενες ορθές και διατμητικές, με σκοπό τον προσδιορισμό των τάσεων που παράγονται στην ημιάπειρη λωρίδα. Οι αυτοϊσορροπούμενες αυτές τάσεις αναμένεται να επηρεάσουν τις τάσεις μόνο τοπικά κοντά στη φορτιζόμενη επιφάνεια της βάσης όπως θεωρεί η αρχή του Saint-Venant. Έτσι αν το στοιχείο έχει επαρκές ύψος, η επιρροή αυτή θεωρείται αμελητέα στην άλλη πλευρά του στοιχείου όπου εκεί υπάρχουν τάσεις που οφείλονται μόνο στα εσωτερικά εντατικά μεγέθη.

---

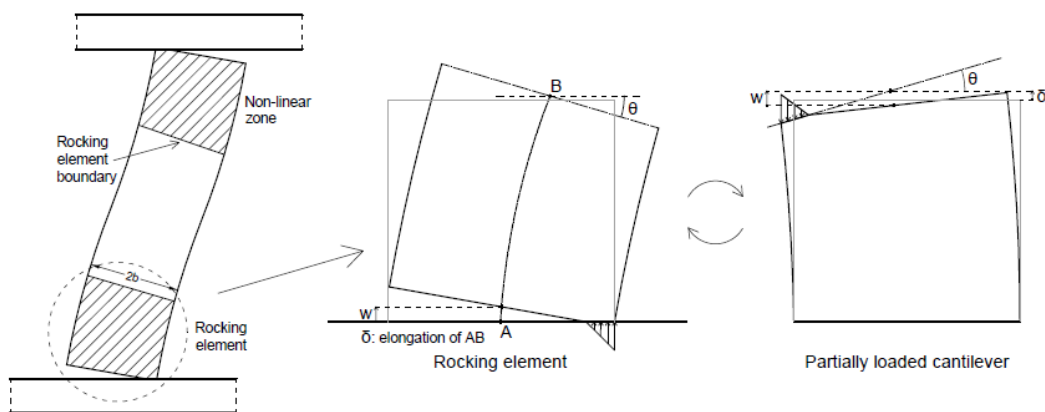
<sup>1</sup> Το μακρο-στοιχείο βασίστηκε στο του ραβδωτό πεπερασμένο στοιχείο δυνάμεων με γεωμετρική μη γραμμικότητα όπως διατυπώθηκε από τους Neuenhofer και Filippou (1998).

<sup>2</sup> F. Gaydon and W. Shepherd, "Generalized plane stress in a semi-infinite strip under arbitrary endload," in *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 281, pp. 184–206, The Royal Society, 1964.



Όσον αφορά την κατασκευή, αυτή κρίνεται εμφανώς πιο βιώσιμη και ανθεκτικότερη με την τοποθέτηση του λικνιζόμενου τοιχείου και οφείλεται στην προαναφερθείσα ικανότητα του τοιχείου να επανέρχεται στην αρχική του θέση με ελάχιστες βλάβες και παραμορφώσεις. Επιπρόσθετα, οι σεισμικές δυνάμεις που μεταβιβάζονται στα υπόλοιπα μέλη της κατασκευής έπειτα από μία σεισμική διέγερση περιορίζονται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το λικνιζόμενο μέλος αποκτά τη μέγιστη αντοχή του στην αρχή της λικνιστικής κίνησης του, δηλαδή αποκτά συμπεριφορά μέλους που φτάνει σε διαρροή χωρίς όμως να αναπτύσσονται μεγάλες παραμορφώσεις.

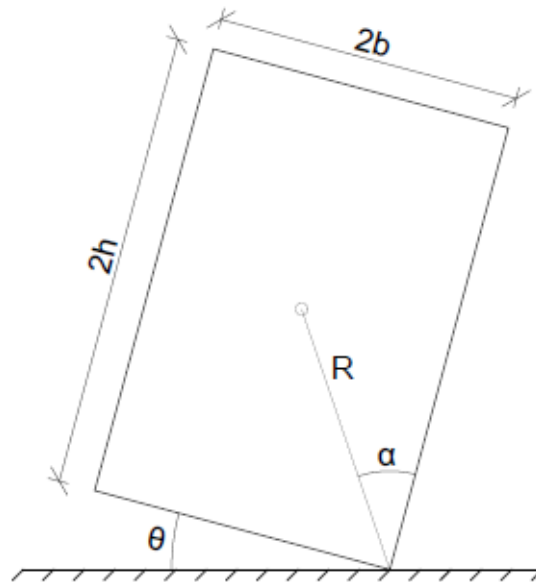
Η συμπεριφορά όμως του τοιχείου επηρεάζεται από τους περιορισμούς που υφίστανται κατά τη διάρκεια του σεισμικού γεγονότος. Αυτοί οι περιορισμοί μπορεί να είναι είτε προεντεταμένοι τένοντες, είτε περιβάλλοντα πλαίσια, οι οποίοι μεταφέρουν αξονική δύναμη η οποία είναι η δύναμη επαναφοράς του μέλους στην αρχική του θέση ισορροπίας καθώς και προκαλεί στο μέλος παραμόρφωση στη βάση του. Η παραμόρφωση αυτή της βάσης του τοιχείου είναι καθοριστικής σημασίας για την συμπεριφορά του πλαισίου και για αυτό γεννήθηκε η ανάγκη διερεύνησης της απόκρισης ενός λικνιζόμενου μέλους υπό συγκεκριμένη σεισμική διέγερση μεταβάλλοντας την ποιότητα σκυροδέματος που το απαρτίζει.



Εικόνα 1.1: Στοιχείο λικνισμού και αντιστοιχία μερικώς φορτιζόμενου προβόλου

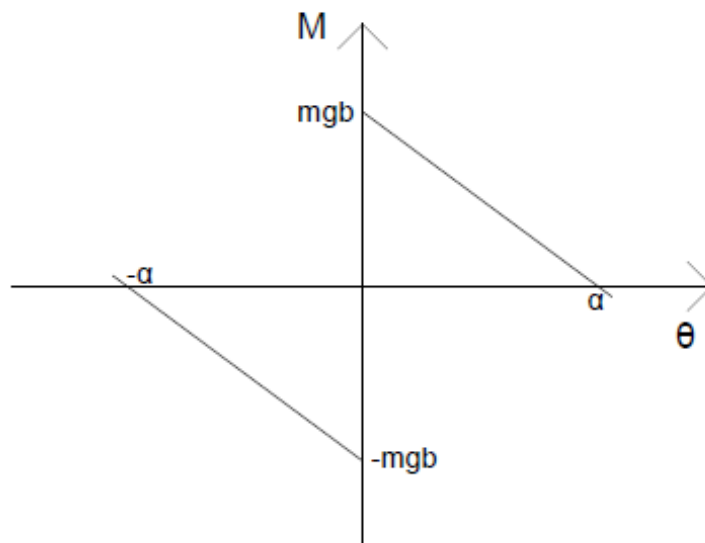
### 1.3 Άκαμπτο λικνιζόμενο στοιχείο

Όπως έχει προαναφερθεί μέχρι τώρα το λικνιζόμενο στοιχείο λαμβανόταν ως άκαμπτο μέλος στο οποίο αν ασκηθεί επαρκώς μεγάλη δύναμη θα στρίψει γύρω από την ακμή του όπως φαίνεται στην εικόνα 2.



Εικόνα 1.2: Μοντέλο άκαμπτου λικνιζόμενου στοιχείου

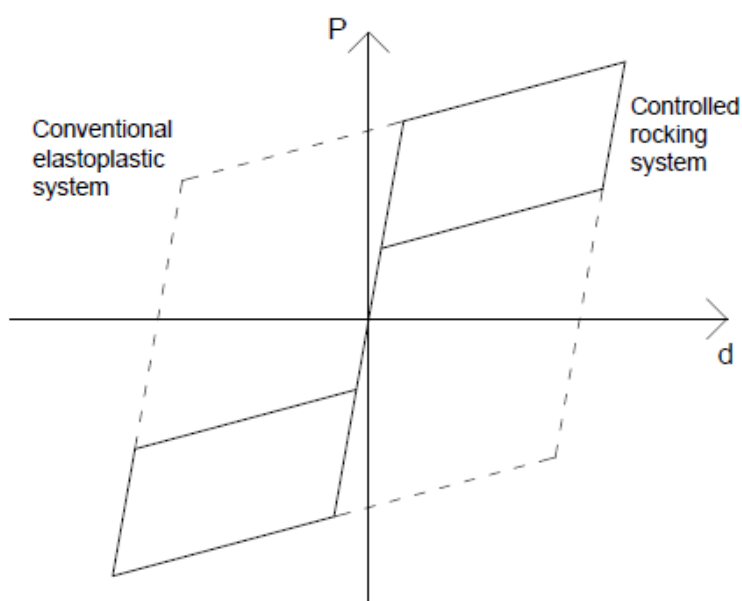
Όπως φαίνεται από την Εικόνα 1.3, το άκαμπτο λικνιζόμενο στοιχείο υπό το ίδιο βάρος του μόνο ισορροπεί για συγκεκριμένη ασκούμενη ροπή σε συγκεκριμένη γωνία στροφής. Αν όμως η γωνία αυτή ξεπεράσει την γωνία  $\alpha$  όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2, τότε το λικνιζόμενο άκαμπτο στοιχείο για να ισορροπήσει θα πρέπει να του ασκηθεί μια ροπή αντίθετης φοράς από την επιβαλλόμενη. Παρατηρείται δηλαδή μία μειούμενη ροπή αδρανείας ή αλλιώς μία πτωτική αντίσταση στην στροφή του μέλους όσο αυτό στρίβει. Όταν η στροφή γίνει ίση με την γωνία  $\alpha$ , η ροπή αδρανείας μηδενίζεται και από εκεί και πέρα γίνεται αρνητική.



Εικόνα 1.3: Σχέση Ροπής – Στροφής του λικνιζόμενου μέλους

Όπως γίνεται αντιληπτό το ίδιο βάρος δεν είναι ικανό να επαναφέρει το στοιχείο στην αρχική του θέση όταν σε αυτό ασκηθεί μια αρκετά μεγάλη ροπή. Μια τέτοια ανάγκη καλύπτεται θέτοντας το μέλος υπό διάφορους περιορισμούς. Συνήθως στα λικνιζόμενα μέλη τοποθετούνται προεντεταμένοι τένοντες έτσι ώστε να θέσουν το μέλος υπό πρόθλιψη και να το κάνουν πιο σταθερό και το αποτρέπει από την ανατροπή. Αυτό γιατί σε αντίθεση με το μέλος χωρίς προένταση όπου μετά από συγκεκριμένη στροφή το μέλος δεν μπορεί να φέρει άλλη δύναμη όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3, τα λικνιζόμενα μέλη υπό προένταση μετά τον λικνισμό μπορούν να παραλάβουν και άλλο φορτίο.

Έτσι μια τυπική καμπύλη φορτίου μετατόπισης ενός λικνιζόμενου στοιχείου υπό πρόθλιψη φαίνεται στην πιο κάτω εικόνα (1.4). Παρατηρείται επίσης ότι το εμβαδό του διαγράμματος δύναμης-μετατόπισης είναι μικρότερο από το αντίστοιχο που αναφέρεται σε συμβατικό μέλος. Σε αυτό οφείλεται το γεγονός ότι τα λικνιζόμενα στοιχεία συνοδεύονται συνήθως με αποσβεστήρες.



Εικόνα 1.4: Υστερητική καμπύλη για λικνιζόμενα στοιχεία υπό περιορισμό

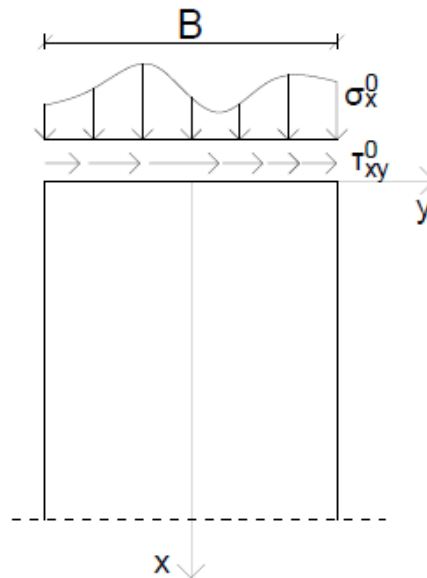
## 1.4 Ελαστικό λικνιζόμενο στοιχείο

Όπως έχει επισημανθεί, η θεώρηση του λικνιζόμενου στοιχείου ως άκαμπτου δεν αντικατοπτρίζει την πραγματικότητα. Έτσι μια ορθότερη προσέγγιση προτείνεται από τον διδακτορικό ερευνητή Β. Αυγενάκη είναι το μακρο-στοιχείο όπως περιγράφηκε στην ενότητα 1.2.

Για να υπολογιστούν οι μετατοπίσεις του προαναφερθέντος προβόλου λόγω της μερικής φόρτισης του στο ελεύθερο άκρο, πρέπει να προσδιοριστεί η χωρική κατανομή των τάσεων κοντά στη φορτισμένη επιφάνεια. Λόγω αυτής της κατανομής, προκαλείται επιμήκυνση εγκάρσια της διατομής από την οποία υπολογίζονται και οι παραμορφώσεις του στοιχείου. Οι ορθές και διατμητικές τάσεις που εφαρμόζονται στο ελεύθερο άκρο αποτελούνται από

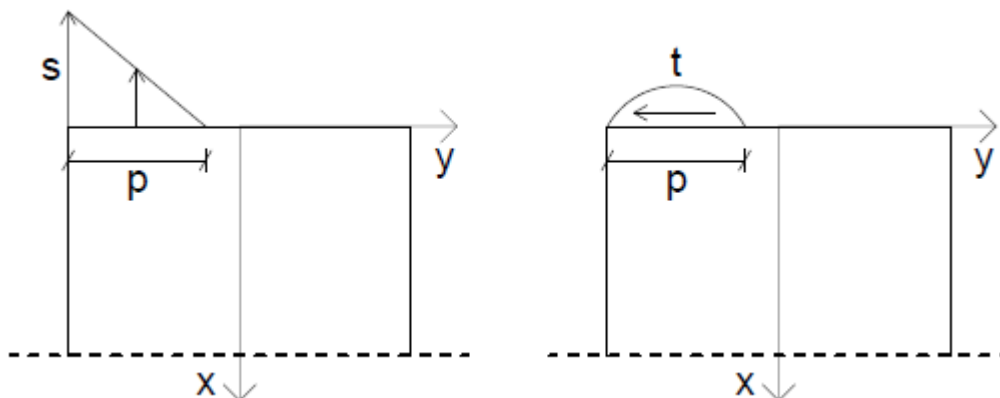
τις τάσεις λόγω των εσωτερικών εντατικών μεγεθών (αξονική δύναμη, τέμνουσα δύναμη και ροπή), καθώς επίσης και από τις αυτοίσορροπούμενες τάσεις.

Οι αυτοίσορροπούμενες τάσεις τείνουν να εξαλιφθούν κατά μήκος του προβόλου, όπως θεωρεί η αρχή του Saint-Venant. Έτσι χρησιμοποιείται η ημι-άπειρη λωρίδα αντί του προβόλου ως πιο εύκολη προσέγγιση, αφού το γενικό πρόβλημα αυτοίσορροπούμενων τάσεων για μία ημι-άπειρη λωρίδα πλάτους  $B = 2b$ , μπορεί να επιλυθεί χρησιμοποιώντας το κανονικοποιημένο πρόβλημα που αναφέρεται σε λωρίδα πλάτους  $b=1$  (Εικόνα 1.5).



Εικόνα 1.5: Κανονικοποιημένο πρόβλημα ημι-άπειρης λωρίδας

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.6, η ελεύθερη επιφάνεια του λικνιζόμενου στοιχείου φορτίζεται στο διάστημα  $[-1, p-1]$  που αντιστοιχεί δηλαδή στην περιοχή μήκους  $p$  της βάσης που έρχεται σε επαφή με εξωτερικό μέλος.



Εικόνα 1.6: Κατανομή ορθών( $s$ ) και διατμητικών( $t$ ) δυνάμεων της φορτιζόμενης επιφάνειας  $p$  για την ημι-άπειρη λωρίδα

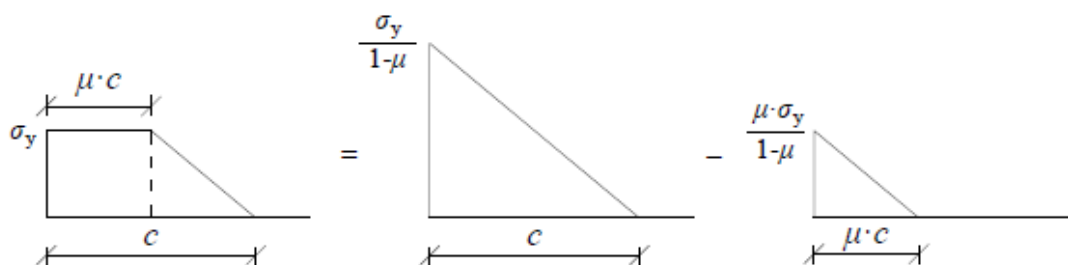
Επιπλέον η διατομή στην διεπιφάνεια του λικνιζόμενου στοιχείου με εξωτερικό μέλος παραμένει επίπεδη, εκτός από την περιοχή  $[-1, \rho-1]$  όπου η επιπεδότητα δεν ισχύει. Αν και πολύ κοντά στο επίπεδο προκαλεί προβλήματα στον υπολογισμό της αξονικής και στροφικής παραμόρφωσης, και για αυτό τον λόγο πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το κενό μεταξύ της φορτιζόμενης και της μη φορτιζόμενης επιφάνειας. Περισσότερες πληροφορίες υπάρχουν στην δημοσίευση: *Evangelos Avgenakis and Ioannis N. Psycharis, „A MACRO-ELEMENT FORMULATION FOR ROCKING FLEXIBLE BODIES WITH A DEFORMABLE BASE, 2016*

## 1.5 Ανελαστικό λικνιζόμενο στοιχείο

Είναι γνωστό ότι σε κανένα μέλος δεν εξασφαλίζεται η ελαστικότητα του σε μία σεισμική διέγερση, πόσο μάλλον σε ένα λικνιζόμενο στοιχείο που όπως αναφέρθηκε ασκούνται σε αυτό συγκεντρωμένες (σχεδόν) δυνάμεις. Είναι εμφανές ότι η ανελαστικότητα δεν αντικατοπτρίζει την πραγματικότητα και έτσι θα διερευνηθεί να αυτή επηρεάζει τη συμπεριφορά ενός λικνιζόμενου μέλους ή της κατασκευής που εντάσσεται. Το προτεινόμενο από τον ερευνητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου ανελαστικό λικνιζόμενο στοιχείο, είναι προέκταση του αντίστοιχου ελαστικού στοιχείου όπως περιγράφηκε στην πιο πάνω παράγραφο λαμβάνοντας όμως υπόψη την ανελαστικότητα των υλικών υπό μονοτονική φόρτιση.

Παρόλα αυτά, για να μπορεί να βασιστεί στο υπόβαθρο του ελαστικού λικνιζόμενου στοιχείου και να είναι δυνατή η υπέρθεση των τάσεων, θεωρήθηκε ότι η επιφάνεια μέσα στο ανελαστικό στοιχείο συμπεριφέρεται ελαστικά. Όμως αυτή η απλοποίηση δεν οδηγεί σε απόκλιση των αποτελεσμάτων από την πραγματικότητα αφού μόνο οι επιμηκύνσεις του ελαστικού μέρους της διατομής λαμβάνονται υπόψη.

Η τραπεζοειδή κατανομή των ορθών τάσεων που αναπτύσσεται σε ένα ανελαστικό λικνιζόμενο τοίχιο προκύπτει από τη διαφορά δύο τριγωνικών κατανομών όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.7. Επίσης οι διατμητικές τάσεις προκύπτουν παρομοίως από τη διαφορά δύο παραβολικών κατανομών και ο λόγος των μεγίστων τιμών των διατμητικών τάσεων είναι ίσος με τον λόγο των μεγίστων ορθών τάσεων.



Εικόνα 1.7: Κατανομή ορθών τάσεων που ασκούνται στη διεπιφάνεια λικνισμού μετά τη διαρροή και διάσπαση της σε δύο τριγωνικές κατανομές

## 1.6 Παραδείγματα εφαρμογών

Μέχρι σήμερα τα λικνιζόμενα μέλη έχουν κυρίως εφαρμογή σε γέφυρες όπως για παράδειγμα τη σιδηροδρομική γέφυρα του Rangitikei, όπως επίσης και σε προεντεταμένες κατασκευές για τις οποίες έχει παρουσιαστεί αναλυτική και πειραματική πρόοδος.

Άλλες εφαρμογές είναι σε βιομηχανικές καμινάδες στο Christchurch Airport (Sharpe and Skinner 1983) και στο Deadman's Point. Επιπλέον η γέφυρα στο Cromwell, Central Otago (Sharpe and Binney 1984), σχεδιάστηκε ειδικά για να λικνίζεται εξ' αρχής ενός σεισμικού γεγονότος για να απομονώνει τις κατασκευές από τις ισχυρές δονήσεις του εδάφους.

## 1.7 Τα πλαίσια που θα μελετηθούν

Το μονώροφο πλαίσιο που θα διερευνηθεί θα έχει διάσταση ύψους 4.5m και μήκους 5m. Σε αυτό το πλαίσιο θα ελεγχθεί η επίδραση του ανελαστικού λικνιζόμενου τοιχείου και η επίδραση του πλάτους του.

Στις αναλύσεις όπου ελέγχεται η επιρροή της ποιότητας σκυροδέματος του τοιχείου, το τοιχείο λαμβάνει σταθερές διαστάσεις, με πλάτος τοιχείου  $B_w=1.4\text{m}$  και πάχος  $W=0.20\text{m}$ . Στις αναλύσεις που ελέγχεται η επιρροή του πλάτους του λικνιζόμενου τοιχείου, τα πλάτη που ελέγχονται είναι 1m, 1.5m, 2m, 2.5m.

## 1.8 Μοντελοποίηση

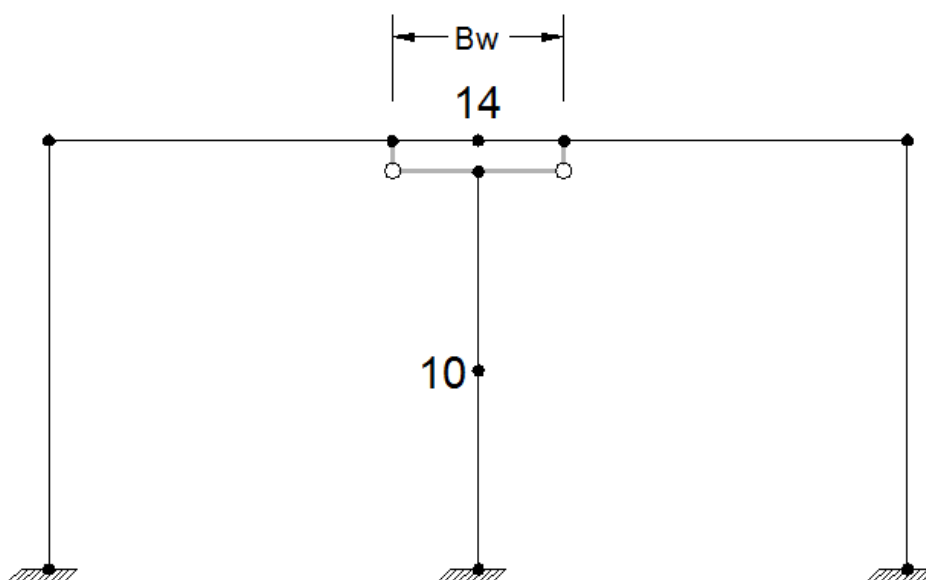
Οι διαστάσεις και οι οπλισμοί των υποστυλωμάτων υπολογίστηκαν θεωρώντας συντελεστές συμπεριφοράς 3 και 6. Τα πλαίσια που διαστασιολογήθηκαν με συντελεστή συμπεριφοράς 6 αντιπροσωπεύουν τα υποδιαστασιολογημένα πλαίσια στα οποία η ενίσχυση κρίνεται και σημαντικότερη. Η δοκός του πλαισίου θεωρήθηκε ελαστική καθώς στην πραγματικότητα θα ενισχυθεί κατάλληλα για να μην διαρρεύσει τουλάχιστο εκατέρωθεν του μέσου όπου και ασκούνται τα μεγαλύτερα εντατικά μεγέθη λόγω του τοιχείου.

Οι δοκοί και τα υποστυλώματα λήφθηκαν ως γραμμικά στοιχεία που αντικατοπτρίζουν το κέντρο βάρους τους. Όπως προαναφέρθηκε και το λικνιζόμενο στοιχείο λαμβάνεται ως γραμμικό στοιχείο (μακρο-στοιχείο) όμως η διαφορά σε αυτό είναι η ένωση του με την δοκό. Αφού το λικνιζόμενο τοιχείο είναι προκατασκευασμένο και δεν υπάρχει μονολιθικότητα με την δοκό, δεν εξασφαλίζεται η κοινή μετατόπιση και στροφή αλλά λικνίζεται πάνω σε αυτή. Αυτό σημαίνει ότι θα ήταν λανθασμένη προσέγγιση να θεωρηθεί ότι ενώνονται στο κέντρο βάρους της δοκού. Το τοιχείο λικνίζεται στην κάτω παρειά της δοκού και έτσι σε αυτό το σημείο γίνεται η ένωση. Για να επιτευχθεί αυτό, μοντελοποιείται το μισό ύψος της δοκού κάτω από τον κεντροβαρικό της άξονα με άκαμπτα και λεπτά στοιχεία. Αυτά τοποθετούνται εκατέρωθεν του μακρο-στοιχείου σε απόσταση ίσο με το μισό μήκος του τοιχείου και ενώνονται με την κορυφή του με άλλα άκαμπτα στοιχεία (Εικόνα 1.8). Έτσι λαμβάνεται υπόψη η επίδραση που έχει πάνω στη δοκό το μήκος του

λικνιζόμενου τοιχείου. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η ορθή μεταβίβαση των παραμορφώσεων και δυνάμεων από το τοιχείο στη δοκό και αντίστροφα.

Να σημειωθεί ότι η ένωση των άκαμπτων στοιχείων μεταξύ τους, γίνεται δεσμεύοντας τις μετακινήσεις και ελευθερώνοντας την στροφή. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζουμε την ομαλή στροφή του τοιχείου ανεξαρτήτως της στροφής της δοκού.

Επίσης όπως αναφέρθηκε το μακρο-στοιχείο που προτάθηκε έχει μία ελεύθερη βάση στην οποία λικνίζεται και μία δεσμευμένη άκρη. Το τοιχείο όμως λικνίζεται και στη βάση και στην κορυφή του, έτσι για την ορθή προσομοίωση του θα ενταχθούν στο προσομοίωμα 2 τέτοια στοιχεία που δεσμεύονται στο μέσο του ύψους, στον κόμβο 10 όπως φαίνεται στην εικόνα 1.8.



Εικόνα 1.8: Μοντελοποίηση λικνιζόμενου τοιχείου εντασσόμενο σε πλαίσιο

## 1.9 Σειρά επιβολής φορτίων

Ως προκατασκευασμένο μέλος, το τοιχείο δεν λαμβάνει την επίδραση όλων των στατικών φορτίων. Θεωρήθηκε ότι η ενίσχυση θα γίνει όταν στο απλό πλαίσιο υπάρχουν μόνο τα μόνιμα φορτία λόγω ιδίου βάρους. Έτσι στις αναλύσεις, λήφθηκε υπόψη ότι το μη ενισχυμένο πλαίσιο αναλαμβάνει τα μόνιμα φορτία και το ενισχυμένο λαμβάνει τα πρόσθετα μόνιμα, τα κινητά και τα σεισμικά φορτία με τους αντίστοιχους συντελεστές.

## 1.10 Παραδοχές μοντελοποίησης

Η διαστασιολόγηση των μελών έγινε λαμβάνοντας υπόψη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Z1 με εδαφική επιτάχυνση 0.16g.

Τα χαρακτηριστικά του σεισμού σχεδιασμού που επιλέγηκαν σε όλες τις αναλύσεις είναι:

Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας: Z2, Z3

Κατηγορία εδάφους: B

Κατηγορία Σπουδαιότητας:  $\gamma_i = 1$

Ιξώδης απόσβεση:  $\zeta=5\%$

Επιπλέον παραδοχές που λήφθηκαν στις αναλύσεις είναι ότι τα στατικά φορτία της δοκού είναι 45KN/m και συμπεριλαμβάνουν τόσο τα μόνιμα όσο και τα κινητά φορτία για τον σεισμικό συνδυασμό. Το πάχος της πλάκας επιλέγηκε στα 18cm, τα πρόσθετα μόνιμα 1.5KN/m, τα κινητά φορτία 3KN/m<sup>2</sup> και η απόσταση μεταξύ των πλαισίων 6m. Έτσι προκύπτουν τα ακόλουθα φορτία:

Ίδιο βάρος πλάκας:  $g_{\pi} = 22.5\text{KN/m}$

Ίδιο βάρος δοκού :  $g_{\delta} = 3.1\text{KN/m}$

Πρόσθετα μόνιμα :  $g_{\pi\rho} = 7.5\text{KN/m}$

Φορτίο λόγω κινητών:  $q_k = 3\text{KN/m}$

Εφαρμόζοντας τον σεισμικό συνδυασμός G+0.3Q+E προκύπτει το συνολικό καταναμεμημένο σεισμικό φορτίο της δοκού ίσο με 45KN/m.

Από το συνολικό φορτίο αυτό τα φορτία που ασκούνται στο μη ενισχυμένο πλαίσιο είναι:

$$P_{\text{μη ενισχυμένου}} = g_{\pi} + g_{\delta} = 25.6\text{KN/m}$$

$$P_{\text{ενισχυμένου}} = g_{\pi\rho} + 0,3q_k = 19.4\text{KN/m}$$

Επίσης ως μόνιμο φορτίο λαμβάνεται και το βάρος του λικνιζόμενου τοιχείου, το οποίο ασκείται στον κόμβο 14 (Εικόνα 1.8) και μεταφέρεται εξολοκλήρου στο τοιχείο μέσω των άκαμπτων δοκών όπως θα επισημανθεί πιο κάτω. Γίνεται επίσης η παραδοχή άπειρης δυστένειας της δοκού και έτσι οι μετακινήσεις του κόμβου 14 αντιστοιχούν και στις μετακινήσεις κορυφής των υποστυλωμάτων και του τοιχείου. Για αυτό τον λόγο όλες οι μετατοπίσεις αναφέρονται στον κόμβο 14.

Για τις ανελαστικές αναλύσεις τα υποστυλώματα και η δοκός έχουν ποιότητα σκυροδέματος C30, και το σκυρόδεμα του λικνιζόμενου τοιχείου είτε είναι ελαστικό, είτε έχει συγκεκριμένη ποιότητα σκυροδέματος (C20, C25, C30, C35, C40, C45, C50).



# Κεφάλαιο 2

---

## Ελαστικές αναλύσεις μονώροφου πλαισίου χωρίς περιορισμό μετακινήσεων και παραμετροποιημένες ως προς την ποιότητα σκυροδέματος

### 2.1 Εισαγωγή

Σκοπός του κεφαλαίου είναι να διερευνηθεί πως επηρεάζει η ποιότητα του σκυροδέματος γενικά την αντοχή του πλαισίου, τις μετατοπίσεις και όλα τα εντατικά μεγέθη, για επαρκώς αναπτυσσόμενη μετακίνηση.

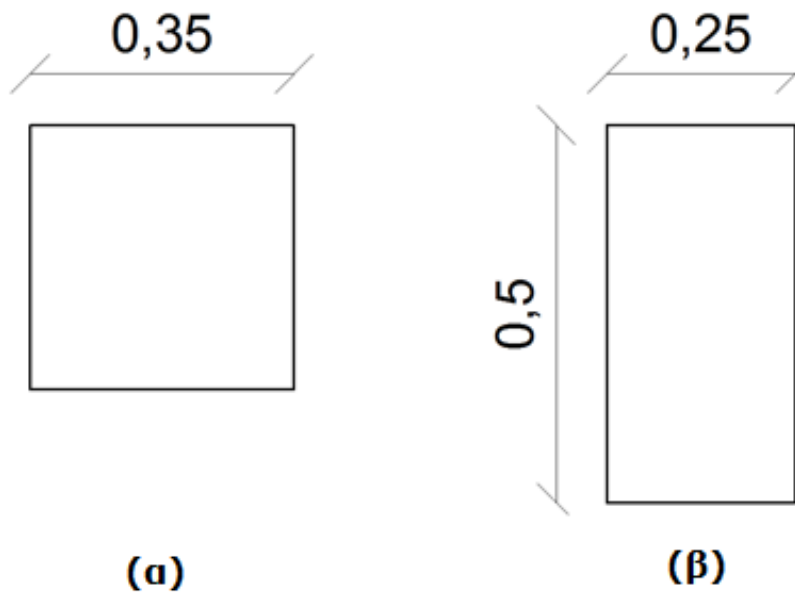
Όλα τα μέλη του πλαισίου πλην του λικνιζόμενου τοιχείου εντάσσονται σε αυτό ως ελαστικά, ώστε να δημιουργηθεί μία πρώτη εικόνα ως προς την συμπεριφορά του λικνιζόμενου τοιχείου στο πλαίσιο αν αυτό κατασκευαστεί από διάφορες ποιότητες σκυροδέματος.

Μελετήθηκε πλαίσιο ενός ανοίγματος με και χωρίς λικνιζόμενο τοιχείο στο μέσο, με το τοιχείο να είναι είτε ελαστικό είτε να έχει συγκεκριμένη ποιότητα σκυροδέματος ( C20, C25, C30, C35, C40, C45, C50).

### 2.2 Γεωμετρία

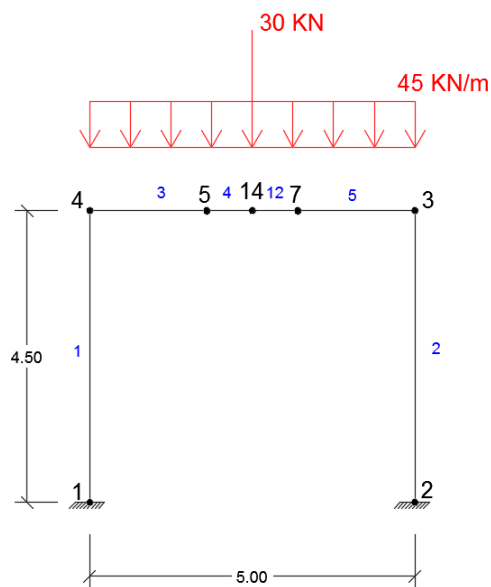
Επιλύεται μονώροφο πλαίσιο ανοίγματος 5 μέτρων και ύψους 4.5 μέτρων. Η διατομή του λικνιζόμενου στοιχείου που τοποθετείται στο μέσο είναι: Πλάτος  $B = 1.4\text{m}$   
Πάχος  $W = 0.2\text{m}$

Η διατομές των υποστυλωμάτων και των δοκών φαίνονται στο πιο κάτω σχήμα:

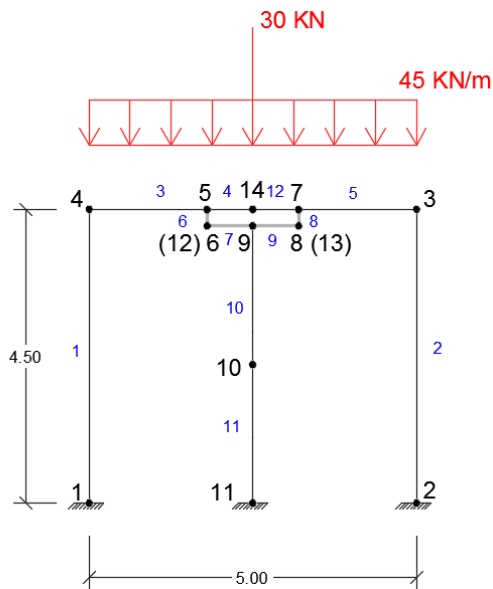


Εικόνα 2.1: Διαστάσεις σε m των διατομών (α) υποστυλωμάτων, (β) δοκών

Για στατικά φορτία επιλέχθηκε κατανεμημένο φορτίο δοκού ίσο με 45kN/m από το οποίο το 55% αναλαμβάνεται αμιγώς από το μη ενισχυμένο και το υπόλοιπο 45 από το ενισχυμένο πλαίσιο (βλέπε παρ. 1.9, 1.10). Επίσης εφαρμόζεται στον κόμβο 14 συγκεντρωμένο φορτίο που αντιστοιχεί στο βάρος του τοιχείου, το οποίο μεταφέρεται μέσω των άκαμπτων δοκών στο λικνιζόμενο στοιχείο.



Εικόνα 2.2: Γεωμετρία και μόνιμα φορτία πλαισίου χωρίς λικνιζόμενο στοιχείο

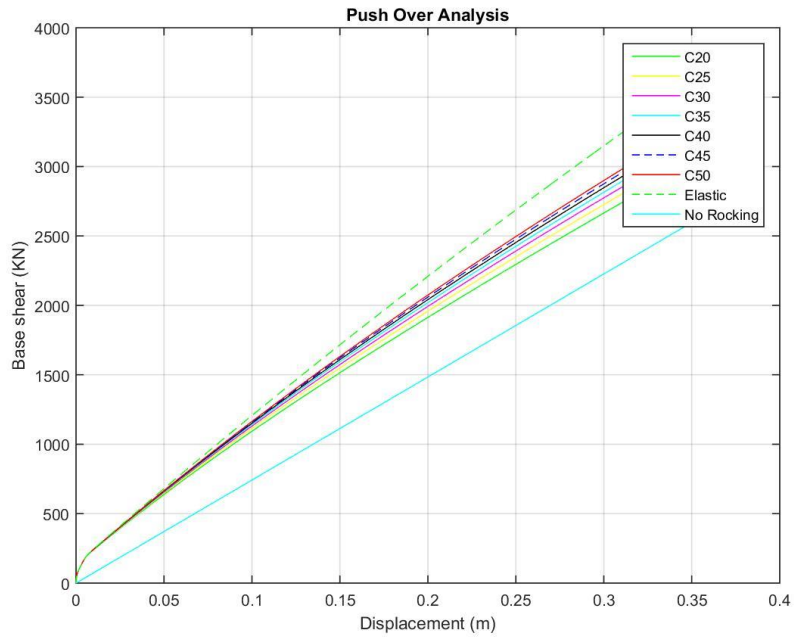


Εικόνα 2.3: Γεωμετρία και μόνιμα φορτία πλαισίου με λικνιζόμενο στοιχείο

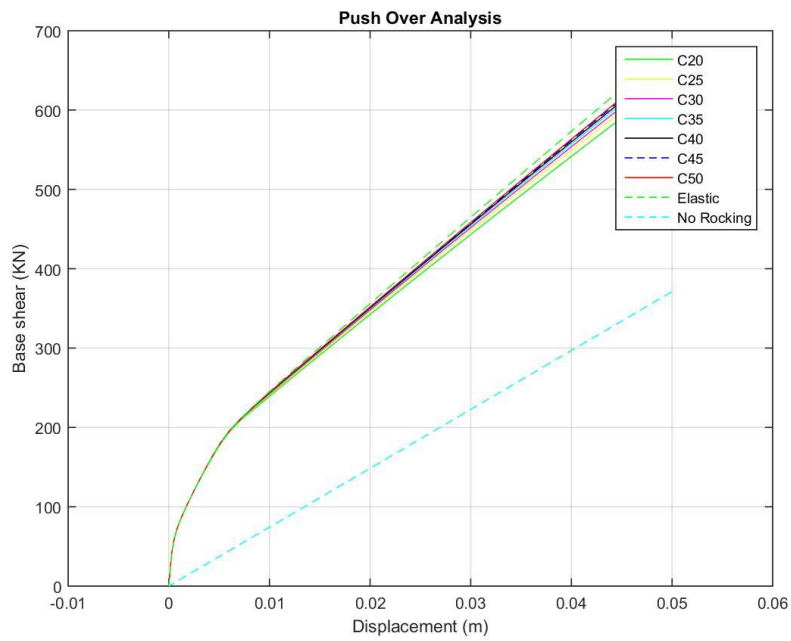
## 2.3 Παραμετροποίηση ως προς την ποιότητα σκυροδέματος του λικνιζόμενου τοιχείου με σταθερό μέτρο ελαστικότητας

### 2.3.1 Καμπύλες ικανότητας

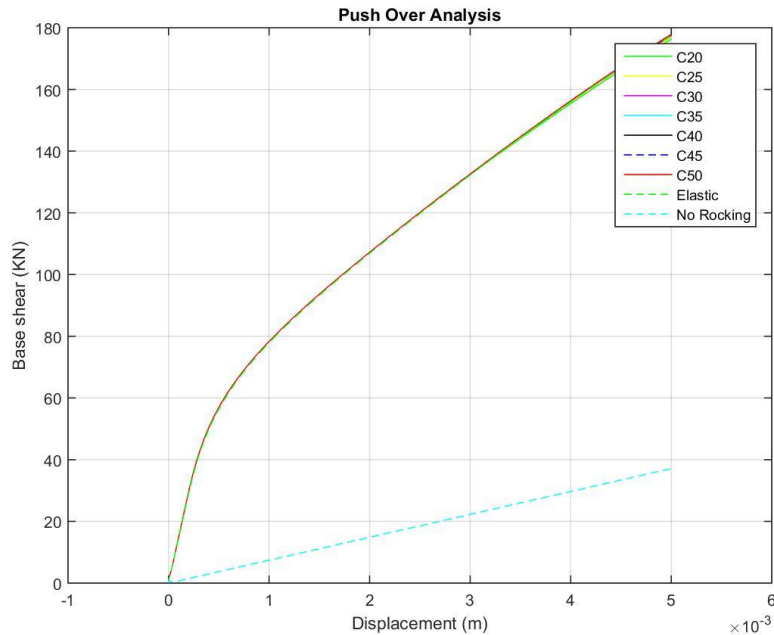
Παρουσιάζονται οι καμπύλες ικανότητας του πλαισίου χωρίς κάποιο περιορισμό μετακινήσεων. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα πλαισίων με ελαστικό τοιχείο είναι λίγο διαφορετικά για μεγάλες μετατοπίσεις λόγω διαφορετικής μόρφωσης του στοιχείου. Πιο σωστή προσέγγιση του ελαστικού στοιχείου θα ήταν να θεωρηθεί το τοιχείο ως ανελαστικό αλλά αυξημένη θλιπτική αντοχή.



Διάγραμμα 2.3: Καμπύλη ικανότητας



Διάγραμμα 2.2: Καμπύλη ικανότητας (μεγέθυνση) μέχρι μετατόπιση 50mm



**Διάγραμμα 2.3: Καμπύλη ικανότητας (μεγέθυνση) μέχρι μετατόπιση 5mm**

Από τις πιο πάνω γραφικές γίνεται εμφανές ότι αρχικά το τοίχειο αυξάνει πολύ την δυσκαμψία της κατασκευής. Από την αρχή, ακολουθείται μία μη γραμμική μεταβολή της μετατόπισης συναρτήσε του επιβαλλόμενου φορτίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο λικνισμός του τοιχείου προκαλεί μεταβολή της δυσκαμψίας του, και συγκεκριμένα στην ανάλυση Pushover όσο αυξάνει η μετατόπιση τόσο μειώνεται η δυσκαμψία του.

Γίνεται επίσης αντιληπτό από το Διάγραμμα 2.2 ότι για πολύ μικρή αναπτυγμένη μετατόπιση του τοιχείου (και της κατασκευής) η δυσκαμψία του μειώνεται πολύ αλλά πέρα από αυτό παραμένει σταθερή, με μικρή μείωση σε μεγάλες μετακινήσεις λόγω φαινομένων δευτέρας τάξεως.

Οι πιο πάνω παρατηρήσεις επαληθεύουν τη προαναφερθείσα θέση ότι το λικνιζόμενο τοίχειο μειώνει την ένταση των υποστυλωμάτων αφού αναλαμβάνει μεγάλο μέρος των εντατικών μεγεθών βάσης. Η ποσοτική παρατήρηση όσο αφορά τη μείωση των εντατικών μεγεθών θα παρουσιαστεί σε επόμενα διαγράμματα.

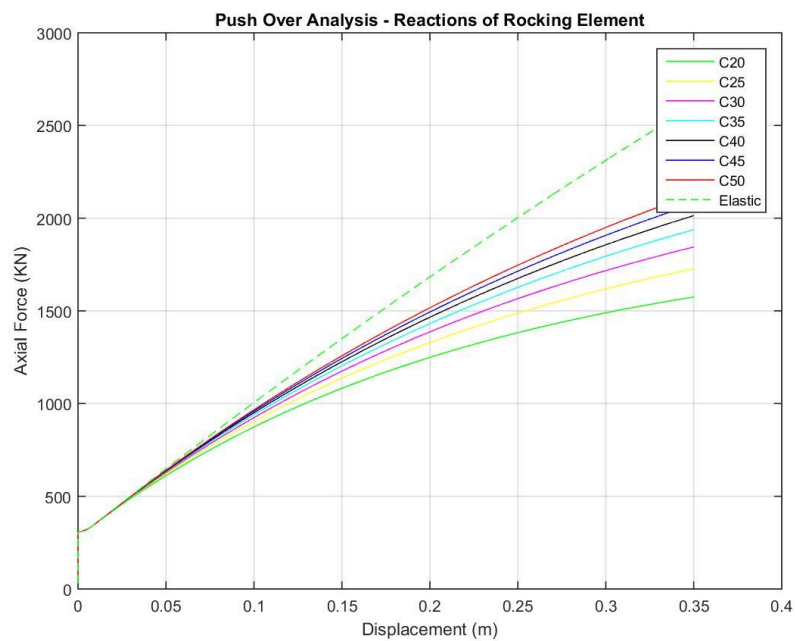
Σημαντική πρώτη παρατήρηση όσο αφορά την ποιότητα του σκυροδέματος είναι ότι αυτή επηρεάζει την καμπύλη ικανότητας για αρκετά μεγάλες μετατοπίσεις, οι οποίες δεν θα αναπτυχθούν στην κατασκευή. Φυσικά σημασία έχει για τις διάφορες ποιότητες σκυροδέματος, τι μετατοπίσεις, πλαστιμότητες θα αναπτυχθούν σε τοπικό και καθολικό επίπεδο όταν στην κατασκευή ασκηθεί ο σεισμός σχεδιασμού. Αυτό θα αναπτυχθεί σε επόμενα κεφάλαια.

Ακόμη, από τις καμπύλες ικανότητας μπορεί να γίνει αντιληπτό ότι ακόμη και για μικρές μετατοπίσεις το σκυρόδεμα του τοιχείου αρχίζει να διαρρέει, αφού για την συγκεκριμένη

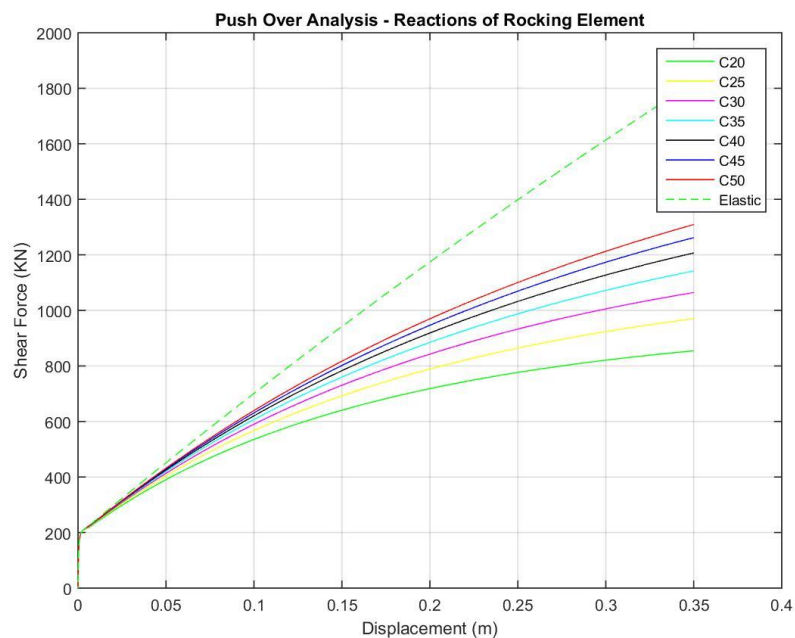
ανάλυση όπως φαίνεται από το διάγραμμα 2.2 οι καμπύλες διαφορετικής ποιότητας σκυροδέματος διακρίνονται για μετατόπιση μεγαλύτερης του 1cm.

### 2.3.2 Αντιδράσεις στη στήριξη του λικνιζόμενου τοιχείου

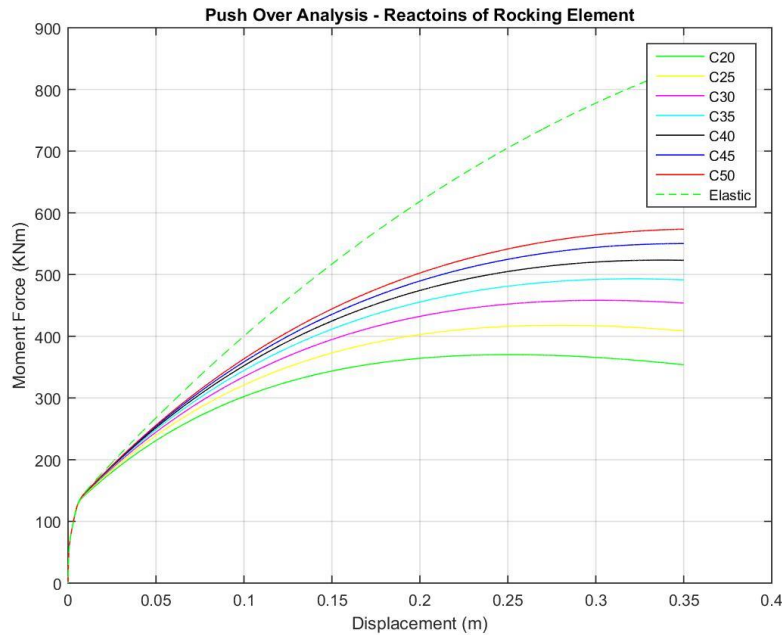
Οι αντιδράσεις στήριξης (αξονική δύναμη, τέμνουσα δύναμη και ροπή κάμψης) παρουσιάζονται στα πιο κάτω διαγράμματα παραμετροποιημένα ως προς την ποιότητα του σκυροδέματος.



Διάγραμμα 2.4: Αξονική δύναμη στη βάση του τοιχείου



Διάγραμμα 2.5: Τέμνουσα δύναμη στη βάση του τοιχείου



**Διάγραμμα 2.6: Ροπή κάμψης στη βάση του τοιχείου**

Από το διάγραμμα 2.4 φαίνεται ότι η αξονική δύναμη του λικνιζόμενου τοιχείου για μετατοπίσεις άνω των 10cm επηρεάζεται πολύ από την ποιότητα του σκυροδέματος. Ειδικότερα η αξονική δύναμη του ελαστικού τοιχείου αποκλίνει από αυτή των ανελαστικών, δηλαδή επηρεάζει έστω και η λίγη ανελαστικότητα του υλικού, λόγω του διαφορετικού στοιχείου που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο. Παρόλα αυτά, δεν μπορεί να ληφθεί συμπέρασμα ως προς την ευαισθησία της αξονικής αντίδρασης σε σχέση με την ποιότητα τους σκυροδέματος του λικνιζόμενου τοιχείου, αφού το πλαίσιο υπό το σεισμό σχεδιασμού δεν θα αναπτύξει τόσο μεγάλες μετατοπίσεις.

Παρόμοια κατάσταση ισχύει και τις αναπτυσσόμενες στη βάση τέμνουσες δυνάμεις και ροπές κάμψεως όπως παρατηρούμε από τα διαγράμματα 2.5 και 2.6 αντίστοιχα. Αξιοσημείωτο είναι ότι σε αντίθεση με την αξονική και τέμνουσα δύναμη οι οποίες έχουν συνεχώς αυξανόμενη τάση, η ροπή κάμψης στη βάση του τοιχείου φαίνεται να φτάνει στη μέγιστη τιμή της για αρκετά μεγάλη μετατόπιση και στη συνέχεια να πέφτει.

Σημειώνεται ότι είναι αναγκαίο να εξεταστούν η παραμόρφωση της άκρης του θλιβόμενου μέρους της βάσης καθώς επίσης και η μέγιστη καμπυλότητα που αναπτύσσεται στο σεισμό. Αποτελούν καθοριστικής σημασίας για την τοπική συμπεριφορά του σκυροδέματος και θα διευκρινιστεί σε επόμενο κεφάλαιο.

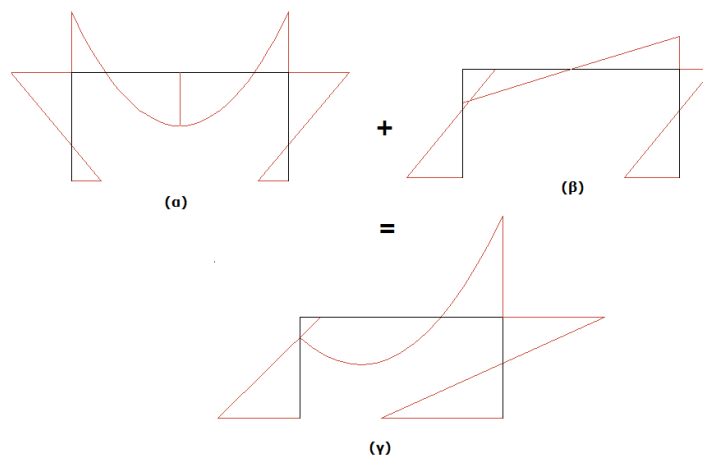
### 2.3.3 Εντατικά μεγέθη στα μέλη του πλαισίου

Στην παρούσα παράγραφο θα παρουσιαστούν τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται σε δοκούς και υποστυλώματα συναρτήσει της μετατόπισης κορυφής του πλαισίου, με διάφορες ποιότητες σκυροδέματος του λικνιζόμενου τοιχείου.

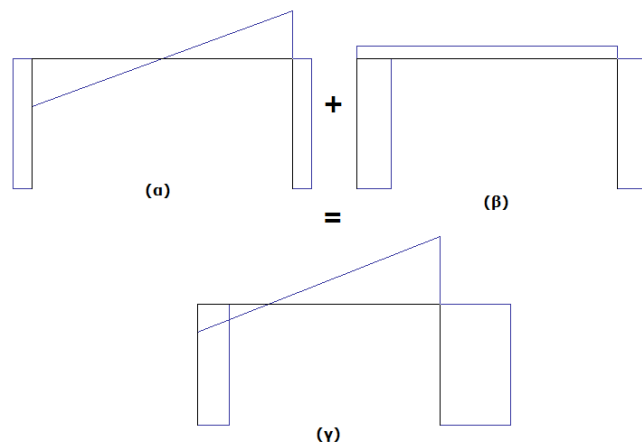
#### 2.3.3.1 Εισαγωγή στα εντατικά μεγέθη με στατικές, γραμμικές και ελαστικές αναλύσεις

Χρήσιμο θα ήταν να γίνει αντιληπτή η αναμενόμενη κατανομή των δυνάμεων στο πλαίσιο όταν σε αυτό ασκηθούν τα στατικά φορτία και τα οριζόντια φορτία της ανάλυσης Pushover. Η προσέγγιση αυτή θα γίνει με απλές στατικές αναλύσεις για να βοηθήσει τον αναγνώστη να κατατοπιστεί στις μεταβολές που αναμένονται κατά την εφαρμογή και αύξηση του οριζόντιου φορτίου.

Σε απλή στατική γραμμική ελαστική ανάλυση επιτρέπεται η επαλληλία όλων των μεγεθών που αντιστοιχούν σε διάφορες φορτίσεις. Έτσι για πλαίσιο χωρίς το τοίχειο θα αναπτυχθούν τα πιο κάτω ποιοτικά διαγράμματα:

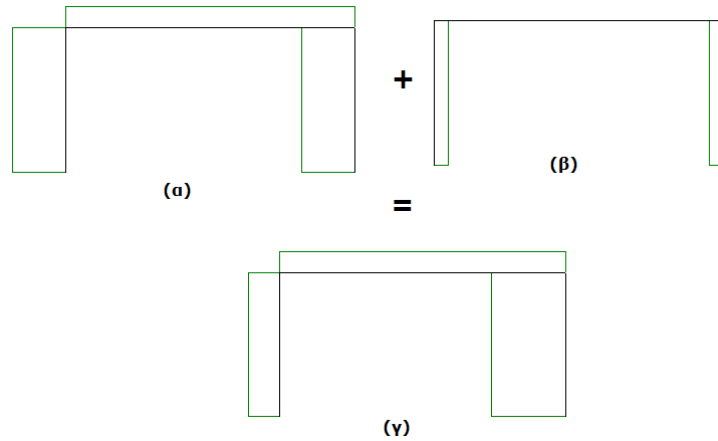


Διάγραμμα 2.7: Διάγραμμα ροπών κάμψης για (α) μόνιμα φορτία, (β) οριζόντιο φορτίο, (γ) άθροισμα



Διάγραμμα 2.8: Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων για (α) μόνιμα φορτία, (β) οριζόντιο φορτίο, (γ) άθροισμα





Διάγραμμα 2.9: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων για (α) μόνιμα φορτία, (β) οριζόντιο φορτίο, (γ) άθροισμα

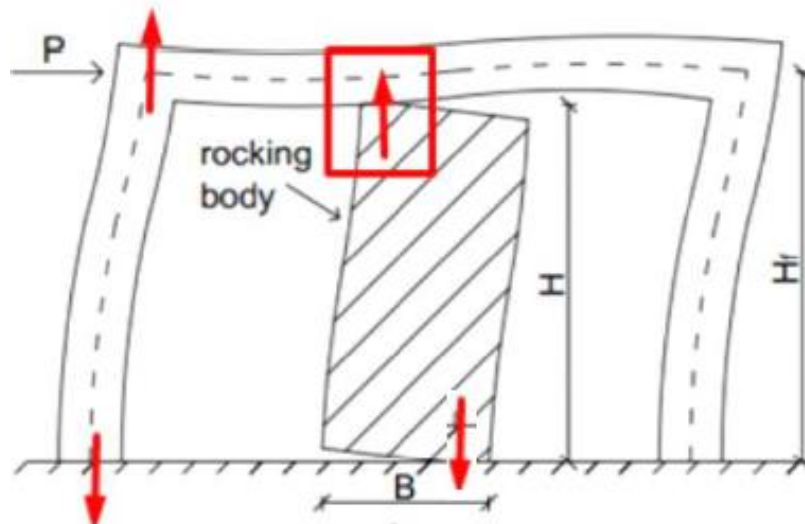
Από το διάγραμμα 2.7 παρατηρείται ότι στο δεξιό υποστύλωμα, όταν το οριζόντιο φορτίο δρα προς τα δεξιά, ασκείται μεγαλύτερη ροπή, και πιο συγκεκριμένα στην βάση αυτού του υποστυλώματος για μεγάλη οριζόντια δύναμη, η δρώσα ροπή λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της. Η δοκός και το αριστερό υποστύλωμα λαμβάνουν μικρότερες τιμές αφού οι 2 φορτίσεις δίνουν ροπές κάμψης με αντίθετο μεταξύ τους πρόσημο. Έτσι για ανελαστικές αναλύσεις που παρουσιάζονται στη συνέχεια, η πρώτη πλαστική άρθρωση στο πλαίσιο χωρίς τοιχείο αναμένεται στη βάση του δεξιού υποστυλώματος.

Παρομοίως η τέμνουσα που προκύπτει από επαλληλία των 2 φορτίσεων μεγιστοποιείται στην δοκό στον δεξιό κόμβο. Πάντως σε ένα πλαίσιο σαν αυτό η τέμνουσα δεν είναι καθοριστική, όμως όπως θα τονιστεί ενδέχεται να είναι κρίσιμη στο σημείο τομής δοκού με το λικνιζόμενο τοιχείο κατά την ανύψωση του.

Στην αξονική δύναμη τα πράγματα είναι διαφορετικά επειδή το οπλισμένο σκυρόδεμα έχει διαφορετική συμπεριφορά αναλόγως του πρόσημου. Αν και το μέτρο της αξονικής δύναμης είναι μεγαλύτερο στο δεξιό υποστύλωμα, το κρίσιμο υποστύλωμα είναι το αριστερό αφού σε αυτό ενδέχεται να αναπτυχθεί εφελκυσμός.

### 2.3.3.2 Δυνάμεις που εισάγονται στα υπόλοιπα μέλη κατά τον λικνισμό του τοιχείου

Σημαντική επίδραση ενδέχεται να έχει στη συμπεριφορά του πλαισίου οι επιπτώσεις που έχει στην κατασκευή ο λικνισμός του τοιχείου. Συγκεκριμένα όπως φαίνεται στην πιο κάτω εικόνα, καθώς αναπτύσσεται στροφή στο τοιχείο αυτό ασκεί δύναμη στην δοκό. Στο συγκεκριμένο σημείο υπάρχει μεγάλη αύξηση της τέμνουσας η οποία πρέπει να ληφθεί υπόψη και σε πραγματικό έργο να ενισχυθεί τοπικά. Πάντως να σημειωθεί ότι στα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων η αστοχία και ανελαστικότητα λόγω τέμνουσας δεν μπορεί να ληφθεί υπόψη.



Εικόνα 2.3: Οι δυνάμεις που δημιουργούνται κατά τον λικνισμό

### 2.3.4 Διαγράμματα εντατικών μεγεθών

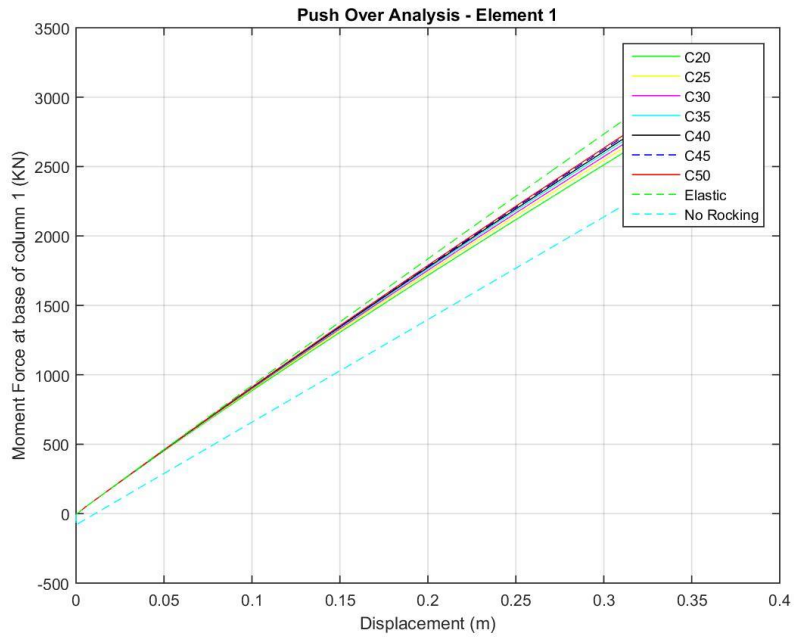
#### 2.3.4.1 Ροπές υποστυλωμάτων και δοκών

Είναι προφανές από το διάγραμμα 2.7 ότι οι μέγιστες ροπές των υποστυλωμάτων θα αναπτυχθούν στις βάσεις τους, ενώ στη δοκό στους κόμβους. Έτσι αρκεί να μελετηθεί η μεταβολή της ροπής στα σημεία αυτά μόνο.

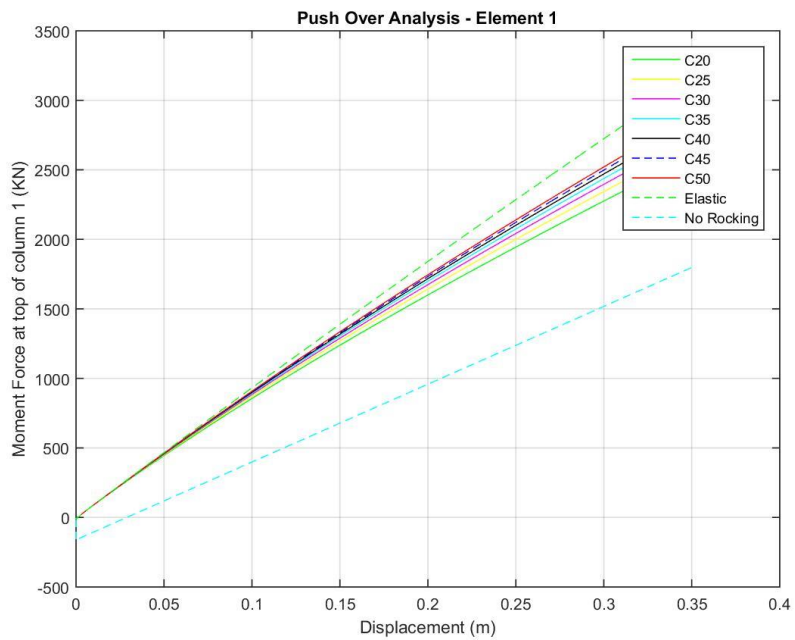
Από τα πιο κάτω διαγράμματα παρατηρείται ότι η βάση των υποστυλωμάτων αναλαμβάνει περισσότερη ροπή από την κορυφή τους. Επίσης επαληθεύεται η αναφορά στην προηγούμενη παράγραφο ότι το δεξιό υποστύλωμα αναλαμβάνει περισσότερη ροπή από το αριστερό. Αυτό ισχύει μόνο στην περίπτωση πλαισίου χωρίς λικνιζόμενο τοίχειο.

Σε αντίθεση, όταν το λικνιζόμενο τοίχειο είναι μέρος του πλαισίου το μέγεθος των ροπών αντιστρέφεται. Το αριστερό υποστύλωμα αναλαμβάνει περισσότερη ροπή από το δεξιό. Δηλαδή το τοίχειο όπως φαίνεται στο διάγραμμα 2.10 επιβαρύνει το αριστερό υποστύλωμα, ενώ σύμφωνα με το διάγραμμα 2.12 ανακουφίζει το δεξιό. Επιπρόσθετα, αξιοσημείωτο είναι η μεγάλη επιρροή που έχει το τοίχειο στις ροπές στους 2 κόμβους.

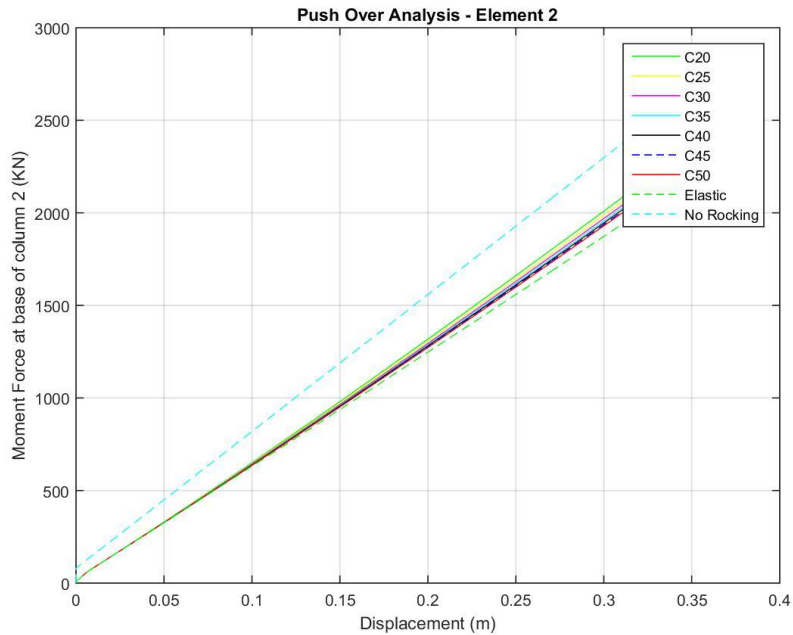
Όσο αφορά την επιρροή της ποιότητας του σκυροδέματος, αν συγκριθεί μια χαμηλή ποιότητα με το ελαστικό τοίχειο, παρατηρείται ότι δεν δημιουργεί ουσιώδη μεταβολή των επιβαλλόμενων ροπών στα υποστυλώματα. Εμφανής διασπορά των ροπών για διάφορες ποιότητες σκυροδέματος παρατηρούνται μόνο για μεγάλες μετατοπίσεις κορυφής που σε σεισμό δεν θα αναπτυχθούν.



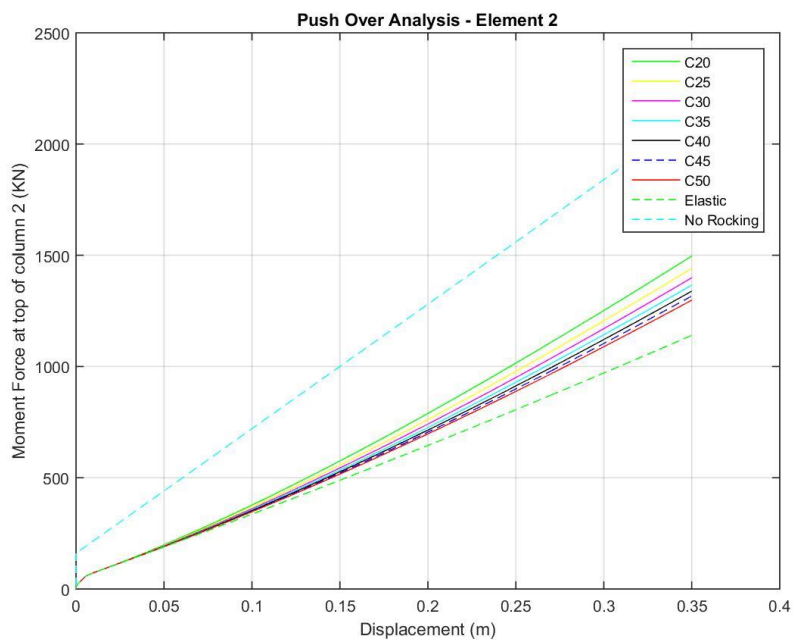
Διάγραμμα 2.10: Ροπή κάμψης υποστυλώματος 1 στη βάση



Διάγραμμα 2.10: Ροπή κάμψης υποστυλώματος 1 στην κορυφή (και δοκού στον αριστερό κόμβο)



Διάγραμμα 2.11: Ροπή κάμψης υποστυλώματος 2 στην βάση



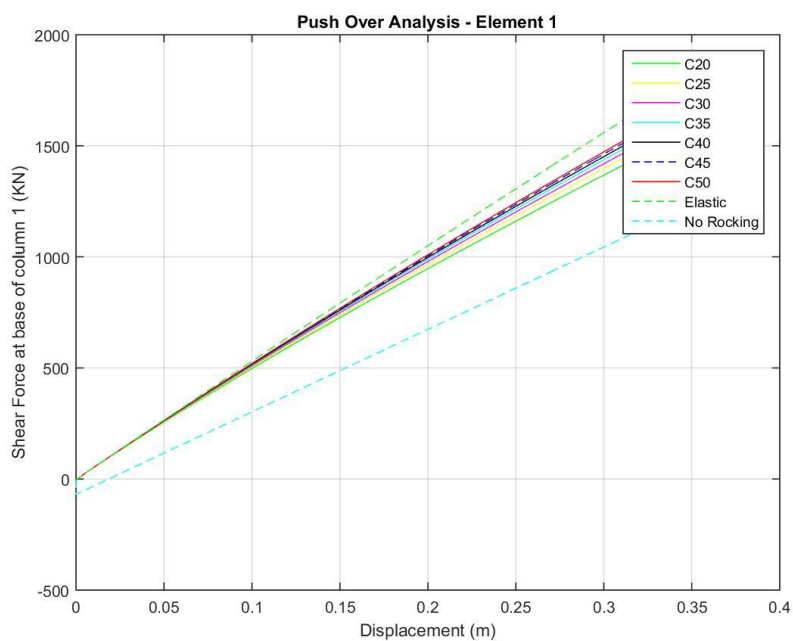
Διάγραμμα 2.12: Ροπή κάμψης υποστυλώματος 2 στην κορυφή (και δοκού στον δεξιό κόμβο)

#### 2.3.4.2 Τέμνουσες δυνάμεις υποστυλωμάτων

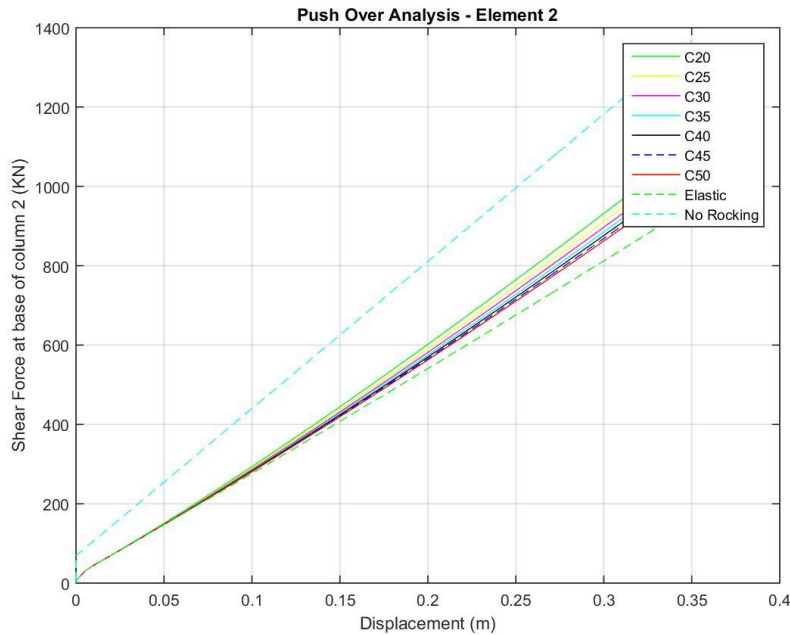
Οι τέμνουσες των υποστυλωμάτων ενδέχεται να μην παίξουν σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά του πλαισίου, όμως θα μελετηθεί η επιρροή και η ποιότητας του τοιχείου. Επίσης είναι προφανές ότι οι τέμνουσες στην κορυφή και στην βάση των υποστυλωμάτων είναι οι ίδιες.

Παρατηρούμε παρομοίως με τις ροπές των υποστυλωμάτων ότι το τοιχείο ανακουφίζει από τέμνουσα το δεξιό υποστύλωμα και επιβαρύνει το αριστερό. Σημαντική παρατήρηση είναι το μέγεθος της μεταβολής της τέμνουσας δύναμης και στα δύο υποστυλώματα. Όταν στο πλαίσιο υπάρχει το τοιχείο η τέμνουσα δύναμη του αριστερού υποστυλώματος είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη με απλό πλαίσιο. Το αντίθετο ισχύει για το δεξιό υποστύλωμα.

Από τα δύο πιο κάτω διαγράμματα γίνεται αντιληπτό ότι η ποιότητα του σκυροδέματος δεν επηρεάζει την τέμνουσα δύναμη που αναλαμβάνουν τα υποστυλώματα, ακόμα και για μεγάλες μετατοπίσεις.



Διάγραμμα 2.13: Τέμνουσα δύναμη στο αριστερό υποστύλωμα



Διάγραμμα 2.14: Τέμνουσα δύναμη στο δεξιό υποστύλωμα

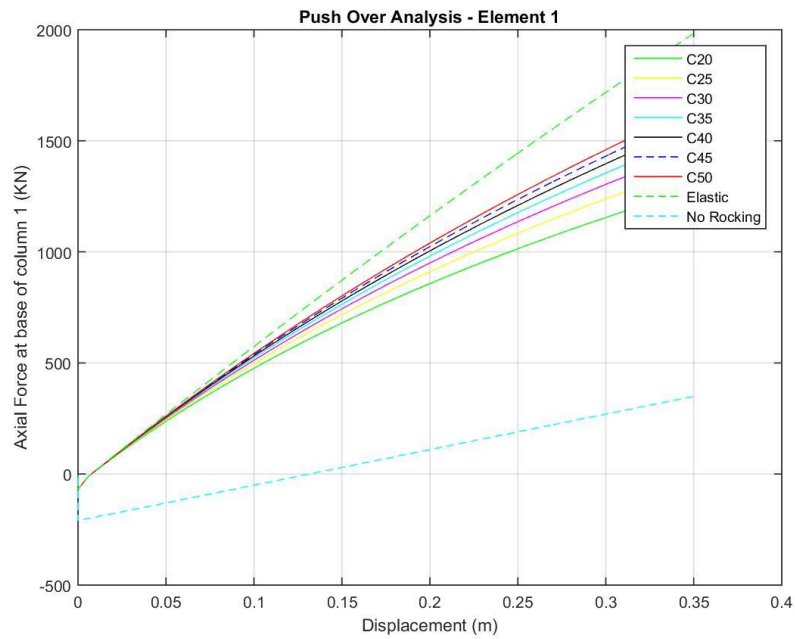
### 2.3.4.3 Αξονικές υποστυλωμάτων

Οι αξονικές δυνάμεις των υποστυλωμάτων επηρεάζουν την αντοχή σε κάμψη σύμφωνα με το διάγραμμα αλληλεπίδρασης αλλά και την διαρροή του σκυροδέματος όταν αυτό είναι ανελαστικό. Με τις ελαστικές αναλύσεις θα γίνει πιο εύκολα αντιληπτό πως επηρεάζει το τοιχείο τις δρώσες αξονικές δυνάμεις στα υποστυλώματα και τι τελικά επιπτώσεις έχει στη συμπεριφορά του πλαισίου.

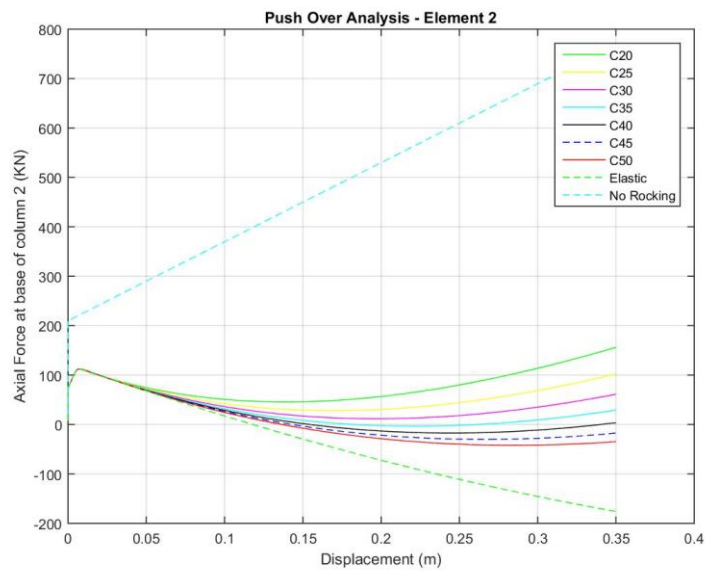
Αυτό που αναμέναμε από το διάγραμμα 2.9 ότι δηλαδή η αξονική του αριστερού υποστυλώματος θα άλλαζε πρόσημο και από θλιπτική θα γινόταν εφελκυστική, επαληθεύεται στο διάγραμμα 2.15. Το ίδιο συμβαίνει και στο δεξιό υποστύλωμα, δηλαδή αυξανόμενος του οριζόντιου φορτίου της ανάλυσης Pushover η αξονική μειώνεται. Οφείλεται βεβαίως ότι το τοιχείο κατά το λικνισμό του τείνει να σηκώσει το πλαίσιο προς τα πάνω αφού για όσο μεγαλώνει η μετατόπιση κορυφής τόσο μεγαλύτερη θλιπτική δύναμη έλκει για να μπορεί να λειτουργήσει.

Άρα σημαντική παρατήρηση είναι ότι το τοιχείο επηρεάζει πάρα πολύ την αξονική δύναμη του υποστυλώματος 2 αφού η ροπή αναλαμβάνεται και μέσα από ζεύγος δυνάμεων στη βάση, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.3. Αντιθέτως, το δεξιό υποστύλωμα μετά την τοποθέτηση του τοιχείου δεν έχει σημαντική μεταβολή ως προς την αξονική του δύναμη έστω και σε μεγάλη οριζόντια δύναμη, αφού το τοιχείο αναλαμβάνει την περισσότερη θλίψη που απαιτείται. Αντίθετα η θλιπτική δύναμη του υποστυλώματος αυτού μειώνεται και γίνεται εφελκυστική σε μεγάλες μετατοπίσεις.

Τέλος, η ποιότητα του σκυροδέματος επηρεάζει σε μεγάλες μετατοπίσεις της κορυφής (μεγαλύτερες των 10cm) που σε μονώροφο πλαίσιο δεν θα αναπτυχθούν.



Διάγραμμα 2.15: Αξονική δύναμη στο αριστερό υποστύλωμα



Διάγραμμα 2.16: Αξονική δύναμη στο δεξιό υποστύλωμα

#### 2.3.4.4 Τέμνουσες δυνάμεις των δοκών

Όπως φαίνεται στην εικόνα 2.3, κατά τον λικνισμό του τοιχείου ασκείται τέμνουσα δύναμη στη δοκό. Αν και η τέμνουσα δύναμη δεν λαμβάνεται υπόψη από το πρόγραμμα Opensees,

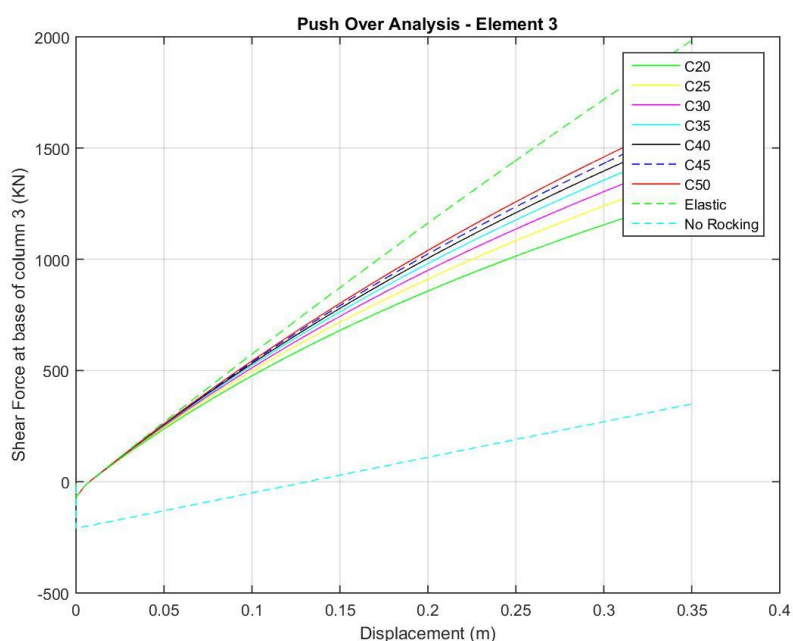
είναι αναγκαία η ποσοτικοποίηση της για να ενισχυθεί τοπικά η δοκός. Αυτό θα ακολουθήσει σε επόμενο κεφάλαιο, καθώς στην παρούσα παράγραφο θα παρουσιαστούν οι τέμνουσες βάσεις που ασκούνται στη δοκό ποιοτικά.

Όπως αναμενόταν, σύμφωνα με το διάγραμμα 2.18 οι τέμνουσες δυνάμεις της δοκού στο σημείο ανασήκωσης του τοιχείου κατά τον λικνισμό είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση αν το τοιχείο δεν υπήρχε. Στο σημείο αυτό φυσικά ασκείται και η μέγιστη τέμνουσα στην δοκό. Σημαντικότερη όμως παρατήρηση είναι επίσης η μεγάλη αύξηση των τεμνουσών στο αριστερό άκρο της δοκού όπως φαίνεται στο διάγραμμα 2.17.

Στο σημείο υποχώρησης του τοιχείου κατά τον λικνισμό, για μετακινήσεις άνω των 6cm οι τέμνουσες είναι μειωμένες σε σχέση με το αν δεν υπήρχε το τοιχείο. Σε μικρότερες όμως μετακινήσεις της κορυφής, είναι αυξημένες. Να σημειωθεί ότι το σημείο αυτό δεν αποτελεί σημείο αναφοράς για τη διαστασιολόγηση του πλαισίου για δύο λόγους. Ο πρώτος είναι από την στιγμή που το σημείο αυτό δεν έχει επαφή με το τοιχείο αποτελεί ένα τυχαίο σημείο της δοκού δεξιά του τοιχείου. Ο δεύτερος και σημαντικότερος είναι ότι το σημείο αυτό θα διαστασιολογηθεί με τα εντατικά μεγέθη του κόμβου 4, αφού ο σεισμός αλλάζει φορά.

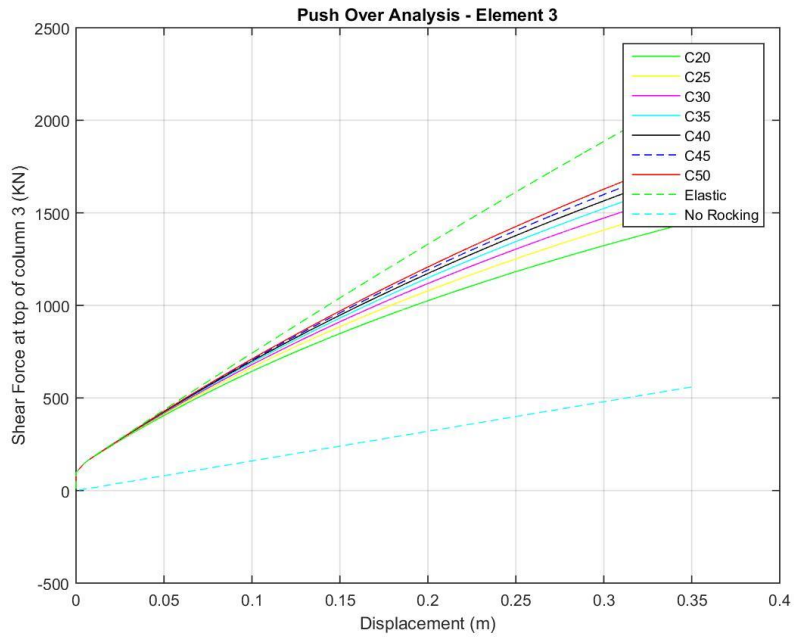
Οι τέμνουσες δυνάμεις στον δεξιό κόμβο της δοκού μειώνονται πολύ μετά την τοποθέτηση του τοιχείου. Η τέμνουσα δύναμη τείνει να αλλάξει πρόσημο αλλά η ανελαστικότητα του τοιχείου προκαλεί την εκ νέου αύξηση της στο σημείο αυτό.

Η ποιότητα του σκυροδέματος επηρεάζει σημαντικά τις ασκούμενες τέμνουσες δυνάμεις στις δοκούς, όμως για μικρές μετατοπίσεις που θα αναπτύξει η κατασκευή υπό το σεισμικό γεγονός η επιρροή είναι αμελητέα.

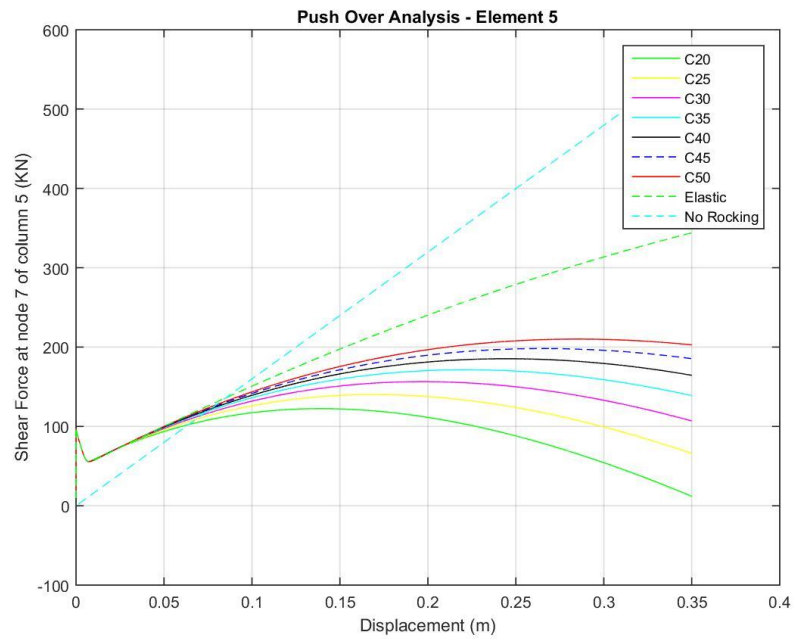


Διάγραμμα 2.17: Τέμνουσα δύναμη στην δοκό στον αριστερό κόμβο

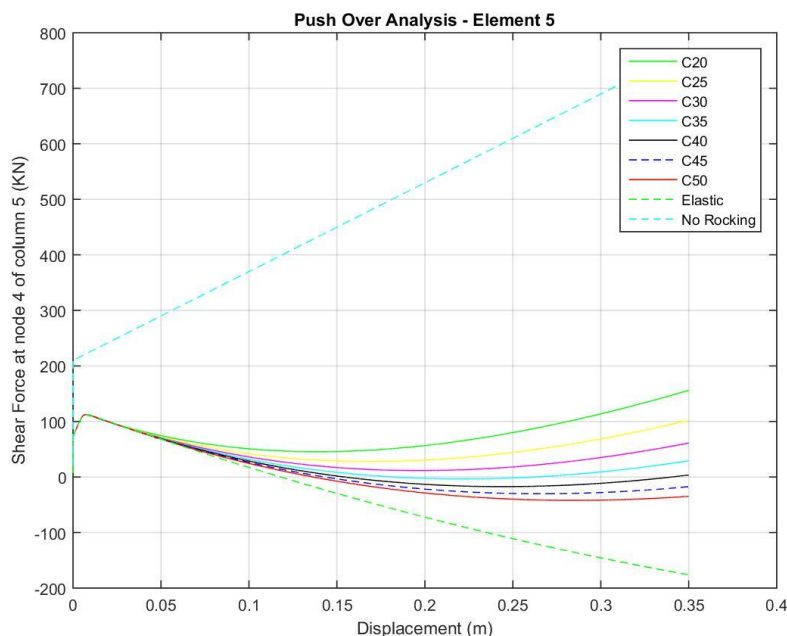




Διάγραμμα 2.18: Τέμνουσα δύναμη στην δοκό στο σημείο ανασήκωσης του τοιχείου



Διάγραμμα 2.19: Τέμνουσα δύναμη στην δοκό στο σημείο υποχώρησης του τοιχείου



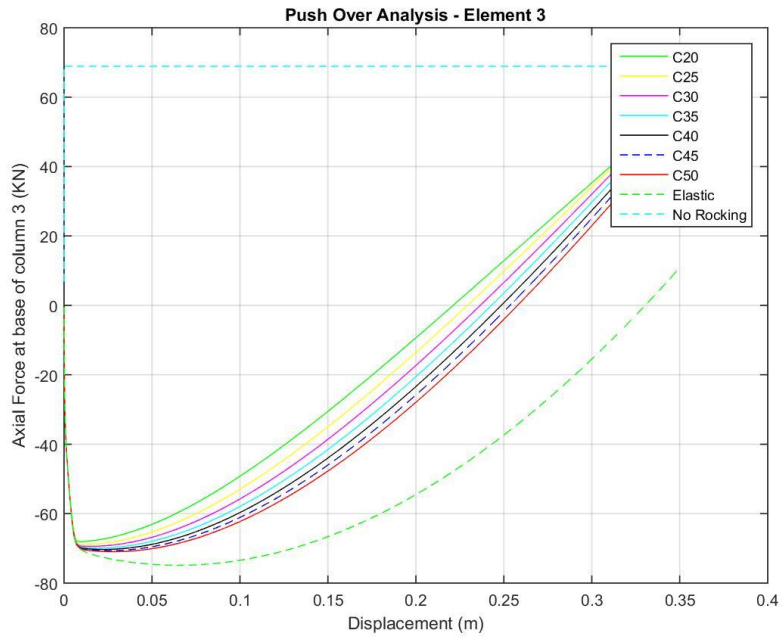
Διάγραμμα 2.20: Τέμνουσα δύναμη στην δοκό στον δεξιό κόμβο

#### 2.3.4.5 Αξονικές δυνάμεις των δοκών

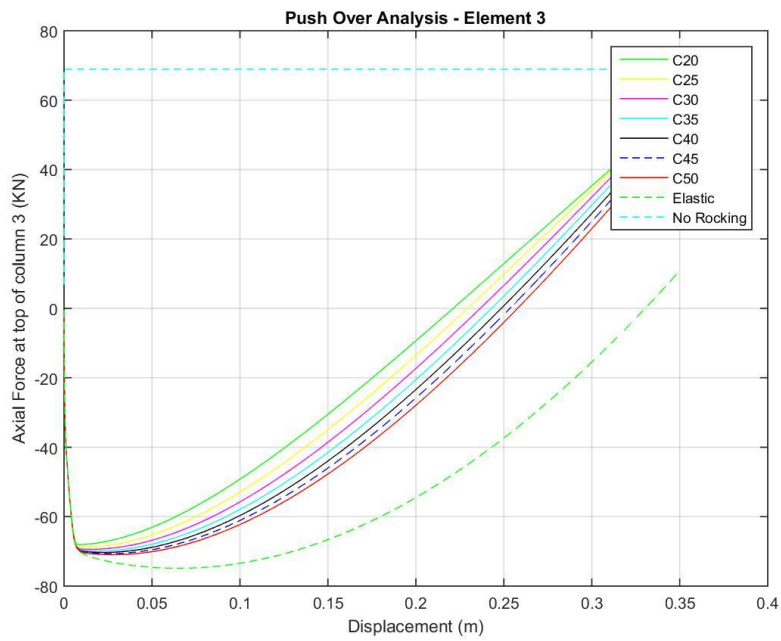
Στην πραγματικότητα η αξονική διαχέεται στην πλάκα και έτσι οι δοκοί έχουν πρακτικά μηδενική αξονική δύναμη. Σημειώνεται όμως ότι τα πιο κάτω διαγράμματα αναφέρονται μόνο σε γυμνό πλαίσιο χωρίς τη πλάκα σκυροδέματος από πάνω που λειτουργεί σαν διάφραγμα. Έτσι η ανεπάρκεια του μοντέλου να προσεγγίσει την πραγματικότητα όσο αφορά τις αξονικές δυνάμεις της δοκού προκύπτει πως η δοκός λαμβάνει αξονικό φορτίο. Στη συνέχεια θα ελεγχθεί η επιρροή του τοιχείου και της ποιότητας σκυροδέματος του στις αξονικές της δοκού για λόγους πληρότητας.

Παρατηρείται από τα διαγράμματα 2.21 και 2.22 ότι στην δοκό αριστερά του τοιχείου οι αξονικές δυνάμεις είναι μικρότερες σε σχέση αν δεν υπήρχε το τοίχειο, αλλά είναι συνεχώς αυξανόμενες. Εν αντιθέσει με την αξονική στη δοκό δεξιά του τοιχείου όπου είναι εμφανώς μεγαλύτερη λόγω την ύπαρξη του τοιχείου αλλά με μειούμενο ρυθμό αύξησης.

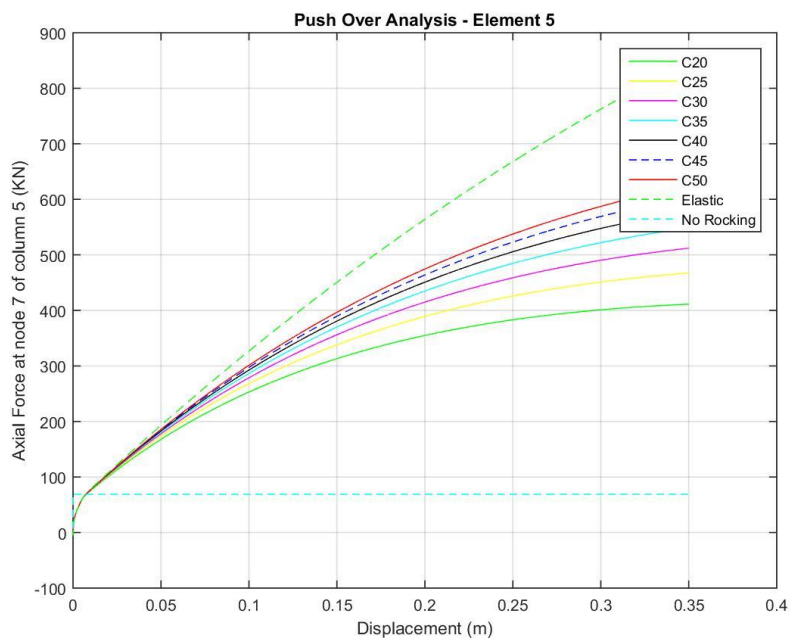
Γενικώς η ποιότητα του σκυροδέματος φαίνεται να επηρεάζει την αξονική δύναμη που ασκείται στην δοκό ακόμα και σε μικρές σχετικά μετακινήσεις. Όμως επειδή το μέτρο της αξονικής δύναμης που καλείται να αναλάβει η δοκός (ακόμα και στο θεωρητικό πλαίσιο χωρίς πλάκα) είναι πολύ μικρό, θεωρείται ότι η αξονική στην δοκό δεν επηρεάζει την συμπεριφορά της, άρα ούτε και η μεταβολή της ποιότητας θα επηρεάσει.



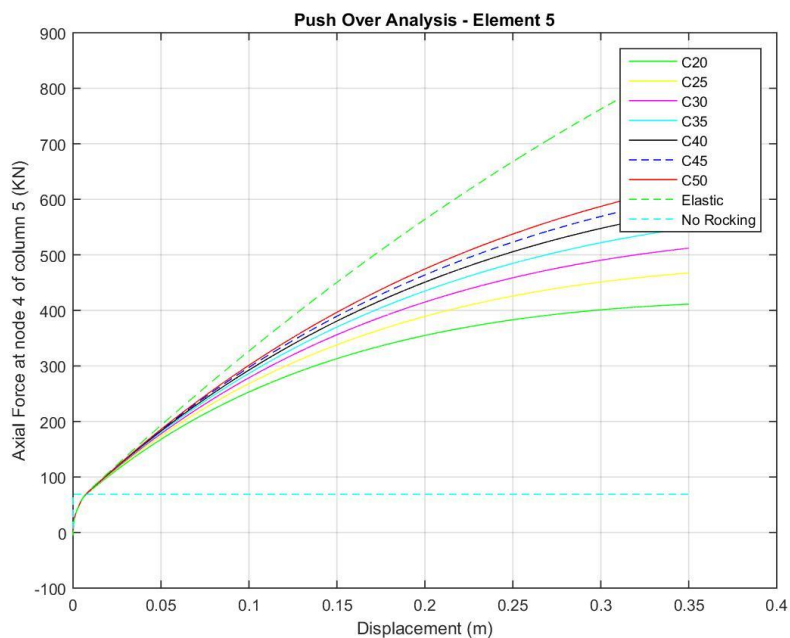
Διάγραμμα 2.21: Αξονική δύναμη στην δοκό στον αριστερό κόμβο



Διάγραμμα 2.22: Αξονική δύναμη στην δοκό στο σημείο ανασήκωσης του τοιχείου



Διάγραμμα 2.23: Αξονική δύναμη στην δοκό στο σημείο υποχώρησης του τοιχείου



Διάγραμμα 2.24: Αξονική δύναμη στην δοκό στον δεξιό κόμβο

### 2.3.5 Συμπέρασμα από ελαστικές αναλύσεις με σταθερό μέτρο ελαστικότητας

Οι ελαστικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν σε πρώτο στάδιο λόγω της απλότητας τους αλλά και για να μειωθούν οι παράγοντες μεταβολής των μεγεθών ώστε να γίνει πιο ευδιάκριτη η επιρροή του λικνιζόμενου τοιχείου και της ποιότητας του στο πλαίσιο.

Παρατηρήθηκε αρχικά ότι το λικνιζόμενο τοίχιο κάνει το πλαίσιο πάρα πολύ δύσκαμπτο στην αρχή, που όμως η δυσκαμψία απομειώνεται γρήγορα την στιγμή που το τοίχιο προβεί σε λικνισμό. Για πολύ μικρές μετακινήσεις του τοιχείου (και της κορυφής), το τελευταίο χάνει μεγάλο μέρος της δυσκαμψίας του με έντονα μη γραμμική συμπεριφορά, στην συνέχεια επανφέρεται η «ελαστικότητα» του πλαισίου αφού θεωρητικά το τοίχιο έχει «διαρρεύσει». Πέρα αυτού του σημείου η δυσκαμψία της ελαστικής κατασκευής και του ανελαστικού πλαισίου παραμένει σταθερή. Η κλίση της «κράτυσης» εξαρτάται από την ποιότητα σκυροδέματος του τοιχείου που όμως δεν φαίνεται να είναι σημαντική επειδή επιδρά μόνο σε μεγάλες μετατοπίσεις που δεν θα αναπτυχθούν σε σεισμικό γεγονός.

Επίσης για τις αντίστοιχες μετατοπίσεις της κορυφής το τοίχιο ανακουφίζει από εντατικά μεγέθη το δεξιό υποστύλωμα αν η οριζόντια δύναμη της Pushover έχει φορά προς τα δεξιά. Σε αντίθεση με το αριστερό υποστύλωμα όπου αναλαμβάνει μεγαλύτερα εντατικά μεγέθη όταν υπάρχει το τοίχιο στο πλαίσιο σε σχέση να μην υπήρχε. Αυτό όπως αναφέρθηκε ισχύει για συγκεκριμένη μετατόπιση κορυφής, όμως σε συγκεκριμένο σεισμό σχεδιασμού που θα δούμε στη συνέχεια, οι μετατοπίσεις του ενισχυμένου και μη πλαισίου διαφέρουν. Έτσι, το ασφαλές συμπέρασμα ως προς την μεταβολή των εντατικών μεγεθών των υποστυλωμάτων θα προκύψει από τα επόμενα κεφάλαια που αναφέρονται σε συγκεκριμένο σεισμό.

Σε αντίθεση με τα υποστυλώματα, στην δοκό το κρίσιμο μέγεθος στον σχεδιασμό είναι όχι μόνο η ροπή αλλά και η τέμνουσα. Η τελευταία αυξάνεται στην δοκό αριστερά του τοιχείου σε μεγάλο βαθμό, οφειλόμενη στην ανασήκωση του τοιχείου. Από την δεξιά πλευρά του τοιχείου οι τέμνουσες των δοκών απομοιώνονται και δεν θα είναι σημαντική παράμετρος στον σχεδιασμό.

Τέλος η συμπεριφορά του τοιχείου δεν φαίνεται να επηρεάζεται από τη ποιότητα του σκυροδέματος όσο αφορά τα εντατικά μεγέθη και την αντοχή. Φυσικά αυτό δεν είναι αρκετό για να ληφθεί το συμπέρασμα ότι δεν θα επηρεάσει σε μια πραγματική κατασκευή αφού θα πρέπει να ελεγχθεί και σε ανελαστικά μέλη καθώς επίσης να προσδιοριστούν οι καμπυλότητες και παραμορφώσεις στη βάση του τοιχείου σε ένα σεισμικό γεγονός.

## **2.4 Παραμετροποίηση ως προς την ποιότητα σκυροδέματος του λικνιζόμενου τοιχείου με μεταβλητό μέτρο ελαστικότητας σύμφωνα με τον κανονισμό σκυροδέματος**

Η πιο πάνω θεώρηση ότι το μέτρο ελαστικότητας παραμένει σταθερό για όλες τις ποιότητες σκυροδέματος δεν είναι ορθό καθώς όσο αυξάνεται η ποιότητα αυξάνεται και αυτό. Στην παρούσα παράγραφο θα διερευνηθεί κατά πόσο το μέτρο ελαστικότητας σε συνδυασμό με την ποιότητα του λικνιζόμενου τοιχείου σκυροδέματος επηρεάζει ώστε να ληφθεί υπόψη στις επικείμενες ανελαστικές αναλύσεις που είναι και οι σημαντικότερες.

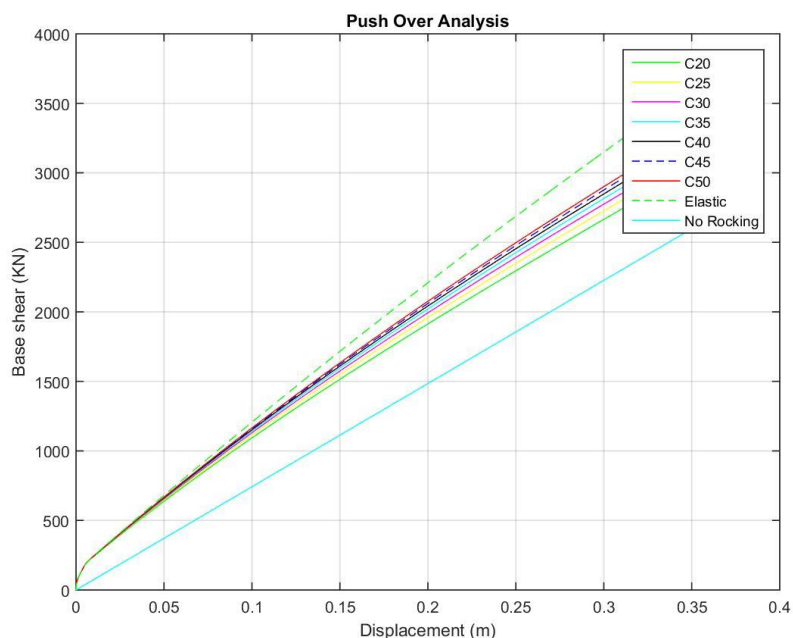
Το μέτρο ελαστικότητας για κάθε ποιότητα σκυροδέματος που εντάχθηκε στο μοντέλο είναι ίσο σύμφωνα με τον πίνακα των κανονισμών:

Αντοχές (Μρα)	Ποιότητες σκυροδέματος								
	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
Θλιπτική fck	12	16	20	25	30	35	40	45	50
Μέτρο Ελαστικότητας Ecm (Gra)	26	28	29	31	32	34	35	36	37

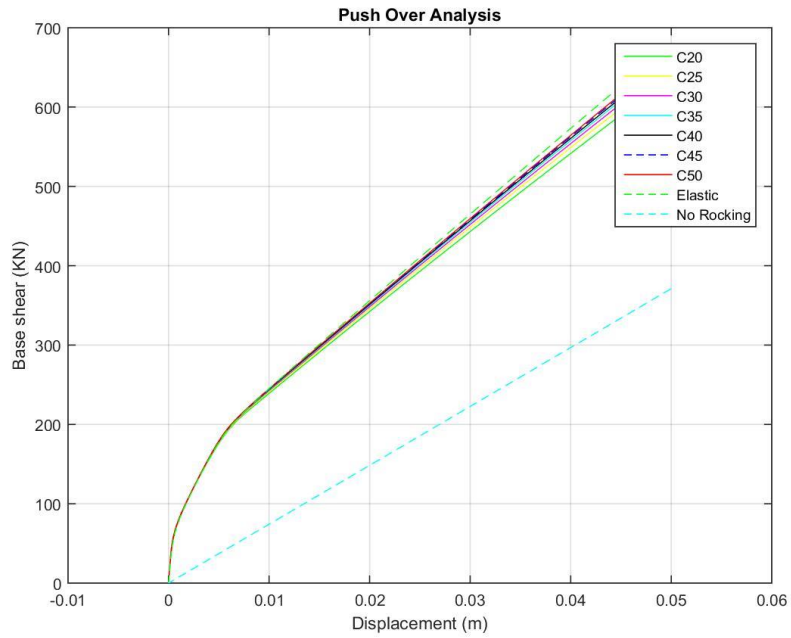
Πίνακας 2.1: Θλιπτή αντοχή και μέτρο ελαστικότητα σκυροδέματος σε αντιστοιχία με την ποιότητα

#### 2.4.1 Καμπύλες ικανότητας

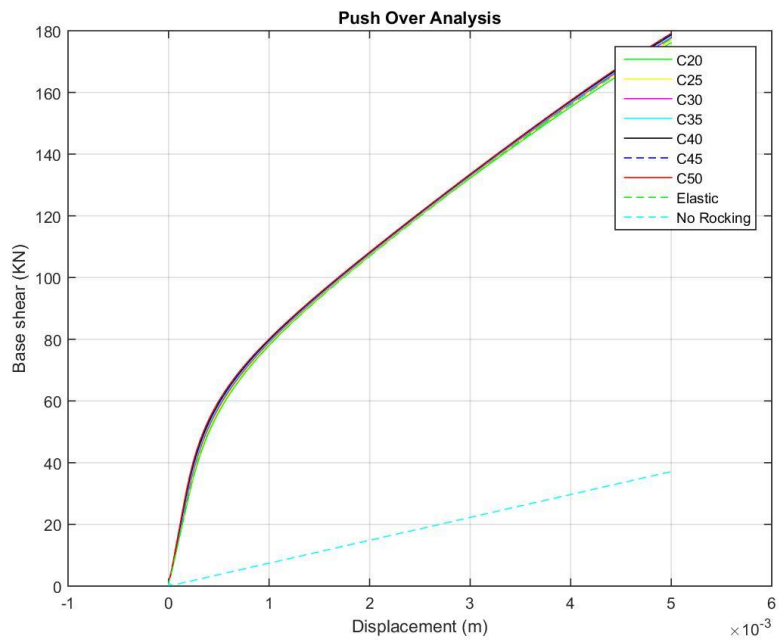
Οι παρατηρήσεις όσον αφορά τη συμπεριφορά του πλαισίου όταν αυτό ενισχυθεί με λικνιζόμενο τοιχείο είναι ποιοτικά ίδια με τις αντίστοιχες του κεφαλαίου 2.3.1 όπου το μέτρο ελαστικότητας ήταν σταθερό. Επίσης παρατηρήθηκε ότι το μέτρο ελαστικότητα δεν επηρεάζει καμία από τις παραμέτρους και τα μεγέθη που παρουσιάστηκα στο κεφάλαιο 2.3. Στη συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικά όλα τα διαγράμματα κατά αντιστοιχία με του κεφαλαίου 2.3 για λόγους πληρότητας και σύγκρισης.



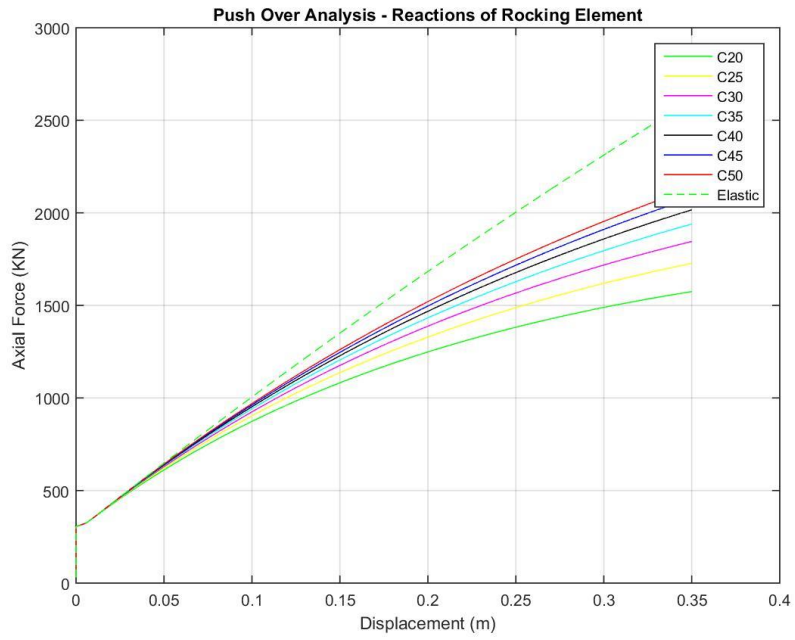
Διάγραμμα 2.25: Καμπύλη ικανότητας πλαισίου



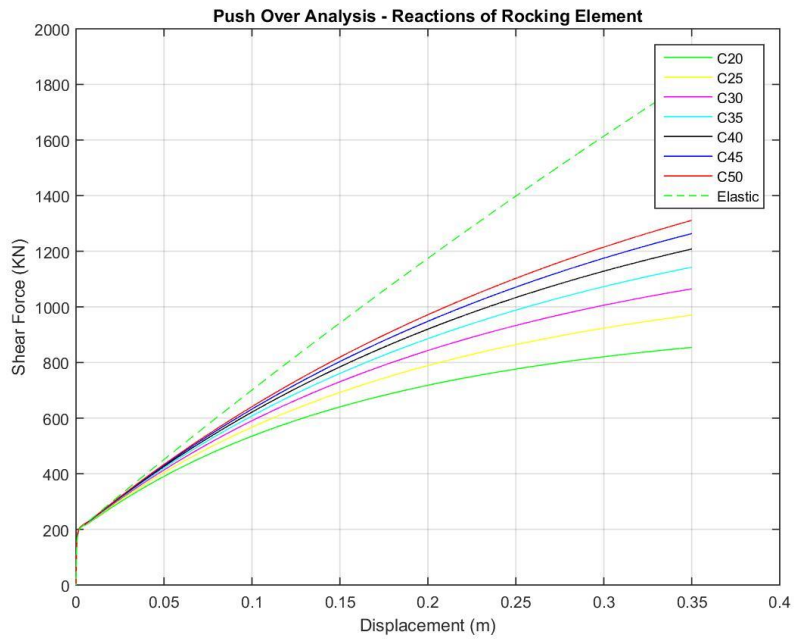
Διάγραμμα 2.26: Καμπύλη ικανότητας πλαισίου (μεγέθυνση) μέχρι μετατόπιση 50mm



Διάγραμμα 2.27: Καμπύλη ικανότητας πλαισίου (μεγέθυνση) μέχρι μετατόπιση 5mm

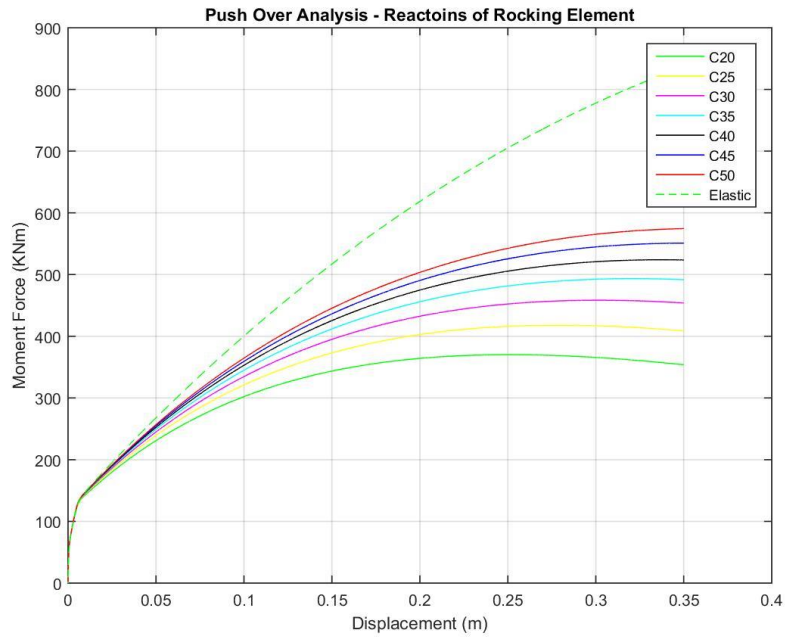


Διάγραμμα 2.28: Αξονική δύναμη στη βάση του τοιχείου

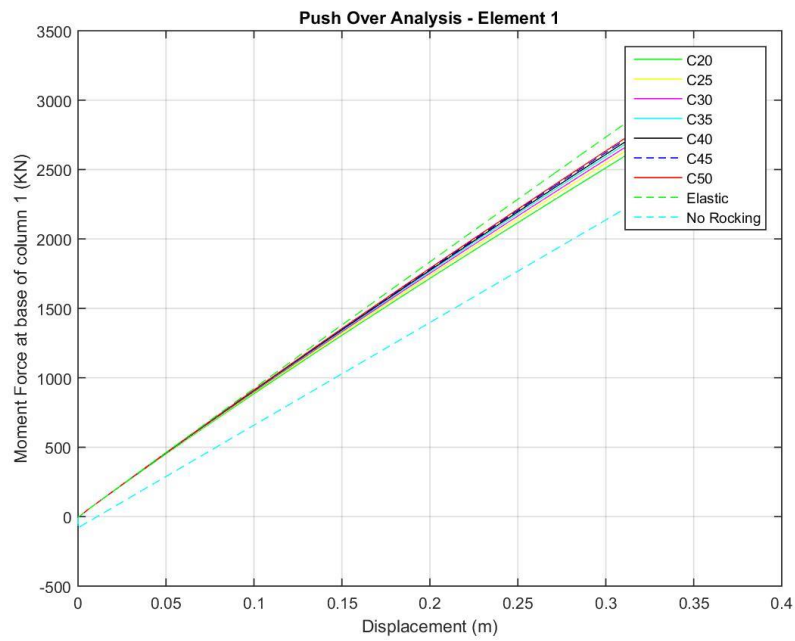


Διάγραμμα 2.29: Τέμνουσα δύναμη στη βάση του τοιχείου

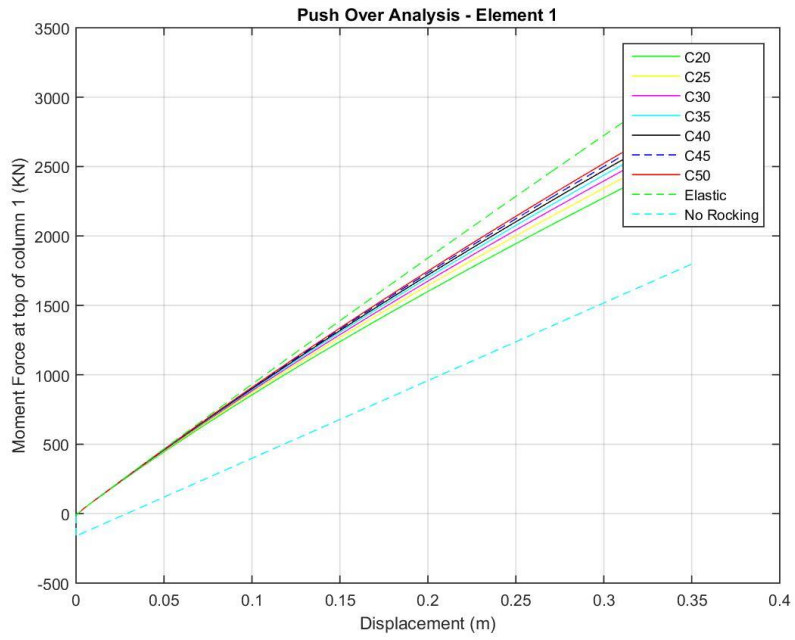




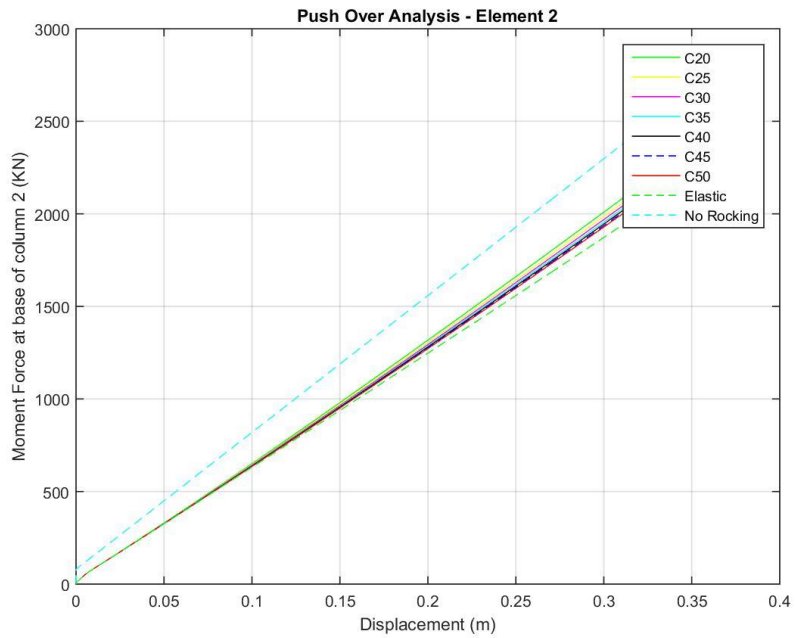
Διάγραμμα 2.30: Ροπή κάμψης στη βάση του τοιχείου



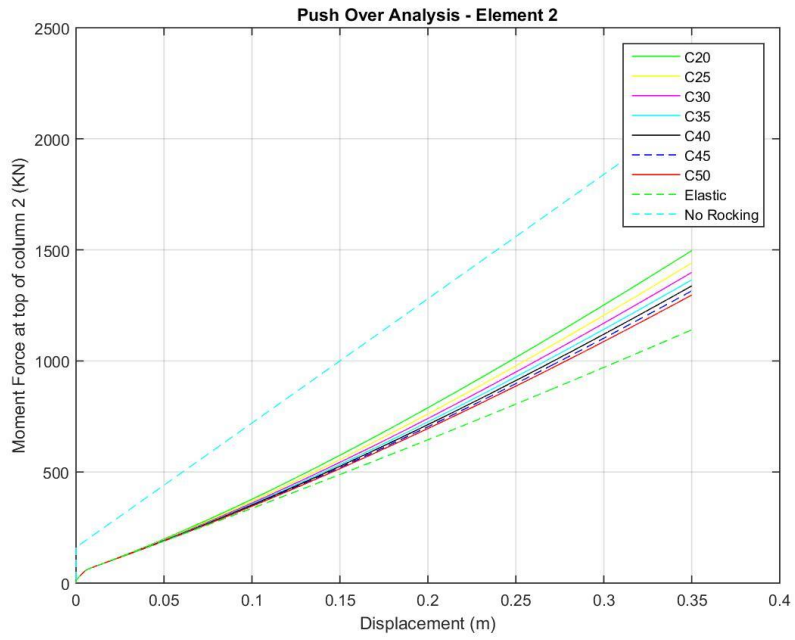
Διάγραμμα 2.31: Ροπή κάμψης υποστυλώματος 1 στην βάση



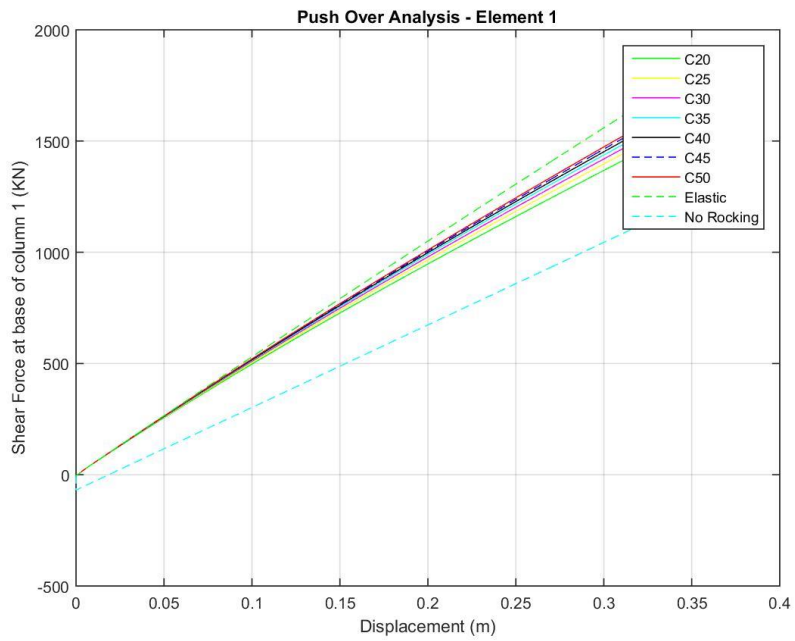
Διάγραμμα 2.32: Ροπή κάμψης υποστυλώματος 1 στην κορυφή (και δοκού στον αριστερό κόμβο)



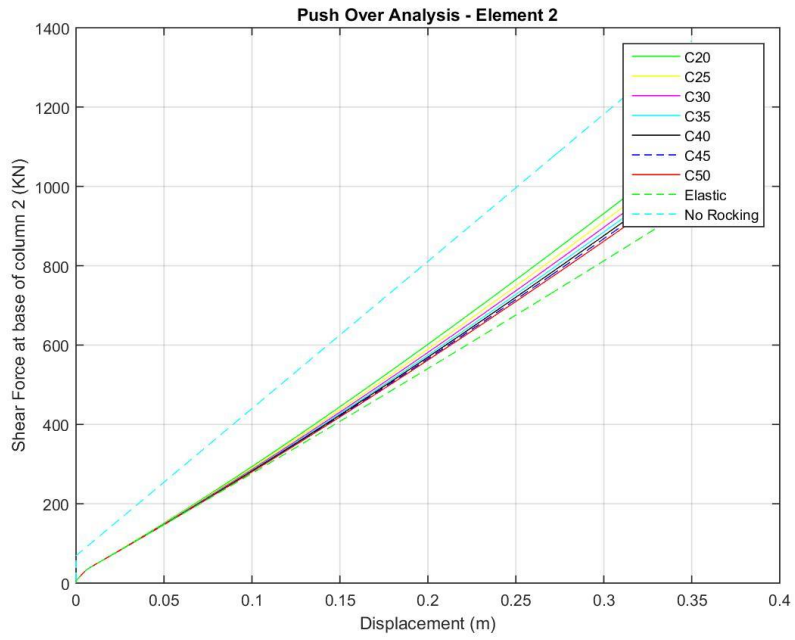
Διάγραμμα 2.33: Ροπή κάμψης υποστυλώματος 2 στην βάση



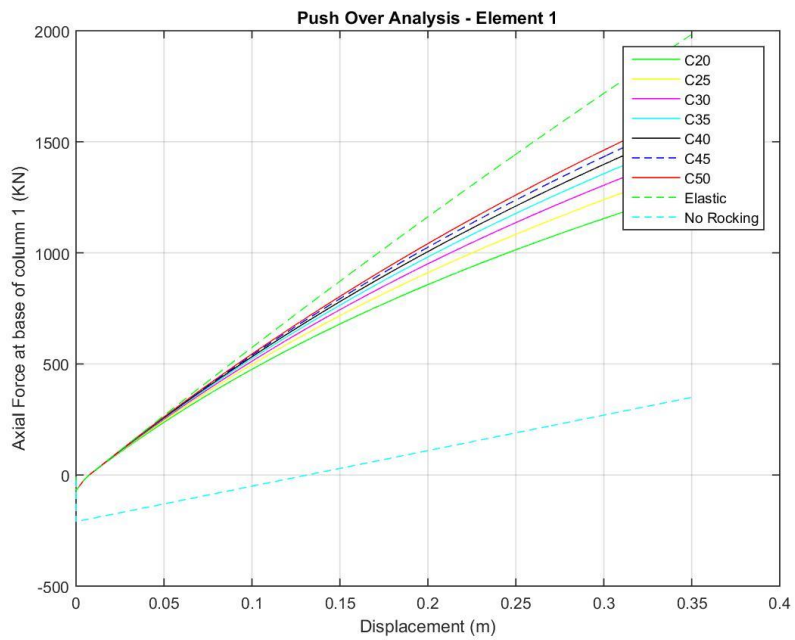
Διάγραμμα 2.34: Ροπή κάμψης υποστυλώματος 2 στην κορυφή (και δοκού στον δεξιό κόμβο)



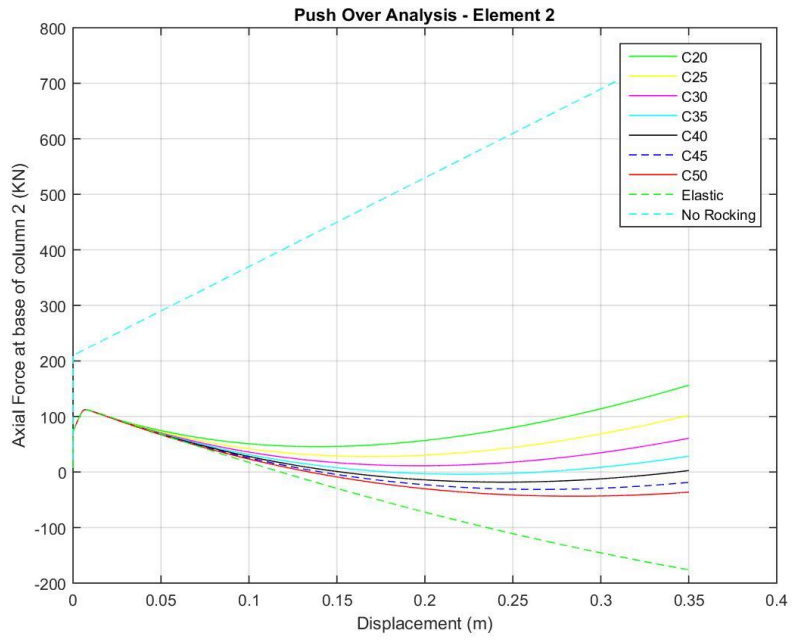
Διάγραμμα 2.35: Τέμνουσα δύναμη του αριστερού υποστυλώματος



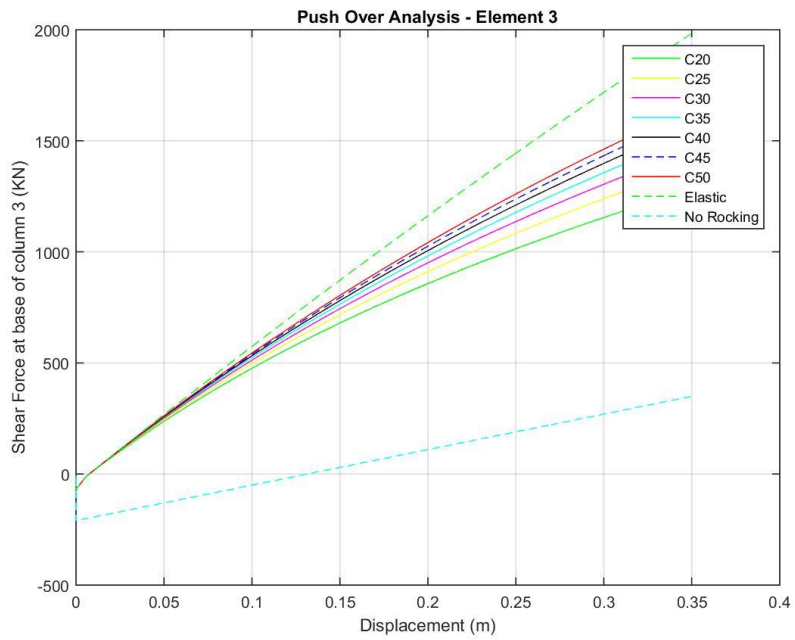
Διάγραμμα 2.36: Τέμνουσα δύναμη του δεξιού υποστρώματος



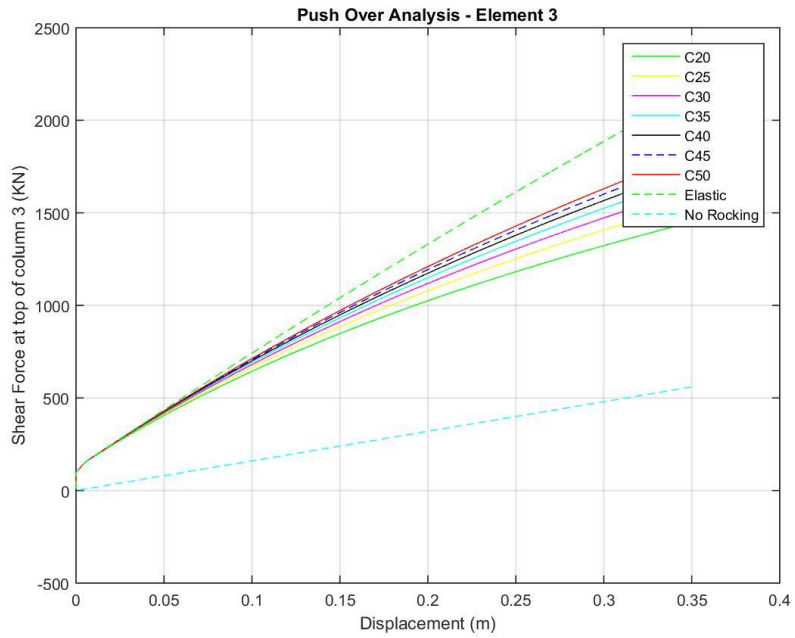
Διάγραμμα 2.37: Αξονική δύναμη του δεξιού υποστρώματος



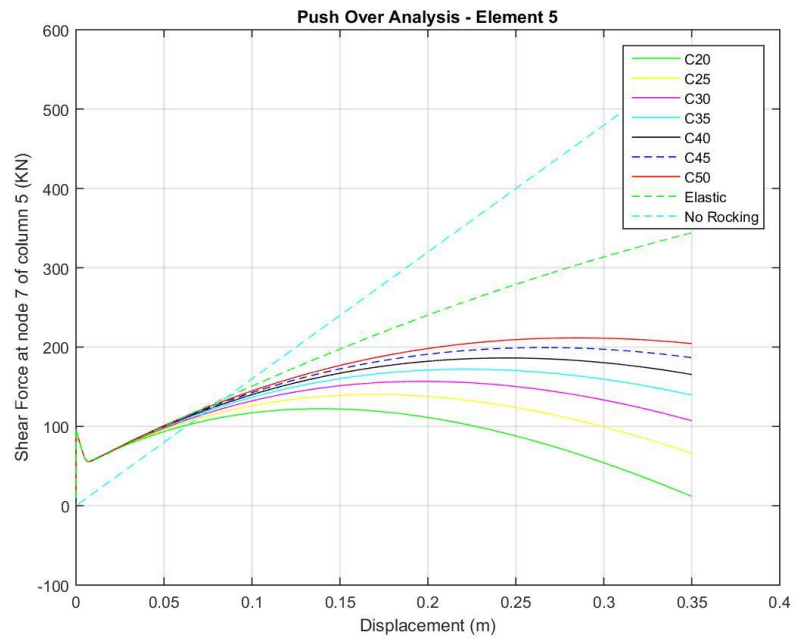
Διάγραμμα 2.38: Αξονική δύναμη του αριστερού υποστυλώματος



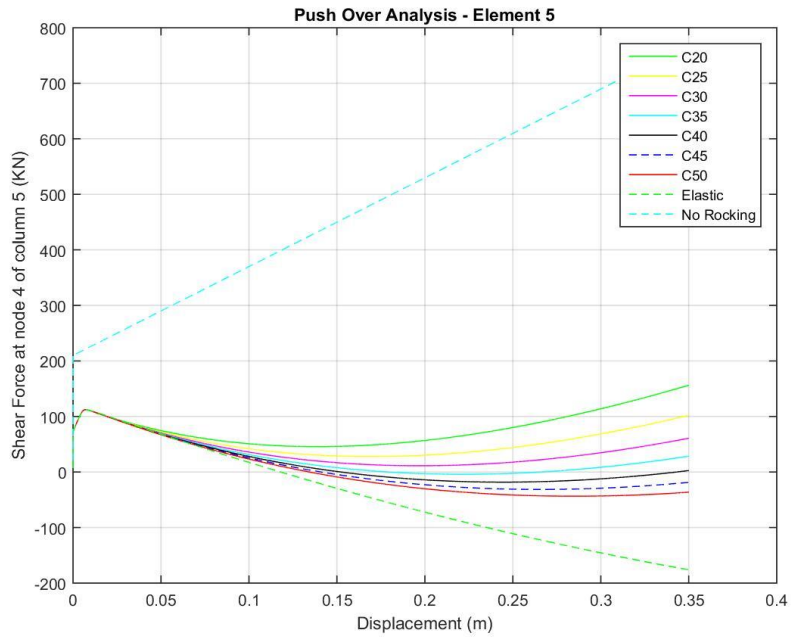
Διάγραμμα 2.39: Τέμνουσα δύναμη στη δοκό στον αριστερό κόμβο



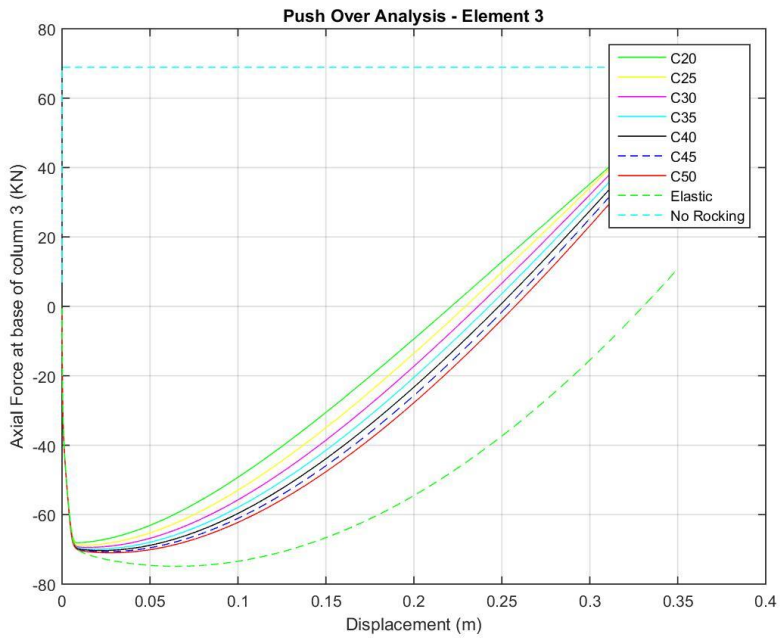
Διάγραμμα 2.40: Τέμνουσα δύναμη στην δοκό στο σημείο ανασήκωσης του τοιχείου



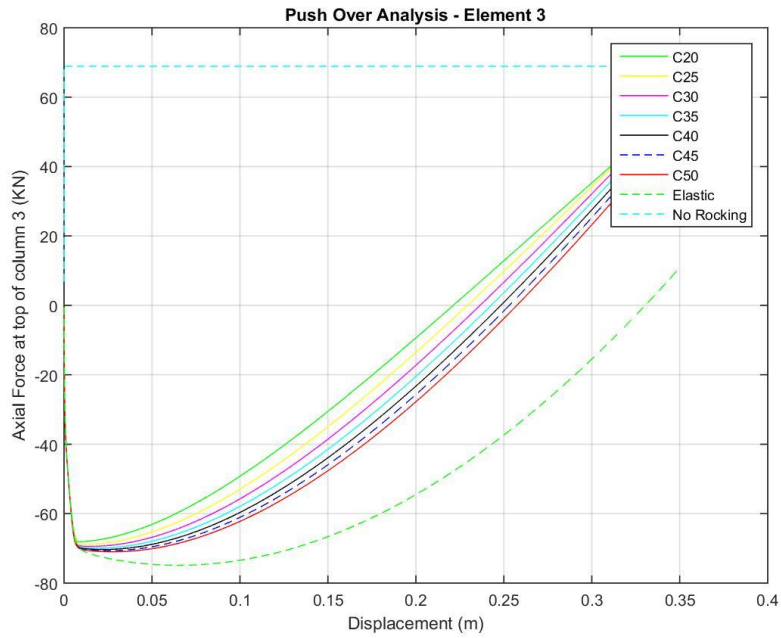
Διάγραμμα 2.41: Τέμνουσα δύναμη στην δοκό στο σημείο υποχώρησης του τοιχείου



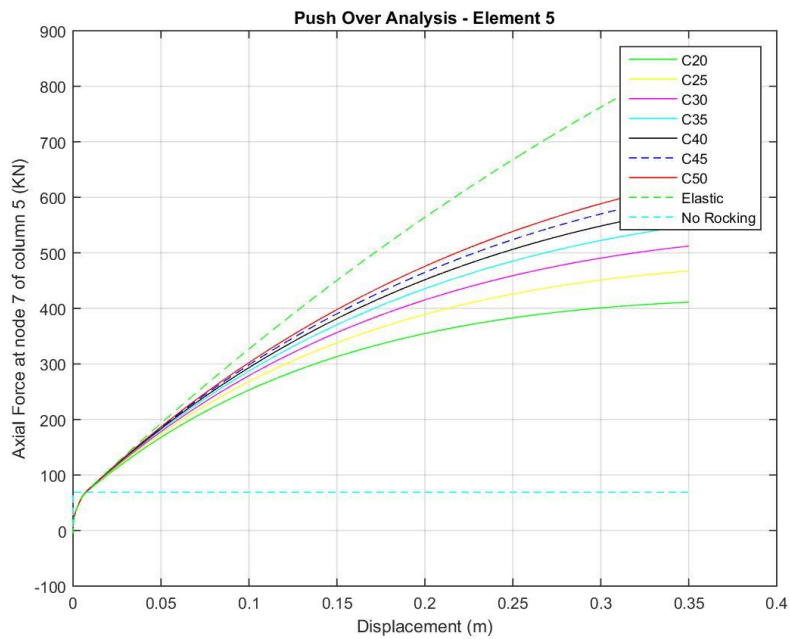
Διάγραμμα 2.42: Τέμνουσα δύναμη στη δοκό στο δεξιό κόμβο



Διάγραμμα 2.43: Αξονική δύναμη στην δοκό στον αριστερό κόμβο

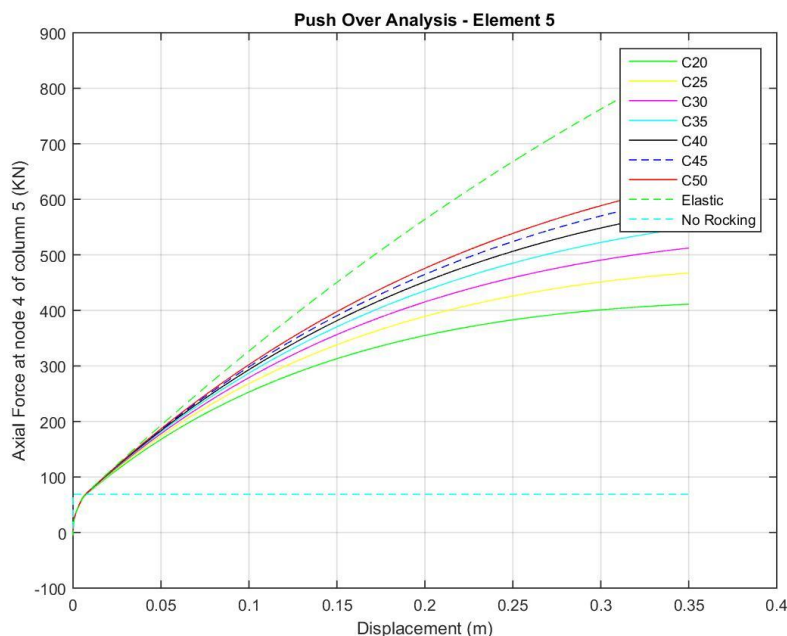


Διάγραμμα 2.44: Αξονική δύναμη στην δοκό στο σημείο ανασήκωσης του τοιχείου



Διάγραμμα 2.45: Αξονική δύναμη στην δοκό στο σημείο υποχώρησης του τοιχείου





Διάγραμμα 2.46: Αξονική δύναμη στην δοκό στο δεξιό κόμβο

#### 2.4.2 Συμπέρασμα του μέτρου ελαστικότητας ως προς την ακρίβεια των αναλύσεων

Από το παρόν κεφάλαιο γίνεται σαφές ότι το μέτρο ελαστικότητας δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου τη συμπεριφορά ή οποιοδήποτε μέγεθος του πλαισίου. Έτσι στις αναλύσεις που ακολουθούν θα λαμβάνεται ενιαίο μέτρο ελαστικότητας για όλες τις ποιότητες σκυροδέματος και ίσο με 30GB.

### 2.5 Συμπεράσματα από τις ελαστικές αναλύσεις

Η απλότητα των ελαστικών αναλύσεων περιόρισαν τους παράγοντες που μπορεί να επηρεάσει τη συμπεριφορά της κατασκευής και κυρίως την ανελαστικότητα των υπόλοιπων μελών του πλαισίου πέρα του λικνιζόμενου τοιχείου. Έτσι γίνεται πιο σαφής η επίδραση που έχει το λικνιζόμενο τοίχιο στη συμπεριφορά της κατασκευής και των μελών που την απαρτίζουν.

Πιο συγκεκριμένα παρατηρήθηκε η μεγάλη αύξηση της αντοχής της κατασκευής, όπως άλλωστε αναμενόταν, αυτό όμως που είναι αξιοσημείωτο είναι η μη γραμμικότητα που παρουσιάζει η απόκριση της κατασκευής υπό οριζόντια φορτία. Προφανώς η μη γραμμικότητα οφείλεται στο τοίχιο το οποίο όπως προαναφέρθηκε, αναπροσαρμόζει το μητρώο δυσκαμψίας του ανάλογα με τον λικνισμό. Στην πραγματικότητα, ο λικνισμός του τοιχείου μειώνει απότομα την δυσκαμψία της κατασκευής για πολύ μικρές μετατοπίσεις. Αυτό αποτελεί μία πρώτη "διαρροή" του τοιχείου, που όπως φαίνεται από το διάγραμμα 2.2 ακολουθείται από μία δεύτερη για μία εκ νέου μικρή μετατόπιση (στο συγκεκριμένο

παράδειγμα η πρώτη διαρροή συμβαίνει για μετατόπιση κορυφής 0.5mm και η δεύτερη για 7mm). Η δεύτερη "διαρροή" του λικνιζόμενου τοιχείου, πιθανός να οφείλεται στην πλαστικοποίηση της βάσης του. Στη συνέχεια η απόκριση της κατασκευής είναι γραμμική αφού όλα τα στοιχεία είναι ελαστικά και το λικνιζόμενο τοίχιο θεωρητικά έχει δεν φτάνει πραγματική διαρροή λόγω τάσεων. Επίσης όπως φαίνεται από το ίδιο διάγραμμα, η κράτυνση της κατασκευής διαφοροποιείται ανάλογα με την ποιότητα σκυροδέματος του τοιχείου.

Τα εντατικά μεγέθη των μελών διαφοροποιούνται πολύ μεταξύ του ενισχυμένου και του μη ενισχυμένου πλαισίου. Έτσι, ενδιαφέρον παρατήρηση είναι η κατανομή των επιπρόσθετων εντατικών μεγεθών:

Το αριστερό υποστυλωμα (αν η δύναμη έχει διεύθυνση προς τα δεξιά) αναλαμβάνει μεγαλύτερα εντατικά μεγέθη σε σχέση με το αν δεν υπήρχε το τοίχιο. Εν αντιθέσει, το δεξιό υποστυλωμα αναλαμβάνει μικρότερα. Όπως αναμενόταν στην δοκό ασκείται μία κατακόρυφη δύναμη λόγω του λικνισμού του τοιχείου (εικόνα 2.3). Για αυτό τον λόγο παρατηρείται ότι η τοποθέτηση του τοιχείου προκαλεί αύξηση της τέμνουσας δύναμης αριστερά του τοιχείου, ενώ δεξιά του τοιχείου οι τέμνουσες μειώνονται.

Η πιο πάνω σύγκριση αναφέρεται για κοινή μετατόπιση των συγκρινόμενων πλαισίων. Στο σεισμό όμως το ενισχυμένο πλαίσιο θα αναπτύξει μικρότερη στοχευόμενη μετατόπιση. Έτσι τα συμπράσματα δεν κρίνονται ασφαλές και θα προσδιοριστούν σε επόμενο κεφάλαιο.

# Κεφάλαιο 3

---

## **Ανελαστικές αναλύσεις μονώροφου πλαισίου χωρίς περιορισμό μετακινήσεων και παραμετροποιημένες ως προς την ποιότητα σκυροδέματος**

### **3.1 Εισαγωγή**

Στο προηγούμενο κεφάλαιο όπου τα μέλη θεωρήθηκαν ελαστικά μελετήθηκε το ανελαστικό λικνιζόμενο τοίχιο ως μέλος ενός μονώροφου πλαισίου. Στην πραγματικότητα όλα τα υλικά συμπεριφέρονται ανελαστικά και ιδιαίτερα το σκυρόδεμα που όπως είναι γνωστό δεν έχει την ίδια συμπεριφορά όταν εφελκύεται και όταν θλίβεται. Έτσι είναι αναγκαίο να διερευνηθεί το αποτέλεσμα της συνύπαρξης της ανελαστικότητας του λικνιζόμενου τοιχείου και των μελών του πλαισίου. Η διερεύνηση θα δώσει πιο ρεαλιστικό αποτέλεσμα όσο αφορά την επίδραση του προκατασκευασμένου λικνιζόμενου τοιχείου όταν τοποθετηθεί ως ενίσχυση σε μία υφιστάμενη κατασκευή.

Συγκεκριμένα, στο μοντέλο θεωρήθηκε ότι η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος είναι μηδενική. Τα υποστυλώματα κατασκευάζονται από σκυρόδεμα ποιότητας C30, ενώ η δοκός θεωρήθηκε ως ελαστική για τον λόγο ότι στο σχεδιασμό θέλουμε να αποφύγουμε πλαστικοποίηση στο μέσο της δοκού που θα προκληθεί από το λικνιζόμενο τοίχιο. Στο σημείο εκεί αναμένονται πολύ μεγάλες ροπές, που όμως θα οπλισθεί τοπικώς. Εξάλλου, σε υφιστάμενο κτήριο η δοκός στο μέσο δεν θα έχει πάνω οπλισμούς, άρα θα διέρρει πολύ εύκολα, έτσι είναι αναγκαία η ενίσχυση της δοκού. Τέλος, το σκυρόδεμα του λικνιζόμενου τοιχείου είτε είναι ελαστικό, είτε έχει συγκεκριμένη ποιότητα σκυροδέματος (C20, C25, C30, C35, C40, C45, C50).

### **3.2 Γεωμετρία**

Η γεωμετρία και τα στατικά φορτία του πλαισίου επιλέχθηκαν έτσι ώστε το σεισμικό φορτίο να δίνει τέτοια πλαστιμότητα στα υποστυλώματα για είναι καλύτερα κατανοητή η επιρροή του τοιχείου σε όλα τα μεγέθη. Η γεωμετρία που επιλέχθηκε φαίνεται στις εικόνες 2.2 και 2.3.

Η διαστασιολόγηση των υποστυλωμάτων γίνεται λαμβάνοντας υπόψη συντελεστή συμπεριφοράς  $q=6$  και  $q=3$ , όμως επιλέχθηκε να παρουσιαστεί στο παρόν κεφάλαιο μόνο η πρώτη περίπτωση μιας και θα παρουσιάσουν τα ίδια ποιοτικά αποτελέσματα. Το πλαίσιο που διαστασιολογήθηκε συντελεστή συμπεριφοράς  $q=6$  σε καινούρια αλλά υποδιαστασιολογημένη κατασκευή. Έτσι, προκύπτουν υποστυλώματα διατομής 0,35x0,35

και οπλισμό 4Φ20. Επιπλέον η δοκός επιλέχθηκε να θεωρηθεί ελαστική, επειδή στην πραγματικότητα θα εξασφαλιστεί η μη διαρροή της τουλάχιστο στο μέσο.

Τα αποτελέσματα που παραθέτονται πιο κάτω προέκυψαν από ανάλυση Push Over μέχρι συγκεκριμένη μετατόπιση που έχει τεθεί, ωστόσο στο σεισμό σχεδιασμού θα αναπτυχθούν πιο μικρές μετατοπίσεις από αυτές που παρουσιάζονται.

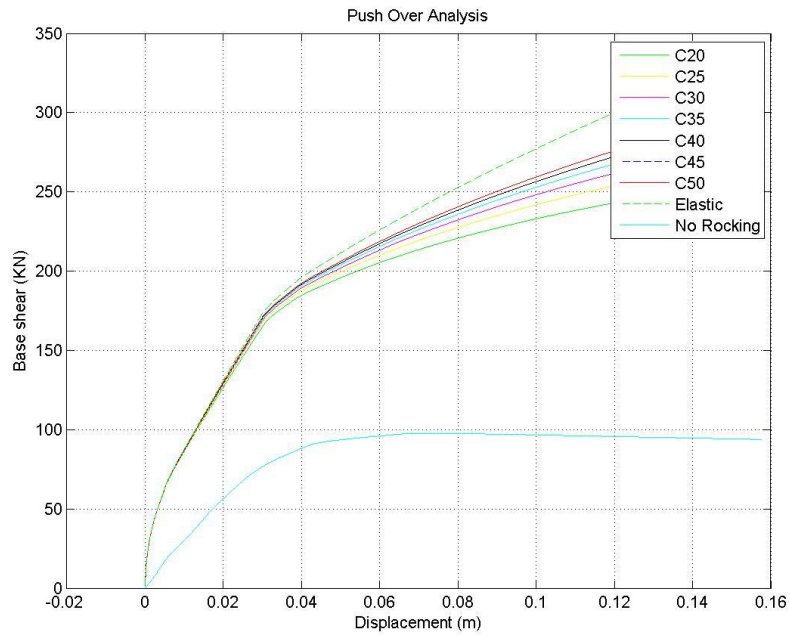
### **3.3 Αποτελέσματα και παρατηρήσεις της ανάλυσης Pushover**

#### **3.3.1 Καμπύλες ικανότητας**

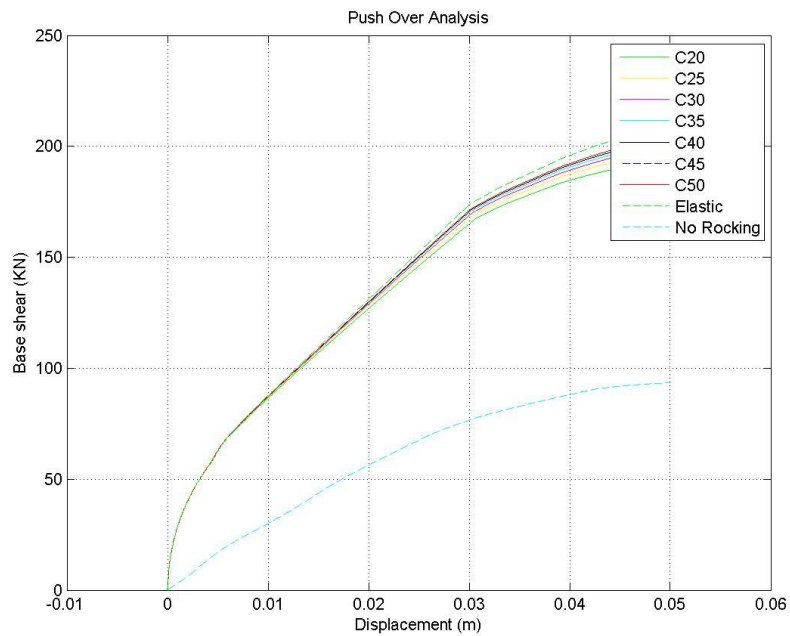
Όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο το τοίχειο δίνει μεγάλη αύξηση της δυσκαμψίας στο πλαίσιο με αποτέλεσμα τη συνολική αύξηση της κατασκευής. Παρόλα αυτά, η δυσκαμψία μειώνεται ραγδαία μόλις προβεί σε λικνισμό για μικρή μετατόπιση κορυφής καθώς επίσης συνεχίζει να μειώνεται αλλά με μικρότερο ρυθμό μέχρι να μηδενιστεί. Στην πραγματικότητα όμως η δυσκαμψία μηδενίζεται αλλά κρατιέται σχεδόν σταθερή.

Στο παρόν υποκεφάλαιο θα μελετηθεί πως επηρεάζεται η αντοχή όταν το πλαίσιο είναι ανελαστικό, καθώς αναμένεται η ανελαστικότητα των υποστυλωμάτων και των δοκών να μειώσει την αντοχή. Ενώ στο πλαίσιο με ελαστικά μέλη όταν "διέρρει" το τοίχειο αναλαμβάνεται και άλλη οριζόντια δύναμη αφού τα υποστυλώματα και η δοκός κρατούσαν την δυσκαμψία τους, στο ανελαστικό πλαίσιο προβλέπεται ότι θα υπάρξει καμπύλωση της καμπύλης ικανότητας φτάνοντας μία μέγιστη αντοχή. Σημαντικό όμως είναι να μελετηθεί πότε διαρρέουν τα υποστυλώματα σε σχέση με το τοίχειο για να δούμε τελικά αν η δυσκαμψία που προσφέρει το λικνιζόμενο τοίχειο είναι ικανή να αυξήσει σημαντικά την αντοχή.

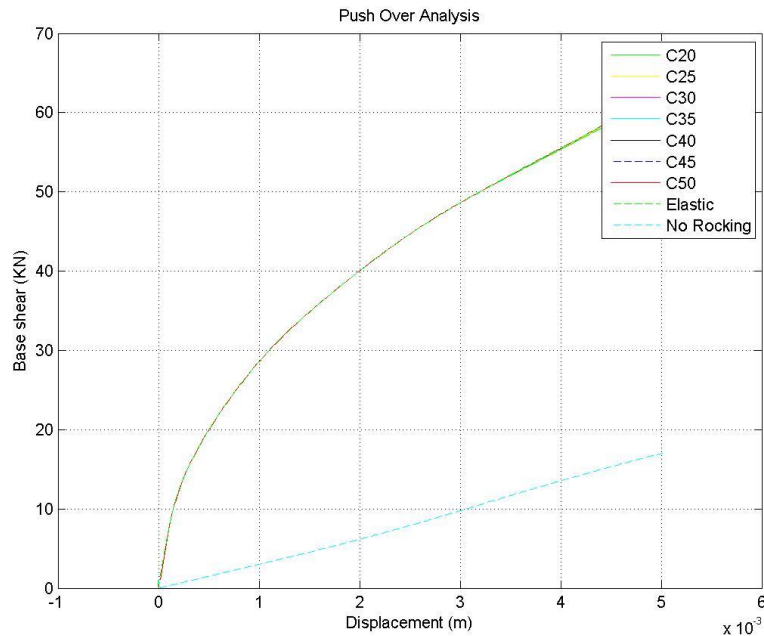
Πιο κάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες ικανότητας:



Διάγραμμα 3.1: Καμπύλη ικανότητας



Διάγραμμα 3.2: Καμπύλη ικανότητας (μεγέθυνση) μέχρι μετατόπιση 50mm μετατόπιση



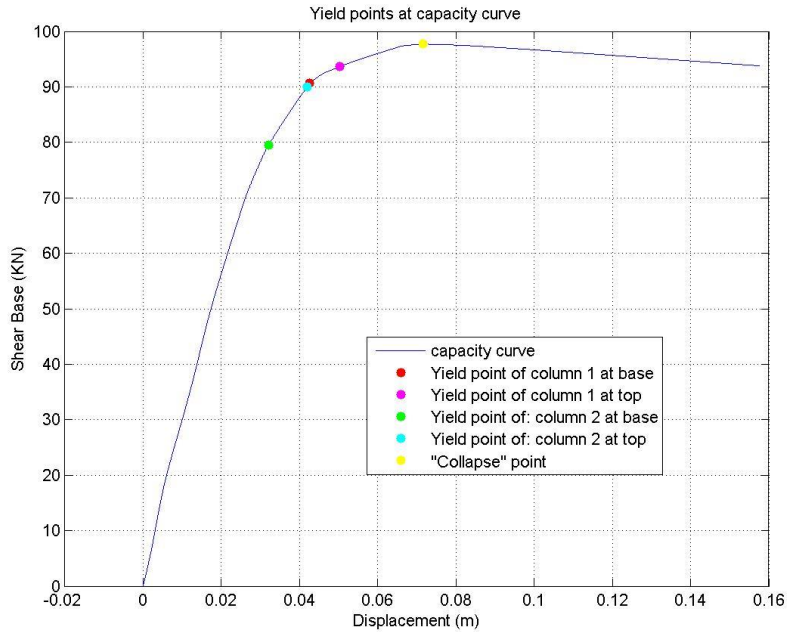
**Διάγραμμα 3.3: Καμπύλη ικανότητας (μεγέθυνση) μέχρι μετατόπιση 5mm μετατόπιση**

Παρατηρώντας τα πιο πάνω διαγράμματα των καμπύλων ικανότητας επαληθεύεται η πρόβλεψη ότι στη καμπύλη θα είναι εμφανές η διαρροή των μελών. Στη συνέχεια του σημείου όπου διαρρέουν τα υποστυλώματα τόσο στη βάση όσο και στην κορυφή σημειώνεται συνεχή άνοδος της αντοχής αλλά με μειούμενη δυσκαμψία. Αυτή είναι μία ιδεατή μορφή αφού στην πραγματικότητα σε κάποια μετατόπιση θα είχε πτώση. Οφείλεται στην θεώρηση ελαστικής δοκού, αφού όταν διαρρεύσουν τα υποστυλώματα το σύστημα δεν μετατρέπεται σε μηχανισμό, και έτσι έχει την ικανότητα να αναλάβει και άλλο φορτίο. Η παραμένουσα δυσκαμψία προσφέρεται αποκλειστικά από το λικνιζόμενο τοίχειο. Η μειούμενη δυσκαμψία λοιπός δείχνει ότι το τοίχειο διαρρέει αλλά με πολύ αργό ρυθμό.

Επίσης, η ποιότητα σκυροδέματος του λικνιζόμενου τοίχειου επηρεάζει την αντοχή του συστήματος μόνο για μεγάλες μετατοπίσεις, που στο πλαίσιο δεν θα αναπτυχθούν.

### 3.3.2 Σειρά δημιουργίας πλαστικών αρθρώσεων

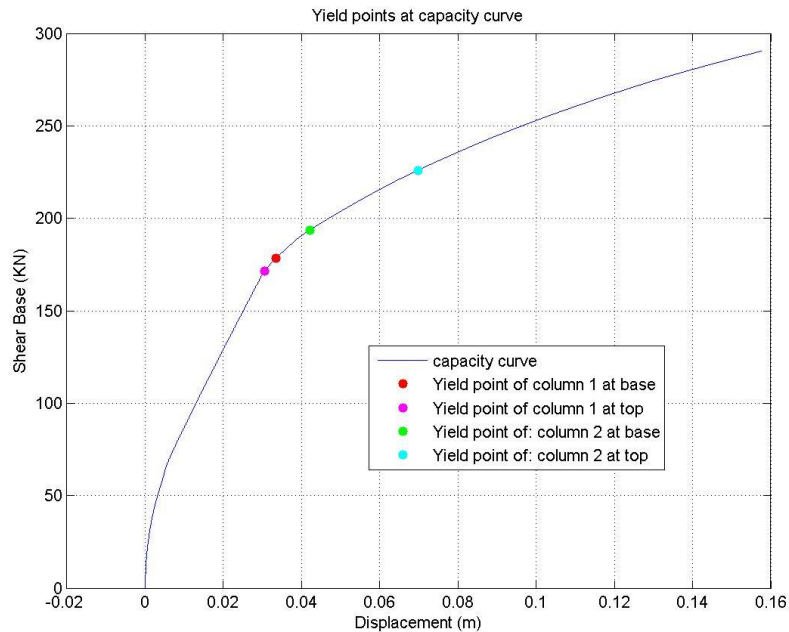
Σημαντικό για την κατανόηση της βελτίωσης της συμπεριφοράς του πλαισίου μετά την τοποθέτηση του τοίχειου είναι να παρακολουθήσουμε τη σειρά που γίνονται οι πλαστικές αρθρώσεις στις 2 περιπτώσεις. Ακολουθούν οι αναλύσεις Push Over κατά τις οποίες το οριζόντιο φορτίο αυξανόταν μέχρι επιτευχθεί μηχανισμός στο πλαίσιο.



**Διάγραμμα 3.4:** Καμπύλη ικανότητας μη ενισχυμένου πλαισίου και τα σημεία πλαστικοποίησης

Όπως ήδη προβλέφθηκε στο κεφάλαιο 2 (Διάγραμμα 2.7) για τα μη ενισχυμένα πλαίσια, οι πρώτες πλαστικές αρθρώσεις θα επέλθουν στην κορυφή και στη βάση του υποστυλώματος 2, αφού το οριζόντιο φορτίο της ανάλυσης δίνει ροπές ίδιας φοράς με ατών που προκλήθηκαν από στατικά φορτία. Σε αντίθεση, η ανάλυση Push Over προκαλεί διαφορετική φορά ροπών στο υποστύλωμα 1 σε σχέση με αυτές που οφείλονται στα στατικά φορτία.

Συγκεκριμένα από το διάγραμμα 3.4 γίνεται εμφανές ότι η πρώτη πλαστική άρθρωση θα γίνει στην βάση του υποστυλώματος 2 που ακολουθείται από την διαρροή στην κορυφή του ίδιου υποστυλώματος σε μεγάλη όμως αύξηση της οριζόντιας δύναμης. Η πλαστική άρθρωση στην βάση του δεξιού υποστυλώματος αλλάζει το στατικό σύστημα και έτσι αυξάνουν οι ροπές στο αριστερό υποστύλωμα. Έτσι, η επόμενη αύξηση θα γίνει σε πολύ μικρή αύξηση της τέμνουσας βάσης στη βάση του υποστυλώματος 1. Τελευταία πλαστική άρθρωση του πλαισίου γίνεται στην κορυφή του υποστυλώματος 2, όπου αυτό το σημείο είναι το πιο λίγο καταπονημένο στο μη ενισχυμένο πλαίσιο για την συγκεκριμένη φορά του οριζόντιου φορτίου. Η πλαστική άρθρωση αυτή μετατρέπει το πλαίσιο σε μηχανισμό και για αυτό γίνεται εμφανές με ένα μέγιστο φορτίο (φορτίο «κατάρρευσης»). Ο πτωτικός κλάδος που ακολουθεί οφείλεται στα φαινόμενα P-Δ, δηλαδή οι μετατοπίσεις προκαλούν πρόσθετες ροπές στη βάση, άρα για να έχουμε ίδιες ροπές, πρέπει να μειωθούν σταδιακά οι οριζόντιες δυνάμεις, το οποίο ακολουθείται από πτώση της καμπύλης ικανότητας.



**Διάγραμμα 3.5:** Καμπύλη ικανότητας ενισχυμένου πλαισίου και τα σημεία πλαστικοποίησης

Από το διάγραμμα 3.5 που αντιστοιχεί σε ενισχυμένο πλαίσιο παρατηρείται ότι αλλάζει η σειρά δημιουργίας πλαστικών αρθρώσεων. Σημαντικό είναι ότι το λικνιζόμενο τοιχείο βοηθάει στην καλύτερη κατανομή των ροπών στα μέλη του πλαισίου. Για αυτόν τον λόγο σε συνδυασμό με την επίδραση της αξονικής των μελών που θα δούμε πιο κάτω, όλες οι πλαστικές αρθρώσεις γίνονται πρώτα στο αριστερό υποστυλώμα και μετά στο δεξιό. Μάλιστα η πλαστική άρθρωση στην κορυφή του δεξιού υποστυλώματος συμβαίνει για πολύ μεγάλη τέμνουσα βάσης. Αυτό, οφείλεται στο γεγονός όπως θα δούμε και πιο κάτω, ότι το λικνιζόμενο τοιχείο λαμβάνει πολύ μεγάλο μέρος της ροπής βάσης καθώς επίσης δημιουργεί αξονική για να παραληφθεί επιπλέον ροπή μέσα από ζεύγος δυνάμεων.

Σε αντίθεση με το πλαίσιο χωρίς το τοιχείο, στο ενισχυμένο η πρώτη πλαστική άρθρωση παρατηρείται στην κορυφή του υποστυλώματος 1. Αυτό οφείλεται σε 2 γεγονότα. Το πρώτο είναι ότι όπως επισημάνθηκε το τοιχείο προκαλεί αύξηση της ροπής στο υποστυλώμα 1 (βλέπε διάγραμμα 2.10) καθώς επίσης αναπτύσσει αξονικό εφελκυσμό σε αυτό και άρα μειώνει την ροπή αντοχής του. Και το δεύτερο είναι ότι αφού αυξάνεται η φέρουσα ικανότητα του πλαισίου, υπάρχει και μεγαλύτερη απαίτηση σε ροπή η οποία αναλαμβάνεται εν μέρει από ζεύγος αξονικών δυνάμεων. Έτσι για μεγάλα οριζόντια φορτία η αξονική του υποστυλώματος 1 γίνεται εφελκυστική και άρα έχει μικρότερη αντοχή σε ροπή.

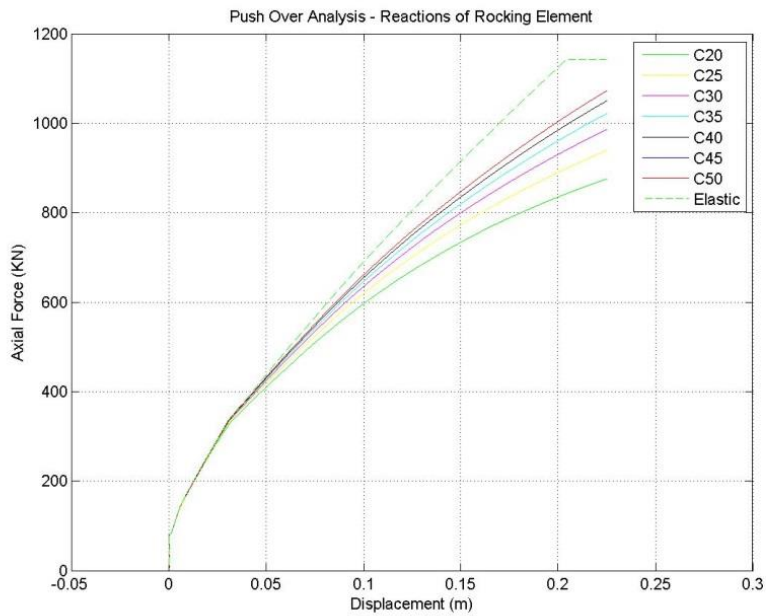
Η δεύτερη πλαστική άρθρωση κατά σειρά δημιουργείται στη βάση του ίδιου υποστυλώματος, ακολουθεί η βάση του υποστυλώματος 2 και τέλος η τέταρτη πλαστική άρθρωση δημιουργείται στην κορυφή του υποστυλώματος 2.



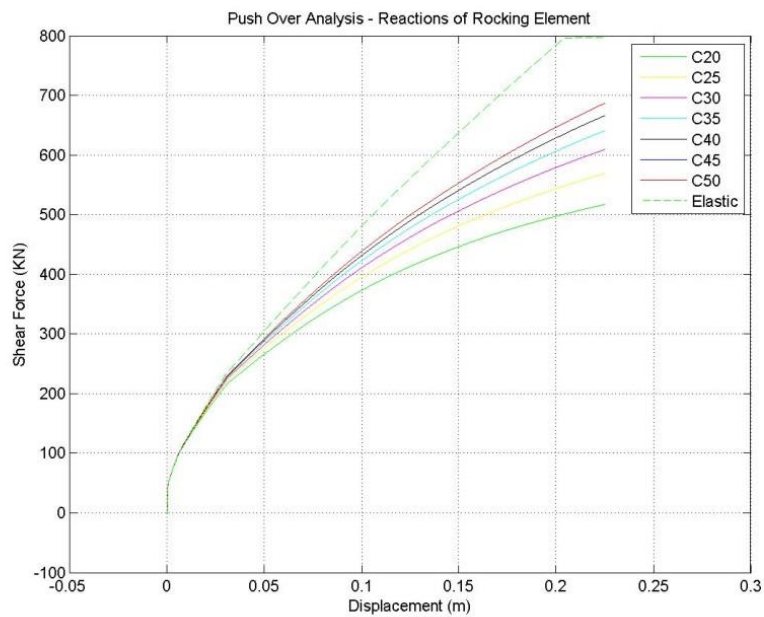
Επιπρόσθετη παρατήρηση είναι ότι μέχρι την πρώτη πλαστική άρθρωση η συμπεριφορά του πλαισίου είναι παρόμοια με αυτή του πλαισίου όπου τα μέλη ήταν ελαστικά (βλέπε διάγραμμα 2.2).

### 3.3.3 Αντιδράσεις στήριξης του λικνιζόμενου τοιχείου

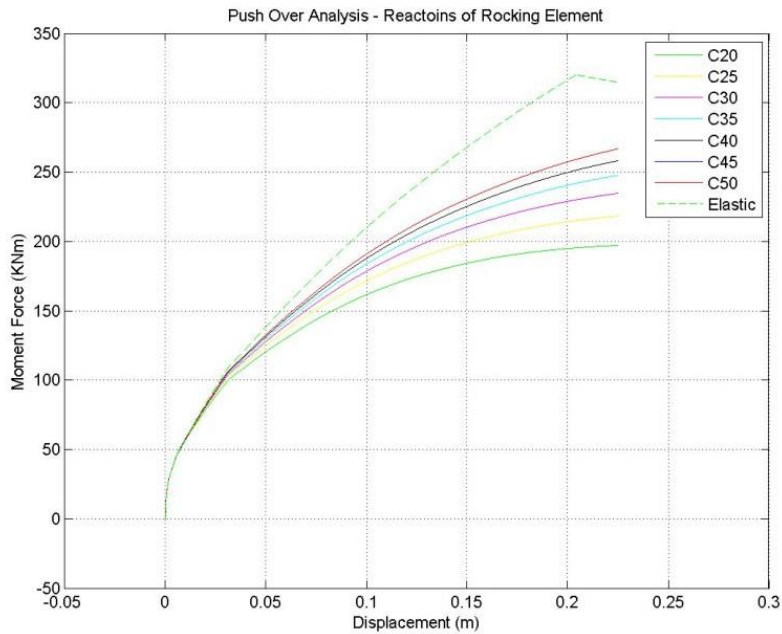
Οι αντιδράσεις στήριξης (αξονική δύναμη, τέμνουσα δύναμη και ροπή κάμψης) παρουσιάζονται στα πιο κάτω διαγράμματα παραμετροποιημένα ως προς την ποιότητα του σκυροδέματος.



Διάγραμμα 3.6: Αξονική δύναμη στη βάση του τοιχείου



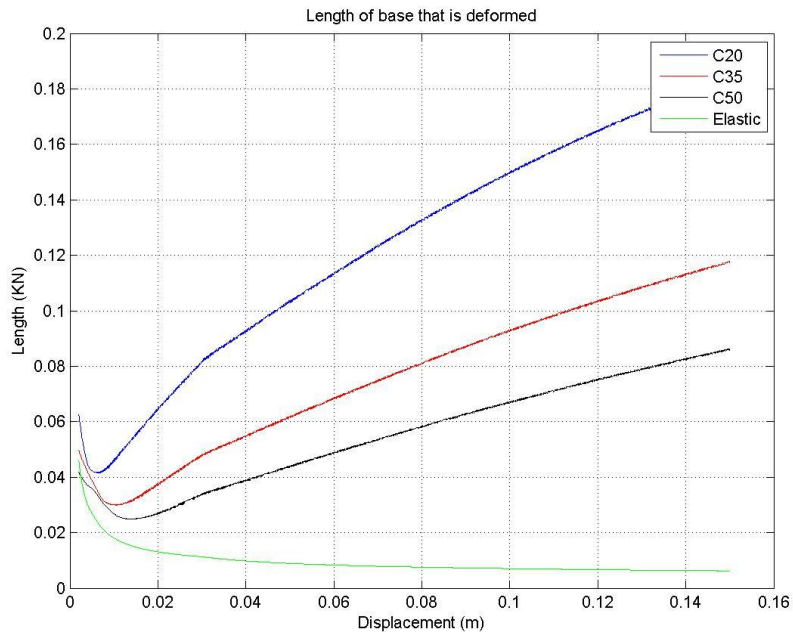
Διάγραμμα 3.7: Τέμνουσα δύναμη στη βάση του τοιχείου



**Διάγραμμα 3.8: Ροπή κάμψης στη βάση του τοιχείου**

Όπως και στις ελαστικές αναλύσεις, η ποιότητα του σκυροδέματος δεν επηρεάζει τις αντιδράσεις στήριξης του λικνιζόμενου τοιχείου για μικρές μετατοπίσεις. Τις επηρεάζει όμως για μεγάλες μετατοπίσεις που ίσως στην συγκεκριμένη κατασκευή να μην αναπτυχθούν, παραμένει όμως σημαντική παρατήρηση. Παρόλα αυτά θα πρέπει να ελεγχθούν οι καμπυλότητες και οι παραμορφώσεις της θλιβόμενης περιοχής του τοιχείου για εξασφαλιστεί ασφαλές συμπέρασμα ως προς την ασφάλεια του τοιχείου υπό διάφορες ποιότητες σκυροδέματος.

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα των αντιδράσεων στήριξης του τοιχείου όταν τα μέλη του πλαισίου είναι ανελαστικά με τα αντίστοιχα του πλαισίου με ελαστικά υποστυλώματα και δοκούς, παρατηρείται η ίδια ποιοτική συμπεριφορά. Και στις δύο αναλύσεις οι αντιδράσεις στήριξης αυξάνονται συνεχώς, με τη διαφορά ότι στο ανελαστικό πλαίσιο τα εντατικά μεγέθη του πλαισίου είναι πολύ μικρότερα. Φυσικά, αυτό αναμενόταν αφού οφείλεται στην πλαστικοποίηση των υπόλοιπων μελών. Η ικανότητα του τοιχείου να αναλαμβάνει συνεχώς φορτίο οφείλεται σε δύο λόγους. Πρώτος είναι ότι δεν δημιουργείται μηχανισμός κατάρρευσης και το τοιχείο είναι το μόνο που αναλαμβάνει την ροπή πέρα του σημείου πλαστικοποίησης της βάσης και της κορυφής των υποστυλωμάτων. Κατά συνέπεια αυξάνεται τόσο η τέμνουσα όσο και η αξονική του τοιχώματος. Ο δεύτερος είναι ότι το τοιχείο δεν διαρρέει πέρα από την βάση του. Η θλιβόμενη - παραμορφωμένη περιοχή της βάσης του τοιχείου είναι σχεδόν όλη πλαστικοποιημένη όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο. Παρόλα αυτά, η αύξηση της θλίψης βελτιώνει την συμπεριφορά του τοιχείου αυξάνοντας το μήκος της βάσης και έτσι δίνει τη δυνατότητα στο τοιχείο να αναλάβει και άλλο φορτίο (βλέπε επόμενο διάγραμμα).



**Διάγραμμα 3.9: Μεταβολή μήκους θλιβόμενης - παραμορφωμένης περιοχής της βάσης του τοιχείου συναρτήσει της μετατόπισης κορυφής**

Από το πιο πάνω διάγραμμα γίνεται επίσης φανερό πόσο επηρεάζεται το μήκος της θλιβόμενης περιοχής της βάσης του τοιχείου από την ποιότητα του σκυροδέματος του. Όσο μικρότερη θλιπτική αντοχή έχει το σκυρόδεμα, τόσο μεγαλύτερο θλιβόμενο μήκος απαιτείται, αφού τα δρώσα εντατικά μεγέθη πρέπει να αναληφθούν από το ολοκλήρωμα των θλιβόμενων τάσεων στη βάση.

Το ελαστικό τοιχείο δίνει τη φαινομενικός αναμενόμενη μεταβολή του θλιβόμενου μήκους. Δηλαδή όσο στρίβει το τοιχείο τόσο μικρότερη διεπιφάνεια έχει την υποδομή. Αυτό βεβαίως οφείλεται στην ελαστικότητα του υλικού που κάνει ικανό το τοιχείο να αναπτύξει τεράστιες τάσεις στην διεπιφάνεια.

Τέλος, η πτώση του παραμορφωμένου μήκους της βάσης για όλες τις ποιότητες σκυροδέματος και σε μικρές μετατοπίσεις, οφείλεται στη λογική του ελαστικού που αναφέρθηκε πιο πάνω, δηλαδή όσο στρίβει το τοιχείο τόσο μικρότερη διεπιφάνεια. Το σημείο όμως που αρχίζει η άνοδος του μήκους αυτού, σηματοδοτεί την πλήρη πλαστικοποίηση της βάσης και την ανικατότητα της να παραλάβει και άλλο φορτίο. Έτσι, δημιουργείται η ανάγκη να αυξηθεί το συγκεκριμένο μήκος.

Η πτώση βεβαίως οφείλεται στην μεγάλη αύξηση της θλιπτικής δύναμης και όχι στην αύξηση της ροπής που θα έδινε αντίθετο αποτέλεσμα. Δηλαδή μεγαλύτερο μέρος της ροπής, παραλαμβάνεται από ζεύγος αξονικών δυνάμεων παρά από το ίδιο το τοιχείο. Για αυτό τον λόγο παρατηρείται στο διάγραμμα 3.8 ότι η δρώσα ροπή του τοιχείου πάει να οριζοντιοποιηθεί, σε αντίθεση με την αξονική του τοιχείου που αυξάνει συνεχώς (βλέπε διάγραμμα 3.6).

### **3.3.4 Διγράμματα εντατικών μεγεθών των μελών του πλαισίου**

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα διαγράμματα όλων των εντατικών μεγεθών συναρτήσει της μετατόπισης κορυφής, για όλα τα μέλη του ανελαστικού πλαισίου ενισχυμένα ή μη με λικνιζόμενο τοίχιο . Σκοπός είναι η σύγκριση των παραμετροποιημένων ως προς την ποιότητα του σκυροδέματος του λικνιζόμενου τοιχείου διαγραμμάτων του ανελαστικού πλαισίου με τα αντίστοιχα διαγράμματα του ελαστικού πλαισίου.

#### **3.3.4.1 Ροπές υποστυλωμάτων**

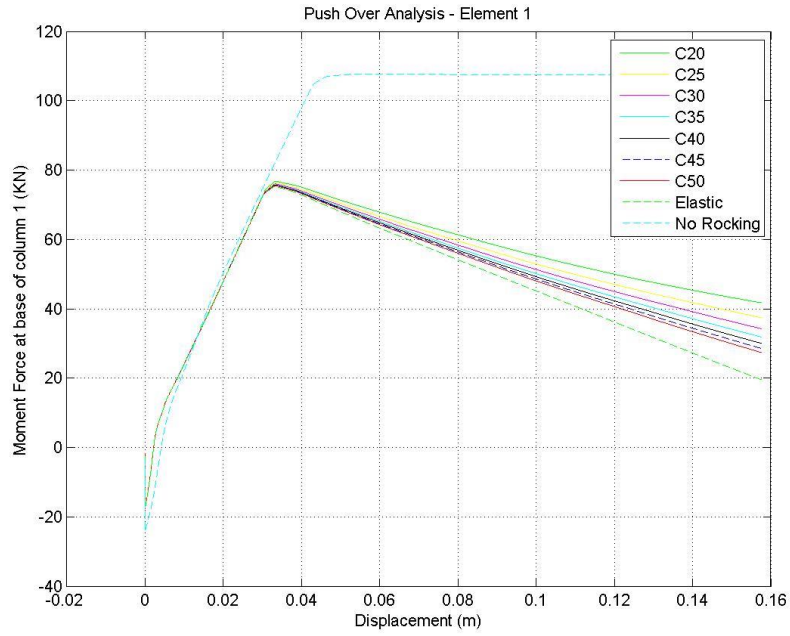
Όπως γίνεται αντιληπτό στα πιο κάτω διαγράμματα επαληθεύεται ότι οι ροπές φτάνουν σε μέγιστο σημείο και έπειτα πέφτουν λόγω πλαστικοποίησης του σκυροδέματος.

Όπως και στις ελαστικές αναλύσεις παρατηρούμε ότι η ροπή στο υποστύλωμα 1 τόσο στη βάση όσο και στην κορυφή αλλάζει πρόσημο επειδή τα στατικά φορτία προκαλούν ροπή διαφορετικής φοράς από την ροπή η οποία οφείλεται στο οριζόντιο φορτίο.

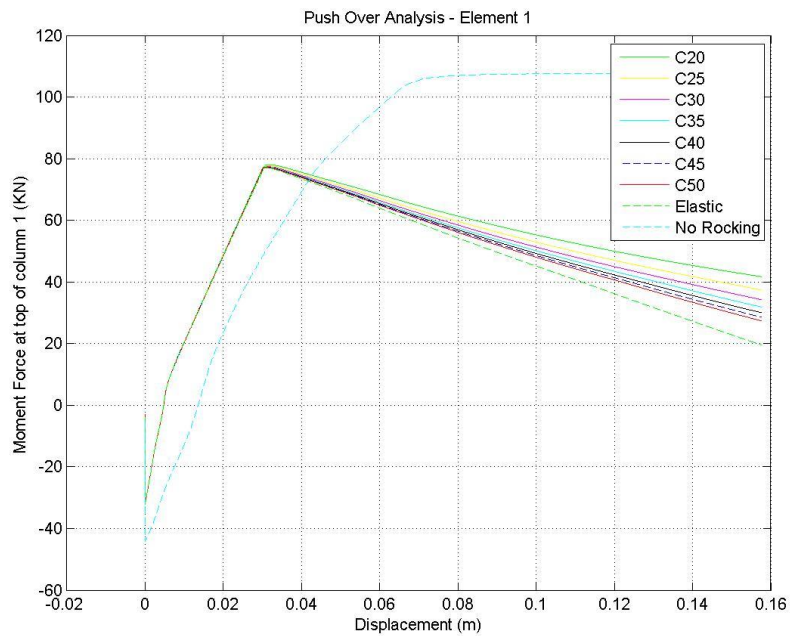
Η επιρροή του λικνιζόμενου τοιχείου στο υποστύλωμα 1 είναι διαφορετική στις ελαστικές αναλύσεις σε σχέση με τις ανελαστικές. Σύμφωνα με το διάγραμμα 2.10 στις ελαστικές αναλύσεις το τοίχιο αυξάνει την ροπή που καλείται να αναλάβει το αριστερό υποστύλωμα. Σε αντίθεση με τις ανελαστικές αναλύσεις που για κάποια μικρή μετακινήσεις κορυφής και έπειτα η ροπή είναι μειωμένη, ενώ για μικρότερες μετατοπίσεις ισχύει ότι ίσχυε και στα ελαστικά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στα ανελαστικά πλαίσια επηρεάζει και η αξονική δύναμη, που όπως εξηγήθηκε γίνεται εφελκυστική στο συγκεκριμένο υποστύλωμα. Έτσι μειώνεται η ροπή αντοχής και για αυτό πλαστικοποιείται αρκετά γρήγορα χωρίς να είναι ικανό να αναλάβει περισσότερη ροπή.

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, όταν διαρρεύσει κάποιο μέλος, μεγαλύτερο ποσοστό της επιπρόσθετης ροπής αναλαμβάνεται από ζεύγος δυνάμεων. Για αυτό τον λόγο μετά την διαρροή του υποστυλώματος 1 η ροπή αντοχής του τοιχείου πέφτει απότομα.

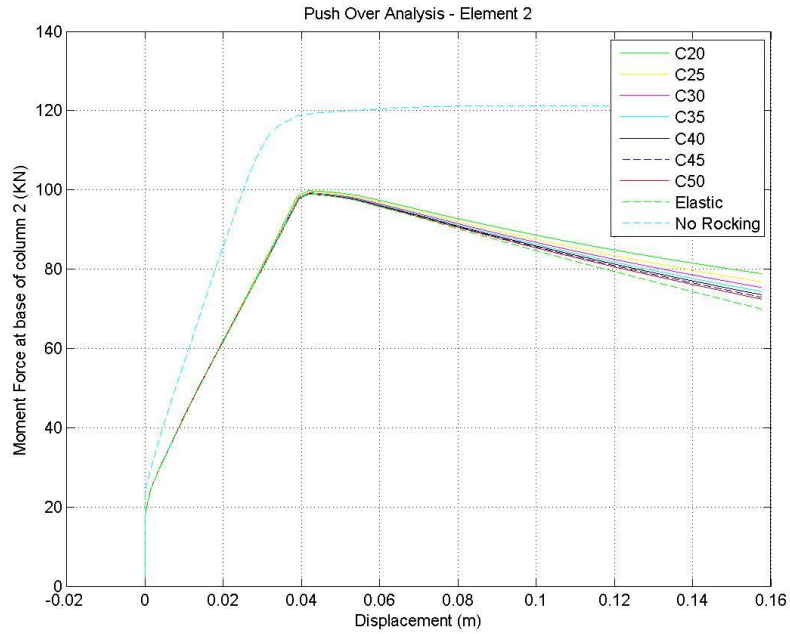
Το υποστύλωμα 2 φαίνεται να ανακουφίζεται από την ύπαρξη του τοιχείου. Όμως αυτή η μείωση οφείλεται παρομοίως στην αξονική δύναμη. Σύμφωνα με το διάγραμμα αλληλεπιδράσεων αν η αξονική βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα, τότε η αύξηση της θα προκαλέσει και αύξηση της ροπής αντοχής. Έτσι στο προκείμενο παράδειγμα με τα συγκεκριμένα στατικά φορτία, αφού η αξονική δύναμη βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα ακόμα και στο πλαίσιο χωρίς ενίσχυση, η τοποθέτηση του τοιχείου θα μειώσει την ροπή αντοχής του υποστυλώματος αφού μειώνει και την θλιπτική δύναμη που του ασκείται. Η πτώση της δρώσας ροπής στο υποστύλωμα 2 μετά την διαρροή οφείλεται παρομοίως στην αλληλεπίδραση ροπής αντοχής και αξονική η οποία όπως θα δούμε σε επόμενο υποκεφάλαιο γίνεται εφελκυστική.



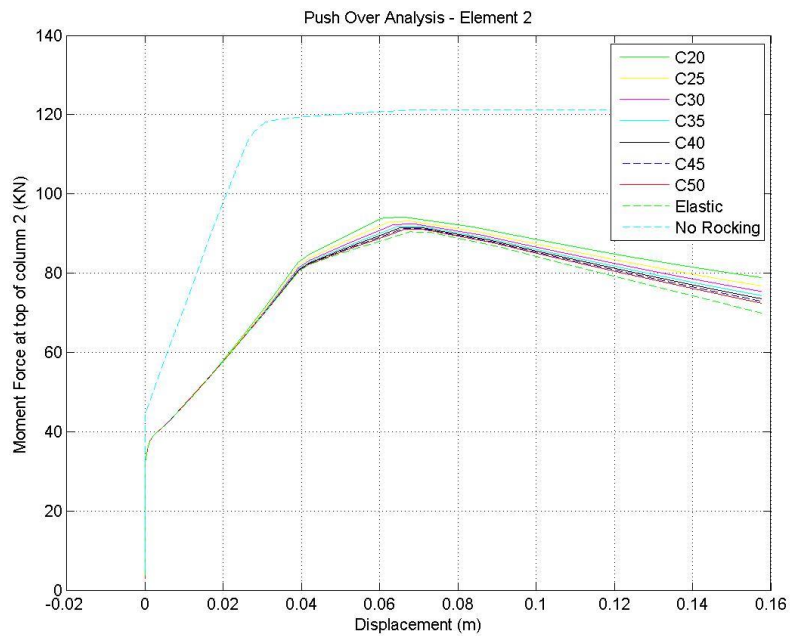
Διάγραμμα 3.10: Ροπή κάμψης υποστυλώματος 1 στη βάση



Διάγραμμα 3.11: Ροπή κάμψης υποστυλώματος 1 στην κορυφή (και δοκού στον αριστερό κόμβο)



Διάγραμμα 3.12: Ροπή κάμψης υποστυλώματος 2 στην βάση



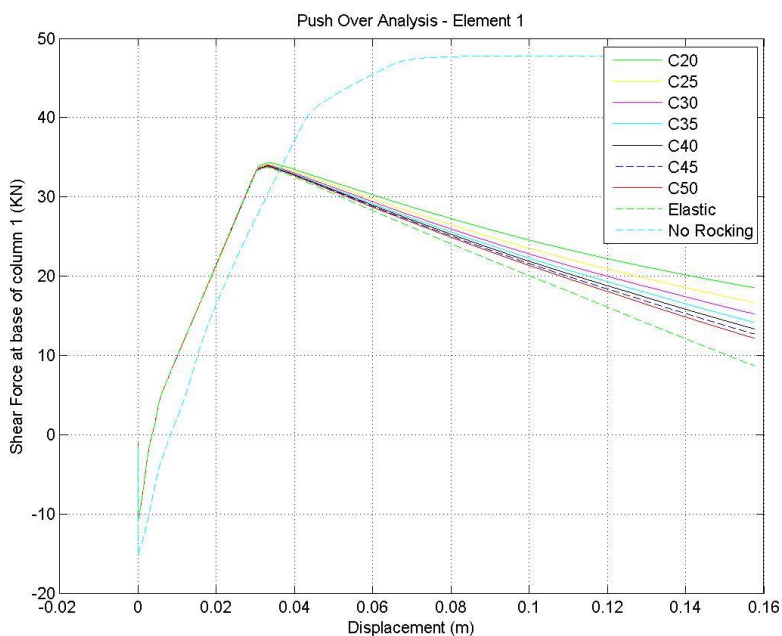
Διάγραμμα 3.13: Ροπή κάμψης υποστυλώματος 2 στην κορυφή (και δοκού στον δεξιό κόμβο)

### 3.3.4.2 Τέμνουσες δυνάμεις υποστυλωμάτων

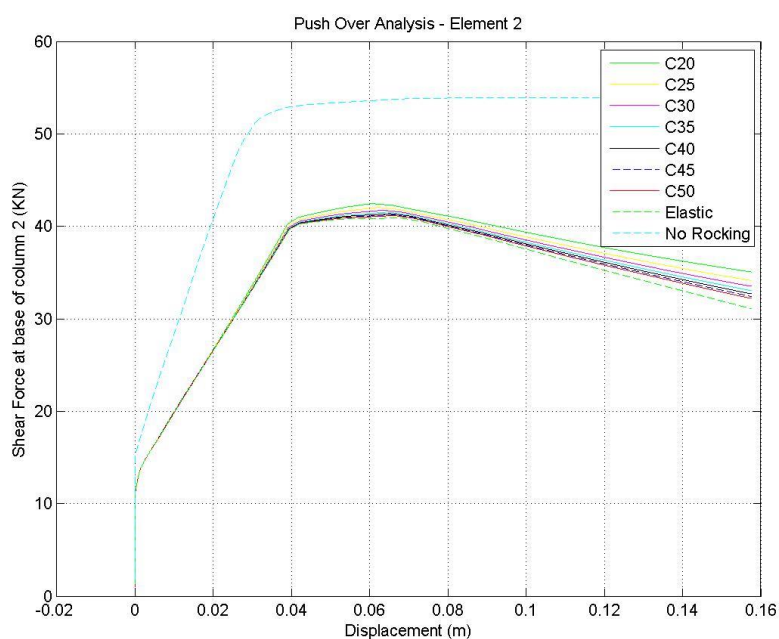
Οι τέμνουσες δυνάμεις ενδέχεται να μην επηρεάσουν την συμπεριφορά των υποστυλωμάτων όμως παρουσιάζονται για λόγους πληρότητας.

Αρχικά παρατηρείται ότι οι τέμνουσες έχουν ακριβώς την ίδια μορφή με τα διαγράμματα των ροπών στο κεφάλαιο 3.3.4.1, αφού τέμνουσα είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ροπή. Έτσι και στα δύο υποστυλώματα για συγκεκριμένη μετατόπιση, η τέμνουσα των υποστυλωμάτων στο ενισχυμένο πλαίσιο είναι μικρότερη από την τέμνουσα στο απλό πλαίσιο

Επίσης, η ποιότητα του σκυροδέματος δεν επηρεάζει την δρώσα τέμνουσα στο υποστύλωμα, παρά μόνο για αρκετά μεγάλες μετατοπίσεις.



Διάγραμμα 3.14: Τέμνουσα δύναμη στο αριστερό υποστύλωμα



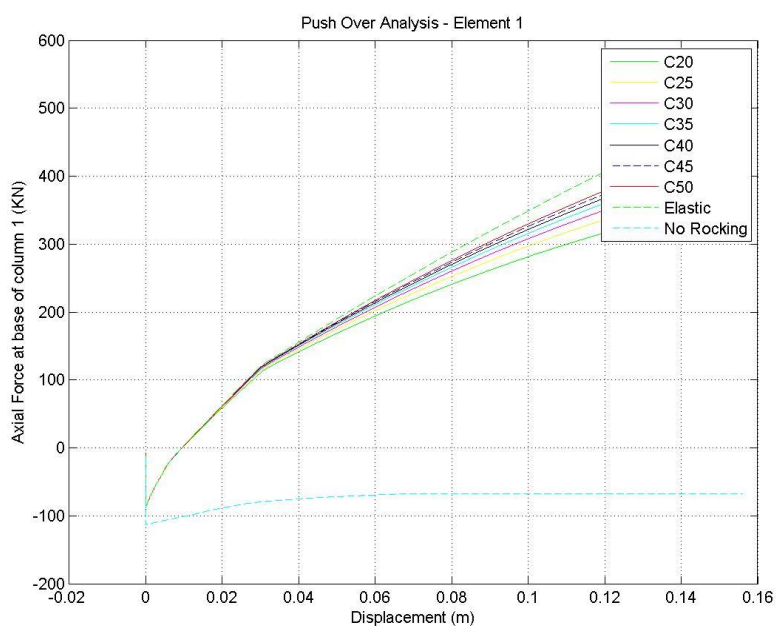
Διάγραμμα 3.15 Τέμνουσα δύναμη στο δεξιό υποστύλωμα

### 3.3.4.3 Αξονικές δυνάμεις υποστυλωμάτων

Η αξονική δύναμη του υποστυλώματος 1 στο πλαίσιο χωρίς ενίσχυση είναι αρχικώς θλιπτική και με την επιβολή του οριζόντιου φορτίου μένει πρακτικά σταθερή με ελάχιστη μείωση. Το υποστύλωμα 2 αρχίζει με την ίδια θλίψη λόγω των στατικών φορτίων, όμως στη συνέχεια θλίβεται περισσότερο (βλέπε εικόνα 2.3). Στο υποστύλωμα 1 σε ενισχυμένο πλαίσιο η αξονική μετά την επιβολή του φορτίου αλλάζει πρόσημο και γίνεται εφελκυστική.

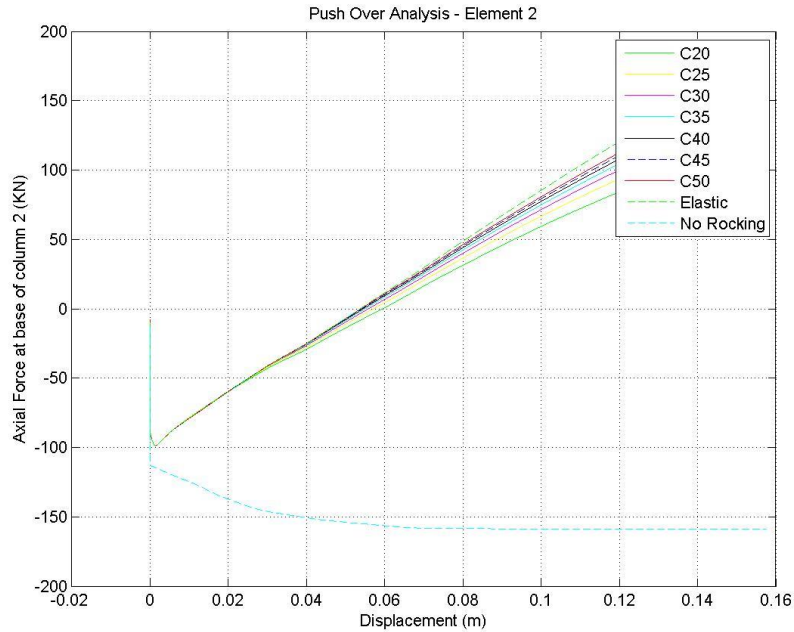
Η επιβολή οριζόντιου φορτίου προκαλεί επίσης εφελκυστική δύναμη στο δεξιό υποστύλωμα του ενισχυμένου πλαισίου. Αυτό οφείλεται στο ότι το τοιχείο κατά τον λικνισμό χρειάζεται μεγάλη αξονική δύναμη για να δουλέψει. Επειδή η αξονική δύναμη λόγω των πρόσθετων μόνιμων και κινητών φορτίων που αναλαμβάνει είναι μικρή, έτσι το τοιχείο κατά το λικνισμό του αντλεί θλιπτική αξονική δύναμη από τα υποστυλώματα. Και για αυτό τον λόγο παρατηρείται ότι το υποστύλωμα 2 εφελκύεται. Όμως ο εφελκυσμός θα συνέβαινε για μετατόπιση κορυφής άνω των 6cm που για τέτοιο δύσκαμπτο πλαίσιο δεν συμβαίνει.

Γίνεται αντιληπτό ότι στο υποστύλωμα 1 ο πρόσθετος εφελκυσμός λόγω του οριζόντιου φορτίου είναι πολύ μεγαλύτερος από του 2. Όπως φαίνεται στην εικόνα 2.3, σε πλαίσιο με συμβατικά μέλη, το οριζόντιο φορτίο θα προκαλούσε εφελκυσμό στο αριστερό υποστύλωμα και θλίψη στο δεξιό. Η αρχή αυτή παραμένει και στο πλαίσιο με λικνιζόμενο τοιχείο, με την διαφορά ότι προκαλείται πρόσθετος εφελκυσμός και στα δύο υποστυλώματα λόγω του τοιχείου. Έτσι, όπως φαίνεται και στα πιο κάτω διαγράμματα η αρχική θλιπτική αξονική δύναμη του υποστυλώματος 1 μειώνεται πολύ πιο γρήγορα από αυτή του υποστυλώματος 2.



Διάγραμμα 3.16: Αξονική δύναμη στο αριστερό υποστύλωμα





Διάγραμμα 3.17: Αξονική δύναμη στο δεξιό υποστώλιωμα

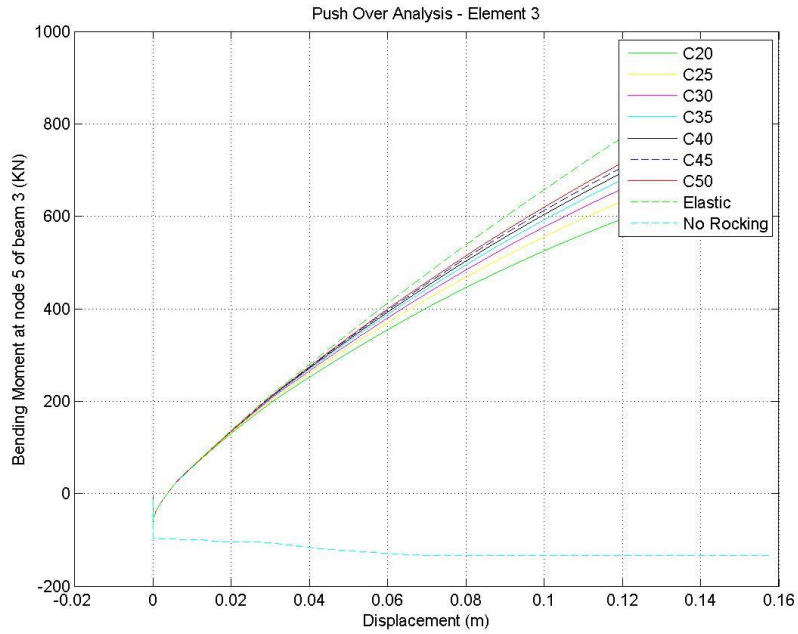
### 3.3.4.4 Ροπές δοκών

Οι ροπές των δοκών είναι καθοριστικό μέγεθος για την διαστασιολόγηση της δοκού, και για αυτό κρίνεται αναγκαίο η μελέτη ως προς την επιρροή τους από το λικνιζόμενο τοιχείο.

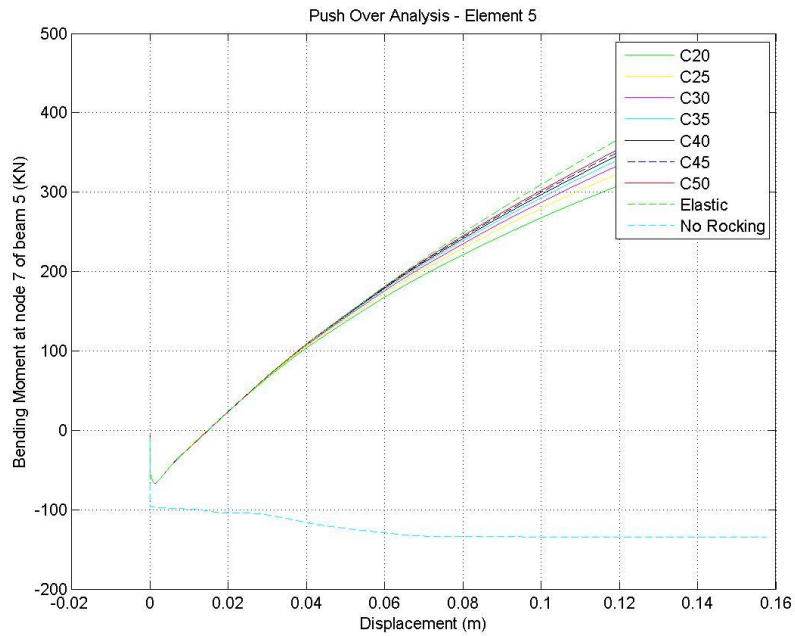
Οι ροπές στους ακραίου κόμβους του πλαισίου (κόμβοι 3 και 4) είναι ίδιες με τις αντίστοιχες των κορυφών των υποστυλωμάτων.

Ενδιάμεσα παρατηρείται ότι το λικνιζόμενο τοχείο προκαλεί μεγάλη αύξηση της ροπής κάμψης κατά απόλυτη τιμή για μετατόπιση άνω των 2 cm. Σημαντικότερο όμως είναι η αλλαγή της φοράς της ροπής, που για την δοκό είναι πολύ σημαντική αφού σε ένα υφιστάμενο πλαίσιο η δοκός είναι οπλισμένη μόνο στην κάτω ίνα. Αυτό φυσικά θα προκαλούσε απευθείας διαρροή της δοκού, και για αυτό κρίνεται αναγκαίο να ενισχυθεί.

Η μεγάλη αύξηση της ροπής στο σημείο της διεπιφάνειας της δοκού με το τοιχείο (κόμβος 5) προκαλεί αύξηση της ροπής κάμψης σε όλη την δοκό, και συγκεκριμένα φαίνεται ότι η ροπή εφελκύει τις πάνω ίνες όλης της δοκού εκτός την περιοχή κοντά στον αριστερό κόμβο. Δηλαδή, ο λικνισμός του τοιχείου τείνει να σηκώνει όλη την δοκό προς τα πάνω.



Διάγραμμα 3.18: Ροπή κάμψης της δοκού στο σημείο ανασήκωση του τοιχείου



Διάγραμμα 3.19: Ροπή κάμψης της δοκού στο σημείο υποχώρησης του τοιχείου

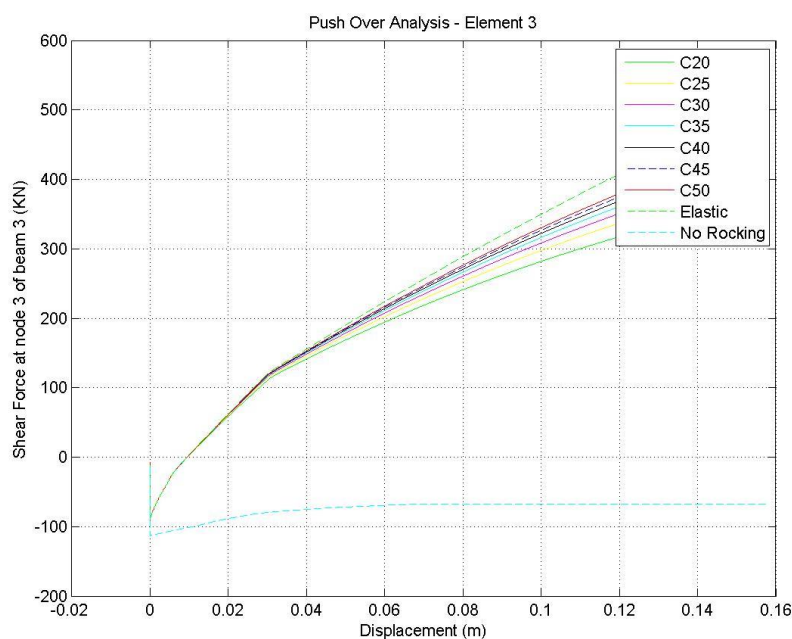
### 3.3.4.5 Τέμνουσες δυνάμεις των δοκών

Η τέμνουσα αποτελεί ένα σημαντικό μέγεθος για την διαστασιολόγηση των δοκών. Αν και στο μοντέλο του Opensees δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της τέμνουσας στην πραγματικότητα θα σπλιστεί έναντι της δράσης της και ειδικότερα στο σημείο ανασήκωσης του τοιχείου όπου ασκείται σημειακό φορτίο (βλέπε Εικόνα 2.3).

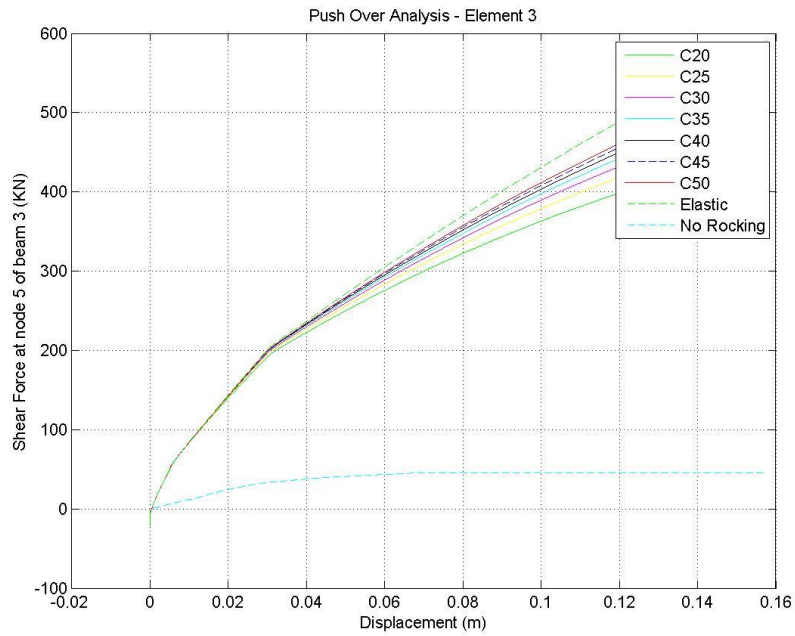
Αυτό γίνεται αντιληπτό από την πολύ μεγάλη αύξηση της τέμνουσας του διαγράμματος 3.19 που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο σημείο(κόμβος 5). Ο κόμβος 5 βρίσκεται πολύ κοντά στο κέντρο του πλαισίου (μισό πλάτος του τοιχείου αριστερά) και για αυτό τον λόγο οι τέμνουσες αν δεν υπάρχει το τοίχειο είναι πάρα πολύ μικρές. Από την άλλη στο ενισχυμένο πλαίσιο ο λικνισμός του τοιχείου προκαλεί αυτήν την πολύ μεγάλη αλλαγή του εντατικού μεγέθους στην δοκό.

Το τοίχειο έχει επίσης σημαντική επιρροή στις τέμνουσες σε όλη την δοκό. Η δρώσα τέμνουσα στον αριστερό κόμβο είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τον κόμβο 5. Αύξηση της τέμνουσας παρατηρείται και στο σημείο υποχώρησης του τοιχείου αλλά και στον δεξιό κόμβο. Οι τέμνουσες της δοκού δεξιά του τοιχείου έχουν πολύ μικρότερη τιμή από τις τέμνουσες αριστερά του τοιχείου.

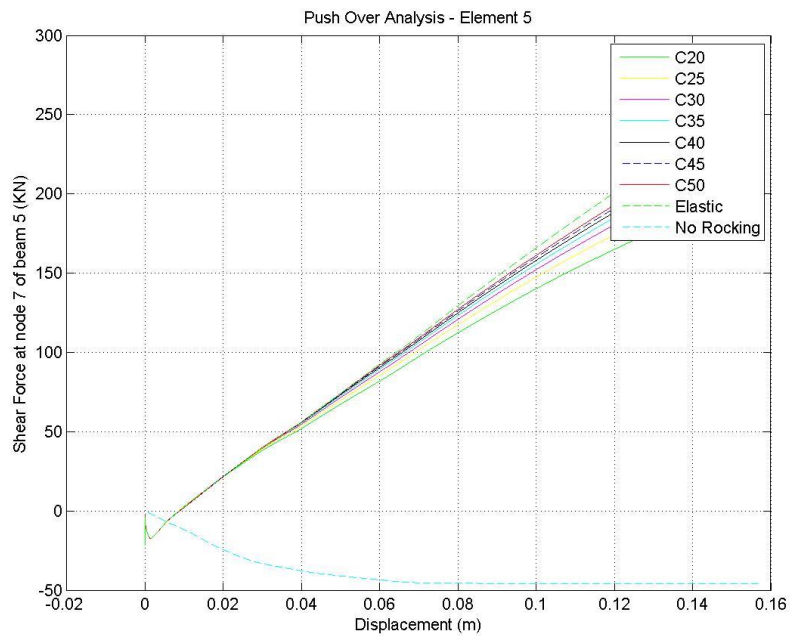
Σημειώνεται ότι αν η δοκός διέρρευε οι τέμνουσες της δοκού θα ήταν πολύ διαφορετικά, αφού θα φτάνανε σε μέγιστο σημείο.



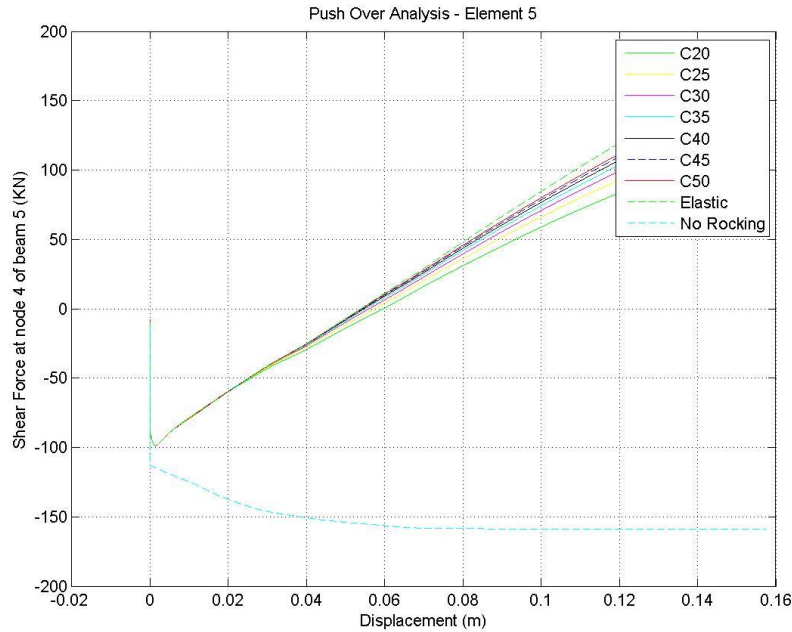
**Διάγραμμα 3.20: Τέμνουσα δύναμη στην δοκό στον αριστερό κόμβο**



Διάγραμμα 3.21: Τέμνουσα δύναμη στην δοκό στο σημείο ανασήκωσης του τοιχείου



Διάγραμμα 3.22: Τέμνουσα δύναμη στην δοκό στο σημείο υποχώρησης του τοιχείου



Διάγραμμα 3.23: Τέμνουσα δύναμη στην δοκό στον δεξιό κόμβο

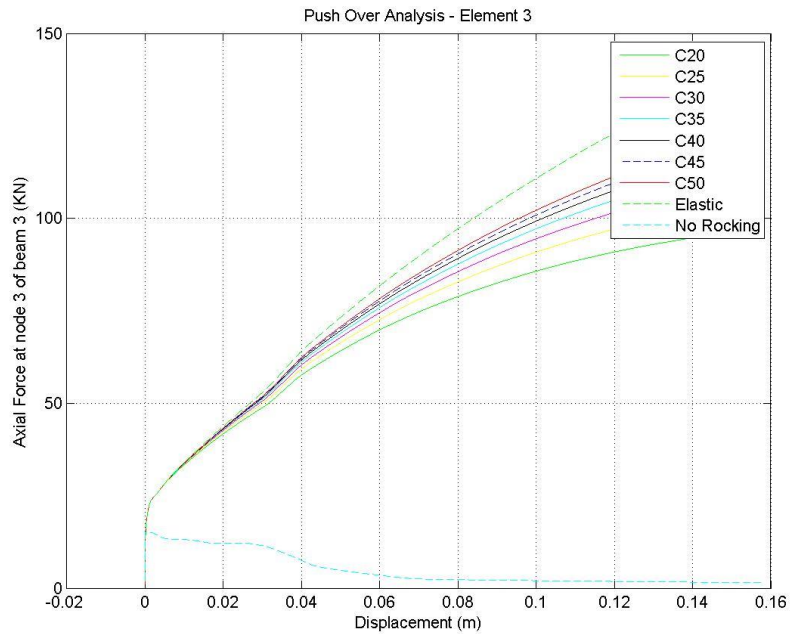
### 3.3.4.6 Αξονικές δυνάμεις των δοκών

Κατά τη διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος θα αναπτυχθούν αξονικές δυνάμεις στη δοκό του πλαισίου χωρίς όμως να είναι σημαντικό μέγεθος στη διαστασιολόγηση της. Στην παράγραφο αυτή θα διερευνηθεί η επίδραση του λικνιζόμενου τοιχείου στις δρώσες αξονικές δυνάμεις στην δοκό συναρτήσει των μετακινήσεων της.

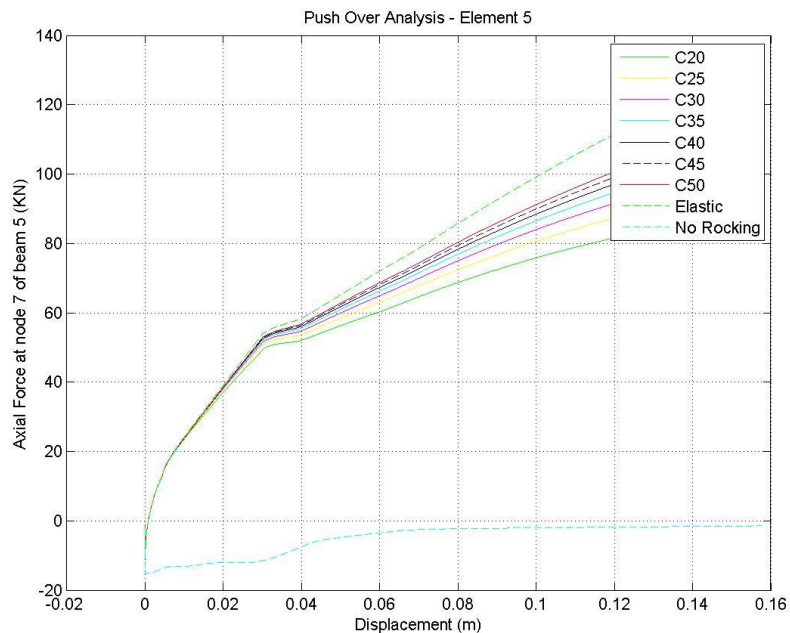
Σε μη ενισχυμένο πλαίσιο το αξονικό φορτίο της δοκού δεν επηρεάζεται πολύ από την αύξηση της οριζόντιας δύναμης (διάγραμμα 2.9), όμως το ίδιο δεν ισχύει στο μη ενισχυμένο. Από τα διαγράμματα 3.24 και 3.25 φαίνεται η αύξηση της αξονικής δύναμης της δοκού με την ύπαρξη του λικνιζόμενου τοιχείου. Φυσικά αυτό συνδέεται με την αύξηση της τέμνουσας βάσης δηλαδή της αντοχής του πλαισίου. Για αυτό τον λόγο τα διαγράμματα 3.21 και 3.22 έχουν την ίδια μορφή με το διάγραμμα της καμπύλης ικανότητας (διάγραμμα 3.1).

Σημειώνεται ότι η αξονική δύναμη της δοκού δεξιά του τοιχείου γίνεται από θλιπτική εφελκυστική. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο μοντέλο λήφθηκαν υπόψη δύο οριζόντιες δυνάμεις της Pushover, μία σε κάθε ακραίο κόμβο. Και αφού το τοιχείο αναλαμβάνει μεγάλο μέρος της τέμνουσας βάσης άρα το υποστύλωμα μικρότερη από την μισή τιμή της, από ισορροπία κόμβου προκύπτει ο εφελκυσμός.

Τέλος όπως και στα υπόλοιπα μεγέθη έτσι και η αξονική δύναμη της δοκού δεν επηρεάζεται από την ποιότητα σκυροδέματος του λικνιζόμενου τοιχείου για λογικές μετακινήσεις.



Διάγραμμα 3.24: Αξονική δύναμη της αριστερής δοκού (στοιχείο 3)



Διάγραμμα 3.25: Αξονική δύναμη της δεξιάς δοκού (στοιχείο 5)

### 3.3.5 Συμπέρασμα από ανελαστικές αναλύσεις

Στο παρόν κεφάλαιο παρατηρήθηκε η επιρροή της ανελαστικότητας των μελών και του λικνιζομένου τοιχείου στο πλαίσιο. Οι ανελαστικές αναλύσεις δίνουν πολύ διαφορετικά αποτελέσματα από τις ελαστικές του προηγούμενου κεφαλαίου λόγω της πλαστικοποίησης των μελών του πλαισίου.

Σημαντική παρατήρηση είναι ότι "διαρρέει" πρώτα το τοίχιο λόγω του λικνισμού (όχι λόγω τάσεων) και στην συνέχεια τα υπόλοιπα μέλη. Η "διαρροή" όμως του τοιχείου δεν σημαίνει ότι δεν προσφέρει πλέον, αντιθέτως διατηρεί δυσκαμψία και για αυτό μετά την πλαστικοποίηση της βάσης και της κορυφής των υποστυλωμάτων, το πλαίσιο έχει την ικανότητα να αναλάβει και άλλο φορτίο (διάγραμμα 3.1). Όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο, παρόλο που η βάση του τοιχείου πλαστικοποιείται σχεδόν ολόκληρη, το μήκος αυτό μπορεί να μεταβληθεί για να αξιοποιηθεί περισσότερο το λικνιζόμενο στοιχείο. Για αυτόν τον λόγο δεν παρατηρείται κάποιο μέγιστο στα εντατικά του μεγέθη.

Σημαντική παρατήρηση είναι το πως το τοίχιο δεν φτάνει σε πλήρη πλαστικοποίηση. Στην αρχή του λικνισμού η διεπιφάνεια τοιχείου και υποδομής είναι μεγάλη και καθώς ο λικνισμός προχωρεί η διεπιφάνεια αυτή μικραίνει για προφανή λόγο. Όπως είπαμε, καθώς αυξάνεται η οριζόντια δύναμη το τοίχιο αυξάνει συνεχώς την ένταση του, όμως ταυτόχρονα μικραίνει και την επιφάνεια μέσα από την οποία θα περάσουν όλα τα εντατικά μεγέθη. Έτσι σε συγκεκριμένο οριζόντιο φορτίο, το τοίχιο έχει φτάσει σε πλήρη πλαστικοποίηση, η οποία όμως είναι προσωρινή. Η ανάγκη για αύξηση της ικανότητας για παραλαβή εντατικών μεγεθών οδηγεί στην ανάληψη μεγάλης θλιπτικής δύναμης από το τοίχιο που βελτιώνει τη συμπεριφορά του (βλέπε διάγραμμα 3.9).

Η μεγάλη και συνεχώς αυξανόμενη δρώσα θλιπτική δύναμη στο τοίχιο έχει επιπτώσεις και στα μέλη του πλαισίου. Αρχικά τα ασκείται στα υποστυλώματα πρόσθετο εφελκυσμός. Το υποστύλωμα 1 που ήδη εφελκυόταν από την ανάγκη για δημιουργία ζεύγους δυνάμεων που απαιτείται για την ανάληψη της ροπής, αυξάνει πολύ τον εφελκυσμό του. Έτσι, δικαιολογείται η ύπαρξη εφελκυσμό στο υποστύλωμα 1 ακόμα και για μικρές μετατοπίσεις (διάγραμμα 3.16). Από την άλλη πλευρά, το υποστύλωμα 2 θα θλιβόταν στο μη ενισχυμένο πλαίσιο, έτσι η μείωση της θλιπτικής του δύναμης λόγω των ίδιων βαρών γίνεται με πολύ πιο αργό ρυθμό από του υποστυλώματος 1 (διάγραμμα 3.17).

Η μείωση της θλιπτικής δύναμης των υποστυλωμάτων οδηγεί σε μείωση της ροπής αντοχής τους. Ειδικότερο στο υποστύλωμα 1 στο οποίο δημιουργείται γρήγορη ανάπτυξης της εφελκυστικής δύναμης, η ροπή πλαστικοποίησης μειώνεται πολύ. Έτσι, ενώ στο μη ενισχυμένο πλαίσιο διέρρεε πρώτα το δεξιό υποστύλωμα στο οποίο αναπτύσσονται ομόσημες ροπές λόγω ίδιου βάρους και οριζόντιου φορτίου, στο ενισχυμένο πλαστικοποιείται πρώτα το αριστερό υποστύλωμα.

Επιπροσθέτως, το τοίχιο επηρεάζει και την δοκό, σε μεγάλο βαθμό. Προκαλεί αύξηση όλων των εντατικών μεγεθών, λόγω φυσικά και της αυξημένης ικανότητας του συστήματος να παραλαμβάνει οριζόντια φορτία. Αναμενόμενη είναι η πολύ μεγάλη τέμνουσα δύναμη στο σημείο ανασήκωσης του τοιχείου κατά τον λικνισμό. Βεβαίως αυξάνονται σε όλη την δοκό οι τέμνουσες λόγω του λικνισμού του τοιχείου, και ειδικότερη η τέμνουσα στον αριστερό κόμβο. Δεξιά του τοιχείου οι τέμνουσες είναι μικρότερης τιμής και έτσι η όπλιση της δοκού θα γίνει με την τέμνουσα στη διεπιφάνεια της δοκού με το τοίχιο, αφού ο σεισμός θα αλλάξει φορά.

Παρατηρήθηκε επίσης ότι το τοιχείο τείνει να ανασηκώσει όλη την δοκό. Δηλαδή εφελκύνει τις πάνω ίνες όλης της δοκού εκτός από το αριστερό άκρο. Δημιουργούνται δηλαδή αρνητικές ροπές σε μεγάλο μέρος της δοκού, οι οποίες είναι και πολύ σημαντικού μεγέθους. Αυτό αποτελεί ένα μειονέκτημα καθώς η δοκός σε υφιστάμενα κτήρια σπλίζεται μόνο στην κάτω ίνα. Δηλαδή γίνεται εμφανής η ανάγκη για ενίσχυση της δοκού τόσο έναντι ροπής όσο και έναντι τέμνουσας.

Είναι δεδομένο όμως, ότι η θεώρηση της δοκού ως ελαστική έχει επιπτώσεις στη μορφή των διαγραμμάτων. Η ανελαστική δοκός δεν είναι ικανή να αναλάβει τις μεγάλες ροπές και τέμνουσες που αναπτύσσονται σε μεγάλες μετακινήσεις που φαίνονται στα διαγράμματα αυτού του κεφαλαίου. Δηλαδή, στα ενισχυμένα πλαίσια με ανελαστικές δοκούς, θα δημιουργηθεί πλαστική άρθρωση στο σημείο όπου ασκείται η μεγάλη "συγκεντρωμένη δύναμη" λόγω του τοιχείου. Η πλαστικοποίηση αυτή θα μετατρέψει το πλαίσιο σε μηχανισμό. Δηλαδή, το πλαίσιο δεν θα έχει την ικανότητα παραλαβής επιπρόσθετων οριζόντιων φορτίων και έτσι όλα τα διαγράμματα εκτός της αξονικής των υποστυλωμάτων θα κατέληγαν σε οριζόντιο κλάδο

Οι επιρροές του τοιχείου σε όλα τα εντατικά μεγέθη για συγκεκριμένη μετατόπιση είναι μεγάλη, όμως νόημα έχει να συγκριθούν με τα αναπτυσσόμενα μεγέθη σε ένα σεισμικό επεισόδιο. Το τελευταίο θα αναπτυχθεί σε επόμενα κεφάλαια, όπου και θα γίνει πιο ξεκάθαρη η βελτίωση της συμπεριφορά του ενισχυμένου πλαισίου.

Τέλος, η ποιότητα του σκυροδέματος δεν επηρεάζει κάποιο εντατικό μέγεθος των υποστυλωμάτων ή δοκών για μικρές μετατοπίσεις οι οποίες μας ενδιαφέρουν. Επηρεάζει όμως την ένταση του ίδιου του τοιχείου. Ειδικότερα η ύπαρξη έστω και μικρής ανελαστικότητας στο τοιχείο διαφοροποιεί τα εντατικά του μεγέθη που προκύπτουν από την ανάλυση ενισχυμένου πλαισίου με ελαστικό λικνιζόμενο τοιχείο. Σημαντικότερη ίσως επιρροή της ποιότητας σκυροδέματος του τοιχείου είναι στο μήκος της παραμορφωμένης βάσης του τοιχείου. Το μήκος αυτό ίσως επηρεάσει τις παραμορφώσεις άρα και τις ζημιές της βάσης. Αυτό οποίο αποτελεί θέμα προς μελέτη στα επόμενα κεφάλαια.



## Παρουσίαση μεθόδου atc-40

### 4.1 Εισαγωγή στην μέθοδο atc-40

Η μέθοδος atc-40 (Applied Technology Council) προτάθηκε από τους Anil K. Chopra και Rakesh K. Goel και είναι ευρέως διαδεδομένη για τον υπολογισμό των στοχευόμενων μετακινήσεων (target displacements) των ανελαστικών κατασκευών υπό σεισμικά φορτία όπως για παράδειγμα τον σεισμό σχεδιασμού.

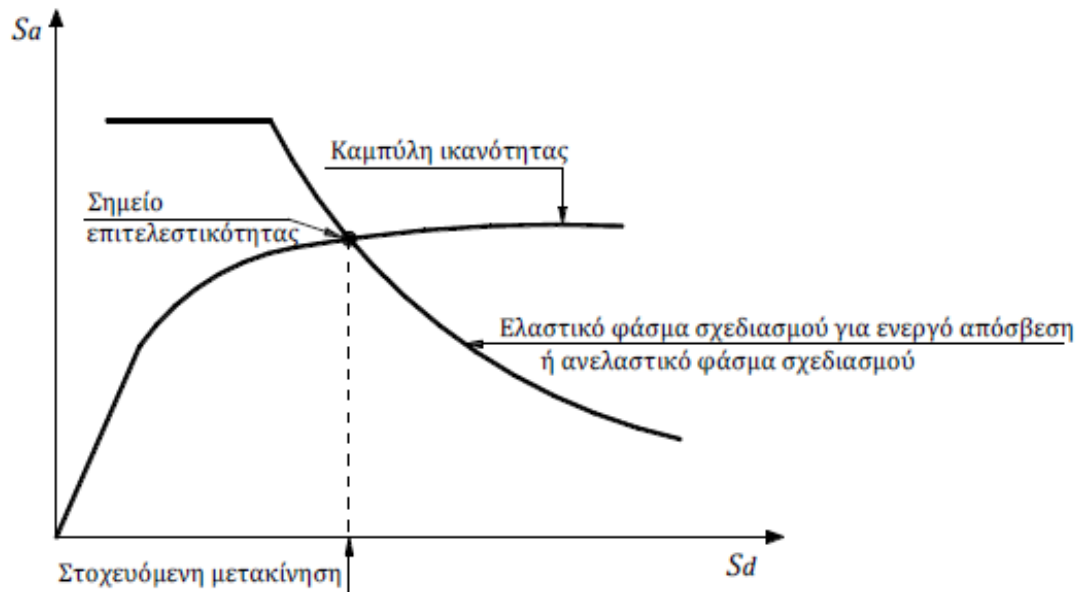
Η απόκριση ανελαστικών κατασκευών μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας είτε την μέθοδο της ελαστικής απόκρισης ή την μέθοδο της ανελαστικής απόκρισης. Η πρώτη μέθοδος για να εκτιμήσει την μη γραμμική απόκριση λαμβάνει υπόψη τη χρήση ενός ισοδύναμου γραμμικού συστήματος που αναπαρίσταται από ένα ισοδύναμο ελαστικό φάσμα, το οποίο είναι συσχετισμένο με το μοντέλο ενεργούς απόσβεσης. Η δεύτερη μέθοδος απασχολεί άμεσα το ανελαστικό φάσμα. Σε αυτή την εργασία θα χρησιμοποιηθεί αποκλειστικά η πρώτη μέθοδος όπως περιγράφεται από την atc-40.

Η μέθοδος αυτή αποτελεί απλοποίηση του προβλήματος και για αυτό οι μετακινήσεις που παράγει είναι προσεγγιστικές. Ωστόσο προτιμάται από τις ακριβέστερες αναλύσεις χρονοϊστοσρίας αφού οι τελευταίες απαιτούν εξειδικευμένα προγράμματα και σημαντικό υπολογιστικό χρόνο καθώς επίσης εξαρτώνται από την επιλογή των σεισμών. Οι επιλογές αυτές καθιστούν την μέθοδο επίφοβη, επειδή η λανθασμένη επιλογή οδηγεί σε πολύ λανθασμένα αποτελέσματα, για αυτό τον λόγο απαιτείται επιλογή διαφόρων σεισμικών διεγέρσεων.

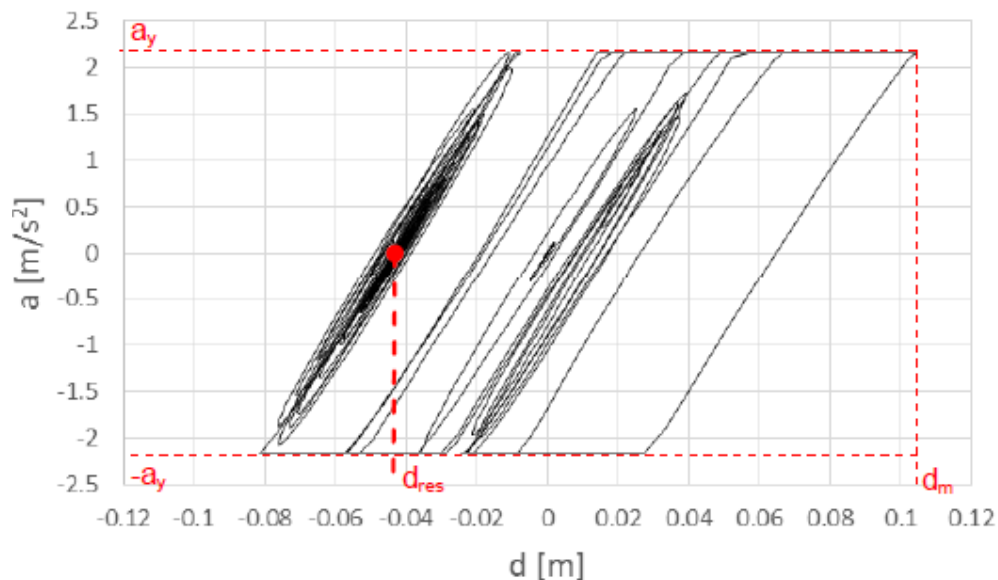
Έτσι στην πράξη για συνηθισμένα έργα χρησιμοποιείται συνήθως η στατική μη-γραμμική ανάλυση (μέθοδος Pushover) και συγκεκριμένα έχουν προταθεί διάφορες μεθοδολογίες που μία από αυτές είναι η atc-40. Η γενική φιλοσοφία υπολογισμού που ακολουθείται είναι ότι για τη στοχευόμενη μετακίνηση η ικανότητα της κατασκευής να παραλαμβάνει σεισμικά φορτία (capacity) πρέπει να είναι ίδια με την αντίστοιχη απαίτηση σύμφωνα με το φάσμα σχεδιασμού (demand). Δηλαδή, το σημείο επιτελεστικότητας προκύπτει ως το σημείο τομής του φάσματος ικανότητας της κατασκευής (το φάσμα ικανότητας προκύπτει από μετατροπή της καμπύλης ικανότητας σε μορφή ADRS –η διαδικασία περιγράφεται παρακάτω) και του ανελαστικού φάσματος (επίσης σε μορφή ADRS) για την αντίστοιχη πλαστιμότητα ή του ελαστικού φάσματος για την ενεργό απόσβεση (Εικόνα 4.1). Το τελευταίο είναι αυτό που χρησιμοποιεί η μέθοδος atc-40.

Γίνεται εμφανές ότι η μέθοδος atc-40 απαιτεί επαναλήψεις αφού η ενεργός απόσβεση της κατασκευής δεν είναι εκ των προτέρων γνωστή. Η ενεργός απόσβεση αποτελείται από την ιξώδη ( $\zeta_e = 5\%$ ) και την υστερητική απόσβεση ( $\zeta_{hyst}$ ). Η πρώτη οφείλεται στην ελαστική απόκριση της κατασκευής και η δεύτερη στην ανελαστική απόκριση και την δημιουργία των βρόγχων υστέρησης που θα αναπτυχθούν σε μία σεισμική διέγερση (Εικόνα 4.2). Ο υπολογισμός της υστερητικής απόσβεσης είναι πολύ σημαντικός, αφού αποτελεί

μηχανισμό απορρόφησης πρόσθετης ενέργειας, πέρα από αυτή που αντιστοιχεί στην βισκοϊξώδη απόσβεση. Η απορροφούμενη αυτή υστερητική ενέργεια ισούται με το εμβαδόν του του βρόγχου υστέρησης. Σε κάθε επανάληψη η υστερητική απόσβεση υπολογίζεται με βάση τον κύκλο απόκρισης της μέγιστης μετακίνησης.



Εικόνα 4.1: Προσδιορισμός της στοχευόμενης μετακίνησης του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος



Εικόνα 4.2: Βρόγχοι υστέρησης ενός ανελαστικού συστήματος υπό σεισμική διέγερση

Να σημειωθεί ότι η μέθοδος atc-40 αλλά και οι υπόλοιπες "στατικές" μεθόδων βασίζονται στην απόκριση ενός ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος. Η απόκριση της κατασκευής σε κάθε όροφο όπως θα περιγραφεί πιο κάτω, γίνεται με βάση την παραμόρφωσή της για συγκεκριμένη κατανομή φορτίων καθ' ύψος.

## 4.2 Ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα

Το ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα εξαρτάται από την κατανομή των φορτίων καθ' ύψος που λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό της καμπύλης ικανότητας. Η κατανομή αυτή μπορεί να είναι τριγωνική ή ομοιόμορφη είτε κατανομή σύμφωνα με την πρώτη ιδιομορφή ή και περισσότερες. Το ορθότερο είναι να επιλεγεί τέτοια κατανομή φορτίων η οποία να αντιστοιχεί στην αναμενόμενη μετακίνηση του συστήματος. Η κατανομή αλλάζει σε κάθε επανάληψη λαμβάνοντας ίσες αναλογίες με την μετακίνηση του κάθε ορόφου στο συγκεκριμένο βήμα. Να σημειωθεί επίσης ότι η μέθοδος αυτή δεν λαμβάνει υπόψη ανώτερες ιδιομορφές παρά μόνο τη θεμελιώδη.

Οι αναλύσεις της παρούσας εργασία αφορούν μόνο επίπεδα πλαίσια άρα επίπεδη κίνηση. Έτσι η κατανομή των φορτίων ανά όροφο  $i$  εκφράζεται από την σχέση:

$$F_i = F_b \frac{m_i \varphi_i}{\sum_j m_j \varphi_j} \quad (\text{εξ. 4.1})$$

όπου:  $F_b = \sum F_i$  είναι η τέμνουσα βάσης

$\varphi_j$  : η κατανομή των μετακινήσεων στους ορόφους

$m_i$  : η μάζα του  $i$  ορόφου

Εάν η κατανομή των φορτίων γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση (4.1) και  $\text{faktor}=1$ , η αντιστοιχία μεταξύ του πολυβάθμιου συστήματος και του ισοδύναμου μονοβαθμίου για όλα τα μεγέθη (δυνάμεις, μετακινήσεις, ενέργεια, κλπ) γίνεται με τη σχέση:

$$Q = \Gamma \cdot \hat{Q} \quad (\text{εξ. 4.2})$$

όπου:  $\hat{Q}$ : μέγεθος στο ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα (π.χ. δύναμη  $\hat{F}$ , μετακίνηση  $\hat{d}$ )

$Q$ : αντίστοιχο μέγεθος στο πολυβάθμιο σύστημα (π.χ. τέμνουσα βάσης  $F_b$ , μετακίνηση κορυφής  $\Delta$ )

$\Gamma$ : συντελεστής συμμετοχής που (για επίπεδη κίνηση της κατασκευής) δίνεται από τη σχέση:

$$\Gamma = \frac{\sum m_i \varphi_i}{\sum m_i \varphi_i^2} \quad (\text{εξ. 4.3})$$

Ο αριθμητής της σχέσης 4.3 ισούται με την μάζα του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος:

$$\hat{m} = \sum m_i \varphi_i \quad (\text{εξ. 4.4})$$

Η μετατροπή της καμπύλης ικανότητας του πλαισίου σε φάσμα ικανότητας του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος σε μορφή ADRS επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τους τύπους:

$$S_a = \frac{F_b}{\alpha \cdot m_{ολ}} \quad (\text{εξ. 4.5})$$

$$S_d = \frac{\Delta}{\Gamma} \quad \text{εάν } \varphi_{top} = 1 \quad (\text{εξ. 4.6α})$$

$$\text{ή } S_d = \frac{\Delta}{\Gamma \cdot \varphi_{top}} \quad \text{εάν } \varphi_{top} \neq 1 \quad (\text{εξ. 4.6β})$$

όπου:  $S_a$ : φασματική επιτάχυνση μονοβάθμιου συστήματος  
 $S_d$ : φασματική μετακίνηση μονοβάθμιου συστήματος  
 $F_b$ : τέμνουσα βάσης πολυβάθμιου συστήματος  
 $m_{ολ}$ : συνολική μάζα πολυβάθμιου συστήματος  
 $\Delta$ : μετακίνηση κορυφής του πλαισίου  
 $\alpha$ : συντελεστής που δηλώνει το ποσοστό της συνολικής μάζας που συμμετέχει στη δυναμική απόκριση της κατασκευής για την αναμενόμενη μορφή παραμόρφωσης και δίνεται από τη σχέση:

$$\alpha = \frac{[\sum m_i \varphi_i]^2}{m_{ολ} \cdot \sum m_i \varphi_i^2} = \frac{\Gamma \cdot \sum m_i \varphi_i}{m_{ολ}} = \Gamma \frac{\hat{m}}{m_{ολ}} \quad (\text{εξ. 4.7})$$

Σύμφωνα με τη θεώρηση του ισοδύναμου ελαστικού συστήματος, η μέγιστη δύναμη  $F_m$  και η μέγιστη μετακίνηση  $d_m$  που θα συμβούν σε ένα ανελαστικό σύστημα κατά τη διάρκεια ενός σεισμού μπορεί να υπολογιστεί από τη μετακίνηση ενός ισοδύναμου ελαστικού συστήματος με ενεργό δυσκαμψία  $K_{eff}$  και ενεργό απόσβεση  $\zeta_{eff}$ . Η ενεργός δυσκαμψία υπολογίζεται από τη σχέση (βλ. Εικόνα 4.3):

$$K_{eff} = \frac{F_m}{d_m} = \frac{m a_m}{d_m} \quad (\text{εξ. 4.8})$$

Όπως αναφέρθηκε η ενεργός απόσβεση υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη και την απόσβεση λόγω υστερητικής συμπεριφοράς  $\zeta_{hyst}$ , που αντιστοιχεί στον κύκλο απόκρισης για τη μέγιστη μετακίνηση. Για τον υπολογισμό της  $\zeta_{hyst}$  συνήθως χρησιμοποιείται η σχέση Chopra (1995), η οποία βασίζεται στην ισοδυναμία των ενεργειών του ελαστοπλαστικού και του ισοδύναμου ελαστικού συστήματος (όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3):

$$\zeta_{hyst} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{E_D}{E_{S0}} = \frac{0.637 \cdot (a_y \cdot d_m - d_y \cdot a_m)}{a_m \cdot d_m} \quad (\text{εξ. 4.9})$$

Η ύπαρξη στη συγκεκριμένη σχέση των φασματικών επιταχύνσεων σημαίνει ότι η μέθοδος λαμβάνει υπόψη ότι η απόσβεση οφείλεται στο σύνολο των μελών του πλαισίου, δηλαδή στα υποστυλώματα αφού οι δοκοί έχουν μικρή συνεισφορά στην απόσβεση. Η προϋπόθεση αυτή που η σχέση θεωρεί είναι ορθή για συμβατικά πλαίσια. Όταν το πλαίσιο ενισχυθεί με λικνιζόμενο τοιχείο η πιο πάνω παραδοχή δεν ισχύει άρα ούτε και η σχέση ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στην πραγματικότητα. Ο λόγος είναι ότι το λικνιζόμενο τοιχείο έχει πολύ μικρό βρόγχο υστέρησης άρα δεν προσφέρει στην υστερητική απόσβεση. Η πιο πάνω σχέση πρέπει να τροποποιηθεί ώστε να λαμβάνει υπόψη την απόσβεση μόνο των υποστυλωμάτων και όχι του λικνιζόμενου τοιχείου. Αυτό επιτυγχάνεται λαμβάνοντας υπόψη στη εξίσωση 4.9 μόνο το ποσοστό της τέμνουσας βάσης που αναλαμβάνεται από τα υποστυλώματα στο ανελαστικό πλαίσιο:

$$\zeta_{hyst} = \frac{0.637 \cdot (\sum V_y \cdot d_1 - d_y \cdot \sum V_1)}{\sum V \cdot d_1} \quad (\text{εξ. 4.10})$$

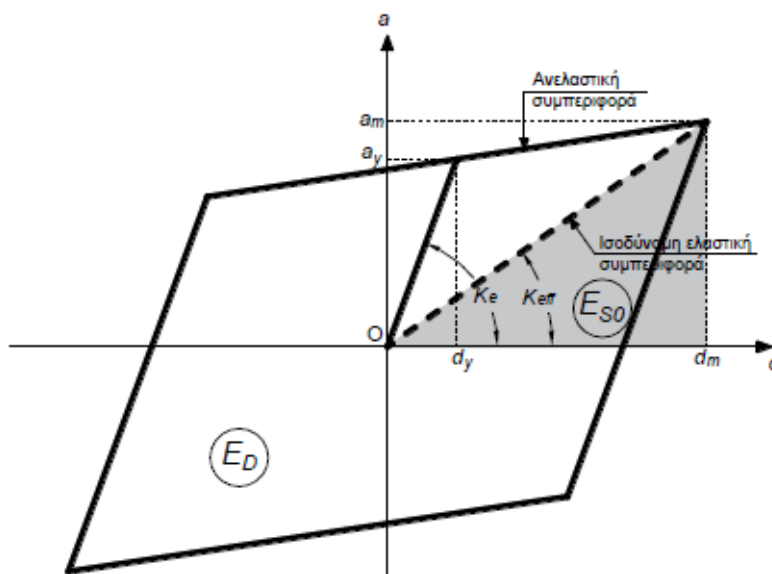
όπου:  $d_1$  : μέγιστη μετατόπιση ( $d_m$ )

$d_y$  : μετατόπιση διαρροής

$\sum V_1$  : το άθροισμα των τέμνουσών δυνάμεων των υποστυλωμάτων που αντιστοιχούν στην μέγιστη μετατόπιση

$\sum V_y$  : το άθροισμα των τέμνουσών δυνάμεων των υποστυλωμάτων που αντιστοιχούν στην μετατόπιση διαρροής

$\sum V$  : τέμνουσα βάσης που αντιστοιχεί στην μετατόπιση διαρροής



Εικόνα 4.3: Ορισμός ισοδύναμου ελαστικού συστήματος

Η ενεργός απόσβεση του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος υπολογίζεται ως άθροισμα της ιξώδους και της υστερητικής απόσβεσης:

$$\zeta_{eff} = \zeta_e + \zeta_{hyst} \quad (\text{εξ. 4.11})$$

όπου:  $\zeta_e = 5\%$

Έχει παρατηρηθεί ότι η σχέση υπολογισμού της υστερητικής απόσβεσης όπως έχει προταθεί από τον Chorga (εξ 4.9) υπερεκτιμά την απόσβεση αυτή για σεισμούς μεγάλης διάρκειας και κατασκευές χωρίς καλή πλαστική συμπεριφορά. Γι' αυτό, η μέθοδος ATC-40 προτείνεται τη χρήση ενός διορθωτικού συντελεστή  $\kappa$  που ορίζεται ανάλογα με την ποιότητα της κατασκευής σε συνδυασμό με την αναμενόμενη σεισμική διέγερση.

Η τελική εξίσωση υπολογισμού της ενεργούς απόσβεσης του μονοβάθμιου συστήματος είναι:

$$\zeta_{eff}(\%) = 5 + \frac{63.7 \cdot \kappa \cdot (\sum V_y \cdot d_1 - d_y \cdot \sum V_1)}{\sum V \cdot d_1} \quad (\text{εξ. 4.12})$$

όπου το  $\kappa$  υπολογίζεται σύμφωνα με τους πίνακες 4.1 και 4.2:

Πίνακας 4.1: Τύποι συμπεριφοράς κτιρίων

Διάρκεια σεισμού	Νέες, καλές αντισεισμικές κατασκευές	Μέτριες αντισεισμικές κατασκευές	Φτωχές αντισεισμικές κατασκευές
Μικρή (κοντά στο επίκεντρο)	A	B	C
Μεγάλη (μακριά από επίκεντρο, γενικώς για ζώνες Z3 & Z4)	B	c	C

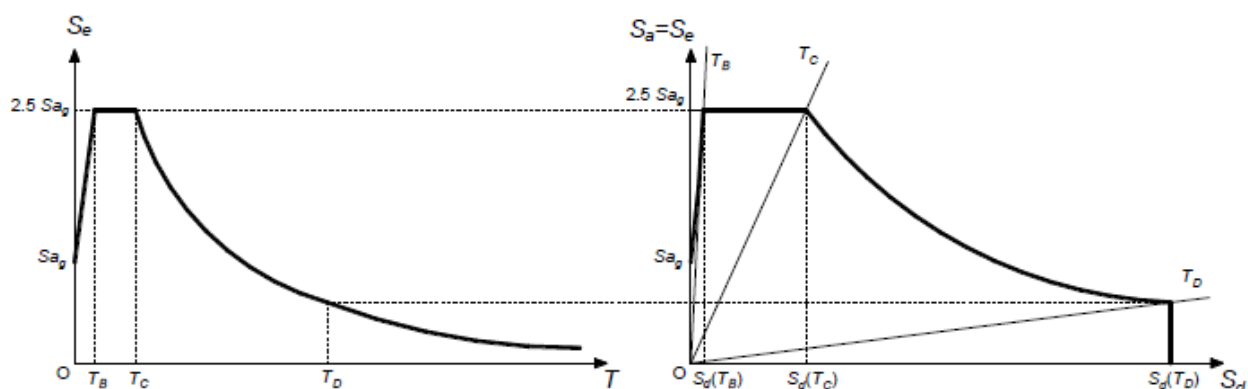
Πίνακας 4.2: Τιμές διορθωτικού συντελεστή κ

Τύπος συμπεριφοράς	$\zeta_{hyst}$	κ
A	$\leq 16.25$	1.00
	$> 16.25$	$1.13 - \frac{0.51 \cdot (\sum V_y \cdot d_1 - d_y \cdot \sum V_1)}{\sum V \cdot d_1}$
B	$< 25$	0,67
	$> 25$	$0.845 - \frac{0.466 \cdot (\sum V_y \cdot d_1 - d_y \cdot \sum V_1)}{\sum V \cdot d_1}$
C	όλες οι τιμές	0.33

### 4.3 Η μέθοδος atc-40 σε βήματα

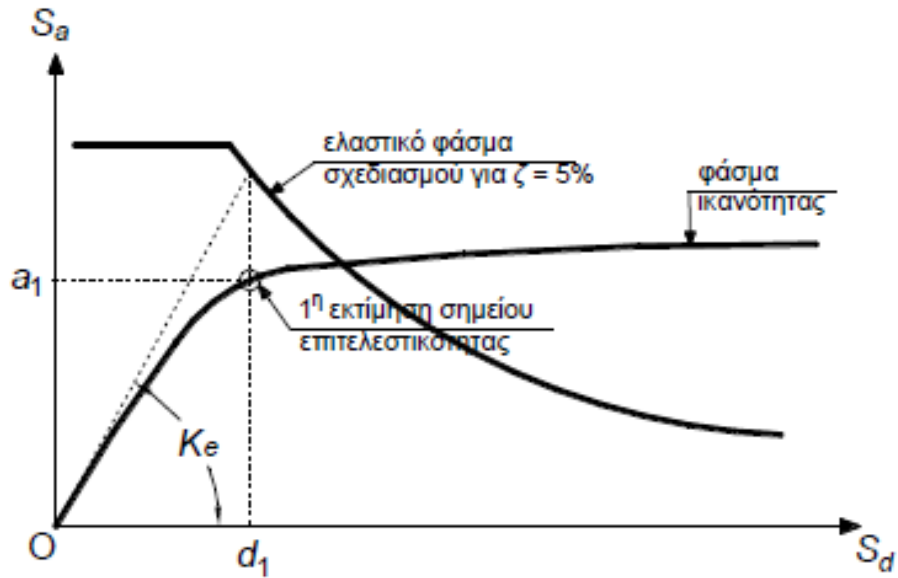
1. Μετατροπή του ελαστικού φάσματος σχεδιασμού για  $\zeta=5\%$  σε μορφή ADRS όπως φαίνεται στην εικόνα 4.4, χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} \cdot S_a \quad (\text{εξ. 4.12})$$



Εικόνα 4.4: Μετατροπή ελαστικού φάσματος σχεδιασμού σε μορφή ADRS

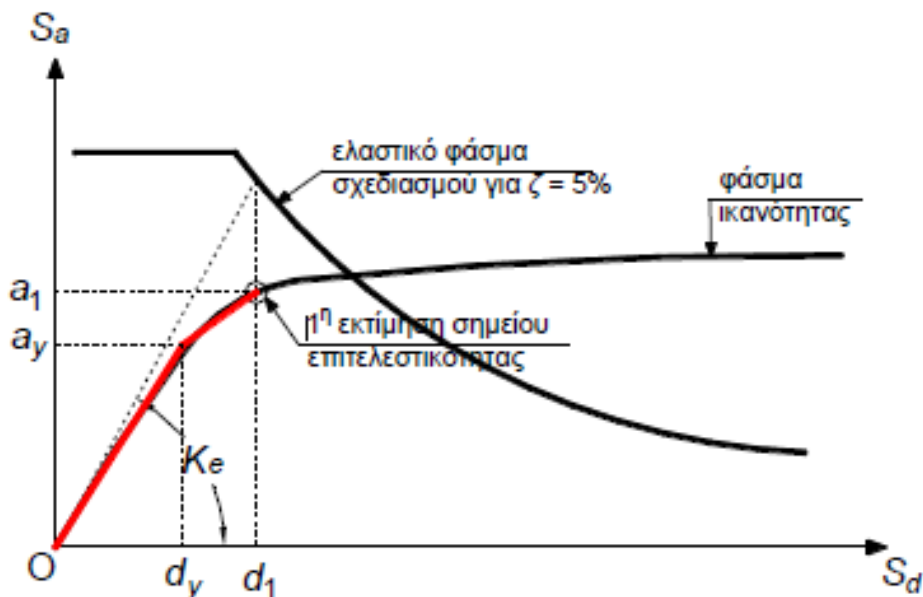
2. Κατασκευή καμπύλη ικανότητας χρησιμοποιώντας τη ανάλυση Pushover, θεωρώντας κατανομή φορτίων αντιπροσωπευτική των αναμενόμενων μετακινήσεων (στα πολυώροφα αυτό δεν παίζει κάποιο ρόλο επειδή θα ακολουθηθεί επαναληπτική διαδικασία). Ακολούθως η καμπύλη αυτή μετατρέπεται σε φάσμα ικανότητας του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (4.5) και (4.6).
3. Εύρεση 1ου σημείου δοκιμών. Από το ελαστικό φάσμα για απόσβεση  $\zeta=5\%$  υπολογίζεται η μετακίνηση  $d_1$  για τη δυσκαμψία  $K_e$  που αντιστοιχεί σε ρηγματωμένες διατομές (τέμνουσα δυσκαμψία στο θεωρητικό σημείο διαρροής). Για τη μετακίνηση  $d_1$  υπολογίζεται η πρώτη εκτίμηση του σημείου επιτελεστικότητας από το αντίστοιχο σημείο πάνω στο φάσμα ικανότητας και η αντίστοιχη επιτάχυνση  $a_1$  (Σχ. 4.5).



Εικόνα 4.5: Εύρεση πρώτου σημείου δοκιμών

4. Διγραμμικοποίηση του τμήματος του φάσματος ικανότητας μέχρι το σημείο της 1ης εκτίμησης του σημείου επιτελεστικότητας που υπολογίστηκε στο προηγούμενο βήμα με κριτήριο τα αποκοπτόμενα εμβαδά πάνω και κάτω από την καμπύλη να είναι ίσα (Σχ. 4.6). Έτσι ορίζεται η μετακίνηση διαρροής  $d_y$  και η επιτάχυνση διαρροής  $a_y$ .

Για κατασκευή του διγραμμικοποιημένου φάσματος ικανότητας είναι απαραίτητη και μία δεύτερη συνθήκη όπως για παράδειγμα η κράτυνση. Η επιλογή της κράτυνσης εναπόκειται στην κρίση του μηχανικού. Για λόγους απλότητας όμως, όλες οι διγραμμικοποιήσεις γίνονται θέτοντας ως περιορισμό ο πρώτος (ελαστικός) κλάδος του διγραμμικοποιημένου φάσματος ικανότητας να περνάει από το  $0.6a_y$  του φάσματος ικανότητας της ανάλυσης Pushover.



Εικόνα 4.6: Κατασκευή διγραμμικού φάσματος ικανότητας



5. Ακολουθεί ο υπολογισμός της ενεργούς απόσβεσης ( $\zeta_{eff}$ ) σύμφωνα με τη σχέση (4.12) και όπως περιγράφηκε πιο πάνω.

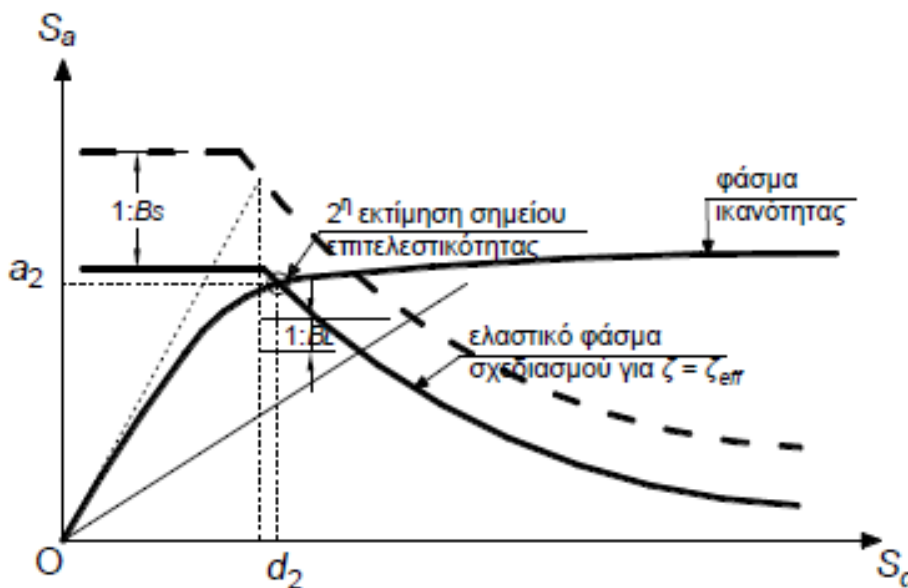
6. Υπολογίζεται το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού που αντιστοιχεί σε  $\zeta = \zeta_{eff}$  πολλαπλασιάζοντας το αντίστοιχο φάσμα για  $\zeta = 5\%$  με τους συντελεστές  $SR_A$  και  $SR_V$  όπως αυτά ορίζονται από τις πιο κάτω σχέσεις. Συγκεκριμένα τα τμήματα του ελαστικού φάσματος σχεδιασμού για  $\zeta = 5\%$  που αντιστοιχούν σε σταθερή επιτάχυνση πολλαπλασιάζονται με τον συντελεστή  $SR_A$  και τα τμήματα σταθερής ταχύτητας με τον συντελεστή  $SR_V$  (βλέπε Εικόνα 4.7).

$$SR_A = \frac{1}{B_S} = \frac{3.21 - 0.68 \cdot \ln \zeta_{eff}}{2.12} \geq SR_{A,min} \quad (\text{εξ. 4.13})$$

$$SR_V = \frac{1}{B_L} = \frac{2.31 - 0.41 \cdot \ln \zeta_{eff}}{1.65} \geq SR_{V,min} \quad (\text{εξ. 4.14})$$

Πίνακας 4.6. Ελάχιστες τιμές μειωτικών συντελεστών απόσβεσης

Τύπος συμπεριφοράς	$SR_{A,min}$	$SR_{V,min}$
A	0.33	0.50
B	0.44	0.56
C	0.56	0.67



Εικόνα 4.7: Κατασκευή ελαστικού φάσματος απόκρισης για  $\zeta = \zeta_{eff}$  και εύρεση νέου σημείου επιτελεστικότητας.

7. Το σημείο τομής μεταξύ του φάσματος σχεδιασμού για  $\zeta = \zeta_{eff}$  και του φάσματος ικανότητας ορίζει το νέο σημείο επιτελεστικότητας. Η προβολή αυτού του σημείου στους άξονες  $S_a$  και  $S_d$  ορίζει την νέα επιτάχυνση  $a_2$  και τη νέα μετακίνηση  $d_2$  αντίστοιχα.

8. Έλεγχος σύγκλισης. Η μέθοδος θέτει επιτρεπτή διαφορά μέγιστων μετατοπίσεων δύο διαδοχικών δοκιμών το 5%, έτσι το κριτήριο διατυπώνεται:

$$0.95 \cdot d_1 < d_2 < 1.05 \cdot d_1 \quad (\text{εξ. 4.15})$$

Αν ο έλεγχος ικανοποιείται, η μετακίνηση  $d_2$  αντιστοιχεί στη μέγιστη μετακίνηση (στοχευόμενη μετακίνηση)  $\hat{d}$  του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος. Αν όμως δεν ικανοποιείται, επαναλαμβάνουμε την διαδικασία για μέγιστη μετακίνηση  $d_2$  και μέγιστη επιτάχυνση  $a_2$ .

9. Μετά τη σύγκλιση υπολογίζεται η στοχευόμενη μετακίνηση της κατασκευής. Η μετατροπή της μετακίνησης  $\hat{d}$  του μονοβάθμιου συστήματος σε στοχευόμενη μετακίνηση κορυφής  $\Delta$  γίνεται από τη σχέση (4.6α) ή (4.6β) επιλύοντας ως προς  $\Delta$  και θέτοντας  $S_d = \hat{d}$ . Δηλαδή στη γενική περίπτωση ισχύει:

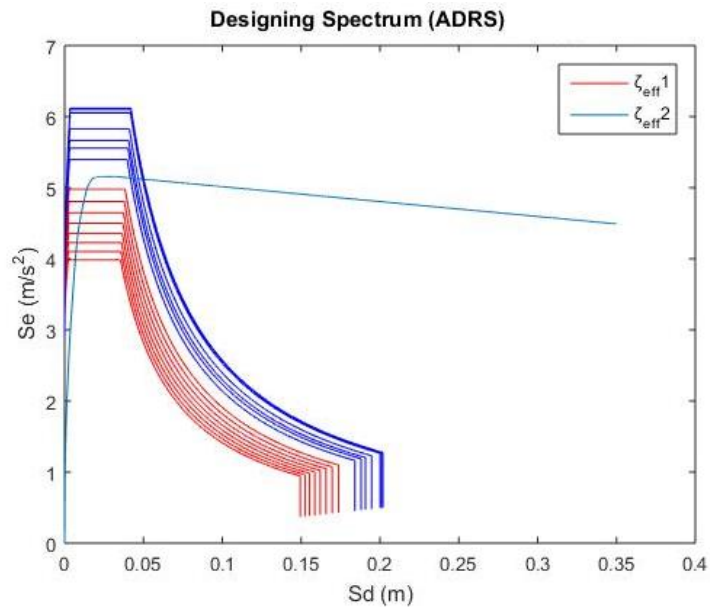
$$\Delta = \Gamma \cdot \varphi_{top} \cdot \hat{d} \quad (\text{εξ. 4.16})$$

#### 4.4 Τροποποίηση της μεθόδου atc-40

Στην παρούσα εργασία η μέθοδος atc-40 τροποποιήθηκε ώστε να διευκολύνει την σύγκλιση. Ο λόγος της μη σύγκλισης και οι τροποποιήσεις παρουσιάζονται πιο κάτω.

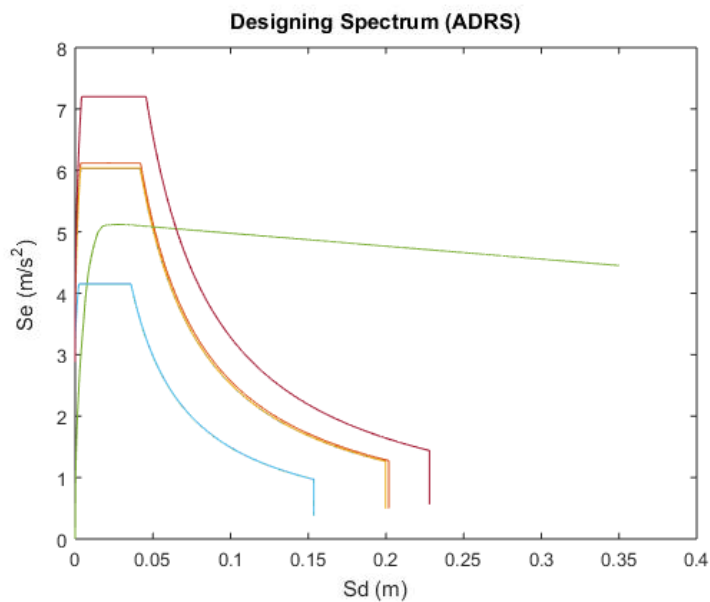
##### 4.4.1 Πρόβλημα σύγκλισης που εμφάνισε η μέθοδος atc-40

Η λειτουργία της μεθόδου οφείλεται σε παλινδρόμηση των τιμών της ενεργούς απόσβεσης ( $\zeta_{eff}$ ) μέχρι δύο διαδοχικές τιμές να συγκλίνουν άρα θα συγκλίνει και η μετατόπιση. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.8, τα μπλε φάσματα επιταχύνσεων που αντιστοιχούν σε  $\zeta_{eff} = 1$  με τη μέθοδο atc-40 δίνουν τα κόκκινα φάσματα που αντιστοιχούν σε  $\zeta_{eff} = 2$ . Η επόμενη επανάληψη της μεθόδου θα αρχίσει με το προηγούμενο κόκκινο φάσμα και θα δώσει ένα νέο μπλε φάσμα αντιστοίχως.



Εικόνα 4.8: Γραφική απεικόνιση σύγκλισης μεθόδου atc-40

Παρόλα αυτά η πιο πάνω σύγκλιση δεν επιτυγχάνεται όπως φαίνεται στο πιο πάνω σχήμα. Όταν η θεωρητική διαρροή του φάσματος ικανότητας του μονοβάθμιου συστήματος (σημείο όπου ξεκινά η οριζοντιοποίηση της καμπύλης ικανότητας) συμπίπτει με την περιοχή σταθερής φασματικής επιτάχυνσης, τότε η μέθοδος προκαλεί προβλήματα παλινδρόμησης και άρα δεν συγκλίνει. Η εικόνα 4.9 πιο κάτω δείχνει ότι μετά από πολύ λίγες επαναλήψεις η μέθοδος κάνει παλινδρομήσεις μεταξύ δύο φασμάτων.



Εικόνα 4.9: Γραφική απεικόνιση της παλινδρόμησης της μεθόδου atc-40

#### 4.4.2 Τρόπος επίλυσης του προβλήματος σύγκλισης

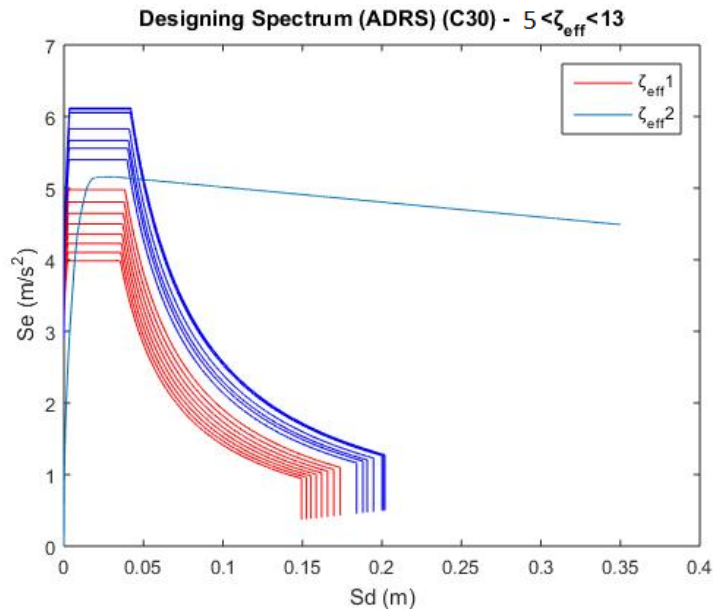
Παρατηρώντας την εικόνα 4.9 διαπιστώνεται ότι αν η μέθοδος τροποποιηθεί έτσι ώστε οι τιμές των ενεργών αποσβέσεων ( $\zeta_{eff}$ ) να επιβάλλονται και δεν προκύπτει από τη μέθοδο atc-40 τότε θα οδηγηθεί η σύγκλιση ανεξαρτήτως της θεωρητικής διαρροής του πλαισίου. Δηλαδή, η τροποποίηση κρατάει τις αρχές της μεθόδου αλλά αλλάζει την ροή της.

Συγκεκριμένα η προτεινόμενη μέθοδος ξεκινάει κανονικά για ελαστικό φάσμα σχεδιασμού που αντιστοιχεί σε απόσβεση 5% και συνεχίζεται όπως περιγράφηκε από τους Anil K. Chopra και Rakesh K. Goel μέχρι τον υπολογισμό της δεύτερης ενεργός απόσβεση. Στη δεύτερη επανάληψη όμως δεν θα χρησιμοποιηθεί η νέα ενεργός απόσβεση που προέκυψε αλλά μία απόσβεση προσαυξημένη της αρχικής (για την δεύτερη επανάληψη θα είναι 5%+Δζ). Δηλαδή σε κάθε επανάληψη επιβάλλεται ένα νέο  $\zeta_{eff}$  προσαυξημένο κατά Δζ από το προηγούμενο επιβαλλόμενο  $\zeta_{eff}$ . Η μέθοδος αυτή συγκλίνει αν για κάποιο επιβαλλόμενο  $\zeta_{eff,1}$  που δίνει μετατόπιση  $\widehat{d1}$  προκύψει  $\zeta_{eff,2}$  το οποίο θα δώσει μετακίνηση παρόμοια με την μετακίνησης  $\widehat{d2}$ .

Ακολουθεί πιο αναλυτική περιγραφή της τροποποιημένης μεθόδου atc-40, η οποία επιλέχθηκε ώστε να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος σύγκλισης:

α) Για ελαστικό φάσμα σχεδιασμού με  $\zeta_{eff,1} = 5\%$  ακολουθούνται τα βήματα από 1 μέχρι 7 όπως περιγράφηκαν πιο πάνω μέχρι και τον υπολογισμό  $\zeta_{eff,2}$ . Όπως παρατηρήθηκε το  $\zeta_{eff,2}$  προκύπτει μικρότερο από το αρχικό  $\zeta_{eff,1}$ . Στη δεύτερη επανάληψη χρησιμοποιείται  $\zeta_{eff,1}$  ίσο με το προηγούμενο  $\zeta_{eff,1}$  προσαυξημένο κατά Δζ, όπου Δζ είναι επαρκώς μεγάλο (πχ Δζ=1%). Το βήμα αυτό συγκλίνει όταν για επιβαλλόμενο  $\zeta_{eff,1}$  προκύψει  $\zeta_{eff,2}$  μεγαλύτερο από το  $\zeta_{eff,1}$ . Η εναλλαγή των μεγεθών του  $\zeta_{eff,1}$  και του  $\zeta_{eff,2}$  σημαίνει ότι η ορθή απόσβεση βρίσκεται στο διάστημα αμέσως πριν γίνει η εναλλαγή.

Για παράδειγμα όπως φαίνεται στην πιο κάτω εικόνα, η μέθοδος ξεκινάει με  $\zeta_{eff,1}=5\%$  και φτάνει μέχρι 13% αυξάνοντας κατά 1%. Για  $\zeta_{eff,1}=13\%$  το οποίο αντιστοιχεί σε ένα μπλε φάσμα, θα δώσει ένα κόκκινο φάσμα που θα έχει μέγιστη επιτάχυνση μεγαλύτερη του μπλε. Αυτό σημαίνει ότι η πραγματική ενεργή απόσβεση είναι στο διάστημα 12% με 13%.

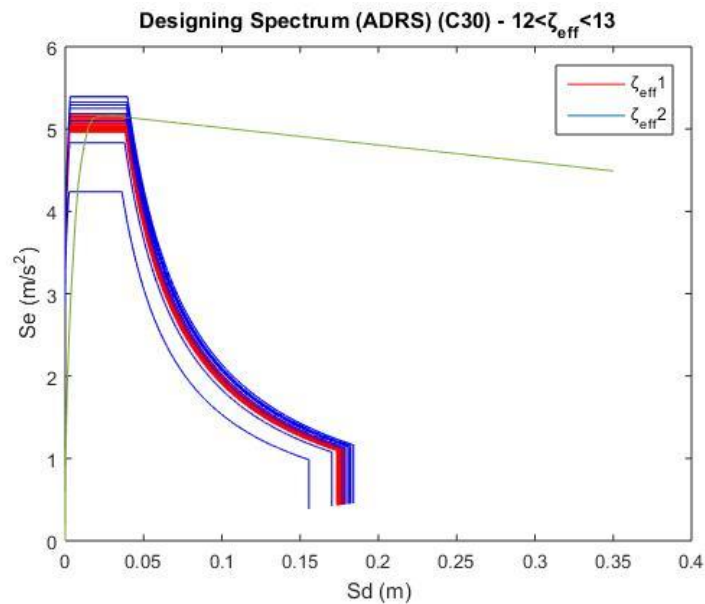


Εικόνα 4.10: Πρώτο στάδιο της τροποποιημένης μεθόδου atc-40

β) Στο δεύτερο στάδιο της μεθόδου αυτής, θα ακολουθηθεί η ίδια διαδικασία με το πρώτο στάδιο με μερικές διαφορές. Η πρώτη είναι ότι στην πρώτη επανάληψη η ενεργός απόσβεση  $\zeta_{eff,1}$  θα είναι αυτή που αντιστοιχεί στην μικρότερη τιμή του εύρους αποσβέσεων που προέκυψε στο προηγούμενο βήμα. Στην συνέχεια ακολουθείται πάλι η ίδια διαδικασία όμως στην δεύτερη επανάληψη το  $\zeta_{eff,1}$  θα προσαυξηθεί κατά  $\Delta\zeta$  πολύ πιο μικρό (πχ 0.1%). Τότε ο αλγόριθμος συγκλίνει συνολικά αν για ελαστικό φάσμα το οποίο αντιστοιχεί σε  $\zeta_{eff,1}$  με μετατόπιση μονοβάθμιου συστήματος  $\widehat{d1}$ , προκύψει νέο φάσμα με  $\zeta_{eff,2}$  και μετατόπιση  $\widehat{d2}$ , έτσι ώστε να ισχύει το κριτήριο σύγκλισης:

$$0.95 \cdot d_1 < d_2 < 1.05 \cdot d_1 \quad (\text{εξ. 4.15})$$

Στο παράδειγμα, από το βήμα 1 προέκυψε ότι η πραγματική ενεργός απόσβεση βρίσκεται στο διάστημα 12% με 13%. Έτσι η πρώτη δοκιμή του δεύτερου σταδίου, θα ληφθεί ίση με την μικρότερη τιμή του διαστήματος, δηλαδή 12%. Ακολουθείται η ίδια διαδικασία και στην δεύτερη επανάληψη θα ληφθεί νέο  $\zeta_{eff,1}$  προσαυξημένο κατά  $\Delta\zeta=0.1\%$ . Τελικώς παρατηρείται σύγκλιση της μετατόπισης κορυφής, η οποία αντιστοιχεί σε επιτάχυνση μονοβάθμιου ταλαντωτή ίση με την τιμή της επιτάχυνσης του κλάδου σταθερής επιτάχυνσης. Έτσι επαληθεύτηκε και ο προαναφερθείσας ισχυρισμός ότι ο λόγος μη σύγκλισης της παραδοσιακής μεθόδου atc-40 είναι όταν η τελική επιτάχυνση του μονοβάθμιου συστήματος βρίσκεται πάνω στον κλάδο σταθερής φασματικής επιτάχυνσης και ταυτόχρονα αποτελεί και την θεωρητική διαρροή του συστήματος.



Εικόνα 4.11: Δεύτερο στάδιο της τροποποιημένης μεθόδου atc-40

γ) Στην περίπτωση που στο προηγούμενο στάδιο το  $\zeta_{eff,1}$  ξεπεράσει το μέγιστο του διαστήματος (στο συγκεκριμένο παράδειγμα 13%) τότε σημαίνει ότι το  $\Delta\zeta$  ήταν μεγάλο και δεν καλύφθηκε το κριτήριο σύγκλισης. Έτσι ομοίως με το βήμα (α) ευρίσκεται ένα διάστημα των  $\zeta_{eff}$  στο οποίο η σχέση  $(\zeta_{eff,1} - \zeta_{eff,2})$  αλλάζει πρόσημο. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι ίδια με το βήμα (β) αλλά με μικρότερο  $\Delta\zeta$ .

## **Ανελαστικές αναλύσεις μονώροφου πλαισίου υπό το σεισμό σχεδιασμού παραμετροποιημένες ως προς την ποιότητα σκυροδέματος του λικνιζόμενου τοιχείου**

### **5.1 Εισαγωγή**

Σκοπός του κεφαλαίου είναι η ποσοτικοποίηση της συμπεριφοράς του μονώροφου πλαισίου υπό το σεισμό σχεδιασμού που αντιστοιχεί στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Z2, όταν αυτό ενισχυθεί με λικνιζόμενο τοίχιο. Οι αναλύσεις που θα γίνουν είναι παραμετροποιημένες ως προς την ποιότητα σκυροδέματος του λικνιζόμενου τοιχείου ώστε να ληφθεί ασφαλές αποτέλεσμα αν αυτή επηρεάζει τη συνολική απόκριση του πλαισίου. Θα γίνει επίσης σύγκριση της επιρροής αυτής τόσο σε πλαίσια διαστασιολογημένα με συντελεστή συμπεριφοράς ίσο με 3 όσο και σε υποδιαστασιολογημένα πλαίσια με συντελεστή συμπεριφοράς 6.

Όπως έχει παρατηρηθεί στα κεφάλαια 3 και 4 η ποιότητα σκυροδέματος του λικνιζόμενου τοιχείου δεν επηρεάζει ούτε τη καθολική συμπεριφορά του πλαισίου ούτε τα εντατικά μεγέθη των μελών για μικρές και λογικές μετατοπίσεις κορυφής. Έτσι μένει πλέον να πιστοποιηθεί το συμπέρασμα αυτό με επεξεργασία των αναλύσεων του κεφαλαίου 3 υπολογίζοντας όλα τα μεγέθη και τις μετατοπίσεις που αναπτύσσονται στο σεισμό σχεδιασμού. Η θλιπτική αντοχή του τοιχείου, σύμφωνα με τα διαγράμματα του κεφαλαίου 3, ίσως επηρεάσει την συμπεριφορά του ίδιου του τοιχείου. Θα μελετηθεί επίσης η μεταβλητότητα των εντατικών μεγεθών αλλά και της παραμορφωμένης βάσης του τοιχείου, ως προς την ποιότητα σκυροδέματος του τοιχείου.

Οι στοχευόμενες μετακινήσεις του πλαισίου θα υπολογιστούν με τη μέθοδο atc-40 όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4. Με βάση αυτές τις μετακινήσεις παράγονται και όλα τα υπόλοιπα αποτελέσματα που κρίνονται απαραίτητα. Τέτοια είναι όλα τα εντατικά μεγέθη όλων των μελών σε στοχευόμενα σημεία του πλαισίου, οι καμπυλότητες και οι παραμορφώσεις στη βάση των υποστυλωμάτων και του τοιχείου. Παράγονται επίσης οι διγραμμικοποιημένες καμπύλες ικανότητας, βάση των οποίων θα προκύψει η γενική πλαστιμότητα μετακινήσεων. Από τα διγραμμικοποιημένα διαγράμματα της ροπής αντοχής-καμπυλότητας των υποστυλωμάτων υπολογίζεται η πλαστιμότητα τους σε όρους καμπυλότητας.

Να σημειωθεί ότι η επεξεργασία των αποτελεσμάτων του κεφαλαίου 3 αναφέρονται όλες στο μονοβάθμιο σύστημα όπως προκύπτει από τις εξισώσεις (4.5) και (4.6). Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα αυτά αντιστοιχούν και στο πολυβάθμιο σύστημα, αφού παρατηρώντας

τις πιο πάνω εξισώσεις καταλήγουμε ότι οι συντελεστές  $\alpha$ ,  $\Gamma$  και  $\varphi_{top}$  είναι ίσοι με την μονάδα.

## 5.2 Γεωμετρία πλαισίου

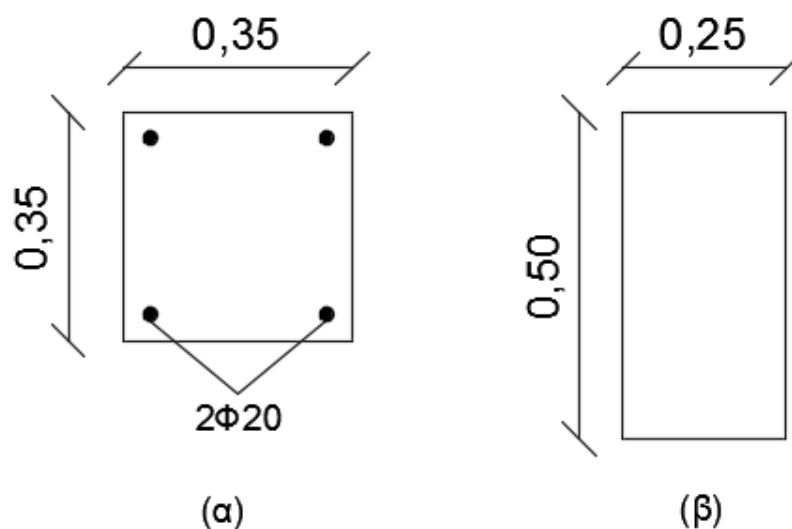
Επιλύεται μονώροφο πλαίσιο ανοίγματος 5 μέτρων και ύψους 4.5 μέτρων. Η διατομή του λικνιζόμενου στοιχείου που τοποθετείται στο μέσο είναι:

$$\text{Πλάτος } B = 1.4\text{m}$$

$$\text{Πάχος } W = 0.20\text{m}$$

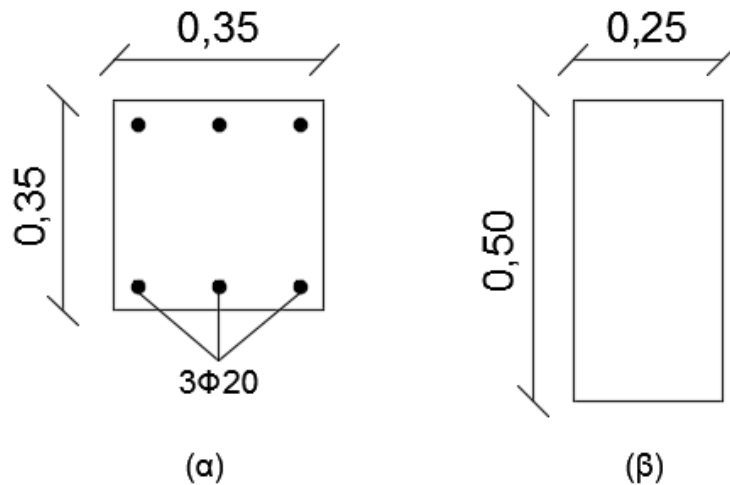
Τα στατικά φορτία παραμένουν ίδια όπως παρουσιάστηκαν στην ενότητα 1.9 και 1.10.

Τα υποστυλώματα διαστασιολογήθηκαν με συντελεστή συμπεριφοράς 3 και 6, που αντιστοιχούν σε καινούριες κατασκευές με τη δεύτερη όμως να είναι υποδιαστασιολογημένη. Επίσης οι δοκοί επιλέχθηκαν να είναι ελαστικές, για τον λόγο ότι στην πραγματικότητα θα ενισχυθούν ώστε να μην διαρρεύσουν κυρίως στο μέσο όπου βρίσκεται το λικνιζόμενο τοιχείο, αντιστοίχως με το κεφάλαιο 3.1. Οι τελικές διαστάσεις των υποστυλωμάτων και των δοκών φαίνονται στις πιο κάτω εικόνες.



Εικόνα 5.1: Διαστασιολόγηση για συντελεστή συμπεριφοράς  $\alpha=6$  (α) υποστυλωμάτων, (β) δοκού





Εικόνα 5.2: Διαστασιολόγηση για συντελεστή συμπεριφοράς  $q=3$  (α) υποστυλωμάτων, (β) δοκού

### 5.3 Αναλύσεις για καινούρια πλαίσια διαστασιολογημένα με συντελεστή συμπεριφοράς $q=3$

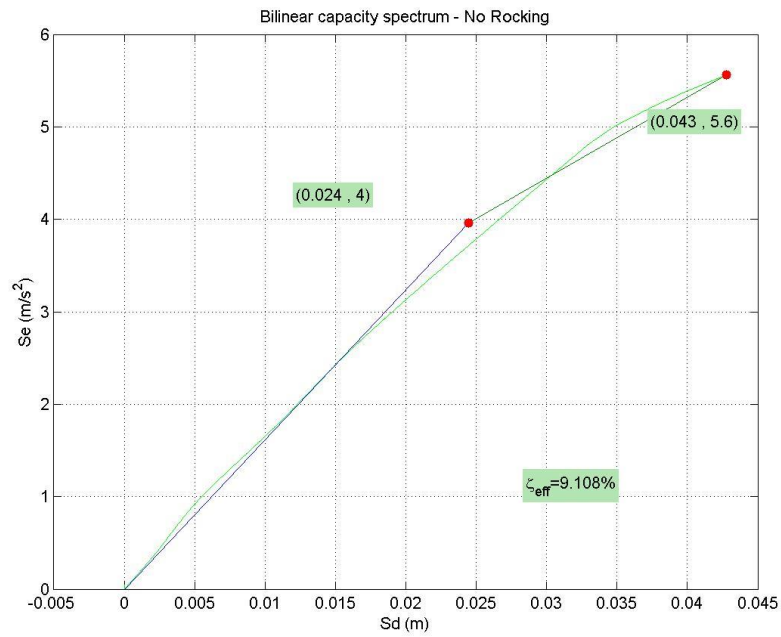
Στην παράγραφο αυτή γίνεται διερεύνηση της τοποθέτησης των λικνιζόμενων τοιχείων σε ανελαστικό πλαίσιο κατά την κατασκευή του. Λαμβάνονται ασφαλή συμπεράσματα για τα πλεονεκτήματα που δέχεται κάθε μέλος και η γενική συμπεριφορά του πλαισίου μετά την ενίσχυση του.

#### 5.3.1 Υπολογισμός στοχευόμενων μετατοπίσεων, ενεργού απόσβεσης και διγραμμικοποίησης της καμπύλης ικανότητας

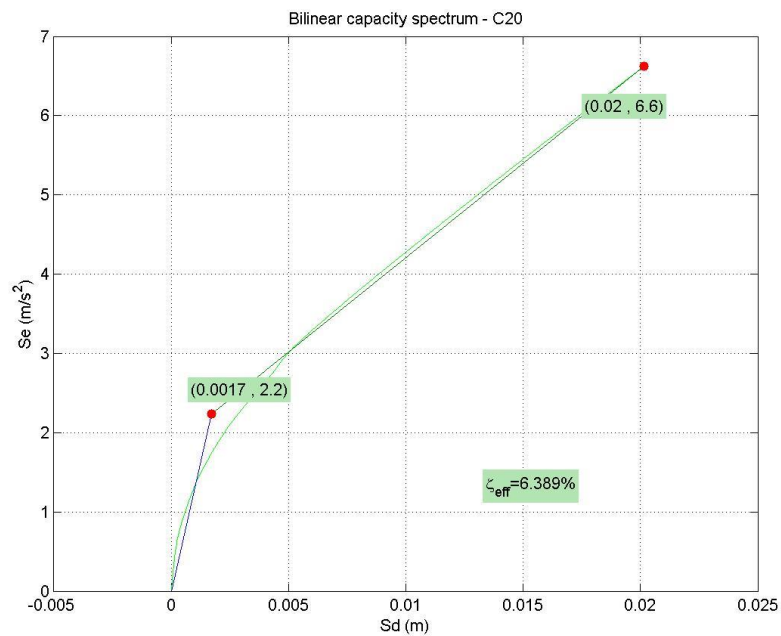
Πραγματοποιήθηκαν 8 διαφορετικές αναλύσεις που η κάθε μία αντιστοιχεί σε διαφορετική ποιότητα σκυροδέματος του λικνιζόμενου τοιχείου και ακόμα μία που αντιστοιχεί στο πλαίσιο χωρίς ενίσχυση. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο atc-40 εξάχθηκαν για όλες τις αναλύσεις οι μέγιστες (στοχευόμενες) μετατοπίσεις που προέκυψαν από την επιβολή του σεισμού σχεδιασμού στο πλαίσιο. Στη συνέχεια ακολουθεί η διγραμμικοποίηση της καμπύλης ικανότητας μέχρι τη μέγιστη μετατόπιση. Η διγραμμικοποίηση επιτυγχάνεται συνδυάζοντας δύο συνθήκες. Η πρώτη συνθήκη είναι η μέγιστη μετακίνηση και επιτάχυνση του διγραμμικοποιημένου φάσματος να ταυτίζονται με τις "πραγματικές" του μονοβάθμιου συστήματος. Η δεύτερη συνθήκη είναι η διγραμμικοποιημένη καμπύλη να τέμνει την καμπύλη ικανότητας του μονοβάθμιου συστήματος στο  $0.6a_y$ .

Να σημειωθεί ότι η ενεργός απόσβεση η οποία προκύπτει μέσα από επαναληπτική διαδικασία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4, αναφέρεται στο ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα.

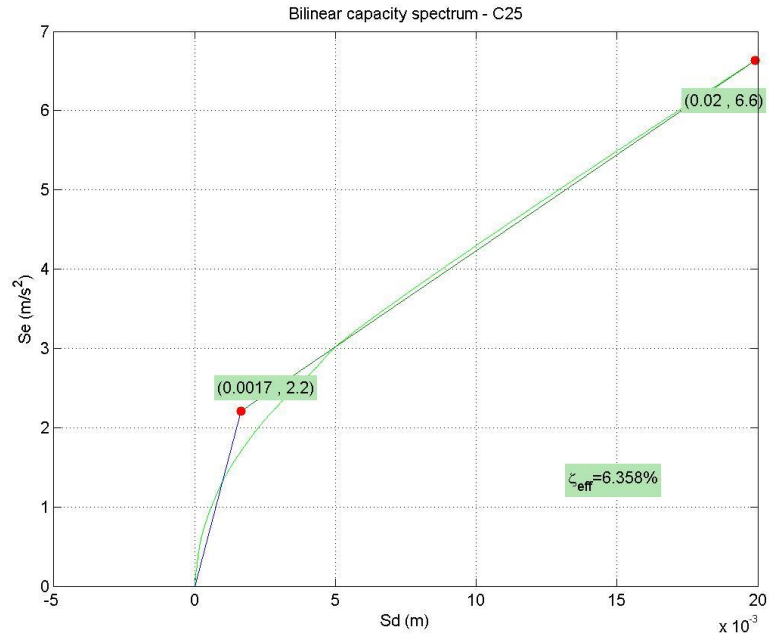
Στα επόμενα διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων:



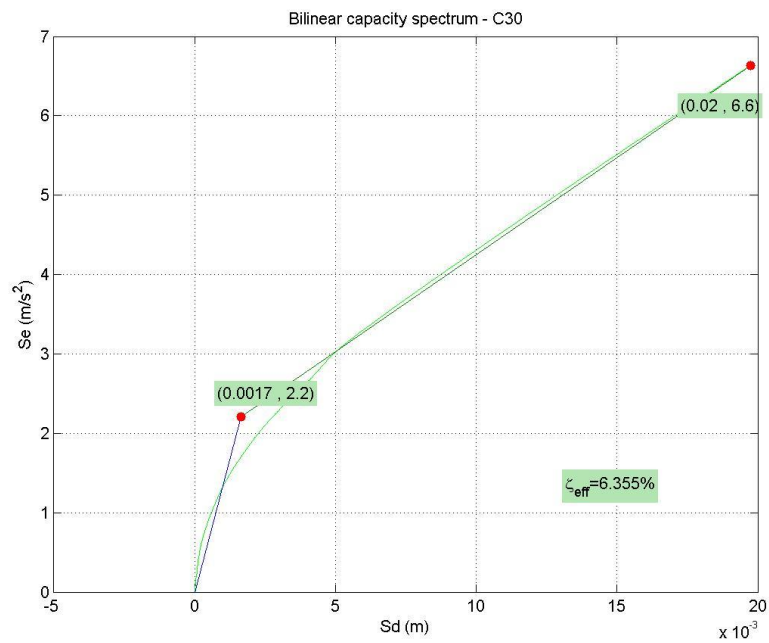
Διάγραμμα 5.1: Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας πλαισίου χωρίς λικνιζόμενο τοιχείο



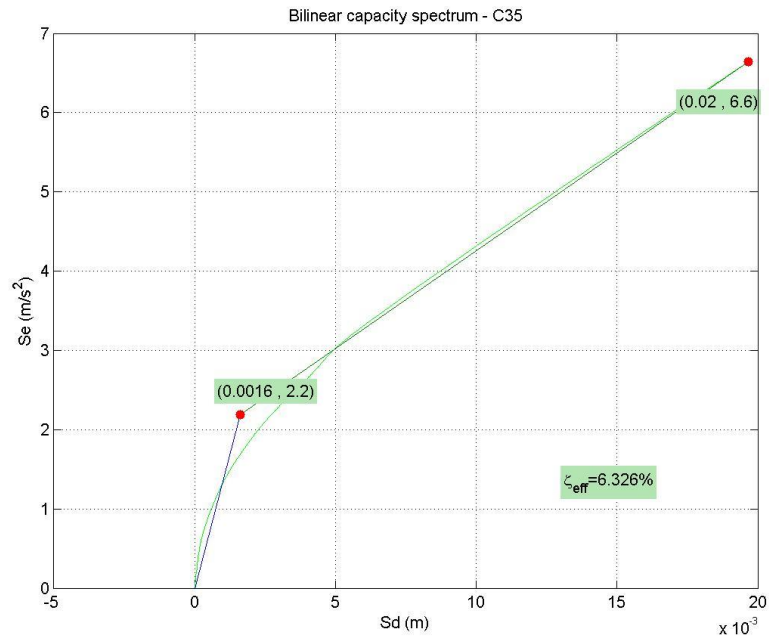
Διάγραμμα 5.2: Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας πλαισίου με λικνιζόμενο τοιχείο ποιότητας C20



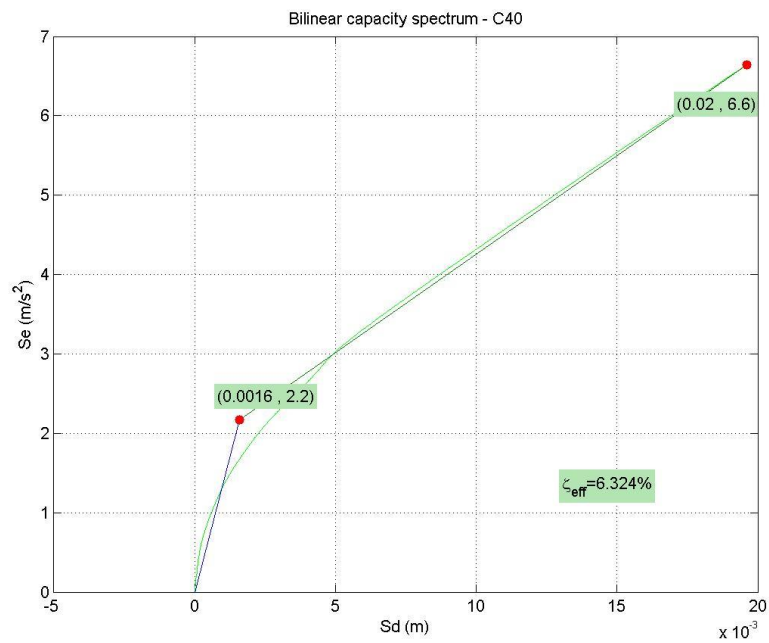
Διάγραμμα 5.3: Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας πλαισίου με λικνιζόμενο τοίχειο ποιότητας C25



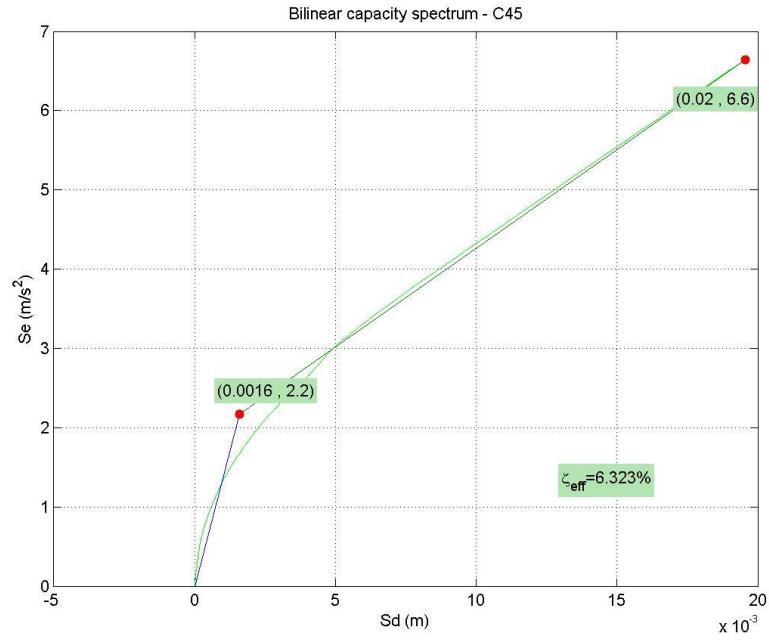
Διάγραμμα 5.4: Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας πλαισίου με λικνιζόμενο τοίχειο ποιότητας C30



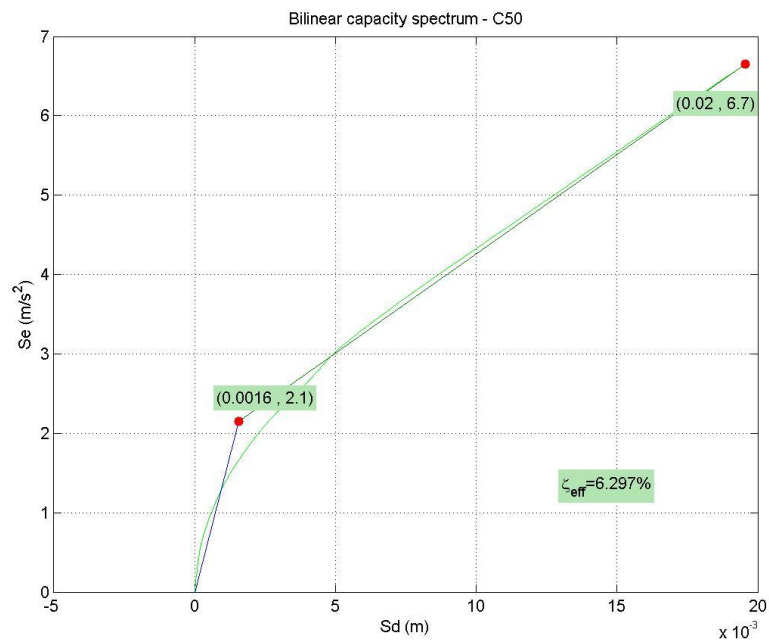
Διάγραμμα 5.5: Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας πλαισίου με λικνιζόμενο τοίχειο ποιότητας C35



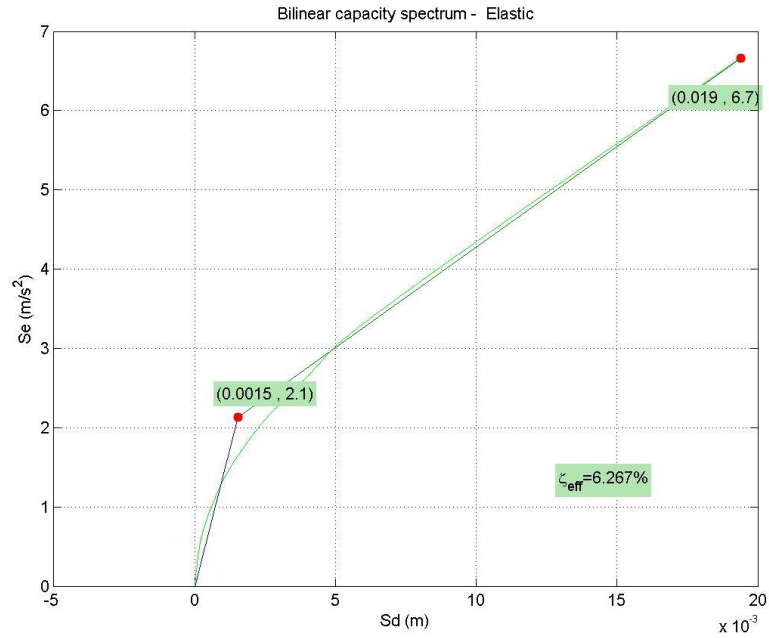
Διάγραμμα 5.6: Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας πλαισίου με λικνιζόμενο τοίχειο ποιότητας C40



Διάγραμμα 5.7: Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας πλαισίου με λικνιζόμενο τοίχειο ποιότητας C45

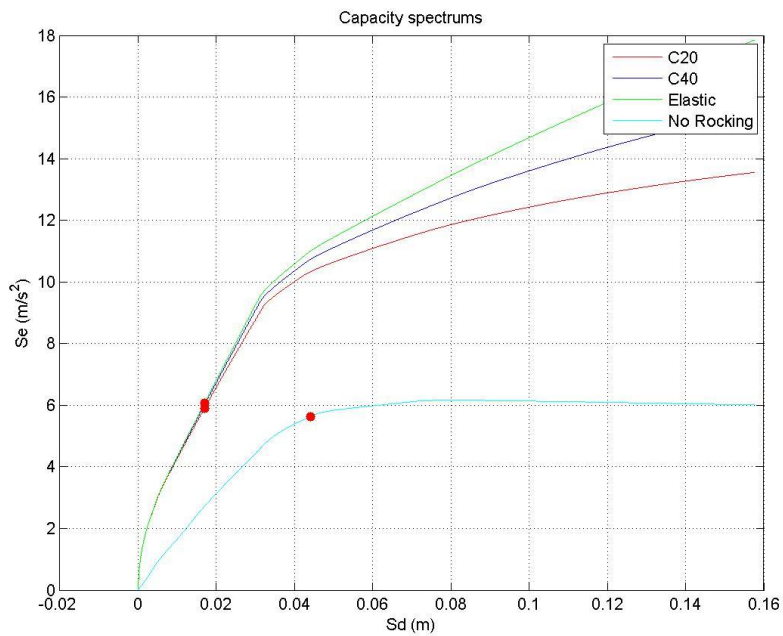


Διάγραμμα 5.8: Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας πλαισίου με λικνιζόμενο τοίχειο ποιότητας C50



Διάγραμμα 5.9: Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας πλαισίου με ελαστικό λικνιζόμενο τοιχείο

Στο πιο κάτω διάγραμμα δείχνονται ενδεικτικά για λόγους σύγκρισης, μερικές από τις πιο πάνω καμπύλες ικανότητας με τη μέγιστη μετατόπιση που προέκυψε για τον συγκεκριμένο σεισμό σχεδιασμού.



Διάγραμμα 5.10: Καμπύλες ικανότητας πλαισίων με διαφορετική ποιότητα σκυροδέματος, με την μέγιστη μετατόπιση

Στον πιο κάτω πίνακα συνοψίζονται τα αποτελέσματα των πιο πάνω διαγραμμάτων:

Πίνακας 5.1: Μετακινήσεις κορυφής και ενεργός απόσβεση του ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή

Ποιότητα σκυροδέματος	Μέγιστη μετακίνηση κορυφής d (mm)	Μετακίνηση διαρροής στην κορυφή dy (mm)	$\zeta_{eff}$ (%)
Χωρίς τοίχιο	43	24	9.11
C20	20	1.7	6.39
C25	20	1.7	6.36
C30	20	1.7	6.35
C35	20	1.6	6.33
C40	20	1.6	6.32
C45	20	1.6	6.32
C50	20	1.6	6.3
Ελαστικό	19	1.5	6.27

Από τα πιο πάνω διαγράμματα και τον πίνακα γίνεται εμφανές ότι η τοποθέτηση του τοιχείου μειώνει κατά 55% την στοχευόμενη μετακίνηση κορυφής του πλαισίου όταν σε αυτό επιβληθεί ο σεισμός σχεδιασμού. Συγκεκριμένα υπό το σεισμό σχεδιασμού με τα χαρακτηριστικά που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 1, το πλαίσιο χωρίς ενίσχυση αναπτύσσει μέγιστη μετακίνηση κορυφής 43mm, ενώ όταν ενισχυθεί με λικνιζόμενο τοίχιο στο μέσο του ανοίγματος η μετακίνηση αυτή περιορίζεται στα 20mm.

Αξιοσημείωτο είναι η μείωση της ενεργούς απόσβεσης του πλαισίου όταν τοποθετηθεί το λικνιζόμενο τοίχιο. Στο πλαίσιο χωρίς ενίσχυση, η ενεργός απόσβεση του ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή υπολογίστηκε με την μέθοδο atc-40 ίση με 9.11%, ενώ η ενίσχυση την μειώνει στο 6.3%. Η μείωση αυτή οφείλεται στο γεγονός που προαναφέρθηκε ότι το λικνιζόμενο τοίχιο προσφέρει πολύ μικρή απόσβεση αφού οι βρόχοι που δημιουργούνται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση είναι πολύ μικροί. Επίσης στη μείωση της απόσβεσης συνεισφέρει το γεγονός ότι το τοίχιο αναλαμβάνει μεγάλο ποσοστό των εντατικών μεγεθών στη βάση, άρα τα υπόλοιπα υποστυλώματα αναλαμβάνουν μικρότερα εντατικά μεγέθη. Αυτό οδηγεί τα υποστυλώματα σε μικρότερη πλαστικοποίηση των ινών τους άρα και λιγότερη απόσβεση από ότι πρόσφεραν όταν το τοίχιο δεν υπήρχε.

Το τελευταίο θα ενισχυθεί και στην συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου που όπως θα παρατηρηθεί τα υποστυλώματα δεν φτάνουν ούτε στο όριο διαρροής, που σημαίνει ότι η απόσβεση για τα υποστυλώματα αυτά είναι πολύ μικρή και λίγο μεγαλύτερη με την ιξώδη απόσβεση (5%) προσθέτοντας ελάχιστη υστερητική απόσβεση μέσα από την πλαστικοποίηση των ακραίων ινών τους..

Γίνεται επίσης φανερό ότι η ποιότητα του σκυροδέματος του λικνιζόμενου τοιχείου δεν επηρεάζει καθόλου μέγιστες μετατοπίσεις, τις μετατοπίσεις διαρροής και την ενεργό απόσβεση του ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή.

### 5.3.2 Αντιδράσεις, καμπυλότητα και παραμόρφωση που αναπτύσσονται στη βάση του λικνιζόμενου τοιχείου λόγω σεισμικού σχεδιασμού

Είναι σημαντικό να ποσοτικοποιηθούν τα εντατικά μεγέθη που αναλαμβάνονται από το λικνιζόμενο τοίχιο καθώς επίσης η καμπυλότητα αλλά κυρίως η παραμόρφωση του ακραίου θλιβόμενου άκρου. Σε αυτό το σημείο θα αναπτυχθεί η μεγαλύτερη παραμόρφωση του τοιχείου που λόγω της ανελαστικής φύσης του υλικού θα προκαλέσει ζημιές εκεί. Η παραμόρφωση είναι ένα μέτρο εκτίμησης των ζημιών που θα εμφανιστούν στο συγκεκριμένο σημείο αν συμβεί ο σεισμός σχεδιασμού.

Να τονιστεί όμως ότι οι παραμορφώσεις αυτές είναι πλασματικές αφού στην πραγματικότητα λόγω της φύσης του υλικού δεν θα αναπτυχθούν. Επίσης γίνεται η παραδοχή της επιπεδότητας της διατομής στην θλιβόμενη περιοχή της βάσης επειδή είναι πολύ μικρή σε μήκος.

Το λικνιζόμενο τοίχιο δεν έχει την ίδια συμπεριφορά με το συμβατικό, καθώς κατά τον λικνισμό του μέρος της βάσης του αποκολλάται. Αυτό σημαίνει ότι στα σημεία της βάσης τα οποία δεν βρίσκονται σε έδαφος δεν φέρουν κανένα εντατικό μέγεθος. Έτσι καμπυλότητα και παραμόρφωση αναπτύσσονται μόνο στην θλιβόμενη περιοχή της βάσης.

Στο ελαστικό τοίχιο η καμπυλότητα και η μέγιστη παραμόρφωση υπολογίζονται από την τριγωνική κατανομή των τάσεων στη βάση μήκους  $C$ . Τα μεγέθη κανονικοποιούνται όπως φαίνεται πιο κάτω και οι εξισώσεις εκφυλίζονται σε:

$$c = 3 \left( 1 + \frac{\rho M_r}{b N_r} \right) \quad (\text{εξ. 5.1})$$

$$\sigma_{\max} = \frac{2 N_r}{3 \left( b + \frac{\rho M_r}{N_r} \right)} \quad (\text{εξ. 5.2})$$

όπου:  $c=C/b$ : κανονικοποιημένο μήκος θλιβόμενης ζώνης  
 $\sigma_{\max}$ : μέγιστη θλιπτική δύναμη στο άκρο της βάσης  
 $N_r = N/w$ : κανονικοποιημένη αξονική δύναμη ως προς το πάχος του τοιχείου  
 $M_r = M/w$ : κανονικοποιημένη ροπή κάμψης ως προς το πάχος του τοιχείου

Η καμπυλότητα έτσι υπολογίζεται ως η κλίσης του διαγράμματος θλιπτικών τάσεων και αλγεβρικά εκφράζεται από τη σχέση:

$$\kappa = 1/r = \frac{\sigma_{\max}}{E * C} \quad (\text{εξ. 5.3})$$

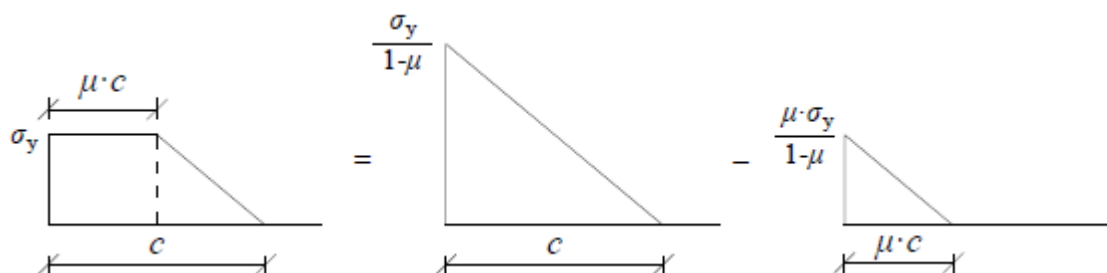
όπου:  $E$ : μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος

Η παραμόρφωση του ελαστικού τοιχείου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_{\max}}{E} \quad (\text{εξ. 5.4})$$



Στο ανελαστικό τοιχείο οι σχέσεις υπολογισμού των καμπυλοτήτων και των παραμορφώσεων παράγονται εκφράζοντας το τραπεζοειδές διάγραμμα ανελαστικών αναλύσεων σε διαφορά 2 τριγωνικών διαγραμμάτων όπως φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα:



Εικόνα 5.3: Τραπεζοειδής ατανομή ανελαστικών τάσεων στην διεπιφάνεια και ο διαχωρισμός της σε δύο τριγωνικές

Ακολουθώντας την γνωστή διαδικασία ολοκληρώνοντας τις τάσεις στη βάση προκύπτουν οι πιο κάτω εξισώσεις:

$$N_r = \frac{1}{2} (1 + \mu) b c \sigma_y \quad (\text{εξ. 5.5})$$

$$M_r = \rho \left[ \frac{1}{2} (1 + \mu) b^2 c \left( \frac{c}{3} - 1 \right) \sigma_y + \frac{1}{6} \mu^2 b^2 c^2 \sigma_y \right] \quad (\text{εξ. 5.6})$$

Επιλύοντας το σύστημα των δύο πιο πάνω εξισώσεων προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$c = \frac{N_r * \omega}{\sigma_y b} \quad (\text{εξ. 5.7})$$

$$\mu = \frac{2}{\omega} - 1 \quad (\text{εξ. 5.8})$$

όπου:

$$= \sqrt{3 \left( \frac{2b\sigma_y}{N_r} + \frac{2\rho M_r \sigma_y}{N_r^2} - 1 \right)} + 1 \quad (\text{εξ. 5.9})$$

Τελικώς η καμπυλότητα που είναι ίση με την κλίση του διαγράμματος θλιπτικών τάσεων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\kappa = \frac{-f_c}{E \cdot (C - \mu C)} \quad (\text{εξ. 5.10})$$

Ο υπολογισμός των παραμορφώσεων στο ανελαστικό τοιχείο γίνεται παρόμοια με το ελαστικό. Λόγω της παραδοχής της επιπεδότητας της διατομής ισχύει ότι η κλίση της παραμόρφωσης είναι ίση με την καμπυλότητα και την κλίση των θλιπτικών τάσεων στην θλιβόμενη περιοχή. Έτσι η μέγιστη παραμόρφωση της ακραίας ίνας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\varepsilon = \kappa * C \quad (\text{εξ. 5.11})$$

Στον πιο κάτω πίνακα παρουσιάζονται τα εντατικά μεγέθη, η καμπυλότητα και η παραμόρφωση στη βάση του λικνιζόμενου στοιχείου.

Πίνακας 5.2: Εντατικά Μεγέθη, παραμορφώσεις και καμπυλότητες στη βάση του τοιχείου

Ποιότητα σκυροδέματος	Αξονική δύναμη N (KN)	Τέμνουσα δύναμη Q (KN)	Ροπή κάμψης M (KNm)	Καμπυλότητα 1/r (1/m)	Παραμόρφωση
C20	-274.28	84.62	182.59	1.3586	0.0951
C25	-274.43	85.57	184.57	1.5567	0.0934
C30	-274.02	86.04	185.56	2.0087	0.0922
C35	-273.99	86.46	186.43	1.4995	0.0593
C40	-273.63	86.67	186.86	2.6825	0.0924
C45	-273.23	86.79	187.11	1.2733	0.0394
C50	-273.16	86.96	187.48	0.6793	0.0194
Ελαστικό	-272.81	87.68	189.12	1.5700	0.0224

Από τον πιο πάνω πίνακα παρατηρείται ότι η ποιότητα του σκυροδέματος του λικνιζόμενου τοιχείου δεν επηρεάζει σημαντικά τα εντατικά μεγέθη. Συγκεκριμένα το ότι η αξονική δύναμη παραμένει σταθερή σε όλες τις ανελαστικές αναλύσεις, οδηγεί στο λογικό συμπέρασμα που φαίνεται στον πίνακα 5.3 ότι η αξονική αυτή θα αναληφθεί από μικρότερο μήκος θλιβόμενης ζώνης όσο μεγαλύτερη είναι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Αυτό έχει και επίδραση στο μοχλοβραχίονα της συνισταμένης των θλιπτικών τάσεων στην βάση του τοιχείου και για αυτό τον λόγο παρατηρείται η μικρή αύξηση της ροπής στη βάση του τοιχείου με τη βελτίωση της ποιότητας του σκυροδέματος. Συνακόλουθο της βάσης της μείωσης της θλιβόμενης ζώνης συναρτήσει της βελτίωσης της ποιότητας σκυροδέματος του τοιχείου, είναι η μείωση του μήκους της πλαστικοποιημένης ζώνης της βάσης του τοιχείου.

Η καμπυλότητα αρχικώς φαίνεται να επηρεάζεται από την ποιότητα του σκυροδέματος. Το συμπέρασμα αυτό όμως δεν μπορεί να ληφθεί με ακρίβεια αφού δεν υπάρχει μία γενική κλίση της τιμής της καμπυλότητας σε σχέση με τη μεταβολή της ποιότητας του σκυροδέματος. Η ακανόνιστη μεταβολή της καμπυλότητας οφείλεται στο γεγονός ότι είναι πολύ ευαίσθητη και μία ασήμαντη μεταβολή προκαλεί τεράστια μεταβολή στο τελικό αποτέλεσμα. Αυτό ισχύει επειδή χρησιμοποιώντας του πιο πάνω τύπους προκύπτει το  $\mu$  πολύ κοντά στο 1, δηλαδή βρίσκεται σε πλαστικοποίηση σχεδόν όλη η διατομή. Παρατηρώντας την εξίσωση (5.10) βλέπουμε ότι αν το  $\mu$  βρίσκεται κοντά στο 1, σημαίνει ότι απειρίζεται η καμπυλότητα. Έτσι μία μικρή μεταβολή μίας εκ των μεταβλητών επηρεάζει το αποτέλεσμα. Να σημειωθεί ότι στα πιο πάνω αποτελέσματα λήφθηκαν υπόψη όλα τα δεκαδικά. Σε περίπτωση όμως που ληφθούν μερικά δεκαδικά των μεταβλητών αξονικής δύναμης και ροπής κάμψης τα αποτελέσματα δεν αποκλίνουν.

Η παραμόρφωση που είναι και το μέγεθος που μας ενδιαφέρει αποκλίνει πολύ σε σχέση με την ποιότητα του σκυροδέματος αφού κυμαίνεται μεταξύ του 20 % και 90%.

Ασφαλές συμπέρασμα που μπορεί να ληφθεί είναι ότι στο τοιχείο αναπτύσσονται παραμορφώσεις πολύ μεγάλες, πάνω από 20%, που στην πραγματικότητα δεν θα αναπτυχθούν επειδή το υλικό θα αστοχήσει. Έτσι γίνεται αντιληπτό ότι στο τοιχείο θα αναπτυχθούν τοπικές ζημιές οι οποίες θα περιοριστούν μόνο στο εύρος της παραμορφωμένης - θλιβόμενης περιοχής της βάσης. Το μήκος αυτό όπως θα δούμε πιο κάτω είναι πολύ μικρό, δηλαδή στο τοιχείο περιορίζονται οι ζημιές σε πολύ μικρή έκταση κάτι που άλλωστε είναι και το ζητούμενο στο ενισχυμένο πλαίσιο με λικνιζόμενο τοιχείο.

Στο πιο κάτω πίνακα γίνεται αντιληπτή η κατανομή των τάσεων στη βάση του τοιχείου. Περίπου το 95%- 98% της διεπιφάνειας δεν έχει επαφή με τη βάση του, ενώ το υπόλοιπο 5%-2% είναι αυτό που παραμορφώνεται και αναλαμβάνει μέσω των θλιπτικών τάσεων την αξονική δύναμη. Το ποσοστό της βάσης το οποίο παραμένει ελαστικό ενώ θλίβεται είναι πάρα πολύ μικρό. Η πλαστικοποιημένη βάση ανέρχεται στο 1.9% -4.5%της συνολικής επιφάνειας, ενώ σημαντικό είναι ότι το μήκος αυτό φτάνει μέχρι 95%-99% της θλιπτικής ζώνης της βάσης. Δηλαδή η θλιπτική περιοχή της βάσης έχει μπει σχεδόν όλη στην πλαστική περιοχή και για αυτό τον λόγο αναπτύσσονται μεγάλες καμπυλότητες.

Πίνακας 5.3: Περιγραφή τάσεων στη βάση του τοιχείου

Ποιότητα σκυροδέματος	Ποσοστό της βάσης που ανασηκώνεται (%)	Ποσοστό της βάσης που θλίβεται (%)	Ποσοστό της βάσης που πλαστικοποιείται (%)	Ποσοστό της βάσης που παραμένει ελαστικό (%)	Ποσοστό της θλιβόμενης περιοχής που πλαστικοποιείται (%)
C20	95.10	4.90	4.86	0.04	99.21
C25	96.08	3.92	3.88	0.04	99.03
C30	96.72	3.28	3.24	0.04	98.92
C35	97.18	2.82	2.76	0.06	98.03
C40	97.54	2.46	2.42	0.04	98.56
C45	97.79	2.21	2.13	0.08	96.19
C50	97.96	2.04	1.86	0.18	91.40

### 5.3.3 Διερεύνηση επιρροής λικνιζόμενου τοιχείου στα υποστυλώματα, τη δοκό και στις πλαστιμότητες

Το λικνιζόμενο τοιχείο αναλαμβάνει μεγάλο μέρος της τέμνουσας και ροπής βάσης και έτσι τα υποστυλώματα για συγκεκριμένο οριζόντιο φορτίο της ανάλυσης Pushover έχουν μικρότερη ένταση. Στο παρόν υποκεφάλαιο ποσοτικοποιούνται τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στα υποστυλώματα τόσο στη βάση όσο και στην κορυφή τους υπό τον σεισμό σχεδιασμού. Σημαντικότερο όμως είναι ο υπολογισμός της πλαστιμότητας που αναπτύσσεται σε κάθε υποστυλώμα υπό το συγκεκριμένο σεισμικό φορτίο.

Θα υπολογιστούν επίσης τα εντατικά μεγέθη που ασκούνται στην δοκό λόγω του λικνιζόμενου τοιχείου. Τα μεγέθη αυτά είναι σημαντικά και πρέπει να ληφθούν υπόψη στην διαστασιολόγηση της δοκού.

### 5.3.3.1 Υπολογισμός εντατικών μεγεθών στα υποστυλώματα του πλαισίου

Ο υπολογισμός των εντατικών μεγεθών που αναπτύσσονται στα υποστυλώματα γίνεται με βάση τη μέθοδο atc-40. Η στοχευόμενη μετακίνηση κορυφής που υπολογίζεται όπως έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο 5.3.1, αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη τέμνουσα βάση του κεφαλαίου 3.3.1. Η τελευταία αντιστοιχεί σε συγκεκριμένα εντατικά μεγέθη των υποστυλωμάτων όπως φαίνεται από τα διαγράμματα του κεφαλαίου 2.3.4.

Στον πιο κάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές των εντατικών μεγεθών του κάθε υποστυλώματος:

Πίνακας 5.4: Εντατικά μεγέθη υποστυλωμάτων στο σεισμό σχεδιασμού

Ποιότητα σκυροδέματος	Υποστώλωμα 1				Υποστώλωμα 2			
	N (KN)	Q (KN)	M <sub>βάσης</sub> (KMm)	M <sub>κορυφής</sub> (KMm)	N (KN)	Q (KN)	M <sub>βάσης</sub> (KMm)	M <sub>κορυφής</sub> (KMm)
Χωρίς τοιχείο	-59.44	52.95	-139.41	98.85	-166.31	74.71	139.41	-168.34
C20	77.64	31.4	-70.42	70.91	-60.2	33.68	70.42	-71.2
C25	77.86	31.08	-69.61	70.25	-60.32	33.36	69.61	-70.54
C30	77.67	30.82	-69.01	69.7	-60.56	33.16	69.01	-70.14
C35	77.77	30.74	-68.79	69.53	-60.72	33.09	68.79	-70.01
C40	77.62	30.64	-68.56	69.3	-60.93	33.03	68.56	-69.92
C45	77.42	30.56	-68.39	69.12	-61.15	33	68.39	-69.88
C50	77.47	30.56	-68.39	69.12	-61.27	33.02	68.39	-69.92
Ελαστικό	77.42	30.31	-67.78	68.59	-61.56	32.81	67.78	-69.53

Από τον πιο πάνω πίνακα παρατηρείται ότι η προσθήκη του λικνιζόμενου τοιχείου προκαλεί πολύ μεγάλη μεταβολή της αξονικής δύναμης του υποστυλώματος 1. Αυτό οφείλεται στο γεγονός μεγαλύτερο οριζόντιο φορτίο που δέχεται το πλαίσιο προκαλεί μεγάλη ροπή βάσης. Η τελευταία αναλαμβάνεται από τις ροπές στις βάσεις των υποστυλωμάτων και από ζεύγος δυνάμεων. Έτσι καθώς αυξάνεται το οριζόντιο φορτίο δημιουργείται εφελκυστική δύναμη στο υποστώλωμα 1 (βλέπε εικόνα 2.3) με αποτέλεσμα το υποστώλωμα να εφελκύεται.

Η αξονική του υποστυλώματος 2 είναι μικρότερη αφού μπει το τοιχείο και ο λόγος είναι ότι ο λικνισμός του τοιχείου πάει να ανσηκώσει όλο το πλαίσιο και προκαλεί επιπλέον εφελκυσμό και στα δύο υποστυλώματα. Μία διαφορετική εξήγηση που απορρέει όμως από την προηγούμενη, είναι ότι καθώς οι μετακινήσεις του πλαισίου αυξάνονται, το τοιχείο απαιτεί μεγαλύτερη αξονική δύναμη για να λειτουργήσει. Η θλίψη αυτή ισορροπείται όμως από την εφελκυστική των υποστυλωμάτων.

Πολύ σημαντικό είναι ότι όταν συμβεί ο σεισμός σχεδιασμού της ζώνης περιοχής Z2, τα υποστυλώματα του πλαισίου αναλαμβάνουν μικρότερη ροπή κάμψης στις βάσεις τους όταν το πλαίσιο είναι ενισχυμένο με το λικνιζόμενο τοιχείο. Αυτό φυσικά συνδέεται με τα διαγράμματα 3.10 και 3.12 του κεφαλαίου 3. Παρατηρώντας αυτά τα διαγράμματα συμπεραίνουμε ότι πιθανώς τα υποστυλώματα του μη ενισχυμένου πλαισίου να έχουν διαρρεύσει. Το πλεονέκτημα της επιρροής του λικνιζόμενου τοιχείου στη δρώσα ροπή των

υποστυλωμάτων φαίνονται καλύτερα στο επόμενο κεφάλαιο όπου θα διερευνηθούν οι καμπυλότητες.

Επίσης όπως άλλωστε περιμέναμε στον αριστερό κόμβο υποστυλώματος δοκού η ροπή αλλάζει πρόσημο και στο δεξιό κόμβο το πρόσημο παραμένει ίδιο (βλέπε εικόνα 2.7). Αξιοσημείωτο είναι ότι οι ροπές των 4 σημείων που ελέγχονται είναι σχεδόν ίσες μεταξύ τους κάτι που δεν συνέβαινε στο μη ενισχυμένο πλαίσιο. Αυτό, επαληθεύει τον ισχυρισμό ότι το τοίχειο προκαλεί ομαλότερη κατανομή της έντασης στα υποστυλώματα στο συγκεκριμένο πλαίσιο, όμως δεν αποτελεί απόδειξη γενικότερης θεωρίας.

Τέλος οι τέμνουσες των υποστυλωμάτων αυξάνονται καθώς η ύπαρξη του τοιχείου αυξάνει την τέμνουσα βάσης πάρα πολύ. Σημειώνεται ότι η αύξηση της τέμνουσας δεν προκαλεί πρόβλημα στη συμπεριφορά του πλαισίου αφού είναι σχετικά μικρή και θα αναληφθεί από τον εγκάρσιο σπλισμό.

### 5.3.3.2 Υπολογισμός εντατικών μεγεθών στη δοκό του πλαισίου

Για τον σεισμό σχεδιασμού αναπτύσσονται στην δοκό εντατικά μεγέθη που αλλάζουν πολύ με την τοποθέτηση του λικνιζόμενου τοιχείου. Είναι αναγκαίο έτσι να διερευνηθούν τα μεγέθη που θα καθορίσουν την διαστασιολόγηση της δοκού.

Ο υπολογισμός των εντατικών μεγεθών γίνεται αντιστοίχως με τα υποστυλώματα όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο και φαίνονται στον πιο κάτω πίνακα. Η δοκός του πλαισίου διαχωρίζεται για λόγους κατανόησης σε δοκό 3 και 5 οι οποίες αντιστοιχούν στη δοκό αριστερά και στην δοκό δεξιά του τοιχείου. Τα σημεία που αναφέρεται ο πίνακας φαίνονται στις εικόνες 2.2 και 2.3.

Πίνακας 5.5: Εντατικά μεγέθη δοκού που αναπτύσσονται στο σεισμό σχεδιασμού

Ποιότητα σκυροδέματος	Δοκός 3					Δοκός 5				
	N (KN)	Q <sub>3</sub> (KN)	Q <sub>5</sub> (KN)	M <sub>3</sub> (KMm)	M <sub>5</sub> (KMm)	N (KN)	Q <sub>7</sub> (KN)	Q <sub>4</sub> (KN)	M <sub>7</sub> (KMm)	M <sub>4</sub> (KMm)
Χωρίς τοίχειο	-10.37	59.46	53.41	98.85	106.42	-10.37	-53.47	166.34	-106.42	-168.34
C20	-42.96	-77.66	158.94	-70.91	-142.03	41.3	21.07	60.22	35.96	-71.2
C25	-43.42	-77.88	159.17	-70.25	-143.09	41.75	20.95	60.33	35.09	-70.54
C30	-43.68	-77.69	158.97	-69.7	-143.29	41.96	20.71	60.58	34.26	-70.14
C35	-43.89	-77.79	159.07	-69.53	-143.65	42.15	20.55	60.73	33.84	-70.01
C40	-44.02	-77.63	158.92	-69.3	-143.59	42.23	20.34	60.95	33.37	-69.92
C45	-44.1	-77.44	158.73	-69.12	-143.43	42.26	20.13	61.16	32.94	-69.88
C50	-44.19	-77.49	158.78	-69.12	-143.52	42.34	20.00	61.29	32.76	-69.92
Ελαστικό	-44.57	-77.43	158.72	-68.59	-143.95	42.66	19.71	61.58	31.84	-69.53

Όπως ειπώθηκε, το λικνιζόμενο τοιχείο κάνει το πλαίσιο πολύ πιο δύσκαμπτο, άρα υπό το σεισμό σχεδιασμού το πλαίσιο θα αναλάβει πολύ μεγαλύτερη σεισμική δύναμη, που στην ανάλυση Pushover μεταφράζεται ως τέμνουσα βάσης. Η θεωρητική αύξηση της αξονικής δύναμης της δοκού οφείλεται στην αύξηση της οριζόντιας δύναμης που ασκείται σε αυτή σε συνδυασμό με το γεγονός ότι δεν αναλαμβάνεται όλη η τέμνουσα βάσης από τα υποστυλώματα. Στην αριστερή δοκό η αξονική παραμένει θλιπτική, ενώ στη δεξιά γίνεται εφελκυστική, όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3.3.4.6 (βλέπε διαγράμματα 3.24 και 3.25).

Είδαμε επίσης, ότι το λικνιζόμενο τοιχείο μειώνει τη δρώσα ροπή τόσο στον αριστερό κόμβο του πλαισίου όσο και στο δεξιό. Ενδιάμεσα στους κόμβους 5 και 7, όπως έχουν οριστεί στο μοντέλο (Εικόνα 2.3), η ροπή λόγω του τοιχείου αλλάζει πρόσημο. Οφείλεται στο γεγονός ότι η προσθήκη του τοιχείου αλλάζει το στατικό σύστημα δημιουργώντας αρνητική ροπή στη μέση της δοκού (βλέπε διαγράμματα 3.18, 3.19). Σημαντική παρατήρηση είναι ότι το μέτρο της ροπής στο σημείο ανασήκωσης του τοιχείου (κόμβος 5) είναι μεγαλύτερο από αυτό που θα προκαλούσε ο σεισμός σχεδιασμού στο μη ενισχυμένο πλαίσιο. Αν αναλογιστεί κανείς ότι σε υφιστάμενη κατασκευή η δοκός είναι οπλισμένη για να παραλαμβάνει μόνο θετικές ροπές, καταλαβαίνει πόσο απαραίτητη είναι η ενίσχυση της δοκού στο μέσο της.

Ακόμη μία σημαντική επιρροή του τοιχείου στην δοκό είναι η δύναμη που ασκείται τοπικά στη δοκό (στον κόμβο 5) λόγω της ανασήκωσης του τοιχείου. Η επιρροή αυτή φαίνεται στον πιο πάνω πίνακα από την τεράστια αύξηση της τέμνουσας της δοκού στο αριστερό σημείο που έρχεται σε επαφή το τοιχείο με την δοκό (κόμβος 5). Να σημειωθεί πάντως ότι η μέγιστη αναπτυσσόμενη τέμνουσα μπορεί να παραληφθεί από τη δοκό με οπλισμούς διάτμησης και είναι αρκετά μικρότερη από τη μέγιστη τέμνουσα από την μέγιστη τέμνουσα που επιτρέπει η αντοχή των λοξών θλιπτήρων του μοντέλου Morch.

$$V_{RD,max} = a_{cw} b_w z v_1 f_{cd} (\cot\theta + \cot\alpha) / (1 + \cot^2\theta)$$

όπου:  $a_{cw} = 1$

$$v_1 = 0.6 \left[ 1 - \frac{f_{ck}}{250} \right]$$

$\theta = 45^\circ$  (γωνία λοξών θλιπτήρων)

$\alpha = 90^\circ$  (γωνία οπλισμού διάτμησης)

Για τις διαστάσεις της συγκεκριμένης δοκού και για ποιότητα σκυροδέματος C30 προκύπτει μέγιστη επιτρεπόμενη τέμνουσα  $V_{RD,max} = 840\text{KN}$ , πολύ μεγαλύτερη από την δρώσα.

Επιπλέον παρατηρείται ότι το τοιχείο προκαλεί αξιόλογη αύξηση (με αντίθετο πρόσημο) στην τέμνουσα της δοκού στον αριστερό κόμβο (3). Αυτό φυσικά οφείλεται στα αίτια που προκάλεσαν την μείωση της αξονικής δύναμης του υποστυλώματος 1, όπως έχει περιγραφεί πιο πάνω, αφού από ισορροπία κόμβου προκύπτει ότι η τέμνουσα της δοκού ισούται με την αξονική του υποστυλώματος. Το ίδιο ισχύει και για την ανεπαίσθητη αύξηση της τέμνουσας στο δεξιό κόμβο (4).

Τέλος να σημειωθεί ότι ο σεισμός αλλάζει φορά, όλη η δοκός θα διστασιολογηθεί με βάση τη δυσμενέστερη περιοχή της που είναι το τμήμα της δοκού που βρίσκεται αριστερά του τοιχείου.

### 5.3.3.3 Υπολογισμός γενικής πλαστιμότητας πλαισίου και τοπικής πλαστιμότητας υποστυλωμάτων

Η καινούρια κατασκευή που σχεδιάζεται με συντελεστή συμπεριφοράς  $\eta=3$  αναπτύσσει στο σεισμό σχεδιασμού συγκεκριμένη πλαστιμότητα, η οποία όμως θα είναι διαφορετική αν ο σεισμός συμβεί στο ενισχυμένο πλαίσιο. Έτσι πρώτος σκοπός του υποκεφαλαίου είναι να παρατηρηθεί η μεταβολή της γενικής πλαστιμότητας μετά την τοποθέτηση του λικνιζόμενου τοιχείου, καθώς επίσης να ελεγχθεί αν αυτή επηρεάζεται από την ποιότητα σκυροδέματος του τοιχείου.

Όμως η ικανοποίηση της απαίτησης της γενικής πλαστιμότητας, όπως θέτεται από τον αντισεισμικό κανονισμό, δεν εξασφαλίζει τη ορθή λειτουργία της κατασκευής. Πρέπει να εξασφαλιστεί ότι και τα υπόλοιπα μέλη της κατασκευής αναπτύσσουν τοπική πλαστιμότητα εντός επιτρεπτών ορίων ώστε να μη προκληθούν μεγάλες ζημιές σε αυτά. Υπολογίζονται επομένως σε κάθε ανάλυση οι τοπικές πλαστιμότητες των υποστυλωμάτων που αναπτύσσονται όταν στο πλαίσιο αναπτυχθεί ο σεισμός σχεδιασμού με επιτάχυνση εδάφους  $\alpha_g=0.24g$  (ζώνη Z2).

Να σημειωθεί ότι η γενική πλαστιμότητα εκφράζεται σε όρους μετακινήσεων ενώ οι τοπικές πλαστιμότητες των υποστυλωμάτων σε όρους καμπυλοτήτων. Η γενική πλαστιμότητα υπολογίζεται αφού διγραμμικοποιηθεί η καμπύλη ικανότητας της κατασκευής μέχρι την μέγιστη μετακίνηση που αναπτύσσεται στο πλαίσιο στο σεισμό σχεδιασμού από τη σχέση:

$$\mu_{\text{γενική}} = d_{\text{max}}/d_y \quad (\text{εξ. 5.12})$$

όπου:  $d_{\text{max}}$  : μέγιστη αναπτυσσόμενη μετακίνηση στην κορυφή του πλαισίου υπό το σεισμό  
σχεδιασμού

$d_y$  : μετακίνηση διαρροής του πλαισίου υπό το σεισμό σχεδιασμού όπως προκύπτει από τη διγραμμικοποίηση της καμπύλης ικανότητας

Για τον υπολογισμό των τοπικών πλαστιμοτήτων στα υποστυλώματα εξάγονται αρχικά από το Opensees οι καμπυλότητες των υποστυλωμάτων που αντιστοιχούν σε κάθε οριζόντιο φορτίο της ανάλυσης Pushover. Στην συνέχεια υπολογίζεται η μέγιστη μετατόπιση κορυφής του πλαισίου που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη τέμνουσα βάσης. Ακολούθως ευρίσκονται οι καμπυλότητες από τις πιο πάνω αναλύσεις που αντιστοιχούν στην συγκεκριμένη τέμνουσα βάσης. Οι συγκεκριμένες καμπυλότητες είναι οι μέγιστες που αναπτύσσονται στα υποστυλώματα αν στο πλαίσιο συμβεί ο σεισμός σχεδιασμού. Για τον υπολογισμό της καμπυλότητας διαρροής των υποστυλωμάτων έγινε διγραμμικοποίηση του διαγράμματος ροπής καμπυλότητας όπως αυτό προκύπτει από επεξεργασία

αποτελεσμάτων του λογισμικού Opensees. Η διγραμμικοποίηση επιλέχθηκε να γίνει με οριζόντιο κλάδο, που αποτελεί καλή προσέγγιση για τις μικρές μετακινήσεις που αναπτύσσονται. Τέλος η πλαστιμότητα του υποστυλώματος σε όρους καμπυλοτήτων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\mu_{\text{τοπική}} = \frac{1/r_{\text{max}}}{1/r_y} \quad (\text{εξ. 5.13})$$

όπου:  $1/r_{\text{max}}$  : μέγιστη αναπτυσσόμενη καμπυλότητα στο υπό μελέτη υποστυλόμετρο του πλαισίου υπό το σεισμό σχεδιασμού

$1/r_y$  : καμπυλότητα διαρροής του υπό μελέτη υποστυλώματος του πλαισίου υπό το σεισμό σχεδιασμού όπως αυτή προέκυψε από την διγραμμικοποίηση της καμπύλης ροπής – καμπυλότητας που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο μέλος

Ακολουθεί ο πίνακας με όλες τις γενικές και τοπικές πλαστιμότητες που αναπτύσσονται στο πλαίσιο όταν συμβεί ο σεισμός σχεδιασμού.

Πίνακας 5.6: Γενική και τοπική των υποστυλωμάτων πλαστιμότητα

Ποιότητα σκυροδέματος	Γενική πλαστιμότητα	Πλαστιμότητα υποστυλώματος 1	Πλαστιμότητα υποστυλώματος 2
Χωρίς τοιχείο	1.75	Δεν διαρρέει	3.13
C20	11.81	Δεν διαρρέει	Δεν διαρρέει
C25	12.04	Δεν διαρρέει	Δεν διαρρέει
C30	11.93	Δεν διαρρέει	Δεν διαρρέει
C35	12.09	Δεν διαρρέει	Δεν διαρρέει
C40	12.24	Δεν διαρρέει	Δεν διαρρέει
C45	12.21	Δεν διαρρέει	Δεν διαρρέει
C50	12.42	Δεν διαρρέει	Δεν διαρρέει
Ελαστικό	12.52	Δεν διαρρέει	Δεν διαρρέει

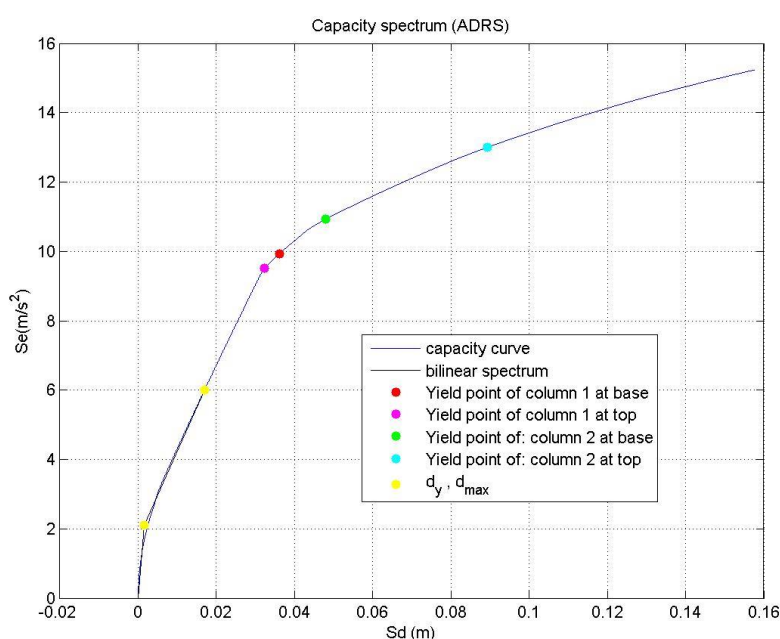
Από τον πίνακα 5.6 παρατηρείται ότι η ενίσχυση του πλαισίου με λικνιζόμενο τοιχείο αυξάνει πολύ την γενική πλαστιμότητα του πλαισίου καθώς επίσης προστατεύει τα υποστυλώματα από διαρροή. Το τελευταίο είναι πάρα πολύ σημαντικό γιατί στην ουσία εκπληρώνει το σκοπό της τοποθέτησης του λικνιζόμενου τοιχείου. Δηλαδή σε περίπτωση που συμβεί ο σεισμός σχεδιασμού, στο πλαίσιο θα δημιουργηθούν μόνο λίγες ζημιές, οι οποίες είναι συγκεντρωμένες και επισκευάσιμες στο λικνιζόμενο τοιχείο, αφού όπως επισημάνθηκε οι ζημιές εμφανίζονται μόνο στην παραμορφωμένη - θλιβόμενη περιοχή της βάσης του η οποία είναι πολύ μικρή σε μήκος.

Η μεγάλη αύξηση της γενικής πλαστιμότητας οφείλεται στο ότι η μέγιστη μετατόπιση βρίσκεται στον αρχικό κλάδο της καμπύλης ικανότητας του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος όπου το πλαίσιο λόγω του τοιχείου είναι πολύ δύσκαμπτο. Σε συνδυασμό με το ότι σε πολύ μικρές μετακινήσεις το μονοβάθμιο σύστημα είναι ακόμη πιο δύσκαμπτο και έχει έντονα μη γραμμική συμπεριφορά, προκύπτει πολύ μικρή μετατόπιση διαρροής σε



σχέση με την μέγιστη όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα 5.2-5.9. Το πλαίσιο όπως είδαμε "διαρρέει" πολύ πριν διαρρεύσει κάποιο από τα υπόλοιπα του μέλη. Άρα, συμπεραίνεται ότι το πλαίσιο "διαρρέει" όταν "διαρρεύσει" το τοίχιο λόγω λικνισμού. Δηλαδή μπορούμε να θεωρήσουμε ότι σε ένα τέτοιο πλαίσιο όλη πλαστιμότητα οφείλεται στην πλαστιμότητα του τοιχείου. Οι τιμές της γενικής πλαστιμότητας στα πλαίσια που ενισχύονται με λικνιζόμενα μέλη, δεν αποτελούν ένδειξη των ζημιών του πλαισίου και ειδικότερα όταν δεν διαρρέει κάποιο μέλος. Έτσι συμπεραίνεται η ανάγκη τροποποίησης του υπολογισμού της γενικής πλαστιμότητας των πλαισίων που ενισχύονται με λικνιζόμενα τοιχεία. Αυτό όμως δεν αποτελεί κανόνα, παρά μόνο για μονώροφα πλαίσια παρόμοιας δυσκαμψίας.

Η πιο πάνω επεξήγηση φαίνεται γραφικά στην επόμενη εικόνα:



Διάγραμμα 5.11: Φάσμα ικανότητας και διγραμμικοποίηση του

### 5.3.4 Συμπεράσματα ως προς την ενίσχυση πλαισίου με αρχική πλαστιμότητα ίση με 3

Αρχικά επιβεβαιώθηκε ότι η ποιότητα σκυροδέματος του λικνιζόμενου τοιχείου δεν επηρεάζει ούτε τη συμπεριφορά του πλαισίου ούτε κάποιο εντατικό μέγεθος. Επηρεάζει όμως το μήκος της διεπιφάνειας που θλίβεται και το ποσοστό αυτής που πλαστικοποιείται. Έχει επίπτωση δηλαδή και στην έκταση που θα έχουν οι ζημιές. Σε καλύτερης ποιότητας σκυροδέματος οι ζημιές θα περιοριστούν σε μικρότερο μήκος της βάσης του τοιχείου από ότι σε λικνιζόμενα τοιχεία που αποτελούνται από υλικό μικρότερης θλιπτικής αντοχής. Σημειώνεται επίσης ότι στις αναλύσεις λήφθηκε σταθερό μέτρο ελαστικότητας για όλες τις ποιότητες του σκυροδέματος. Το μέτρο ελαστικότητας μειώνει τις παραμορφώσεις, έτσι γίνεται ακόμα πιο εμφανές ότι η ποιότητα σκυροδέματος επηρεάζει το μέγεθος των ζημιών.

Στη συνέχεια, παρατηρήθηκε ότι το λικνιζόμενο τοιχείο κάνει το πλαίσιο πολύ πιο δύσκαμπτο και έτσι η μετακίνηση της κορυφής του είναι πολύ πιο μικρή καθώς επίσης λαμβάνει και μεγαλύτερη σεισμική δύναμη όταν συμβεί ο σεισμός σχεδιασμού. Σημαντικότερη παρατήρηση είναι ότι η μέγιστη σεισμική δύναμη που ασκείται στο ενισχυμένο πλαίσιο δεν είναι ικανή να πλαστικοποιήσει κάποιο υποστυλόμετρο του πλαισίου. Δηλαδή, σημαντικό πλεονέκτημα του λικνιζόμενου τοιχείου είναι ότι περιορίζει την διαρροή στα υποστυλώματα άρα και τις πιθανόν ζημιές. Έτσι οι ζημιές είναι συγκεντρωμένες στο λικνιζόμενο τοιχείο, που όμως όπως έχει επισημανθεί είναι επιδιορθώσιμες καθώς αυτές θα γίνουν μόνο στο παραμορφώσιμο μέρος της βάσης που είναι πολύ μικρό σε έκταση. Από τις αναλύσεις οι ζημιές αυτές γίνονται αντιληπτές από τις μεγάλες αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στη ακραία ίνα της θλιβόμενης περιοχής της βάσης του τοιχείου, που όμως είναι αδύνατο να αναπτυχθούν λόγω του νόμου του υλικού του ανελαστικού σκυροδέματος.

Επιπλέον, επιβεβαιώθηκε ότι το λικνιζόμενο τοιχείο δεν συμβάλλει στην απόσβεση καθώς οι βρόχοι υστέρησης που αναπτύσσει κατά την φόρτιση αποφόρτιση είναι πολύ μικροί (αυτό λήφθηκε υπόψη στην επεξεργασία των αναλύσεων). Γίνεται αντιληπτό από τις ενεργές αποσβέσεις του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος που για μη ενισχυμένο πλαίσιο είναι ίση περίπου 9%, ενώ για ενισχυμένο περιορίζεται στο 6%.

Τέλος, αποδείχθηκε ότι το λικνιζόμενο τοιχείο αυξάνει την γενική πλαστιμότητα του πλαισίου. Αυτό οφείλεται στην μεγάλη δυσκαμψία και την μη γραμμική απόκριση του πλαισίου στην αρχή του λικνισμού. Λόγω αυτού, το πλαίσιο χάνει μεγάλο μέρος της δυσκαμψίας του για πολύ μικρές μετατοπίσεις κορυφής. Έτσι, μετά την διγραμμικοποίηση του φάσματος ικανότητας προκύπτει πολύ μικρή μετατόπιση διαρροής σε σχέση με την μέγιστη μετατόπιση. Όλη η πλαστιμότητα του πλαισίου οφείλεται στην πλαστιμότητα και στην "διαρροή" του λικνιζόμενου τοιχείου. Παρόλα αυτά αν παρατηρηθεί η διγραμμικοποιημένη καμπύλη πάνω σε όλο το φάσμα ικανότητας (Εικόνα 5.11) συμπεραίνουμε ότι στο πλαίσιο δεν έχει επέλθει ουσιώδης διαρροή καθώς αυτά που καθορίζουν την διαρροή του πλαισίου είναι η πλαστικοποίηση των μελών του εκτός του τοιχείου.

Λαμβάνοντας υπόψη τις πιο πάνω παρατηρήσεις, γίνεται αντιληπτό ότι η απαίτηση σε πλαστιμότητα που επιβάλλει ο κανονισμός για τις συμβατικές κατασκευές δεν θα πρέπει να είναι ίδια με τις κατασκευές που έχουν λικνιζόμενα μέλη.

#### **5.4 Αναλύσεις για καινούρια πλαίσια διστασιολογημένα με συντελεστή συμπεριφοράς $q=6$**

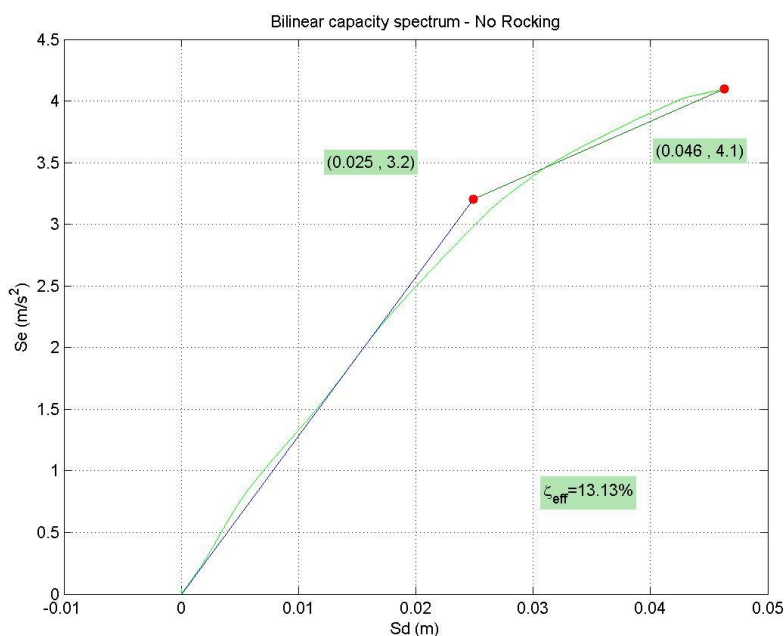
Πολλές εφαρμογές των προκατασκευασμένων λικνιζόμενων τοιχείων προβλέπεται ότι θα έχουν σε ενισχύσεις υποδιαστασιολογημένων κατασκευών. Στην παρούσα εργασία τέτοιες κατασκευές θεωρούνται αυτές που έχουν διαστασιολογηθεί με συντελεστή συμπεριφοράς 6.

Στο παρόν υποκεφάλαιο θα ελεγχθεί η συμπεριφορά υποδιαστασιοποιημένων πλαισίων πριν και μετά την ενίσχυση τους, ώστε να ληφθούν ασφαλή συμπεράσματα για θέματα όπως ο περιορισμός μετακινήσεων, οι πλαστικοποιήσεις των υπόλοιπων μελών και το κόστος των ζημιών.

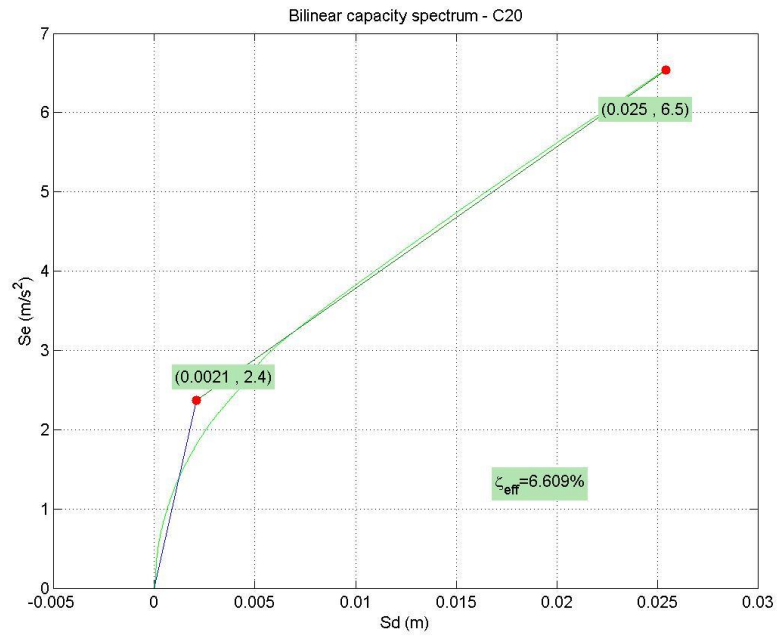
#### 5.4.1 Υπολογισμός στοχευόμενων μετατοπίσεων, ενεργού απόσβεσης και διγραμμικοποίησης της καμπύλης ικανότητας

Πραγματοποιήθηκαν ανελαστικές αναλύσεις Pushover του συγκεκριμένου πλαισίου όπως έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο 3. Εφαρμόζοντας την μέθοδο atc-40 του κεφαλαίου 4 και θεωρώντας ότι στο πλαίσιο ασκείται ο σεισμός σχεδιασμού με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ( $\alpha_g=0.24g$ , τύπος εδάφους Β) υπολογίζεται η μέγιστη μετακίνηση και επιτάχυνση που αναπτύσσεται στο πλαίσιο καθώς και η ενεργός απόσβεση του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος. Ακολουθεί, η διγραμμικοποίηση του φάσματος ικανότητας του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος μέχρι την μέγιστη μετατόπιση και επιτάχυνση θεωρώντας ότι ο πρώτος κλάδος πρέπει να τέμνει την καμπύλη του φάσματος στο  $0.6\alpha_g$ .

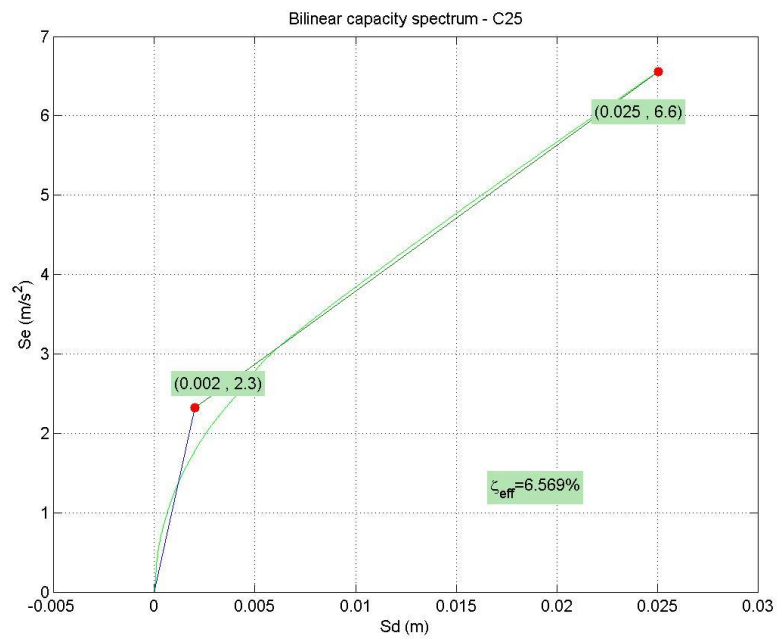
Τα φάσματα ικανότητας του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος και οι διγραμμικοποιήσεις τους φαίνονται πιο κάτω παραμετροποιημένες ως προς την ποιότητα σκυροδέματος του λικνιζόμενου τοιχείου.



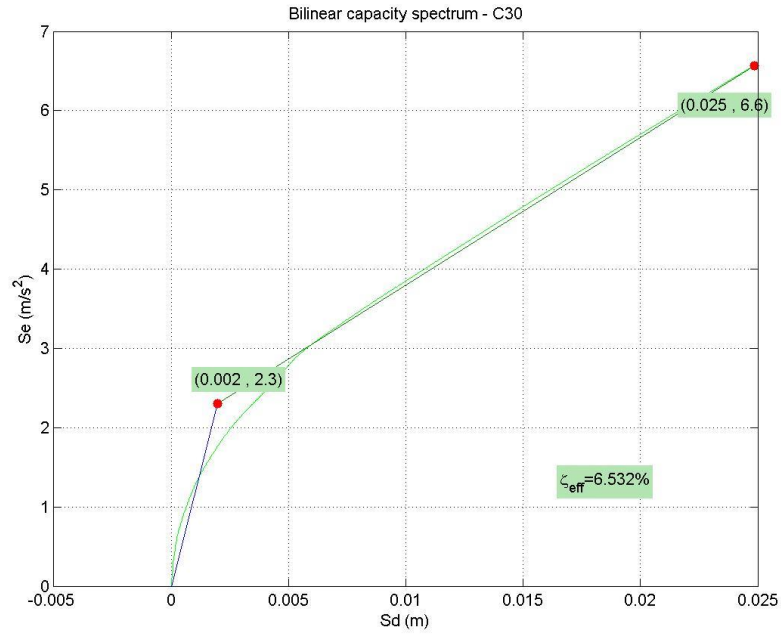
Διάγραμμα 5.12: Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας πλαισίου χωρίς λικνιζόμενο στοιχείο



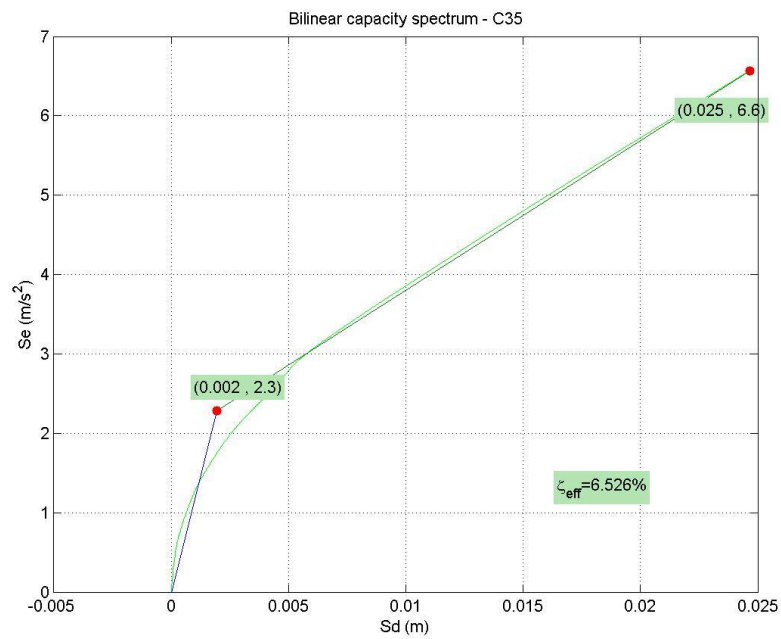
Διάγραμμα 5.13: Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας πλαισίου με λικνιζόμενο στοιχείο ποιότητας C20



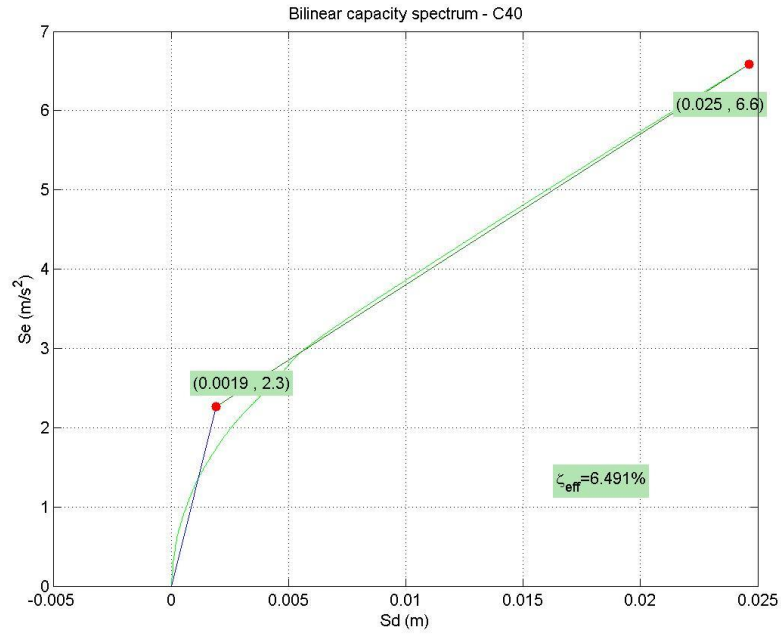
Διάγραμμα 5.14: Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας πλαισίου με λικνιζόμενο στοιχείο ποιότητας C25



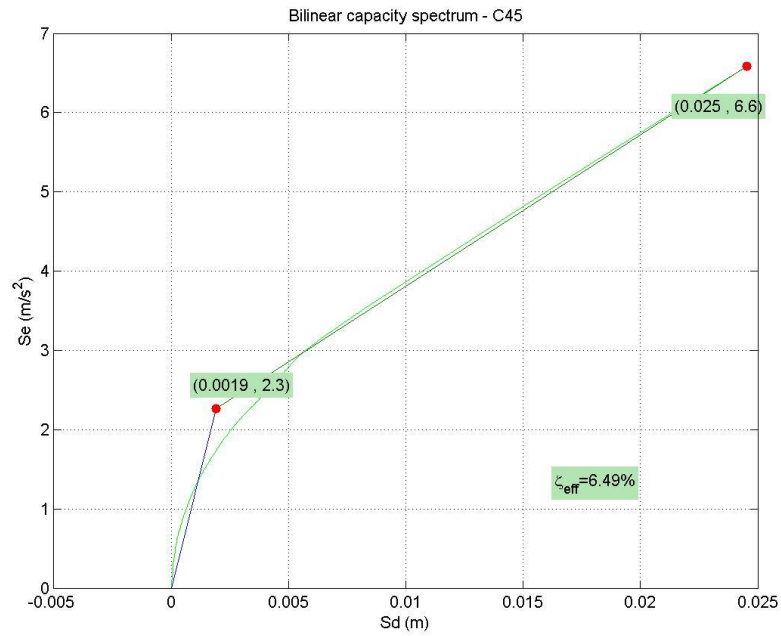
Διάγραμμα 5.15: Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας πλαισίου με λικνιζόμενο στοιχείο ποιότητας C30



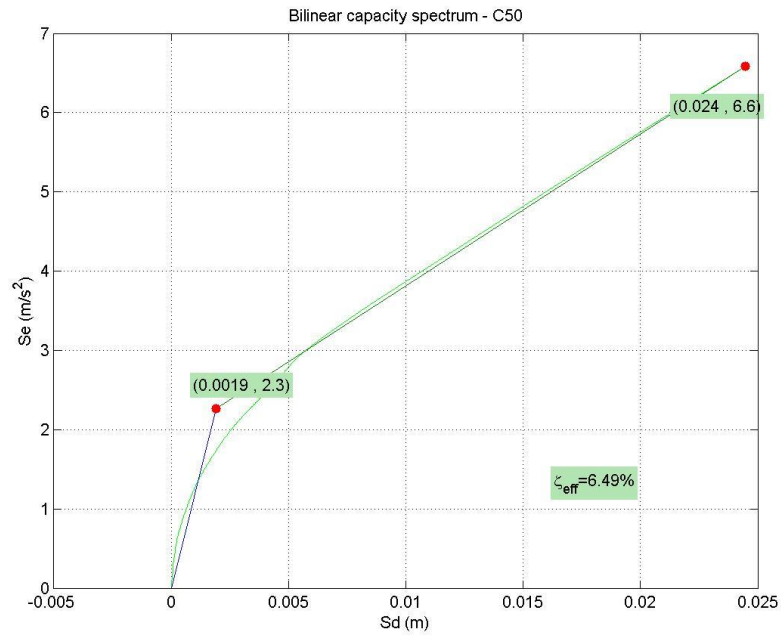
Διάγραμμα 5.16: Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας πλαισίου με λικνιζόμενο στοιχείο ποιότητας C35



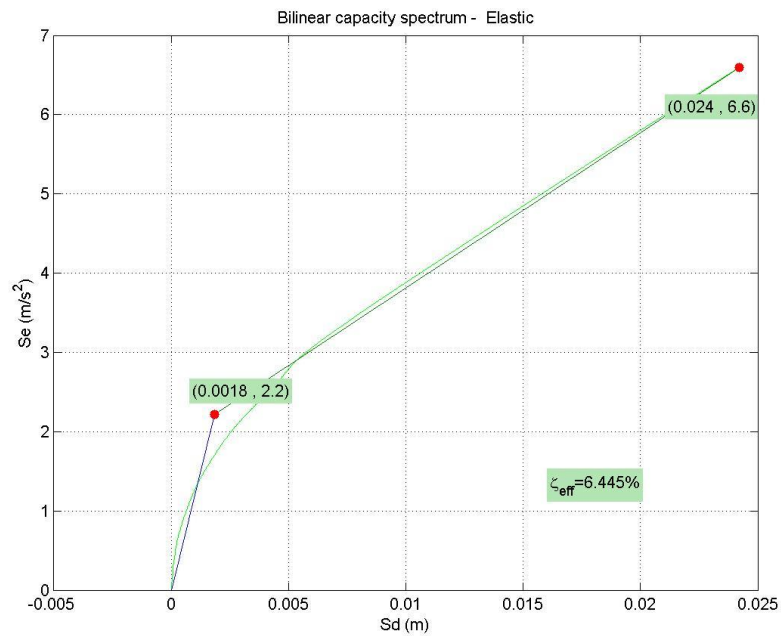
Διάγραμμα 5.17: Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας πλαισίου με λικνιζόμενο στοιχείο ποιότητας C40



Διάγραμμα 5.18: Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας πλαισίου με λικνιζόμενο στοιχείο ποιότητας C45

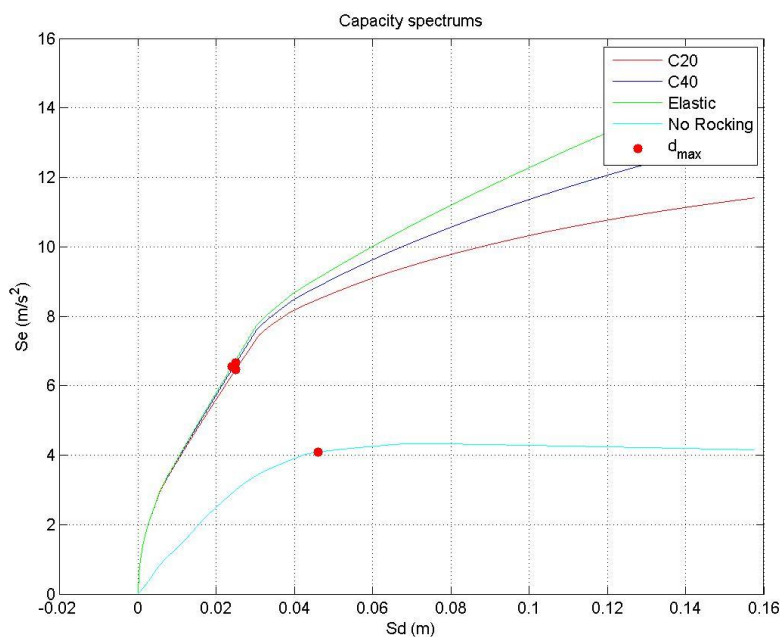


Διάγραμμα 5.19: Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας πλαισίου με λικνιζόμενο στοιχείο ποιότητας C50



Διάγραμμα 5.20: Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας πλαισίου με ελαστικό λικνιζόμενο στοιχείο

Στο πιο κάτω διάγραμμα δείχνονται ενδεικτικά για λόγους απλότητας, μερικές από τις πιο πάνω καμπύλες ικανότητας με τη μέγιστη μετατόπιση που προέκυψε για τον σεισμό σχεδιασμού.



Διάγραμμα 5.21: Καμπύλες ικανότητας πλαισίων με διαφορετική ποιότητα σκυροδέματος, με την μέγιστη μετατόπιση

Στον πιο κάτω πίνακα συνοψίζονται τα αποτελέσματα των πιο πάνω διαγραμμάτων:

Πίνακας 5.7: Μετακινήσεις κορυφής και ενεργός απόσβεση του ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή

Ποιότητα σκυροδέματος	Μέγιστη μετακίνηση κορυφής d (mm)	Μετακίνηση διαρροής στην κορυφή dy (mm)	$\zeta_{eff}$ (%)
Χωρίς τοιχείο	46	25.0	13.13
C20	25	2.1	6.61
C25	25	2.0	6.57
C30	25	2.0	6.53
C35	25	2.0	6.53
C40	25	1.9	6.49
C45	25	1.9	6.49
C50	24	1.9	6.49
Ελαστικό	24	1.8	6.44

Όπως στο πλαίσιο που διαστασιολογήθηκε με  $q=3$ , έτσι και στο πλαίσιο που λήφθηκε  $q=6$  η τοποθέτηση του λικνιζόμενου τοιχείου μειώνει πολύ τη μέγιστη μετατόπιση κορυφής. Η μείωση φτάνει το 45% την μετακίνησης κορυφής πλαισίου χωρίς ενίσχυση, λίγο μικρότερη



από την μείωση που παρατηρήθηκε στο καινούριο πλαίσιο που ήταν 55%. Σημαντική παρατήρηση είναι ότι παρόλο που τα δύο πλαίσια έχουν διαφορετικά υποστυλώματα, οι μετακινήσεις των δύο ενισχυμένων πλαισίων είναι παρόμοιες. Αυτό είναι ένα συμπέρασμα που ίσως να οφείλεται στο γεγονός ότι το λικνιζόμενο τοίχιο καθορίζει την συμπεριφορά του πλαισίου στο σεισμό σχεδιασμού και όχι τα μέλη του. Το τελευταίο ισχύει επειδή κατά πάσα πιθανότητα τα μέλη δεν πλαστικοποιούνται ή τουλάχιστο δεν αναπτύσσουν μεγάλες τοπικές πλαστιμότητες. Η πιο πάνω παρατήρηση θα ελεγχθεί ολοκληρωμένα στην συνέχεια. Να σημειωθεί ότι οι πιο πάνω μετακινήσεις αντιστοιχούν στο ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα που όμως στο μονώροφο πλαίσιο ταυτίζονται και με τις πραγματικές.

Μειώνεται επίσης η ενεργός απόσβεση του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος επειδή το τοίχιο δεν προσφέρει υστερητική απόσβεση για τους λόγους που εξηγήθηκαν λεπτομερώς πιο πάνω. Αυτό όμως που διαφέρει από τα αποτελέσματα των αναλύσεων του πλαισίου που διαστασιολογήθηκε με  $q=3$  είναι ότι στο πλαίσιο που διαστασιολογήθηκε με  $q=6$  αναπτύσσεται μεγαλύτερη ενεργός απόσβεση. Η διαφορά στην απόσβεση των 2 μη ενισχυμένων πλαισίων είναι αρκετά σημαντική, σημάδι ότι στο υποδιαστασιολογημένο πλαίσιο αναπτύσσεται μεγαλύτερη πλαστιμότητα (μερική ή πλήρη διαρροή των ινών της διατομής) στα υποστυλώματα από ότι στο πλαίσιο της παραγράφου 5.3. Η διαφορά της αποσβέσεως των μη ενισχυμένων πλαισίων οφείλεται στους μεγαλύτερους βρόγχους υστέρησης που θα αναπτύξει το υποδιαστασιολογημένο πλαίσιο σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση λόγω του ότι έχει εξαρχής μεγαλύτερη γενική πλαστιμότητα. Βεβαίως οι βρόχοι υστέρησης σχετίζονται και με την τοπική πλαστιμότητα των υποστυλωμάτων, αφού είναι προφανές ότι μεγαλύτερη γενική πλαστιμότητα παραπέμπει και σε μεγαλύτερες τοπικές. Στα ενισχυμένα πλαίσια η διαφορά της απόσβεσης του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος είναι πολύ μικρή. Αυτό αποτελεί ένδειξη μικρής ή καθόλου πλαστικοποίησης των υποστυλωμάτων αφού ούτε στο πλαίσιο της προηγούμενης παραγράφου παρατηρήθηκε οποιαδήποτε διαρροή μέλους. Τα πιο πάνω αποτελούν αντικείμενο προς διερεύνηση του παρόντος κεφαλαίου.

Η μεγάλη πτώση της τιμής της μετακίνησης της διαρροής ομοίως με το πλαίσιο που διαστασιολογήθηκε με  $q=3$  οφείλεται στην μεγάλη δυσκαμψία του πλαισίου στην αρχή της αποκρίσεως του λόγω της ύπαρξης του λικνιζόμενου τοιχείου (για πιο λεπτομερή περιγραφή βλέπε υποκεφάλαιο 5.4).

Τέλος, όπως και στις υπόλοιπες αναλύσεις η ποιότητα του σκυροδέματος δεν επηρεάζει καθόλου τη μέγιστη μετακίνηση, την μετακίνηση διαρροής ή την ενεργό απόσβεση του ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή.

#### **5.4.2 Αντιδράσεις, καμπυλότητα και παραμόρφωση στη βάση του λικνιζόμενου τοιχείου λόγω σεισμού σχεδιασμού**

Αφού το τοίχιο παίζει καθοριστικό ρόλο στην απόκριση και την συμπεριφορά του πλαισίου, είναι επιτακτικό να μελετηθεί το ίδιο ως προς τα εντατικά μεγέθη, τις καμπυλότητες και τις παραμορφώσεις. Επιλέγεται να ελεγχθεί μόνο η βάση του τοιχείου

πάνω στην οποία λικνίζεται ως το δυσμενέστερο σημείο του, αφού εκεί συγκεντρώνονται όλα τα εντατικά μεγέθη σε ένα μικρό μήκος και αναπτύσσονται οι μεγαλύτερες παραμορφώσεις όπως αποδείχθηκε στο υποκεφάλαιο 3.3.2.

Για την συμπεριφορά του λικνιζόμενου τοιχείου, τις παραδοχές, την κατανομή των τάσεων και την απόδειξη των εξισώσεων υπολογισμού των καμπυλοτήτων και των παραμορφώσεων ανατρέξτε στο κεφάλαιο 3.3.2.

Στον πιο κάτω πίνακα παρουσιάζονται τα εντατικά μεγέθη, η καμπυλότητα και η παραμόρφωση στη βάση του λικνιζόμενου στοιχείου.

Πίνακας 5.8: Παραμορφώσεις και καμπυλότητες στη βάση του τοιχείου

Ποιότητα σκυροδέματος	Αξονική δύναμη N (KN)	Τέμνουσα δύναμη Q (KN)	Ροπή κάμψης M (KNm)	Καμπυλότητα 1/r (1/m)	Παραμόρφωση
C20	-293.18	89.76	194.48	0.4138	0.0307
C25	-293.42	90.87	196.78	0.5146	0.0306
C30	-293.57	91.6	198.32	0.8371	0.0415
C35	-293.16	91.97	199.07	1.2471	0.0528
C40	-293.31	92.38	199.94	1.7453	0.0632
C45	-292.85	92.53	200.23	2.2749	0.0748
C50	-292.57	92.67	200.52	1.5315	0.0456
Ελαστικό	-291.53	93.5	202.38	2.2923	0.0279

Γίνεται εμφανές από τον πιο πάνω πίνακα ότι το λικνιζόμενο τοίχιο αναλαμβάνει σημαντικά εντατικά μεγέθη. Αν αναλογιστούμε ότι αυτά μεταφέρονται στο έδαφος μέσω της πολύ μικρής διεπιφάνειας του τοιχείου με την υποδομή, σημαίνει ότι θα αναπτυχθούν πολύ υψηλές τάσεις και παραμορφώσεις. Αυτές είναι δύο παράμετροι που ελέγχονται.

Παρομοίως με το κεφάλαιο 5.3.2 αναπτύσσονται μεγάλες παραμορφώσεις τάξης μεγέθους 50‰. Προφανώς αυτές οι παραμορφώσεις δεν θα μπορέσουν να αναπτυχθούν λόγω του νόμου του ανελαστικού υλικού. Αυτά ισχύουν ακριβώς όπως είδαμε και στο πλαίσιο την ενότητας 5.3, όμως αυτό που διαφέρει με το υποδιαστασιοποιημένο πλαίσιο είναι η μεταβλητότητα της παραμόρφωσης της ακραίας ίνας της βάσης ως προς την ποιότητα σκυροδέματος του λικνιζόμενου τοιχείου. Το πιο δύσκαμπτο πλαίσιο του κεφαλαίου 5.3 παρουσιάζει μείωση των παραμορφώσεων με την βελτίωση της ποιότητας του σκυροδέματος, ενώ το πιο εύκαμπτο παρουσιάζει το αντίθετο. Η παραμόρφωση όμως όπως είπαμε είναι πλασματική, έτσι δεν μπορεί να ληφθεί κρίσιμο συμπέρασμα.

Η δεύτερη παράμετρος που ελέγχεται είναι η κατανομή των τάσεων στην βάση. Όπως φαίνεται στον πίνακα 5.9, δεν υπάρχει καμία ποιοτική διαφορά μεταξύ των δύο πλαισίων με διαφορετικά υποστρώματα. Το 95%-98% της βάσης αποκολλάται από το έδαφος και δεν δέχεται κανένα εντατικό μέγεθος. Το υπόλοιπο 2%-5% παραμορφώνεται και δέχεται όλα τα εντατικά μεγέθη. Αυτό το μήκος σχεδόν όλο πλαστικοποιείται (96%-98%) και ελάχιστο

ποσοστό της θλιβόμενης περιοχής παραμένει ελαστικό (2%-4%). Αυτός είναι και ο λόγος της δημιουργίας πολύ μεγάλων καμπυλοτήτων στο σημείο αυτό, όπως φαίνονται από τον πίνακα 5.8.

Όσο αφορά την ποιότητα του σκυροδέματος του λικνιζόμενου τοιχείου, αυτή δεν φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά τα εντατικά μεγέθη και τις παραμορφώσεις. Επηρεάζει όμως τα ποσοστά που παρουσιάζονται στον πίνακα 5.9. Ισχύει η ίδια αναλογία με πλαίσιο της ενότητας 5.3. Δηλαδή όσο βελτιώνεται η ποιότητα σκυροδέματος του λικνιζόμενου τοιχείου αυξάνει το ποσοστό της βάσης που ανασηκώνεται, άρα μειώνεται το μήκος της βάσης που θλίβεται και παραμορφώνεται όπως επίσης και το ποσοστό της βάσης που πλαστικοποιείται. Επιπλέον, πλαστικοποιείται μικρότερο μέρος της θλιβόμενης περιοχής όσο μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή έχει το σκυρόδεμα. Δηλαδή όσο η ποιότητα του σκυροδέματος του λικνιζόμενου τοιχείου βελτιώνεται, τόσο περιορίζονται οι ζημιές σε μικρότερη επιφάνεια της βάσης. Για επεξήγηση αυτής της αναλογίας βλέπε το κεφάλαιο 5.3.2.

Η μεταβλητότητα της καμπυλότητας σε σχέση με την ποιότητα σκυροδέματος του λικνιζόμενου τοιχείου επεξηγείται στο κεφάλαιο 5.3.2, αλλά δεν αποτελεί κρίσιμο μέγεθος ούτε στη διαστασιολόγηση του τοιχείου.

Όσο αφορά τη σύγκριση των δύο πλαισίων, η ανάπτυξη μεγαλύτερων μετακινήσεων κορυφής στο υποδιαστασιολογημένο πλαίσιο οδηγεί σύμφωνα με το διάγραμμα 3.9 σε μεγαλύτερο μήκος της θλιβόμενης - παραμορφώσιμης περιοχής της βάσης και της κορυφής του τοιχείου, άρα και σε μεγαλύτερο μήκος της πλαστικοποιημένης ζώνης. Δηλαδή η υποδιαστασιολόγηση των υποστυλωμάτων αυξάνουν την έκταση των ζημιών στην κατασκευή.

Τέλος, συγκρίνοντας τους πίνακες 5.2 και 5.8 που αναφέρονται σε πλαίσια που είναι διαστασιολογημένα με συντελεστή συμπεριφοράς  $q=3$  και  $q=6$  αντίστοιχα, παρατηρείται ότι στο πρώτο πλαίσιο (με  $q=3$ ) το λικνιζόμενο τοίχιο αναλαμβάνει μικρότερα εντατικά μεγέθη. Αν αναλογιστούμε ότι και στα δύο πλαίσια ασκείται η ίδια σεισμική επιτάχυνση (βλέπε πίνακες 5.1 και 5.7) άρα και ίδια σεισμική δύναμη, η πιο πάνω παρατήρηση μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα υποστυλώματα του υποδιαστασιολογημένου πλαισίου φτάνουν σε διαρροή ή κοντά σε αυτή, και έτσι τα επιπλέον μεγέθη αναλαμβάνονται από το τοίχιο.

Πίνακας 5.9: Περιγραφή τάσεων στη βάση του τοιχείου

Ποιότητα σκυροδέματος	Ποσοστό της βάσης που ανασκώνεται (%)	Ποσοστό της βάσης που θλίβεται (%)	Ποσοστό της βάσης που πλαστικοποιείται (%)	Ποσοστό της βάσης που παραμένει ελαστικό (%)	Ποσοστό της θλιβόμενης περιοχής που πλαστικοποιείται (%)
C20	94.71	5.29	5.18	0.12	97.83
C25	95.75	4.25	4.13	0.12	97.28
C30	96.46	3.54	3.45	0.09	97.59
C35	96.98	3.02	2.96	0.07	97.79
C40	97.38	2.62	2.62	0.06	97.84
C45	97.65	2.35	2.30	0.05	97.99
C50	97.87	2.13	2.05	0.08	96.35

#### 5.4.3 Διερεύνηση επιρροής λικνιζόμενου τοιχείου στα υποστυλώματα, τη δοκό και στις πλαστιμότητες

Στο παρόν υποκεφάλαιο θα μελετηθεί η επιρροή του λικνιζόμενου τοιχείου στα υποστυλώματα του πλαισίου που διαστασιολογήθηκε με συντελεστή συμπεριφοράς  $\alpha=6$ . Τα συμπεράσματα εξάγονται μελετώντας της μεταβολή των εντατικών μεγεθών και την τοπική πλαστιμότητα των υποστυλωμάτων σε περίπτωση που συμβεί ο σεισμός σχεδιασμού. Τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στην δοκό θα διερευνηθούν επίσης.

Θα μελετηθεί επίσης η επιρροή της γενικής συμπεριφοράς του πλαισίου μέσα από τον υπολογισμό της γενικής πλαστιμότητας, για την οποία θέτει συγκεκριμένα όρια ο κανονισμός.

Τέλος, θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με τα αντίστοιχα του κεφαλαίου 4.3.3 που αναφέρονται σε καινούρια κατασκευή.

##### 5.4.3.1 Υπολογισμός εντατικών μεγεθών στα υποστυλώματα του πλαισίου

Ο τρόπος υπολογισμού των εντατικών μεγεθών των υποστυλωμάτων του πλαισίου που κατασκευάστηκε με βάση τους παλαιούς κανονισμούς είναι ο ίδιος με του καινούριου πλαισίου όπως περιγράφηκε λεπτομερώς στο κεφάλαιο 5.4.3.1.

Στον πιο κάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές των εντατικών μεγεθών του κάθε υποστυλώματος:

Πίνακας 5.10: Εντατικά μεγέθη υποστυλωμάτων στο σεισμό σχεδιασμού

Ποιότητα σκυροδέματος	Υποστώλιμα 1				Υποστώλιμα 2			
	N (KN)	Q (KN)	M <sub>βάσης</sub> (KMm)	M <sub>κορυφής</sub> (KMm)	N (KN)	Q (KN)	M <sub>βάσης</sub> (KMm)	M <sub>κορυφής</sub> (KMm)
Χωρίς τοιχείο	-72.86	41.58	-106.91	80.19	-152.89	53.22	119.6	-119.88
C20	86.75	27.69	-61.25	63.37	-50.66	30.45	72.29	-64.72
C25	87.01	27.3	-60.31	62.54	-50.74	30.05	71.34	-63.87
C30	87.23	27.09	-59.81	62.11	-50.84	29.84	70.86	-63.44
C35	87.02	26.9	-59.37	61.68	-51.08	29.69	70.47	-63.13
C40	87.24	26.85	-59.25	61.59	-51.16	29.65	70.37	-63.04
C45	87	26.75	-59.03	61.36	-51.39	29.59	70.21	-62.94
C50	86.89	26.7	-58.92	61.24	-51.57	29.57	70.15	-62.9
Ελαστικό	86.51	26.4	-58.24	60.58	-52.23	29.38	69.65	-62.55

Η επιρροή του λικνιζόμενου τοιχείου στα υποστυλώματα του πλαισίου που διαστασιολογήθηκε με συντελεστή συμπεριφοράς  $q=6$  είναι ποιοτικά ίδια με του πλαισίου του κεφαλαίου 5.3.3.1 το οποίο διαστασιολογήθηκε με συντελεστή συμπεριφοράς  $q=3$ . Η διαφορά όμως μεταξύ των δύο αναλύσεων έχει να κάνει με τις τιμές των εντατικών μεγεθών.

Συγκρίνοντας αρχικά τα μη ενισχυμένα πλαίσια (μέσω των πινάκων 5.4 και 5.10) παρατηρείται ότι στο διαστασιολογημένο με  $q=3$  πλαίσιο αναπτύσσονται στα υποστυλώματα μεγαλύτερη ροπή και τέμνουσα δύναμη όμως μικρότερη αξονική.

Η καθολική δυσκαμψία του πλαισίου οφείλεται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό στο τοιχείο. Έτσι, η διαφορά της δυσκαμψίας των υποστυλωμάτων των δύο πλαισίων κρίνεται ασήμαντη ως προς τη συνολική δυσκαμψία και για αυτό τον λόγο οι σεισμικές επιταχύνσεις που αναπτύσσονται στα δύο πλαίσια είναι ίσες. Παρόλα αυτά, η διαφορά στην δυσκαμψία των μελών πρέπει να ληφθεί υπόψη για τον υπολογισμό των τοπικών μεγεθών. Τα υποστυλώματα του πλαισίου που διαστασιολογήθηκε με συντελεστή συμπεριφοράς  $q=3$  αναλαμβάνουν μεγαλύτερη τέμνουσα δύναμη και ροπή κάμψης στο σεισμό σχεδιασμού. Επίσης πρόσθετος πιθανός παράγοντας είναι ότι τα υποστυλώματα αυτού του πλαισίου έχουν μεγαλύτερη ροπή αντοχής από του υποδιαστασιολογημένου πλαισίου. Το τελευταίο αν ισχύει μας οδηγεί σε υποψία διαρροής (ή κοντά στην διαρροή) των υποστυλωμάτων του αρχικώς υποδιαστασιολογημένου ενισχυμένου πλαισίου και θα ελεγχθεί στην συνέχεια.

Τέλος, η διαφορά στις αξονικές δυνάμεις των υποστυλωμάτων των 2 πλαισίων, οφείλεται στη διαφορά των αναπτυσσομένων μετακινήσεων κορυφής. Στο πλαίσιο που για την διαστασιολόγηση του χρησιμοποιήθηκε μεγαλύτερος συντελεστής συμπεριφοράς αναπτύσσονται μεγαλύτερες μετακινήσεις, ικανές να αυξήσουν τον εφελκυσμό των υποστυλωμάτων.

### 5.4.3.2 Υπολογισμός εντατικών μεγεθών στη δοκό του πλαισίου

Όπως αναφέρθηκε είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των εντατικών μεγεθών που αναπτύσσονται στην δοκό όταν συμβεί ο σεισμός σχεδιασμού σε πλαίσιο ενισχυμένο με λικνιζόμενο τοίχειο επειδή θα καθορίσουν την διαστασιολόγηση σε καινούρια κατασκευή ή την ενίσχυση της δοκού σε υφιστάμενη κατασκευή.

Ακολουθεί πίνακας με όλες τις τιμές των εντατικών μεγεθών στη δοκό, η οποία χωρίζεται σε δοκό 3 που βρίσκεται αριστερά του τοιχείου και δοκό 5 που βρίσκεται δεξιά του τοιχείου όταν το οριζόντιο φορτίο έχει φορά προς τα δεξιά. Τα σημεία που αναφέρεται ο πίνακας φαίνονται στις εικόνες 2.2 και 2.3.

Πίνακας 5.11: Εντατικά μεγέθη δοκού που αναπτύσσονται στο σεισμό σχεδιασμού

Ποιότητα σκυροδέματος	Δοκός 3					Δοκός 5				
	N (KN)	Q <sub>3</sub> (KN)	Q <sub>5</sub> (KN)	M <sub>3</sub> (KMm)	M <sub>5</sub> (KMm)	N (KN)	Q <sub>7</sub> (KN)	Q <sub>4</sub> (KN)	M <sub>7</sub> (KMm)	M <sub>4</sub> (KMm)
Χωρίς τοίχειο	5.41	72.88	40	-80.19	121.3	5.41	-40.03	152.91	-121.3	-119.88
C20	45.65	-86.78	168.07	-63.37	-166	-43.68	30.6	50.69	46.64	-64.72
C25	46.2	-87.04	168.33	-62.54	-167.29	-44.21	30.52	50.77	45.65	-63.87
C30	46.56	-87.26	168.54	-62.11	-168.12	-44.57	30.42	50.87	45.03	-63.44
C35	46.76	-87.05	168.34	-61.68	-168.17	-44.72	30.18	51.11	44.3	-63.13
C40	46.96	-87.27	168.56	-61.59	-168.65	-44.92	30.09	51.19	44.05	-63.04
C45	47.05	-87.03	168.32	-61.36	-168.46	-44.97	29.87	51.42	43.54	-62.94
C50	47.14	-86.92	168.21	-61.24	-168.37	-45.02	29.69	51.6	43.19	-62.9
Ελαστικό	47.6	-86.54	167.82	-60.58	-168.35	-45.37	29.02	52.26	41.63	-62.55

Η ποιοτική αλλαγή των εντατικών μεγεθών της δοκού του υποδιαστασιολογημένου πλαισίου λόγω της ενίσχυσης του με λικνιζόμενο τοίχειο είναι ακριβώς η ίδια με του κεφαλαίου 5.3.3.2 στο οποίο υπάρχουν και όλες οι επεξηγήσεις.

Οι διαφορές στις τιμές των εντατικών μεγεθών της δοκού του αρχικώς διαστασιολογημένου με  $q=3$  πλαισίου με τα αντίστοιχα μεγέθη της δοκού του υποδιαστασιολογημένου πλαισίου ( $q=6$ ) είναι μικρές εκτός από την μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή στην δοκό στο σημείο ανασήκωσης του τοιχείου (κόμβος 5). Η διαφορά της ροπής εκεί είναι σημαντική και θα αλλάξει την διαστασιολόγηση ή την ενίσχυση της δοκού. Η ροπή στο συγκεκριμένο σημείο για το υποδιαστασιολογημένο πλαίσιο είναι μεγαλύτερη από του πλαισίου του υποκεφαλαίου 5.3 αφού στο πρώτο πλαίσιο το τοίχειο αναλαμβάνει μεγαλύτερα εντατικά μεγέθη.

Η μικρή διαφορά της τέμνουσας και της αξονικής στους ακραίους κόμβους της δοκού (κόμβοι 3 και 4) των δύο πλαισίων, οφείλεται στα αίτια της διαφοράς αξονικής και τέμνουσας αντίστοιχα των υποστυλωμάτων (ισορροπία κόμβου) όπως περιγράφονται στο κεφάλαιο 5.4.3.1. Η αξονική όμως είναι ιδεατή και αναφέρεται σε πλαίσιο χωρίς πλάκα.

Στην πραγματικότητα η δοκός λειτουργεί με μηδενική αξονική αφού αυτή διαχέεται μέσα στην πλάκα.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η διαστασιολόγηση ή ενίσχυση της δοκού καθορίζεται από τα εντατικά μεγέθη και κυρίως την ροπή που αναλαμβάνει το τοιχείο. Η ένταση του τοιχείου όμως εξαρτάται από την διαστασιολόγηση των υποστυλωμάτων και έτσι καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η διαστασιολόγηση ή ενίσχυση της δοκού επηρεάζεται από την αρχική δυσκαμψία των υποστυλωμάτων. Βέβαια αυτά ισχύουν με την προϋπόθεση δεν θα συμβεί πλαστική άρθρωση στο μέσο της δοκού.

#### **5.4.3.3 Υπολογισμός γενικής πλαστιμότητας πλαισίου και τοπικής πλαστιμότητας υποστυλωμάτων**

Ο κανονισμός καθορίζει τα όρια της γενικής πλαστιμότητας που όμως δεν είναι αρκετά για να εξασφαλιστεί η ορθή λειτουργία των μελών μιας κατασκευής. Είναι απαραίτητο, να ελεγχθούν οι τοπικές πλαστιμότητες των μελών και συγκεκριμένα όλων των υποστυλωμάτων για να αποφευχθούν οι μεγάλες ζημιές στα μέλη αυτά.

Η γενική πλαστιμότητα εκφράζεται σε όρους μετακινήσεων και η τοπική πλαστιμότητα σε όρους καμπυλοτήτων. Οι σχέσεις για τον υπολογισμό των πιο πάνω αναφέρονται στο κεφάλαιο 5.3.3.3.

Ακολουθεί ο πίνακας με όλες τις γενικές και τοπικές πλαστιμότητες που αναπτύσσονται όταν συμβεί ο σεισμός σχεδιασμού στο πλαίσιο που αρχικώς διαστασιολογήθηκε με  $q=6$ .

Πίνακας 5.12: Γενική και τοπική των υποστυλωμάτων πλαστιμότητα

Ποιότητα σκυροδέματος	Γενική πλαστιμότητα	Πλαστιμότητα υποστυλώματος 1	Πλαστιμότητα υποστυλώματος 2
Χωρίς τοιχείο	1.86	2.46	5.61
C20	12.1	Δεν διαρρέει	Δεν διαρρέει
C25	12.37	Δεν διαρρέει	Δεν διαρρέει
C30	12.5	Δεν διαρρέει	Δεν διαρρέει
C35	12.65	Δεν διαρρέει	Δεν διαρρέει
C40	12.87	Δεν διαρρέει	Δεν διαρρέει
C45	12.83	Δεν διαρρέει	Δεν διαρρέει
C50	12.8	Δεν διαρρέει	Δεν διαρρέει
Ελαστικό	13.18	Δεν διαρρέει	Δεν διαρρέει

Από τον πίνακα 5.12 παρατηρείται ότι το υφιστάμενο πλαίσιο που σχεδιάστηκε με μειωμένο συντελεστή συμπεριφοράς, όταν ενισχυθεί η πλαστιμότητα του αυξάνει. Ο λόγος αύξησης της πλαστιμότητας περιγράφηκε λεπτομερώς στο κεφάλαιο 5.3.3.3.

Συγκρίνοντας τις δύο διαφορετικές αναλύσεις που αναφέρονται στα δύο αυτά πλαίσια που έχουν διαφορετική δυσκαμψία υποστυλωμάτων, παρατηρείται ότι καταλήγουν και τα δύο μετά την ενίσχυση σε περίπου ίση γενική πλαστιμότητα, με ελαφρώς μεγαλύτερη την πλαστιμότητα του πλαισίου που διαστασιολογήθηκε με μεγαλύτερο συντελεστή συμπεριφοράς. Αυτό ενισχύει τη διατυπωθείσα πρόβλεψη του υποκεφαλαίου 5.4.1 ότι η γενική συμπεριφορά του πλαισίου στο σεισμό σχεδιασμού καθορίζεται από το τοιχείο και όχι τόσο από τα μέλη. Δηλαδή η συνολική δυσκαμψία του πλαισίου οφείλεται κατά μεγάλο ποσοστό από το τοιχείο και έτσι η μικρή διαφορά δυσκαμψίας των υποστυλωμάτων δεν επηρεάζει. Αν όμως η διαφορά των υποστυλωμάτων των δύο πλαισίων είναι μεγάλη, τότε θα επηρεαζόταν σημαντικά και η γενική πλαστιμότητα αφού θα διέρρεαν με μεγάλη διαφορά. Φυσικά αυτό το σενάριο δεν ανταποκρίνεται σε μονώροφα πλαίσια, αφού όπως είδαμε η διαφορά στη διαστασιολόγηση ακόμη και μεταξύ των υποστυλωμάτων που σχεδιάστηκαν για το μικρότερο που θέτει ο κανονισμός και για πολύ μεγάλο συντελεστή συμπεριφοράς δεν είναι τόσο σημαντική. Σημαντική θα ήταν σε κατασκευές όπου οι σεισμικές ροπές είναι μεγάλες σε σχέση με τις στατικές ή σε εύκαμπτες κατασκευές (π.χ. πολυώροφες) που τα σεισμικά φορτία επηρεάζονται πολύ από την δυσκαμψία των υποστυλωμάτων.

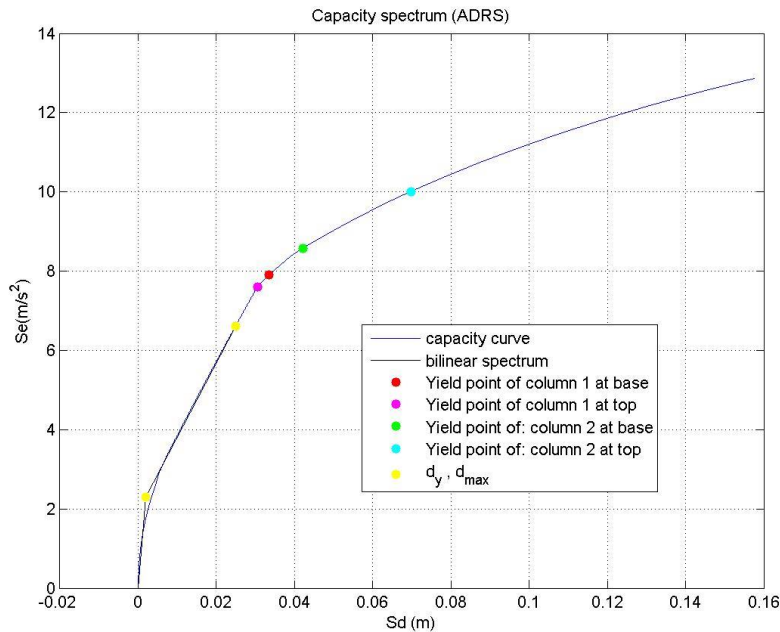
Η μικρή διαφορά των δυσκαμψιών των υποστυλωμάτων των δύο πλαισίων έχει όμως επιπτώσεις στα ίδια τα υποστυλώματα. Παρόλο που όπως φαίνεται από τον πιο πάνω πίνακα τα υποστυλώματα δεν φτάνουν σε διαρροή στον σεισμό σχεδιασμού, εντούτοις φτάνουν πιο κοντά σε αυτή, δηλαδή αναπτύσσουν μεγαλύτερη πλαστικοποίηση των ινών τους (βλέπε διαγράμματα 5.11 και 5.20) . Η πλαστικοποίηση αυτή όμως είναι πολύ μικρή και για αυτό τον λόγο δεν επηρεάζει την γενική πλαστιμότητα τόσο πολύ.

Οι δύο πιο πάνω παράγραφοι επαληθεύουν τον ισχυρισμό ότι η τελική συμπεριφορά του πλαισίου καθορίζεται από το τοιχείο και όχι από τα μέλη. Ο παράγοντας που τελικώς επηρεάζει τη συμπεριφορά του ενισχυμένου συγκεκριμένων διαστάσεων πλαισίου είναι το πλάτος του λικνιζόμενου που θα δούμε και σε επόμενο κεφάλαιο, και όχι η ποιότητα του σκυροδέματος του, όπως φαίνεται από τον πίνακα 5.12.

Άλλη παρατήρηση από τον πίνακα 5.12 είναι ότι το τοιχείο βελτιώνει πάρα πολύ την συμπεριφορά του υποστυλώματος 2 και περιορίζει κατά πολύ τις ζημιές που θα δημιουργηθούν σε αυτό. Μάλιστα ενώ το υποστυλώμα 1 στο μη ενισχυμένο πλαίσιο αναπτύσσει υπό τον σεισμό σχεδιασμού πολύ πιο μικρή τοπική πλαστιμότητα, εντούτοις μετά την ενίσχυση το ίδιο υποστυλώμα βρίσκεται πολύ πιο κοντά στην πλαστικοποίηση από ότι το υποστυλώμα 2 (βλέπε διάγραμμα 5.20). Αυτό οφείλεται στο αναφερθείσα γεγονός ότι το τοιχείο προκαλεί ομαλότερη κατανομή των ροπών στα υποστυλώματα καθώς επίσης αυξάνει πολύ πιο γρήγορα τον εφελκυσμό στο υποστυλώμα 1 και έτσι η πλαστικοποίηση έρχεται πολύ πιο γρήγορα (βλέπε διαγράμματα 3.4 και 3.5).

Στο πιο κάτω διάγραμμα φαίνεται το φάσμα επιταχύνσεων μορφής ADRS, η σειρά πλαστικοποίησης των μελών και η διάταξη τους σε σχέση με την μέγιστη μετατόπιση.





Διάγραμμα 5.20: Φάσμα ικανότητας και διγραμμικοποίηση του

#### 5.4.4 Συμπεράσματα ως προς την ενίσχυση πλαισίου με αρχική πλαστιμότητα ίση με 6

Η ενίσχυση ενός υφιστάμενου πλαισίου που σχεδιάστηκε με συντελεστή συμπεριφοράς  $q=6$  έχει την ίδια ποιοτική επίδραση με ένα πλαίσιο που σχεδιάστηκε με  $q=3$  σε όλα τα χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς του πλαισίου όπως μετακινήσεις, εντατικά μεγέθη και παραμορφώσεις.

Το λικνιζόμενο τοίχιο κάνει πολύ πιο δύσκαμπτο το πλαίσιο έτσι στο σεισμό σχεδιασμού, η ενισχυμένη κατασκευή αναλαμβάνει μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις και έχει μικρότερη μέγιστη μετακίνηση σε σχέση με το μη ενισχυμένο πλαίσιο. Επίσης, το τοίχιο βελτιώνει την συμπεριφορά των υποστυλωμάτων και ειδικότερα του υποστυλώματος 2 (δεξιό υποσύλωμα αν η οριζόντια δύναμη έχει φορά δεξιά) αφού μειώνει πάρα πολύ την τοπική του πλαστιμότητα. Σημαντικό ότι κανένα από τα δύο υποστυλώματα δεν διαρρέει και επίσης οι ροπές που αναλαμβάνονται από αυτά είναι περίπου ίσες. Αυτό φανερώνει ένα πλεονέκτημα του τοιχείου ότι αναγκάζει και τα δύο υποστυλώματα να συνεισφέρουν το ίδιο, πράγμα που δεν συνέβαινε στο μη ενισχυμένο πλαίσιο όπου στο υποσύλωμα 2 αναπτύσσεται πολύ μεγάλη τοπική πλαστιμότητα άρα και μεγάλες ζημιές. Επιπρόσθετο πλεονέκτημα της ενίσχυσης είναι ότι οι ζημιές στα υποστυλώματα έχουν εξαλειφθεί.

Η γενική πλαστιμότητα αυξάνει με την τοποθέτηση του τοιχείου επειδή οφείλεται αποκλειστικά στην πλαστιμότητα του τελευταίου. Το τοίχιο είναι πολύ δύσκαμπτο στην αρχή και έχει έντονα μη γραμμική απόκριση, "διαρρέει" μέσω του λικνισμού σε πολύ μικρή μετατόπιση και για αυτό τον λόγο αυξάνεται η πλαστιμότητα. Αναλυτικότερη εξήγηση αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 5.3.4. Να σημειωθεί όμως ότι η γενική πλαστιμότητα σε

κατασκευές με λικνιζόμενα μέλη δεν έχει την ίδια σημασία με την αντίστοιχη σε συμβατικές κατασκευές καθώς δεν εκφράζει σε καμία περίπτωση πιθανή διαρροή των μελών αλλά εκφράζει στην ουσία μόνο την πλαστιμότητα του τοιχείου κατά τον λικνισμό (βλέπε διάγραμμα 5.20)

Η ενίσχυση του πλαισίου με λικνιζόμενο τοίχιο μειώνει την ενεργό απόσβεση του ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή επειδή θεωρήθηκε ότι τοίχιο δεν προσφέρει υστερητική απόσβεση. Η παραδοχή ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στην πραγματικότητα επειδή οι βρόχοι υστέρησης που αναπτύσσει σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση έχουν μικρό εμβαδόν.

Τέλος, η ποιότητα του σκυροδέματος του λικνιζόμενου τοιχείου δεν επηρεάζει καθόλου την συμπεριφορά ή τα εντατικά μεγέθη. Επηρεάζει όμως το μήκος της θλιβόμενης - παραμορφωμένης διεπιφάνειας και το μήκος πλαστικοποίησης της βάσης του τοιχείου (και αντίστοιχα της κορυφής του). Η καλύτερη ποιότητα σκυροδέματος οδηγεί σε μικρότερο μήκος πλαστικοποίησης της βάσης και άρα είναι πιο περιορισμένες ζημιές. Επίσης, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος του λικνιζόμενου τοιχείου μπορεί να επηρεάζει ελάχιστα την ακραία παραμόρφωση, όμως δεδομένο ότι αυτή δεν θα αναπτυχθεί λόγω του νόμου του ανελαστικού υλικού, θεωρείται ότι δεν σημαντική επιρροή. Να σημειωθεί επίσης ότι σε όλες τις αναλύσεις λαμβάνεται σταθερό μέτρο ελαστικότητας στο τοίχιο. Αν λαμβανόταν το αντίστοιχο που δίνει ο κανονισμός ανά ποιότητα σκυροδέματος, θα προέκυπτε προφανώς και μικρότερες ζημιές στη βάση του τοιχείου για καλύτερης ποιότητας σκυροδέματος

#### **5.4.5 Συμπεράσματα ως προς την σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων που έγιναν για πλαίσια που διαστασιολογήθηκαν με συντελεστή συμπεριφοράς 3 και 6.**

Πρώτη παρατήρηση συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του καινούριου και του παλαιού πλαισίου είναι όπως έχει αναφερθεί, η ίδια ποιοτική αλλαγή στη συμπεριφορά τους μετά την ενίσχυση τους. Συγκρίνοντας όμως αριθμητικές τιμές, καταλήγουμε σε διάφορα σημαντικά συμπεράσματα που παρουσιάζονται πιο κάτω.

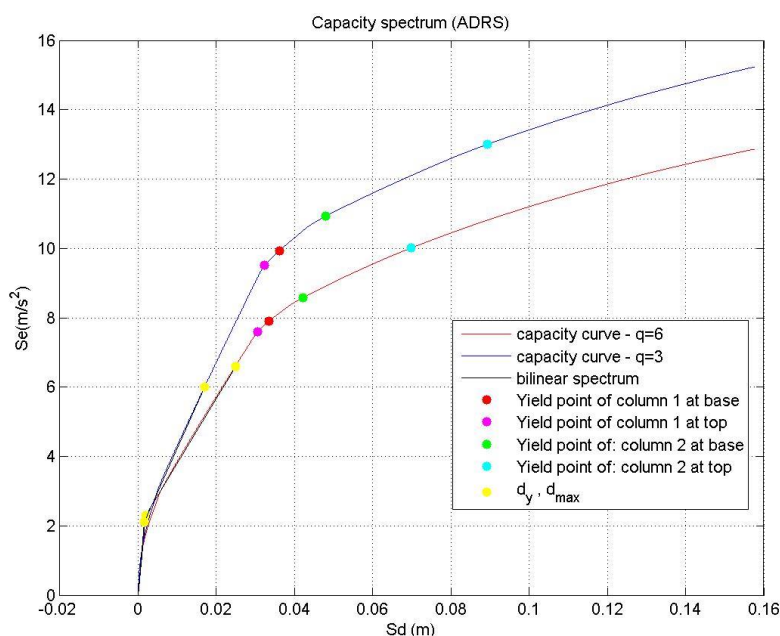
Η διαστασιολόγηση των δύο πλαισίων έγινε λαμβάνοντας τον ελάχιστο του κανονισμού και ένα πολύ μεγάλο συντελεστή συμπεριφοράς (6 και 3 αντίστοιχα). Παρόλα αυτά, η διαστάσεις που προέκυψαν δεν είναι πολύ διαφορετικές, αφού καθοριστικό ρόλο στην διαστασιολόγηση διαδραμάτισε το στατικό φορτίο και όχι το σεισμικό. Αυτό επειδή οι σεισμικές ροπές για τον σεισμό σχεδιασμού με  $\alpha_g=0.16g$  (ζώνη σεισμικότητας Z1) είναι πολύ μικρές σε σχέση με τις ροπές λόγω στατικών φορτίων. Έτσι, λογικώς οδηγηθήκαμε σε πλαστιμότητες γενικές και τοπικές των δύο ενισχυμένων πλαισίων πολύ παρόμοιες μεταξύ τους (βλέπε πίνακα 5.13).

Πιο κάτω ακολουθεί ως προς τις πλαστιμότητες πίνακας συγκριτικός πίνακας:

Πίνακας 5.13: Γενική και τοπική των υποστυλωμάτων πλαστιμότητα για τα δύο πλαίσια

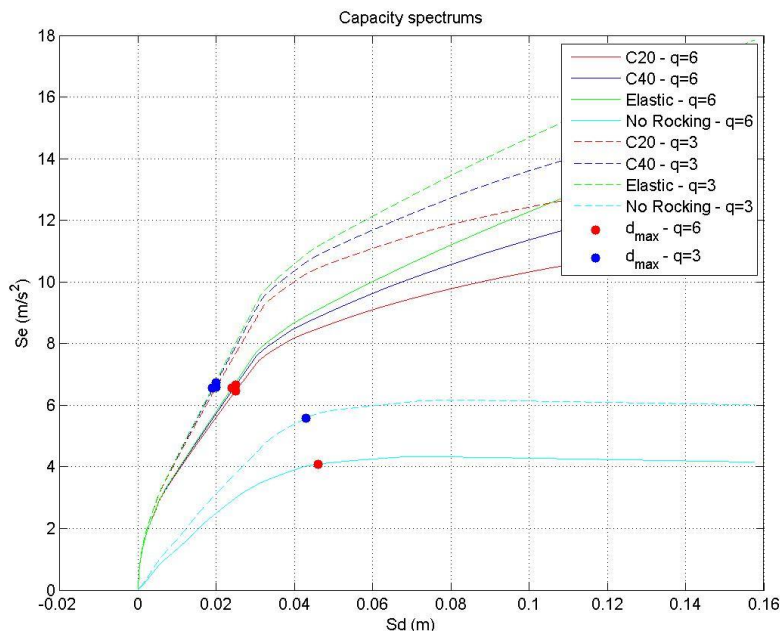
Ποιότητα σκυροδέματος	Διαστασιολόγηση μη ενισχυμένου πλαισίου με $q=3$			Διαστασιολόγηση μη ενισχυμένου πλαισίου με $q=6$		
	Γενική πλαστιμότητα	Πλαστιμότητα υποστυλώματος 1	Πλαστιμότητα υποστυλώματος 2	Γενική πλαστιμότητα	Πλαστιμότητα υποστυλώματος 1	Πλαστιμότητα υποστυλώματος 2
Χωρίς τοιχείο	1.75	Δεν διαρρέει	3.13	1.86	2.46	5.61
C20	11.81	Δεν διαρρέει	Δεν διαρρέει	12.1	Δεν διαρρέει	Δεν διαρρέει
C40	12.24	Δεν διαρρέει	Δεν διαρρέει	12.87	Δεν διαρρέει	Δεν διαρρέει
Ελαστικό	12.52	Δεν διαρρέει	Δεν διαρρέει	13.18	Δεν διαρρέει	Δεν διαρρέει

Όπως αναμενόταν η γενική πλαστιμότητα του πλαισίου και οι τοπικές πλαστιμότητες των υποστυλωμάτων είναι (έστω και ελάχιστα) πιο μεγάλες για το υποδιαστασιολογημένο πλαίσιο, αφού όπως είναι λογικό τα μέλη τους φτάνουν πιο κοντά στην διαρροή τους. Λόγω της εκ γενετής μικρότερης αντοχής των υποστυλωμάτων στο διαστασιολογημένο με  $q=6$  πλαίσιο, η πλαστικοποίηση των ινών της διατομής των υποστυλωμάτων είναι μεγαλύτερη. Αυτό δικαιολογεί και την παρατήρηση ότι η απόσβεση του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος είναι μεγαλύτερη στο υποδιαστασιολογημένο πλαίσιο. Το πιο κάτω διάγραμμα κάνει κατανοητό ακριβώς αυτό που περιγράφεται.



Διάγραμμα 5.21: Φάσματα ικανότητας των 2 πλαισίων με τα σημεία πλαστικοποίησής τους και την διγραμμοποίηση μέχρι την μέγιστη μετατόπιση

Επίσης, η μεγαλύτερη δυσκαμψία του πλαισίου που διαστασιολογήθηκε με συντελεστή συμπεριφοράς  $q=3$  έχει επίπτωση στις μετακινήσεις. Αυτό γίνεται ξεκάθαρο από το επόμενο διάγραμμα:

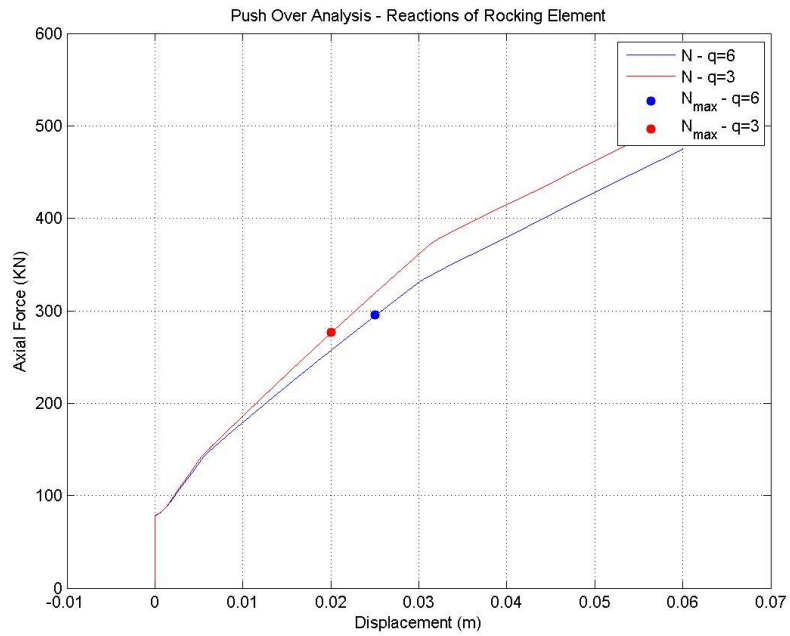


Διάγραμμα 5.21: Φάσματα ικανότητας των 2 πλαισίων με το σημείο μέγιστης φασματικής μετακίνησης

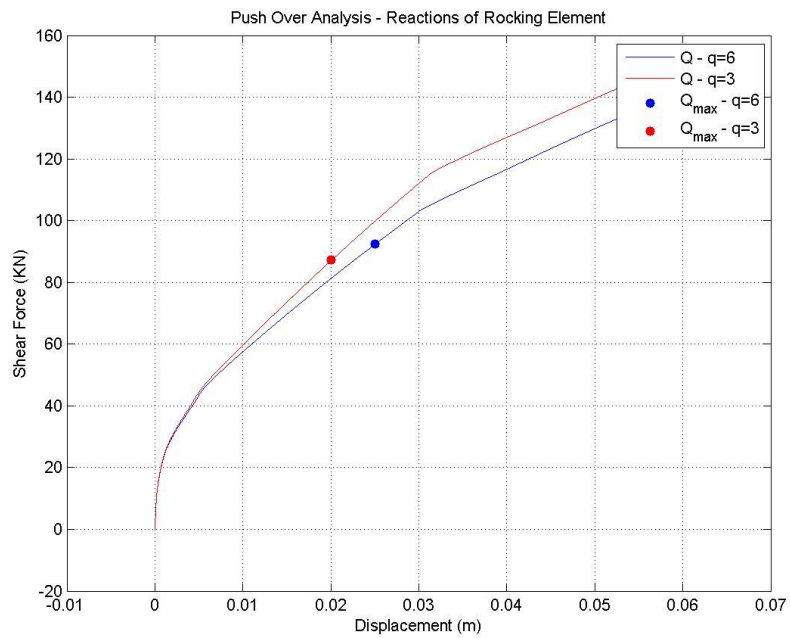
Από το διάγραμμα 5.21 επαληθεύεται η άποψη ότι η αύξηση της δυσκαμψίας των υποστυλωμάτων έχει μεγαλύτερη επίπτωση στο μη ενισχυμένο πλαίσιο αφού στο ενισχυμένο η δυσκαμψία όπως αναφέρθηκε εξαρτάται κυρίως από το τοίχειο. Συγκεκριμένα στα μη ενισχυμένα πλαίσια αναπτύσσονται περίπου ίσες φασματικές μετακινήσεις αλλά με μεγάλη διαφορά στις φασματικές επιταχύνσεις. Αντιθέτως, στα ενισχυμένα πλαίσια οι φασματικές επιταχύνσεις είναι ίσες αλλά οι φασματικές μετακινήσεις διαφέρουν. Ακόμη, από το διάγραμμα απορρέει ότι ενώ το τοίχειο είναι το ίδιο αποτελεσματικό ως προς τις μετακινήσεις των 2 πλαισίων, αφού μειώνει τις μετακινήσεις περίπου στο 50%, είναι πιο αποτελεσματικό όμως στην μείωση των σεισμικών δυνάμεων στο πιο δύσκαμπτο πλαίσιο.

Επίσης η ανάπτυξη μεγαλύτερων μετακινήσεων κορυφής στο υποδιαστασιολογημένο πλαίσιο οδηγεί σύμφωνα με το διάγραμμα 3.9 σε μεγαλύτερο μήκος της θλιβόμενης - παραμορφώσιμης περιοχής της βάσης και της κορυφής του τοιχείου, άρα και σε μεγαλύτερο μήκος της πλαστικοποιημένης ζώνης. Δηλαδή η υποδιαστασιολόγηση των υποστυλωμάτων αυξάνουν την έκταση των ζημιών στην κατασκευή.

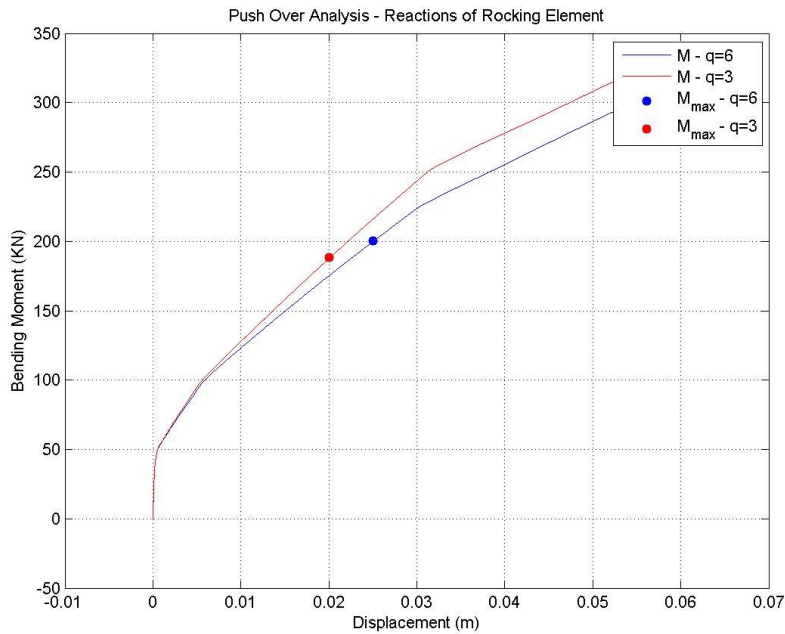
Επιπρόσθετα έχει παρατηρηθεί ότι το λικνιζόμενο τοίχειο του πλαισίου που είναι διαστασιολογημένο με συντελεστή συμπεριφοράς  $q=3$  αναλαμβάνει μικρότερα εντατικά μεγέθη από τα αντίστοιχα του τοιχείου ενός υποδιαστασιολογημένου πλαισίου. Αφού όμως η σεισμική δύναμη των δύο πλαισίων είναι ίδια, συμπεραίνουμε ότι η πιο πάνω συμπεριφορά απορρέει από την μεγαλύτερη πλαστικοποίηση των ινών των υποστυλωμάτων του υποδιαστασιολογημένου πλαισίου. Η πιο πάνω παρατήρηση γίνεται ξεκάθαρη από τα επόμενα διαγράμματα.



Διάγραμμα 5.22: Αξονική δύναμη στη βάση του τοιχείου

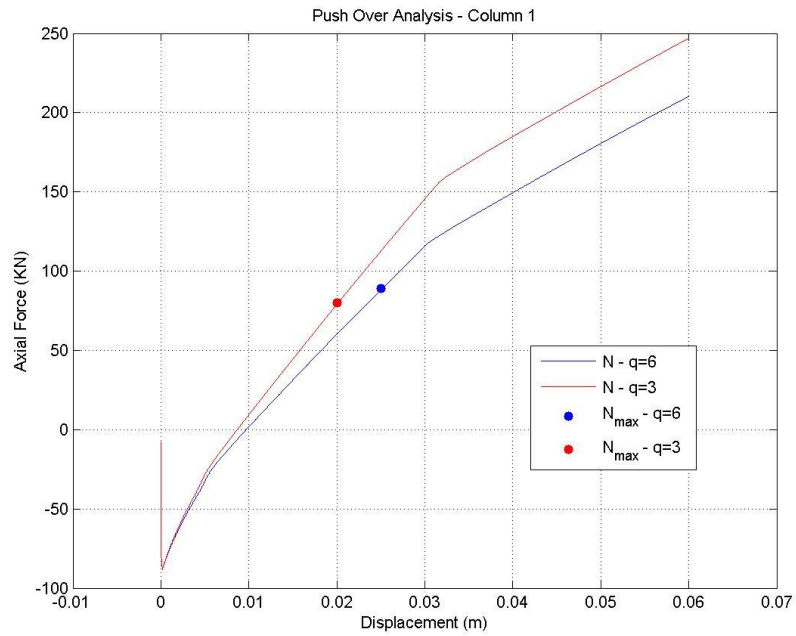


Διάγραμμα 5.22: Τέμνουσα δύναμη στη βάση του τοιχείου

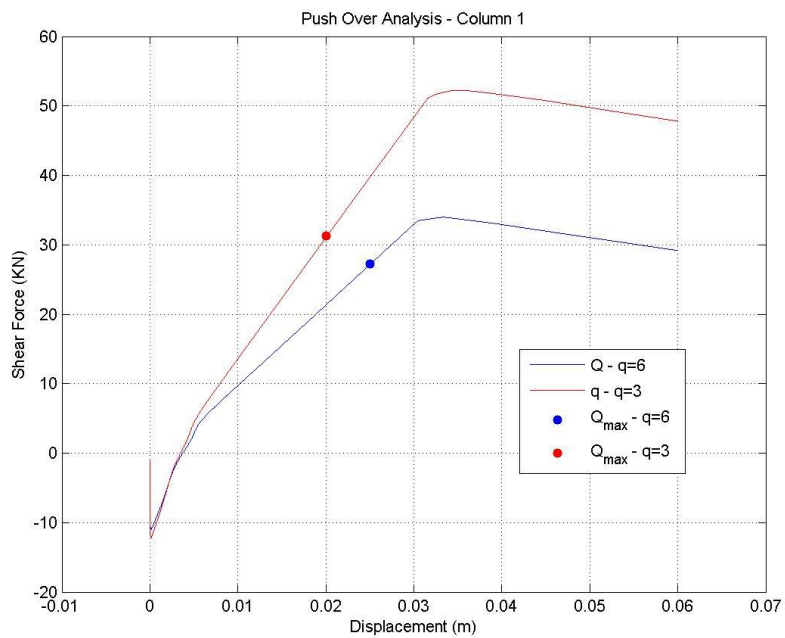


Διάγραμμα 5.23: Ροπή κάμψης στη βάση του τοιχείου

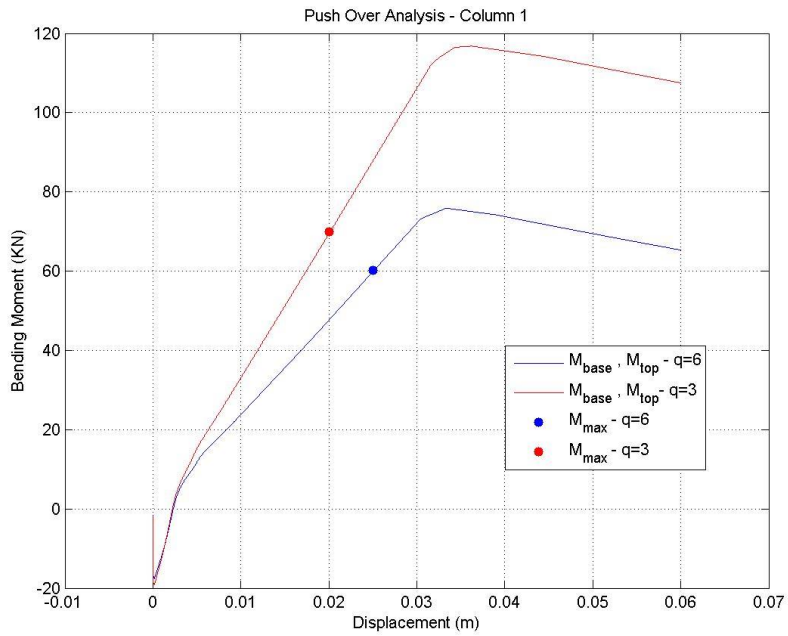
Η αρχική διαστασιολόγηση των πλαισίων επηρεάζει και τα εντατικά μεγέθη που αναλαμβάνουν τα υποστυλώματα. Τα υποστυλώματα του πλαισίου που διαστασιολογήθηκε με συντελεστή συμπεριφοράς  $q=3$  αναλαμβάνουν μεγαλύτερη τέμνουσα δύναμη και ροπή κάμψης στο σεισμό σχεδιασμού. Ο λόγος είναι ότι τα υποστυλώματα αυτού του πλαισίου έχουν μεγαλύτερη ροπή αντοχής από τα υποστυλώματα του υποδιαστασιολογημένου πλαισίου που όπως είδαμε βρίσκονται κοντά στο όριο διαρροής και άρα η πλαστικοποίησή τους είναι αναγκάζει το τοίχειο να παραλάβει επιπλέον ένταση. Το ίδιο ισχύει και για την τέμνουσα η οποία είναι συνυφασμένη με την ροπή. Το αντίθετο όμως ισχύει με τις αξονικές των υποστυλωμάτων. Λόγω του ότι το πιο εύκαμπτο πλαίσιο ( $q=6$ ) αναπτύσσει μεγαλύτερες μετακινήσεις από το πλαίσιο της παραγράφου 5.3, τα υποστυλώματα του θα αναπτύξουν και μεγαλύτερη εφελκυστική δύναμη.



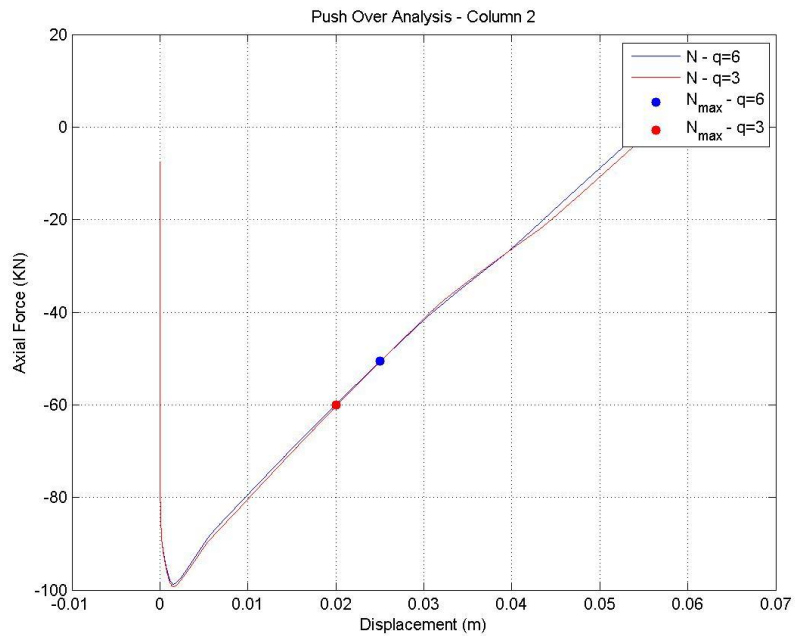
Διάγραμμα 5.24: Αξονική δύναμη υποστυλώματος 1 στη βάση



Διάγραμμα 5.25: Τέμνουσα δύναμη υποστυλώματος 1 στη βάση

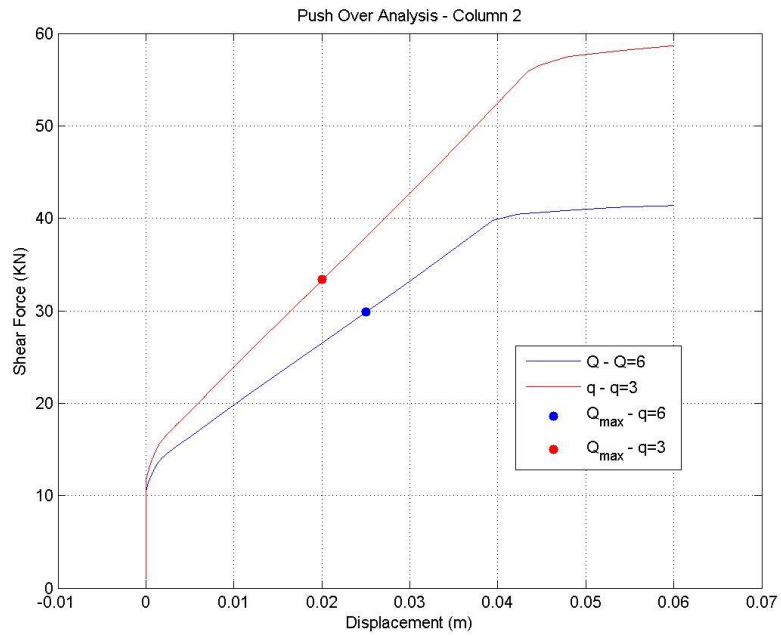


Διάγραμμα 5.26: Ροπή κάμψης υποστυλώματος 1 στη βάση

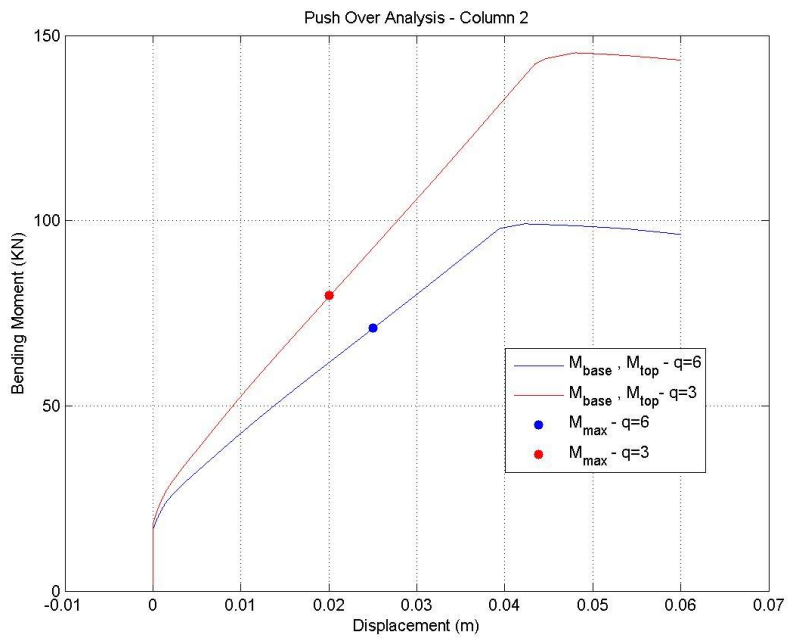


Διάγραμμα 5.27: Αξονική δύναμη υποστυλώματος 2 στη βάση





Διάγραμμα 5.28: Τέμνουσα δύναμη υποστύλωματος 2 στη βάση



Διάγραμμα 5.26: Ροπή κάμψης υποστύλωματος 2 στη βάση

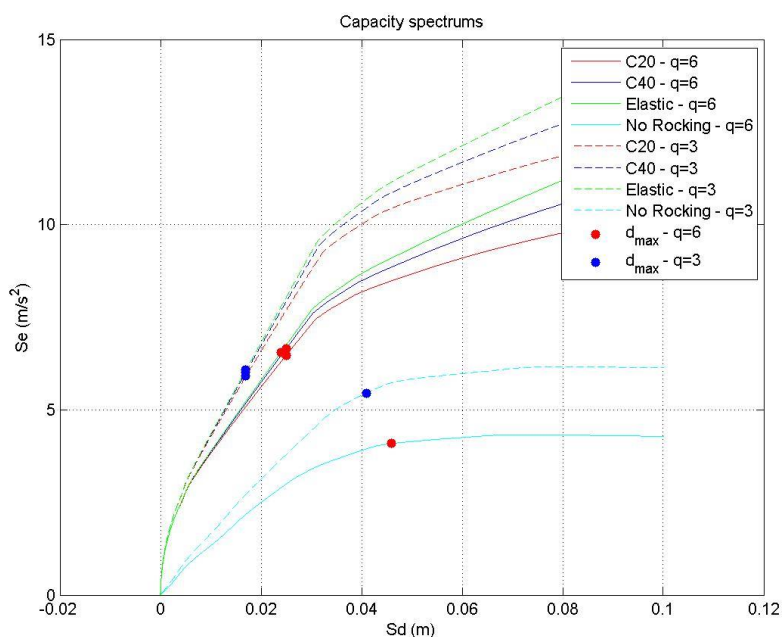
## 5.5 Έλεγχος επιρροής ποιότητας σκυροδέματος του τοιχείου όταν στο πλαίσιο ο σεισμό που αντιστοιχεί σε ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Z3

Το μέγεθος του σεισμού αναμένεται να αλλάξει τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια αφού όπως παρατηρήθηκε στα περισσότερα πλαίσια τα οποία θεωρήθηκαν ότι βρίσκονται σε ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Z2, δεν υπήρχε διαρροή. Έτσι, αναμένουμε ότι αυξημένο φάσμα σχεδιασμού θα δώσει πιο αντιπροσωπευτικά συμπεράσματα ως προς την επίδραση του λικνιζόμενου τοιχείου στη συμπεριφορά του πλαισίου και των μελών του.

Μέχρι τώρα έχουμε παρατηρήσει ότι η ποιότητα σκυροδέματος του λικνιζόμενου τοιχείου δεν επηρεάζει κάποιο μέγεθος της κατασκευής εκτός από τη συμπεριφορά της βάσης του ιδίου. Όμως από τις στατικές αναλύσεις της Pushover του κεφαλαίου 4, παρατηρήθηκε ότι η ποιότητα του τοιχείου μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλες μετακινήσεις της κορυφής του πλαισίου. Γνωρίζοντας ότι ο σεισμός της ζώνης σεισμική επικινδυνότητας Z3 θα προκαλέσει μεγαλύτερες μετακινήσεις, η επιρροή της ποιότητας του τοιχείου είναι αβέβαιη.

Η γεωμετρία παραμένει ίδια με τα προηγούμενα κεφάλαια για να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Επίσης παρουσιάζονται λιγότερες αναλύσεις για λόγους συντομίας. Περισσότερη ανάλυση της επιρροής του μεγέθους του σεισμού ακολουθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

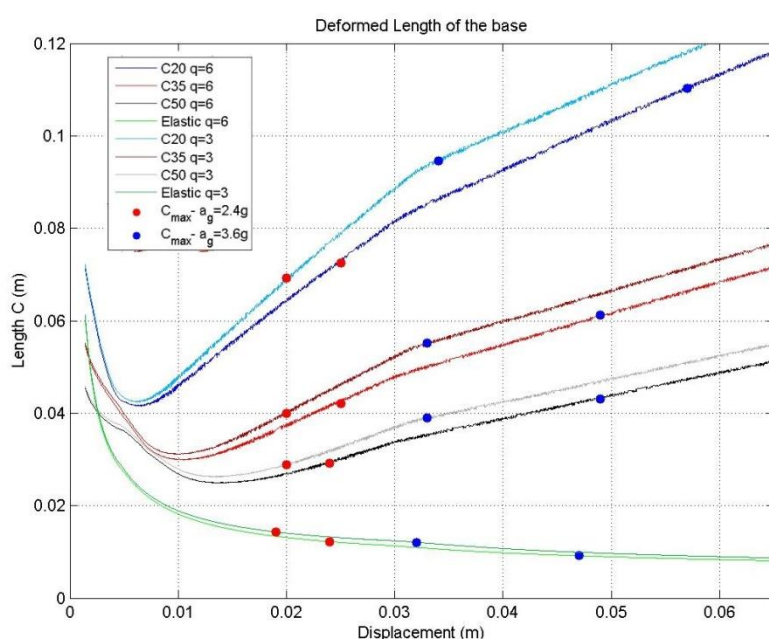
Πιο κάτω παρουσιάζονται οι αναπτυσσόμενες μέγιστες μετακινήσεις των πλαισίων που διαστασιολογήθηκαν με συντελεστή συμπεριφοράς 3 και 6, όταν σε αυτά συμβεί ο σεισμός σχεδιασμού με επιτάχυνση εδάφους  $\alpha_g=0.36g$ .



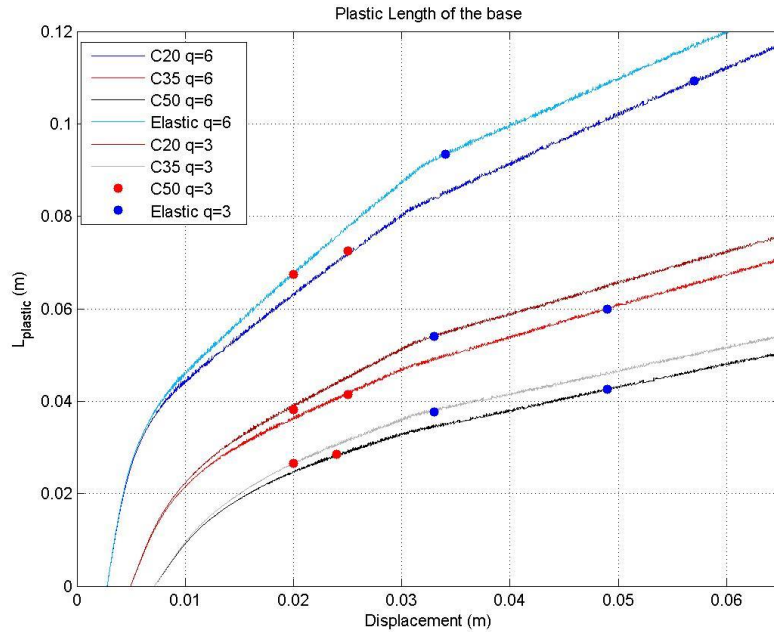
Διάγραμμα 5.27: Φάσματα ικανότητας με τις μέγιστες μετατοπίσεις

Από το διάγραμμα 5.27 παρατηρείται ότι ούτε και πιο ισχυρός σεισμός οδηγεί τις αναπτυσσόμενες μετακινήσεις να επηρεαστούν από την ποιότητα του σκυροδέματος. Η μετακινήσεις που προκύπτουν για τα ενισχυμένα πλαίσια που διαστασιολογήθηκαν με συντελεστή συμπεριφοράς  $q=3$  και  $q=6$  είναι 33mm και 49mm αντίστοιχα.

Παρατηρώντας τις καμπύλες όλων των εντατικών μεγεθών που προέκυψαν από την ανάλυση Pushover, είναι ότι η ποιότητα του σκυροδέματος θα επηρέαζε μερικά χαρακτηριστικά της απόκρισης μόνο για μέγιστες μετακινήσεις κορυφής μεγαλύτερες των 100mm. Η μόνη παράμετρος που επηρεάζεται από την ποιότητα του σκυροδέματος του λικνιζόμενου τοιχείου είναι το μήκος της θλιβόμενης ζώνης και οι παραμορφώσεις όπως φαίνονται από το πιο κάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 5.28: Μεταβολή του μήκους της διεπιφάνειας της βάσης και οι μέγιστες τιμές για τα 2 πλαίσια



Διάγραμμα 5.29: Μεταβολή του μήκους της πλαστικής ζώνης της βάσης και οι μέγιστες τιμές για τα 2 πλαίσια

Πίνακας 5.14: Παραμορφώσεις και καμπυλότητες στη βάση του τοιχείου

Ποιότητα σκυροδέματος	q=3		q=6	
	Παραμόρφωση	Μήκος πλαστικοποιημένης ζώνης (m)	Παραμόρφωση q=6	Μήκος πλαστικοποιημένης ζώνης (m)
C20	0.0372	0.0935	1.3357	0.1054
C35	0.0565	0.0538	0.5825	0.0606
C50	0.0800	0.0417	0.1557	0.0470
Ελαστικό	0.0366	0.0385	0.0536	0.0428

Από το πιο πάνω πίνακα και διαγράμματα γίνεται εμφανές ότι τόσο το μήκος της θλιβόμενης παραμορφωμένης βάσης του τοιχείου, όσο και το μήκος της πλαστικοποιημένης περιοχής αυτού, επηρεάζεται από την ποιότητα του σκυροδέματος. Συγκεκριμένα όσο καλύτερη ποιότητα σκυροδέματος χρησιμοποιείται για το τοίχειο, τόσο τα δύο πιο πάνω μεγέθη μειώνονται. Οι παραμορφώσεις όπως φαίνονται στον πίνακα 5.14 είναι μεγάλες άρα είναι σίγουρο ότι θα προκληθούν ζημιές. Άρα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι όσο η ποιότητα του σκυροδέματος βελτιώνεται τόσο, η οι ζημιές περιορίζονται σε μικρότερη έκταση της βάσης. Αυτό το συμπέρασμα έχει περισσότερη σημασία όσο πιο ισχυρός είναι ο σεισμός.

# Κεφάλαιο 6

## Ανελαστικές αναλύσεις μονώροφου πλαισίου χωρίς περιορισμό μετακινήσεων και παραμετροποιημένες ως προς το πλάτος του τοιχείου

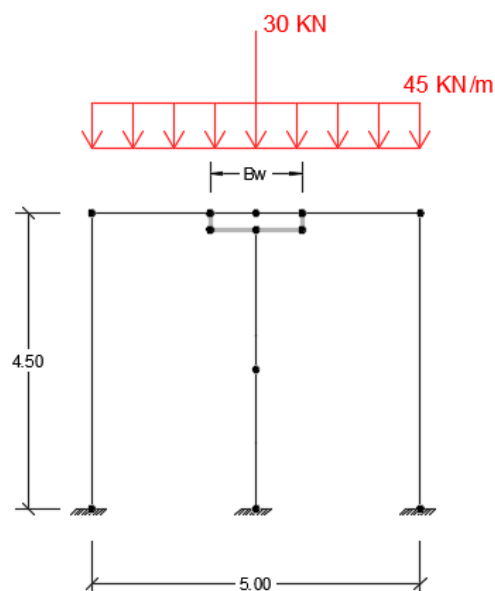
### 6.1 Εισαγωγή

Το πλάτος του λικνιζόμενου τοιχείου είναι ένα μέγεθος που ενδέχεται να επηρεάσει σημαντικά την τελική συμπεριφορά του πλαισίου. Σε πλαίσιο με συγκεκριμένες διαστάσεις, διάταξη μελών, φορτία και σεισμικό φάσμα θα γίνουν αναλύσεις αλλάζοντας μόνο το πλάτος του λικνιζόμενου τοιχείου ώστε να είναι σαφής η επίδραση του σε όλα τα μεγέθη.

Θα συγκριθούν 5 μοντέλα μεταξύ τους των οποίων διαφέρει το πλάτος του λικνιζόμενου τοιχείου. Συγκεκριμένα θα μελετηθεί το πλαίσιο χωρίς ενίσχυση και τα ενισχυμένα πλαίσια με πλάτη τοιχείου 1m, 1.5m, 2m και 2.5m. Η διαστασιολόγηση των πλαισίων έγινε τόσο με συντελεστή  $q=6$  που αντιστοιχεί σε υποδιαστασιολογημένη κατασκευή όσο και με συντελεστή  $q=3$ . Για λόγους καλύτερης εποψίας παρουσιάζονται μόνο τα αποτελέσματα του πρώτου πλαισίου.

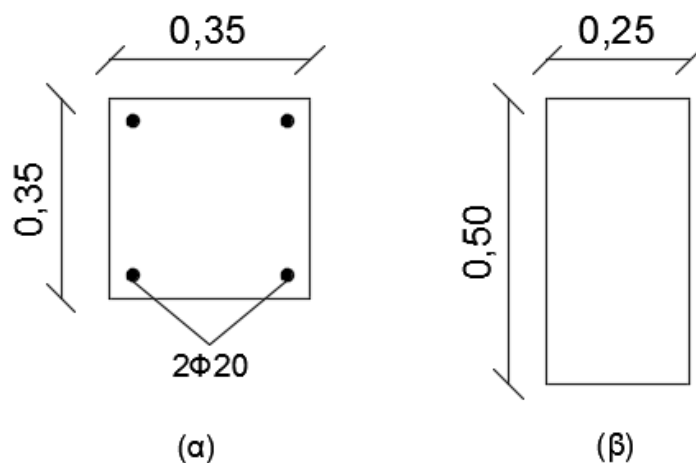
### 6.2 Γεωμετρία και παραδοχές

Το πλαίσιο που θα ελεγχθεί έχει τις ίδιες διαστάσεις με τις υπόλοιπες αναλύσεις στα προηγούμενα κεφάλαια όπως φαίνονται στην εικόνα 6.1.



Εικόνα 6.1: Γεωμετρία του υπό μελέτη πλαισίου

Το πλαίσιο που θα μελετηθεί έχει σχεδιαστεί αρχικώς με συντελεστή συμμετοχής  $\eta=6$ . Επιλέγεται ελαστική δοκός για τον λόγο που εξηγήθηκε στο κεφάλαιο 5.2. Οι διαστάσεις των υποστυλωμάτων και των δοκών είναι οι ακόλουθες:



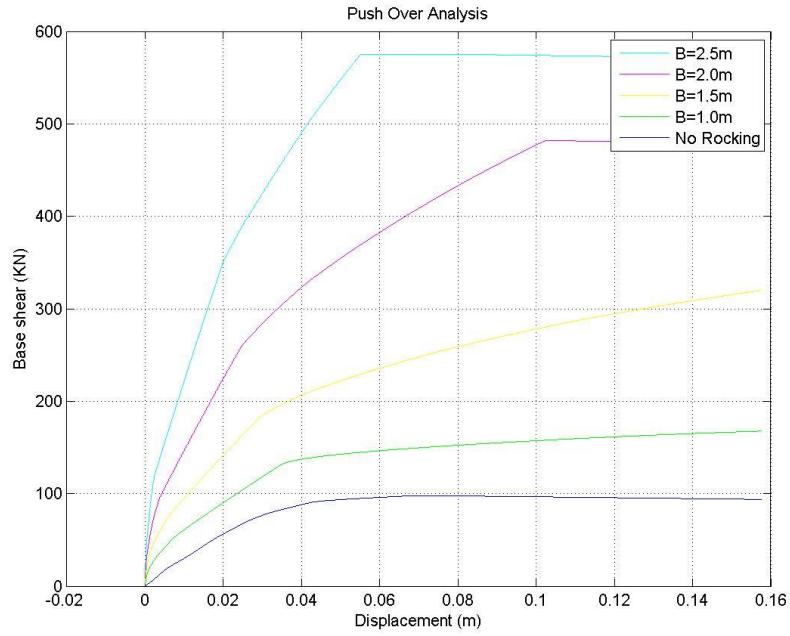
Εικόνα 6.2: Διαστάσεις (α) υποστυλώματος και (β) δοκού

Η ποιότητα σκυροδέματος που επιλέχθηκε είναι C30 για όλα τα μέλη και μέτρο ελαστικότητας 30GPa.

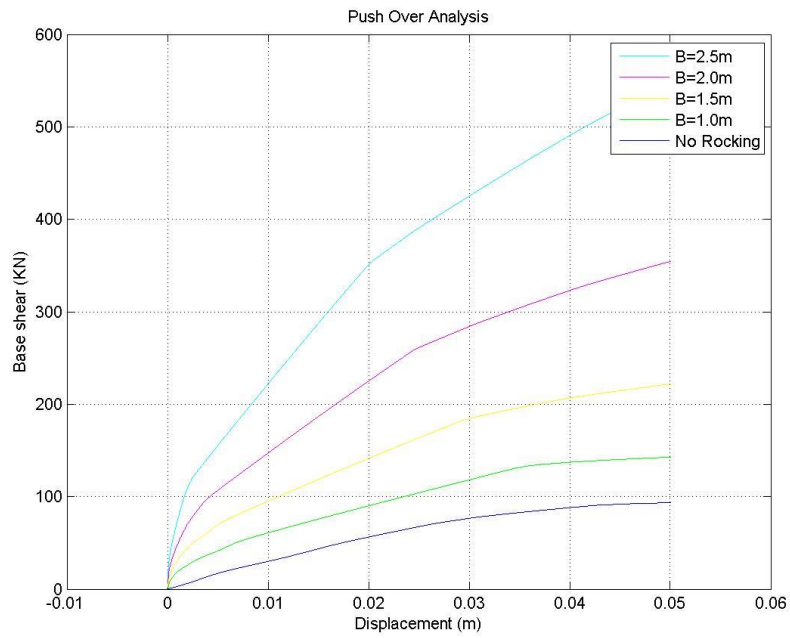
### 6.3 Καμπύλες ικανότητας

Οι καμπύλες ικανότητας είναι ένας δείκτης που μπορεί δώσει συγκριτικά αποτελέσματα ως προς την δυσκαμψία του πλαισίου, τη σεισμική δύναμη ή τις αναμενόμενες παραμορφώσεις σε επικείμενη σεισμική διέγερση. Αποτελούν μία πρώτη εκτίμηση για το πως το πλάτος του λικνιζόμενου τοιχείου επηρεάζει την απόκριση της κατασκευής όταν στο πλαίσιο ασκηθούν οριζόντιες δυνάμεις.

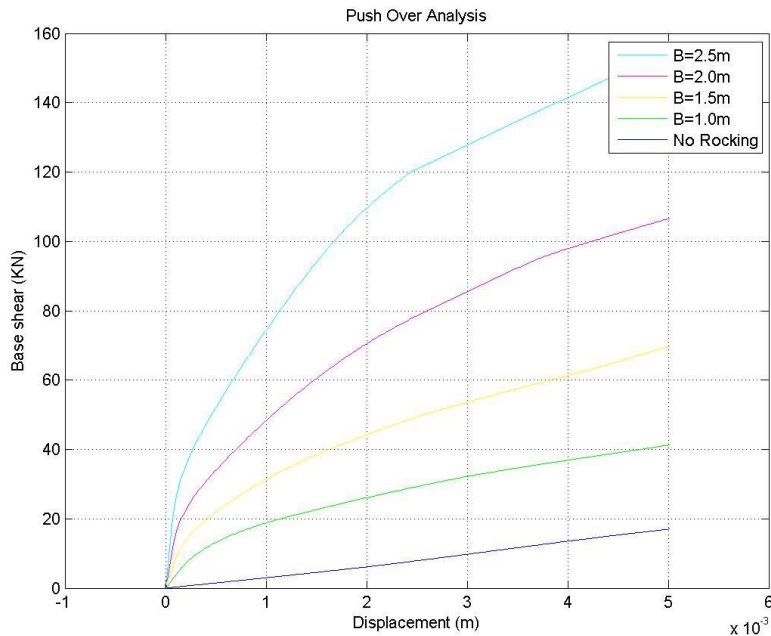
Πιο κάτω φαίνονται οι καμπύλες ικανότητας των 5 διαφορετικών πλαισίων:



Διάγραμμα 6.1: Καμπύλες ικανότητας πλαισίων με διαφορετικό πλάτος λικνιζόμενου τοιχείου



Διάγραμμα 6.2: Καμπύλες ικανότητας πλαισίων με διαφορετικό πλάτος λικνιζόμενου τοιχείου για μετατόπιση μέχρι 50mm



**Διάγραμμα 6.3: Καμπύλες ικανότητας πλαισίων με διαφορετικό πλάτος λικνιζόμενου τοιχείου για μετατόπιση μέχρι 5mm**

Από τα πιο πάνω διαγράμματα γίνεται ξεκάθαρο ότι καθώς το πλάτος του λικνιζόμενου τοιχείου αυξάνεται, η συμπεριφοράς του πλαισίου βελτιώνεται, όπως επίσης αυξάνεται και η μέγιστη τέμνουσα βάσης που έχει την ικανότητα να αναλάβει το πλαίσιο.

Γνωρίζοντας ότι το τοιχείο "διαρρέει" λόγω λικνισμού (το τοιχείο διαρρέει και λόγω τάσεων) για πολύ μικρές μετατοπίσεις και παρατηρώντας ότι τα πλαίσια με μεγαλύτερο λικνιζόμενο τοιχείο έχουν μεγαλύτερη δυσκαμψία, συμπεραίνεται ότι όσο μεγαλύτερο το πλάτος του λικνιζόμενου τοιχείου τόσο το πλαίσιο διαρρέει για μεγαλύτερη τέμνουσα βάσης. Από το διάγραμμα 6.2 φαίνεται ότι το μεγαλύτερο πλάτους τοιχείο αρχίζει να "διαρρέει" σε μεγαλύτερη μετατόπιση κορυφής όμως "διαρρέει" πλήρως σε μικρότερη μετατόπιση (το ένα σημείο αντιστοιχεί σε αρχή της πλαστικοποίησης της βάσης και το άλλο της κορυφής).

Επίσης σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος του τοιχείου τόσο πιο απότομη είναι η διαρροή του πλαισίου. Δηλαδή για μεγάλα πλάτη του λικνιζόμενου τοιχείου, στο πλαίσιο κατανέμονται καλύτερα τα εντατικά μεγέθη ώστε να πλαστικοποιούνται περισσότερα μέλη την ίδια χρονική στιγμή (βλέπε διάγραμμα 6.3). Αυτό ίσως αποδειχθεί και πλεονέκτημα καθώς περιορίζονται οι τοπικές πλαστιμότητες των μελών.

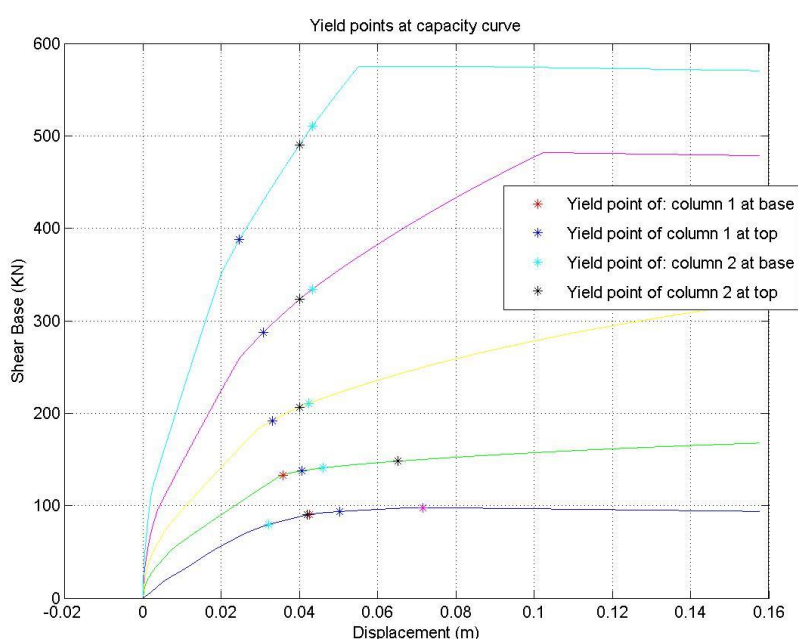
Από το διάγραμμα 6.1 παρατηρείται για πρώτη φορά ότι το πλαίσιο φτάνει σε μέγιστη φέρουσα ικανότητα. Βεβαίως αναμένουμε τις 4 πλαστικές αρθρώσεις στα υποστυλώματα, όμως αυτό από μόνο του δεν προκαλεί μηχανισμό του. Η δοκός είναι ελαστική και το τοιχείο δεν διαρρέει. Αυτό που κάνει το διάγραμμα να οριζοντιοποιηθεί είναι ότι το τοιχείο χρειάζεται μεγάλη θλιπτική δύναμη για μεγάλες μετατοπίσεις, η οποία αναγκάζει τα υποστυλώματα σε πολύ μεγάλο εφελκυσμό. Όταν το υποστυλώματα 1 φτάσει τη μέγιστη



του αξονική τότε όλο το σύστημα αστοχεί. Μάλιστα η αστοχία σε κάμψη προκαλεί εντελώς απότομα την αδυναμία της κατασκευή να παραλάβει επιπλέον φορτίο και για αυτό τον λόγο παρατηρείται η απότομη οριζοντιοποίηση της καμπύλης.

## 6.4 Σειρά δημιουργίας πλαστικών αρθρώσεων

Σημαντικό για την κατανόηση και επεξήγηση της συμπεριφοράς του πλαισίου και των μελών του όταν στο μέσο του ανοίγματος τοποθετείται λικνιζόμενο τοίχειο διαφορετικού μήκους είναι να παρατηρήσουμε την σειρά δημιουργίας πλαστικών αρθρώσεων. Παραθέτεται στο επόμενο διάγραμμα τα σημεία διαρροής των μελών του πλαισίου πάνω στην καμπύλη ικανότητας.



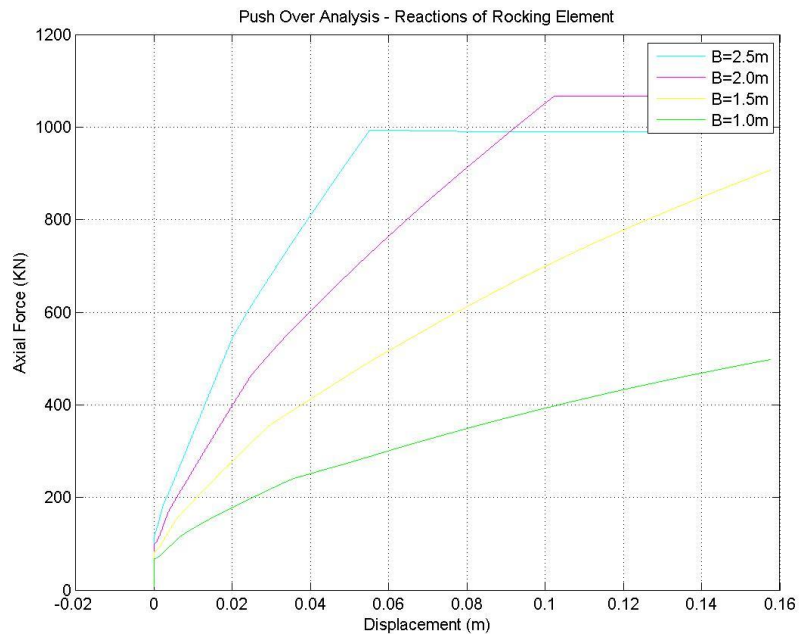
Διάγραμμα 6.4: Καμπύλες ικανότητας και σειρά πλαστικοποίησης

Όπως σημειώθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια το μη ενισχυμένο πλαίσιο φτάνει στο μέγιστο σημείο για πολύ μικρότερη τέμνουσα βάσης και μεγαλύτερη μετακίνηση αφού είναι πιο εύκαμπτο από το ενισχυμένο πλαίσιο.

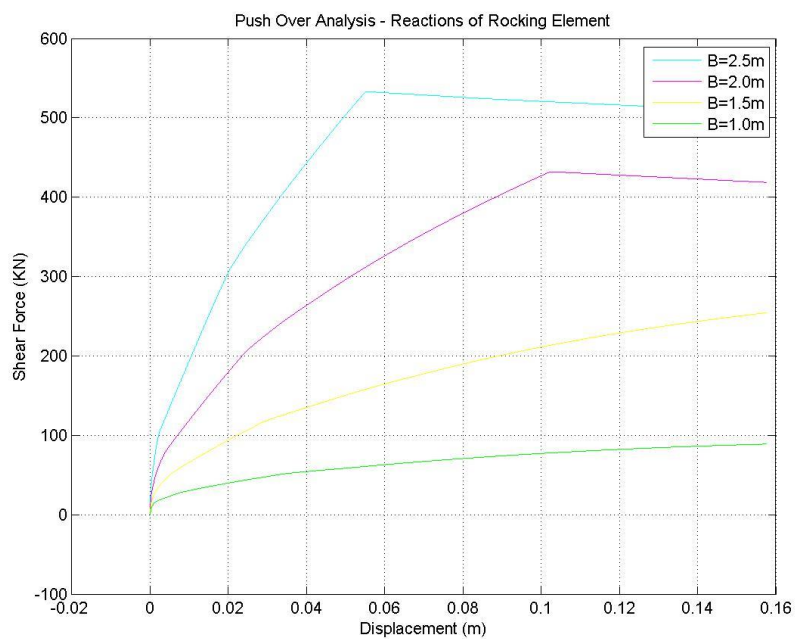
Αξιοσημείωτο όμως είναι ότι όσο το μήκος του τοιχείου αυξάνει τόσο οι πλαστικές αρθρώσεις δημιουργούνται με μεγαλύτερη διαφορά οριζόντιας δύναμης μεταξύ τους. Αυτό δίνει καταρχάς μεγάλη δυσκαμψία στο πλαίσιο, αφού αργεί η οριζοντιοποίηση της καμπύλης ικανότητας ακόμα και για μεγάλα σεισμικά φορτία. Έτσι το τοίχειο περιορίζει σημαντικά τις ζημιές στα υποστυλώματα και στις δοκούς ακόμα και για μεγάλες οριζόντιες δυνάμεις. Στα πλαίσια που ενισχύονται με τοίχεια μήκους 2.5m οι διαρροές είναι πολύ απομακρυσμένες μεταξύ τους και συμβαίνουν για τεράστια σεισμικά φορτία που για την συγκεκριμένη κατασκευή, με την συγκεκριμένη μάζα δεν θα συμβούν.

## 6.5 Αντιδράσεις στη στήριξη του λικνιζόμενου τοιχείου

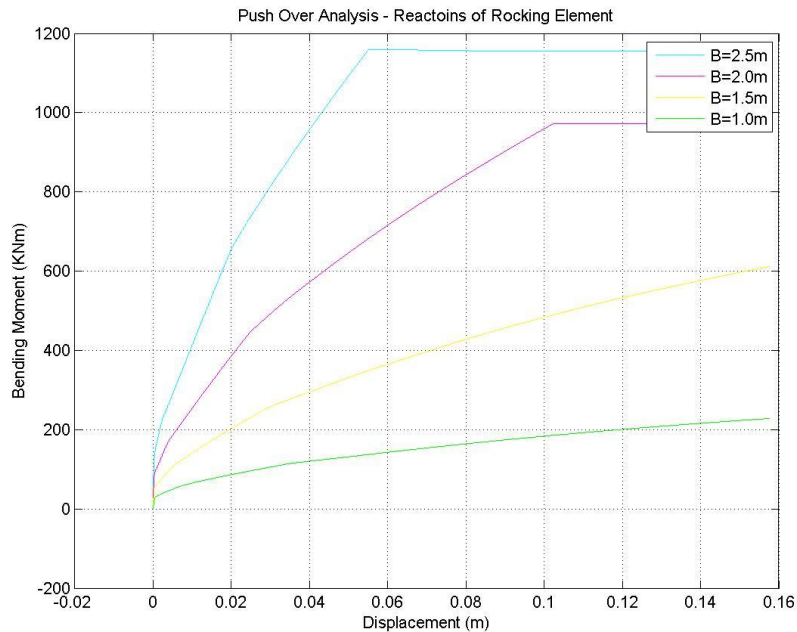
Θα μελετηθούν τα εντατικά μεγέθη (αξονική δύναμη, τέμνουσα δύναμη, ροπή κάμψης) που ασκούνται στη βάση του τοιχείου με τα διάφορα μήκη λικνιζόμενου τοιχείου. Ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα.



Διάγραμμα 6.5: Αξονική δύναμη στη βάση του τοιχείου



Διάγραμμα 6.6: Τέμνουσα δύναμη στη βάση του τοιχείου

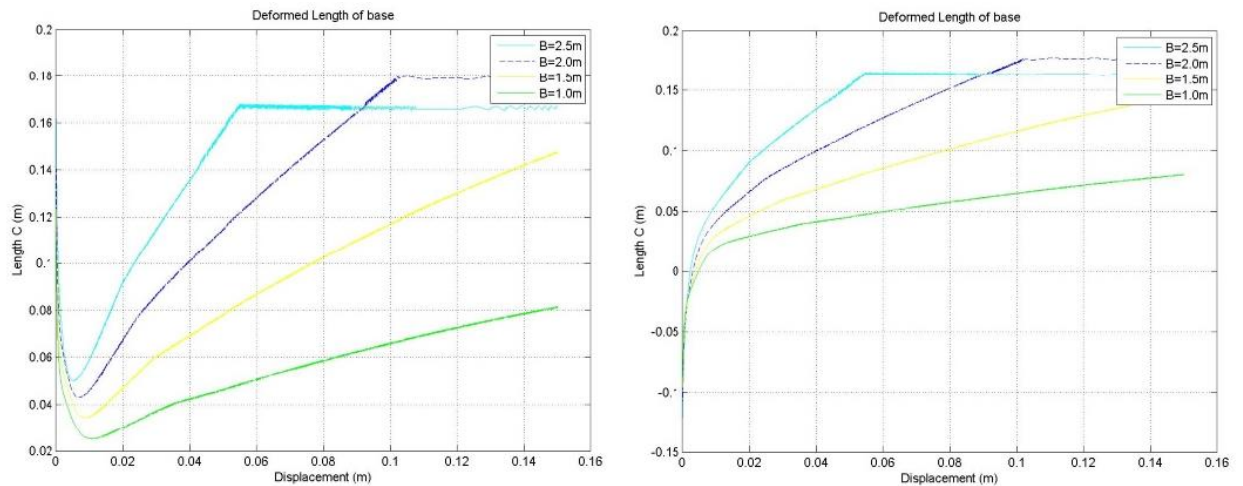


**Διάγραμμα 6.7: Ροπή κάμψης στη βάση του τοιχείου**

Όπως φαίνεται από τα πιο πάνω διαγράμματα, για συγκεκριμένο μήκος μετατόπισης της κορυφής του πλαισίου και τα τρία εντατικά μεγέθη στη βάση του υποστυλώματος αυξάνουν καθώς αυξάνεται το μήκος του λικνιζόμενου τοιχείου. Η τέμνουσα δύναμη αυξάνεται αφού αυξάνεται και η φέρουσα ικανότητα του πλαισίου σε οριζόντιες δυνάμεις. Την ίδια μορφή με την τέμνουσα δύναμη έχει το διάγραμμα της ροπής κάμψης που ασκείται στην βάση του τοιχείου.

Τέλος, οι αξονικές δυνάμεις παρομοίως αυξάνονται όσο αυξάνεται και το μήκος του τοιχείου. Δηλαδή όσο πιο πλατύ είναι το τοίχειο τόσο μεγαλύτερη θλίψη χρειάζεται για να λειτουργήσει σωστά στον λικνισμό. Φυσικά αυτό θα έχει αντίκτυπο στα υποστυλώματα στα οποία λόγω του λικνισμού θα προκαλείται εφελκυσμός. Αυτό το θέμα, θα μελετηθεί λεπτομερώς σε επόμενη ενότητα του παρόντος κεφαλαίου. Επίσης λόγω της αύξησης της θλίψης του τοιχείου άρα και της αύξησης του εφελκυσμού κυρίως του υποστυλώματος 1, αναλαμβάνεται μεγάλο μέρος της ροπής βάσης από το ζεύγος αξονικών δυνάμεων.

Τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στην βάση ενός τοιχείου μεγάλου μήκους είναι πολύ μεγαλύτερα από αυτά που αναπτύσσονται σε πλαίσιο ενισχυμένο με μικρότερο μήκος. Αυτό φυσικά έχει επιπτώσεις στη βάση έδρασης του τοιχείου. Μία από αυτές φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα.



**Διάγραμμα 6.8: Μεταβολή μήκους θλιβόμενης - παραμορφωμένης περιοχής και μήκος πλαστικοποιημένης ζώνης της βάσης του τοιχείου συναρτήσει της μετατόπισης κορυφής**

Από τα πιο πάνω διάγραμματα παρατηρείται για συγκεκριμένη μετατόπιση κορυφής ότι όσο μεγαλύτερο μήκος είναι το τοιχείο, τόσο μεγαλύτερη είναι και η παραμορφωμένη - θλιβόμενη βάση του. Μάλιστα, όσο πιο δύσκαμπτο είναι το τοιχείο, το μήκος αυτό επηρεάζεται περισσότερο από την μετακίνηση κορυφής του πλαισίου. Αυτό συνδέεται με το γεγονός που παρατηρήθηκε πιο πάνω, ότι όσο αυξάνεται η μετατόπιση κορυφής του πλαισίου, τα εντατικά μεγέθη του τοιχείου αυξάνονται με πιο ταχύ ρυθμό για τα πλαίσια που είναι ενισχυμένα λικνιζόμενο τοιχείο μεγάλου μήκους. Επίσης η αύξηση του μήκους του λικνιζόμενου τοιχείου προκαλεί μεγαλύτερο μήκος της πλαστικοποιημένης ζώνης.

Η πιο πάνω παρατήρηση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι για συγκεκριμένη μετατόπιση κορυφής όσο μικρότερο είναι το μήκος του τοιχείου τόσο πιο συγκεντρωμένες είναι οι ζημιές. Όμως είναι αναγκαίο να ποσοτικοποιηθούν οι ζημιές για να ληφθεί ασφαλές συμπέρασμα αν το μήκος του τοιχείου έχει σοβαρό αντίκτυπο στις ζημιές που θα συμβούν στο σεισμό σχεδιασμού.

## 6.6 Διγράμματα εντατικών μεγεθών των μελών του πλαισίου

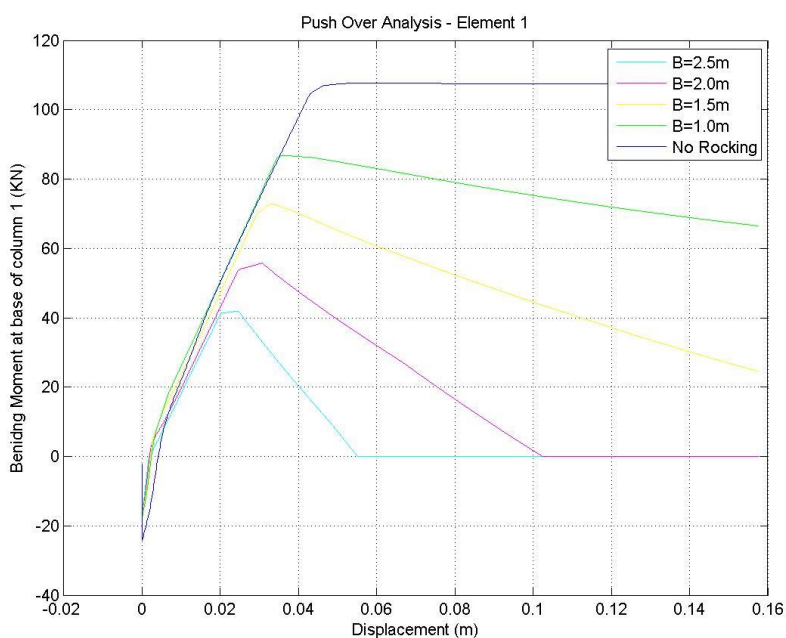
Για την καλύτερη αντίληψη των επιπτώσεων που έχει το μήκος του τοιχείου στα υποστυλώματα και στις δοκούς του πλαισίου κρίνεται απαραίτητο να μελετηθεί η μεταβολή των εντατικών μεγεθών τους όταν το μήκος αυτό αλλάζει.

### 6.6.1 Ροπές υποστυλωμάτων

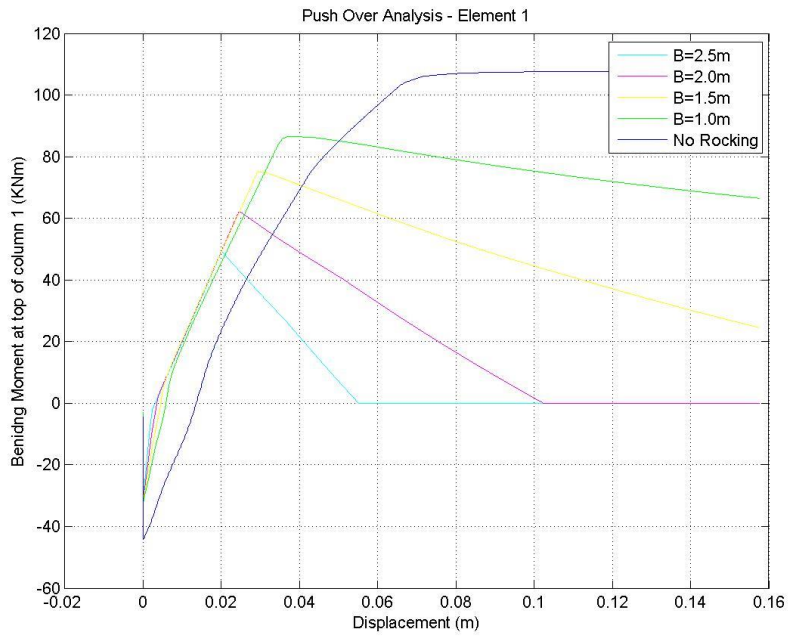
Από τις πιο κάτω γραφικές παρατηρείται η μείωση της ροπής αντοχής των υποστυλωμάτων 1 και 2 του ενισχυμένου πλαισίου σε σύγκριση με του απλό πλαισίου, λόγω της μείωσης της αξονικής δύναμης. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη σύγκριση των ροπών που δρουν στα υποστυλώματα του ενισχυμένου και μη πλαισίου υπάρχουν στο κεφάλαιο 3.3.4.1.

Όσο αφορά την σύγκριση των ροπών των υποστυλωμάτων μεταξύ ενισχυμένων πλαισίων με διαφορετικό μήκος τοιχείου, παρατηρείται ότι η ροπή αντοχής των υποστυλωμάτων 1 και 2 μειώνεται όσο αυξάνει το μήκος του τοιχείου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για συγκεκριμένη μετατόπιση κορυφής, η αύξηση του τοιχείου επιτρέπει την ανάληψη μεγαλύτερης δύναμης από το πλαίσιο άρα και μεγαλύτερη ροπή βάσης. Έτσι το τοιχείο όπως έχει ειπωθεί θα αναλάβει μεγαλύτερη θλιπτική δύναμη που τείνει να σηκώσει το πλαίσιο προς τα πάνω. Επομένως, και στα δύο υποστυλώματα ασκούνται εφελκυστικές δυνάμεις που είναι μεγαλύτερες σε μέγεθος όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος του τοιχείου.

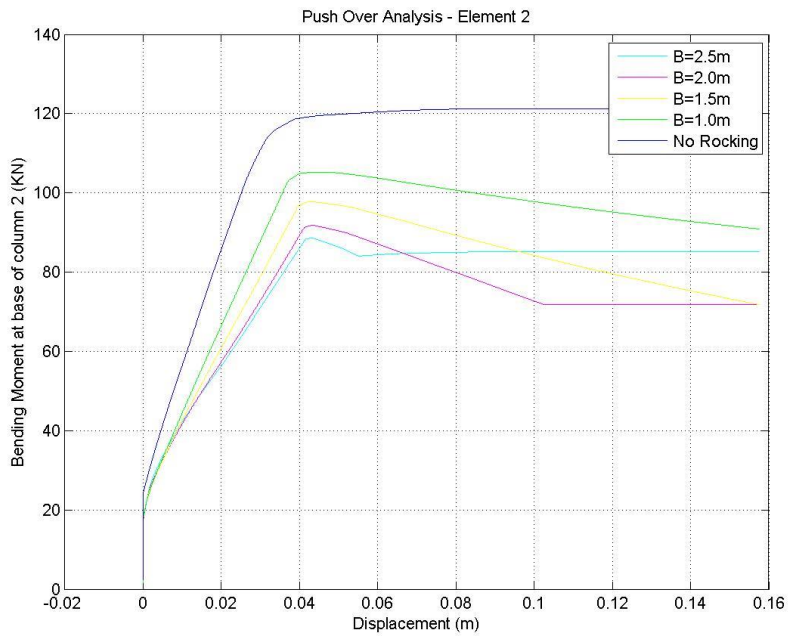
Σημειώνεται όμως ότι μέρος της ροπής αναλαμβάνεται από ζεύγη αξονικών δυνάμεων και συγκεκριμένα από εφελκυστική δύναμη του υποστυλώματος 1 και θλιπτική του 2. Όμως αναμένεται για μεγάλες μετατοπίσεις η αξονική να υπερνικά την θλιπτική του υποστυλώματος 2. Δηλαδή, στο υποστυλώμα 1 αναπτύσσεται πολύ μεγαλύτερη αξονική δύναμη παρά το 2 και για αυτόν τον λόγο η ροπή αντοχής του τελευταίου είναι μεγαλύτερη. Η μείωση της ροπής αντοχής των υποστυλωμάτων για συγκεκριμένη μετατόπιση, όπως γίνεται αντιληπτό είναι πιο έντονη όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος του τοιχείου. Παρόλα αυτά, πριν την διαρροή η συμπεριφορά των υποστυλωμάτων σε ροπή είναι η ίδια σε όλα τα πλαίσια.



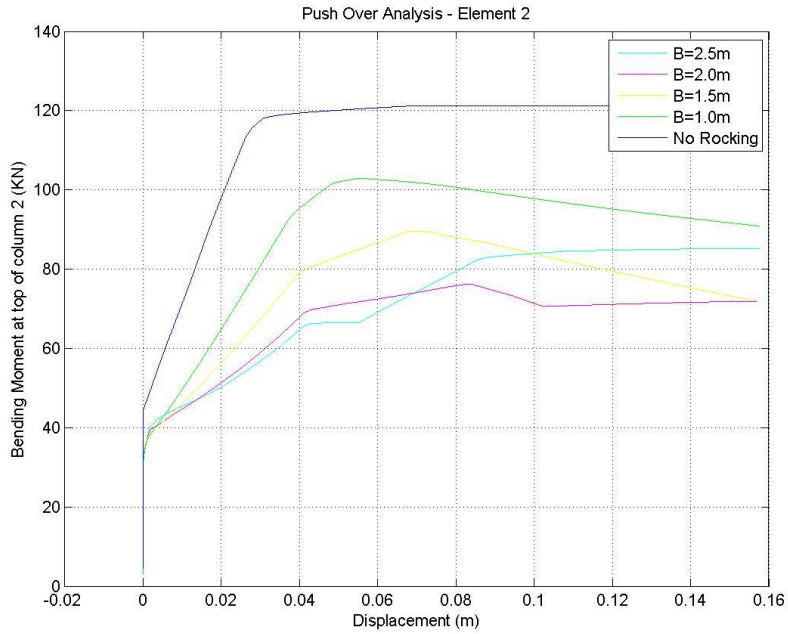
Διάγραμμα 6.9: Ροπή κάμψης υποστυλώματος 1 στη βάση



Διάγραμμα 6.10: Ροπή κάμψης υποστυλώματος 1 στην κορυφή (και δοκού στον αριστερό κόμβο)



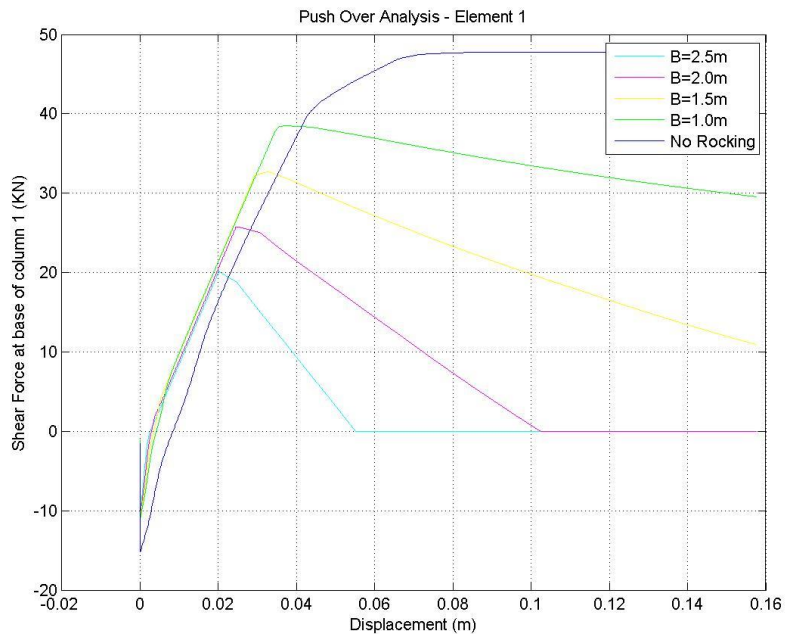
Διάγραμμα 6.11: Ροπή κάμψης υποστυλώματος 2 στην βάση



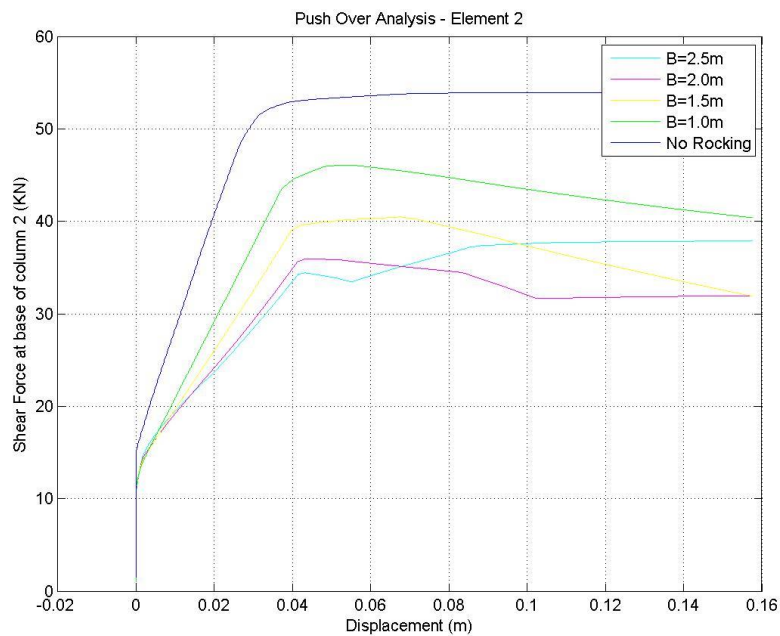
Διάγραμμα 6.12: Ροπή κάμψης υποστυλώματος 2 στην κορυφή (και δοκού στον δεξιό κόμβο)

### 6.6.2 Τέμνουσες δυνάμεις υποστυλωμάτων

Η τέμνουσες δυνάμεις των υποστυλωμάτων είναι συσχετισμένες άμεσα με την δρώσα ροπή. Για αυτό τον λόγο, τα διαγράμματα ροπής και τέμνουσας έχουν την ίδια μορφή. Έτσι όπως και στις ροπές κάμψης, οι τέμνουσες των υποστυλωμάτων για συγκεκριμένη μετατόπιση κορυφής μειώνονται όσο αυξάνεται το μήκος του τοιχείου. Δηλαδή το τοιχείο, αναλαμβάνει πολύ μεγαλύτερο ποσοστό της τέμνουσας βάσης όσο το μήκος του αυξάνεται.



Διάγραμμα 6.13: Τέμνουσα δύναμη στο αριστερό υποστυλωμα



Διάγραμμα 6.14: Τέμνουσα δύναμη στο δεξιό υποστυλώμα

### 6.6.3 Αξονικές δυνάμεις υποστυλωμάτων

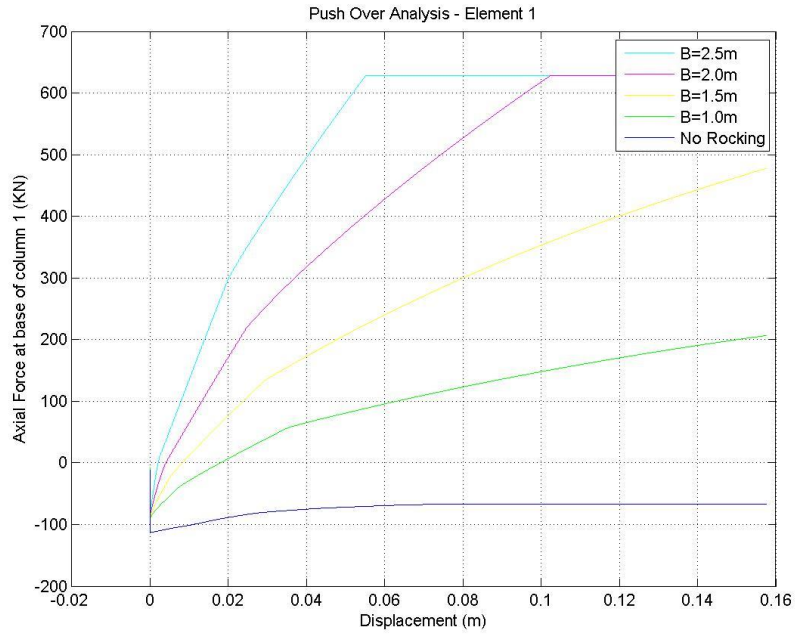
Η ύπαρξη του τοιχείου επηρεάζει τις αξονικές δυνάμεις των υποστυλωμάτων. Συγκεκριμένα για τους λόγους που περιγράφονται στο κεφάλαιο 3.3.4.3 στο υποστυλώμα 1 αναπτύσσεται εφελκυστική δύναμη ακόμα και για μικρές μετατοπίσεις κορυφής. Αντίθετα στο υποστυλώμα 2 η μείωση της θλίψης γίνεται με πολύ πιο αργό ρυθμό και φτάνει τελικά σε εφελκυσμό σε αρκετά μεγάλη μετατόπιση κορυφής. Συγκρίνοντας τα διγράμματα 6.15 και 6.16 επαληθεύεται ότι στο αριστερό υποστυλώμα η αξονική είναι πολύ πιο μεγάλη από του υποστυλώματος 2. Η πιο πάνω συμπεριφορά δικαιολογείται όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 6.6.1.

Η μέγιστη εφελκυστική αξονική δύναμη που μπορεί να παραλάβει το συγκεκριμένο υποστυλώμα είναι:

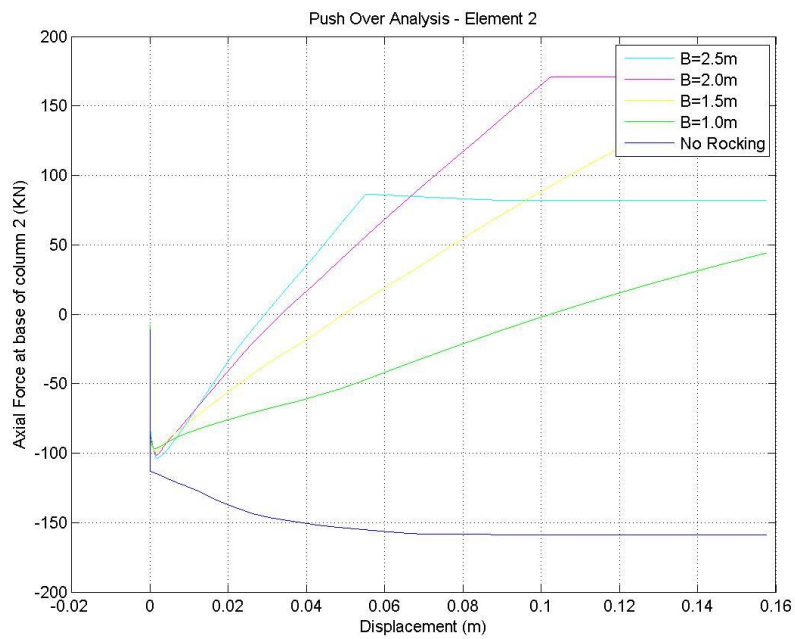
$$N_{\max} = A_s \cdot f_y = 4 \cdot \pi \cdot 2^2 \text{ cm}^2 \cdot 50 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 630 \text{ kN}$$

Άρα οι οπλισμοί του υποστυλώματος μπορούν να αναλάβουν μέγιστη εφελκυστική δύναμη 630kN, ίση δηλαδή με την μέγιστη που μπορεί να αναπτυχθεί (διάγραμμα 6.15). Επιβεβαιώνεται δηλαδή ότι η αστοχία οφείλεται στην ανικανότητα του υποστυλώματος 1 να φέρει πρόσθετη εφελκυστική δύναμη.





Διάγραμμα 6.15: Αξονική δύναμη στο αριστερό υποστύλωμα



Διάγραμμα 6.16: Αξονική δύναμη στο δεξιό υποστύλωμα

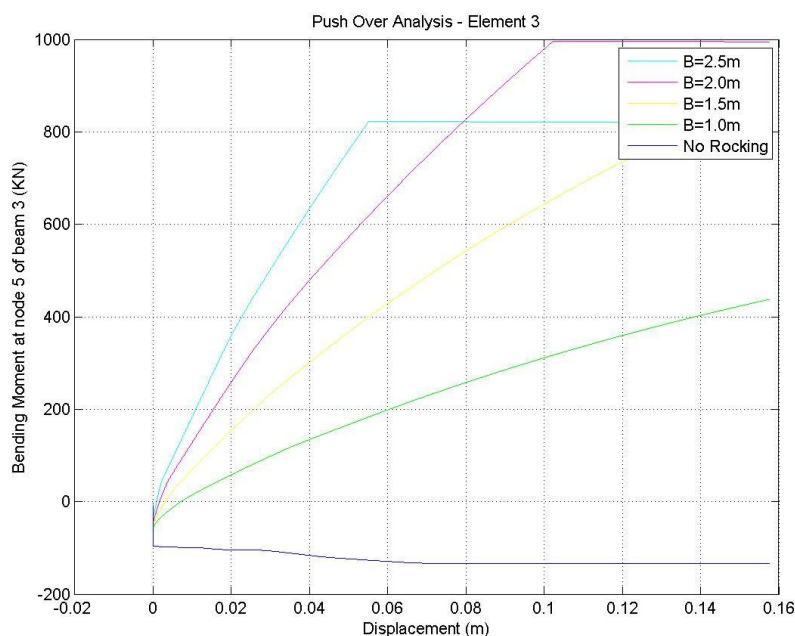
#### 6.6.4 Ροπές κάμψης των δοκών

Όπως είδαμε σε προηγούμενα κεφάλαια η ροπή που αναπτύσσεται στην δοκό και ειδικότερα στο σημείο ανασήκωσης του τοιχείου (κόμβος 5) είναι πολύ σημαντική και πρέπει να υπολογιστεί λεπτομερώς. Στα πιο κάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι ροπές στο μέσο της δοκού αριστερά και δεξιά του τοιχείου που αντιστοιχούν στο σημείο

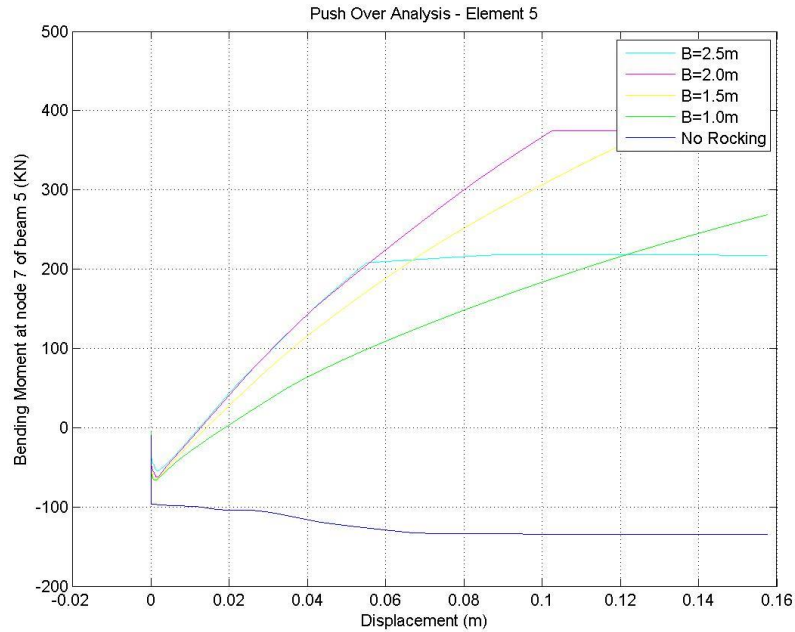
ανασήκωσης και υποχώρησης του τοιχείου. Οι ροπές στους ακραίους κόμβους της δοκού είναι ίδιες με τις ροπές της κεφαλής των υποστυλωμάτων και παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 6.6.1.

Από τα πιο κάτω διαγράμματα γίνεται αντιληπτό το πόσο μεγάλο είναι το μέγεθος της δρώσας ροπής των υποστυλωμάτων στο σημείο ανασήκωσης της δοκού. Η δοκός ενός υφιστάμενου πλαισίου είναι οπλισμένη να αναλάβει ροπές αντίθετης φοράς από αυτές που αναπτύσσονται λόγω της ενίσχυσης του τοιχείου. Αν και στην πραγματικότητα δεν θα αναπτυχθούν τόσο μεγάλες ροπές στην δοκό, κρίνεται αναγκαία η ενίσχυση της. Μάλιστα η μεγάλη αρνητική ροπή στο κόμβο 5 παρασύρει και όλη την δοκό προς τα πάνω με αποτέλεσμα δεξιά του τοιχείου η δοκός να εφελκύεται .

Από το διάγραμμα 6.17 φαίνεται ότι όσο μεγαλύτερο είναι το λικνιζόμενο τοιχείο, τόσο μεγαλύτερη είναι και η αναπτυσσόμενη ροπή της δοκού στον κόμβο 5. Αυτό έχει επιπτώσεις και στην υπόλοιπη δοκό. Όσο αυξάνει το μήκος του τοιχείου, αριστερά αυτού η δοκός μειώνει την ροπή της αφού τείνει να γίνει από αρνητική θετική (διάγραμμα 6.10). Ενώ δεξιά του τοιχείου, η αύξηση του πλάτους τείνει να αυξήσει την ροπή αφού η υπάρχουσα ροπή με την επιβαλλόμενη είναι το ίδιου πρόσημου. Όμως υπάρχει αλληλεπίδραση της ροπής με την φέρουσα ικανότητα του υποστυλώματος στο δεξιό κόμβο και για αυτό παρατηρείται ότι χάνεται η σχέση μήκους λικνιζόμενου τοιχείου και ροπής (βλέπε διάγραμμα 6.18).



Διάγραμμα 6.17: Ροπή κάμψης της δοκού στο σημείο υποχώρησης του τοιχείου



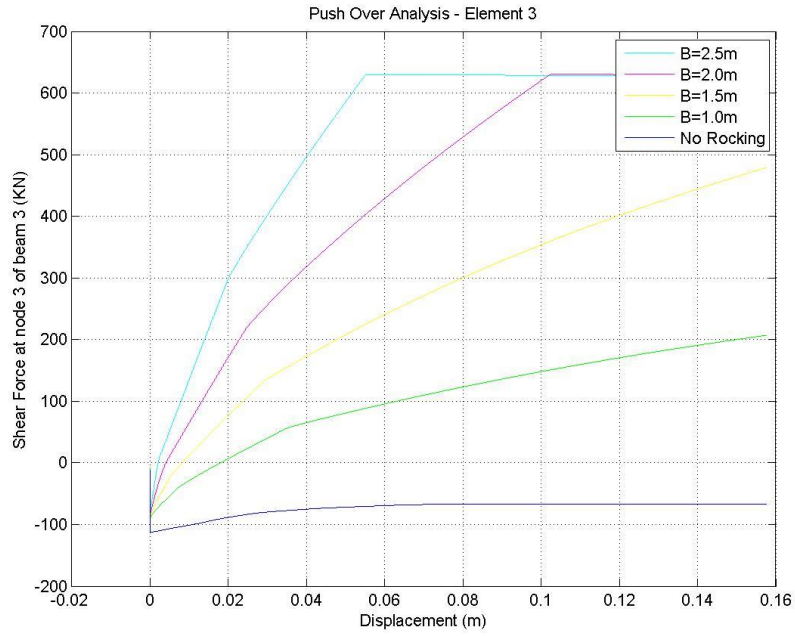
Διάγραμμα 6.18: Ροπή κάμψης της δοκού στο σημείο υποχώρησης του τοιχείου

### 6.6.5 Τέμνουσες δυνάμεις των δοκών

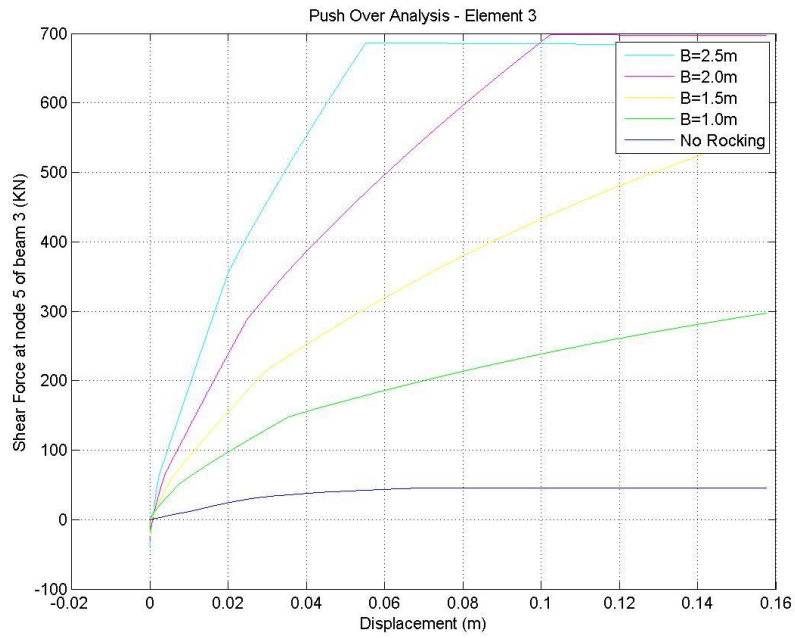
Η τέμνουσα δύναμη της δοκού στο αριστερό άκρο (κόμβος 3) είναι ίση με την αξονική δύναμη του υποστυλώματος 1 (αριστερό) λόγω ισορροπίας κόμβου. Το ίδιο ισχύει και για την τέμνουσα δύναμη στον δεξιό κόμβο (κόμβος 4) όπου ισούται με την αξονική δύναμη του υποστυλώματος 2 (δεξιό υποστυλωμα).

Όπως έχει αναφερθεί πολλές φορές πολύ σημαντικό μέγεθος που ίσως να καθορίσει την διαστασιολόγηση της δοκού είναι η τέμνουσα δύναμη στο σημείο ανασήκωσης του τοιχείου κατά τον λικνισμό. Από το διάγραμμα 6.17 παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερο σε μήκος είναι το τοιχείο τόσο μεγαλύτερη τέμνουσα δύναμη ασκείται στην δοκό στο σημείο αυτό για συγκεκριμένη μετατόπιση. Να σημειωθεί ότι η αύξηση του μήκους του τοιχείου αυξάνει τις τέμνουσες σε όλη τη δοκό και ιδιαίτερα στον αριστερό κόμβο όπου η τέμνουσα εκεί είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την τέμνουσα στον κόμβο 5.

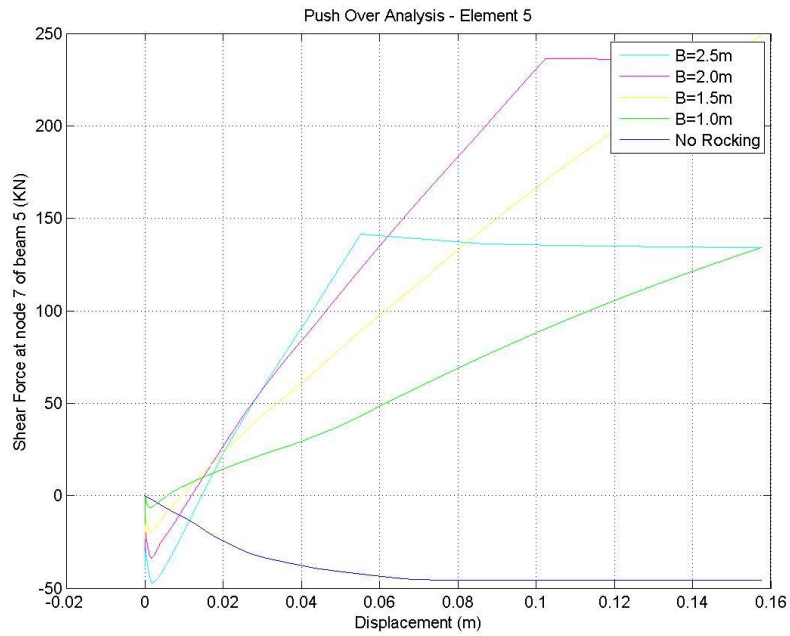
Στο σεισμό όμως δεν θα αναπτυχθούν ίσες μετατοπίσεις για πλαίσια που ενισχύονται με διαφορετικού μήκους λικνιζόμενα μέλη. Άρα, θα πρέπει να καθοριστούν οι αναπτυσσόμενες μετατοπίσεις των πλαισίων για να καθοριστεί η επίδραση του μήκους στο τοιχείο. Η απαίτηση αυτή θα διερευνηθεί στο επόμενο κεφάλαιο.



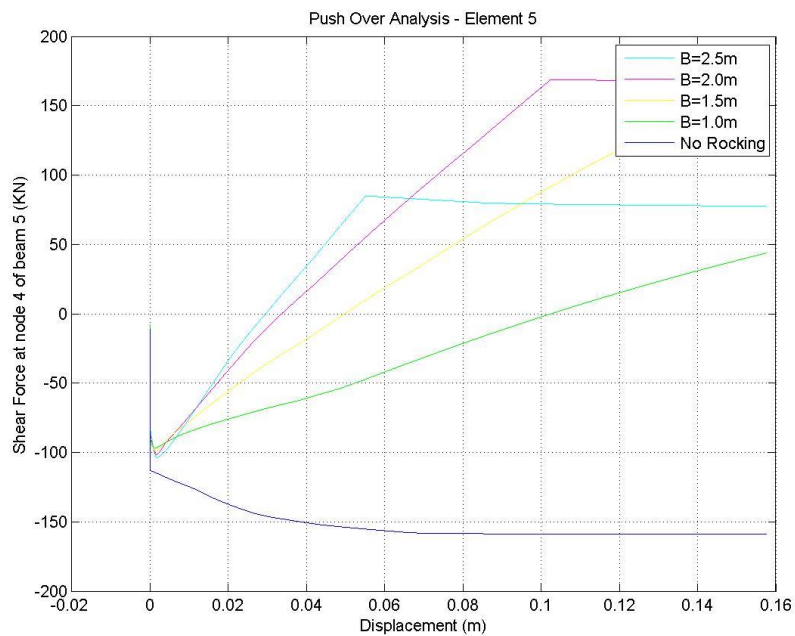
Διάγραμμα 6.19: Τέμνουσα δύναμη στην δοκό στον αριστερό κόμβο



Διάγραμμα 6.20: Τέμνουσα δύναμη στην δοκό στο σημείο ανασήκωσης του τοιχείου



Διάγραμμα 6.21: Τέμνουσα δύναμη στην δοκό στο σημείο υποχώρησης του τοιχείου



Διάγραμμα 6.22: Τέμνουσα δύναμη στην δοκό στον δεξιό κόμβο

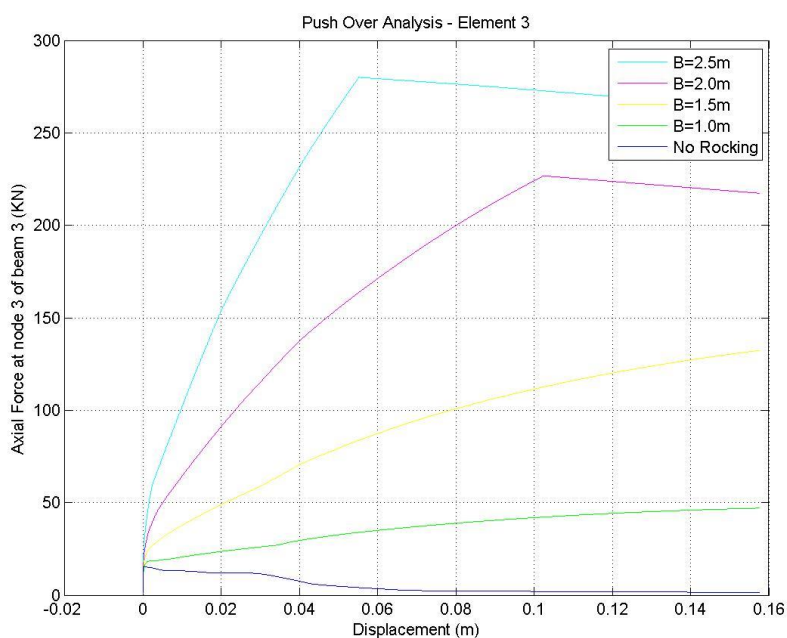
### 6.6.6 Αξονικές δυνάμεις των δοκών

Αρχικά να σημειωθεί ακόμα μία φορά ότι σε πραγματικό κτήριο από οπλισμένο σκυρόδεμα οι δοκοί δεν φέρουν αξονική δύναμη γιατί αυτή διαχέετε μέσα στην πλάκα. Παρόλα αυτά,

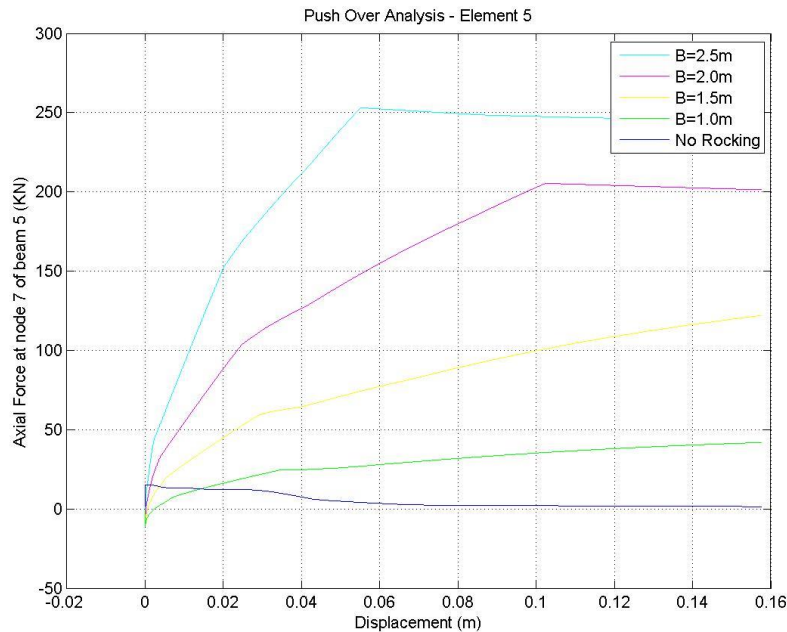
οι αξονικές δυνάμεις των δοκών που προέκυψαν και οφείλονται σε λάθος του μοντέλου, παρουσιάζονται έτσι ώστε να είναι δυνατή και η επεξήγηση της επιρροή τους.

Είναι εμφανές από τα διαγράμματα 6.20 και 6.21 ότι η αξονική της δοκού επηρεάζεται πάρα πολύ από το μήκος του τοιχείου. Η αξονική της δοκού που βρίσκεται αριστερά του τοιχείου αυξάνεται όσο το πλάτος το τοιχείο αποκτά μεγαλύτερο μήκος. Αυτό προκύπτει συνδυάζοντας 2 προαναφερθείσες παρατηρήσεις. Η πρώτη αφορά την αύξηση της ικανότητας του πλαισίου να φέρει οριζόντια δύναμη για μεγαλύτερα τοιχεία. Η δεύτερη παρατήρηση είναι ότι η τέμνουσα του υποστυλώματος 1 μειώνεται πολύ με την αύξηση του μήκους του λικνιζόμενου τοιχείου (βλέπε διάγραμμα 6.13). Έτσι από ισορροπία του αριστερού κόμβου (κόμβος 3) προκύπτει ότι όσο αυξάνεται η οριζόντια δύναμη τόσο αυξάνεται και η θλίψη της δοκού.

Τα ίδια ακριβώς ισχύουν για την αξονική της δοκού που βρίσκεται δεξιά του τοιχείου. Με την διαφορά ότι η δοκός αυτή εφελκύεται ενώ η δοκός δεξιά του τοιχείου θλίβεται. Σημειώνεται ότι στην ανάλυση Pushover υπάρχουν δύο οριζόντιες δυνάμεις που αυξάνονται. Η μία βρίσκεται στον αριστερό κόμβο και η άλλη στον δεξιό κόμβο του πλαισίου.



Διάγραμμα 6.23: Αξονική δύναμη της αριστερής δοκού (στοιχείο 3)



Διάγραμμα 6.24: Αξονική δύναμη της δεξιά δοκού (στοιχείο 5)

## 6.7 Συμπεράσματα

Από το παρόν κεφάλαιο έγινε σαφές ότι το μήκος του λικνιζόμενου τοιχείου επηρεάζει πολύ τη γενική συμπεριφορά του πλαισίου όταν σε αυτό ασκηθεί οριζόντια δύναμη σεισμού.

Από το διάγραμμα 6.1 παρατηρήσαμε την μεγάλη αύξηση της φέρουσας ικανότητας του πλαισίου σε οριζόντια φορτία. Παρατηρήσαμε επίσης από το διάγραμμα 6.4 ότι όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος του τοιχείου τόσο οι πλαστικές αρθρώσεις δημιουργούνται με μεγαλύτερη διαφορά οριζόντιας δύναμης μεταξύ τους. Αυτό δίνει καταρχάς μεγάλη δυσκαμψία στο πλαίσιο ακόμα και για μεγάλα σεισμικά φορτία. Έτσι το τοίχειο περιορίζει σημαντικά τις ζημιές στα υποστυλώματα και στις δοκούς ακόμα και για μεγάλες οριζόντιες δυνάμεις.

Παρατηρώντας επίσης τα διαγράμματα 6.2 και 6.3 συμπεραίνουμε ότι όσο αυξάνεται το μήκος του τοιχείου και άρα αυξάνεται και η δυσκαμψία του, ο λικνισμός του αρχίζει για μεγαλύτερη τέμνουσα βάση αλλά σε μικρότερη μετακίνηση.

Αναμενόμενο είναι ότι και το ίδιο το λικνιζόμενο τοίχειο επηρεάζεται από το μήκος του. Βάσει των διαγράμματα 6.5, 6.6 και 6.7, η αξονική δύναμη, η τέμνουσα δύναμη και η ροπή κάμψης που προκύπτουν από τις αντιδράσεις στήριξης είναι μεγαλύτερες όσο μεγαλύτερο είναι το τοίχειο. Σημειώνεται ότι η αύξηση των τριών εντατικών του μεγεθών είναι περίπου ανάλογη με την αύξηση του μήκους. Σημειώνεται ότι το μεγαλύτερο τοίχειο απαιτεί πολύ περισσότερη θλιπτική δύναμη για αν λειτουργήσει σωστά και αυτό έχει σοβαρό αντίκτυπο στις ροπές αντοχής των υποστυλωμάτων.

Όπως αναφέρθηκε, όσο αυξάνεται το μήκος του τοιχείου μειώνεται η ροπή αντοχής των δύο υποστυλωμάτων και ιδιαίτερα του υποστυλώματος 1. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της εφελκυστικής δύναμης των υποστυλωμάτων, με την διαφορά ότι στο υποστυλώμα 1 αναπτύσσεται πολύ μεγαλύτερη αξονική δύναμη. Αυτό παρατηρείται και στο σχήμα 6.4 όπου η αύξηση του μήκους του τοιχείου προκαλεί γρηγορότερη πλαστικοποίηση της κορυφής του υποστυλώματος 1 σε σχέση με το υποστυλώμα 2. Τέλος, καθώς το πλάτος του τοιχείου αυξάνεται, η τέμνουσα των υποστυλωμάτων μειώνεται αφού είναι συνδεδεμένη άμεσα με την ροπή. Έτσι, συνδυάζοντας τις 2 προηγούμενες παραγράφους παρατηρείται ότι όσο αυξάνει το μήκος του λικνιζόμενου τοιχείου, αυτό αναλαμβάνει όλο και μεγαλύτερο ποσοστό της τέμνουσας και ροπής βάσης.

Σημαντικό επίσης είναι πως για συγκεκριμένη μετατόπιση κορυφής όσο αυξάνει το μήκος του τοιχείου, τόσο αυξάνει και το μήκος της βάσης που παραμορφώνεται, αφού ασκούνται σε αυτό μεγαλύτερα εντατικά μεγέθη. Έτσι κρίνεται αναγκαίο να υπολογισθούν αναπτυσσόμενες μετακινήσεις των διαφορετικών αυτών πλαισίων για να διαπιστωθεί αν το μήκος του τοιχείου εκτείνει τις ζημιές σε μεγαλύτερο μήκος της βάσης του.

Στη δοκό, το σημαντικότερο μέγεθος που επηρεάζεται από το μήκος του τοιχείου είναι η τέμνουσα στο σημείο ανασήκωσης του τοιχείου, αλλά όμως η ροπή στο σημείο αυτό είναι εξίσου ή ακόμη περισσότερο σημαντική. Καθώς μεγαλώνει το μήκος αυτό, η ροπή της δοκού στο σημείο διεπιφάνειας της με το λικνιζόμενο τοιχείο αυξάνεται και επηρεάζει και το υπόλοιπο πλαίσιο αφού όλο και περισσότερο μήκος δοκού εφελκύεται. Έτσι στον αριστερό κόμβο όπου η ροπή είναι θετική τείνει να μειωθεί ενώ στο δεξιό κόμβο αυξάνει. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι η αύξηση του μήκους του τοιχείου καθυστερεί σε σχέση με την αύξηση της μετατόπισης κορυφής, την διαρροή του αριστερού κόμβου. Όπως αναφέρθηκε λόγω της αλληλεπίδρασης της αξονικής δυνάμεως με την ροπή αντοχής, η κορυφή του υποστυλώματος 1 πλαστικοποιείται πρώτη.



## **Ανελαστικές αναλύσεις μονώροφου πλαισίου υπό το σεισμό σχεδιασμού παραμετροποιημένες ως προς την ποιότητα σκυροδέματος του λικνιζόμενου τοιχείου**

### **7.1 Εισαγωγή**

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρατηρήθηκε η γενική μεταβολή της συμπεριφορά των πλαισίων τα οποία ενισχύονται με διαφορετικό μήκος λικνιζόμενου τοιχείου. Η συγκρίσεις έγιναν για συγκεκριμένη μετατόπιση όλων των πλαισίων, όμως στην πραγματικότητα ο σεισμός δεν θα αναπτύξει διαφορετικές. Είναι γνωστό ότι η αύξηση του μήκους του τοιχείου επηρεάζει την δυσκαμψία και έτσι οι μετακινήσεις δεν θα είναι ίδιες μεταξύ των διάφορων πλαισίων όταν σε αυτά συμβεί ο σεισμός σχεδιασμού. Έτσι γίνεται αναγκαίο η σύγκριση να γίνει στα αποτελέσματα λόγω του σεισμού που προκύπτουν μέσα από τις αναλύσεις.

Σκοπός του κεφαλαίου είναι η ποσοτικοποίηση της επιρροής του μήκους του λικνιζόμενου τοιχείου που έχει στη γενική και τοπική συμπεριφορά του πλαισίου και των μελών του. Θα μελετηθούν η μεταβλητότητα των μετακινήσεων, πλαστιμοτήτων καθολικών και τοπικών, εντατικά μεγέθη, καμπυλότητες και παραμορφώσεις. Στο προηγούμενο κεφάλαιο (κεφάλαιο 6) έγινε αντιληπτό ότι το μήκος του τοιχείου επηρεάζει πολλά από τα πιο πάνω, όμως η σύγκριση αυτή όπως αναφέρθηκε δεν είναι αντιπροσωπευτική ως προς την απόκριση των πλαισίων στο σεισμό σχεδιασμού.

Τα δεδομένα της ανάλυσης Pushover επεξεργάζονται σύμφωνα με την μέθοδο atc-40 όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4, από την οποία προκύπτουν οι μέγιστες μετακινήσεις, μετακινήσεις διαρροής και οι αντίστοιχες επιταχύνσεις και τέμνουσες βάσης. Με βάση αυτά υπολογίζονται όλα τα εντατικά μεγέθη που αντιστοιχούν στα συγκεκριμένα αποτελέσματα.

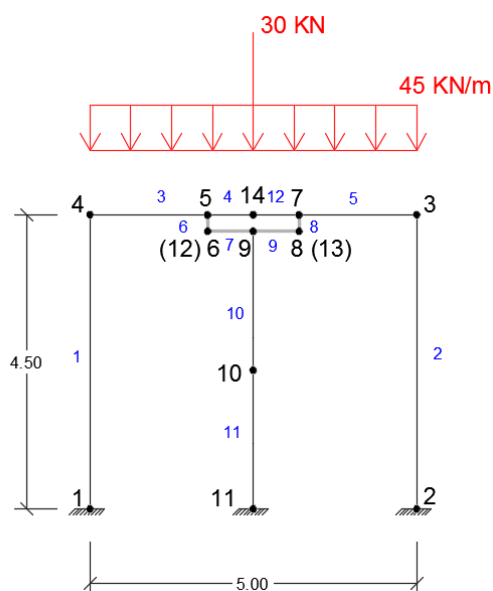
Παρουσιάζονται δύο διαφορετικές αναλύσεις με διαφορετική αρχική διαστασιολόγηση του μη ενισχυμένου πλαισίου. Τα υποστυλώματα διαστασιολογήθηκαν με συντελεστή συμπεριφοράς 3 και 6.. Και τα δύο πλαίσια αναφέρονται σε καινούριες κατασκευές με την διαφορά ότι το πλαίσιο που σχεδιάστηκε με συντελεστή συμπεριφοράς  $q=6$  αναφέρεται σε υποδιαστασιολογημένη κατασκευή. Συγκρίσεις θα γίνουν επίσης μεταξύ των δύο πλαισίων, αν σε αυτά συμβεί ο σεισμός σχεδιασμού ζώνης σεισμικής επικινδυνότητας Z2 και Z3 με εδαφικές επιταχύνσεις 0.24g και 0.36g αντίστοιχα.

Να σημειωθεί ότι όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αναφέρονται στο μονοβάθμιο σύστημα που όμως ταυτίζεται και με το συγκεκριμένο πολυβάθμιο αφού παρατηρώντας τις εξισώσεις 4.5 και 4.6 καταλήγουμε ότι οι συντελεστές  $\alpha$ ,  $\Gamma$  και  $\varphi_{top}$  είναι ίση με την μονάδα.

## 7.2 Γεωμετρία και παραδοχές

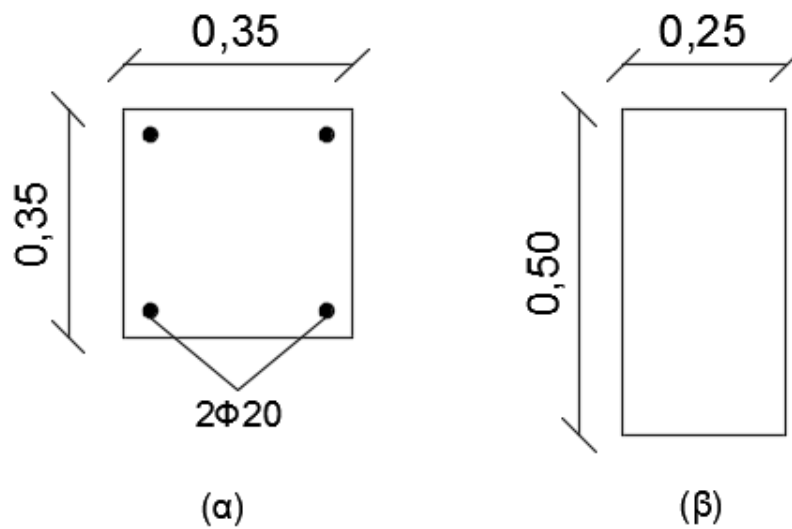
Το πλαίσιο που θα ελεγχθεί έχει τις ίδιες διαστάσεις με τις υπόλοιπες αναλύσεις στα προηγούμενα κεφάλαια όπως φαίνονται στην εικόνα 7.1.

Η ποιότητα σκυροδέματος όλων των μελών επιλέχθηκε να είναι C30 και το μέτρο ελαστικότητας 30GPa. Σε όλα τα ενισχυμένα πλαίσια θεωρήθηκε πάχος τοιχείου:  $W = 0.20\text{m}$

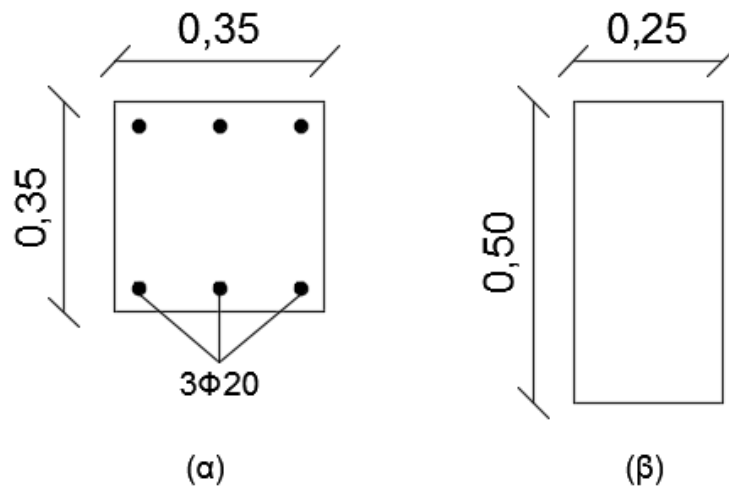


Εικόνα 7.1: Γεωμετρία του υπό μελέτη πλαισίου

Η διαστασιολόγηση των υποστυλωμάτων των δύο αναλύσεων γίνεται λαμβάνοντας υπόψη συντελεστές συμπεριφοράς 3 και 6. Επίσης οι δοκοί επιλέχθηκαν να είναι ελαστικές, για τον λόγο ότι στην πραγματικότητα θα ενισχυθούν ώστε να μην διαρρεύσουν κυρίως στο μέσο όπου βρίσκεται το λικνιζόμενο τοιχείο, αντιστοίχως με το κεφάλαιο 3.1, 5.1 και 6.1. Οι τελικές διαστάσεις των υποστυλωμάτων και των δοκών φαίνονται στις πιο πάνω εικόνες.



Εικόνα 7.2: Διαστασιολόγηση για συντελεστή συμπεριφοράς  $q=6$  (α) υποστρωμάτων, (β) δοκού



Εικόνα 7.3: Διαστασιολόγηση για συντελεστή συμπεριφοράς  $q=3$  (α) υποστρωμάτων, (β) δοκού

### 7.3 Αναλύσεις για πλαίσια διστασιολογημένα με συντελεστή συμπεριφοράς $q=3$

Στην παράγραφο αυτή γίνεται διερεύνηση της επιρροής του πλάτους του λικνιζόμενου τοιχείου σε ανελαστικό πλαίσιο κατά την κατασκευή του. Λαμβάνονται ασφαλή συμπεράσματα για τα πλεονεκτήματα που δέχεται κάθε μέλος αλλά και η γενική συμπεριφορά του πλαισίου με την αύξηση του μήκους του τοιχείου.

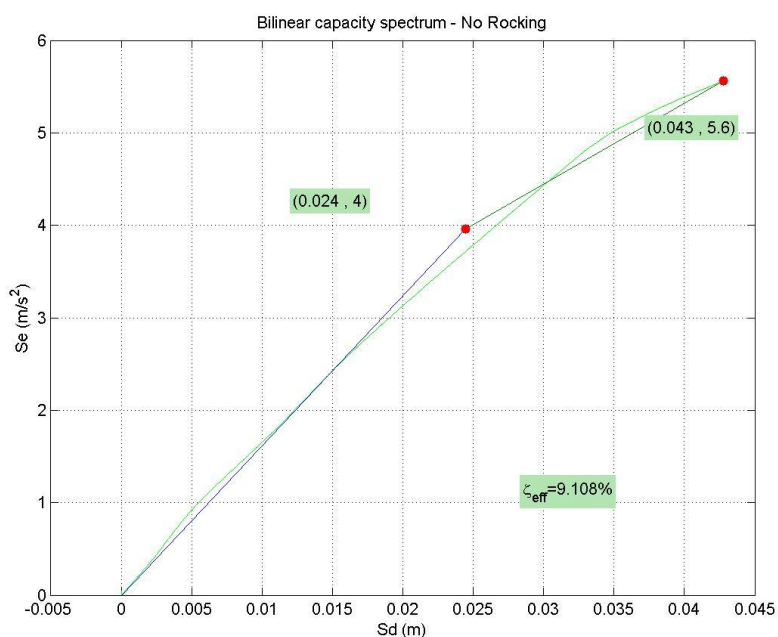
### 7.3.1 Υπολογισμός στοχευόμενων μετατοπίσεων, ενεργούς απόσβεσης και διγραμμικοποίησης της καμπύλης ικανότητας

Υπολογίζονται όλες οι στοχευόμενες μετακινήσεις σε όλα τα πλαίσια με διαφορετικό μήκος τοιχείου. Επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο atc-40 μέσα από την οποία προκύπτουν η ενεργός απόσβεση, η διγραμμικοποίηση του φάσματος ικανότητας, η μετακίνηση διαρροής και η μέγιστη αναπτυσσόμενη μετακίνηση του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος. Τα αποτελέσματα αυτά ανάγονται στα πραγματικά που όπως αναφέρθηκε συμπίπτουν.

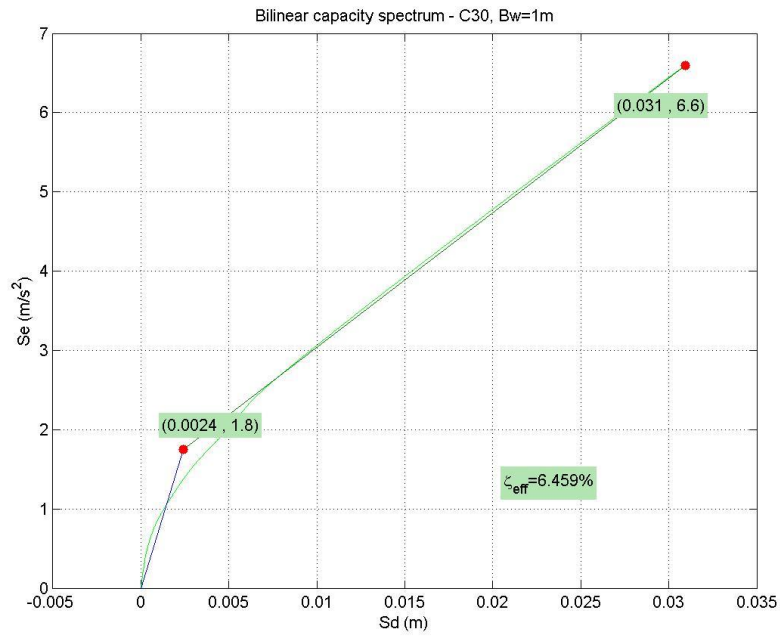
Η διγραμμικοποίηση πραγματοποιήθηκε θεωρώντας τις 2 ακόλουθες συνθήκες:

- (α) Η διγραμμικοποίηση να γίνεται μέχρι το σημείο μέγιστης μετατοπίσεως
- (β) Η διγραμμικοποίηση να τέμνει το φάσμα ικανότητας στο  $0.6\alpha_y$ .

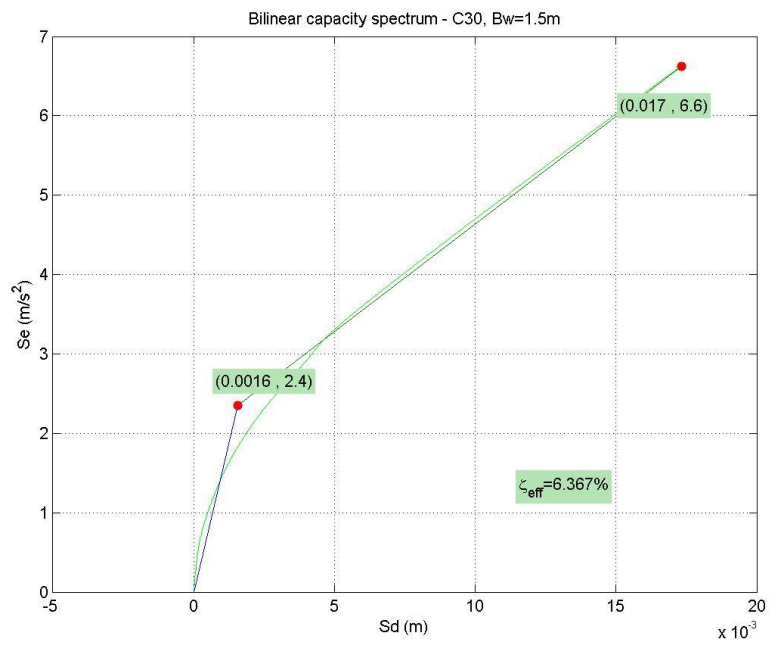
Στα επόμενα διαγράμματα φαίνονται τα σχετικά αποτελέσματα των αναλύσεων:



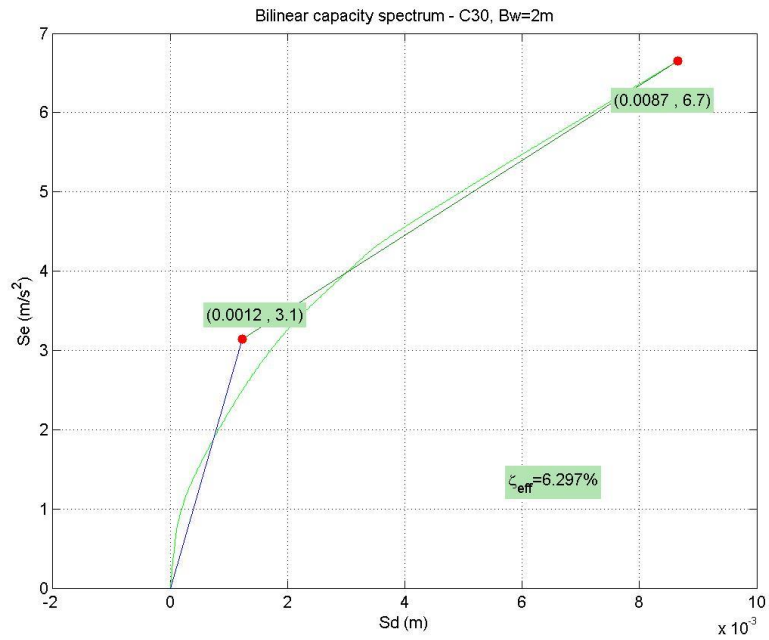
Διάγραμμα 7.1: Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας πλαισίου χωρίς λικνιζόμενο τοιχείο



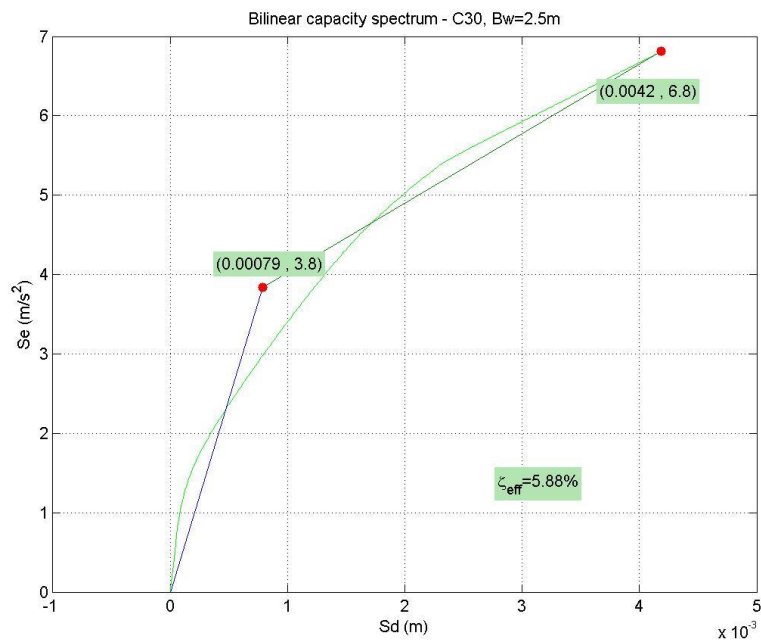
Διάγραμμα 7.2: Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας πλαισίου με λικνιζόμενο τοίχειο μήκους 1.0m



Διάγραμμα 7.3: Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας πλαισίου με λικνιζόμενο τοίχειο μήκους 1.5m

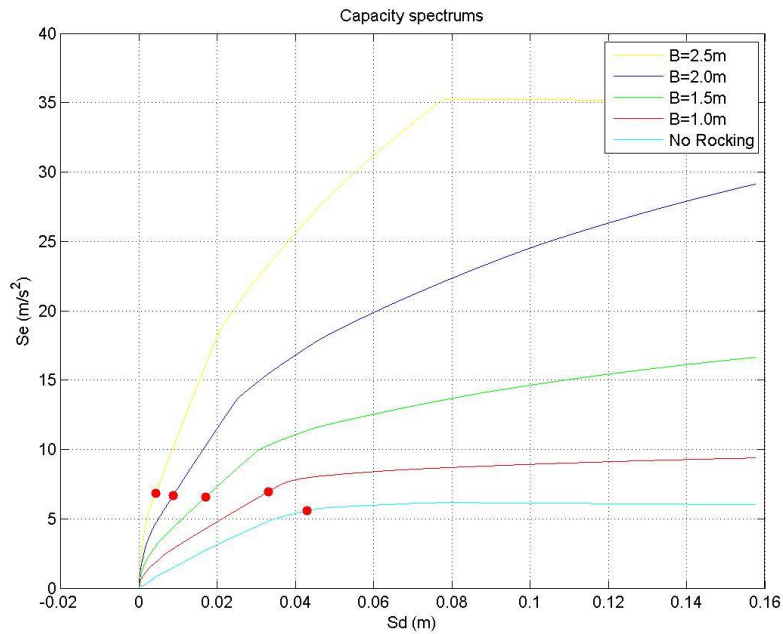


Διάγραμμα 7.4: Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας πλαισίου με λικνιζόμενο τοίχειο μήκους 2.0m



Διάγραμμα 7.5: Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας πλαισίου με λικνιζόμενο τοίχειο μήκους 2.5m

Στο πιο κάτω διάγραμμα συνοψίζονται τα φάσματα ικανότητας και σημειώνεται σε κάθε ένα η μέγιστη μετατόπιση που αναπτύσσεται στο σεισμό σχεδιασμού.



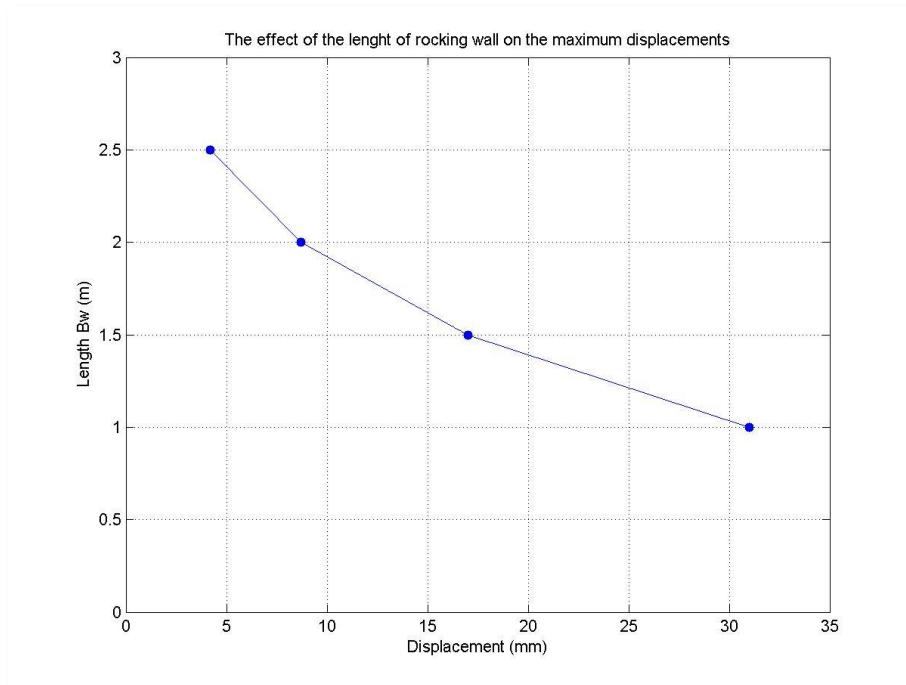
Διάγραμμα 7.6: Φάσματα ικανότητας πλαισίων με διαφορετικό μήκος λικνιζόμενου τοιχείου, με την μέγιστη μετατόπιση

Στον πιο κάτω πίνακα συνοψίζονται τα αποτελέσματα των πιο πάνω διαγραμμάτων:

Πίνακας 7.1: Μετακινήσεις κορυφής και ενεργός απόσβεση του ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή

Πλάτος λικνιζόμενου τοιχείου (m)	Μέγιστη μετακίνηση κορυφής (mm)	Μετακίνηση διαρροής $d\gamma$ (mm)	$\zeta_{eff}$ (%)
Χωρίς τοιχείο	43	24	9.11
1.00	31	2.4	6.46
1.50	17	1.3	6.37
2.00	8.7	1.2	6.30
2.50	4.2	0.79	5.88

Από τα πιο πάνω διαγράμματα και πίνακα γίνεται εμφανές η μείωση των μετακινήσεων της κορυφής των πλαισίων καθώς το μήκος του λικνιζόμενου τοιχείου αυξάνεται. Η μεταβολή αυτή δεν είναι γραμμική αλλά γίνεται πιο έντονη όσο αυξάνεται το μήκος του τοιχείου όπως φαίνεται στο πιο κάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 7.7: Επιρροή του μήκους του τοιχείου στη μέγιστη μετατόπιση

Επίσης όσο αυξάνει το μήκος του λικνιζόμενου μειώνεται και η μετακίνηση διαρροής. Συγκρίνοντας τα διαγράμματα 7.1 με 7.5 παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερο το τοίχιο τόσο η θεωρητική διαρροή του πλαισίου συμβαίνει σε πολύ πιο δύσκαμπτη περιοχή. Η περιοχή αυτή είναι η "διαρροή" του τοιχείου που είναι στην αρχή του λικνισμού του. Αυτό θα έχει και μεγάλη επίπτωση στην γενική πλαστιμότητα του πλαισίου.

Ακόμη, η ενεργός απόσβεση του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος μειώνεται καθώς αυξάνει το μήκος του λικνιζόμενου τοιχείου, αφού τα υποστυλώματα συμμετέχουν πιο λίγο στην υστερητική απόσβεση λόγω της μικρότερης πλαστικοποίησης των ινών τους.

### 7.3.2 Αντιδράσεις, καμπυλότητα και παραμόρφωση που αναπτύσσονται στη βάση του λικνιζόμενου τοιχείου λόγω σεισμού σχεδιασμού

Προσδιορίζεται η μεταβολή των εντατικών μεγεθών που αναπτύσσονται στη βάση του λικνιζόμενου τοιχείου συναρτήσει του μήκους του. Επίσης υπολογίζεται σε όλες τις αναλύσεις η καμπυλότητα η οποία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της παραμόρφωσης στην ακραία ίνα της βάσης του λικνιζόμενου τοιχείου. Όπως αναφέρθηκε είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της παραμόρφωσης του λικνιζόμενου τοιχείου καθώς αποτελεί ένα δείκτη προσδιορισμού των ζημιών στη βάση του τοιχείου. Σημειώνεται όμως ότι οι παραμορφώσεις είναι απλά ενδεικτικές αφού δεν μπορούν να αναπτυχθούν λόγω της ανελαστικότητας του υλικού.

Το λικνιζόμενο τοίχιο δεν έχει την ίδια συμπεριφορά με το συμβατικό, καθώς κατά τον λικνισμό του μέρος της βάσης του αποκολλάται. Αυτό το μέρος που δεν έχει επαφή με την υποδομή και δεν αναπτύσσει κανένα εντατικό μέγεθος. Σε αντίθεση με το μέρος της βάσης



που έχει επαφή με την υποδομή παραμορφώνεται και αναλαμβάνει όλα τα εντατικά μεγέθη.

Η καμπυλότητα και η παραμόρφωση της θλιβόμενης περιοχής της βάσης υπολογίζεται από τις σχέσεις 5.7 μέχρι 5.11. Τα υπόλοιπα μεγέθη υπολογίζονται με βάση την υπολογισθείσα μέγιστη μετατόπιση, δηλαδή ευρίσκονται από τις αναλύσεις Pushover τα εντατικά μεγέθη που αντιστοιχούν στην μέγιστη μετακίνηση.

Στον πιο κάτω πίνακα παρουσιάζονται τα εντατικά μεγέθη, η καμπυλότητα και η παραμόρφωση στη βάση του λικνιζόμενου στοιχείου.

Πίνακας 7.2: Παραμορφώσεις και καμπυλότητες στη βάση του τοιχείου

Πλάτος λικνιζόμενου τοιχείου (m)	Αξονική δύναμη N (KN)	Τέμνουσα δύναμη Q (KN)	Ροπή κάμψης M (KNm)	Καμπυλότητα 1/r (1/m)	Παραμόρφωση
1.00	-241.35	52.74	115.82	0.7303	0.0299
1.50	-274.32	92.75	199.47	0.5386	0.0251
2.00	-256.33	117.46	250.84	0.1306	0.0061
2.50	-232.97	133.62	286.45	0.0323	0.0018

Στον πιο πάνω πίνακα γίνεται εμφανές ότι η τέμνουσα και η ροπή στη βάση του λικνιζόμενου τοιχείου αυξάνουν όσο το μήκος του αυξάνει. Σημαντική παρατήρηση είναι ότι η αξονική δύναμη του τοιχείου αυξάνει όταν το μήκος αυτού είναι μέχρι 1.5m και από εκεί και πέρα η αύξηση του μήκους προκαλεί πτώση της αξονικής δύναμης. Δηλαδή όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 6.5 για τόσο μικρές μετατοπίσεις το τοίχιο δεν χρειάζεται μεγάλη αξονική δύναμη για να λειτουργήσει αφού δεν έχει αναπτυχθεί έντονα ο λικνισμός. Έτσι καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι μεγάλοι μήκους τοιχεία σε σχέση με το άνοιγμα του πλαισίου αναλαμβάνουν μικρότερη αξονική δύναμη. Πάντως η επιρροή του μήκους του τοιχείου στην αξονική του είναι μικρή και δεν πρόκειται να καθορίσει την επιλογή του μήκους του.

Η αύξηση της ροπής και της τέμνουσας του τοιχείου συναρτήσει της αύξησης του μήκους του, οφείλεται σε δύο παράγοντες. Πρώτα η αύξηση του πλάτους του τοιχείου κάνει το πλαίσιο πιο δύσκαμπτό άρα ασκούνται σε αυτό μεγαλύτερες σεισμικές δυνάμεις (αναπτύσσει μικρότερη απόσβεση), και κατά δεύτερο η μεγάλη δυσκαμψία του τοιχείου έλκει την περισσότερη ένταση.

Αυτό όμως δεν αποδεικνύει την σπουδαιότητα του μήκους του τοιχείου. Πρέπει να μελετηθούν οι τάσεις που προκαλούνται από αυτά τα μεγέθη, αλλά ακόμα σημαντικότερο τι παραμορφώσεις αναπτύσσονται. Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται όλες οι πληροφορίες που απαιτούνται για να ληφθεί πιο ολοκληρωμένη αντίληψη για το πως επηρεάζει το ίδιο το τοίχιο η αύξηση του μήκους του.

Πίνακας 7.3: Περιγραφή τάσεων στη βάση του τοιχείου με ποσοστά

Πλάτος λικνιζόμενου τοιχείου (m)	Ποσοστό της βάσης που ανασηκώνεται (%)	Ποσοστό της βάσης που θλίβεται (%)	Ποσοστό της βάσης που πλαστικοποιείται (%)	Ποσοστό της βάσης που παραμένει ελαστικό (%)	Ποσοστό της θλιβόμενης περιοχής που πλαστικοποιείται (%)
1.00	95.91	4.09	3.95	0.14	96.65
1.50	96.89	3.11	2.99	0.12	96.02
2.00	97.67	2.33	1.94	0.38	83.55
2.50	97.83	2.17	0.93	1.24	42.98

Πίνακας 7.4: Περιγραφή τάσεων στη βάση του τοιχείου με μονάδες μήκους

Πλάτος λικνιζόμενου τοιχείου (m)	Μήκος της βάσης που ανασηκώνεται (m)	Μήκος της βάσης που θλίβεται (m)	Μήκος της βάσης που πλαστικοποιείται (m)	Μήκος της βάσης που παραμένει ελαστικό (m)
1.00	0.959	0.041	0.040	0.001
1.50	1.453	0.047	0.045	0.002
2.00	1.953	0.047	0.039	0.008
2.50	2.446	0.054	0.023	0.031

Από τον πίνακα 7.3 γίνεται αντιληπτό ότι όσο το μήκος του τοιχείου αυξάνεται τόσο μικρότερο ποσοστό της βάσης θλίβεται και μεγαλύτερο ανασηκώνεται, αν και τα μήκη ως μεγέθη είναι παρόμοια. Σημαντικότερο όμως είναι η μεταβλητότητα του ποσοστού της βάσης που πλαστικοποιείται. Το τελευταίο μειώνεται πολύ όσο αυξάνει το μήκος του λικνιζόμενου τοιχείου. Παράλληλα το ποσοστό και το μήκος της θλιβόμενης περιοχής που παραμένει ελαστικό μεγαλώνει. Πολύ σημαντικό είναι ότι ενώ για μικρού μήκους τοιχεία πλαστικοποιείται σχεδόν όλη η παραμορφωμένη βάση, για μεγάλου μήκους τοιχεία μόνο ένα ποσοστό της τάξης των 45% πλαστικοποιείται. Παρατηρείται στο συγκεκριμένο πλαίσιο με τις συγκεκριμένες διαστάσεις ότι το μήκος τοιχείου μεγαλύτερο των 2 μέτρων προκαλεί μεγάλη μείωση του μήκους πλαστικοποίησης.

Για τον λόγο αυτό μειώνονται και πολύ η καμπυλότητα και η μέγιστη παραμόρφωση της ακραίας ίνας της θλιβόμενης βάσης του τοιχείου. Δηλαδή οι δύο αυτές παράμετροι μειώνονται πάρα πολύ για μήκος τοιχείου άνω των 2 μέτρων. Άρα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι για κάθε πλαίσιο υπάρχει ένα συγκεκριμένο ελάχιστο μήκος τοιχείου το οποίο γίνεται πολύ αποτελεσματικό σε σχέση με την μείωση των ζημιών στη βάση του στο σεισμό σχεδιασμού. Για γενίκευση αυτού του συμπεράσματος θα πρέπει να ελεγχθούν διάφορα πλαίσια με διαφορετική γεωμετρία.

### 7.3.3 Διερεύνηση επιρροής μήκους λικνιζόμενου τοιχείου στα υποστυλώματα, τη δοκό και στις πλαστιμότητες

Όπως είδαμε και στο κεφάλαιο 5, το λικνιζόμενο τοίχιο βοηθάει πολύ τα υποστυλώματα αφού περιορίζει την πλαστιμότητα τους, άρα βελτιώνει και την ομαλή λειτουργία της κατασκευής.

Στο παρόν κεφάλαιο υπολογίζεται για κάθε πλαίσιο η γενική πλαστιμότητα για την οποία θέτει όρια ο αντισεισμικός κανονισμός. Πιο σημαντική όμως είναι η τοπική πλαστιμότητα των υποστυλωμάτων καθώς αυτά ίσως καθορίσουν την συμπεριφορά της κατασκευής σε μία σεισμική διέγερση του εδάφους.

Τα εντατικά μεγέθη των υποστυλωμάτων και των δοκών είναι χρήσιμα για να αντιληφθούμε πως κατανέμονται τα επιπλέον εντατικά μεγέθη που δέχεται η κατασκευή στο σεισμό όταν αυξηθεί το μήκος του τοιχείου.

#### 7.3.3.1 Υπολογισμός εντατικών μεγεθών στα υποστυλώματα του πλαισίου

Τα υποστυλώματα ενός πλαισίου καθορίζουν την συμπεριφορά του και για αυτό τον λόγο πρέπει να προσδιοριστεί κατά πόσο τα εντατικά μεγέθη τους επηρεάζονται από την αύξηση του μήκους του τοιχείου.

Ο υπολογισμός των εντατικών μεγεθών που αναπτύσσονται στα υποστυλώματα γίνεται με βάση τη μέθοδο atc-40. Η στοχευόμενη μετακίνηση κορυφής που υπολογίζεται όπως έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο 7.3.1, αντιστοιχεί σε συγκεκριμένα εντατικά μεγέθη των υποστυλωμάτων όπως φαίνεται από τα διαγράμματα του κεφαλαίου 6.6.

Στον πιο κάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές των εντατικών μεγεθών του κάθε υποστυλώματος:

Πίνακας 7.5: Εντατικά μεγέθη υποστυλωμάτων στο σεισμό σχεδιασμού

Πλάτος λικνιζόμενου τοιχείου (m)	Υποστύλωμα 1				Υποστύλωμα 2			
	N (KN)	Q (KN)	M <sub>βάσης</sub> (KNm)	M <sub>κορυφής</sub> (KNm)	N (KN)	Q (KN)	M <sub>βάσης</sub> (KNm)	M <sub>κορυφής</sub> (KNm)
Χωρίς τοίχιο	-59.44	52.95	139.41	98.85	-166.31	74.71	167.83	168.34
1.00	63.73	47.33	109.1	103.87	-70.17	48.95	117.79	102.51
1.50	76.95	26.91	60.05	61.03	-61.85	30.35	71.7	64.85
2.00	63.72	11.84	26.6	26.68	-78.3	22.13	48.15	51.42
2.50	48.2	3.42	8.71	6.69	-97.96	19.05	37.21	48.5

Η αξονική δύναμη των δύο υποστυλωμάτων έχει την ίδια μεταβλητότητα ως προς το πλάτος, με αυτή που παρατηρήθηκε στην αξονική του τοιχείου. Δηλαδή τα υποστυλώματα αυξάνουν τον εφελκυσμό τους μέχρι πλάτος τοιχείου 1.5m και από εκεί και πέρα επιστρέφει περισσότερη θλίψη σε αυτά. Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό αν

παρατηρήσουμε τον πίνακα 7.1. Οι μέγιστες μετατοπίσεις οροφής είναι πολύ πιο μικρές για τα πλαίσια που είναι ενισχυμένα με τοιχείο μήκους 2m και άνω, και αυτός είναι ο λόγος που προκαλείται η μείωση στην εφελκυστική δύναμη. Βεβαίως, η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται από την συμπεριφορά της βάσης του τοιχείου που όπως αναφέρθηκε όταν το πλάτος του είναι μεγαλύτερο από 2m, η αξονική που απαιτεί για να λειτουργήσει ελαττώνεται.

Το πιο πάνω φυσικά έχει αλληλεπίδραση με όλα τα εντατικά μεγέθη του πλαισίου. Από τον πίνακα 7.5 φαίνεται ότι τα υποστυλώματα αναλαμβάνουν μικρότερη τέμνουσα δύναμη και ροπή κάμψης καθώς αυξάνεται το μήκος του τοιχείου. Αυτό οφείλεται βεβαίως στο ότι το πιο πλατύ τοιχείο προκαλεί μικρότερη μετακίνηση κορυφής του υποστυλώματος άρα και μικρότερη ροπή και τέμνουσα. Σύμφωνα με το διαγράμματα 6.9 και 6.10, αυτό ισχύει πριν την διαρροή των υποστυλωμάτων, έτσι είναι μία ένδειξη ότι τα υποστυλώματα ίσως να μην έχουν διαρρεύσει τουλάχιστο για αυτά που εντάσσονται στα πιο δύσκαμπτα πλαίσια. Επίσης η τάση αυτή των δύο μεγεθών να μειώνονται στην αύξηση του μήκους του λικνιζόμενου τοιχείου επαληθεύει την παρατήρηση του προηγούμενου υποκεφαλαίου, ότι δηλαδή το πιο πλατύ τοιχείο αυξάνει την δυσκαμψία του και έλκει μεγαλύτερη ένταση.

Πιο κάτω ακολουθούν πίνακες που δείχνουν τι ποσοστό της τέμνουσας και ροπής βάσης αναλαμβάνεται από το κάθε μέλος του πλαισίου, για να είναι δυνατή η σύγκριση του μεγέθους του κάθε μέλους με το συνολικό μέγεθος που δρα. Επίσης σκόπιμο είναι να συγκριθούν και οι τιμές των μεγεθών που αντιστοιχούν σε κάθε πλαίσιο και για αυτό παρουσιάζονται πίνακες που περιγράφουν την ανάληψη των συγκεκριμένων μεγεθών. Σημειώνεται πως παρουσιάζονται μόνο οι ροπές και τέμνουσες που δρουν στα μέλη λόγω της οριζόντιας δύναμης Pushover.

Πίνακας 7.6: Ποσοστό τέμνουσας βάσης που αναλαμβάνεται από κάθε μέλος

Πλάτος λικνιζόμενου τοιχείου (m)	Τέμνουσα βάση (KN)	Ποσοστό τοιχείου (%)	Ποσοστό υποστυλώματος 1 (%)	Ποσοστό υποστυλώματος 2 (%)
Χωρίς τοιχείο	127.66	-	54.78	45.22
1.00	148.83	35.44	40.12	24.57
1.50	149.56	62.02	26.15	12.14
2.00	150.24	78.18	15.86	6.75
2.50	153.80	86.88	9.84	4.77

Πίνακας 7.7: Μέγεθος τέμνουσας βάσης που αναλαμβάνεται από κάθε μέλος

Πλάτος λικνιζόμενου τοιχείου (m)	Τέμνουσα βάση (kN)	Τέμνουσα τοιχείου (kN)	Τέμνουσα υποστυλώματος 1 (kN)	Τέμνουσα υποστυλώματος 2 (kN)
Χωρίς τοίχιο	127.66	-	69.94	57.72
1.00	148.83	52.74	59.71	9.86
1.50	149.56	92.75	39.11	3.17
2.00	150.24	117.46	23.83	1.07
2.50	153.80	133.62	15.13	0.47

Πίνακας 7.8: Ποσοστό ροπή βάσης που αναλαμβάνεται από κάθε μέλος

Πλάτος λικνιζόμενου τοιχείου (m)	Ροπή βάσης (kNm)	Ποσοστό τοιχείου (%)	Ποσοστό υποστυλώματος 1 (%)	Ποσοστό υποστυλώματος 2 (%)	Ποσοστό από ζεύγος δυνάμεων (%)
Χωρίς τοίχιο	574.47	-	28.90	24.58	46.52
1.00	669.74	17.29	19.20	14.68	48.83
1.50	673.02	29.64	11.77	7.80	50.79
2.00	676.08	37.10	6.72	4.34	51.84
2.50	692.10	41.39	3.91	2.73	51.98

Πίνακας 7.9: Μέγεθος ροπή βάσης που αναλαμβάνεται από κάθε μέλος

Πλάτος λικνιζόμενου τοιχείου (m)	Ροπή βάσης (kNm)	Ροπή τοιχείου (kNm)	Ροπή υποστυλώματος 1 (kNm)	Ροπή υποστυλώματος 2 (kNm)	Ροπή από ζεύγος δυνάμεων (kNm)
Χωρίς τοίχιο	574.47	-	166.04	141.20	267.23
1.00	669.74	115.82	128.57	98.32	327.03
1.50	673.02	199.47	79.22	52.53	341.80
2.00	676.08	250.84	45.41	29.34	350.49
2.50	692.10	286.45	27.05	18.87	359.73

Πίνακας 7.10: Αξονική δύναμη που αναλαμβάνεται από τα υποστυλώματα

Πλάτος λικνιζόμενου τοιχείου (m)	Υποστύλωμα 1 (KN)	Υποστύλωμα 2 (KN)
Χωρίς τοιχείο	53.44	-53.44
1.00	153.60	-19.70
1.50	164.78	-25.98
2.00	148.58	-6.56
2.50	128.20	17.96

Από τον πιο πάνω πίνακα γίνεται πιο ξεκάθαρο αυτό που ήδη αναφέρθηκε σχετικά με την μεταβλητότητα της πρόσθετης αξονικής εφελκυστικής δύναμης των υποστυλωμάτων λόγω του οριζόντιου φορτίου.

Από τους πίνακες 7.6 και 7.8 παρατηρείται ότι όσο αυξάνει το μήκος του τοιχείου τόσο αυτό συμμετέχει περισσότερο στην παραλαβή της τέμνουσας και ροπής βάσης ενώ τα υποστυλώματα συμμετέχουν λιγότερο. Ενισχύεται δηλαδή η πιο πάνω άποψη ότι η διαφορά της ροπής και της τέμνουσας βάσης καθώς αυξάνεται το μήκος του τοιχείου αναλαμβάνεται κατά μεγάλο ποσοστό της από το τοιχείο.

Αν και το ποσοστό της ροπής βάσης που αναλαμβάνει το τοιχείο αυξάνει, παραμένει σχετικά μικρό. Έτσι, κρίνεται αναγκαία η διερεύνηση των ποσοστών ανάληψης από κάθε μέλος της υπόλοιπης ροπής δύναμης. Παρατηρούμε έτσι ότι το 50% της ροπής βάσης παραλαμβάνεται από ζεύγος δυνάμεων. Το σημαντικότερο όμως είναι ότι αυτό το ποσοστό παραμένει σταθερό για όλα τα πλαίσια, δηλαδή δεν επηρεάζεται από το μήκος του τοιχείου. Με άλλα λόγια όσο αυξάνεται το μήκος του τοιχείου τόσο αυξάνεται το μέγεθος της ροπής που αναλαμβάνεται από το ζεύγος δυνάμεων.

Το τελευταίο αρχικά έρχεται σε αντίθεση με την προηγούμενη παρατήρηση ότι το τοιχείο μήκους μεγαλύτερο των 2m μειώνει την εφελκυστική δύναμη του υποστυλώματος 1 (βλέπε πίνακα 7.10). Μία πιο προσεκτική διερεύνηση του θέματος ξεκαθαρίζει την αντίθεση αυτή. Η αύξηση του μήκους του τοιχείου αυξάνει τον μοχλοβραχίονα της αξονικής του δύναμης από το κέντρο του πλαισίου κατά μήκος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ροπής βάσης που παραλαμβάνει η θλιπτική δύναμη του τοιχείου, που σε συνδυασμό με την μείωση της θλίψης του υποστυλώματος 2 οδηγούμαστε στη πιο πάνω παρατήρηση ότι η ροπή βάσης που αναλαμβάνεται από τις αξονικές δυνάμεις αυξάνεται όσο αυξάνεται το τοιχείο γίνεται πιο πλατύ.

### 7.3.3.2 Υπολογισμός εντατικών μεγεθών στη δοκό του πλαισίου

Όπως αναφέρθηκε η τοποθέτηση του λικνιζόμενου τοιχείου επηρεάζει τα εντατικά μεγέθη. Είναι αναγκαίο έτσι να διερευνηθεί η μεταβλητότητα των μεγεθών καθώς αλλάζει το μήκος του λικνιζόμενου τοιχείου.

Ο υπολογισμός των εντατικών μεγεθών της δοκού που παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα γίνεται αντιστοίχως με τα υποστυλώματα όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο.

Πίνακας 7.11: Εντατικά μεγέθη δοκού που αναπτύσσονται στο σεισμό σχεδιασμού

Πλάτος λικνιζόμενου τοιχείου (m)	Δοκός 3					Δοκός 5				
	N (KN)	Q <sub>3</sub> (KN)	Q <sub>5</sub> (KN)	M <sub>3</sub> (KMm)	M <sub>5</sub> (KMm)	N (KN)	Q <sub>7</sub> (KN)	Q <sub>4</sub> (KN)	M <sub>7</sub> (KMm)	M <sub>4</sub> (KMm)
Χωρίς τοίχιο	10.37	59.46	53.41	-98.85	-168.34	10.37	-53.47	166.34	-106.42	-168.34
1.00	26.65	-63.74	154.06	-103.87	-102.51	-25.94	20.13	70.19	52.45	-102.51
1.50	47.58	-76.97	156.00	-61.03	-64.85	-44.67	17.18	61.85	25.76	-64.85
2.00	63.15	-63.71	131.45	-26.68	-51.42	-53.14	-10.51	78.25	-15.15	-51.42
2.50	73.43	-48.14	104.59	-6.69	-48.50	-57.94	-41.42	97.87	-38.55	-48.50

Η αξονική της δοκού αυξάνεται καθώς αυξάνεται το μήκος του λικνιζόμενου τοιχείου. Αυτό είναι λογικό αφού αυξάνεται και η οριζόντια δύναμη που δέχεται το πλαίσιο στους κόμβους 3 και 4 (βλέπε πίνακα 7.7). Λαμβάνοντας επίσης υπόψη ότι η τέμνουσα των υποστυλωμάτων μειώνεται με την αύξηση του μήκους του τοιχείου (βλέπε πίνακα 7.5), από ισορροπία κόμβου προκύπτει ορθώς η πιο πάνω παρατήρηση. Η αξονικές δυνάμεις που παρουσιάζονται είναι ιδεατές και αναφέρονται σε γυμνό πλαίσιο χωρίς πλάκα σκυροδέματος. Ο λόγο είναι ότι στην πραγματικότητα η αξονική δύναμη διαχεεται στην πλάκα και η δοκός δεν φέρει αξονική δύναμη.

Η τέμνουσα της δοκού στους κόμβους 3 και 4 μειώνεται αρκετά (μάλιστα στον κόμβο 3 αλλάζει πρόσημο) όπως ακριβώς συνέβαινε και με την αξονική του υποστυλώματος αφού λόγω ισορροπίας στον κόμβο ισούνται. Σημαντική παρατήρηση είναι ότι η τέμνουσα της δοκού στο κρίσιμο σημείο ανασήκωσης (κόμβος 5) του τοιχείου για μήκος τοιχείου μέχρι 1.5m αυξάνεται ενώ για μεγαλύτερο μήκος μειώνεται, ακολουθεί δηλαδή όπως αναμενόταν την διακύμανση της αξονική δύναμης του τοιχείου.

Οι ροπές των δοκών στα άκρα (κόμβος 3 και 4) είναι ίσες με τις ροπές των υποστυλωμάτων στους αντίστοιχους κόμβους και η συμπεριφορά των μεταβολών τους εξηγείται στο κεφάλαιο 7.3.3.1. Οι ροπές στους κόμβους 5 και 7 παρομοίως μειώνονται καθώς αυξάνει το μήκος του τοιχείου. Αυτό δείχνει ότι όσο πιο πλατύ είναι το τοίχιο τόσο μικρότερη αντίσταση βρίσκει από την δοκό, αφού η ανασήκωση του είναι μικρότερη λόγω μικρότερων μετακινήσεων κορυφής. Αυτό έχει πολύ ευεργετικά αποτελέσματα ως προς την δοκό, επειδή όπως αναφέρθηκε σε υφιστάμενο πλαίσιο είναι αρχικώς οπλισμένη για να αναλαμβάνει μόνο θετικές ροπές. Με την αύξηση του μήκους του τοιχείου, τόσο λιγότερο μήκος της δοκού αλλάζει πρόσημο και έτσι η ενίσχυση της θα είναι πιο περιορισμένη.

Γενικά, παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του μήκους του λικνιζόμενου τοιχείου προκαλεί μόνο ευμενή επίδραση στην δοκό.

### 7.3.3.3 Υπολογισμός γενικής πλαστιμότητας πλαισίου και τοπικής πλαστιμότητας υποστυλωμάτων

Όπως έχει αναφερθεί τόσο η γενική πλαστιμότητα του πλαισίου όσο και η τοπική είναι σημαντική σε μία συμβατική κατασκευή. Όμως, όπως αποδείχθηκε στο κεφάλαιο 5, η γενική πλαστιμότητα πλαισίου το οποίο είναι ενισχυμένο με λικνιζόμενο τοιχείο πρέπει να λαμβάνεται υπόψη με διαφορετικό τρόπο από ότι με σε μια συμβατική κατασκευή, ειδικότερα όταν δεν έχουν διαρρεύσει τα μέλη του. Αυτό επειδή λόγω της μεγάλης αρχικής δυσκαμψίας στην αρχή και της γρήγορης "διαρροής" του πλαισίου λόγω λικνισμού, προκύπτει μεγάλη γενική πλαστιμότητα.

Έτσι κρίνεται χρήσιμο να δούμε πόσο μεταβάλλεται η γενική πλαστιμότητα σε σχέση με την αύξηση του μήκους του τοιχείου. Επίσης, θα ήταν χρήσιμος ο υπολογισμός των τοπικών πλαστιμοτήτων των υποστυλωμάτων σε όλα τα πλαίσια υπό το φορτίο σχεδιασμού, αφού αποτελεί δείκτη βελτίωση της συμπεριφοράς ενός μέλους.

Να σημειωθεί ότι η γενική πλαστιμότητα εκφράζεται σε όρους μετακινήσεων ενώ οι τοπικές πλαστιμότητες των υποστυλωμάτων σε όρους καμπυλοτήτων. Η γενική πλαστιμότητα υπολογίζεται αφού διγραμμικοποιηθεί η καμπύλη ικανότητας της κατασκευής μέχρι την μέγιστη μετακίνηση που αναπτύσσεται στο πλαίσιο στο σεισμό σχεδιασμού από τη σχέση 5.12. Η τοπική πλαστιμότητα υπολογίζεται από την σχέση 5.13 με την διαδικασία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 5.3.3.2.

Πίνακας 7.12: Γενική και τοπική των υποστυλωμάτων πλαστιμότητα

Πλάτος λικνιζόμενου τοιχείου (m)	Γενική πλαστιμότητα	Τοπική πλαστιμότητα υποστυλώματος 1	Τοπική πλαστιμότητα υποστυλώματος 2
Χωρίς τοιχείο	1.75	Δεν διαρρέει	3.13
1.00	12.80	Δεν διαρρέει	Δεν διαρρέει
1.50	10.99	Δεν διαρρέει	Δεν διαρρέει
2.00	7.02	Δεν διαρρέει	Δεν διαρρέει
2.50	5.32	Δεν διαρρέει	Δεν διαρρέει

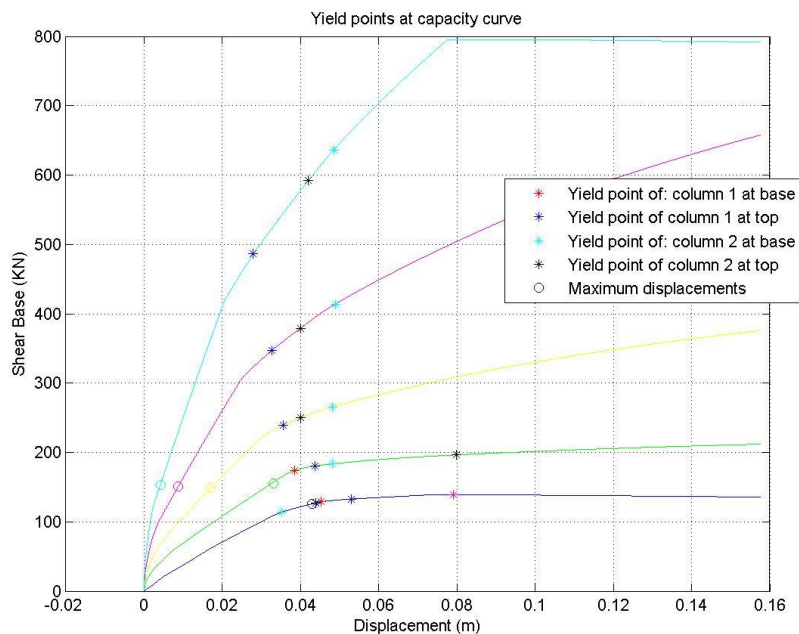
Από τον πιο πάνω πίνακα γίνεται εμφανές ότι όσο το μήκος του λικνιζόμενου τοιχείου μεγαλώνει, τόσο μειώνεται η γενική πλαστιμότητα του τοιχείου. Αυτό φυσικά οφείλεται στην μείωση της μέγιστης μετακίνησης και στη μικρή σχετικά μεταβλητότητα της μετακίνησης διαρροής.

Γίνεται επίσης εμφανές πως τα λικνιζόμενα τοιχεία περιορίζουν την πλαστιμότητα των υποστυλωμάτων. Από το διάγραμμα 7.8 παρατηρούμε ότι στο μη ενισχυμένο πλαίσιο η μέγιστη μετατόπιση (43mm) προκαλεί διαρροή μόνο της βάσης του υποστυλώματος 2, και για αυτό τον λόγο η τοπική πλαστιμότητα του υποστυλώματος 1 είναι μηδενική.

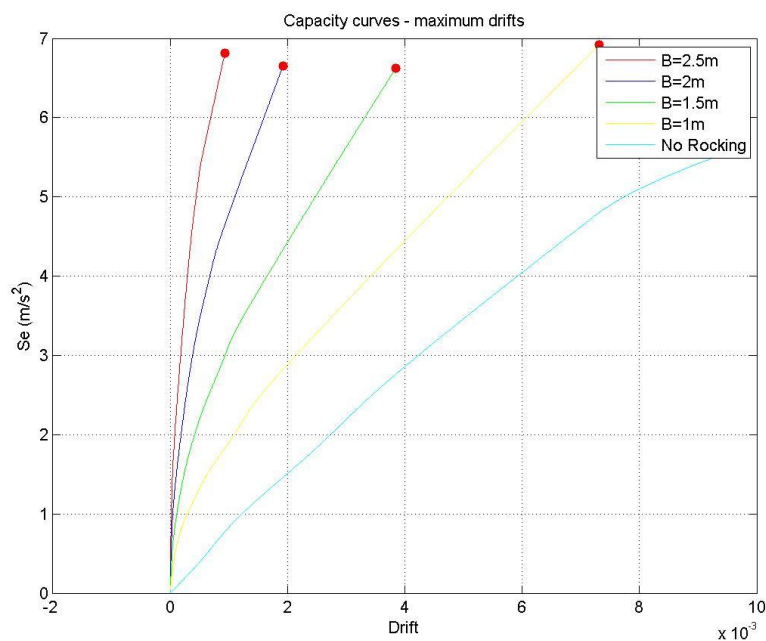


Στα υπόλοιπα πλαίσια λόγω της μεγάλης δυσκαμψίας τους, η μέγιστη μετατόπιση λόγω του σεισμού σχεδιασμού δεν προκαλεί διαρροή κάποιου μέλους. Έτσι συμπεραίνεται για επαρκώς μεγάλα μήκη λικνιζόμενων τοιχείων η γενική πλαστιμότητα οφείλεται μόνο στην "διαρροή" του πλαισίου.

Το πιο πάνω γίνονται εύκολα αντιληπτό παρατηρώντας το διάγραμμα 7.9, όπου φαίνονται οι μέγιστες μετατοπίσεις του μονοβάθμιου ισοδύναμου συστήματος (που αντιστοιχεί και στο πολυβάθμιο) σε μικρότερη κλίμακα.



Διάγραμμα 7.8: Καμπύλες ικανότητας με τα σημεία μεγίστων μετατοπίσεων και σημεία πλαστικοποιήσεως



Διάγραμμα 7.9: Μέγιστες σεισμικές παραμορφώσεις και επιταχύνσεις του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος

### **7.3.4 Συμπεράσματα ως προς την επιρροή στο πλαίσιο αρχικής πλαστιμότητας 3 από την αύξηση του μήκους του λικνιζόμενου τοιχείου.**

Όπως αναμενόταν όσο αυξάνεται το μήκος του τοιχείου μειώνονται οι μέγιστες μετακινήσεις της κορυφής του πλαισίου με εκθετική σχέση (διάγραμμα 7.7). Αυτό όμως που έχει μεγάλη σημασία είναι ότι όσο μεγαλώνει το τοιχείο τόσο πιο δύσκαμπτο είναι το πλαίσιο και η τμήση του φάσματος ικανότητας με το φάσμα σχεδιασμού γίνεται στον αρχικό πολύ δύσκαμπτο κλάδο.

Ακόμη ένα συμπέρασμα είναι ότι η πλαστιμότητα του πλαισίου οφείλεται μόνο στην "διαρροή" του λικνιζόμενου τοιχείου. Έτσι, αυξάνεται πάρα πολύ η γενική πλαστιμότητα αφού από την διγραμμικοποίηση προκύπτει ότι το πλαίσιο "διαρρέει" σε πολύ μικρή μετατόπιση λόγω του ότι το τοιχείο προβαίνει σε λικνισμό για αυτή την πολύ μικρή μετακίνηση κορυφής.

Παρατηρήθηκε ακόμη κάτι το οποίο ήταν γνωστό από προηγούμενο κεφάλαιο, ότι δηλαδή το λικνιζόμενο τοιχείο προστατεύει τα υποστυλώματα από διαρροή και μειώνει την τοπική πλαστιμότητα. Δεν κατέστη δυνατό να ποσοτικοποιηθεί πόσο μειώνει την τοπική πλαστιμότητα αφού σε όλα τα πλαίσια που μελετώνται τα υποστυλώματα μένουν ελαστικά. Έτσι κρίνεται αναγκαίο να μελετηθούν τα ίδια πλαίσια σε μεγαλύτερο σεισμό.

Η μη διαρροή των πλαισίων σχετίζεται με την ανάπτυξη μικρότερης ενεργούς απόσβεσης του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος, αφού όσο μεγαλώνει το μήκος του τοιχείου οι ίνες των μελών πλαστικοποιούνται όλο και πιο λίγο άρα προσφέρουν μικρότερη υστερητική απόσβεση. Γίνεται ξεκάθαρο από το διάγραμμα 7.9, όπου φαίνεται ότι όσο το τοιχείο αυξάνει σε μήκος, τόσο περισσότερο η μέγιστη μετατόπιση κορυφής που αναπτύχθηκε στον σεισμό απέχει από την πρώτη πλαστικοποίηση.

Πολύ σημαντικό συμπέρασμα του κεφαλαίου είναι σε ότι κάθε πλαίσιο υπάρχει ένα συγκεκριμένο μήκος τοιχείου το οποίο βελτιώνει πολύ την συμπεριφορά του πλαισίου και κυρίως απαλλάσσει τα υποστυλώματα και τη δοκό από έντονη καταπόνηση. Στις συγκεκριμένες διαστάσεις πλαισίου, το κρίσιμο αυτό μήκος του τοιχείου είναι τα 2m. Για αυτό το μήκος παρατηρήθηκε έντονη μείωση της στοχευόμενης μετακίνησης η οποία επιδρά σε όλα τα εντατικά μεγέθη του πλαισίου.

Η τέμνουσα δύναμη και η ροπή κάμψης των υποστυλωμάτων μειώνονται όσο αυξάνει το μήκος του λικνιζόμενου τοιχείου, με μεγαλύτερη μείωση να παρατηρείται για τα πλαίσια που ενισχύονται με τοιχείο μεγαλύτερο των 2 μέτρων. Σημαντικότερη παρατήρηση είναι ότι το ενώ η αξονική εφελκυστική δύναμη των υποστυλωμάτων αυξάνεται με την αύξηση του μήκους του τοιχείου, η σχέση αυτή αλλάζει στα πλαίσια που είναι ενισχυμένα με μήκος τοιχείου μεγαλύτερο του 1.5m. Φυσικά η μείωση των εφελκυστικών δυνάμεων των υποστυλωμάτων οφείλεται στην αξονική του τοιχείου, λόγω ισορροπίας αξονικών δυνάμεων.

Στο λικνιζόμενο τοιχείο παρατηρείται αντιστοίχως ότι η θλιπτική αξονική δύναμη του αυξάνει όταν το μήκος αυτού είναι μέχρι 1.5m και από εκεί και πέρα η αύξηση του μήκους προκαλεί πτώση της αξονικής δύναμης. Συμπεράνουμε δηλαδή ότι τα λικνιζόμενα τοιχεία με μεγαλύτερο πλάτος απαιτούν μικρότερη θλιπτική δύναμη για να λειτουργήσουν. Η ροπή κάμψης και η τέμνουσα στη βάση του λικνιζόμενου τοιχεία αυξάνουν ομοίως με την αύξηση του μήκους του, αφού η μεγαλύτερη δυσκαμψία που διαθέτει έλκει περισσότερη ένταση, είναι δηλαδή αλληλοσύνδεα με την μείωση της μετατόπισης .

Παρόλο που η αύξηση του μήκους του λικνιζόμενου τοιχείου προκαλεί μεγαλύτερες ροπές στη βάση του, η αύξηση της ροπής βάσης του πλαισίου είναι πολύ μεγαλύτερη. Έτσι η πρόσθετη ροπή που αναλαμβάνεται από το τοιχείο, αναλαμβάνεται μέσω των αξονικών και θλιπτικών δυνάμεων στη βάση των υποστυλωμάτων και του τοιχείου. Αυτός είναι ένας ακόμα παράγοντας που η αύξηση του μήκους του τοιχείου προκαλεί περισσότερο εφελκυσμό στο υποστύλωμα 1 και περισσότερη θλίψη στο τοιχείο. Βεβαίως, όπως αναφέρθηκε τοιχείο μεγαλύτερα των 2 μέτρων, αναλαμβάνει πολύ μεγαλύτερο ποσοστό της ροπής βάσης (βλέπε πίνακα 7.5) και για αυτόν τον λόγο μειώνονται οι αξονικές των υποστυλωμάτων. Σημειώνεται επίσης ότι το ποσοστό της ροπής βάσης που αναλαμβάνεται από τις αξονικές δυνάμεις των υποστυλωμάτων και του τοιχείου παραμένει σταθερό σε όλες τις αναλύσεις (βλέπε πίνακα 7.5). Παρατηρείται στο συγκεκριμένο πλαίσιο με τις συγκεκριμένες διαστάσεις ότι το μήκος τοιχείου μεγαλύτερο των 2 μέτρων προκαλεί μεγάλη μείωση του μήκους πλαστικοποίησης.

Επιπροσθέτως, το μήκος του τοιχείου έχει επίδραση και στη συμπεριφορά των τάσεων στη βάση του ιδίου. Από τον πίνακα 7.3 γίνεται αντιληπτό ότι όσο το μήκος του τοιχείου αυξάνεται τόσο μικρότερο ποσοστό της βάσης θλίβεται και μεγαλύτερο ανασκώνεται, αν και τα μήκη ως μεγέθη είναι παρόμοια. Σημαντικότερο όμως είναι η μεταβλητότητα του ποσοστού της βάσης που πλαστικοποιείται. Η τελευταία παράμετρος μειώνεται περισσότερο όσο αυξάνει το μήκος του λικνιζόμενου τοιχείου, και ειδικότερα για πλάτος τοιχείου μεγαλύτερου των 2m η μείωση αυτή είναι πιο έντονη. Άρα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι για κάθε πλαίσιο υπάρχει ένα συγκεκριμένο ελάχιστο μήκος τοιχείου το οποίο γίνεται πολύ αποτελεσματικό σε σχέση με την μείωση των ζημιών στη βάση του στο σεισμό σχεδιασμού. Για γενίκευση αυτού του συμπεράσματος θα πρέπει να ελεγχθούν διάφορα πλαίσια με διαφορετική γεωμετρία.

Τέλος, θετική επίδραση έχει η αύξηση του μήκους του λικνιζόμενου τοιχείου και στη δοκό καθώς μειώνει τα κρίσιμα μεγέθη της, τα οποία είναι η ροπή κάμψης και η τέμνουσα δύναμη στο σημείο της διεπιφάνειας δοκού υποστυλώματος κατά τον λικνισμό (κόμβο 5). Συγκεκριμένα η τέμνουσα δύναμη στο σημείο αυτό της δοκού ακολουθεί την διακύμανση της αξονικής δύναμης του υποστυλώματος αφού σχετίζονται άμεσα. Η μείωση της ροπής κάμψης λόγω της αύξησης του μήκους του τοιχείου αναγκάζει και την δοκό να μειώσει την ροπή σε όλα τα σημεία της και έτσι μεγαλύτερο τμήμα της δοκού έχει θετική φορά των ροπών. Αυτό είναι πολύ σημαντικό, γιατί η δοκός ενός υφιστάμενου πλαισίου είναι οπλισμένη να παραλαμβάνει μόνο θετικές ροπές. Έτσι αν το υφιστάμενο πλαίσιο ενισχυθεί με μεγάλο μήκος τοιχείου, η δοκός θα θέλει λιγότερη ενίσχυση.

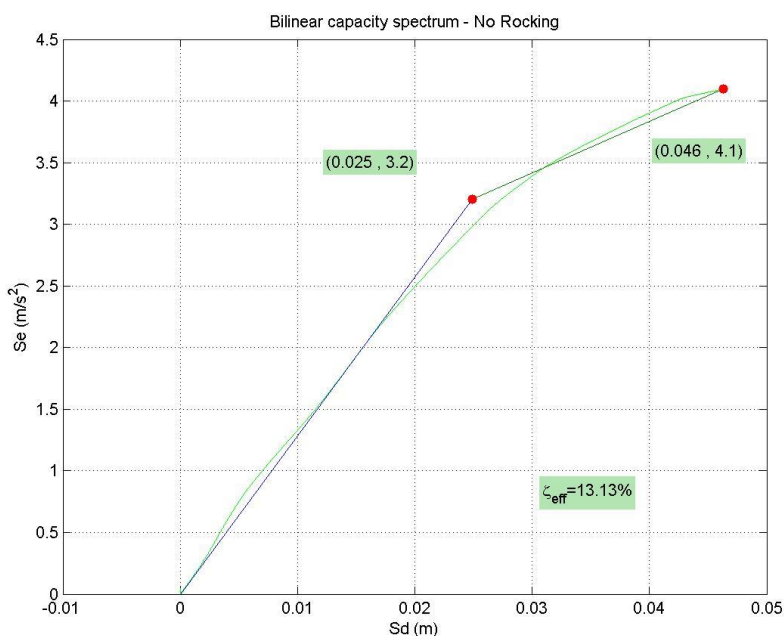
## 7.4 Αναλύσεις για πλαίσια διαστασιολογημένα με συντελεστή συμπεριφοράς $q=6$

Στην παράγραφο αυτή γίνεται διερεύνηση της επιρροής του πλάτους του λικνιζόμενου τοιχείου σε ανελαστικό πλαίσιο το οποίο σχεδιάστηκε συντελεστή συμπεριφοράς  $q=6$ . Σημαντική είναι η σύγκριση της επιρροής του μήκους του τοιχείου όταν αυτό εφαρμόζεται στο υποδιαστασιολογημένο πλαίσιο της παρούσας παραγράφου και στο πιο δύσκαμπτο πλαίσιο της παραγράφου 7.3.

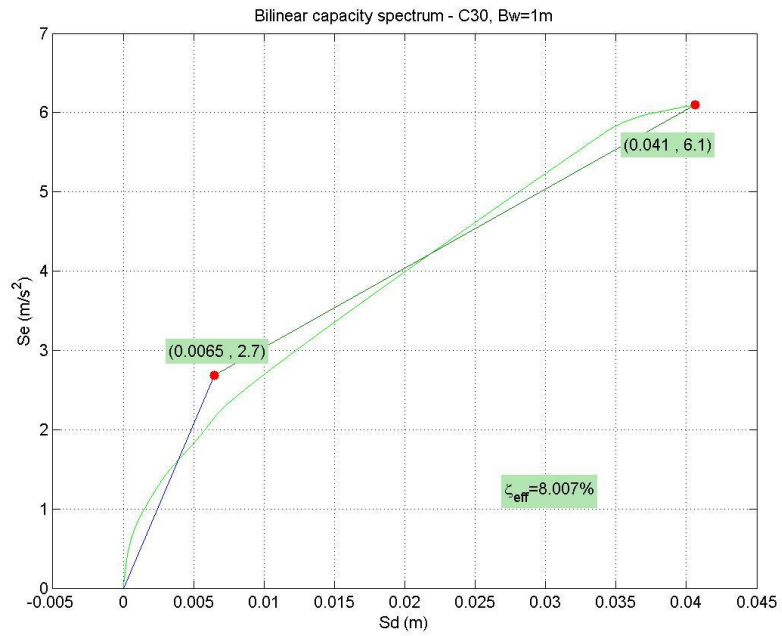
### 7.4.1 Υπολογισμός στοχευόμενων μετατοπίσεων και ενεργούς απόσβεση καθώς και διγραμμικοποίηση της καμπύλης ικανότητας

Υπολογίζονται οι μέγιστες μετατοπίσεις κορυφής και η μετατόπιση διαρροής πλαισίου (ταυτίζονται με τις μετακινήσεις του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος) που αναπτύσσονται στο σεισμό σχεδιασμού, με τη μεθοδολογία του κεφαλαίου 7.3.1.

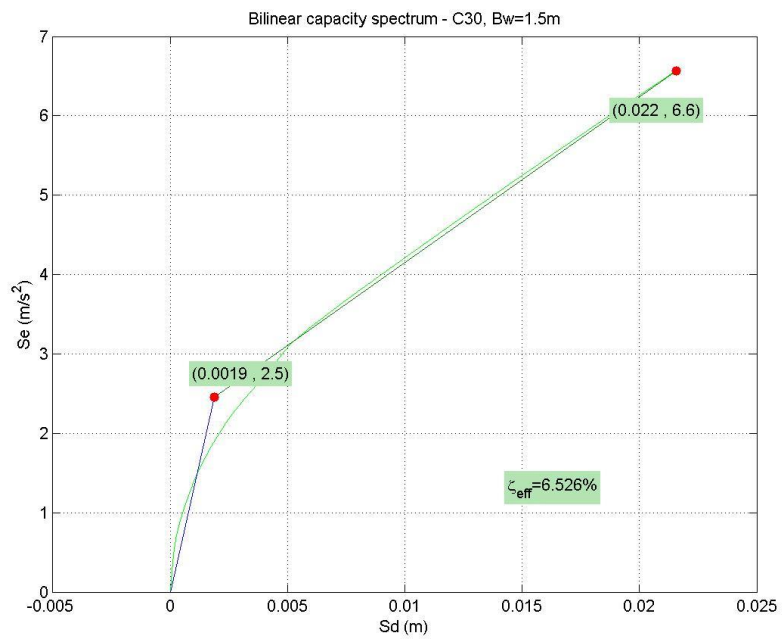
Στα επόμενα διαγράμματα φαίνονται τα σχετικά αποτελέσματα των αναλύσεων:



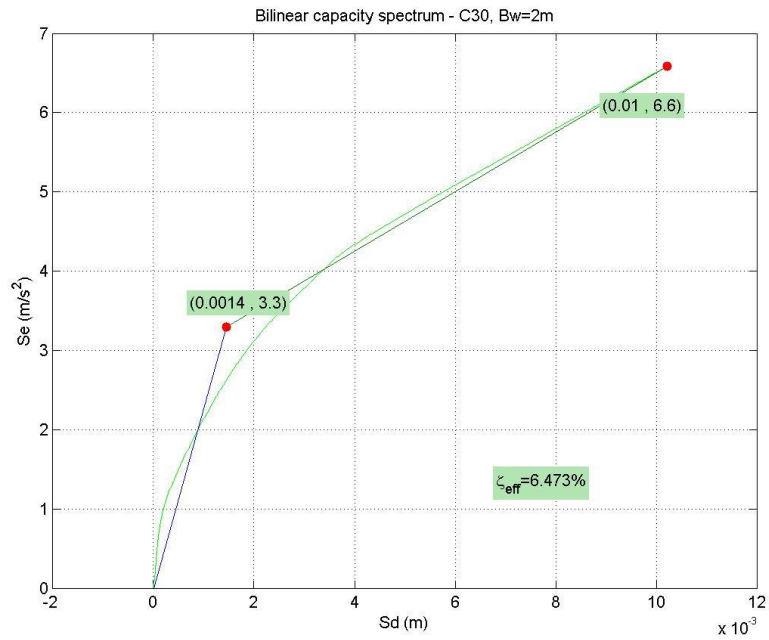
Διάγραμμα 7.7: Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας πλαισίου χωρίς λικνιζόμενο τοιχείο



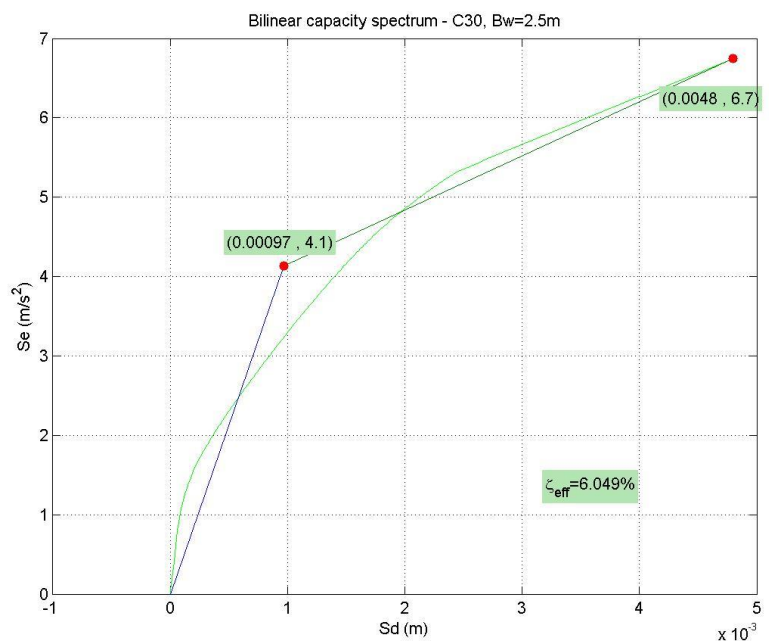
Διάγραμμα 7.8: Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας πλαισίου με λικνιζόμενο τοίχειο μήκους 1.0m



Διάγραμμα 7.9: Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας πλαισίου με λικνιζόμενο τοίχειο μήκους 1.5m

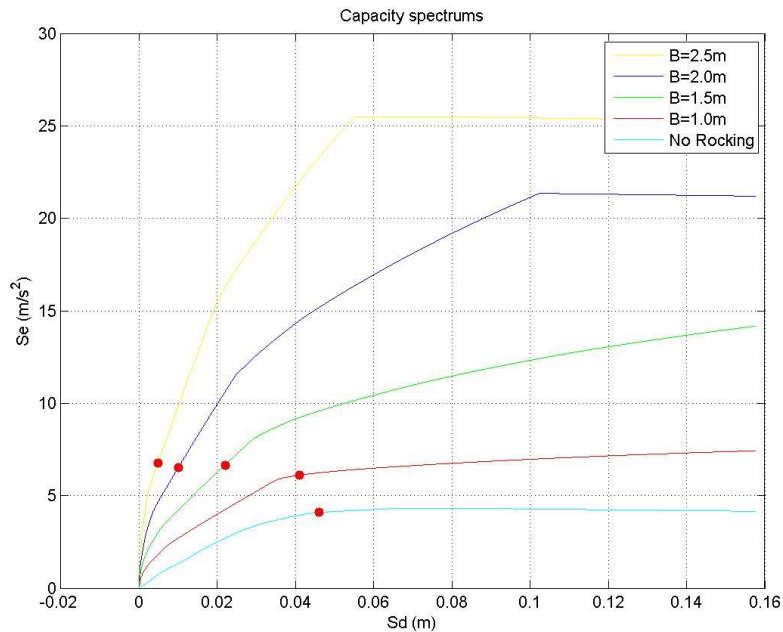


Διάγραμμα 7.10: Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας πλαισίου με λικνιζόμενο τοίχειο μήκους 2.0m



Διάγραμμα 7.11: Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας πλαισίου με λικνιζόμενο τοίχειο μήκους 2.5m

Στο πιο κάτω διάγραμμα συνοψίζονται τα φάσματα ικανότητας και σημειώνεται στο κάθε ένα η μέγιστη μετατόπιση που αναπτύσσεται στο σεισμό σχεδιασμού.



**Διάγραμμα 7.12:** Καμπύλες ικανότητας πλαισίων με διαφορετικό μήκος λικνιζόμενου τοιχείου, με την μέγιστη μετατόπιση

Στον πιο κάτω πίνακα συνοψίζονται τα αποτελέσματα των πιο πάνω διαγραμμάτων:

Πίνακας 7.13: Μετακινήσεις κορυφής και ενεργός απόσβεση του ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή

Πλάτος λικνιζόμενου τοιχείου (m)	Μέγιστη μετακίνηση κορυφής (mm)	Μετακίνηση διαρροής dy (mm)	$\zeta_{eff}$ (%)
Χωρίς τοιχείο	45	25.0	13.13
1.00	41	6.5	8.01
1.50	22	1.9	6.53
2.00	10	1.4	6.47
2.50	4.8	0.97	6.05

Η επιρροή του τοιχείου στο υποδιαστασιολογημένο πλαίσιο είναι ποιοτικά ίδια με την επιρροή του στο πλαίσιο της προηγούμενης ενότητας. Συγκρίνοντας τους πίνακες 7.1 και 7.13 που αντιστοιχούν σε σωστά διαστασιολογημένα και σε υποδιαστασιολογημένα πλαίσια αντίστοιχα, παρατηρούμε ότι οι μέγιστες μετακινήσεις και μετακινήσεις διαρροής του πλαισίου λόγω του σεισμού σχεδιασμού είναι περίπου ίσες, όταν οι ενισχύσεις των πλαισίων είναι με τοιχείο μήκους άνω του 1.5m. Επαληθεύεται το συμπέρασμα του κεφαλαίου 5, ότι δηλαδή η τελική μετακίνηση της κορυφής του πλαισίου δεν επηρεάζεται από τις διαστάσεις των υποστυλωμάτων του. Αυτό που επηρεάζεται από την αρχική δυσκαμψία του πλαισίου είναι οι επιταχύνσεις καθώς μειώνονται στο πλαίσιο που είναι διαστασιολογημένο με  $q=6$ .

Παρατηρείται ότι τα υποδιαστασιολογημένα πλαίσια αναπτύσσουν μεγαλύτερη απόσβεση του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος. Αυτό αναμενόταν αφού έχει πιο εύκαμπτα υποστυλώματα άρα για τον ίδιο σεισμό σχεδιασμού θα αναπτυχθεί μεγαλύτερη πλαστικοποίηση των ινών τους άρα και μεγαλύτερη απόσβεση.

#### 7.4.2 Αντιδράσεις, καμπυλότητα και παραμόρφωση που αναπτύσσονται στη βάση του λικνιζόμενου τοιχείου λόγω σεισμού σχεδιασμού

Στο παρόν υποκεφάλαιο θα μελετηθούν τα εντατικά μεγέθη, η παραμόρφωση και η καμπυλότητα του λικνιζόμενου τοιχείου ενός υποδιαστασιολογημένου πλαισίου με σκοπό την σύγκριση των αντίστοιχων αποτελεσμάτων που προέκυψαν για τα ισχυρότερα πλαίσια.

Στον πιο κάτω πίνακα παρουσιάζονται τα εντατικά μεγέθη, η καμπυλότητα και η παραμόρφωση στη βάση του λικνιζόμενου στοιχείου, το οποίο τοποθετήθηκε σε υφιστάμενο πλαίσιο.

Πίνακας 7.14: Παραμορφώσεις και καμπυλότητες στη βάση του τοιχείου

Πλάτος λικνιζόμενου τοιχείου (m)	Αξονική ύναμη N (KN)	Τέμνουσα ύναμη Q (KN)	Ροπή κάμψης M (KNm)	Καμπυλότητα 1/r (1/m)	Παραμόρφωση
1.00	-253.15	-54.62	121.24	2.2917	0.0972
1.50	-292.16	-98.28	212.00	1.8552	0.0908
2.00	-264.98	-121.28	259.13	0.2325	0.0108
2.50	-234.49	-134.71	288.40	0.0431	0.0022

Συγκρίνοντας τον πιο πάνω πίνακα με τον πίνακα 7.2 παρατηρείται ότι τα εντατικά μεγέθη στη βάση του λικνιζόμενου τοιχείου είναι παρόμοια μεταξύ υποδιαστασιολογημένου πλαισίου και πλαισίου του προηγούμενου υποκεφαλαίου. Στο πλαίσιο που διαστασιολογήθηκε με  $q=6$  το τοιχείο αναλαμβάνει λίγο μικρότερα εντατικά μεγέθη οφειλόμενο στην μικρότερη δυσκαμψία του πλαισίου αυτού.

Πίνακας 7.15: Περιγραφή τάσεων στη βάση του τοιχείου

Πλάτος λικνιζόμενου τοιχείου (m)	Ποσοστό της βάσης που ανασηκώνεται (%)	Ποσοστό της βάσης που θλίβεται (%)	Ποσοστό της βάσης που πλαστικοποιείται (%)	Ποσοστό της βάσης που παραμένει ελαστικό (%)	Ποσοστό της θλιβόμενης περιοχής που πλαστικοποιείται (%)
1.00	95.76	4.24	4.20	0.04	98.97
1.50	96.74	3.26	3.23	0.04	98.90
2.00	97.68	2.32	2.10	0.22	90.71
2.50	97.97	2.03	1.10	0.93	54.25



Επίσης από τους πίνακες 7.2 και 7.3 με τους πίνακες 7.14 και 7.15 συμπεραίνουμε ότι ο συντελεστής συμπεριφοράς των πλαισίων επηρεάζει τη συμπεριφορά της βάσης του λικνιζόμενου τοιχείου. Αρχικά το υποδιαστασιοποιημένο πλαίσιο αναπτύσσει πολύ μεγαλύτερη μέγιστη παραμόρφωση στην ακραία θλιβόμενη ίνα του τοιχείου. Επίσης το μήκος της βάσης που θλίβεται και παραμορφώνεται είναι μεγαλύτερο όπως μεγαλύτερο είναι και μήκος που πλαστικοποιείται. Δηλαδή στα πλαίσια που σχεδιασθηκαν με μεγαλύτερο συντελεστή συμπεριφοράς θα αναπτυχθούν μεγαλύτερες ζημιές στη βάση του τοιχείου οι οποίες μάλιστα θα εκτείνονται περισσότερο.

#### 7.4.3 Διερεύνηση επιρροής λικνιζόμενου τοιχείου στα υποστυλώματα, τη δοκό και στις πλαστιμότητες

Όπως είδαμε σε όλες τις αναλύσεις πλαισίων με λικνιζόμενα τοιχεία, τα υποστυλώματα πολλές φορές δεν φτάνουν στην διαρροή όταν στο πλαίσιο συμβεί ο σεισμός σχεδιασμού. Στο κεφάλαιο 5, όμως παρατηρήθηκε ότι τα υποστυλώματα υποδιαστασιοποιημένου πλαισίου που ενισχύεται με τοιχείο μήκους 1.4m αν και δεν φτάνουν σε διαρροή βρίσκονται πολύ κοντά σε αυτή.

Στο παρόν κεφάλαιο θα μελετηθεί η βελτίωση της συμπεριφορά των υποστυλωμάτων ως μέλη υφιστάμενου ενισχυμένου πλαισίου και σκοπός είναι να ποσοτικοποιηθεί βελτίωση της συμπεριφοράς των υποστυλωμάτων συναρτήσει του μήκους του λικνιζόμενου τοιχείου. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται και με τα αντίστοιχα του κεφαλαίου 7.3.3.

Όλα τα εντατικά μεγέθη των υποστυλωμάτων και των δοκών, καθώς και οι πλαστιμότητες υπολογίζονται όπως περιγράφεται το κεφάλαιο 7.3.3.

##### 7.4.3.1 Υπολογισμός εντατικών μεγεθών στα υποστυλώματα του πλαισίου

Στον πιο κάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές των εντατικών μεγεθών του κάθε υποστυλώματος, τα οποία ανήκουν σε υφιστάμενο πλαίσιο:

Πίνακας 7.16: Εντατικά μεγέθη υποστυλωμάτων στο σεισμό σχεδιασμού

Πλάτος λικνιζόμενου τοιχείου (m)	Υποστυλώμα 1				Υποστυλώμα 2			
	N (KN)	Q (KN)	M <sub>βάσης</sub> (KMm)	M <sub>κορυφής</sub> (KMm)	N (KN)	Q (KN)	M <sub>βάσης</sub> (KMm)	M <sub>κορυφής</sub> (KMm)
Χωρίς τοιχείο	-72.86	41.58	106.91	80.19	-152.89	53.22	119.6	119.88
1	66.18	38.42	86.47	86.41	-60.47	44.64	105.03	95.83
1.5	85.92	23.25	51.13	53.49	-52.74	27.06	63.76	58.02
2	67.7	9.14	20.24	20.89	-73.25	19.31	42.08	44.81
2.5	48.57	2.53	6.46	4.93	-96.2	16.86	33.11	42.75

Συγκρίνοντας τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη των δύο πλαισίων (πίνακες 7.5 και 7.6) παρατηρείται ότι όπως αναμενόταν στο πλαίσιο χωρίς ενίσχυση τα υποστυλώματα του πλαισίου που διαστασιολογήθηκαν με συντελεστή συμπεριφοράς  $q=6$ , αναπτύσσουν αρκετά μικρότερη ένταση από το πλαίσιο της προηγούμενη ενότητας. Η σημαντικότερη όμως παρατήρηση είναι ότι όσο το πλάτος του τοιχείου αυξάνει τα εντατικά μεγέθη των 2 αναλύσεων γίνονται όλο και πιο όμοια. Αυτό αποτελεί ένδειξη ότι στα πολύ δύσκαμπτα πλαίσια αυτό που καθορίζει την συμπεριφορά είναι το τοιχείο. Οφείλεται στο ότι τα υποστυλώματα δεν διαρρέουν αλλά επίσης και στην ανάπτυξη πολύ μικρών μετακινήσεων που σημαίνει ότι η αρχική δυσκαμψία των υποστυλωμάτων δεν είναι σημαντική.

Η πιο πάνω παρατήρηση ισχύει για τις τέμνουσες και ροπές των υποστυλωμάτων αλλά όχι για τις αξονικές τους δυνάμεις. Οι αξονικές δυνάμεις του πιο υποδιαστασιολογημένου πλαισίου είναι μεγαλύτερες αφού ως πιο εύκαμπτο αναπτύσσει μεγαλύτερες μετατοπίσεις κορυφής άρα ο εφελκυσμός του υποστυλωμάτων και η θλίψη του 2 αυξάνονται. Ομοίως όμως η διαφορά είναι μικρή και δεν είναι κρίσιμη.

Πιο κάτω ακολουθούν πίνακες που δείχνουν τι ποσοστό της τέμνουσας ροπή βάσης αναλαμβάνεται από το κάθε μέλος του πλαισίου.

Πίνακας 7.17: Ποσοστό τέμνουσας βάσης που αναλαμβάνεται από κάθε μέλος

Πλάτος λικνιζόμενου τοιχείου (m)	Τέμνουσα βάση (KN)	Ποσοστό τοιχείου (%)	Ποσοστό υποστυλώματος 1 (%)	Ποσοστό υποστυλώματος 2 (%)
Χωρίς τοιχείο	92.47	-	41.26	27.61
1.00	137.65	39.68	36.02	24.32
1.50	148.33	66.26	23.08	10.83
2.00	148.71	81.55	13.40	5.73
2.50	152.17	88.53	8.57	4.17

Πίνακας 7.18: Μέγεθος τέμνουσας βάσης που αναλαμβάνεται από κάθε μέλος

Πλάτος λικνιζόμενου τοιχείου (m)	Τέμνουσα βάση (KN)	Τέμνουσα τοιχείου (KN)	Τέμνουσα υποστυλώματος 1 (KN)	Τέμνουσα υποστυλώματος 2 (KN)
Χωρίς τοιχείο	92.47	-	38.15	25.53
1.00	137.65	54.62	49.58	8.76
1.50	148.33	98.28	34.24	2.50
2.00	148.71	121.28	19.93	0.77
2.50	152.17	134.71	13.05	0.36

Πίνακας 7.19: Ποσοστό ροπής βάσης που αναλαμβάνεται από κάθε μέλος

Πλάτος λικνιζόμενου τοιχείου (m)	Τέμνουσα βάση (KN)	Ποσοστό τοιχείου (%)	Ποσοστό υποστυλώματος 1 (%)	Ποσοστό υποστυλώματος 2 (%)	Ποσοστό από ζεύγος δυνάμεων (%)
Χωρίς τοιχείο	416.12	-	31.50	22.94	45.57
1.00	619.43	19.57	17.86	14.09	48.48
1.50	667.49	31.76	10.32	6.93	50.99
2.00	669.20	38.72	5.64	3.72	51.91
2.50	684.77	42.12	3.45	2.40	52.04

Πίνακας 7.20: Μέγεθος ροπή βάσης που αναλαμβάνεται από κάθε μέλος

Πλάτος λικνιζόμενου τοιχείου (m)	Ροπή βάσης (KNm)	Ροπή τοιχείου (KNm)	Ροπή υποστυλώματος 1 (KNm)	Ροπή υποστυλώματος 2 (KNm)	Ροπή από ζεύγος δυνάμεων (KNm)
Χωρίς τοιχείο	416.12	-	131.07	95.44	189.61
1.00	619.43	121.24	110.63	87.25	300.30
1.50	667.49	212.00	68.91	46.26	340.32
2.00	669.20	259.13	37.74	24.92	347.40
2.50	684.77	288.40	23.62	16.42	356.32

Συγκρίνοντας τους πίνακες 7.6 με 7.18 και 7.8 με 7.20 παρατηρείται ότι στο πλαίσιο που διαστασιολογήθηκε με μικρότερο συντελεστή συμπεριφοράς αναλαμβάνεται μεγαλύτερη τέμνουσα άρα και ροπή βάσης λόγω του σεισμού σχεδιασμού. Αυτό επισημάνθηκε και πιο πάνω και οφείλεται στο ότι το παλιό πλαίσιο είναι πιο δύσκαμπτο (μεγαλύτερες διαστάσεις υποστυλωμάτων). Το σημαντικό όμως είναι πως η διαφορά μειώνεται στα πλαίσια που ενισχύονται με μεγάλους μήκους λικνιζόμενου τοιχείου. Επειδή η δυσκαμψία οφείλεται κατά πολύ μεγάλο ποσοστό στο τοιχείο, τα υποστυλώματα δεν επηρεάζουν τόσο και έτσι η τέμνουσα και ροπή βάσης είναι περίπου ίσες.

Η πιο πάνω παρατήρηση ισχύει και σε όλα τα εντατικά μεγέθη των υποστυλωμάτων. Δηλαδή όλα τα εντατικά μεγέθη των δύο πλαισίων με  $q=3$  και  $q=6$  είναι περίπου ίσα για μεγάλα μήκη τοιχείων. Σε μικρότερα μήκη τα μεγέθη διαφέρουν αφού διαφέρει η δράση. Όμως αυτό που παρατηρείται είναι ότι η κατανομή των ρομών δεν επηρεάζεται από τον συντελεστή συμπεριφοράς (βλέπε πίνακες 7.9 και 7.19). Αντίθετα, η κατανομή των τεμνουσών δυνάμεων επηρεάζεται από τον συντελεστή αυτό. Αν και το ποσοστό της τέμνουσας βάσης που αναλαμβάνει το τοιχείο είναι ίδιο και για τα δύο κτήρια, το ποσοστό της τέμνουσας βάσης που αναλαμβάνεται από τα υποστυλώματα επηρεάζεται από τον συντελεστή συμπεριφοράς.

### 7.4.3.2 Υπολογισμός εντατικών μεγεθών στη δοκό του πλαισίου

Το μέγεθος που καθορίζει την διαστασιολόγηση της δοκού είναι κατεξοχήν η ροπή, όμως όταν σε μία κατασκευή υπάρχει λικνιζόμενο μέλος, τότε η τέμνουσα πρέπει να ληφθεί οπωσδήποτε υπόψη. Έτσι, στο παρόν κεφάλαιο καθορίζεται η μεταβολή των δύο αυτών μεγεθών της δοκού ενός υποδιαστασιολογημένου πλαισίου όταν το μήκος του λικνιζόμενου τοιχείου αλλάζει. Οι μεταβολές αυτές θα συγκριθούν μεταξύ των 2 πλαισίων που σχεδιάστηκε με διαφορετικό συντελεστή συμπεριφοράς.

Ο υπολογισμός των εντατικών μεγεθών γίνεται αντιστοίχως με τα υποστυλώματα όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο υποκεφάλαιο και φαίνονται στον πιο κάτω πίνακα.

Πίνακας 7.21: Εντατικά μεγέθη δοκού που αναπτύσσονται στο σεισμό σχεδιασμού

Πλάτος λικνιζόμενου τοιχείου (m)	Δοκός 3					Δοκός 5				
	N (KN)	Q <sub>3</sub> (KN)	Q <sub>5</sub> (KN)	M <sub>3</sub> (KNm)	M <sub>5</sub> (KMm)	N (KN)	Q <sub>7</sub> (KN)	Q <sub>4</sub> (KN)	M <sub>7</sub> (KMm)	M <sub>4</sub> (KMm)
Χωρίς τοιχείο	5.41	72.88	40.00	-80.19	-119.88	5.41	-40.03	152.91	-121.30	-119.88
1.00	29.81	-66.20	156.52	-86.41	-95.83	-24.74	29.82	60.50	65.15	-95.83
1.50	50.51	-85.95	164.97	-53.49	-58.02	-47.36	26.26	52.77	34.83	-58.02
2.00	65.06	-67.68	135.42	-20.89	-44.81	-55.22	-5.47	73.21	-14.19	-44.81
2.50	73.51	-48.50	104.95	-4.93	-42.75	-59.33	-39.64	96.09	-42.08	-42.75

Η επιρροή του μήκους του λικνιζόμενου τοιχείου στα εντατικά μεγέθη της δοκού ενός υφιστάμενου πλαισίου είναι η ίδια με την επιρροή σε καινούριο πλαίσιο όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 7.3.3.2. Σημαντική επιρροή του συντελεστή συμπεριφοράς παρατηρείται μόνο στη ροπή κάμψης στο σημείο της διεπιφάνειας τοιχείου δοκού κατά τον λικνισμό (κόμβος 5). Η δοκός του πλαισίου που σχεδιάστηκε με μεγαλύτερο συντελεστή συμπεριφοράς ( $\alpha=6$ ) αναπτύσσει στο σημείο αυτό μικρότερη ροπή από ότι αναπτύσσει ένα ισχυρότερο πλαίσιο. Αυτό ίσως να οφείλεται στο γεγονός ότι στο πλαίσιο με  $\alpha=6$  τα υποστυλώματα είναι πιο εύκαμπτα δηλαδή παραμορφώνονται πιο εύκολα, άρα η δοκός ασκεί λιγότερη αντίσταση στον κόμβο 5.

Σημειώνεται γενικά ότι ο συντελεστής συμπεριφοράς δεν έχει σημαντική επίδραση στην δοκό και ότι δεν θα ληφθεί υπόψη άμεσα για την ενίσχυση της δοκού όταν το πλαίσιο στο οποίο ανήκει ενισχυθεί με τοιχείο.

### 7.4.3.3 Υπολογισμός γενικής πλαστιμότητας πλαισίου και τοπικής πλαστιμότητας υποστυλωμάτων

Πολύ σημαντικό είναι να καθοριστεί σε ποιο πλαίσιο (με  $\alpha=3$  ή με  $\alpha=6$ ) και σε ποιο μήκος το λικνιζόμενο τοιχείο είναι πιο αποτελεσματικό. Η πλαστιμότητα τοπική και γενική, αποτελεί ένα από τους παράγοντες που καθορίζουν συμπεριφορά του πλαισίου.

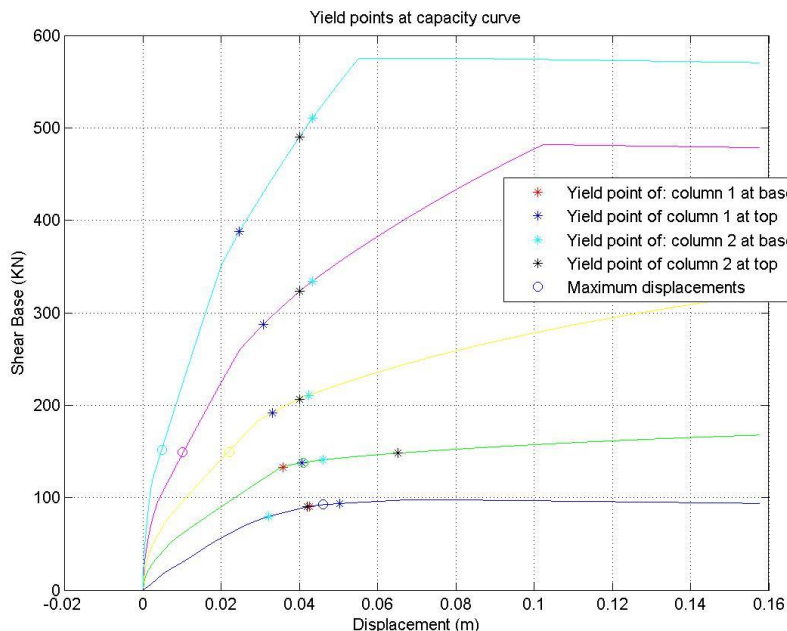
Να σημειωθεί ότι η γενική πλαστιμότητα εκφράζεται σε όρους μετακινήσεων ενώ οι τοπικές πλαστιμότητες των υποστυλωμάτων σε όρους καμπυλοτήτων και υπολογίζονται με την ίδια διαδικασία του κεφαλαίου 7.3.3.3.

Πίνακας 7.22: Γενική και τοπική των υποστυλωμάτων πλαστιμότητα

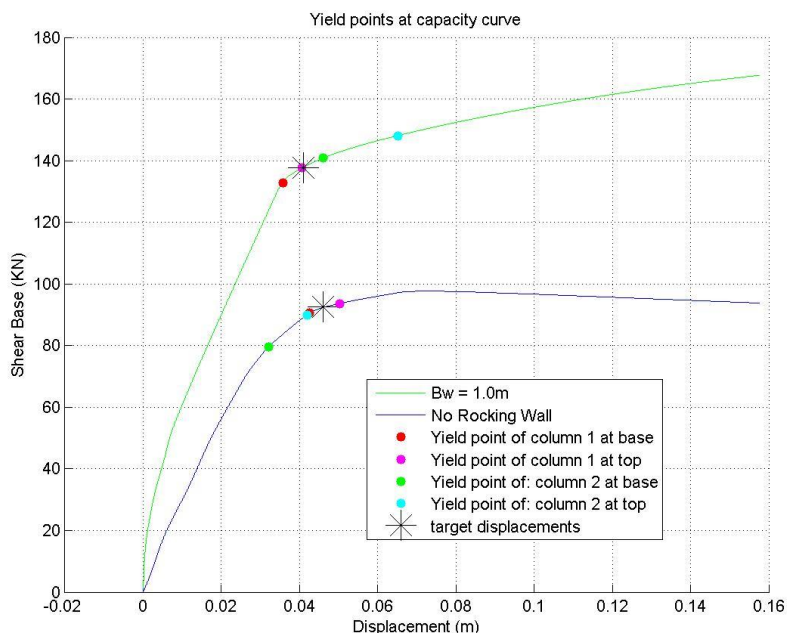
Πλάτος λικνιζόμενου τοιχείου (m)	Γενική πλαστιμότητα	Πλαστιμότητα υποστυλώματος 1	Πλαστιμότητα υποστυλώματος 2
Χωρίς τοιχείο	1.86	2.46	5.61
1.00	6.27	4.25	2.46
1.50	11.58	Δεν διαρρέει	Δεν διαρρέει
2.00	7.08	Δεν διαρρέει	Δεν διαρρέει
2.50	4.94	Δεν διαρρέει	Δεν διαρρέει

Η επιρροή του μήκους του λικνιζόμενου τοιχείου στις πλαστιμότητες του υποδιαστασιοποιημένου πλαισίου είναι η ίδια ποιοτικά με αυτή που παρατηρήθηκε στο καινούριο πλαίσιο. Δηλαδή, όσο αυξάνει το μήκος αυτό αυξάνει και η γενική πλαστιμότητα του πλαισίου. Όπως αναφέρθηκε, αυτό ισχύει για τον λόγο ότι δεν προκαλούνται διαρροές στα υπόλοιπα μέλη, άρα στην πράξη το όλο σύστημα λειτουργά ελαστικά εκτός από το τοιχείο που "διαρρέει". Για αυτό τον λόγο όταν το πλαίσιο που διαστασιολογήθηκε με συντελεστή συμπεριφοράς 6 και ενισχύθηκε με μήκος λικνιζόμενου τοιχείου 1m, δεν υπακούει στον πιο πάνω κανόνα αφού διαρρέουν τα υποστυλώματα του. Η αύξηση της γενικής πλαστιμότητας οφείλεται στο συνδυασμό 2 δεδομένων. Το πρώτο είναι ότι η διαρροή που προκύπτει από την διραμμικοποίηση είναι σταθερή στα ενισχυμένα πλαίσια επειδή οφείλεται κυρίως στην "διαρροή" του πλαισίου (διάγραμμα 7.2). Ο δεύτερος λόγος είναι ότι αν η ενίσχυση δεν αυξάνει ικανοποιητικά την δυσκαμψία, οι στοχευόμενες μετακινήσεις που θα αναπτυχθούν θα είναι ίδιας τάξης με του μη ενισχυμένου πλαισίου (με μεγαλύτερη φασματική επιτάχυνση) (διάγραμμα 7.14). Έτσι συνδυάζοντας τα δύο πιο πάνω δεδομένα προκύπτει λογικώς η αύξηση της γενικής πλαστιμότητας.

Ως γνωστό το τοιχείο βοηθάει κυρίως τον περιορισμό των τοπικών πλαστιμοτήτων στα υποστυλώματα. Αυτό, επαληθεύεται στο υποστυλώμα 2 όμως δεν επαληθεύεται στο υποστυλώμα 1 για ενίσχυση με τοιχείο 1m που όπως φαίνεται από τον πιο πάνω πίνακα η πλαστιμότητα του αυξάνει. Η διαρροή των μελών φαίνεται στα επόμενα δύο διαγράμματα.



Διάγραμμα 7.13: Καμπύλες ικανότητας με τα σημεία μεγίστων μετατοπίσεων και σημεία πλαστικοποίησης



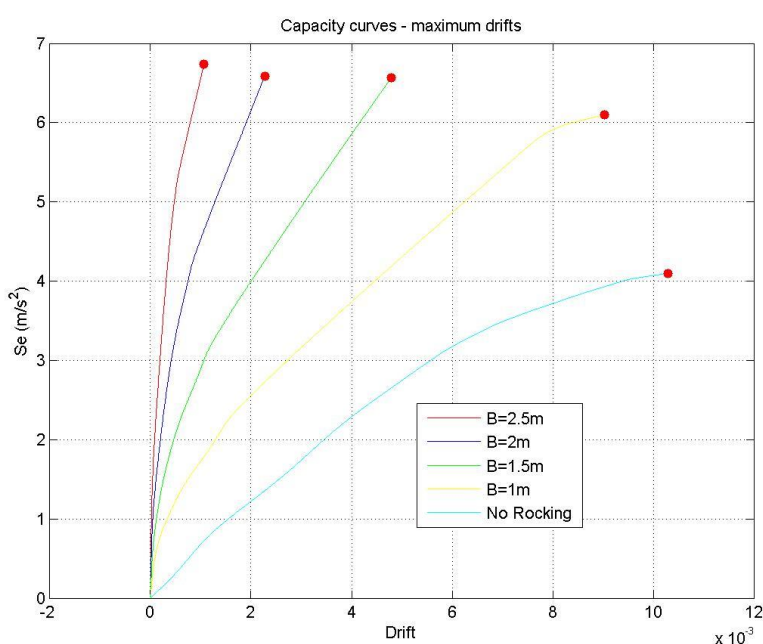
Διάγραμμα 7.14: Καμπύλες ικανότητας πλαισίων με διαρροή

Από τα το διάγραμμα 7.13, γίνεται εμφανές ότι οι μετατοπίσεις κορυφής στο ενισχυμένο και μη πλαίσιο είναι της ίδια τάξης μεγέθους, με διαφορετικές όμως μέγιστες αναπτυσσόμενες σεισμικές δυνάμεις. Αυτό όμως που διαφέρει είναι η μείωση της ροπής αντοχής του υποστυλώματος 1 λόγω ύπαρξης εφελκυστικής αξονικής δυνάμεως (βλέπε διάγραμμα 6.9). Έτσι όπως φαίνεται από το διάγραμμα 7.14, η στοχευόμενη μετακίνηση είναι μεγαλύτερη από την μετακίνηση διαρροής της βάσης του υποστυλώματος 1 τόσο στο

ενισχυμένο όσο και στο μη ενισχυμένο πλαίσιο. Η διαφορά μεταξύ των δύο μετακινήσεων είναι μεγαλύτερο στη ενισχυμένο πλαίσιο και για αυτό εκεί το υποστύλωμα 1 αναπτύσσει μεγαλύτερη πλαστιμότητα.

Από την σύγκριση της συμπεριφοράς των τοπικών και γενικών πλαστιμοτήτων που αναπτύσσονται στα δύο πλαίσια τα οποία έχουν διαστασιολογηθεί με συντελεστή συμπεριφοράς 3 και 6, συμπεράναμε ότι ο συντελεστής αυτός ίσως είναι καθοριστικός όταν οι ενισχύσεις των πλαισίων γίνουν με τοίχιο μικρού μήκους. Επειδή, αν στο ενισχυμένο πλαίσιο δημιουργηθούν πλαστικές αρθρώσεις, τότε η ενίσχυση μπορεί να αυξήσει τόσο την γενική πλαστιμότητα όσο και την τοπική του υποστυλώματος 1.

Ακολουθεί διάγραμμα που κάνει πολύ εμφανές ποιο πλαίσιο αποκρίθηκε ελαστικά στο σεισμό σχεδιασμού.



Διάγραμμα 7.15: Μέγιστες σεισμικές μετακινήσεις και επιταχύνσεις του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος

#### 7.4.4 Συμπεράσματα ως προς την επιρροή στο πλαίσιο αρχικής πλαστιμότητας 6 από την αύξηση του μήκους του λικνιζόμενου τοιχείου.

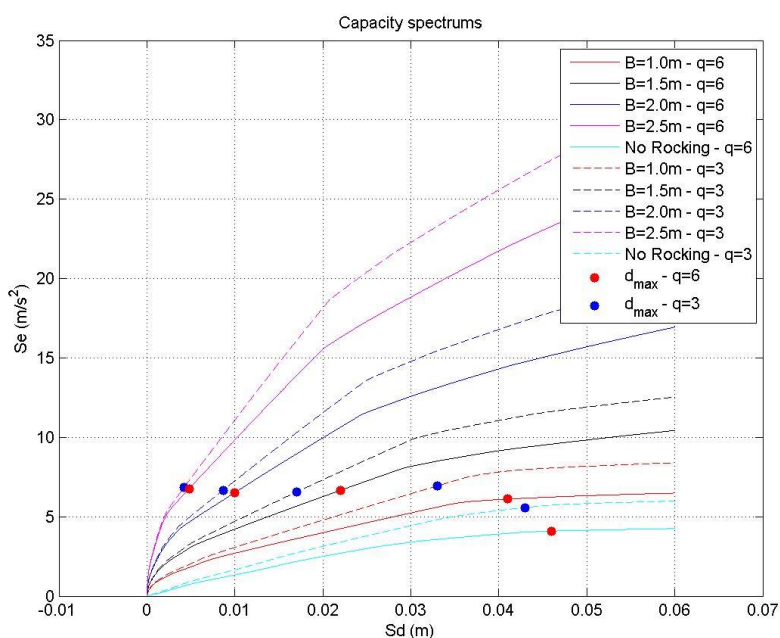
Η επιρροή του μήκους του λικνιζόμενου τοιχείου στην συμπεριφορά υφιστάμενου πλαισίου είναι ίδια με την επιρροή σε ένα καινούριο πλαίσιο και περιγράφεται στο κεφάλαιο 7.3.4. Σημαντικό συμπέρασμα είναι επίσης ότι η ενίσχυση του πλαισίου με μικρό λικνιζόμενο τοίχιο μπορεί να αυξήσει την πλαστιμότητα του αριστερού υποστυλώματος δηλαδή να του αυξήσει τις ζημιές σε ένα σεισμικό γεγονός.

#### 7.4.5 Συμπεράσματα ως προς την σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων που έγιναν για καινούρια πλαίσια και παλαιά πλαίσια.

Παραθέτοντας τα αποτελέσματα του κεφαλαίου 7.3 και 7.4 καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ενώ ποιοτικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων είναι ίδια, ποσοτικά υπάρχουν διαφορές μεταξύ των πλαισίων που διαστασιολογήθηκαν με διαφορετικό συντελεστή συμπεριφοράς. Οι διαφορές όμως μειώνονται όσο αυξάνεται το μήκος του τοιχείου, επειδή αυτό αναλαμβάνει όλο και μεγαλύτερη ένταση.

Όπως παρατηρήσαμε οι διαφορές αυτές γεφυρώνονται πλήρως αν η ενίσχυση των πλαισίων γίνει με λικνιζόμενο τοιχείο μεγάλου μήκους. Αποδείχθηκε πως υπάρχει για το πλαίσιο ένα συγκεκριμένο μήκος τοιχείου το οποίο κάνει την ενίσχυση πολύ πιο αποτελεσματική ανεξαρτήτως του συντελεστή συμπεριφοράς που χρησιμοποιήθηκε. Στο συγκεκριμένο πλαίσιο προέκυψε ότι το κρίσιμο μήκος είναι τα 2.00m. Αυτός ο ισχυρισμός ισχύει για όλα τα πλαίσια, όμως για την τεκμηρίωση του χρειάζεται επιπλέον έρευνα.

Αρχικά παρατηρήθηκε ότι το πλαίσιο που διαστασιολογήθηκε με  $q=3$  αναπτύσσει στοχευόμενες μετακινήσεις μικρότερες και οι φασματικές επιταχύνσεις επιταχύνσεις μεγαλύτερες αφού είναι πιο δύσκαμπτο από το πλαίσιο που διαστασιολογήθηκε με συντελεστή συμμετοχής  $q=6$ . Οι διαφορές αυτές όμως μειώνονται μέχρι να εξαληφθούν καθώς αυξάνεται το μήκος του λικνιζόμενου τοιχείου. Οι πιο πάνω παρατηρήσεις απεικονίζεται στο επόμενο διάγραμμα.



Διάγραμμα 7.16: Φάσματα ικανότητας και οι στοχευόμενες μετακινήσεις των πλαισίων με διαφορετικό πλάτος τοιχείου και συντελεστή συμπεριφοράς

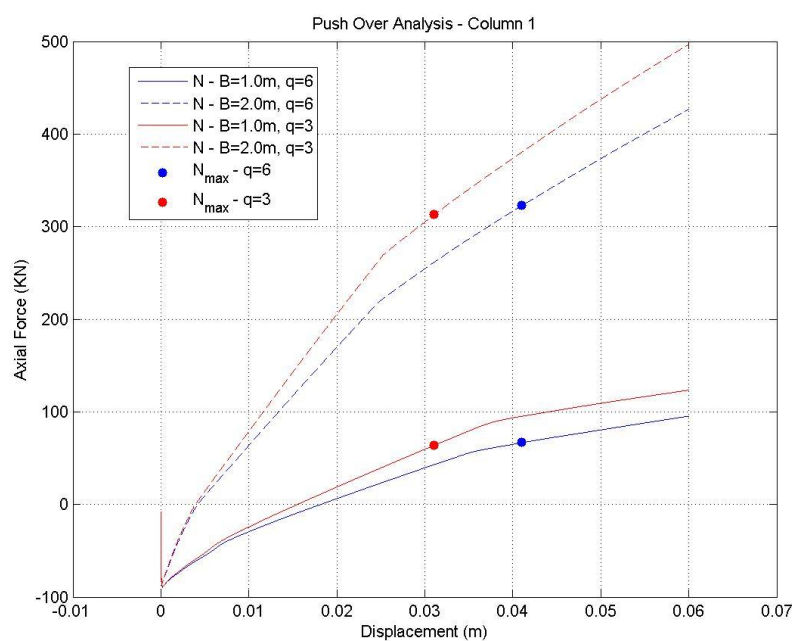
Από το πιο πάνω διάγραμμα γίνεται εμφανές ότι οι στοχευόμενες μετακινήσεις των πλαισίων που διαστασιολογήθηκαν με διαφορετικό συντελεστή συμπεριφοράς αποκλίνουν πολύ όταν το αυτά ενισχυθούν με μήκος λικνιζόμενου τοιχείου 1m. Το



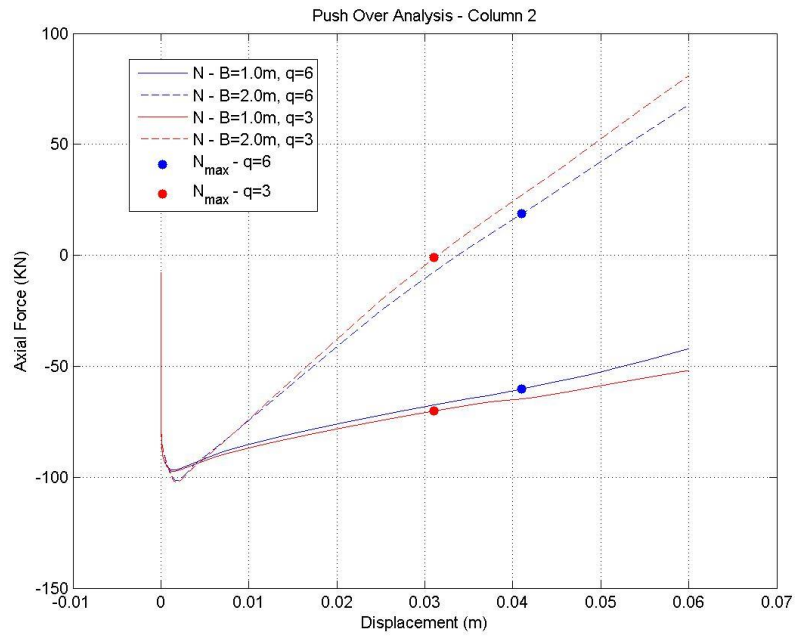
υποδιαστασιοποιημένο πλαίσιο φαίνεται ότι μπαίνει σε σχεδόν οριζόντιο κλάδο, δηλαδή πλαστικοποιούνται περισσότερο τα μέλη του, όπως φαίνεται καλύτερα στο διάγραμμα 7.14. Αυτό έχει διάφορες επιπτώσεις στο συγκεκριμένο πλαίσιο που μας οδήγησε σε χρήσιμα συμπεράσματα. Πρώτα, αυξάνει την τοπική πλαστιμότητα του αριστερού υποστυλώματος το οποίο είναι αντίθετα στον σκοπό της ενίσχυσης. Συμπεραίνουμε έτσι ότι σε κάθε πλαίσιο υπάρχει ένα ελάχιστο μήκος κάτω από το οποίο θα αυξήσει τις ζημιές του αριστερού υποστυλώματος (αν ο σεισμός είναι προς τα δεξιά), ειδικότερα αν το πλαίσιο είναι εύκαμπτο.

Οι τέμνουσες δυνάμεις και οι ροπές κάμψης που ασκούνται στα υποστυλώματα λόγω του σεισμού σχεδιασμού είναι μικρότερες σε μέγεθος στο υποδιαστασιοποιημένο πλαίσιο. Όμως όσο το πλάτος του λικνιζόμενου τοιχείου αυξάνει, τα εντατικά αυτά μεγέθη προσεγγίζουν τα αντίστοιχα του πλαισίου που διαστασιολογήθηκε με συντελεστή συμπεριφοράς  $q=3$ . Οι αξονικές δυνάμεις εξαρτώνται κυρίως από την μετακίνηση κορυφής. Έτσι στο πλαίσιο με μεγαλύτερο συντελεστή συμπεριφοράς (με  $q=6$ ) αναπτύσσεται περισσότερος εφελκυσμός στο υποστυλώμα 1 και λιγότερη θλίψη στο δύο, σε σχέση με πλαίσιο που διαστασιολογήθηκε με  $q=3$ . Η διαφορά της αξονικής δύναμης είναι ασήμαντη λόγω των μικρών διαφορών των στοχευόμενων μετακινήσεων μεταξύ των δύο πλαισίων. Ενδέχεται όμως να είναι σημαντική σε πλαίσια που οι σεισμικές ροπές να είναι μεγάλες σε σχέση με τις στατικές. Παρατηρήθηκε επίσης από τους πίνακες 7.9 και 7.19, ότι η κατανομή της ροπής στα μέλη του πλαισίου δεν επηρεάζεται από το συντελεστή συμπεριφοράς, επηρεάζεται όμως οι τέμνουσες των υποστυλωμάτων.

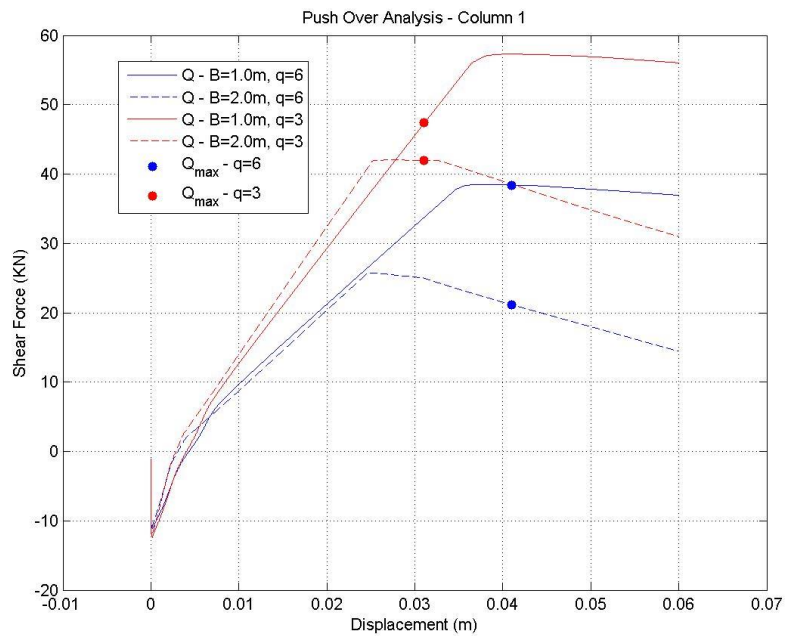
Πιο κάτω παρουσιάζονται τα εντατικά μεγέθη των υποστυλωμάτων ανάλογα με το πλαίσιο στο οποίο εντάσσονται:



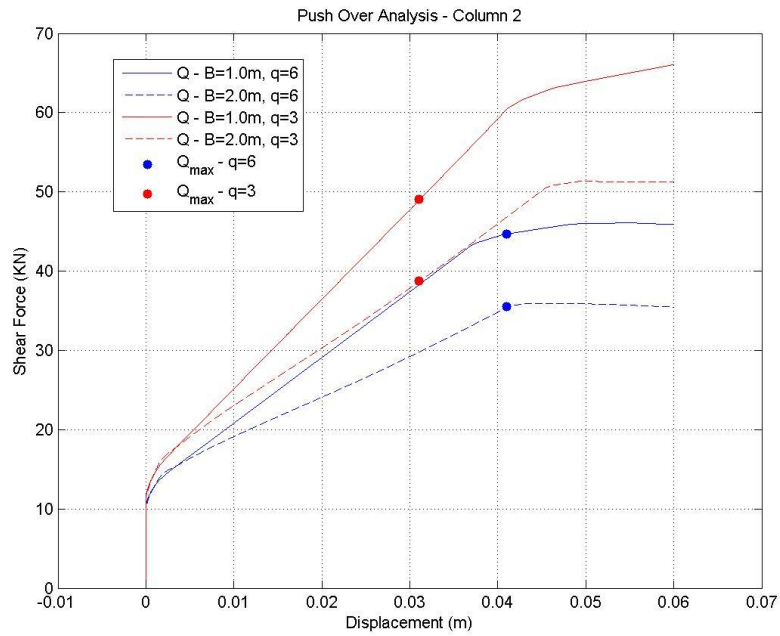
Διάγραμμα 7.17: Αξονική δύναμη υποστυλώματος 1



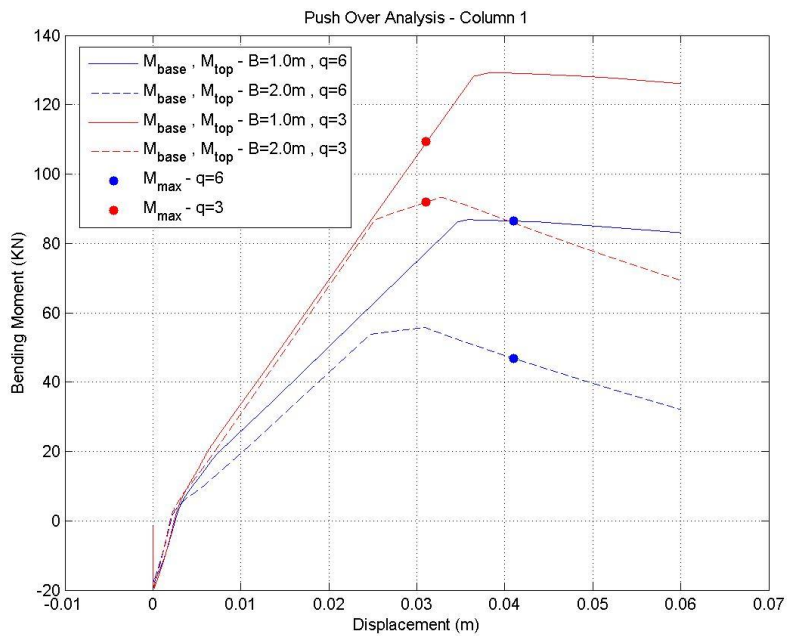
Διάγραμμα 7.18: Αξονική δύναμη υποστύλματος 2



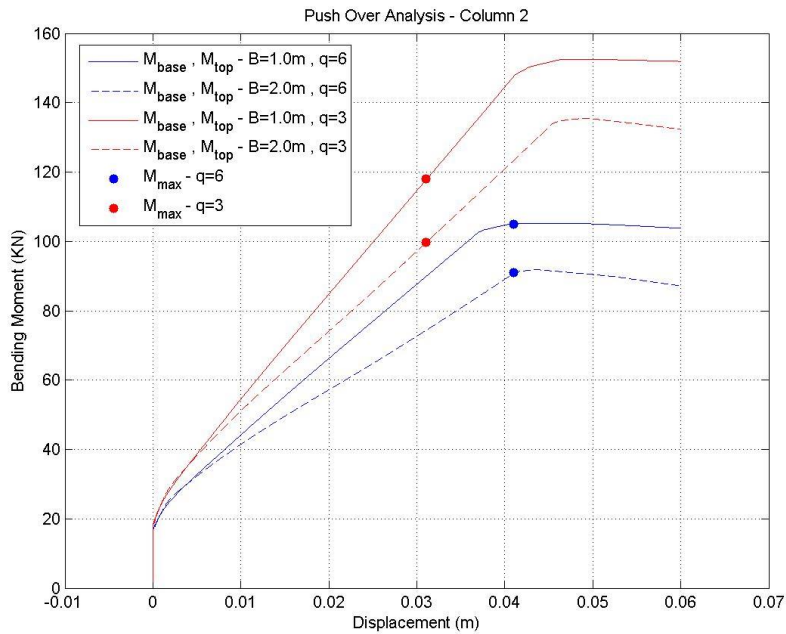
Διάγραμμα 7.19: Τέμνουσα δύναμη υποστύλματος 1



**Διάγραμμα 7.20: Τέμνουσα δύναμη υποστύλωματος 2**



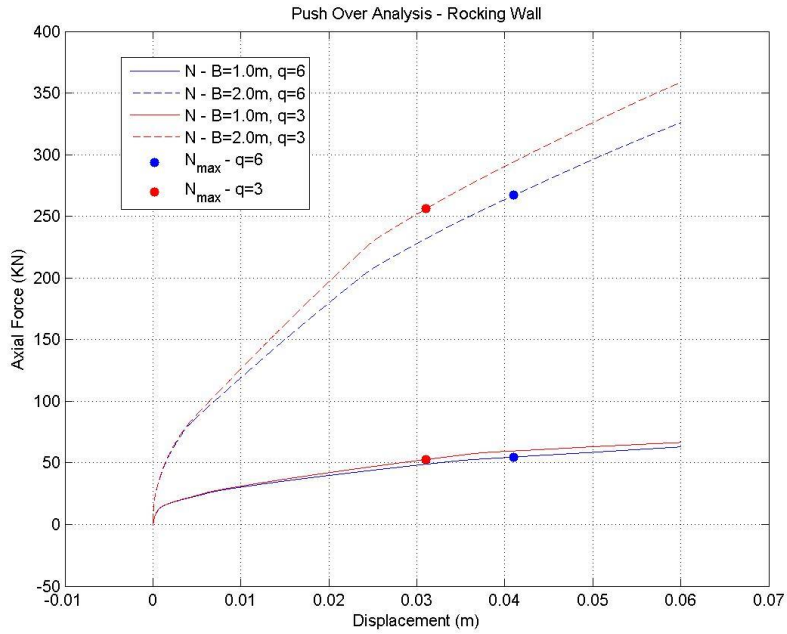
**Διάγραμμα 7.21: Ροπή κάμψης υποστύλωματος 1 στη βάση**



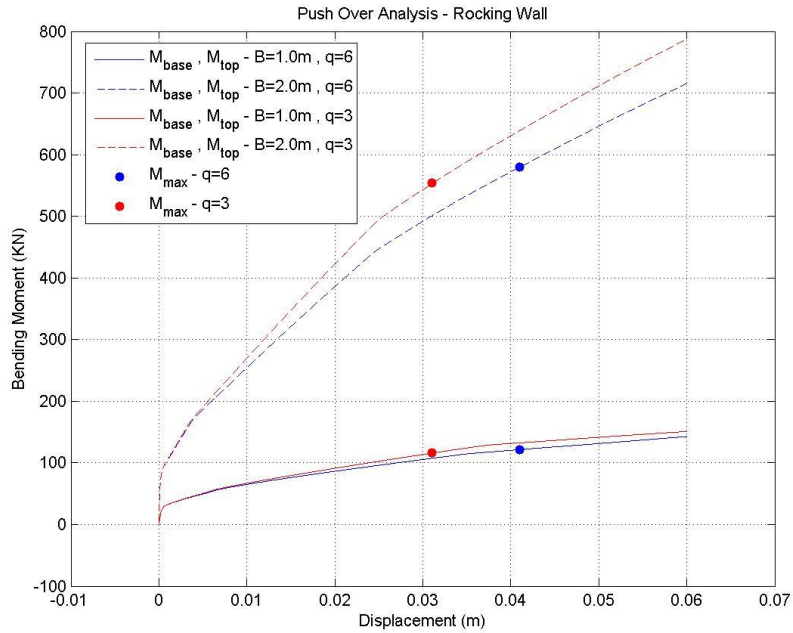
Διάγραμμα 7.22: Ροπή κάμψης υποστυλώματος 1 στη βάση

Επίσης, ο συντελεστής συμπεριφοράς της διαστασιολόγησης των πλαισίων δεν επηρεάζει σημαντικά ούτε τα εντατικά μεγέθη της βάσης του λικνιζόμενου τοιχείου. Υπάρχει μικρή μείωση της έντασης στο πλαίσιο με το μικρότερο συντελεστή συμπεριφοράς, όμως το τοιχείο στο ίδιο πλαίσιο αναλαμβάνει μεγαλύτερο ποσοστό της τέμνουσας και ροπής βάσης. Δηλαδή το τοιχείο του πλαισίου με πιο εύκαμπτα υποστυλώματα συμμετέχει περισσότερο στην ανάληψη της έντασης που προκαλεί ο σεισμός στην κατασκευή. Αυτές οι διαφορές είναι πρακτικά ασήμαντες, όμως αυτό που πρέπει να ληφθεί υπόψη στον σχεδιασμό για την επιλογή του συντελεστή συμπεριφοράς είναι τάσεις στη βάση του τοιχείου. Αποδείχθηκε, ότι το υποδιαστασιολογημένο πλαίσιο αναπτύσσει πολύ μεγαλύτερη μέγιστη παραμόρφωση στην ακραία θλιβόμενη ίνα του τοιχείου. Επίσης το μήκος της βάσης που θλίβεται και παραμορφώνεται είναι μεγαλύτερο όπως μεγαλύτερο είναι και μήκος που πλαστικοποιείται. Δηλαδή στα πλαίσια που σχεδιαστήκαν με μεγαλύτερο συντελεστή συμπεριφοράς θα αναπτυχθούν μεγαλύτερες ζημιές στη βάση του τοιχείου οι οποίες μάλιστα θα εκτείνονται περισσότερο.

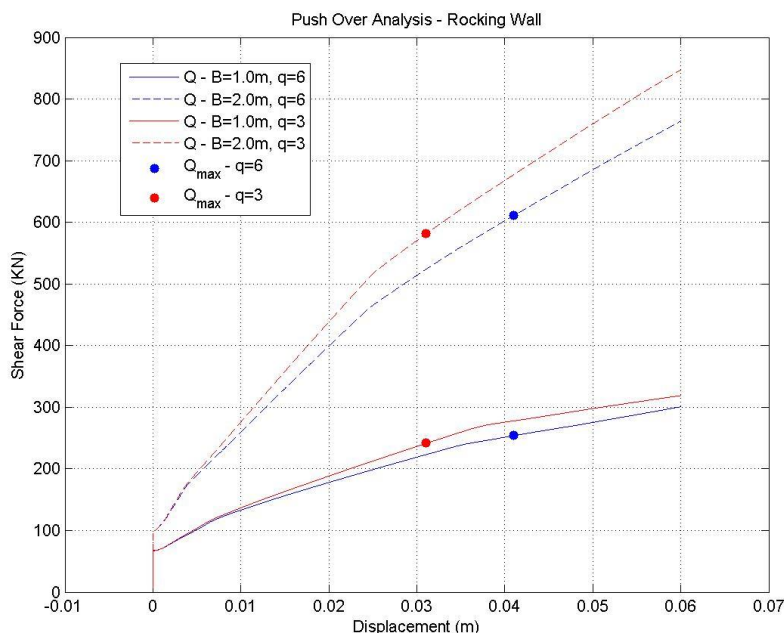
Πιο κάτω παρουσιάζονται τα εντατικά μεγέθη στη βάση του τοιχείου ανάλογα με το πλαίσιο στο οποίο εντάσσονται:



Διάγραμμα 7.23: Αξονική δύναμη στη βάση του τοιχείου



Διάγραμμα 7.25: Τέμνουσα δύναμη στη βάση του τοιχείου



Διάγραμμα 7.25: Ροπή κάμψης στη βάση του τοιχείου

Τέλος, ο συντελεστής συμπεριφοράς δεν έχει σημαντική επίδραση στην δοκό και δεν είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη άμεσα για την ενίσχυση της δοκού μετά την τοποθέτηση του λικνιζόμενου τοιχείου στο πλαίσιο.

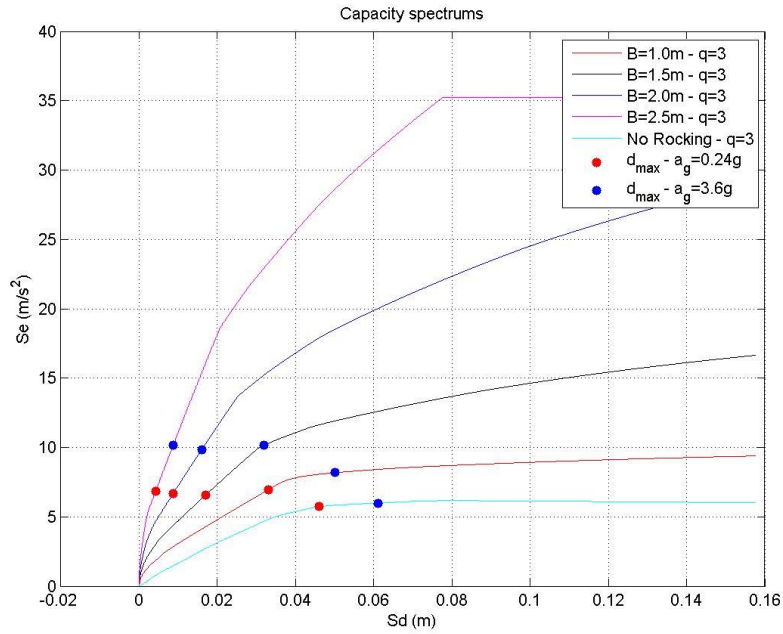
## 7.5 Αναλύσεις πλαισίων υπό το σεισμικό φάσμα σχεδιασμού της ζώνης σεισμικής επικινδυνότητας Z3 και σύγκριση με τα αποτελέσματα του σεισμού σχεδιασμού που αντιστοιχεί στη ζώνη Z2

Το μέγεθος του σεισμού αναμένεται να αλλάξει τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια αφού όπως παρατηρήθηκε στα περισσότερα πλαίσια τα οποία θεωρηθήκαν ότι βρίσκονται σε ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Z2, δεν υπήρχε διαρροή. Έτσι, αναμένουμε ότι αυξημένο φάσμα σχεδιασμού θα δώσει πιο αντιπροσωπευτικά συμπεράσματα ως προς την επίδραση του λικνιζόμενου τοιχείου στη συμπεριφορά του πλαισίου και των μελών του.

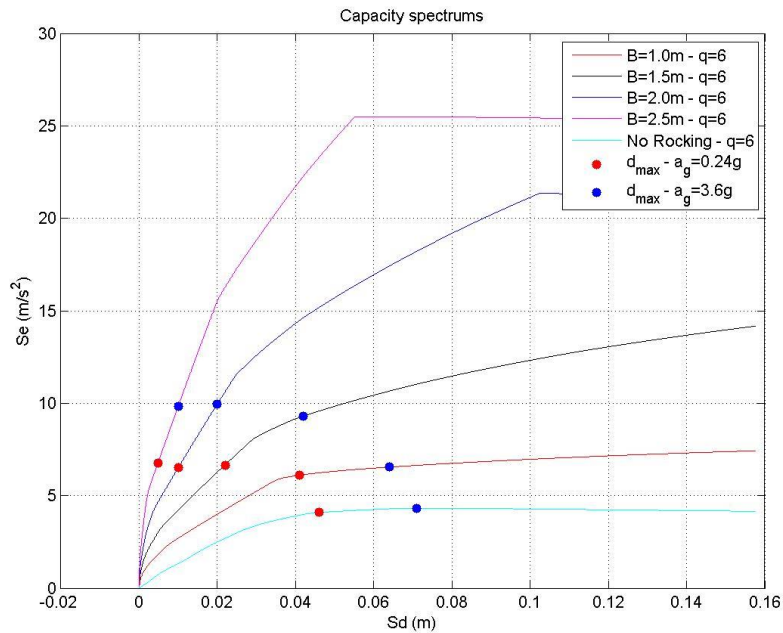
Η γεωμετρία παραμένει ίδια με τα προηγούμενα υποκεφάλαια για να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

### 7.5.1 Υπολογισμός στοχευόμενων μετατοπίσεων

Ο ισχυρότερος σεισμός θα προκαλέσει μεγαλύτερες μετακινήσεις κορυφής από τον σεισμό που μελετήθηκε μέχρι τώρα. Αυτό γίνεται αντιληπτό από τα διαγράμματα που ακολουθούν.

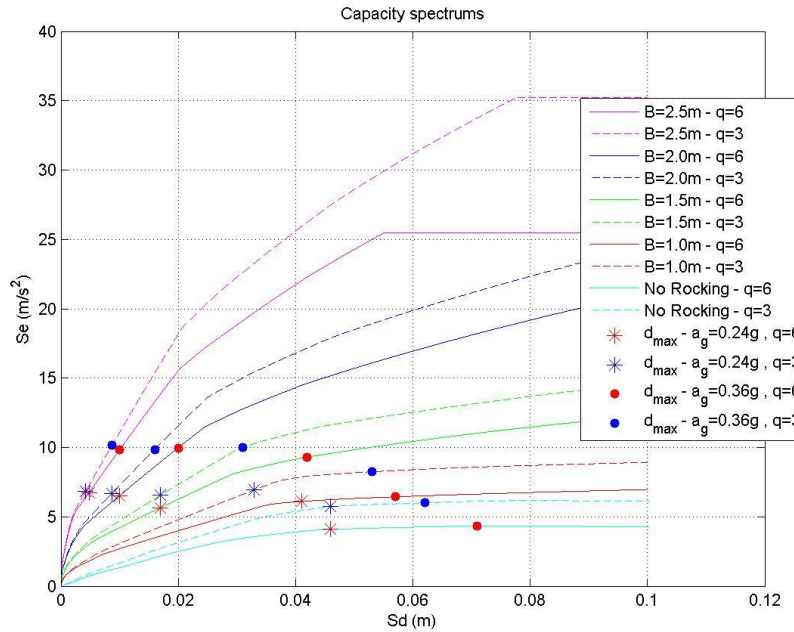


Διάγραμμα 7.26: Φάσματα κανότητας πλαισίων που διαστασιολογήθηκαν με συντελεστή συμπεριφοράς 3 με διαφορετικό μήκος λικνιζόμενου τοιχείου και η μέγιστη μετατόπιση για κάθε σεισμό

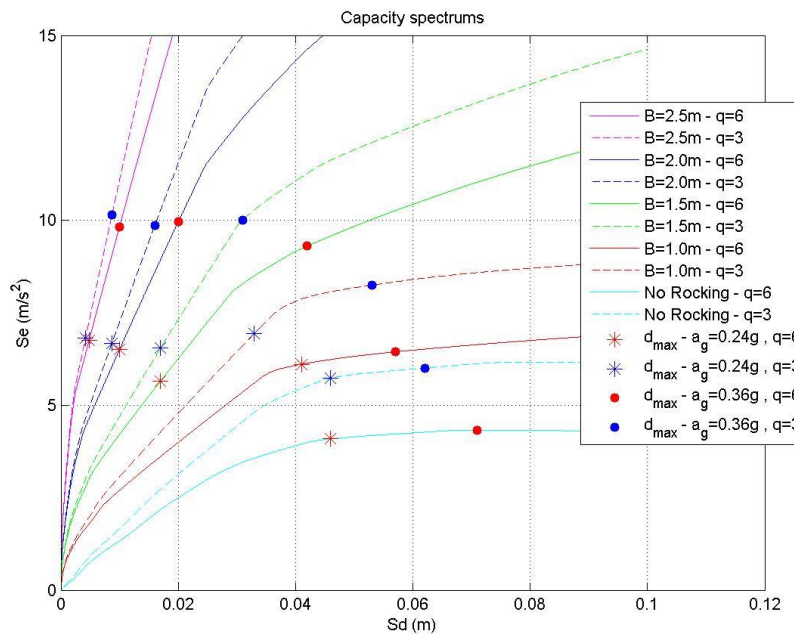


Διάγραμμα 7.27: Φάσματα κανότητας πλαισίων που διαστασιολογήθηκαν με συντελεστή συμπεριφοράς 6 με διαφορετικό μήκος λικνιζόμενου τοιχείου και η μέγιστη μετατόπιση για κάθε σεισμό

Από τα πιο πάνω διαγράμματα γίνεται αντιληπτό πως και στα δύο πλαίσια, η μετατόπιση κορυφής του πλαισίου αυξάνει πολύ στο σεισμό σχεδιασμού, όμως αυξάνει περισσότερο στο πιο εύκαμπτο πλαίσιο. Αυτό γίνεται πιο εμφανές από το πιο κάτω διάγραμμα το οποίο συγκρίνει πλαίσια με διαφορετική αρχική διαστασιολόγηση για διάφορα πλάτη τοιχείων ως ενίσχυση.



Διάγραμμα 7.28: Φάσματα ικανότητας με τις μέγιστες αναπτυσσόμενες μετακινήσεις κορυφής των δύο πλαισίων



Διάγραμμα 7.29: Φάσματα ικανότητας σε μικρή κλίμακα με τις μέγιστες αναπτυσσόμενες μετακινήσεις κορυφής των δύο πλαισίων

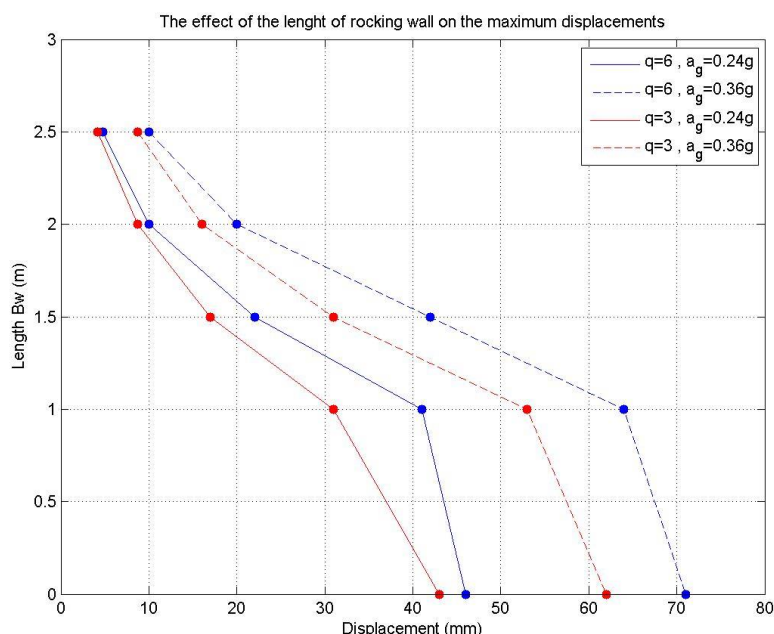
Από το διάγραμμα 7.29 φαίνεται ότι η αρχική διαστασιολόγηση του πλαισίου επηρεάζει την απόκριση του περισσότερο όταν ο σεισμός είναι πιο ισχυρός. Παρατηρείται όμως καθώς το πλαίσιο γίνεται πιο δύσκαμπτο, η διαφορά των φασματικών επιταχύνσεων και μετακινήσεων των πλαισίων με διαφορετικό μήκος τοιχείου μειώνεται. Επίσης αντιλαμβανόμαστε ότι όσο το μήκος του λικνιζόμενου τοιχείου μειώνεται τόσο το μέγεθος του σεισμού επηρεάζει περισσότερο τη συμπεριφορά του πλαισίου αυξάνοντας την μέγιστη



μετακίνηση της κορυφής. Από την άλλη η σεισμική δύναμη που προκαλούν οι σεισμοί με εδαφική επιτάχυνση 0.24g και 0.36g στο πλαίσιο αυξάνεται όσο μεγαλώνει το μήκος του τοιχείου.

Από το διάγραμμα 7.28 παρατηρείται η γενική συμπεριφορά της κατασκευής. Παρατηρείται δηλαδή η σύγκριση των σεισμικών φορτίων σε σχέση με την φέρουσα ικανότητα της κατασκευής. Είναι προφανές λοιπόν ότι τα πλαίσια που είναι ενισχυμένα με τοίχειο μήκους 1m, φτάνουν κοντά στην φέρουσα ικανότητα τους ακόμα και λόγω του ασθενούς σεισμού. Δηλαδή, σε περίπτωση που συμβεί ο σεισμός σχεδιασμού της ζώνης σεισμικότητας Z3, το πλαίσιο δεν θα είναι ικανό να αναλάβει περισσότερη ένταση, και έτσι η πρόσθετη ενέργεια του μεγαλύτερου σεισμού καταναλώνεται μέσω μετακινήσεων. Αυτό επεξηγεί την πιο πάνω παρατήρηση, ότι οι μετακινήσεις των πιο εύκαμπτων πλαισίων επηρεάζονται περισσότερο από το μέγεθος του σεισμού.

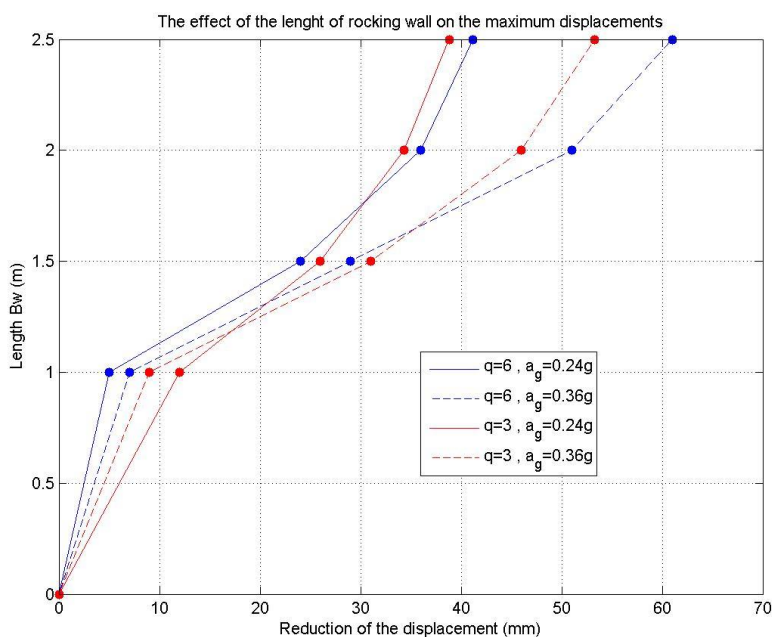
Η επιρροή του τοιχείου στις μέγιστες μετακινήσεις κορυφής του πλαισίου όπως αναφέρθηκε είναι εκθετικής μορφής, δηλαδή η αύξηση του μήκους του πλαισίου προκαλεί όλο και περισσότερη μείωση των μετακινήσεων. Στο επόμενο διάγραμμα απεικονίζεται η ταχύτητα μείωσης της επιτάχυνσης συναρτήσει του πλάτους. Παρατηρείται, η προαναφερόμενη μικρή αποτελεσματικότητα του πλαισίου το οποίο ενισχύθηκε με λικνιζόμενο τοίχειο μήκους 1m. Στην συνέχεια το διάγραμμα ακολουθεί για όλες τις αναλύσεις επιταχυνόμενη μείωση των μετακινήσεων σε σχέση με την αύξηση του μήκους.



**Διάγραμμα 7.30: Επιρροή του μήκους του τοιχείου στις μέγιστες μετατοπίσεις λόγω των 2 εδαφικών επιταχύνσεων**

Σημαντικό είναι ότι η ενίσχυση του πλαισίου μειώνει περισσότερο το μέτρο των μετακινήσεων στον ισχυρό σεισμό, καθώς η κλίση του κάθε τμήματος είναι μεγαλύτερη από αυτές του ασθενέστερου σεισμού. Το επόμενο διάγραμμα απεικονίζει την μείωση σε

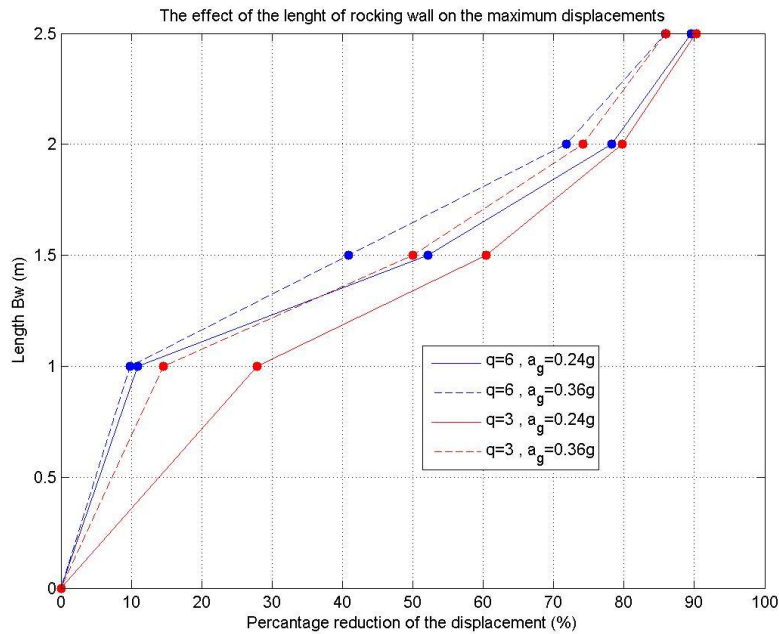
χλιοστά της μετατόπισης κορυφής του κάθε ενισχυμένου πλαισίου σε σχέση με του γυμνού πλαισίου.



Διάγραμμα 7.31: Διαφορά μετακινήσεων μεταξύ ενισχυμένου και μη πλαισίου

Παρόλο που το μέγεθος της μείωσης (σε m) της μέγιστης μετακίνησης κορυφής του ενισχυμένου πλαισίου σε σύγκριση με του μη ενισχυμένου είναι μεγαλύτερο στους ισχυρούς σεισμούς, τα ποσοστά μείωσης της μετατόπιση αυτής είναι μεγαλύτερα για τον ασθενή σεισμό. Από το διάγραμμα 7.31 φαίνεται ότι η διαφορά των ποσοστών στους δύο σεισμούς είναι αρκετά μεγάλη για μικρού μήκους τοιχεία και μειώνεται καθώς το μήκος αυξάνεται. Το φαινόμενο αυτό είναι ακόμα πιο έντονο, αν το πλαίσιο έχει διαστασιολογηθεί με συντελεστή συμπεριφοράς 3.

Η πιο πάνω παράγραφος δείχνει ότι η ενίσχυση είναι αποτελεσματικότερη στον ασθενή σεισμό σχεδιασμού.

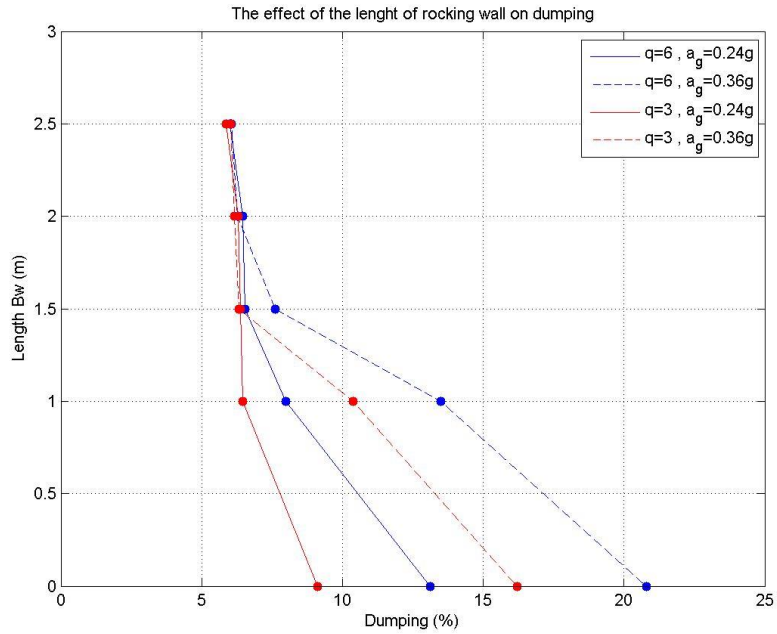


Διάγραμμα 7.32: Επιρροή του μήκους του τοιχείου ως προς τα ποσοστά μείωσης των μετακινήσεων

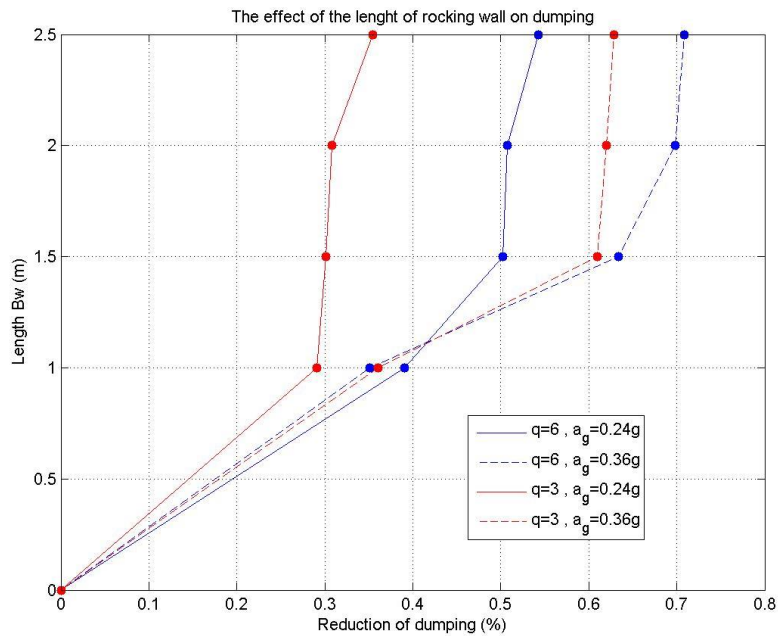
### 7.5.2 Επιρροή του μεγέθους του σεισμού ως προς την απόσβεση

Η απόσβεση επηρεάζεται κυρίως από την διαρροή των ινών των υποστρωμάτων. Όπως είναι γνωστό όσο πιο ισχυρός είναι ο σεισμός, οι μετακινήσεις αυξάνουν και για αυτό η απόσβεση του ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή είναι μεγαλύτερες για τον σεισμό σχεδιασμού της ζώνης Z3.

Τα διαγράμματα 7.33 και 7.34 που ακολουθούν επαληθεύουν ότι η απόσβεση είναι μεγαλύτερη στα πλαίσια που διαστασιολογήθηκαν με μικρότερο συντελεστή συμπεριφοράς, και στις σεισμικές διεγέρσεις με μεγαλύτερη επιτάχυνση εδάφους. Σημαντικό είναι ότι και για τις 4 αναλύσεις που παρουσιάζονται, ο συντελεστής απόσβεσης συμπίπτει όταν το μήκος του λικνιζόμενου τοιχείου είναι μεγαλύτερο από 1.5m. Έτσι λογικώς οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η μείωση της αποσβέσεως συναρτήσει της αύξηση του μήκους του τοιχείου εξελίσσεται ταχύτερα στον ισχυρότερο σεισμό. Συγκεκριμένα όταν συμβεί ο σεισμός σχεδιασμού της ζώνης επικινδυνότητας Z3, η μείωση της απόσβεσης συναρτήσει της αύξησης του μήκους του λικνιζόμενου τοιχείου είναι ταχεία για πλάτη τοιχείου μέχρι 1.5m.



Διάγραμμα 7.33: Η επιρροή της του μήκους του λικνιζόμενου τοιχείου στην απόσβεση των πλαισίων



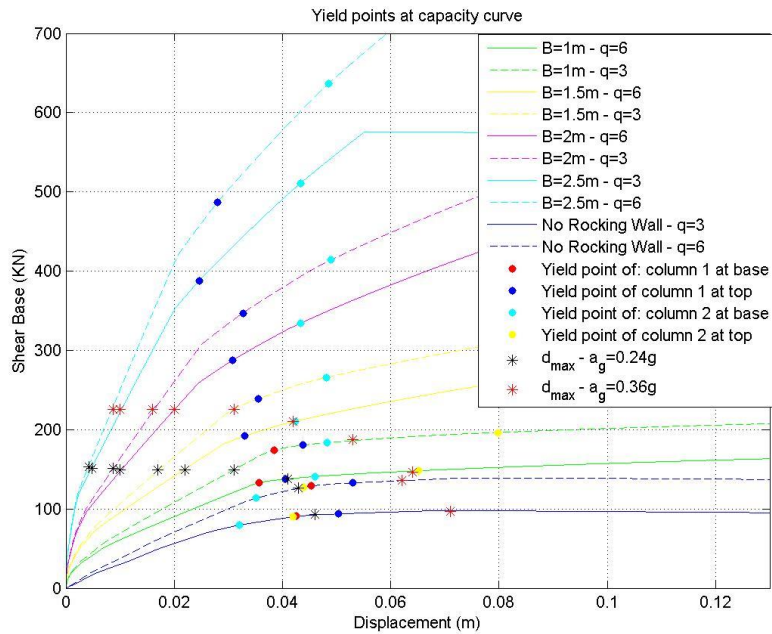
Διάγραμμα 7.34: Η επιρροή της του μήκους του λικνιζόμενου τοιχείου στην μείωση της απόσβεση των πλαισίων

### 7.5.3 Επιρροή της διαρροής των μελών με την αύξηση της εδαφικής επιτάχυνσης

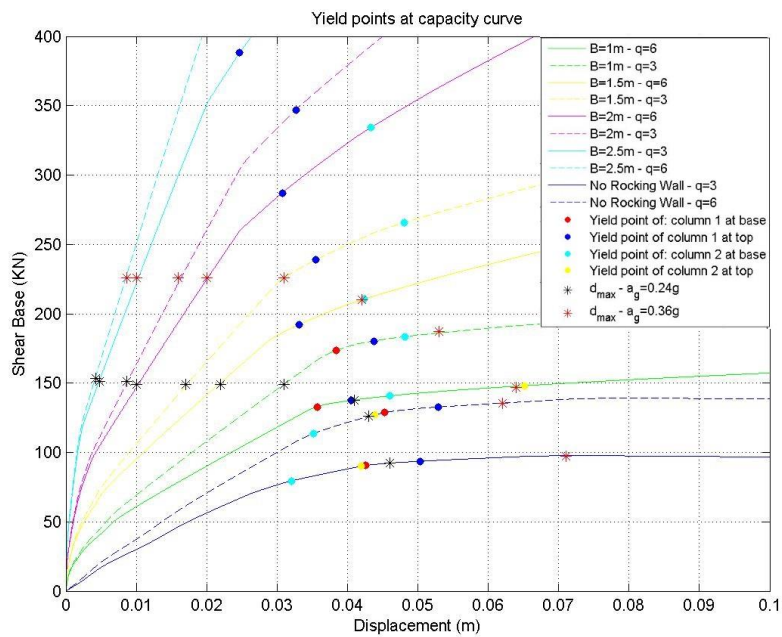
Από το διάγραμμα 7.28 φαίνεται ότι οι μετατοπίσεις κορυφής που προκληθήκαν λόγω του ισχυρότερου σεισμού, σε σχέση με τις μετατοπίσεις του ασθενέστερου, καταλήγουν σε κλάδους του φάσματος ικανότητας με μικρότερη κλίση από την κλίση. Αυτό όπως

αναφέρθηκε σημαίνει μεγαλύτερη διαρροή των ινών των υποστυλωμάτων αλλά από το πιο πάνω διάγραμμα δεν γίνεται ξεκάθαρο ποια μέλη διαρρέουν.

Στα ακόλουθα διαγράμματα φαίνεται για κάθε ανάλυση ποια μέλη διαρρέουν και πόσο η μετατόπιση διαρροής των μελών απέχει από την μέγιστη μετατόπιση.



Διάγραμμα 7.35: Καμπύλες ικανότητας με τα σημεία διαρροής και τις μέγιστες μετατοπίσεις



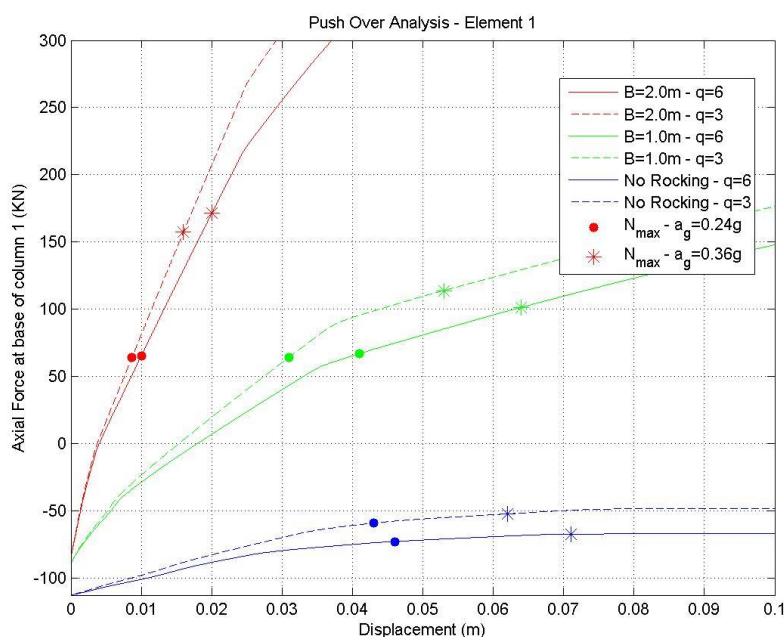
Διάγραμμα 7.36: Καμπύλες ικανότητας με τα σημεία διαρροής και τις μέγιστες μετατοπίσεις, σε μεγένθυση

Από τα πιο πάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι υποστυλώμα των πλαισίων που ενισχύονται με μήκη λικνιζόμενου τοιχείου 2m και 2.5m δεν διαρρέει ακόμα και στον ισχυρό σεισμό. Το μέγεθος του σεισμού όμως επηρεάζει τα πιο εύκαμπτα πλαίσια. Συγκεκριμένα στο πλαίσιο που διαστασιολογήθηκε με  $q=6$  και ενισχύεται με μήκος τοιχείου 1.5m, ενώ στο σεισμό σχεδιασμού με εδαφική επιτάχυνση 0.24g δεν διαρρέει κανένα μέλος του, στο ισχυρότερο σεισμό παρατηρείται διαρροή σε δύο σημεία των υποστυλωμάτων του. Επίσης, παρόλο που ασθενής σεισμός δεν προκαλεί κάποια διαρροή στο πλαίσιο που σχεδιάστηκε με συντελεστή συμπεριφοράς 3 και ενισχύθηκε με τοίχιο μήκους 1m, ο σεισμός με χαρακτηριστικά της ζώνης επικινδυνότητας Z3 προκαλεί διαρροή τριών σημείων.

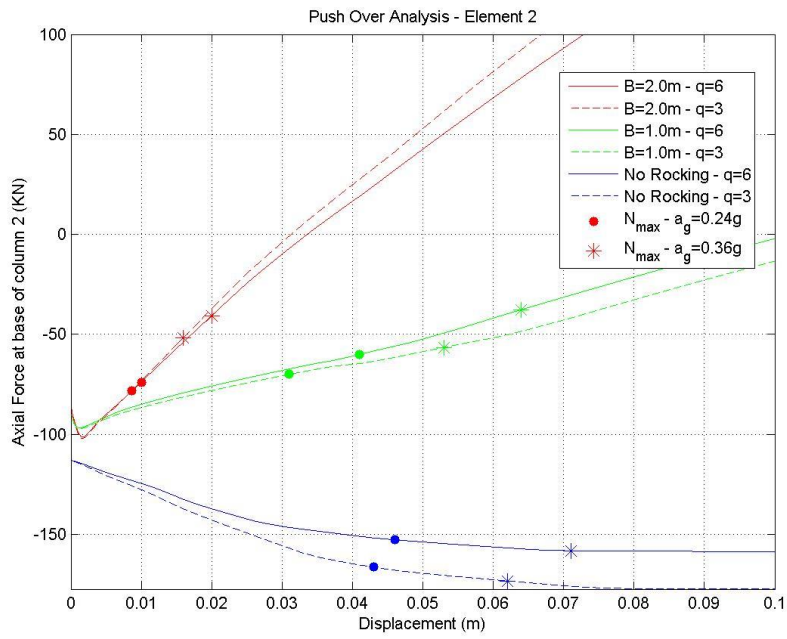
Από τα πιο πάνω συμπεραίνεται ότι ο ισχυρότερος σεισμός προκαλεί διαρροές σε πολλά σημεία των εύκαμπτων πλαισίων, ενώ η συμπεριφορά βελτιώνεται δραματικά αν το πλαίσιο ενισχυθεί με τοίχιο άνω των 2m.

#### 7.5.4 Εντατικά μεγέθη υποστυλωμάτων

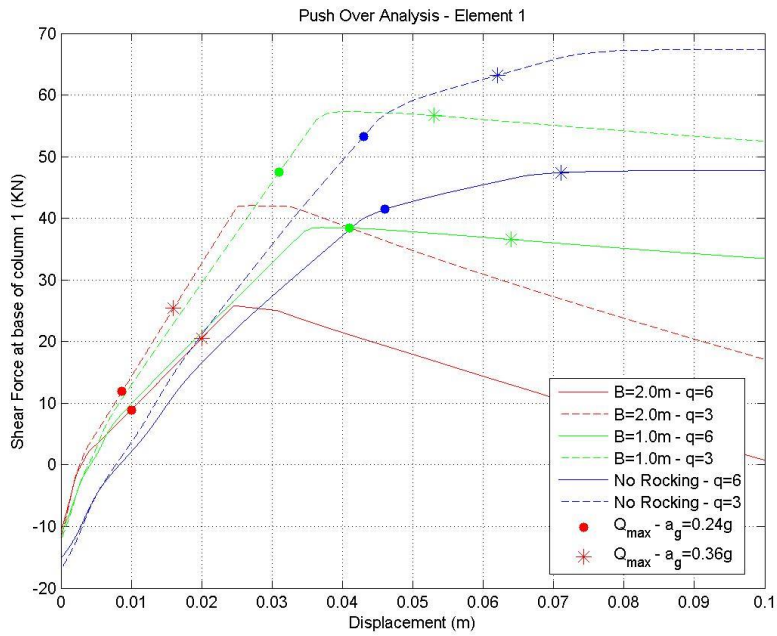
Όπως είδαμε στην προηγούμενη ενότητα η ένταση των υποστυλωμάτων εξαρτάται από την εδαφική επιτάχυνση του σεισμού. Έτσι κρίνεται αναγκαίο να μελετηθούν τα εντατικά μεγέθη των υποστυλωμάτων για να ληφθούν συμπεράσματα για το πως αυτά αλλάζουν από την αλληλεπίδραση του μεγέθους του σεισμού και του συντελεστή συμπεριφοράς. Στη συνέχεια επισυνάπτονται τα διαγράμματα ροπών, τεμνουσών και αξονικών δυνάμεων των υποστυλωμάτων.



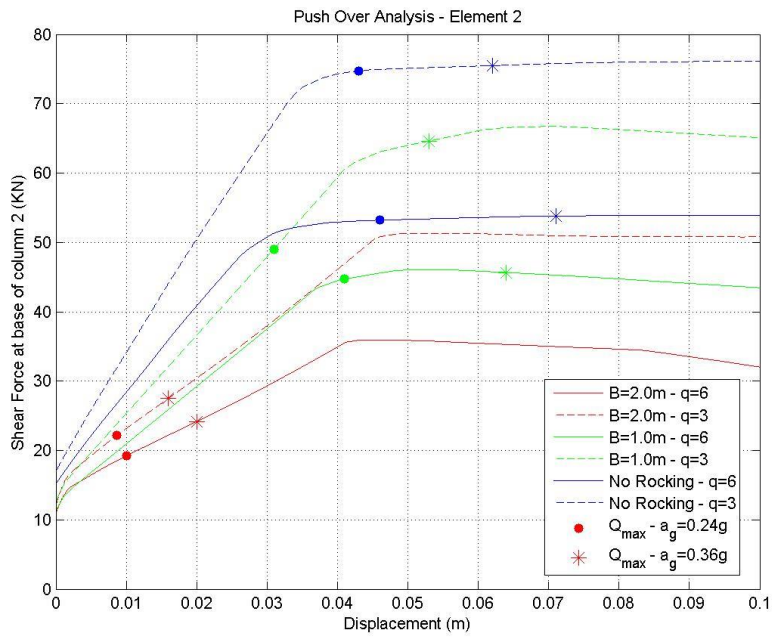
Διάγραμμα 7.37: Αξονική δύναμη υποστυλώματος 1



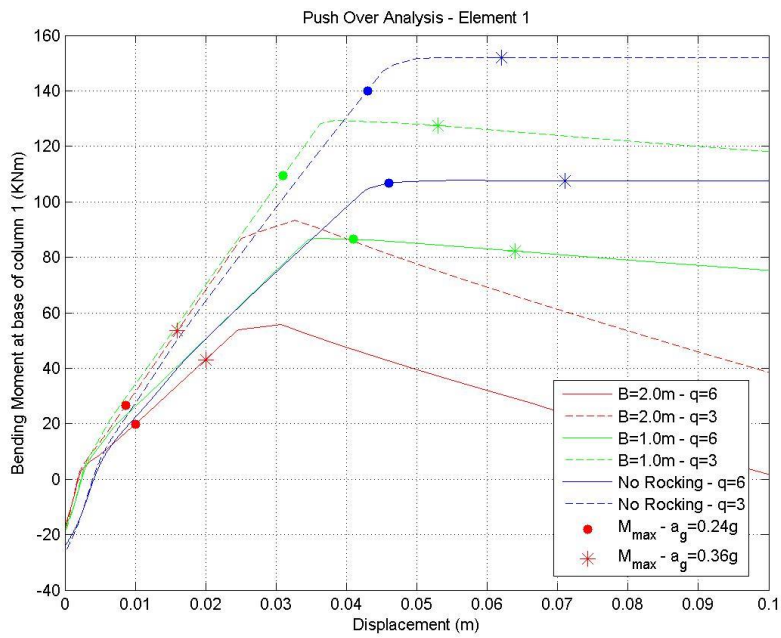
Διάγραμμα 7.38: Αξονική δύναμη υποστρώματος 2



Διάγραμμα 7.39: Τέμνουσα δύναμη υποστρώματος 1

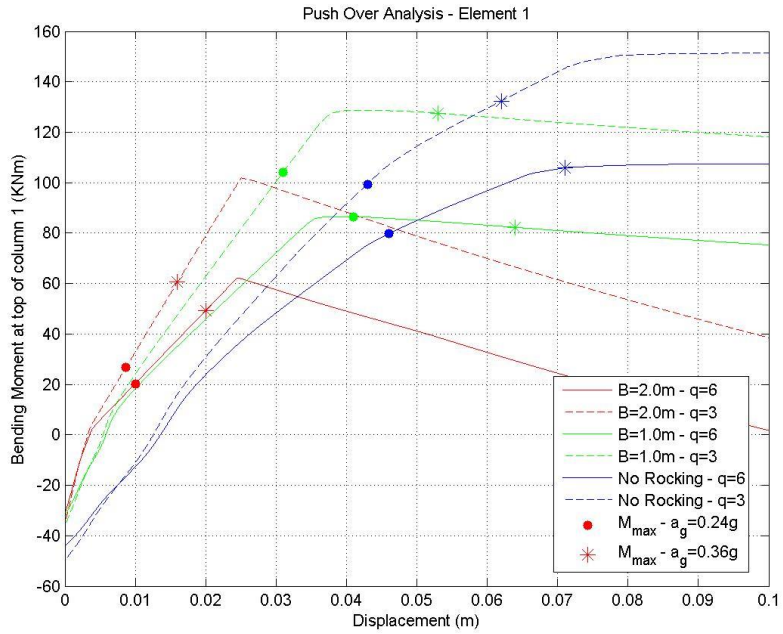


Διάγραμμα 7.40: Τέμνουσα δύναμη υποστυλώματος 2

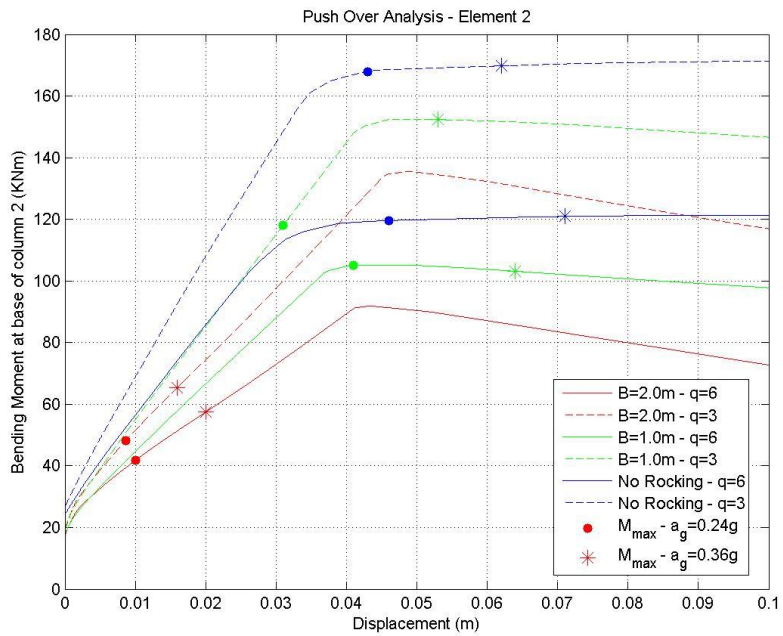


Διάγραμμα 7.41: Ροπή κάμψης υποστυλώματος 1 στη βάση

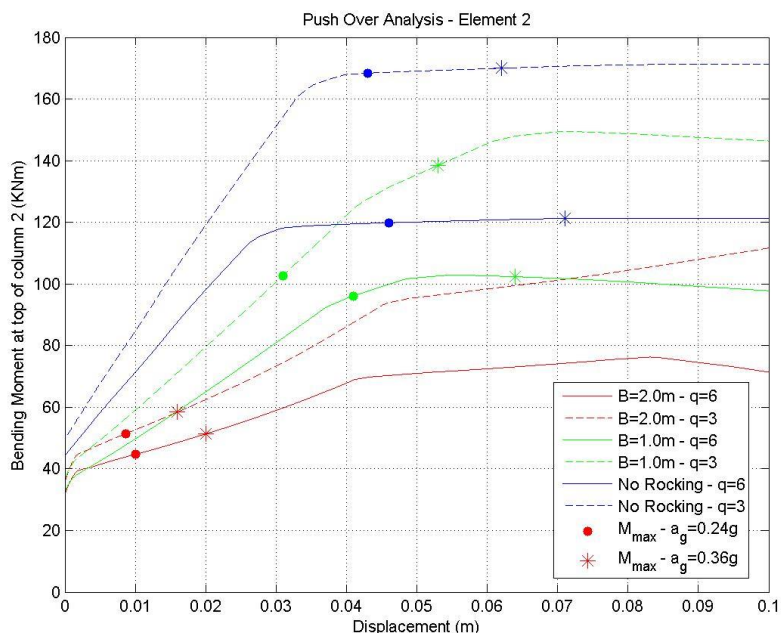




Διάγραμμα 7.42: Ροπή κάμψης υποστυλώματος 1 στη κορυφή



Διάγραμμα 7.43: Ροπή κάμψης υποστυλώματος 2 στη βάση



Διάγραμμα 7.44: Ροπή κάμψης υποστυλώματος 2 στη κορυφή

Προφανώς η επιρροή του μεγέθους της σεισμικής διέγερσης στα μη ενισχυμένα πλαίσια γίνεται πιο έντονη στα πλαίσια που είναι πιο δύσκαμπτα, όπως αυτά που ενισχύονται με μεγαλύτερο συντελεστή συμπεριφοράς και αυτά που ενισχύονται με λικνιζόμενο τοιχείο μεγαλύτερου μήκους. Αυτό ισχύει αφού τα πιο δύσκαμπτα υποστυλώματα έχουν την ικανότητα να παραλάβουν πολύ περισσότερη ροπή για μικρότερη μετακίνηση κορυφής. Επίσης το μεγαλύτερο τοιχείο ανακουφίζει τα υποστυλώματα έτσι η αναπτυσσόμενη ροπή δεν φτάνει την διαρροή του μέλους.

Η αύξηση της ισχύος του σεισμού προκαλεί αύξηση της αξονικής δύναμης και στα δύο υποστυλώματα. Η αύξηση αυτή φαίνεται να είναι ελαφρώς μεγαλύτερη στα πλαίσια που διαστασιολογήθηκαν με συντελεστή συμπεριφοράς 3. Επίσης, ενώ στο υποστυλώμα 1 η διαφορά αξονικής δύναμης που προκαλείται λόγω των δύο σεισμών δεν επηρεάζεται από τους συντελεστές συμπεριφοράς, η αξονική του υποστυλώματος 2 αυξάνεται πολύ περισσότερο στο πλαίσιο που ενισχύεται με τοιχείο πλάτους 1m παρά με τοιχείο 2m.

Παρομοίως οι τέμνουσες δυνάμεις και οι ροπές κάμψης στα υποστυλώματα αυξάνονται λόγω του ισχυρότερου σεισμού με εδαφική επιτάχυνση 0.36g. Η επιρροή του σεισμού στα δύο αυτά μεγέθη του υποστυλώματος 1 γίνεται εντονότερη σε πλαίσια τα οποία ενισχύονται με μεγάλο μήκους λικνιζόμενο τοιχείο, καθώς και σε πλαίσια που είναι διαστασιολογημένα με μικρότερο συντελεστή συμπεριφοράς. Ο λόγος είναι οι δρώσες ροπές πιο των εύκαμπτων πλαισίων είναι βρίσκονται πολύ κοντά στη διαρροή. Αυτό δεν ισχύει για το υποστυλώμα 2 και έτσι το μέγεθος του σεισμού γίνεται πιο έντονος στα πιο εύκαμπτα πλαίσια.

Παρόλο που το μέγεθος του σεισμού προκαλεί μεγαλύτερη αύξηση στα εντατικά μεγέθη των πιο δύσκαμπτων πλαισίων, επηρεάζει δυσμενώς τα πιο εύκαμπτα. Τα υποστυλώματα που υποδιαστασιολογήθηκαν έχουν μικρότερο όριο διαρροής εκ γενετής. Επίσης, η

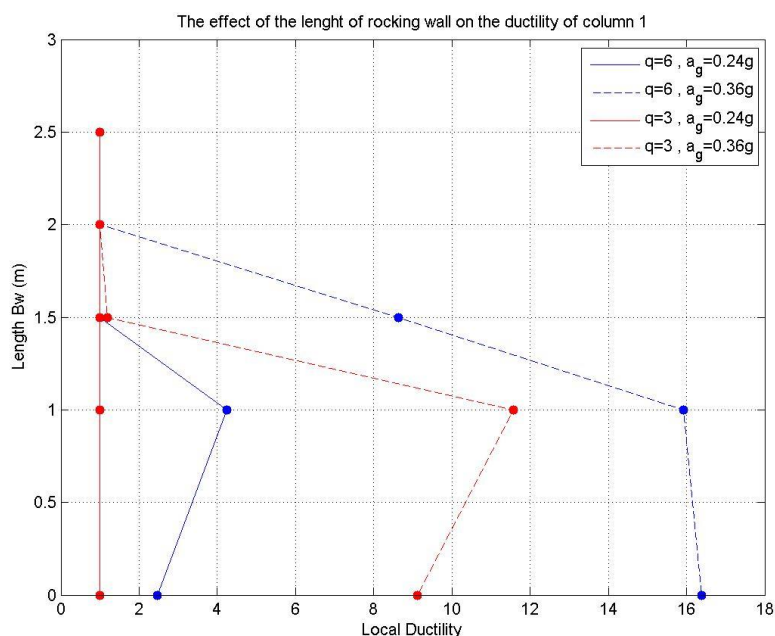
ευκαμψία τους αυξάνει την εφελκυστική αντοχή των υποστυλωμάτων με αποτέλεσμα να είναι ακόμα μικρότερη η ροπή διαρροής. Σε συνδυασμό ότι ο ασθενέστερος σεισμός προκαλεί στα υποστυλώματα ροπές κοντά στο όριο διαρροή τους, αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα ο ισχυρότερος σεισμός να μην αυξήσει τις μετακινήσεις κορυφής τους με σταθερή πρακτικά ροπή. Έτσι προκαλείται μεγάλη αύξηση της τοπικής πλαστιμότητας των υποστυλωμάτων με συνέπειες που θα αναλυθούν στην συνέχεια.

### 7.5.5 Επίδραση του μεγέθους του σεισμού στη τοπική πλαστιμότητα των υποστυλωμάτων

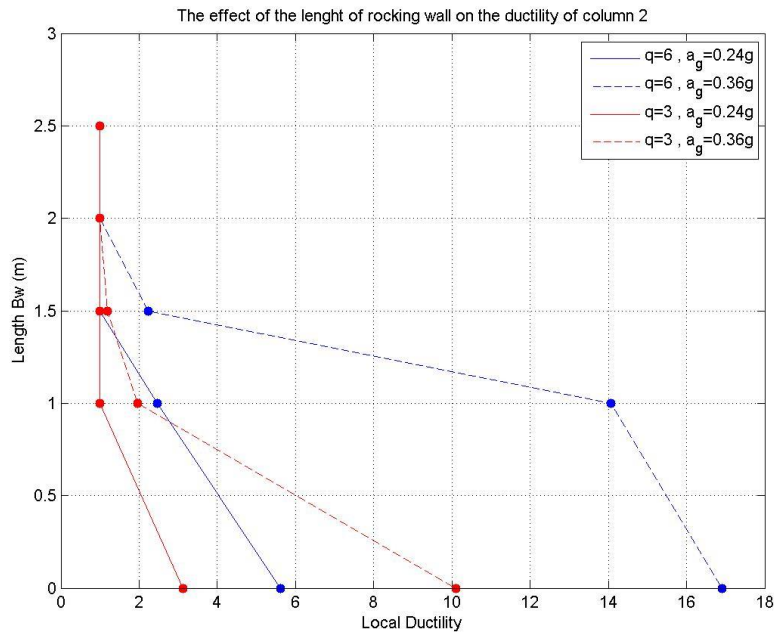
Στο προηγούμενο υποκεφάλαιο έγινε αντιληπτό ότι ο ισχυρότερος σεισμός προκαλεί μεγαλύτερες πλαστικές παραμορφώσεις στα υποστυλώματα. Έτσι στο παρόν υποκεφάλαιο θα ποσοτικοποιηθεί η επίδραση του ισχυρότερου σεισμού στις τοπικές πλαστιμότητες και κατ' επέκταση στη ποσότητα των μόνιμων ζημιών σε αυτά.

Τα πιο κάτω διαγράμματα περιγράφουν τη μεταβολή τοπικής πλαστιμότητας των υποστυλωμάτων συναρτήσει του μήκους λικνιζόμενου τοιχείου.

(Σημείωση: Η πλαστιμότητα ίση με 1 στα διαγράμματα του οριζόντιου άξονα αναφέρεται στην μη διαρροή του μέλους)



Διάγραμμα 7.45: Μεταβολή τοπικής πλαστιμότητας του υποστυλώματος 1 συναρτήσει του μήκους λικνιζόμενου τοιχείου



**Διάγραμμα 7.45: Μεταβολή τοπικής πλαστιμότητας του υποστυλώματος 2 συναρτήσει του μήκους λικνιζόμενου τοιχείου**

Παρατηρείται ότι η επίδραση της ενίσχυσης είναι αποτελεσματικότερη ως προς τη μείωση της τοπικής πλαστιμότητας του υποστυλώματος 2 επειδή ήταν το μέλος που καταπονείτο περισσότερο στο απλό πλαίσιο. Σημαντική παρατήρηση είναι ότι για ενίσχυση πλαισίου με λικνιζόμενο τοίχιο μήκους 1.0m, η πλαστιμότητα του υποστυλώματος 1 αυξάνεται (βλέπε διάγραμμα 7.36). Αντίθετα, η συμπεριφορά του υποστυλώματος 2 βελτιώνεται για την συγκεκριμένη ενίσχυση του πλαισίου, όμως προφανώς αυτή η ενίσχυση δεν είναι αποτελεσματική.

Η ενίσχυση του πλαισίου είναι αποτελεσματικότερη ως προς την μείωση της τοπικής πλαστιμότητας των υποστυλωμάτων όταν συμβεί ο σεισμός σχεδιασμού που αντιστοιχεί σε επιτάχυνση εδάφους 0.36g αλλά και όταν το πλαίσιο σχεδιάστηκε με τον μεγαλύτερο συντελεστή συμπεριφοράς. Ο συνδυασμός των πιο πάνω αυξάνει την τοπική πλαστιμότητα των μελών των μη ενισχυμένων πλαισίων (μπλε διακεκομμένη γραμμή), που όμως μετά από ικανοποιητική ενίσχυση το μέτρο αυτής γίνεται περίπου ίσο με τα αντίστοιχα των υπόλοιπων πλαισίων. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα το μήκος του τοιχείου που θεωρείται ικανοποιητική ενίσχυση αποδείχθηκε για το υποστυλώμα 1 στα 2.0m και στο υποστυλώμα 2 στα 1.5m.

### 7.5.6 Επίδραση του μεγέθους του σεισμού στη γενική πλατιμότητα των πλαισίων

Ως γνωστό η γενική πλαστιμότητα επηρεάζεται από τις τοπικές πλαστιμότητες των μελών. Στο προηγούμενο υποκεφάλαιο παρατηρήσαμε ότι οι τελευταίες επηρεάζονται τόσο από το μέγεθος της εδαφικής επιτάχυνσης όσο και από τον συντελεστή συμπεριφοράς που

χρησιμοποιήθηκε για τον σχεδιασμό του πλαισίου. Έτσι αναμένουμε ότι η γενική πλαστιμότητα του πλαισίου θα επηρεαστεί επίσης από τους πιο πάνω παράγοντες. Σημειώνεται πως γενική πλαστιμότητα εξαρτάται από την διγραμμικοποίηση του φάσματος ικανότητας.

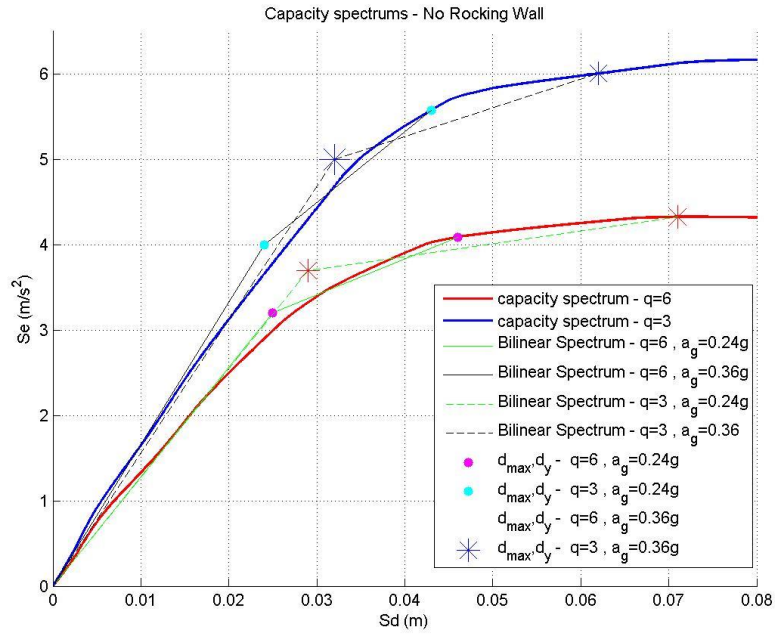
Πίνακας 7.23: Γενικές πλαστιμότητες των 2 πλαισίων για τους δύο σεισμούς σχεδιασμού

Πλάτος λικνιζόμενου τοιχείου (m)	Συντελεστής συμπεριφοράς 3		Συντελεστής συμπεριφοράς 6	
	Γενική πλαστιμότητα $\alpha_g = 0.24g$	Γενική πλαστιμότητα $\alpha_g = 0.36g$	Γενική πλαστιμότητα $\alpha_g = 0.24g$	Γενική πλαστιμότητα $\alpha_g = 0.36g$
Χωρίς τοίχιο	1.75	1.94	1.86	2.42
1.00	12.80	1.98	6.27	2.48
1.50	10.99	13.64	11.58	5.75
2.00	7.02	11.44	7.08	12.19
2.50	5.32	8.52	4.94	9.2

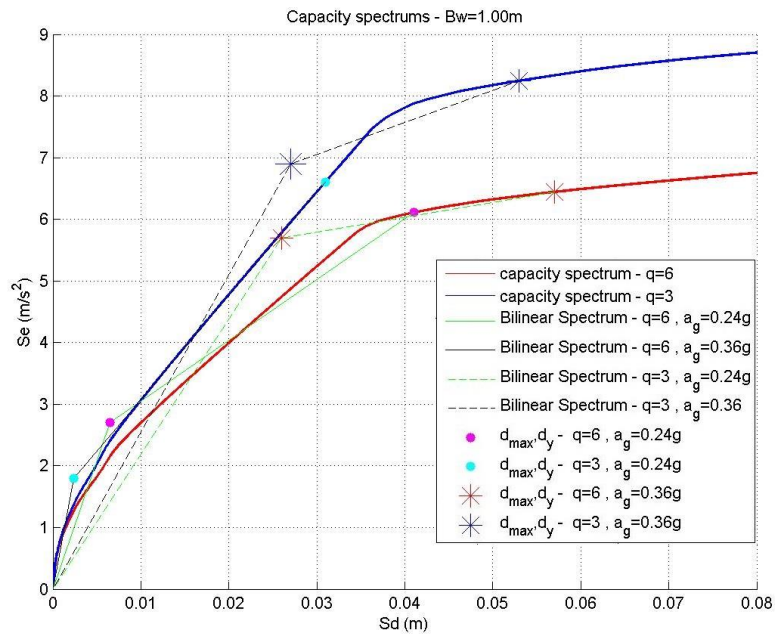
Στον πιο πάνω πίνακα παρουσιάζονται οι γενικές πλαστιμότητες που αναπτύσσονται σε κάθε πλαίσιο για τους δύο σεισμούς με διαφορετική εδαφική επιτάχυνση. Η αύξηση της πλαστιμότητας που παρατηρείται στα ενισχυμένα πλαίσια οφείλεται στη μη διαρροή (ή ελάχιστη διαρροή) των μελών και η πλαστιμότητα οφείλεται αποκλειστικά στη μείωση της δυσκαμψίας του τοιχείου μετά τον λικνισμό. Το φαινόμενο αυτό περιγράφεται και απεικονίζεται καλύτερα στα κεφάλαια 7.3.1 και 7.4.1.

Βέβαια η αύξηση του σεισμού και η μείωση της δυσκαμψίας των μελών, οδηγούν όπως είδαμε κάποια μέλη σε διαρροή, κυρίως στην ενίσχυση με το μικρότερο μήκος τοιχείου. Για αυτό τον λόγο παρατηρείται πιο λογική γενική πλαστιμότητα για αυτά τα πλαίσια. Όμως, για πιο δύσκαμπτα τοιχεία τα υποστυλώματα συμπεριφέρονται πάλι ελαστικά και έτσι δεν μπορεί να ληφθεί κρίσιμο συμπέρασμα ως προς την επιρροή του τοιχείου στην πλαστιμότητα των μελών. Παρατηρείται όμως ότι όταν στα πλαίσια δεν υπάρχει διαρροή μελών η αύξηση του τοιχείου προκαλεί απλά μικρότερη "διαρροή" του ίδιου του τοιχείου. Αυτό όμως, δεν αποσκοπεί σε συμπέρασμα ως προς τη συμπεριφορά του πλαισίου.

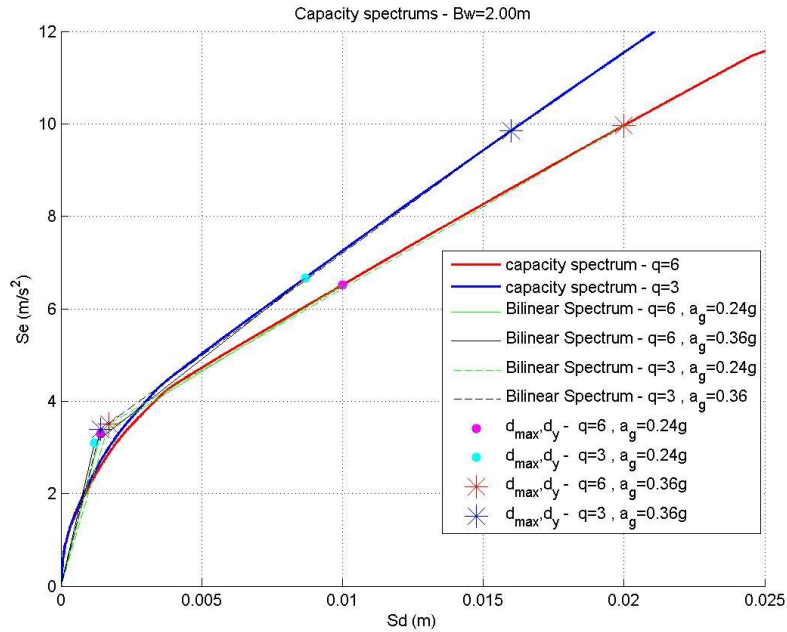
Η πιο πάνω συμπεριφορά γίνεται πιο κατανοητή παρατηρώντας τα ακόλουθα διαγράμματα, που απεικονίζουν τις διγραμμικοποιημένες καμπύλες ικανότητας τριών πλαισίων τα οποία είναι ενισχυμένα με τοιχεία μήκους 1m και 2m και ένα παραμένει χωρίς ενίσχυση.



Διάγραμμα 7.46: Διαγραμμικοποίηση καμπυλότητας ικανότητας μη ενισχυμένων για τις δύο εντάσεις σεισμών



Διάγραμμα 7.47: Διαγραμμικοποίηση καμπυλότητας ικανότητας πλαισίων ενισχυμένα με πλάτος λικνιζόμενου τοιχείου 1m για τις δύο εντάσεις σεισμών

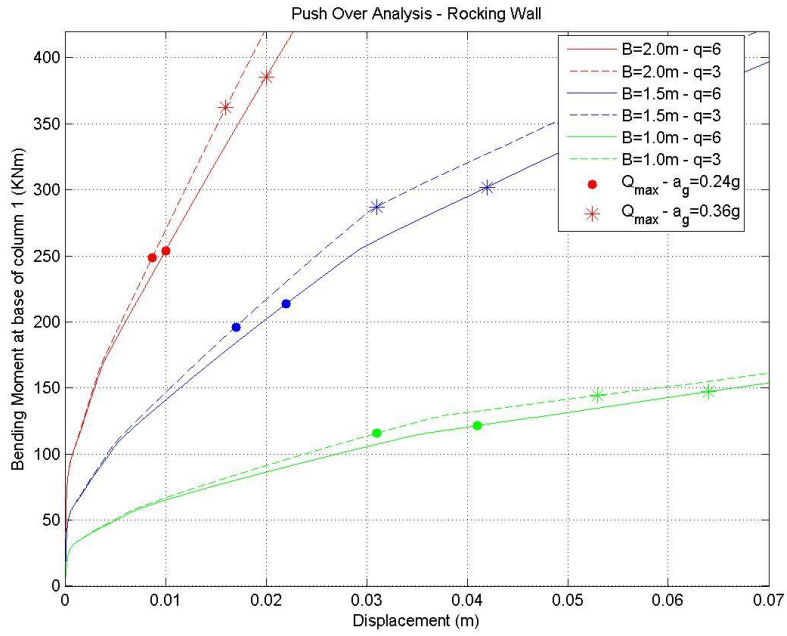


Διάγραμμα 7.48: Διαγραμμικοποίηση καμπυλότητας ικανότητας πλαισίων ενισχυμένα με πλάτος λικνιζόμενου τοιχείου 2m για τις δύο εντάσεις σεισμών

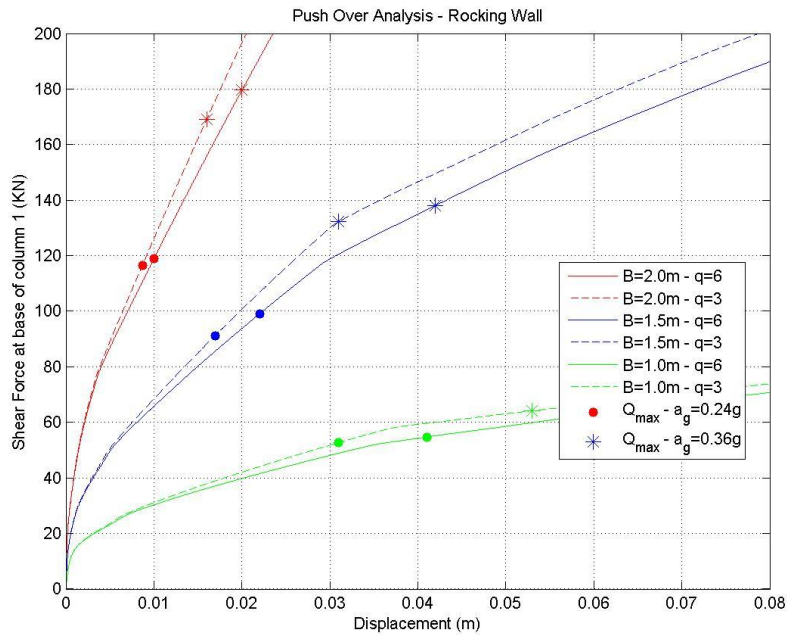
### 7.5.7 Επίδραση του μεγέθους του σεισμού στα εντατικά μεγέθη και στην κατανομή των τάσεων στη βάση του τοιχείου

Από τις προηγούμενες αναλύσεις παρατηρήσαμε ότι για το συγκεκριμένο πλαίσιο τα εντατικά μεγέθη στη βάση του τοιχείου δεν επηρεάζονται στο σεισμό σχεδιασμού με  $a_g=0.24g$  από το συντελεστή συμπεριφοράς που χρησιμοποιήθηκε κατά τον σχεδιασμό των απλών πλαισίων. Όμως είναι αβέβαιο ότι θα συμβεί το ίδιο στον ισχυρότερο σεισμό με επιτάχυνση εδάφους  $a_g=0.36g$ . Επίσης απαραίτητο θέμα προς μελέτη είναι η κατανομή των τάσεων στη βάση του πλαισίου, καθώς παρατηρήθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο ότι αυτές είναι ευάλωτες τόσο στο πλάτος του τοιχείου όσο και στο συντελεστή συμπεριφοράς.

Πιο κάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών που ασκούνται στη βάση του τοιχείου.

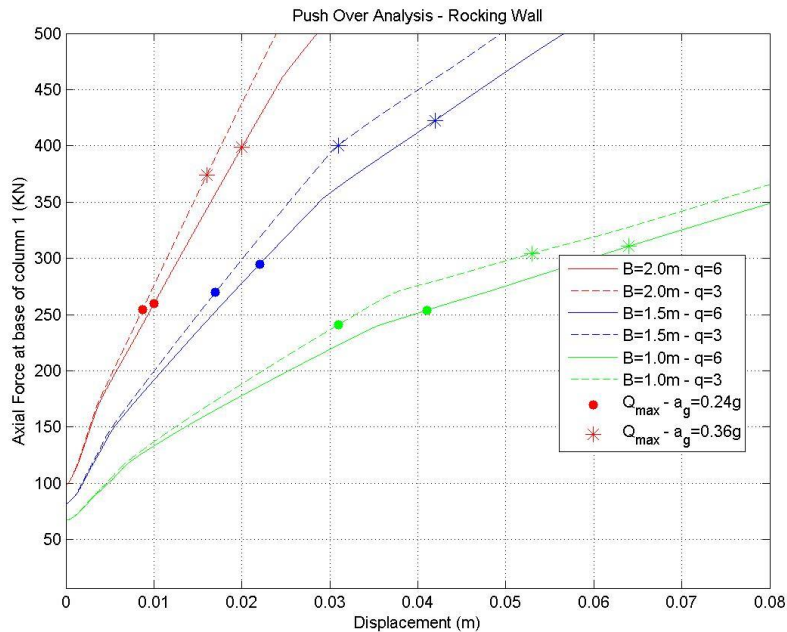


Διάγραμμα 7.49: Ροπή κάμψης στη βάση του τοιχείου με τις μέγιστες τιμές σημειωμένες



Διάγραμμα 7.50: Τέμνουσα δύναμη στη βάση του τοιχείου με τις μέγιστες τιμές σημειωμένες





Διάγραμμα 7.51: Αξονική δύναμη στη βάση του τοιχείου με τις μέγιστε τιμές σημειωμένες

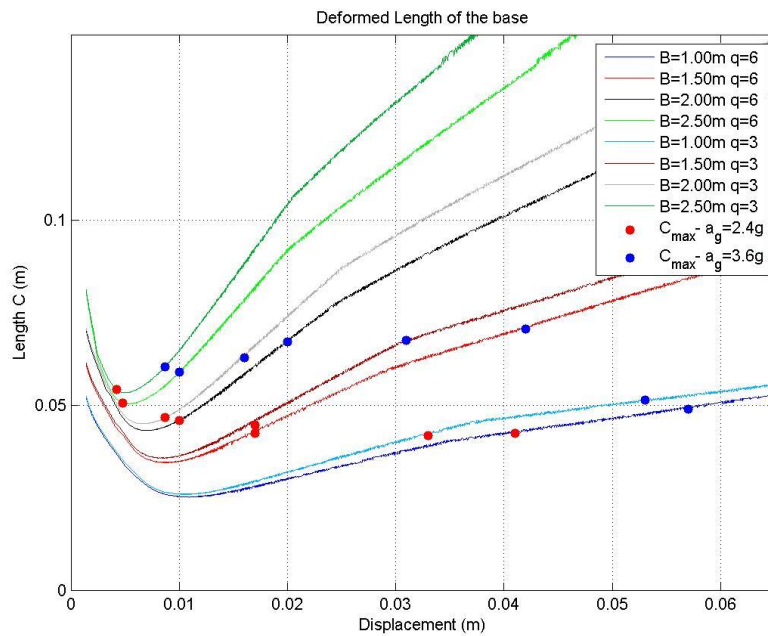
Το διάγραμμα 7.49 είναι πολύ χρήσιμο για την διαστασιολογήση του πλαισίου. Από αυτό το διάγραμμα, παρατηρείται ότι ο σεισμός με επιτάχυνση εδάφους 0.36g προκαλεί πολύ μεγάλη αύξηση της ροπής στη βάση του τοιχείου σε σχέση με τον ασθενέστερο σεισμό σχεδιασμού. Η αύξηση αυτή γίνεται πιο ασήμαντη καθώς μειώνεται το μήκος του λικνιζόμενου τοιχείου και συγκεκριμένα το τοίχιο μήκους 1m αναπτύσσει πολύ μικρή διαφορά ροπής μεταξύ των δύο σεισμών. Η πιο πάνω επιρροή της ροπής σε σχέση με το μέγεθος του σεισμού και το μήκος του πλαισίου, ταυτίζεται με την γενική συμπεριφορά του πλαισίου. Αυτό ενισχύει ακόμη περισσότερη τον διατυπωθείσα ισχυρισμό ότι η απόκριση του πλαισίου καθορίζεται από την αντοχή του τοιχείου.

Επίσης, όσο η ένταση του σεισμού μεγαλώνει, τόσο περισσότερο το μέγεθος της δρώσας ροπής στο τοίχιο επηρεάζεται από το συντελεστή συμπεριφοράς που χρησιμοποιήθηκε για τον σχεδιασμό του απλού πλαισίου. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η διαφορά είναι πολύ μικρή, όμως αποτελεί ένα γενικότερο συμπέρασμα που ενδέχεται να επηρεάσει άλλες κατασκευές.

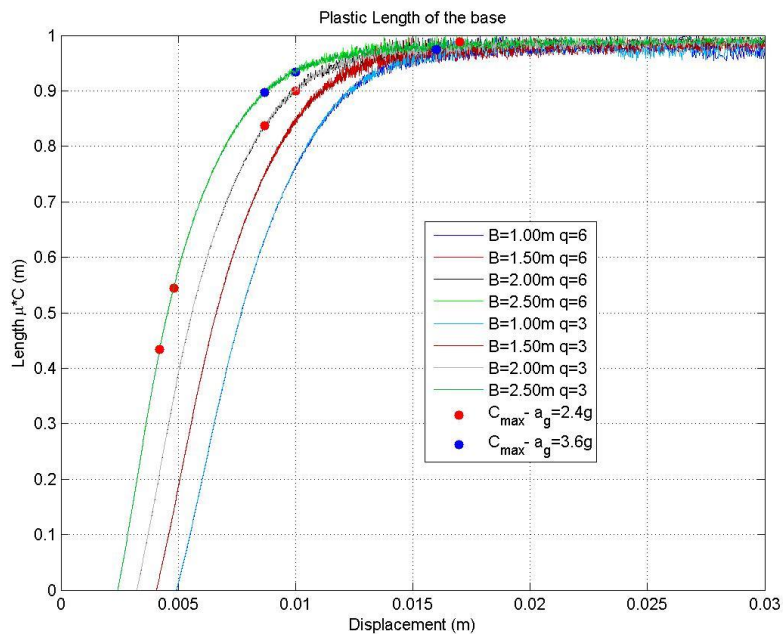
Το διάγραμμα 7.50 αποτελεί τη βάση με την οποία θα οπλιστεί το υποστυλώμα μέσω συνδετήρων έναντι τέμνουσας. Από το διάγραμμα 7.50 και 7.51, επιβεβαιώνεται πως οι δρώσες τέμνουσες και αξονικές δυνάμεις του τοιχείου ακολουθούν την συμπεριφορά των ροπών για τους λόγους που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Αυτό που ξεχωρίζει όμως είναι πως οι τέμνουσες και οι αξονικές δυνάμεις επηρεάζονται πολύ περισσότερο από τον συντελεστή συμπεριφοράς που σχεδιάστηκαν τα μη ενισχυμένα πλαίσια. Επιπλέον, γίνεται εύκολα αντιληπτό πως το μέγεθος του σεισμού επηρεάζει πολύ περισσότερο τα δύο αυτά μεγέθη του τοιχείου στα πλαίσια που διαστασιολογήθηκαν αρχικώς με συντελεστή συμπεριφοράς 6. Το αντίθετο δηλαδή που ισχύει με τα υποστυλώματα, αφού στο συγκεκριμένο συντελεστή τα υποστυλώματα αναλαμβάνουν

μικρότερη ένταση για συγκεκριμένη μετατόπιση, έτσι την ένταση αυτή την λαμβάνει το τοίχείο.

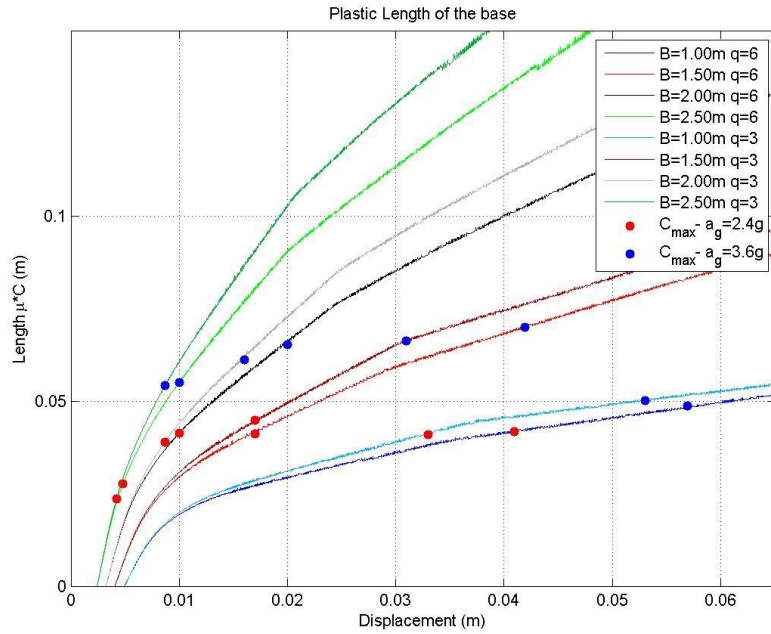
Στη συνέχεια ακολουθούν διαγράμματα που παρουσιάζουν το θλιβόμενο μήκος της βάσης του τοιχείου στους δύο σεισμούς και το μήκος της πλαστικοποιημένης περιοχής.



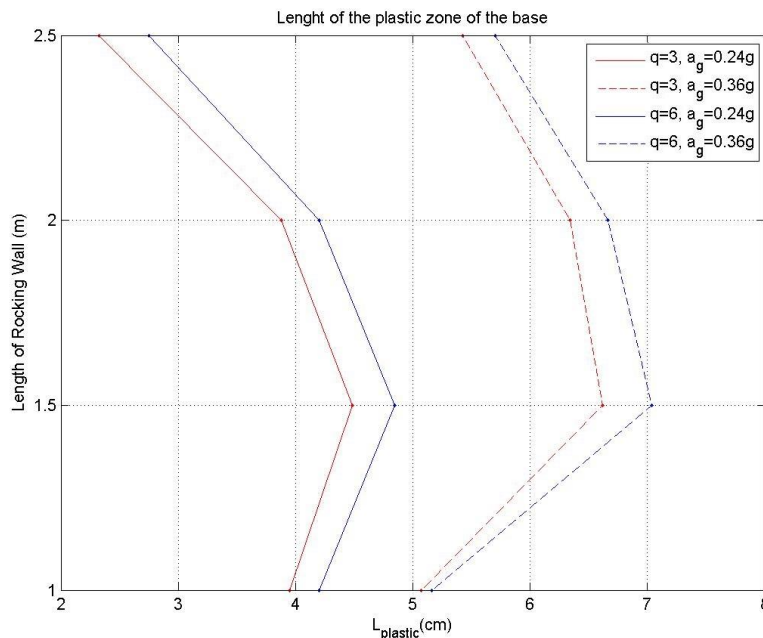
Διάγραμμα 7.52: Επιρροή του μήκους της θλιβόμενης ζώνης της βάσης ως προς το μέγεθος του σεισμού



Διάγραμμα 7.53: Ποσοστό της θλιβόμενης ζώνης της βάσης που πλαστικοποιείται



Διάγραμμα 7.54: Επιρροή του μήκους της πλαστικοποιημένης ζώνης της βάσης ως προς το μέγεθος του σεισμού



Διάγραμμα 7.55: Μήκος πλαστικοποιημένης ζώνης στη βάση του τοιχείου

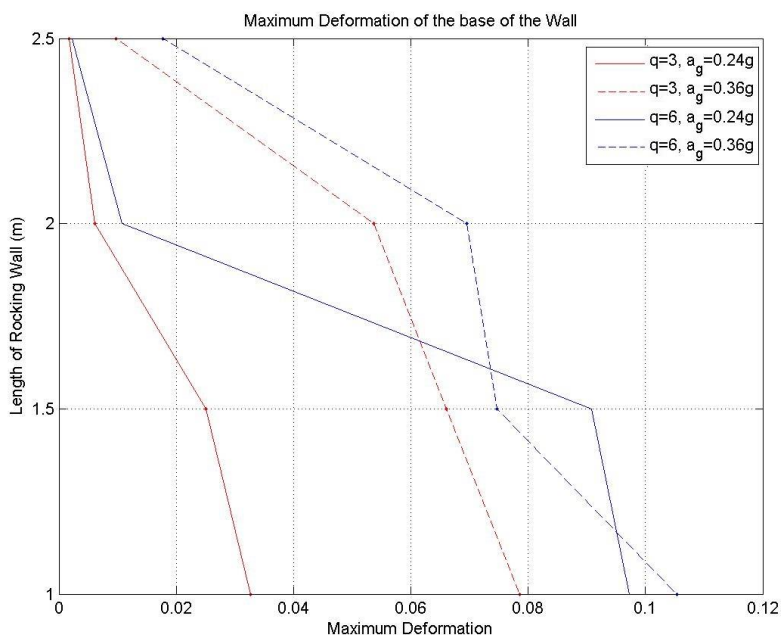
Από τα πιο πάνω διάγραμματα φαίνεται ότι το μέγεθος του σεισμού επηρεάζει πολύ το μήκος της θλιβόμενης ζώνης. Αντίθετα με άλλα μεγέθη η επιρροή αυτή παραμένει μεγάλη ακόμα και για μεγάλο μήκος του τοιχείου. Σημαντικό επίσης είναι ότι το μήκος αυτό επηρεάζεται ελάχιστα από τον συντελεστή συμπεριφοράς με τον οποίο διαστασιολογήθηκε το μη ενισχυμένο πλαίσιο.

Επίσης είναι προφανές ότι το μήκος της πλαστικοποιημένης ζώνης είναι μεγαλύτερο όταν συμβεί ο σεισμός σχεδιασμού με μεγαλύτερη εδαφική επιτάχυνση. Αξιοσημείωτο είναι ότι

η διαφορά των πλαστικοποιηένων ζωνών που προκύπτουν από τους δύο σεισμούς παραμένει σταθερή για όλα τα πλάτη του λικνιζόμενου τοιχείου.

Από τα διαγράμματα 7.52 και 7.53 παρατηρούμε ότι η βάση αρχικώς του τοιχείου είναι όλη ελαστική και η αύξηση του οριζόντιου φορτίου το μειώνει συνεχώς μέχρι να πλαστικοποιηθεί ολόκληρη. Από εκεί και πέρα, οι μετακινήσεις κορυφής προκαλούν αύξηση της θλιβόμενης βάσης για να μπορεί να παραληφθεί η πρόσθετη ένταση. Για αυτό τον λόγο, η βάση του τοιχείου είναι συνεχώς πλήρως πλαστικοποιημένη. Από τα συγκεκριμένα διαγράμματα παρατηρείται όλες οι αναλύσεις έσωσαν πλήρη πλαστικοποίηση της βάσης εκτός από το πλαίσιο που ενισχύεται με λικνιζόμενο τοιχείο μήκους 2.5m.

Ακολουθεί διάγραμμα που παρουσιάζει τις μέγιστες παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στην ακραία θλιβόμενη ίνα της βάσης του τοιχείου αναλόγως της έντασης του σεισμού και την διαστασιολόγηση του μη ενισχυμένου πλαισίου.



Διάγραμμα 7.56: Μέγιστες παραμορφώσεις στη ακραία θλιβόμενη ίνα της βάσης του τοιχείου

Αρχικά να υπενθυμιστεί ότι κατά τον λικνισμό του τοιχείου η βάση του πλαστικοποιείται σχεδόν εξ' ολοκλήρου (εκτός από την περίπτωση που το τοιχείο έχει μήκος 2.5m). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων των μεγεθών της παραμόρφωσης αφού πλέον η σχέση υπολογισμού της, είναι πάρα πολύ ευαίσθητη σε μικρές αλλαγές. Επιπλέον οι παραδοχές που θεωρήθηκαν στον υπολογισμό της παραμόρφωσης (πχ επιπεδότητα της διατομής), πλέον επηρεάζουν και ίσως οδηγήσουν τα αποτελέσματα σε αριθμητικά λάθη.

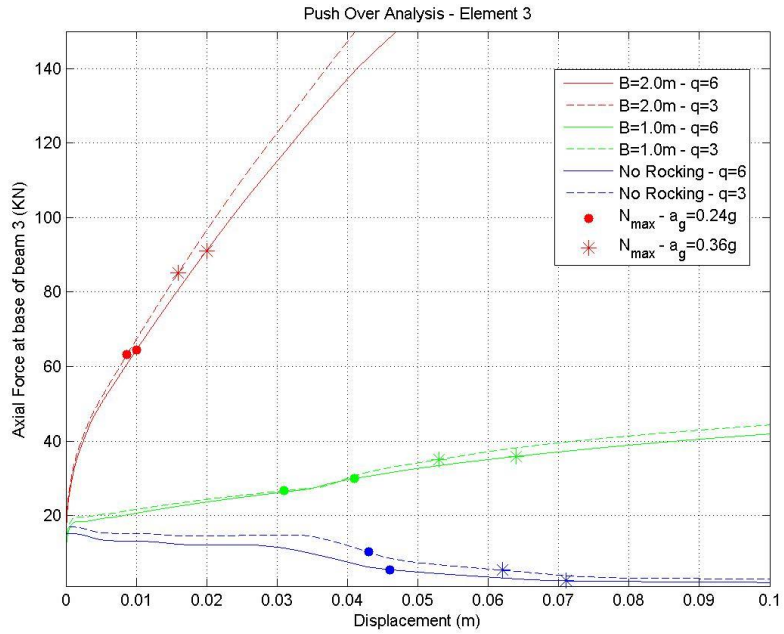
Παρόλα αυτά, ποιοτικά το διάγραμμα προσφέρει χρήσιμα συμπεράσματα. Όπως αναμενόταν ο σεισμός σχεδιασμού με μεγαλύτερη εδαφική επιτάχυνση προκαλεί μεγαλύτερη παραμόρφωση στη βάση του τοιχείου. Σημαντικότερο είναι όμως ότι στον πιο ισχυρό σεισμό οι παραμορφώσεις δεν μειώνονται ικανοποιητικά για μήκος τοιχείου 2m και κάτω. Σε αντίθεση, ο ασθενής σεισμός προκαλεί ανεπαίστετες παραμορφώσεις στη βάση του τοιχείου το οποίο έχει μήκος 2m και άνω. Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι η αποτελεσματικότητα του μήκος του τοιχείου στην μείωση των παραμορφώσεων εξαρτάται από το μέγεθος του σεισμικού γεγονότος. Μάλιστα, αν ο σεισμός είναι μεγάλος τότε οι ζημιές είναι δύσκολο να αποφευχθεί αφού απαιτεί πολύ μεγάλο μήκος τοιχείου.

Έτσι, συνδυάζοντας τα διαγράμματα 7.52 και 7.53 καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι όσο μεγαλύτερο είναι το σεισμικό γεγονός, τόσο μεγαλύτερες θα είναι οι ζημιές στη βάση του τοιχείου, που μάλιστα θα εκτείνονται και σε μεγαλύτερη απόσταση. Επιπλέον, παρόλο που ο συντελεστής συμπεριφοράς δεν επηρεάζει το παραμορφωμένο μήκος της βάσης, εντούτοις το πλαίσιο με το μεγαλύτερο συντελεστή αναπτύσσει πολύ μεγαλύτερες παραμορφώσεις άρα και μεγαλύτερες βλάβες.

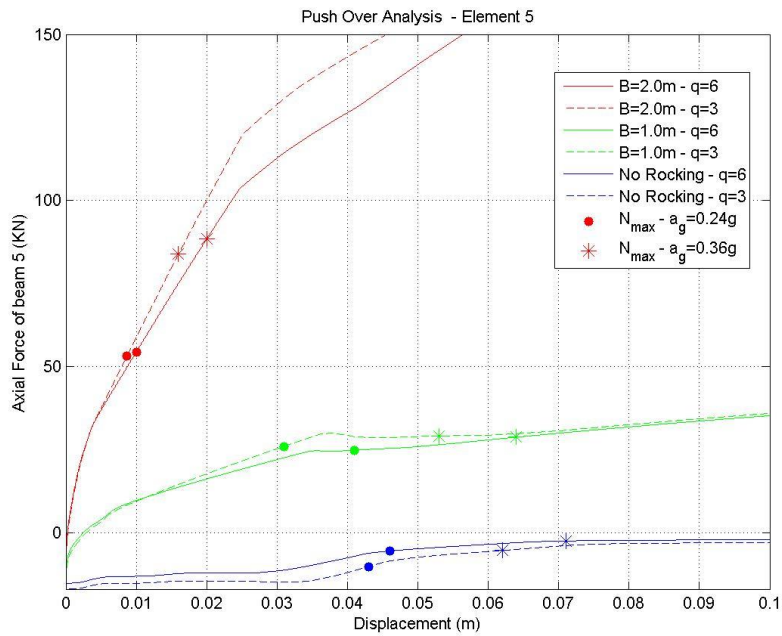
#### **7.5.8 Επίδραση του μεγέθους του σεισμού στα εντατικά μεγέθη της δοκού**

Στο παρόν κεφάλαιο θα μελετηθεί η επιρροή των εντατικών μεγεθών στην δοκό των πλαισίων ανάλογα με το μέγεθος του σεισμού. Υπενθυμίζεται ότι η δοκός θεωρήθηκε ελαστική για τον λόγο ότι στην πραγματικότητα θα ενισχυθεί τοπικά για να μη διαρρέυσει τουλάχιστο στο σημείο της διεπιφάνειας της με το τοίχιο κατά τον λικνισμό. Σκοπός του κεφαλαίου λοιπόν, είναι να ελεγχθεί αν ο ισχυρότερος σεισμός θα είναι ο καθοριστικός για την διαστασιολόγηση της δοκού.

Ακολουθούν τα διαγράμματα αξονικών δυνάμεων, τεμνουσών δυνάμεων και ροπών κάμψεως στα άκρα της δοκού καθώς και στα σημεία εκατέρωθεν του λικνιζόμενου τοιχείου. Σημειώνεται ότι οι ροπές των δοκών στους κόμβους με τα υποστυλώματα δεν παρουσιάζονται αφού παρουσιάστηκαν πιο πάνω ως ροπές κορυφής υποστυλωμάτων.

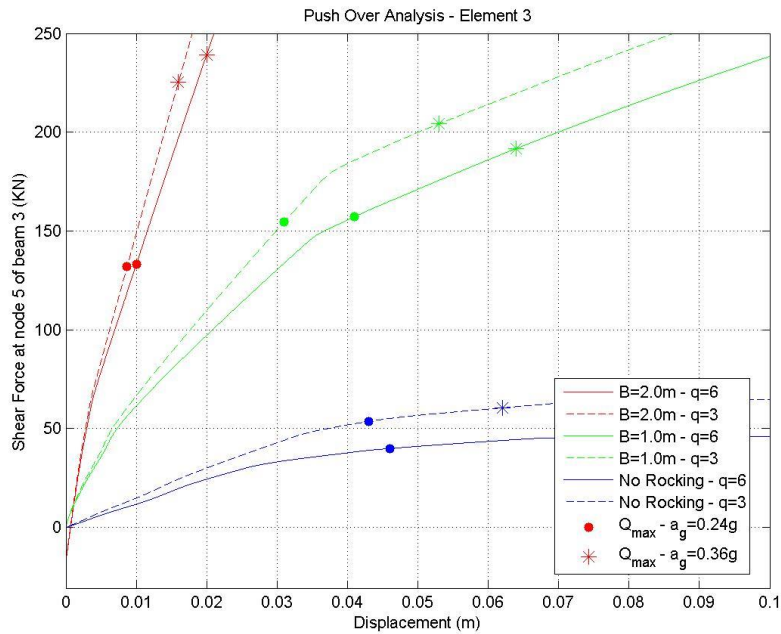


Διάγραμμα 7.57: Αξονική δύναμη της δοκού αριστερά του τοιχείου

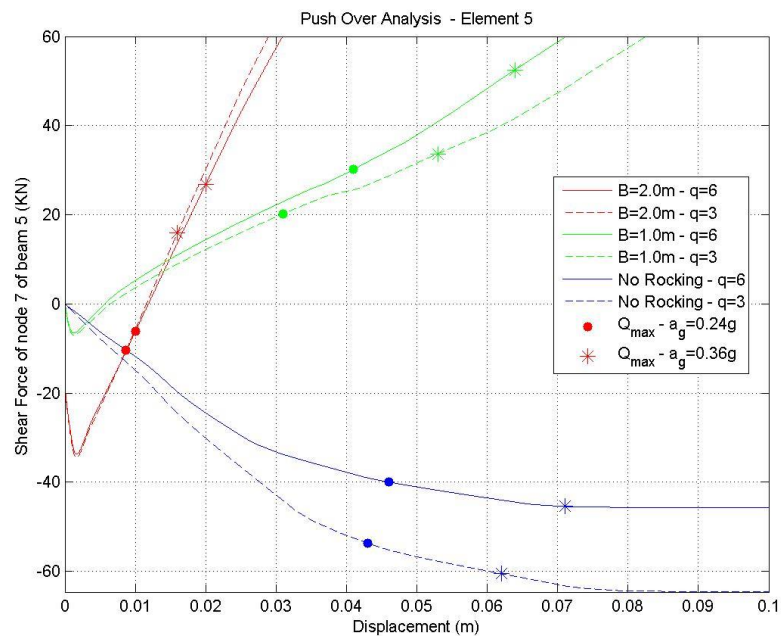


Διάγραμμα 7.58: Αξονική δύναμη της δοκού δεξιά του τοιχείου

Η αξονική της δοκού όπως αναφέρθηκε οφείλεται σε λάθος του μοντέλου αφού στην πραγματικότητα είναι μηδενική, όμως παρουσιάζεται για λόγους πληρότητας.



Διάγραμμα 7.59: Τέμνουσα δύναμη της δοκού αριστερά του τοιχείου

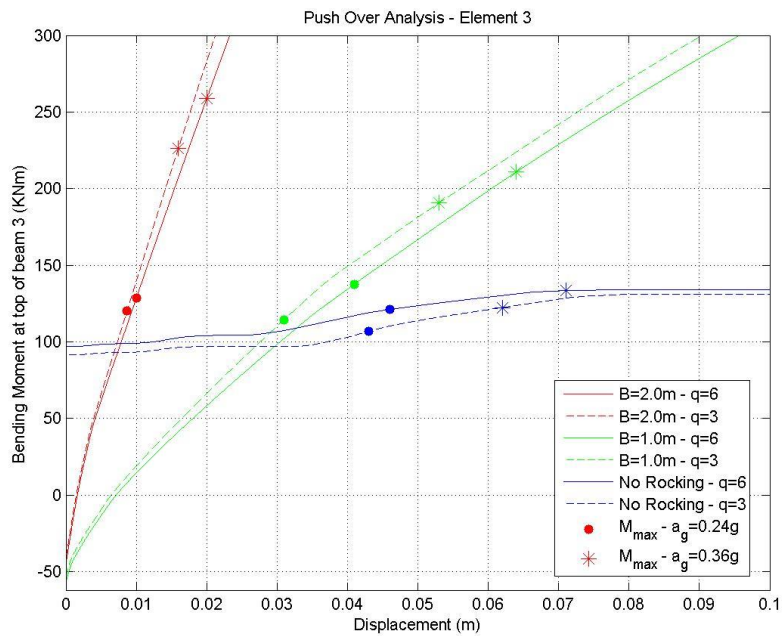


Διάγραμμα 7.60: Τέμνουσα δύναμη της δοκού δεξιά του τοιχείου

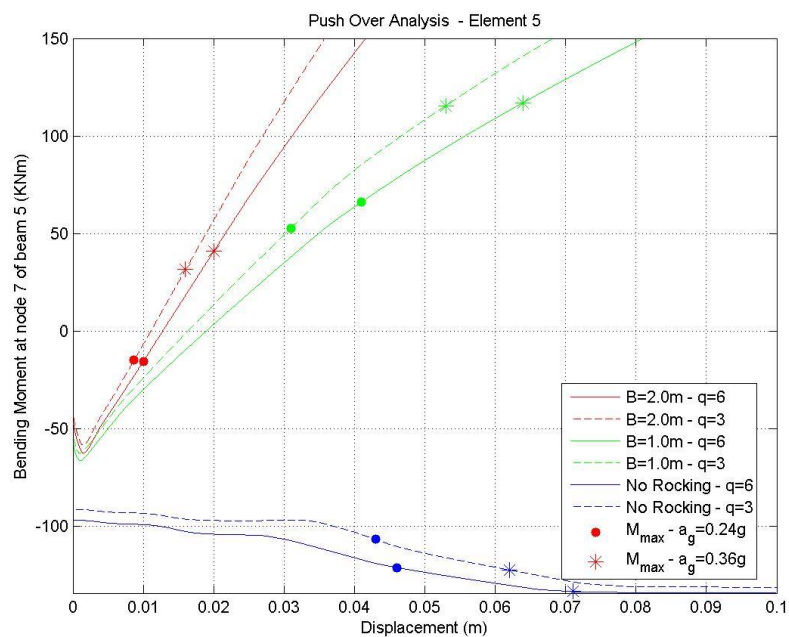
Ο ισχυρότερος σεισμός προκαλεί μεγαλύτερες τέμνουσες δυνάμεις στη δοκό του πλαισίου. Σημαντικό όμως είναι ότι η επίδραση του μεγέθους του σεισμού είναι πιο έντονη όταν το πλαίσιο ενισχυθεί με μικρότερου μήκους λικνιζόμενου τοιχείου. Από ισορροπία κόμβου προκύπτει ότι η τέμνουσα δύναμη της δοκού ισούται με τη αξονική του υποστυλώματος. Σύμφωνα με τα διαγράμματα 7.19 και 7.20 οι αξονικές των υποστυλωμάτων αυξάνονται όσο μειώνεται το μήκος του λικνιζόμενου τοιχείου. Έτσι η ίδια αναλογία προκύπτει και για τις τέμνουσες δυνάμεις της δοκού.

Αξίζει να σημειωθεί η τέμνουσα δύναμη της δοκού επηρεάζεται από το συντελεστή συμπεριφοράς που τέθηκε κατά την διαστασιολόγηση του πλαισίου.

Τέλος, τόσο το μέγεθος του σεισμού όσο και η αρχική διαστασιολόγηση του πλαισίου καθορίζουν τη διαστασιολόγηση της δοκού έναντι τέμνουσας.



Διάγραμμα 7.61: Ροπή κάμψης της δοκού στο σημείο ανασήκωσης του τοιχείου



Διάγραμμα 7.62: Ροπή κάμψης της δοκού στο σημείο υποχώρησης του τοιχείου



Από τα διαγράμματα 7.58 και 7.59, γίνεται αντιληπτό το μέγεθος της επίδρασης στις ροπές των δοκών λόγω της αύξησης της σεισμικής επιτάχυνσης. Η επίδραση αυτή έχει πολύ μεγάλη σημασία στο σημείο ανασήκωσης της δοκού αφού σε αυτό το σημείο δρουν οι μεγαλύτερες ροπές. Το μέγεθος της σεισμικής διέγερσης επηρεάζει τις ροπές των δοκών όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος του λικνιζόμενου τοιχείου. Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα 7.58, η ροπή της δοκού που εντάσσεται σε πλαίσιο ενισχυμένο με τοιχείο μήκους 2m και προκαλείται από εδαφική επιτάχυνση 0.36g, είναι σχεδόν η διπλάσια της ροπής που προκαλείται από εδαφική επιτάχυνση 0.24g

Επίσης ο συντελεστής συμπεριφοράς που λήφθηκε για τη διαστασιολόγηση των πλαισίων δεν επηρεάζει αισθητά τις ροπές των δοκών.

### 7.5.9 Συμπεράσματα

Από το παρόν κεφάλαιο συμπεραίνουμε ότι το μέγεθος του σεισμού επηρεάζει πολλά χαρακτηριστικά της απόκρισης, όμως αυτή η επιρροή περιορίζεται αναλόγως του μήκους του λικνιζόμενου τοιχείου. Συγκεκριμένα οι μετακινήσεις κορυφής και η σεισμική δύναμη αυξάνονται με την αύξηση της ισχύος του σεισμικού επεισοδίου. Όταν το μήκος του λικνιζόμενου τοιχείου μειώνεται, τότε η επιρροή του μεγέθους του σεισμού στις φασματικές μετακινήσεις είναι πιο μεγάλη, ενώ το αντίθετο ισχύει για τις φασματικές επιταχύνσεις. Στο πλαίσιο που είναι ενισχυμένο με τοιχείο πλάτους 1m, η αποτελεσματικότητα της ενίσχυσης είναι μικρή, ενώ αυξάνεται με εκθετική μορφή όταν αυξηθεί το μήκος αυτό.

Το σεισμική εδαφική επιτάχυνση επηρεάζει επίσης την απόσβεση του πλαισίου. Παρατηρήθηκε ότι η μείωση της αποσβέσεως συναρτήσει της αύξηση του μήκους του τοιχείου εξελίσσεται ταχύτερα στον ισχυρότερο σεισμό.

Σημαντική επίπτωση του μεγέθους του σεισμού έχει στην ένταση των υποστυλωμάτων. Παραδεκτό ότι όσο ισχυρότερος είναι ο σεισμός τόσο περισσότερη διαρροή θα προκληθεί στα υποστυλώματα. Το σημαντικότερο όμως είναι ότι το μέγεθος του σεισμού επηρεάζει λιγότερο τη διαρροή των υποστυλωμάτων στα πλαίσια που είναι ενισχυμένα με τοιχείο μήκους 2m και άνω. Αντιθέτως, η ένταση των υποστυλωμάτων αυξάνει όσο αυξάνει ο συντελεστής συμπεριφοράς του σχεδιασμού, αφού ο ασθενής σεισμός δημιουργεί ένταση στο υποστυλώμα πιο κοντά στη διαρροή. Αυτό έχει επίδραση και στην τοπική πλαστιμότητα η οποία αυξάνεται κυρίως στο αριστερό υποστυλώμα που καταπονείται περισσότερο. Να σημειωθεί όμως ότι η ενίσχυση των πλαισίων είναι πιο αποτελεσματική ως προς την μείωση των τοπικών πλαστιμοτήτων στο ισχυρότερο σεισμό και στα πιο εύκαμπτα πλαίσια.

Επιπλέον πολύ σημαντική επιρροή του μεγέθους του σεισμού παρατηρήθηκε και στα εντατικά μεγέθη της βάσης του τοιχείου. Η ροπή εκεί αυξάνεται πολύ περισσότερο στον ισχυρό σεισμό και ειδικότερα στα δύσκαμπτα πλαίσια ενώ η επιρροή της σεισμικής έντασης είναι αμελητέα στα πιο εύκαμπτα. Η προηγούμενη παρατήρηση ταυτίζεται με την γενική

συμπεριφορά της κατασκευής στους ισχυρότερους σεισμούς και ενισχύει ακόμη περισσότερη τον διατυπωθείσα ισχυρισμό ότι η απόκριση του πλαισίου καθορίζεται από την αντοχή του τοιχείου. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα εντατικά μεγέθη του τοιχείου επηρεάζονται από την αρχική διαστασιολόγηση. Παρατηρήθηκε ακόμη ότι όσο μεγαλύτερο είναι το σεισμικό γεγονός, τόσο μεγαλύτερες θα είναι οι ζημιές στη βάση του τοιχείου, που μάλιστα θα εκτείνονται και σε μεγαλύτερη απόσταση.

Τέλος, τόσο το μέγεθος του σεισμού όσο και η αρχική διαστασιολόγηση του πλαισίου καθορίζουν την διαστασιολόγηση της δοκού. Συγκεκριμένα η αύξηση της εντάσεως του σεισμού αυξάνει πολύ περισσότερο τη ροπή και την τέμνουσα στο σημείο ανασήκωσης της δοκού. Όμως ένα από τα σημαντικότερα συμπεράσματα είναι ότι η αύξηση του μήκους του τοιχείου αποδίδει πολύ μεγάλη αύξηση τόσο στην τέμνουσα δύναμη όσο και στη ροπή κάμψης της δοκού. Δηλαδή, μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους κατά το σχεδιασμό είναι αν η (ενισχυμένη) δοκός μπορεί να παραλάβει την ένταση που θα προκαλούσε το τοίχιο με το συγκεκριμένο μήκος που επιλέχθηκε.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την διπλωματική εργασία λήφθηκαν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την συμπεριφορά ενός ανελαστικού λικνιζόμενου τοιχείου εντασσόμενο σε ανελαστικό πλαίσιο. Παράγονται πληροφορίες που αφορούν την επιρροή της ποιότητας σκυροδέματος του λικνιζόμενου τοιχείου, του μεγέθους του σεισμού και της αρχικής διαστασιολόγησης των μη ενισχυμένων πλαισίων στα εντατικά μεγέθη και στην παραμόρφωση της βάσης του τοιχείου. Τα πιο πάνω ευρήματα αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της έρευνας που αφορά τη διαστασιολόγηση του πλαισίου και του τοιχείου.

### 8.1 Κύρια συμπεράσματα

- Δημιουργία πρόσθετης εφελκυστικής δύναμης στα υποστυλώματα, λόγω της μεγάλης θλιπτικής δύναμης που αναλαμβάνει το τοίχιο. Η επιρροή αυτή είναι πολύ πιο έντονη στο αριστερό υποστυλώμα που έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της ροπής αντοχής του που οδηγά τις πρώτες πλαστικές αρθρώσεις να συμβούν εκεί.
- Στο σημείο της διεπιφάνειας δοκού τοιχείου δημιουργείται λόγω του λικνισμού μεγάλη ροπή κάμψης και τέμνουσα δύναμης που αυξάνει τα δύο εντατικά μεγέθη σε όλη τη δοκό. Σημειώνεται ότι ο σεισμός σε συνδυασμό με το λικνισμό προσδίδει στο μεγαλύτερο μέρος της δοκού μόνο αρνητικές ροπές. Αυτό, έχει δυσμενής επίπτωση κυρίως σε δοκό υφιστάμενου κτηρίου καθώς είναι οπλισμένη να παραλάβει μόνο θετικές ροπές στο μέσο, έτσι κρίνεται αναγκαία η ενίσχυση της.
- Αξίζει να αναφερθεί ότι τόσο η δοκός όσο και τα υποστυλώματα θα διαστασιολογηθούν με τα δυσμενέστερα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη που θα προκύψουν από τις δύο φορές του σεισμού.
- Στην αρχή του λικνισμού, η βάση αποκολλάται σταδιακά και για αυτό παρατηρείται μείωση της θλιβόμενης ζώνης. Όμως παράλληλα με την στροφή του τοιχείου, η οριζόντια δύναμη της ανάλυσης Pushover αυξάνεται και έτσι τα εντατικά μεγέθη του τοιχείου αυξάνονται. Η ταυτόχρονη μείωση της θλιβόμενης ζώνης της βάσης και η αύξηση των εντατικών μεγεθών θα οδηγήσει σε πλήρη πλαστικοποίηση την βάση του τοιχείου. Πέρα από αυτό το σημείο, το μήκος της παραμορφωμένης ζώνης αρχίζει να αυξάνεται καθώς καλείται να παραλάβει πρόσθετα φορτία λόγω της αύξησης της οριζόντιας σεισμικής δύναμης. Αξιοσημείωτο είναι ότι μετά την πρώτη πλήρη πλαστικοποίηση της βάσης, αυτή παραμένει συνεχώς σε πλήρη διαρροή. Αυτό, έχει και αντίκτυπο στην δημιουργία μεγάλων παραμορφώσεων στην ακραία θλιβόμενη ίνα της βάσης του τοιχείου. Οι τιμές που προκύπτουν λόγω της ύπαρξης ακόμα και του ασθενέστερου σεισμού είναι αρκετά μεγάλες κάτι που εξυπακούεται σε μεγάλες ζημιές εκεί.

- Αποδείχθηκε πως η ποιότητα του σκυροδέματος του τοιχείου επηρεάζει τα μεγέθη μόνο σε μεγάλες μετακινήσεις κορυφής. Από τις αναλύσεις του κεφαλαίου 5, προέκυψε ότι οι μέγιστες αναπτυσσόμενες μετακινήσεις του πλαισίου λόγω του σεισμού σχεδιασμού με χαρακτηριστικά τόσο ζώνης σεισμικής επικινδυνότητας 2 όσο και της 3, είναι επαρκώς μικρές ώστε να συμπεράνουμε ότι η ποιότητα σκυροδέματος δεν επηρεάζει κανένα μέγεθος.
- Η θλιπτική αντοχή της βάσης του τοιχείου επηρεάζει σημαντικά την θλιβόμενη-παραμορφωμένη περιοχή της βάσης. Συγκεκριμένα η καλύτερη ποιότητα σκυροδέματος μειώνει το μήκος της θλιβόμενης ζώνης, το μήκος της πλαστικοποιημένης ζώνης και τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις. Δηλαδή η καλύτερη ποιότητα του σκυροδέματος μειώνει τις ζημιές στη βάση του τοιχείου και τις περιορίζει σε μικρότερη έκταση.
- Αποδείχθηκε ότι όσο πιο ισχυρός είναι ο σεισμός, η βελτίωση της ποιότητας του σκυροδέματος περιορίζει περισσότερο τις ζημιές στη βάση του τοιχείου. Γίνεται αντιληπτή δηλαδή η αναγκαιότητα της χρησιμοποίησης καλής ποιότητας σκυροδέματος όταν το κτήριο βρίσκεται σε περιοχή με ισχυρούς σεισμούς (διαγράμματα 5.28-5.29).
- Όταν δεν διαρρέουν τα μέλη του ενισχυμένου πλαισίου, ή διαρρέουν λίγο, η γενική πλαστιμότητα εξαρτάται αποκλειστικά από το λικνισμό του τοιχείου. Δηλαδή η μετατόπιση διαρροής του συστήματος είναι ίση με την μετατόπιση όπου τελειώνει η μη γραμμική απόκριση του πλαισίου λόγω της έναρξης του λικνισμού. Για αυτό το λόγο παρατηρείται αύξηση της γενικής πλαστιμότητας του ενισχυμένου πλαισίου σε σχέση με του απλού.
- Όταν στο σεισμό σχεδιασμού ενός ενισχυμένου πλαισίου αναπτυχθούν μεγάλες τοπικές πλαστιμότητες, η γενική πλαστιμότητα κυμαίνεται σε λογικά επίπεδα, όμως πάλι είναι αυξημένη σε σχέση με τη πλαστιμότητα που αναπτύσσεται στο μη ενισχυμένο πλαίσιο υπό το ίδιο σεισμικό φορτίο. Αυτό οφείλεται στο ότι το όριο διαρροής μεταφέρεται σε μικρότερη μετατόπιση λόγω της επιρροής της "διαρροής" του τοιχείου λόγω λικνισμού.
- Η γενική πλαστιμότητα σε κατασκευές με λικνιζόμενα μέλη δεν έχει την ίδια σημασία με την αντίστοιχη σε συμβατικές κατασκευές καθώς δεν εκφράζει σε καμία περίπτωση πιθανή διαρροή των μελών αλλά εκφράζει στην ουσία μόνο την πλαστιμότητα του τοιχείου κατά τον λικνισμό (βλέπε διάγραμμα 5.20)
- Συμπεραίνεται ανάγκη τροποποίησης του κανονισμού όσο αφορά τα όρια των γενικών πλαστιμοτήτων στα πλαίσια που ενισχύονται με λικνιζόμενο τοιχεία ή τροποποίηση στον τρόπο υπολογισμού της γενικής πλαστιμότητας τέτοιων πλαισίων. Αυτό όμως δεν αποτελεί κανόνα, παρά μόνο για μονώροφα πλαίσια παρόμοιας δυσκαμψίας..
- Το λικνιζόμενο τοίχιο βελτιώνει την συμπεριφορά των υποστυλωμάτων και ειδικότερα του υποστυλώματος 2 (δεξιό υποστύλωμα αν η οριζόντια δύναμη έχει φορά δεξιά) αφού μειώνει πάρα πολύ την τοπική του πλαστιμότητα.
- Αν και μικρή διαφορά, το πλαίσιο που διαστασιολογήθηκε με μεγαλύτερο συντελεστή συμπεριφοράς αναπτύσσει μεγαλύτερες γενική και τοπικές πλαστιμότητες (διάγραμμα 5.21)

- Τα ενισχυμένα πλαίσια με τους δύο συντελεστές συμπεριφοράς, αναπτύσσουν υπό το σεισμό σχεδιασμού ίδιες φασματικές επιταχύνσεις και διαφορετικές φασματικές μετακινήσεις, χωρίς ωστόσο μεγάλη απόκλιση (διάγραμμα 5.21). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το τοιχείο καθορίζει την δυσκαμψία του πλαισίου και η μικρή διαφορά στη διαστασιολόγηση των υποστυλωμάτων δεν παίζει σημαντικό ρόλο. Αυτό ισχύει αν τα υποστυλώματα δεν αναπτύσσουν μεγάλες τοπικές πλαστιμότητες.
- Η υποδιαστασιολόγηση του πλαισίου αυξάνει το μήκος της θλιβόμενης και της πλαστικοποιημένης ζώνης του τοιχείου, δηλαδή οδηγεί το τοιχείο σε μεγαλύτερης έκτασης ζημιές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, λόγω της μικρότερης δυσκαμψίας των υποστυλωμάτων, το τοιχείο αναλαμβάνει περισσότερη ένταση άρα και μεγαλύτερη πλαστικοποιημένη ζώνη.
- Τα υποστυλώματα του πλαισίου που σχεδιάστηκαν με συντελεστή συμπεριφοράς 3 αναλαμβάνουν μεγαλύτερη ροπή και τέμνουσα από τα αντίστοιχα του πλαισίου που σχεδιάστηκαν με συντελεστή συμπεριφοράς 6. Αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη πλαστικοποίηση των ινών των πιο εύκαμπτων υποστυλωμάτων.
- Οι αξονικές των υποστυλωμάτων των πλαισίων με τον μεγαλύτερο συντελεστή συμπεριφοράς είναι μεγαλύτερες και αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη μετατόπιση κορυφής τους.
- Όσο το μήκος του τοιχείου αυξάνει τόσο οι πλαστικές αρθρώσεις δημιουργούνται με μεγαλύτερη διαφορά οριζόντιας δύναμης μεταξύ τους. Αυτό δίνει καταρχάς μεγάλη δυσκαμψία στο πλαίσιο, αφού αργεί η οριζοντιοποίηση της καμπύλης ικανότητας ακόμα και για μεγάλα σεισμικά φορτία (διάγραμμα 6.4).
- Η αύξηση του μήκους του τοιχείου περιορίζει σημαντικά τις ζημιές στα υποστυλώματα και στις δοκούς ακόμα και για μεγάλες οριζόντιες δυνάμεις.
- Όσο μεγαλύτερο σε μήκος είναι το τοιχείο τόσο μεγαλύτερη τέμνουσα δύναμη ασκείται στην δοκό στο σημείο της διεπιφάνειας της με το υποστυλώμα για συγκεκριμένη μετατόπιση. Να σημειωθεί ότι η αύξηση του μήκους του τοιχείου αυξάνει τις τέμνουσες σε όλη τη δοκό και ιδιαίτερα στον αριστερό κόμβο όπου η τέμνουσα εκεί είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την τέμνουσα του κόμβου 5.
- Η μεταβολή των αναπτυσσόμενων στοχευόμενων μετακινήσεων της κορυφής του πλαισίου στο σεισμό σχεδιασμού ως προς τη μεταβολή του μήκους του τοιχείου είναι εκθετικής μορφής (διάγραμμα 7.7).
- Η ενεργός απόσβεση του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος μειώνεται καθώς αυξάνει το μήκος του λικνιζόμενου τοιχείου, αφού τα υποστυλώματα συμμετέχουν πιο λίγο στην υστερητική απόσβεση λόγω της μικρότερης πλαστικοποίησης των ινών τους.
- Η ροπή και η τέμνουσα στη βάση του λικνιζόμενου τοιχείου αυξάνουν όσο το μήκος του αυξάνει το πλάτος του.
- Όταν ο λικνισμός δεν είναι σε προχωρημένο στάδιο, δηλαδή δεν πλαστικοποιείται όλη η βάση του, η αύξηση του μήκους του τοιχείου προκαλεί πτώση της αξονικής δύναμης. Αντιθέτως στους ισχυρότερους σεισμούς, η όπου η βάση του τοιχείου πλαστικοποιείται όλη ακόμα και για μεγάλο μήκος τοιχείου, η αύξηση του μήκους του τοιχείου προκαλεί αύξηση της θλιπτικής του δύναμης άρα και περισσότερο εφελκυσμό στα μέλη (βλέπε διάγραμμα 7.32).

- Επιβεβαιώθηκε ότι τα λικνιζόμενα τοιχεία με μεγαλύτερο πλάτος απαιτούν μικρότερη θλιπτική δύναμη για να λειτουργήσουν.
- Παρατηρείται ότι όσο αυξάνει το μήκος του τοιχείου τόσο αυτό συμμετέχει περισσότερο στην παραλαβή της τέμνουσας και ροπής βάσης ενώ τα υποστυλώματα συμμετέχουν λιγότερο. Ενισχύεται δηλαδή η πιο πάνω άποψη ότι η διαφορά της ροπής και της τέμνουσας βάσης καθώς αυξάνεται το μήκος του τοιχείου αναλαμβάνεται κατά μεγάλο ποσοστό της από το τοιχείο (πίνακες 7.6 και 7.8). Αν και το ποσοστό της ροπής βάσης που αναλαμβάνει το τοιχείο αυξάνει, παραμένει σχετικά μικρό (30%-40%).
- Αποδείχθηκε έτσι ότι το 50% της ροπής βάσης παραλαμβάνεται από ζεύγος δυνάμεων. Το σημαντικότερο όμως είναι ότι αυτό το ποσοστό παραμένει σταθερό για όλα τα πλαίσια, δηλαδή δεν επηρεάζεται από το μήκος του τοιχείου. Με άλλα λόγια όσο αυξάνεται το μήκος του τοιχείου τόσο αυξάνεται το μέγεθος της ροπής που αναλαμβάνεται από το ζεύγος δυνάμεων (πίνακας 7.8). Το τελευταίο αρχικά έρχεται σε αντίθεση με την προηγούμενη παρατήρηση ότι το τοιχείο μήκους μεγαλύτερο των 2m μειώνει την εφελκυστική δύναμη του υποστυλώματος 1 (βλέπε πίνακα 7.10). Μία πιο προσεκτική διερεύνηση του θέματος ξεκαθαρίζει την αντίθεση αυτή. Η αύξηση του μήκους του τοιχείου αυξάνει τον μοχλοβραχίονα της αξονικής του δύναμης από το κέντρο του πλαισίου κατά μήκος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ροπής βάσης που παραλαμβάνει η θλιπτική δύναμη του τοιχείου, που σε συνδυασμό με την μείωση της θλίψης του υποστυλώματος 2 οδηγούμαστε στη πιο πάνω παρατήρηση ότι η ροπή βάσης που αναλαμβάνεται από τις αξονικές δυνάμεις αυξάνεται όσο αυξάνεται το τοιχείο γίνεται πιο πλατύ.
- Η τέμνουσα δύναμη και η ροπή κάμψης των υποστυλωμάτων μειώνονται όσο αυξάνει το μήκος του λικνιζόμενου τοιχείου, με μεγαλύτερη μείωση να παρατηρείται για τα πλαίσια που ενισχύονται με τοιχείο μεγαλύτερο των 2 μέτρων.
- Πολύ σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι σε κάθε πλαίσιο υπάρχει ένα συγκεκριμένο μήκος τοιχείου το οποίο βελτιώνει πολύ την συμπεριφορά του πλαισίου και κυρίως απαλλάσσει τα υποστυλώματα και τη δοκό από έντονη καταπόνηση. Στις συγκεκριμένες διαστάσεις πλαισίου, το κρίσιμο αυτό μήκος του τοιχείου είναι τα 2m. Για αυτό το μήκος παρατηρήθηκε έντονη μείωση της στοχευόμενης μετακίνησης η οποία επιδρά σε όλα τα εντατικά μεγέθη του πλαισίου.
- Αποδείχθηκε ότι ο συντελεστής συμπεριφοράς των πλαισίων επηρεάζει τη συμπεριφορά της βάσης του λικνιζόμενου τοιχείου (σύγκριση πινάκων 7.2 και 7.3 με τους πίνακες 7.14 και 7.15).
- Το υποδιαστασιολογημένο πλαίσιο αναπτύσσει πολύ μεγαλύτερη μέγιστη παραμόρφωση στην ακραία θλιβόμενη ίνα του τοιχείου. Επίσης το μήκος της βάσης που θλίβεται και παραμορφώνεται είναι μεγαλύτερο όπως μεγαλύτερο είναι και μήκος που πλαστικοποιείται. Δηλαδή στα πλαίσια που σχεδιάστηκαν με μεγαλύτερο συντελεστή συμπεριφοράς θα αναπτυχθούν μεγαλύτερες ζημιές στη βάση του τοιχείου οι οποίες μάλιστα θα εκτείνονται περισσότερο.
- Παρατηρήθηκε ότι όπως αναμενόταν τα υποστυλώματα του πλαισίου που διαστασιολογήθηκαν με συντελεστή συμπεριφοράς  $\alpha=6$ , αναπτύσσουν αρκετά μικρότερη ροπή και τέμνουσα. Η σημαντικότερη όμως παρατήρηση είναι ότι όσο το πλάτος του τοιχείου αυξάνει τα εντατικά μεγέθη των 2 αναλύσεων γίνονται όλο

και ποιο όμοια. Αυτό αποτελεί ένδειξη ότι στα πολύ δύσκαμπτα πλαίσια αυτό που καθορίζει την συμπεριφορά είναι το τοιχείο. Οφείλεται στο ότι τα υποστυλώματα δεν διαρρέουν αλλά επίσης και στην ανάπτυξη πολύ μικρών μετακινήσεων που σημαίνει ότι η αρχική δυσκαμψία των υποστυλωμάτων δεν είναι σημαντική.

- Ο συντελεστής συμπεριφοράς επηρεάζει τις τοπικές και γενικές πλαστιμότητες του πλαισίου όταν το μήκος του λικνιζόμενου τοιχείου είναι μικρού μήκους σε σχέση με το πλάτος.
- Στο πλαίσιο με τον μικρότερο συντελεστή συμπεριφοράς το μικρού μήκους λικνιζόμενο τοιχείο αυξάνει περισσότερο τις ζημιές του αριστερού υποστυλώματος.
- Στο πλαίσιο με μεγαλύτερο συντελεστή συμπεριφοράς (με  $q=6$ ) αναπτύσσεται περισσότερος εφελκυσμός στο υποστυλώμα 1 και λιγότερη θλίψη στο δύο.
- Η αρχική διαστασιολόγηση του πλαισίου επηρεάζει την απόκριση του περισσότερο όταν ο σεισμός είναι πιο ισχυρός. Παρατηρείται όμως ότι καθώς το πλαίσιο γίνεται πιο δύσκαμπτο, η διαφορά των φασματικών επιταχύνσεων και μετακινήσεων των πλαισίων με διαφορετικό μήκος τοιχείου μειώνεται.
- Όσο το μήκος του λικνιζόμενου τοιχείου μειώνεται τόσο το μέγεθος του σεισμού επηρεάζει περισσότερο τη συμπεριφορά του πλαισίου αυξάνοντας την μέγιστη μετακίνηση της κορυφής.
- Στον ισχυρό σεισμό η συμπεριφορά βελτιώνεται δραματικά αν το πλαίσιο ενισχυθεί με τοιχείο άνω των 2m (διάγραμμα 7.35 και 7.36).
- Αυτό που έχει σημασία όμως δεν είναι το μέγεθος της δρώσας ροπής αλλά η τοπική πλαστιμότητα των υποστυλωμάτων. το μέγεθος του σεισμού επηρεάζει δυσμενώς τα πιο εύκαμπτα πλαίσια. Τα υποστυλώματα που υποδιαστασιολογήθηκαν έχουν μικρότερο όριο διαρροής εκ γενετής. Επίσης, η ευκαμψία τους αυξάνει την εφελκυστική αντοχή των υποστυλωμάτων με αποτέλεσμα να είναι ακόμα μικρότερη η ροπή διαρροής. Σε συνδυασμό ότι ο ασθενέστερος σεισμός προκαλεί στα υποστυλώματα ροπές κοντά στο όριο διαρροή τους, αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα ο ισχυρότερος σεισμός να μην αυξήσει τις μετακινήσεις κορυφής τους με σταθερή πρακτικά ροπή. Έτσι προκαλείται μεγάλη αύξηση της τοπικής πλαστιμότητας των υποστυλωμάτων με συνέπειες που θα αναλυθούν στην συνέχεια (διαγράμματα 7.41 και 7.43).
- Για ενίσχυση πλαισίου με λικνιζόμενο τοιχείο μήκους 1.0m, η πλαστιμότητα του υποστυλώματος 1 αυξάνεται (βλέπε διάγραμμα 7.36). Αντίθετα, η συμπεριφορά του υποστυλώματος 2 βελτιώνεται για την συγκεκριμένη ενίσχυση του πλαισίου, όμως προφανώς αυτή η ενίσχυση δεν είναι αποτελεσματική.
- Αποδείχθηκε ότι ο σεισμός με επιτάχυνση εδάφους 0.36g προκαλεί πολύ μεγάλη αύξηση της ροπής στη βάση του τοιχείου σε σχέση με τον ασθενέστερο σεισμό σχεδιασμού. Η αύξηση αυτή γίνεται πιο ασήμαντη καθώς μειώνεται το μήκος του λικνιζόμενου τοιχείου και συγκεκριμένα το τοιχείο μήκους 1m αναπτύσσει πολύ μικρή διαφορά ροπής μεταξύ των δύο σεισμών. Η πιο πάνω επιρροή της ροπής σε σχέση με το μέγεθος του σεισμού και το μήκος του πλαισίου, ταυτίζεται με την γενική συμπεριφορά του πλαισίου. Αυτό ενισχύει ακόμη περισσότερη τον διατυπωθείσα ισχυρισμό ότι η απόκριση του πλαισίου καθορίζεται από την αντοχή του τοιχείου (διάγραμμα 7.49).

- Όσο η ένταση του σεισμού μεγαλώνει, τόσο περισσότερο το μέγεθος της δρώσας ροπής στο τοίχιο επηρεάζεται από το συντελεστή συμπεριφοράς.
- Το διάγραμμα 7.50 αποτελεί τη βάση με την οποία θα οπλιστεί το υποστυλώμα μέσω συνδετήρων έναντι τέμνουσας.
- Το μέγεθος του σεισμού επηρεάζει πολύ περισσότερο τη ροπή και την τέμνουσα του τοιχείου στα πλαίσια που διαστασιολογήθηκαν αρχικώς με συντελεστή συμπεριφοράς 6. Το αντίθετο δηλαδή που ισχύει με τα υποστυλώματα, αφού στο συγκεκριμένο συντελεστή τα υποστυλώματα αναλαμβάνουν μικρότερη ένταση για συγκεκριμένη μετατόπιση, έτσι την ένταση αυτή την λαμβάνει το τοίχιο.
- Το μέγεθος του σεισμού επηρεάζει πολύ το μήκος της θλιβόμενης ζώνης. Αντίθετα με άλλα μεγέθη η επιρροή αυτή παραμένει μεγάλη ακόμα και για μεγάλο μήκος του τοιχείου (διάγραμμα 7.52,7.54,7.55).
- Το μήκος της θλιβόμενης ζώνης επηρεάζεται ελάχιστα από τον συντελεστή συμπεριφοράς με τον οποίο διαστασιολογήθηκε το μη ενισχυμένο πλαίσιο.
- Όπως αναμενόταν ο σεισμός σχεδιασμού με μεγαλύτερη εδαφική επιτάχυνση προκαλεί μεγαλύτερη παραμόρφωση στη βάση του τοιχείου. Σημαντικότερο είναι όμως ότι στον πιο ισχυρό σεισμό οι παραμορφώσεις δεν μειώνονται ικανοποιητικά για μήκος τοιχείου 2m και κάτω. Σε αντίθεση, ο ασθενής σεισμός προκαλεί ανεπαίστες παραμορφώσεις στη βάση του τοιχείου το οποίο έχει μήκος 2m και άνω. Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι η αποτελεσματικότητα του μήκος του τοιχείου στην μείωση των παραμορφώσεων εξαρτάται από το μέγεθος του σεισμικού γεγονότος.
- Αποδείχθηκε ότι αν ο σεισμός είναι μεγάλος τότε οι ζημιές είναι δύσκολο να αποφευχθεί αφού απαιτεί πολύ μεγάλο μήκος τοιχείου.
- Τόσο το μέγεθος του σεισμού όσο και η αρχική διαστασιολόγηση του πλαισίου καθορίζουν τη διαστασιολόγηση της δοκού έναντι τέμνουσας.
- Αποδείχθηκε ότι η αύξηση του μήκους του τοιχείου αποδίδει πολύ μεγάλη αύξηση τόσο στην τέμνουσα δύναμη όσο και στη ροπή κάμψης της δοκού. Δηλαδή, μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους κατά το σχεδιασμό είναι αν η (ενισχυμένη) δοκός μπορεί να παραλάβει την ένταση που θα προκαλούσε το τοίχιο με το συγκεκριμένο μήκος που επιλέχθηκε.

## 8.2 Σημεία προαγωγής της επιστήμης

- Διαπίστωση επιρροής της ποιότητας σκυροδέματος του ανελαστικού λικνιζόμενου τοιχείου
- Κατανόηση συμπεριφοράς της βάσης του ανελαστικού λικνιζόμενου τοιχείου
- Διαπίστωση θετικών και αρνητικών επιπτώσεων στην αύξηση του μήκους του λικνιζόμενου τοιχείου
- Αναγνώριση ανάγκης για αναθεώρηση του υπολογισμού και της εκτίμησης της γενικής πλαστιμότητας κατασκευών που ενισχύονται με λικνιζόμενα μέλη
- Αποδείχθηκε η ανάγκη τοπικής ενίσχυσης των γωνιών της βάσης του λικνιζόμενου τοιχείου



### 8.3 Θέματα προς περαιτέρω μελέτη

- Διερεύνηση πολλών ειδών κατασκευών με άνιση κατανομή των δυσκαμψιών σε κάτοψη. Τέτοιες κατασκευές παρουσιάζουν σε μερικά μέλη μεγάλη τοπική πλαστιμότητα που ίσως να αποδειχθεί η χρησιμότητα του λικνιζόμενου τοιχείου.
- Μελέτη πολυώροφων πλαισίων για να διερευνηθεί αν επηρεάζουν οι παράγοντες που ελέχθησαν στα μονώροφα πλαίσια.
- Μελέτη πλαισίου με μεγαλύτερη μάζα τέτοια ώστε τα σεισμικά φορτία να είναι δυσμενή σε σχέση με τα στατικά. Αυτό θα οδηγήσει σε εντελώς διαφορετικές διαστάσεις υποστρωμάτων και άρα σε διαφορετικά συμπεράσματα ως προς τον επηρεασμό της απόκρισης μεταξύ των πλαισίων που διαστασιολογήθηκαν με διαφορετικό συντελεστή απόσβεσης.
- Μελέτη διαφόρων τύπων πλαισίων για να επαληθευτεί ο ισχυρισμός ότι για κάθε πλαίσιο υπάρχει ένα συγκεκριμένο ελάχιστο μήκος τοιχείου το οποίο γίνεται πολύ αποτελεσματικό σε σχέση με την μείωση των ζημιών στη βάση του στο σεισμό σχεδιασμού.
- Μελέτη των τάσεων στο εσωτερικό του τοιχείου που θα καθορίσει την διαστασιολόγηση του.
- Διεξαγωγή πειραμάτων σε μονώροφα και πολυώροφα πλαίσια.
- Διερεύνηση της συμπεριφοράς πλαισίου ενισχυμένου με λικνιζόμενο τοιχείο σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση.



# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- [1] Evangelos Avgenakis, Ioannis N. Psycharis, "A Micro-Element Formulation for Rocking Flexible Bodies with a Deformable Base", *ECCOMAS Congress 2016, VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, Crete Island, Greece, 5-10 June 2016.
- [2] Nathan G. Chancellor, Matthew R. Eatherton, David A. Roke, Tugce Akbas, "Self-Centering Seismic Lateral Force Resisting Systems: High Performance Structures for the City of Tomorrow", *Building 2014*, vol. 4, no. 3, pp. 520-548, 4 Sep. 2014.
- [3] Qiang Xue, "Assessing the Accuracy of the Damping Models Used in Displacement-Based Seismic Demand Evaluation and Design of Inelastic Structures", *Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, Vol. 3, No. 2, pp. 37-45, Sep. 2001.
- [4] Evangelos Avgenakis, Ioannis N. Psycharis, "A new Computational Approach for the Rocking Response of Deformable Bodies Considering Material Nonlinearity", *COMPADYN 2017, 6th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, Rhodes Island, Greece, 15-17 June 2017.
- [5] Bowang Chen, Jianguo Tan, Yang Oyang, "An Improved Simulation Model of Shear Wall Structures of Tall Building", *Procedia Engineering, 2011 SREE Conference on Engineering Modelling and Simulation*, vol. 12, pp. 127-132, 2011.
- [6] Q. T. Ma, M. H. Khan, "SHAKE TABLE TESTS OF A STEPPING BRIDGE MODEL", *The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China*, 2008.
- [7] George W. Housner, "The behavior of Inverted Pendulum Structures During Earthquakes", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 53, No. 2, pp. 403-417, February 1963.
- [8] Nicos Makris and Michalis F. Vassiliou, "The Dynamics of the Rocking Frame", *In book: Seismic Assessment, behavior and Retrofit of Heritage Buildings and Monuments*, Publisher: Springer International Publishing, Editors: Ioannis Psycharis, Stavroula Pantazopoulou, Manolis Papadrakakis, January 2015.
- [9] Γραμματικού Β. Σοφίας-Ευδοξίας, "Τρόπος και Παραμόρφωση Αστοχίας Μελών Οπλισμένου Σκυροδέματος Υπό Εγκάρσια Φόρτιση", *Διδακτορική διατριβή*, Πάτρα 2016.
- [10] Γιάννης Ν. Ψυχάρης, "Σημειώσεις Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Τεύχος 1", Αθήνα 2016.
- [11] Γιάννης Ν. Ψυχάρης, "Σημειώσεις Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Τεύχος 2", Αθήνα 2015.
- [12] Γιάννης Ν. Ψυχάρης, "Αντισεισμικός Σχεδιασμός με Βάση τις Μετακινήσεις", *Σημειώσεις για το μάθημα: Ειδικά θέματα αντισεισμικής τεχνολογίας*, Αθήνα 2015.
- [13] Anil K. Chopra, Rakesh K. Goel, "Capacity-Demand-Diagram Methods For Estimation Deformation of Inelastic Systems", March 2002.
- [14] Evangelos Angenakis, "Modelling of Rocking Flexible Bodies Consideration the Deformability of their Base", *Master thesis*, October 2015.
- [15] Ζαντής Χρίστος, "Συγκριτική Διερεύνηση της Στατικής Μη Γραμμικής Συμπεριφοράς Τυπικών Πλαισίων από Ω.Σ Ενισχυμένων με Λικνιζόμενα Προκατασκευασμένα Τοιχία", *Διπλωματική εργασία*, Αθήνα, Ιούλιος 2017.

[16] F. Gaydon and W. Shepherd, "Generalized plane stress in a semi-infinite strip under arbitrary endload," in *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 281, pp. 184–206, The Royal Society, 1964.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

---

## Κώδικες μοντελοποίηση πλαισίων στο Opensees

### Π1 Ανελαστικά πλαίσια χωρίς ενίσχυση

```
# units: kN,m

# Remove existing model
wipe

#global virables
set pi 3.1415926535897931

#create the ModelBuilder object: number of dimensions, degrees of freedom
model basic -ndm 2 -ndf 3

#Define concrete features
set E 30000000.0; #metro elastikotitas
#Define material's features
set fpc -30000.0; #concrete compressive strength at 28 days - C30

# STEEL
# Reinforcing steel
set fy_steel 500000.0;      # Yield stress
set E_steel 200000000.0;   # Young's modulus

#define geometry of elements
set h_C 0.35; #height of column
set b_C 0.35; #width of column
set h_B 0.5; #height of beam
set b_B 0.25; #width of beam
set Rocking_B 1.4; #longitude dimension of rocking element
set Rocking_W 0.20; #thickness of rocking element
set A_Rigid 0.05
set I_Rigid 600.0

#define geometry of columns
set cover_C 0.025; #cover of columns
set numSubdiv_y_C 16; #number of fiber subdivisions of columns for longitude
dimension - y
set numSubdiv_z_C 16; #number of fiber subdivisions of columns for depth
dimension - z
set TotNumBars_C 4; #total number of bars of steel per column ---- MUST be
even number
set Diameter_Steel_C 0.020; #diameter of steel

#define geometry of beams
set cover_B 0.03; #cover of beams
set numSubdiv_y_B 16; #number of fiber subdivisions of beams for longitude
dimension - y
set numSubdiv_z_B 16; #number of fiber subdivisions of beams for depth
dimension - z
set TotNumBars_B 8; #total number of bars of steel per beam
set Diameter_Steel_B 0.020; #diameter of steel

#Define loads
set Vertical_Uni_Load -45.15; #vertical uniform load
#set Hor_Load -60.0; #horizontio fortio

#define geometry, parametrize of end nodes
set H_cord 4.5; #height
set L_cord 5.0; # length
set B [expr $Rocking_B]; #lenth of rigid element
```

```

#calculations geometric
set A_C [expr $h_C*$b_C]; #area of column
set A_B [expr $h_B*$b_B]; #area of beam
set I_C [expr $b_C*pow($h_C,3.0)/12.0/2.0]; #Iz inertia monment of column,
reduction to 0.5*Iz
set I_B [expr $b_B*pow($h_B,3.0)/12.0/2.0]; #Iz inertia monment of beam,
reduction to 0.5*Iz

set Lmiddle [expr $L_cord/2.0]; #length of middle coordiate
set Hmiddle [expr ($H_cord-$h_B/2.0)/2.0]; #height of middle coordinate
set L_left [expr $Lmiddle-$B/2.0]; #lenght coordinate of the rigids members
set L_right [expr $Lmiddle+$B/2.0]; #lenght coordinate of the rigids members
set H_upper [expr $H_cord]; #height coordinate of the rigid members
set H_down [expr $H_cord-$h_B/2.0]; #height coordinate of the rigid members

set Rockingmass [expr $Rocking_B*$Rocking_W*$H_down*25.0]; #mass of rocking
element in KN

#Calculation for geometry of columns and beams
set LineNumBars_C [expr int($TotNumBars_C/2.0)]; #number of steel bars per
line. I suppose that only two sides will be reinforced
set Area_Steel_C [expr $pi*pow($Diameter_Steel_C,2.0)/4.0]; #area of each
steel bar
set LineNumBars_B [expr int($TotNumBars_B/2.0)]; #number of steel bars per
line. I suppose that only two sides will be reinforced
set Area_Steel_B [expr $pi*pow($Diameter_Steel_B,2.0)/4.0]; #area of each
steel bar

#set nodes, each coordiante is referred to their axis of centre of gravity o
each element
node 1 0 0
node 2 $L_cord 0
node 3 0 $H_cord
node 4 $L_cord $H_cord
node 14 $Lmiddle $H_cord

#boundary conditions
fix 1 1 1 1
fix 2 1 1 1

#DEFINE
ELEMENTS.....
.....
#uniaxialMaterial Steel02 $matTag $Fy $E $b(strain-hardening ratio - ratio
between post-yield tangent and initial elastic tangent) $R0 $cR1 $cR2 <$a1
$a2 $a3 $a4 $sigInit>
uniaxialMaterial Steel01 1 $fy_steel $E_steel 0.000001
# uniaxialMaterial Steel02 1 500000.0 200000000.0 0.0 18.0 0.925 0.15 0.0
1.0 0.0 1.0 0.0; #reinforcement bars, useful in convergence
#uniaxialMaterial Concrete01 $matTag $fpc(concrete compressive strength at
28 days) $epsc0(concrete strain at maximum strength) $fpcu(concrete crushing
strength) $epsU(concrete strain at crushing strength)
uniaxialMaterial Concrete01 2 $fpc -0.002 $fpc -0.1;

#Fiber Section Properties, for columns

set coverY_C [expr $h_C/2.0]
set coverZ_C [expr $b_C/2.0]
set coreY_C [expr $coverY_C-$cover_C]
set coreZ_C [expr $coverZ_C-$cover_C]

section fiberSec 1 {
#patch quad $matTag $numSubdiv_y_C $numSubdiv_z_C $yI $zI $yJ $zJ $yK $zK
$yL $zL ---- concrete simulation
patch quad 2 $numSubdiv_y_C $numSubdiv_z_C -$coverY_C $coverZ_C -$coverY_C
-$coverZ_C $coverY_C -$coverZ_C $coverY_C $coverZ_C

```

```

#layer straight $matTag $numFiber(number of fibers along line) $areaFiber
$yStart $zStart $yEnd $zEnd
layer straight 1 $LineNumBars_C $Area_Steel_C -$scoreY_C $scoreZ_C -$scoreY_C -
$scoreZ_C
layer straight 1 $LineNumBars_C $Area_Steel_C $scoreY_C $scoreZ_C $scoreY_C -
$scoreZ_C
}

#Fiber Section Properties, for beams

set coverY_B [expr $h_B/2.0]
set coverZ_B [expr $b_B/2.0]
set coreY_B [expr $coverY_B-$cover_B]
set coreZ_B [expr $coverZ_B-$cover_B]

#uniaxialMaterial Elastic 4 $E

#fiber section for beams
section fiberSec 2 {
patch quad 2 $numSubdiv_y_B $numSubdiv_z_B -$coverY_B $coverZ_B -$coverY_B -
$coverZ_B $coverY_B -$coverZ_B $coverY_B $coverZ_B
layer straight 1 $LineNumBars_B $Area_Steel_B -$scoreY_B $scoreZ_B -$scoreY_B -
$scoreZ_B
layer straight 1 $LineNumBars_B $Area_Steel_B $scoreY_B $scoreZ_B $scoreY_B -
$scoreZ_B
}

#Define geometric transformation (no orientation needed for 2D problem)
geomTransf PDelta 1; #column
geomTransf PDelta 2; #beam

#Define inelastic columns' and beams' elemets
#element nonlinearBeamColumn $eleTag $iNode $jNode $numIntgrPts(number of
integration points along the element) $sectionTag $transfTag
element nonlinearBeamColumn 1 1 3 10 1 1; #
element nonlinearBeamColumn 2 2 4 10 1 1; #
element elasticBeamColumn 3 3 14 $A_B $E $I_B 2
element elasticBeamColumn 4 14 4 $A_B $E $I_B 2

#Define recorder files
recorder Node -file Node14_NoRocking.out -time -node 14 -dof 1 disp
recorder Element -file ElementYield1_NoRocking.out -time -ele 1 localForce;
#MQN
recorder Element -file ElementYield2_NoRocking.out -time -ele 2 localForce
recorder Element -file ElementYield3_NoRocking.out -time -ele 3 localForce
recorder Element -file ElementYield5_NoRocking.out -time -ele 4 localForce
#stress and strain of columns at base both of right and left side of the
Section
recorder Element -file StressStrain1_Node1_left_NoRocking.out -time -ele 1
section 1 fiber $coverY_C -$coverZ_C stressStrain
recorder Element -file StressStrain1_Node1_right_NoRocking.out -time -ele 1
section 1 fiber -$coverY_C -$coverZ_C stressStrain
recorder Element -file StressStrain2_Node2_left_NoRocking.out -time -ele 2
section 1 fiber $coverY_C -$coverZ_C stressStrain
recorder Element -file StressStrain2_Node2_right_NoRocking.out -time -ele 2
section 1 fiber -$coverY_C -$coverZ_C stressStrain
#stress and strain of columns at base both of right and left side of the
Section
recorder Element -file StressStrain1_Node3_left_NoRocking.out -time -ele 1
section 10 fiber $coverY_C -$coverZ_C stressStrain
recorder Element -file StressStrain1_Node3_right_NoRocking.out -time -ele 1
section 10 fiber -$coverY_C -$coverZ_C stressStrain
recorder Element -file StressStrain2_Node4_left_NoRocking.out -time -ele 2
section 10 fiber $coverY_C -$coverZ_C stressStrain
recorder Element -file StressStrain2_Node4_right_NoRocking.out -time -ele 2
section 10 fiber -$coverY_C -$coverZ_C stressStrain
#stress and strain of beams at both of right and left side of the Section

```

```

recorder Element -file StressStrain3_Node3_up_NoRocking.out -time -ele 3
section 1 fiber $coverY_C -$coverZ_C stressStrain
recorder Element -file StressStrain3_Node3_down_NoRocking.out -time -ele 3
section 1 fiber -$coverY_C -$coverZ_C stressStrain
recorder Element -file StressStrain5_Node7_up_NoRocking.out -time -ele 5
section 1 fiber $coverY_C -$coverZ_C stressStrain
recorder Element -file StressStrain5_Node7_down_NoRocking.out -time -ele 5
section 1 fiber -$coverY_C -$coverZ_C stressStrain

recorder Element -file StressStrain3_Node5_up_NoRocking.out -time -ele 3
section 10 fiber $coverY_C -$coverZ_C stressStrain
recorder Element -file StressStrain3_Node5_down_NoRocking.out -time -ele 3
section 10 fiber -$coverY_C -$coverZ_C stressStrain
recorder Element -file StressStrain5_Node4_up_NoRocking.out -time -ele 5
section 10 fiber $coverY_C -$coverZ_C stressStrain
recorder Element -file StressStrain5_Node4_down_NoRocking.out -time -ele 5
section 10 fiber -$coverY_C -$coverZ_C stressStrain
#deformation: axial and strain curvature
recorder Element -file Deformation_el1_Node1_No_Rocking.out -time -ele 1
section 1 deformation
recorder Element -file Deformation_el2_Node2_No_Rocking.out -time -ele 2
section 1 deformation
recorder Element -file Deformation_el1_Node3_No_Rocking.out -time -ele 1
section 10 deformation
recorder Element -file Deformation_el2_Node4_No_Rocking.out -time -ele 2
section 10 deformation

#Define dead loads
#eleLoad -ele $eleTag1 <$eleTag2 ....> -type -beamUniform $Wy <$Wx>
pattern Plain 1 Linear {
eleLoad -ele 3 4 -type -beamUniform $Vertical_Uni_Load 0
}

#Analysis of dead loads
set Tol 1.0e-8
constraints Transformation
numberer RCM
system UmfPack
test EnergyIncr $Tol 400
algorithm Newton
set NstepGravity 10
set DGravity [expr 1.0/$NstepGravity]
integrator LoadControl $DGravity; #DGravity=the load factor increment E>
analysis Static
analyze $NstepGravity

puts "Dead load analysis complete"
loadConst -time 0.0; #is used after the gravity analysis is completed. This
command is also used to reset the time to zero so that the pushover starts
from time zero. The pushover analysis is performed using a displacement-
controlled static analysis. In this example, the structure was pushed to 10%
roof drift, or 32.4β. The roof node at Pier 1, node 13 in Figures 1 and 2

#Set up parameters
set IDctrlNode 14; # node where disp is read for
disp control
set IDctrlDOF 1; # degree of freedom read for
disp control (1 = x displacement)
set Dmax [expr 0.035*$H_cord]; # maximum displacement of pushover:
10% roof drift
set Dincr [expr 0.0001*$Dmax]; # displacement increment

#create load pattern for lateral pushover
pattern Plain 3 Linear {
# apply the load - command: load nodeID xForce yForce
load 3 0.5 0.0 0.0
load 4 0.5 0.0 0.0
}

```



```

#Push over analysis
  constraints Transformation; # how it
handles boundary conditions
  numberer RCM; # renumber dof's to
minimize band-width (optimization)
  system UmfPack; # how to store and
solve the system of equations in the analysis (large model: try UmfPack)
  test EnergyIncr 1.0e-8 4000; # tolerance, max iterations
  algorithm Newton; # use Newton's solution
algorithm: updates tangent stiffness at every iteration
  integrator DisplacementControl $IDctrlNode $IDctrlDOF $Dincr; #
use displacement-controlled analysis
  analysis Static; # define type of
analysis: static for pushover
  set Nsteps [expr int($Dmax/$Dincr)];# number of pushover analysis
steps

  ##set ok [analyze $Nsteps]; # this will return zero
if no convergence problems were encountered
  ###puts "Pushover complete"; # display this message
in the command window

set ierrors 0
set Dstep 0.0
set ok 0
while {$Dstep <= 1.0 && $ok == 0} {

set controlDisp [lindex [nodeDisp $IDctrlNode $IDctrlDOF] 0]
set Dstep [expr $controlDisp/$Dmax]
test EnergyIncr 1.0e-8 2000
algorithm Newton
integrator DisplacementControl $IDctrlNode $IDctrlDOF $Dincr
set ok [analyze 1]

if {$ok != 0} {
  incr ierrors; #increases by one
  set Nk 100
  set DincrReduced [expr $Dincr/$Nk];
  integrator DisplacementControl $IDctrlNode $IDctrlDOF $DincrReduced
  for {set ik 1} {$ik <=$Nk} {incr ik 1} {
    test EnergyIncr 1.0e-8 2000
    algorithm Newton
    set ok [analyze 1]

    if {$ok != 0} {
      puts "Decreasing Tolerance"
      test EnergyIncr 1.0e-5 20000
      algorithm Newton
      set ok [analyze 1]
    }
  }

  if {$ok != 0} {
    puts "Disp: $controlDisp, ModifiedNewton failed, Trying
NewtonWithLineSearch"
    test EnergyIncr 1.0e-6 100000
    algorithm NewtonLineSearch -tol 1.0e-6 -maxIter 50000
    set ok [analyze 1]
  }

  if {$ok != 0} {
    puts "Disp: $controlDisp, NewtonWithLineSearch failed, Trying
Broyden"
    test EnergyIncr 1.0e-6 100000
    algorithm BFGS
    set ok [analyze 1]
  }
}
}
}
}

```

```
}  
  
if {$ok != 0} {  
    puts "Not all steps completed. Only $Dstep out of 1 completed"  
}  
  
puts "Pushover complete"  
wipe
```

## Π2 Ανελαστικά ενισχυμένα πλαίσια παραμετροποιημένα ως προς το πλάτος του λικνιζόμενου τοιχείου.

```
# units: kN,m
#keep E (modulus of elasticity) constant

wipe

# Remove existing model
wipe

#global virables
set pi 3.1415926535897931

set Rocking_B 1.0; #longitude dimension of rocking element
set dB 0.5 ; #increasing step of rocking width

while {$Rocking_B<=2.5} {

# Remove existing model
wipe

#create the ModelBuilder object: number of dimensions, degrees of freedom
model basic -ndm 2 -ndf 3

#Define concrete features
set fc -30000.0; #concrete quality C
set E 30000000.0; #metro elastikotitas
#Define material's features
set fpc -30000.0; #concrete compressive strength at 28 days - C30

# STEEL
# Reinforcing steel
set fy_steel 500000.0; # Yield stress
set E_steel 200000000.0; # Young's modulus

#define geometry of elements
set h_C 0.35; #height of column
set b_C 0.35; #width of column
set h_B 0.5; #height of beam
set b_B 0.25; #width of beam
set Rocking_W 0.20; #thickness of rocking element
set A_Rigid 0.05
set I_Rigid 600.0

#define geometry of columns
set cover_C 0.025; #cover of columns
set numSubdiv_y_C 16; #number of fiber subdivisions of columns for longitude
dimension - y
set numSubdiv_z_C 16; #number of fiber subdivisions of columns for depth
dimension - z
set TotNumBars_C 4; #total number of bars of steel per column ---- MUST be
even number
set Diameter_Steel_C 0.020; #diameter of steel

#define geometry of beams
set cover_B 0.03; #cover of beams
set numSubdiv_y_B 16; #number of fiber subdivisions of beams for longitude
dimension - y
set numSubdiv_z_B 16; #number of fiber subdivisions of beams for depth
dimension - z
set TotNumBars_B 8; #total number of bars of steel per beam
set Diameter_Steel_B 0.020; #diameter of steel
```

```

#Define loads
set Vertical_Uni_Load_without_wall -30.76; #vertical uniform load
set Vertical_Uni_Load_with_wall -14.4; #vertical uniform load
#set Hor_Load -60.0; #horizOntio fortio

#define geometry, parametrize of end nodes
set H_cord 4.5; #height
set L_cord 5.0; # length
set B [expr $Rocking_B]; #lenth of rigid element

#calculations geometric
set A_C [expr $h_C*$b_C]; #area of column
set A_B [expr $h_B*$b_B]; #area of beam
set I_C [expr $b_C*pow($h_C,3.0)/12.0/2.0]; #Iz inertia monment of column,
reduction to 0.5*Iz
set I_B [expr $b_B*pow($h_B,3.0)/12.0/2.0]; #Iz inertia monment of beam,
reduction to 0.5*Iz

set Lmiddle [expr $L_cord/2.0]; #length of middle coordiate
set Hmiddle [expr ($H_cord-$h_B/2.0)/2.0]; #height of middle coordinate
set L_left [expr $Lmiddle-$B/2.0]; #lenght coordinate of the rigids members
set L_right [expr $Lmiddle+$B/2.0]; #lenght coordinate of the rigids members
set H_upper [expr $H_cord]; #height coordinate of the rigid members
set H_down [expr $H_cord-$h_B/2.0]; #height coordinate of the rigid members

set Rockingmass [expr $Rocking_B*$Rocking_W*$H_down*25.0]; #mass of rocking
element in KN

#Calculation for geometry of columns and beams
set LineNumBars_C [expr int($TotNumBars_C/2.0)]; #number of steel bars per
line. I suppose that only two sides will be reinforced
set Area_Steel_C [expr $pi*pow($Diameter_Steel_C,2.0)/4.0]; #area of each
steel bar
set LineNumBars_B [expr int($TotNumBars_B/2.0)]; #number of steel bars per
line. I suppose that only two sides will be reinforced
set Area_Steel_B [expr $pi*pow($Diameter_Steel_B,2.0)/4.0]; #area of each
steel bar

#set nodes, each coordiante is referred to their axis of centre of gravity o
each element
node 1 0 0
node 2 $L_cord 0
node 3 0 $H_cord
node 4 $L_cord $H_cord
node 5 $L_left $H_upper
node 7 $L_right $H_upper
node 14 $Lmiddle $H_cord

#boundary conditions
fix 1 1 1 1
fix 2 1 1 1

#DEFINE
ELEMENTS.....
.....
#uniaxialMaterial Steel02 $matTag $Fy $E $b(strain-hardening ratio - ratio
between post-yield tangent and initial elastic tangent) $R0 $cR1 $cR2 <$a1
$a2 $a3 $a4 $sigInit>
uniaxialMaterial Steel01 1 $fy_steel $E_steel 0.000001
#uniaxialMaterial Concrete01 $matTag $fpc(concrete compressive strength at
28 days) $epsc0(concrete strain at maximum strength) $fpcu(concrete crushing
strength) $epsU(concrete strain at crushing strength)
uniaxialMaterial Concrete01 2 $fpc -0.002 $fpc -0.1;

#Fiber Section Properties, for columns

set coverY_C [expr $h_C/2.0]

```

```

set coverZ_C [expr $b_C/2.0]
set coreY_C [expr $coverY_C-$cover_C]
set coreZ_C [expr $coverZ_C-$cover_C]

section fiberSec 1 {
#patch quad $matTag $numSubdiv_y_C $numSubdiv_z_C $yI $zI $yJ $zJ $yK $zK
$yL $zL ---- concrete simulation
patch quad 2 $numSubdiv_y_C $numSubdiv_z_C -$coverY_C $coverZ_C -$coverY_C
-$coverZ_C $coverY_C -$coverZ_C $coverY_C $coverZ_C
#layer straight $matTag $numFiber(number of fibers along line) $areaFiber
$yStart $zStart $yEnd $zEnd
layer straight 1 $LineNumBars_C $Area_Steel_C -$coreY_C $coreZ_C -$coreY_C -
$coreZ_C
layer straight 1 $LineNumBars_C $Area_Steel_C $coreY_C $coreZ_C $coreY_C -
$coreZ_C
}

#Fiber Section Properties, for beams

set coverY_B [expr $h_B/2.0]
set coverZ_B [expr $b_B/2.0]
set coreY_B [expr $coverY_B-$cover_B]
set coreZ_B [expr $coverZ_B-$cover_B]

#uniaxialMaterial Elastic 4 $E

#fiber section for beams
section fiberSec 2 {
patch quad 2 $numSubdiv_y_B $numSubdiv_z_B -$coverY_B $coverZ_B -$coverY_B -
$coreZ_B $coverY_B -$coverZ_B $coverY_B $coverZ_B
layer straight 1 $LineNumBars_B $Area_Steel_B -$coreY_B $coreZ_B -$coreY_B -
$coreZ_B
layer straight 1 $LineNumBars_B $Area_Steel_B $coreY_B $coreZ_B $coreY_B -
$coreZ_B
}

#Define geometric transformation (no orientation needed for 2D problem)
geomTransf PDelta 1; #column
geomTransf PDelta 2; #beam

#Define inelastic columns' and beams' elemets
#element nonlinearBeamColumn $eleTag $iNode $jNode $numIntgrPts(number of
integration points along the element) $sectionTag $transfTag

element nonlinearBeamColumn 1 1 3 10 1 1; #
element nonlinearBeamColumn 2 2 4 10 1 1; #
element elasticBeamColumn 3 3 5 $A_B $E $I_B 2
element elasticBeamColumn 4 5 14 $A_B $E $I_B 2
element elasticBeamColumn 5 7 4 $A_B $E $I_B 2
element elasticBeamColumn 12 14 7 $A_B $E $I_B 2

#calculations for recorders output
set ffc [expr int($fc/(-1000.0))]
#Define recorder files
recorder Node -file Node14_C$ffc,B$Rocking_B,m.out -time -node 14 -dof 1
disp
recorder Element -file ElementYield1_C$ffc,B$Rocking_B,m.out -time -ele 1
localForce; #MQN
recorder Element -file ElementYield2_C$ffc,B$Rocking_B,m.out -time -ele 2
localForce
recorder Element -file ElementYield3_C$ffc,B$Rocking_B,m.out -time -ele 3
localForce
recorder Element -file ElementYield5_C$ffc,B$Rocking_B,m.out -time -ele 5
localForce
#stress and strain of columns at base both of right and left side of the
Section

```

```

recorder Element -file StressStrain1_Node1_left_C$ffc,B$Rocking_B,m.out -
time -ele 1 section 1 fiber $coverY_C -$coverZ_C stressStrain
recorder Element -file StressStrain1_Node1_right_C$ffc,B$Rocking_B,m.out -
time -ele 1 section 1 fiber -$coverY_C -$coverZ_C stressStrain
recorder Element -file StressStrain2_Node2_left_C$ffc,B$Rocking_B,m.out -
time -ele 2 section 1 fiber $coverY_C -$coverZ_C stressStrain
recorder Element -file StressStrain2_Node2_right_C$ffc,B$Rocking_B,m.out -
time -ele 2 section 1 fiber -$coverY_C -$coverZ_C stressStrain
#stress and strain of columns at base both of right and left side of the
Section
recorder Element -file StressStrain1_Node3_left_C$ffc,B$Rocking_B,m.out -
time -ele 1 section 10 fiber $coverY_C -$coverZ_C stressStrain
recorder Element -file StressStrain1_Node3_right_C$ffc,B$Rocking_B,m.out -
time -ele 1 section 10 fiber -$coverY_C -$coverZ_C stressStrain
recorder Element -file StressStrain2_Node4_left_C$ffc,B$Rocking_B,m.out -
time -ele 2 section 10 fiber $coverY_C -$coverZ_C stressStrain
recorder Element -file StressStrain2_Node4_right_C$ffc,B$Rocking_B,m.out -
time -ele 2 section 10 fiber -$coverY_C -$coverZ_C stressStrain
#stress and strain of beams at both of right and left side of the Section
recorder Element -file StressStrain3_Node3_up_C$ffc,B$Rocking_B,m.out -time
-ele 3 section 1 fiber $coverY_C -$coverZ_C stressStrain
recorder Element -file StressStrain3_Node3_down_C$ffc,B$Rocking_B,m.out -
time -ele 3 section 1 fiber -$coverY_C -$coverZ_C stressStrain
recorder Element -file StressStrain5_Node7_up_C$ffc,B$Rocking_B,m.out -time
-ele 5 section 1 fiber $coverY_C -$coverZ_C stressStrain
recorder Element -file StressStrain5_Node7_down_C$ffc,B$Rocking_B,m.out -
time -ele 5 section 1 fiber -$coverY_C -$coverZ_C stressStrain

recorder Element -file StressStrain3_Node5_up_C$ffc,B$Rocking_B,m.out -time
-ele 3 section 10 fiber $coverY_C -$coverZ_C stressStrain
recorder Element -file StressStrain3_Node5_down_C$ffc,B$Rocking_B,m.out -
time -ele 3 section 10 fiber -$coverY_C -$coverZ_C stressStrain
recorder Element -file StressStrain5_Node4_up_C$ffc,B$Rocking_B,m.out -time
-ele 5 section 10 fiber $coverY_C -$coverZ_C stressStrain
recorder Element -file StressStrain5_Node4_down_C$ffc,B$Rocking_B,m.out -
time -ele 5 section 10 fiber -$coverY_C -$coverZ_C stressStrain
#deformation: axial and strain curvature
recorder Element -file Deformation_el1_Node1_C$ffc,B$Rocking_B,m.out -time -
ele 1 section 1 deformation
recorder Element -file Deformation_el2_Node2_C$ffc,B$Rocking_B,m.out -time -
ele 2 section 1 deformation
recorder Element -file Deformation_el1_Node3_C$ffc,B$Rocking_B,m.out -time -
ele 1 section 10 deformation
recorder Element -file Deformation_el2_Node4_C$ffc,B$Rocking_B,m.out -time -
ele 2 section 10 deformation

#Define dead loads
#eleLoad -ele $eleTag1 <$eleTag2 ....> -type -beamUniform $Wy <$Wx>
pattern Plain 1 Linear {
eleLoad -ele 3 4 12 5 -type -beamUniform $Vertical_Uni_Load_without_wall 0
}

#Analysis of dead loads
set Tol 1.0e-8
constraints Transformation
numberer RCM
system UmfPack
test EnergyIncr $Tol 400
algorithm Newton
set NstepGravity 10
set DGravity [expr 1.0/$NstepGravity]
integrator LoadControl $DGravity; #DGravity=the load factor increment E>
analysis Static
analyze $NstepGravity

puts "Dead load analysis complete"

```

loadConst -time 0.0; #is used after the gravity analysis is completed. This command is also used to reset the time to zero so that the pushover starts from time zero. The pushover analysis is performed using a displacement-controlled static analysis. In this example, the structure was pushed to 10% roof drift, or 32.4β. The roof node at Pier 1, node 13 in Figures 1 and 2

```

node 6 $L_left $H_down
node 8 $L_right $H_down
node 9 $Lmiddle $H_down
node 10 $Lmiddle $Hmiddle
node 11 $Lmiddle 0
node 12 $L_left $H_down
node 13 $L_right $H_down

fix 11 1 1 1

#define rigid elements
element elasticBeamColumn 6 5 6 $A_Rigid 30000000000.0 $I_Rigid 2
element elasticBeamColumn 7 12 9 $A_Rigid 30000000000.0 $I_Rigid 2
element elasticBeamColumn 8 7 8 $A_Rigid 30000000000.0 $I_Rigid 2
element elasticBeamColumn 9 13 9 $A_Rigid 30000000000.0 $I_Rigid 2

#Define Rocking element
#
eleTag,iNode,jNode,E,sy(E±0□E±E·O,,EHETIE@),B(OCE»E-O,,EQO,),W(OCE-O±EQO,),shea
rdef(E'EHE±O,,EO.OCE±O□E±EOEQO□O±O□OfEpEHO,1-E±E±EH0-EQO±EH)
element RockingBC2dYield 10 10 9 $E $fc $Rocking_B $Rocking_W 1
element RockingBC2dYield 11 10 11 $E $fc $Rocking_B $Rocking_W 1

#constrain master node (rNode) with slave node(cNode) - master node 6 with
slave node 12 and master node 8 with slave node 13
#equalDOF $rNodeTag $cNodeTag $dof1 $dof2 ...
equalDOF 6 12 1 2
equalDOF 8 13 1 2

#calculate reaction of the rocking element
recorder Node -file Reaction_Rocking_C$ffc,B$Rocking_B,m.out -time -node 11
-dof 1 2 3 reaction

#Define dead loads
#eleLoad -ele $eleTag1 <$eleTag2 ....> -type -beamUniform $Wy <$Wx>
pattern Plain 11 Linear {
eleLoad -ele 3 4 12 5 -type -beamUniform $Vertical_Uni_Load_with_wall 0
}

pattern Plain 22 Linear {
load 14 0 -$Rockingmass 0
}

#Analysis of dead loads
set Tol 1.0e-8
constraints Transformation
numberer RCM
system UmfPack
test EnergyIncr $Tol 400
algorithm Newton
set NstepGravity 10
set DGravity [expr 1.0/$NstepGravity]
integrator LoadControl $DGravity; #DGravity=the load factor increment E>
analysis Static
analyze $NstepGravity

puts "Dead load analysis complete"
loadConst -time 0.0; #is used after the gravity analysis is completed. This
command is also used to reset the time to zero so that the pushover starts
from time zero. The pushover analysis is performed using a displacement-

```

controlled static analysis. In this example, the structure was pushed to 10% roof drift, or 32.4β. The roof node at Pier 1, node 13 in Figures 1 and 2

```

#Set up parameters
set IDctrlNode 14; # node where disp is read for
disp control
set IDctrlDOF 1; # degree of freedom read for
disp control (1 = x displacement)
set Dmax [expr 0.035*$H_cord]; # maximum displacement of pushover:
10% roof drift
set Dincr [expr 0.0001*$Dmax]; # displacement increment

#create load pattern for lateral pushover
pattern Plain 3 Linear {
# apply the load - command: load nodeID xForce yForce
load 3 0.5 0.0 0.0
load 4 0.5 0.0 0.0
}

#Push over analysis
constraints Transformation; # how it
handles boundary conditions
numberer RCM; # renumber dof's to
minimize band-width (optimization)
system UmfPack; # how to store and
solve the system of equations in the analysis (large model: try UmfPack)
test EnergyIncr 1.0e-8 4000; # tolerance, max iterations
algorithm Newton; # use Newton's solution
algorithm: updates tangent stiffness at every iteration
integrator DisplacementControl $IDctrlNode $IDctrlDOF $Dincr; #
use displacement-controlled analysis
analysis Static; # define type of
analysis: static for pushover
set Nsteps [expr int($Dmax/$Dincr)];# number of pushover analysis
steps

##set ok [analyze $Nsteps]; # this will return zero
if no convergence problems were encountered
###puts "Pushover complete"; # display this message
in the command window

set ierrors 0
set Dstep 0.0
set ok 0
while {$Dstep <= 1.0 && $ok == 0} {

set controlDisp [lindex [nodeDisp $IDctrlNode $IDctrlDOF] 0]
set Dstep [expr $controlDisp/$Dmax]
test EnergyIncr 1.0e-8 2000
algorithm Newton
integrator DisplacementControl $IDctrlNode $IDctrlDOF $Dincr
set ok [analyze 1]

if {$ok != 0} {
incr ierrors; #increases by one
set Nk 100
set DincrReduced [expr $Dincr/$Nk];
integrator DisplacementControl $IDctrlNode $IDctrlDOF $DincrReduced
for {set ik 1} {$ik <=$Nk} {incr ik 1} {
test EnergyIncr 1.0e-8 2000
algorithm Newton
set ok [analyze 1]

if {$ok != 0} {
puts "Decreasing Tolerance"
test EnergyIncr 1.0e-5 20000
algorithm Newton
set ok [analyze 1]
}
}
}
}

```



```

}

    if {$ok != 0} {
        puts "Disp: $controlDisp, ModifiedNewton failed, Trying
NewtonWithLineSearch"
        test EnergyIncr 1.0e-6 100000
        algorithm NewtonLineSearch -tol 1.0e-6 -maxIter 50000
        set ok [analyze 1]
    }

    if {$ok != 0} {
        puts "Disp: $controlDisp, NewtonWithLineSearch failed, Trying
Broyden"
        test EnergyIncr 1.0e-6 100000
        algorithm BFGS
        set ok [analyze 1]
    }
}
}

if {$ok != 0} {
    puts "Not all steps completed. Only $Dstep out of 1 completed"
}

puts "Pushover complete"

set Rocking_B [expr $Rocking_B+$dB]
wipe
}

Wipe

```