



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

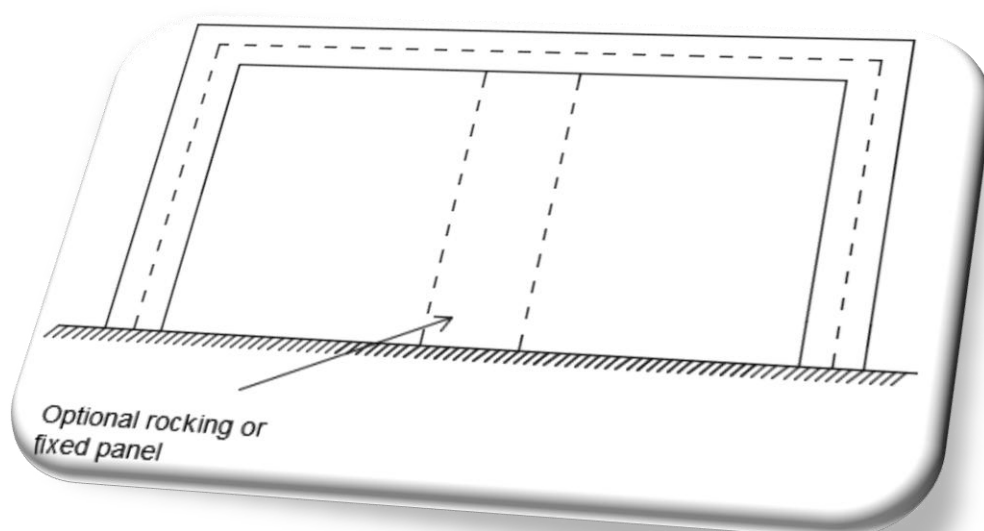
ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ  
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΥΠΙΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΑΠΟ Ω.Σ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ  
ΔΙΚΝΙΖΟΜΕΝΑ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΑ ΤΟΙΧΙΑ.

Συγγραφέας:

**ΖΑΝΤΗΣ ΧΡΙΣΤΟΣ**

Υπεύθυνος Καθηγητής:

**ΨΥΧΑΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ**



**Αθήνα, Ιούλιος 2016**





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ  
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΥΠΙΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΑΠΟ Ω.Σ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ  
ΔΙΚΝΙΖΟΜΕΝΑ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΑ ΤΟΙΧΙΑ.

Συγγραφέας:

**ΖΑΝΤΗΣ ΧΡΙΣΤΟΣ**

Υπεύθυνος Καθηγητής:

**ΨΥΧΑΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ**

**Αθήνα, Ιούλιος 2016**

Η έγκριση της διπλωματικής αυτής εργασίας από την Ανώτατη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει απαραίτητα και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα.

Σε περίπτωση που θέλετε να επικοινωνήσετε με τον συγγραφέα, για θέματα σχετικά με την εργασία, μπορείτε να απευθυνθείτε στη διεύθυνση ηλεκτρονικού ταχυδρομείου [christoszantis@hotmail.gr](mailto:christoszantis@hotmail.gr)

---

## Ευχαριστίες...

---

Θα ήθελα καταρχάς να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ι. Ψυχάρη. Η επιστημονική του καθοδήγηση σε συνδυασμό με τις ενδιαφέρουσες και εποικοδομητικές συζητήσεις που είχαμε ήταν καθοριστικοί παράγοντες για την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδακτορικό φοιτητή Ευάγγελο Αυγενάκη για την συνεχή βοήθεια και καθοδήγηση που μου έδινε καθ'όλη την διάρκεια της συγκεκριμένης εργασίας.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ θα ήθελα να το πω στην οικογένεια μου, που βρίσκεται πάντα δίπλα μου και με στηρίζει σε κάθε μου βήμα.

Με την εργασία αυτή ολοκληρώνεται η πενταετής μου φοίτηση στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Η περίοδος αυτή ήταν ένα πολύ όμορφο και συναρπαστικό ταξίδι προς τη γνώση.



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2016



---

## Εκτεταμένη Περίληψη.

---

Τα τελευταία χρόνια, έχει παρατηρηθεί ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον στην χρήση λικνιζόμενων μελών, έναντι των συμβατικών, για το σχεδιασμό αντισεισμικών κατασκευών. Τα λικνιζόμενα αυτά μέλη έχουν ευεργετικές ιδιότητες όσον αφορά την ανθεκτικότητα των κατασκευών. Αυτό συμβαίνει, καθώς αντί να αναπτύσσουν βλάβες και παραμένουσες παραμορφώσεις, έχουν την ικανότητα να επανέρχονται στην αρχική τους θέση χωρίς σημαντικές βλάβες, οδηγώντας έτσι, σε αυξημένη ασφάλεια της κατασκευής και μειωμένο κόστος επιδιόρθωσης προς αποκατάσταση της μετασεισμικής ζημιάς. Επιπρόσθετα, 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 έρευνα για τα λικνιζόμενα αυτά μέλη έχει προχωρήσει αρκετά τα τελευταία χρόνια, παρουσιάζοντας αρκετά πειραματικά αποτελέσματα και κανονισμούς για το σχεδιασμό των μελών αυτών. Παρόλαυτα υστερεί ακόμη ο τομέας της αριθμητικής πρόβλεψης που αφορά την συμπεριφορά των περιορισμένων λικνιζόμενων μελών σε κατασκευές.

Η απόκριση των λικνιζόμενων μελών που δέχονται περιορισμό οποιασδήποτε μορφής (όπως από πρόσθετα στοιχεία, προεντεταμένους τένοντες, περιβάλλοντα πλαίσια κλπ.) διαφέρει αρκετά σε σχέση με την απόκριση των ελεύθερων λικνιζόμενων σωμάτων. Η συγκεκριμένη μεταβολή στην απόκριση απορρέει από την μεταβολή της λικνιστικής συμπεριφοράς τους υπό την ανάπτυξη κατακόρυφων δυνάμεων στις διαφορές αυτές περιπτώσεις.

Βασικό εμπόδιο έως τώρα για την περαιτέρω μελέτη των σωμάτων αυτών σε πλαίσια και στην εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την ακριβή απόκριση τους αποτελούσε το γεγονός ότι, η επίδραση των δυνάμεων αυτών προκαλούσε παραμόρφωση στην βάση του σώματος, η οποία δεν μπορούσε να θεωρηθεί απαραμόρφωτη, αλλά έπρεπε η παραμορφωσιμότητα αυτή να λαμβανόταν υπόψη για την εξαγωγή ορθότερων συμπερασμάτων ως προς την λικνιστική συμπεριφορά. Μέχρι τώρα όμως, η παραμορφωσιμότητα της βάσης των λικνιζόμενων μελών αγνοούταν.

Η νέα αντιμετώπιση που προτείνεται από τον διδακτορικό φοιτητή Αυγενάκη<sup>1</sup>, λαμβάνει υπόψη πέραν της παραμορφωσιμότητας καθ' ύψος του μέλους και την παραμόρφωση της βάσης καθώς λικνίζεται, καθιστώντας έτσι δυνατή την

---

<sup>1</sup> Διπλωματική Εργασία (2015) : *Modeling of rocking flexible bodies considering the deformability of their base* - Evangelos Avgenakis.

περαιτέρω αριθμητική μελέτη των περιορισμένων λικνιζόμενων μελών σε πλαίσια, που αποτελεί σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

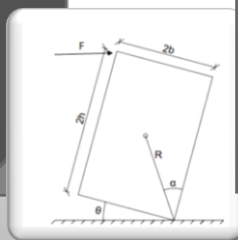
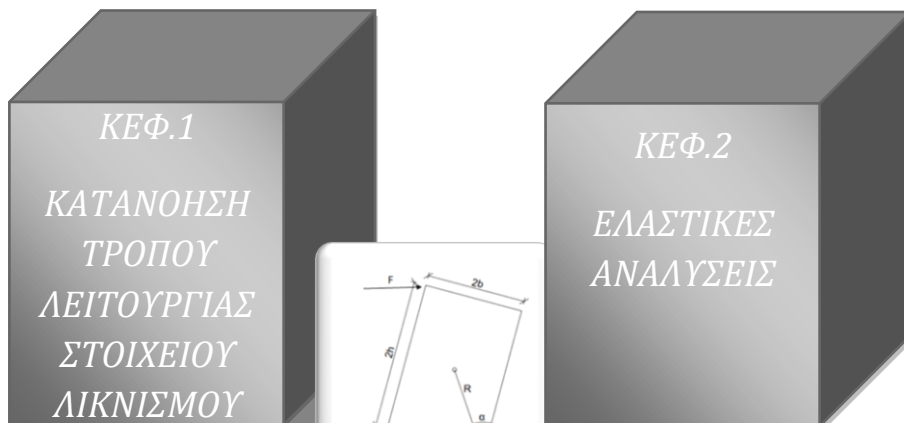
**Στο κεφάλαιο 1** παρουσιάζεται συνοπτικώς το υπάρχων θεωρητικό υπόβαθρο όσον αφορά το στοιχείο λικνισμού, γίνεται μια πρώτη αναγνώριση των σκοπών της παρούσης διπλωματικής και παρουσιάζονται κάποια πρώτα αποτελέσματα για να μπορέσει ο αναγνώστης να έρθει σε μια πρώτη επαφή με τον τρόπο λειτουργίας του στοιχείου λικνισμού και να είναι σε θέση για ευκολότερη κατανόηση των ερευνητικών αποτελεσμάτων της παρούσης. Γίνεται σαφής αναφορά στην νέα μεθοδολογία που χρησιμοποιείται και τον τρόπο λειτουργίας της, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων στο συγκεκριμένο τεύχος και προτάθηκε από τον Αυγενάκη.

**Στο κεφάλαιο 2**, μελετάται η απόκριση διαφόρων τύπων πλαισίων που αποτελούνται από ελαστικά στοιχεία. Συγκεκριμένα, προς ικανοποίηση των αναγκών του παρόντος κεφαλαίου γίνονται αναλύσεις για διαφορετικές περιπτώσεις πλαισίων όσον αφορά τους λόγους ύψους προς πλάτος στοιχείου λικνισμού ( $H_f/B$ ), πλάτος στοιχείου λικνισμού προς μήκος ανοίγματος ( $B/L_f$ ) για πλαίσια ενός, δύο και τριών ανοιγμάτων. Για τις περιπτώσεις αυτές υπολογίζονται και παρουσιάζονται οι καμπύλες ικανότητας των πλαισίων αυτών. Για όλες τις περιπτώσεις υπολογίζεται η στοχευμένη ικανότητα για συγκεκριμένο πάντα σεισμό σχεδιασμού. Τέλος, υπολογίζονται κατά μήκος των φορέων η αναπτυσσόμενη ένταση σε μια προσπάθεια κατανόησης του τρόπου απόκρισης των φορέων πριν και μετά την ενίσχυση με το στοιχείο λικνισμού καθώς και των γεωμετρικών παραγόντων που την επηρεάζουν.

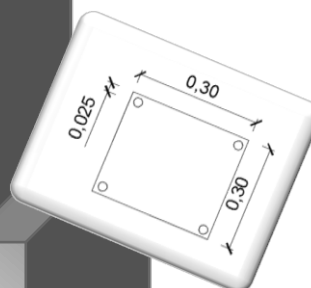
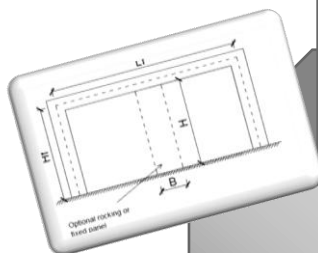
**Στο κεφάλαιο 3**, αποσκοπούμε σε μια αναλυτικότερη πλέον μελέτη της απόκρισης των πλαισίων, πριν και μετά την ενίσχυση, προς μια ορθότερη ποιοτική κατανόηση της αλληλεπίδρασης τους με το στοιχείο λικνισμού. Συγκεκριμένα, μελετώνται πλαίσια με ανελαστικά στοιχεία τα οποία ενισχύονται με το στοιχείο λικνισμού. Εξετάζονται δύο κύριες κατηγορίες πλαισίων, πλαίσια που προσομοιάζουν "νέα κτήρια" με μια αναπτυσσόμενη πλαστιμότητα του ελεύθερου πλαισίου για το σεισμό σχεδιασμού  $\mu=3.0$ , και πλαίσια που προσομοιάζουν "παλαιά κτήρια" με μια αναπτυσσόμενη πλαστιμότητα του ελεύθερου πλαισίου για το σεισμό σχεδιασμού  $\mu=6.0$ . Υπολογίζονται, λοιπόν, οι αποκρίσεις πλαισίων με διαφορετικά μήκη ανοίγματος,  $L_f$ , ενισχυμένα ή μη με στοιχεία λικνισμού στο κέντρο του διαφορετικών πλατών,  $B$ . Η μεταβολή στην απόκριση εξετάζεται μέσω της μεταβολής της γενικής αλλά και μεγίστου τοπικής πλαστιμότητας των πλαισίων. Επιπροσθέτως στο παρόν κεφάλαιο για την περίπτωση των νέων κατασκευών εξετάστηκε και η περίπτωση της προσθήκης του στοιχείου λικνισμού στο άκρο, η οποία παρουσιάζει ενδιαφέροντα αποτελέσματα για την "αποτύπωση" του τοπίου μελλοντικών αναλύσεων.

**Τέλος**, αφού παρουσιαστούν συνοπτικώς τα αποτελέσματα της παρούσης διπλωματικής εργασίας προτείνονται θέματα για περαιτέρω μελέτη.

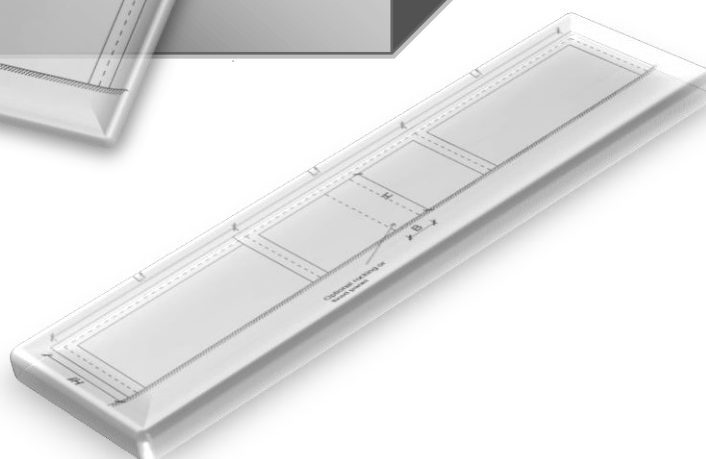
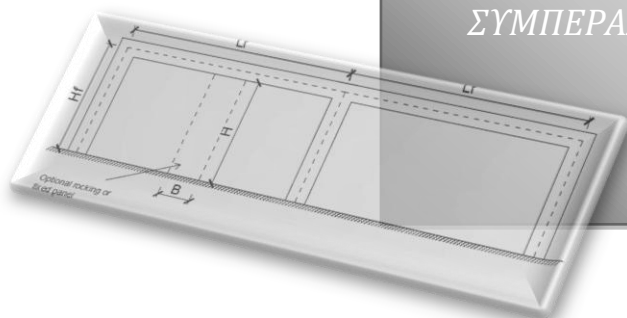




ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΕΣ  
ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ



ΚΕΦ. 4  
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ



---

Σημειώνεται ότι οι πιο πάνω εικόνες κινούνται στους ρυθμούς του λικνισμού και δεν αποτελούν λάθος μορφοποίησης του συγγραφέα!! Καλή Ανάγνωση!...

---

# Abstract

---

In recent years, the need for resilient structural systems has led to a renewed interest in the use of rocking members, instead of conventional ones, for the design of earthquake resistant structures. This happens, because instead of developing damage and residual deformations, rocking members have the ability to re-center without significant damage, leading to increased structural safety and lower repair costs after an earthquake. Furthermore, since rocking members attain their maximum strength when the rocking motion initiates, they can reduce the seismic forces acting on the structure similarly to yielding members.

The research for these members has advanced in recent years, showing several experimental results and regulations for the design of these members. Nevertheless, there is still a lag in the field of numerical prediction on the behavior of the limited rocking members in structures.

The response of the rocking members, receiving restrictions of any form (such as additional elements, prestressing tendons, surrounding frames etc.), is quite different compared to the response of the free bodies. This change in the response, is a result of the change, due to tilting behavior, in developing vertical forces.

Much of the research that has been presented until now has focused on the response of rigid rocking bodies, while only few studies consider the deformability of the rocking members. Even in the latter case, most approaches consider the bodies flexible along their height, but the contact area with the base mat is assumed rigid.

The new approach proposed by the PhD student Avgenakis, is able to take into account the deformability of the body along its height, as well as the deformation of its base during rocking.

In Chapter 1 we present briefly the existing theoretical background regarding rocking element, presenting the objectives of our study and some early results to enable the reader to come into first contact with the operating rocking element and be able for easier understanding of the later results. A clear reference to the new methodology used and the manner of operation, which was used to export the results in this issue and proposed by Avgenakis.

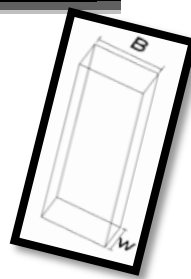
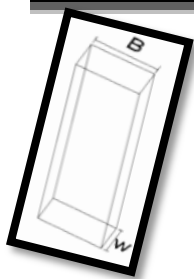
In Chapter 2, we study the response of different types of frames consisting of elastic elements. In particular, to meet the needs of this chapter different occasions of frames are analyzed regarding the ratio of height to width of the rocking element ( $H_f / B$ ) and the ratio of width to span length ( $B / L_f$ ) for one, two and three spans. For these cases we calculated and presented the capacity

curves of these frames. For all these cases targeted capacity is calculated for specific earthquake design. Finally, the intensity distribution is calculated along the frames in an attempt to understand how the response of frames is affected, before and after the amplification of the rocking element for various geometrical factors.

In Chapter 3, our aim is a more detailed study of the response of the frames before and after the reinforcement, to better qualitatively understand of the interaction with this element. Specifically, frames from elements with yielding material that are reinforced with rocking element are examined for two main categories, frames resembling "new buildings" with a growing ductility of free framework for the design earthquake  $\mu = 3.0$ , and under similar "old buildings" with a developing ductility of free framework for the design earthquake  $\mu = 6.0$ . Furthermore the frame responses with different span lengths,  $L_f$ , reinforced or not with rocking elements in the center of different widths,  $B$ , are calculated. The change in the response is examined by the general and maximum local ductility of the frames. In addition, as a part of this chapter, the case of reinforcement with the rocking element at the end of the frames is examined, which shows interesting results for future analyzes.

Finally, we present the overall results of this thesis and topics for further study are proposed.

# Περιεχόμενα.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1-ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
1.1 Γενική Περιγραφή.....	5
1.2 Τρόπος λειτουργίας του λικνιζόμενου μέλους.....	6
1.2.1 Περίληψη.....	6
1.2.2 Εισαγωγή.....	7
1.2.3 Στοιχείο λικνισμού που λαμβάνει υπόψη την παραμόρφωση βάσης.....	9
1.3 Απλές εφαρμογές χρήσης στοιχείου λικνισμού.....	12
1.3.1 Εισαγωγή.....	12
1.3.2 Λικνιστικό στοιχείο με σταθερή κατακόρυφη φόρτιση.....	13
1.3.3 Λικνιστικό στοιχείο με ενσωματωμένο προεντεταμένο τένοντα.....	16
1.3.4 Πλαίσιο ενός ανοίγματος με προσθήκη στοιχείου λικνισμού.....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ.....	23
2.1 Εισαγωγή.....	23
2.2 Προσομοίωση με το λογισμικό OpenSees.....	24
2.2.1 Εισαγωγή.....	24
2.2.2 Προσομοίωση ελαστικών πλαισίων ενισχυμένου σκυροδέματος.....	25
2.2.3 Παράμετροι Στατικών Ελαστικών Αναλύσεων.....	28
2.2.4 Εξαγωγή αποτελεσμάτων.....	31
2.3 Περιπτώσεις πλαισίων που μελετήθηκαν.....	34
2.4 Υπολογισμός καμπύλων Ικανότητας.....	35
2.4.1. Στατική Ανελαστική Ανάλυση Εξώθησης (Pushover Analysis).....	35
2.4.1.1 Οι βασικές έννοιες της στατικής ανελαστικής ανάλυσης εξώθησης.....	35
2.4.1.2 Αδυναμίες, περιορισμοί και δυνατότητες της στατικής ανελαστικής ανάλυσης εξώθησης.....	37
2.4.2 Καμπύλες ικανότητας πλαισίων που εξετάστηκαν.....	39

2.4.2.1 Καμπύλες ικανότητας πλαισίων ενός ανοίγματος. ....	40
2.4.2.2 Καμπύλες ικανότητας πλαισίων δύο ανοιγμάτων .....	41
2.4.2.3 Καμπύλες ικανότητας πλαισίων τριών ανοιγμάτων. ....	42
2.4.3 Συμπεράσματα .....	43
2.5 Υπολογισμός στοχευμένων μετακινήσεων. ....	44
2.5.1 Εισαγωγή.....	44
2.5.2 Γενική φιλοσοφία υπολογισμού.....	45
2.5.3 Στοχευμένες μετακινήσεις πλαισίων που εξετάστηκαν. ....	46
2.5.3.1 Στοχευμένες μετακινήσεις πλαισίων ενός ανοίγματος.....	48
2.5.3.2 Στοχευμένες μετακινήσεις πλαισίων δύο ανοιγμάτων.....	49
2.5.3.3 Στοχευμένες μετακινήσεις πλαισίων τριών ανοιγμάτων .....	50
2.5.4 Συμπεράσματα. ....	51
2.6 Εντατικά μεγέθη πλαισίων MQN.....	52
2.6.1 Εισαγωγή.....	52
2.6.2 Διαγράμματα MQN πλαισίων που εξετάστηκαν .....	53
2.6.2.1 Διαγράμματα Q υποστυλωμάτων. ....	53
2.6.2.2 Διαγράμματα M υποστυλωμάτων. ....	56
2.6.2.3 Διαγράμματα N υποστυλωμάτων. ....	59
2.6.2.4 Διαγράμματα Q δοκών.....	62
2.6.2.5 Διαγράμματα M+ δοκών. ....	65
2.6.2.6 Διαγράμματα M- δοκών. ....	68
2.6.3 Συμπεράσματα .....	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ.....	73
3.1 Εισαγωγή .....	73
3.2 Προσομοίωση με το λογισμικό OpenSees.....	75
3.2.1 Εισαγωγή.....	75
3.2.2 Προσομοίωση ανελαστικών πλαισίων ενισχυμένου σκυροδέματος.....	76
3.2.2.1 Υλικά.....	78
3.2.2.2 Διατομές .....	81
3.2.2.3 Στοιχεία Δοκού-Υποστηλώματος.....	82
3.2.3 Παραμέτροι Στατικών Ανελαστικών Αναλύσεων. ....	83
3.2.4 Εξαγωγή αποτελεσμάτων.....	85

3.3 Περιπτώσεις πλαισίων που μελετήθηκαν.....	88
3.3.1 Εισαγωγή.....	88
3.3.2 Όπλιση Πλαισίων .....	88
3.3.2.1 ATC-40 , με υπολογισμό απόσβεσης ελεύθερων πλαισίων.....	88
3.3.2.2 Διαδικασία όπλισης ελεύθερων πλαισίων.....	94
3.3.2.3 Αποτελέσματα.....	95
3.4 Υπολογισμός στοχευμένων μετακινήσεων. ....	95
3.4.1 Εισαγωγή.....	95
3.4.2 Παραλλαγή μεθόδου ATC-40 για ενισχυμένα πλαίσια .....	96
3.4.3 Στοχευμένες μετακινήσεις πλαισίων.....	97
3.4.3.1 Στοχευμένες μετακινήσεις πλαισίων με $\mu=3.0$ (νέα κατασκευή) .....	97
3.4.3.1 Στοχευμένες μετακινήσεις πλαισίων με $\mu=6.0$ (παλαιά κατασκευή).....	99
3.4.4 Συμπεράσματα .....	101
3.5 Υπολογισμός μέγιστων τοπικών πλαστιμοτήτων.....	102
3.5.1 Εισαγωγή.....	102
3.5.2 Απόκριση σημείου μέγιστης αναπτυσσόμενης τοπικής πλαστιμότητας για πλαίσια με $\mu=3.0$ (νέες κατασκευές) .....	103
3.5.3 Απόκριση σημείου μέγιστης αναπτυσσόμενης τοπικής πλαστιμότητας για πλαίσια με $\mu=6.0$ (παλαιές κατασκευές).....	107
3.5.3 Συμπεράσματα. ....	111
3.6 Καμπύλες ικανότητας και στοχευμένες μετακινήσεις για πλαίσιο με προσθήκη στοιχείου λικνισμού επί του άκρου.....	112
3.6.1 Εισαγωγή.....	112
3.6.2 Συνοπτικά συγκριτικά αποτελέσματα.....	113
3.6.3 Συμπεράσματα. ....	115
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ..	117
4.1 Συμπεράσματα.....	117
4.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα. ....	119
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α-ΚΩΔΙΚΕΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ .....	121
Α.1 Στοιχείο λικνισμού υπό σταθερή κατακόρυφη φόρτιση.....	122

A.2	Στοιχείο λικνισμού με προεντεταμένο τένοντα. ....	124
A.3	Πλαίσιο ελαστικής απόκρισης ενός ανοίγματος χωρίς προσθήκη στοιχείου λικνισμού.....	126
A.4	Πλαίσιο ελαστικής απόκρισης ενός ανοίγματος με προσθήκη στοιχείου λικνισμού στο μέσον.....	129
A.5	Πλαίσιο ανελαστικής απόκρισης ενός ανοίγματος χωρίς προσθήκη στοιχείου λικνισμού.....	132
A.6	Πλαίσιο ανελαστικής απόκρισης ενός ανοίγματος με προσθήκη στοιχείου λικνισμού στο μέσον.....	135
A.7	Πλαίσιο ανελαστικής απόκρισης ενός ανοίγματος με προσθήκη στοιχείου λικνισμού στην άκρη. ....	139
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β - ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ.....		
		145
B.1	Κατανομή έντασης ανά κόμβο σε πλαίσια ενός ανοίγματος για όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. ....	145
B.2	Κατανομή έντασης ανά κόμβο σε πλαίσια δύο ανοιγμάτων για όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. ....	147
B.3	Κατανομή έντασης ανά κόμβο σε πλαίσια τριών ανοιγμάτων για όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. ....	150

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1-ΕΙΣΑΓΩΓΗ.

## 1.1 Γενική Περιγραφή.

Η παρούσα μελέτη είναι μέρος των σπουδών στο αντικείμενο της Επιστήμης του Πολιτικού Μηχανικού και ταυτόχρονα αποτελεί Διπλωματική Εργασία.

Η εργασία εντάσσεται στο γενικό προβληματισμό σχετικά με τις δυνατότητες που έχει η προσθήκη σε υπάρχοντα αλλά και σε νέα κτήρια λικνιζόμενου μέλους ως προς την βελτίωση της αντισεισμικής τους συμπεριφοράς.

Η ανάγκη περαιτέρω μελέτης της απόκρισης λικνιζόμενων μελών γίνεται εντονότερη τα τελευταία χρόνια λόγω της συνεχούς αυξανόμενης απαίτησης για ολοένα και βελτιωμένη αντισεισμική απόκριση των νέων κατασκευών, αλλά και των ήδη υπαρχόντων. Είναι εξάλλου γεγονός ότι η πλειονότητα των υφιστάμενων κτιρίων σε λειτουργία, έχουν κατασκευαστεί με υλικά χαμηλότερης ποιότητας από τα διατιθέμενα σήμερα, έχουν μελετηθεί για χαμηλότερο σεισμικό συντελεστή και παράλληλα η τεχνογνωσία και οι κανονισμοί με τους οποίους υλοποιήθηκε η μελέτη τους, υπολείπονται των συγχρόνων που, εν τω μεταξύ, έχουν αναβαθμιστεί σημαντικά.

Προς ικανοποίηση των ανωτέρω απαιτήσεων, εξετάζεται η χρήση λικνιζόμενων μελών, έναντι των συμβατικών, για το σχεδιασμό αντισεισμικών κατασκευών. Τα λικνιζόμενα αυτά μέλη, έχουν ευεργετικές ιδιότητες όσον αφορά την ανθεκτικότητα των κατασκευών. Αυτό συμβαίνει, καθώς αντί να αναπτύσσουν βλάβες και παραμένουσες παραμορφώσεις, έχουν την ικανότητα να επανέρχονται στην αρχική τους θέση χωρίς σημαντικές βλάβες, οδηγώντας σε αυξημένη ασφάλεια της κατασκευής και μειωμένο κόστος επιδιόρθωσης προς αποκατάσταση της μετασεισμικής ζημιάς. Επιπρόσθετα, 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.

Για τις ανάγκες της παρούσης Διπλωματικής εργασίας μελετήθηκαν πλαίσια διαφορετικών χαρακτηριστικών με προσθήκη ή μη λικνιζόμενου μέλους. Πλαίσια που διαφέρουν ως προς το μήκος ανοίγματος, ως προς τον αριθμό ανοιγμάτων και ως προς το πλάτος του λικνιζόμενου μέλους που προστίθεται.



Επίσης οι αποκρίσεις αυτές μελετήθηκαν για ελαστικά θεωρούμενα πλαίσια καθώς και για ανελαστικά των οποίων η όπλιση έγινε με τρόπο που να προσομοιάζει περιπτώσεις παλαιών και νέων κατασκευών .

## **1.2 Τρόπος λειτουργίας του λικνιζόμενου μέλους.**

Η απόκριση των λικνιζόμενων μελών που δέχονται περιορισμό οποιασδήποτε μορφής (από πρόσθετα στοιχεία, προεντεταμένους τένοντες, περιβάλλοντα πλαίσια κτλ.) διαφέρει αρκετά σε σχέση με την απόκριση των ελεύθερων λικνιζόμενων σωμάτων. Η συγκεκριμένη μεταβολή στην απόκριση απορρέει από την μεταβολή της λικνιστικής συμπεριφοράς τους υπό την ανάπτυξη κατακόρυφων δυνάμεων στις διάφορες αυτές περιπτώσεις.

Βασικό εμπόδιο έως τώρα για την περαιτέρω μελέτη των σωμάτων αυτών σε πλαίσια και για την ορθότερη εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την ακριβή απόκριση τους αποτελούσε το γεγονός ότι, η επίδραση των δυνάμεων αυτών προκαλούσε παραμόρφωση στην βάση του σώματος, η οποία δεν μπορούσε να θεωρηθεί απαραμόρφωτη, αλλά έπρεπε η παραμορφωσιμότητα αυτή να λαμβανόταν υπόψη για την εξαγωγή ορθών συμπερασμάτων ως προς την λικνιστική συμπεριφορά. Μέχρι τώρα η παραμορφωσιμότητα της βάσης των λικνιζόμενων μελών αγνοούταν.

Η νέα αντιμετώπιση που προτείνεται από τον διδακτορικό φοιτητή Αυγενάκη, λαμβάνει υπόψη πέραν της παραμορφωσιμότητας καθ' ύψος του μέλους και την παραμόρφωση της βάσης καθώς λικνίζεται, καθιστώντας έτσι δυνατή την περαιτέρω αριθμητική μελέτη των περιορισμένων λικνιζόμενων μελών σε πλαίσια, που αποτελεί σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

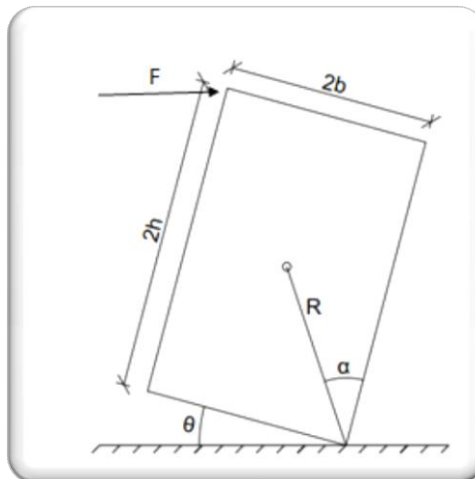
### **1.2.1 Περίληψη.**

Θα μπορούσε το λικνιζόμενο μέλος να αποτελέσει μια επαναστατική προσθήκη στην αντισεισμικότητα των κατασκευών; Όπως όλα δείχνουν από την μελέτη των τελευταίων χρόνων διαφαίνεται ότι κάτι τέτοιο θα ήταν εφικτό. Οι μελέτες όμως έως τώρα θεωρούσαν τα λικνιστικά μέλη ως άκαμπτα, ενώ ελάχιστες λάμβαναν υπόψη την παραμορφωσιμότητα, οι οποίες όμως θεωρούσαν εύκαμπτο το κορμό του μέλους και άκαμπτη την βάση. Μια νέα προσέγγιση από τον διδακτορικό φοιτητή Αυγενάκη έρχεται να προστεθεί πλέον σε ερευνητικό επίπεδο, όπου πλέον η παραμορφωσιμότητα λαμβάνεται υπόψη και στην βάση.

## 1.2.2 Εισαγωγή

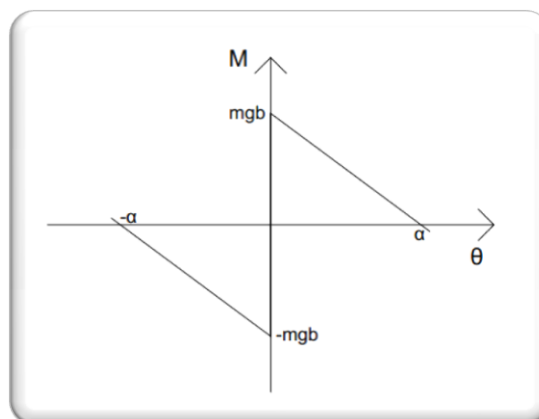
Η λικνιστική κίνηση στερεών σωμάτων και κατασκευαστικών μελών έχει αποσπάσει ένα μεγάλο μέρος του ενδιαφέροντος της επιστημονικής κοινότητας. Σε αντίθεση με τα συνήθη μέλη που εμφανίζονται στην κλασική μηχανική, τα οποία μπορούν να διαβιβάσουν εφελκυστικές πιέσεις μέσω της βάσης τους, μέλη όπως τα λικνιστικά που συνδέονται καθόλου ή έστω και μερικώς με την βάση τους μπορούν να αναπτύξουν μόνο συμπίεση, ενώ το ανασήκωμα τους μεταβάλλει σημαντικά την απόκριση τους.

Όταν μια επαρκώς μεγάλη οριζόντια δύναμη εφαρμοσθεί στο μέλος, η βάση του παύει να έχει πλήρη επαφή με το έδαφος και το σώμα αρχίζει να περιστρέφεται περί μια ακμή του (Εικόνα 1.1).



Εικόνα 1.1: Μοντέλο άκαμπτου λικνιστικού μέλους.

Εάν η μόνη κατακόρυφη δύναμη που ασκείται στο στοιχείο είναι το ίδιο βάρος του, και το σώμα μελετάται υπό την παραδοχή της ακαμψίας σώματος-βάσης, το λικνιστικό μέλος παρουσιάζει μια συμπεριφορά σταδιακής μειούμενης ακαμψίας. Αυτό συμβαίνει όταν η στροφή  $\theta$  ξεπεράσει την γωνία του στοιχείου  $\alpha$  (Διάγραμμα 1.1).

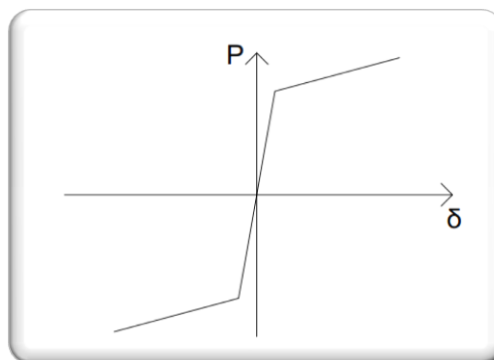


Διάγραμμα 1.1: Ροπή-στροφή άκαμπτου λικνιστικού μέλους.

Η συμπερίληψη επομένως, ενός λικνιστικού μέλους σε πραγματικές κατασκευές φαίνεται να αποτελεί μια ακούρυντως υποσχόμενη λύση για τον σχεδιασμό αντισεισμικών κατασκευών. Τα συμβατικά κατασκευαστικά στοιχεία είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε σταδιακά να δώσουν και να αναπτύξουν φθορές κατά την διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος και να εμφανίσουν ταυτόχρονα παραμένουσες παραμορφώσεις. Μια τέτοια προσέγγιση, η οποία ευρέως χρησιμοποιείται σήμερα ως σχεδιαστική λογική κατασκευών, αναπόφευκτα οδηγεί πολλές φορές σε κοστοβόρες αλλά και χρονοβόρες επισκευές στις κατασκευές. Σε αντίθεση, η απόκριση του λικνιστικού μέλους είναι παρόμοια με μέλη που διαρρέουν, ικανή να περιορίσει τις δυνάμεις που μεταβιβάζονται στην κατασκευή κατά την διάρκεια του σεισμού, χωρίς να αναπτυχθούν σημαντικές φθορές, ενώ ταυτόχρονα οι απομένουσες παραμορφώσεις είναι στην ουσία ανύπαρκτες. Έτσι, χρειάζονται αρκετά λιγότερες επιδιορθώσεις στην κατασκευή μετά από ένα σεισμικό γεγονός, σε σχέση πάντα με τις συμβατικές κατασκευές.

Μέχρι σήμερα, στοιχεία που δέχονται λικνισμό έχουν χρησιμοποιηθεί σε βάσεις γεφυρών (π.χ. στη σιδηροδρομική γέφυρα Rangitikei) καθώς και σε προκατασκευασμένες κατασκευές υπό πειραματική μορφή. Είναι γεγονός πως κάποιες γενικές οδηγίες ως προς την χρήση αυτού του εναλλακτικού τρόπου αντισεισμικού σχεδιασμού έχουν ήδη δημοσιευτεί από κάποιους οργανισμούς, ενώ παράλληλα ο Ευρωκώδικας 8 κάνει αναφορά στην λικνιστική απόκριση, αφού η εμφάνιση λικνισμού αναμένεται σε μεγάλα ελαφρώς οπλισμένα τοιχεία κατά την διάρκεια ισχυρών σεισμών.

Τα κατασκευαστικά μέλη που πρόκειται να εμφανίσουν λικνισμό, πολλές φορές, ενισχύονται από επιπρόσθετους χαλύβδινους προεντεταμένους τένοντες, εισάγοντας έτσι μια επιπρόσθετη θλιπτική δύναμη στο λικνιστικό μέλος. Όπως θα δούμε και σε κάποια παραδείγματα αναλύσεων αργότερα, αυτή η επιπρόσθετη δύναμη οδηγεί στην περαιτέρω "αδρανοποίηση" του λικνιστικού στοιχείου, κάνοντας το περισσότερο σταθερό και εμποδίζοντας την περιστροφή επί της ακμής του. Μια τυπική σχέση δύναμης-μετατόπισης ενός τέτοιου ενισχυμένου λικνιστικού μέλους φαίνεται στο Διάγραμμα 1.2.



**Διάγραμμα 1.2:** Απόκριση Δύναμης-Μετατόπισης λικνιστικού στοιχείου με προεντεταμένους τένοντες υπό την επίδραση οριζόντιου φορτίου.

Σε διεθνές ερευνητικό επίπεδο, παρόλο που υπάρχουν πολλές αναλυτικές λύσεις σχετικά τον σχεδιασμό ελεγχόμενων λικνιστικών συστημάτων, πολύ λίγα μοντέλα υπάρχουν τα οποία λαμβάνουν υπόψη τους την παραμόρφωση των λικνιστικών σωμάτων. Δυστυχώς, όμως, ακόμη και τα τελευταία δεν λαμβάνουν υπόψη τους την παραμόρφωση στην επιφάνεια επαφής του σώματος με το εκάστοτε έδαφος παρά μόνο την παραμορφωσιμότητα καθ' ύψος θεωρώντας άκαμπτα τα άκρα που αλληλεπιδρούν με εξωτερικά στοιχεία λόγω διεπαφής. Ως αποτέλεσμα αυτού, επί της ουσίας, το λικνιστικό στοιχείο τείνει να περιστραφεί περί ενός εκ των άκρων του, κάτι το οποίο βέβαια, είναι σε κάποιο βαθμό ανακριβές. Η καινοτομία λοιπόν, της μεθόδου που προτείνεται από τον διδακτορικό φοιτητή Αυγενάκη και χρησιμοποιείται σε αυτή την διπλωματική, αποτελεί το γεγονός πως λαμβάνονται υπόψη τόσο η παραμορφωσιμότητα καθ' ύψος αλλά και της βάσης. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο έγινε μια παραμετρική εξερεύνηση η οποία μελέτησε μερικές παραμέτρους σχετικά με την αντοχή τυπικών κατασκευών που συμπεριλάμβαναν το λικνιστικό αυτό στοιχείο και έφεραν οριζόντιο φορτίο, αντιστοίχως με φορτίο που προσομοιάζει ένα σεισμικό γεγονός επί των κατασκευών.

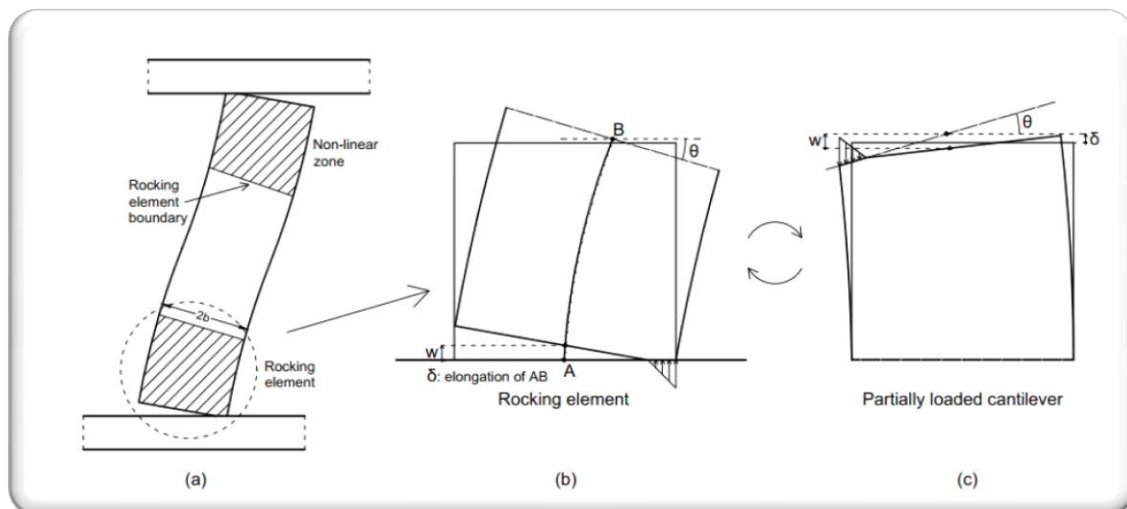
Η συγκεκριμένη ανάλυση πραγματοποιήθηκε για σταδιακώς αυξανόμενο οριζόντιο φορτίο ( ανάλυση push-over) για τρεις χαρακτηριστικές περιπτώσεις: α) ένα λικνιστικό στοιχείο με σταθερή κατακόρυφη φόρτιση, β) ένα λικνιστικό στοιχείο με προεντεταμένο τένοντα και γ) ένα πλαίσιο ενός ανοίγματος που συμπεριλάμβανε ένα στοιχείο λικνισμού. Αξίζει εδώ να σημειωθεί, ότι οι αντίστοιχες αναλύσεις έγιναν και ως μέρος της παρούσης διπλωματικής για έλεγχο ορθότητας του κώδικα που χρησιμοποιήθηκε στο OpenSees, για εξακρίβωση των προηγούμενων αποτελεσμάτων προηγούμενων ερευνών καθώς και για καλύτερη κατανόηση του λικνιστικού αυτού στοιχείου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όντως, καθώς αναμενόταν, η εισαγωγή του σώματος του στοιχείου λικνισμού επηρεάζει την απόκριση των κατασκευών. Για παράδειγμα, στο απλό πλαίσιο ενός ανοίγματος, η εισαγωγή του στοιχείου λικνισμού βελτίωσε σημαντικά την αντοχή του.

### 1.2.3 Στοιχείο λικνισμού που λαμβάνει υπόψη την παραμόρφωση βάσης.

Όπως έχουμε προαναφέρει οι αναλύσεις στην παρούσα διπλωματική, γίνονται με χρήση ενός στοιχείου το οποίο προτάθηκε από τον Αυγενάκη. Ένα στοιχείο που λαμβάνει υπόψη του όχι μόνο την παραμορφωσιμότητα καθ' ύψος, αλλά και της βάσης. Στο παρόν υποκεφάλαιο θα δοθεί μια συνοπτική εξήγηση του πως δουλεύει αυτό το στοιχείο και πως έγινε η προσομοίωση του. Το μακρό-στοιχείο (macro-element), αυτό, μοντελοποιεί την κατανομή των τάσεων που επιδρούν στην διεπιφάνεια του στοιχείου με κάποιο εξωτερικό στοιχείο έτσι ώστε να προσδίδει την ορθή μη γραμμική απόκριση του. Μέσω, λοιπόν, αυτής της

προσέγγισης και σε συνδυασμό με την παραμορφωσιμότητα καθ' ύψος του στοιχείου, η παραμορφωσιμότητα της πλευράς μπορεί να ληφθεί υπόψη, κάτι το οποίο είναι σίγουρα αναγκαίο για την ορθότερη εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την απόκριση ενός τέτοιου στοιχείου λικνισμού ως μονάδα αλλά και ως μέρος μιας κατασκευής. Αυτό το μακρό-στοιχείο χρησιμοποιείται στις πλευρές του στοιχείου λικνισμού οι οποίες βρίσκονται σε επαφή με εξωτερικά στοιχεία, όπου αναμένεται η ανάπτυξη μιας μη-γραμμικής αναπτυσσόμενης κατανομής τάσεων. Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την πλήρη ανάπτυξη αυτού του μακρό-στοιχείου, καλό θα ήταν ο αναγνώστης να ανατρέξει στην διπλωματική εργασία του Αυγενάκη, η οποία προσαρτάται ως εξωτερικός σύνδεσμος στη βιβλιογραφία της παρούσης διπλωματικής.

Την γενική λοιπόν ιδέα, κάτω από αυτή την προτεινόμενη προσέγγιση, αποτελεί η θεώρηση του προβλήματος του λικνιζόμενου μέλους, το οποίο αναπτύσσει συμπιεστικές τάσεις μόνο κατά μήκος της διεπιφάνειας του στοιχείου με εξωτερικά στοιχεία (Εικόνα 1.2b) ως πρόβλημα ενός ισοδύναμου προβόλου, ο οποίος φορτίζεται μερικώς στην ελεύθερη επιφάνεια του με την ίδια κατανομή τάσεων (Εικόνα 1.2c).



Εικόνα 1.2: Στοιχείο λικνισμού και αναλογία μερικώς φορτιζόμενου προβόλου.

Η απόκριση εξετάζεται σε ένα σύστημα συντεταγμένων χωρίς οποιεσδήποτε λειτουργίες άκαμπτου σώματος, αλλά πιο συγκεκριμένα αποτελεί ένα απλά στηριζόμενο σύστημα συντεταγμένων δοκού, το οποίο προτάθηκε από τους Neuenhofer and Filippou<sup>3</sup>. Η απόκριση αυτή, στην ουσία διέπεται από τρεις δυνάμεις και τρεις σχετικές μετατοπίσεις.

<sup>3</sup> A. Neuenhofer and F. C. Filippou, "Geometrically nonlinear flexibility-based frame finite element," *Journal of Structural Engineering*, 1998.

Δίνοντας ένα σύνολο από δυνάμεις οι οποίες δρουν στους κόμβους του στοιχείου, οι τρεις σχετικές μετατοπίσεις μπορούν εύκολα να υπολογιστούν βάση της καμπτικής θεωρίας. Παρόλα αυτά εφόσον οι δυνάμεις αυτές δεν επιδρούν σε ολόκληρο το τμήμα του μέλους (Εικόνες 1.2b, 1.2c), είναι αναγκαίο, προς ικανοποίηση της ορθότητας, να θεωρηθούν στη διεπιφάνεια του στοιχείου λικνισμού, επιπρόσθετες κατανομές τάσεων "αυτοεξισορρόπησης", έτσι ώστε το μοντέλο να αποδίδει την ορθή κατανομή τάσεων.

Η επίδραση αυτών των τάσεων "αυτοεξισορρόπησης" μπορεί να καθοριστεί χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο προβόλου, ή αρκετά απλούστερα, χρησιμοποιώντας ένα πρόβλημα ημι-άπειρης λωρίδας, έως ότου οι τάσεις αυτές να αποδυναμωθούν κατά μήκος της λωρίδας. Η μη γραμμική κατανομή τάσεων μπορεί εύκολα να υπολογιστεί με την μέθοδο των F. Gaydon and W. Shepherd<sup>4</sup>.

Χρησιμοποιώντας, εν συνεχεία, την μη γραμμική κατανομή των τάσεων, η επιμήκυνση των ινών κατά μήκος της επιφάνειας του στοιχείου μπορεί να διευκρινιστεί. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.2b, η κατανομή της επιμήκυνσης στην υπό φόρτιση και αφόρτιστη περιοχή διαφέρουν εξαιτίας της παραμόρφωσης της επιφάνειας επαφής. Λαμβάνοντας υπόψη την κατανομή αυτή λόγω της επιμήκυνσης της φορτιζόμενης περιοχής, μια επιπρόσθετη αξονική επιμήκυνση και στροφή δύναται να υπολογιστούν, οι οποίες συμπεριλαμβάνουν την επίδραση του κενού μεταξύ της βάσης του στοιχείου λικνισμού και του εξωτερικού στοιχείου με το οποίο βρίσκεται σε επαφή. Αυτές οι μετατοπίσεις ακολούθως μπορούν να προστεθούν σε αυτές που αρχικώς υπολογίστηκαν σύμφωνα με την τεχνική θεωρία, ούτως ώστε να εξαχθούν οι ορθές τελικές σχετικές μετατοπίσεις, οι οποίες θα συμπεριλαμβάνουν και την επίδραση της απόκρισης εξαιτίας του λικνισμού.

Δεδομένου ότι τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων συνήθως απαιτούν εσωτερικές δυνάμεις στοιχείου για δεδομένα και μετατοπίσεις, μια επαναληπτική διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί έως ότου επιτευχθεί η επιθυμητή σύγκλιση.

Εν κατακλείδι, το προτεινόμενο μακρό-στοιχείο μετά από αναλύσεις που διεξήχθησαν έδωσε αποτελέσματα αρκετά παρόμοια με αυτά που προέκυψαν από μια αυστηρή ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από διάφορα συστήματα με αυτό που προέκυψε από το πρόγραμμα ABAQUS, έδωσαν μίαν πέραν της αρκούντως ικανοποιητικής σύγκλισης. Επιπροσθέτως, η νέα αυτή προτεινόμενη μέθοδος πραγματοποιεί αναλύσεις σε εξαιρετικά χαμηλό χρόνο εν σχέση με ένα συμβατικό κώδικα

---

<sup>4</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.

πεπερασμένων στοιχείων και σε κάποιες περιπτώσεις παρουσίασε αρκετά λιγότερα προβλήματα σύγκλισης. Έτσι, η χρήση του συγκεκριμένου στοιχείου στις αναλύσεις της παρούσης διπλωματικής, κρίθηκε η καταλληλότερη και απεδείχθη απαραίτητη, από άποψης χρόνου, ακρίβειας και ορθότητας των αποτελεσμάτων.

Για περαιτέρω λεπτομέρειες σχετικά με την λειτουργία αυτού του μακρό-στοιχείου καλό είναι να ανατρέξετε στην διπλωματική εργασία του Αυγενάκη, εξωτερικός σύνδεσμος της οποίας υπάρχει στην Βιβλιογραφία της παρούσης.

## 1.3 Απλές εφαρμογές χρήσης στοιχείου λικνισμού.

### 1.3.1 Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική έγινε στο πρόγραμμα OpenSees, ένα λογισμικό του πανεπιστημίου Berkeley. Το OpenSees είναι ένα πρόγραμμα εξαιρετικών δυνατοτήτων, καθαρής κωδικοποίησης χωρίς γραφικό περιβάλλον. Έτσι, ως έναρξη της παρούσης διπλωματικής έγιναν κάποιες αρχικές κωδικοποιήσεις, οι οποίες αν και είχαν επαναληφθεί σε άλλα προγράμματα από τον Αυγενάκη για λόγους ελέγχου καλής λειτουργίας του κώδικα στο OpenSees, επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων και καλύτερης κατανόησης του λικνιζόμενου στοιχείου, έγιναν ξανά για τις ανάγκες της παρούσης και παρουσιάζονται στην συνέχεια. Επίσης, όπως έχει τονιστεί ξανά, ένας εκ των σκοπών της παρούσης διπλωματικής είναι η βοήθεια στην συνέχεια της έρευνας από επόμενους ερευνητές, για αυτό τον λόγο οι κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν για τις απλές αυτές εφαρμογές επισυνάπτονται στο παράρτημα Α.

Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για σταδιακώς αυξανόμενο οριζόντιο φορτίο (ανάλυση push-over) για τρεις χαρακτηριστικές περιπτώσεις: ένα λικνιστικό στοιχείο με σταθερή κατακόρυφη φόρτιση<sup>5</sup>, ένα λικνιστικό στοιχείο με προεντεταμένο τένοντα<sup>6</sup> και ένα πλαίσιο ενός ανοίγματος που συμπεριλάμβανε ένα στοιχείο λικνισμού<sup>7</sup>.

---

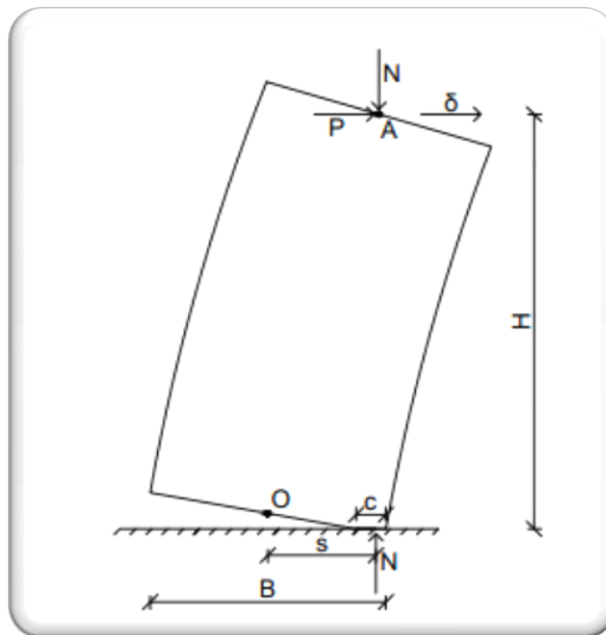
<sup>5</sup> Ο κώδικας στο OpenSees παρουσιάζεται στο παράρτημα Α.1.

<sup>6</sup> Ο κώδικας στο OpenSees παρουσιάζεται στο παράρτημα Α.2.

<sup>7</sup> Ο κώδικας στο OpenSees παρουσιάζεται στο παράρτημα Α.3.

### 1.3.2 Λικνιστικό στοιχείο με σταθερή κατακόρυφη φόρτιση

Στην συγκεκριμένη περίπτωση εξετάζεται ένα στοιχείο λικνισμού στο οποίο εφαρμόζεται σταθερή κατακόρυφη δύναμη (Εικόνα 1.3). Το στοιχείο αυτό έχει ύψος  $H$ , πλάτος  $B$  και πάχος  $W$ , καθώς μία κατακόρυφη δύναμη  $N$  εφαρμόζεται στο μέσο της κορυφής του. Το σώμα θεωρείται παραμορφώσιμο με μέτρο ελαστικότητας  $E$ . Η επίδραση του λόγου του Poisson δεν συνυπολογίζεται, καθώς θεωρείται ασήμαντη. Η βάση στην οποία εδράζεται το στοιχείο θεωρείται άκαμπτη, και έτσι, οποιαδήποτε παραμόρφωση συμβαίνει μόνο στο στοιχείο λικνισμού.



Εικόνα 1.3: Στοιχείο λικνισμού με σταθερή κατακόρυφη δύναμη.

Η απόκριση του στοιχείου αυτού, κατά την εφαρμογή ενός οριζόντιου φορτίου  $P$  επί του σημείου  $A$  η οποία προκαλεί οριζόντια μετατόπιση  $\delta$ , εξετάζεται για σταδιακώς αυξανόμενο μέγεθος. Θεωρώντας, ισορροπία ροπών περί το σημείο  $O$  και κάνοντας την εύλογη παραδοχή πως η μεταβολή της απόστασης του σημείου  $A$  (σημείο επιβολής δύναμης  $P$ ) και του σημείου  $O$  είναι αμελητέα σε σχέση με το ύψος  $H$ , λαμβάνουμε την εξής σχέση:

$$P \cdot H = N \cdot (s - \delta) \quad (1.1)$$

στην οποία το  $s$  συμβολίζει την απόσταση από το σημείο εφαρμογής της προκύπτουσας κατακόρυφης δύναμης  $N^8$  στο σημείο επαφής με την βάση του στοιχείου λικνισμού από το κέντρο του  $O$ . Σύμφωνα με την υπάρχουσα θεωρία,

<sup>8</sup> Η δύναμη αυτή αποτελεί αποτέλεσμα δράσης αντίδρασης του στοιχείου με την βάση του, εξαιτίας της εφαρμοζόμενης δύναμης επί του σημείου  $A$ .



αν το  $\delta \leq B/6$ , δεν παρατηρείται οποιοδήποτε ανασήκωμα, κάτι το οποίο συμβαίνει σε αντίθετη περίπτωση, όπου εμφανίζεται ανασήκωμα. Σε αυτή την περίπτωση το μήκος της επιφάνειας επαφής του στοιχείου λικνισμού με την εξωτερική βάση δίνεται από την σχέση:

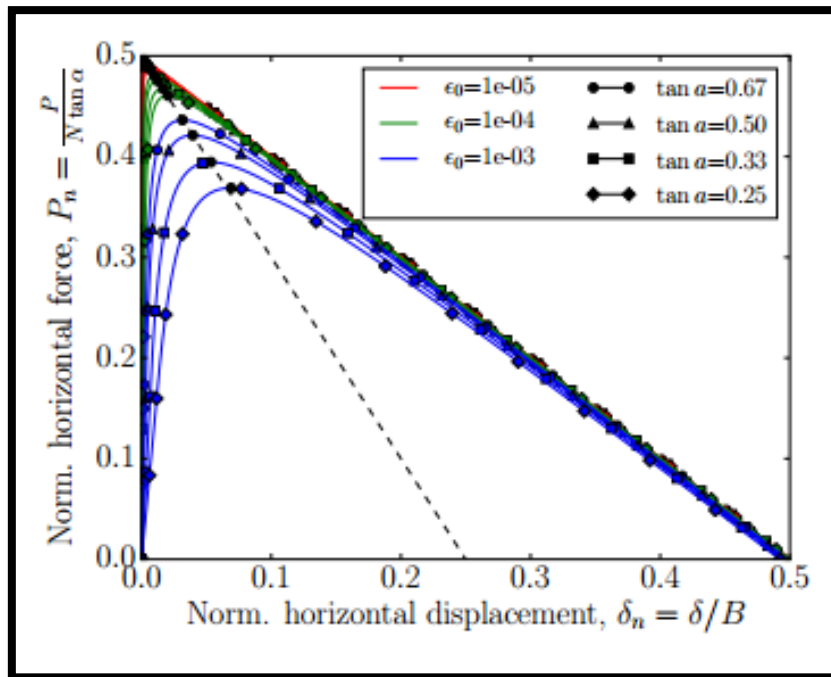
$$c = \left(\frac{B}{2} - s\right). \quad (1.2)$$

Στην εξαιρετική περίπτωση, όπου το στοιχείο λικνισμού λαμβάνεται και προσομοιάζεται ως απαραμόρφωτο, το ανασήκωμα του στοιχείου ξεκινά όταν:

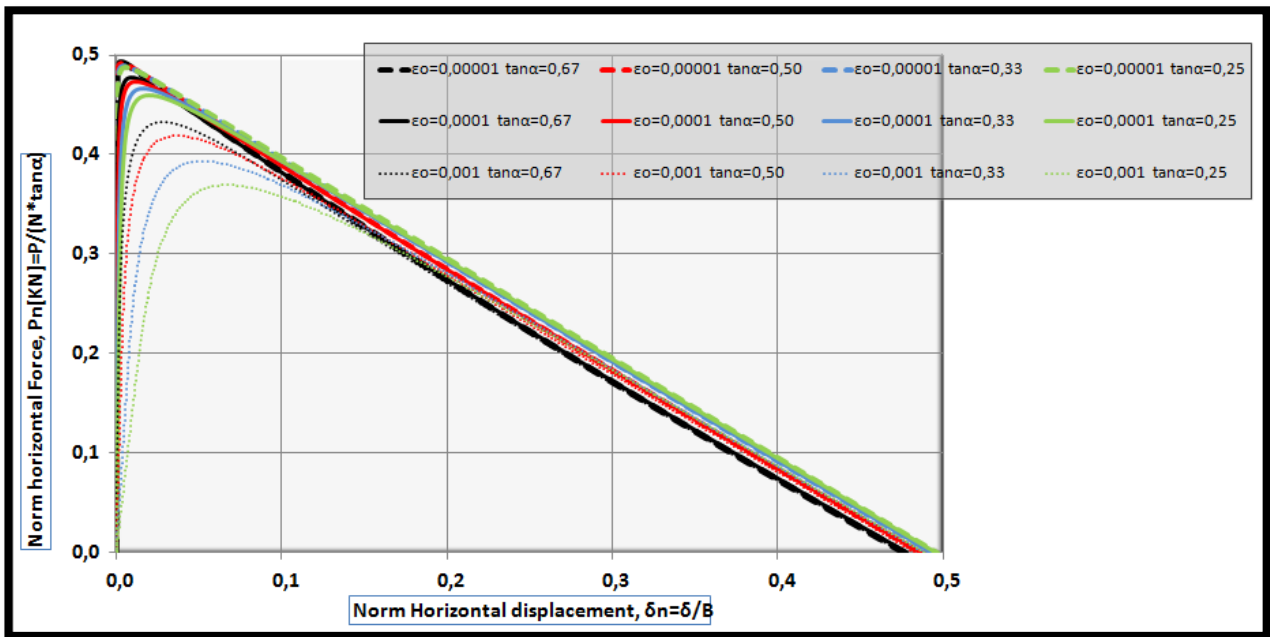
$$P \cdot H = N \cdot B/2 \quad (1.3)$$

και το  $s$  φτάνει την μέγιστη τιμή του ίση με  $s = B/2$ .

Όπως προαναφέρθηκε, οι αναλύσεις για την συγκεκριμένη περίπτωση αν και είχαν γίνει ως μέρος της έρευνας του Αυγενάκη, πραγματοποιήθηκαν ξανά για λόγους επιβεβαίωσης ορθότητας των αποτελεσμάτων που πηγάζουν από την κωδικοποίηση που χρησιμοποιήθηκε και ταυτόχρονα για λόγους κατανόησης του τρόπου λειτουργίας του λικνιστικού στοιχείου. Έτσι παρουσιάζονται στην συνέχεια (Διάγραμμα 1.3), τα αποτελέσματα που προέκυψαν ως μέρος της διπλωματικής του Αυγενάκη, καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν ως μέρος της παρούσης (Διάγραμμα 1.4).



Διάγραμμα 1.3: Απόκριση οριζόντιας δύναμης-μετατόπισης στοιχείου λικνισμού (Αυγενάκης).

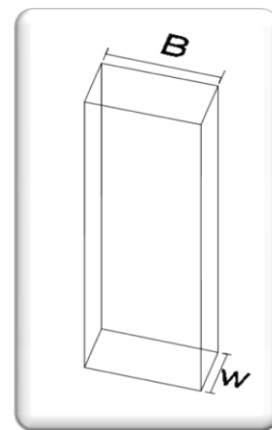


Διάγραμμα 1.4: Απόκριση οριζόντιας δύναμης-μετατόπισης στοιχείου λικνισμού (Ζαντής).

Η απόκριση του στοιχείου για την εξαγωγή των υπολογισμών θεωρήθηκε ότι διέπεται από δύο κανονικοποιημένες ποσότητες:

- $tana = \frac{B}{H}$
- $\epsilon_0 = \frac{N}{B \cdot W \cdot E}$

Η πρώτη εκφράζει την επίδραση της λεπτότητας του σώματος και η δεύτερη ανταποκρίνεται στην αρχική αξονική παραμόρφωση του σώματος εξαιτίας της κατακόρυφης δύναμης και υπολογίζεται από την ευκαμψία του σώματος και το μέγεθος της κατακόρυφης δύναμης.



Επίσης, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται κανονικοποιημένα ως ακολούθως:

- Η οριζόντια δύναμη κανονικοποιείται ως προς την ποσότητα  $N \cdot tana$  :  

$$Pn = \frac{P}{N \cdot tana}$$
- Η οριζόντια μετακίνηση κορυφής κανονικοποιείται ως προς το πλάτος B:  

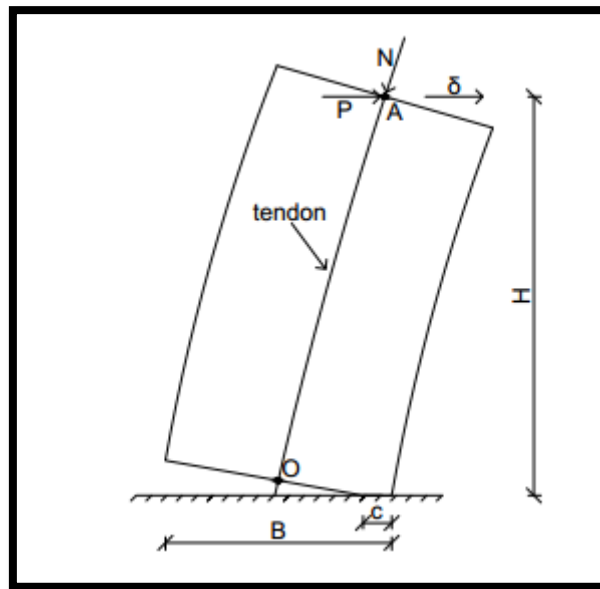
$$\delta n = \frac{\delta}{B}$$

Παρατηρήσεις<sup>9</sup>: Για το σχεδόν άκαμπτο σώμα, παρατηρούμε ότι το ανασήκωμα ξεκινά για  $Pn=0.5$ , και απομειώνεται όσο μειώνει και η δυσκαμψία του σώματος.

<sup>9</sup> Για περισσότερες αναλύσεις και διαγράμματα απόκρισης του συγκεκριμένου παραδείγματος, ανατρέξτε στην διπλωματική Αυγενάκη, καθώς περισσότερα αποτελέσματα επί των συγκεκριμένων ξεφεύγουν των ορίων ενδιαφέροντος της παρούσης διπλωματικής.

### 1.3.3 Λικνιστικό στοιχείο με ενσωματωμένο προεντεταμένο τένοντα

Σε αυτή την περίπτωση, η προσθήκη ενός προεντεταμένου τένοντα στο κέντρο του λικνιστικού στοιχείου οδηγεί σε ενισχυμένη απόκριση του στοιχείου, αφού παράγεται μια δύναμη σταθεροποίησης του, η οποία δρα ευεργετικά στην αποτροπή της ενάρξεως του ανασηκώματος. Αυτό το παράδειγμα, προσομοιάζει πραγματικές περιπτώσεις κατασκευών που μπορούν να συναντηθούν στην πράξη, όπως λικνιζόμενα υποστηλώματα ή διατμητικούς τοίχους όπου η προσθήκη του ενισχυμένου στοιχείου είναι συνήθης (Εικόνα 1.4).

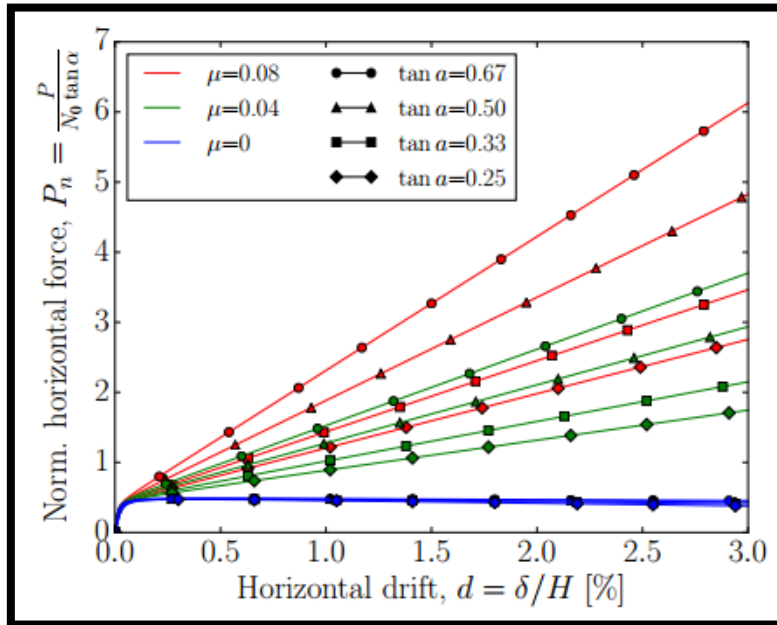


Εικόνα 1.4: Μοντέλο με προσθήκη προεντεταμένου τένοντα.

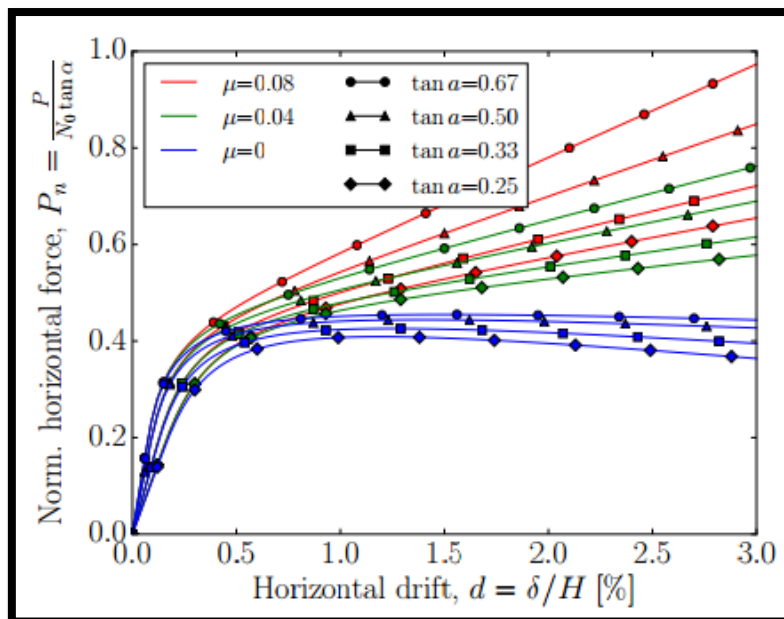
Σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση, του ελεύθερου στοιχείου, όπου η δύναμη σταθεροποίησης παρέμενε σταθερή κατά την συνολική διάρκεια της αποκρίσεως, η προσθήκη του τένοντα δημιουργεί συνεχής αυξανόμενο μέγεθος της δυνάμεως αυτής κατά την περιστροφική κίνηση του σώματος, εξαιτίας της προκύπτουσας επιμήκυνσης του. Επίσης, η διεύθυνση της δυνάμεως αυτής ακολουθεί την περιστροφή του τένοντα.

Η απόκριση συνεχίζεται να διέπεται από τις προηγούμενες κανονικοποιημένες παραμέτρους  $\tau_{na}$  και  $\varepsilon_o$ . Σημειώνεται ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση το  $\varepsilon_o = \frac{N_o}{B \cdot W \cdot E}$  και παρουσιάζεται η περίπτωση όπου  $\mu = \frac{Et \cdot At}{E \cdot A} = 0.04$ . Στα αντίστοιχα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν από τον Αυγενάκη στην περίπτωση του προεντεταμένου τένοντα, αυτά κανονικοποιούνται μόνο για την παράμετρο  $\mu$  και για διάφορες περιπτώσεις σώματος λικνισμού με μεταβαλλόμενη "λεπτότητα", όπως αυτή ορίστηκε προηγουμένως.

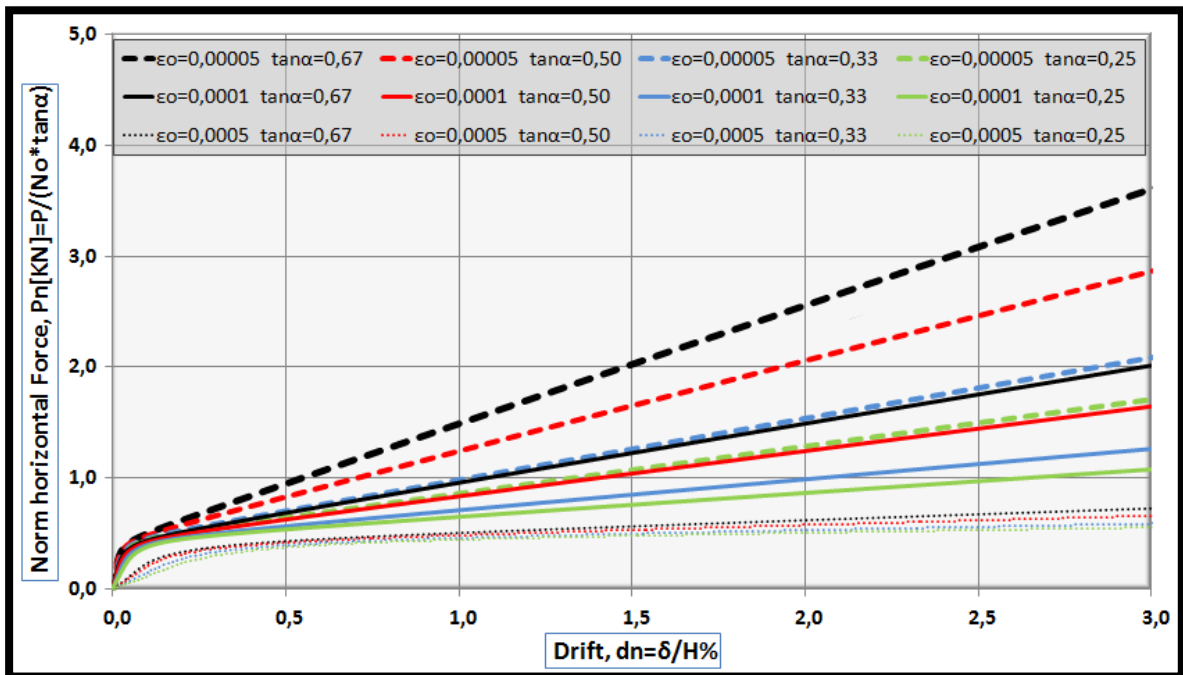
Όπως προαναφέρθηκε, οι αναλύσεις για το συγκεκριμένο παράδειγμα, αν και είχαν γίνει ως μέρος της έρευνας του Αυγενάκη, πραγματοποιήθηκαν ξανά για λόγους επιβεβαίωσης ορθότητας, κατανόησης του τρόπου λειτουργίας του λικνιστικού στοιχείου καθώς και της αρχικής κωδικοποίησης. Έτσι παρουσιάζονται στην συνέχεια (Διαγράμματα 1.5 και 1.6 ), τα αποτελέσματα που προέκυψαν ως μέρος της διπλωματικής του Αυγενάκη, καθώς και τα αποτελέσματα της παρούσης(Διάγραμμα 1.7).



Διάγραμμα 1. 5: Διάγραμμα λικνιζόμενου στοιχείου με προσθήκη προεντεταμένου τένοντα για  $\varepsilon_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ . Η περίπτωση  $\mu=0$  προσομοιάζει λικνιζόμενο σώμα χωρίς τένοντα, με σταθερή δηλαδή κατακόρυφη δύναμη  $N_0$  ( Αυγενάκης)



Διάγραμμα 1. 6: Διάγραμμα λικνιζόμενου στοιχείου με προσθήκη προεντεταμένου τένοντα για  $\varepsilon_0 = 5 \cdot 10^{-4}$ . Η περίπτωση  $\mu=0$  προσομοιάζει λικνιζόμενο σώμα χωρίς τένοντα, με σταθερή δηλαδή κατακόρυφη δύναμη  $N_0$  ( Αυγενάκης).



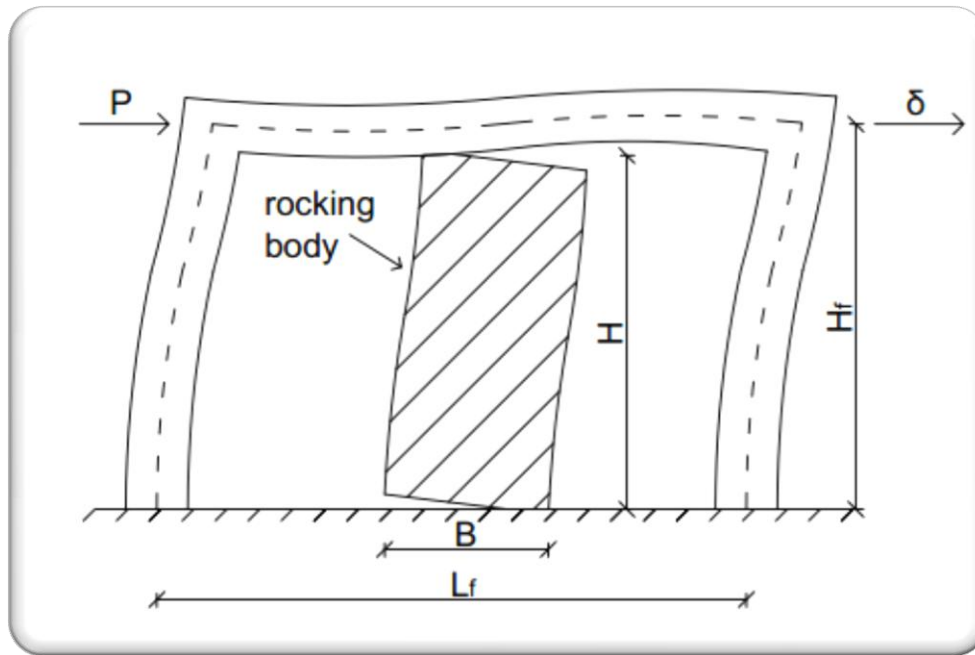
Διάγραμμα 1.7: Διάγραμμα Λικνιζόμενου στοιχείου με προσθήκη προεντεταμένου τένοντα για  $\mu=0,04$ . (Ζαντής).

Παρατηρήσεις<sup>10</sup>: Βλέπουμε, λοιπόν, ότι η προσθήκη προεντεταμένου τένοντα επηρεάζει αρκετά την απόκριση του σύνθετου λικνιστικού στοιχείου έναντι του απλού. Στα Διαγράμματα 1.5 και 1.6, η περίπτωση όπου  $\mu=0$  (μπλε καμπύλη) ανταποκρίνεται στην περίπτωση όπου απουσιάζει η ύπαρξη του προεντεταμένου τένοντα, και η κατακόρυφη δύναμη παραμένει σταθερή με τιμή  $N_0$ . Το διάγραμμα σε αυτή την περίπτωση ανταποκρίνεται στο αντίστοιχο του απλού λικνιστικού στοιχείου, χωρίς προεντεταμένο τένοντα και με σταθερή δύναμη που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο ( 1.3.2)

### 1.3.4 Πλαίσιο ενός ανοίγματος με προσθήκη στοιχείου λικνισμού.

Σε αυτό το τελευταίο "αναγνωριστικό" παράδειγμα, εξετάζεται η περίπτωση όπου ένα τοίχιο στοιχείου λικνισμού τοποθετείται σε ένα πλαίσιο ενός ανοίγματος. Το τοίχιο αυτό παραμένει ασύνδετο στην βάση και στην κορυφή του, έχοντας έτσι την δυνατότητα ανασηκώματος. (Εικόνα 1.5)

<sup>10</sup> Για περισσότερες αναλύσεις και διαγράμματα απόκρισης του συγκεκριμένου παραδείγματος, ανατρέξτε στην διπλωματική Αυγενάκη, καθώς περισσότερα αποτελέσματα επί των συγκεκριμένων ξεφεύγουν των ορίων ενδιαφέροντος της παρούσης διπλωματικής.



Εικόνα 1.5: Πλαίσιο με προσθήκη λικνιστικού στοιχείου.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για ένα πλαίσιο ενισχυμένου σκυροδέματος που απλοποιητικά θεωρείται ότι λειτουργεί ελαστικά. Το πλαίσιο<sup>11</sup> αυτό αποτελείται από υποστυλώματα διατομής  $0.50^{12}\text{m} \times 0.60\text{m}$  και από κολώνες διατομών  $0,25^{13}\text{m} \times 0.50\text{m}$ , ενώ το πάχος του στοιχείου λικνισμού είναι  $0,25\text{m}$  (κάθετο στο επίπεδο του πλαισίου). Το μέτρο ελαστικότητας του μελών του κυρίου πλαισίου είναι ίσο με  $E_f=30 \text{ GPa}$ , ενώ το μέτρο ελαστικότητας του στοιχείου λικνισμού,  $E_w$ , θεωρείται ως μεταβλητή παράμετρος. Για τα κατασκευαστικά μέλη του κυρίου πλαισίου (υποστυλώματα και δοκοί), η ρηγματωμένη δυσκαμψία λήφθηκε υπόψη βάση της συνήθους υπόθεσης του Ευρωκώδικα, δηλαδή η ενεργός δυσκαμψία να είναι ίση με την μισή της γεωμετρικής :

$$EI_{eff} = 0.5EI_g \quad (1.4)$$

Εφαρμόζεται στο μοντέλο κατακόρυφο κατανεμημένο φορτίο  $q = 60 \text{ KN/m}$  κατά μήκος της δοκού και κατακόρυφο φορτίο ίσο με το μισό του βάρους<sup>14</sup> του στοιχείου λικνισμού στην κορυφή του στοιχείου.

Όπως προαναφέρθηκε, οι αναλύσεις για το συγκεκριμένο παράδειγμα, αν και είχαν γίνει ως μέρος της έρευνας του Αυγενάκη, πραγματοποιήθηκαν ξανά για λόγους επιβεβαίωσης της ορθότητας των αποτελεσμάτων της αρχικής κωδικοποίησης και κατανόησης του τρόπου λειτουργίας του λικνιστικού

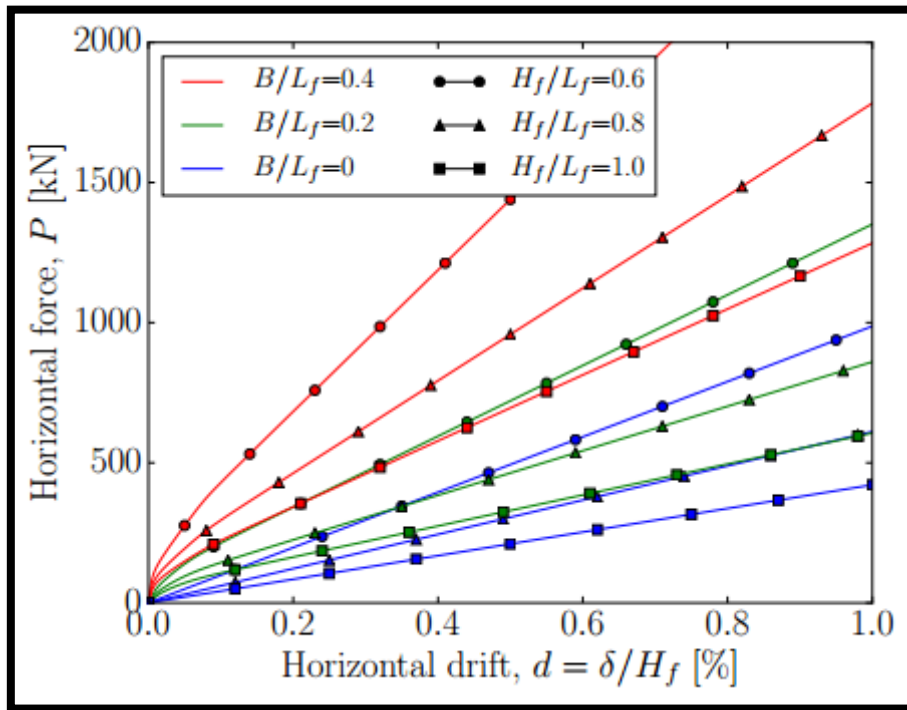
<sup>11</sup> Το πλαίσιο που μελετάται στο επόμενο κεφάλαιο των Ανελαστικών αναλύσεων συνεχίζει να έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με το παρών παράδειγμα.

<sup>12</sup> Μέγεθος κάθετο στο επίπεδο του πλαισίου.

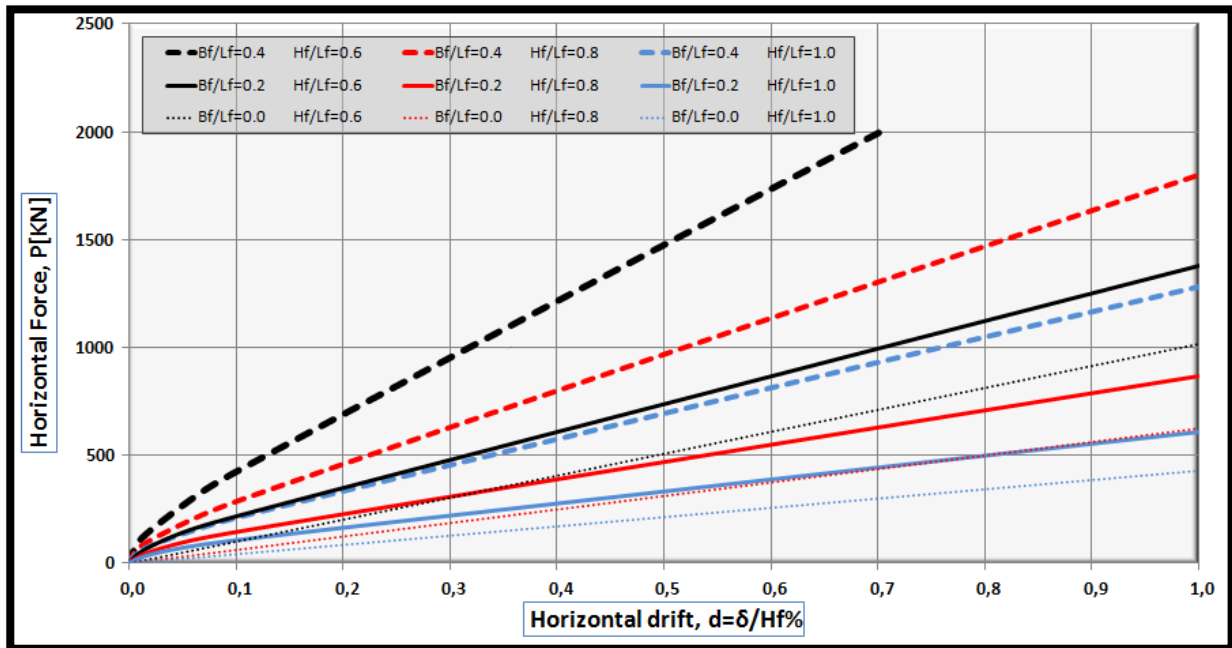
<sup>13</sup> Μέγεθος κάθετο στο επίπεδο του πλαισίου.

<sup>14</sup> Θεωρείται ότι το μισό παραλαμβάνεται από το έδαφος και δεν επιδρά στην απόκριση του στοιχείου.

στοιχείου. Έτσι παρουσιάζονται στην συνέχεια (Διάγραμμα 1.8), τα αποτελέσματα που προέκυψαν ως μέρος της διπλωματικής του Αυγενάκη, καθώς και τα αποτελέσματα της παρούσης.(Διάγραμμα 1.9).



Διάγραμμα 1.8: Οριζόντια Δύναμη-οριζόντιο drift (καμπύλες ικανότητας) για πλαίσια με διαφορετικούς λόγους  $B/L_f$  και  $H_f/L_f$  ( $E_w/E_f=1$ ) (Αυγενάκης).



Διάγραμμα 1.9: Οριζόντια Δύναμη-οριζόντιο drift (καμπύλες ικανότητας) για πλαίσια με διαφορετικούς λόγους  $B/L_f$  και  $H_f/L_f$  ( $E_w/E_f=1$ ) (Ζαντής).

Στα διαγράμματα 1.8 και 1.9 η απόκριση του πλαισίου σε σταδιακός αυξανόμενο οριζόντιο φορτίο,  $P$ , παρουσιάζεται για διαφορετικές περιπτώσεις πλαισίων με διαφορετικό λόγο ύψους προς μήκος ανοίγματος,  $H_f/L_f$ , και διαφορετικούς λόγους πλάτους στοιχείου λικνισμού προς μήκος ανοίγματος,  $B/L_f$ , υποθέτοντας ότι  $E_w=E_f$ . Σημειώνεται ότι η περίπτωση όπου  $B/L_f=0$  αναφέρεται στην περίπτωση πλαισίου χωρίς προσθήκη στοιχείου λικνισμού.

Παρατηρήσεις<sup>15</sup>: Στα διαγράμματα αυτά, παρουσιάζεται η κλασική καμπύλη ικανότητας των διαφόρων αυτών περιπτώσεων, και αποδεικνύεται ότι τόσο η ικανότητα της κατασκευής, όσο και η ακαμψία αυξάνονται με την αύξηση του λόγου  $B/L_f$ . Παραδείγματος χάριν, καθώς το πλάτος  $B$  του λικνιστικού στοιχείου αυξάνεται σε σχέση με το μήκος ανοίγματος, παρατηρείται ταυτόχρονη αύξηση της ικανότητας και της ακαμψίας της κατασκευής.

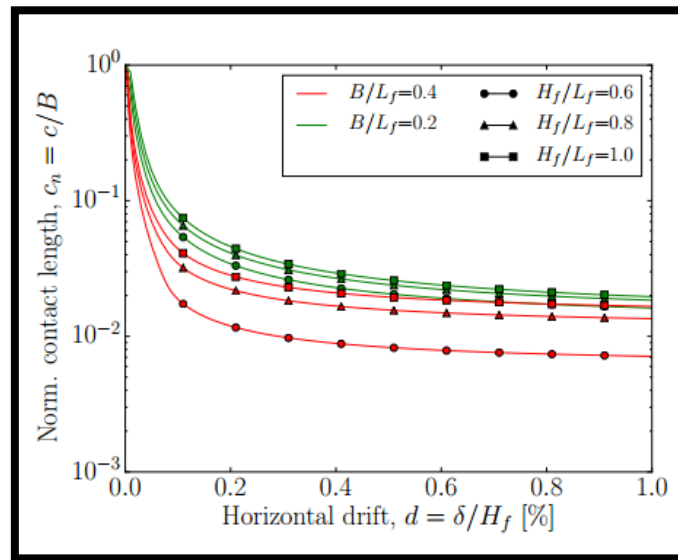
Αυτή η συμπεριφορά, ήταν αναμενόμενη, εφόσον η λικνιστική κίνηση του τοιχείου περιορίζεται περισσότερο όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος του  $B$ , εξαιτίας της μεγαλύτερης συνολικής κατακόρυφης μετατόπισης που απαιτείται να παραληφθεί από την δοκό, τα οποία συμβαίνουν και πιο κοντά στα άκρα της. Παρομοίως, η ικανότητα και η ακαμψία της κατασκευής, αυξάνονται, καθώς ο λόγος  $H_f/L_f$  μειώνεται, πχ καθώς το πλαίσιο γίνεται και πιο άκαμπτο. Σημειώνεται ότι, όσο μεγαλύτερος γίνεται ο λόγος  $H_f/L_f$ , η κατασκευή για σταθερό  $B$  και  $L_f$ , αναφέρεται σε λεπτότερο στοιχείο λυγισμού (μεγαλύτερο  $t_{ana}$ ), εφόσον του ύψος του τοίχου,  $H$ , σχετίζεται άμεσα με το ύψος του πλαισίου  $H_f$ .

Είναι ενδιαφέρον ότι η μη γραμμικότητα της απόκρισης, κυρίως περιορίζεται στην αρχή (για μικρούς λόγους  $drift$ ), καθώς η κίνηση μετά το ανασήκωμα παρουσιάζει πρακτικώς μια σταθερή ακαμψία. Επιπροσθέτως, η συνολική απόκριση, στις περισσότερες των περιπτώσεων, θα μπορούσε να προσεγγιστεί από την απόκριση ενός γραμμικού συστήματος με την ακαμψία που αποκτά το σύστημα μετά το αρχικό ανασήκωμα. Αυτή η συμπεριφορά σχετίζεται με την σταθεροποίηση του μήκους επαφής, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 1.10.

---

<sup>15</sup> Για περισσότερες αναλύσεις και διαγράμματα απόκρισης του συγκεκριμένου παραδείγματος, ανατρέξτε στην διπλωματική Αυγενάκη, καθώς περισσότερα αποτελέσματα επί των συγκεκριμένων ξεφεύγουν των ορίων ενδιαφέροντος της παρούσης διπλωματικής.





Διάγραμμα 1. 10: Κανονικοποιημένο μήκος σημείου επαφή στο κάτω άκρο του στοιχείου λικνισμού συνάρτηση του drift για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Παρόμοια προκύπτουν και τα μήκη επαφής στο άνω άκρο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

### 2.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής, σκοπός μας είναι η προσομοίωση διαφορών πλαισίων και η εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς τον βαθμό με τον οποίο η εισαγωγή του προτεινόμενου στοιχείου λικνισμού μπορεί να έχει ευεργετικά αποτελέσματα ως προς την αντισεισμικότητα των κατασκευών αυτών.

Προς ικανοποίηση των αναγκών του παρόντος κεφαλαίου γίνονται αναλύσεις για διαφορετικές περιπτώσεις πλαισίων όσον αφορά τον λόγο ύψους προς πλάτος στοιχείου λικνισμού ( $H_f/B$ ), τον λόγο πλάτους στοιχείου λικνισμού προς μήκος ανοίγματος ( $B/L_f$ ) για πλαίσια ενός, δύο και τριών ανοιγμάτων.

Στο κεφάλαιο αυτό, όλες οι αναλύσεις γίνονται με χρήση ελαστικών στοιχείων, για να οδηγηθούμε σε κάποια αρχικά συμπεράσματα. Η προσομοίωση των πλαισίων έγινε με δισδιάστατα επίπεδα πλαίσια κατά την διαμήκη διεύθυνση, χρησιμοποιώντας το λογισμικό OpenSees (McKenna 2001). Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής χρησιμοποιήθηκε η Στατική Ανελαστική Ανάλυση Εξώθησης (Pushover Analysis) για την μελέτη των πλαισιακών φορέων με προσθήκη ή μη του στοιχείου λικνισμού. Τα προσομοιώματα των κτιρίων επιλύονται σε πρώτη φάση ελαστικά, αρχικά υπό την επίδραση των κατακόρυφων φορτίων (βαρύτητας) και ακολούθως υπό σταδιακώς αυξανόμενη οριζόντια δύναμη.

Εν συνεχεία, αφού εξάχθηκαν κάποια αρχικά συμπεράσματα από τις καμπύλες ικανότητας, για κάθε μια εκ των περιπτώσεων, έγινε αποτίμηση της σεισμικής τους συμπεριφοράς για συγκεκριμένο φάσμα σχεδιασμού κατά ΕΚ8. Για τις ανάγκες της παρούσης οι υπολογισμοί έγιναν θεωρώντας: εδαφική επιτάχυνση αναφοράς  $\alpha_{qgR}=0.24g$ , Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Z2, κατηγορία σπουδαιότητας II και κατηγορία εδάφους B. Ακολούθως, υπολογίζεται η αναμενόμενη μετακίνηση της κατασκευής (στοχευμένη μετακίνηση) που ορίζει το σημείο επιτελεστικότητας (performance point) της κατασκευής γι' αυτό το σεισμό. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορες μέθοδοι<sup>16</sup> υπολογισμού της στοχευμένης μετακίνησης πάνω στην καμπύλη pushover οι οποίες βασίζονται κυρίως στην μέθοδο του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος (μέθοδος ATC-40, μέθοδος N2, μέθοδος συντελεστών). Αφού υπολογιστεί η αναμενόμενη

<sup>16</sup> Στην συγκεκριμένη διπλωματική επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος ATC-40.

μετακίνηση της κατασκευής (μετακίνηση κορυφής) σημειώνεται στην καμπύλη ικανότητας το αντίστοιχο σημείο επιτελεστικότητας  $\mu$ , το οποίο συγκρίνεται με τα αντίστοιχα των διαφόρων περιπτώσεων πλαισίων, ενισχυμένων και μη. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για διαφορετικές περιπτώσεις πλαισίων.

Τέλος, για τα προκύπτων σημεία επιτελεστικότητας για κάθε πλαίσιο και για τον θεωρούμενο σεισμό, υπολογίζονται οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις MQN κατά μήκος του πλαισίου και γίνεται εξαγωγή κάποιων πρόσθετων αποτελεσμάτων ως προς την απόκριση του.

## 2.2 Προσομοίωση με το λογισμικό OpenSees.

### 2.2.1 Εισαγωγή

Το OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation) είναι ένα εξειδικευμένο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε στη δυτική ακτή των Η.Π.Α, από το Pacific Earthquake Engineering Research Center, με κύριο σκοπό την ανάλυση της σεισμικής συμπεριφοράς των κατασκευών. Παρέχει στους χρήστες πληθώρα επιλογών καθώς διαθέτει μεγάλο εύρος στοιχείων (γραμμικά, επιφανειακά, χωρικά) που μπορούν να συνδυαστούν με σύνθετους νόμους υλικών, ώστε να μπορέσουν να προσεγγίσουν, όσο το δυνατόν καλύτερα, την πραγματική συμπεριφορά των εκάστοτε κατασκευών μέσω μη γραμμικών αναλύσεων στατικών και δυναμικών αναλύσεων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το λογισμικό αυτό είναι ανοιχτού κώδικα<sup>17</sup>, ενθαρρύνοντας έτσι το χρήστη όχι μόνο να μελετήσει τον κώδικα αλλά και να επέμβει σε αυτόν, εξελίσσοντας τον. Στα θετικά του προγράμματος προσμετράται και η λειτουργία μιας διαδικτυακής πλατφόρμας (message board) στην οποία οι χρήστες ανταλλάσσουν πληροφορίες και ενημερώνονται για διάφορα επιστημονικά θέματα που αφορούν το λογισμικό και τη χρήση του.

Στο OpenSees η εισαγωγή του προσομοιώματος και των παραμέτρων της ανάλυσης γίνεται μέσω εντολών οι οποίες εκτελούνται με τη βοήθεια ενός διερμηνέα που είναι προγραμματισμένος σε γλώσσα Tcl<sup>18</sup>. Ένα από τα λίγα μειονεκτήματα του προγράμματος είναι η απουσία γραφικών η οποία δυσκολεύει το χρήστη καθώς δεν υπάρχει εύκολη εποπτεία του προσομοιώματος. Ωστόσο η χρήση εντολών της Tcl κατά τη μόρφωση του

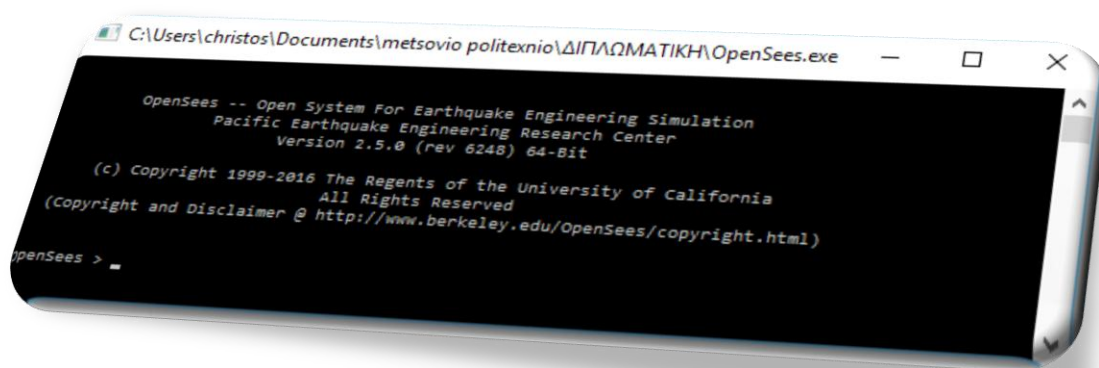
<sup>17</sup> Εκμεταλλευόμενος την ιδιότητα αυτή του προγράμματος, ο Αυγενάκης ανέπτυξε το μοντέλο του στοιχείου λικνισμού που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις της παρούσης.

<sup>18</sup> Προτείνεται σε μελλοντικούς μελετητές να χρησιμοποιήσουν ως βάση για την κωδικοποίηση τους το πρόγραμμα Notepad++, που αποτελεί σημαντικό βοηθητικό εργαλείο κατά το γράψιμο του κώδικα σε μία πληθώρα από γλώσσες κωδικοποίησης, συμπεριλαμβανομένου της Tcl.

φορέα και την εκτέλεση των αναλύσεων μπορεί να βοηθήσει τόσο στην αποφυγή σφαλμάτων όσο και στην ευκολότερη χρήση του λογισμικού.

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής το OpenSees χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση στατικών μονοτονικών αναλύσεων σε φορείς από οπλισμένο σκυρόδεμα . Συγκεκριμένα, προσομοιώθηκαν πλαισιωτοί φορείς από οπλισμένο σκυρόδεμα ενισχυμένοι με το στοιχείο λικνισμού όπως αυτό προσομοιώθηκε και κωδικοποιήθηκε από τον Αυγενάκη . Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια περιγραφή της προσομοίωσης των φορέων αυτών στο OpenSees.

Η ακριβής κωδικοποίηση που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες του Κεφαλαίου 2 , παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α<sup>19</sup>.



Εικόνα 2.1: Παράθυρο εισαγωγής εντολών

## 2.2.2 Προσομοίωση ελαστικών πλαισίων ενισχυμένου σκυροδέματος

Στο πρώτο στάδιο, όπου γίνεται μια διερεύνηση λαμβάνοντας υπόψη την απόκριση του πλαισίου ως ελαστικά δρών, προσομοιώθηκαν οι διάφορες περιπτώσεις των πλαισίων με ελαστικά στοιχεία. Επωμένος δεν υπάρχει κάποιος ιδιαίτερος διαχωρισμός υλικών πέραν κάποιων γενικών χαρακτηριστικών που είναι κοινά σε όλα τα στοιχεία των πλαισίων που δρουν ελαστικά.

Άξια επιπλέον σχολιασμού, πέραν της απλής παράθεσης του κώδικα που εμφανίζεται στο παράρτημα Α , αποτελούν τα εξής 3 σημεία, και γι' αυτό γίνεται στο παρόν υποκεφάλαιο επιπλέον αναφορά:

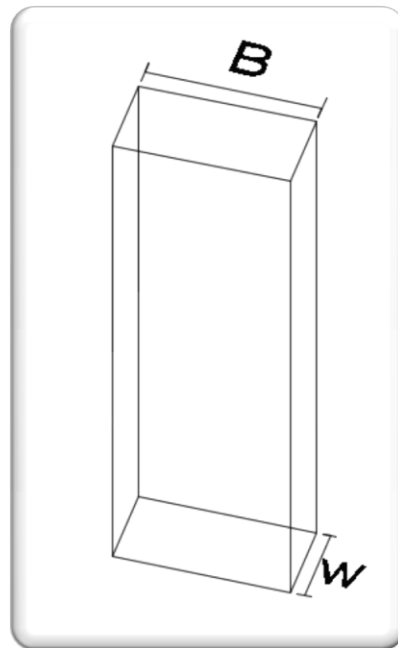
- Το στοιχείο λικνισμού, προσομοιάστηκε στους φορείς με το κωδικοποιημένο μοντέλο που παραχωρήθηκε για τους σκοπούς της

<sup>19</sup> Συγκεκριμένα στο υποπαράρτημα Α.4.

παρούσης από τον Αυγενάκη. Το μοντέλο αυτό ενεργοποιείται μέσω της εντολής:

**RockingBC2d eleTag iNode jNode E nu B W (1 or 0)**

στο οποίο εισάγονται κατά σειρά ο αριθμός του στοιχείου, ο κόμβος αρχής, ο κόμβος πέρατος, το μέτρο ελαστικότητας του στοιχείου, ο λόγος Poisson, το πλάτος του, το πάχος του και το κατά πόσον θα λαμβάνεται υπόψη η συμβολή των διατμητικών παραμορφώσεων. Για τις ανάγκες των ελαστικών αναλύσεων το στοιχείο λικνισμού είχε τις τιμές και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της Εικόνας 2.2 όσον αφορά τις ιδιότητες του.



```
element RockingBC2d eleTag iNode jNode 3000000 0.0 $B 0.25 1
```

Εικόνα 2.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες στοιχείων υλικού για το σώμα λικνισμού.

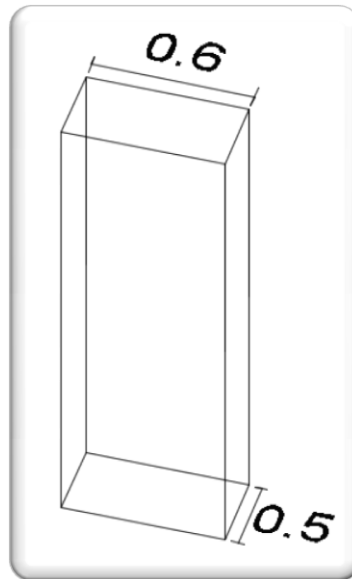
Πρέπει να γίνει κατανοητό ότι το συγκεκριμένο στοιχείο θεωρεί εμφάνιση ανασηκώματος μόνο στον κόμβο j, επωμένος αν κάποιος θέλει να φτιάξει ένα στοιχείο με διπλό ανασήκωμα, όπως στην πλειοψηφία των περιπτώσεων της παρούσης διπλωματικής, χρειάζεται η διασύνδεση 2 τέτοιων στοιχείων με κατάλληλη αρίθμηση των κόμβων τους.

- Όσον αφορά τα στοιχεία των πλαισίων ( δοκοί και υποστυλώματα ) που αποκρίνονται ελαστικά, ενεργοποιήθηκαν μέσω της εντολής:

**element elasticBeamColumn eleTag iNode jNode A E Iz transfTag**

στην οποία εισάγονται κατά σειρά ο αριθμός του στοιχείου, ο κόμβος αρχής, ο κόμβος πέρας, το εμβαδό του στοιχείου, το μέτρο ελαστικότητας του στοιχείου, η ροπή αδρανείας κατά z και η συσχέτιση του στοιχείου με τους καθολικούς άξονες.

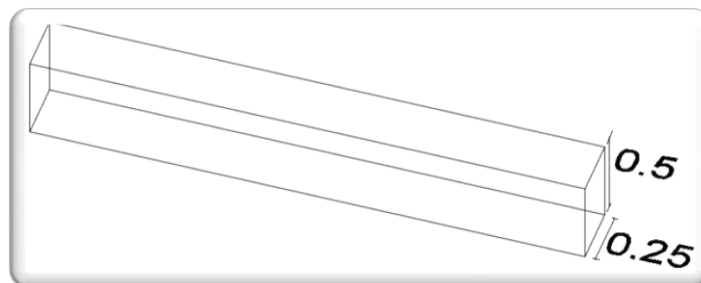
Στην εντολή αυτή τα πάντα μεταβάλλονται βάση των αναγκών της προσομοίωσης. Για τις ανάγκες των ελαστικών αναλύσεων τα χαρακτηριστικά των στοιχείων υποστυλώματος παρουσιάζονται παρακάτω (Εικόνα 2.3).



```
element elasticBeamColumn eleTag iNode jNode 0.3 30000000 0.0045 1;
```

Εικόνα 2.3: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες στοιχείων υλικού για τα υποστυλώματα .

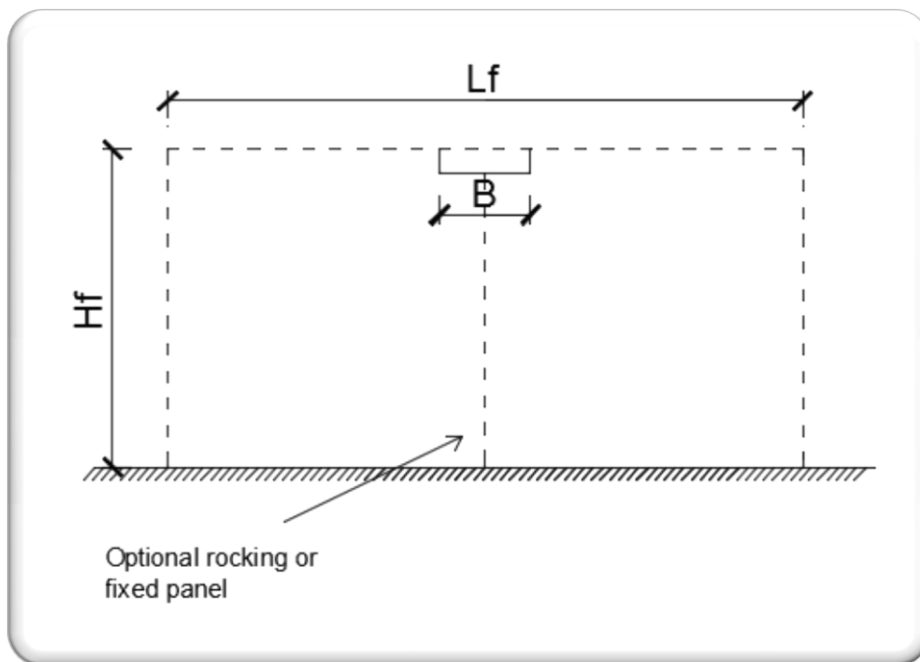
Για τις ανάγκες των ελαστικών αναλύσεων τα χαρακτηριστικά των στοιχείων δοκού σύμφωνα με Εικόνα 2.4.



```
element elasticBeamColumn eleTag iNode jNode 0.125 30000000 0.00130208333 2;
```

Εικόνα 2.4: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες στοιχείων υλικού για τις δοκούς.

- Τέλος ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στον τρόπο σύνδεσης του στοιχείου λικνισμού με το υπόλοιπο πλαίσιο. Το OpenSees προσομοιώνει τον φορέα μέσω του άξονα των στοιχείων του. Εδώ όμως δημιουργούνται προβλήματα στην σύνδεση δοκού και στοιχείου λικνισμού, αφού η ένωση του στοιχείου με την δοκό δεν πρέπει να γίνεται επί του άξονα της, αλλά επί της εξωτερικής ακραίας εφαπτομενικής επιφάνειας της. Για να αποφευχθούν λοιπόν προβλήματα, και να επιτευχθεί η ορθή λειτουργία του προγράμματος η προσομοίωση έγινε σύμφωνα με την Εικόνα 2.5. Τα εξωτερικά επιπρόσθετα στοιχεία<sup>20</sup>, είναι αρκούτσως λεπτά και άκαμπτα για ορθή μεταβίβαση των παραμορφώσεων.



Εικόνα 2.5: Τρόπος προσομοίωσης πλαισίου στο OpenSees.

### 2.2.3 Παράμετροι Στατικών Ελαστικών Αναλύσεων.

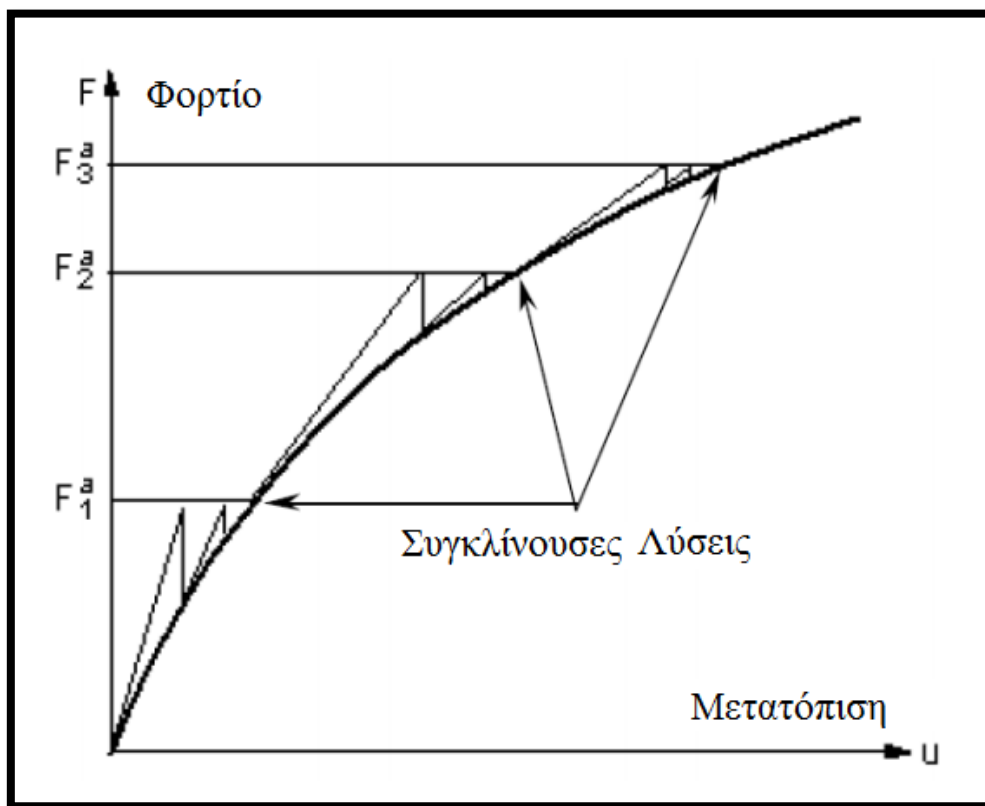
Στην εργασία αυτή έγιναν στατικές ανελαστικές αναλύσεις εξώθησης (Pushover Analysis) για διαφορετικές περιπτώσεις πλαισίων με προσθήκη ή μη του στοιχείου λικνισμού, οι οποίες παρουσιάζονται σε επόμενα υποκεφάλαια.

Κατά τις αναλύσεις αυτές αρχικά επιβάλλονται στο φορέα τα ίδια βάρη, 60 KN/m κατά μήκος της δοκού και εκτελείται μια πρώτη στατική επίλυση με τα κατακόρυφα αυτά φορτία. Στη συνέχεια επιβάλλονται τα οριζόντια φορτία και

<sup>20</sup> Στοιχεία που παρουσιάζονται με την συνεχή γραμμή. Τα στοιχεία με τις διακεκομμένες γραμμές αποτελούν τους άξονες των στοιχείων δοκού και υποστυλωμάτων.

εκτελείται σε προκαθορισμένα βήματα φόρτισης ή μετατόπισης μια στατική ανελαστική ανάλυση.

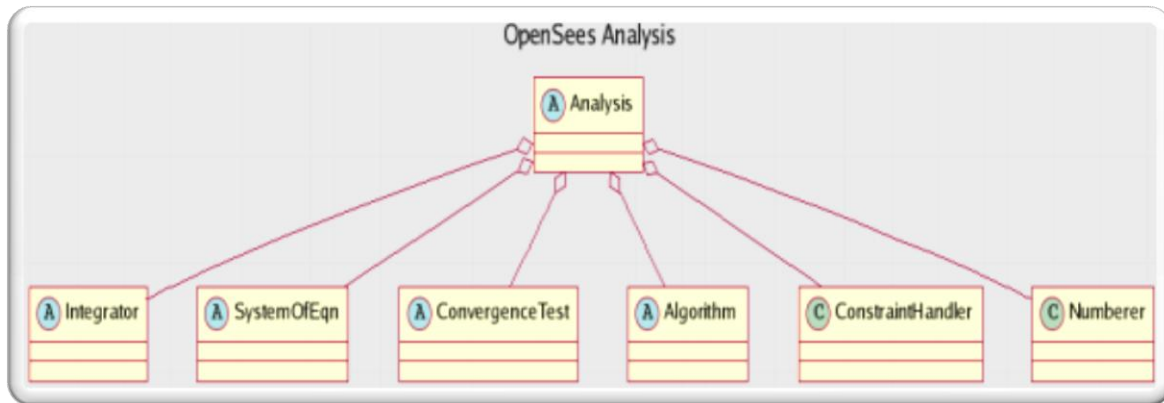
Σε ανελαστικά προβλήματα η σχέση  $[P]=[K]*[\Delta]$ , που συνδέει τις μετακινήσεις με τα φορτία είναι μη γραμμική καθώς η δυσκαμψία της κατασκευής μειώνεται με την αύξηση του φορτίου, μεταβάλλοντας έτσι και το μητρώο δυσκαμψίας  $[K]$ . Αυτό θα το δούμε αργότερα στο κεφάλαιο 3, όπου λαμβάνουν μέρος οι ανελαστικές αναλύσεις. Έτσι κατά τον υπολογισμό μιας στοιχειώδους μετακίνησης  $\Delta u$  που οφείλεται σε μια στοιχειώδη μεταβολή της δύναμης  $\Delta P$  εισέρχεται ένα σφάλμα σε κάθε διαδοχικό βήμα φόρτισης. Το σφάλμα αυτό μειώνεται μέσω διαδοχικών επαναλήψεων μέχρι να επιτευχθεί το απαιτούμενο κριτήριο σύγκλισης εντός του προκαθορισμένου μέγιστου αριθμού επαναλήψεων (Διάγραμμα 2.1).



Διάγραμμα 2.1: Διαδικασία μη γραμμικής επίλυσης.

Για να εκτελέσει το λογισμικό τις αναλύσεις αυτές πρέπει να προσδιοριστούν αρκετές παράμετροι, οι οποίες διαφέρουν σε κάθε περίπτωση ανάλογα με τη φύση του προβλήματος (Εικόνα 2.6).





Εικόνα 2.6: Παράμετροι ανάλυσης.

Οι παράμετροι αυτές είναι οι εξής :

α) **ConstraintHandler** : Καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο οι συνοριακές συνθήκες εισέρχονται στην ανάλυση και το πώς αυτές επηρεάζουν τους βαθμούς ελευθερίας των κόμβων. Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής χρησιμοποιήθηκε η εντολή `constraints Transformation`, η οποία εφαρμόζεται όταν οι δεσμεύσεις των κόμβων δεν είναι ομογενείς (λόγω της ύπαρξης του στοιχείου λικνισμού).

β) **DOF Numberer** : Καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο αριθμούνται οι εξισώσεις και αντιστοιχίζονται με τους βαθμούς ελευθερίας. Επειδή η αρίθμηση των κόμβων που χρησιμοποιήθηκε στα περισσότερα προβλήματα δεν ήταν συνεχής έπρεπε να χρησιμοποιηθεί ένας καταμετρητής που να συμπυκνώνει την αρίθμηση, μειώνοντας έτσι τις διαστάσεις των μητρώων και αποφεύγοντας την εισαγωγή πρόσθετων μηδενικών όρων. Για το λόγο αυτό προτιμήθηκε ο καταμετρητής `Reverse Cuthill-McKee (RCM)`.

γ) **System Of Equation/Solver** : Ορίζει τον τρόπο με τον οποίο αποθηκεύονται και λύνονται οι μητρικές εξισώσεις. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε το σύστημα `UmfPack`, το οποίο προτείνεται για προσομοιώματα με μεγάλο αριθμό στοιχείων.

δ) **Integrator** : Η παράμετρος αυτή καθορίζει το στόχο του επόμενου βήματος. Υπάρχουν δύο δυνατές επιλογές ανάλογα με το αν ο στόχος προσδιορίζεται με την επιβολή πρόσθετης δύναμης (`LoadControl`) ή μετακίνησης (`DisplacementControl`) στο φορέα. Για την επιβολή των κατακόρυφων φορτίων χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση με `LoadControl` ενώ για τη πλευρική εξώθηση χρησιμοποιήθηκε η `DisplacementControl` καθώς παρατηρήθηκε ευκολότερη σύγκλιση.

ε) **Algorithm** : Εδώ ορίζεται ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την εύρεση του επιθυμητού στόχου. Επιλέχθηκε ο αλγόριθμος `Newton-Raphson` που χρησιμοποιεί ένα επικαιροποιημένο μητρώο δυσκαμψίας

στ) **Convergence Test** : Η παράμετρος αυτή εξετάζει αν έχει πραγματοποιηθεί σύγκλιση στο τέλος του βήματος φόρτισης μέσω ενός κριτηρίου σύγκλισης. Επιλέχθηκε το Norm Displacement Increment .

Μετά από την επιλογή των προηγούμενων παραμέτρων ορίζεται η ανάλυση να είναι στατική μέσω της εντολής **analysis Static** καθώς δεν έγιναν δυναμικές αναλύσεις.

#### 2.2.4 Εξαγωγή αποτελεσμάτων.

Για τις ανάγκες του παρόντος κεφαλαίου για την εξαγωγή των απαραίτητων συμπερασμάτων, χρειάστηκαν διάφορες πληροφορίες κατά την φόρτιση των πλαισίων μέσω της Στατικής Ανελαστικής Ανάλυσης Εξώθησης (Pushover Analysis). Συγκεκριμένα χρειάστηκαν να παρθούν πληροφορίες δύο ειδών ανά περίπτωση:

- Σε πρώτη φάση, για κάθε βήμα της φορτίσεως, αρχικώς λόγω της σταδιακής φορτίσεως του κατανεμημένου οριζόντιο φορτίου της κύριας δοκού, αλλά και του στοιχείου λικνισμού όπου θεωρήθηκε ως ενεργό δρών επί του πλαισίου το ήμισυ του βάρους του, και ακολούθως λόγω της σταδιακώς αυξανόμενης οριζόντιας φόρτισης, χρειάστηκαν τα αποτελέσματα από το λογισμικό πρόγραμμα OpenSees της δυνάμεως φορτίσεως με την αντίστοιχη μετακίνηση<sup>21</sup> της οροφής του, ανά αύξων βήμα για τον σχεδιασμό των καμπύλων ικανότητας. Η συγκεκριμένη ανάγκη εκπληρώθηκε με την εντολή :

```
recorder Node <-file $fileName> <-time> <-nodes $node1 -dof ($dof1) disp
```

στην οποία εισάγονται κατά σειρά, το όνομα του αρχείου στο οποίο θέλει ο χρήστης να εμφανίζονται τα αποτελέσματα, ο αριθμός αναγνώρισης του κόμβου τον οποίο να αφορούν τα αποτελέσματα, ο βαθμός ελευθερίας για τον οποίο θα εμφανίζεται η προκύπτουσα μετακίνηση και τέλος η εντολή disp η οποία καθορίζει ως εξαγωγίμα αποτελέσματα την δύναμη με την προκύπτουσα μετακίνηση για κάθε βήμα της προσαυξητικής ανάλυσης.

---

<sup>21</sup>Μετακίνηση κορυφής θεωρήθηκε το μέσο του πλαισίου (ή μέσο συνόλου δοκού που απαρτίζουν το πλαίσιο ανά περίπτωση).

```
recorder Node -file Example.out -time -nodes 14 -dof 1 disp
```

Εικόνα 2.7: Παράδειγμα χρήσης της εντολής recorder--disp

- Σε δεύτερη φάση χρειάστηκε η κατανομή της έντασης<sup>22</sup> στους κόμβους του πλαισίου, για να είναι δυνατή η εύρεση της μέγιστου αναπτυσσόμενης ανά περίπτωση και η καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του φορέα, καθώς και της, πιθανής, βελτίωσης ή όχι των μεγίστων δυνάμεων επί του φορέα με την προσθήκη του στοιχείου λικνισμού. Η συγκεκριμένη ανάγκη εκπληρώθηκε με την εντολή:

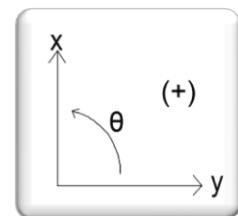
**recorder Element <-file \$fileName> <-time> <-ele \$ele1 \$ele2 globalForce**

στην οποία εισάγονται κατά σειρά, το όνομα του αρχείου στο οποίο θέλει ο χρήστης να εμφανίζονται τα αποτελέσματα, ο αριθμός αναγνώρισης των ράβδων στις οποίες θα εμφανίζονται τα αποτελέσματα MQN για κάθε ένα από τους κόμβους της αρχής και τέλους, η εντολή globalForce η οποία καθορίζει ως εξαγωγή αποτελέσματα την οριζόντια δύναμη που εφαρμόζεται στο πλαίσιο με τις αντίστοιχες εμφανιζόμενες δυνάμεις για κάθε κόμβο της ράβδου στο καθολικό σύστημα.

Ιδιαίτερη προσοχή, πρέπει να δοθεί κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων αυτών στο γεγονός ότι εμφανίζονται για το καθολικό σύστημα και όχι για το τοπικό της ράβδου, δυσχεραίνοντας έτσι την κατανόηση τους από τον μελετητή. Γι' αυτό τον λόγο παρατίθεται στην συνέχεια ένας απλουστευμένος τρόπος κατανόησης και επεξεργασίας των αποτελεσμάτων αυτών για μελλοντικούς μελετητές.

Τρόπος επεξεργασίας αποτελεσμάτων εντολής globalForce:

- Το OpenSees μέσω της εντολής αυτής δίνει αποτελέσματα στο **καθολικό σύστημα** του φορέα(Εικόνα 2.8).
- Έτσι δίνει αποτελέσματα ανά σειρά δηλωμένων ράβδων μέσω της εντολής ως εξής(Πίνακας 2.1):



Εικόνα 2.8: Καθολικό σύστημα φορέα.

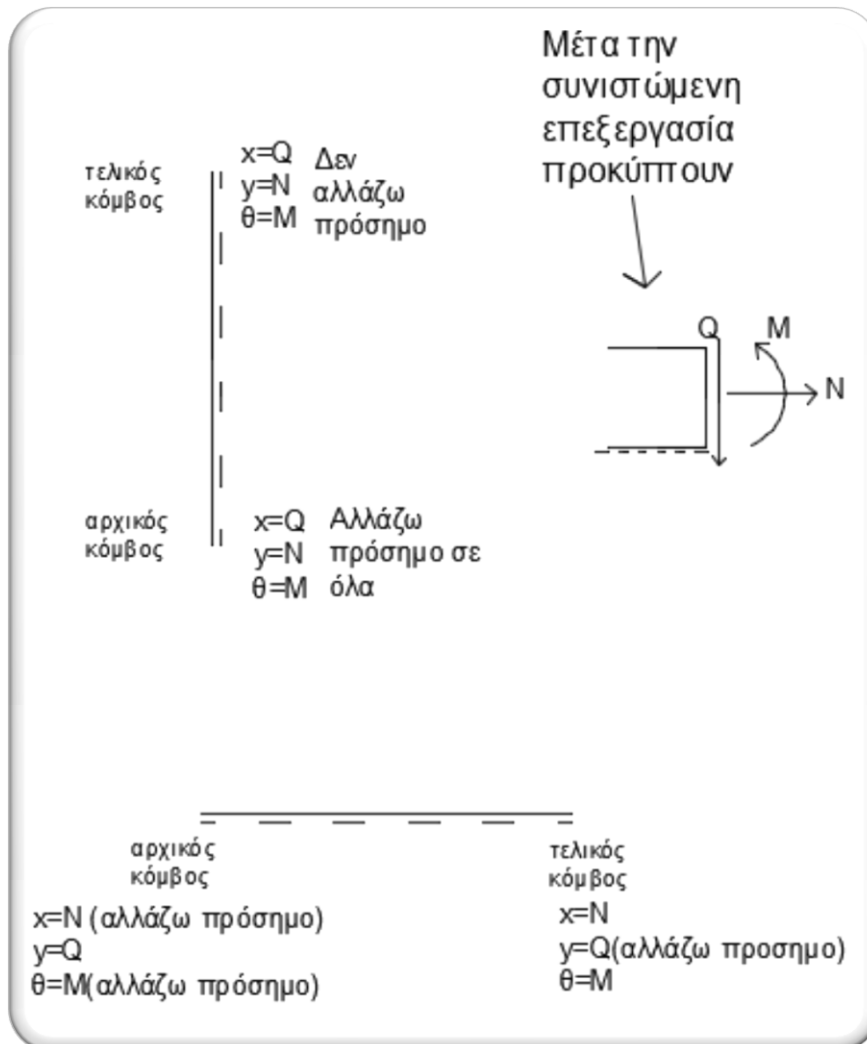
<sup>22</sup> Δυνάμεις MQN επί των κόμβων του πλαισίου.

	1η δηλωθέν ράβδος						2η δηλωθέν ράβδος					
	Αρχικός κόμβος ράβδου			Τελικός κόμβος ράβδου			Αρχικός κόμβος ράβδου			----- <sup>23</sup>		
F	GF <sub>x</sub>	GF <sub>y</sub>	Gf <sub>θ</sub>	GF <sub>x</sub>	GF <sub>y</sub>	Gf <sub>θ</sub>	GF <sub>x</sub>	GF <sub>y</sub>	Gf <sub>θ</sub>	...	...	...

Πίνακας 2.1 :Εξαγώγιμα αποτελέσματα εντολής GlobalForce.

\*GF=global force

Επωμένως, για την ορθότητα των αποτελεσμάτων, και την παρουσίαση τους με ορθά πρόσημα ( θετική ροπή: εφελκύνει κάτω ίνα, θετική αξονική: εφελκυσμός, τέμνουσα δεν απασχολεί ) προτείνεται η επεξεργασία τους με την πιο κάτω λογική διαχωρισμού και επεξεργασίας σε υποστυλώματα και δοκούς(Εικόνα 2.9).



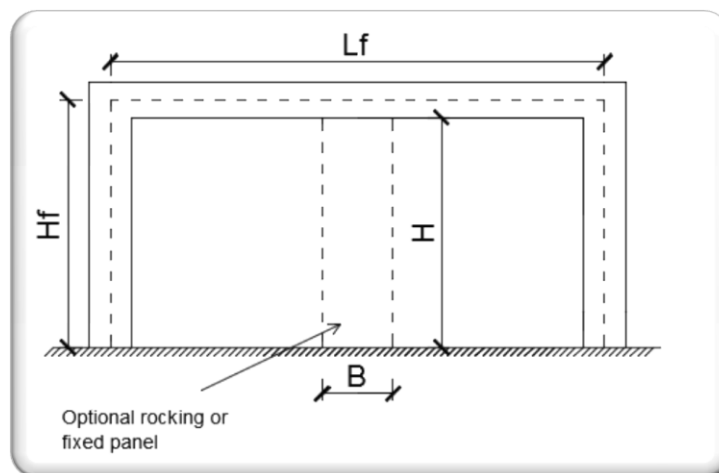
Εικόνα 2.9: Μέθοδος επεξεργασίας αποτελεσμάτων

<sup>23</sup> Υποδηλώνεται συνέχεια της ίδιας λογικής με την 1η ράβδο για το σύνολο των ράβδων του συστήματος που εξετάζεται.

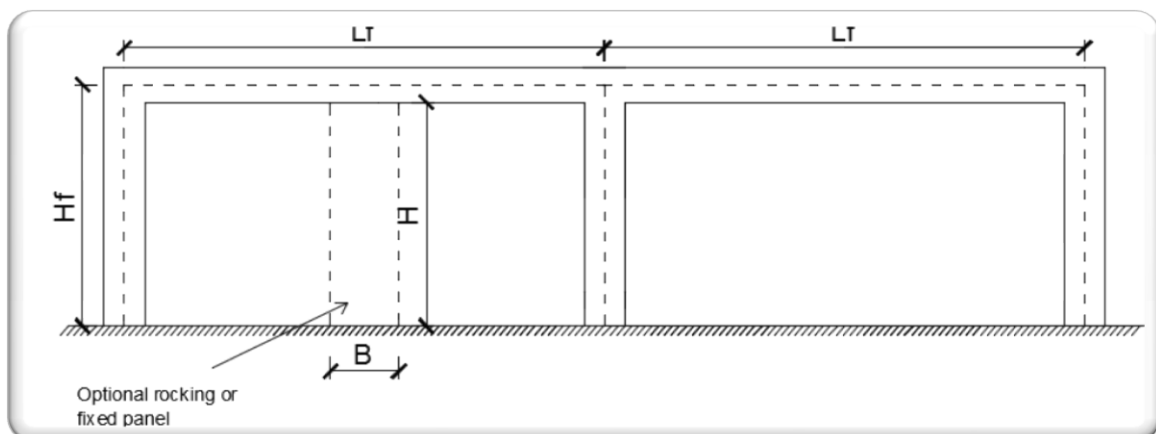
## 2.3 Περιπτώσεις πλαισίων που μελετήθηκαν

Για τις ανάγκες του παρόντος κεφαλαίου μελετήθηκαν πλαίσια ενός δύο και τριών ανοιγμάτων (Εικόνες 2.10,2.11 και 2.12) για δύο κύριες κατηγορίες χαρακτηριστικών πλαισίων με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την επίδραση της προσθήκης του στοιχείου λικνισμού στην απόκριση των κατασκευών.

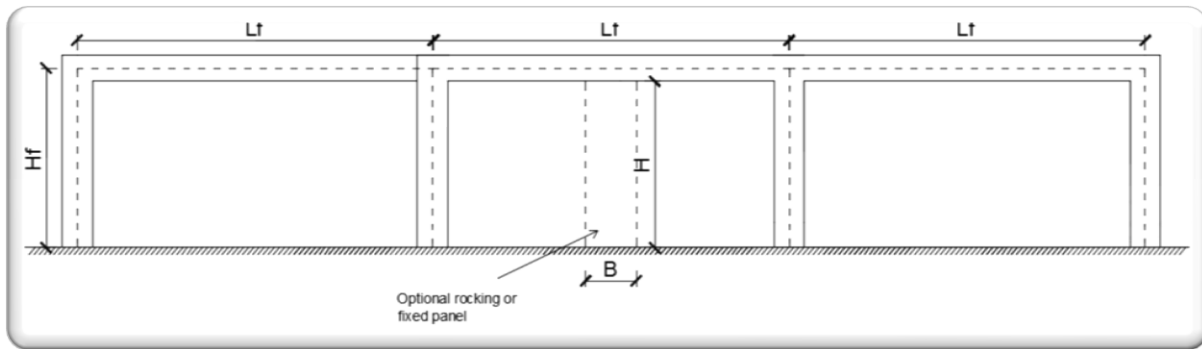
- Στην πρώτη κατηγορία, παρέμενε σταθερό το ύψος του πλαισίου  $H_f=3.5\text{m}$  και λόγος  $B/L_f=1/3$  ενώ μεταβλητός θεωρήθηκε ο λόγος  $H/B$  με τιμές 3.5,2.5 και 1.5.
- Στην δεύτερη κατηγορία , παρέμενε σταθερό το ύψος του πλαισίου  $H_f=3.5$  , ο λόγος  $H_f/B=3.5$  , ενώ μεταβλητός θεωρήθηκε ο λόγος  $B/L_f$  με τιμές  $1/2,1/3,1/4$  και  $1/5$ .



Εικόνα 2.10 : Διαμόρφωση πλαισίου ενός ανοίγματος.



Εικόνα 2.11 : Διαμόρφωση πλαισίου δύο ανοιγμάτων.



Εικόνα 2.12 : Διαμόρφωση πλαισίου τριών ανοιγμάτων.

## 2.4 Υπολογισμός καμπύλων Ικανότητας

### 2.4.1. Στατική Ανελαστική Ανάλυση Εξώθησης (Pushover Analysis)

#### 2.4.1.1 Οι βασικές έννοιες της στατικής ανελαστικής ανάλυσης εξώθησης

Με τον όρο "στατική ανελαστική ανάλυση εξώθησης"<sup>24</sup> αποδίδεται στα ελληνικά ο αγγλικός όρος "static pushover analysis" και σημαίνει τη διενέργεια της υλικός (αλλά και ενδεχομένως και γεωμετρικώς) μη γραμμικής ανάλυσης για μονότονη και σταδιακά αυξανόμενη στατική φόρτιση (επαυξητική διαδικασία) μέχρι την έλευση της κατάρρευσης του κτιρίου που αναλύεται. Στην αρχική της μορφή η ανάλυση εξώθησης χρησιμοποιήθηκε ως μία μέθοδος προσδιορισμού του οριακού φορτίου, στα πλαίσια της οποίας μετά από την διενέργεια της επαυξητικής διαδικασίας λαμβανόταν μια καμπύλη εξωτερικών φορτίων-μετακινήσεων (καμπύλη ικανότητας).

Προκειμένου να γίνει κατανοητό το βασικό υπόβαθρο επί του οποίου στηρίζεται ο υπολογισμός στα πλαίσια της ανάλυσης εξώθησης, θα πρέπει να γίνει μια αρχική αναφορά στις θεμελιώδεις έννοιές της. Οι έννοιες αυτές είναι η απαίτηση και η ικανότητα κυρίως αλλά και επιπροσθέτως η συμπεριφορά. Η συμπεριφορά της κατασκευής εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο η ικανότητα μπορεί να ικανοποιεί ή όχι την απαίτηση. Δηλαδή θα πρέπει η κατασκευή να έχει την ικανότητα να αντιστέκεται στην απαίτηση που επιβάλλει η σεισμική διέγερση έτσι ώστε η συμπεριφορά της να είναι συμβατή με τους στόχους που ενδεχομένως έχουν μπει για τον σχεδιασμό της. Επιπλέον, η διερεύνηση του

<sup>24</sup> Στην βιβλιογραφία μπορούν να αναφερθούν ποικίλες ονομασίες για την pushover, όπως στατική υπερωθητική ανελαστική ανάλυση.

«μεγέθους» της απαίτησης σε σχέση με το «μέγεθος» της ικανότητας παρέχει πληροφορία για την αναμενόμενη συμπεριφορά της υπάρχουσας κατασκευής με δεδομένη σχεδίαση φέροντος οργανισμού γενικότερα και δομικών στοιχείων ειδικότερα. Η ανάλυση εξώθησης, ως μια απλοποιημένη ανελαστική μέθοδος που στηρίζεται στον έλεγχο των μετακινήσεων, απαιτεί τον προσδιορισμό τριών βασικών παραμέτρων, δηλαδή της ικανότητας, της απαίτησης σε μετακίνηση και της συμπεριφοράς.

(α) **Ικανότητα:** Η ικανότητα της κατασκευής προκύπτει από την ικανότητα των επιμέρους δομικών στοιχείων που την αποτελούν. Ο προσδιορισμός της ικανότητας της κατασκευής σε συνθήκες στις οποίες διάφορες περιοχές των δομικών στοιχείων της έχουν εισέλθει στην ανελαστική περιοχή συμπεριφοράς απαιτεί την γνώση της συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων πέρα από το όριο διαρροής. Επομένως αποτελεί βασικό δεδομένο της ανάλυσης εξώθησης, η εισαγωγή στο υπολογιστικό προσομοίωμα των ανελαστικών χαρακτηριστικών των διατομών των δομικών στοιχείων (π.χ. διαγράμματα M-κ, διαγράμματα αλληλεπίδρασης ροπών-αξονικών δυνάμεων). Η προκύπτουσα καμπύλη ικανότητας είναι η γραφική παράσταση της σχέσης που συνδέει την τέμνουσα βάση μιας κατασκευής με την μετακίνηση σε ένα προκαθορισμένο σημείο, κατά κανόνα στην κορυφή της. Αυτονόητο είναι ότι η επιλεχθείσα μετακίνηση θα πρέπει να έχει την ίδια διεύθυνση με την διεύθυνση εισαγωγής των σεισμικών φορτίων όπως επίσης και ότι η τέμνουσα βάση συντίθεται από της δυνάμεις των κατακόρυφων στοιχείων της κατασκευής στη βάση της κατά τη συγκεκριμένη διεύθυνση εισαγωγής των σεισμικών φορτίων.

(β) **Απαίτηση:** Είναι γνωστό ότι κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης η κίνηση του εδάφους προκαλεί σύνθετες μετακινήσεις στην ανωδομή των κατασκευών, οι οποίες είναι μεταβαλλόμενες με το χρόνο. Για την παρακολούθηση της μεταβολής των μετακινήσεων αυτών απαιτείται προσομοίωση των δράσεων που επιβάλλει η σεισμική διέγερση. Στα πλαίσια της ανάλυσης εξώθησης, για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ένα σύνολο πλευρικών μετακινήσεων. Έτσι, για μια δεδομένη κατασκευή αλλά και για μια δεδομένη σεισμική διέγερση η απαίτηση σε μετακίνηση αποτελεί εκτίμηση της μέγιστης αναμενόμενης σεισμικής απόκρισης της κατασκευής. Αυτή η εκτιμώμενη απαίτηση σε μετακίνηση εκφράζεται μέσω του υπολογισμού της μετακίνησης- στόχου του σημείου που έχει επιλεγεί για τον σχεδιασμό της καμπύλης ικανότητας. Για τον υπολογισμό αυτής της μετακίνησης-στόχου δίνονται διάφορες μεθοδολογίες στα σχετικά κανονιστικά κείμενα (βλ. π.χ. ATC-40, FEMA356, EN1998-1,3, ΚΑΝ.ΕΠΕ).

(γ) **Συμπεριφορά:** Έχοντας ήδη καθορίσει την ικανότητα (με βάση τη σχεδίαση της καμπύλης εξώθησης) και την απαίτηση (μέσω του υπολογισμού της μετακίνησης-στόχου), το επόμενο βήμα είναι ο έλεγχος της συμπεριφοράς της κατασκευής. Με τον έλεγχο αυτόν επιχειρείται η εξασφάλιση ότι τα φέροντα αλλά και τα μη φέροντα στοιχεία δεν έχουν υποστεί βλάβες πέρα από τα όρια για το δεδομένο επίπεδο συμπεριφοράς (στάθμη επιτελεστικότητας) για το

οποίο έγινε η αποτίμηση της κατασκευής, θεωρώντας πάντα ότι η κατασκευή υποβάλλεται σε μετακινήσεις που αντιστοιχούν στην απαίτηση που τέθηκε για την μετακίνηση.

#### 2.4.1.2 Αδυναμίες, περιορισμοί και δυνατότητες της στατικής ανελαστικής ανάλυσης εξώθησης.

Η ανάλυση εξώθησης αποτελεί το πλέον διαδεδομένο υπολογιστικό "εργαλείο" για την αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας υφιστάμενων αλλά και νέων κτιρίων. Η δυνατότητα της να δίνει αποτελέσματα και πληροφορίες τις οποίες δεν είναι δυνατό να έχει ο μελετητής από τις κλασικές ελαστικές αναλύσεις δεν πρέπει να αποτελεί επιχείρημα για την απόκρυψη των αδυναμιών και περιορισμών που τίθενται κατά την εφαρμογή της. Η παρουσίαση των αδυναμιών αυτών αποτελεί υποχρέωση προς τους μηχανικούς που θα κληθούν να την εφαρμόσουν διότι θα τους προφυλάξει από την εσφαλμένη εντύπωση που πιθανώς θα δημιουργηθεί για την αξιοπιστία και τα όρια εφαρμογής της μεθόδου. Μια γενική αρχή που θα πρέπει να έχει κανείς κατά νου είναι ότι τα αποτελέσματα της ανάλυσης εξώθησης έχουν μεγαλύτερη ποιοτική παρά ποσοτική αξία<sup>25</sup>. Έτσι, με βάση τη λογική που εκτέθηκε, ακολούθως παρουσιάζονται οι βασικές αδυναμίες της ανάλυσης εξώθησης οι οποίες είναι εν συντομία οι εξής:

- Η ανάλυση εξώθησης στηρίζεται στην σημαντική παραδοχή ότι η απόκριση ενός πολυβάθμιου συστήματος σχετίζεται με την απόκριση ενός ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος. Αν εξαιρεθούν κάποια συστήματα στα οποία η θεμελιώδης ιδιομορφή είναι κυρίαρχη στην απόκριση, η παραπάνω παραδοχή δεν μπορεί να έχει γενική ισχύ. Πέραν τούτου όμως, ως γενική αρχή, εφόσον η ανάλυση εξώθησης είναι ανελαστική ανάλυση, κατά την εκτέλεση της πλαστικοποιούνται διάφορα σημεία ενός φορέα με συνέπεια η θεμελιώδης ιδιομορφή να μεταβάλλεται συνεχώς. Παρόλαυτα η επαύξηση των φορτίων γίνεται με βάση τη θεμελιώδη ιδιομορφή του ελαστικού συστήματος (δηλαδή του αρχικού πριν τις πλαστικοποιήσεις). Στις δικές μας όμως περιπτώσεις, όπου για τις ανάγκες της παρούσης διπλωματικής εξετάζονται μονώροφα πλαίσια η προσαυξητική δύναμη εφαρμόζεται επί της δοκού.
- Λόγω του γεγονότος ότι η ανάλυση εξώθησης λαμβάνει υπόψη την πρώτη μόνον ιδιομορφή ταλάντωσης για την κατανομή του στατικού τύπου σεισμικών φορτίων, υπάρχει περίπτωση να εμφανιστούν σοβαρές αποκλίσεις από την πραγματική απόκριση σε κάποια κτίρια ,για αυτό και

<sup>25</sup> Έχοντας επίγνωση της λογικής αυτής η παρούσα διπλωματική αναφέρεται σε όλο το εύρος της σε εξαγωγή ποιοτικών αποκλειστικά συμπερασμάτων.



η επιρροή των ανώτερων ιδιομορφών στη συνολική απόκριση είναι ιδιαίτερα σημαντική.

- Στα πλαίσια της ανάλυσης εξώθησης δεν αντιμετωπίζεται η προοδευτική απομείωση της δυσκαμψίας λόγω της ανακυκλιζόμενης φόρτισης του σεισμού, η οποία παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην δυναμική απόκριση της κατασκευής κατά τη διάρκεια της σεισμού. Επίσης ο στατικός χαρακτήρας της ανάλυσης εξώθησης εμποδίζει τη θεώρηση της απορρόφησης ενέργειας από την κατασκευή λόγω της δυναμικής απόκρισης (π.χ. ιξώδης απόσβεση) και θεωρεί μόνον την απορρόφηση ενέργειας μέσω των παραμορφώσεων.
- Θεωρείται μόνον η οριζόντια σεισμική φόρτιση. Η κατακόρυφη συνιστώσα της σεισμικής διέγερσης, που ενδεχομένως σε ειδικές περιπτώσεις έχει μεγάλη επιρροή στην απόκριση, δε λαμβάνεται υπόψη. Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. δηλώνει ότι στα πλαίσια της ανάλυσης εξώθησης μπορεί να αγνοηθεί η επιρροή της κατακόρυφης συνιστώσας. Ενδεχομένως τεχνικές θεώρησης της κατακόρυφης σεισμικής συνιστώσας στα πλαίσια της ανάλυσης εξώθησης να είναι διαθέσιμες, όμως σε ερευνητικό επίπεδο και χωρίς να έχουν την επαρκή τεκμηρίωση.
- Κατά την εφαρμογή της ανάλυσης εξώθησης διαχωρίζεται εμφανώς η ικανότητα (σχεδίαση της υπερωθητικής καμπύλης) από την απαίτηση (υπολογισμό της μετακίνησης-στόχου η οποία επιβάλλεται από μία σεισμική διέγερση). Αυτό όμως δεν είναι ακριβές αφού η ανελαστική απόκριση κατασκευής εξαρτάται σαφώς από τη σεισμική διέγερση και αντίστοιχα η ικανότητα της κατασκευής σχετίζεται πάντα με την απαίτηση της ίδιας της κατασκευής, δηλαδή από την παραμόρφωση που «απαιτεί» η εκάστοτε σεισμική διέγερση.

Παρά τις αδυναμίες της συγκεκριμένης μεθόδου , για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής θεωρήθηκε ως ικανή να μας δώσει τα απαραίτητα ποιοτικά αποτελέσματα για την εξαγωγή συμπερασμάτων, νοουμένου και ότι οι αναλύσεις αφορούν μονώροφα πλαίσια.

Έτσι η χρήση της μεθόδου αυτής έδωσε τις εξής πληροφορίες<sup>26</sup>:

- Ρεαλιστική εκτίμηση της κατανομής της έντασης σε μια κατασκευή αφού έχει τη δυνατότητα υπολογισμού των δυνάμεων που αναπτύσσονται στα δομικά στοιχεία στην ανελαστική περιοχή συμπεριφοράς, δυνατότητα που ως γνωστό δεν μπορούν να έχουν οι ελαστικές μέθοδοι ανάλυσης.
- Εκτιμά τις απαιτούμενες παραμορφώσεις των δομικών στοιχείων που μέσω της ανελαστικής τους συμπεριφοράς απορροφούν σεισμική ενέργεια.

<sup>26</sup> Αναφερόμαστε στην γενικότερη εφαρμογή της μεθόδου σε όλες τις αναλύσεις της διπλωματικής αυτής εργασίας.

- Έδωσε πολύτιμες πληροφορίες για την επιρροή της απομείωσης της αντοχής αλλά και για την επιρροή της αστοχίας μεμονωμένων δομικών στοιχείων στη συνολική αντοχή του συστήματος.
- Κατανόηση συμπεριφοράς φορέα.

#### 2.4.2 Καμπύλες ικανότητας πλαισίων που εξετάστηκαν

Αρχικά έγιναν αναλύσεις μέσω του λογισμικού OpenSees για να οδηγηθούμε στις καμπύλες ικανότητας των διαφόρων εξεταζόμενων πλαισίων για να είναι δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την απόκριση τους, και την αλλαγή της αρχικής συμπεριφοράς του πλαισίου με την προσθήκη του στοιχείου λικνισμού καθώς και των παραγόντων που την επηρεάζουν.

Παρουσιάζονται παρακάτω τα προκύπτον διαγράμματα των καμπύλων ικανότητας ανά περίπτωση μεταβαλλόμενου λόγου  $H/B$ ,  $B/L$  για ένα, δύο και τρία ανοίγματα. Σημειώνεται επίσης ότι για κάθε περίπτωση παρουσιάζεται και ο λόγος των δυσκαμψιών του πλαισίου με το στοιχείο λικνισμού που εμφανίζεται πριν το ανασήκωμα του στοιχείου, με την δυσκαμψία του αντίστοιχου αρχικώς ελεύθερου πλαισίου.

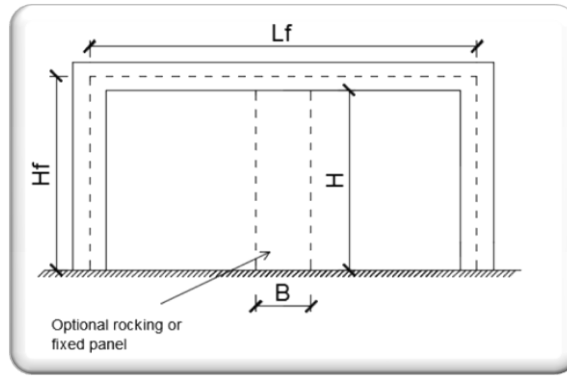
Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για πλαίσια ενισχυμένου σκυροδέματος που απλοποιητικά θεωρούνται ότι λειτουργούν ελαστικά. Τα πλαίσια αυτά αποτελούνται από υποστυλώματα διατομής  $0.50\text{m} \times 0.60\text{m}$  και από κολώνες διατομών  $0,25\text{m} \times 0.50\text{m}$ , ενώ το πάχος του στοιχείου λικνισμού είναι  $0,25\text{m}$  (κάθετο στο επίπεδο του πλαισίου). Το μέτρο ελαστικότητας του μελών του κυρίου πλαισίου είναι ίσο με  $E_f=30\text{GPa}$ , ενώ το μέτρο ελαστικότητας του στοιχείου λικνισμού,  $E_w$ , θεωρείται ως μεταβλητή παράμετρος. Για τα κατασκευαστικά μέλη του κυρίου πλαισίου ( υποστυλώματα και δοκοί ), η ρηγματωμένη δυσκαμψία λήφθηκε υπόψη βάση της συνήθους υπόθεσης του Ευρωκώδικα, δηλαδή η ενεργός δυσκαμψία να είναι ίση με την μισή της γεωμετρικής :

$$EI_{eff} = 0.5EI_g \quad (2.1)$$

Εφαρμόζεται στο μοντέλο κατακόρυφο κατανεμημένο φορτίο  $q = 60 \text{ KN/m}$  κατά μήκος της δοκού και κατακόρυφο φορτίο ίσο με το μισό του βάρους<sup>27</sup> του στοιχείου λικνισμού στην κορυφή του στοιχείου.

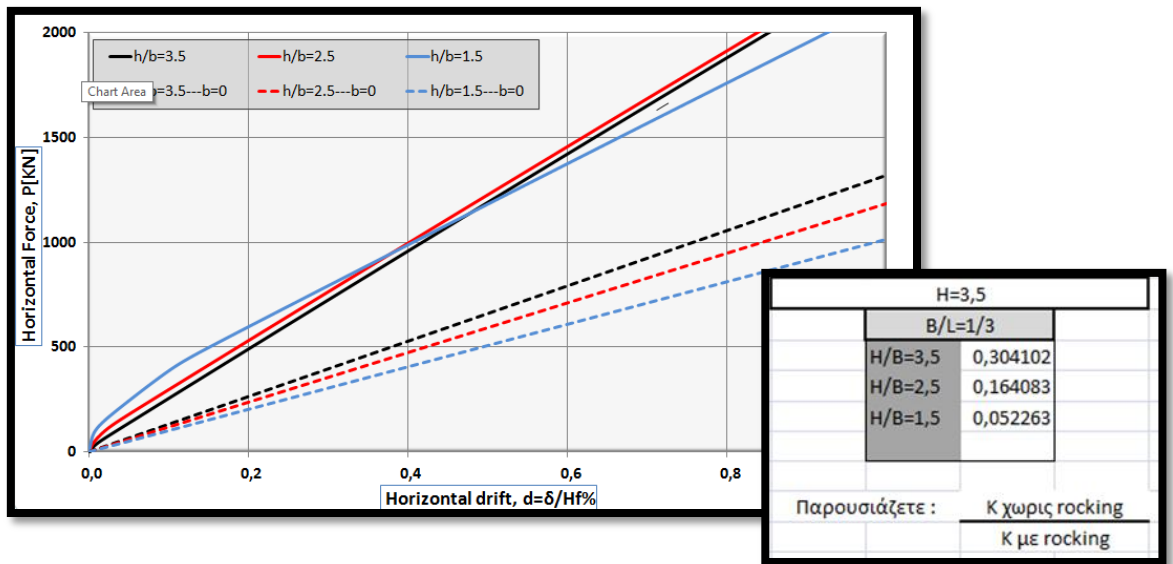
<sup>27</sup> Θεωρείται ότι το μισό παραλαμβάνεται από το έδαφος και δεν επιδρά στην απόκριση του στοιχείου.

2.4.2.1 Καμπύλες ικανότητας πλαισίων ενός ανοίγματος.

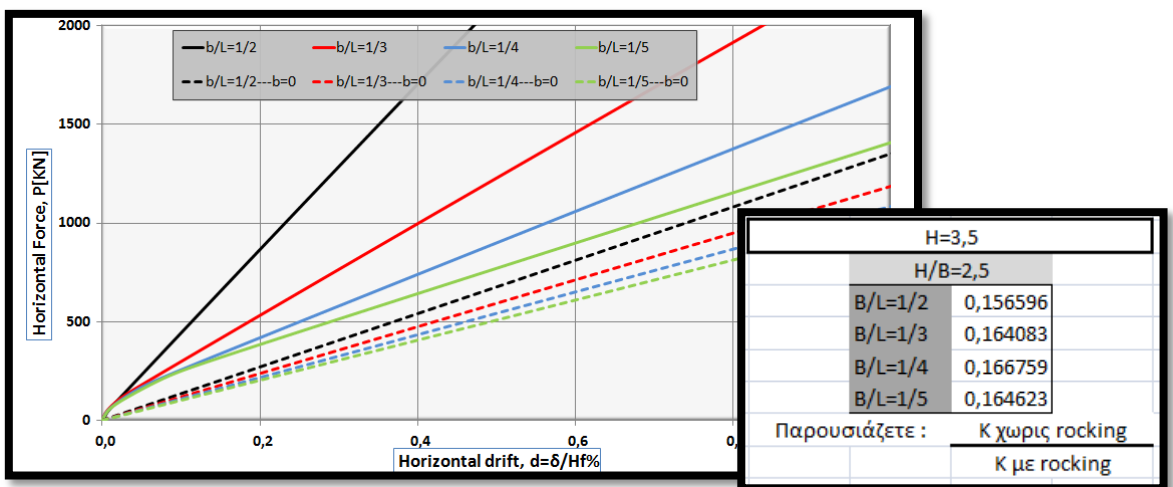


Εικόνα 2.13 : Διαμόρφωση πλαισίου ενός ανοίγματος<sup>28</sup>

**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**



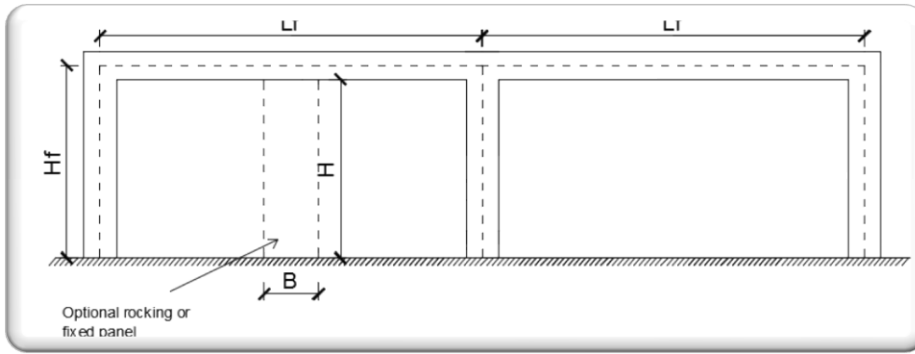
Διάγραμμα 2.2 : Καμπύλες ικανότητας για πλαίσια ενός ανοίγματος για μεταβαλλόμενο λόγο H/B.



Διάγραμμα 2.3 : Καμπύλες ικανότητας για πλαίσιο ενός ανοίγματος για μεταβαλλόμενο λόγο B/Lf

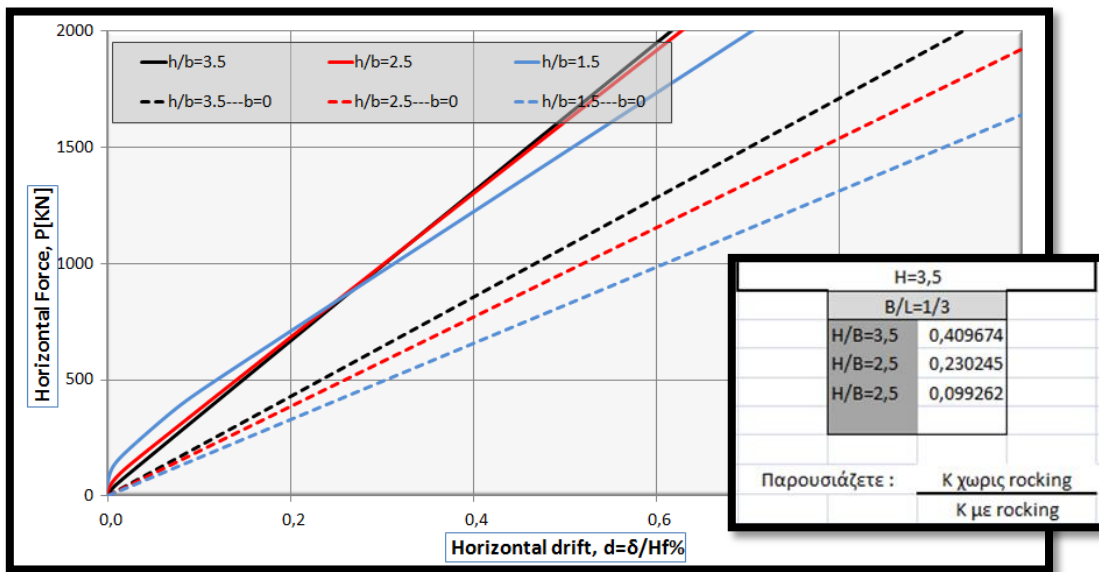
<sup>28</sup> Οι διακεκομμένες γραμμές-καμπύλες αναφέρονται στις περιπτώσεις ελεύθερων πλαισίων.

2.4.2.2 Καμπύλες ικανότητας πλαισίων δύο ανοιγμάτων

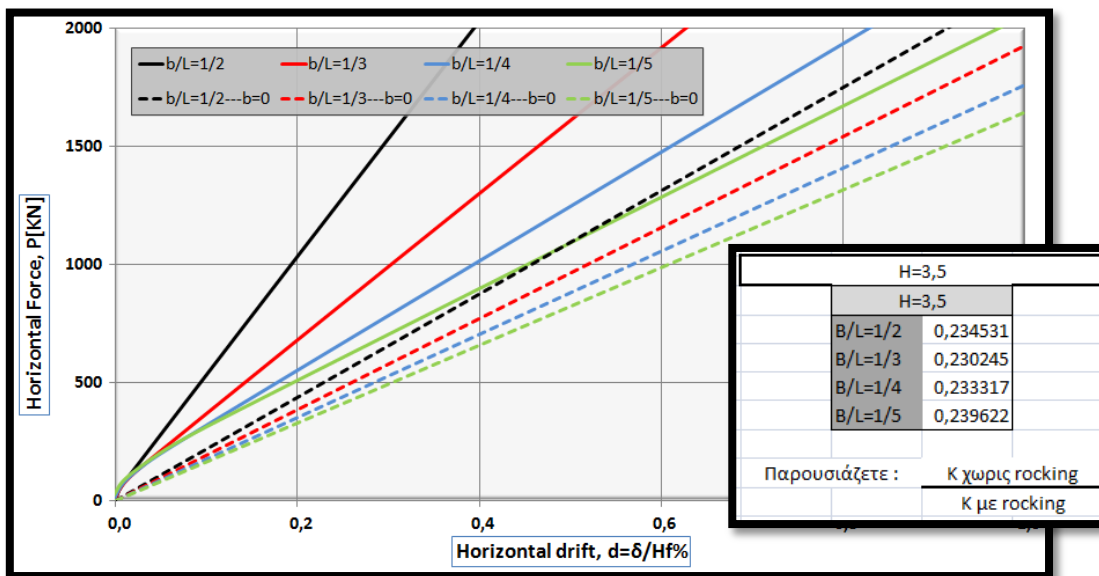


Εικόνα 2.14 : Διαμόρφωση πλαισίου δύο ανοιγμάτων.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

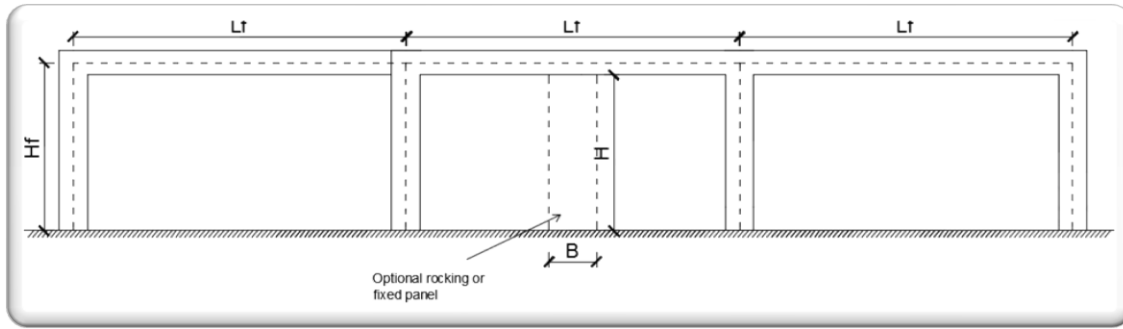


Διάγραμμα 2.4 : Καμπύλες ικανότητας για πλαίσια δύο ανοιγμάτων για μεταβαλλόμενο H/B



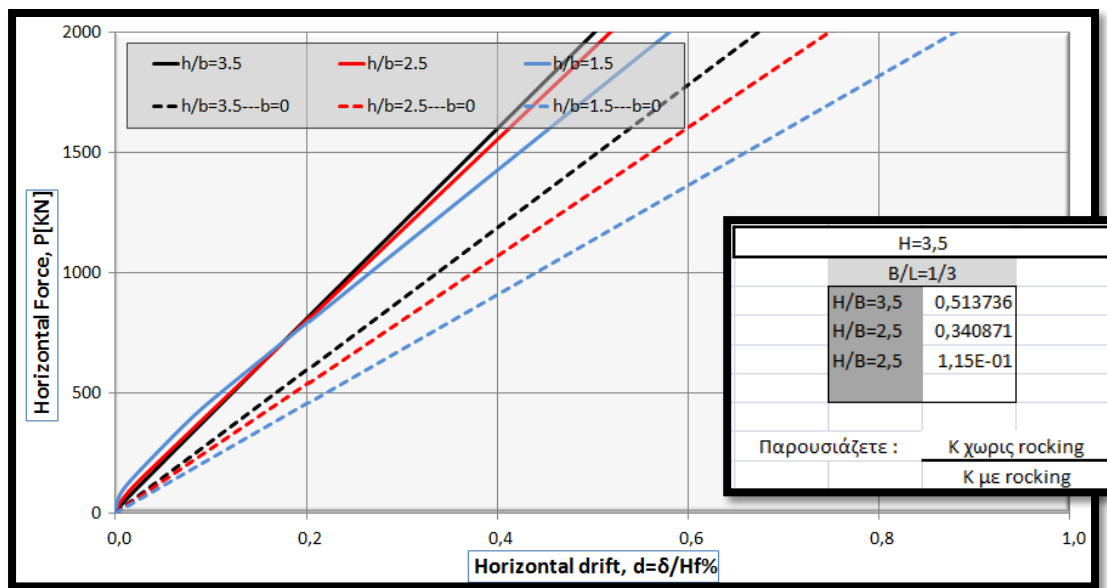
Διάγραμμα 2.5 : Καμπύλες ικανότητας για πλαίσια δύο ανοιγμάτων για μεταβαλλόμενο B/Lf

2.4.2.3 Καμπύλες ικανότητας πλαισίων τριών ανοιγμάτων.

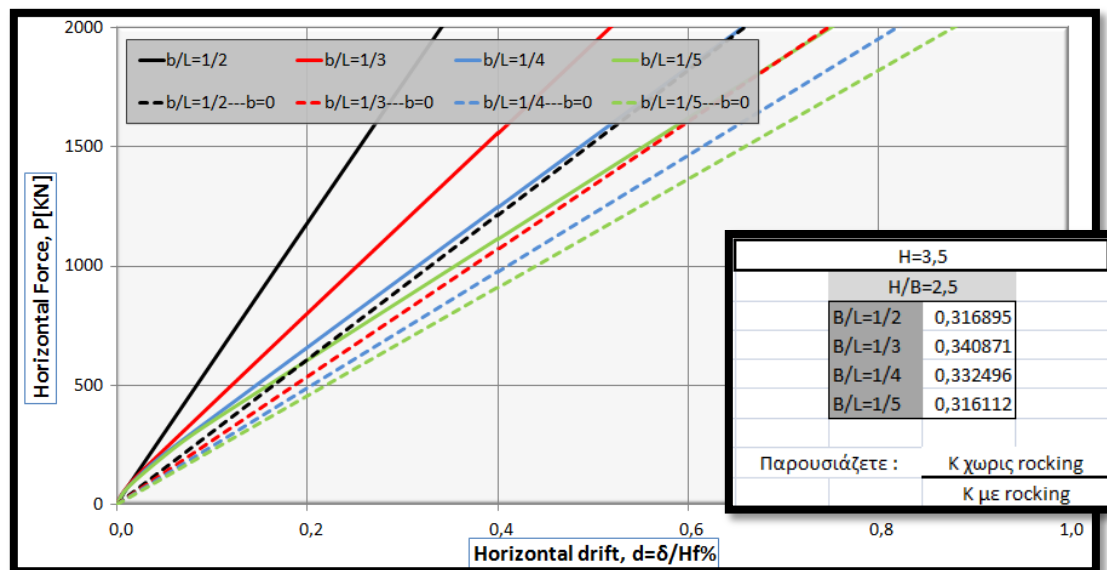


Εικόνα 2.15: Διαμόρφωση πλαισίου τριών ανοιγμάτων.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



Διάγραμμα 2.6: Καμπύλες ικανότητας για πλαίσια τριών ανοιγμάτων για μεταβαλλόμενο λόγο H/B



Διάγραμμα 2.7 : Καμπύλες ικανότητας για πλαίσια τριών ανοιγμάτων για μεταβαλλόμενο λόγο B/Lf.

### 2.4.3 Συμπεράσματα

Στο υποκεφάλαιο 2.4.2 , εξετάζεται η επίδραση της εισαγωγής του στοιχείου λικνισμού σε διαφορετικές περιπτώσεις μονώροφων πλαισίων, διαφορετικών χαρακτηριστικών και πλήθους ανοιγμάτων. Το στοιχείο λικνισμού, έχει την δυνατότητα ανασηκώματος και στις δύο πλευρές, άνω και κάτω.

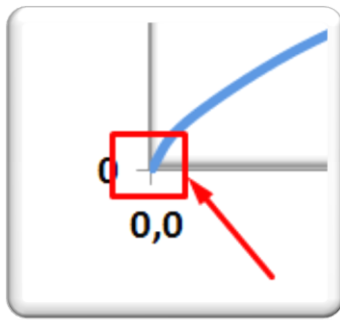
Όπως παρατηρούμε από τις καμπύλες ικανότητες των ανώτερων διαγραμμάτων, καθώς αναμένετο, τόσο η ικανότητα όσο και η ακαμψία αυξάνει , αυξανόμενου του λόγου  $B/L_f$ , πχ καθώς το πλάτος  $B$  του στοιχείου λικνισμού αυξάνει σε σχέση με το αντίστοιχο μήκος ανοίγματος  $L_f$ . Αυτή η εικόνα αναμενόταν, νοουμένου ότι καθώς το ανασήκωμα του στοιχείου περιορίζεται περισσότερο από την δοκό για μεγαλύτερα πλάτη στοιχείου, εξαιτίας της μεγαλύτερης συνολικής κατακόρυφης μετακίνησης της δοκού που απαιτείται, μέρος της οποίας τείνει να υπάρξει στα άκρα του όπου η αντίσταση μετακίνησης της δοκού είναι ισχυρότερη.

Αποδείχθηκε επίσης ότι τόσο η ικανότητα όσο και η δυσκαμψία, μειωμένου του λόγου  $H/B$ , για παραμένον σταθερό λόγο  $B/L_f$  , δεν μεταβάλλονται ουσιαστικά, πχ καθώς το πλάτος  $B$  αυξάνει, για να διατηρηθεί ο λόγος  $B/L_f$  σταθερός, αυξάνει αναλόγως και το μήκος ανοίγματος ανάλογα<sup>29</sup>. Αυτή η εικόνα αναμενόταν, νοουμένου ότι καθώς το ανασήκωμα του στοιχείου περιορίζεται περισσότερο από την δοκό για μεγαλύτερα πλάτη στοιχείου μ εξαιτίας της μεγαλύτερης συνολικής κατακόρυφης μετακίνησης της δοκού που απαιτείται, την ίδια στιγμή ο περιορισμός αναιρείται από την παράλληλη αύξηση του μήκους του ανοίγματος. Βάση αυτού, μπορεί να στοιχειοθετηθεί η διαπίστωση πως για σταθερό λόγο  $B/L_f$  ουδεμία μεταβολή στο ενισχυμένο πλαίσιο προκύπτει κατά την μεταβολή των χαρακτηριστικών του παραπάνω λόγου.

Όσον αφορά τον αριθμό των ανοιγμάτων κατά την οριζόντια διεύθυνση του φορέα παρατηρείτε αρχικώς μία αύξηση στην ικανότητα και στην ακαμψία , αυξανόμενου του αριθμού των ανοιγμάτων. Αυτή η εικόνα αναμενόταν, εφόσον η αύξηση των ανοιγμάτων, προϋποθέτει περισσότερα κατακόρυφα στοιχεία ακαμψίας (υποστυλώματα) άρα ισχυρότερη απόκριση πλαισίου στην παραλαβή μετατοπίσεων. Όσον αφορά βέβαια την προσθήκη του στοιχείου λικνισμού παρατηρείτε μια μειούμενη ισχυροποίηση της αποκρίσεως του πλαισίου όσον αφορά την ικανότητα και την ακαμψία με την αύξηση των ανοιγμάτων. Ένα αναμενόμενο αποτέλεσμα, αφού όσο περισσότερο το πλήθος των ανοιγμάτων,

<sup>29</sup> Η ταυτόχρονη αυτή μεταβολή των μεγεθών  $L_f$  και  $B$  , παραμέτρων που η αύξηση τους μειώνει και αυξάνει αντίστοιχα την δυσκαμψία και την ικανότητα των πλαισίων , δεν δίνει ικανό τρόπο σύγκρισης της επιρροής των λόγων αυτών στην απόκριση των πλαισίων.

τόσο μικρότερος και ο λόγος "εμβαδού" επιρροής του στοιχείου λικνισμού ως προς το εμβαδό του συνολικού πλαισίου.



**Εικόνα 2.16 :** Περιοχή αναφερόμενης δυσκαμψίας πλαισίων με στοιχείο λικνισμού.

Όσον αφορά τους λόγους ακαμψιών των συστημάτων αποδείχθηκε ότι η μεταβολή του μήκους ανοίγματος  $L_f$ , προκαλεί ανάλογη μεταβολή στην ακαμψία τόσο του ελεύθερου πλαισίου όσο και του πλαισίου με το στοιχείο λικνισμού και έτσι η επιρροή παραμένει αποκλειστικώς ανάλογη της αύξησης αυτής ανεξαρτήτως της υπάρξεως του στοιχείου λικνισμού ή όχι. Σημειώνεται εδώ, πως στα πλαίσια με την προσθήκη του στοιχείου λικνισμού, αναφερόμαστε στην ακαμψία του πλαισίου στον αρχικός εμφανιζόμενο κλάδο ( Εικόνα 2.16).

Είναι επίσης ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι η μη γραμμική απόκριση της κατασκευής στην περίπτωση του ελαστικού πλαισίου περιορίζεται κυρίως στην αρχή της απόκρισης ( σε μικρούς λόγους drift), ενώ η μετά-λικνιστική απόκριση δείχνει πρακτικώς μια σταθερή δυσκαμψία. Επιπροσθέτως, η γενική απόκριση μπορεί, στις περισσότερες περιπτώσεις, να προσεγγιστεί από την απόκριση ενός γραμμικού συστήματος.

## 2.5 Υπολογισμός στοχευμένων μετακινήσεων.

### 2.5.1 Εισαγωγή.

Για τον υπολογισμό της στοχευμένης μετακίνησης, ο ακριβέστερος τρόπος είναι με μη-γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας. Η μέθοδος αυτή, όμως, απαιτεί εξειδικευμένα προγράμματα και σημαντικό υπολογιστικό χρόνο, ενώ τα αποτελέσματα δεν είναι κατ'ανάγκη αξιόπιστα, επειδή εξαρτώνται από την επιλογή των σεισμικών διεγέρσεων που θα χρησιμοποιηθούν στις αναλύσεις. Γι'αυτό και απαιτούνται πολλές τέτοιες επιλύσεις με σεισμικές διεγέρσεις διαφορετικών χαρακτηριστικών.

Ως μια απλοποίηση του προβλήματος, η μετακίνηση μπορεί να υπολογιστεί με προσεγγιστικές μεθόδους (πχ μέθοδος των συντελεστών) ή με στατική μη-γραμμική ανάλυση (μέθοδος pushover), οι οποίες όμως οδηγούν σε αμφισβητήσιμη ακρίβεια αποτελεσμάτων. Συνήθως χρησιμοποιείται η στατική μη-γραμμική ανάλυση, γνωστή και ως Μέθοδος Pushover, η οποία όπως έχει προαναφερθεί ικανοποιεί της ανάγκες της παρούσης διπλωματικής αφού ζητούμενο είναι η εξαγωγή ποιοτικών συμπερασμάτων και όχι απαραίτητα ποσοτικών.

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορες εναλλακτικές μεθοδολογίες εφαρμογής της στατικής μη-γραμμικής ανάλυσης, όπως η μέθοδος ATC-40, η μέθοδος N2, η ιδιομορφική στατική μη-γραμμική ανάλυση (modal pushover), η προσαρμοζόμενη στατική μη-γραμμική ανάλυση (adaptive pushover) κ.α.

Στη παρούσα εργασία η στοχευόμενη μετακίνηση υπολογίστηκε κάνοντας χρήση της μεθόδου ATC-40. Νοούμενου ότι στην παρούσα διπλωματική ασχολούμαστε με μονοβάθμια συστήματα η αρχική περιγραφή<sup>30</sup> της μεθόδου γίνεται μόνο στο βαθμό που αφορά τις ανάγκες της παρούσης. Για περισσότερες πληροφορίες επί της μεθόδου, καλό είναι ο αναγνώστης, να ανατρέξει σε σχετική βιβλιογραφία<sup>31</sup>.

Επίσης, στο παρόν κεφάλαιο όπου τα συστήματα αποκρίνονται ελαστικά ο υπολογισμός των στοχευμένων μετακινήσεων βασίζεται καθαρά στην γενική φιλοσοφία<sup>32</sup> της μεθόδου. Εν συνεχεία σε επόμενο κεφάλαιο των ανελαστικών αναλύσεων η μέθοδος θα χρησιμοποιηθεί εκτενέστερα και η σχετική περιγραφή της μεθοδολογίας της θα παρουσιαστεί αναλυτικότερα. Για τις ανάγκες του παρόντος αρκούμαστε στην γενική φιλοσοφία υπολογισμού.

## 2.5.2 Γενική φιλοσοφία υπολογισμού.

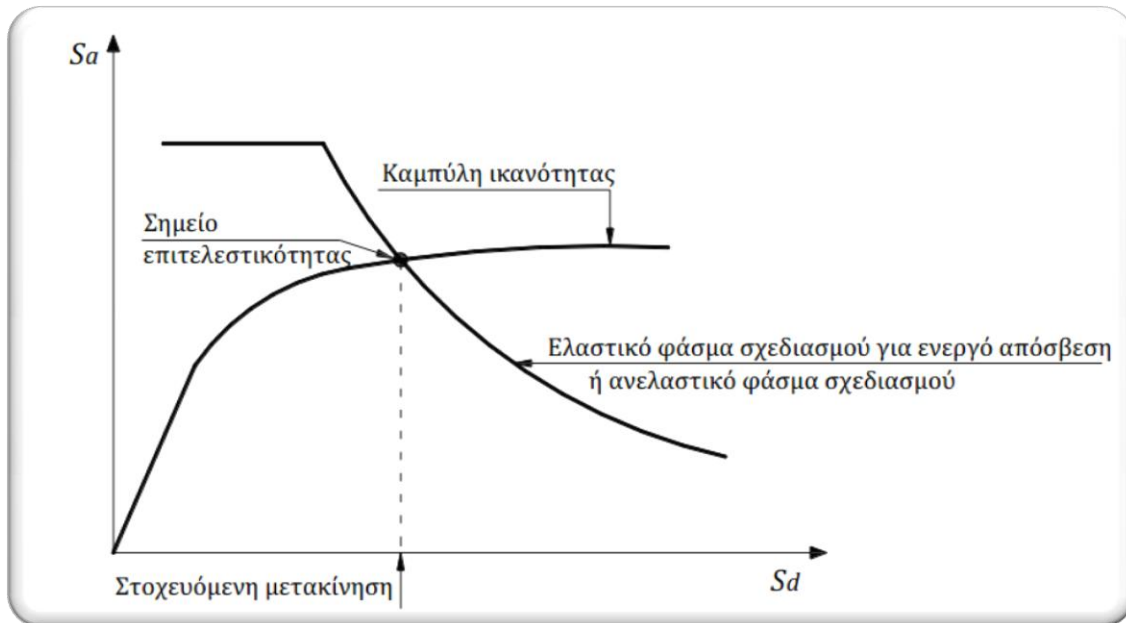
Η γενική φιλοσοφία υπολογισμού που ακολουθήθηκε στην παρούσα φάση, είναι ότι για τη στοχευμένη μετακίνηση η ικανότητα της κατασκευής να παραλαμβάνει σεισμικά φορτία (capacity) πρέπει να είναι ίδια με την αντίστοιχη απαίτηση σύμφωνα με το φάσμα σχεδιασμού (demand). Δηλαδή, το σημείο επιτελεστικότητας προκύπτει ως το σημείο τομής του φάσματος ικανότητας της κατασκευής (το φάσμα ικανότητας προκύπτει από την μετατροπή της καμπύλης ικανότητας σε μορφή ADRS-η διαδικασία περιγράφεται παρακάτω-) και του ελαστικού φάσματος, στην περίπτωση μας, (επίσης σε μορφή ADRS) για την αντίστοιχη πλαστιμότητα ή του ελαστικού φάσματος για την ενεργό απόσβεση. (Εικόνα 2.17)

<sup>30</sup> Στο επόμενο κεφάλαιο των ανελαστικών αναλύσεων γίνεται μια πιο εκτενέστερη παρουσίαση της μεθόδου.

<sup>31</sup> Ψυχάρης Ιωάννης (2015) : Σημειώσεις αντισεισμικής τεχνολογίας, τεύχος 2.

<sup>32</sup> Στα μονοβάθμια ελαστικά, δεν χρειάζεται υπολογισμός αποσβέσεως, κάτι που διευκολύνει υπερβολικά τον χρόνο υπολογισμού των στοχευμένων μετακινήσεων.





Εικόνα 2.17 : Προσδιορισμός της στοχευόμενης μετακίνησης του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος.

Η ακρίβεια που επιτυγχάνεται με αυτές τις "στατικές" μεθόδους επαναλαμβάνεται για ακόμη μία φορά ότι δεν είναι γενικά ικανοποιητική. Παρόλαυτα, όσον αφορά τις ανάγκες της παρούσης έρευνας, όπου μελετώνται μονοβάθμια συστήματα, κρίνεται ικανοποιητική ως προς την εξαγωγή ποιοτικά ορθών αποτελεσμάτων.

Στο παρόν κεφάλαιο δεν θα γίνει κάποια περαιτέρω αναφορά στην μέθοδο ATC-40, εφόσον η γενική φιλοσοφία των μεθόδων αυτών αρκεί για να μας οδηγήσει στα ζητούμενα αποτελέσματα.

### 2.5.3 Στοχευμένες μετακινήσεις πλαισίων που εξετάστηκαν.

Αφού εξάχθηκαν κάποια αρχικά συμπεράσματα από τις καμπύλες ικανότητας, για κάθε μια εκ των περιπτώσεων, έγινε αποτίμηση της σεισμικής τους συμπεριφοράς για συγκεκριμένο φάσμα σχεδιασμού κατά ΕΚ8. Για τις ανάγκες της παρούσης οι υπολογισμοί έγιναν θεωρώντας :

- εδαφική επιτάχυνση αναφοράς  $\alpha_{ggR}=0.24g$  ,
- Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Ζ2 ,
- κατηγορία σπουδαιότητας ΙΙ
- κατηγορία εδάφους Β.

Ακολουθως, υπολογίζεται η αναμενόμενη μετακίνηση της κατασκευής (στοχευμένη μετακίνηση ) που ορίζει το σημείο επιτελεστικότητας (performance point ) της κατασκευής γι' αυτό το σεισμό.

Ο υπολογισμός της μετακίνησης αυτής ανά περίπτωση έγινε ακολουθώντας την γενική φιλοσοφία υπολογισμού που αναπτύχθηκε στο υποκεφάλαιο 2.5.2, προσαρμοσμένη-απλοποιημένη για ελαστικά δρών μονοβάθμιο σύστημα .

Συνοπτικώς τα βήματα για κάθε περίπτωση είναι:

- Μετατροπή της καμπύλης ικανότητας σε ADRS:

$$Sa = \frac{P}{mol} \text{ και } Sd = \delta$$

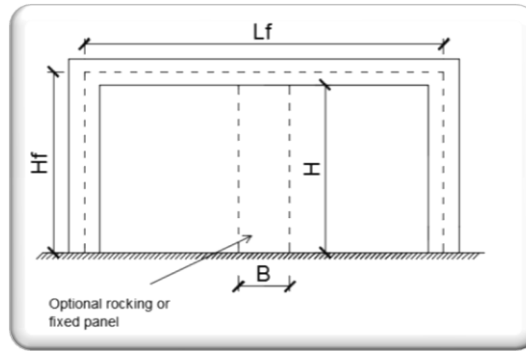
- Μετατροπή του ελαστικού φάσματος σχεδιασμού σε ADRS:

$$Sd = \frac{T^2}{4 \cdot \pi^2} \cdot Se$$

- Εύρεση σημείου τομής, το οποίο αντιστοιχεί στην στοχευμένη μετακίνηση.

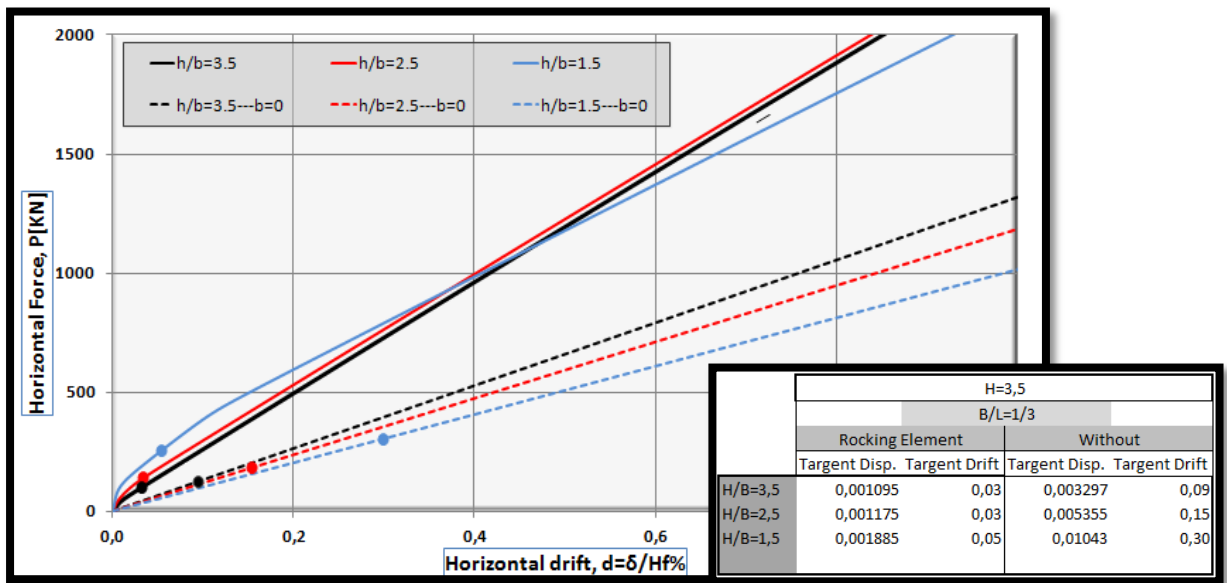
Ακολουθώντας τα παραπάνω βήματα οδηγηθήκαμε στις στοχευμένες μετακινήσεις, όπως αυτές παρουσιάζονται εν συνεχεία στις διάφορες εξεταζόμενες περιπτώσεις πλαισίων.

2.5.3.1 Στοχευμένες μετακινήσεις πλαισίων ενός ανοίγματος.

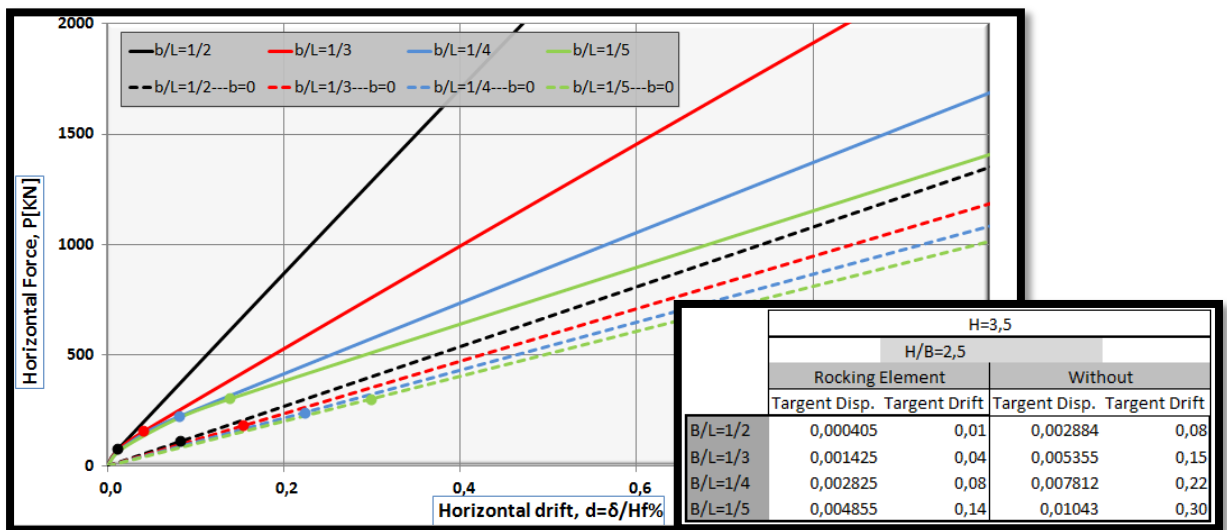


Εικόνα 2.18: Διαμόρφωση πλαισίου ενός ανοίγματος.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

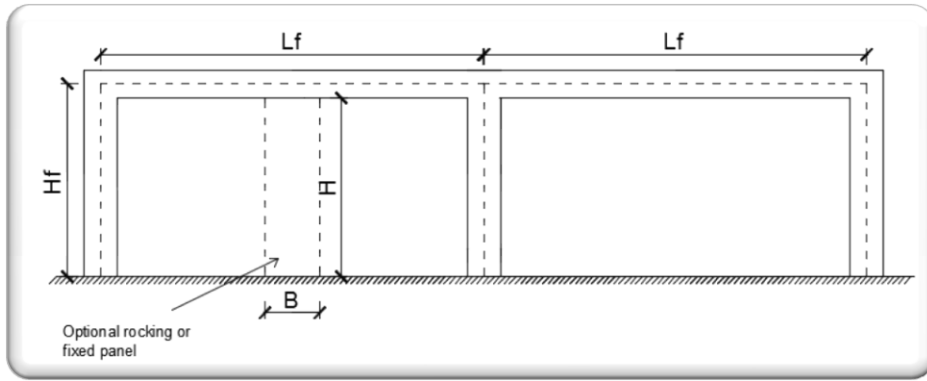


Διάγραμμα 2.8 : Στοχευμένες μετακινήσεις για πλαίσια ενός ανοίγματος για μεταβαλλόμενο λόγο H/B.



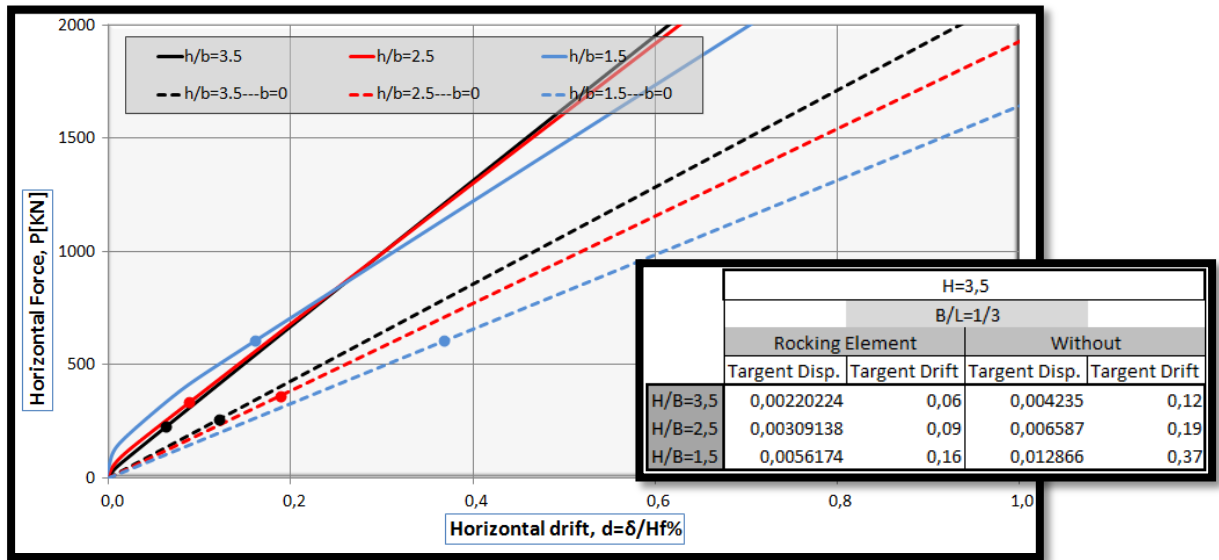
Διάγραμμα 2.9 : Στοχευμένες μετακινήσεις για πλαίσια ενός ανοίγματος για μεταβαλλόμενο λόγο B/Lf

2.5.3.2 Στοχευμένες μετακινήσεις πλαισίων δύο ανοιγμάτων

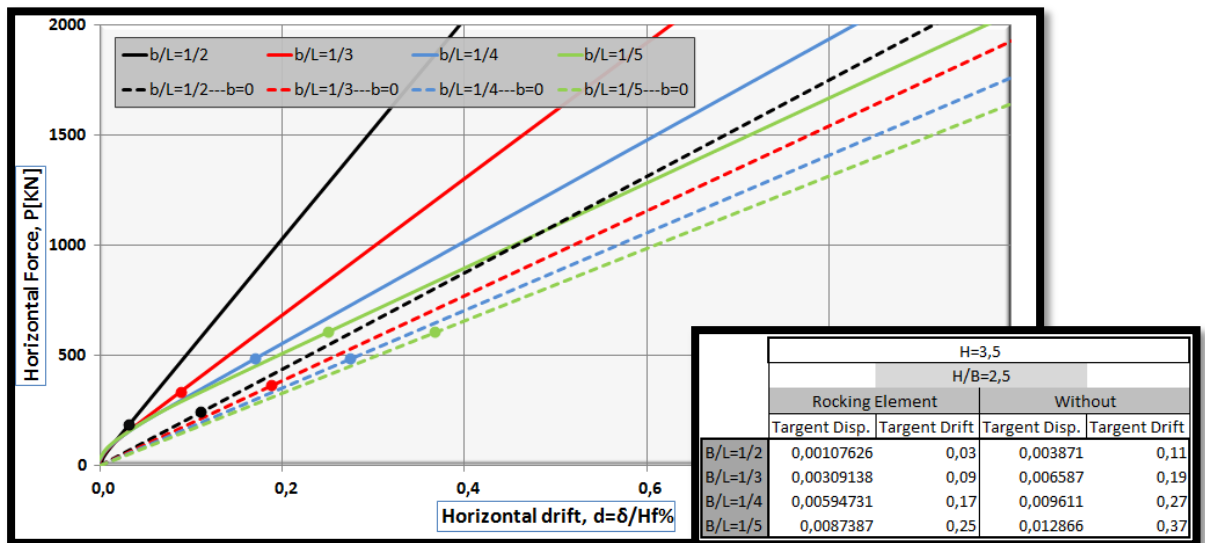


Εικόνα 2.19 : Διαμόρφωση πλαισίου δύο ανοιγμάτων

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

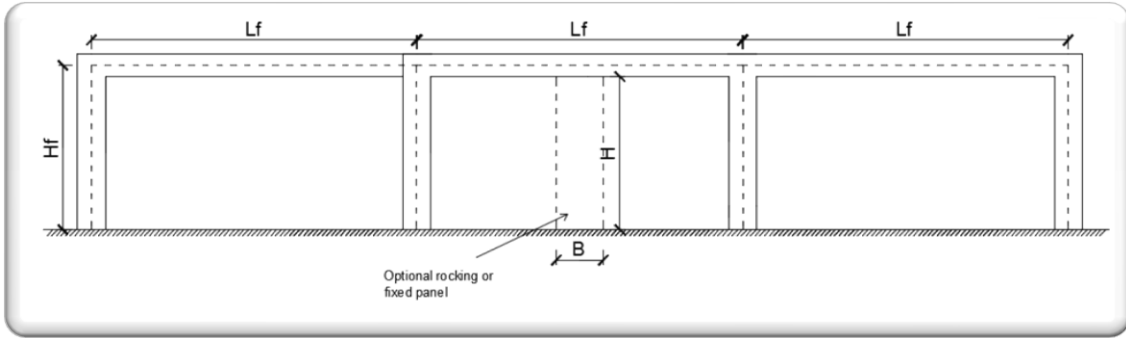


Διάγραμμα 2.10: Στοχευμένες μετακινήσεις για πλαίσια δύο ανοιγμάτων για μεταβαλλόμενο λόγο H/B.



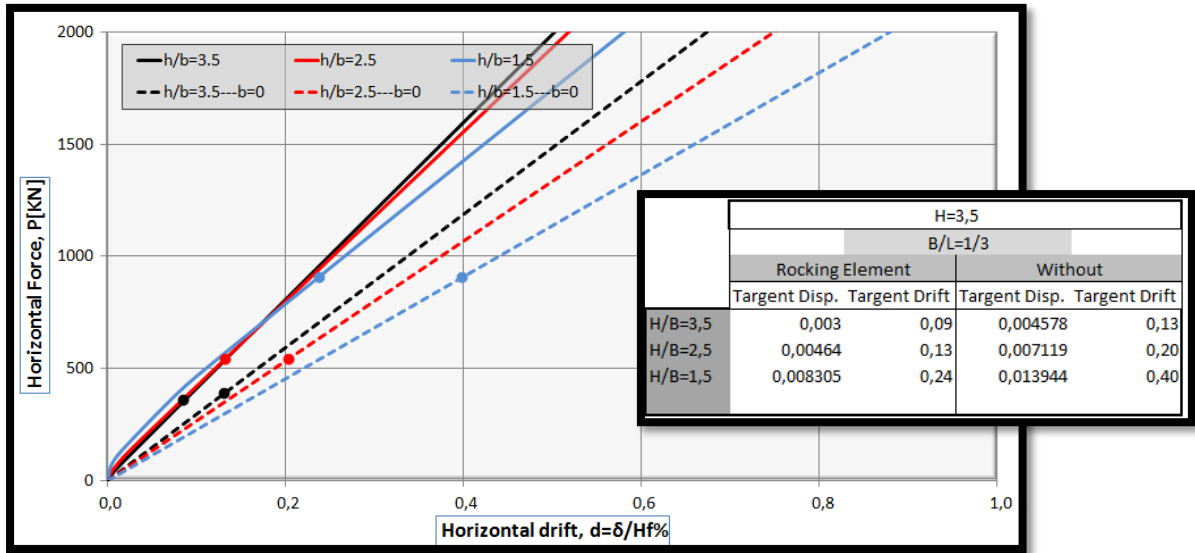
Διάγραμμα 2.11 : Στοχευμένες μετακινήσεις για πλαίσια δύο ανοιγμάτων για μεταβαλλόμενο λόγο B/Lf.

2.5.3.3 Στοχευμένες μετακινήσεις πλαισίων τριών ανοιγμάτων

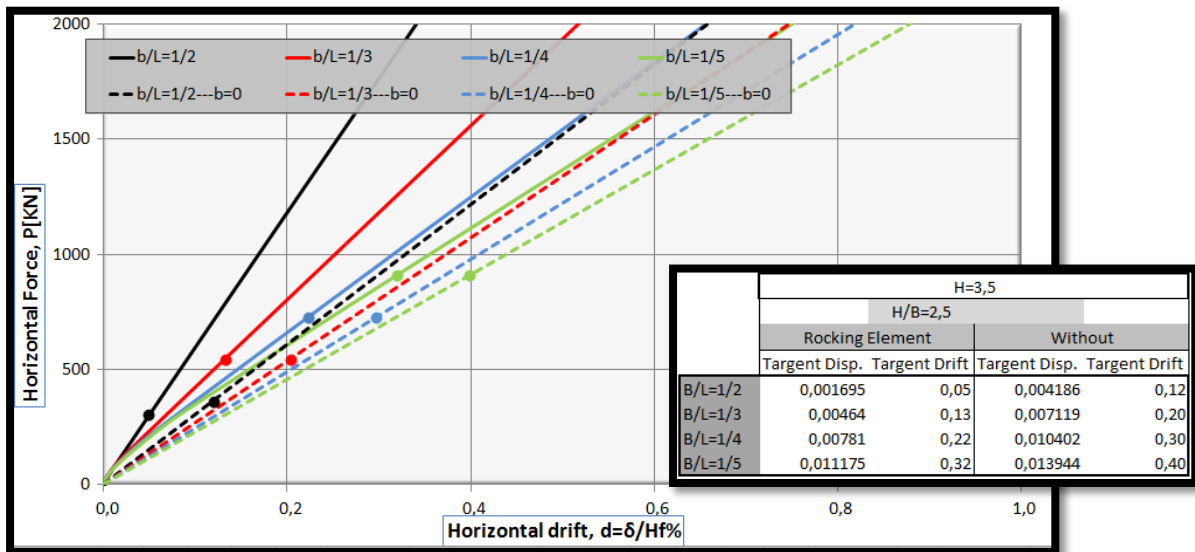


Εικόνα 2.20 : Διαμόρφωση πλαισίου τριών ανοιγμάτων.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ



Διάγραμμα 2.12: Στοχευμένες μετακινήσεις για πλαίσια τριών ανοιγμάτων για μεταβαλλόμενο λόγο  $H/B$ .



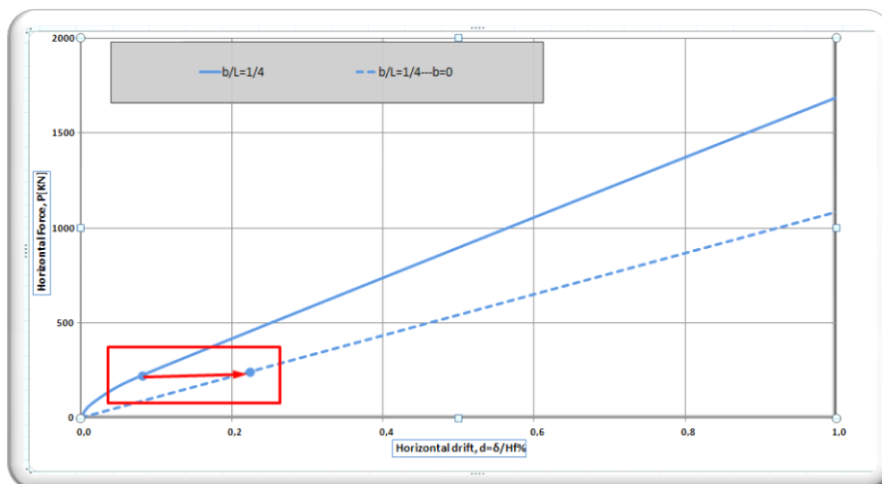
Διάγραμμα 2.13: Στοχευμένες μετακινήσεις για πλαίσια τριών ανοιγμάτων για μεταβαλλόμενο λόγο  $B/L_f$

### 2.5.4 Συμπεράσματα.

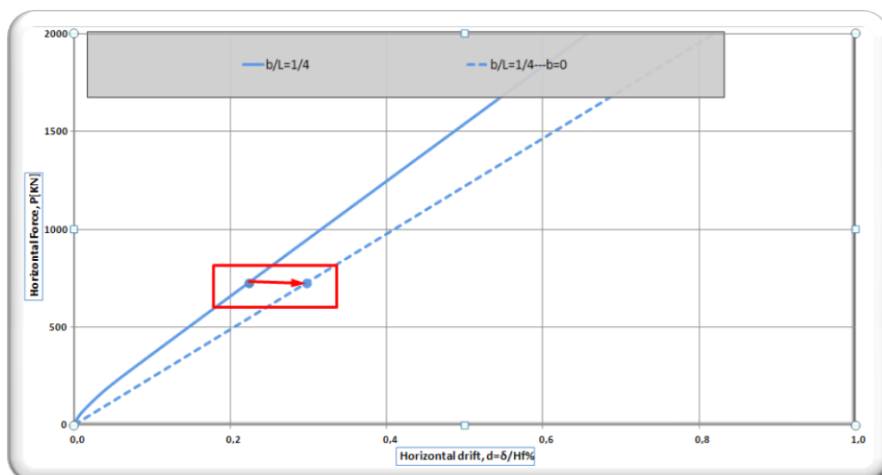
Στην πρώτη φάση ελαστικών αναλύσεων μπορούμε να εξάγουμε μετά και τον υπολογισμό της στοχευμένης μετακίνησης κάποια ποιοτικά συμπεράσματα ως προς την απόκριση των πλαισίων και την βελτίωση της αποκρίσεως τους με την προσθήκη του στοιχείου λικνισμού. Παρατηρείται λοιπόν, μια αρκούντως ικανοποιητική μείωση της στοχευμένης μετακίνησης ακόμη και στην ακραία περίπτωση που μελετήθηκε πλαίσιο τριών ανοιγμάτων, με μικρό λόγο  $B/L_f$  (Διάγραμμα 2.13).

Ως μια γενική παραμετρική διαπίστωση η οποία ισχύει για την εμφάνιση αυτού του "κέρδους", μείωση δηλαδή της προκύπτουσας στοχευμένης μετακίνησης με την προσθήκη στοιχείου λικνισμού, αποτελούν τα παρακάτω:

- Το κέρδος αυτό, είναι μεγαλύτερο όσο μικρότερο το πλήθος των ανοιγμάτων του φορέα για προσθήκη του ίδιου στοιχείου λικνισμού. (πχ Εικόνα 2.20,2.21 )



Εικόνα 2.21 : "Κέρδος" για πλαίσιο ενός ανοιγματος με λόγο  $B/L=1/4$ .



Εικόνα 2.22: "Κέρδος" για πλαίσιο τριών ανοιγμάτων με λόγο  $B/L=1/4$

- Το κέρδος αυτό επηρεάζεται άμεσα από το πάχος του προστιθέμενου στοιχείου σε σχέση με το μήκος ανοίγματος πλαισίου, δηλαδή όσο μεγαλύτερος ο λόγος  $B/L_f$  τόσο μεγαλύτερο και το κέρδος αυτό.

## 2.6 Εντατικά μεγέθη πλαισίων MQN

### 2.6.1 Εισαγωγή

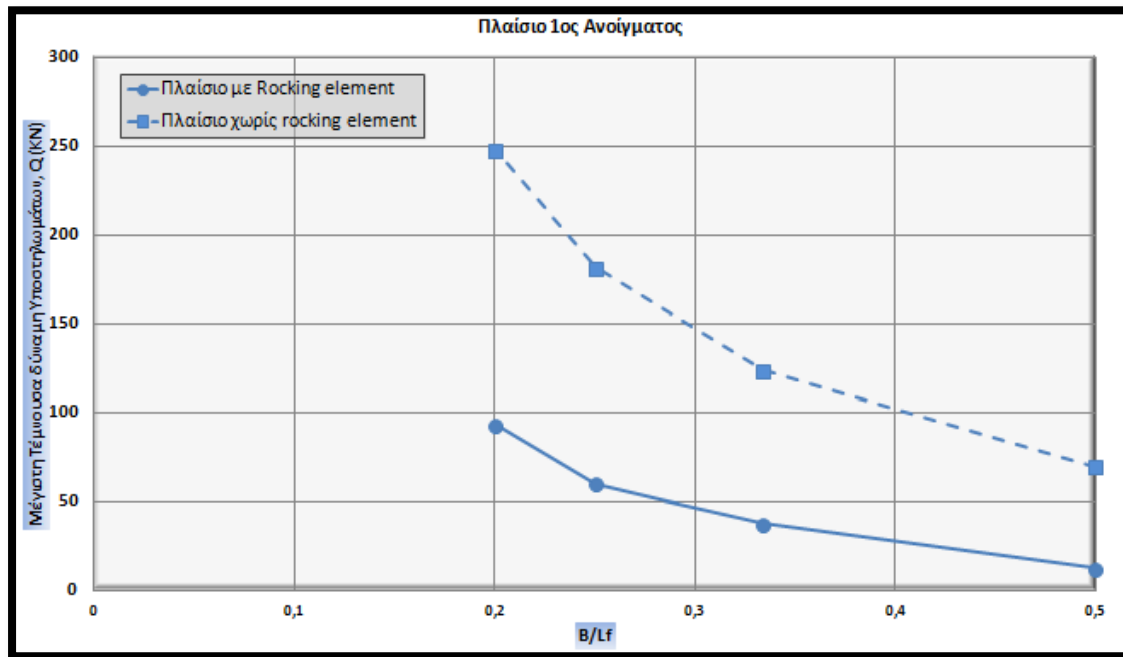
Μέσω του προγράμματος OpenSees και για τις προκύπτουσες στοχευμένες μετακινήσεις που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο υπολογίστηκαν τα εντατικά φορτία που αναπτύχθηκαν στον φορέα κατά μήκος των κόμβων του, για όλες τις περιπτώσεις. Για λόγους απλότητας και κατανόησης των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται σε διαγράμματα τα μέγιστα αναπτυσσόμενα MQN που εμφανίζονται στα υποστυλώματα αλλά και στις δοκούς για όλες τις προαναφερθείσες περιπτώσεις πλαισίων που παρουσιάζονται στο παρών κεφάλαιο. Οι ακριβείς μετρήσεις ανά κόμβο και περίπτωση πλαισίου παρουσιάζονται αναλυτικώς **στο παράρτημα Β**.

Ως σημεία ενδιαφέροντος στα ακόλουθα διαγράμματα θεωρήθηκαν οι μεταβολές των αξονικών δυνάμεων, των τεμνουσών και των ροπών των υποστυλωμάτων, καθώς και οι μεταβολές των τεμνουσών και των θετικών ή αρνητικών ροπών κατά μήκος των δοκών.

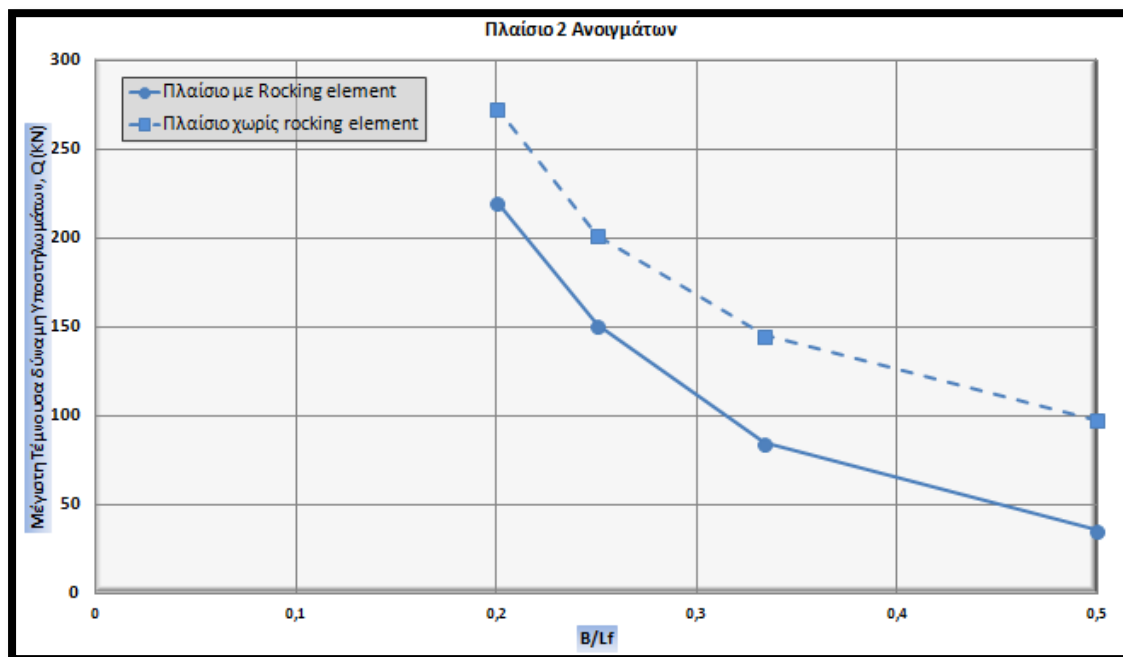
## 2.6.2 Διαγράμματα MQN πλαισίων που εξετάστηκαν

### 2.6.2.1 Διαγράμματα Q υποστυλωμάτων.

Παρουσιάζεται η μέγιστη τέμνουσα κατά απόλυτη τιμή που προκύπτει από την βάση και την κορυφή επί του συνόλου των υποστυλωμάτων του πλαισίου.

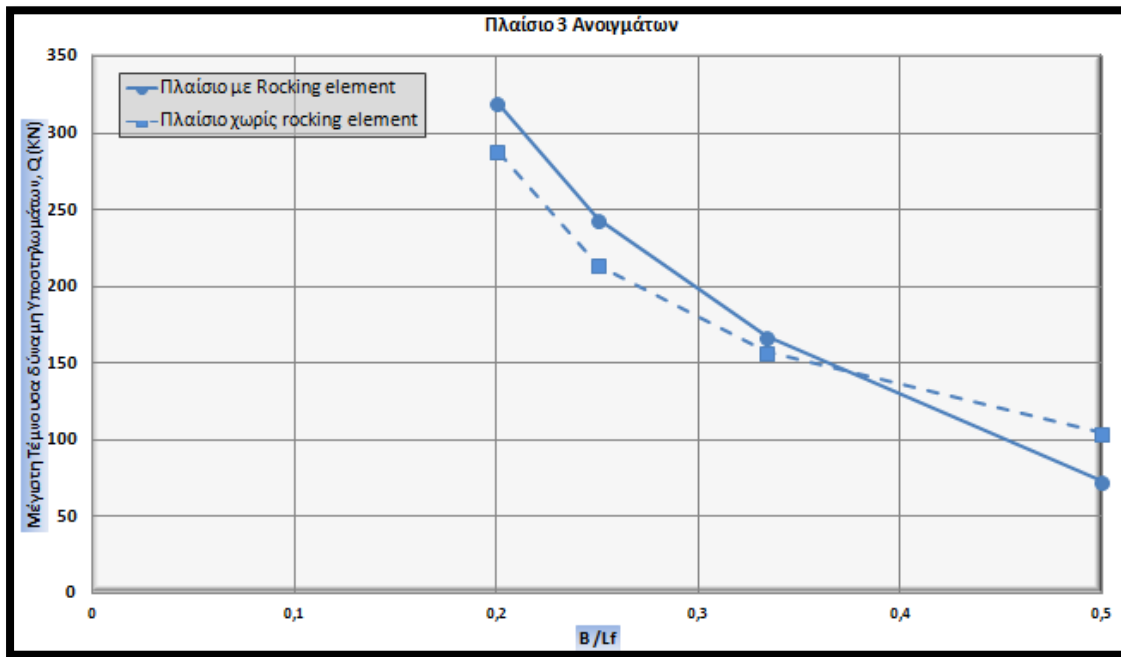


Διάγραμμα 2.14: Αναπτυσσόμενες τέμνουσες για πλαίσια ενός ανοίγματος με μεταβαλλόμενο λόγο B/Lf.

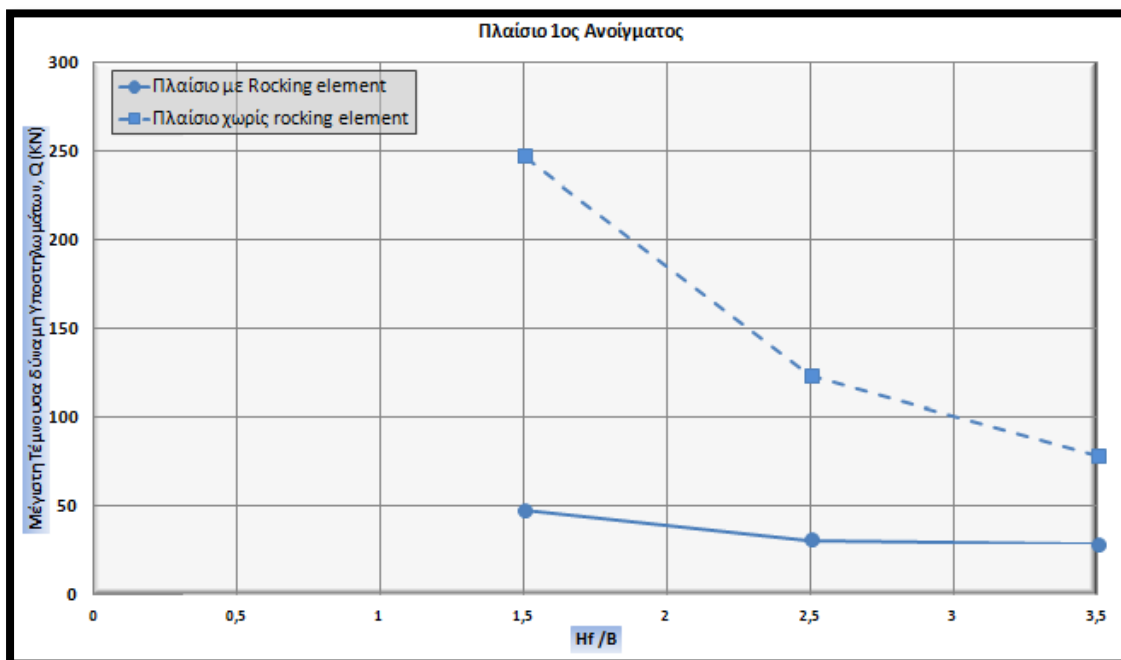


Διάγραμμα 2.15: Αναπτυσσόμενες τέμνουσες για πλαίσια δύο ανοιγμάτων με μεταβαλλόμενο λόγο B/Lf.

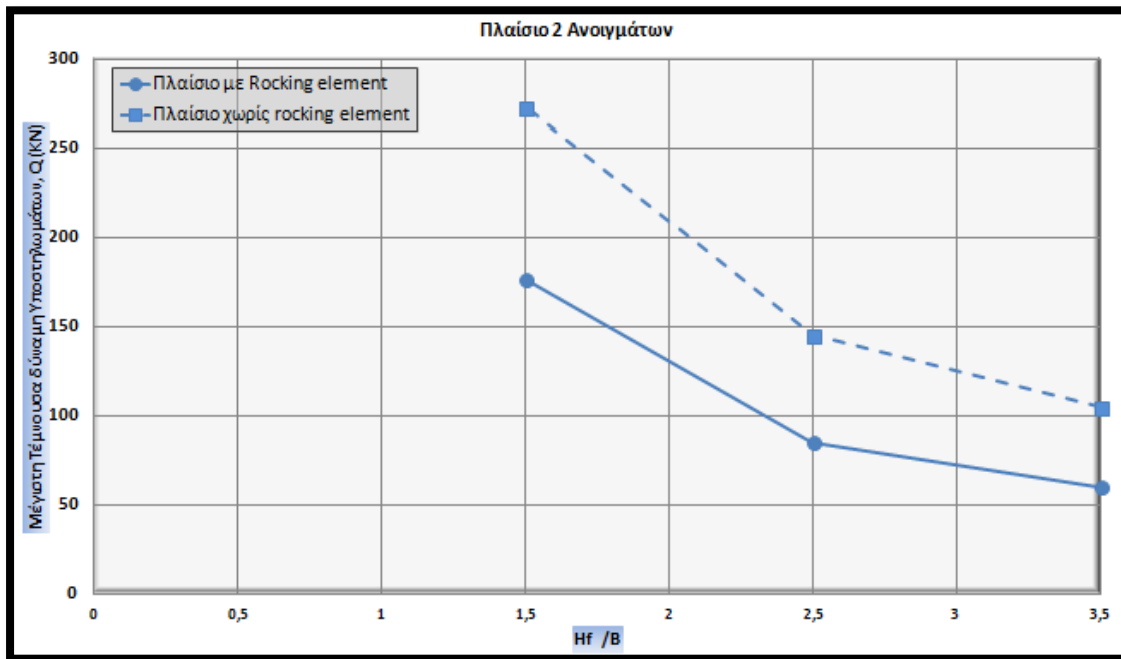




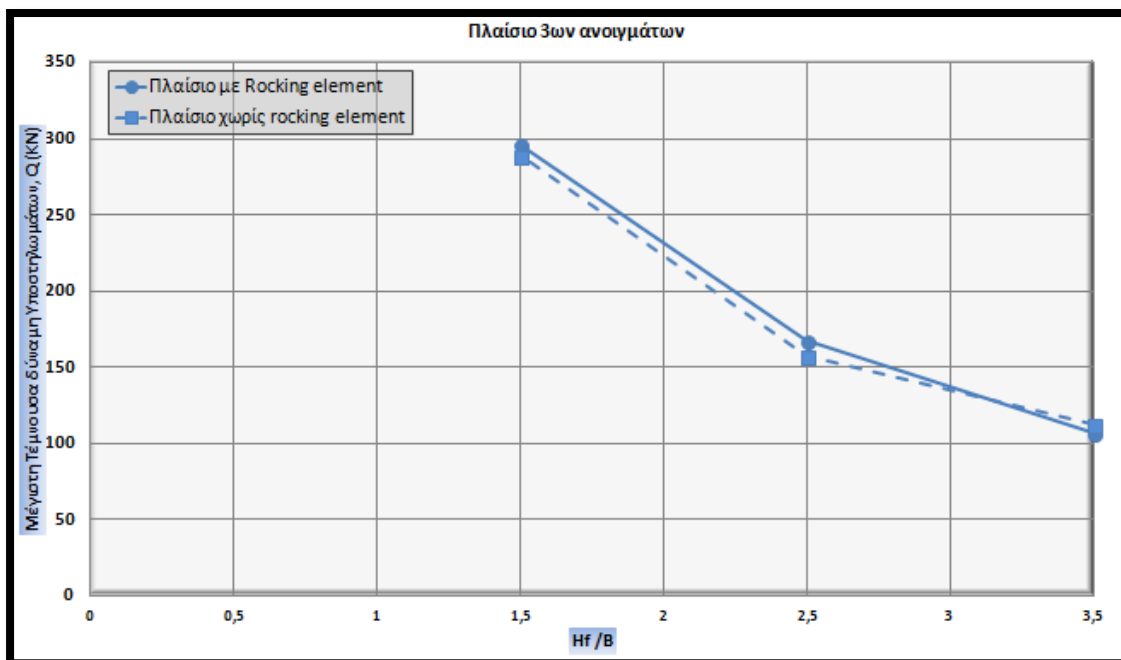
Διάγραμμα 2.16: Αναπτυσσόμενες τέμνουσες για πλαίσια τριών ανοιγμάτων με μεταβαλλόμενο λόγο B/Lf.



Διάγραμμα 2.17: Αναπτυσσόμενες τέμνουσες για πλαίσιο ενός ανοίγματος με μεταβαλλόμενο λόγο Hf/B



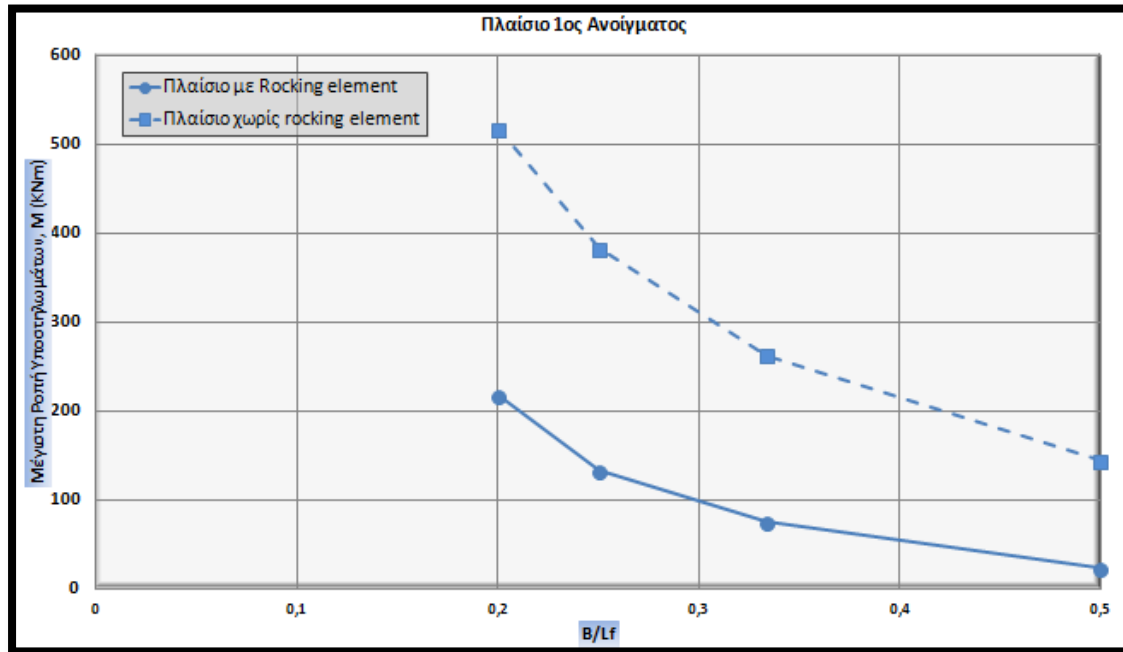
Διάγραμμα 2.18: Αναπτυσσόμενες τέμνουσες για πλαίσιο δύο ανοιγμάτων με μεταβαλλόμενο λόγο  $H_f/B$ .



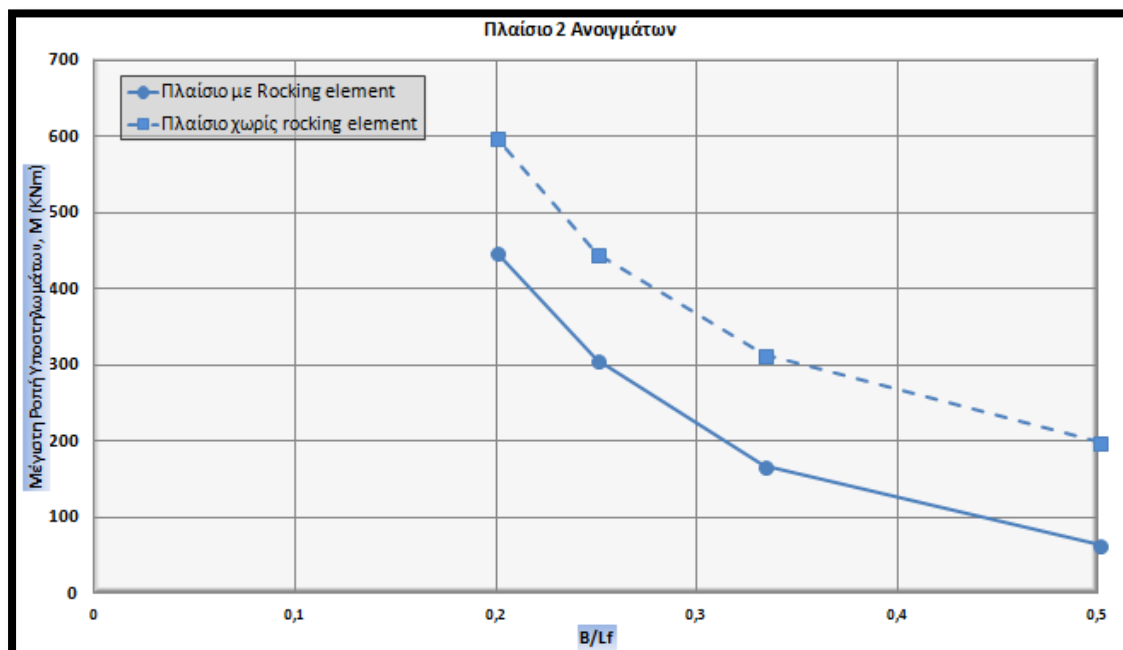
Διάγραμμα 2.19: Αναπτυσσόμενες τέμνουσες για πλαίσιο τριών ανοιγμάτων με μεταβαλλόμενο λόγο  $H_f/B$ .

2.6.2.2 Διαγράμματα  $M$  υποστυλωμάτων.

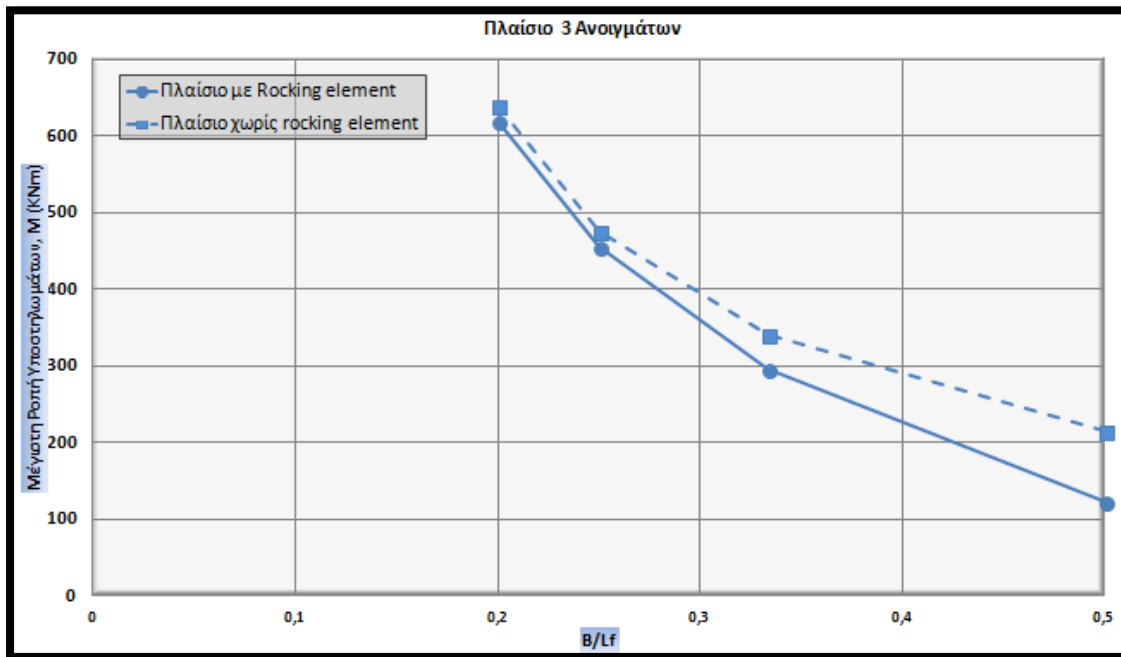
Παρουσιάζεται η μέγιστη ροπή κατά απόλυτη τιμή που προκύπτει από την βάση και την κορυφή επί του συνόλου των υποστυλωμάτων του πλαισίου.



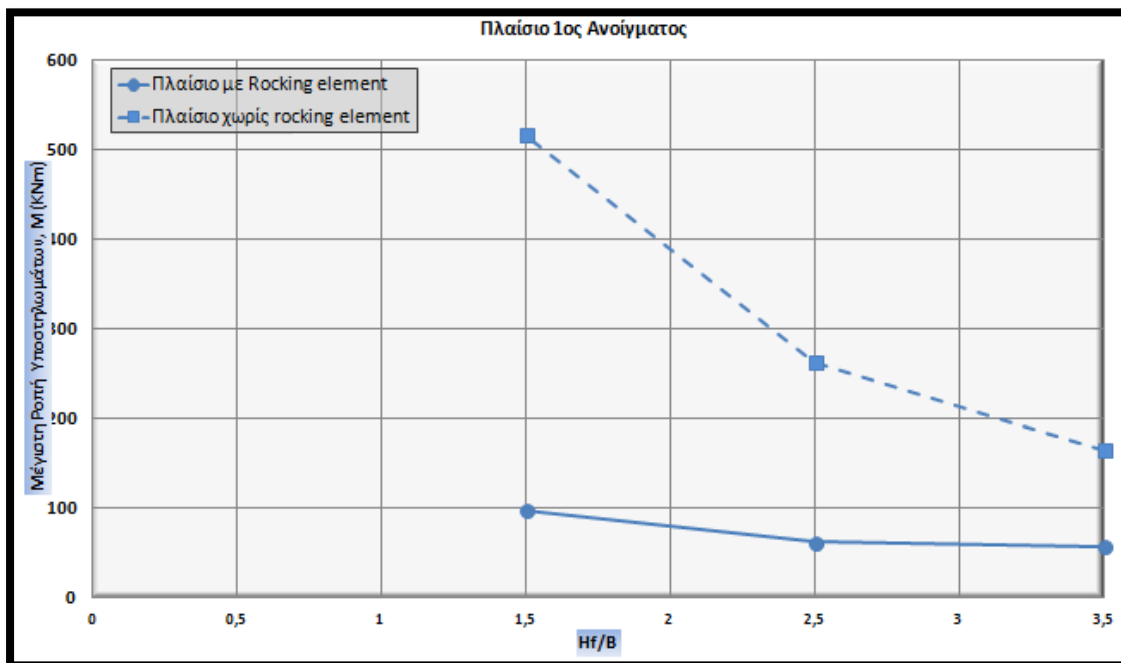
Διάγραμμα 2.20: Αναπτυσσόμενες ροπές για πλαίσιο ενός ανοίγματος με μεταβαλλόμενο λόγο  $B/L_f$ .



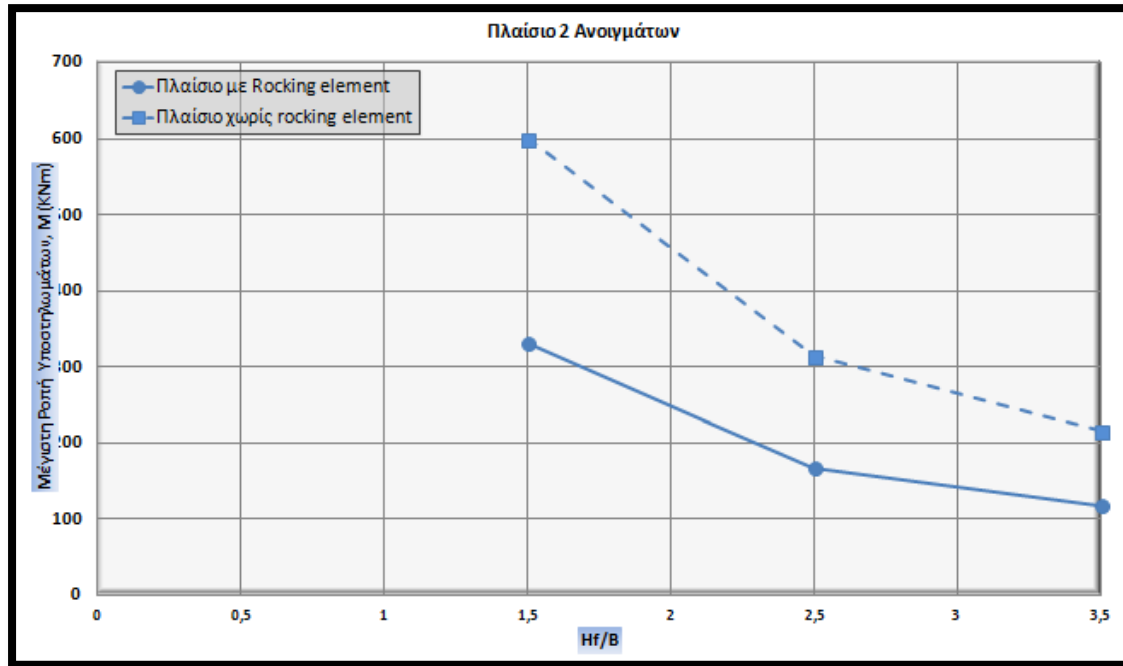
Διάγραμμα 2.21: Αναπτυσσόμενες ροπές για πλαίσιο δύο ανοιγμάτων με μεταβαλλόμενο λόγο  $B/L_f$ .



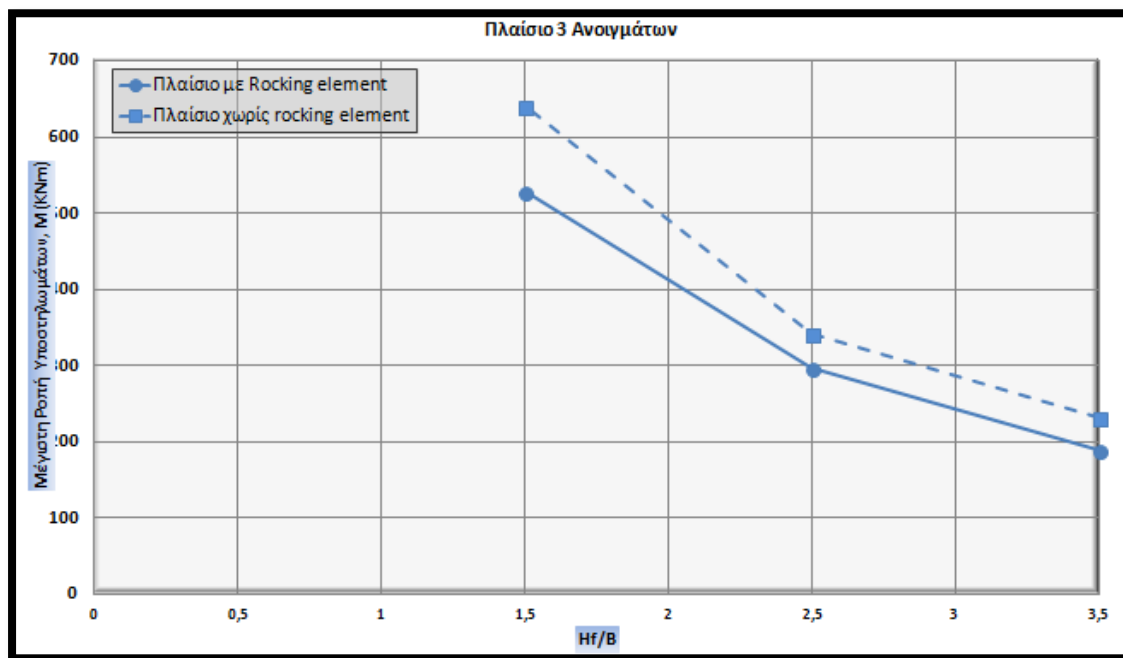
Διάγραμμα 2.22 : Αναπτυσσόμενες ροπές για πλαίσια τριών ανοιγμάτων με μεταβαλλόμενο λόγο  $B/L_f$ .



Διάγραμμα 2.23: Αναπτυσσόμενες ροπές για πλαίσιο ενός ανοίγματος με μεταβαλλόμενο λόγο  $H/B$ .



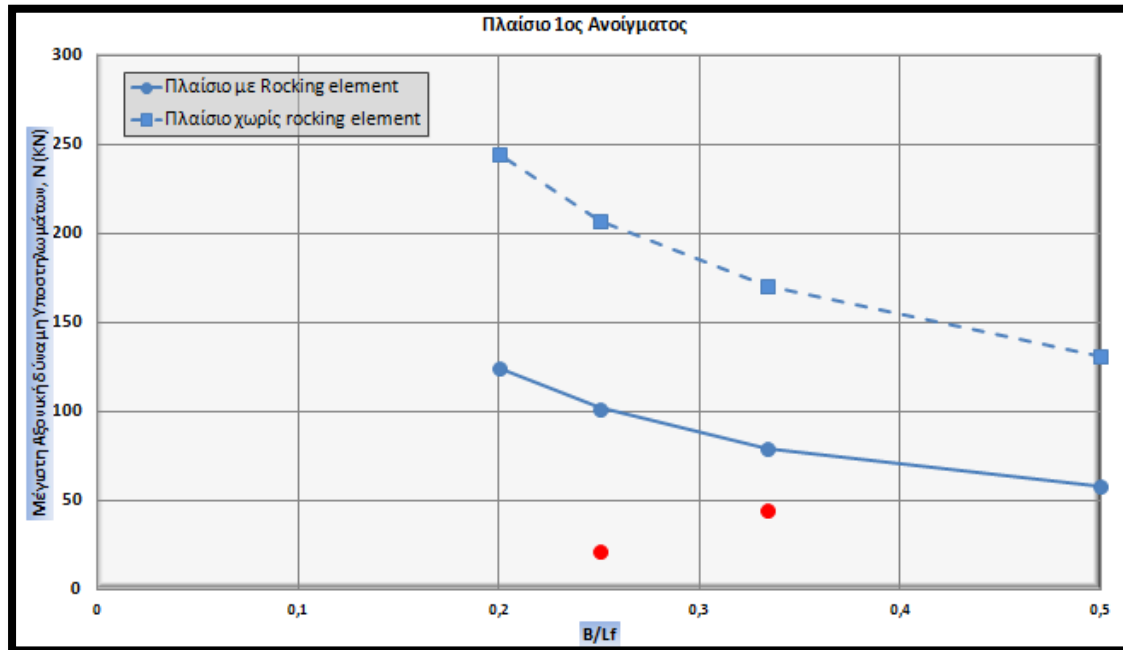
Διάγραμμα 2.24: Αναπτυσσόμενες ροπές για πλαίσιο δύο ανοιγμάτων με μεταβαλλόμενο λόγο H/B.



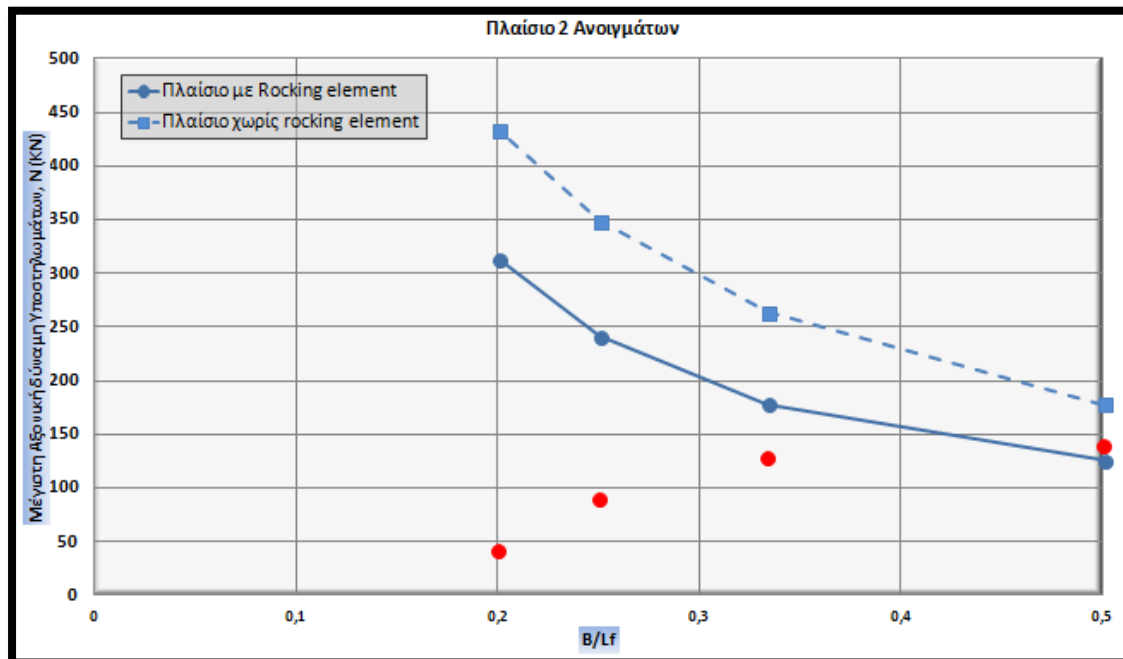
Διάγραμμα 2.25 : Αναπτυσσόμενες ροπές για πλαίσιο τριών ανοιγμάτων με μεταβαλλόμενο λόγο H/B.

2.6.2.3 Διαγράμματα  $N$  υποστυλωμάτων.

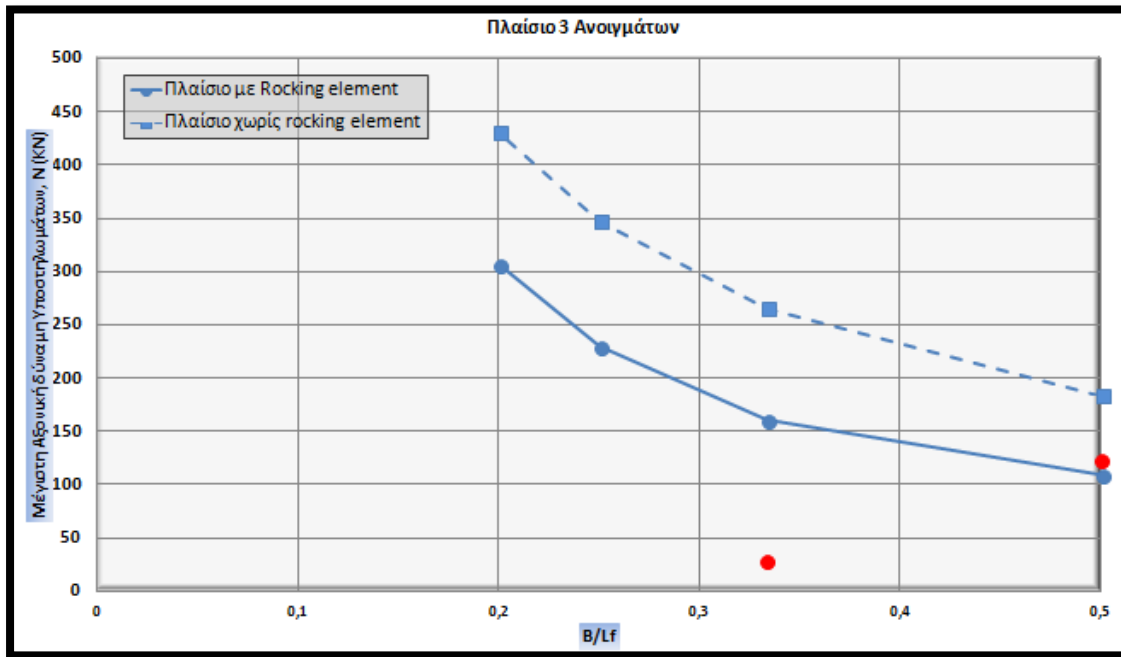
Παρουσιάζεται η μεταβολή στην θλίψη-στις περιπτώσεις όπου έχω εμφάνιση εφελκυσμού φαίνεται στο διάγραμμα η αντίστοιχη τιμή με κόκκινη κουκκίδα.



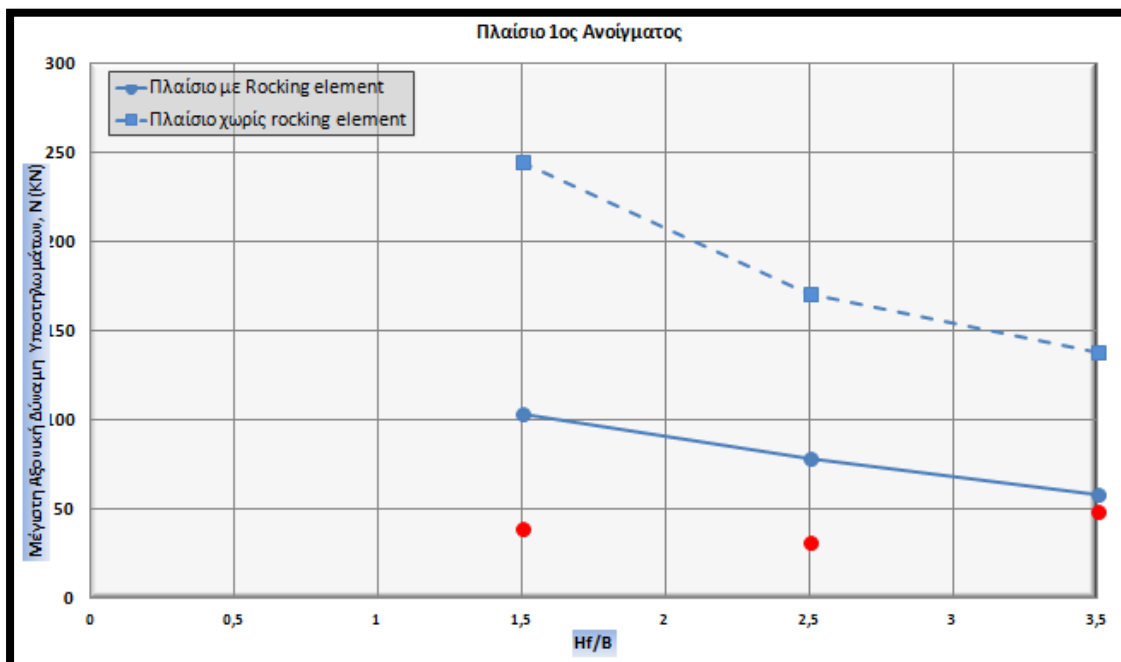
Διάγραμμα 2.26 : Αναπτυσσόμενες αξονικές για πλαίσια ενός ανοίγματος με μεταβαλλόμενο λόγο  $B/L_f$ .



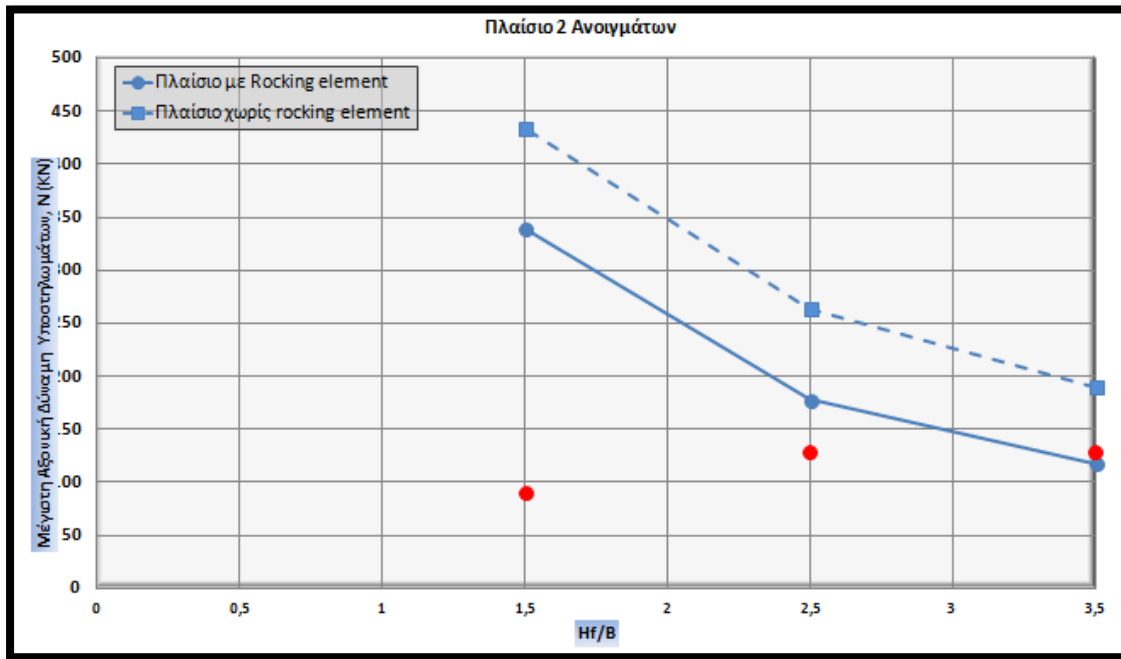
Διάγραμμα 2.27 : Αναπτυσσόμενες αξονικές για πλαίσια δύο ανοιγμάτων με μεταβαλλόμενο λόγο  $B/L_f$ .



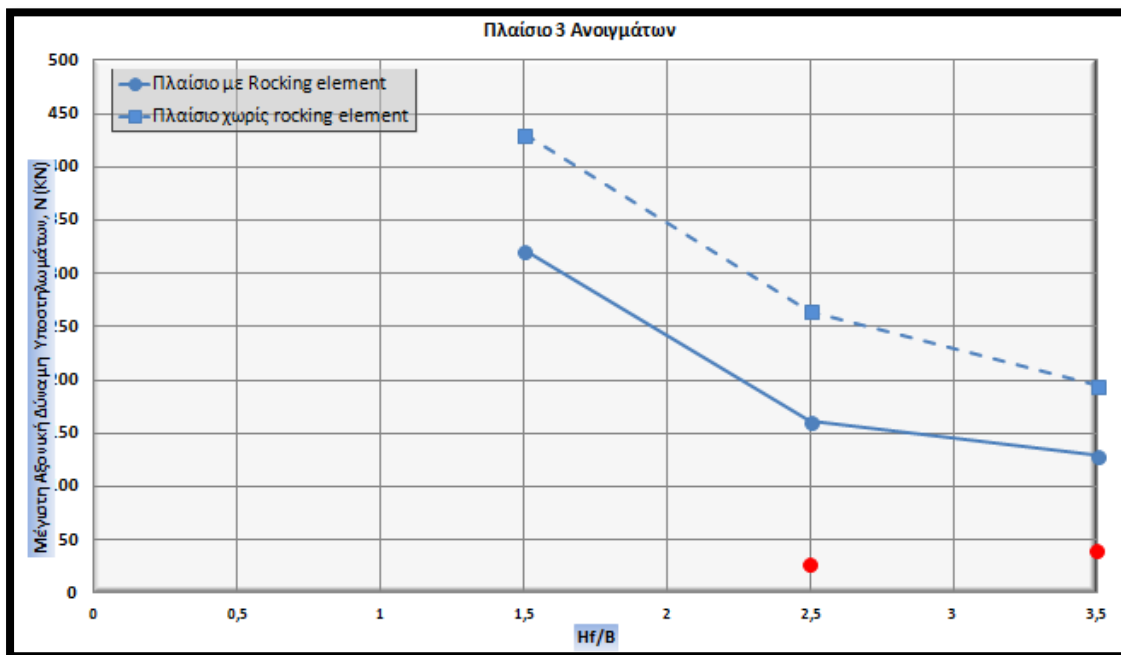
Διάγραμμα 2.28: Αναπτυσσόμενες αξονικές για πλαίσια τριών ανοιγμάτων με μεταβαλλόμενο λόγο  $B/L_f$ .



Διάγραμμα 2.29: Αναπτυσσόμενες αξονικές για πλαίσιο ενός ανοίγματος με μεταβαλλόμενο λόγο  $H/B$ .



Διάγραμμα 2.30 : Αναπτυσσόμενες αξονικές για πλαίσιο δύο ανοιγμάτων με μεταβαλλόμενο λόγο H/B.

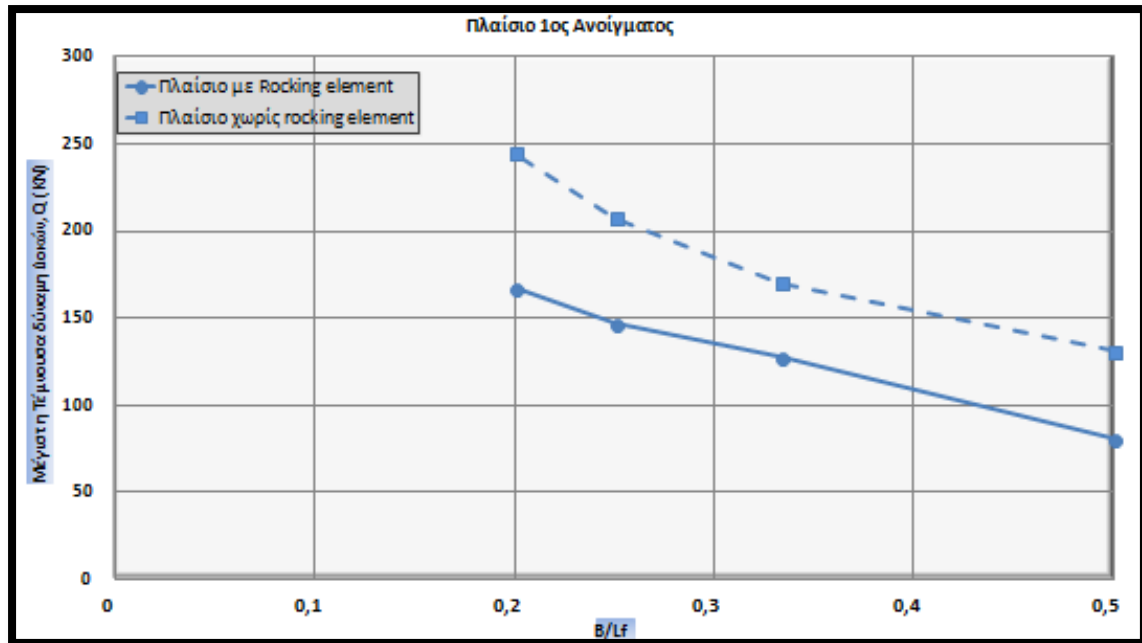


Διάγραμμα 2.31: Αναπτυσσόμενες αξονικές για πλαίσιο τριών ανοιγμάτων με μεταβαλλόμενο λόγο H/B.

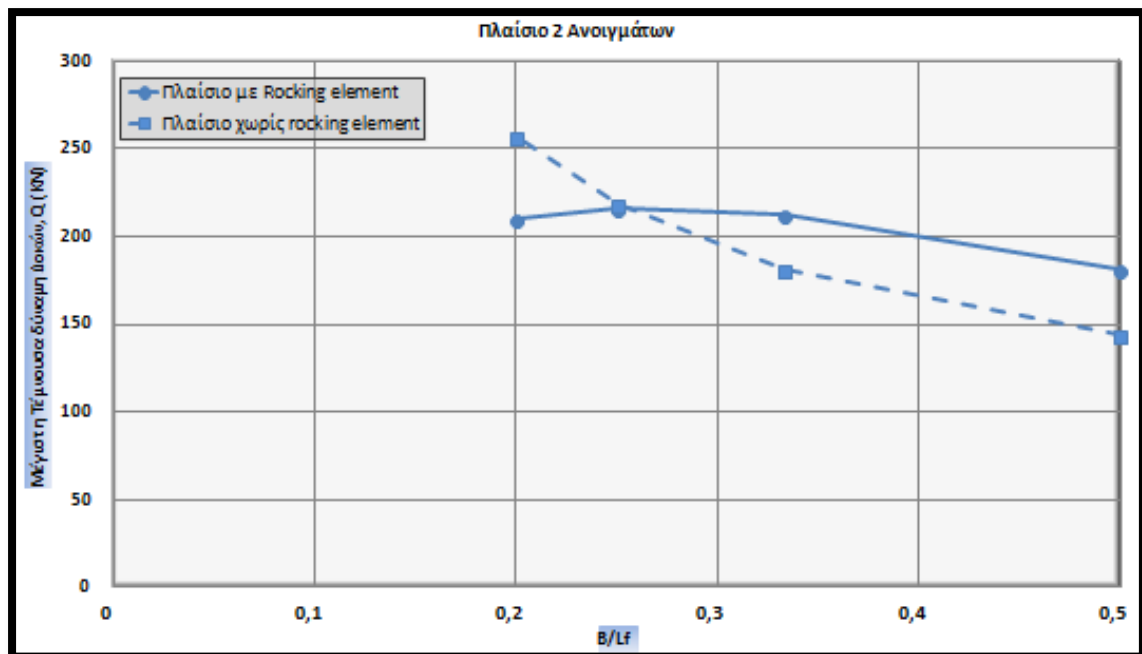


## 2.6.2.4 Διαγράμματα Q δοκών.

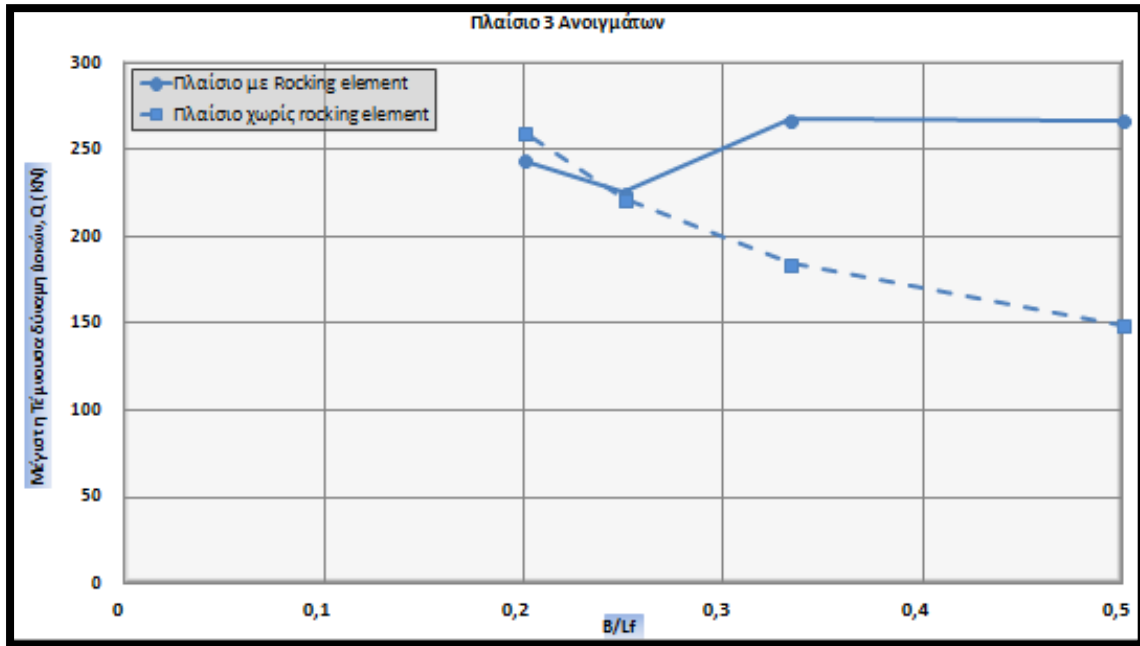
Παρουσιάζεται η μέγιστη τέμνουσα κατά απόλυτη τιμή που προκύπτει επί του συνόλου των δοκών του πλαισίου.



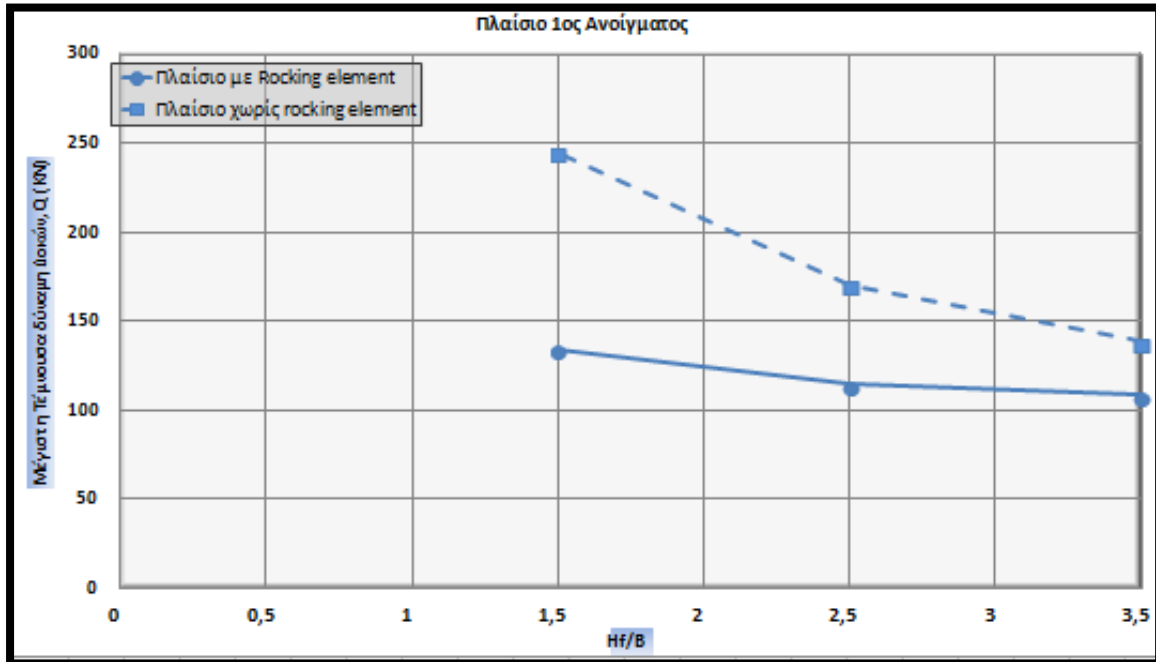
Διάγραμμα 2.32: Αναπτυσσόμενες τέμνουσες για πλαίσιο ενός ανοίγματος με μεταβαλλόμενο λόγο  $B/L_f$ .



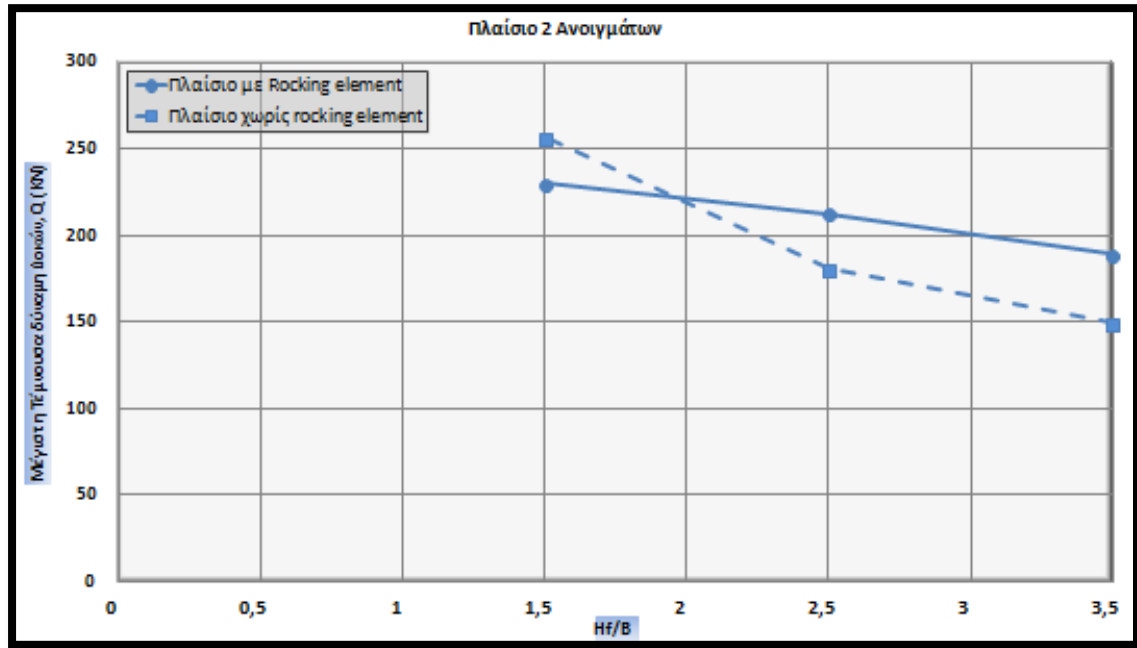
Διάγραμμα 2.33: Αναπτυσσόμενες τέμνουσες για πλαίσιο δύο ανοιγμάτων με μεταβαλλόμενο λόγο  $B/L_f$ .



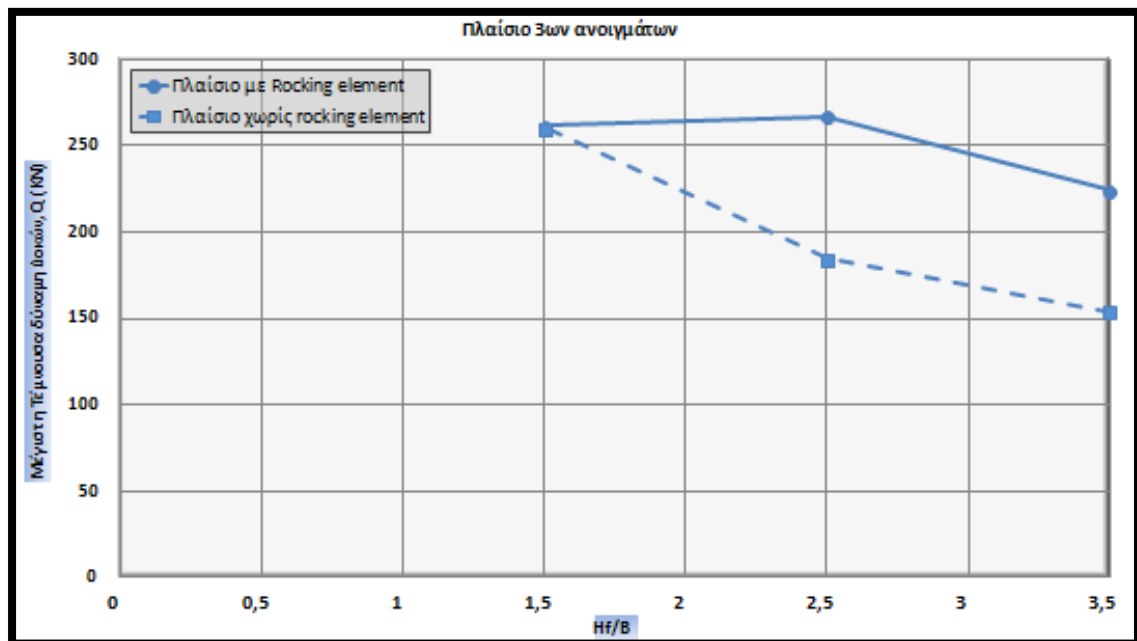
Διάγραμμα 2.34: Αναπτυσσόμενες τέμνουσες για πλαίσια τριών ανοιγμάτων με μεταβαλλόμενο λόγο B/Lf.



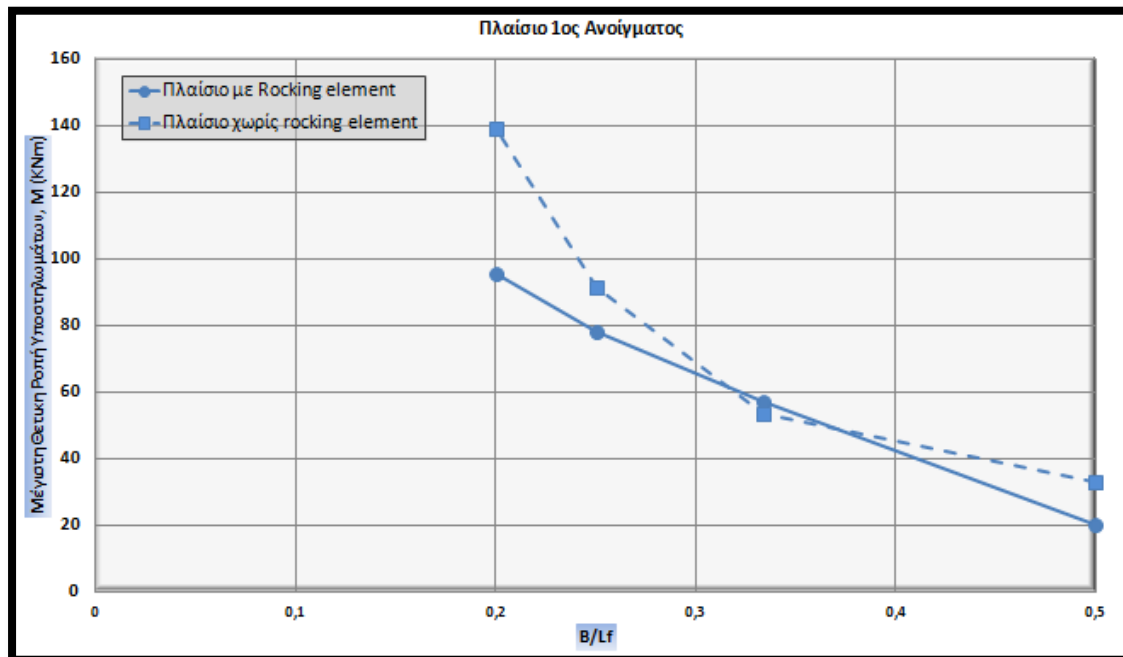
Διάγραμμα 2.35: Αναπτυσσόμενες τέμνουσες για πλαίσιο ενός ανοίγματος με μεταβαλλόμενο λόγο Hf/B.



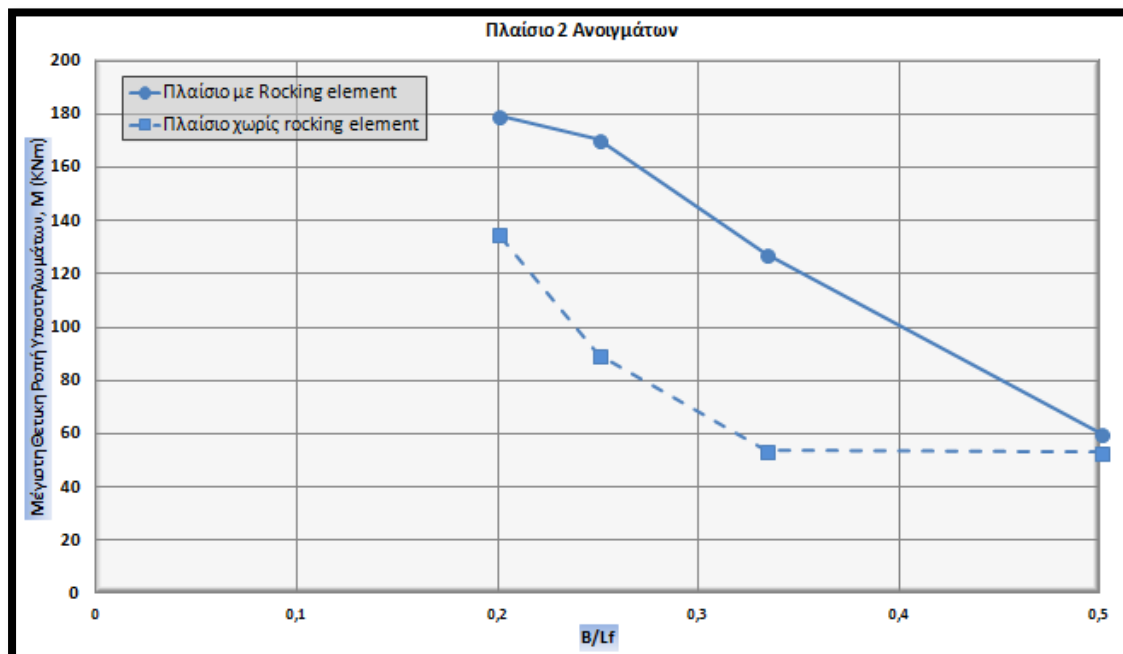
Διάγραμμα 2.36: Αναπτυσσόμενες τέμνουσες για πλαίσια δύο ανοιγμάτων με μεταβαλλόμενο λόγο H/B.



Διάγραμμα 2.37: Αναπτυσσόμενες τέμνουσες για πλαίσιο τριών ανοιγμάτων με μεταβαλλόμενο λόγο H/B.

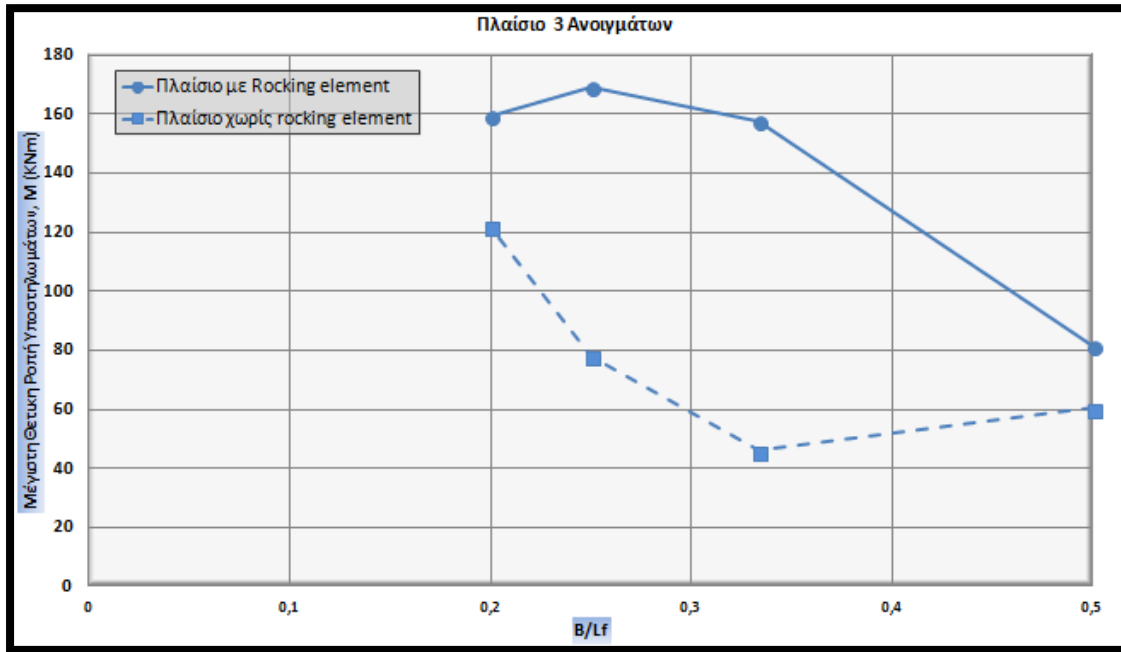
2.6.2.5 Διαγράμματα  $M+^{33}$  δοκών.

Διάγραμμα 2.38: Αναπτυσσόμενες θετικές ροπές για πλαίσια ενός ανοίγματος με μεταβαλλόμενο λόγο B/Lf.

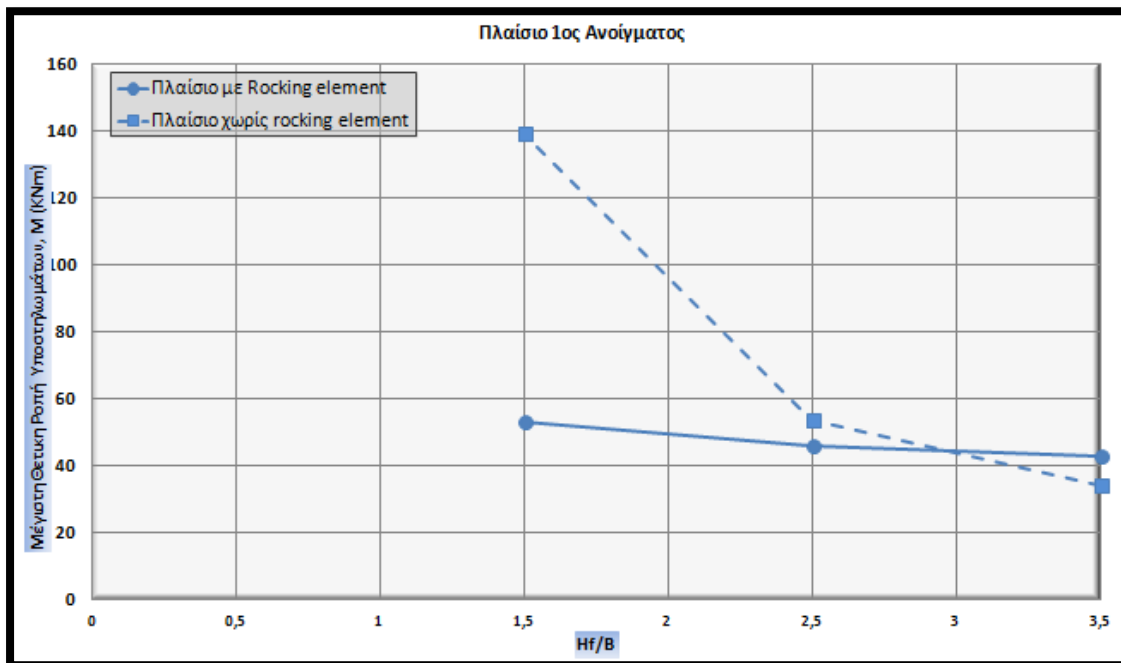


Διάγραμμα 2.39: Αναπτυσσόμενες θετικές ροπές για πλαίσια δύο ανοιγμάτων με μεταβαλλόμενο λόγο B/Lf.

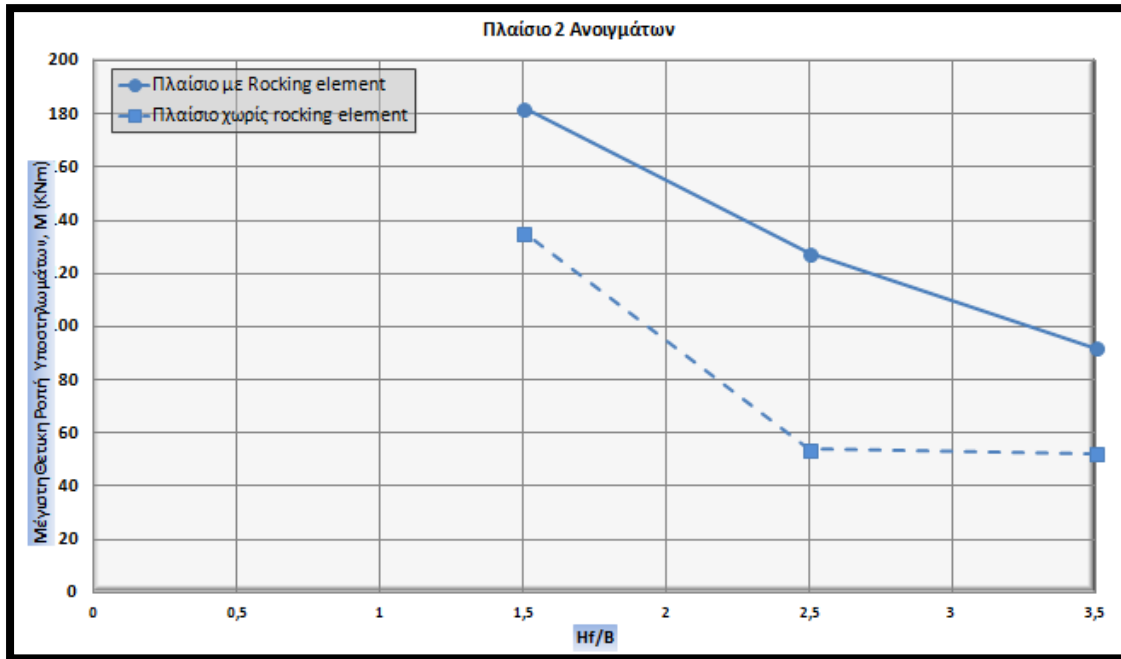
<sup>33</sup> Αναφερόμαστε σε εφελκυσμό κάτω.



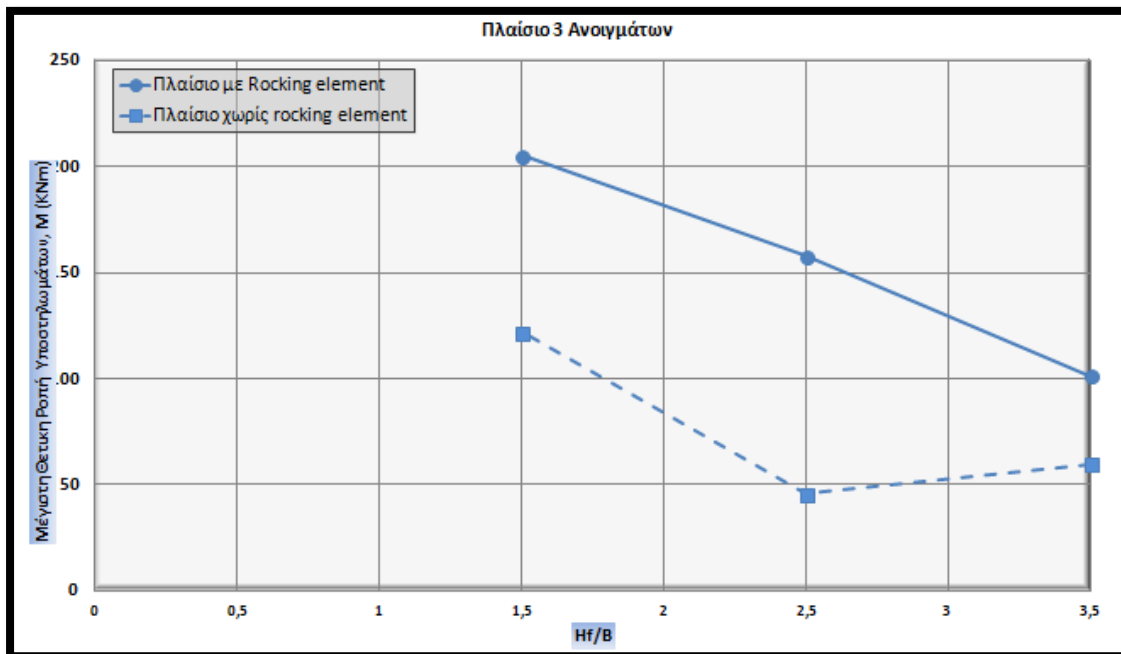
Διάγραμμα 2.40: Αναπτυσσόμενες θετικές ροπές για πλαίσια τριών ανοιγμάτων με μεταβαλλόμενο λόγο B/Lf.



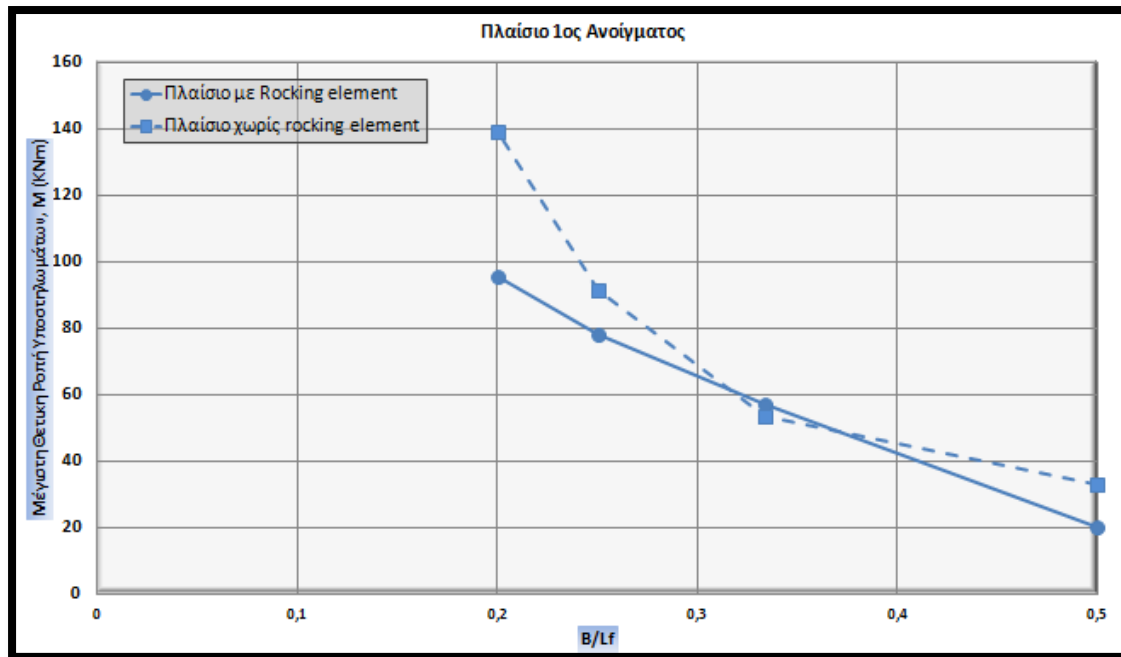
Διάγραμμα 2.41: Αναπτυσσόμενες θετικές ροπές για πλαίσιο ενός ανοίγματος με μεταβαλλόμενο λόγο Hf/B.



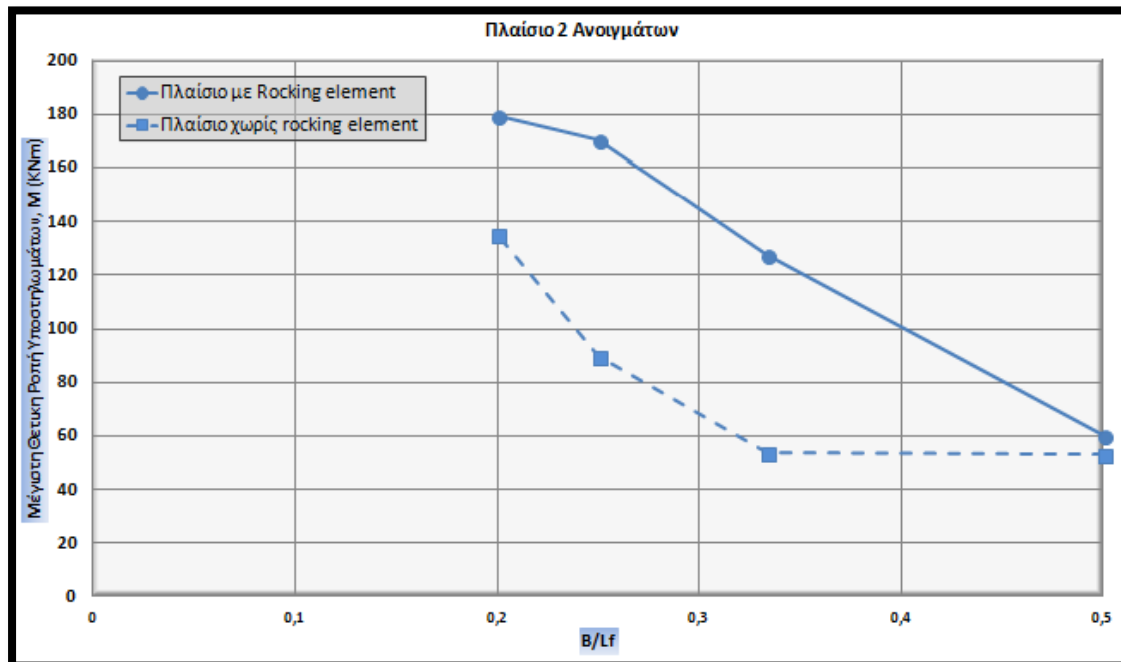
Διάγραμμα 2.42: Αναπτυσσόμενες θετικές ροπές για πλαίσια δύο ανοιγμάτων με μεταβαλλόμενο λόγο H/B.



Διάγραμμα 2.43: Αναπτυσσόμενες θετικές ροπές για πλαίσια τριών ανοιγμάτων με μεταβαλλόμενο λόγο H/B.

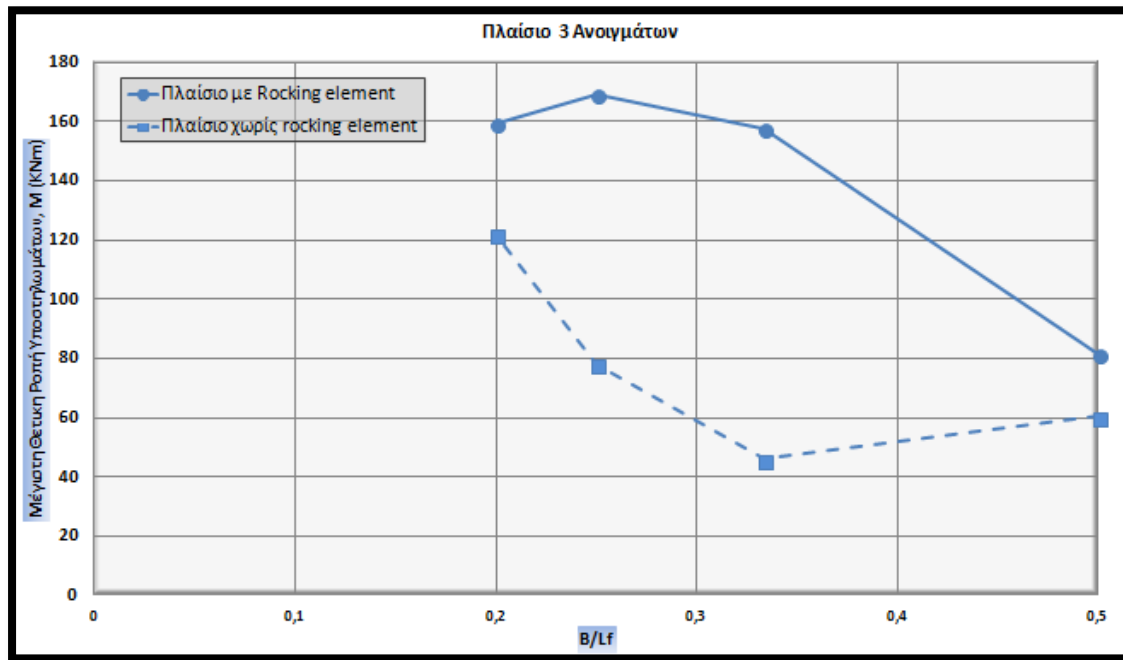
2.6.2.6 Διαγράμματα  $M^{-34}$  δοκών.

Διάγραμμα 2.44: Αναπτυσσόμενες αρνητικές ροπές για πλαίσιο ενός ανοίγματος με μεταβαλλόμενο λόγο B/Lf.

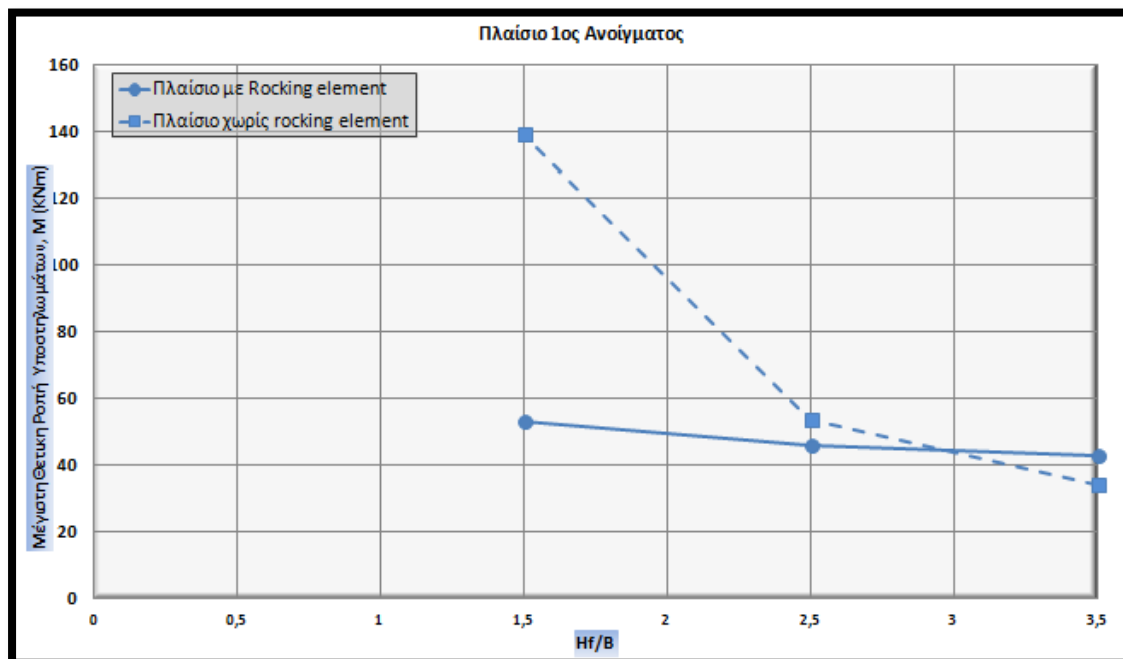


Διάγραμμα 2.45: Αναπτυσσόμενες αρνητικές ροπές για πλαίσιο δύο ανοιγμάτων με μεταβαλλόμενο λόγο B/Lf.

<sup>34</sup> Αναφερόμαστε σε εφελκυσμό άνω.

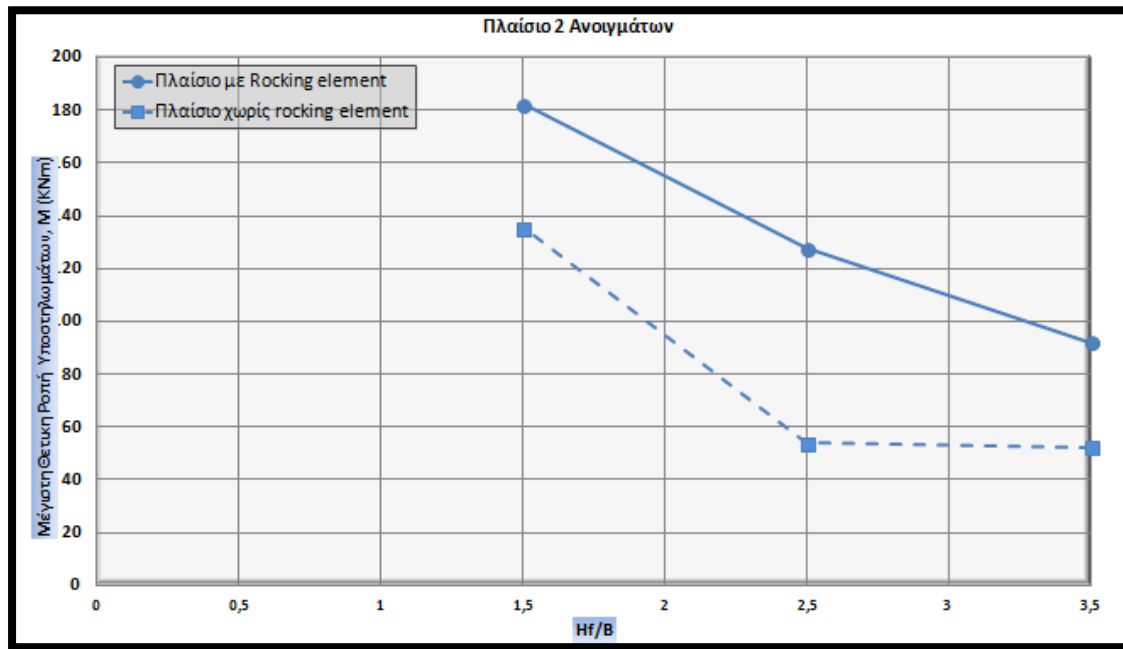


Διάγραμμα 2.46: Αναπτυσσόμενες αρνητικές ροπές για πλαίσια τριών ανοιγμάτων με μεταβαλλόμενο λόγο B/Lf.

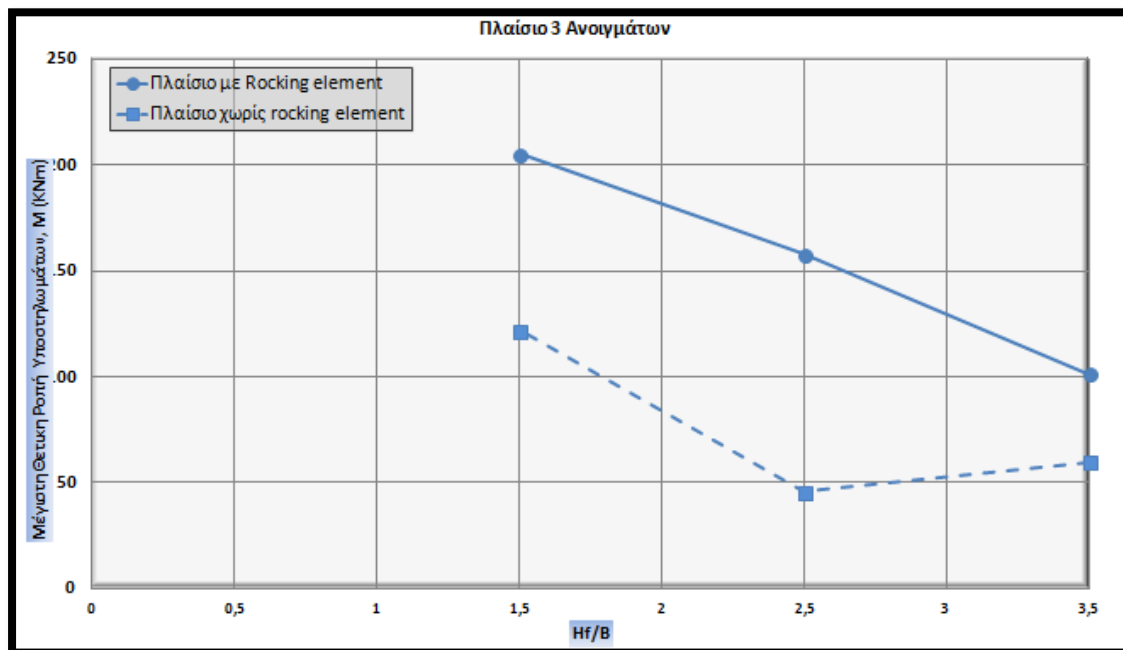


Διάγραμμα 2.47: Αναπτυσσόμενες αρνητικές ροπές για πλαίσιο ενός ανοίγματος με μεταβαλλόμενο λόγο H/B.





Διάγραμμα 2.48: Αναπτυσσόμενες αρνητικές ροπές για πλαίσια δύο ανοιγμάτων με μεταβαλλόμενο λόγο H/B.

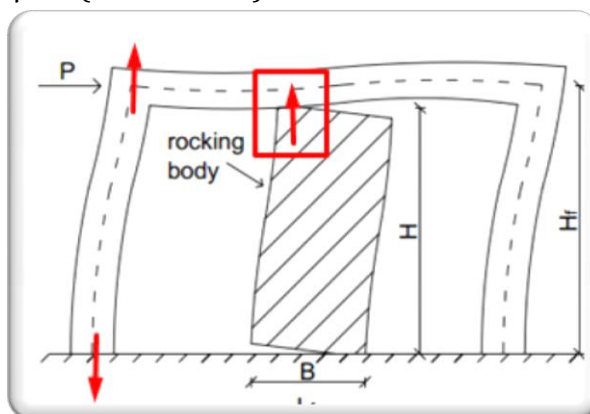


Διάγραμμα 2.49: Αναπτυσσόμενες αρνητικές ροπές για πλαίσια τριών ανοιγμάτων με μεταβαλλόμενο λόγο H/B.

### 2.6.3 Συμπεράσματα

Η απόκριση των πλαισίων μελετήθηκε σε 6 βασικούς άξονες σχετικά με την μεταβολή της έντασης κατά μήκος τους. Οι άξονες αποτελούνταν από την μέγιστη εμφανιζόμενη τέμνουσα, ροπή και αξονική επί των υποστυλωμάτων καθώς και την μέγιστη εμφανιζόμενη τέμνουσα, θετική και αρνητική ροπή επί της δοκού. Ως γενική ποιοτική εικόνα παρατηρείται ότι η προσθήκη του στοιχείου λικνισμού έχει ευμενή επιρροή ως προς την απόκριση του φορέα, όσον αφορά την κατανομή της έντασης του. Η ευμενής αυτή επιρροή δεν είναι ανεξάρτητη των χαρακτηριστικών του φορέα, καθώς η προσθήκη του στοιχείου λικνισμού δεν αποτελεί κανόνα άνευ όρων, για την μείωση της εντάσεως. Προέκυψαν επιγραμματικά τα εξής:

- Όσον αφορά τις εμφανιζόμενες τέμνουσες στα υποστυλώματα παρατηρήθηκε ότι όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των ανοιγμάτων, τόσο και λιγότερη η μείωση της τέμνουσας στο ενισχυμένο πλαίσιο και η μείωση αυτή μειώνεται ακόμη περαιτέρω όσο μικρότερος ο λόγος  $B/L$ , δηλαδή αν διατηρήσω το  $L$  σταθερό και μειώσω το  $B$ .
- Όσον αφορά τις εμφανιζόμενες ροπές στα υποστυλώματα παρατηρήθηκε ότι όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των ανοιγμάτων, τόσο και λιγότερη η μείωση της ροπής στο ενισχυμένο πλαίσιο και η μείωση αυτή μειώνεται ακόμη περαιτέρω όσο μικρότερος ο λόγος  $B/L$ , δηλαδή αν διατηρήσω το  $L$  σταθερό και μειώσω το  $B$ .
- Όσον αφορά τις εμφανιζόμενες θλιπτικές δυνάμεις στα υποστυλώματα παρατηρήθηκε ότι όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των ανοιγμάτων, τόσο και λιγότερη η μείωση της θλιπτικής δύναμης στο ενισχυμένο πλαίσιο και η μείωση αυτή μειώνεται ακόμη περαιτέρω όσο μικρότερος ο λόγος  $B/L$ , δηλαδή αν διατηρήσω το  $L$  σταθερό και μειώσω το  $B$ . Παρόλα αυτά λόγω της κίνησης του λικνιζόμενου σώματος, κατά το ανασήκωμα του παρατηρείται εφελκυσμός στο υποστυλόμε που βρίσκεται πριν το στοιχείο λικνισμού. (Εικόνα 2.23).



Εικόνα 2.23 : Αναπτυσσόμενες δυνάμεις κατά την λικνιστική κίνηση του στοιχείου.

Αξίζει να σημειωθεί επωμένος, πως περιοχή μελέτης σε μετέπειτα ερευνητικό επίπεδο θα μπορούσε να αποτελέσει ο τρόπος ενίσχυσης του σημείου ανασηκώματος επί της δοκού. Ο εφελκυσμός που εμφανίζεται στο υποστύλωμα χρειάζεται περισσότερη μελέτη για τον έλεγχο της επάρκειας του υποστυλώματος. Βέβαια μπορεί να θεωρηθεί ότι σε πολυώροφα κτήρια που η θλιπτική δύναμη επί των υποστυλωμάτων είναι αυξημένη ο εφελκυσμός δεν εμφανίζεται. Δεν γίνεται κάποια περισσότερη αναφορά καθώς ξεφεύγει της παρούσης.

- Όσον αφορά τις εμφανιζόμενες τέμνουσες στις δοκούς παρατηρήθηκε ότι όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των ανοιγμάτων, τόσο και λιγότερη η μείωση της τέμνουσας στο ενισχυμένο πλαίσιο και η μείωση αυτή μειώνεται ακόμη περαιτέρω όσο μικρότερος ο λόγος  $B/L$ , δηλαδή αν διατηρήσω το  $L$  σταθερό και μειώσω το  $B$ . Η μείωση αυτή, σε περιπτώσεις δύο ανοιγμάτων και άνω παύει πλέον να είναι μείωση, αλλά αύξηση. Αυτό συμβαίνει λόγω του ανασηκώματος του στοιχείου λικνισμού. Αξίζει να σημειωθεί επωμένος, για ακόμη μια φορά, πως περιοχή μελέτης σε μετέπειτα ερευνητικό επίπεδο θα μπορούσε να αποτελέσει ο τρόπος ενίσχυσης του σημείου ανασηκώματος επί της δοκού. Εδώ γίνεται απλή αναφορά του γεγονότος, χωρίς κάποια παραπάνω διερεύνηση.
- Όσον αφορά τις εμφανιζόμενες θετικές ροπές στις δοκούς παρατηρήθηκε ότι όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των ανοιγμάτων, τόσο και λιγότερη η μείωση της θετικής ροπής στο ενισχυμένο πλαίσιο και η μείωση αυτή μειώνεται ακόμη περαιτέρω όσο μικρότερος ο λόγος  $B/L$ , δηλαδή αν διατηρήσω το  $L$  σταθερό και μειώσω το  $B$ . Η μείωση αυτή, σε περιπτώσεις δύο ανοιγμάτων και άνω παύει πλέον να είναι μείωση, αλλά αύξηση. Αυτό συμβαίνει λόγω του στοιχείου ανασηκώματος του στοιχείου λικνισμού.
- Όσον αφορά τις εμφανιζόμενες αρνητικές ροπές στις δοκούς παρατηρήθηκε ότι όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των ανοιγμάτων, τόσο και λιγότερη η μείωση της αρνητικής ροπής στο ενισχυμένο πλαίσιο και η μείωση αυτή μειώνεται ακόμη περαιτέρω όσο μικρότερος ο λόγος  $B/L$ , δηλαδή αν διατηρήσω το  $L$  σταθερό και μειώσω το  $B$ .

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

---

### 3.1 Εισαγωγή

Μετά τα πρώτα ευμενή αποτελέσματα του κεφαλαίου 2, ως προς την απόκριση πλαισίων με την προσθήκη του στοιχείου λικνισμού, αποφασίστηκε όπως γίνουν αναλύσεις αντιστοίχου λογικής για ανελαστικά πλαίσια. Λόγω της αύξησης πλέον της πολυπλοκότητας των αναλύσεων και των υπολογισμών κρίθηκε ως απαραίτητη η μείωση του αριθμού των περιπτώσεων που θα εξεταστούν για λόγους χρόνου, χωρίς όμως να περιορίζεται στο κατ' ελάχιστο η αρχικώς απαιτούμενη "βιβλιοθήκη" των αποτελεσμάτων.

Προς ικανοποίηση των αναγκών του παρόντος κεφαλαίου, εξετάζεται πλαίσιο ενός ανοίγματος με την προσθήκη του στοιχείου λικνισμού στο μέσο του. Εξετάζονται λοιπόν, πλαίσια με διάφορα μήκη ανοίγματος (3.0m, 4.2, 5.6m, 7.0m), οπλισμένα ώστε να αντιστοιχούν σε δύο κύριες κατηγορίες πλαισίων. Για κάθε μήκος ανοίγματος οπλίστηκαν τα πλαίσια έτσι ώστε τα αρχικώς ελεύθερα πλαίσια, χωρίς δηλαδή την προσθήκη του στοιχείου λικνισμού, να αποκτούν γενική πλαστιμότητα για τον σεισμό σχεδιασμού 3.0 και 6.0, προσομοιάζοντας έτσι την απόκριση μιας σύγχρονης και μια παλαιάς κατασκευής αντίστοιχα.

Στο κεφάλαιο αυτό, όλες οι αναλύσεις γίνονται με χρήση ανελαστικών στοιχείων<sup>35</sup>, για να οδηγηθούμε σε κάποια περαιτέρω συμπεράσματα. Η προσομοίωση των πλαισίων έγινε με δισδιάστατα επίπεδα πλαίσια κατά την διαμήκη διεύθυνση, χρησιμοποιώντας το λογισμικό OpenSees (McKenna 2001). Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής χρησιμοποιήθηκε η **Στατική Ανελαστική Ανάλυση Εξώθησης (Pushover Analysis)** για την μελέτη των πλαισιακών φορέων με προσθήκη ή μη των του στοιχείου λικνισμού. Τα προσομοιώματα των κτιρίων επιλύθηκαν ανελαστικά (Κεφάλαιο 3), αρχικά υπό την επίδραση των κατακόρυφων φορτίων (βαρύτητας) και ακολούθως υπό σταδιακώς αυξανόμενη οριζόντια δύναμη.

Εν συνεχεία, έγινε αποτίμηση της σεισμικής τους συμπεριφοράς για **συγκεκριμένο φάσμα σχεδιασμού κατά ΕΚ8**, υπολογίζοντας την στοχευμένη μετακίνηση λαμβανομένου υπόψη της αναπτυσσόμενης αποσβέσεως ανά

---

<sup>35</sup> Εκτός από το στοιχείο λικνισμού, το οποίο προσομοιώνεται ελαστικά.

περίπτωση, λόγω της πλαστικοποίησης των φορέων. Για τις ανάγκες τις παρούσης οι υπολογισμοί έγιναν θεωρώντας<sup>36</sup> :

- εδαφική επιτάχυνση αναφοράς  $\alpha_{ggR=0.24g}$  ,
- Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Z2 ,
- κατηγορία σπουδαιότητας II
- κατηγορία εδάφους B.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορες μέθοδοι υπολογισμού της στοχευμένης μετακίνησης πάνω στην καμπύλη pushover οι οποίες βασίζονται κυρίως στην μέθοδο του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος ( μέθοδος ATC-40, μέθοδος N2, μέθοδος συντελεστών). Αφού υπολογιστεί η αναμενόμενη μετακίνηση της κατασκευής (μετακίνηση κορυφής) σημειώνεται στην καμπύλη ικανότητας το αντίστοιχο σημείο επιτελεστικότητας  $\mu$ , το οποίο συγκρίνεται με τα αντίστοιχα των διαφόρων περιπτώσεων πλαισίων, ενισχυμένων και μη.

Τέλος, για τα προκύπτων σημεία επιτελεστικότητας για κάθε πλαίσιο και για τον θεωρούμενο σεισμό, υπολογίζονται οι αναπτυσσόμενες μέγιστες τοπικές πλαστιμότητες<sup>37</sup> του πλαισίου και γίνεται εξαγωγή κάποιων πρόσθετων αποτελεσμάτων.

---

<sup>36</sup> Ο ίδιος σεισμός που θεωρήθηκε και στο κεφάλαιο 2 - Ελαστικές Αναλύσεις.

<sup>37</sup> Σε όρους ροπής - καμπυλότητας.

## 3.2 Προσομοίωση με το λογισμικό OpenSees.

### 3.2.1 Εισαγωγή.<sup>38</sup>

Το OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation) είναι ένα εξειδικευμένο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε στη δυτική ακτή των Η.Π.Α, από το Pacific Earthquake Engineering Research Center, με κύριο σκοπό την ανάλυση της σεισμικής συμπεριφοράς των κατασκευών. Παρέχει στους χρήστες πληθώρα επιλογών καθώς διαθέτει μεγάλο εύρος στοιχείων (γραμμικά, επιφανειακά, χωρικά) που μπορούν να συνδυαστούν με σύνθετους νόμους υλικών, ώστε να μπορέσουν να προσεγγίσουν, όσο το δυνατόν καλύτερα, την πραγματική συμπεριφορά των εκάστοτε κατασκευών μέσω μη γραμμικών αναλύσεων στατικών και δυναμικών αναλύσεων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το λογισμικό αυτό είναι ανοιχτού κώδικα, ενθαρρύνοντας έτσι το χρήστη όχι μόνο να μελετήσει τον κώδικα αλλά και να επέμβει σε αυτόν, εξελίσσοντας τον. Στα θετικά του προγράμματος προσμετράτε και η λειτουργία μιας διαδικτυακής πλατφόρμας (message board) στην οποία οι χρήστες ανταλλάσσουν πληροφορίες και ενημερώνονται για διάφορα επιστημονικά θέματα που αφορούν το λογισμικό και τη χρήση του.

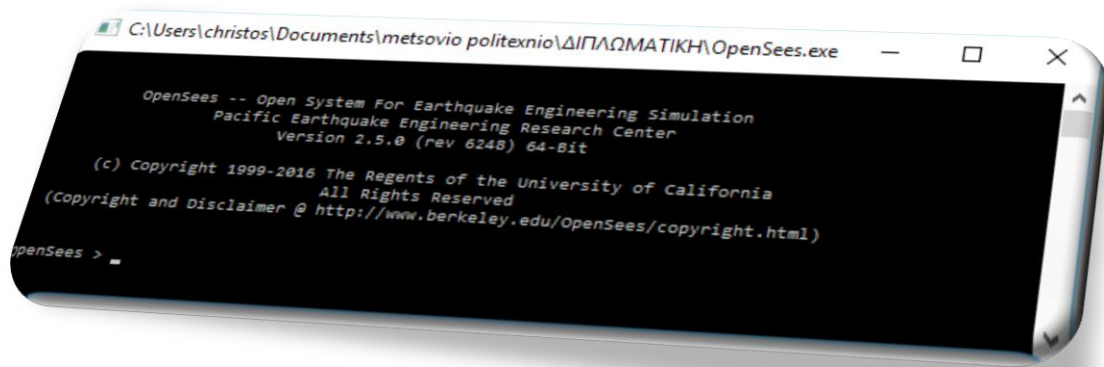
Στο OpenSees η εισαγωγή του προσομοιώματος και των παραμέτρων της ανάλυσης γίνεται μέσω εντολών οι οποίες εκτελούνται με τη βοήθεια ενός διερμηνέα που είναι προγραμματισμένος σε γλώσσα Tcl. Ένα από τα λίγα μειονεκτήματα του προγράμματος είναι η απουσία γραφικών η οποία δυσκολεύει το χρήστη καθώς δεν υπάρχει εύκολη εποπτεία του προσομοιώματος. Ωστόσο η χρήση εντολών της Tcl κατά τη μόρφωση του φορέα και την εκτέλεση των αναλύσεων μπορεί να βοηθήσει τόσο στην αποφυγή σφαλμάτων όσο και στην ευκολότερη χρήση του λογισμικού.

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής το OpenSees χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση στατικών μονοτονικών αναλύσεων σε φορείς από οπλισμένο σκυρόδεμα. Συγκεκριμένα, προσομοιώθηκαν πλαισιωτοί φορείς από οπλισμένο σκυρόδεμα ενισχυμένοι με το στοιχείο λικνισμού όπως αυτό προσομοιώθηκε και κωδικοποιήθηκε από τον Αυγενάκη. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια περιγραφή της προσομοίωσης των φορέων αυτών στο OpenSees.

---

<sup>38</sup> Επαναλαμβάνεται από το Κεφάλαιο 2 για λόγους ανεξαρτητοποίησης Κεφαλαίων.

Η ακριβής κωδικοποίηση που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες του Κεφαλαίου 2, παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α<sup>39</sup>.



Εικόνα 3.1: Παράθυρο εισαγωγής εντολών.

### 3.2.2 Προσομοίωση ανελαστικών πλαισίων ενισχυμένου σκυροδέματος

Στο παρόν στάδιο μελέτης, όπου γίνεται μια διερεύνηση λαμβάνοντας υπόψη την απόκριση του πλαισίου ως ανελαστικά εμφανιζόμενη, προσημειώθηκαν οι διάφορες περιπτώσεις των πλαισίων με ανελαστικά στοιχεία. Οι περιπτώσεις αυτές διαχωρίστηκαν σε παλαιές και νέες κατασκευές ( $\mu=3,0$  και  $\mu=6,0$  αντίστοιχα).

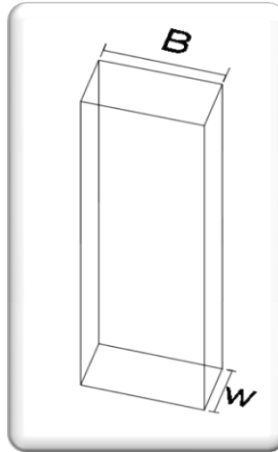
Άξια επιπλέον σχολιασμού, πέραν της απλής παράθεσης του κώδικα που εμφανίζεται στα υποπαραρτήματα Α.5, Α.6 και Α.7 αποτελούν τα εξής 3 σημεία, και γι' αυτό γίνεται στο παρόν υποκεφάλαιο επιπλέον αναφορά:

- Το στοιχείο λικνισμού, προσομοιώθηκε στους φορείς με το κωδικοποιημένο μοντέλο που παραχωρήθηκε για τους σκοπούς της παρούσης από τον Αυγενάκη. Το μοντέλο αυτό ενεργοποιείται μέσω της εντολής:

**RockingBC2d eleTag iNode jNode E nu B W (1 or 0)**

<sup>39</sup> Συγκεκριμένα στα υποπαραρτήματα Α.5, Α.6 και Α.7.

στο οποίο εισάγονται κατά σειρά ο αριθμός του στοιχείου, ο κόμβος αρχής, ο κόμβος πέρατος, το μέτρο ελαστικότητας του στοιχείου, ο λόγος Poisson, το πλάτος του και το πάχος του και το κατά πόσον θα λαμβάνεται υπόψη η συμβολή των διατμητικών παραμορφώσεων. Για τις ανάγκες των ελαστικών αναλύσεων το στοιχείο λικνισμού είχε τις τιμές της Εικόνας 3.2 όσον αφορά τις ιδιότητες και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του.



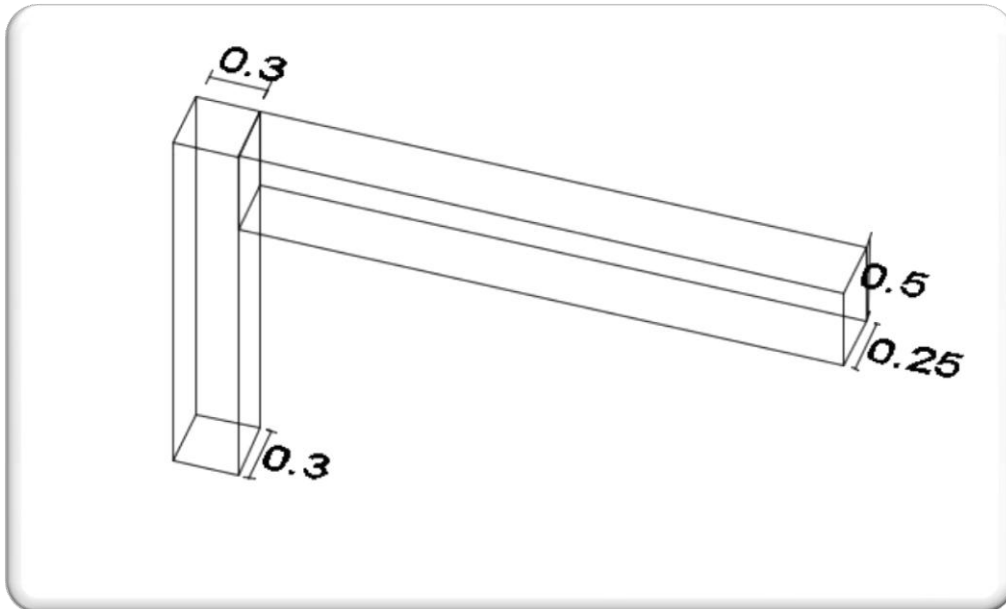
```
element RockingBC2d eleTag iNode jNode 30000000 0.0 $B 0.25 1
```

Εικόνα 3.2 : Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες στοιχείων υλικού για το σώμα λικνισμού που χρησιμοποιήθηκαν.

Πρέπει να γίνει κατανοητό ότι το συγκεκριμένο στοιχείο θεωρεί εμφάνιση ανασηκώματος μόνο στον κόμβο  $j$ , επωμένος αν κάποιος θέλει να φτιάξει ένα στοιχείο με διπλό ανασήκωμα, όπως στην πλειοψηφία των περιπτώσεων της παρούσης διπλωματικής, χρειάζεται η διασύνδεση 2 τέτοιων στοιχείων με κατάλληλη αρίθμηση των κόμβων τους.

- Για την προσομοίωση τόσο των γυμνών όσο και των ενισχυμένων πλαισίων με την προσθήκη του στοιχείου λικνισμού χρησιμοποιήθηκαν μη γραμμικά ραβδοφόρα πεπερασμένα στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά είναι κατανεμημένης πλαστιμότητας και η διατομή τους διακριτοποιείται σε ίνες (fibers). Κάθε ομάδα ινών μπορεί να έχει το δικό της νόμο τάσεων παραμορφώσεων, ανάλογα με το υλικό που αντιπροσωπεύει. Αρχικά λοιπόν ορίζονται τα υλικά και η διατομή ενός φορέα και στη συνέχεια τα δομικά του στοιχεία.



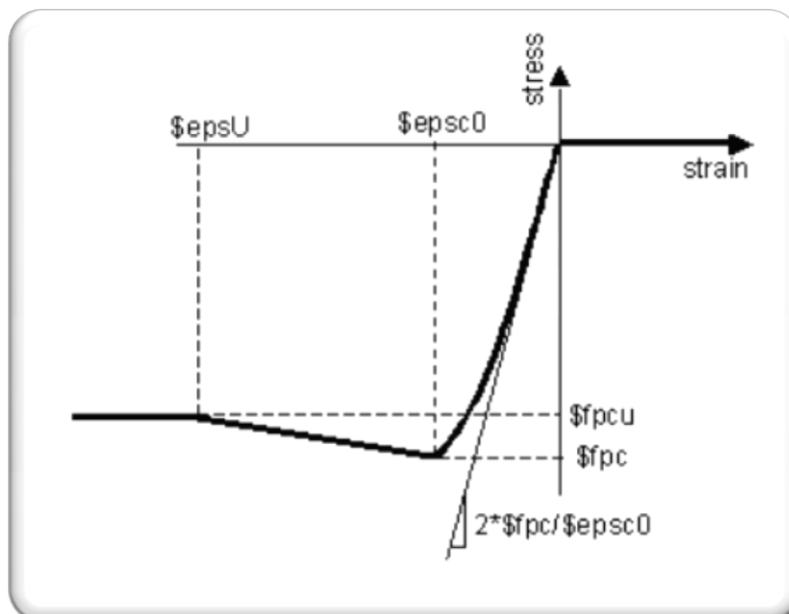


Εικόνα 3.3 : Διαστασιολόγηση στοιχείων πλαισίου

## 3.2.2.1 Υλικά.

## Σκυρόδεμα.

Το OpenSees διαθέτει αρκετούς νόμους τάσεων-παραμορφώσεων για το σκυρόδεμα. Στη διπλωματική αυτή χρησιμοποιήθηκε το **Concrete01 Material - Zero Tensile Strength** στο οποίο είναι ενσωματωμένος ο νόμος των Kent-Scott-Park (Εικόνα 3.4). Το υλικό αυτό θεωρεί μηδενικές εφελκυστικές αντοχές του σκυροδέματος ακόμα και πριν την ρηγμάτωση του.



Εικόνα 3.4: Καταστατικός νόμος σκυροδέματος Concrete01.

Το υλικό ενεργοποιείται με την εντολή:

**uniaxialMaterial Concrete01 \$matTag \$fpc \$epsc0 \$fpcu \$epsU**

Οι παράμετροι οι οποίες πρέπει να εισαχθούν αναλύονται παρακάτω:

**\$matTag:** αριθμός-ταυτότητα με τον οποίο αποθηκεύεται το υλικό.

**\$fpc:** η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος στις 28 ημέρες.

**\$epsc0:** η θλιπτική παραμόρφωση για την μέγιστη αντοχή που ορίσαμε προηγουμένως.

**\$fpcu:** η τάση θραύσης του σκυροδέματος.

**\$epsU:** η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη θραύση.

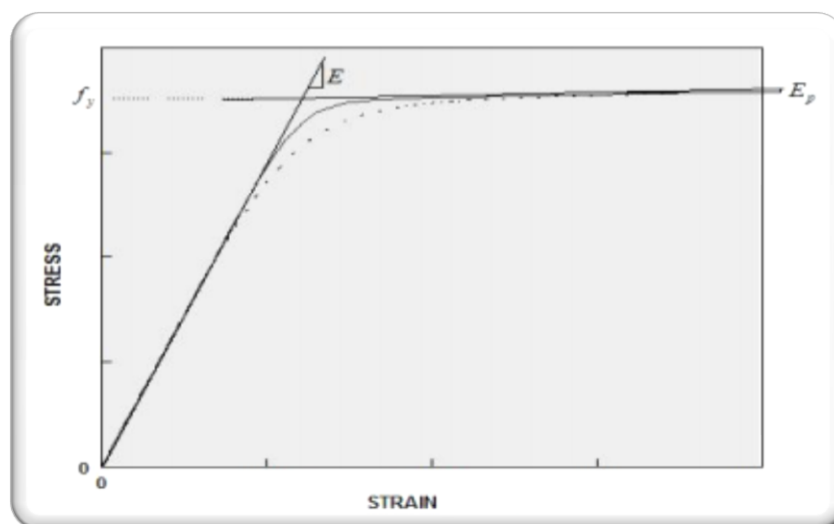
```
uniaxialMaterial Concrete01 2 -300000.0 -0.002 -300000.0 -1.0
```

Εικόνα 3.5: Ιδιότητες Σκυροδέματος.

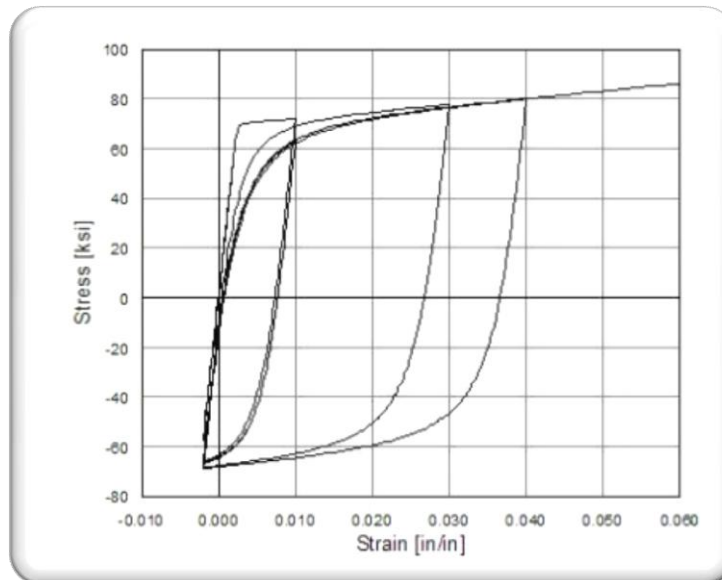
Θεωρήθηκαν λοιπόν,  $f_{pc}=30\text{MPa}$  εφόσον έχω στιγμιαίο συμβάν (σεισμό) άρα δεν απαιτείται κάποια αποτίμηση της αντοχής του σκυροδέματος. Επίσης όσον αφορά την τάση θραύσης του σκυροδέματος αυτή θεωρήθηκε πολύ μεγάλη, ουσιαστικώς ανύπαρκτη, εφόσον δεν ήταν στο πεδίο ενδιαφέροντος των αποτελεσμάτων.

*Χάλυβας.*

Για την προσομοίωση του διαμήκους χάλυβα εντός των διατομών χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο **Steel02 Material - Giuffré-Menegotto-Pinto** .



Εικόνα 3.6: Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων χάλυβα Steel02.



Εικόνα 3.7: Υστερητική συμπεριφορά Χάλυβα Steel02 υπό ανακύκλιση.

Το υλικό ενεργοποιείται με την εντολή

**uniaxialMaterial Steel02 \$matTag \$Fy \$E \$b \$R0 \$cR1 \$cR2**

όπου οι παράμετροι που προσδιορίζουν τις ιδιότητες του υλικού είναι:

**\$matTag** : ο αριθμός-ταυτότητα με τον οποίο αποθηκεύεται το υλικό.

**\$Fy** : το όριο διαρροής του χάλυβα.

**\$E** : η αρχική ελαστική δυσκαμψία.

**\$b** : ο συντελεστής κράτυνσης ίσος με  $E_p/E$ .

**\$R0 \$cR1 \$cR2** : οι παράμετροι που ελέγχουν τη μετάβαση από τον ελαστικό στον πλαστικό κλάδο (χρησιμοποιήθηκαν οι συνιστώμενες τιμές 15, 0.95 και 0.15 αντίστοιχα).

```
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
```

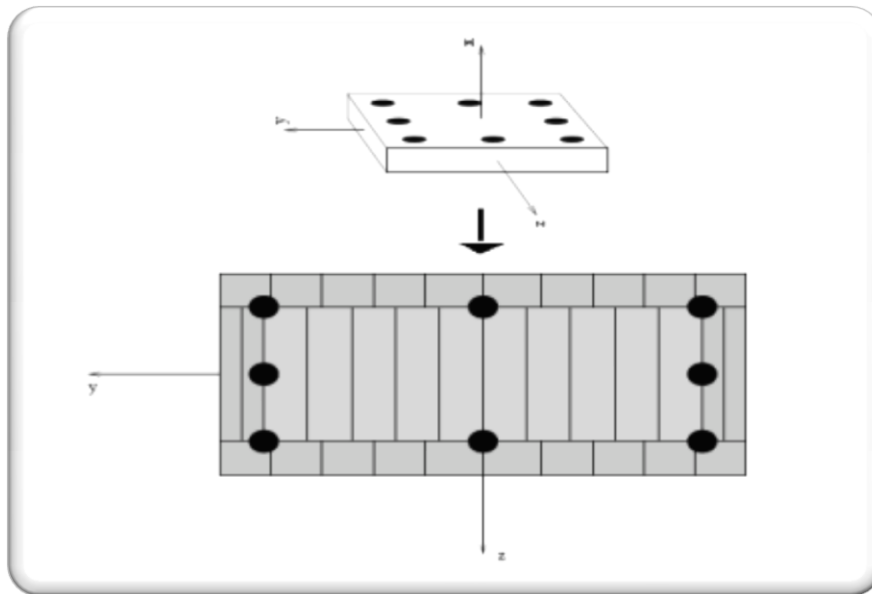
Εικόνα 3.8: Ιδιότητες Χάλυβα σπλισμού.

Θεωρήθηκαν λοιπόν  $F_y$  (όριο διαρροής χάλυβα)=500MPa και  $E$  (αρχική ελαστική δυσκαμψία) = 200000MPa .

Αξίζει να σημειωθεί ότι η παρουσία ομαλού μεταβατικού κλάδου μεταξύ ελαστικής και πλαστικής περιοχής βοηθάει στην αποφυγή προβλημάτων σύγκλισης κατά τη μετάβαση από τον έναν κλάδο στον άλλο. Αυτό άλλωστε είναι το συγκριτικό πλεονέκτημα αυτού του υλικού έναντι άλλων διγραμμικών ελαστοπλαστικών μοντέλων (πχ Steel01 Material).

## 3.2.2.2 Διατομές

Στο OpenSees οι διατομές Ω/Σ προσομοιώνονται αποτελεσματικά μέσω της διακριτοποίησης τους σε ίνες (Εικόνα 3.9). Έτσι με την πολυστρωματική θεώρηση λαμβάνεται υπόψη και η αλληλεπίδραση της ροπής κάμψης και της αξονικής δύναμης σε μια διατομή.



Εικόνα 3.9: Διακριτοποίηση διατομής σε ίνες.

Ο ορισμός μιας διατομής γίνεται μέσω της παρακάτω εντολής, όπου οι ίνες μπορούν να εισαχθούν με τρεις τρόπους.

```
section Fiber$secTag {
```

```
    fiber...
```

```
    patch...
```

```
    layer... ...}
```

α) Ως μεμονωμένα στοιχεία με την εντολή:

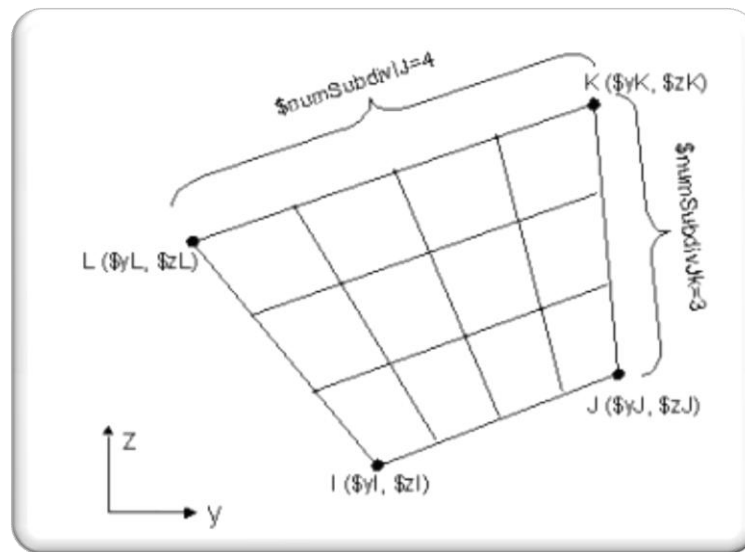
```
    fiber $yLoc $zLoc $A $matTag
```

όπου προσδιορίζονται (κατά σειρά) : η θέση της ίνας στο τοπικό σύστημα της διατομής, το εμβαδόν της ίνας και του υλικού από το οποίο αποτελείται.

β) Ως ομάδες ινών μέσω της εντολής:

```
    patch quad $matTag $numSubdivIJ $numSubdivJK $yI $zI $yJ $zJ $yK $zK $yL $zL
```

όπου εισάγονται : το υλικό, ο αριθμός των ινών και τα όρια της ομάδας στο τοπικό σύστημα αξόνων, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η εντολή αυτή προτιμήθηκε για την προσομοίωση του σκυροδέματος.



Εικόνα 3.10 : Ομάδα ινών.

γ) Ως ισαπέχουσες ίνες μέσω της εντολής:

**layer straight \$matTag \$numFiber \$areaFiber \$yStart \$zStart \$yEnd \$zEnd**

όπου προσδιορίζονται : το υλικό, ο αριθμός των ινών, το εμβαδόν, η αρχή και το πέρας της στρώσης. Η εντολή αυτή χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία των οπλισμών.

### 3.2.2.3 Στοιχεία Δοκού-Υποστυλώματος

Για την προσομοίωση των δοκών και των υποστυλωμάτων χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία δοκού-υποστηλώματος κατανεμημένης πλαστιμότητας, τα οποία βασίζονται στη μέθοδο των δυνάμεων (Force Based Beam-Column Elements). Τα στοιχεία αυτά προτιμήθηκαν έναντι εκείνων που ακολουθούν την μέθοδο των μετακινήσεων (Displacement Based) καθώς επιτυγχάνεται γρηγορότερη σύγκλιση.

Η εντολή που ενεργοποιεί τα στοιχεία αυτά είναι η ακόλουθη:

**element nonlinearBeamColumn \$eleTag \$iNode \$jNode \$numIntgrPts \$secTag \$transfTag**

στην οποία πρέπει να προσδιοριστούν:

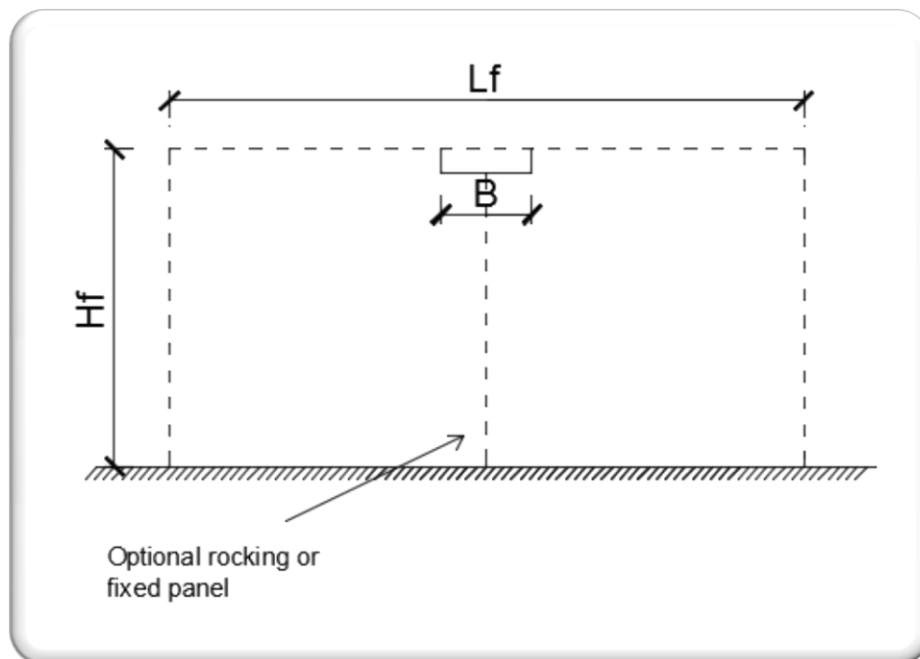
**\$eleTag** : η αρίθμηση του στοιχείου.

**\$iNode \$jNode** : οι κόμβοι αρχής και πέρατος.

**\$numIntgrPts**: τα εσωτερικά σημεία ολοκλήρωσης (Gauss points).

**\$secTag** : ο αριθμός της διατομής.

**\$transfTag** : ο μετασχηματισμός από το τοπικό στο καθολικό σύστημα συντεταγμένων.



Εικόνα 3.11 : Τρόπος προσομοίωσης πλαισίου στο OpenSees.

### 3.2.3 Παράμετροι Στατικών Ανελαστικών Αναλύσεων<sup>40</sup>.

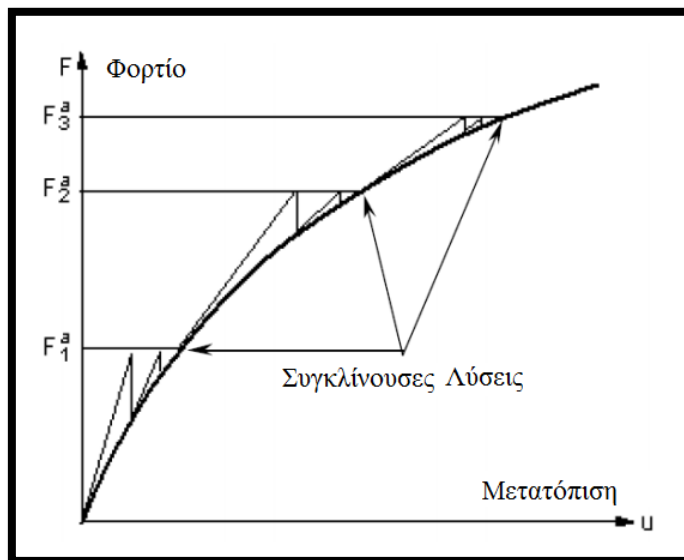
Στην εργασία αυτή έγιναν στατικές ανελαστικές αναλύσεις εξώθησης (Pushover Analysis) σε διαφορετικές περιπτώσεις πλαισίων με προσθήκη η μη στοιχείου λικνισμού, οι οποίες παρουσιάζονται σε επόμενα υποκεφάλαια.

Κατά τις αναλύσεις αυτές αρχικά επιβάλλονται στο φορέα τα ίδια βάρη, 60 KN/m κατά μήκος της δοκού και εκτελείται μια πρώτη στατική επίλυση με τα κατακόρυφα αυτά φορτία. Στη συνέχεια επιβάλλονται τα οριζόντια φορτία και εκτελείται σε προκαθορισμένα βήματα φόρτισης ή μετατόπισης μια στατική ανελαστική ανάλυση.

Σε ανελαστικά προβλήματα η σχέση  $[P]=[K]*[\Delta]$ , που συνδέει τις μετακινήσεις με τα φορτία είναι μη γραμμική καθώς η δυσκαμψία της κατασκευής μειώνεται με την αύξηση του φορτίου, μεταβάλλοντας έτσι και το μητρώο δυσκαμψίας  $[K]$ . Αυτό θα το δούμε αργότερα στο κεφάλαιο 3, όπου λαμβάνουν μέρος οι ανελαστικές αναλύσεις. Έτσι κατά τον υπολογισμό μιας στοιχειώδους

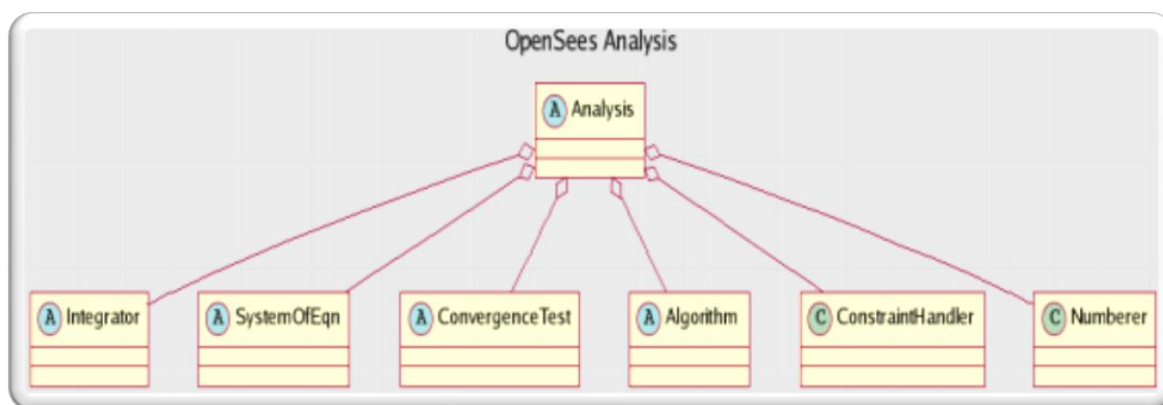
<sup>40</sup> Παραμένουν οι ίδιοι που χρησιμοποιήθηκαν και στις ελαστικές αναλύσεις, παρόλ'αυτα αναφέρονται και στο παρόν υποκεφάλαιο για λόγους ανεξαρτητοποίησης των κεφαλαίων.

μετακίνησης  $\Delta u$  που οφείλεται σε μια στοιχειώδη μεταβολή της δύναμης  $\Delta P$  εισέρχεται ένα σφάλμα σε κάθε διαδοχικό βήμα φόρτισης. Το σφάλμα αυτό μειώνεται μέσω διαδοχικών επαναλήψεων μέχρι να επιτευχθεί το απαιτούμενο κριτήριο σύγκλισης εντός του προκαθορισμένου μέγιστου αριθμού επαναλήψεων.



Διάγραμμα 3.1: Διαδικασία μη γραμμικής επίλυσης.

Για να εκτελέσει το λογισμικό τις αναλύσεις αυτές πρέπει να προσδιοριστούν αρκετές παράμετροι, οι οποίες διαφέρουν σε κάθε περίπτωση ανάλογα με τη φύση του προβλήματος.



Εικόνα 3.12 : Παράμετροι ανάλυσης.

Οι παράμετροι αυτές είναι οι εξής :

α) **ConstraintHandler** : Καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο οι συνοριακές συνθήκες εισέρχονται στην ανάλυση και το πώς αυτές επηρεάζουν τους βαθμούς ελευθερίας των κόμβων. Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής χρησιμοποιήθηκε η εντολή `constraints Transformation`, η οποία εφαρμόζεται όταν οι δεσμεύσεις των κόμβων δεν είναι ομογενείς (λόγω της ύπαρξης του στοιχείου λικνισμού).

β) **DOF Numberer** : Καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο αριθμούνται οι εξισώσεις και αντιστοιχίζονται με τους βαθμούς ελευθερίας. Επειδή η αρίθμηση των κόμβων που χρησιμοποιήθηκε στα περισσότερα προβλήματα δεν ήταν συνεχής έπρεπε να χρησιμοποιηθεί ένας καταμετρητής που να συμπυκνώνει την αρίθμηση, μειώνοντας έτσι τις διαστάσεις των μητρώων και αποφεύγοντας την εισαγωγή πρόσθετων μηδενικών όρων. Για το λόγο αυτό προτιμήθηκε ο καταμετρητής Reverse Cuthill-McKee (RCM).

γ) **System Of Equation/Solver** : Ορίζει τον τρόπο με τον οποίο αποθηκεύονται και λύνονται οι μητρικές εξισώσεις. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε το σύστημα UmfPack, το οποίο προτείνεται για προσομοιώματα με μεγάλο αριθμό στοιχείων.

δ) **Integrator** : Η παράμετρος αυτή καθορίζει το στόχο του επόμενου βήματος. Υπάρχουν δύο δυνατές επιλογές ανάλογα με το αν ο στόχος προσδιορίζεται με την επιβολή πρόσθετης δύναμης (LoadControl) ή μετακίνησης (DisplacementControl) στο φορέα. Για την επιβολή των κατακόρυφων φορτίων χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση με LoadControl ενώ για τη πλευρική εξώθηση χρησιμοποιήθηκε η DisplacementControl καθώς παρατηρήθηκε ευκολότερη σύγκλιση.

ε) **Algorithm** : Εδώ ορίζεται ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την εύρεση του επιθυμητού στόχου. Επιλέχθηκε ο αλγόριθμος Newton-Raphson που χρησιμοποιεί ένα επικαιροποιημένο μητρώο δυσκαμψίας

στ) **Convergence Test** : Η παράμετρος αυτή εξετάζει αν έχει πραγματοποιηθεί σύγκλιση στο τέλος του βήματος φόρτισης μέσω ενός κριτηρίου σύγκλισης. Επιλέχθηκε το Norm Displacement Increment .

Μετά από την επιλογή των προηγούμενων παραμέτρων ορίζεται η ανάλυση να είναι στατική μέσω της εντολής **analysis Static** καθώς δεν έγιναν δυναμικές αναλύσεις.

### 3.2.4 Εξαγωγή αποτελεσμάτων

Για τις ανάγκες του παρόντος κεφαλαίου σχετικά με την εξαγωγή των απαραίτητων αποτελεσμάτων, χρειάστηκαν διάφορα στοιχεία κατά την φόρτιση των πλαισίων μέσω της Στατικής Ανελαστικής Ανάλυσης Εξώθησης (Pushover Analysis). Συγκεκριμένα χρειάστηκαν να παρθούν αποτελέσματα για τρεις διαφορετικές κύριες κατηγορίες ανά περίπτωση.

Σε πρώτη φάση, για κάθε βήμα της φορτίσεως, αρχικώς λόγω της σταδιακής φορτίσεως του κατανεμημένου οριζόντιο φορτίου της κύριας δοκού, αλλά και του στοιχείου λικνισμού όπου θεωρήθηκε ως ενεργό δρών επί του πλαισίου το



ήμισυ του βάρους του<sup>41</sup>, και ακολούθως λόγω της σταδιακώς αυξανόμενης οριζόντιας φόρτισης, χρειάστηκαν τα αποτελέσματα από το λογισμικό πρόγραμμα OpenSees της δυνάμεως φορτίσεως με την αντίστοιχη μετακίνηση της οροφής του ( μέσω της κύριας δοκού ) ανά αύξων βήμα για τον σχεδιασμό των καμπύλων Pushover. Η συγκεκριμένη ανάγκη εκπληρώθηκε με την εντολή :

**recorder Node <-file \$fileName> <-time> <-nodes \$node1 -dof (\$dof1) disp**

στην οποία εισάγονται κατά σειρά, το όνομα του αρχείου στο οποίο θέλει ο χρήστης να εμφανίζονται τα αποτελέσματα, ο αριθμός αναγνώρισης του κόμβου τον οποίο να αφορούν τα αποτελέσματα, ο βαθμός ελευθερίας για τον οποίο θα εμφανίζεται η προκύπτουσα μετακίνηση και τέλος η εντολή disp η οποία καθορίζει ως εξαγωγή αποτελέσματα την δύναμη με την προκύπτουσα μετακίνηση για κάθε βήμα της προσαυξητικής ανάλυσης.

```
recorder Node -file Example.out -time -nodes 14 -dof 1 disp
```

Εικόνα 3.13: Παράδειγμα χρήσης της εντολής recorder-disp.

Σε δεύτερη φάση χρειάστηκαν οι εμφανιζόμενες μέγιστες ροπές και οι αντίστοιχες τιμές καμπυλοτήτων κατά μήκος του φορέα. Ως γνωστών τα μέγιστα αυτά εμφανίζονται σε μία εκ των βάσεων των υποστυλωμάτων, έτσι έγινε ο υπολογισμός τους μόνο για τις δύο αυτές βάσεις επί του πλαισίου ενός ανοίγματος που μελετάται. Η συγκεκριμένη ανάγκη εκπληρώθηκε με τις εντολές:

**recorder Element <-file \$fileName> <-time> <-ele \$ele1 section \$section1 Force**

όπου εισάγονται κατά σειρά, το όνομα του αρχείου στο οποίο θέλει ο χρήστης να εμφανίζονται τα αποτελέσματα, ο αριθμός αναγνώρισης της ράβδου στις οποίες θα εμφανίζονται τα αποτελέσματα για την επιφάνεια που έχουμε δηλώσει, ο αριθμός αναγνώρισης της επιφάνειας και τέλος η εντολή Force η οποία καθορίζει ως εξαγωγή αποτελέσματα την δύναμη που εφαρμόζεται στο πλαίσιο με την Fx και Mx στο τοπικό σύστημα.

**recorder Element <-file \$fileName> <-time> <-ele \$ele1 section \$section1 deformation**

όπου εισάγονται κατά σειρά, το όνομα του αρχείου στο οποίο θέλει ο χρήστης να εμφανίζονται τα αποτελέσματα, ο αριθμός αναγνώρισης της ράβδου στις οποίες θα εμφανίζονται τα αποτελέσματα για την επιφάνεια που έχουμε

<sup>41</sup> Γίνεται η παραδοχή πως το μισό βάρος του παραλαμβάνεται από το έδαφος και δεν λαμβάνει μέρος στην απόκριση του πλαισίου.

δηλώσει, ο αριθμός αναγνώρισης της επιφάνειας και τέλος η εντολή `deformation` η οποία καθορίζει ως εξαγωγή αποτελέσματα την δύναμη που εφαρμόζεται στο πλαίσιο με την αξονική παραμόρφωση και την καμπυλότητα.

Μέσω επεξεργασίας των ανωτέρω αποτελεσμάτων και χρήση των αποτελεσμάτων ροπής και καμπυλότητας έγινε ο υπολογισμός των τοπικών πλαστικοτήτων.

```
recorder Element -file deformation1.out -time -ele 1 section 1 deformation
recorder Element -file forces1.out -time -ele 1 section 1 force
```

Εικόνα 3.14: Παράδειγμα χρήσης των εντολών `recorder-deformation` και `recorder-force`.

Τέλος, όπως θα δούμε σε επόμενα κεφάλαια χρειάστηκε για την ορθή εύρεση της αποσβέσεως των πλαισίων ο ακριβής υπολογισμός των τεμνουσών των ανελαστικών δρών υποστυλωμάτων. Η συγκεκριμένη ανάγκη εκπληρώθηκε με την εντολή:

**recorder Element <-file \$fileName> <-time> <-ele \$ele1 \$ele2 globalForce**

στο οποίο εισάγονται κατά σειρά, το όνομα του αρχείου στο οποίο θέλει ο χρήστης να εμφανίζονται τα αποτελέσματα, ο αριθμός αναγνώρισης των ράβδων στις οποίες θα εμφανίζονται τα αποτελέσματα MQN για κάθε ένα από τους κόμβους της και τέλος η εντολή `globalForce` η οποία καθορίζει ως εξαγωγή αποτελέσματα την δύναμη που εφαρμόζεται στο πλαίσιο με τις εμφανιζόμενες δυνάμεις για κάθε κόμβο της ράβδου στο καθολικό σύστημα. Μέσω των προκυπτουσών αποτελεσμάτων, έγινε χρήση των εμφανιζόμενων τεμνουσών που ήταν αναγκαία ανά περίπτωση.

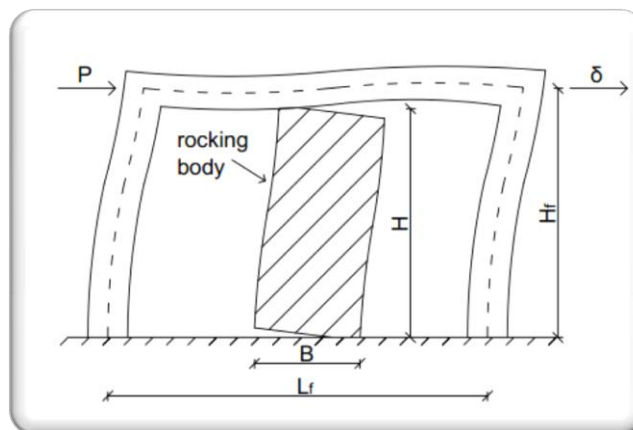
```
recorder Element -file Example.out -time -ele 1 2 globalForce
```

Εικόνα 3.15: Παράδειγμα χρήσης της εντολής `recorder-globalForce`.

### 3.3 Περιπτώσεις πλαισίων που μελετήθηκαν

#### 3.3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται η απόκριση δύο κύριων περιπτώσεων πλαισίων. Η πρώτη κατηγορία αποτελείται από κτήρια που θεωρούνται "νέα κτήρια" δηλαδή οπλισμένα με τους σύγχρονους κανονισμούς, επωμένος θεωρητικός για τον σεισμό σχεδιασμού να αναπτύσσουν γενική πλαστιμότητα  $\mu=3.0$ . Η δεύτερη κατηγορία αποτελείται από κτήρια που θεωρούνται "παλαιά κτήρια" δηλαδή οπλισμένα με τους παλαιούς κανονισμούς, επωμένος θεωρητικός για τον σεισμό σχεδιασμού να αναπτύσσουν γενική πλαστιμότητα  $\mu=6.0$ . Ο σχεδιασμός αυτός αφορά τα ελεύθερα πλαίσια, δηλαδή πλαίσια χωρίς την ύπαρξη του στοιχείου λικνισμού. Εφόσον έγινε ο οπλισμός αυτός για όλες τις περιπτώσεις πλαισίων με μήκη 3.0, 4.2, 5.6 και 7.0m έγιναν οι αναλύσεις όλων αυτών των περιπτώσεων με την ενίσχυση τους με το στοιχείο λικνισμού, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την βελτίωση της απόκρισης τους.



Εικόνα 3.16: Πλαίσιο με προσθήκη στοιχείου λικνισμού.

#### 3.3.2 Όπλιση Πλαισίων

##### 3.3.2.1 ATC-40, με υπολογισμό απόσβεσης ελεύθερων πλαισίων.

Τα πλαίσια που μελετώνται στο παρόν κεφάλαιο, λόγω της ανάπτυξης πλαστιμότητας αναπτύσσουν και την ανάλογη απόσβεση. Σε πρώτη φάση, κατά την επαναληπτική διαδικασία εύρεσης των απαραίτητων οπλισμών των ελεύθερων πλαισίων, όπου τα πλαίσια αποτελούνται αποκλειστικά από

ανελαστικά στοιχεία, η απόσβεση αυτή υπολογίζεται με την μέθοδο ATC-40 που περιγράφεται παρακάτω.

Η μέθοδος ATC-40 σε βήματα:

Στην ATC-40 προτείνονται τρεις μεθοδολογίες υπολογισμού με παραπλήσια αποτελέσματα. Παρακάτω περιγράφεται η διαδικασία της πρώτης μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική για τον υπολογισμό της απόσβεσης και των στοχευμένων μετακινήσεων στα ανελαστικώς δρώντα ελεύθερα πλαίσια. Η διαδικασία αυτή είναι περισσότερο αναλυτική και μπορεί εύκολα να προγραμματιστεί, σε αντίθεση με την τρίτη η οποία είναι γραφική. Τονίζεται ότι η διαδικασία αυτή, αφορά και πολυβάθμια πλαίσια, αλλά για τις ανάγκες της παρούσης που μελετώνται μονοβάθμια πλαίσια, αρκούν, τα παρακάτω προσαρμοσμένα βήματα για την περίπτωση μας:

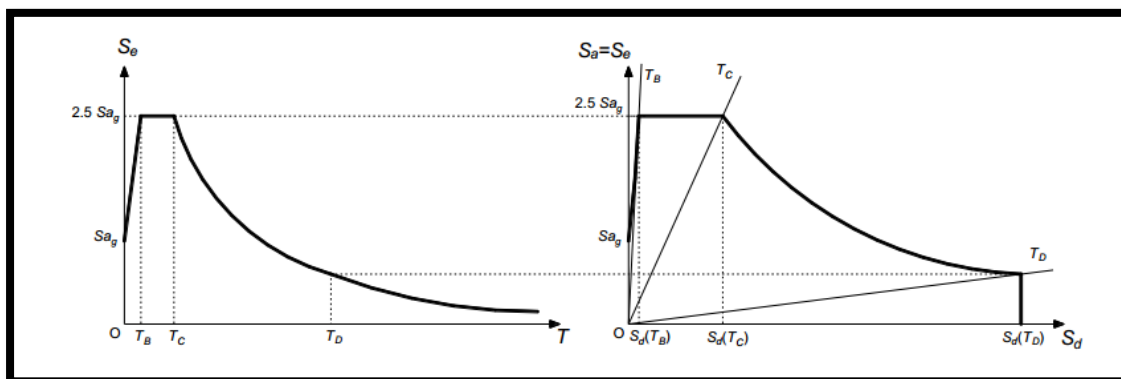
1. Μετατροπή του ελαστικού φάσματος σχεδιασμού για  $\zeta=5\%$  σε μορφή ADRS όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3.2. Η διαδικασία μετατροπής είναι απλή και βασίζεται στη σχέση:

$$S_d = \frac{T^2}{4 \cdot \pi^2} \cdot S_a \quad (3.1)$$

Σημειώνεται ότι ισχύει:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{S_d}{S_a}} \quad (3.2)$$

και επομένως στο φάσμα ADRS ακτινικές γραμμές από την αρχή των αξόνων έχουν σταθερή περίοδο (Διάγραμμα 3.2)



Διάγραμμα 3.2 : Μετατροπή ελαστικού φάσματος σχεδιασμού σε μορφή ADRS.

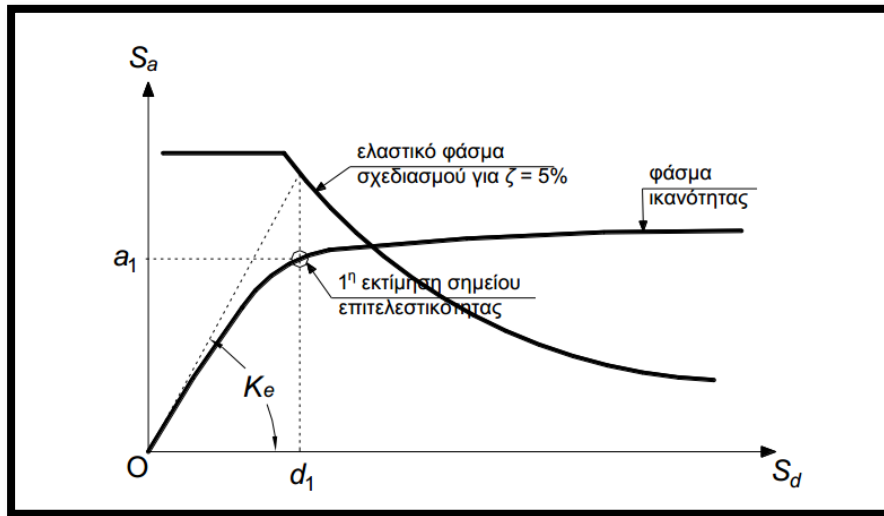
2. Κατασκευή της καμπύλης ικανότητας και του φάσματος ικανότητας,  
Η κατασκευή της καμπύλης ικανότητας προκύπτει ανά περίπτωση με την χρήση του προγράμματος OpenSees για πλαίσιο με συγκεκριμένο οπλισμό. Στην συνέχεια, η καμπύλη αυτή μετατρέπεται σε φάσμα ικανότητας του χρησιμοποιώντας τις σχέσεις :

$$S_a = \frac{P}{m\omega l} \quad (3.3)$$

$$S_d = \delta \quad (3.4)$$

### 3. Εύρεση 1ου σημείου δοκιμών.

Από το ελαστικό φάσμα για απόσβεση  $\zeta=5\%$  υπολογίζεται η μετακίνηση  $d_1$  για την δυσκαμψία  $K_e$  που αντιστοιχεί σε ρηγματωμένες διατομές (τέμνουσα δυσκαμψία στο θεωρητικό σύστημα 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  $a_1$  (Διάγραμμα 3.3)



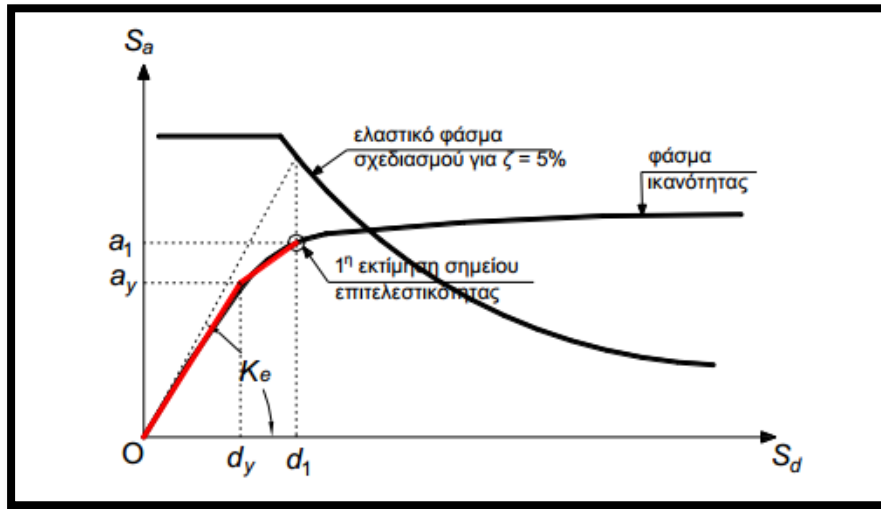
Διάγραμμα 3.3 : Εύρεση 1ου σημείου δοκιμών.

Σημειώνεται ότι η μετακίνηση  $d_1$  είναι η τιμή που θα προέκυπτε από τη θεώρηση ίσης μετακίνησης μεταξύ του ελαστικού και του ανελαστικού συστήματος<sup>42</sup>.

### 4. Κατασκευή γραμμικού φάσματος ικανότητας.

Διγραμμικοποιούμε το τμήμα του φάσματος ικανότητας μέχρι το σημείο της 1<sup>ης</sup> εκτίμησης του σημείου επιτελεστικότητας που υπολογίστηκε στο προηγούμενο βήμα με κριτήριο τα αποκοπτόμενα εμβαδά πάνω και κάτω από την καμπύλη να είναι ίσα (Σχήμα). Έτσι ορίζεται η μετακίνηση διαρροής  $d_y$  και η επιτάχυνση διαρροής  $a_y$ .

<sup>42</sup> Παραδοχή ίσων μετακινήσεων.



Διάγραμμα 3.4 : Κατασκευή διγραμμικού φάσματος ικανότητας.

5. Υπολογισμός ενεργούς απόσβεσης. Η ενεργός απόσβεση μπορεί να γραφτεί ως:

$$\zeta_{eff} = \zeta_e + \zeta_{hyst} \quad (3.5)$$

όπου:  $\zeta_e$  = απόσβεση κατασκευής για ελαστική συμπεριφορά ( $\zeta_e = 5\%$  για Ω.Σ) και  $\zeta_{hyst}$  = υστερητική απόσβεση λόγω ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς. Για τον υπολογισμό της υστερητικής απόσβεσης χρησιμοποιείται η σχέση Chorga. Έχει αποδειχθεί όμως ότι η σχέση αυτή υπερεκτιμά την υστερητική απόσβεση για σεισμούς μεγάλης διάρκειας και κατασκευές χωρίς καλή πλάσטיμη συμπεριφορά. Γι' αυτό, στην ATC-40 προτείνεται η χρήση ενός διορθωτικού συντελεστή  $\kappa$  που ορίζεται ανάλογα με την ποιότητα της κατασκευής σε συνδυασμό με την αναμενόμενη σεισμική διέγερση. Οι τύποι συμπεριφοράς δίνονται στον Πίνακα 3.1 και οι συντελεστές  $\kappa$  στον Πίνακα 3.3 .

Για τις ανάγκες της παρούσης διπλωματικής και για λόγους περιορισμού της πολυπλοκότητας των υπολογισμών οι κατασκευές θεωρήθηκαν ως μέτρια αντισεισμικές για σεισμό μικρής διάρκειας, κοντά στο επίκεντρο (Κατηγορία Β).

Θέτοντας  $\alpha_m = a_1$  και  $d_m = d_1$  στην προηγούμενη σχέση προκύπτει σύμφωνα με τα παραπάνω:

$$\zeta_{eff}(\%) = 5 + \frac{63.7 \cdot \kappa \cdot (\alpha_y \cdot d_1 - d_y \cdot a_1)}{a_1 \cdot d_1} \quad (3.6)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού που αντιστοιχεί σε απόσβεση  $\zeta = \zeta_{eff}$  με πολλαπλασιασμό των τιμών του φάσματος σχεδιασμού για  $\zeta = 5\%$  με τους συντελεστές  $SR_A$  και  $SR_B$  :

$$SR_A = \frac{1}{B_s} = \frac{3.21 - 0.68 \cdot \ln \zeta_{eff}}{2.12} \geq SR_{A,min} \quad (3.7)$$

$$SR_B = \frac{1}{B_L} = \frac{2.31 - 0.41 \cdot \ln \zeta_{eff}}{1.65} \geq SR_{V,min} \quad (3.8)$$

στα τμήματα που αντιστοιχούν σε σταθερή επιτάχυνση και σταθερή ταχύτητα αντίστοιχα. Οι ελάχιστες τιμές των συντελεστών δίνονται στον Πίνακα 3.3.

Το σημείο τομής μεταξύ του φάσματος σχεδιασμού για  $\zeta = \zeta_{eff}$  και του φάσματος ικανότητας ορίζει το νέο σημείο επιτελεσματικότητας. 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. (Εικόνα 3.5)

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

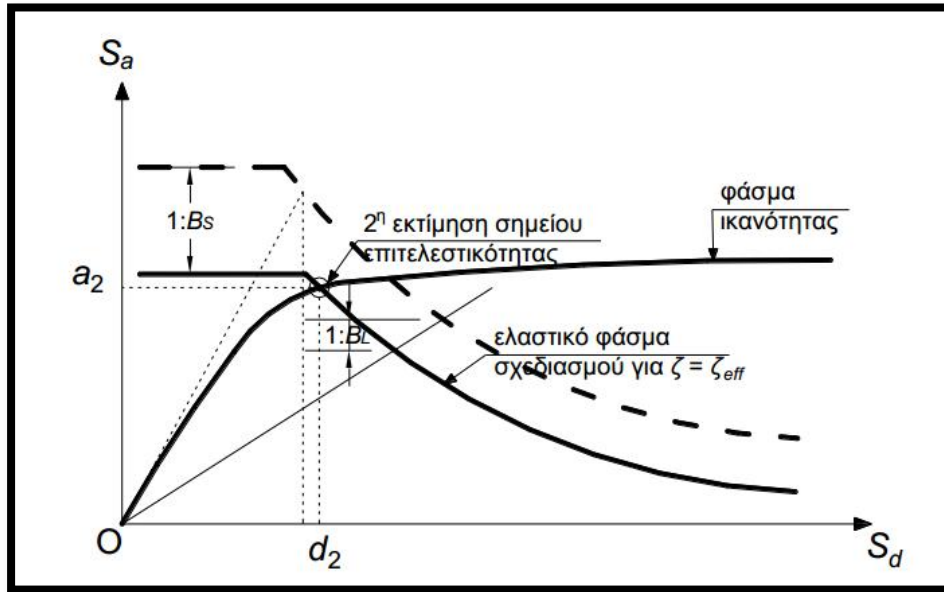
Πίνακας 3. 1 : Τύποι συμπεριφοράς κτηρίων.

Τύπος συμπεριφοράς	$\zeta_{hyst}$ (%)	$\kappa$
A	$\leq 16.25$	1.00
	$> 16.25$	$1.13 - \frac{0.51 \cdot (a_y \cdot d_m - d_y \cdot a_m)}{a_m \cdot d_m}$
B	$< 25$	0.67
	$> 25$	$0.845 - \frac{0.446 \cdot (a_y \cdot d_m - d_y \cdot a_m)}{a_m \cdot d_m}$
C	Όλες οι τιμές	0.33

Πίνακας 3. 2 : Τιμές διορθωτικού συντελεστή  $\kappa$ .

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

Πίνακας 3.3 : Ελάχιστες τιμές μειωτικών συντελεστών απόσβεσης.



Διάγραμμα 3.5 : Κατασκευή ελαστικού φάσματος απόκρισης για  $\zeta = \zeta_{eff}$  και εύρεση νέου σημείου επιτελεστικότητας.

Η μέθοδος βασίζεται σε επαναληπτική διαδικασία μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση. Θεωρούμε ότι η σύγκλιση έχει επιτευχθεί εάν:

$$0.95 \cdot d_1 < d_2 < 1.05 \cdot d_1 \quad (3.9)$$

Εάν το κριτήριο δεν ικανοποιείται, επαναλαμβάνεται η διαδικασία για μέγιστη μετακίνηση  $d_2$  και μέγιστη επιτάχυνση  $a_2$ . Εάν το κριτήριο ικανοποιείται, η μέτακίνηση  $d_2$  αντιστοιχεί στη μέγιστη αναμενόμενη μετακίνηση ( στοχευόμενη μετακίνηση ) του πλαισίου.

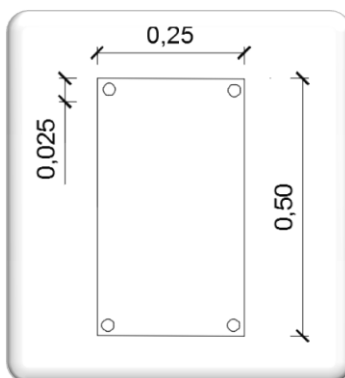
Σημειώνεται ότι, κατά την διαδικασία των επιλύσεων για τις ανάγκες της παρούσης διπλωματικής έγιναν αντιληπτά κάποια προβλήματα συνεχούς παλινδρόμησης στη σύγκλιση της συγκεκριμένης μεθόδου. Τα προβλήματα αυτά παρουσιάζονταν όταν το σημείο επιτελεστικότητας για κάποια επανάληψη προέκυπτε κοντά στην θεωρητική μετακίνηση διαρροής. Στις περιπτώσεις αυτές, ακολουθήθηκε η λογική των δοκιμών για τις τιμές της αποσβέσεως. Οι τιμές για τις δοκιμές αυτές ακολουθούσαν την εξής πορεία: Αν η τιμή της αποσβέσεως που προέκυπτε ήταν μεγαλύτερη της προηγούμενης τότε, η απόσβεση για την επόμενη δοκιμή δεν έπαιρνε την τιμή της 2ης αλλά της πρώτης, προσαυξημένης με μία πολύ μικρή αύξηση. Αν ήταν μικρότερη αντίστοιχα. Έτσι μετά από κάποιες δοκιμές, επιτυχανόταν και η εξαγωγή της ορθής αποσβέσεως και για αυτές τις προκύπτουσες περιπτώσεις προβληματικής σύγκλισης κατά την επαναληπτική διαδικασία.



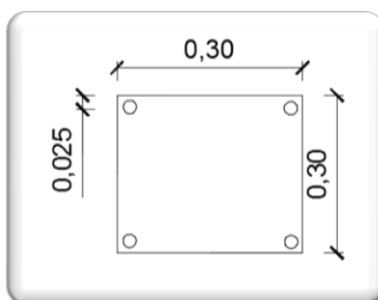
### 3.3.2.2 Διαδικασία όπλισης ελεύθερων πλαισίων.

Μέσα από μια επαναληπτική μέθοδο όπλισης και υπολογισμού των γενικών πλαστιμοτήτων με χρήση της μεθόδου ATC-40 που αναλύθηκε παραπάνω έγινε η τελική όπλιση των πλαισίων. Σκοπός ήταν, για πλαίσια 3.0, 4.2, 5.6 και 7.0m μήκους ανοίγματος να βρεθεί ο κατάλληλος οπλισμός έτσι ώστε για τον σεισμό σχεδιασμού να αναπτύσσονται πλαστιμότητες 3.0 και 6.0 για κάθε περίπτωση.

Μετά από κάποιες δοκιμές, έγινε αντιληπτό ότι η ανάπτυξη της πλαστιμότητας ανά περίπτωση δεν επηρεάζεται τόσο από την όπλιση της δοκού αλλά επηρεάζεται κυρίως από τον οπλισμό των υποστυλωμάτων. Έτσι αποφασίστηκε ότι στο σύνολο των περιπτώσεων οι δοκοί θα οπλιστούν για όλες τις περιπτώσεις το ίδιο, με 4Φ12 (Εικόνα 3.17) και αυτό που θα αλλάζει ανά περίπτωση θα είναι ο οπλισμός των υποστυλωμάτων .



Εικόνα 3.17: Διατομή δοκού οπλισμένη πάντα με 4Φ12.



Εικόνα 3.18: Διατομή υποστυλώματος οπλισμένη κατά τον πίνακα 3.1 ανά περίπτωση.

## 3.3.2.3 Αποτελέσματα

Ακριβείς πλαστιμότητες και οπλισμοί

Μήκος πλαisiού(m)	Οπλισμός δοκού	Οπλισμός υποστρωμάτων	Γενική πλαστιμότητα
3,0	4Φ12	4Φ16	3,31
3,0	4Φ12	4Φ10	6,77
4,2	4Φ12	4Φ16	4,08
4,2	4Φ12	4Φ12	6,76
5,6	4Φ12	4Φ20	3,69
5,6	4Φ12	4Φ14	6,19
7,0	4Φ12	4Φ22	3,5
7,0	4Φ12	4Φ16	5,955

Πίνακας 3.4: Ακριβείς πλαστιμότητες και οπλισμού πλαisiών.

**Παρατήρηση:** Μελετήθηκαν πλαίσια για τα συγκεκριμένα μήκη ανοιγμάτων, που με όπλιση τυποποιημένου οπλισμού δίνουν το πλησιέστερο προς την επιθυμητή πλαστιμότητα 3.0 και 6.0.

### 3.4 Υπολογισμός στοχευμένων μετακινήσεων.

#### 3.4.1 Εισαγωγή

Αφού υπολογίστηκαν οι κατάλληλοι οπλισμοί των διαφόρων μηκών ανοιγμάτων για τα πλαίσια, ούτως ώστε να επιτυγχάνεται η πλησιέστερη δυνατή γενική πλαστιμότητα 3.0 (προσομοιάζοντας νέα κτήρια) και 6.0 (προσομοιάζοντας παλαιά κτήρια), ζητούμενο ήταν η εξαγωγή των καμπύλων ικανότητας για πλαίσια ελεύθερα και ενισχυμένα με το στοιχείο λικνισμού μεταβαλλόμενου πλάτους και των αντίστοιχων στοχευμένων μετακινήσεων για τον σεισμό σχεδιασμού της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Συγκεκριμένα, έγιναν ενισχύσεις για κάθε μια εκ των περιπτώσεων με προσθήκη στοιχείου λικνισμού πλάτους 1.0, 1.5 και 2.0 m .

Το βασικό πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε στην παρούσα διερεύνηση, αποτέλεσε το γεγονός πως το στοιχείο λικνισμού και η κωδικοποίηση του προσομοιάζει την ελαστική απόκριση ενός τέτοιου στοιχείου. Έτσι πλέον τα ενισχυμένα πλαίσια αποτελούν την συνύπαρξη ανελαστικών στοιχείων και ελαστικού. Επωμένος, η αρχική παραδοχή με την οποία είχε ληφθεί το πλαίσιο όλο με απόσβεση 5%, φάνηκε<sup>43</sup> πως αποτέλεσε υπεραπλούστευση αφού οδήγησε στο γεγονός οι τοπικές πλαστιμότητες για κάποιες ενισχύσεις πλαισίων με το στοιχείο λικνισμού να είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες των ελεύθερων πλαισίων. Αυτό συνέβηκε γιατί, τα ελεύθερα πλαίσια στην πλειοψηφία τους έδιναν απόσβεση περί το 27%. Η υπεραπλουστευμένη θεώρηση του 5% στο σύνολο των ενισχυμένων πλαισίων, οδηγούσε σε ανακριβή συμπεράσματα.

Έχοντας υπόψη λοιπόν, την παραπάνω διαπίστωση, και το γεγονός πως η μέθοδος ATC-40 ως έχει θα έδινε λανθασμένη απόσβεση στην περίπτωση μας, έγινε μια μικρή τροποποίηση της, η οποία περιγράφεται στο επόμενο υποκεφάλαιο, για να μας δίνεται η δυνατότητα για ορθώς ποιοτικά συμπεράσματα.

### 3.4.2 Παραλλαγή μεθόδου ATC-40 για ενισχυμένα πλαίσια.

Στα ενισχυμένα πλαίσια όπου το στοιχείο λικνισμού δρα ελαστικά με απόσβεση 5%, ενώ ο περιβάλλον φορέας απαρτάται από ανελαστικά δρώντα μέλη θεωρήθηκε μια τροποποίηση της μεθόδου ATC-40 για τον υπολογισμό της αποσβέσεως η οποία βασίζεται στη σχέση Chorga.

Η αλλαγή που έγινε αφορά στο βήμα 5 της παραγράφου 3.3.2.1, και συγκεκριμένα η συνολική απόσβεση στην περίπτωση μας υπολογίζεται από:

$$\zeta_{eff(\%)} = 5 + \frac{63.7 \cdot \kappa \cdot (\Sigma V_y \cdot d_1 - d_y \cdot \Sigma V_1)}{a_1 \cdot \Sigma V_1}$$

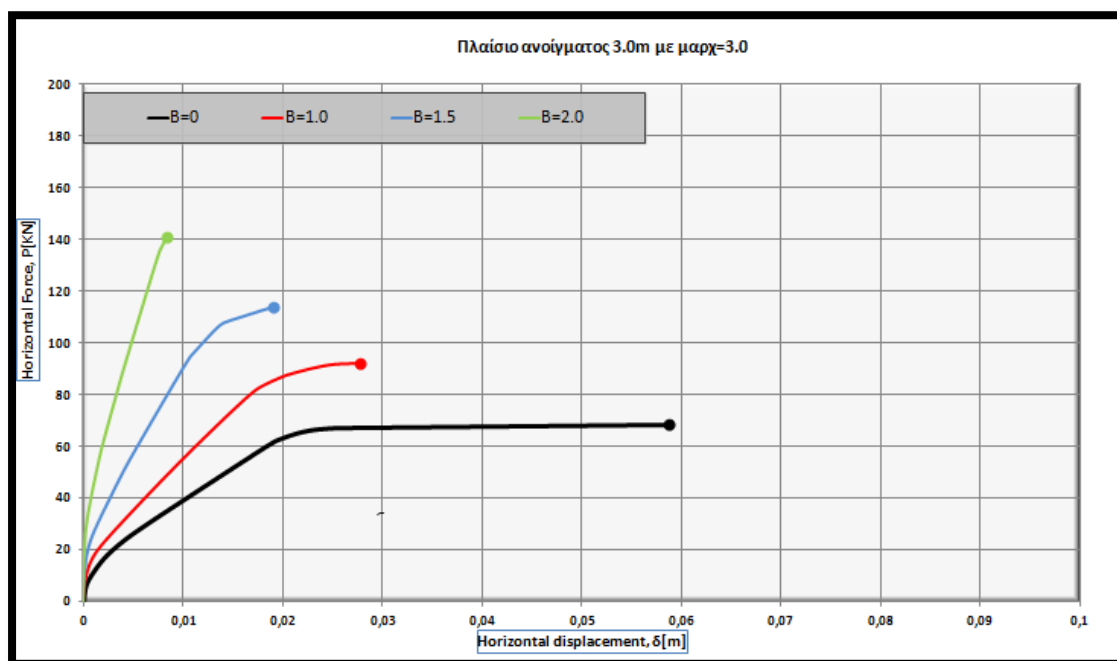
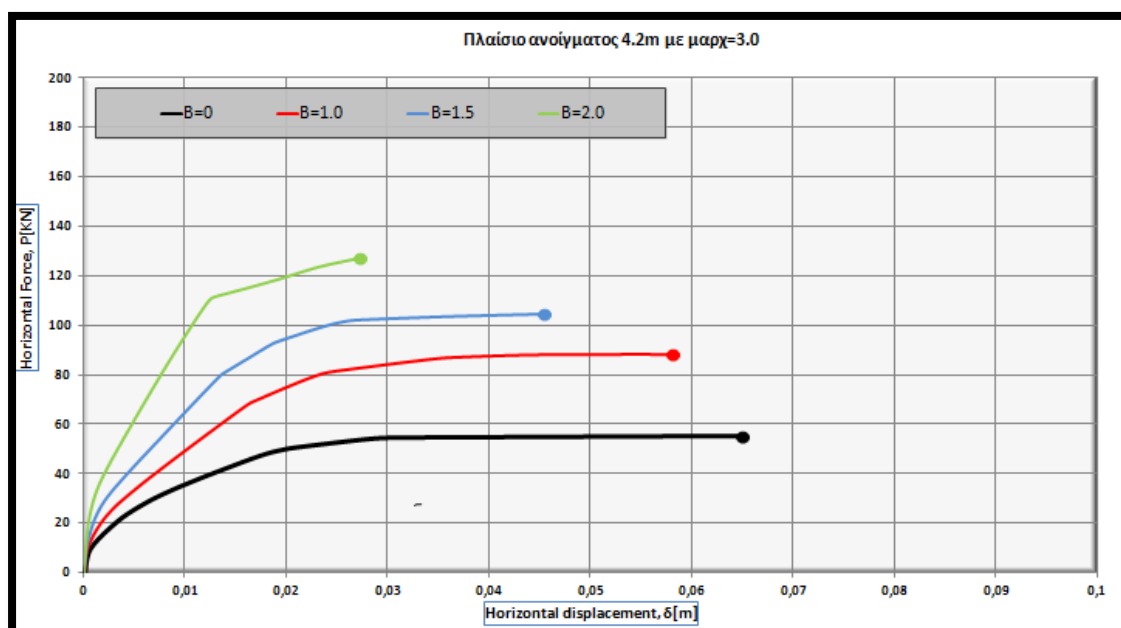
όπου τα  $\Sigma V_y$ ,  $\Sigma V_1$  αναφέρονται στο άθροισμα των τεμνουσών των βάσεων των ανελαστικών δρώντων υποστρωμάτων των πλαισίων στα αντίστοιχα σημεία της διγραμμικοποίησης για τέμνουσα διαρροής, και μέγιστη τέμνουσα.

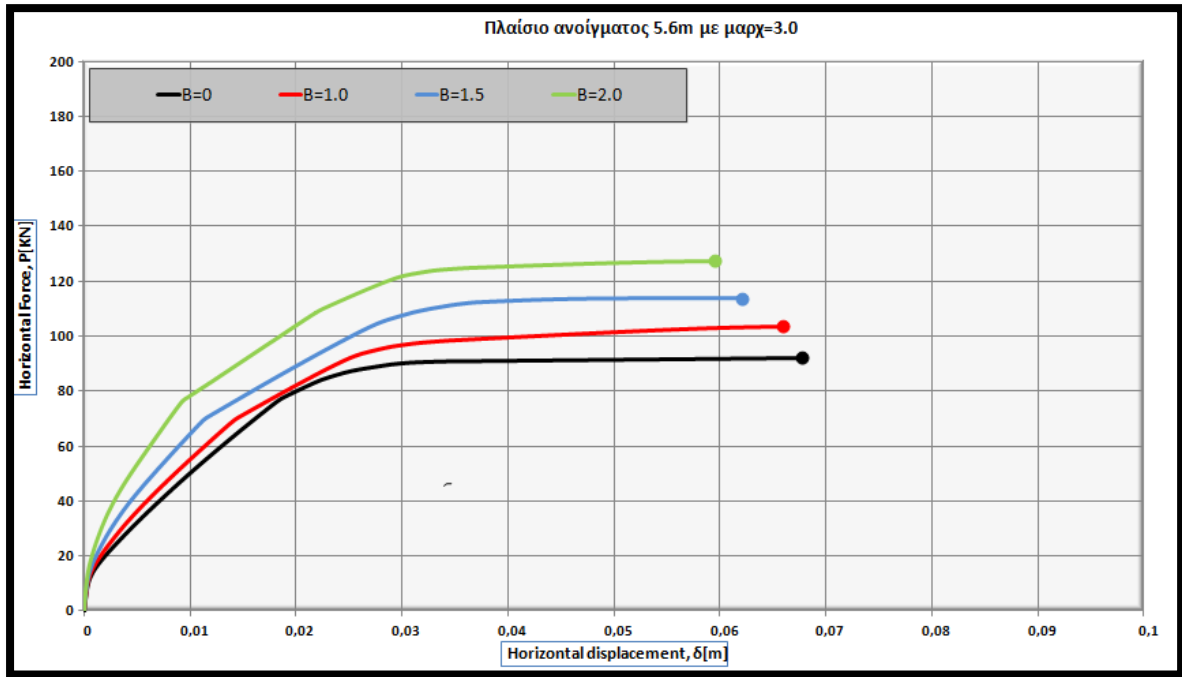
<sup>43</sup> Έγιναν υπολογισμοί θεωρώντας απλοποιητικά πλήρη ελαστική δράση, άρα απόσβεση 5%. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δεν παρουσιάζονται ως μέρος της διπλωματικής αφού παρουσιάζονται εν συνεχεία ακριβέστερα με θεώρηση ορθής απόσβεσης στο ενισχυμένο πλαίσιο.

## 3.4.3 Στοχευμένες μετακινήσεις πλαισίων

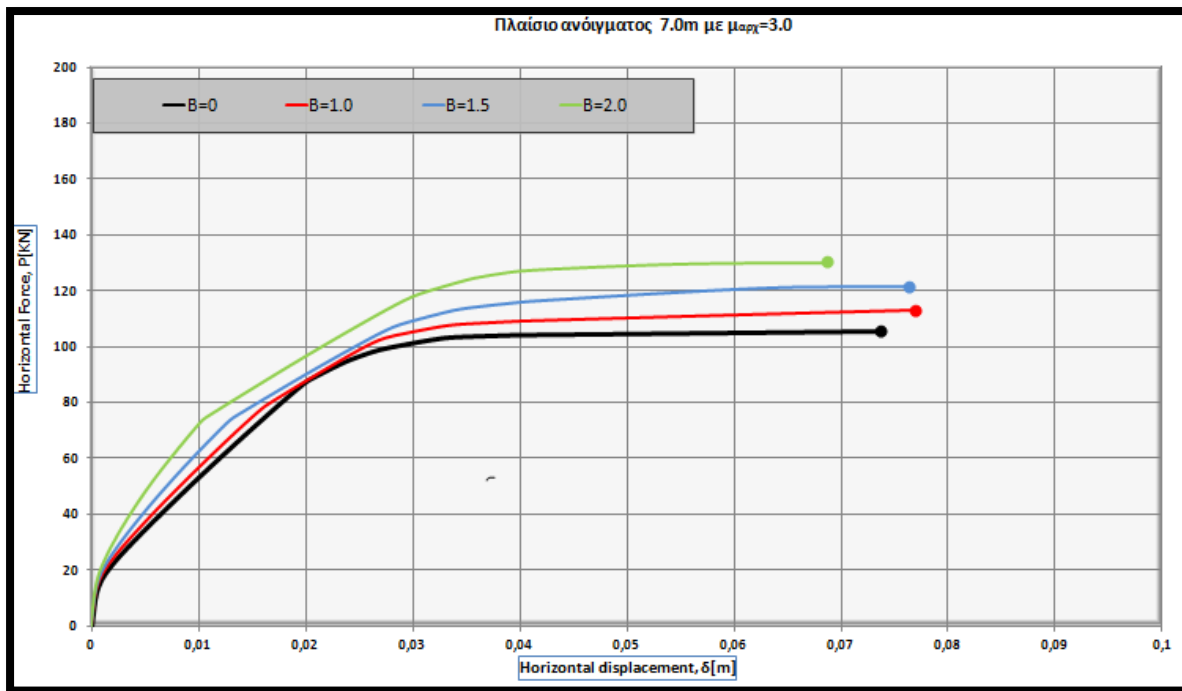
3.4.3.1 Στοχευμένες μετακινήσεις πλαισίων με  $\mu=3.0$  (νέα κατασκευή)

Αρχικώς παρουσιάζονται οι προκύπτουσες καμπύλες ικανότητας των πλαισίων όπου η αρχική όπλιση των ελευθέρων πλαισίων πριν την ενίσχυση για το σεισμό σχεδιασμού έδινε μια γενική πλαστιμότητα  $\mu=3.0$ , προσομοιάζοντας έτσι νέες κατασκευές. Η ακριβής αναπτυσσόμενη πλαστιμότητα σχεδιασμού ανά μήκος ανοίγματος ελεύθερου πλαισίου υπάρχει στον Πίνακα 3.4.

Διάγραμμα 3.6: Στοχευμένες μετακινήσεις πλαισίων με  $L=3.0$  m.Διάγραμμα 3.7: Στοχευμένες μετακινήσεις πλαισίων με  $L=4.2$  m.



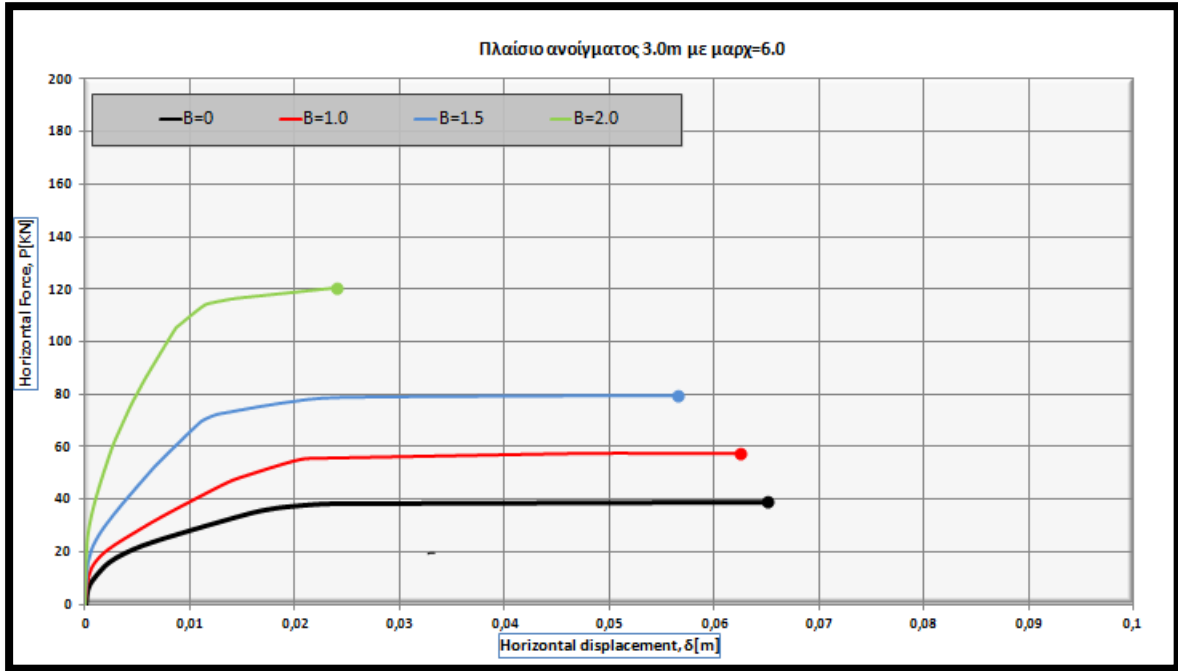
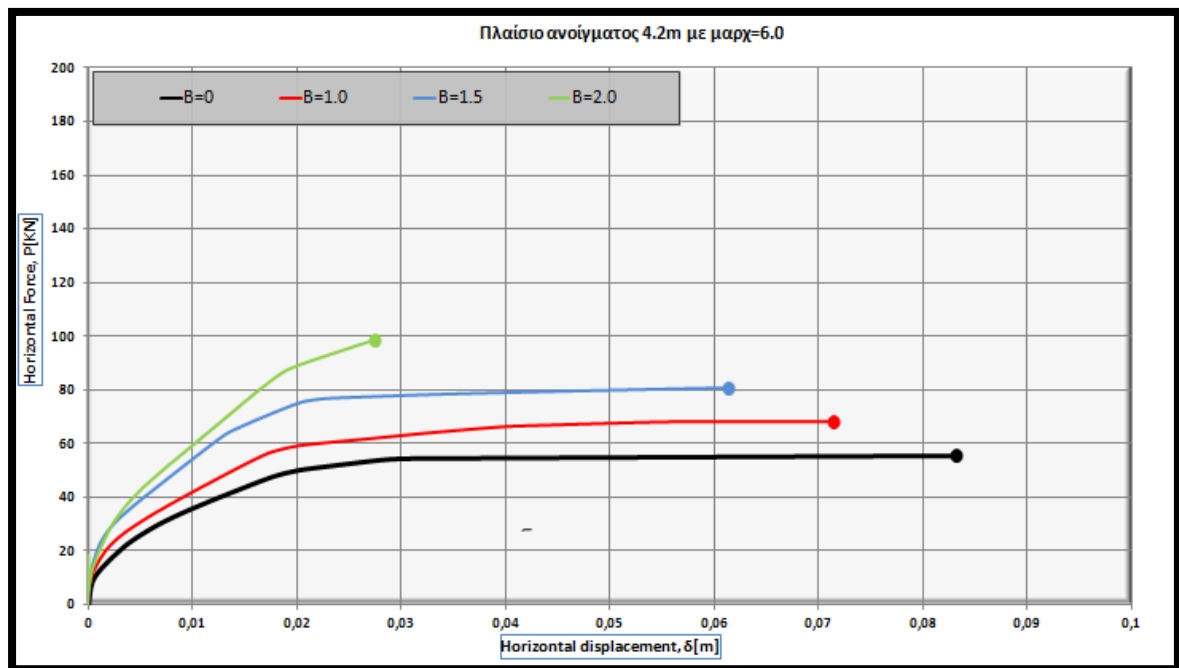
Διάγραμμα 3.8: Στοχευμένες μετακινήσεις πλαισίων με L=5.6m.

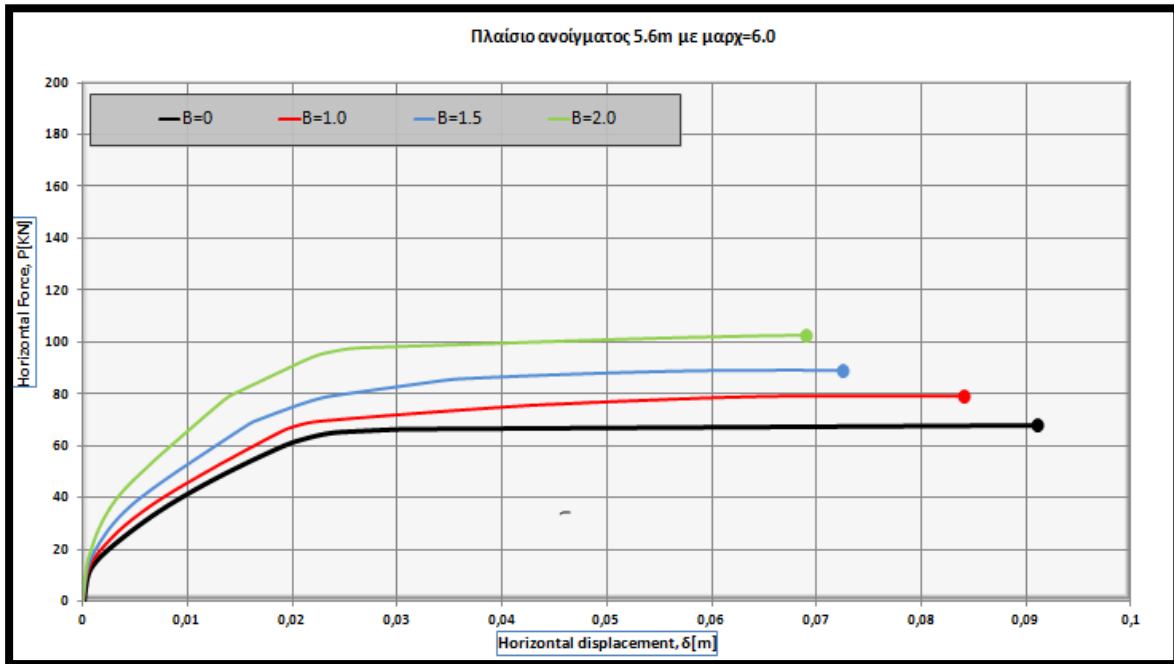


Διάγραμμα 3.9: Στοχευμένες μετακινήσεις πλαισίων με L=7.0m.

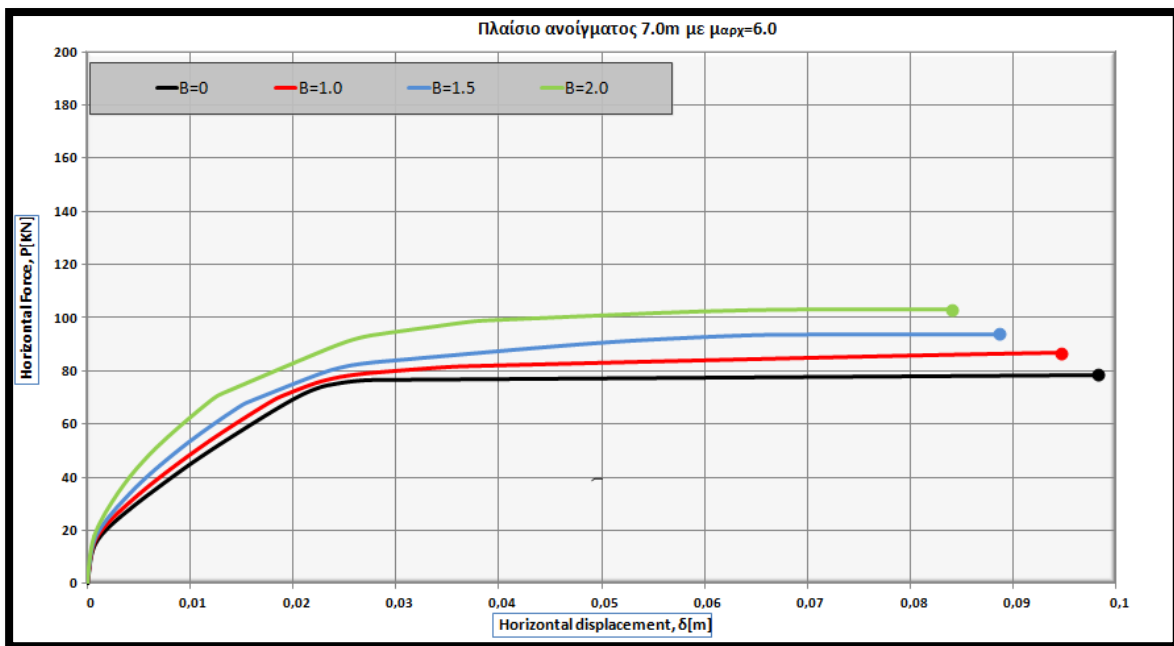
3.4.3.1 Στοχευμένες μετακινήσεις πλαισίων με  $\mu=6.0$  (παλαιά κατασκευή).

Παρουσιάζονται οι προκύπτουσες καμπύλες ικανότητας των πλαισίων που η αρχική όπλιση των ελευθέρων πλαισίων πριν την ενίσχυση για το σεισμό σχεδιασμού έδινε μια γενική πλαστιμότητα  $\mu=6.0$ , προσομοιάζοντας έτσι παλαιές κατασκευές. Η ακριβής αναπτυσσόμενη πλαστιμότητα σχεδιασμού ανά μήκος ανοίγματος ελεύθερου πλαισίου υπάρχει στον Πίνακα 3.4.

Διάγραμμα 3.10: Στοχευμένες μετακινήσεις πλαισίων με  $L=3.0m$ .Διάγραμμα 3.11: Στοχευμένες μετακινήσεις πλαισίων με  $L=4.2m$ .



Διάγραμμα 3.12: Στοχευμένες μετακινήσεις πλαισίων με L=5.6m.



Διάγραμμα 3.13: Στοχευμένες μετακινήσεις πλαισίων με L=7.0.

### 3.4.4 Συμπεράσματα

Στην δεύτερη φάση ανελαστικών αναλύσεων μπορούμε να εξάγουμε μετά και τον υπολογισμό της στοχευμένης μετακίνησης κάποια ποιοτικά συμπεράσματα ως προς την απόκριση των πλαισίων και την βελτίωση της αποκρίσεως τους με την προσθήκη του στοιχείου λικνισμού. Παρατηρείται λοιπόν, μια ικανοποιητική μείωση της στοχευμένης μετακίνησης στην πλειοψηφία των περιπτώσεων. Παρόλαυτα έγινε εμφανές ότι οι προκύπτουσες αυτές στοχευμένες μετακινήσεις εξαρτώνται άμεσα από τον σεισμό σχεδιασμού που θα θεωρηθεί, και κυρίως αν οι στοχευμένες μετακινήσεις προκύπτουν ως σημείο τομής του κλάδου με σταθερή επιτάχυνση ή σταθερή ταχύτητα<sup>44</sup>.

Αναλυτικά, οδηγηθήκαμε στα εξής συμπεράσματα:

- Όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος  $B/L$  τόσο βελτιωμένη είναι και η απόκριση του πλαισίου, δηλαδή για μικρά μεγέθη του λόγου αυτού, μικρές και οι μεταβολές στις στοχευμένες μετακινήσεις<sup>45</sup>.
- Σε περιπτώσεις όπου ο λόγος αυτός είναι αρκετά μικρός, πιθανόν να εμφανιστούν μεγαλύτερες στοχευμένες μετακινήσεις από ότι στο ελεύθερο πλαίσιο, και αυτό γιατί λόγω της προσθήκης του στοιχείου λικνισμού και της μεταβολής του  $dy$  που προκύπτει από την διαγραμμαμικοποίηση και της μικρής μεταβολής στην ικανότητα του πλαισίου, εμφανίζεται στο ενισχυμένο πλαίσιο αρκετά μικρότερη απόσβεση με αποτέλεσμα να εμφανίζονται μεγαλύτερες προκύπτουσες μετατοπίσεις. Αυτό βέβαια, είναι στα όρια της εμφανιζόμενης αποδεκτής ανακρίβειας της μεθόδου που χρησιμοποιείται, γι'αυτό το λόγο συστήνεται η μη θεώρηση του ως γενικού κανόνα.

Σε παλαιές κατασκευές με  $\mu=6.0$  εμφανίζεται αρκετά μειούμενο "κέρδος" για μικρά ανοίγματα από την προσθήκη αντίστοιχου πλάτους στοιχείου λικνισμού από ότι σε προσθήκη του σε νέες κατασκευές με  $\mu=3.0$ . Αυτό οφείλεται στην μείωση της αποσβέσεως δυσαναλόγως με την αύξηση της ικανότητας καθώς και στο γεγονός ότι "εργάζεται" στον κλάδο σταθερής ταχύτητας.

<sup>44</sup> Αν η καμπύλη ικανότητας μετά την προσθήκη του στοιχείου λικνισμού τέμνει τον κλάδο της σταθερής επιτάχυνσης, ενώ χωρίς την ενίσχυση τέμνει τον κλάδο της σταθερής ταχύτητας παρατηρείται αρκετά σημαντικότερη μείωση της στοχευμένης μετακίνησης.

<sup>45</sup> Έναντι του αρχικώς ελεύθερου πλαισίου.

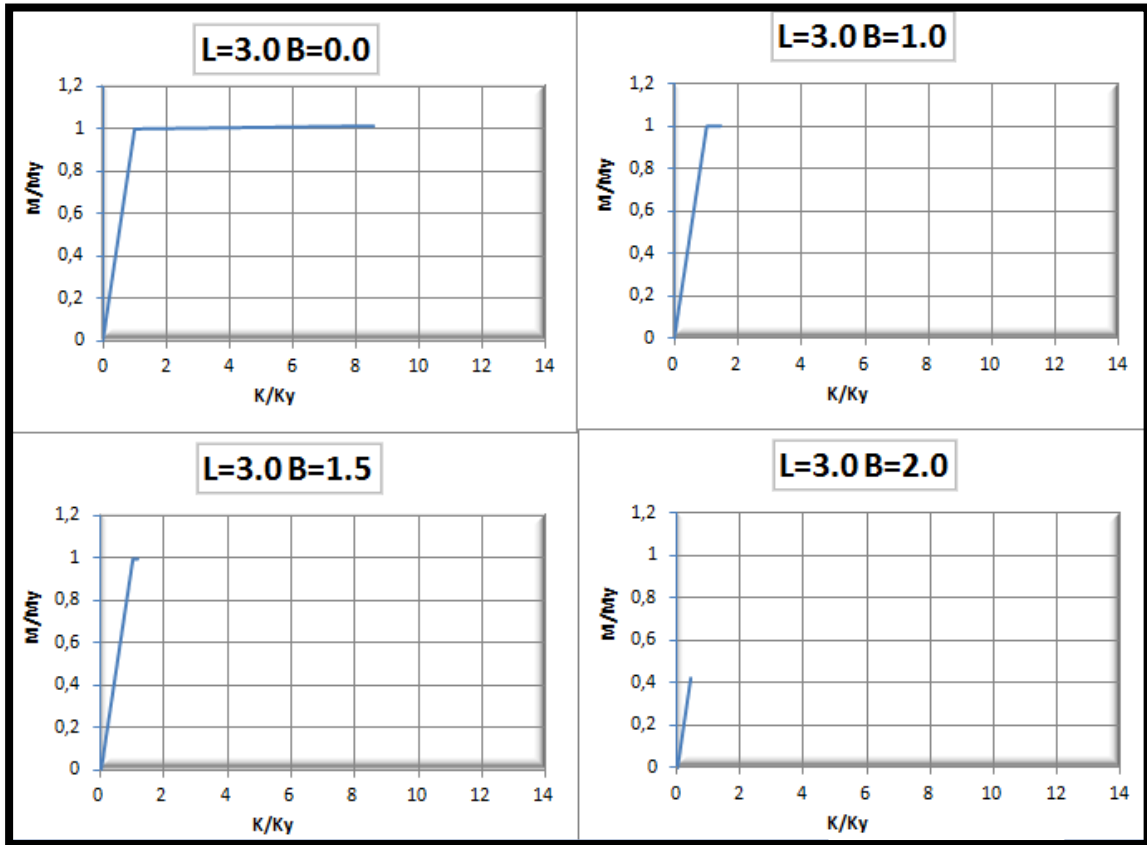


### **3.5 Υπολογισμός μέγιστων τοπικών πλαστιμοτήτων.**

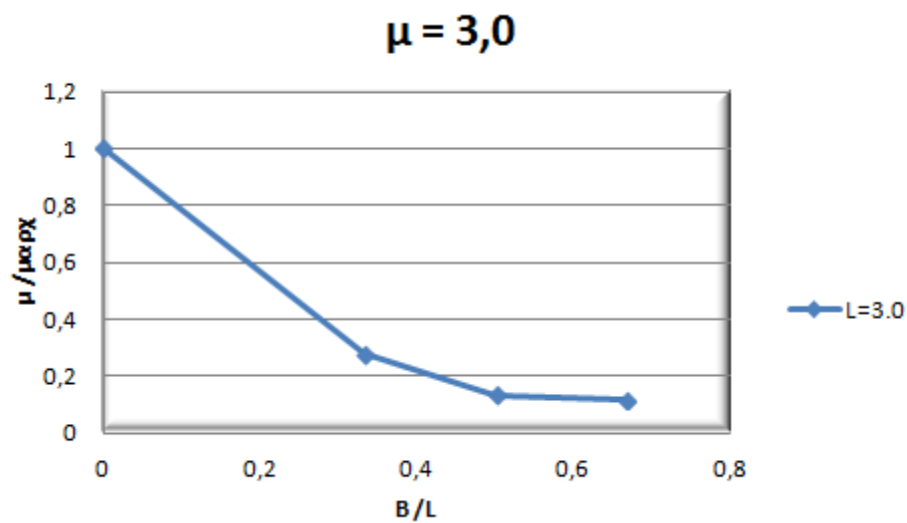
#### **3.5.1 Εισαγωγή.**

Εν συνεχεία για λόγους περαιτέρω κατανόησης της απόκρισης των πλαισίων και εξαγωγής συμπερασμάτων υπολογίζονται για τις στοχευμένες μετακινήσεις που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο οι μέγιστες τοπικές πλαστιμότητες ανά περίπτωση πλαισίου που μελετάται. Αρχικώς παρουσιάζονται τα διαγράμματα του σημείου στο οποίο εμφανίζεται η μέγιστη τοπική πλαστιμότητα ανά περίπτωση κανονικοποιημένα σε όρους  $M/My$  και  $K/Ky$ . Για λόγους περαιτέρω κατανόησης των αποτελεσμάτων, παρουσιάζονται για κάθε περίπτωση ελεύθερου πλαισίου που εξετάζεται με την προσθήκη ενίσχυσης για διαφορετικά πλάτη στοιχείων λικνισμού σε κοινό κανονικοποιημένο διάγραμμα για τους λόγους  $\mu/\mu_{αρχ}$  και  $B/Lf$ .

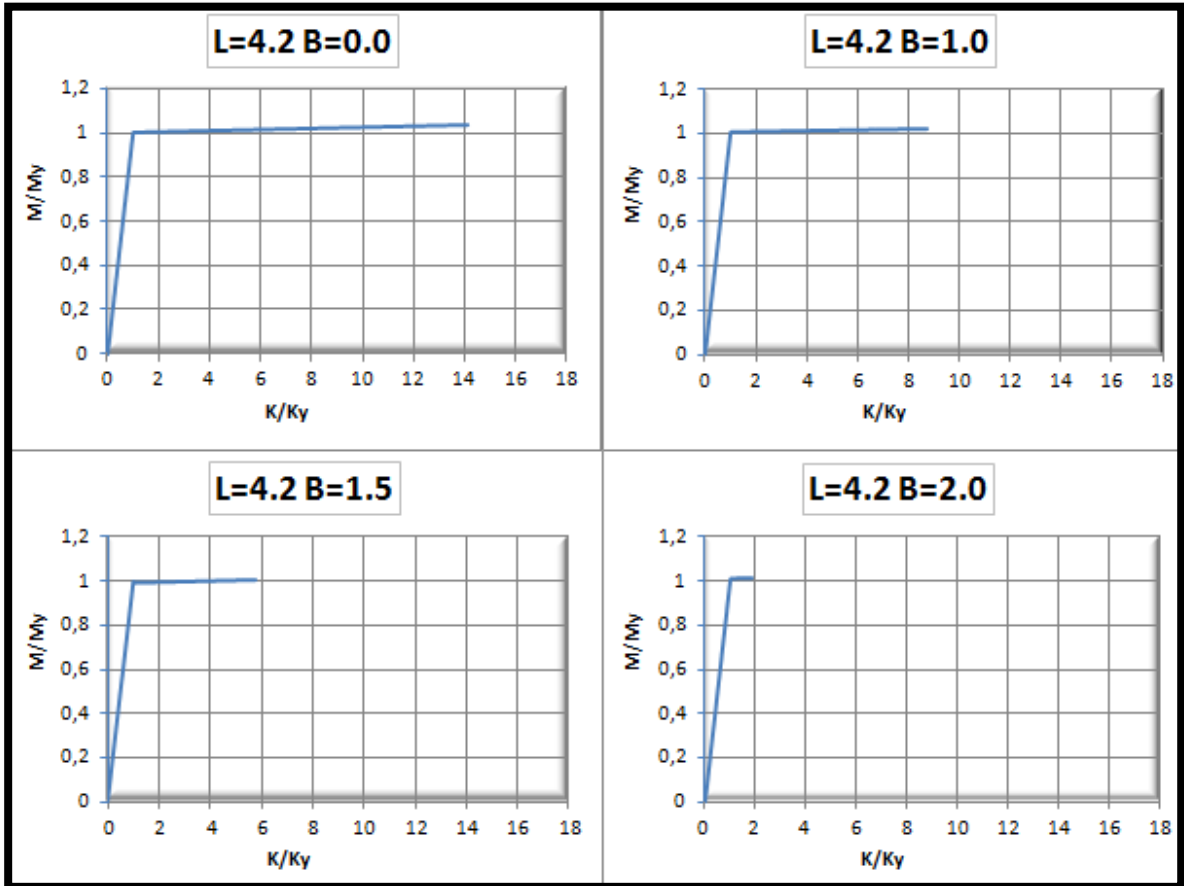
### 3.5.2 Απόκριση σημείου μέγιστης αναπτυσσόμενης τοπικής πλαστιμότητας για πλαίσια με $\mu=3.0$ (νέες κατασκευές).



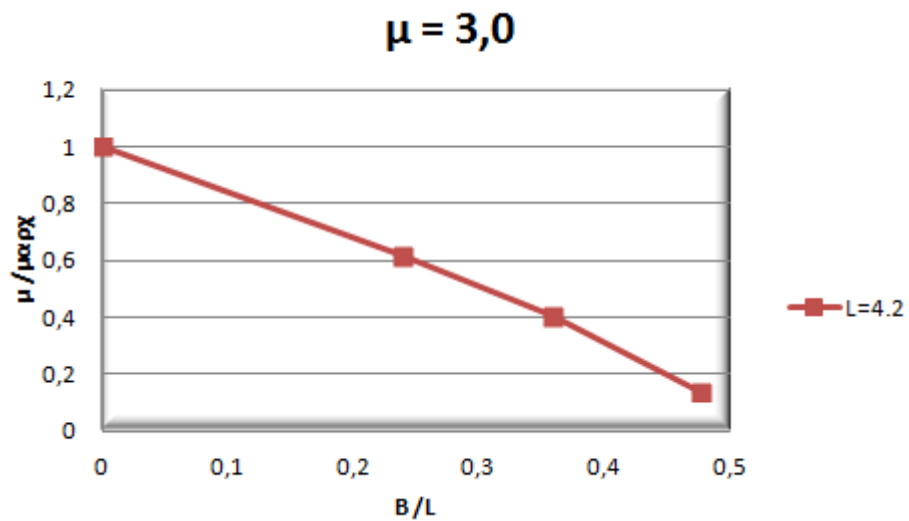
Διάγραμμα 3.14: Αναπτυσσόμενες τοπικές πλαστιμότητες πλαισίων με  $L_f=3.0$ .



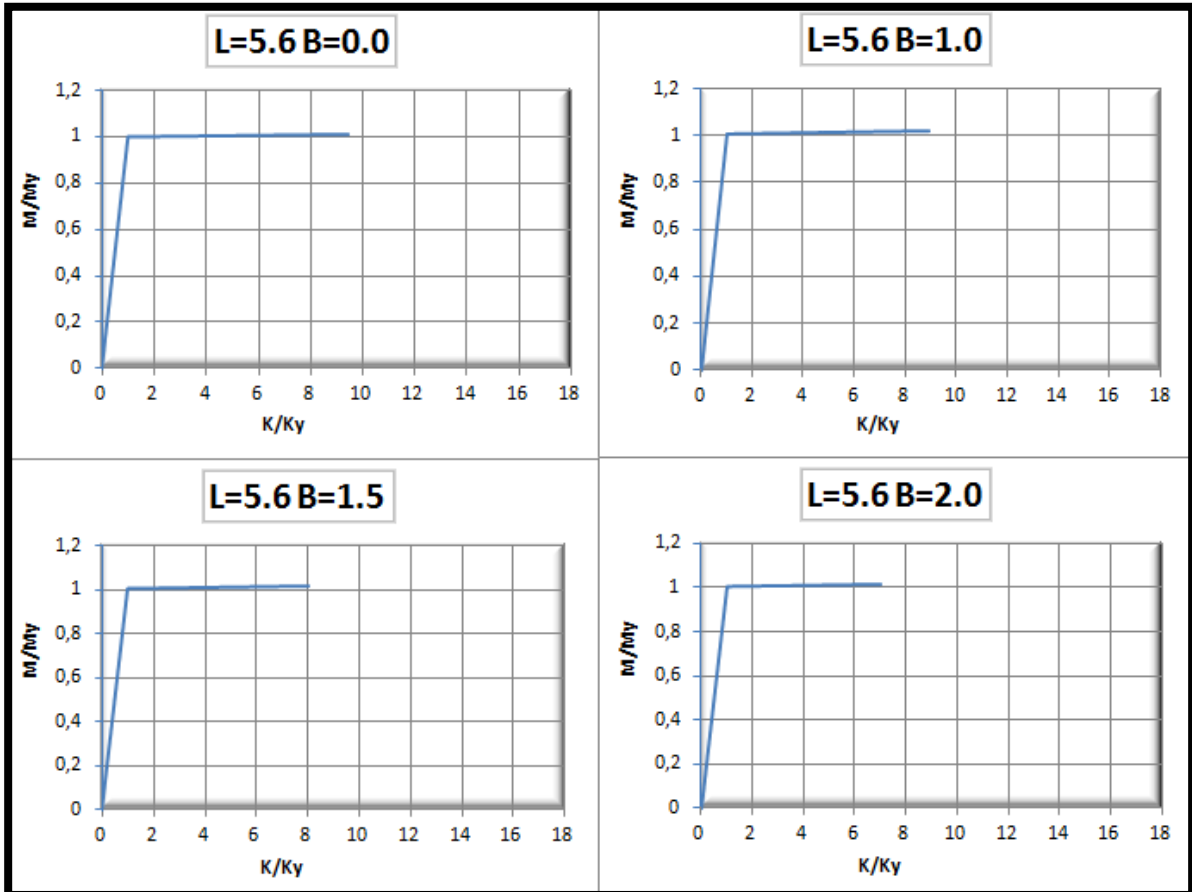
Διάγραμμα 3.15: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για πλαίσιο με  $L_f=3.0\text{m}$ .



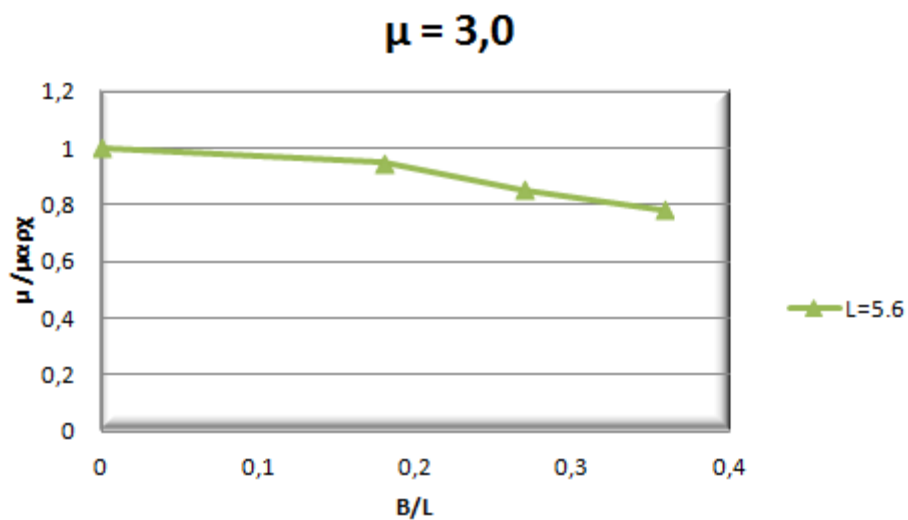
Διάγραμμα 3.16: Αναπτυσσόμενες τοπικές πλαστιμότητες πλαισίου  $L_f=4.2$ .



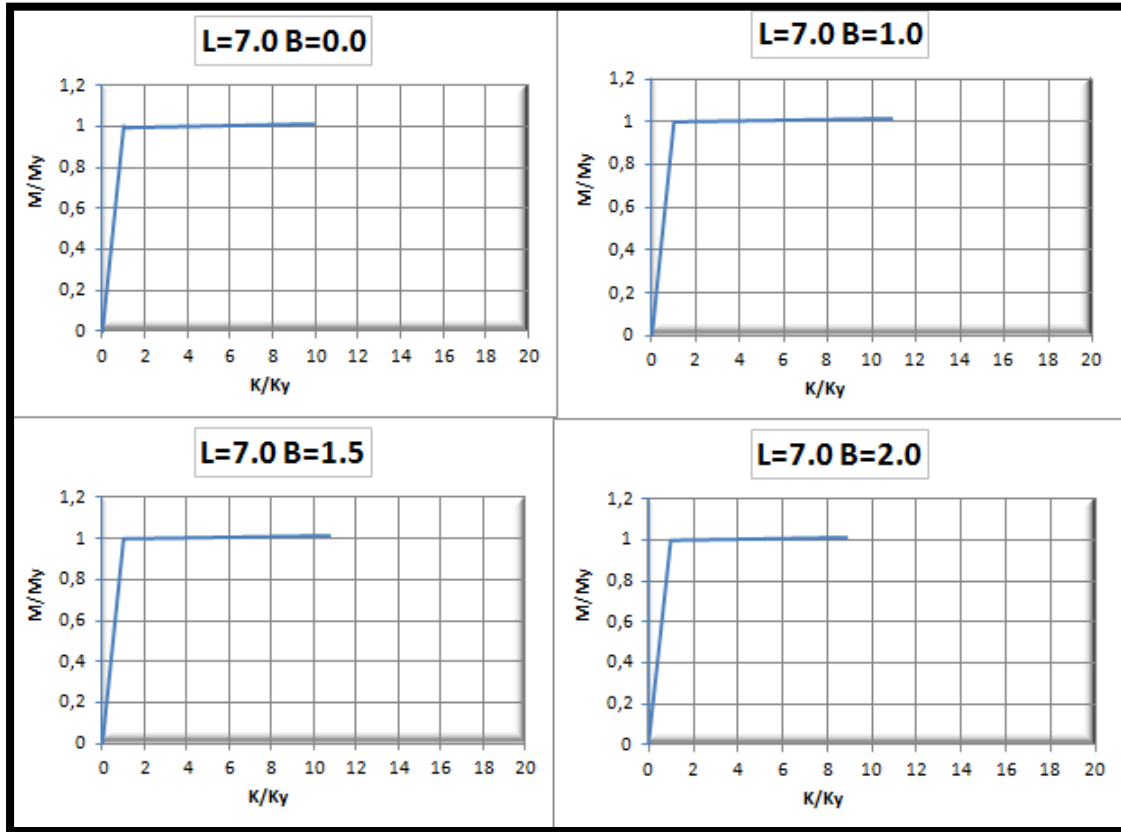
Διάγραμμα 3.17: Συγκεντρωτική αποτελέσματα για πλαίσιο με  $L_f=4.2m$ .



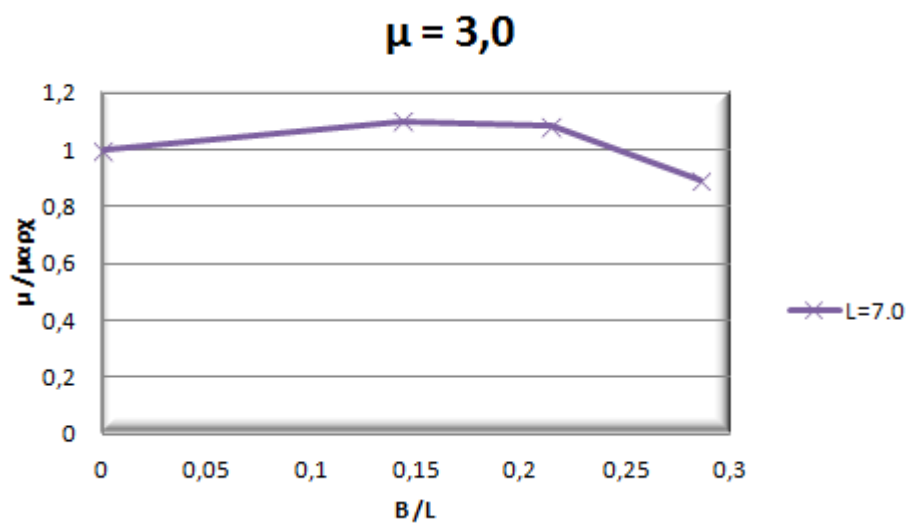
Διάγραμμα 3.18: Αναπτυσσόμενες τοπικές πλαστιμότητες πλαισίου  $L_f=5.6$ .



Διάγραμμα 3.19: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για πλαίσιο με  $L_f=5.6m$ .

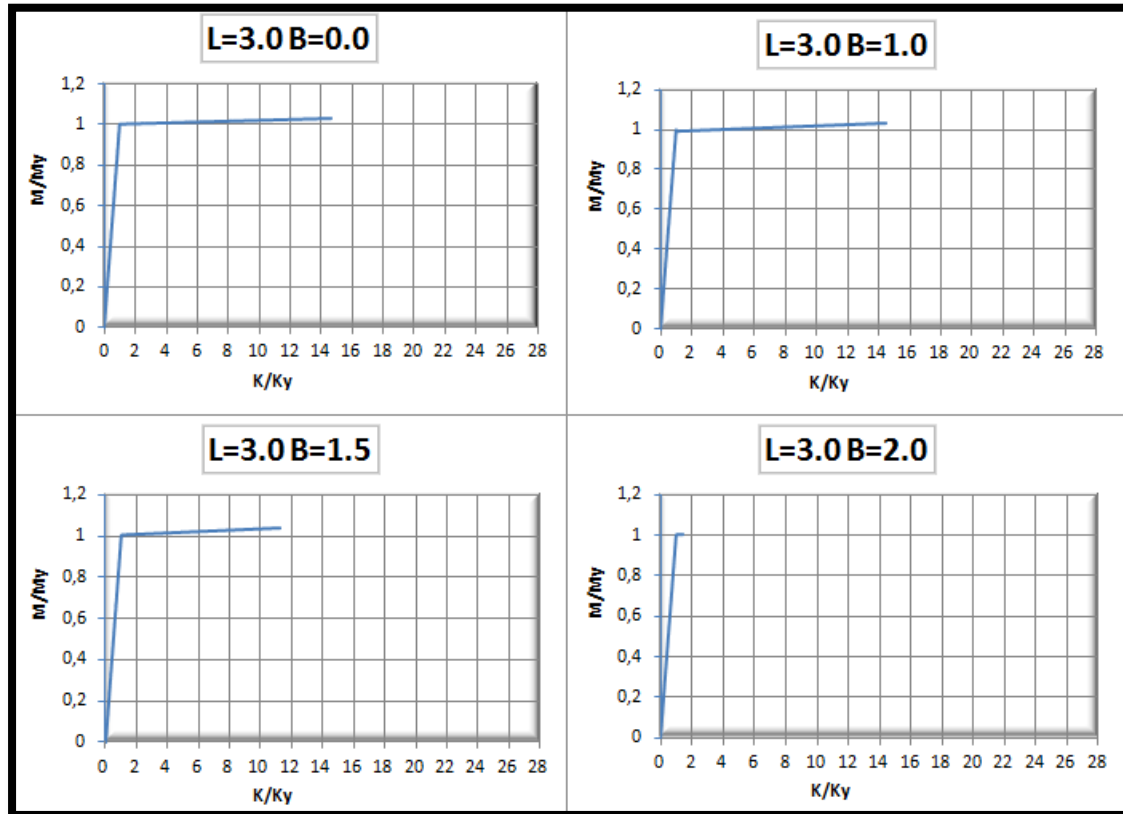


Διάγραμμα 3.20: Αναπτυσσόμενες τοπικές πλαστιμότητες πλαισίου  $L_f=7.0m$ .

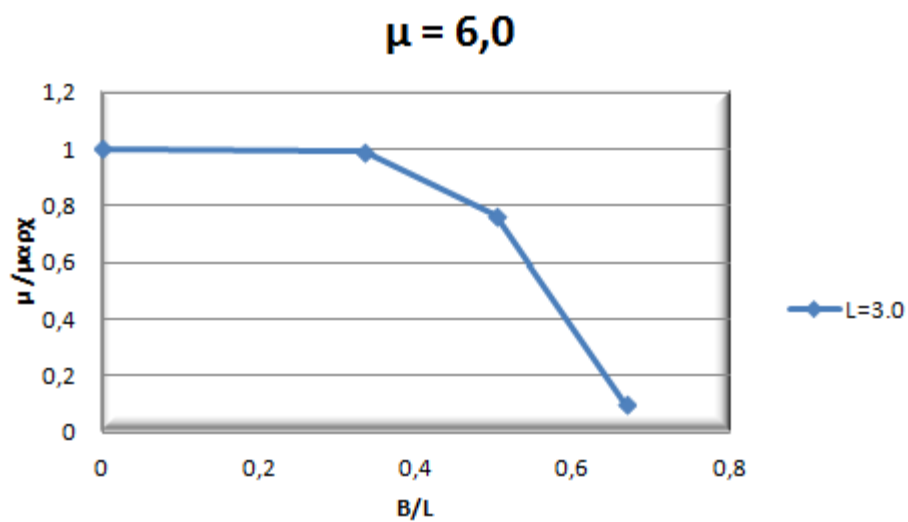


Διάγραμμα 3.21: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για πλαίσιο με  $L_f=7.0m$ .

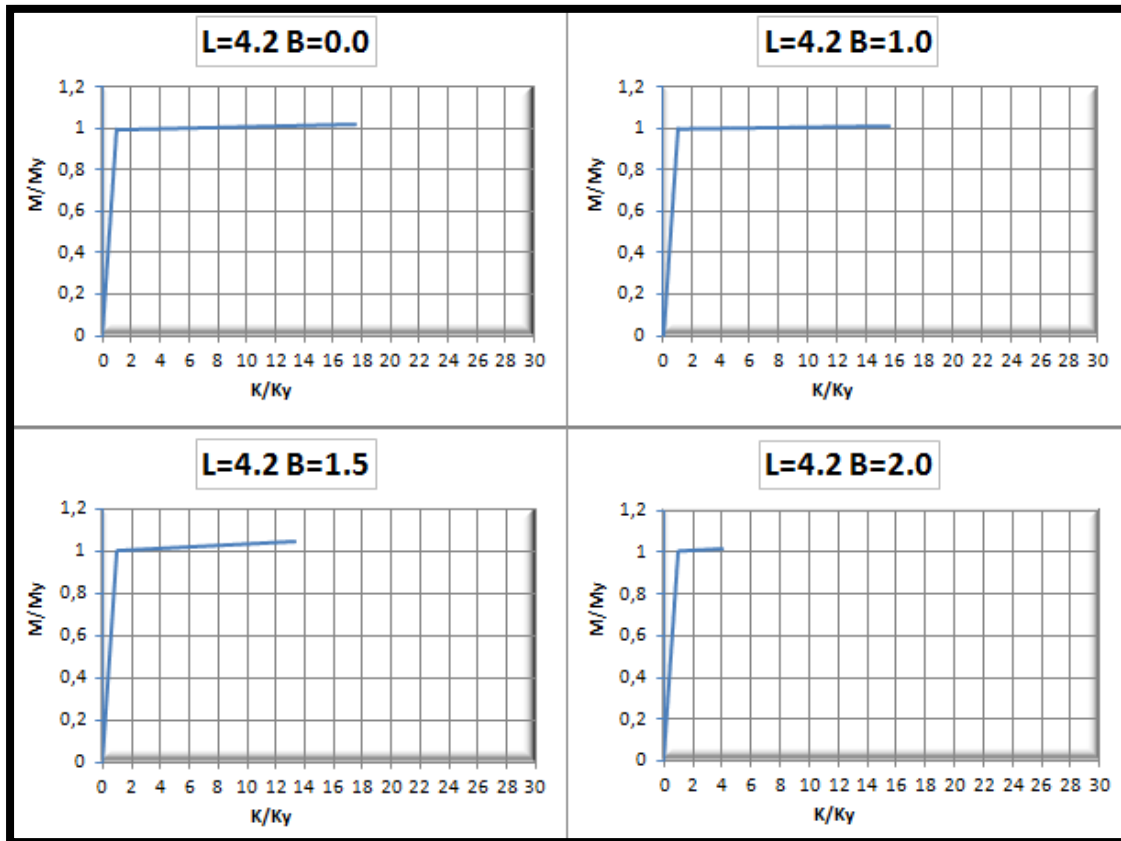
### 3.5.3 Απόκριση σημείου μέγιστης αναπτυσσόμενης τοπικής πλαστιμότητας για πλαίσια με $\mu=6.0$ (παλαιές κατασκευές).



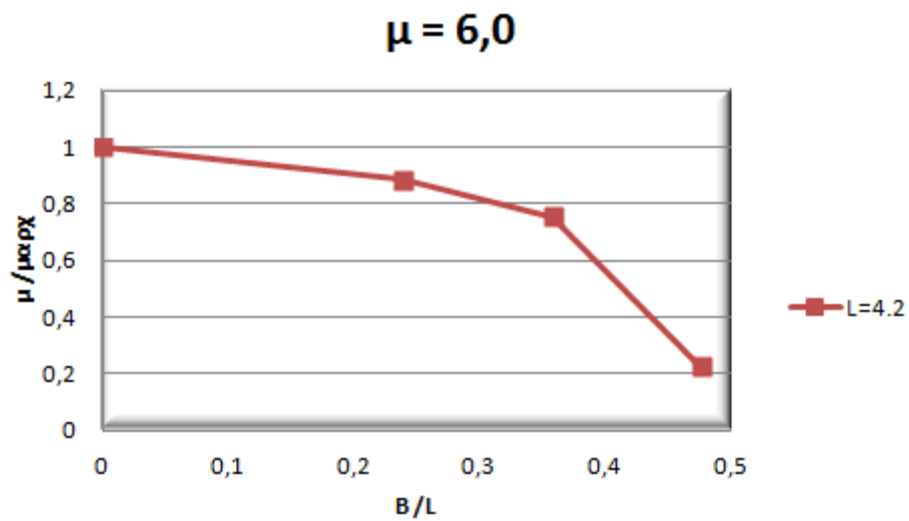
Διάγραμμα 3.22: Αναπτυσσόμενες τοπικές πλαστιμότητες πλαισίου  $L_f=3.0$  m.



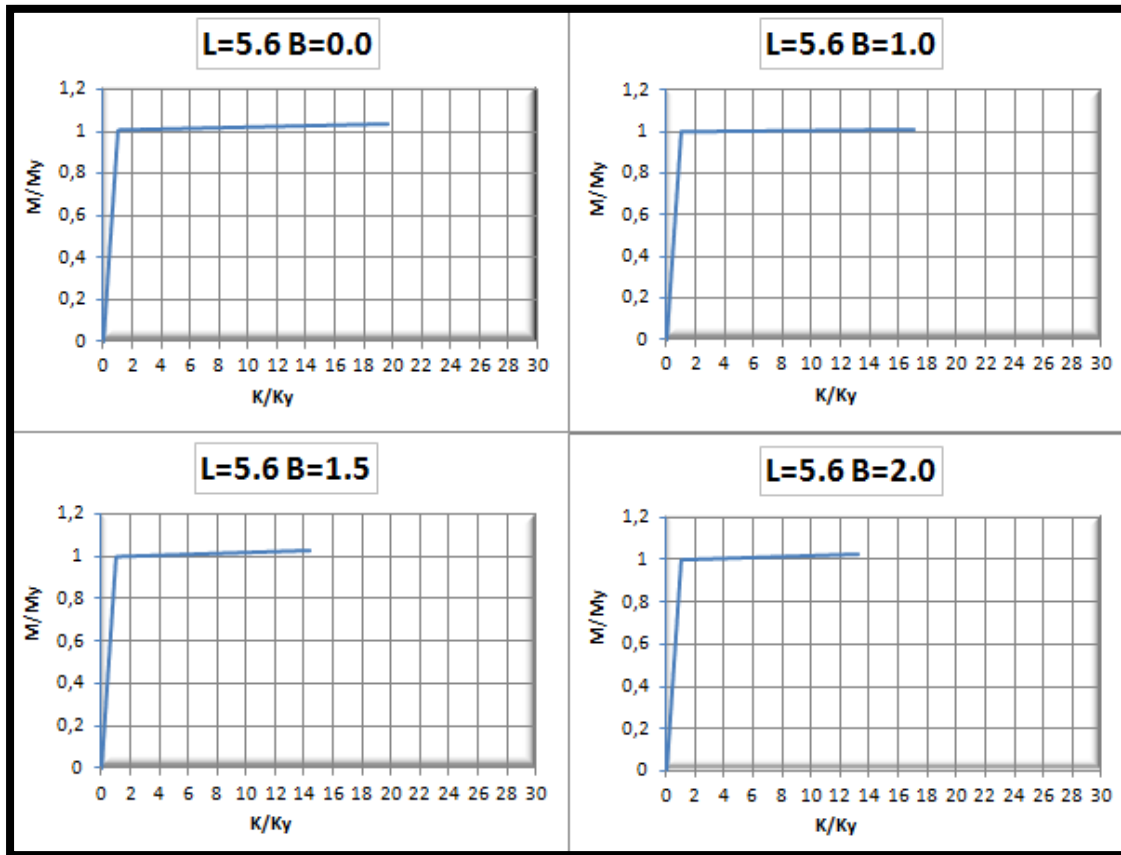
Διάγραμμα 3.23: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για πλαίσιο με  $L_f=3.0$  m.



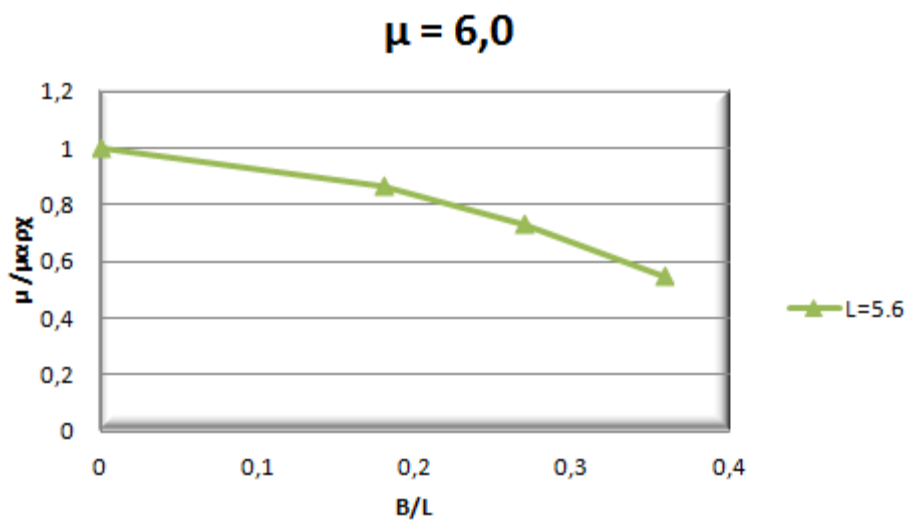
Διάγραμμα 3.24: Αναπτυσσόμενες τοπικές πλαστιμότητες πλαισίου  $L_f=4.2$  m.



Διάγραμμα 3.25: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για πλαίσιο με  $L_f=4.2$  m.

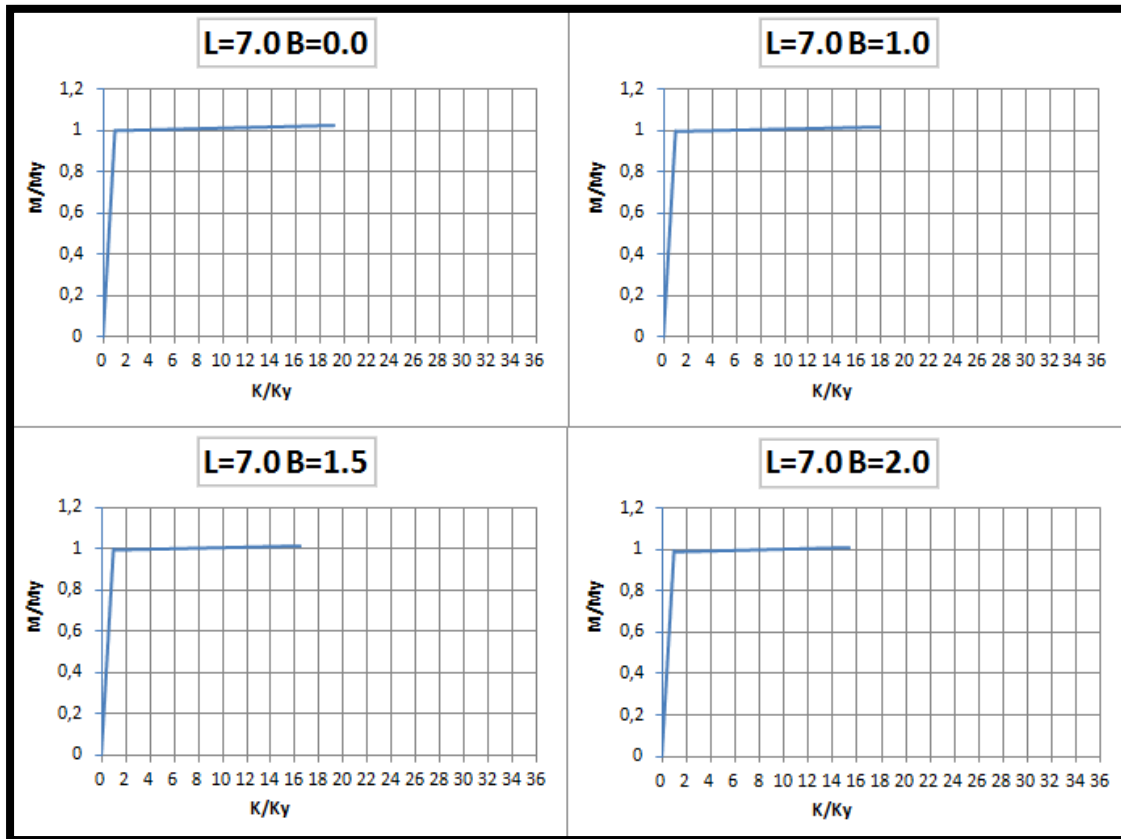


Διάγραμμα 3.26: Αναπτυσσόμενες τοπικές πλαστιμότητες πλαισίου  $L_f=5.6$ m.

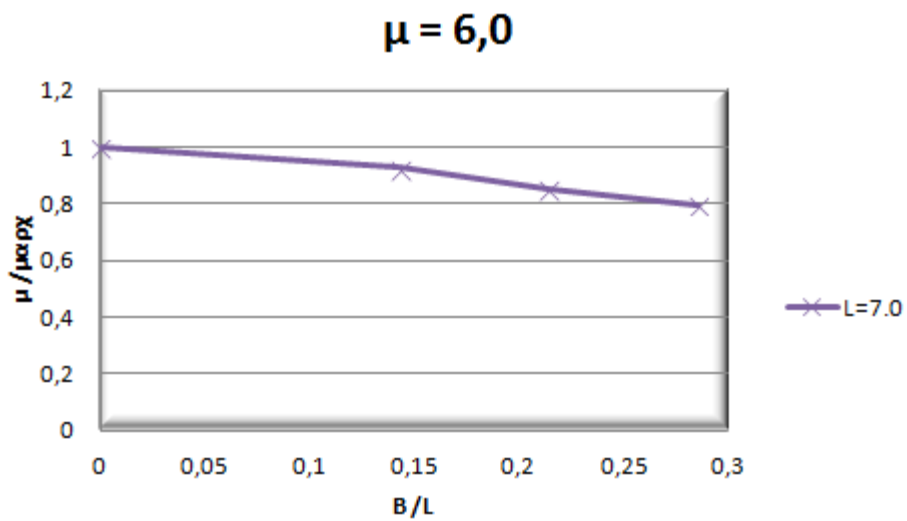


Διάγραμμα 3.27: Συγκεντρικά αποτελέσματα για πλαίσιο με  $L_f=5.6$ m.





Διάγραμμα 3.28: Αναπτυσσόμενες τοπικές πλαστιμότητες πλαισίου  $L_f=7.0$ m.



Διάγραμμα 3.29: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για πλαίσιο με  $L_f=7.0$ m.

### 3.5.3 Συμπεράσματα.

Στην περαιτέρω διερευνητική φάση εξέτασης της απόκρισης των ανελαστικών αναλύσεων όπου εξάγαμε τις μέγιστες εμφανιζόμενες τοπικές πλαστιμότητες ανά εξεταζόμενο πλαίσιο παρατηρείται καθώς αναμένετο μια "συναλίθευση" των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις στοχευμένες μετακινήσεις. Οδηγούμαστε λοιπόν στα ίδια ποιοτικά συμπεράσματα ως προς την απόκριση των πλαισίων και την βελτίωση της αποκρίσεως τους με την προσθήκη του στοιχείου λικνισμού. Παρατηρείται λοιπόν, μια ικανοποιητική μείωση της τοπικής πλαστιμότητας με την προσθήκη του στοιχείου λικνισμού στην πλειοψηφία των περιπτώσεων. Παρόλαυτα έγινε εμφανές ότι οι μέγιστες τοπικές πλαστιμότητες εξαρτώνται άμεσα από το σεισμό σχεδιασμού που θα θεωρηθεί, και κυρίως ότι οι στοχευμένες μετακινήσεις άρα και οι τοπικές πλαστιμότητες επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από το σημείο τομής της καμπύλης ικανότητας με το σεισμό σχεδιασμού, αν η τομή δηλαδή αφορά τον κλάδο με σταθερή επιτάχυνση ή σταθερή ταχύτητα.

Αναλυτικά, οδηγηθήκαμε στα ίδια συμπεράσματα, με το κεφάλαιο 3.4.4 :

- Όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος  $B/L$  τόσο βελτιωμένη είναι και η απόκριση του πλαισίου, δηλαδή για μικρές τιμές του λόγου αυτού, μικρές και οι μεταβολές στις τοπικές πλαστιμότητες<sup>46</sup>.
- Σε περιπτώσεις όπου ο λόγος αυτός είναι αρκετά μικρός, πιθανόν να εμφανιστούν μεγαλύτερες τοπικές πλαστιμότητες από ότι στο ελεύθερο πλαίσιο, και αυτό γιατί λόγω της προσθήκης του στοιχείου λικνισμού και της μεταβολής του  $dy$  που προκύπτει από την διαγραμματικοποίηση και της μικρής μεταβολής στην ικανότητα του πλαισίου, εμφανίζεται στο ενισχυμένο πλαίσιο αρκετά μικρότερη απόσβεση. Αυτό βέβαια, είναι στα όρια της εμφανιζόμενης αποδεκτής ανακρίβειας της μεθόδου που χρησιμοποιείται, γι'αυτό το λόγο συστήνεται η μη θεώρηση του ως γενικού κανόνα.

Σε παλαιές κατασκευές με  $\mu=6,0$  εμφανίζεται αρκετά μειούμενο "κέρδος" για μικρά ανοίγματα από την προσθήκη αντίστοιχου πλάτους στοιχείου λικνισμού από ότι σε προσθήκη του σε νέες κατασκευές με  $\mu=3,0$ . Αυτό οφείλεται στην μείωση της αποσβέσεως δυσαναλόγως με την αύξηση της ικανότητας καθώς και στο γεγονός ότι "εργάζεται" στον κλάδο σταθερής ταχύτητας.

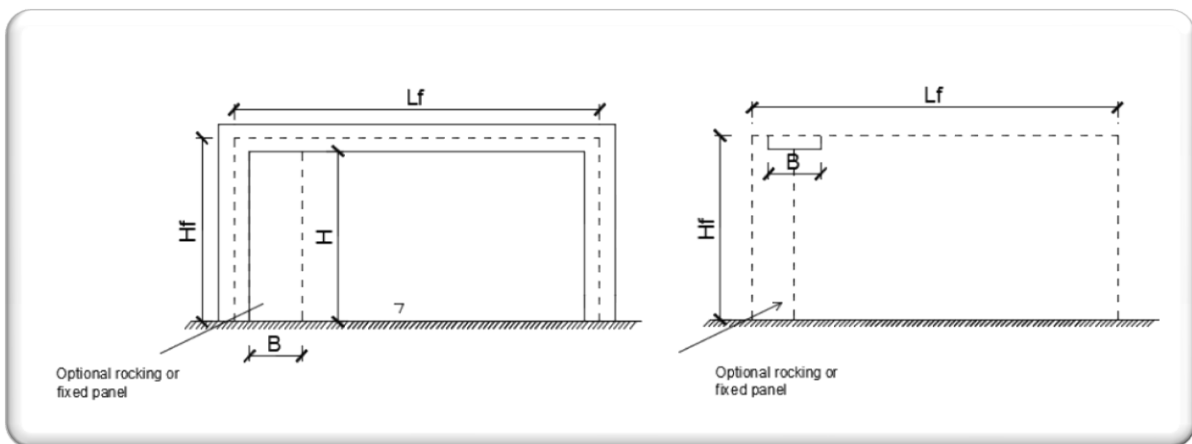
---

<sup>46</sup> Έναντι του αρχικώς ελεύθερου πλαισίου.

### 3.6 Καμπύλες ικανότητας και στοχευμένες μετακινήσεις για πλαίσιο με προσθήκη στοιχείου λικνισμού επί του άκρου.

#### 3.6.1 Εισαγωγή.

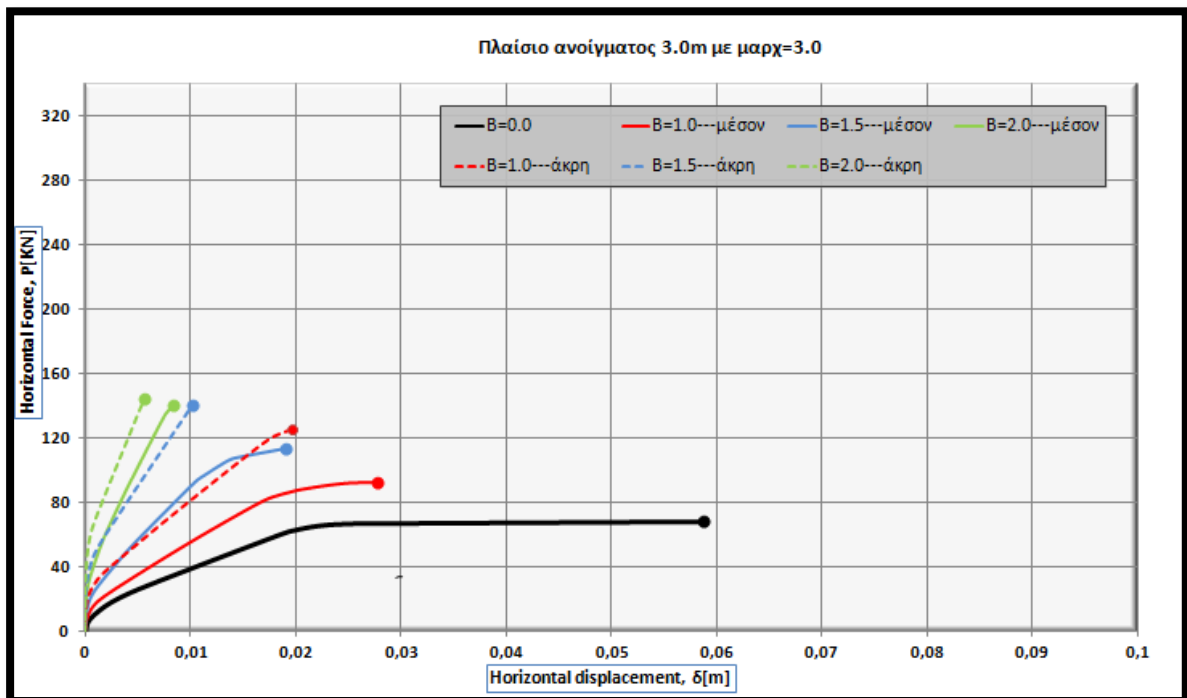
Για σκοπούς υποβοήθησης της ανάγκης των μελλοντικών μελετών έγιναν κάποιες επιπλέον "αναγνωριστικές" αναλύσεις για τις περιπτώσεις των "νέων κτηρίων" που μελετήθηκαν στο παρόν κεφάλαιο με προσθήκη λικνισμού επί του άκρου. Σκοπός των αναλύσεων στη παρούσα φάση δεν αποτέλεσε η εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς κατά τον τρόπο με τον οποίο διαφοροποιείται η απόκριση του πλαισίου με την εισαγωγή του στοιχείου λικνισμού επί το άκρο αλλά καθαρά και μόνο εάν υπάρχει εναλλακτικό πεδίο μελέτης ως προς την απόκριση πλαισίων με στοιχείο λικνισμού στο άκρο και γενικότερα σε διαφορετικές θέσεις πέρα από το μέσον. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των περιπτώσεων των πλαισίων που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της παρούσης επισυνάπτονται στο παράρτημα Α.7. Η μορφοποίηση του πλαισίου παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.19. Θεωρούμε απλοποιητικά ότι η μετακίνηση κορυφής του πλαισίου είναι ίση με την μετακίνηση επί του κεντρικού άξονα της δοκού του πλαισίου που βρίσκεται πάνω από το στοιχείο λικνισμού.



Εικόνα 3.19: Μόρφωση πλαισίου με στοιχείο λικνισμού επί το άκρο.

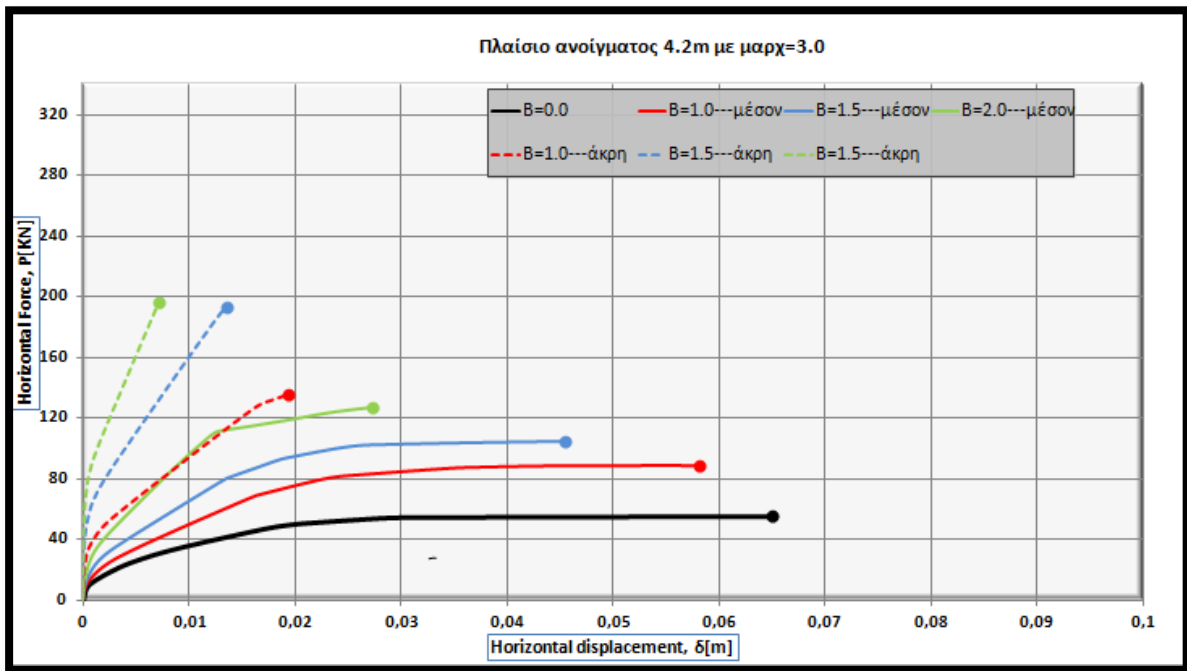
## 3.6.2 Συνοπτικά συγκριτικά αποτελέσματα.

Παρουσιάζονται οι προκύπτουσες καμπύλες ικανότητας και στοχευμένες μετακινήσεις για όλες τις περιπτώσεις<sup>47</sup> που μελετήθηκαν στο παρόν κεφάλαιο για τις θεωρούμενες ως νέες κατασκευές με προσθήκη στοιχείο λικνισμού στο μέσον, και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα που προέκυψαν με την προσθήκη του στοιχείου λικνισμού επί το άκρον.

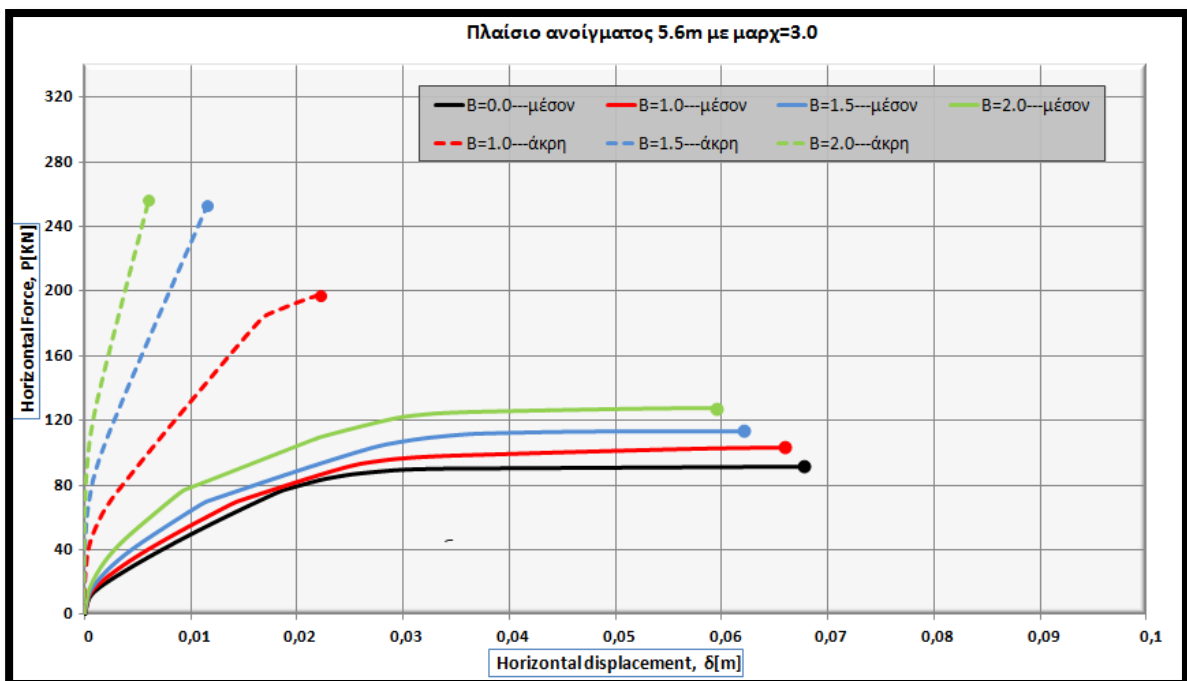


Διάγραμμα 3.30: Καμπύλες ικανότητας και στοχευμένες μετακινήσεις για πλαίσια θεωρούμενων ως νέων κατασκευών με  $L_f=3.0m$  για προσθήκη στοιχείων λικνισμού στο μέσον και στο άκρο.

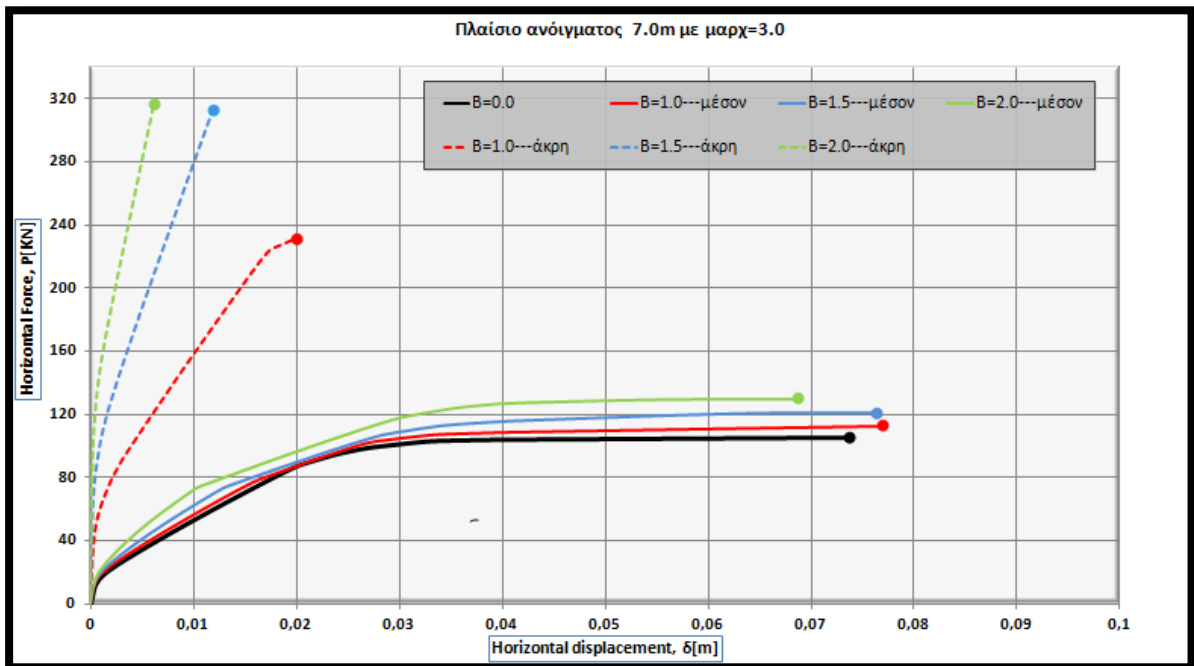
<sup>47</sup> Συγκεκριμένα για περιπτώσεις πλαισίου αρχικά οπλισμένο να αναπτύσσει για τον σεισμό σχεδιασμού πλαστιμότητα  $\mu=3.0$  μήκους  $L_f=3.0, 4.2, 5.6$  και  $7.0$  m . Οι ενισχύσεις των πλαισίων αφορούν προσθήκη στοιχείων λικνισμού 1.0 , 1.5 και 2.0 στο μέσον και στο άκρο για όλες τις περιπτώσεις.



Διάγραμμα 3.31: Καμπύλες ικανότητας και στοχευμένες μετακινήσεις για πλαίσια θεωρούμενων ως νέων κατασκευών με  $L_f=4.2m$  για προσθήκη στοιχείων λικνισμού στο μέσον και στο άκρο.



Διάγραμμα 3.32 : Καμπύλες ικανότητας και στοχευμένες μετακινήσεις για πλαίσια θεωρούμενων ως νέων κατασκευών με  $L_f=5.6m$  για προσθήκη στοιχείων λικνισμού στο μέσον και στο άκρο.



Διάγραμμα 3.33: Καμπύλες ικανότητας και στοχευμένες μετακινήσεις για πλαίσια θεωρούμενων ως νέων κατασκευών με  $L_f=7.0m$  για προσθήκη στοιχείων λικνισμού στο μέσον και στο άκρο.

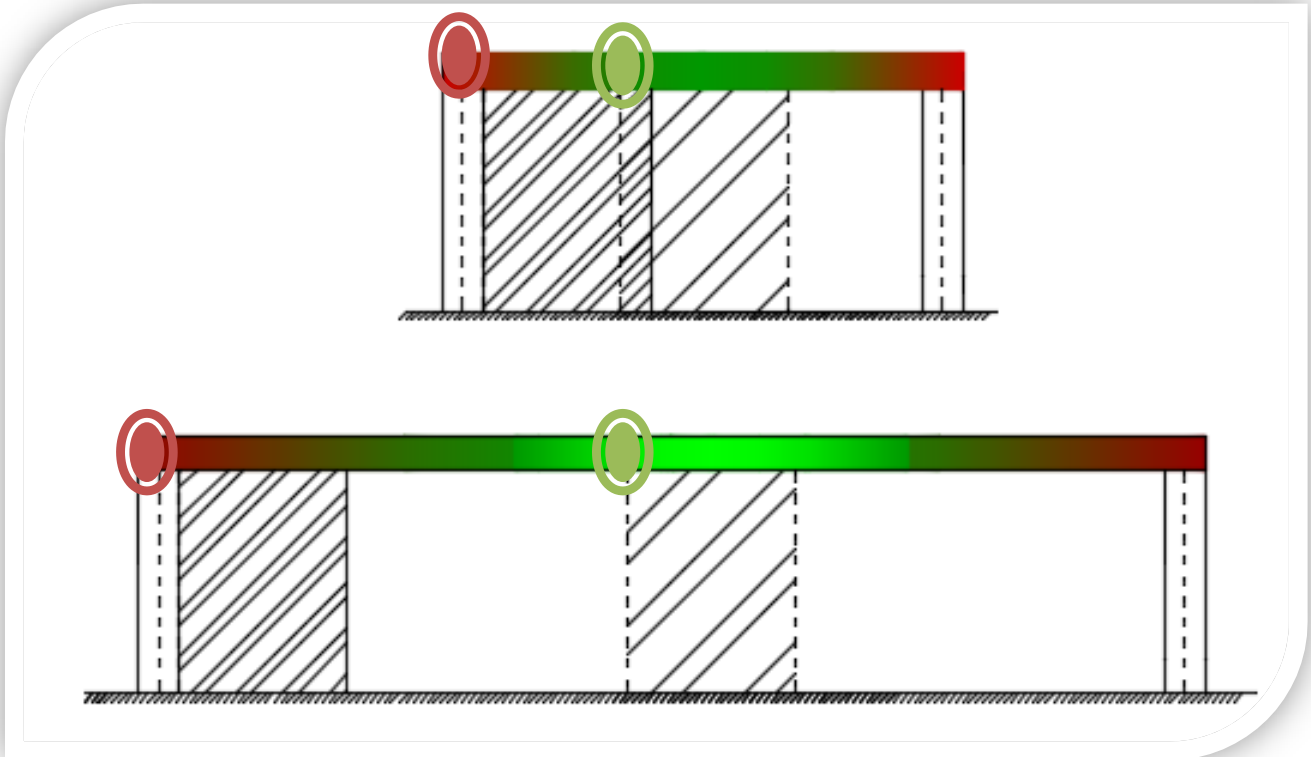
### 3.6.3 Συμπεράσματα.

Στην περίπτωση των ανελαστικών αναλύσεων με προσθήκη των στοιχείων λικνισμού στο άκρο παρατηρείται μια σημαντική ενίσχυση της απόκρισης της κατασκευής, σε σχέση με την ενίσχυση της με προσθήκη στο μέσον. Συγκεκριμένα :

- Αποδεικνύεται ότι τόσο η ικανότητα<sup>48</sup> της κατασκευής, όσο και η ακαμψία αυξάνονται περισσότερο με την μετατόπιση του στοιχείου λικνισμού πλησιέστερα στο άκρο από την κεντρική αρχική του θέση. Αυτή η συμπεριφορά ήταν αναμενόμενη, εφόσον η λικνιστική κίνηση του τοιχείου περιορίζεται περισσότερο εξαιτίας της μεγαλύτερης αντίδρασης στην μετακίνηση της δοκού η οποία αυξάνει στα άκρα της.
- Παρομοίως αποδεικνύεται ότι όσο μεγαλύτερο το πλάτος B που "εκμεταλλεύεται" την ισχυρή αντίδραση της περιοχής του άκρου, τόσο μεγαλύτερη και η ισχυροποίηση της ικανότητας και της ακαμψίας.
- Είναι σημαντικό να παρατηρηθεί πως η βελτίωση σε σχέση με την προσθήκη του στοιχείου λικνισμού στο μέσον, για την περίπτωση με την προσθήκη του στο άκρο είναι αύξουσα ανάλογα με το μήκος του πλαισίου. Δηλαδή παρατηρείται ότι στο πλαίσιο με μήκος 7.0, η μετατόπιση του στοιχείου λικνισμού στο άκρο επιφέρει αρκετά μεγαλύτερη βελτίωση στην απόκριση του πλαισίου έναντι της

<sup>48</sup> Η ικανότητα αυτή διπλασιάζεται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων και κυρίως στα μεγαλύτερα ανοίγματα.

περίπτωση με  $L_f=3.0$ . Αυτό συμβαίνει γιατί στο πλαίσιο πχ με  $L_f=3.0\text{m}$  η μεταβολή στην αντίσταση της δοκού στο σημείο ανασηκώματος μέσο-άκρο είναι μικρότερη σε σχέση με την περίπτωση του πλαισίου  $L_f= 7.0\text{m}$ . Αυτό συμβαίνει γιατί η αντίσταση της δοκού στο μέσο πλαισίου  $3.0\text{m}$  είναι μεγαλύτερη από ότι στο πλαίσιο  $7.0\text{m}$ . ( Εικόνα 3.20 ).



Εικόνα 3.20: Εξήγηση βελτίωσης απόκρισης με προσθήκη στοιχείου λικνισμού στο άκρο.

- Παρόλα αυτά πρέπει να τονιστεί πως χρειάζεται περαιτέρω μελέτη των αναπτυσσόμενων εντάσεων στο σημείο επαφής του στοιχείου λικνισμού με την δοκό εξαιτίας του ανασηκώματος του.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ.

### 4.1 Συμπεράσματα.

- Η ενίσχυση πλαισίων με το στοιχείο λικνισμού βελτίωσε σημαντικά την αντοχή και την δυσκαμψία των αρχικών φορέων.
- Στα ελαστικά πλαίσια παρατηρούμε σημαντική αύξηση της αντοχής και της δυσκαμψίας των πλαισίων αυξανόμενου του λόγου  $B/Lf$ .
- Στα ελαστικά πλαίσια παρατηρείται μια μειούμενη ισχυροποίηση της αποκρίσεως του ενισχυμένου πλαισίου έναντι του ελεύθερου όσον αφορά την ικανότητα και την ακαμψία με την αύξηση του πλήθους των ανοιγμάτων.
- Η μη γραμμική απόκριση της κατασκευής στην περίπτωση του ελαστικού πλαισίου περιορίζεται κυρίως στην αρχή της απόκρισης (σε μικρούς λόγους  $drift$ ), ενώ η μετά-λικνιστική απόκριση δείχνει πρακτικώς μια σταθερή δυσκαμψία. Επιπροσθέτως, η γενική απόκριση μπορεί, στις περισσότερες περιπτώσεις, να προσεγγιστεί από την απόκριση ενός γραμμικού συστήματος.
- Η μείωση της στοχευμένης ικανότητας στα ελαστικά πλαίσια επηρεάζεται άμεσα από το πάχος του προστιθέμενου στοιχείου σε σχέση με το μήκος ανοίγματος πλαισίου, δηλαδή όσο μεγαλύτερος ο λόγος  $B/Lf$  τόσο μεγαλύτερη και η μείωσης αυτή.
- Η μείωση της στοχευμένης ικανότητας στα ελαστικά πλαίσια επηρεάζεται άμεσα από το πλήθος των ανοιγμάτων, το μέγεθος της μείωσης<sup>49</sup> είναι αντιστρόφως ανάλογο του πλήθους των ανοιγμάτων.
- Στα ελαστικά πλαίσια η ενίσχυση με το στοιχείο λικνισμού, οδηγεί σε σημαντική μείωση της εντάσεως σε όρους ροπών, αξονικών και τεμνουσών στην πλειοψηφία των περιπτώσεων. Συγκεκριμένα όσο μεγαλύτερος ο λόγος  $B/Lf$  και όσο μικρότερο το πλήθος των ανοιγμάτων τόσο μεγαλύτερη και η μείωση αυτή. Παρ όλα αυτά λόγω της κίνησης του λικνιζόμενου σώματος, κατά το ανασήκωμα εμφανίζονται κάποιοι πρόσθετοι εφελκυσμοί και ροπές στο σημείο ανασηκώματος επί της δοκού και του υποστυλώματος που βρίσκεται πριν το σημείο αυτό.

<sup>49</sup> Νοείται ότι αναφερόμαστε σε σταθερό ύψος πλαισίων, χαρακτηριστικών στοιχείου λικνισμού και μήκος ανοίγματος πλαισίων για όλες τις περιπτώσεις αριθμού ανοιγμάτων.



- Όσον αφορά τις εμφανιζόμενες θλιπτικές δυνάμεις στα υποστυλώματα παρατηρήθηκε ότι όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των ανοιγμάτων, τόσο και λιγότερη η μείωση της θλιπτικής δύναμης στο ενισχυμένο πλαίσιο και η μείωση αυτή μειώνεται ακόμη περαιτέρω όσο μικρότερος ο λόγος  $B/L$ , δηλαδή αν διατηρήσω το  $L$  σταθερό και μειώσω το  $B$ . Παρ' όλα αυτά λόγω της κίνησης του λικνιζόμενου σώματος, κατά το ανασήκωμα του παρατηρείται εφελκυσμός στο υποστυλωμα που βρίσκεται πριν το στοιχείο λικνισμού. Βέβαια μπορεί να θεωρηθεί ότι σε πολυώροφα κτήρια που η θλιπτική δύναμη επί των υποστυλωμάτων είναι αυξημένη ο εφελκυσμός δεν εμφανίζεται.
- Για περιπτώσεις με άνω των δύο ανοιγμάτων εμφανίζεται αυξημένη τέμνουσα και ροπή στις δοκούς η οποία αυξάνει αναλόγως του λόγου  $B/LF$ . Αυτό συμβαίνει λόγω του στοιχείου ανασηκώματος του στοιχείου λικνισμού.
- Στα ανελαστικά πλαίσια όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος  $B/Lf$  τόσο βελτιωμένη είναι και η απόκριση του πλαισίου, δηλαδή για μικρούς λόγους  $B/Lf$ , μικρές και οι μειώσεις στις στοχευμένες μετακινήσεις και αντιστοίχως στις μέγιστες αναπτυσσόμενες τοπικές πλαστιμότητες.
- Στα ανελαστικά πλαίσια σε περιπτώσεις όπου ο λόγος  $B/LF$  είναι αρκετά μικρός, πιθανόν να εμφανιστούν μεγαλύτερες στοχευμένες μετακινήσεις και τοπικές πλαστιμότητες από ότι στο ελεύθερο πλαίσιο, και αυτό γιατί λόγω της προσθήκης του στοιχείου λικνισμού και της μεταβολής του  $dy$  που προκύπτει από την διγραμμικοποίηση και της μικρής μεταβολής στην ικανότητα του πλαισίου, εμφανίζεται στο ενισχυμένο πλαίσιο αρκετά μικρότερη απόσβεση με αποτέλεσμα να εμφανίζονται μεγαλύτερες προκύπτουσες μετατοπίσεις. Αυτό βέβαια, είναι στα όρια της εμφανιζόμενης αποδεκτής ανακρίβειας της μεθόδου που χρησιμοποιείται, γιατί το λόγο συστήνεται η μη θεώρηση του ως γενικού κανόνα.
- Σε παλαιές κατασκευές με  $\mu=6,0$  εμφανίζεται αρκετά μειούμενο "κέρδος" για μικρά ανοίγματα από την προσθήκη αντίστοιχου πλάτους στοιχείου λικνισμού από ότι σε νέες κατασκευές με  $\mu=3,0$ . Αυτό οφείλεται στην μείωση της αποσβέσεως δυσαναλόγως με την αύξηση της ικανότητας καθώς και στο γεγονός ότι "εργάζεται" στον κλάδο σταθερής ταχύτητας.
- Αποδεικνύεται ότι τόσο η ικανότητα της κατασκευής, όσο και η ακαμψία αυξάνονται περαιτέρω με την μετατόπιση του στοιχείου λικνισμού πλησιέστερα στο άκρο από την κεντρική αρχική του θέση.
- Είναι σημαντικό να παρατηρηθεί πως η βελτίωση σε σχέση με την προσθήκη του στοιχείου λικνισμού στο μέσον, για την περίπτωση με την προσθήκη του στο άκρο είναι αξιόλογα με το μήκος του πλαισίου. Δηλαδή παρατηρείται ότι στο πλαίσιο με μήκος 7.0, η μετατόπιση του στοιχείου λικνισμού στο άκρο επιφέρει αρκετά μεγαλύτερη βελτίωση στην απόκριση του πλαισίου έναντι της περίπτωση με  $Lf=3.0$ . Αυτό συμβαίνει γιατί στο πλαίσιο πχ με  $Lf=3.0m$  η

"εκμετάλλευση " αυτών των νέων περιοχών της δοκού από το στοιχείο λικνισμού πχ 1.0 m είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη για πλαίσιο με  $L_f = 7.0m$ .

## 4.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

- Διερεύνηση ενίσχυσης του σημείου ανασηκώματος του στοιχείου λικνισμού επί της δοκού.
- Διερεύνηση της ενίσχυσης για διαφορετικές διατάξεις των στοιχείων λικνισμού εντός του πλαισίου.
- Διερεύνηση της αλληλεπίδρασης στοιχείου λικνισμού-πλαισίου για διαφορετικά πάχη και ποιότητες υλικών.
- Διερεύνηση της απόκρισης πολυώροφων πλαισίων.
- Διεξαγωγή πειραμάτων σε μονώροφα και πολυώροφα πλαίσια.
- Διερεύνηση της συμπεριφοράς σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση.
- Προσομοίωση ανελαστικού δρώντος στοιχείου λικνισμού.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

Αυγενάκης Ε. ( 2015 ) : Modelling of rocking flexible bodies considering the deformability of their base.

Ψυχάρης Ιωάννης ( 2015 ) : Σημειώσεις αντισεισμικής τεχνολογίας , τεύχος 1.

Ψυχάρης Ιωάννης ( 2015 ) : Σημειώσεις αντισεισμικής τεχνολογίας , τεύχος 2.

Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ) , Φεβ. 2009

George W.Housner ( 1963 ) : The behaviour of inverted pendulum structures during earthquakes.

Chik-Sing Yim , Anil K.Chopra and Joseph Penzien (1980) : Rocking response of rigid blocks to earthquakes.

Ioannis N. Psycharis and Paul C. Jennings (1983) : Rocking of slender rigid bodies allowed to uplift.

Nathann Brent Chancellor , Matthew R.Eartherton , David A.Roke and Tugce Akbas ( 2014 ) : Self-Centering Seismic Lateral Force Resisting Systems - High Performance Structures for the City of Tomorrow.

---

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α-ΚΩΔΙΚΕΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ

---

Παρουσιάζονται στα επόμενα υποπαράρτηματα , οι κώδικες των βασικών<sup>50</sup> περιπτώσεων σε OpenSees που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της παρούσης. Συγκεκριμένα:

1. Στοιχείο λικνισμού υπό σταθερή κατακόρυφη φόρτιση.
2. Στοιχείο λικνισμού με προεντεταμένο τένοντα.
3. Πλαίσιο ελαστικής απόκρισης ενός ανοίγματος χωρίς προσθήκη στοιχείου λικνισμού.
4. Πλαίσιο ελαστικής απόκρισης ενός ανοίγματος με προσθήκη στοιχείου λικνισμού.
5. Πλαίσιο ανελαστικής απόκρισης ενός ανοίγματος χωρίς προσθήκη στοιχείου λικνισμού.
6. Πλαίσιο ανελαστικής απόκρισης ενός ανοίγματος με προσθήκη στοιχείου λικνισμού.

---

<sup>50</sup> Οι περιπτώσεις δύο και τριών ανοιγμάτων δεν παρουσιάζονται καθώς θεωρείται ότι εύκολα μπορεί να γίνει η τροποποίηση του κώδικα ενός ανοίγματος για να προκύψουν οι πιο σύνθετες αυτές περιπτώσεις.

## A.1 Στοιχείο λικνισμού υπό σταθερή κατακόρυφη φόρτιση.

```

wipe

#create the ModelBuilder object
model basic -ndm 2 -ndf 3

# build the model
set B 1.0
set H 4.0
set W 0.06667
# add nodes - command: node nodeID xCrd yCrd
node 1 0.0 0.0
node 2 0.0 $H

# eleTag,iNode,jNode,E,nu,B,W , "συμβολή διατμητικών παραμορφώσεων 1-ναι 0-οχι"
element RockingBC2d 1 2 1 30000000 0.2 $B $W 1

# set the boundary conditions - command: fix nodeID xResrnt? yRestrnt?
fix 1 1 1 1

pattern Plain 1 Linear {
  load 2 0.0 -2000.0 0.0
}

# create a Recorder object for the nodal displacements at node 4
recorder Node -file Example.out -time -nodes 2 -dof 1 disp

set Tol 1.0e-8
constraints Transformation
numberer RCM
system UmfPack
test EnergyIncr $Tol 400
algorithm Newton
set NstepGravity 10
set DGravity [expr 1./$NstepGravity]
integrator LoadControl $DGravity
analysis Static
analyze $NstepGravity

puts "Dead load analysis complete"
loadConst -time 0.0

#PUSH OVER ANALYSIS.....
#Set up parameters that are particular to the model.
set ctrlNode 2
set ctrlDOF 1
#characteristics of pushover analysis
set Dmax 0.5
set Dincr [expr 0.0001*$Dmax]

```

```

#create load pattern for lateral pushover
pattern Plain 2 Linear {
  # apply the load - command: load nodeID xForce yForce
  load 2 1.0 0.0 0.0
}

constraints Transformation
numberer RCM
system UmfPack
test EnergyIncr 1.0e-8 10
algorithm Newton
integrator DisplacementControl $ctrlNode $ctrlDOF $Dincr
analysis Static
set Nsteps [expr int($Dmax/$Dincr)]

set ierrors 0
set Dstep 0.0
set ok 0
while {$Dstep <= 1.0 && $ok == 0} {

  set controlDisp [lindex [nodeDisp $ctrlNode $ctrlDOF] 0]
  set Dstep [expr $controlDisp/$Dmax]

  test EnergyIncr 1.0e-8 10
  algorithm Newton
  integrator DisplacementControl $ctrlNode $ctrlDOF $Dincr
  set ok [analyze 1]

  if {$ok != 0} {
    incr ierrors
    set Nk 100
    set DincrReduced [expr $Dincr/$Nk];
    integrator DisplacementControl $ctrlNode $ctrlDOF $DincrReduced
    for {set ik 1} {$ik <=$Nk} {incr ik 1} {
      test EnergyIncr 1.0e-8 10
      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]
}
}
}

puts "Pushover complete"
wipe

```

## A.2 Στοιχείο λικνισμού με προεντεταμένο τένοντα.

```

Wipe

#create the ModelBuilder object
model basic -ndm 2 -ndf 3

# build the model
set B 1.0
set H 4.0
set W 0.13333
# add nodes - command: node nodeId xCrd yCrd
node 1 0.0 0.0
node 2 0.0 $H

#TENDOM SECTION.....
set sigInit 2378121.284; #ΠΠΟΕΝΤΑΣΗ

uniaxialMaterial Steel02 1 150000000.0 190000000.0 0.01 18.0 0.925 0.15 0.0 1.0 0.0 1.0
$sigInit

# eleTag,iNode,jNode,E,nu,B,W , "συμβολή διατμητικών παραμορφώσεων 1-ναι 0-οχι"

element corotTruss 2 1 2 0.000841 1
element RockingBC2d 1 2 1 30000000 0.2 $B $W 1
# set the boundary conditions - command: fix nodeId xResrnt? yRestrnt?
fix 1 1 1 1

# create a Recorder object for the nodal displacements at node 4
recorder Node -file Example.out -time -nodes 2 -dof 1 disp

set Tol 1.0e-8
constraints Transformation
numberer RCM
system UmfPack
test EnergyIncr $Tol 400
algorithm Newton

```

```

set NstepGravity 10
set DGravity [expr 1./$NstepGravity]
integrator LoadControl $DGravity
analysis Static
analyze $NstepGravity

puts "Dead load analysis complete"
loadConst -time 0.0

#PUSH OVER ANALYSIS.....
#Set up parameters that are particular to the model.
set ctrlNode 2
set ctrlDOF 1
#characteristics of pushover analysis
set Dmax 0.5
set Dincr [expr 0.0001*$Dmax]
#create load pattern for lateral pushover
pattern Plain 2 Linear {
  # apply the load - command: load nodeID xForce yForce
  load 2 1.0 0.0 0.0
}

constraints Transformation
numberer RCM
system UmfPack
test EnergyIncr 1.0e-8 10
algorithm Newton
integrator DisplacementControl $ctrlNode $ctrlDOF $Dincr
analysis Static
set Nsteps [expr int($Dmax/$Dincr)]

set ierrors 0
set Dstep 0.0
set ok 0
while {$Dstep <= 1.0 && $ok == 0} {

    set controlDisp [lindex [nodeDisp $ctrlNode $ctrlDOF] 0]
    set Dstep [expr $controlDisp/$Dmax]

    test EnergyIncr 1.0e-8 10
    algorithm Newton
    integrator DisplacementControl $ctrlNode $ctrlDOF $Dincr
    set ok [analyze 1]

    if {$ok != 0} {
        incr ierrors
        set Nk 100
        set DincrReduced [expr $Dincr/$Nk];
        integrator DisplacementControl $ctrlNode $ctrlDOF $DincrReduced
        for {set ik 1} {$ik <=$Nk} {incr ik 1} {
            test EnergyIncr 1.0e-8 10
            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]
}
}
}

puts "Pushover complete"
wipe

```

### A.3 Πλαίσιο ελαστικής απόκρισης ενός ανοίγματος χωρίς προσθήκη στοιχείου λικνισμού.

```

#SET UP.....
wipe;          #clear memory of all past model definitions
model basic -ndm 2 -ndf 3; #Define the model Builder 2D
#DEFINE GEOMETRY.....
set Lf 5.6;
set Hf 3.5;
set Lfmiddle [expr $Lf/2.0]
# NODAL COORDINATES.....
node 1 0.0 0.0
node 2 $Lf 0.0
node 3 0.0 $Hf
node 4 $Lf $Hf
node 14 $Lfmiddle $Hf
#SINGLE POINT CONSTRAINTS.....
fix 1 1 1 1
fix 2 1 1 1

#DEFINE ELEMENTS.....
#ELASTIC ELEMENTS.....
#Define geometric transformation.....

```

```

geomTransf Linear 1; #Column
geomTransf Linear 2; #Beam
#element connectivity-normal
element elasticBeamColumn 1 1 3 0.3 30000000 0.0045 1; #
element elasticBeamColumn 2 2 4 0.3 30000000 0.0045 1; #
element elasticBeamColumn 3 3 14 0.125 30000000 0.00130208333 2;#REDUCTION OF K 0.5
(0.5*Iz)
element elasticBeamColumn 4 14 4 0.125 30000000 0.00130208333 2;#

#DEFINE Recorder.....
recorder Node -file Example.out -time -nodes 14 -dof 1 disp
recorder Element -file Example.out -time -ele 1 3 4 2 globalForce; #MQN

#DEFINE Load.....
pattern Plain 1 Linear {
eleLoad -ele 3 4 -type -beamUniform -60.
}

set Tol 1.0e-8
constraints Transformation
numberer RCM
system UmfPack
test EnergyIncr $Tol 400
algorithm Newton
set NstepGravity 10
set DGravity [expr 1./$NstepGravity]
integrator LoadControl $DGravity
analysis Static
analyze $NstepGravity

puts "Dead load analysis complete"
loadConst -time 0.0

#PUSH OVER ANALYSIS.....
#Set up parameters that are particular to the model.
set ctrlNode 14
set ctrlDOF 1
#characteristics of pushover analysis
set Dmax 0.07
set Dincr [expr 0.0001*$Dmax]
#create load pattern for lateral pushover
pattern Plain 2 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
}

```

```

constraints Transformation
numberer RCM
system UmfPack
test EnergyIncr 1.0e-8 10
algorithm Newton
integrator DisplacementControl $ctrlNode $ctrlDOF $Dincr
analysis Static
set Nsteps [expr int($Dmax/$Dincr)]

set ierrors 0
set Dstep 0.0
set ok 0
while {$Dstep <= 1.0 && $ok == 0} {

    set controlDisp [lindex [nodeDisp $ctrlNode $ctrlDOF] 0]
    set Dstep [expr $controlDisp/$Dmax]

    test EnergyIncr 1.0e-8 10
    algorithm Newton
    integrator DisplacementControl $ctrlNode $ctrlDOF $Dincr
    set ok [analyze 1]

    if {$ok != 0} {
        incr ierrors
        set Nk 100
        set DincrReduced [expr $Dincr/$Nk];
        integrator DisplacementControl $ctrlNode $ctrlDOF $DincrReduced
        for {set ik 1} {$ik <=$Nk} {incr ik 1} {
            test EnergyIncr 1.0e-8 10
            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]
        }
    }
}

```

```

    }
  }
}

puts "Pushover complete"
wipe

```

## A.4 Πλαίσιο ελαστικής απόκρισης ενός ανοίγματος με προσθήκη στοιχείου λικνισμού στο μέσον.

```

#SET UP.....
wipe;          #clear memory of all past model definitions
model basic -ndm 2 -ndf 3; #Define the model Builder 2D
#DEFINE GEOMETRY.....
set Lf 7.0;
set Hf 3.5;
set B 1.4;
set Hfedge [expr $Hf-0.25];
set Hmiddle [expr $Hfedge/2.0];
set Lfmiddle [expr $Lf/2.0]
set left [expr $Lfmiddle-$B/2.0]
set right [expr $Lfmiddle+$B/2.0]
set rockingmass [expr $Hmiddle*$B*0.25*2.5]
set mass [expr (60*$Lf+$rockingmass)/10]

# NODAL COORDINATES.....
node 1 0.0 0.0
node 2 $Lf 0.0
node 3 0.0 $Hf
node 4 $Lf $Hf
node 5 $left $Hf
node 6 $left $Hfedge
node 7 $right $Hf
node 8 $right $Hfedge
node 9 $Lfmiddle $Hfedge
node 10 $Lfmiddle $Hmiddle
node 11 $Lfmiddle 0.0
node 12 $left $Hfedge
node 13 $right $Hfedge
node 14 $Lfmiddle $Hf
#SINGLE POINT CONSTRAINTS.....
fix 1 1 1 1
fix 11 1 1 1
fix 2 1 1 1

#DEFINE ELEMENTS.....
#Rocking element
# eleTag,iNode,jNode,E,nu,B,W, "συμβολή διατμητικών παραμορφώσεων 1-ναι 0-οχι"
element RockingBC2d 11 10 11 30000000 0.0 $B 0.25 1
element RockingBC2d 10 10 9 30000000 0.0 $B 0.25 1
#ELASTIC ELEMENTS
#Define geometric transformation

```

```

geomTransf Linear 1; #Column
geomTransf Linear 2; #Beam
#element connectivity-normal
element elasticBeamColumn 1 1 3 0.3 30000000 0.0045 1; #
element elasticBeamColumn 2 2 4 0.3 30000000 0.0045 1; #
element elasticBeamColumn 3 3 5 0.125 30000000 0.00130208333 2; #REDUCTION OF K 0.5
(0.5*Iz)
element elasticBeamColumn 4 5 14 0.125 30000000 0.00130208333 2; #
element elasticBeamColumn 12 14 7 0.125 30000000 0.00130208333 2; #
element elasticBeamColumn 5 7 4 0.125 30000000 0.00130208333 2; #
#element connectivity-rigid elements
element elasticBeamColumn 6 6 5 0.05 30000000000 600 1
element elasticBeamColumn 8 8 7 0.05 30000000000 600 1
element elasticBeamColumn 7 12 9 0.05 30000000000 600 2
element elasticBeamColumn 9 9 13 0.05 30000000000 600 2

equalDOF 6 12 1 2
equalDOF 8 13 1 2

#DEFINE Recorder
recorder Node -file Example.out -time -nodes 14 -dof 1 disp
recorder Element -file Example.out -time -ele 1 2 globalForce; #MQN
#DEFINE Load
pattern Plain 1 Linear {
eleLoad -ele 3 4 12 5 -type -beamUniform -60.
}
pattern Plain 2 Linear {
load 14 0.0 -$rockingmass 0.0
}

set Tol 1.0e-8
constraints Transformation
numberer RCM
system UmfPack
test EnergyIncr $Tol 400
algorithm Newton
set NstepGravity 10
set DGravity [expr 1./$NstepGravity]
integrator LoadControl $DGravity
analysis Static
analyze $NstepGravity

puts "Dead load analysis complete"
loadConst -time 0.0

#PUSH OVER ANALYSIS.....
#Set up parameters that are particular to the model.
set ctrlNode 14
set ctrlDOF 1

```

```

#characteristics of pushover analysis
set Dmax 0.05
set Dincr [expr 0.0001*$Dmax]
#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
}

constraints Transformation
numberer RCM
system UmfPack
test EnergyIncr 1.0e-8 10
algorithm Newton
integrator DisplacementControl $ctrlNode $ctrlDOF $Dincr
analysis Static
set Nsteps [expr int($Dmax/$Dincr)]

set ierrors 0
set Dstep 0.0
set ok 0
while {$Dstep <= 1.0 && $ok == 0} {

  set controlDisp [lindex [nodeDisp $ctrlNode $ctrlDOF] 0]
  set Dstep [expr $controlDisp/$Dmax]

  test EnergyIncr 1.0e-8 10
  algorithm Newton
  integrator DisplacementControl $ctrlNode $ctrlDOF $Dincr
  set ok [analyze 1]

  if {$ok != 0} {
    incr ierrors
    set Nk 100
    set DincrReduced [expr $Dincr/$Nk];
    integrator DisplacementControl $ctrlNode $ctrlDOF $DincrReduced
    for {set ik 1} {$ik <=$Nk} {incr ik 1} {
      test EnergyIncr 1.0e-8 10
      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]
}
}
}
}
puts "Pushover complete"
wipe

```

## A.5 Πλαίσιο ανελαστικής απόκρισης ενός ανοίγματος χωρίς προσθήκη στοιχείου λικνισμού.

```

#SET UP.....
wipe; #clear memory of all past model definitions
model basic -ndm 2 -ndf 3; #Define the model Builder 2D
#DEFINE GEOMETRY.....
set Lf 3.0;
set Hf 3.5;
set Lfmiddle [expr $Lf/2.0]
set Bcol 0.3; #Column Width
set Dcol 0.3; #Column Depth
set coverCol 0.025
set numBarsCol 2
set numBarsBeam 2
set barAreaCol 0.000078539
set barAreaBeam 0.000113097
# NODAL COORDINATES.....
node 1 0.0 0.0
node 2 $Lf 0.0
node 3 0.0 $Hf
node 4 $Lf $Hf
node 14 $Lfmiddle $Hf
#SINGLE POINT CONSTRAINTS.....
fix 1 1 1 1
fix 2 1 1 1

#DEFINE ELEMENTS.....
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
uniaxialMaterial Concrete01 2 -300000.0 -0.002 -300000.0 -0.1

#Fiber Section Properties

set coverY [expr $Dcol/2.0]
set coverZ [expr $Bcol/2.0]
set coreY [expr $coverY-$coverCol]

```

```

set coreZ [expr $coverZ-$coverCol]
section fiberSec 4 {
patch quad 2 16 16 -$coverY $coverZ -$coverY -$coverZ $coverY -$coverZ $coverY $coverZ
layer straight 1 $numBarsCol $barAreaCol -$scoreY $scoreZ -$scoreY -$scoreZ
layer straight 1 $numBarsCol $barAreaCol $scoreY $scoreZ $scoreY -$scoreZ
}
section fiberSec 11 {
patch quad 2 16 16 -0.25 0.175 -0.25 -0.175 0.25 -0.175 0.25 0.175
layer straight 1 $numBarsBeam $barAreaBeam -0.22 0.145 -0.22 -0.145
layer straight 1 $numBarsBeam $barAreaBeam 0.22 0.145 0.22 -0.145
}

#ELASTIC ELEMENTS
#Define geometric transformation
geomTransf Linear 1; #Column
geomTransf Linear 2; #Beam
#element connectivity-normal
element nonlinearBeamColumn 1 1 3 5 4 1; #
element nonlinearBeamColumn 2 2 4 5 4 1; #
element nonlinearBeamColumn 3 3 14 5 11 2; #
element nonlinearBeamColumn 4 14 4 5 11 2; #
#element elasticBeamColumn 3 3 14 0.125 30000000 0.00130208333 2;#REDUCTION OF K 0.5
(0.5*Iz)
#element elasticBeamColumn 4 14 4 0.125 30000000 0.00130208333 2;#

#DEFINE Recorder
recorder Node -file disp.out -time -nodes 14 -dof 1 disp
recorder Element -file deformation1.out -time -ele 1 section 1 deformation
recorder Element -file forces1.out -time -ele 1 section 1 force
recorder Element -file deformation12.out -time -ele 2 section 1 deformation
recorder Element -file forces12.out -time -ele 2 section 1 force

#DEFINE Load
#pattern Plain 1 Linear {
#eleLoad -ele 3 4 -type -beamUniform -60.
#}
pattern Plain 1 Linear {
load 3 0.0 -90.0 0.0
load 4 0.0 -90.0 0.0
}

set Tol 1.0e-8
constraints Transformation
numberer RCM
system UmfPack
test EnergyIncr $Tol 400
algorithm Newton
set NstepGravity 10

```



```

set DGravity [expr 1./$NstepGravity]
integrator LoadControl $DGravity
analysis Static
analyze $NstepGravity

puts "Dead load analysis complete"
loadConst -time 0.0

#PUSH OVER ANALYSIS.....
#Set up parameters that are particular to the model.
set ctrlNode 14
set ctrlDOF 1
#characteristics of pushover analysis
set Dmax 0.3
set Dincr [expr 0.0001*$Dmax]
#create load pattern for lateral pushover
pattern Plain 2 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
}

constraints Transformation
numberer RCM
system UmfPack
test EnergyIncr 1.0e-8 10
algorithm Newton
integrator DisplacementControl $ctrlNode $ctrlDOF $Dincr
analysis Static
set Nsteps [expr int($Dmax/$Dincr)]

set ierrors 0
set Dstep 0.0
set ok 0
while {$Dstep <= 1.0 && $ok == 0} {

  set controlDisp [lindex [nodeDisp $ctrlNode $ctrlDOF] 0]
  set Dstep [expr $controlDisp/$Dmax]

  test EnergyIncr 1.0e-8 10
  algorithm Newton
  integrator DisplacementControl $ctrlNode $ctrlDOF $Dincr
  set ok [analyze 1]

  if {$ok != 0} {
    incr ierrors
    set Nk 100
    set DincrReduced [expr $Dincr/$Nk];
    integrator DisplacementControl $ctrlNode $ctrlDOF $DincrReduced
    for {set ik 1} {$ik <= $Nk} {incr ik 1} {
      test EnergyIncr 1.0e-8 10
    }
  }
}

```

```

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]
}
}
}
}

puts "Pushover complete"
wipe

```

## A.6 Πλαίσιο ανελαστικής απόκρισης ενός ανοίγματος με προσθήκη στοιχείου λικνισμού στο μέσον.

```

#SET UP.....
wipe;          #clear memory of all past model definitions
model basic -ndm 2 -ndf 3; #Define the model Builder 2D
#DEFINE GEOMETRY.....
set Lf 4.2;
set Hf 3.5;
set B 2.0;
set Hfedge [expr $Hf-0.25];
set Hmiddle [expr $Hfedge/2.0];
set Lfmiddle [expr $Lf/2.0]
set left [expr $Lfmiddle-$B/2.0]
set right [expr $Lfmiddle+$B/2.0]
set rockingmass [expr $Hmiddle*$B*0.25*2.5]
set mass [expr (60*$Lf+$rockingmass)/10]
set Bcol 0.3; #Column Width
set Dcol 0.3; #Column Depth
set coverCol 0.025
set numBarsCol 2
set numBarsBeam 2

```

```

set barAreaCol 0.000201061
set barAreaBeam 0.000113097
# NODAL COORDINATES.....
node 1 0.0 0.0
node 2 $Lf 0.0
node 3 0.0 $Hf
node 4 $Lf $Hf
node 5 $left $Hf
node 6 $left $Hfedge
node 7 $right $Hf
node 8 $right $Hfedge
node 9 $Lfmiddle $Hfedge
node 10 $Lfmiddle $Hmiddle
node 11 $Lfmiddle 0.0
node 12 $left $Hfedge
node 13 $right $Hfedge
node 14 $Lfmiddle $Hf
#SINGLE POINT CONSTRAINTS.....
fix 1 1 1 1
fix 11 1 1 1
fix 2 1 1 1

#DEFINE ELEMENTS.....
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
uniaxialMaterial Concrete01 2 -300000.0 -0.002 -300000.0 -1.0

#Fiber Section Properties

set coverY [expr $Dcol/2.0]
set coverZ [expr $Bcol/2.0]
set coreY [expr $coverY-$coverCol]
set coreZ [expr $coverZ-$coverCol]
section fiberSec 4 {
patch quad 2 16 16 -$coverY $coverZ -$coverY -$coverZ $coverY -$coverZ $coverY $coverZ
layer straight 1 $numBarsCol $barAreaCol -$scoreY $scoreZ -$scoreY -$scoreZ
layer straight 1 $numBarsCol $barAreaCol $scoreY $scoreZ $scoreY -$scoreZ
}
section fiberSec 11 {
patch quad 2 16 16 -0.25 0.175 -0.25 -0.175 0.25 -0.175 0.25 0.175
layer straight 1 $numBarsBeam $barAreaBeam -0.22 0.145 -0.22 -0.145
layer straight 1 $numBarsBeam $barAreaBeam 0.22 0.145 0.22 -0.145
}

#Rocking element
# eleTag,iNode,jNode,E,nu,B,W, "συμβολή διατμητικών παραμορφώσεων 1-ναι 0-οχι"
element RockingBC2d 11 10 11 30000000 0.0 $B 0.25 1
element RockingBC2d 10 10 9 30000000 0.0 $B 0.25 1
#ANELASTIC ELEMENTS
#Define geometric transformation
geomTransf Linear 1; #Column
geomTransf Linear 2; #Beam

```

```

#element connectivity-normal
element nonlinearBeamColumn 1 1 3 5 4 1; #
element nonlinearBeamColumn 2 2 4 5 4 1; #
element nonlinearBeamColumn 3 3 5 5 11 2; #
element nonlinearBeamColumn 4 5 14 5 11 2; #
element nonlinearBeamColumn 12 14 7 5 11 2; #
element nonlinearBeamColumn 5 7 4 5 11 2; #
#element elasticBeamColumn 3 3 5 0.125 30000000 0.00130208333 2; #REDUCTION OF K 0.5
(0.5*Iz)
#element elasticBeamColumn 4 5 14 0.125 30000000 0.00130208333 2; #
#element elasticBeamColumn 12 14 7 0.125 30000000 0.00130208333 2; #
#element elasticBeamColumn 5 7 4 0.125 30000000 0.00130208333 2; #

#element connectivity-rigid elements
element elasticBeamColumn 6 6 5 0.05 30000000000 600 1
element elasticBeamColumn 8 8 7 0.05 30000000000 600 1
element elasticBeamColumn 7 12 9 0.05 30000000000 600 2
element elasticBeamColumn 9 9 13 0.05 30000000000 600 2

equalDOF 6 12 1 2
equalDOF 8 13 1 2

#DEFINE Recorder
recorder Element -file Example.out -time -ele 1 2 globalForce
#recorder Node -file disp.out -time -nodes 14 -dof 1 disp
#recorder Element -file deformation1.out -time -ele 1 section 1 deformation
#recorder Element -file forces1.out -time -ele 1 section 1 force
#recorder Element -file deformation12.out -time -ele 2 section 1 deformation
#recorder Element -file forces12.out -time -ele 2 section 1 force

#DEFINE Load
#pattern Plain 1 Linear {
#eleLoad -ele 3 4 12 5 -type -beamUniform -60.
#}
pattern Plain 1 Linear {
load 3 0.0 -126.0 0.0
load 4 0.0 -126.0 0.0
}
pattern Plain 2 Linear {
load 14 0.0 -$rockingmass 0.0
}

set Tol 1.0e-8
constraints Transformation
numberer RCM
system UmfPack
test EnergyIncr $Tol 400
algorithm Newton
set NstepGravity 10

```

```

set DGravity [expr 1./$NstepGravity]
integrator LoadControl $DGravity
analysis Static
analyze $NstepGravity

puts "Dead load analysis complete"
loadConst -time 0.0

#PUSH OVER ANALYSIS.....
#Set up parameters that are particular to the model.
set ctrlNode 14
set ctrlDOF 1
#characteristics of pushover analysis
set Dmax 0.1
set Dincr [expr 0.001*$Dmax]
#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
}

constraints Transformation
numberer RCM
system UmfPack
test EnergyIncr 1.0e-8 10
algorithm Newton
integrator DisplacementControl $ctrlNode $ctrlDOF $Dincr
analysis Static
set Nsteps [expr int($Dmax/$Dincr)]

set ierrors 0
set Dstep 0.0
set ok 0
while {$Dstep <= 1.0 && $ok == 0} {

  set controlDisp [lindex [nodeDisp $ctrlNode $ctrlDOF] 0]
  set Dstep [expr $controlDisp/$Dmax]

  test EnergyIncr 1.0e-8 10
  algorithm Newton
  integrator DisplacementControl $ctrlNode $ctrlDOF $Dincr
  set ok [analyze 1]

  if {$ok != 0} {
    incr ierrors
    set Nk 1000
    set DincrReduced [expr $Dincr/$Nk];
    integrator DisplacementControl $ctrlNode $ctrlDOF $DincrReduced
    for {set ik 1} {$ik <= $Nk} {incr ik 1} {
      test EnergyIncr 1.0e-8 10
    }
  }
}

```

```

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]
}
}
}
}
puts "Pushover complete"
wipe

```

## A.7 Πλαίσιο ανελαστικής απόκρισης ενός ανοίγματος με προσθήκη στοιχείου λικνισμού στην άκρη.

```

#SET UP.....
wipe;          #clear memory of all past model definitions
model basic -ndm 2 -ndf 3; #Define the model Builder 2D
#DEFINE GEOMETRY.....
set Lf 7.0;
set Hf 3.5;
set B 2.0;
set Hfedge [expr $Hf-0.25];
set Hmiddle [expr $Hfedge/2.0];
set Lfmiddle [expr $Lf/2.0]
set left [expr $Lfmiddle-$B/2.0]
set right [expr 0.15+$B]
set center [expr 0.15+$B/2.0]
set rockingmass [expr $Hmiddle*$B*0.25*2.5]
set mass [expr (60*$Lf+$rockingmass)/10]
set Bcol 0.3; #Column Width
set Dcol 0.3; #Column Depth
set coverCol 0.025
set numBarsCol 2
set numBarsBeam 2
set barAreaCol 0.000380132

```

```

set barAreaBeam 0.000113097

# NODAL COORDINATES.....
node 1 0.0 0.0
node 2 $Lf 0.0
node 3 0.0 $Hf
node 4 $Lf $Hf
node 5 0.15 $Hf
node 6 0.15 $Hfedge
node 7 $right $Hf
node 8 $right $Hfedge
node 9 $center $Hfedge
node 10 $center $Hmiddle
node 11 $center 0.0
node 12 0.15 $Hfedge
node 13 $right $Hfedge
node 14 $center $Hf
#SINGLE POINT CONSTRAINTS.....
fix 1 1 1 1
fix 11 1 1 1
fix 2 1 1 1

#DEFINE ELEMENTS.....
uniaxialMaterial Steel02 1 500000.0 200000000.0 0.0 18.0 0 1.0 0.0 1.0 0.0 1.0 0.0
uniaxialMaterial Concrete01 2 -300000.0 -0.002 -300000.0 -50.0

#Fiber Section Properties

set coverY [expr $Dcol/2.0]
set coverZ [expr $Bcol/2.0]
set coreY [expr $coverY-$coverCol]
set coreZ [expr $coverZ-$coverCol]
section fiberSec 4 {
patch quad 2 16 16 -$coverY $coverZ -$coverY -$coverZ $coverY -$coverZ $coverY
$coverZ
layer straight 1 $numBarsCol $barAreaCol -$coreY $coreZ -$coreY -$coreZ
layer straight 1 $numBarsCol $barAreaCol $coreY $coreZ $coreY -$coreZ
}
section fiberSec 11 {
patch quad 2 16 16 -0.25 0.175 -0.25 -0.175 0.25 -0.175 0.25 0.175
layer straight 1 $numBarsBeam $barAreaBeam -0.22 0.145 -0.22 -0.145
layer straight 1 $numBarsBeam $barAreaBeam 0.22 0.145 0.22 -0.145
}

#Rocking element
# eleTag,iNode,jNode,E,nu,B,W, "συμβολή διατμητικών παραμορφώσεων 1-ναι 0-οχι"
element RockingBC2d 11 10 11 30000000 0.0 $B 0.25 0
element RockingBC2d 10 10 9 30000000 0.0 $B 0.25 0
#ANELASTIC ELEMENTS
#Define geometric transformation
geomTransf Linear 1; #Column
geomTransf Linear 2; #Beam

#element connectivity-normal

```

```

element nonlinearBeamColumn 1 1 3 5 4 1; #
element nonlinearBeamColumn 2 2 4 5 4 1; #
element nonlinearBeamColumn 3 3 5 5 11 2; #
element nonlinearBeamColumn 4 5 14 5 11 2; #
element nonlinearBeamColumn 12 14 7 5 11 2; #
element nonlinearBeamColumn 5 7 4 5 11 2; #
#element elasticBeamColumn 3 3 5 0.125 30000000 0.00130208333 2; #REDUCTION
OF K 0.5 (0.5*Iz)
#element elasticBeamColumn 4 5 14 0.125 30000000 0.00130208333 2; #
#element elasticBeamColumn 12 14 7 0.125 30000000 0.00130208333 2; #
#element elasticBeamColumn 5 7 4 0.125 30000000 0.00130208333 2; #

#element connectivity-rigid elements
element elasticBeamColumn 6 6 5 0.05 30000000000 600 1
element elasticBeamColumn 8 8 7 0.05 30000000000 600 1
element elasticBeamColumn 7 12 9 0.05 30000000000 600 2
element elasticBeamColumn 9 9 13 0.05 30000000000 600 2

equalDOF 6 12 1 2
equalDOF 8 13 1 2

#DEFINE Recorder
recorder Element -file Example.out -time -ele 1 2 globalForce
recorder Node -file disp.out -time -nodes 14 -dof 1 disp
recorder Element -file deformation1.out -time -ele 1 section 1 deformation
recorder Element -file forces1.out -time -ele 1 section 1 force
recorder Element -file deformation12.out -time -ele 2 section 1 deformation
recorder Element -file forces12.out -time -ele 2 section 1 force

#DEFINE Load
#pattern Plain 1 Linear {
#eleLoad -ele 3 4 12 5 -type -beamUniform -60.
#}
pattern Plain 1 Linear {
load 3 0.0 -210.0 0.0
load 4 0.0 -210.0 0.0
}
pattern Plain 2 Linear {
load 14 0.0 -$rockingmass 0.0
}

set Tol 1.0e-8
constraints Transformation
numberer RCM
system UmfPack
test EnergyIncr $Tol 400
algorithm Newton
set NstepGravity 10
set DGravity [expr 1./$NstepGravity]
integrator LoadControl $DGravity
analysis Static
analyze $NstepGravity

```



```

puts "Dead load analysis complete"
loadConst -time 0.0

#PUSH OVER ANALYSIS.....
#Set up parameters that are particular to the model.
set ctrlNode 14
set ctrlDOF 1
#characteristics of pushover analysis
set Dmax 0.5
set Dincr [expr 0.0001*$Dmax]
#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
}

constraints Transformation
numberer RCM
system UmfPack
test EnergyIncr 1.0e-8 10
algorithm Newton
integrator DisplacementControl $ctrlNode $ctrlDOF $Dincr
analysis Static
set Nsteps [expr int($Dmax/$Dincr)]

set ierrors 0
set Dstep 0.0
set ok 0
while {$Dstep <= 1.0 && $ok == 0} {

  set controlDisp [lindex [nodeDisp $ctrlNode $ctrlDOF] 0]
  set Dstep [expr $controlDisp/$Dmax]

  test EnergyIncr 1.0e-8 10
  algorithm Newton
  integrator DisplacementControl $ctrlNode $ctrlDOF $Dincr
  set ok [analyze 1]

  if {$ok != 0} {
    incr ierrors
    set Nk 100
    set DincrReduced [expr $Dincr/$Nk];
    integrator DisplacementControl $ctrlNode $ctrlDOF $DincrReduced
    for {set ik 1} {$ik <=$Nk} {incr ik 1} {
      test EnergyIncr 1.0e-8 10
      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} {
NewtonWithLineSearch"      puts "Disp: $controlDisp, ModifiedNewton failed, Trying
                            test EnergyIncr 1.0e-6 100000
                            algorithm NewtonLineSearch -tol 1.0e-6 -maxIter 50000
                            set ok [analyze 1]
    }
Trying Broyden"          if {$ok != 0} {
                            puts "Disp: $controlDisp, NewtonWithLineSearch failed,
                            test EnergyIncr 1.0e-6 100000
                            algorithm BFGS
                            set ok [analyze 1]
    }
}
puts "Pushover complete"
wipe
```

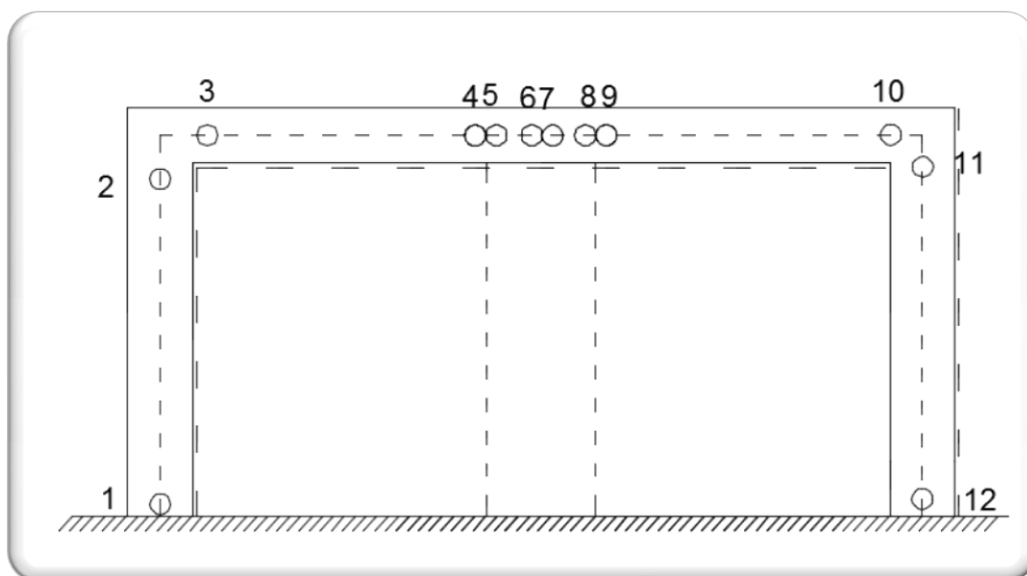


## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β - ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ.

Παρουσιάζονται στα επόμενα υποπαράρτηματα , τα ακριβή αποτελέσματα κατανομής των εντάσεων κατά μήκος των πλαισίων για περαιτέρω διερεύνηση από τον αναγνώστη πέραν των συγκεκριμένων που παρουσιάστηκαν στο αντίστοιχο κεφάλαιο της παρούσης διπλωματικής εργασίας (Κεφάλαιο 2). Συγκεκριμένα:

1. Κατανομή έντασης ανά κόμβο σε πλαίσια ενός ανοίγματος για όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν.
2. Κατανομή έντασης ανά κόμβο σε πλαίσια δύο ανοιγμάτων για όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν.
3. Κατανομή έντασης ανά κόμβο σε πλαίσια τριών ανοιγμάτων για όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν.

### Β.1 Κατανομή έντασης ανά κόμβο σε πλαίσια ενός ανοίγματος για όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν.



Εικόνα Β. 1 : Αρίθμηση κόμβων πλαισίου ενός ανοίγματος.

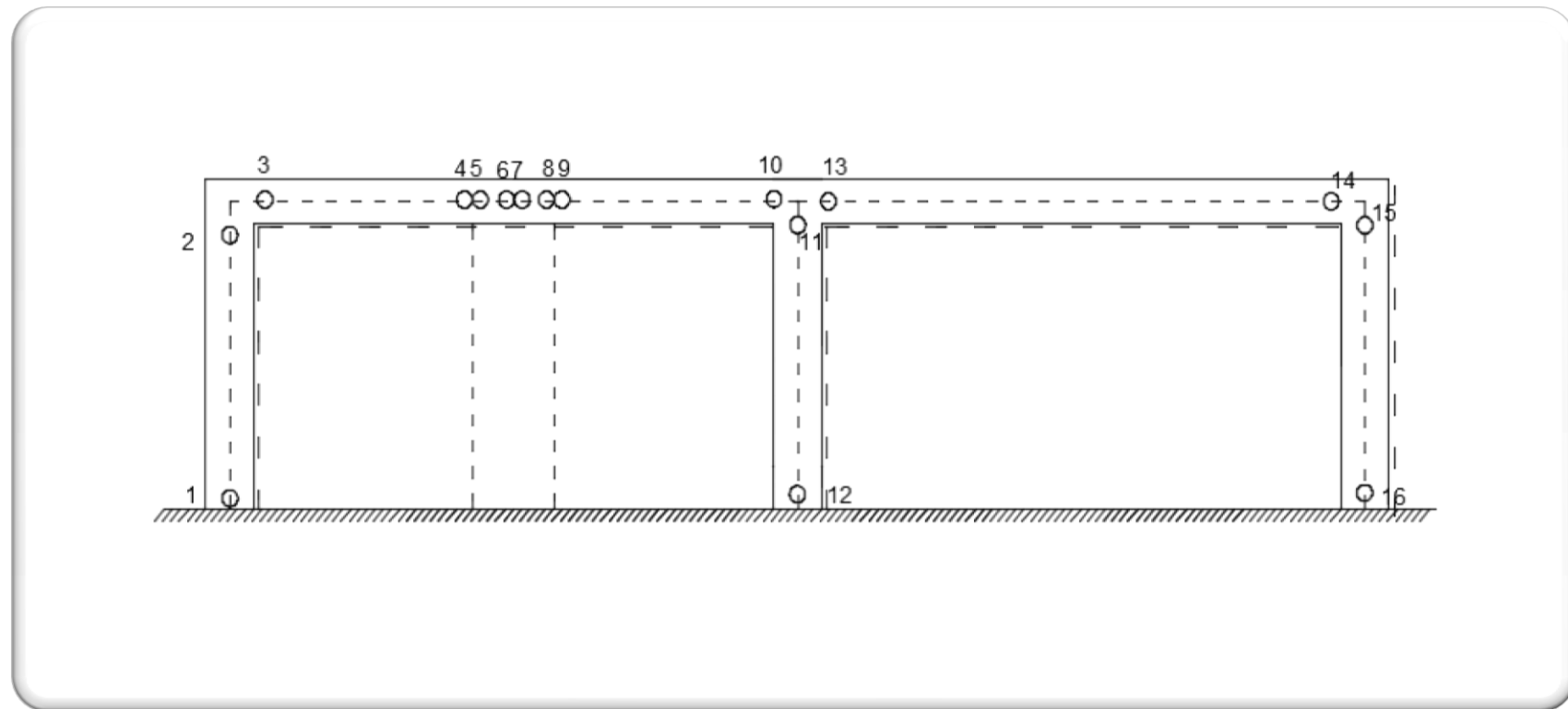
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
		ΔΥΝΑΜΗ	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	
H=3,5 B/L=1/3	3,5	H/B=3,5	-28,7642	-28,7642	-48,576	-108,58	53,2507	23,2507	22,2351	-7,76488	1,37113	-58,6289	-23,1792	-23,179
	2,5	H/=2,5	-30,9099	-30,9099	-30,637	-114,64	76,5201	34,5201	33,0983	-8,90175	4,98731	-79,0127	-28,5642	-28,564
	1,5	H/B=1,5	-40,7785	-40,7785	5,512	-134,49	99,5932	29,5942	27,2244	-42,7746	36,148	-103,853	-47,5313	-47,531
H=3,5 H/B=2,5	0,5	B/L=1/2	-12,6022	-12,6022	-38,833	-80,833	53,8242	11,8242	10,4024	-31,5976	-16,261	-58,2608	-11,8575	-11,858
	0,333333	B/L=1/3	-37,9972	-37,9972	-44,272	-128,27	79,2711	37,2711	35,8493	-6,15073	4,88693	-79,1131	-32,0388	-32,039
	0,25	B/L=1/4	-60,2487	-60,2487	-21,355	-147,36	101,405	59,4045	57,9827	15,9827	24,0464	-101,954	-58,1799	-58,18
	0,2	B/L=1/5	-86,9851	-86,9851	0,43486	-167,57	122,832	80,8322	79,4104	37,4104	43,3402	-124,66	-93,4039	-93,404
		ΔΥΝΑΜΗ	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	
H=3,5 B/L=1/3	3,5	H/B=3,5	48,5763	48,5763	-20,824	-20,824	47,5484	47,5484	47,5484	47,5484	26,4089	26,4089	-58,6289	-58,629
	2,5	H/=2,5	30,6369	30,6369	-38,533	-38,533	42,027	42,027	42,027	42,027	40,879	40,879	-79,0127	-79,013
	1,5	H/B=1,5	-5,512	-5,512	-85,675	-85,675	49,9276	49,9276	49,9276	49,9276	78,9218	78,9218	-103,853	-103,85
H=3,5 H/B=2,5	0,5	B/L=1/2	38,8334	38,8334	-26,445	-26,445	-9,8875	-9,8875	-9,8875	-9,8875	27,1893	27,1893	-58,2608	-58,261
	0,333333	B/L=1/3	44,2722	44,2722	-40,355	-40,355	61,2795	61,2795	61,2795	61,2795	46,3137	46,3137	-79,1131	-79,113
	0,25	B/L=1/4	21,3552	21,3552	-51,509	-51,509	119,828	119,828	119,828	119,828	53,5773	53,5773	-101,954	-101,95
	0,2	B/L=1/5	-0,43486	-0,43486	-64,801	-64,801	191,823	191,823	191,823	191,823	58,3823	58,3823	-124,66	-124,66
		ΔΥΝΑΜΗ	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	
H=3,5 B/L=1/3	3,5	H/B=3,5	-57,5755	42,999	42,999	-35,577	-18,484	0,641108	0,641108	4,25867	-1,0262	-29,6551	29,6551	-51,472
	2,5	H/=2,5	-62,1037	46,0809	46,0809	-55,611	-35,471	3,39345	3,39345	11,8622	11,5752	-40,2425	40,2425	-59,732
	1,5	H/B=1,5	-89,2933	53,4315	53,4315	-97,043	-63,142	12,216	12,216	3,14521	10,3938	-68,596	68,596	-97,764
H=3,5 H/B=2,5	0,5	B/L=1/2	-23,7785	20,329	20,329	-21,554	-17,415	5,56188	5,56188	-1,85646	7,41273	-18,6698	18,6698	-22,832
	0,333333	B/L=1/3	-75,8182	57,1721	57,1721	-63,609	-38,2	2,58944	2,58944	12,9839	9,24248	-42,7158	42,7158	-69,42
	0,25	B/L=1/4	-132,698	78,1723	78,1723	-98,974	-56,14	0,143635	0,143635	26,0315	9,46893	-72,3336	72,3336	-131,3
	0,2	B/L=1/5	-208,768	95,6798	95,6798	-138,3	-74,147	-2,86409	-2,86409	38,0232	4,6631	-109,184	109,184	-217,73

Πίνακας Β.1 : Κατανομή έντασης σε ενισχυμένα πλαίσια ενός ανοίγματος.

		1	2	3	6	7	10	11	12	
		ΔΥΝΑΜΗ	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	
H=3,5 B/L=1/3	3,5	H/B=3,5	45,8598	45,8598	41,5789	-48,421	-48,421	-138,421	78,6833	78,6833
	2,5	H/=2,5	57,2478	57,2478	81,3748	-44,625	-44,625	-170,625	124,245	124,245
	1,5	H/B=1,5	54,2912	54,2912	174,894	-35,106	-35,106	-245,106	248,071	248,071
H=3,5 H/B=2,5	0,5	B/L=1/2	41,5268	41,5268	36,6022	-47,398	-47,398	-131,398	69,8354	69,8354
	0,333333	B/L=1/3	57,2478	57,2478	81,3748	-44,625	-44,625	-170,625	124,245	124,245
	0,25	B/L=1/4	59,8646	59,8646	128,699	-39,301	-39,301	-207,301	182,043	182,043
	0,2	B/L=1/5	54,2912	54,2912	174,894	-35,106	-35,106	-245,106	248,071	248,071
		ΔΥΝΑΜΗ	N	N	N	N	N	N	N	N
H=3,5 B/L=1/3	3,5	H/B=3,5	-41,5789	-41,5789	-16,412	-16,412	-16,412	-16,4117	-138,421	-138,421
	2,5	H/=2,5	-81,3748	-81,3748	-33,499	-33,499	-33,499	-33,4986	-170,625	-170,625
	1,5	H/B=1,5	-174,894	-174,894	-96,89	-96,89	-96,89	-96,8898	-245,106	-245,106
H=3,5 H/B=2,5	0,5	B/L=1/2	-36,6022	-36,6022	-14,154	-14,154	-14,154	-14,1543	-131,398	-131,398
	0,333333	B/L=1/3	-81,3748	-81,3748	-33,499	-33,499	-33,499	-33,4986	-170,625	-170,625
	0,25	B/L=1/4	-128,699	-128,699	-61,089	-61,089	-61,089	-61,0894	-207,301	-207,301
	0,2	B/L=1/5	-174,894	-174,894	-96,89	-96,89	-96,89	-96,8898	-245,106	-245,106
		ΔΥΝΑΜΗ	M	M	M	M	M	M	M	M
H=3,5 B/L=1/3	3,5	H/B=3,5	-126,316	34,193	34,193	29,0613	29,0613	-111,07	111,07	-164,321
	2,5	H/=2,5	-185,231	15,136	15,136	53,723	53,723	-172,29	172,29	-262,568
	1,5	H/B=1,5	-295,219	-105,199	-105,2	139,431	139,431	-350,939	350,939	-517,309
H=3,5 H/B=2,5	0,5	B/L=1/2	-112,13	33,2138	33,2138	25,6569	25,6569	-99,4999	99,4999	-144,924
	0,333333	B/L=1/3	-185,231	15,136	15,136	53,723	53,723	-172,29	172,29	-262,568
	0,25	B/L=1/4	-243,03	-33,5042	-33,504	91,6526	91,6526	-253,591	253,591	-383,562
	0,2	B/L=1/5	-295,219	-105,199	-105,2	139,431	139,431	-350,939	350,939	-517,309

Πίνακας Β.2 : Κατανομή έντασης σε μη ενισχυμένα πλαίσια ενός ανοίγματος.

## Β.2 Κατανομή έντασης ανά κόμβο σε πλαίσια δύο ανοιγμάτων για όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν.



Διάγραμμα Β.1 : Αρίθμηση κόμβων πλαισίου δύο ανοιγμάτων.

			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ΔΥΝΑΜΗ			Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q
H=3,5 B/L=1/3	3,5	H/B=3,5	59,8084	59,8084	-129,38	-189,38	60,0356	30,0356	29,0199	-0,98006	8,74265	-51,2573	38,5182	38,5182	-61,821	-118,179	56,8524	56,8524
	2,5	H/=2,5	82,9428	82,9428	-128,88	-212,88	88,3434	46,3434	44,9215	2,9215	9,62655	-74,3735	40,182	40,182	-103,834	-148,166	84,6258	84,6258
	1,5	H/B=1,5	129,014	129,014	-90,214	-230,22	135,31	65,3109	62,9412	-7,05783	-4,6816	-144,683	40,5111	40,5111	-194,796	-225,204	176,47	176,47
H=3,5 H/B=2,5	0,5	B/L=1/2	35,4991	35,4991	-139,33	-181,33	57,8395	15,8395	14,4176	-27,5824	-14,021	-56,0214	16,7444	16,7444	-69,6983	-98,3017	34,229	34,229
	0,33333	B/L=1/3	82,9428	82,9428	-128,88	-212,88	88,3434	46,3434	44,9215	2,9215	9,62655	-74,3735	40,182	40,182	-103,834	-148,166	84,6258	84,6258
	0,25	B/L=1/4	127,992	127,992	-90,257	-216,26	107,85	65,8502	64,4284	22,4284	26,0353	-99,9647	68,1951	68,1951	-141,878	-194,122	151,149	151,149
	0,2	B/L=1/5	157,942	157,942	-42,382	-210,38	122,155	80,1548	78,733	36,733	39,2553	-128,745	86,3314	86,3314	-184,485	-235,515	220,587	220,587
ΔΥΝΑΜΗ			N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
H=3,5 B/L=1/3	3,5	H/B=3,5	129,383	129,383	-16,472	-16,472	148,241	148,241	148,241	148,241	57,1892	57,1892	-113,078	-113,08	19,4275	19,4275	-118,18	-118,18
	2,5	H/=2,5	128,88	128,88	-28,653	-28,653	213,704	213,704	213,704	213,704	98,3838	98,3838	-178,207	-178,21	26,97	26,97	-148,17	-148,17
	1,5	H/B=1,5	90,2139	90,2139	-73,225	-73,225	242,317	242,317	242,317	242,317	187,495	187,495	-339,479	-339,48	25,7681	25,7681	-225,2	-225,2
H=3,5 H/B=2,5	0,5	B/L=1/2	139,33	139,33	-26,071	-26,071	85,9252	85,9252	85,9252	85,9252	72,1677	72,1677	-125,72	-125,72	27,3415	27,3415	-98,302	-98,302
	0,33333	B/L=1/3	128,88	128,88	-28,653	-28,653	213,704	213,704	213,704	213,704	98,3838	98,3838	-178,207	-178,21	26,97	26,97	-148,17	-148,17
	0,25	B/L=1/4	90,2565	90,2565	-33,625	-33,625	297,858	297,858	297,858	297,858	103,89	103,89	-241,842	-241,84	10,4681	10,4681	-194,12	-194,12
	0,2	B/L=1/5	42,3819	42,3819	-44,069	-44,069	334,665	334,665	334,665	334,665	97,1027	97,1027	-313,23	-313,23	-18,5766	-18,5766	-235,52	-235,52
ΔΥΝΑΜΗ			M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
H=3,5 B/L=1/3	3,5	H/B=3,5	-117,205	92,1243	92,1243	-67,259	-26,081	-3,56308	-3,56308	3,4469	-19,316	-40,5734	41,3366	-93,477	-0,763228	-83,7738	83,7738	-115,21
	2,5	H/=2,5	-162,571	127,729	127,729	-111,5	-50,915	-3,77414	-3,77414	12,9709	-15,859	-61,182	25,6215	-115,02	35,5605	-128,658	128,658	-167,53
	1,5	H/B=1,5	-269,437	182,11	182,11	-191,73	-112,84	4,18607	4,18607	36,7842	23,0788	-151,181	-29,2861	-171,08	180,467	-286,892	286,892	-330,75
H=3,5 H/B=2,5	0,5	B/L=1/2	-64,2406	60,0063	60,0063	-52,225	-24,226	1,56206	1,56206	-3,04561	-6,485	-31	15,3486	-43,257	15,6514	-55,6961	55,6961	-64,106
	0,33333	B/L=1/3	-162,571	127,729	127,729	-111,5	-50,915	-3,77414	-3,77414	12,9709	-15,859	-61,182	25,6215	-115,02	35,5605	-128,658	128,658	-167,53
	0,25	B/L=1/4	-277,09	170,883	170,883	-150,96	-68,084	-7,28927	-7,28927	23,1106	-25,381	-103,007	28,0384	-210,64	74,9687	-221,254	221,254	-307,77
	0,2	B/L=1/5	-373,247	179,55	179,55	-174,32	-79,636	-8,82763	-8,82763	31,5854	-27,805	-153,09	8,83191	-293,33	144,258	-322,86	322,86	-449,2

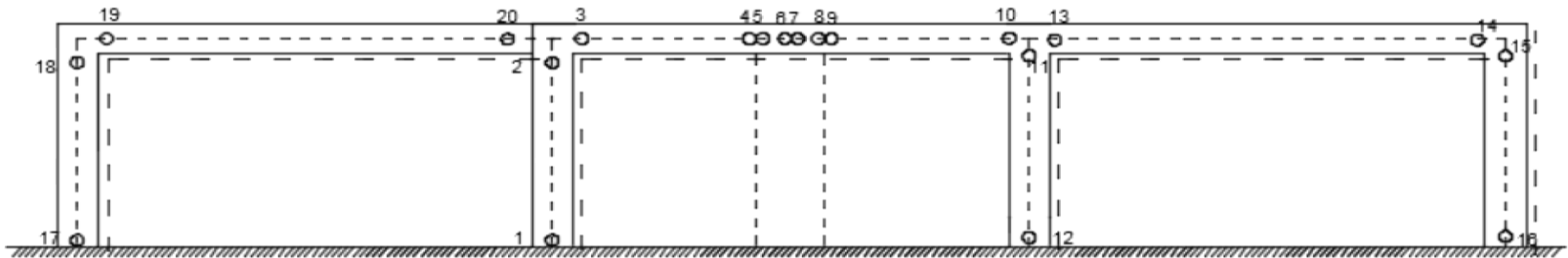
Πίνακας Β.3 : : Κατανομή έντασης σε ενισχυμένα πλαίσια δύο ανοιγμάτων.

			1	2	3	6	7	10	11	12	13	14	15	16
ΔΥΝΑΜΗ			Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q
H=3,5 B/L=1/3	3,5	H/B=3,5	62,6348	62,6348	30,711	-59,289	-59,289	-149,289	104,838	104,838	-41,107	-138,893	91,77	91,77
	2,5	H/=2,5	78,4215	78,4215	71,1275	-54,873	-54,873	-180,873	145,708	145,708	-83,073	-168,927	138,836	138,836
	1,5	H/B=1,5	94,0339	94,0339	163,237	-46,763	-46,763	-256,763	237,378	237,378	-176,89	-243,114	273,45	273,45
H=3,5 H/B=2,5	0,5	B/L=1/2	59,4902	59,4902	23,9233	-60,077	-60,077	-144,077	97,9224	97,9224	-33,939	-134,062	84,5722	84,5722
	0,333333	B/L=1/3	78,4215	78,4215	71,1275	-54,873	-54,873	-180,873	145,708	145,708	-83,073	-168,927	138,836	138,836
	0,25	B/L=1/4	89,9173	89,9173	117,561	-50,439	-50,439	-218,439	192,02	192,02	-130,53	-205,466	201,826	201,826
	0,2	B/L=1/5	94,0339	94,0339	163,237	-46,763	-46,763	-256,763	237,378	237,378	-176,89	-243,114	273,45	273,45
ΔΥΝΑΜΗ			N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
H=3,5 B/L=1/3	3,5	H/B=3,5	-30,711	-30,711	-23,78	-23,78	-23,78	-23,7796	-190,396	-190,396	-5,3556	-5,35564	-138,893	-138,89
	2,5	H/=2,5	-71,1275	-71,1275	-42,567	-42,567	-42,567	-42,5668	-263,945	-263,945	-17,847	-17,8474	-168,927	-168,93
	1,5	H/B=1,5	-163,237	-163,237	-107,59	-107,59	-107,59	-107,587	-433,649	-433,649	-71,829	-71,8293	-243,114	-243,11
H=3,5 H/B=2,5	0,5	B/L=1/2	-23,9233	-23,9233	-21,171	-21,171	-21,171	-21,1714	-178,015	-178,015	-3,9106	-3,91062	-134,062	-134,06
	0,333333	B/L=1/3	-71,1275	-71,1275	-42,567	-42,567	-42,567	-42,5668	-263,945	-263,945	-17,847	-17,8474	-168,927	-168,93
	0,25	B/L=1/4	-117,561	-117,561	-71,337	-71,337	-71,337	-71,3371	-348,973	-348,973	-40,571	-40,5713	-205,466	-205,47
	0,2	B/L=1/5	-163,237	-163,237	-107,59	-107,59	-107,59	-107,587	-433,649	-433,649	-71,829	-71,8293	-243,114	-243,11
ΔΥΝΑΜΗ			M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
H=3,5 B/L=1/3	3,5	H/B=3,5	-166,836	52,3858	52,3858	30,9523	30,9523	-125,481	151,28	-215,654	-25,799	-120,882	120,882	-200,31
	2,5	H/=2,5	-237,725	36,75	36,75	53,8177	53,8177	-193,715	194,802	-315,175	-1,0873	-179,208	179,208	-306,72
	1,5	H/B=1,5	-397,71	-68,5911	-68,591	135,238	135,238	-395,933	270,305	-560,518	125,629	-357,428	357,428	-599,65
H=3,5 H/B=2,5	0,5	B/L=1/2	-155,074	53,1421	53,1421	27,8347	27,8347	-115,073	143,166	-199,563	-28,093	-112,08	112,08	-183,92
	0,333333	B/L=1/3	-237,725	36,75	36,75	53,8177	53,8177	-193,715	194,802	-315,175	-1,0873	-179,208	179,208	-306,72
	0,25	B/L=1/4	-319,086	-4,37523	-4,3752	89,5958	89,5958	-286,833	236,213	-435,858	50,6204	-260,428	260,428	-445,96
	0,2	B/L=1/5	-397,71	-68,5911	-68,591	135,238	135,238	-395,933	270,305	-560,518	125,629	-357,428	357,428	-599,65

Πίνακας Β.4 : Κατανομή έντασης σε μη ενισχυμένα πλαίσια δύο ανοιγμάτων.



### Β.3 Κατανομή έντασης ανά κόμβο σε πλαίσια τριών ανοιγμάτων για όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν.



Εικόνα Β.2 : Αρίθμηση κόμβων πλαισίου τριών ανοιγμάτων.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

		17	18	19	20	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
		ΔΥΝΑΜΗ	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q
H=3,5 B/L=1/3	H/B=3,5	36,8739	36,8739	56,446	-123,55	106,576	106,576	-164,151	-224,151	69,4246	39,4246	38,409	8,40899	18,1793	-41,8207	55,3153	55,3153	-49,902	-130,1	72,5074	72,5074
	H/=2,5	40,8838	40,8838	96,7842	-155,22	167,375	167,375	-183,192	-267,192	101,27	59,27	57,8482	15,8482	22,2072	-61,7928	69,0159	69,0159	-90,391	-161,61	112,256	112,256
	H/B=1,5	22,3727	22,3727	186,632	-233,37	295,92	295,92	-121,676	-261,677	143,827	73,8284	71,4586	1,4596	3,17808	-136,823	84,1243	84,1243	-185,27	-234,73	217,76	217,76
H=3,5 H/B=2,5	B/L=1/2	16,2116	16,2116	65,0119	-102,99	73,6738	73,6738	-224,766	-266,766	69,2064	27,2064	25,7845	-16,216	-0,053502	-42,0535	30,2369	30,2369	-59,162	-108,84	46,9031	46,9031
	B/L=1/3	40,8838	40,8838	96,7842	-155,22	167,375	167,375	-183,192	-267,192	101,27	59,27	57,8482	15,8482	22,2072	-61,7928	69,0159	69,0159	-90,391	-161,61	112,256	112,256
	B/L=1/4	56,7904	56,7904	134,735	-201,27	244,35	244,35	-99,3432	-225,343	111,583	69,5829	68,161	26,161	29,0916	-96,9084	101,498	101,498	-132,3	-203,7	181,237	181,237
	B/L=1/5	64,0802	64,0802	175,951	-244,05	320,149	320,149	-37,5811	-205,581	120,991	78,991	77,5691	35,5691	37,5153	-130,485	128,499	128,499	-176,29	-243,71	256,958	256,958
	ΔΥΝΑΜΗ	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
H=3,5 B/L=1/3	H/B=3,5	-56,446	-56,446	-52,732	-52,732	40,5966	40,5966	-35,7615	-35,7615	202,138	202,138	202,138	202,138	51,3888	51,3888	-91,722	-91,722	17,0984	17,0984	-130,1	-130,1
	H/=2,5	-96,7842	-96,7842	-95,447	-95,447	27,9759	27,9759	-64,4025	-64,4025	309,51	309,51	309,51	309,51	91,3899	91,3899	-152,18	-152,18	24,0751	24,0751	-161,61	-161,61
	H/B=1,5	-186,632	-186,632	-204,89	-204,89	-111,69	-111,692	-136,235	-136,235	326,32	326,32	326,32	326,32	152,644	152,644	-322,09	-322,09	9,50437	9,50437	-234,73	-234,73
H=3,5 H/B=2,5	B/L=1/2	-65,0119	-65,0119	-60,271	-60,271	121,778	121,778	-63,0799	-63,0799	157,781	157,781	157,781	157,781	75,8254	75,8254	-101,22	-101,22	29,5796	29,5796	-108,84	-108,84
	B/L=1/3	-96,7842	-96,7842	-95,447	-95,447	27,9759	27,9759	-64,4025	-64,4025	309,51	309,51	309,51	309,51	91,3899	91,3899	-152,18	-152,18	24,0751	24,0751	-161,61	-161,61
	B/L=1/4	-134,735	-134,735	-124,93	-124,93	-101,92	-101,922	-62,3091	-62,3091	335,449	335,449	335,449	335,449	80,7144	80,7144	-229,21	-229,21	0,48775	0,48775	-203,7	-203,7
	B/L=1/5	-175,951	-175,951	-162,98	-162,98	-206,47	-206,468	-69,8872	-69,8872	338,446	338,446	338,446	338,446	68,6598	68,6598	-306,77	-306,77	-29,9	-29,9	-243,71	-243,71
	ΔΥΝΑΜΗ	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
H=3,5 B/L=1/3	H/B=3,5	-109,688	19,3706	19,3706	-81,291	-190,08	182,939	101,648	-92,5029	-33,028	-5,8157	-5,8157	5,88879	-31,7985	-43,6192	62,0505	-131,55	-18,431	-101,86	101,864	-151,91
	H/=2,5	-151,58	-8,48667	-8,4867	-131,19	-296,8	289,016	157,823	-157,445	-63,967	-7,77825	-7,77825	18,0155	-36,5145	-64,2245	56,7424	-184,81	7,48207	-157,04	157,041	-235,85
	H/B=1,5	-217,211	-138,907	-138,91	-302,48	-527,92	507,801	205,318	-241,931	-126,29	0,672073	0,672073	43,2071	-0,21197	-156,132	8,91013	-285,53	147,222	-320,34	320,335	-441,82
H=3,5 H/B=2,5	B/L=1/2	-56,875	-0,13428	-0,1343	-53,301	-122,92	134,936	81,6351	-90,4009	-35,186	-1,44116	-1,44116	1,90801	-18,5809	-33,3184	32,2323	-73,597	1,08604	-70,633	70,6334	-93,527
	B/L=1/3	-151,58	-8,48667	-8,4867	-131,19	-296,8	289,016	157,823	-157,445	-63,967	-7,77825	-7,77825	18,0155	-36,5145	-64,2245	56,7424	-184,81	7,48207	-157,04	157,041	-235,85
	B/L=1/4	-241,895	-43,1288	-43,129	-229,41	-456,6	398,622	169,211	-171,71	-72,27	-8,86219	-8,86219	24,1505	-39,5331	-110,741	62,3139	-292,93	48,4268	-248,36	248,355	-385,97
	B/L=1/5	-327,529	-103,249	-103,25	-341,59	-619,57	500,951	159,362	-181,065	-78,982	-8,98839	-8,98839	30,61	-36,8364	-166,994	51,0022	-398,74	115,992	-351,97	351,97	-547,38

Πίνακας Β.5 : Κατανομή έντασης σε ενισχυμένα πλαίσια τριών ανοιγμάτων.

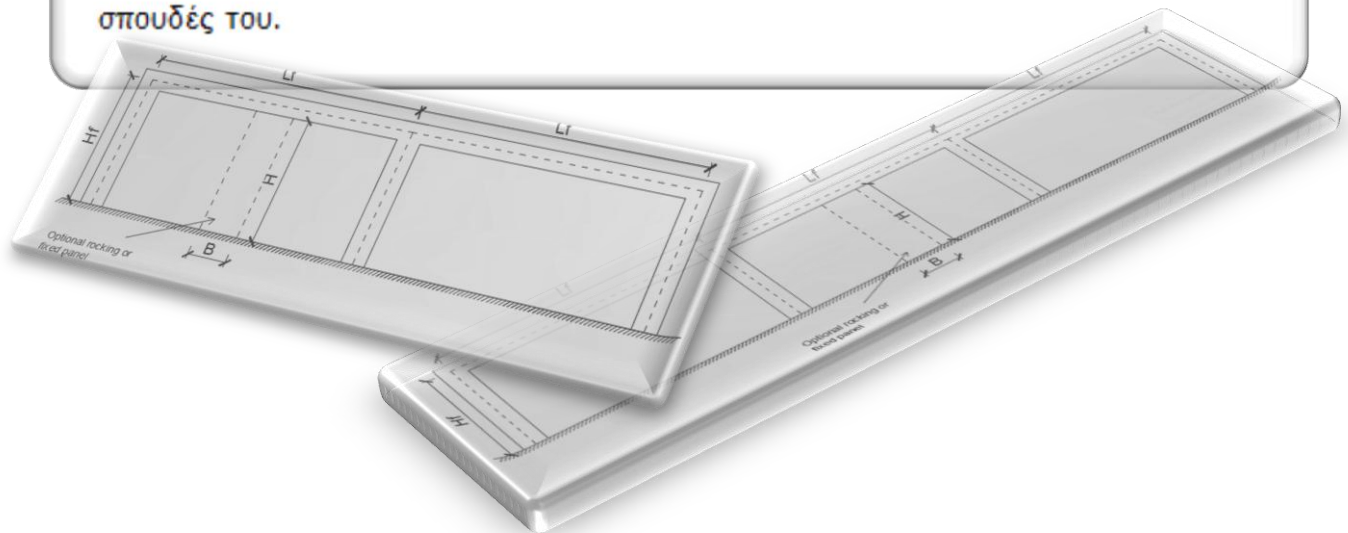
		17	18	19	20	1	2	3	6	7	10	11	12	13	14	15	16
ΔΥΝΑΜΗ		Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q
H=3,5 B/L=1/3	H/B=3,5	69,1693	69,1693	25,8432	-154,16	112,228	112,228	40,8131	-49,1869	-49,187	-139,187	109,182	109,182	-35,4802	-144,52	98,4247	98,4247
	H/=2,5	87,572	87,572	66,9597	-185,04	157,364	157,364	79,9505	-46,0495	-46,05	-172,049	151,617	151,617	-78,24	-173,76	147,952	147,952
	H/B=1,5	110,556	110,556	159,78	-260,22	260,942	260,942	170,54	-39,4604	-39,46	-249,46	247,344	247,344	-173,177	-246,823	288,493	288,493
H=3,5 H/B=2,5	B/L=1/2	65,6248	65,6248	18,883	-149,12	104,684	104,684	34,2702	-49,7298	-49,73	-133,73	102,047	102,047	-28,146	-139,854	90,828	90,828
	B/L=1/3	87,572	87,572	66,9597	-185,04	157,364	157,364	79,9505	-46,0495	-46,05	-172,049	151,617	151,617	-78,24	-173,76	147,952	147,952
	B/L=1/4	102,568	102,568	113,828	-222,17	209,399	209,399	125,415	-42,5846	-42,585	-210,585	200,002	200,002	-126,338	-209,662	213,923	213,923
	B/L=1/5	110,556	110,556	159,78	-260,22	260,942	260,942	170,54	-39,4604	-39,46	-249,46	247,344	247,344	-173,177	-246,823	288,493	288,493
ΔΥΝΑΜΗ		N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
H=3,5 B/L=1/3	H/B=3,5	-25,8432	-25,8432	-28,082	-28,082	-194,97	-194,97	-13,1045	-13,1045	-13,105	-13,1045	-174,667	-174,67	-1,17365	-1,17365	-144,52	-144,52
	H/=2,5	-66,9597	-66,9597	-48,554	-48,554	-264,99	-264,991	-27,3162	-27,3162	-27,316	-27,3162	-250,289	-250,29	-11,8256	-11,8256	-173,76	-173,76
	H/B=1,5	-159,78	-159,78	-116,28	-116,28	-430,76	-430,759	-82,1694	-82,1694	-82,169	-82,1694	-422,638	-422,64	-61,6591	-61,6591	-246,82	-246,82
H=3,5 H/B=2,5	B/L=1/2	-18,883	-18,883	-25,171	-25,171	-183,39	-183,387	-11,2833	-11,2833	-11,283	-11,2833	-161,876	-161,88	-0,032164	-0,032164	-139,85	-139,85
	B/L=1/3	-66,9597	-66,9597	-48,554	-48,554	-264,99	-264,991	-27,3162	-27,3162	-27,316	-27,3162	-250,289	-250,29	-11,8256	-11,8256	-173,76	-173,76
	B/L=1/4	-113,828	-113,828	-78,905	-78,905	-347,59	-347,587	-50,9787	-50,9787	-50,979	-50,9787	-336,922	-336,92	-32,4501	-32,4501	-209,66	-209,66
	B/L=1/5	-159,78	-159,78	-116,28	-116,28	-430,76	-430,759	-82,1694	-82,1694	-82,169	-82,1694	-422,638	-422,64	-61,6591	-61,6591	-246,82	-246,82
ΔΥΝΑΜΗ		M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
H=3,5 B/L=1/3	H/B=3,5	-182,211	59,8816	59,8816	-132,59	-231,95	160,847	28,2585	21,9781	21,9781	-119,302	153,971	-228,17	-34,6683	-128,891	128,891	-215,6
	H/=2,5	-260,612	45,8903	45,8903	-202,08	-340,84	209,937	7,85809	43,4542	43,4542	-185,55	197,201	-333,46	-11,651	-188,941	188,941	-328,89
	H/B=1,5	-442,793	-55,8477	-55,848	-407,39	-613,46	299,838	-107,547	121,842	121,842	-383,77	271,489	-594,22	112,281	-370,04	370,04	-639,69
H=3,5 H/B=2,5	B/L=1/2	-169,332	60,3545	60,3545	-121,97	-214,49	151,906	29,9326	19,1109	19,1109	-109,311	145,94	-211,23	-36,6287	-119,762	119,762	-198,14
	B/L=1/3	-260,612	45,8903	45,8903	-202,08	-340,84	209,937	7,85809	43,4542	43,4542	-185,55	197,201	-333,46	-11,651	-188,941	188,941	-328,89
	B/L=1/4	-352,367	6,6209	6,6209	-296,74	-474,41	258,491	-38,2512	77,7121	77,7121	-276,725	238,241	-461,77	38,4841	-271,792	271,792	-476,94
	B/L=1/5	-442,793	-55,8477	-55,848	-407,39	-613,46	299,838	-107,547	121,842	121,842	-383,77	271,489	-594,22	112,281	-370,04	370,04	-639,69

Πίνακας Β.6 : Κατανομή έντασης σε μη ενισχυμένα πλαίσια τριών ανοιγμάτων.

## ΣΥΝΤΟΜΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

### ΖΑΝΤΗΣ ΧΡΙΣΤΟΣ

Ο κ. Ζαντής Χρίστος απεφοίτησε από το Παγκύπριο Λύκειο Λευκωσίας στην Κύπρο με μ.ο 19,55/20. Ακολούθως πέτυχε την εισαγωγή του στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο στο οποίο αποφοιτά από την σχολή Πολιτικών Μηχανικών με την παρούσα Διπλωματική εργασία στα 5 έτη. Ομιλεί αππαιίστως την αγγλική και είναι κάτοχος IGCSE (grade B) και IELTS (grade 7/9). Έγινε δεκτός στο University College of London (UCL) στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα Construction Management and Economics για το έτος 2016-2017 , όπου και θα συνεχίσει τις σπουδές του.



© 2016

ΤΟΥ

**Ζαντής Χρίστος**

© 2016

ΤΟΥ

**Ζαντής Χρίστος**