

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Δομοστατικός Τομέας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρήση εξειδικευμένου λογισμικού για την προσομοίωση και την επαλήθευση πειραματικών αποτελεσμάτων απλών και ενισχυμένων (με Χ-χαλύβδινους συνδέσμους) πλαισίων από Ο/Σ υπό κλίμακα

Φοιτήτρια: Αικατερίνη Ντρίβα
Επιβλέπων: Δ. Σοφιανόπουλος,
Αναπληρωτής Καθηγητής

Βόλος, Οκτώβριος 2016



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 15406/1
Ημερ. Εισ.: 08-09-2017
Δωρεά: Συγγραφέας
Ταξινόητικός Κωδικός: ΠΤ – ΠΜ
2016
NTP

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο:	3
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ	
1.1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	3
1.1.1. ΣΤΑΤΙΚΗ ΥΠΕΡΩΘΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (STATIC PUSHOVER ANALYSIS)	3
1.1.2. ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑΣ (STATIC TIME-HISTORY ANALYSIS)	5
1.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ SeismoStruct	7
1.2.1. ΠΡΟΕΡΓΑΣΙΑ (Pre-Processor)	7
1.2.2. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ (Processor)	11
1.2.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ (Post-Processor)	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο:	13
ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΤΑ ΟΠΟΙΑ ΒΑΣΙΣΤΗΚΕ Η ΟΛΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	
2.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ	13
2.2. ΤΕΛΕΥΤΑΙΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΜΕ ΜΗ ΟΛΙΣΘΑΙΝΟΝΤΕΣ ΚΟΜΒΟΥΣ ΒΑΣΗΣ ΤΩΝ Χ-ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο:	22
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΚΑΙ ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΣ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥΣ	
3.1. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΗ-ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΥΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ	22
3.2. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΜΕ Χ-ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ ΥΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ	27
3.2.1. ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΜΕ Χ-ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ L20x3	27
3.2.2. ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΜΕ Χ-ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ 2L20x3/5	34
3.2.3. ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΜΕ Χ-ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ L25x3	42
3.2.4. ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΜΕ Χ-ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ L20x3 ΠΛΗΡΩΣ ΠΑΚΤΩΜΕΝΟ	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο:	52
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	53

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η χρήση εξειδικευμένου λογισμικού για την προσομοίωση και την επαλήθευση πειραματικών αποτελεσμάτων απλών και ενισχυμένων (με Χ-χαλύβδινους συνδέσμους) πλαισίων από οπλισμένο σκυρόδεμα υπό κλίμακα. Πιο συγκεκριμένα, τα πειραματικά αποτελέσματα προέρχονται από σχετικά πρόσφατο ερευνητικό πρόγραμμα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και άλλες επιπρόσθετες δοκιμές ενώ το εξειδικευμένο λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το SeismoStruct.

Αναλυτικότερα, με βάση το συγκεκριμένο αυτό λογισμικό επιλέχθηκε η στατική υπερωθητική ανάλυση (static pushover analysis) και η στατική ανάλυση χρονοϊστορίας (static time-history analysis) ούτως ώστε, αφενός μεν να γίνει σωστή προσομοίωση των πειραματικών δεδομένων αφετέρου δε να ληφθεί προσπάθεια για την επαλήθευση των δεδομένων αυτών μέσω του λογισμικού.

Η όλη εργασία απαρτίζεται από τέσσερα κεφάλαια και βιβλιογραφία το περιεχόμενο των οποίων παρουσιάζεται συνοπτικά ακολούθως.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της παρούσας εργασίας καθώς και μια σύντομη περιγραφή του χρησιμοποιούμενου λογισμικού. Αναλυτικότερα, περιγράφεται η στατική υπερωθητική ανάλυση και η στατική ανάλυση χρονοϊστορίας, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα καθώς και τα μειονεκτήματα τους και γίνεται μια σύντομη σύγκριση τους. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το περιβάλλον του λογισμικού, η χρήση του καθώς και οι δυνατότητές του. Τέλος, υποδεικνύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του με βάση την χρήση του για την παρούσα εργασία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη αναφορά στα πειράματα στα οποία βασίστηκε η εργασία. Πιο συγκεκριμένα, τα πειραματικά δεδομένα καθώς και τα αποτελέσματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως βασικός άξονας, είναι αποτέλεσμα πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του Ερευνητικού Προγράμματος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του ΠΘ, με τίτλο «Θεωρητική - Παραμετρική Διερεύνηση και Βελτιστοποίηση της Σεισμικής Ενίσχυσης Συμβατικών Κτιριακών Κατασκευών με Φέροντα Οργανισμό από Οπλισμένο Σκυρόδεμα με Πυλωτή μέσω μη έκκεντρων Χαλύβδινων Χιαστών Συνδέσμων Δυσκαμψίας».

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η προσομοίωση του πλαισίου με την βοήθεια του προγράμματος SeismoStruct, παρουσιάζονται οι

παραδοχές που έγιναν, οι φορτίσεις που χρησιμοποιήθηκαν και τέλος δίνονται γραφικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων που έγιναν. Γίνεται επίσης σύγκριση των αναλύσεων που χρησιμοποιήθηκαν.

Στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο σχολιάζονται τα συμπεράσματα όσο αναφορά το λογισμικό που προκύπτουν από την χρήση του καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

1.1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

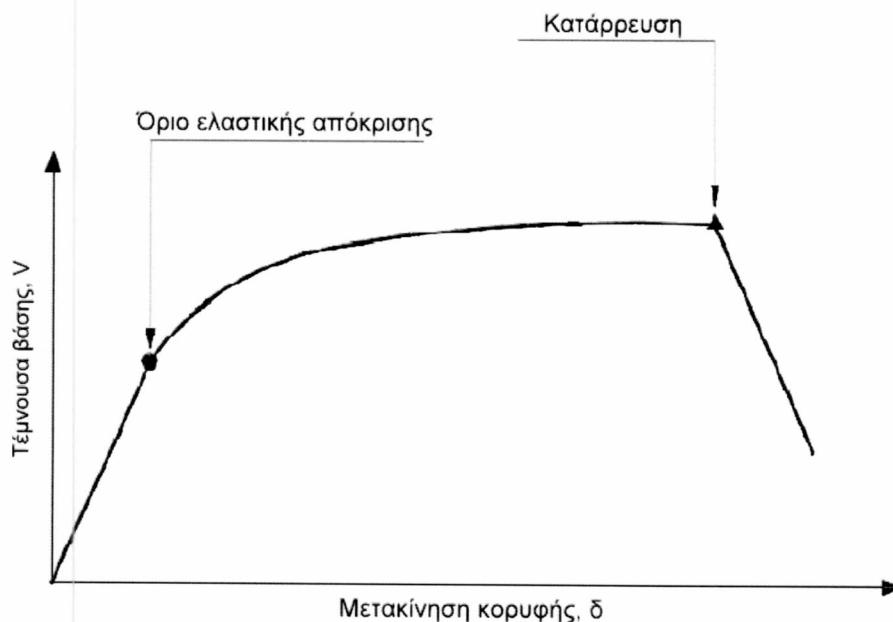
Το αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η διερεύνηση και προσομοίωση της συμπεριφοράς πλαισίων από οπλισμένο σκυρόδεμα ενισχυμένων ή μη από X-συνδέσμους δίνοντας έμφαση στον τρόπο αποτίμησης της σεισμικής συμπεριφοράς τους με βάση πειραματικά αποτελέσματα σε απλά πλαίσια υπό κλίμακα. Επιλέχθηκαν δυο τρόποι για την καλύτερη δυνατή προσομοίωση τους, η στατική υπερωθητική ανάλυση (static pushover analysis) και η στατική ανάλυση χρονοϊστορίας (static time-history analysis). Και οι δυο αποτελούν μεθόδους υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας υφιστάμενων κατασκευών και τον έλεγχο των παραδοχών που έγιναν κατά τον σχεδιασμό τους. Μπορεί όμως να αποτελέσουν και μεθόδους ανάλυσης πάνω στις οποίες θα βασιστεί ένας αλγόριθμος αυτόματου σχεδιασμού με ταυτόχρονη ικανοποίηση των κριτηρίων αντοχής και λειτουργικότητας που ορίζουν οι κανονισμοί. Στη συνέχεια παρατίθεται μια σύντομη περιγραφή τους.

1.1.1. ΣΤΑΤΙΚΗ ΥΠΕΡΩΘΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (STATIC PUSHOVER ANALYSIS)

Γενικά, στη στατική υπερωθητική ανάλυση το αποτέλεσμα της σεισμικής δράσης προσομοιώνεται με στατικά επιβαλλόμενες μετατοπίσεις ή στατικά φορτία αυξανόμενα μέχρι την επίτευξη κάποιου ορίου, συνήθως κατάρρευσης. Η συνήθης μορφή αστοχίας είναι η αστοχία σε κάμψη μίας κρίσιμης διατομής (ο ικανοτικός σχεδιασμός που επιβάλλουν οι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί εξασφαλίζει η καμπτική αστοχία να προηγείται πάντοτε της διατμητικής) ή η μετατροπή του φορέα σε μηχανισμό, τοπικά ή συνολικά.

Βασίζεται στην παραδοχή ότι η απόκριση ενός πολυβάθμιου συστήματος που αποτελεί προσομοίωμα μιας πραγματικής κατασκευής, μπορεί να συσχετιστεί με την απόκριση ενός ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος με κατάλληλες ιδιότητες. Αυτό σημαίνει ότι η απόκριση του πολυβάθμιου συστήματος προσδιορίζεται ή ελέγχεται από μια και μόνο «ιδιομορφή» δηλαδή το διάνυσμα μετακινήσεων των βαθμών ελευθερίας είναι ανάλογο με ένα διάνυσμα το οποίο μένει

αμετάβλητο κατά την διάρκεια της σεισμικής διέγερσης. Αρχικά, το προσομοίωμα υποβάλλεται σε σταδιακά αυξανόμενη στατική φόρτιση με αμετάβλητη καθ' ύψος κατανομή και χαράσσεται το διάγραμμα τέμνουσας βάσης V (δηλαδή της συνισταμένης των φορτίων που δρουν κατά την διεύθυνση της σεισμικής διέγερσης) - μετακίνηση κορυφής δ (υπερωθητική καμπύλη ή καμπύλη ικανότητας ή αντίστασης) (Σχήμα 1.1.). Η καμπύλη ικανότητας εξιδανικεύεται σε ένα διγραμμικό διάγραμμα, από το οποίο προσδιορίζονται οι θεμελιώδεις ιδιότητες του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος. Λαμβάνοντας υπόψη επιπλέον παραδοχές, η μέγιστη μετακίνηση που επιβάλει ο σεισμός σχεδιασμού, η οποία αποκαλείται μετακίνηση-στόχος ή στοχευόμενη μετακίνηση, προκύπτει ως συνάρτηση της μέγιστης μετακίνησης του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος. Τα υπόλοιπα μεγέθη απόκρισης που χρειάζονται, προκύπτουν με εκ νέου διεξαγωγή υπερωθητικής ανάλυσης μέχρι να εξισωθεί η μετακίνηση κορυφής του προσομοιώματος με την ήδη υπολογισμένη στοχευόμενη μετακίνηση.



Σχήμα 1.1. Υπερωθητική καμπύλη ή καμπύλη ικανότητας ή αντίστασης.

Ανάλογα με την προσομοίωση των οριζόντιων φορτίων η στατική υπερωθητική ανάλυση (ΣΥΑ) διακρίνεται στις παρακάτω κατηγορίες.

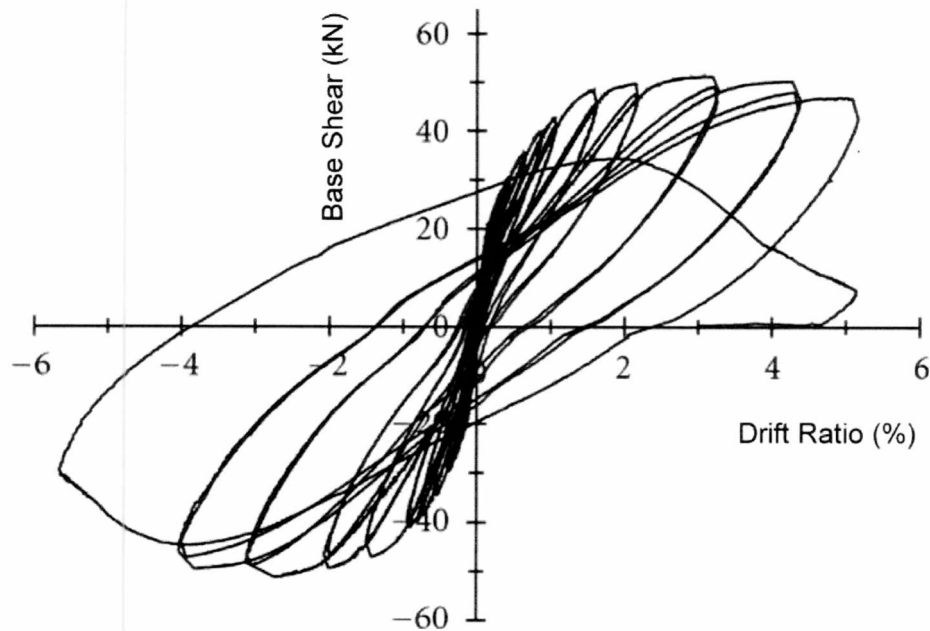
- i. (ΣΥΑ) με φορτία γραμμικής κατανομής σταθερής αναλογίας,

- ii. (ΣΥΑ) με φορτία ιδιομορφικής κατανομής σταθερής αναλογίας,
- iii. (ΣΥΑ) με φορτία ιδιομορφικής κατανομής μεταβαλλόμενης αναλογίας,
- iv. (ΣΥΑ) με φορτία πολύ-ιδιομορφικής κατανομής σταθερής ή μεταβαλλόμενης αναλογίας.

Η ΣΥΑ (ή μη γραμμική στατική μέθοδος) είναι ένα εύχρηστο εργαλείο για την καθημερινή πράξη με εφαρμογή σε αποδεκτά χρονικά πλαίσια. Παρόλα αυτά, στερείται όπως έχει επισημανθεί θεωρητικής τεκμηρίωσης, καθώς στηρίζεται σε μεγάλο όγκο αυθαίρετων παραδοχών και παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα μόνο για επίπεδα συστήματα μέσου και χαμηλού ύψους. Οι κυριότεροι λόγοι στους οποίους οφείλονται οι ανακρίβειες στα αποτελέσματα της ΣΥΑ είναι η αγνόηση της μεταβολής των ταλαντωτικών ιδιοτήτων της κατασκευής με την προοδευτική πλαστικοποίηση διατομών της. Σε μια προσπάθεια να εξαλειφθούν οι παραπάνω αδυναμίες προτάθηκαν κατά καιρούς διάφορες παραλλαγές της ΣΥΑ, οι οποίες επικράτησε να ονομάζονται «προηγμένες» μέθοδοι ενώ οι αρχικές παραλλαγές αποκαλούνται συνήθως «συμβατικές».

1.1.2. ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑΣ (STATIC TIME-HISTORY ANALYSIS)

Στη δυναμική ανελαστική ανάλυση χρησιμοποιείται ένα προσομοίωμα του φορέα το οποίο ενσωματώνει ανελαστικούς νόμους φορτίου-παραμόρφωσης για τα επιμέρους δομικά στοιχεία του κτιρίου. Στον φορέα εφαρμόζεται σεισμική φόρτιση με την μορφή επιταχυνσιογραφημάτων εδαφικών κινήσεων, από όπου υπολογίζεται μέσω επαναληπτικής διαδικασίας η απόκριση του φορέα (Σχήμα 1.2.). Τα αποτελέσματα της μεθόδου θα πρέπει να ελέγχονται σε κάθε περίπτωση και αν κρίνεται απαραίτητο να μειώνεται το χρονικό βήμα της ολοκλήρωσης. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατό να μειωθούν κάποιοι παράγοντες, όπως για παράδειγμα η απότομη μείωση της δυσκαμψίας από ένα βήμα στο επόμενο, που επηρεάζουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 1.2. Ενδεικτικό επιταχυνσιογραφήματων εδαφικών κινήσεων.

Η μη γραμμική υπερωθητική ανάλυση, όπως προαναφέρθηκε, προϋποθέτει καθορισμό ενός πλευρικού προφίλ φορτίσεων και προσδιορισμό της στοχευόμενης μετατόπισης για τον έλεγχο του φορέα. Αντίθετα, η δυναμική ανελαστική ανάλυση χρονοϊστορίας εξαρτάται από δύο παράγοντες. Πρώτον την εξιδανίκευση του φορέα, δηλαδή των προσομοιωμάτων για την αναπαράσταση της μη γραμμικής συμπεριφοράς του, και δεύτερον της επιλογής του επιταχυνσιογραφήματος που θα χρησιμοποιηθεί. Το τελευταίο απαιτεί την καλή γνώση της αναμενόμενης σεισμικής κίνησης στο σημείο στο οποίο εδράζεται η κατασκευή, κάτι το οποίο είναι δύσκολο να συμβεί.

Τα υπολογιζόμενα εντατικά μεγέθη του φορέα αποτελούν ορθολογικές προσεγγίσεις των αναμενόμενων κατά τη διάρκεια του σεισμού, επειδή το μοντέλο προσομοίωσης και η μεθοδολογία προσεγγίζουν με μεγάλη αμεσότητα την ανελαστική απόκριση του φορέα κατά τη διάρκεια του σεισμικού φαινομένου. Για τους παραπάνω λόγους, η ανελαστική δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας μπορεί να εφαρμοστεί χωρίς περιορισμούς σε οποιονδήποτε φορέα ή έδαφος θεμελίωσης. Παρόλα αυτά η απόκριση της κατασκευής ενδέχεται να είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στα χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων επιταχυνσιογραφήματων που χρησιμοποιούνται, συνεπώς η ανάλυση χρονοϊστορίας πρέπει να επαναλαμβάνεται για περισσότερες από

μία εδαφικές διεγέρσεις. Για τους παραπάνω λόγους τα χρησιμοποιούμενα επιταχυνσιογραφήματα είναι κατάλληλα επιλεγμένες φυσικές καταγραφές ή τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα συμβατά με κάποιο φάσμα σχεδιασμού, για την κατασκευή των οποίων ελήφθησαν όλες οι πιθανές αβεβαιότητες όσον αφορά τη σεισμική κίνηση. Τα τεχνητά αυτά επιταχυνσιογραφήματα διακρίνονται σε πλήρως τεχνητά και σε ήμιτεχνητα τα οποία θυμίζουν περισσότερο τις φυσικές καταγραφές.

Ενώ η ανελαστική δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας είναι η ακριβέστερη μέθοδος ανάλυσης, χρησιμοποιείται σε περιορισμένο βαθμό στο σχεδιασμό των κατασκευών, λόγω του μεγάλου υπολογιστικού κόστους, της ανάγκης προσεκτικής επιλογής επιταχυνσιογραφημάτων και της δυσκολίας στην επεξεργασία του μεγάλου όγκου των εξαγόμενων αποτελεσμάτων. Η ανελαστική δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας χρησιμοποιείται κυρίως για ερευνητικούς σκοπούς ως σημείο αναφοράς και εργαλείο αξιολόγησης της ακρίβειας των αποτελεσμάτων των υπόλοιπων μεθόδων ανάλυσης και κυρίως της ανελαστικής στατικής μεθόδου.

1.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ SeismoStruct

Γενικά, το συγκεκριμένο λογισμικό είναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ικανό να προβλέψει την συμπεριφορά μεγάλων μετατοπίσεων πλαισίων στο χώρο υπό στατική ή δυναμική φόρτιση, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις γεωμετρικές μη γραμμικότητες όσο και την ανελαστικότητα των υλικών. Είναι διαθέσιμη μια μεγάλη γκάμα μοντέλων υλικών καθώς και διάφορα 3D στοιχεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια ευρεία ποικιλία προκαθορισμένου σκυροδέματος και χάλυβα και την διαμόρφωση κατασκευών.

Στην ουσία το πρόγραμμα λειτουργεί σε τρία στάδια, την προεργασία (Pre-Processor) όπου προσδιορίζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιούμε στο κατασκευαστικό μοντέλο, την επεξεργασία (Processor) όπου διεκπεραιώνεται η ανάλυση και τα αποτελέσματα (Post-Processor).

1.2.1. ΠΡΟΕΡΓΑΣΙΑ (Pre-Processor)

Σε αυτό το στάδιο της ανάλυσης, δίνονται τα δεδομένα στο πρόγραμμα και όπως παρατηρείται από το παρακάτω Σχήμα, το περιβάλλον του ενδείκνυται για την διαδικασία αυτή (Σχήμα 1.3.). Στο πάνω τμήμα βρίσκεται η



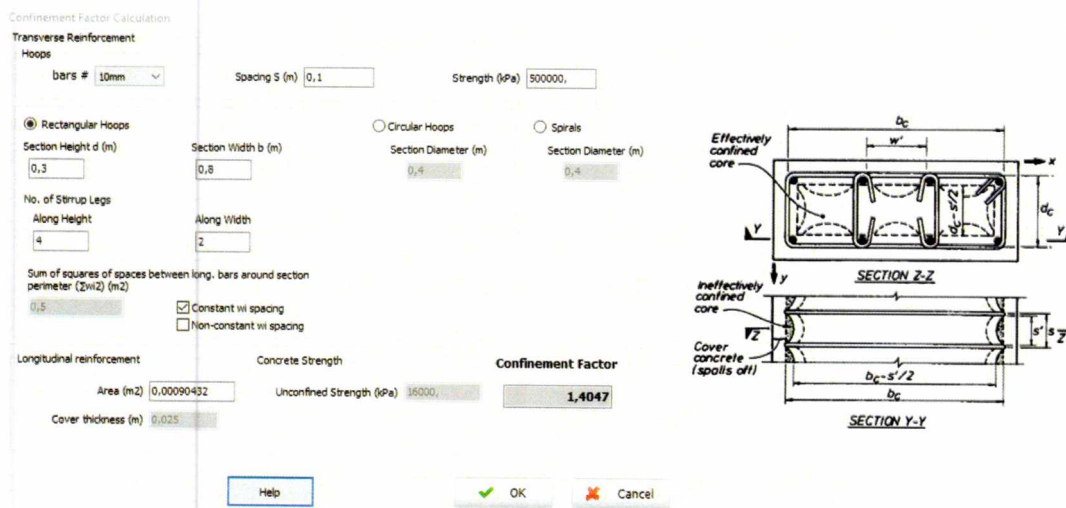
Σχήμα 1.3. Αρχική σελίδα στο λογισμικό SeismoStruct.

γραμμή εντολών καθώς και η γραμμή εργαλείων η οποία αποτελείται από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες εντολές.

Αρχικά ο χρήστης καλείται να επιλέξει τρόπο ανάλυσης. Προς το παρόν είναι διαθέσιμες επτά επιλογές:

- i. ανάλυση ιδιοτιμών
- ii. στατική ανάλυση (μη μεταβλητό φορτίο)
- iii. στατική υπερωθητική ανάλυση
- iv. στατική προσαρμοστική υπερωθητική ανάλυση
- v. στατική ανάλυση χρονοϊστορίας
- vi. δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας
- vii. σταδιακή δυναμική ανάλυση.

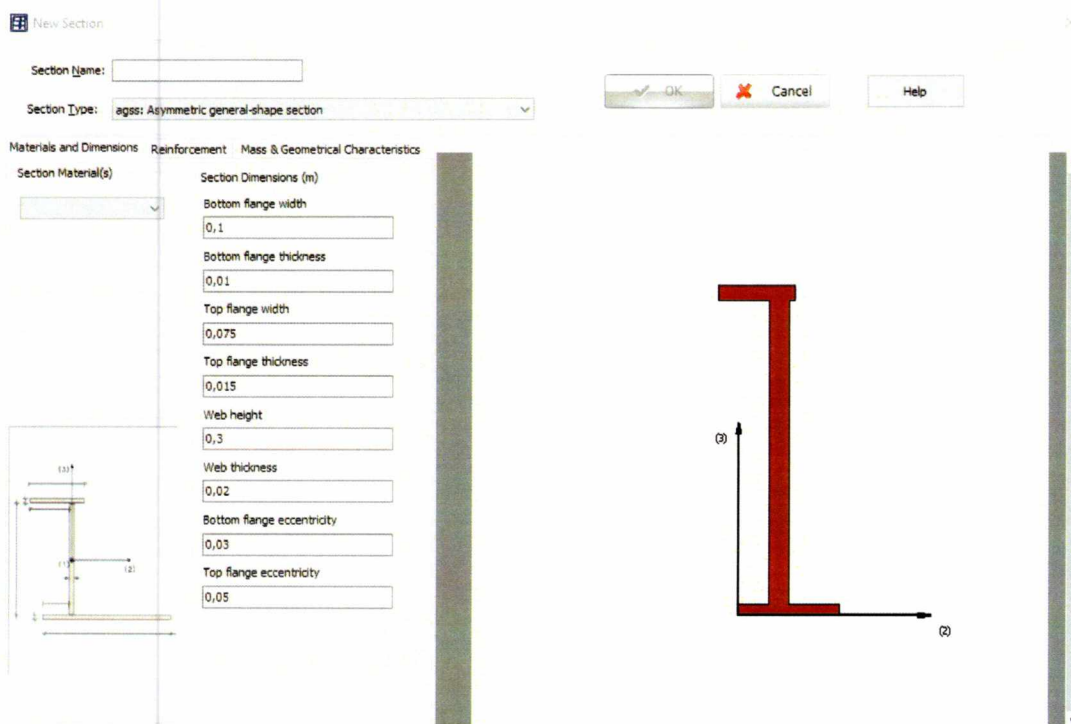
Στην εντολή Materials ο χρήστης έχει την δυνατότητα να προσδιορίσει τα υλικά που θα χρησιμοποιήσει και να δώσει τις δικές του τιμές αν χρειάζεται σε κάποιες ιδιότητες (αντοχή σκυροδέματος, τάση διαρροής οπλισμού κ.ά.). Το πρόγραμμα διαθέτει 13 τύπους υλικών. Σε αυτή επίσης προσδιορίζονται οι συνδετήρες του σκυροδέματος και οι ιδιότητές τους. Παρατηρείται και στην παρακάτω εικόνα πως οι επιλογές είναι περιορισμένες (Σχήμα 1.4.).



Σχήμα 1.4. Ενδεικτικό φύλλο προσδιορισμού συνδετήρων σκυροδέματος.

Στην εντολή Sections προσδιορίζεται η γεωμετρία του κάθε στοιχείου που θα χρειαστούμε με βάση τα υλικά που δημιουργήθηκαν στην προηγούμενη εντολή. Είναι διαθέσιμοι 21 τύποι υλικών, από απλό ενός υλικού συμπαγούς διατομής μέχρι πιο περίπλοκα οπλισμένα σκυροδέματα και σύνθετα

τιμήματα. Είναι φυσικό όμως να υπάρχουν κάποιες ελλείψεις όπως για παράδειγμα στις διατομές των μεταλλικών στοιχείων. Σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει η επιλογή «μη συμμετρική διατομή γενικού σχήματος» (Σχήμα 1.5.).



Σχήμα 1.5. Ενδεικτικό φύλλο προσδιορισμού γεωμετρίας διατομής.

Στην εντολή Element Classes προσδιορίζεται η κατηγορία των στοιχείων. Διαθέσιμοι είναι 10 τύποι, οι οποίοι χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα αν είναι τύπος «δοκός-υποστύλωμα», τύπος «στοιχείο σύνδεσης» ή «στοιχείο μάζας». Ενδεικτικά, υπάρχουν ανελαστικά πλαισιωτά στοιχεία, ελαστικά πλαισιωτά στοιχεία και στοιχεία μάζας.

Στην συνέχεια δηλώνεται η γεωμετρία της κατασκευής με τις εντολές Nodes, Element Connectivity, Constraints και Restraints, όπου προσδιορίζονται οι συντεταγμένες στο χώρο κάθε σύνδεσης των στοιχείων, οι συνδέσεις των στοιχείων που ορίστηκαν σε προηγούμενη εντολή και ο προσανατολισμός τους, οι διάφορες περιοριστικές συνθήκες της κατασκευής και οι βαθμοί ελευθερίας των κόμβων αντίστοιχα.

Στο SeismoStruct η εντολή Load περιλαμβάνει όχι μόνο τα φορτία της κατασκευής αλλά και πιθανές μετατοπίσεις ή επιταχύνσεις που μπορεί να

επιβληθούν. Υπάρχουν τέσσερις τύποι φόρτισης, ανάλογα τον τύπο ανάλυσης που θα χρησιμοποιηθεί. Είναι

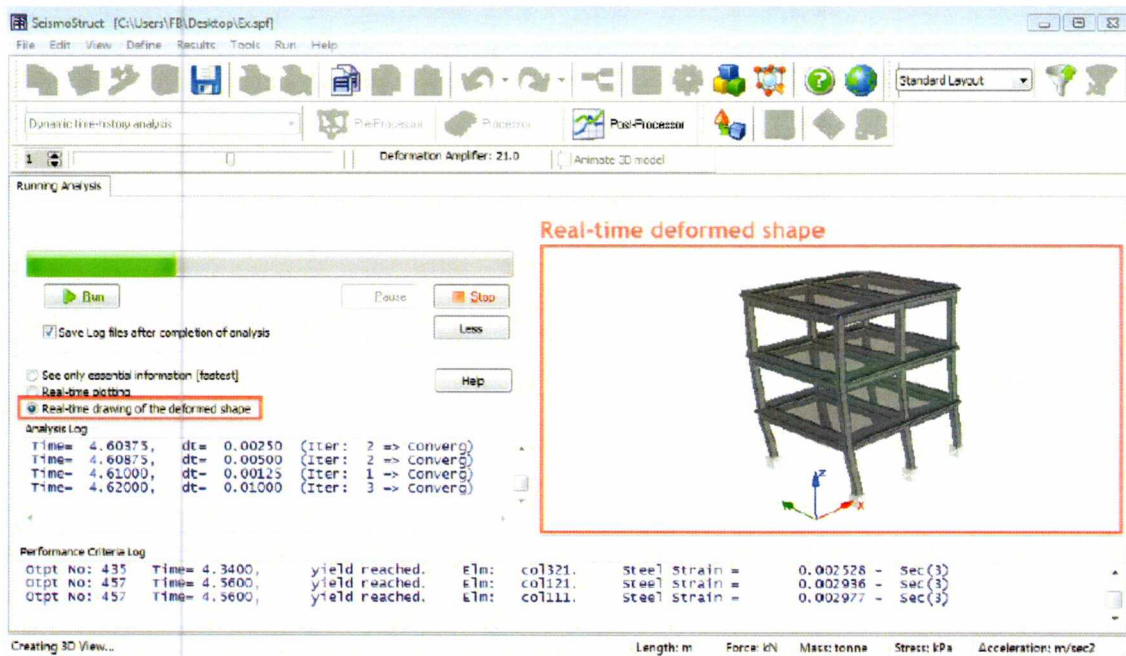
- i. τα μόνιμα φορτία
- ii. τα στοιχειώδες φορτία
- iii. τα στατικά χρονοϊστορίας φορτία
- iv. τα δυναμικά χρονοϊστορίας φορτία.

Είναι σημαντικό ο χρήστης να μπορεί να προσδιορίσει τα διαφορετικά οριακά στάδια στα οποία βρίσκεται η ανάλυση κάθε στιγμή. Αυτό γίνεται με την εντολή Performance Criteria όπου δίνεται κάποια τιμή στην αντοχή του υλικού, στην καμπυλότητα, στην περιστροφή ή/και στην κατάρρευση του στοιχείου και καταγράφεται απ το πρόγραμμα. Γενικά προσδιορίζεται ο τρόπος εκτέλεσης της ανάλυσης.

Τέλος, στην Analysis Output, ο χρήστης έχει την δυνατότητα να προσδιορίσει τα αποτελέσματα που θέλει να πάρει από το πρόγραμμα καθώς και να τα περιορίσει έτσι ώστε να μειωθεί και ο χρόνος εκτέλεσης του.

1.2.2. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ (Processor)

Στο στάδιο αυτό, ο χρήστης «τρέχει» την ανάλυση. Δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να μπορεί να σταματήσει προσωρινά την ανάλυση είτε για να κάνει κάποια άλλη εργασία είτε να ελέγξει τα αποτελέσματα για να κρίνει αν αξίζει να συνεχίσει. Επίσης, παρουσιάζονται πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο καθώς και η παραμόρφωση της κατασκευής, γεγονός που βοηθάει να υπάρχει μια εποπτεία στην ανάλυση (Σχήμα 1.6.).



Σχήμα 1.6. Ενδεικτικό φύλλο παρουσίασης παραμορφωμένης κατασκευής σε πραγματικό χρόνο.

1.2.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ (Post-Processor)

Τέλος παρατίθενται τα αποτελέσματα της ανάλυσης γραφικά ή αριθμητικά, τμηματικά ή στο σύνολο της κατασκευής, σε μορφή που μπορεί να αντιγραφεί έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί και σε άλλα αρχεία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο: ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΤΑ ΟΠΟΙΑ ΒΑΣΙΣΤΗΚΕ Η ΟΛΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

2.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Όπως προαναφέρθηκε στην Εισαγωγή, τέσσερα από τα πειράματα, στα αποτελέσματα και τα γενικά στοιχεία των οποίων στηρίχθηκε η παρούσα Εργασία, πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του Ερευνητικού Προγράμματος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του ΠΘ, με τίτλο «Θεωρητική - Παραμετρική Διερεύνηση και Βελτιστοποίηση της Σεισμικής Ενίσχυσης Συμβατικών Κτιριακών Κατασκευών με Φέροντα Οργανισμό από Οπλισμένο Σκυρόδεμα με Πυλωτή μέσω μη έκκεντρων Χαλύβδινων Χιαστών Συνδέσμων Δυσκαμψίας» με φορέα χρηματοδότησης τον Οργανισμό Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ). Το πλήρες κείμενο της Τελικής Έκθεσης Προόδου βρίσκεται στον παρακάτω υπερσύνδεσμο:

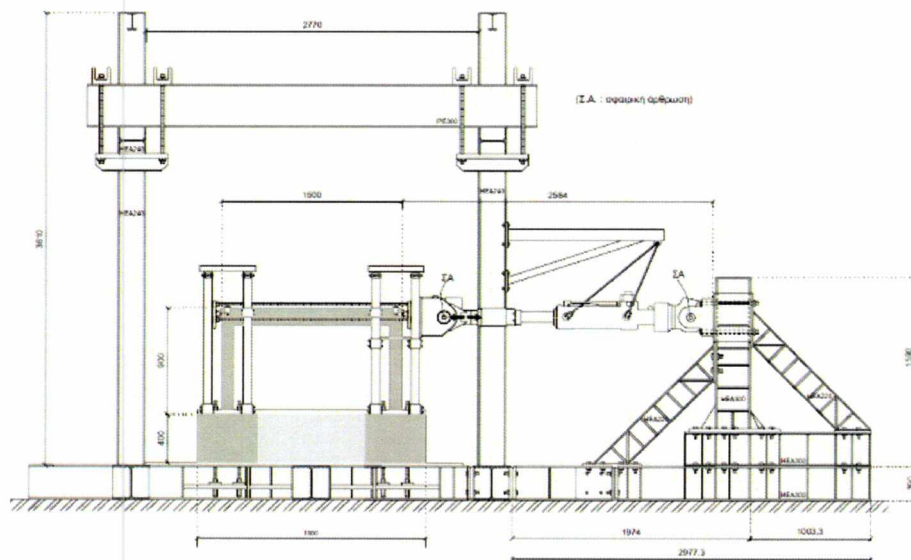
http://www.oasp.gr/assigned_program/2410

Η Θεωρητική – Παραμετρική διερεύνηση στο Πρόγραμμα αυτό πραγματοποιήθηκε με βάση το λογισμικό RUAUMOKO, το οποίο είναι ευρέως διαδεδομένο και αξιόπιστο, πλην όμως αρκετά δύσχρηστο, καθόσον απαιτεί ιδιαίτερες γνώσεις Fortran και πολύ μεγάλη εμβάθυνση για την αποτελεσματική του εφαρμογή. Τα αποτελέσματα της διερεύνησης αυτής ήταν συνοπτικά τα ακόλουθα:

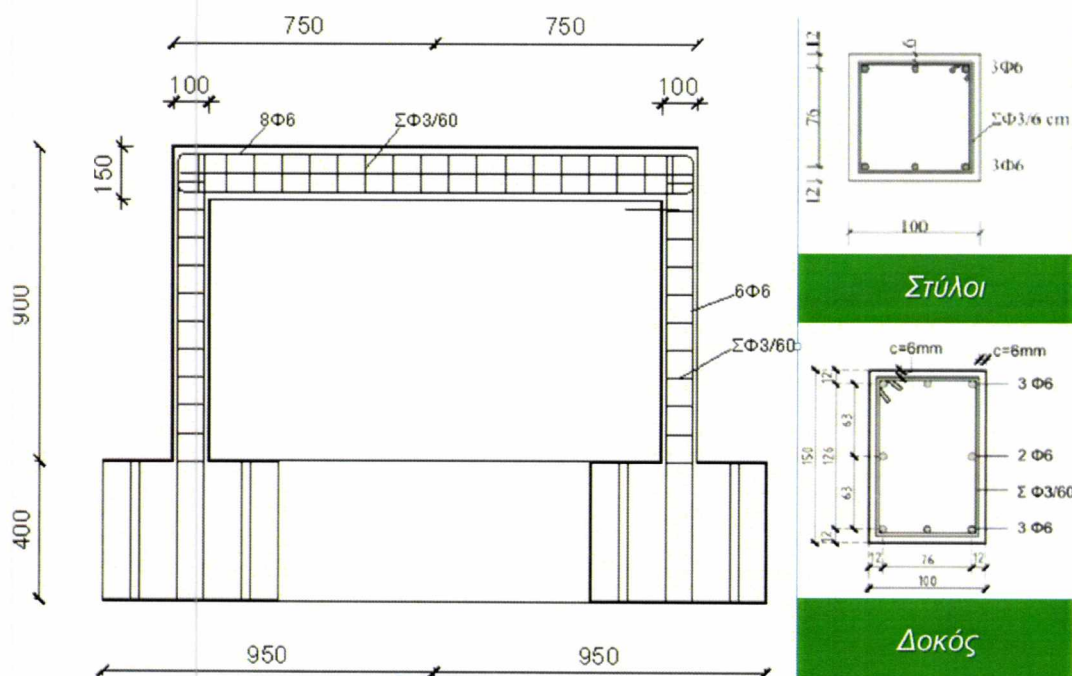
- Η αντοχή του συστήματος των Χ-συνδέσμων να μην υπερβαίνει το πενταπλάσιο της καμπτικής αντοχής του απλού (γυμνού) πλαισίου από οπλισμένο σκυρόδεμα.
- Η δυσκαμψία του συστήματος των Χ-συνδέσμων να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με αυτή της τοιχοπλήρωσης, αν αυτή υπήρχε στο φάτνωμα του πλαισίου.
- Οι συνδέσεις των Χ-συνδέσμων μέσω κομβοελασμάτων τόσο στους κόμβους δοκών – στύλων του πλαισίου όσο και στις βάσεις των στύλων του να είναι εύκολα εφαρμόσιμες σε υφιστάμενα πλαίσια με πυλωτή.

Για την επιβεβαίωση των παραπάνω θεωρητικών ευρημάτων, και λόγω της αδυναμίας στο ΠΘ πραγματοποίησης πειραμάτων πραγματικής κλίμακας, έλαβαν χώραν τέσσερες δοκιμές. Η πρώτη αφορούσε ένα υπό κλίμακα πλαίσιο από

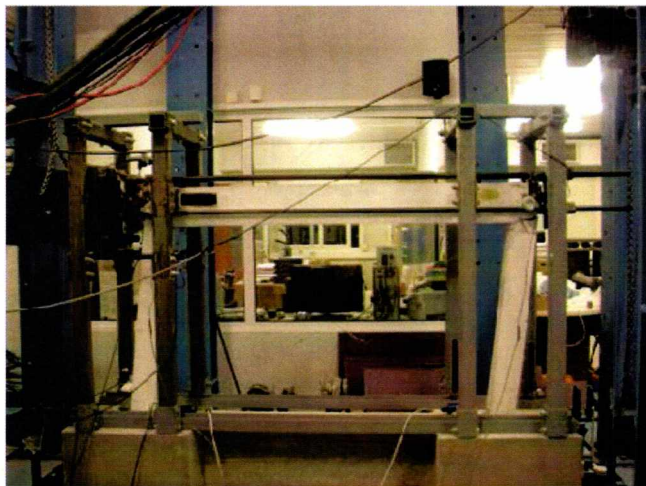
οπλισμένο σκυρόδεμα, το οποίο φορτίστηκε μέχρι εξάντλησης της αντοχής του με σταδιακά αυξανόμενη πλευρική μετατόπιση του πάνω αριστερά κόμβου (στατική μονοτονική πλευρική φόρτιση), σύμφωνα με τα Σχήματα 2.1 (πειραματική διάταξη) και 2.2 (διαστάσεις και λεπτομέρειες), ενώ η τελική κατάσταση του δοκιμίου παρατίθεται στη φωτογραφία του Σχήματος 2.3.



Σχήμα 2.1. Γραφική αναπαράσταση πειραματικής διάταξης.

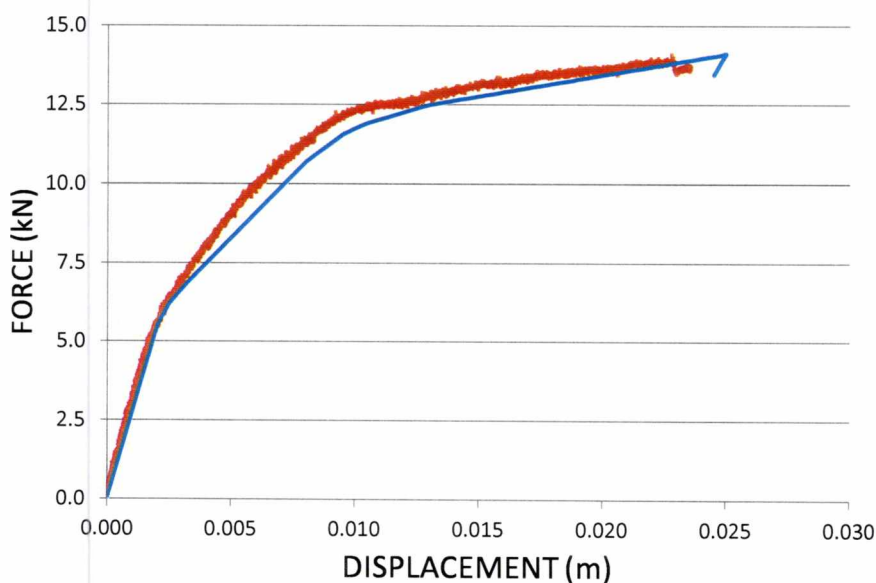


Σχήμα 2.2. Δοκίμιο απλού («γυμνού») πλαισίου.



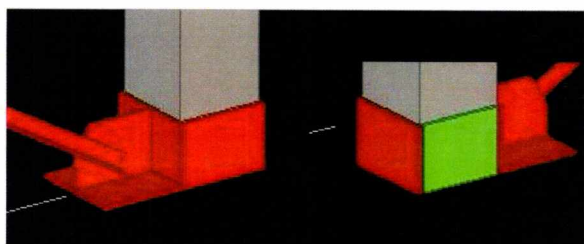
Σχήμα 2.3. Φωτογραφία του πλαισίου μετά το πέρας της δοκιμής.

Διαπιστώθηκε τελικά ότι οι πρώτες ρηγματώσεις έλαβαν χώραν για πλευρικό φορτίο περίπου ίσο με 6 kN, ενώ το πλαίσιο εξάντλησε τη μέγιστη αντοχή του στα 14 kN, που εμφανίστηκε για μετατόπιση 24 mm κατά τον 1^ο κύκλο φόρτισης. Στη συνέχεια βαθμονομήθηκαν τα αποτελέσματα της στατικής υπερωθητικής ανάλυσης στο RUAUMOKO και διαπιστώθηκε εξαιρετική σύμπτωση, σύμφωνα με το Σχήμα 2.4, που ακολουθεί.

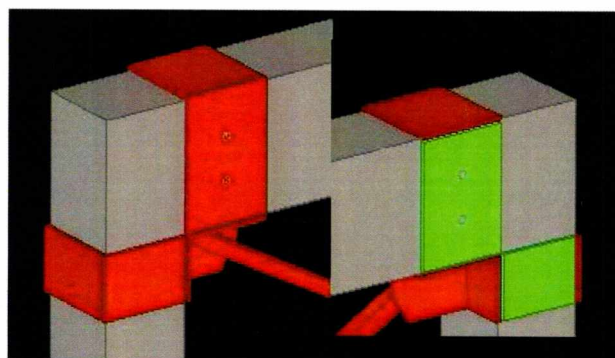


Σχήμα 2.4. Σύγκριση μεταξύ πειραματικής απόκρισης μοντέλου υπό κλίμακα για από πλαίσιο ΟΣ και αναλυτικής πρόβλεψης για πλευρική μονοτονική φόρτιση

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν τρία (3) πειράματα, με εφαρμογή μη έκκεντρων χαλύβδινων X-συνδέσμων στο παραπάνω πλαίσιο και ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Ιδιάζουσα σημασία για το σχεδιασμό είχε ο τρόπος υλοποίησης των συνδέσεων με κομβοελάσματα των X-συνδέσμων στις τέσσερις γωνίες του απλού πλαισίου. Λόγω των δυσκολιών σύνδεσης των κομβοελασμάτων στις βάσεις των στύλων με τη θεμελίωση (μεμονωμένα πέδιλα, πεδιλοδοκοί ή κοιτόστρωση) αποφασίστηκε τα εν λόγω κομβοελάσματα να μην συνδεθούν με τη θεμελίωση κατά την οριζόντια διεύθυνση. Πιο συγκεκριμένα, η σύνδεση με τη βάση του στύλου υλοποιήθηκε μέσω μεταλλικού κολάρου από συγκολλημένα γύρω-γύρω μεταλλικά ελάσματα. Το κολάρο αυτό δεν αγκυρώθηκε στο στύλο αλλά αφέθηκε ελεύθερη η προς τα πάνω ολίσθηση του κατά μήκος του στύλου. Προς τα κάτω τούτο απεφεύχθη μέσω ελάσματος βάσης συγκολλημένου στο κομβοέλασμα, το οποίο βρίσκεται σε επαφή με το οριζόντιο επίπεδο στη βάση του στύλου (επιφάνεια έδρασης). Τρισδιάστατες γραφικές αναπαραστάσεις των κόμβων αυτών φαίνονται στα Σχήματα 2.5 και 2.6.



Σχήμα 2.5. Τρισδιάστατη απεικόνιση σύνδεσης X-συνδέσμων με τη βάση των στύλων



Σχήμα 2.6. Τρισδιάστατη απεικόνιση σύνδεσης X-συνδέσμων με τον κόμβο δοκού-στύλου του πλαισίου

Η όλη σύνδεση των χιαστών στους κόμβους κορυφής σχεδιάστηκε κατά τέτοιον τρόπο ώστε να εμποδίζεται η ολίσθηση τόσο κατακόρυφα (για το κολάρο του στύλου) όσο και οριζόντια (για το κολάρο της δοκού). Επιπρόσθετα δε, μεγάλο πλεονέκτημα των συγκεκριμένων συνδέσεων των Χ-συνδέσμων με το πλαίσιο από ΟΣ είναι το ότι σε πραγματικές υφιστάμενες κατασκευές τα κόλλαρα στη βάση και την κορυφή των στύλων μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν, καθόσον οι στύλοι στο επίπεδο της πυλωτής είναι περιμετρικά ελεύθερες. Η όλη διάταξη συνδέσεων επιτρέπει περιορισμένη στροφή και άνω/κάτω κίνηση των κολάρων στις βάσεις των στύλων μόνο όταν οι διαγώνιοι σύνδεσμοι, που συνδέονται με τα κολάρα αυτά, εφελκύνονται. Επίσης, αυτή η περιορισμένη ευκαμψία προσδίδει στο σύστημα μια προφανή επιπρόσθετη πλαστιμότητα.

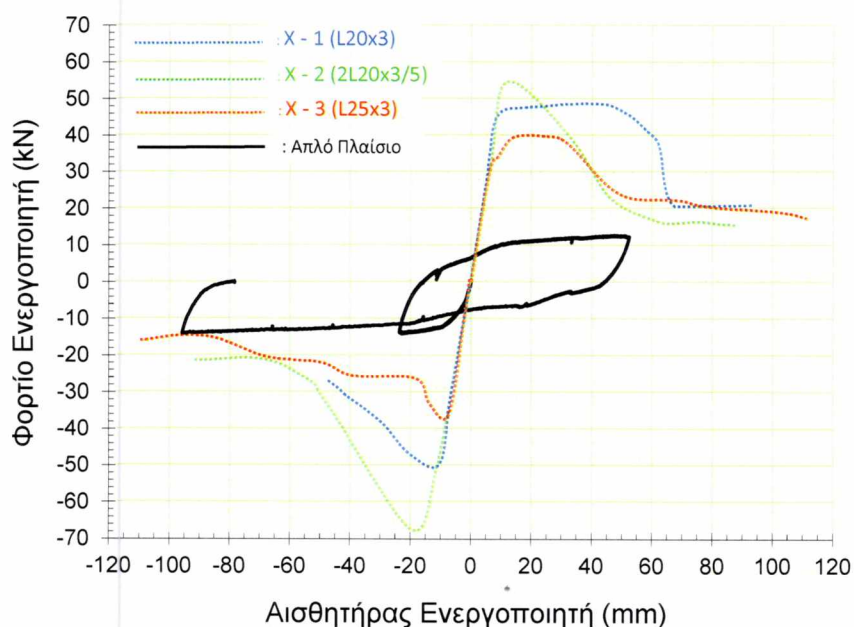
Με βάση αυτές τις γενικές απαιτήσεις έγινε σχεδιασμός τριών συστημάτων Χ-συνδέσμων. Το πρώτο σύστημα διέθετε διαγώνια μέλη διατομής απλού ισοσκελούς γωνιακού L20x3, συγκολλητά με τέσσερα κομβοελάσματα στις γωνίες και με ένα κεντρικό κομβοέλασμα στο μέσο. Οι ραφές σχεδιάστηκαν με αντοχή μεγαλύτερη της εφελκυστικής αντοχής εκάστου διαγώνιου μέλους. Το σύστημα τελικά διέθετε 2.6 φορές μεγαλύτερη αντοχή και 3.6 φορές μεγαλύτερη δυσκαμψία από τις αντίστοιχες τιμές του απλού (γυμνού) πλαισίου, όπως αυτές μετρήθηκαν από τα πειραματικά αποτελέσματα.

Τα δεύτερο σύστημα υλοποιήθηκε μέσω μελών διατομής διπλών γωνιακών 2L20x3/5, με αποτέλεσμα πενταπλάσια αντοχή σε σχέση με αυτή του απλού πλαισίου (επίσης μετρηθείσα πειραματικά). Στα δύο πρώτα αυτά συστήματα οι πειραματικά αποκτηθείσες τιμές αντοχής ήταν σχετικά κοντά με τις τιμές που βρέθηκαν στην φάση προκαταρκτικού σχεδιασμού.

Στο τρίτο σύστημα έγινε χρήση μελών διατομής L25x3 και η αντοχή και δυσκαμψία που προέκυψε από τα πειράματα ήταν 1.9 και 3 φορές μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες του απλού πλαισίου.

Η διαμόρφωση και οι λεπτομέρειες των διατάξεων αυτών παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, ενώ τα πλήρη αποτελέσματα των πειραμάτων περιέχονται στον προαναφερθέντα υπερσύνδεσμο και δεν παρατίθενται εδώ για λόγους οικονομίας της ύλης. Συνοπτική εικόνα των δοκιμών αυτών πάντως μπορεί κανείς να αποκτήσει από το κείμενο μιας πρόσφατης δημοσίευσης [5].

Η ανελαστική συμπεριφορά των Χ-συνδέσμων (ανελαστικός λυγισμός και διαρροή λόγω εφελκυσμού) είχε σαν αποτέλεσμα την μεγάλη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας με αξιόπιστο τρόπο. Θεωρώντας ότι για το απλό χωρίς Χ-συνδέσμους πλαίσιο η μετατόπιση διαρροής είναι περίπου 5mm (ως Σχήμα 3.35), και τα τρία συστήματα Χ-συνδέσμων κατέδειξαν μεγάλη αντοχή (40, 50 και 70 kN) καθώς και μεγάλη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας για πλαστιμότητα = 4 (20mm) και μάλιστα για σχετικά μεγάλο αριθμό κύκλων συγκρινόμενα με το απλό πλαίσιο. Επίσης είναι σημαντικό να παρατηρήσει κανείς ότι όταν οι Χ-σύνδεσμοι είχαν πλήρως αστοχήσει, η αντοχή του συστήματος έπεσε σε αυτή του απλού πλαισίου (14 kN). Τα παραπάνω μπορούν να παρατηρηθούν άμεσα από τις καμπύλες περιβαλλουσών του Σχήματος 2.7.

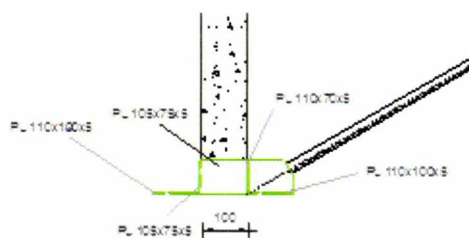
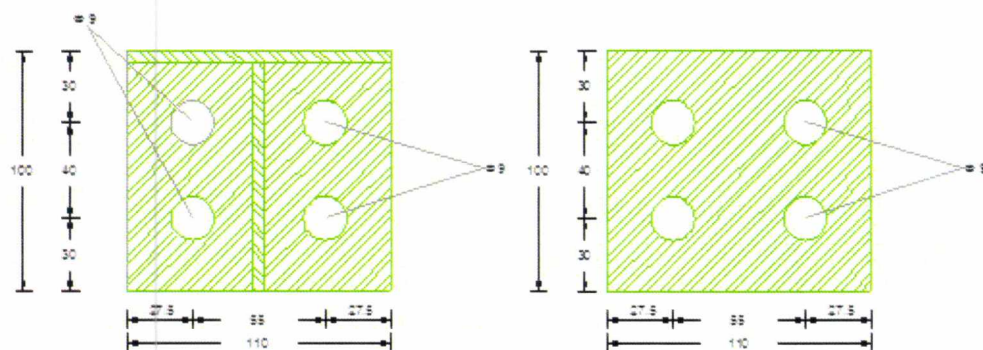


Σχήμα 2.7. Πειραματικές καμπύλες περιβαλλουσών των τριών πειραμάτων με Χ-συνδέσμους αλλά και του απλού πλαισίου

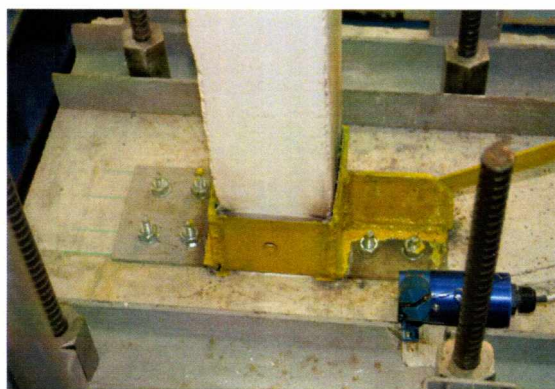
2.2. ΤΕΛΕΥΤΑΙΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΜΕ ΜΗ ΟΛΙΣΘΑΙΝΟΝΤΕΣ ΚΟΜΒΟΥΣ ΒΑΣΗΣ ΤΩΝ Χ-ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ

Το τελευταίο (5^ο) πείραμα, τα αποτελέσματα του οποίου υπήρξαν επίσης έναυσμα για την παρούσα Εργασία, αφορούσε ένα πλαίσιο με Χ-συνδέσμους L20x3, όμοιο μα το 2^ο, με τη μοναδική διαφορά ότι οι συνδέσεις βάσης των χιαστών δεν διέθεταν δυνατότητα κατακόρυφης ολίσθησης. Η συγκεκριμένη διάταξη πραγματοποιήθηκε με απαγόρευση της κατακόρυφης κίνησης των συνδέσεων αυτών,

καθόσον η όλη διαμόρφωση του κομβοελάσματος βάσης κοχλιώθηκε – αγκυρώθηκε στη πλάκα έδρασης, σύμφωνα με το Σχήμα 2.8 (α και β).



(α)



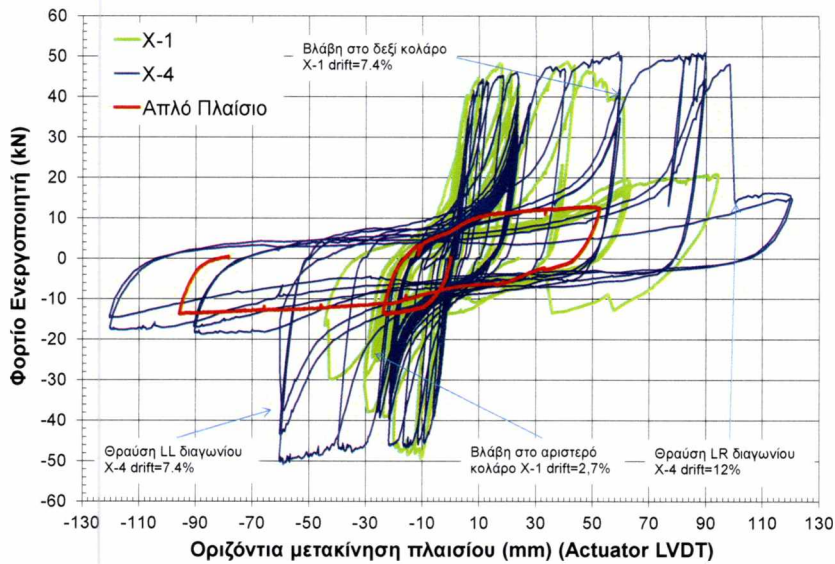
(β)

Σχήμα 2.8. Λεπτομέρεια σύνδεσης κάτω κόμβων των X-συνδέσμων με τις βάσεις των στύλων και την πλάκα έδρασης (μη δυνατότητα κατακόρυφης ολίσθησης).

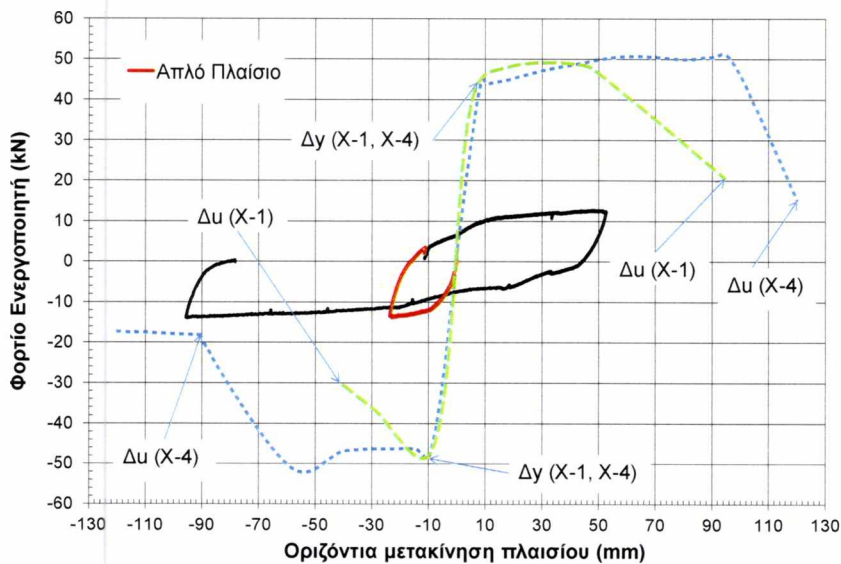
Τα αποτελέσματα του τελευταίου αυτού πειράματος απετέλεσαν μέρος της Διπλωματικής Εργασίας του συνάδελφου Γ. Βούρα, υπό την επίβλεψη του κ. Σοφιανόπουλου, τα οποία μου διατέθηκαν αυτούσια. Περισσότερες πληροφορίες

για το πλήρες περιεχόμενο της συγκεκριμένης Εργασίας μπορούν να αναζητηθούν από τη Βιβλιοθήκη του Ιδρύματος μας.

Αν το 2^ο πείραμα (1^η διάταξη X-συνδέσμων) ονομαστεί X-1 και το 5^ο (4^η διάταξη X-συνδέσμων) X-4, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η σύγκριση των σχετικών αποτελεσμάτων. Αυτή γίνεται γραφικά στα Σχήματα 2.9 και 2.10.



Σχήμα 2.9. Υστερητική καμπύλη φόρτισης – οριζόντιας μετακίνησης πλαισίου για τα δύο συστήματα X-1 και X-4.



Σχήμα 2.10. Περιβάλλουσες των αντοχών για τα δύο συστήματα (διακεκομμένη γραμμή) και καμπύλη δύναμης – μετατόπισης του απλού πλαισίου (συμπαγής γραμμή)

Όπως βλέπουμε λοιπόν τα δύο συστήματα παρουσιάζουν εμφανώς μεγαλύτερες τιμές αντοχής – πλαστιμότητας και δυσκαμψίας, σε σχέση με το απλό γυμνό πλαίσιο. Επίσης, συγκρινόμενα μεταξύ τους, τα συστήματα X-1 και X-4, προσεγγίζουν την ίδια τιμή αντοχής με μικρές διαφοροποιήσεις, και με το σύστημα X-1 να αναπτύσσει την μέγιστη αντοχή του σε μικρότερες μετακινήσεις από το σύστημα X-4. Αντίθετα, και όσον αφορά τις τιμές της πλαστιμότητας για τα δύο συστήματα X-1 και X-4, βλέπουμε χαρακτηριστικά πως υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ των δύο συστημάτων, αλλά και μεταξύ των δύο κλάδων φόρτισης του συστήματος X-1. Τούτο οφείλεται στον διαφορετικό μηχανισμό αστοχίας που αναπτύσσεται στα δύο συστήματα λόγω του διαφορετικού τρόπου σύνδεσης των κολάρων στην βάση των στύλων. Αυτή η διαφοροποίηση στον μηχανισμό αστοχίας κυριαρχεί στην συμπεριφορά των δύο συστημάτων για πλαστιμότητες μεγαλύτερες της διαρροής ($\Delta y=10mm$).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΚΑΙ ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΣ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥΣ

3.1. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΗ-ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΥΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Στο συγκεκριμένο Κεφάλαιο περιγράφεται η προσομοίωση και ανάλυση του πλαισίου με την βοήθεια του προγράμματος SeismoStruct. Το πλαίσιο μορφώθηκε - σχεδιάστηκε σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα που πρόέκυψαν από την έρευνα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και η όλη ανάλυση πραγματοποιήθηκε με δυο μεθόδους, με στατική ανάλυση χρονοϊστορίας και με στατική υπερωθητική ανάλυση.

Αρχικά, πρέπει να επισημανθεί πως για την καλύτερη προσομοίωση των πειραματικών δεδομένων καθώς και την καλύτερη δυνατή προσέγγιση των αποτελεσμάτων, μετά από δοκιμές χρειάστηκε να προσαρμοστούν κάποια από τα δεδομένα.

Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν

σκυρόδεμα αντοχής $f_{ck}=33,14\text{MPa}$

και ανηγμένη παραμόρφωση θραύσης $\varepsilon_{cu}=1,65\%$,

χάλυβας με τάση διαρροής $f_{sy}=350\text{MPa}$ για τον διαμήκη οπλισμό

και $f_{sy}=560\text{MPa}$ για τους συνδετήρες,

ενώ για την προσομοίωση στο SeismoStruct χρησιμοποιήθηκαν

σκυρόδεμα αντοχής $f_{ck}=33\text{MPa}$

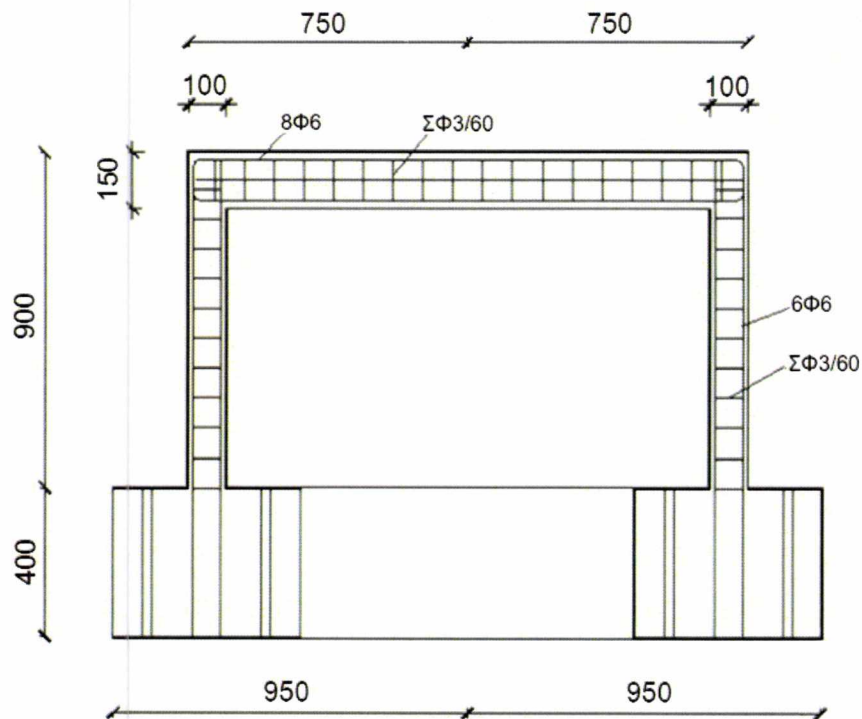
και ανηγμένη παραμόρφωση θραύσης $\varepsilon_{cu}=1,65\%$,

χάλυβας για τον διαμήκη οπλισμό με τάση διαρροής $f_{sy}=250\text{MPa}$

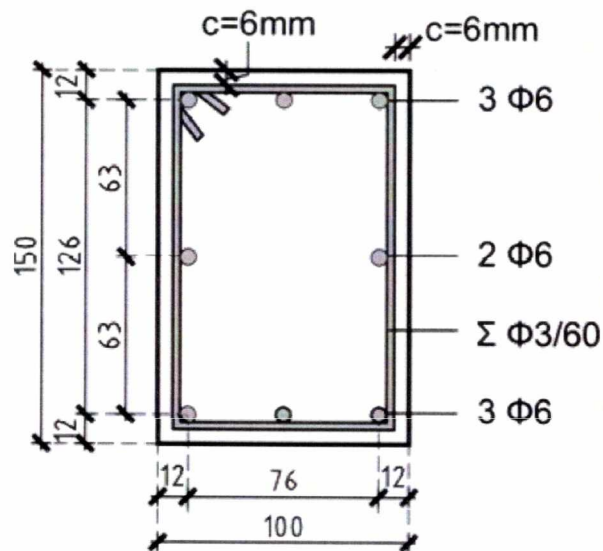
και για τους συνδετήρες $f_{sy}=560\text{MPa}$.

Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε διαμήκης οπλισμός με διάμετρο 6mm και συνδετήρες με διάμετρο 3mm. Στο SeismoStruct, ενώ για τον διαμήκη οπλισμό χρησιμοποιήθηκε διάμετρος 6mm, για τους συνδετήρες υπήρχε ως περιορισμός τα 5mm ελάχιστη διάμετρος. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των συνδετήρων.

Στα παρακάτω Σχήματα απεικονίζονται κατά σειρά αναλυτικά η γεωμετρία του πλαισίου (Σχήμα 3.1), η διατομή της δοκού (Σχήμα 3.2) και των υποστυλωμάτων (Σχήμα 3.3).

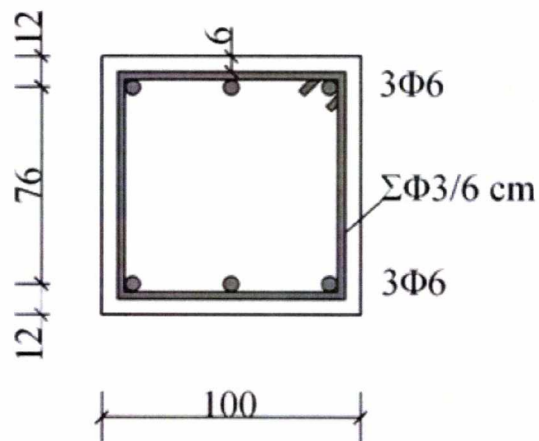


Σχήμα 3.1. Διαστάσεις (σε mm) και οπλισμός μη ενισχυμένου πλαισίου



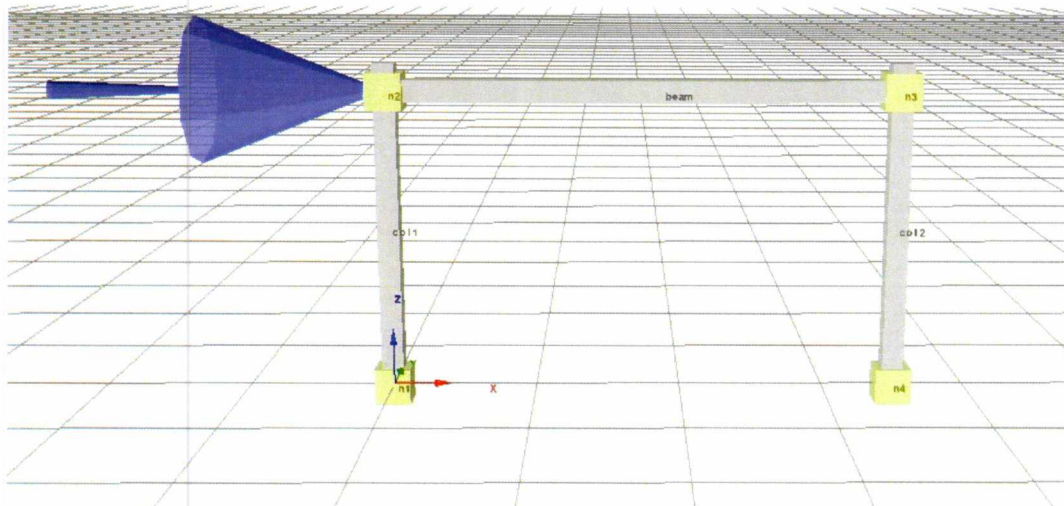
Σχήμα 3.2. Διαστάσεις (σε mm) και οπλισμός δοκού πλαισίου.





Σχήμα 3.3. Διαστάσεις (σε mm) και οπλισμός στύλων πλαισίου.

Για το σχεδιασμό του πλαισίου στο πρόγραμμα χρησιμοποιήθηκαν σαν κόμβοι οι τομές των αξόνων της δοκού και των υποστυλωμάτων (n1 βάση αριστερού στύλου, n2 κορυφή αριστερού στύλου, n3 κορυφή δεξιού στύλου, n4 βάση δεξιού στύλου). Οι κόμβοι στην βάση των υποστυλωμάτων (n1, n4) θεωρήθηκαν πακτωμένοι ενώ οι άλλοι δυο κόμβοι εντελώς ελεύθεροι, σύμφωνα με τη γραφική αναπαράσταση του Σχήματος 3.4, που έπεται.

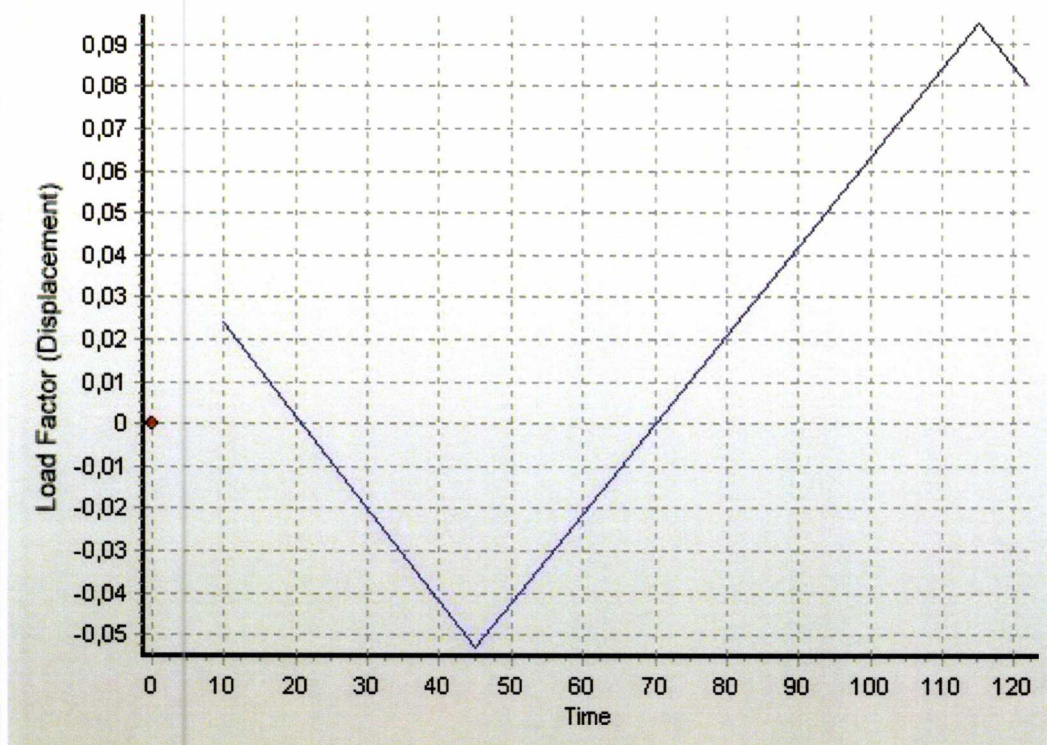


Σχήμα 3.4. Μη ενισχυμένο πλαίσιο στο *SeismoStruct*.

Μέχρι αυτό το σημείο, η διαδικασία ήταν ίδια και για τις δυο μεθόδους ανάλυσης. Η διαφοροποίηση έγινε στο τρόπο φόρτισης. Στο πείραμα το πλαίσιο υποβλήθηκε σε μονοτονική φόρτιση μέχρι τη μέγιστη φέρουσα ικανότητα

του ($\delta u \approx 21\text{mm}$, $F_u \approx 14\text{kN}$) με ταχύτητα φόρτισης 0.005 mm/sec . Στην συνέχεια το δοκίμιο υποβλήθηκε σε αποφόρτιση και φόρτιση στην αντίθετη κατεύθυνση μέχρι την πλήρη αστοχία του.

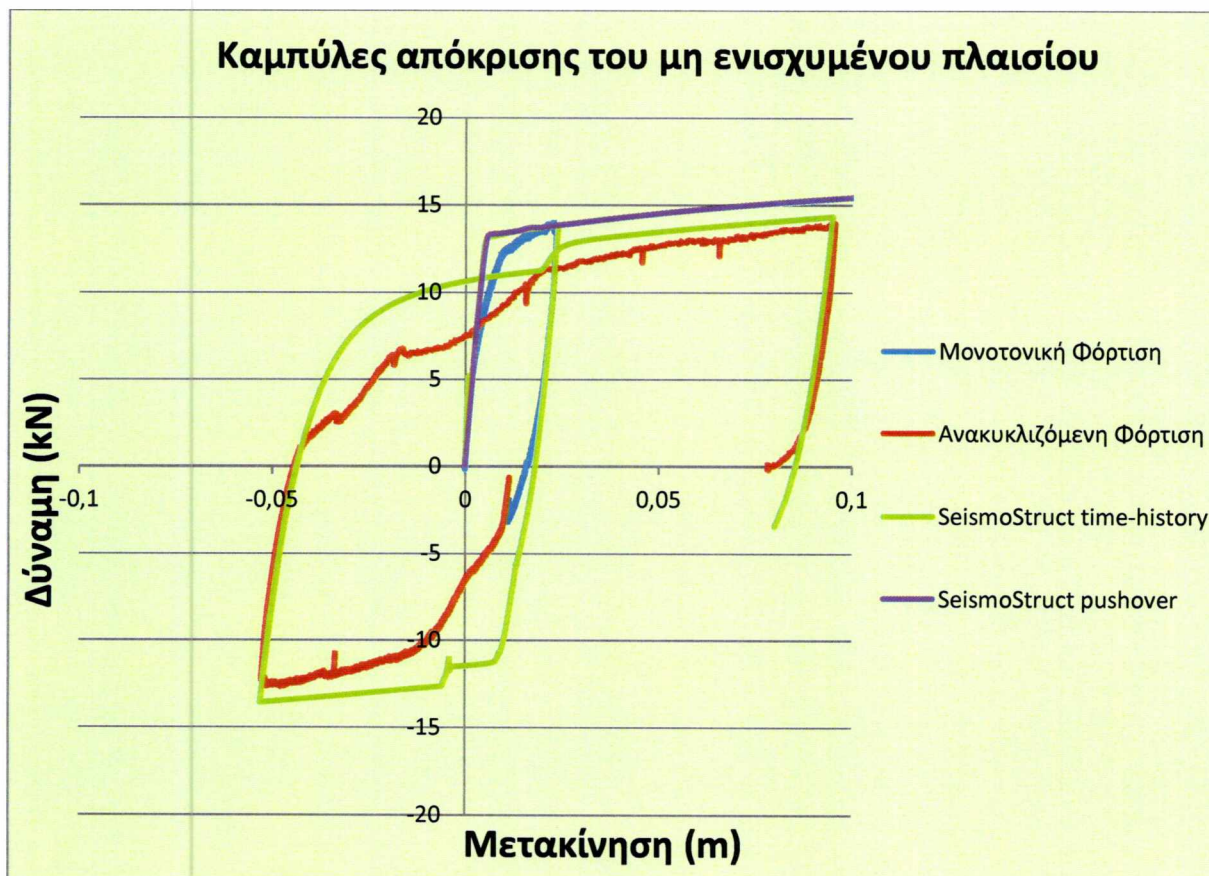
Με σκοπό την κατά το δυνατόν ακριβέστερη αναπαράσταση των συνθηκών του πειράματος, σε ό,τι αφορά τη φόρτιση, στο λογισμικό έγινε χρήση – στην ανάλυση χρονοϊστορίας – μέσω μιας οιονεί ανακυκλιζόμενης φόρτισης με βάση το οριζόντιο φορτίο, που φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 3.5. Το διάγραμμα απεικονίζει τις μετακινήσεις του πλαισίου, οι οποίες πάρθηκαν από τα αποτελέσματα του πειράματος, σε συνάρτηση με τον αριθμό βημάτων που χρησιμοποιήθηκαν. Συγκεκριμένα, πάρθηκαν 12200 βήματα με χρόνο βημάτων 0.01dt .



Σχήμα 3.5. Διάγραμμα φόρτισης μη-ενισχυμένου πλαισίου.

Στην στατική υπερωθητική ανάλυση η φόρτιση ήταν συγκεντρωμένη δύναμη που επιβλήθηκε σταδιακά στον κόμβο 2, με μέγιστη τιμή της τα 14kN , που ήταν η φέρουσα ικανότητα του πλαισίου, όπως βρέθηκε στο πείραμα.

Τα αποτελέσματα αμφότερων των μεθόδων ανάλυσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.6, όπου για λόγους σύγκρισης έχουν παρατεθεί επίσης και τα πειραματικά αποτελέσματα.



Σχήμα 3.6. Καμπύλες διατμητικής δύναμης - πλευρικής μετατόπιση του μη-ενισχυμένου πλαισίου.

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από τα πειραματικά δεδομένα με μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση (μπλε και κόκκινη γραμμή αντίστοιχα) καθώς και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο πρόγραμμα SeismoStruct, με στατική ανάλυση χρονοϊστορίας και με στατική υπερωθητική ανάλυση (πράσινη και μωβ αντίστοιχα).

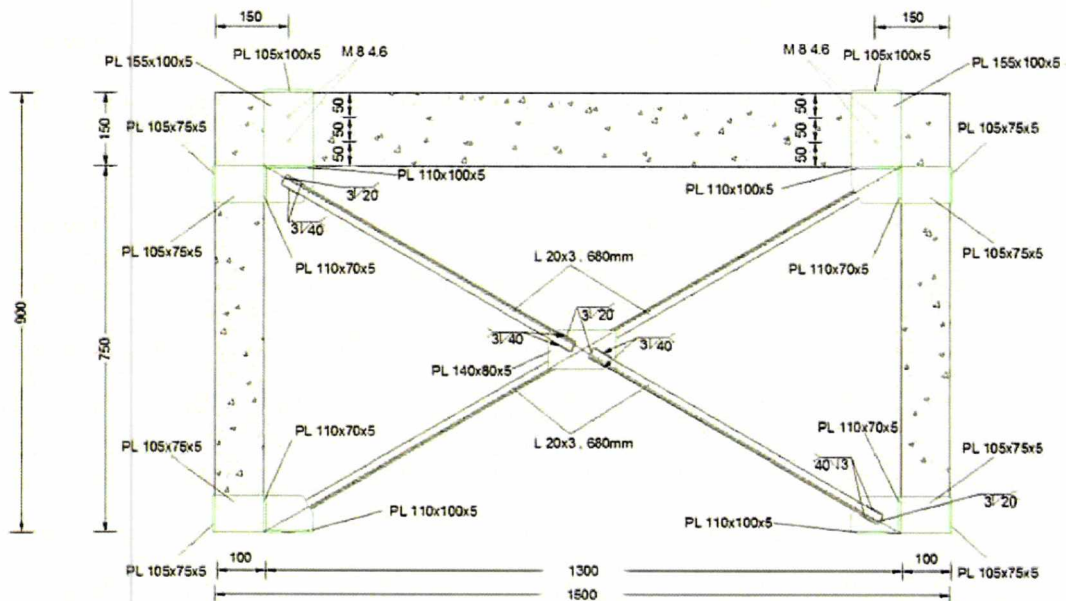
3.2. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΜΕ Χ-ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ ΥΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Για τη μόρφωση – σχεδιασμό του ενισχυμένου πλαισίου χρησιμοποιήθηκε η ίδια διαδικασία με αυτή του μη ενισχυμένου. Η διαφοροποίηση αφορούσε στους Χ-συνδέσμους καθώς μελετήθηκαν τρεις περιπτώσεις. Επίσης, και εδώ πραγματοποιήθηκε η μελέτη με δυο μορφές ανάλυσης, με στατική ανάλυση χρονοϊστορίας και με στατική υπερωθητική ανάλυση.

3.2.1. ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΜΕ Χ-ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ L20x3

Στο πείραμα για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό θεωρήθηκαν ράβδοι ονομαστικής τάσης διαρροής $f_{sy}=235\text{MPa}$ αλλά η πειραματική της τιμή ήταν $f_{sy}=325\text{MPa}$. Τελικά, για την καλύτερη προσέγγιση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε τάσης διαρροής $f_{sy}=340\text{MPa}$.

Στο 1^ο σύστημα Χ-συνδέσμων προσαρτήθηκαν διαγώνια μέλη διατομής απλού ισοσκελούς γωνιακού L20x3, συγκολλημένα στις τέσσερις γωνίες (κόμβους δοκών-στύλων και βάσεις στύλων) και μεταξύ τους στην περιοχή τομής των αξόνων τους, σύμφωνα με το Σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7. Διαστάσεις (σε mm) και λεπτομέρειες 1^ο ενισχυμένου πλαισίου (L20x3).

Στη συνέχεια παραθέτουμε αναλυτικά τις διαστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν στο SeismoStruct για τη προσομοίωση της διατομής L20x3 σύμφωνα με όσα αναλυτικά αναφέρθηκαν περί διατομών στο λογισμικό, στο Κεφάλαιο 1.

- Πλάτος κάτω πέλματος: 0,02m
- Πάχος κάτω πέλματος: 0,003m
- Πλάτος πάνω πέλματος: 0,00001m
- Πάχος πάνω πέλματος: 0,00001m
- Ύψος κορμού: 0,017m
- Πάχος κορμού: 0,003m
- Εκκεντρότητα κάτω πέλματος: 0
- Εκκεντρότητα πάνω πέλματος: 0

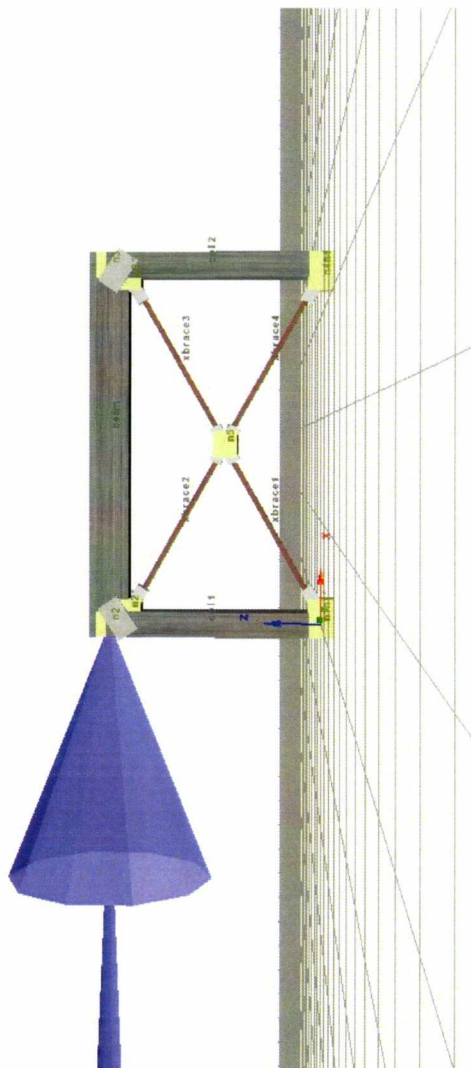
Παρατηρείται πως δόθηκαν τιμές στο πλάτος και πάχος του πάνω πέλματος και μάλιστα πολύ μικρές. Αυτό έγινε καθώς στο πρόγραμμα δεν μπορούσε να δοθεί η τιμή 0 και να γίνει η ανάλυση.

Δημιουργήθηκαν 4 καινούργιοι κόμβοι ($n1^*$, $n2^*$, $n3^*$, $n4^*$) στις εσωτερικές γωνίες του πλαισίου και ένας στο κέντρο ($n5^*$) για να μπορέσουμε να εισάγουμε τις ράβδους. Καθώς όμως στο πείραμα οι ράβδοι ήταν δύσκαμπτα συνδεδεμένοι με τους κόμβους δοκού – στύλων του πλαισίου, οι κόμβους $n2^*$ και $n3^*$ των ράβδων δεσμεύτηκαν με τους βασικούς κόμβους $n2$ $n3$ του πλαισίου έτσι ώστε να ακολουθούν τις μετατοπίσεις και τις στροφές αυτών. Δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στον προσανατολισμό των ράβδων, δηλαδή η εναλλαγή των σκελών να είναι τέτοια ώστε να αποφευχθεί ο λυγισμός εκτός επιπέδου του πλαισίου. Τέλος, για να προσομοιωθούν οι δύσκαμπτοι χαλύβδινοι δίσκοι στους οποίους ήταν συγκολλημένοι οι ράβδοι, εφαρμόστηκε ακαμψία στα άκρα των ράβδων τόση όση η διαγώνιος των δύσκαμπτων δίσκων αυτών.

Οι βαθμοί ελευθερίας των βασικών κόμβων του πλαισίου $n1$, $n2$, $n3$, $n4$, δεν αλλάχθηκαν. Όσο αναφορά τους βαθμούς ελευθερίας των κόμβων ένωσης των ράβδων με την δοκό, μελετήθηκαν δυο περιπτώσεις και για τις δυο αναλύσεις. Στην πρώτη περίπτωση, οι κόμβοι $n1^*$ και $n4^*$ αφέθηκαν ελεύθεροι στην κατεύθυνση z και δεσμεύτηκαν οι άλλοι βαθμοί ελευθερίας και στην δεύτερη περίπτωση, μόνο ο κόμβος $n1^*$ ήταν ελεύθερος στην κατεύθυνση z με δεσμευμένους

τους άλλους βαθμούς ελευθερίας. Και στις δυο περιπτώσεις, όλοι οι κόμβοι δεσμεύθηκαν στην y κατεύθυνση και στην στροφή περί τον άξονα z για την αποφυγή παραμόρφωσης εκτός επιπέδου του πλαισίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8.

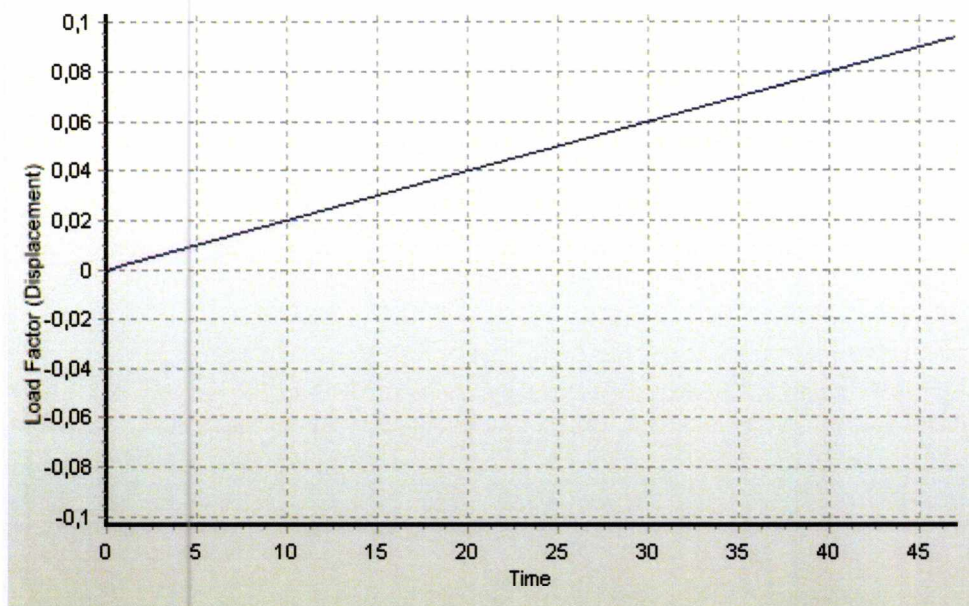
Τέλος, μελετήθηκε και η περίπτωση ο κόμβος $n5^*$ να αφεθεί ελεύθερος με στατική ανάλυση χρονοϊστορίας και είτε ελεύθερο μόνο τον $n1^*$ είτε ελεύθεροι οι $n1^*$ - $n4^*$ έτσι ώστε να μελετηθεί και η παραμόρφωση εκτός επιπέδου.



Σχήμα 3.8. Ενισχυμένο πλαίσιο με X-συνδέσμους L20x3 στο SeismoStruct.

Αντίστοιχα με το μη-ενισχυμένο πλαίσιο, για να προσομοιωθούν τα πειραματικά δεδομένα, για την στατική ανάλυση χρονοϊστορίας, χρησιμοποιήθηκε το διάγραμμα φόρτισης του Σχήματος 3.9. Το διάγραμμα

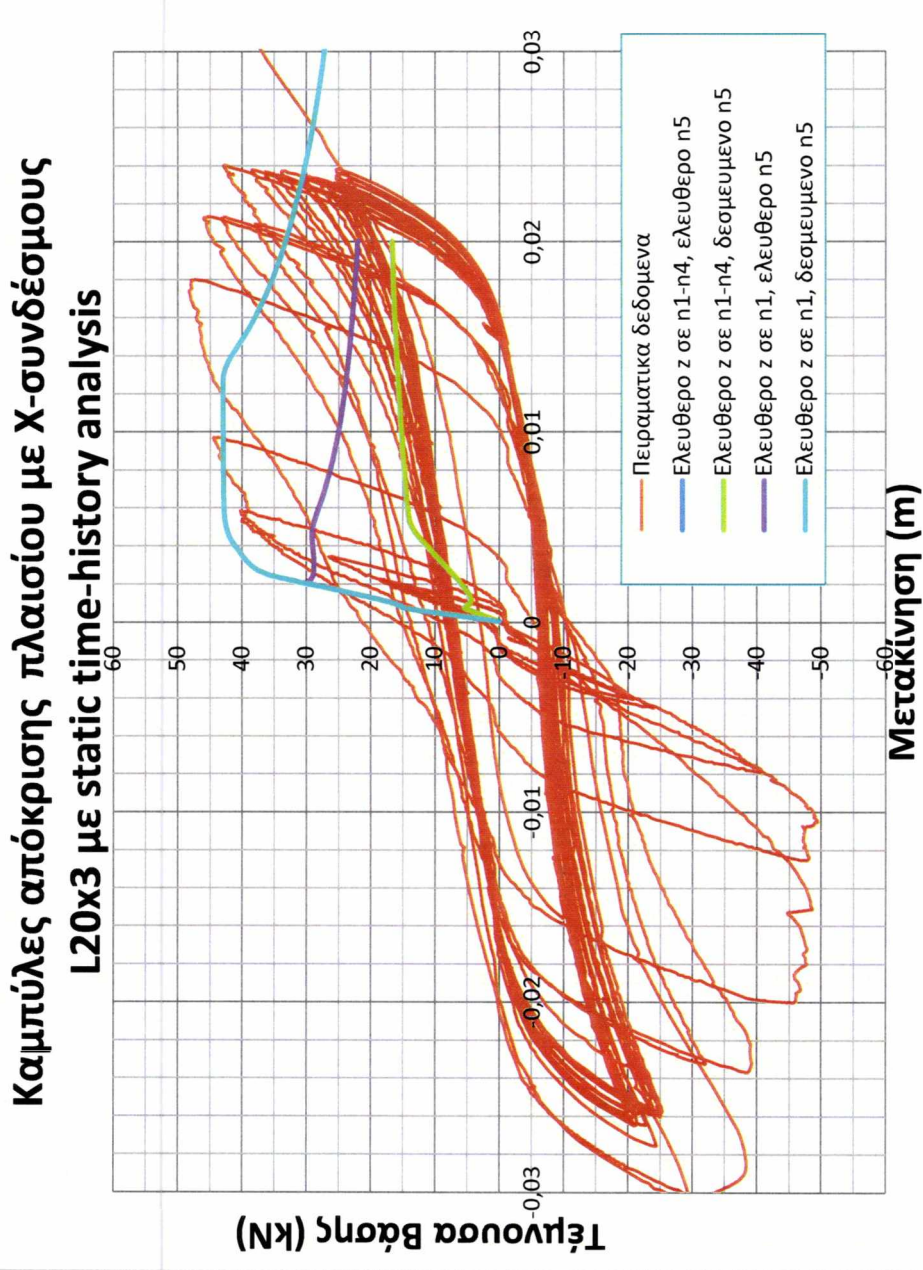
απεικονίζει τις μετακινήσεις του πλαισίου, οι οποίες πάρθηκαν από τα αποτελέσματα του πειράματος, σε συνάρτηση με τον αριθμό βημάτων που χρησιμοποιήθηκαν.



Σχήμα 3.9. Διάγραμμα φόρτισης ενισχυμένου πλαισίου με X-συνδέσμους L20x3.

Στην στατική υπερωθητική ανάλυση η φόρτιση ήταν συγκεντρωμένη δύναμη που επιβλήθηκε σταδιακά στον κόμβο 2 με μέγεθος 50kN, που ήταν λίγο μεγαλύτερη από την πειραματικά διαπιστωμένη αντοχή του (40 kN).

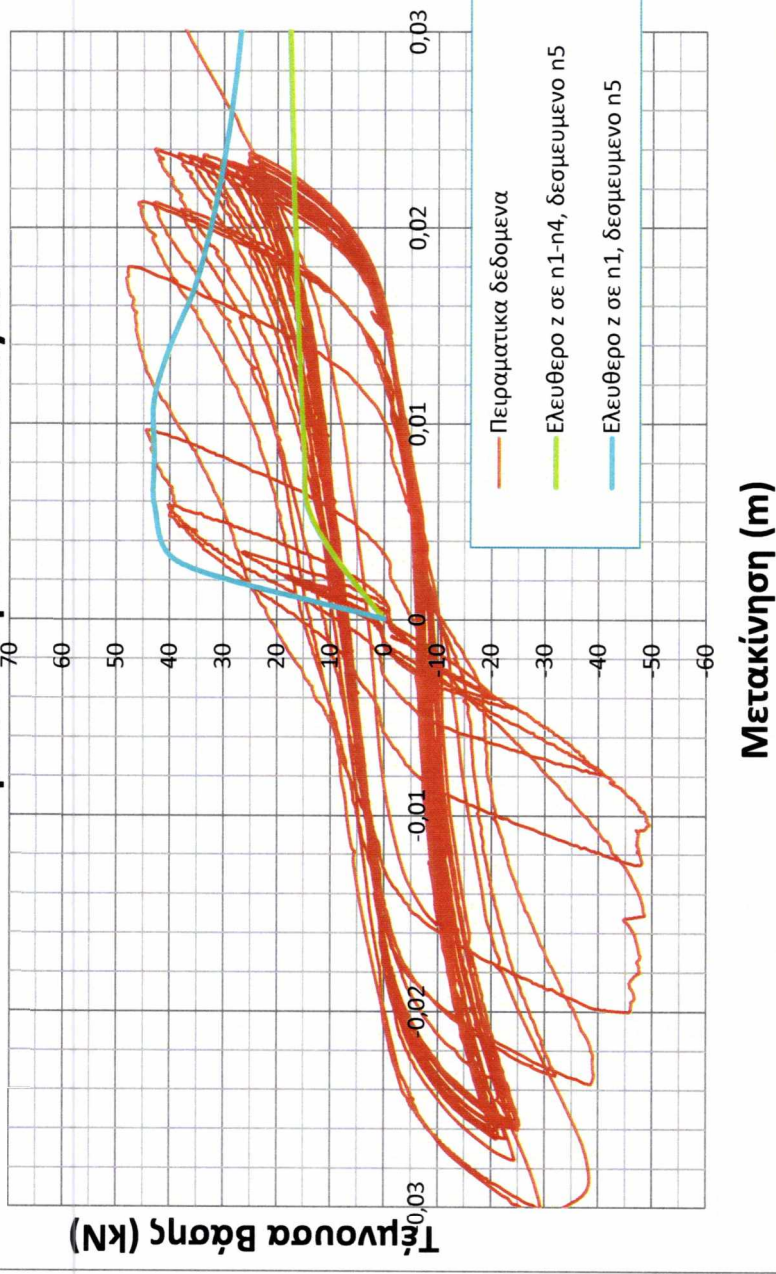
Στα συνθετικά Σχήματα 3.10 και 3.11 απεικονίζονται μαζί τα πειραματικά αποτελέσματα και τα αποτελέσματα των αναλύσεων που περιγράφηκαν προηγουμένως. Αυτά θα σχολιαστούν στη συνέχεια, αναφορικά με το ακριβές περιεχόμενό τους.



Σχήμα 3.10. Καμπύλες διατημητικής δύναμης - πλευρικής μετατόπισης του ενισχυμένου πλαισίου με Χ-συνδέσμους L20x3 τόσο πειραματικές όσο και με στατική ανάλυση χρονοϊστορίας.

Καμπύλες απόκρισης πλαισίου με Χ-συνδέσμους L20x3

με static pushover analysis



Σχήμα 3.11. Καμπύλες διατμητικής δύναμης - πλευρικής μετατόπισης του ενισχυμένου πλαισίου με Χ-συνδέσμους L20x3 τόσο πειραματικές όσο και με στατική υπερθητική ανάλυση.

Πιο συγκεκριμένα, στο παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 3.10) απεικονίζονται τα πειραματικά αποτελέσματα (κόκκινη γραμμή), καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση στο πρόγραμμα SeismoStruct με στατική ανάλυση χρονοϊστορίας για τις εξής περιπτώσεις:

(α1,2) ελεύθερη η z κατεύθυνση μόνο για τους κόμβους n1* και n4* και με ελεύθερο ή δεσμευμένο τον κόμβο n5* (μπλε και πράσινη γραμμή αντίστοιχα),

(β1,2) ελεύθερη η z κατεύθυνση μόνο για τον κόμβο n1* και με ελεύθερο ή δεσμευμένο τον κόμβο n5* (μωβ και γαλάζια γραμμή αντίστοιχα).

Παρατηρείται πως η περίπτωση που προσεγγίζει επαρκώς τα πειραματικά αποτελέσματα είναι η τελευταία, όπου ο κόμβος στο κέντρο του πλαισίου n5* είναι δεσμευμένος και είναι ελεύθερος μόνο η z κατεύθυνση του κόμβου n1*.

Αντίστοιχα, στο Σχήμα 3.11 καταδεικνύονται τα πειραματικά αποτελέσματα (κόκκινη γραμμή), καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση στο πρόγραμμα SeismoStruct με στατική υπερωθητική ανάλυση για τις εξής περιπτώσεις:

(γ1) ελεύθερη η z κατεύθυνση μόνο για τους κόμβους n1* και n4* και δεσμευμένο τον κόμβο n5* (πράσινη γραμμή),

(γ2) ελεύθερη η z κατεύθυνση μόνο για τον κόμβο n1* και δεσμευμένο τον κόμβο n5* (γαλάζια γραμμή).

Παρατηρείται πως η περίπτωση που προσεγγίζει επαρκώς τα πειραματικά αποτελέσματα είναι η τελευταία, όπου ο κόμβος στο κέντρο του πλαισίου n5* είναι δεσμευμένος και είναι ελεύθερος μόνο η z κατεύθυνση του κόμβου n1*.

Στη συνέχεια, παρατίθενται γραφικά συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ των δύο ειδών αναλύσεων στο λογισμικό (για όλες τις επί μέρους περιπτώσεις), με παρόντα επίσης τα αντίστοιχα πειραματικά, για λόγους εποπτείας. Αυτά περιέχονται στο Σχήμα 3.12.



Σχήμα 3.12. Συγκριτικές καμπύλες διατμητικής δύναμης – πλευρικής μετατόπισης του ενισχυμένου πλαισίου με Χ-συνδέσμους L20x3.

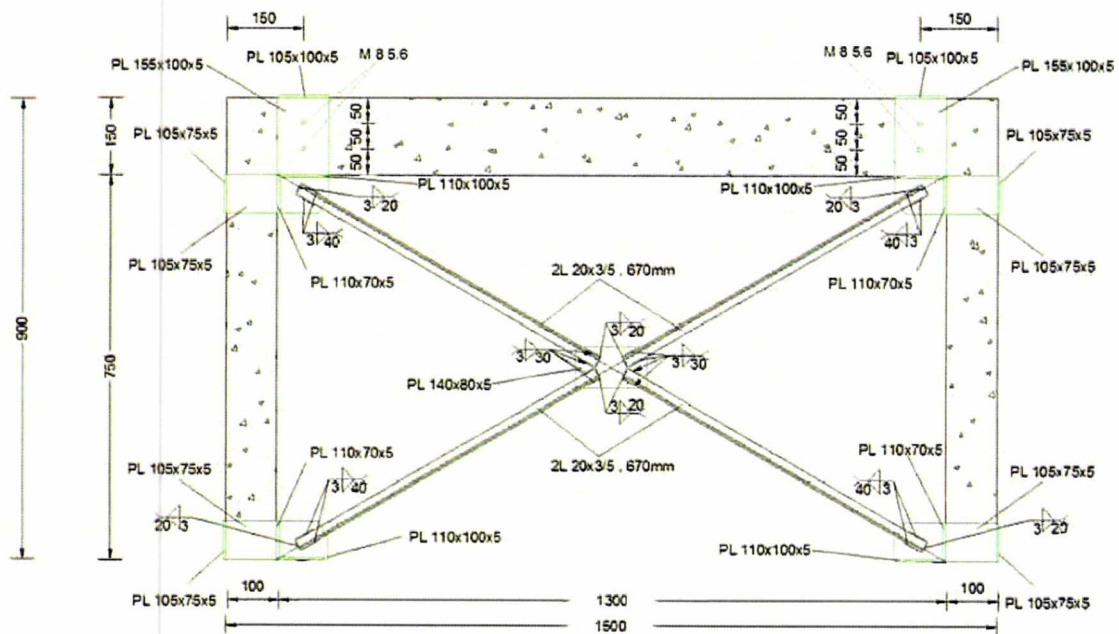
Παρατηρείται πως δεν έχει σημασία η ανάλυση που χρησιμοποιούμε, αυτά που προσεγγίζουν τα πειραματικά δεδομένα καλύτερα είναι αυτά όπου ο κόμβος στο κέντρο του πλαισίου n5* είναι δεσμευμένος και είναι ελεύθερος μόνο η z κατεύθυνση του κόμβου n1*. Επίσης βλέπουμε πως έχουν μικρές διαφορές μεταξύ τους.

3.2.2. ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΜΕ Χ-ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ 2L20x3/5

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι αντίστοιχη με αυτή της προηγούμενης περίπτωσης. Στο πείραμα για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό θεωρήθηκαν ράβδοι ονομαστικής τάσης διαρροής $f_{sy}=235\text{MPa}$ αλλά η πειραματική

της τιμή ήταν $f_{sy}=325\text{MPa}$. Τελικά, για την καλύτερη προσέγγιση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε τάσης διαρροής $f_{sy}=340\text{MPa}$.

Στο 2ο σύστημα X-συνδέσμων προσαρτήθηκαν διαγώνια μέλη διατομής διπλών ισοσκελών γωνιακών 2L20x3/5 με απόσταση παράλληλων σκελών 5 mm, συγκολλημένων στις τέσσερις γωνίες (κόμβους δοκών-στύλων και βάσεις στύλων) αλλά και ενδιάμεσα. Στο Σχήμα 3.13 φαίνονται αναλυτικά οι διαστάσεις και οι λεπτομέρειες του εν λόγω πλαισίου.



Σχήμα 3.13. Διαστάσεις (σε mm) και λεπτομέρειες 2^{οβ} ενισχυμένου πλαισίου (2L20x3/5).

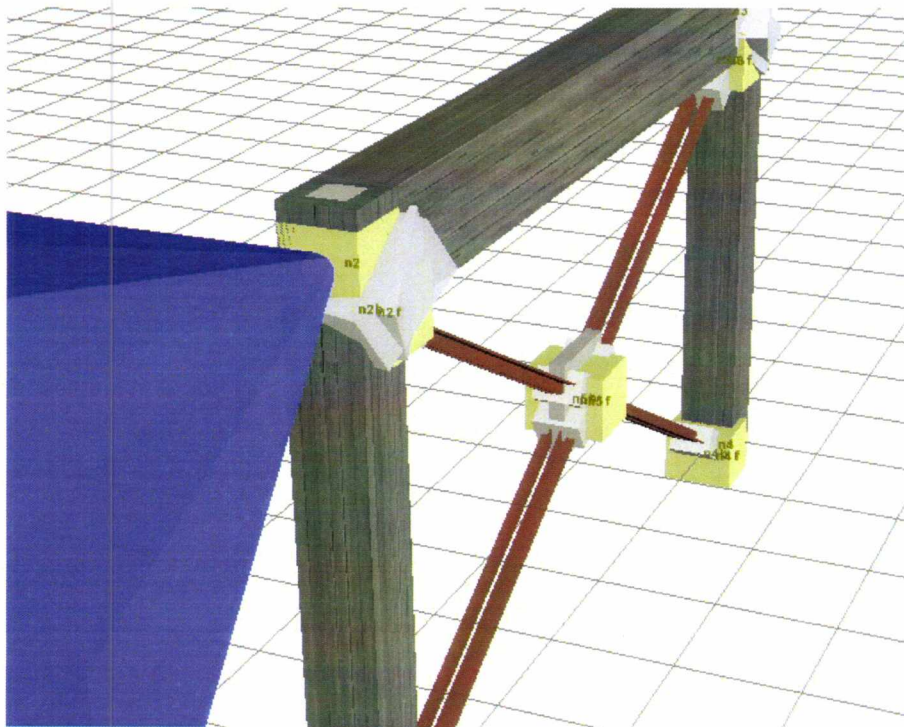
Στη συνέχεια παραθέτουμε αναλυτικά τις διαστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν στο SeismoStruct για τη προσομοίωση της διατομής 2L20x3/5 (βλ. κεφάλαιο 1).

- Πλάτος κάτω πέλματος: 0,02m
- Πάχος κάτω πέλματος: 0,003m
- Πλάτος πάνω πέλματος: 0,00001m
- Πάχος πάνω πέλματος: 0,00001m
- Ύψος κορμού: 0,017m

- Πάχος κορμού: 0,003m
- Εκκεντρότητα κάτω πέλματος: 0
- Εκκεντρότητα πάνω πέλματος: 0

Δόθηκαν διαστάσεις στο πάνω πέλμα καθώς ήταν απαραίτητες για την ανάλυση στο πρόγραμμα, όμως δόθηκαν τέτοιες ώστε να μην επηρεαστούν τα αποτελέσματα.

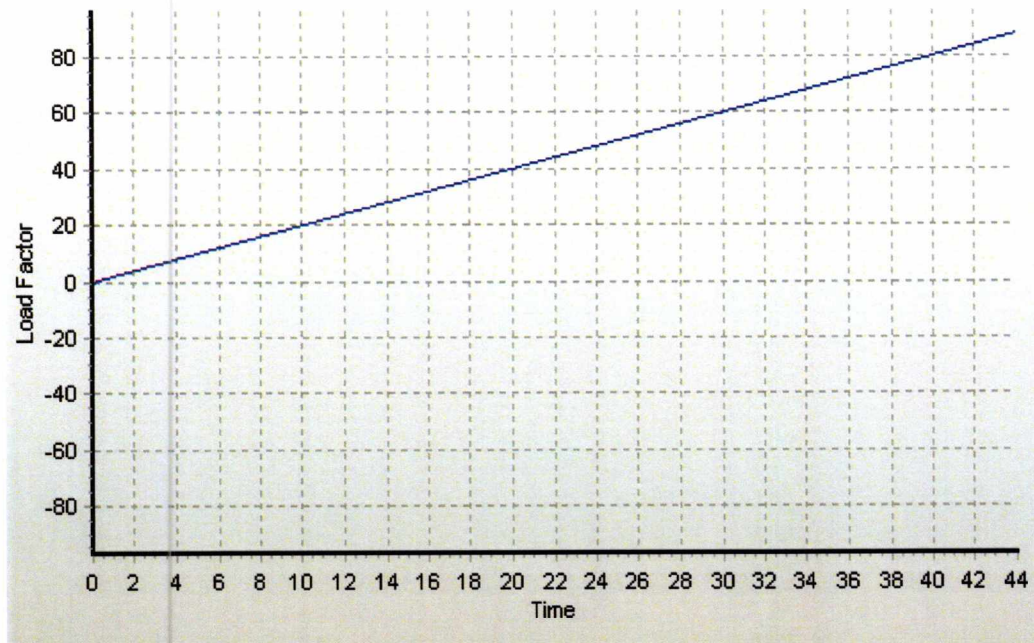
Για την εισαγωγή των ράβδων, εκτός των βασικών κόμβων n1, n2, n3, n4, δημιουργήθηκαν άλλοι 8 κόμβοι στις εσωτερικές γωνίες του πλαισίου για να μπου οι εμπρόσθιες (n1f, n2f, n3f, n4f) και οι οπίσθιες (n1b, n2b, n3b, n4b) ράβδοι καθώς και ένας στην θεωρητική τομή των συνδέσμων (n5*) του πλαισίου. Οι συνθήκες δέσμευσης καθώς και η προσομοίωση των χαλύβδινων δίσκων και οι βαθμοί ελευθερίας που χρησιμοποιήθηκαν στους κόμβους, είναι ίδιες με την πρώτη περίπτωση X-συνδέσμων, σύμφωνα με το Σχήμα 3.14, που ακολουθεί.



Σχήμα 3.14. Ενισχυμένο πλαίσιο με X-συνδέσμους 2L20x3/5 στο SeismoStruct.

Για την προσομοίωση των πειραματικών δεδομένων με στατική ανάλυση χρονοϊστορίας, χρησιμοποιήθηκε το παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα

3.15) ως φόρτιση του πλαισίου. Το διάγραμμα αυτό απεικονίζει τις πλευρικές δυνάμεις που ασκήθηκαν στο πλαίσιο, οι οποίες πάρθηκαν από τα αποτελέσματα του πειράματος, σε συνάρτηση με τον αριθμό βημάτων που χρησιμοποιήθηκαν.

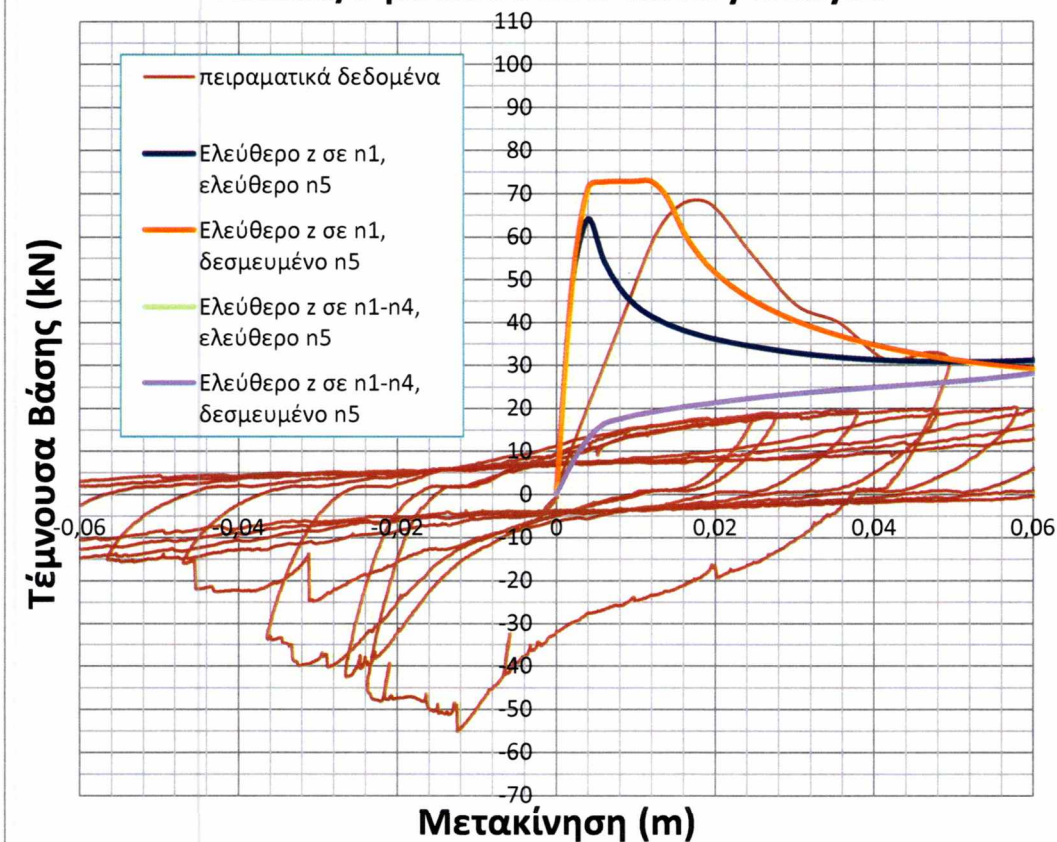


Σχήμα 3.15. Διάγραμμα φόρτισης ενισχυμένου πλαισίου με X-συνδέσμους 2L20x3/5.

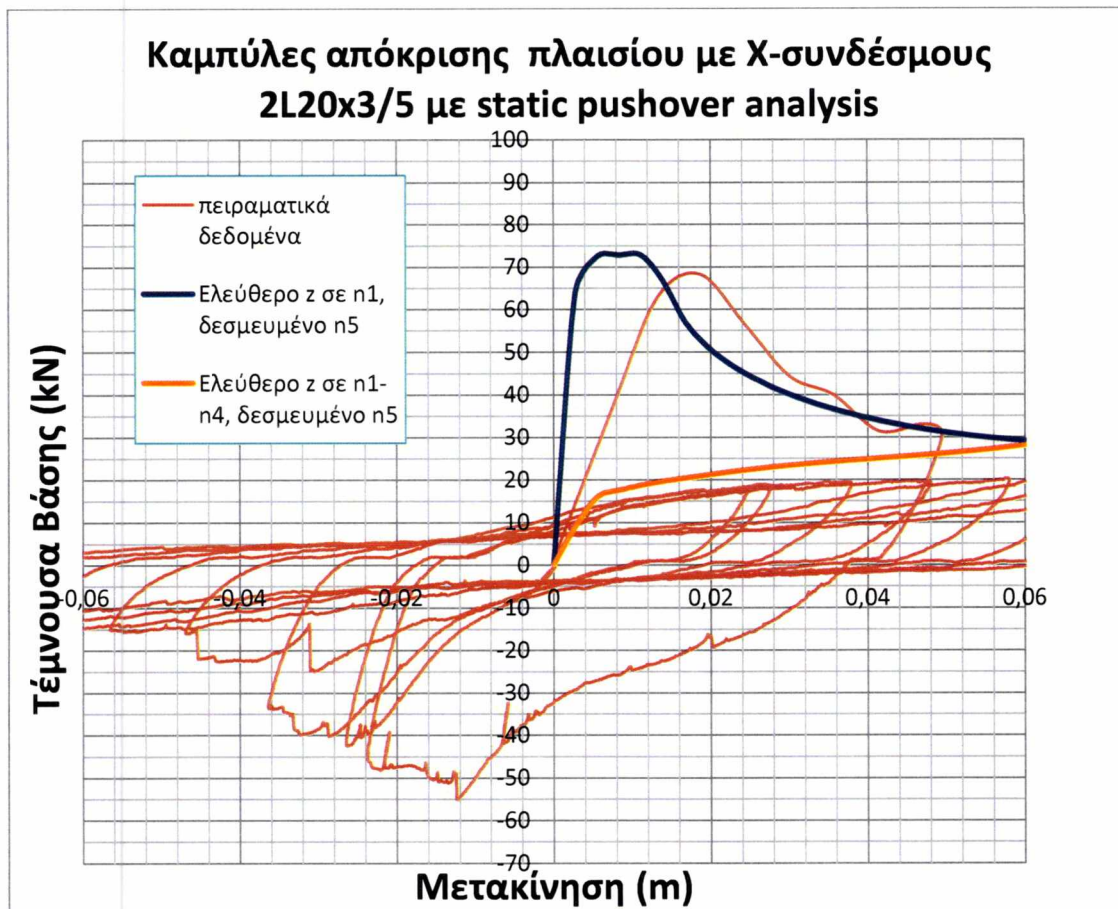
Στην στατική υπερωθητική ανάλυση η φόρτιση ήταν συγκεντρωμένη δύναμη που επιβλήθηκε σταδιακά στον κόμβο 2 με μέγεθος 88kN, που ήταν μεγαλύτερη από φέρουσα ικανότητα του πλαισίου, όπως προέκυψε από τα πειράματα (50 kN).

Τα επί μέρους ανά περίπτωση ανάλυσης, αλλά και τα συνολικά συγκριτικά αποτελέσματα παρατίθενται στα Σχήματα 3.16 – 3.18.

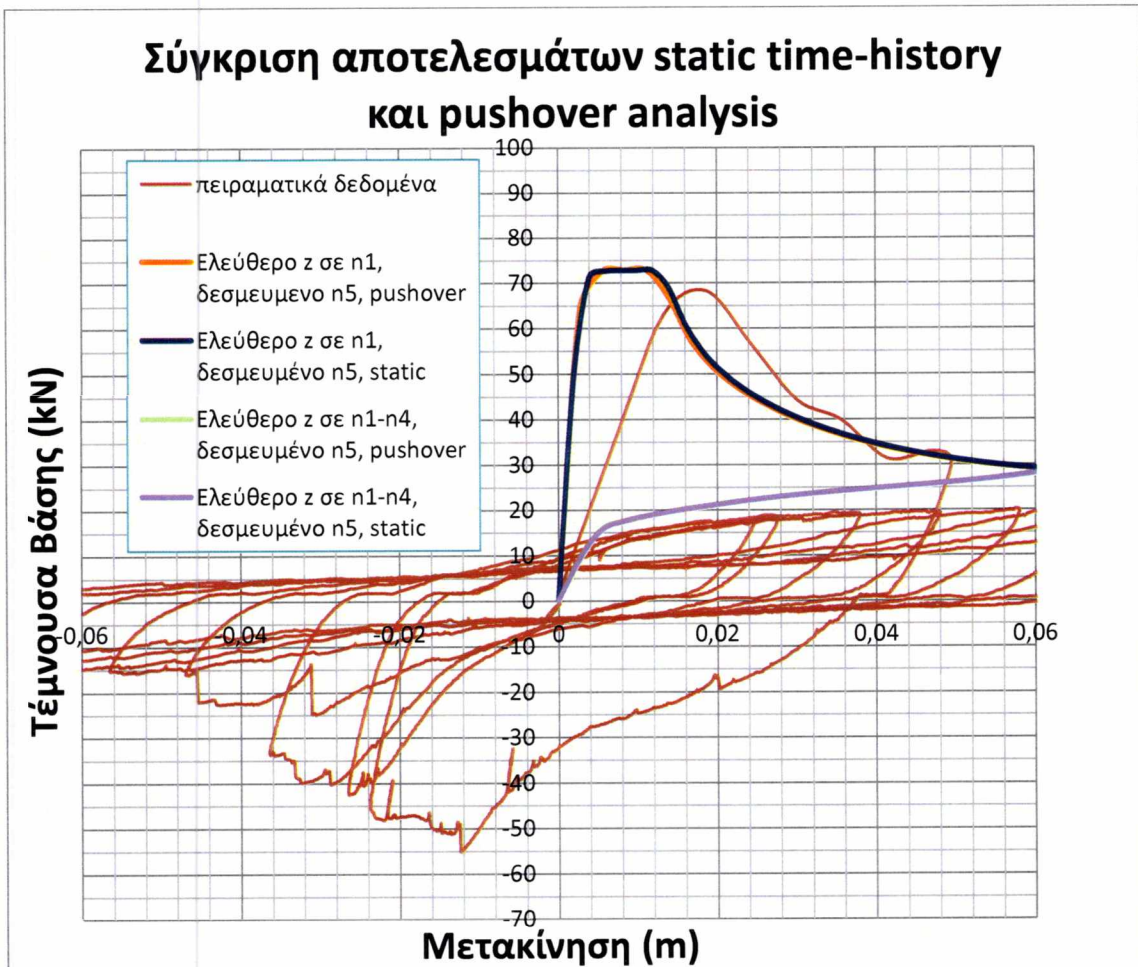
**Καμπύλες απόκρισης πλαισίου με Χ-συνδέσμους
2L20x3/5 με static time-history analysis**



Σχήμα 3.16. Καμπύλες διατμητικής δύναμης - πλευρικής μετατόπισης του ενισχυμένου πλαισίου με Χ-συνδέσμους 2L20x3/5 τόσο πειραματικές όσο και με στατική ανάλυση χρονοϊστορίας.



Σχήμα 3.17. Καμπύλες διατμητικής δύναμης - πλευρικής μετατόπισης του ενισχυμένου πλαισίου με Χ-συνδέσμους 2L20x3/5 τόσο πειραματικές όσο και με στατική υπερωθητική ανάλυση.



Σχήμα 3.18. Συγκριτικές καμπύλες διατμητικής δύναμης – πλευρικής μετατόπισης του ενισχυμένου πλαισίου με Χ-συνδέσμους 2L20x3/5.

Αναλυτικότερα, ισχύουν τα ακόλουθα:

Στο Σχήμα 3.16 απεικονίζονται τα πειραματικά αποτελέσματα (κόκκινη γραμμή), καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση στο πρόγραμμα SeismoStruct με στατική ανάλυση χρονοϊστορίας για τις εξής περιπτώσεις:

- ελεύθερη η z κατεύθυνση μόνο για τους κόμβους n1f*, n1b* και με ελεύθερο ή δεσμευμένο τον κόμβο n5* (μπλε και πορτοκαλί γραμμή αντίστοιχα).
- ελεύθερη η z κατεύθυνση μόνο για τους κόμβους n1f*, n1b* και n4f*, n4b* και με ελεύθερο ή δεσμευμένο τον κόμβο n5* (πράσινη και μωβ γραμμή αντίστοιχα),

Παρατηρείται πως η περίπτωση που προσεγγίζει επαρκώς τα πειραματικά δεδομένα είναι η δεύτερη όπου ο κόμβος στο κέντρο του πλαισίου n5* είναι δεσμευμένος και είναι ελεύθερη μόνο η z κατεύθυνση των κόμβων n1f*, n1b*.

Κατ' αναλογία, στο Σχήμα 3.17 φαίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα (κόκκινη γραμμή), καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση στο πρόγραμμα SeismoStruct με στατική υπερωθητική ανάλυση για τις εξής περιπτώσεις:

- ελεύθερη η z κατεύθυνση μόνο για τους κόμβους n1f*, n1b* και δεσμευμένο τον κόμβο n5* (μπλε γραμμή).
- ελεύθερη η z κατεύθυνση μόνο για τους κόμβους n1f*, n1b* και n4f*, n4b* και δεσμευμένο τον κόμβο n5* (πορτοκαλί γραμμή),

Παρατηρείται πως η περίπτωση που προσεγγίζει επαρκώς τα πειραματικά δεδομένα είναι η πρώτη όπου ο κόμβος στο κέντρο του πλαισίου n5* είναι δεσμευμένος και είναι ελεύθερος μόνο η z κατεύθυνση των κόμβων n1f*, n1b*.

Τέλος, στο Σχήμα 3.18 καταγράφονται συγκριτικά τόσο τα πειραματικά αποτελέσματα (κόκκινη γραμμή), καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση στο πρόγραμμα SeismoStruct με τις δυο μορφές ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκαν.

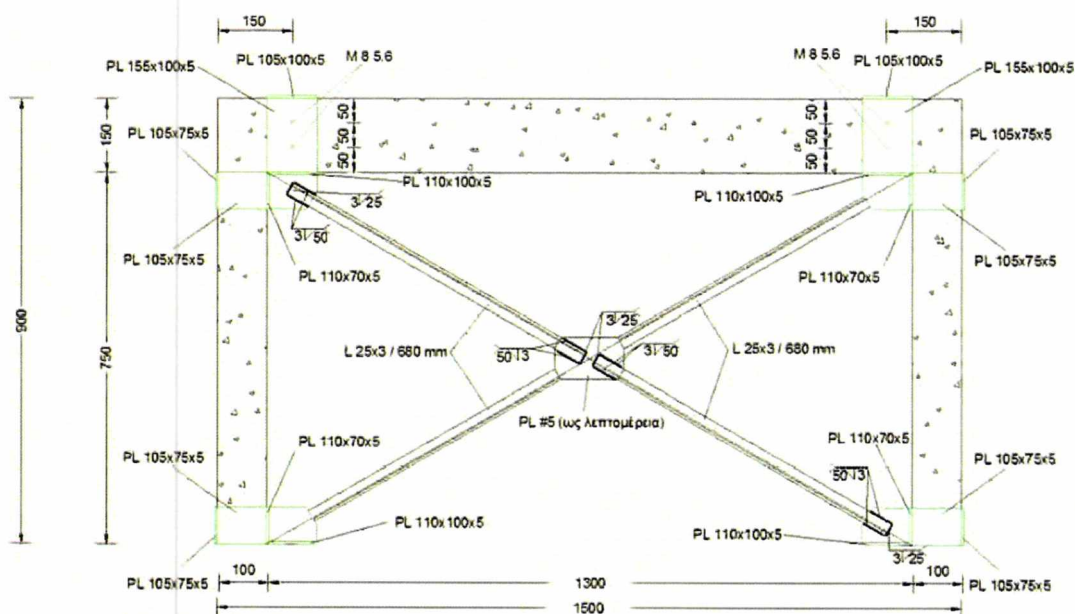
Παρατηρείται πως δεν έχει σημασία η ανάλυση που χρησιμοποιούμε, ενώ αυτά που προσεγγίζουν τα πειραματικά αποτελέσματα

καλύτερα είναι αυτά όπου ο κόμβος στο κέντρο του πλαισίου n5* είναι δεσμευμένος και είναι ελεύθερος μόνο η z κατεύθυνση των κόμβων n1f*, n1b*. Επίσης βλέπουμε πως έχουν μικρές διαφορές μεταξύ τους.

3.2.3 ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΜΕ Χ-ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ L25x3

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι αντίστοιχη με αυτή των προηγούμενων περιπτώσεων. Στο πείραμα για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό θεωρήθηκαν ράβδοι ονομαστικής τάσης διαρροής $f_{sy}=235\text{MPa}$ αλλά η πειραματική της τιμή ήταν $f_{sy}=325\text{MPa}$. Τελικά, για την καλύτερη προσέγγιση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε τάσης διαρροής $f_{sy}=340\text{MPa}$

Στο 3^ο σύστημα Χ-συνδέσμων προσαρτήθηκαν διαγώνια μέλη διατομής απλού ισοσκελούς γωνιακού L25x3, συγκολλημένου στις τέσσερις γωνίες (κόμβους δοκών-στύλων και βάσεις στύλων) αλλά και ενδιάμεσα (στο σημείο τομής των αξόνων τους). Γεωμετρία και σχετικές λεπτομέρειες δίνονται στο Σχήμα 3.18.



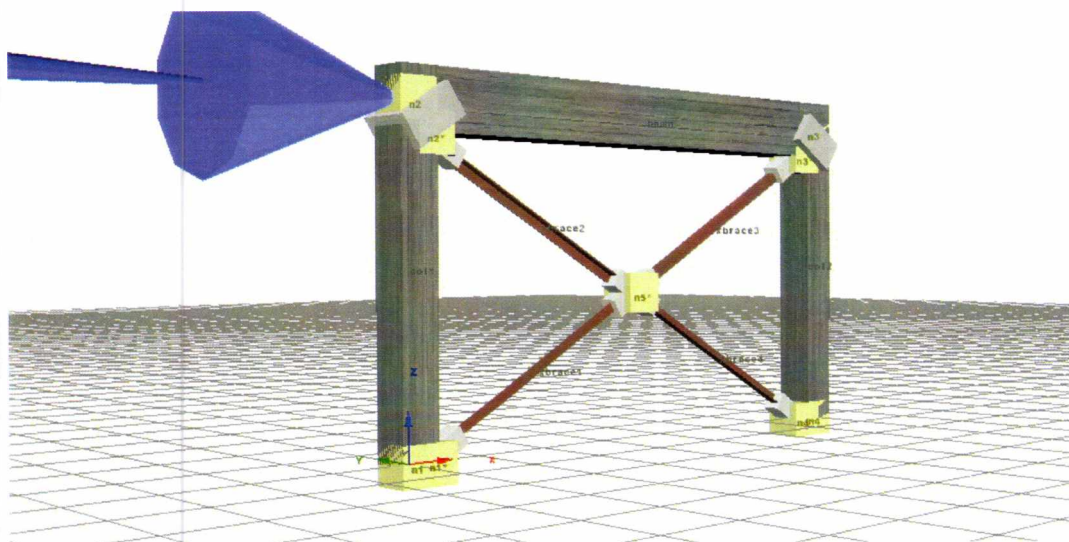
Σχήμα 3.18. Διαστάσεις (σε mm) και λεπτομέρειες 3^{ου} ενισχυμένου πλαισίου (L25x3).

Στη συνέχεια παραθέτουμε αναλυτικά τις διαστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν στο SeismoStruct για τη προσομοίωση της διατομής L25x3 (βλ. κεφάλαιο 1).

- Πλάτος κάτω πέλματος: 0,025m
- Πάχος κάτω πέλματος: 0,003m
- Πλάτος πάνω πέλματος: 0,00001m
- Πάχος πάνω πέλματος: 0,00001m
- Ύψος κορμού: 0,022m
- Πάχος κορμού: 0,003m
- Εκκεντρότητα κάτω πέλματος: 0
- Εκκεντρότητα πάνω πέλματος: 0

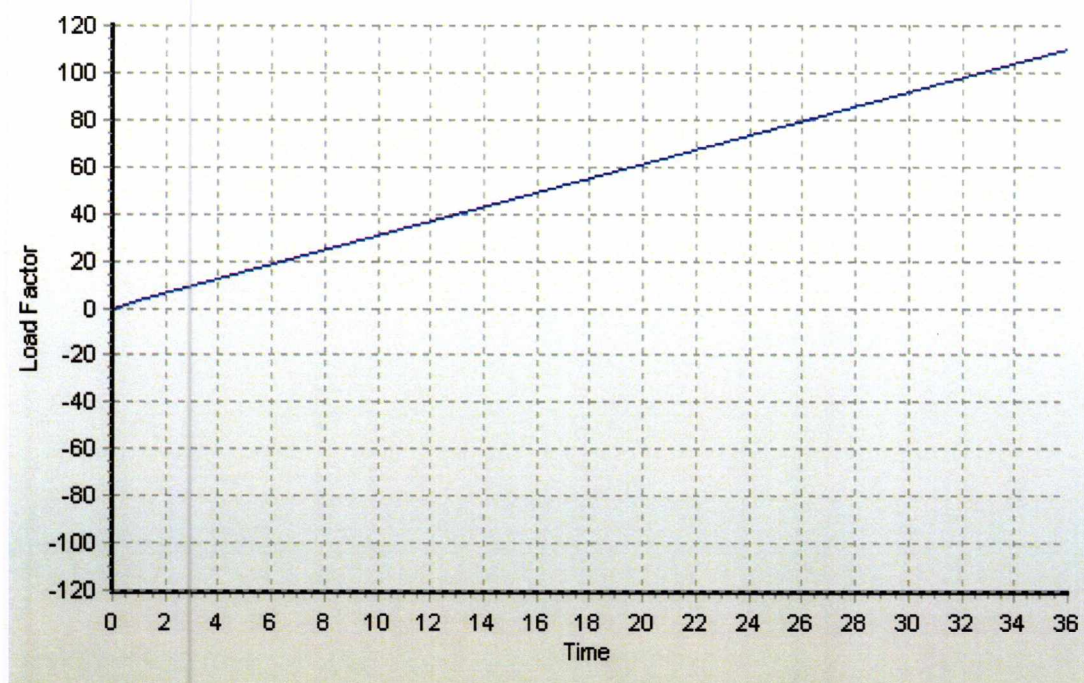
Δόθηκαν διαστάσεις στο πάνω πέλμα καθώς ήταν απαραίτητες για την ανάλυση στο πρόγραμμα, όμως δόθηκαν τέτοιες ώστε να μην επηρεαστούν τα αποτελέσματα.

Δημιουργήθηκαν 4 καινούργιοι κόμβοι (n1*, n2*, n3*, n4*) στις εσωτερικές γωνίες του πλαισίου και ένας στο κέντρο (n5*) για να μπορέσουμε να εισάγουμε τις ράβδους. Οι συνθήκες δέσμευσης καθώς και η προσομοίωση των χαλύβδινων δίσκων και οι βαθμοί ελευθερίας που χρησιμοποιήθηκαν στους κόμβους, είναι ίδιες με τις προηγούμενες περιπτώσεις X-συνδέσμων, ως Σχήμα 3.19.



Σχήμα 3.19. Ενισχυμένο πλαίσιο με X-συνδέσμους L25x3 στο SeismoStruct.

Για την προσομοίωση των πειραματικών δεδομένων με στατική ανάλυση χρονοϊστορίας, χρησιμοποιήθηκε το παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 3.20) ως φόρτιση του πλαισίου. Το διάγραμμα απεικονίζει τις πλευρικές δυνάμεις που ασκήθηκαν στο πλαίσιο, οι οποίες πάρθηκαν από τα αποτελέσματα του πειράματος, σε συνάρτηση με τον αριθμό βημάτων που χρησιμοποιήθηκαν.

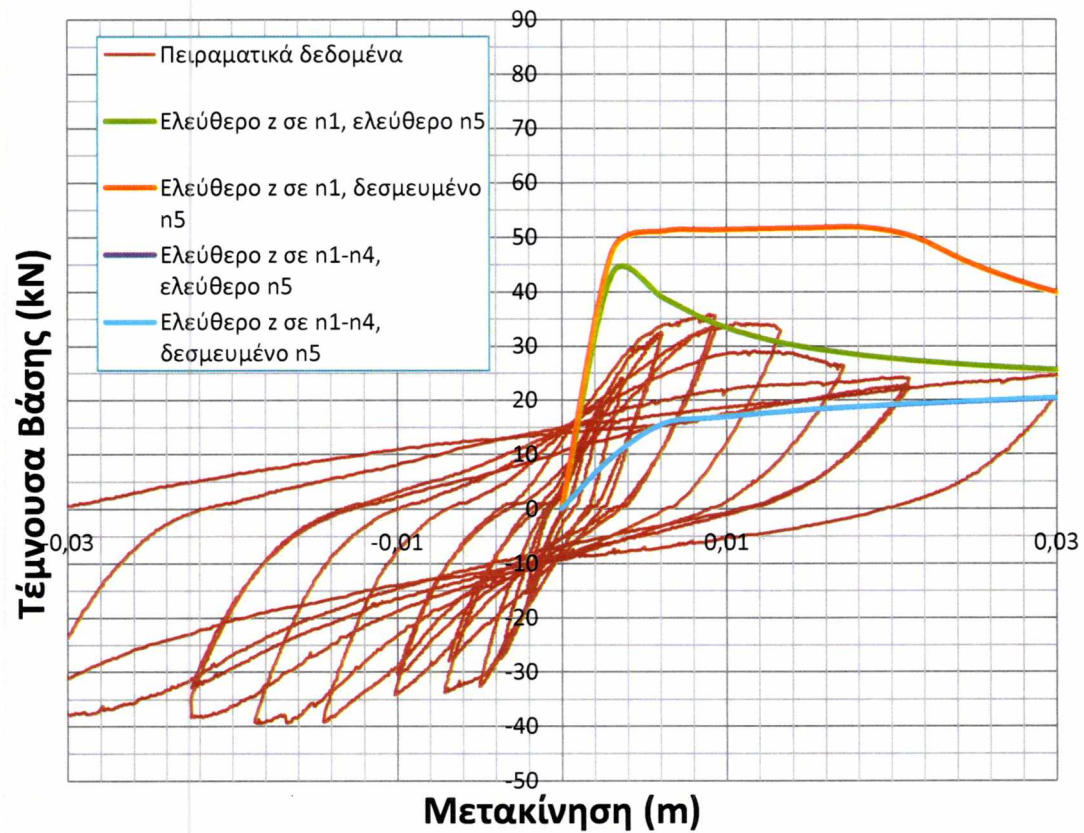


Σχήμα 3.20. Διάγραμμα φόρτισης ενισχυμένου πλαισίου με X-συνδέσμους L25x3.

Στην στατική υπερωθητική ανάλυση η φόρτιση ήταν συγκεντρωμένη δύναμη που επιβλήθηκε σταδιακά στον κόμβο 2 με μέγεθος 110kN.

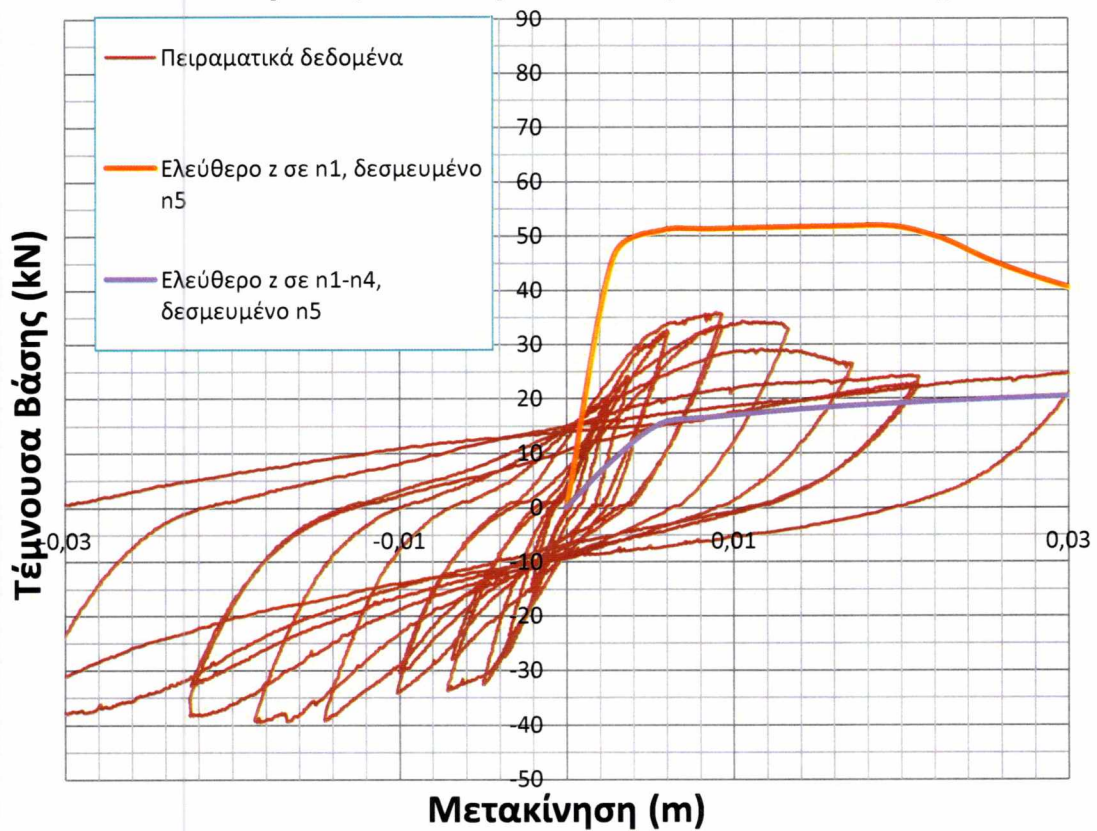
Με την ίδια λογική όπως στις προηγούμενες υποπεριπτώσεις, παρουσιάζονται στα επόμενα τρία Σχήματα 3.21 – 3.23 τα αποτελέσματα των δύο τύπων αναλύσεων αλλά και τα συγκριτικά, συνοδευόμενα από τα αντίστοιχα πειραματικά.

Καμπύλες απόκρισης πλαισίου με Χ-συνδέσμους L25x3 με static time-history analysis

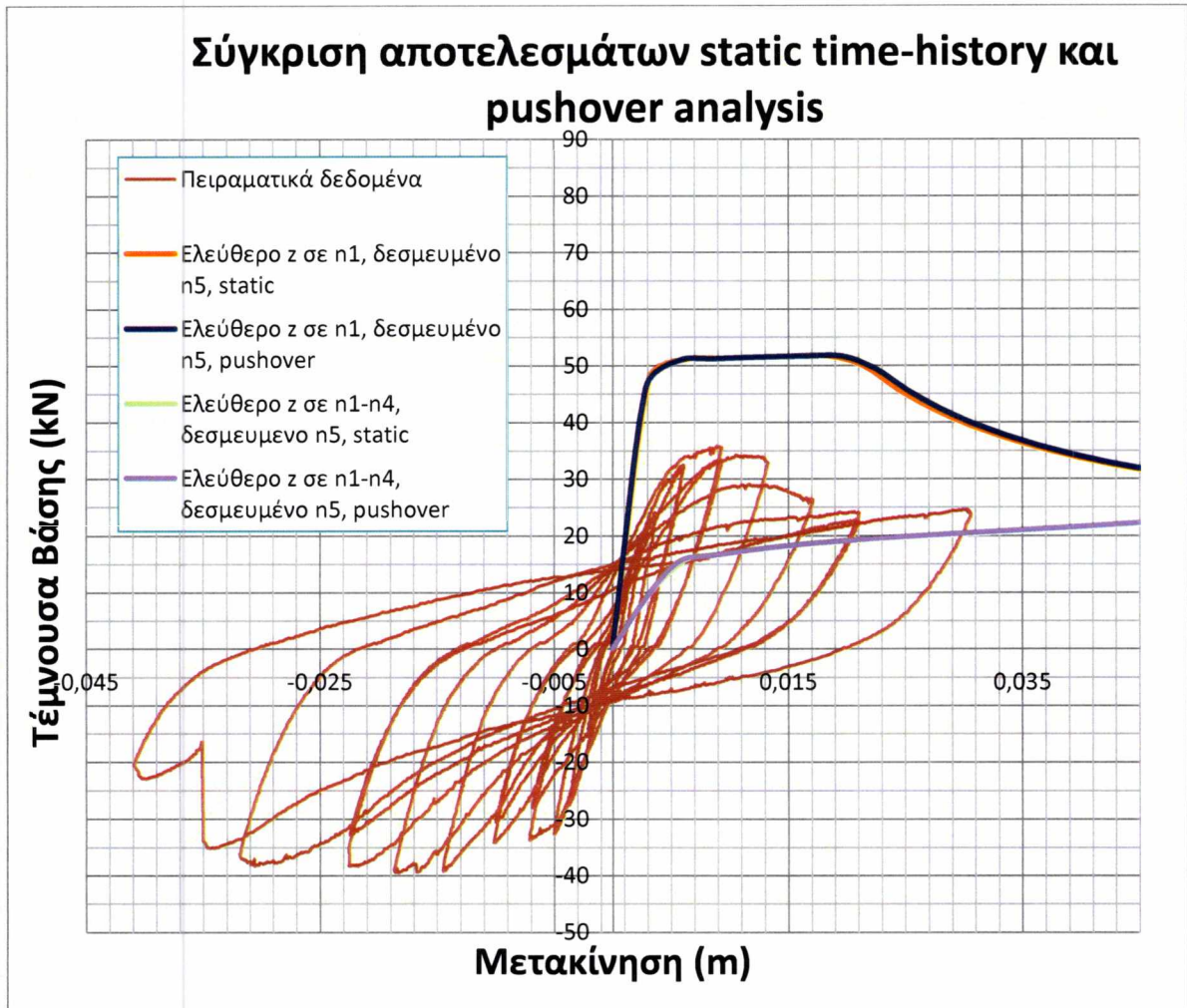


Σχήμα 3.21. Καμπύλες διατμητικής δύναμης - πλευρικής μετατόπισης του ενισχυμένου πλαισίου με Χ-συνδέσμους L25x3 τόσο πειραματικές όσο και με στατική ανάλυση χρονοϊστορίας.

Καμπύλες απόκρισης πλαισίου με Χ-συνδέσμους L25x3 με static pushover analysis



Σχήμα 3.22. Καμπύλες διατμητικής δύναμης - πλευρικής μετατόπισης του ενισχυμένου πλαισίου με Χ-συνδέσμους L25x3 τόσο πειραματικές όσο και με στατική υπερωθητική ανάλυση.



Σχήμα 3.23. Συγκριτικές καμπύλες διατμητικής δύναμης - πλευρικής μετατόπισης του ενισχυμένου πλαισίου με X-συνδέσμους L25x3.

Αναλυτικότερα, στο Σχήμα 3.21 απεικονίζονται τα πειραματικά αποτελέσματα (κόκκινη γραμμή), καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση στο πρόγραμμα SeismoStruct με στατική ανάλυση χρονοϊστορίας για τις εξής περιπτώσεις:

- ελεύθερη η z κατεύθυνση μόνο για τον κόμβο n1* και με ελεύθερο ή δεσμευμένο τον κόμβο n5* (πράσινη και πορτοκαλί γραμμή αντίστοιχα).
- ελεύθερη η z κατεύθυνση μόνο για τους κόμβους n1* και n4* και με ελεύθερο ή δεσμευμένο τον κόμβο n5* (μωβ και γαλάζια γραμμή αντίστοιχα),

Παρατηρείται πως η περίπτωση που προσεγγίζει επαρκώς τα πειραματικά δεδομένα είναι η πρώτη όπου ο κόμβος στο κέντρο του πλαισίου n5* είναι δεσμευμένος και είναι ελεύθερος μόνο η z κατεύθυνση του κόμβου n1*.

Στο Σχήμα 3.22 απεικονίζονται τα πειραματικά αποτελέσματα (κόκκινη γραμμή), καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση στο πρόγραμμα SeismoStruct με στατική υπερωθητική ανάλυση για τις εξής περιπτώσεις:

- ελεύθερη η z κατεύθυνση μόνο για τον κόμβο n1* και δεσμευμένο τον κόμβο n5* (πορτοκαλί γραμμή).
- ελεύθερη η z κατεύθυνση μόνο για τους κόμβους n1* και n4* και δεσμευμένο τον κόμβο n5* (μωβ γραμμή).

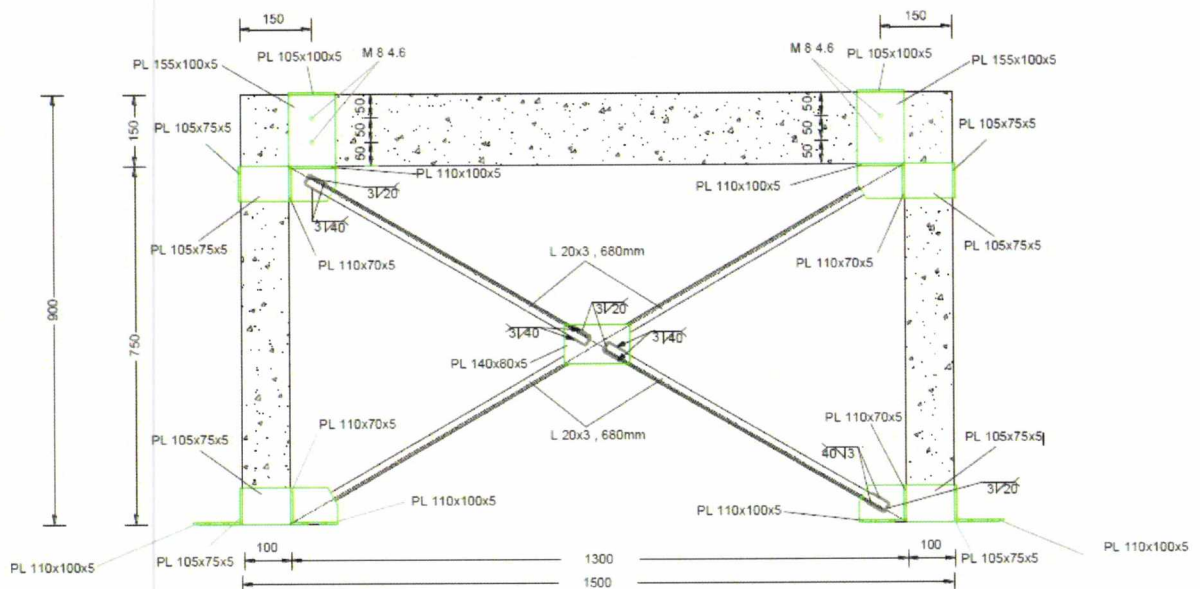
Παρατηρείται πως η περίπτωση που προσεγγίζει επαρκώς τα πειραματικά δεδομένα είναι η τελευταία όπου ο κόμβος στο κέντρο του πλαισίου n5* είναι δεσμευμένος και είναι ελεύθερος μόνο η z κατεύθυνση του κόμβου n1*.

Τέλος, στο Σχήμα 3.23 απεικονίζονται τα πειραματικά αποτελέσματα (κόκκινη γραμμή), καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση στο πρόγραμμα SeismoStruct με τις δυο μορφές ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκαν.

Παρατηρείται πως δεν έχει σημασία η ανάλυση που χρησιμοποιούμε, αυτά που προσεγγίζουν τα πειραματικά δεδομένα καλύτερα είναι αυτά όπου ο κόμβος στο κέντρο του πλαισίου n5* είναι δεσμευμένος και είναι ελεύθερος μόνο η z κατεύθυνση του κόμβου n1*. Επίσης βλέπουμε πως έχουν μικρές διαφορές μεταξύ τους.

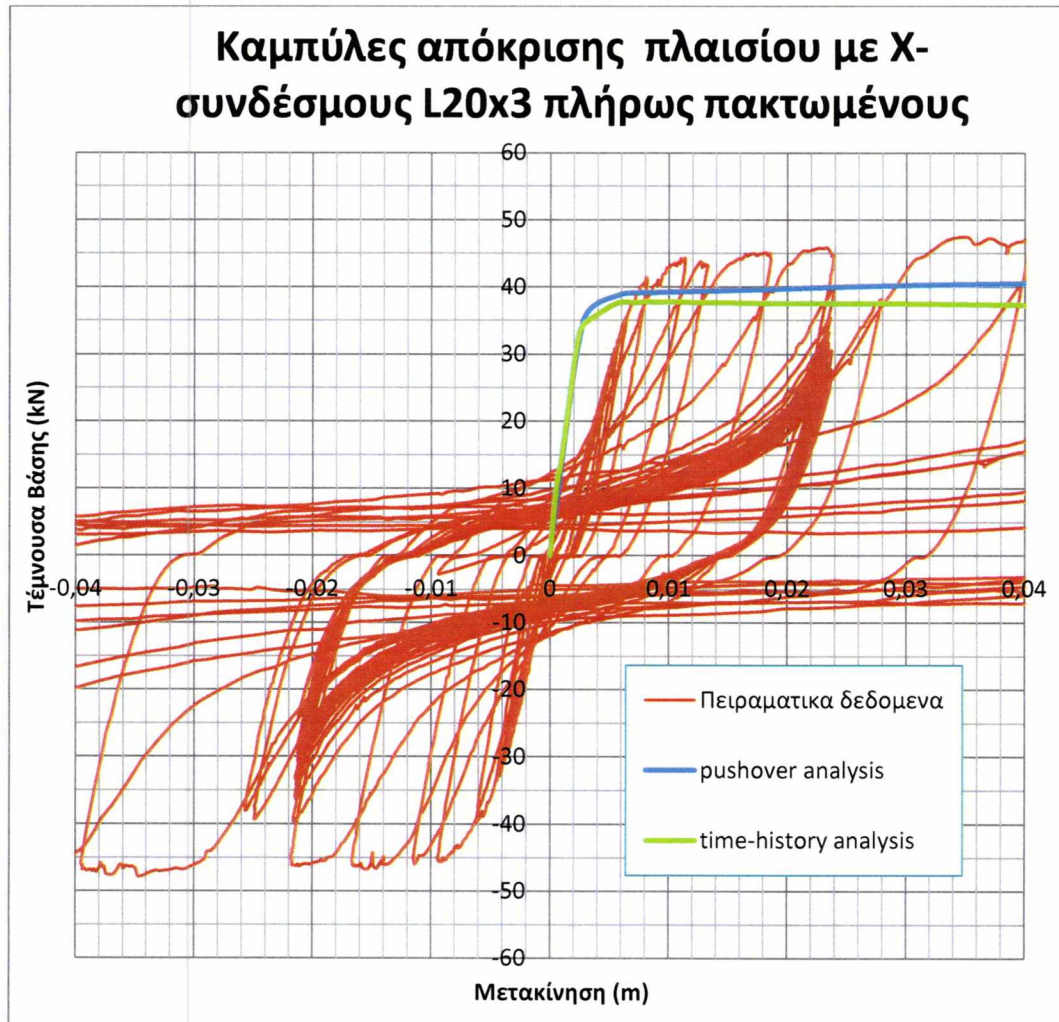
3.2.4 ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΜΕ Χ-ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ L20x3 ΠΛΗΡΩΣ ΠΑΚΤΩΜΕΝΟ

Το συγκεκριμένο πλαίσιο από άποψη γεωμετρίας, υλικών καθώς και φόρτισης ακολουθεί αυτά του πρώτου πλαισίου με Χ-συνδέσμους (κεφάλαιο 3.2.1). η διαφοροποίηση γίνεται στους βαθμούς ελευθερίας. Πιο συγκεκριμένα, οι δύο κόμβοι στην βάση των υποστυλωμάτων n1*, n4* είναι πλήρως πακτωμένοι με δέσμευση όλων των βαθμών ελευθερίας.



Σχήμα 3.24. Διαστάσεις (σε mm) και λεπτομέρειες 4^ο ενισχυμένου πλαισίου (L20x3 πλήρως πακτωμένο).

Με την ίδια λογική όπως στις προηγούμενες υποπεριπτώσεις, παρουσιάζονται στο επόμενο Σχήμα 3.25 τα αποτελέσματα των δύο τύπων αναλύσεων συγκριτικά, συνοδευόμενα από τα αντίστοιχα πειραματικά.



Σχήμα 3.25. Συγκριτικές καμπύλες διατμητικής δύναμης - πλευρικής μετατόπισης του ενισχυμένου πλαισίου με Χ-συνδέσμους L20x3 πλήρως πακτωμένου.

Αναλυτικότερα, στο Σχήμα 3.25 απεικονίζονται τα πειραματικά αποτελέσματα (κόκκινη γραμμή), καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση στο πρόγραμμα SeismoStruct με στατική υπερωθητική ανάλυση (μπλε γραμμή) και με στατική ανάλυση χρονοϊστορίας (πρασινή γραμμή).

Παρατηρείται πως η περίπτωση που προσεγγίζει επαρκώς τα πειραματικά δεδομένα είναι η πρώτη, η στατική υπερωθητική ανάλυση παρόλο που δεν έχουν μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους τα αποτελέσματα των δυο αναλύσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Αρχικά πρέπει να επισημανθεί πως το λογισμικό SeismoStruct είναι πολύ εύκολο στην εκμάθηση του καθώς και στην χρήση του. Αυτό διευκολύνεται χάρις την πλήρη οπτική επαφή με το περιβάλλον εργασίας που έχει ο χρήστης με το λογισμικό. Διαθέτει διάφορους τύπους ανάλυσης έτσι ώστε να μπορεί να προσομοιώσει μια μεγάλη ποικιλία προβλημάτων. Επίσης, ένα θετικό στοιχείο του προγράμματος είναι και η παρουσίαση καμπυλών μετατόπισης καθώς και το παραμορφωμένο σχήμα της κατασκευής σε πραγματικό χρόνο σε συνδυασμό με την ικανότητα της παύσης και της εκ νέου έναρξης της ανάλυσης. Με αυτή την ιδιότητα ο χρήστης έχει πλήρη έλεγχο της ανάλυσης και την δυνατότητα παρέμβασης ανά πάσα στιγμή. Επιπλέον, το πρόγραμμα βρίσκεται σε πλήρη συνεργασία με το περιβάλλον των Windows, δίνοντας τη δυνατότητα εισόδου και εξόδου δεδομένων με διάφορες μορφές αρχείων. Ο χρήστης μπορεί επίσης να ρυθμίσει κριτήρια επιδόσεων, επιτρέποντας του να προσδιορίσει τις στιγμές κατά τις οποίες επιτυγχάνονται διαφορετικές οριακές επιδόσεις όπως δομική βλάβη ή κατάρρευση.

Ένα από τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά την χρήση του λογισμικού SeismoStruct ήταν η έλλειψη πρότυπης διατομής για τους X-συνδέσμους που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ανάλυση. Παρ' όλη τη διαθεσιμότητα μιας μεγάλης ποικιλίας από οπλισμένο σκυρόδεμα, χάλυβα και σύνθετα τμήματα, χρειάστηκε να κατασκευαστεί η διατομή (ισοσκελής γωνιακή).

Τα αποτελέσματα πλησιάζουν ικανοποιητικά τα πειραματικά, γεγονός που καταδεικνύει το συγκεκριμένο πρόγραμμα ως ένα αξιόπιστο λογισμικό, το οποίο λόγω της εύκολης χρήσης του μπορεί να χρησιμοποιηθεί καθημερινά. Εικάζεται πως μπορεί να παρουσιάσει μεγαλύτερη ακρίβεια στην απόκριση για πραγματικές κατασκευές καθώς για την συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά δεδομένα από πολύ μικρότερης κλίμακας κατασκευή.

Προτείνεται όπως το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του ΠΘ ασχοληθεί περισσότερο με το συγκεκριμένο λογισμικό, και το χρησιμοποιήσει (μετά από αξιολόγηση) ως εργαλείο μάθησης και έρευνας σε προ- αλλά και μεταπτυχιακό επίπεδο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Οι παρακάτω βιβλιογραφικές αναφορές σχετίζονται άμεσα με τις πηγές, από τις οποίες αντλήθηκε υλικό για την εκπόνηση της παρούσας Εργασίας. Στις εν λόγω πηγές μπορεί κανείς να ανατρέξει σε δημοσιεύσεις που αφορούν το όλο αντικείμενο, χωρίς να υπάρχει λόγος να επαναληφθούν και εδώ.

1. SeismoSoft, Earthquake Engineering Software Solutions, *SeismoStruct: Large displacement behaviour of space frames under static or dynamic loading, taking into account both geometric nonlinearities and material inelasticity*.
<http://www.seissoft.com/seisstruct>
2. Στατική V, *Σύγχρονες Μέθοδοι Πλαστικής Ανάλυσης Κατασκευών*, Παρουσιάσεις (2007-08) και Διδακτικές Σημειώσεις (2003), Μ. Παπαδρακάκης, Καθηγητής Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ.
3. Βούρας, Γ. (2016): *Πειραματική Διερεύνηση και Αξιολόγηση της Συμπεριφοράς Πλαισίων από Ο/Σ Ενισχυμένων με Συστήματα Ολισθαινόντων και Αρθρωμένων Χ-Συνδέσμων από Χάλυβα*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας (το πλήρες κείμενο μη αναρτηθέν ακόμα στο διαδίκτυο).
4. ΟΑΣΠ, Ερευνητικό Πρόγραμμα με Επιστημονικό Υπεύθυνο τον Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας κ. Φίλιππο Περδικάρη με τίτλο «ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΛΑΙΣΙΩΝ Ο/Σ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΕΜΦΑΤΝΟΥΜΕΝΑ ΤΟΙΧΩΜΑΤΑ Ο/Σ», 2012.
http://www.oasp.gr/assigned_program/2406
5. Tsopelas, P., Vouras, G., Sophianopoulos, D., Papatheocharis, T. and Perdikaris, P. "Sliding X-Braces for Seismic Upgrading of existing RC buildings with pilotis", ICONHIC2016, 1st International Conference on Natural Hazards & Infrastructure, 28-30 June 2016, Chania, Greece, paper No. 189.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000125593

