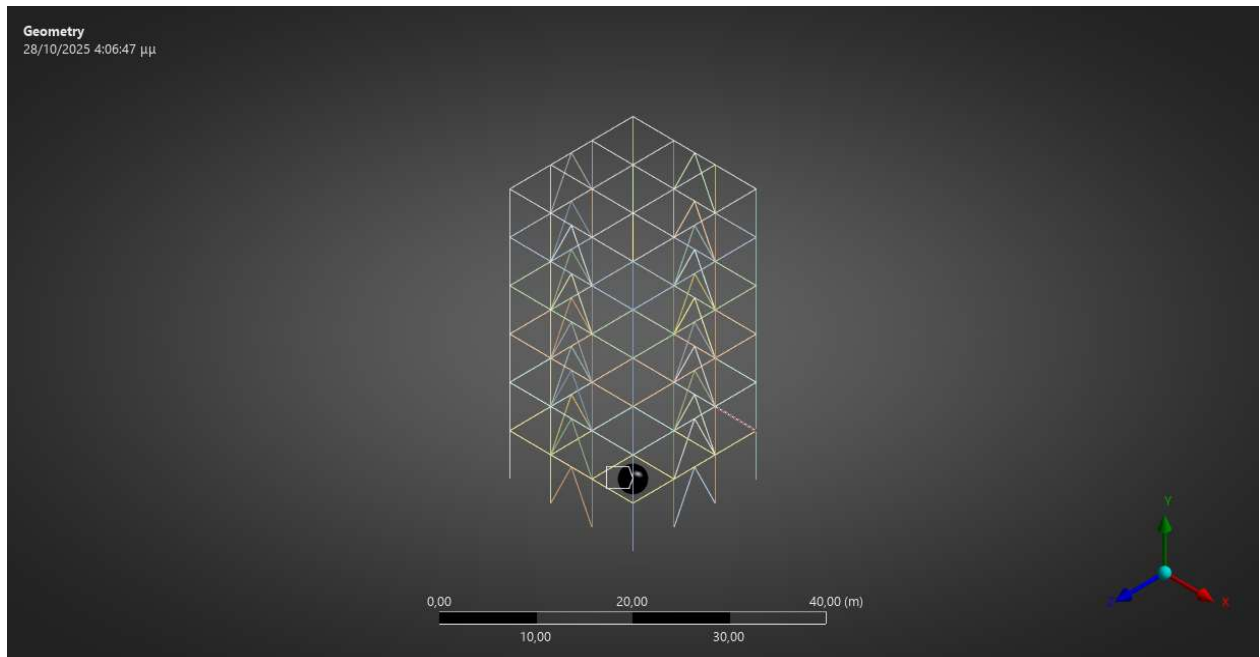


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δυναμική ανάλυση συνδέσμου που δέχεται μόνο εφελκυσμό με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων



ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΓΕΡΟΥΜΑΤΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΑΜ:7689

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΙΩΑΝΝΗΣ ΔΙΑΜΑΝΤΑΚΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2025

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου και έχει ως θέμα την « Δυναμική ανάλυση συνδέσμου που δέχεται μόνο εφελκυσμό με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ».

Η αντοχή και η στατική επάρκεια των μεταλλικών κατασκευών κατά τη διάρκεια σεισμικών δράσεων αποτελούν ζητήματα υψίστης σημασίας. Οι σύνδεσμοι που δέχονται μόνο εφελκυσμό(tension-only) χρησιμοποιούνται ευρέως ως συστήματα για την ενίσχυση της πλευρικής δυσκαμψίας και την απορρόφηση σεισμικής ενέργειας. Το χαρακτηριστικό τους είναι ότι οι σύνδεσμοι δεν δέχονται θλιπτικά φορτία, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα αποδοτικά ως μηχανισμούς διάταξης αντοχής κατά τη σεισμική φόρτιση.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη δυναμική ανάλυση τέτοιων συνδέσμων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, αξιοποιώντας το λογισμικό Ansys για τον υπολογισμό και την αποτίμηση της συμπεριφοράς τους υπό σεισμικά φορτία.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους επιβλέποντες καθηγητές, κ. Ιωάννη Διαμαντάκο του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου και κ. Παπαγιαννόπουλο του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου , για τη βοήθεια και καθοδήγηση που μου παρείχαν για να πραγματοποιηθεί η ακόλουθη εργασία.

Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή: Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Φοιτητής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο Φοιτητής

ΓΕΡΟΥΜΑΤΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

.....

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εξετάζει τη συμπεριφορά και την απόδοση συνδέσμων μεταλλικών κατασκευών που δέχονται μόνο εφελκυσμό υπό συνθήκες σεισμικής φόρτισης.

Η μελέτη ξεκινά με θεωρητική ανασκόπηση σχετικά με τη σημασία των συνδέσμων μεταλλικών κατασκευών, τους τύπους τους, τη μηχανική τους απόκριση και τους πιθανούς τρόπους αστοχίας τους. Ακολουθεί η ανάπτυξη λεπτομερούς μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό ANSYS, προκειμένου να προσομοιωθεί η δυναμική απόκριση ενός συνδέσμου που δέχεται μόνο εφελκυσμό σε σεισμικά φορτία. Τα αποτελέσματα της σεισμικής ανάλυσης περιλαμβάνουν την κατανομή των αξονικών δυνάμεων στους συνδέσμους και στα υποστυλώματα, καθώς και την ολική μετατόπιση της μεταλλικής κατασκευής και τη μετατόπιση της στέγης.

Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν την αποτελεσματικότητα, τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς των εφελκυσόμενων συνδέσμων υπό σεισμική φόρτιση, παρέχοντας χρήσιμα συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα και βελτιώσεις στον σχεδιασμό.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

- Σύνδεσμοι μεταλλικών κατασκευών
- Σύνδεσμος που δέχεται μόνο εφελκυσμό
- Δυναμική ανάλυση
- Σεισμική απόκριση
- Πεπερασμένα στοιχεία
- Αξονική δύναμη
- Μετατόπιση

ABSTRACT

This thesis examines the behavior and performance of tension-only steel braced frames under seismic loading.

The study begins with a theoretical review of the significance of steel bracing systems, their types, their mechanical response and possible failure modes. This is followed by the development of a detailed finite element model in ANSYS software to simulate the dynamic response of the tension-only braced frame under seismic loads. The analysis includes the evaluation of axial force distribution in the braces and columns, along with the total and roof deformation of the structure.

The results highlight the effectiveness, advantages and limitations of tension-only braces under seismic conditions, providing useful conclusions and suggestions for future research and design improvements.

KEYWORDS

- Steel structures
- Tension-only brace
- Dynamic analysis
- Seismic response
- Finite elements
- Axial force
- Displacement

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ	3
ABSTRACT.....	4
KEYWORDS.....	4
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	5
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	8
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
1.2 ΣΤΟΧΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	8
1.3 ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ	10
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ.....	10
2.1.1 ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ.....	11
2.1.2 ΕΙΔΗ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥΣ	12
2.1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	16
2.2 ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΠΟΥ ΔΕΧΕΤΑΙ ΜΟΝΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ.....	18
2.2.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ.....	18
2.2.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ.....	19
2.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΟΥ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ ΜΕ ΣΥΝΔΕΣΜΟ ΕΦΕΚΛΥΣΜΟΥ-ΘΛΙΨΗΣ	20
2.3 ΤΡΟΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ	23
3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	23
3.1.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ, ΥΛΙΚΟ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	24
3.2 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	25
3.2.1 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ (TRANSIENT STRUCTURAL ANALYSIS).....	25
3.2.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΑΙ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ.....	26
3.3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	27
3.3.1 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΣ ΣΤΟ ANSYS	28

3.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	36
4.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	36
4.2 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΑΞΟΝΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ.....	36
4.2.1 ΑΞΟΝΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ.....	36
4.2.2 ΑΞΟΝΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΤΑ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ.....	39
4.3 ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	41
4.3.1 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	42
4.3.2 ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΤΗ ΣΤΕΓΗ.....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	50
5.1 ΣΥΝΟΨΗ ΚΥΡΙΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	50
5.2 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	51
5.3 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	51
6.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	52

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Χαλύβδινη κατασκευή με συνδέσμους (braced steel frame).....	10
Εικόνα 2 Σύνδεσμος με μονή διαγώνια	12
Εικόνα 3 Σύνδεσμος σε σχήμα Χ	13
Εικόνα 4 Σύνδεσμοι τύπου V.....	14
Εικόνα 5 Σύνδεσμος τύπου Κ.....	15
Εικόνα 6 Ενδεικτικές εφαρμογές συνδέσμων μεταλλικών κατασκευών	17
Εικόνα 7 Γενική απεικόνιση του μοντέλου στο ANSYS	23
Εικόνα 8 Διάγραμμα επιτάχυνσης-χρόνου του σεισμού Kobe(1995).....	26
Εικόνα 9 Γενική άποψη της γεωμετρίας του μοντέλου στο SpaceClaim.....	28
Εικόνα 10 Τοποθέτηση μεγάλης μάζας στο μοντέλο μέσω Remote Point στο περιβάλλον ANSYS.....	30
Εικόνα 11 Meshing στους συνδέσμους	31
Εικόνα 12 Default mesh στα υπόλοιπα δομικά στοιχεία της κατασκευής	31
Εικόνα 13 Εφαρμογή σεισμικής δύναμης	32
Εικόνα 14 Οριακές συνθήκες κατασκευής	33
Εικόνα 15 Αξονικές δυνάμεις στους εφελκόμενους συνδέσμους.....	37
Εικόνα 16 Αξονικές δυνάμεις στους συνδέσμους εφελκυσμού-θλίψης.....	38
Εικόνα 17 Αξονικές δυνάμεις στα υποστυλώματα (μοντέλο tension-only).....	39
Εικόνα 18 Αξονικές δυνάμεις στα υποστυλώματα (μοντέλο tension-compression)	40
Εικόνα 19 Μέγιστη μετατόπιση(μοντέλο tension-only)	42
Εικόνα 20 Μετατόπιση στο τέλος της διέγερσης(μοντέλο tension-only)	43
Εικόνα 21 Μέγιστη μετατόπιση(μοντέλο tension-compression).....	44
Εικόνα 22 Μετατόπιση στο τέλος της διέγερσης(μοντέλο tension-compression).....	45
Εικόνα 23 Μέγιστη μετατόπιση της στέγης(μοντέλο tension-only).....	46
Εικόνα 24 Μετατόπιση της στέγης στο τέλος της διέγερσης(μοντέλο tension-only).....	47
Εικόνα 25 Μέγιστη μετατόπιση της στέγης(μοντέλο tension-compression).....	48
Εικόνα 26 Μετατόπιση της στέγης στο τέλος της διέγερσης(μοντέλο tension-compression).....	49

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΠΡΟΛΟΓΟΣ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σχεδιασμός και η ανάλυση κατασκευών που υπόκεινται σε σεισμική φόρτιση παραμένουν από τους σημαντικότερους τομείς έρευνας στη δομοστατική μηχανική. Οι σεισμοί επιβάλλουν σύνθετες και δυναμικές απαιτήσεις στα κτίρια, καθιστώντας απαραίτητη τη μελέτη του τρόπου με τον οποίο συμπεριφέρονται διάφορα δομικά συστήματα υπό τέτοιες συνθήκες. Η ανάγκη για αντισεισμική προστασία είναι ιδιαίτερα επιτακτική σε σειсмоγενείς περιοχές, όπου οι κατασκευές καλούνται να αντέξουν επαναλαμβανόμενες ή και έντονες φορτίσεις χωρίς να παρουσιάσουν σοβαρές βλάβες ή αστοχίες.

Οι μεταλλικές κατασκευές, λόγω της ευελιξίας, της αντοχής και της προσαρμοστικότητας τους, προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε τέτοια σενάρια φόρτισης. Ιδιαίτερα τα συστήματα ανάληψης σεισμικών δυνάμεων, τα οποία αυξάνουν τη δυσκαμψία και περιορίζουν τις πλευρικές μετατοπίσεις, έχουν καθιερωθεί ως μια από τις πιο διαδεδομένες μορφές αντισεισμικού σχεδιασμού. Ο σωστός σχεδιασμός τους συμβάλλει σημαντικά στη συνολική απόδοση και ασφάλεια μιας κατασκευής κατά τη διάρκεια ενός σεισμού.

Τις τελευταίες δεκαετίες, η πρόοδος των υπολογιστικών εργαλείων και των τεχνικών προσομοίωσης έχει επιτρέψει μια βαθύτερη κατανόηση της δομικής απόκρισης υπό σεισμικά γεγονότα. Αυτές οι εξελίξεις επιτρέπουν στους μηχανικούς να αξιολογούν τη δομική συμπεριφορά με μεγαλύτερη ακρίβεια, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την απόδοση, τους πιθανούς τρόπους αστοχίας και τους τομείς βελτίωσης.

1.2 ΣΤΟΧΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αυτή η μελέτη εστιάζει στη σεισμική συμπεριφορά συνδέσμων μεταλλικών κατασκευών που δέχονται μόνο εφελκυσμό. Ο πρωταρχικός στόχος είναι η διερεύνηση της δομικής τους απόκρισης υπό συνθήκες δυναμικής φόρτισης χρησιμοποιώντας ανάλυση χρονοϊστορίας (time-history analysis). Η ανάλυση διεξάγεται χρησιμοποιώντας το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ANSYS, υπό ιδανικές υποθέσεις για υλικά, γεωμετρία και οριακές συνθήκες.

Οι βασικές παράμετροι που μελετήθηκαν περιλαμβάνουν την κατανομή των αξονικών δυνάμεων στους συνδέσμους και στα υποστυλώματα, καθώς και τη συνολική μετατόπιση της μεταλλικής κατασκευής και τη μετατόπιση της στέγης.

Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει μια βαθύτερη κατανόηση της αποτελεσματικότητας και των περιορισμών των εφελκόμενων συνδέσμων μεταλλικών κατασκευών.

1.3 ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Η μελέτη αυτή ακολουθεί μια αριθμητική προσέγγιση για τη διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης μεταλλικών κατασκευών με συνδέσμους που δέχονται μόνο εφελκυσμό. Η μεθοδολογία περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός λεπτομερούς μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας το λογισμικό ANSYS για την προσομοίωση της συμπεριφοράς τόσο συνδέσμων που δέχονται μόνο εφελκυσμό όσο και συνδέσμων που δέχονται εφελκυσμό και θλίψη, προκειμένου να πραγματοποιηθεί σύγκριση της απόκρισής τους υπό σεισμική φόρτιση.

Το υπολογιστικό μοντέλο περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία, όπως υποστυλώματα, δοκούς και συνδέσμους που δέχονται μόνο εφελκυσμό, και υποβάλλεται σε δυναμική φόρτιση μέσω ανάλυσης χρονοϊστορίας (time-history analysis). Επίσης, ορίζονται κατάλληλες οριακές συνθήκες, ιδιότητες υλικών και γεωμετρικές διαμορφώσεις.

Οι βασικές παράμετροι απόκρισης που αξιολογήθηκαν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης περιλαμβάνουν την κατανομή των αξονικών δυνάμεων στους συνδέσμους και στα υποστυλώματα, καθώς και τη συνολική μετατόπιση της μεταλλικής κατασκευής και τη μετατόπιση της στέγης. Τα αποτελέσματα παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την αποτελεσματικότητα και τους περιορισμούς των εφελκυστικών αντιστηρίξεων σε σύγκριση με εκείνες που δέχονται εφελκυσμό και θλίψη υπό σεισμικές συνθήκες.

Αυτό το μεθοδολογικό πλαίσιο επιτρέπει μια αξιόπιστη και ρεαλιστική αξιολόγηση της δομικής απόδοσης, συμβάλλοντας σε μια βαθύτερη κατανόηση του πώς συμπεριφέρονται τέτοια συστήματα κατά τη διάρκεια σεισμικών γεγονότων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Οι σύνδεσμοι μεταλλικών κατασκευών είναι αντισεισμικά συστήματα που χρησιμοποιούνται ευρέως σε όλο τον κόσμο. Οι σύνδεσμοι της κατασκευής (bracing members), συνήθως κατασκευασμένοι από δομικό χάλυβα (structural steel), έχουν σχεδιαστεί για να αποδίδουν αποτελεσματικά τόσο σε εφελκυσμό όσο και σε θλίψη. Σε τέτοια συστήματα, οι δοκοί (beams) και τα υποστυλώματα (columns) φέρουν κατακόρυφα φορτία, ενώ το σύστημα συνδέσμων είναι υπεύθυνο για την αντίσταση στις πλευρικές δυνάμεις. Αυτός ο διαχωρισμός ρόλων επιτρέπει στη δομή να επιτυγχάνει τόσο αντοχή όσο και πλαστιμότητα κατά τη διάρκεια σεισμικών γεγονότων. Επίσης, οι σύνδεσμοι είναι μια πολύ συνηθισμένη μορφή κατασκευής, καθώς είναι οικονομικοί στην κατασκευή και εύκολοι στην ανάλυση.



Εικόνα 1 Χαλύβδινη κατασκευή με συνδέσμους (braced steel frame)

2.1.1 ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

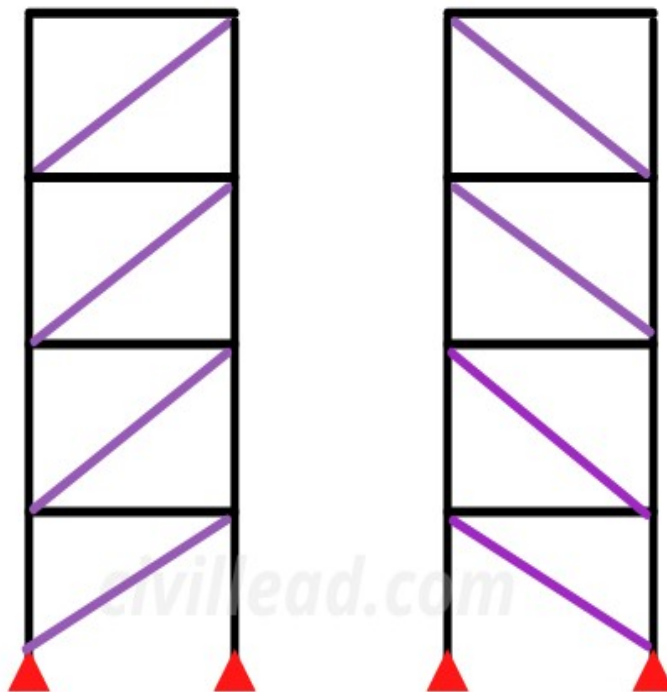
Οι σύνδεσμοι μεταλλικών κατασκευών διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στις σύγχρονες κατασκευές, ειδικά σε περιοχές επιρρεπείς σε σεισμούς ή αιολική δραστηριότητα. Η σημασία τους έγκειται σε διάφορες βασικές πτυχές:

1. Αντίσταση σε Πλευρικές Δυνάμεις: Οι σύνδεσμοι μεταλλικών κατασκευών λειτουργούν ως πρώτη γραμμή άμυνας ενάντια στον άνεμο και τους σεισμούς, διασφαλίζοντας ότι η κατασκευή παραμένει σταθερή και απαραμόρφωτη.
2. Αποφυγή λυγισμού και κατάρρευσης: κατανέμει τις τάσεις ομοιόμορφα. Αυτό αποτρέπει τις τοπικές αστοχίες από το να εξελιχθούν σε γενικευμένες, μειώνοντας τον κίνδυνο κατάρρευσης κατά τη διάρκεια ακραίων γεγονότων. Για παράδειγμα, μια έρευνα για τις ζημιές σε μεταλλικά κτίρια πραγματοποιήθηκε λίγο μετά τον σεισμό του Κόμππε το 1995. Η έρευνα έδειξε ότι από τους 452 συνδέσμους μεταλλικών κατασκευών, μόνο 29 κατέρρευσαν (6%) και 141 είχαν σοβαρές ζημιές (31%), ενώ 282 (63%) υπέστησαν μέτριες ζημιές ή είχαν μόνο μικρές ζημιές.
3. Ευελιξία στον σχεδιασμό: Χρησιμοποιώντας αποτελεσματικά αυτές τις κατασκευές, οι αρχιτέκτονες και οι μηχανικοί μπορούν να δημιουργήσουν σχέδια διατηρώντας την ευελιξία χωρίς να θυσιάζεται η σταθερότητα και η ασφάλεια.
4. Οικονομικοί και αποδοτικοί: Οι σύνδεσμοι μεταλλικών κατασκευών δεν είναι μόνο αποτελεσματικοί αλλά και οικονομικοί στην κατασκευή και την εγκατάσταση. Η απλότητα του σχεδιασμού και της ανάλυσης τους καθιστά πρακτική επιλογή για ένα ευρύ φάσμα έργων, από πολυώροφα κτίρια έως βιομηχανικά κτίρια.

2.1.2 ΕΙΔΗ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥΣ

Οι σύνδεσμοι είναι διαγώνια μέλη που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση της πλευρικής αντοχής μιας κατασκευής. Παρακάτω παρουσιάζονται οι πιο κοινοί τύποι συνδέσμων που χρησιμοποιούνται σε μεταλλικές ή σύνθετες κατασκευές :

- A. Μονή διαγώνια: Ο συγκεκριμένος τύπος θεωρείται αποτελεσματικός στην αντοχή σε πλευρικά φορτία. Σχηματίζεται με την εισαγωγή μονών διαγώνιων στοιχείων στο πλαίσιο (δικτυώματα). Όταν εφαρμόζεται πλευρικό φορτίο στην κατασκευή, οι διαγώνιες υποβάλλονται σε θλίψη, ενώ το οριζόντιο μέλος λειτουργεί ως στοιχείο εφελκυσμού προκειμένου να διατηρηθεί η κατασκευή σε ισοροπία.



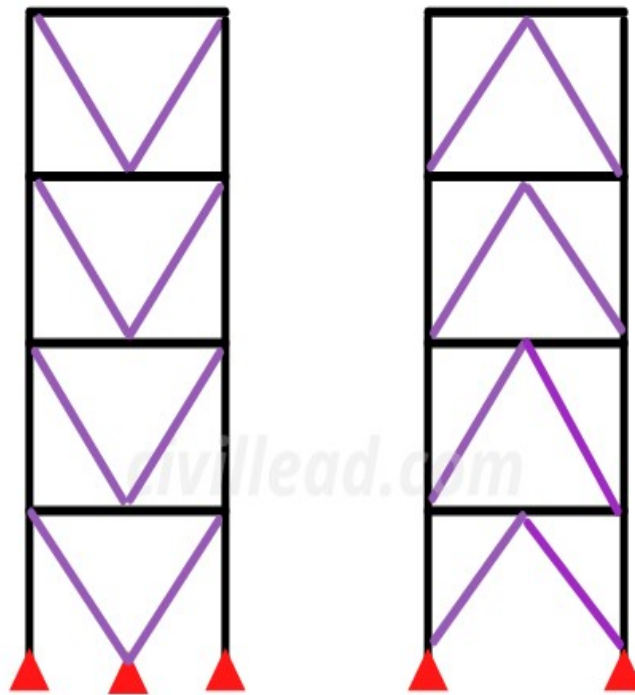
Εικόνα 2 Σύνδεσμος με μονή διαγώνια

- Β. Σύνδεσμοι σε σχήμα Χ(cross bracing/ X-braced frames): Σε αυτό τον τύπο, δύο διαγώνια στοιχεία διασταυρώνονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν ένα σχήμα Χ. Αυτά απλώς πρέπει να είναι ανθεκτικά στον εφελκυσμό, με μία διαγώνιο να λειτουργεί κάθε φορά για να αντιστέκεται στην πλευρική φόρτιση, ανάλογα με την κατεύθυνση φόρτισης. Επομένως, μπορούν να χρησιμοποιηθούν καλώδια για αυτό το είδος συνδέσμου.



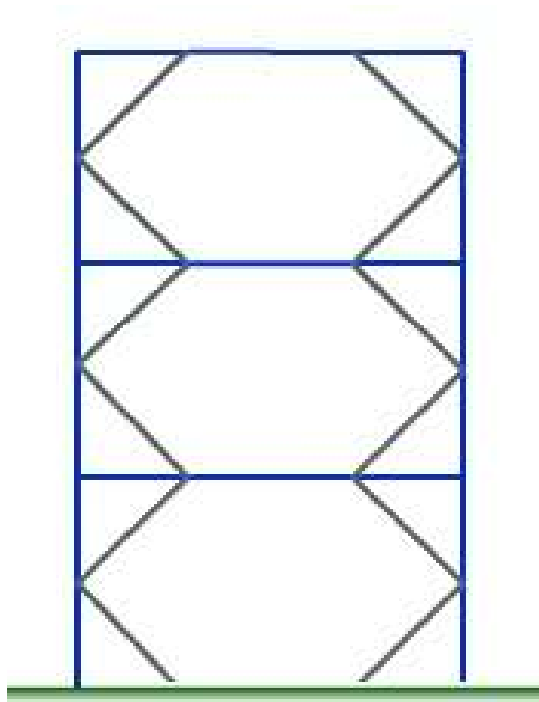
Εικόνα 3 Σύνδεσμος σε σχήμα Χ

- C. Σύνδεσμοι τύπου V(Chevron bracing/ V-bracing): Δύο διαγώνια μέλη που σχηματίζουν σχήμα V εκτείνονται προς τα κάτω από τις δύο επάνω γωνίες ενός οριζόντιου στοιχείου και συναντώνται σε ένα κεντρικό σημείο της κάτω δοκού. Η ανεστραμμένη σύνδεση τύπου V περιλαμβάνει τα δύο μέλη να συναντώνται σε ένα κεντρικό σημείο της επάνω δοκού. Οι σύνδεσμοι τύπου Chevron είναι γνωστοί για την υψηλή ελαστική ακαμψία και αντοχή τους.



Εικόνα 4 Σύνδεσμοι τύπου V

- D. Σύνδεσμοι τύπου Κ (K-bracing): Οι σύνδεσμοι τύπου Κ συνδέονται με τα υποστυλώματα στο μέσο του ύψους τους. Το είδος αυτό προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία για τη δημιουργία ανοιγμάτων στην πρόσοψη του κτηρίου και προκαλεί τη μικρότερη κάμψη στις δοκούς των ορόφων. Ωστόσο, οι σύνδεσμοι τύπου Κ δεν συνιστώνται σε σεισμικές περιοχές, εξαιτίας της πιθανής αστοχίας των υποστυλωμάτων σε περίπτωση που το κατακόρυφο μέλος (σε θλίψη) λυγίσει.



Εικόνα 5 Σύνδεσμος τύπου Κ

2.1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Οι σύνδεσμοι μεταλλικών κατασκευών βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σε διάφορους τομείς. Η ικανότητά τους να προσφέρουν σταθερότητα τους καθιστά ιδιαίτερα δημοφιλείς. Για παράδειγμα χρησιμοποιούνται σε :

Εμπορικά Κτήρια

Για τα εμπορικά κτήρια είναι απαραίτητοι για τη διατήρηση της σταθερότητάς τους κατά τη διάρκεια καταιγίδων και σεισμών. Οι πολυώροφες κατασκευές επωφελούνται ιδιαίτερα από τους συνδέσμους σε σχήμα Χ, καθώς παρέχουν αποτελεσματική αντίσταση στην πλευρική παραμόρφωση.

Στις αστικές περιοχές, όπου ο χώρος είναι περιορισμένος, οι σύνδεσμοι τύπου Κ (K-bracing) και Chevron προσαρμόζονται εύκολα και αποδοτικά, χωρίς να μειώνεται η απόδοση. Περίπου το 40% των εμπορικών κτηρίων πλέον χρησιμοποιούν τέτοια συστήματα, ενισχύοντας έτσι τη δομική αντοχή (Υπουργείο Ενέργειας ΗΠΑ).

Βιομηχανικές Εγκαταστάσεις

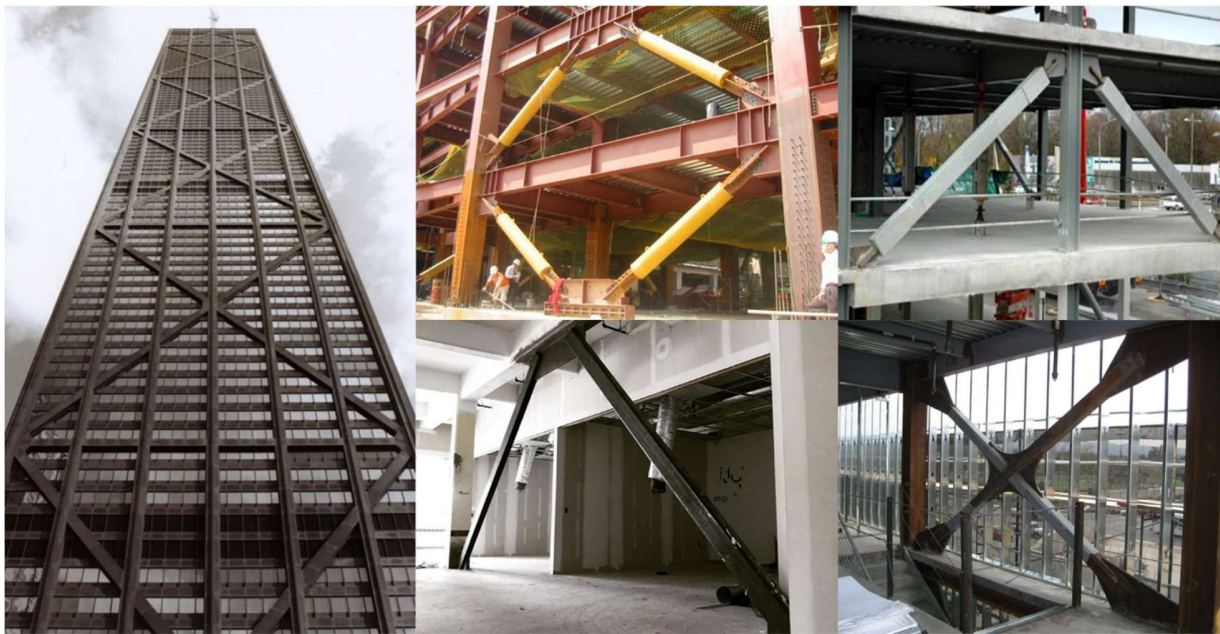
Στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις, οι σύνδεσμοι μεταλλικών κατασκευών αποτελούν θεμελιώδες στοιχείο λόγω της ικανότητάς τους να αντέχουν σε δυναμικά φορτία, δονήσεις, και βαριά μηχανολογικά συστήματα. Από γερανογέφυρες και αγωγούς μεταφοράς υλικών έως αποθήκες και εργοστασιακές εγκαταστάσεις, διασφαλίζουν τη δομική ακεραιότητα και τη λειτουργικότητα σε απαιτητικά περιβάλλοντα.

Κτίρια κατοικιών και γραφείων

Αν και λιγότερο διαδεδομένοι σε σχέση με τις εμπορικές κατασκευές, οι σύνδεσμοι μεταλλικών κατασκευών βρίσκουν ολοένα και μεγαλύτερη εφαρμογή σε σύγχρονες πολυκατοικίες και ψηλά οικιστικά κτίρια, ειδικά σε περιοχές με υψηλή σεισμικότητα. Η χρήση τους συμβάλλει στη βελτίωση της σεισμικής απόκρισης του κτιρίου, περιορίζοντας τις παραμορφώσεις και τις βλάβες.

Γέφυρες και Τομέας Μεταφορών

Οι σύνδεσμοι μεταλλικών κατασκευών αποτελούν θεμελιώδες στοιχείο για τα βασικά δομικά τμήματα των γεφυρών, σιδηροδρομικών σταθμών, αεροδρομίων και άλλων υποδομών μεταφορών. Οι απαιτήσεις για αντοχή σε έντονα δυναμικά φορτία καθιστούν απαραίτητη την ύπαρξη ενισχυμένων συστημάτων πλευρικής ευστάθειας. Η χρήση τους επιτρέπει τον έλεγχο παραμορφώσεων και τη διατήρηση της στατικής επάρκειας ακόμη και υπό συνθήκες ακραίας φόρτισης.



Εικόνα 6 Ενδεικτικές εφαρμογές συνδέσμων μεταλλικών κατασκευών

2.2 ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΠΟΥ ΔΕΧΕΤΑΙ ΜΟΝΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ

Οι σύνδεσμοι που δέχονται μόνο εφελκυσμό είναι κατάλληλα σχεδιασμένοι ώστε να λειτουργούν μόνο υπό εφελκυσμό και καθόλου θλίψη. Συγκεκριμένα, ένας φθινός και εύκολος στην κατασκευή και σχεδίαση σύνδεσμος παραμένει ανενεργός όταν βρίσκεται σε θλίψη και αναπτύσσει δύναμη αντίστασης όταν βρίσκεται σε εφελκυσμό. Ωστόσο, επειδή αυτοί δεν αναπτύσσουν αντοχή σε θλίψη, είναι σημαντικός ο σωστός σχεδιασμός του υπόλοιπου φορέα ώστε να διατηρείται η συνολική ακαμψία και ανθεκτικότητα της κατασκευής σε περιπτώσεις τοπικής αστοχίας.

Ο κύριος σκοπός του συγκεκριμένου συστήματος είναι να αποτρέπει το κτίριο από το να ταλαντώνεται ή να παραμορφώνεται υπερβολικά υπό συνθήκες φόρτισης. Οι σύνδεσμοι λειτουργούν μετατρέποντας τις εφαρμοζόμενες φορτίσεις, όπως αυτές του ανέμου ή του σεισμού, σε δυνάμεις εφελκυσμού μέσα στην ίδια την κατασκευή. Επιπλέον, η απλότητα της στατικής ανάλυσης τέτοιων συστημάτων τα καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικά για προκατασκευασμένες λύσεις και έργα με περιορισμένο χρόνο εκτέλεσης.

Οι σύνδεσμοι που δέχονται μόνο εφελκυσμό είναι ιδιαίτερα διαδεδομένοι σε κτίρια χαμηλού ύψους και ελαφριάς βιομηχανικής χρήσης. Επίσης, παραδείγματα τέτοιων συστημάτων συναντώνται συχνά σε μεταλλικές κατασκευές ή σε περιοχές με υψηλή σεισμικότητα όπου απαιτείται απλή αλλά αποτελεσματική πλευρική ενίσχυση.

2.2.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Οι σύνδεσμοι που δέχονται μόνο εφελκυσμό λειτουργούν αποκλειστικά όταν υπόκεινται σε εφελκυστικές δυνάμεις. Κατά τη διάρκεια σεισμικών ή πλευρικών φορτίσεων, οι σύνδεσμοι επιμηκύνονται και προσδίδουν πλευρική ακαμψία και αντοχή στη δομή. Αυτή η ενεργοποίηση οδηγεί σε έναν ελεγχόμενο δρόμο μετάδοσης φορτίων, όπου οι σύνδεσμοι συμβάλλουν στην αντίσταση της μετατόπισης μέσω αξονικού εφελκυσμού.

Υπό δυναμική διέγερση, όπως ένας σεισμός, οι σύνδεσμοι ενεργοποιούνται εναλλάξ ανάλογα με την κατεύθυνση της κίνησης, προσφέροντας αξιόπιστη και επαναλαμβανόμενη απόκριση. Έτσι, τη στιγμή του εφελκυσμού αναπτύσσουν μια δύναμη αντίστασης ενώ τη στιγμή της θλίψης παραμένουν ανενεργοί. Αυτή η συμπεριφορά επιτρέπει στο σύστημα να ανακατανείμει τη σεισμική ενέργεια μέσω αξονικής παραμόρφωσης, καθιστώντας το ευκολότερο στην προσομοίωση.

2.2.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

Πλεονεκτήματα του συνδέσμου που δέχεται μόνο εφελκυσμό:

1. Απλοποιημένη ανάλυση. Η συμπεριφορά του συστήματος διευκολύνει τη στατική ανάλυση και τη διαδικασία σχεδιασμού.
2. Χαμηλό κόστος. Οι εφελκυσόμενοι σύνδεσμοι είναι συχνά ελαφρύτεροι και λιγότερο δαπανηροί.
3. Ευκολότερος έλεγχος μετά από σεισμό. Η συμπεριφορά των συστημάτων είναι σαφής και ενδείξεις αστοχίας είναι άμεσα ορατές, διευκολύνοντας τον έλεγχο και την αποκατάσταση.
4. Αρχιτεκτονική ευελιξία. Οι εφελκυσόμενοι σύνδεσμοι επιτρέπουν πιο ανοιχτά και ευέλικτα σχέδια χωρίς παρεμβολές στον λειτουργικό χώρο.

Περιορισμοί:

1. Μειωμένη δυσκαμψία. Η πλευρική δυσκαμψία της κατασκευής μειώνεται κατά τη φάση της θλίψης, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερες μετατοπίσεις.
2. Πολυπλοκότητα σχεδιασμού. Ο σχεδιασμός των συνδέσεων απαιτεί ακρίβεια, ώστε να διασφαλίζεται η καλή απόδοση του συστήματος υπό σεισμικά φορτία.
3. Ασύμμετρη απόκριση. Η αδρανοποίηση υπό θλίψη μπορεί να οδηγήσει σε ανισομερή μετατόπιση και παραμόρφωση του πλαισίου.
4. Πιθανότητα αυξημένων μετακινήσεων ορόφου. Η μειωμένη πλευρική ακαμψία μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές σχετικές μετακινήσεις μεταξύ των ορόφων. Ενδεικτικά, σε σεισμό, αναφέρονται τα αποδεκτά όρια 2.5% και 0.5% του ύψους του ορόφου για μέγιστη μεταβατική και μόνιμη σχετική μετακίνηση ορόφων.

2.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΟΥ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ ΜΕ ΣΥΝΔΕΣΜΟ ΕΦΕΚΛΥΣΜΟΥ-ΘΛΙΨΗΣ

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου συνδέσμου είναι κρίσιμη για τη στατική και σεισμική απόδοση μιας κατασκευής. Οι εφελκόμενοι σύνδεσμοι και οι σύνδεσμοι εφελκυσμού-θλίψης παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά, πλεονεκτήματα και περιορισμούς. Μέσα από τη σύγκριση των δύο τύπων επιδιώκεται η ανάδειξη των χαρακτηριστικών που καθορίζουν την επιλογή τους σε διαφορετικά κατασκευαστικά σενάρια.

Εφελκόμενος σύνδεσμος:

- Ενεργοποιείται μόνο υπό εφελκυσμό
- Πιο οικονομικός και απλός στο σχεδιασμό
- Επιτρέπει μεγαλύτερες μετακινήσεις
- Χρήσιμος σε ελαφριές ή προσωρινές κατασκευές
- Επιτρέπει μεγαλύτερη αρχιτεκτονική ευελιξία

Σύνδεσμος εφελκυσμού-θλίψης:

- Ενεργός και σε θλίψη και σε εφελκυσμό
- Παρέχει μεγαλύτερη πλευρική δυσκαμψία
- Απαιτεί μεγαλύτερες διατομές και προστασία από λυγισμό
- Κατάλληλος για κτήρια με υψηλές στατικές ή σεισμικές απαιτήσεις
- Συμβατός με αποσβεστήρες σε απαιτητικές αντισεισμικές εφαρμογές

2.3 ΤΡΟΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ

Η γνώση των πιθανών τρόπων αστοχίας είναι κρίσιμη για την πρόληψη ανεπαρκειών στο σχεδιασμό και για τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συνδέσμου.

A. Αστοχία Μελών (Bracing Members)

- **Αστοχία σε εφελκυσμό**
→ Συνήθως σε εφελκυσμένα συστήματα. Προκαλείται όταν ο σύνδεσμος υπερβεί τη μέγιστη εφελκυστική αντοχή του.
- **Λυγισμός σε θλίψη (buckling)**
→ Σε συστήματα εφελκυσμού-θλίψης. Συχνός μηχανισμός αστοχίας όταν ο λόγος λεπτότητας(μήκος προς διατομή) του συνδέσμου είναι μεγάλος.
- **Τοπικός λυγισμός (local buckling)**
→ Π.χ. Τοπικός λυγισμός τμημάτων της διατομής του συνδέσμου πριν την ολική αστοχία.

B. Αστοχία Συνδέσεων (Connections)

- **Κοχλίες: διάτμηση ή ολίσθηση**
→ Εμφανίζεται σε ανεπαρκώς σχεδιασμένες ή υπερφορτισμένες συνδέσεις.
- **Συγκολλήσεις: θραύση ή ρωγμές κόπωσης**
→ Ειδικά σε σημεία υψηλών τάσεων ή επαναλαμβανόμενης φόρτισης.
- **Αστοχία πλακών κόμβων (gusset plates)**
→ Λόγω αστοχίας σε διάτμηση, καμπτική παραμόρφωση ή ανεπαρκή πάκτωση.

Γ. Αθροιστικά Φαινόμενα (Cumulative Effects)

- **Κόπωση υλικού**
→ Ιδιαίτερα σε σεισμικές δράσεις με πολλούς κύκλους παραμόρφωσης.
- **Πλαστικοποίηση ή υπέρβαση τοπικής οριακής κατάστασης**
→ Όταν κάποιο μέλος ξεπεράσει τα όριά του σε εφελκυσμό ή θλίψη και μπει σε πλαστική παραμόρφωση.

Δ. Συστημικές Αστοχίες (Global/System-Level Failures)

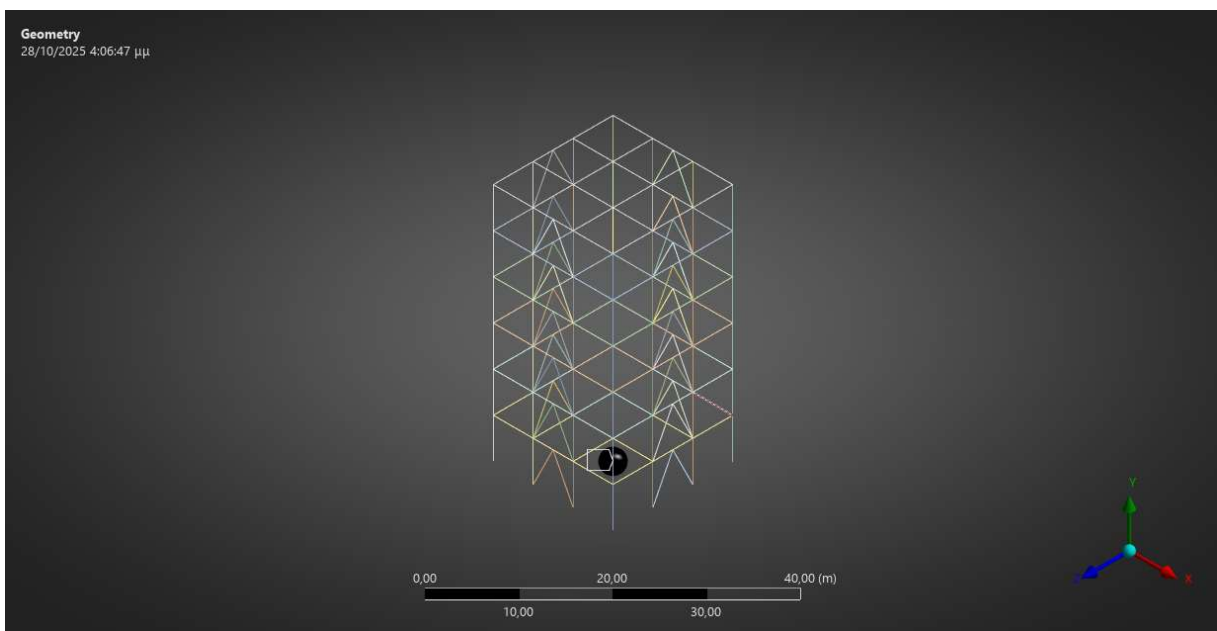
- **Απώλεια πλευρικής δυσκαμψίας (soft story mechanism)**
→ Όταν ένας όροφος χάνει την πλευρική του ακαμψία, συχνά λόγω αστοχίας συνδέσμων.
- **Μη γραμμική μετακίνηση (excessive drift)**
→ Όταν οι σύνδεσμοι δεν μπορούν να ελέγξουν τις πλευρικές μετακινήσεις.
- **Κατάρρευση μηχανισμού (collapse mechanism)**
→ Συνδυασμένη αστοχία μελών που οδηγεί σε ολική κατάρρευση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το υπό μελέτη μοντέλο αντιπροσωπεύει ένα πολυώροφο μεταλλικό κτίριο , το οποίο περιλαμβάνει διαγώνιους συνδέσμους σε επιλεγμένα φατνώματα για την αύξηση της πλευρικής δυσκαμψίας του συστήματος.

Ο φορέας αναπτύχθηκε στο περιβάλλον του λογισμικού ANSYS, αξιοποιώντας τις δυνατότητες πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων και των κόμβων. Η μοντελοποίηση έγινε με σκοπό τη διερεύνηση της απόκρισης του συστήματος υπό σεισμικά φορτία.



Εικόνα 7 Γενική απεικόνιση του μοντέλου στο ANSYS

3.1.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ, ΥΛΙΚΟ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε αντιπροσωπεύει ένα πολυώροφο μεταλλικό κτίριο ύψους 36 μέτρων. Η κάτοψη του μοντέλου έχει συνολικό μήκος 18 m, αποτελούμενη από 3 ανοίγματα των 6 m.

Οι δοκοί και τα υποστυλώματα έχουν επιλεγεί από διατομές τύπου IPE και HEB αντίστοιχα, ενώ οι σύνδεσμοι έχουν υλοποιηθεί με διατομές τύπου SHS. Ειδικότερα, για το συγκεκριμένο μοντέλο έχουν χρησιμοποιηθεί οι διατομές HEB 400 για τα υποστυλώματα, IPE 240 για τις δοκούς και SHS 80 X 80 X 5 για τους συνδέσμους. Οι σύνδεσμοι έχουν μοντελοποιηθεί ως μόνο-εφελκυστικά (tension-only) στοιχεία, ώστε να αναπαραστήσουν τη συμπεριφορά των πραγματικών εφελκυστικών συνδέσμων κατά τη διάρκεια σεισμικών φορτίσεων.

Ως υλικό κατασκευής, χρησιμοποιήθηκε δομικός χάλυβας (structural steel), με χαρακτηριστικές ιδιότητες: μέτρο ελαστικότητας $E = 200 \text{ GPa}$, λόγος Poisson $\nu = 0.3$ και πυκνότητα $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$.

Κατά τη μοντελοποίηση, υιοθετήθηκαν οι ακόλουθες παραδοχές:

- Όλα τα μέλη θεωρούνται πλήρως συνδεδεμένα στους κόμβους.
- Οι ιδιότητες του υλικού είναι ελαστικές, ισοτροπικές και ομοιογενείς.
- Οι γεωμετρικές ατέλειες και αρχικές παραμορφώσεις δεν λαμβάνονται υπόψη στη φάση της γραμμικής ανάλυσης.
- Η επίδραση των μεγάλων μετακινήσεων λαμβάνεται υπόψη στα επόμενα στάδια της ανάλυσης.

3.2 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Η διαμόρφωση της ανάλυσης αποτελεί κρίσιμο βήμα για την αξιόπιστη εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης της κατασκευής. Δεδομένου ότι στόχος είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς ενός εφελκυσμένου συνδέσμου μεταλλικής κατασκευής υπό δυναμική φόρτιση, επιλέχθηκε η χρονικά μεταβαλλόμενη δυναμική ανάλυση (transient structural analysis) ως η πλέον κατάλληλη μέθοδος για την ακριβή προσομοίωση της σεισμικής συμπεριφοράς.

Η ανάλυση περιλαμβάνει τον καθορισμό της σεισμικής διέγερσης μέσω χρονοϊστοριών επιτάχυνσης εδάφους, τον τρόπο εφαρμογής της φόρτισης στο μοντέλο, καθώς και τις οριακές συνθήκες που αναπαριστούν τους περιορισμούς στήριξης της κατασκευής. Οι παράμετροι αυτοί είναι κρίσιμοι για την εξασφάλιση ρεαλιστικής προσομοίωσης της συμπεριφοράς της φέρουσας κατασκευής κατά τη διάρκεια της σεισμικής φόρτισης.

3.2.1 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ (TRANSIENT STRUCTURAL ANALYSIS)

Για τη μελέτη της δυναμικής απόκρισης της κατασκευής υπό σεισμική διέγερση, πραγματοποιήθηκε μια δυναμική ανάλυση χρονοϊστορίας (transient structural time history analysis). Ο συγκεκριμένος τύπος ανάλυσης λαμβάνει υπόψη τα φαινόμενα αδράνειας και απόσβεσης, γεγονός που τον καθιστά κατάλληλο για τη μελέτη της συμπεριφοράς της κατασκευής με την πάροδο του χρόνου κατά τη διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος.

Η ανάλυση περιλάμβανε την εφαρμογή μιας ισοδύναμης σεισμικής διέγερσης στη βάση, η οποία προσομοιώθηκε ως δύναμη που ασκείται σε ένα σημείο αναφοράς που συνδέει όλους τους κόμβους της βάσης, αντιπροσωπεύοντας την εδαφική κίνηση. Στο σημείο αυτό, προστέθηκε μια μεγάλη μάζα ώστε να προσομοιωθεί η εδαφική επιτάχυνση μέσω του δεύτερου νόμου του Νεύτωνα ($F = m \cdot a$). Αυτή η τεχνική (large mass approach) επέτρεψε την αξιολόγηση των χρονικά εξαρτώμενων μετατοπίσεων, των δυναμικών χαρακτηριστικών και τη συνολική συμπεριφορά του συστήματος.

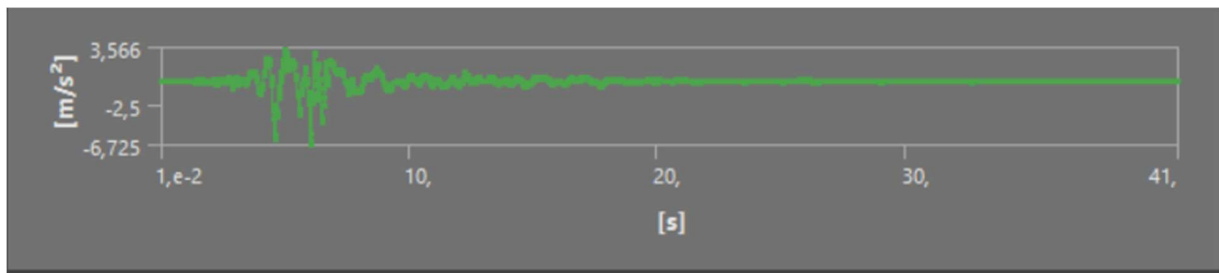
Διενεργήθηκαν δύο ξεχωριστές αναλύσεις της κατασκευής: μία με συνδέσμους που λειτουργούν μόνο σε εφελκυσμό και μία με συνδέσμους που λειτουργούν τόσο σε εφελκυσμό όσο και σε θλίψη, ώστε να παρατηρηθούν και να συγκριθούν οι διαφορές στην απόκριση υπό την ίδια σεισμική διέγερση.

3.2.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΑΙ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ

Για την προσομοίωση της σεισμικής διέγερσης, εφαρμόστηκε δυναμικό φορτίο στο σημείο αναφοράς της κατασκευής που συνδέει τους κόμβους της βάσης(base excitation). Η σεισμική διέγερση εφαρμόστηκε ως χρονική κατανομή δύναμης (time-dependent force), η οποία αντιπροσώπευε τη σεισμική επιτάχυνση μέσω της σχέσης $F=m \cdot a$, όπου m είναι η μάζα που τοποθετήθηκε στο σημείο αναφοράς της βάσης.

Η σεισμική διέγερση εφαρμόστηκε στον οριζόντιο άξονα X, ώστε να διερευνηθεί η πλευρική απόκριση της κατασκευής. Η επιτάχυνση χρησιμοποιήθηκε σε μορφή πινάκων χρόνου – επιτάχυνσης και εισήχθη μέσω του ANSYS ως επιβαλλόμενη δύναμη. Η καταγραφή σεισμικής επιτάχυνσης προήλθε από τον σεισμό του Kobe (Ιαπωνία, 1995), διασφαλίζοντας ρεαλιστική αναπαράσταση ενός έντονου σεισμικού γεγονότος.

Οι συνθήκες στήριξης εφαρμόστηκαν στη βάση της κατασκευής, με περιορισμό στους βαθμούς ελευθερίας Y και Z, επιτρέποντας μόνο την κίνηση κατά την κατεύθυνση X υπό σεισμική διέγερση.



Εικόνα 8 Διάγραμμα επιτάχυνσης-χρόνου του σεισμού Kobe(1995)

3.3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Για τη μελέτη της σεισμικής απόκρισης της κατασκευής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, μία από τις πιο αξιόπιστες και διαδεδομένες τεχνικές στην ανάλυση σύνθετων δομικών συστημάτων. Η μέθοδος αυτή, επιτρέπει την προσομοίωση της συμπεριφοράς της κατασκευής με υψηλό βαθμό ακρίβειας, λαμβάνοντας υπόψη σημαντικά δυναμικά φαινόμενα όπως η αδράνεια, η απόσβεση, καθώς και η χρονικά μεταβαλλόμενη εφαρμογή φορτίων, όπως είναι η σεισμική διέγερση.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη του μοντέλου ήταν το **ANSYS**, το οποίο επιλέχθηκε λόγω της ισχυρής του ικανότητας στην εκτέλεση δυναμικών αναλύσεων και της ευρείας χρήσης του στον τομέα της στατικής και δυναμικής μελέτης κατασκευών. Το ANSYS παρέχει ευέλικτες δυνατότητες μοντελοποίησης, ακρίβεια στην προσομοίωση σύνθετων κατασκευών και αξιόπιστους αριθμητικούς αλγορίθμους επίλυσης, γεγονός που το καθιστά ιδανικό για την προσομοίωση της συμπεριφοράς φέρουσας κατασκευής υπό σεισμικά φορτία.

Η χρήση πεπερασμένων στοιχείων σε αυτή τη μελέτη επέτρεψε την αποτύπωση της πραγματικής συμπεριφοράς του φέροντος συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τις δυναμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των δομικών μελών, την κατανομή των εσωτερικών δυνάμεων, καθώς και τη συμβολή των συνδέσμων στην απορρόφηση της σεισμικής ενέργειας.

3.3.1 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΣ ΣΤΟ ANSYS

Για την ανάπτυξη του υπολογιστικού μοντέλου του υπό μελέτη κτιρίου, ακολουθήθηκε μία συστηματική διαδικασία μέσω του λογισμικού ANSYS, με στόχο την ακριβή προσομοίωση της σεισμικής απόκρισης του συστήματος.

Γεωμετρία:

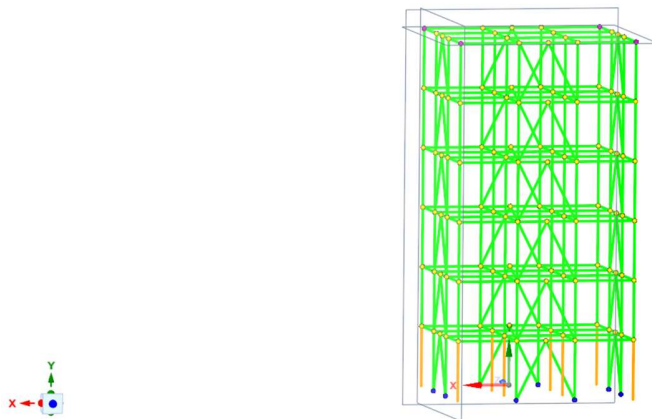
Η γεωμετρία του μοντέλου δημιουργήθηκε στο περιβάλλον SpaceClaim του ANSYS, αξιοποιώντας τις δυνατότητές του για παραμετρική μοντελοποίηση. Το μοντέλο αντιπροσωπεύει ένα πολυώροφο μεταλλικό πλαίσιο έξι επιπέδων, με διαστάσεις περίπου 18×18 μέτρα στην κάτοψη και 36 μέτρα καθ' ύψος.

Η κατασκευή περιλαμβάνει δοκούς (IPE 240), υποστυλώματα (HEB 400) και συνδέσμους (SHS 80X80X5), διατεταγμένα σε κανονική και συμμετρική διάταξη.

Κατά τη σχεδίαση, εφαρμόστηκε η εντολή “Share topology”. Αυτή εξασφαλίζει τη σωστή σύνδεση μεταξύ των στοιχείων και αποτρέπει την ύπαρξη μη ρεαλιστικών ασυνεχειών κατά την ανάλυση.

Click an object. Double-click to select an edge loop. Triple-click to select a solid.

Ansys
2025 R1
STUDENT



Εικόνα 9 Γενική άποψη της γεωμετρίας του μοντέλου στο SpaceClaim

Υλικό:

Ως υλικό κατασκευής, χρησιμοποιήθηκε δομικός χάλυβας (structural steel), με χαρακτηριστικές ιδιότητες: μέτρο ελαστικότητας $E = 200 \text{ GPa}$, λόγος Poisson $\nu = 0.3$ και πυκνότητα $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$. Το υλικό αυτό επιλέχθηκε λόγω της ευρείας χρήσης του στις μεταλλικές κατασκευές και της ικανότητάς του να αποδίδει ρεαλιστικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά που απαιτούνται για δυναμική ανάλυση.

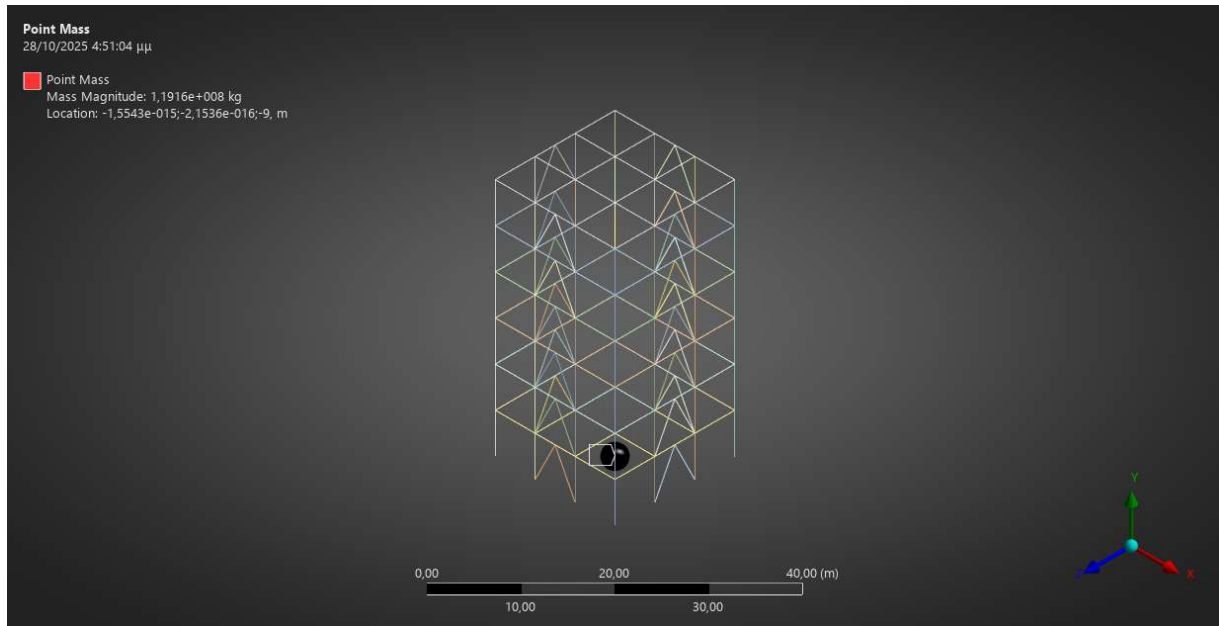
Συμπεριφορά:

Για τους συνδέσμους εφαρμόστηκε συμπεριφορά μόνο σε εφελκυσμό (tension-only behavior), δηλαδή θεωρήθηκε ότι δεν συμμετέχουν στη μεταφορά φορτίων θλίψης. Η ρύθμιση αυτή πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον του ANSYS, όπου οι αντίστοιχοι σύνδεσμοι ορίστηκαν με μόνο-εφελκυστικά χαρακτηριστικά.

Μέθοδος μεγάλης μάζας (Large Mass Approach):

Για την εφαρμογή της μεθόδου "Large Mass", δημιουργήθηκε ένα σημείο αναφοράς (Remote point) στη βάση της κατασκευής, το οποίο συνδέει όλους τους κόμβους της βάσης. Στο σημείο αυτό εφαρμόστηκε μάζα πολύ μεγάλου μεγέθους, η οποία επιτρέπει την εφαρμογή δυναμικών φορτίσεων (όπως σεισμικών) με ακρίβεια, εστιάζοντας στην κινηματική απόκριση της κατασκευής.

Η τιμή της μάζας ορίστηκε ίση με $1,1916 \times 10^8 \text{ kg}$, δηλαδή 1.000 φορές μεγαλύτερη από την πραγματική μάζα του φορέα ($\sim 1,1916 \times 10^5 \text{ kg}$), ώστε να εξασφαλιστεί αδρανειακή απόκριση και να ενεργοποιηθεί η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος προς την επιθυμητή διεύθυνση.



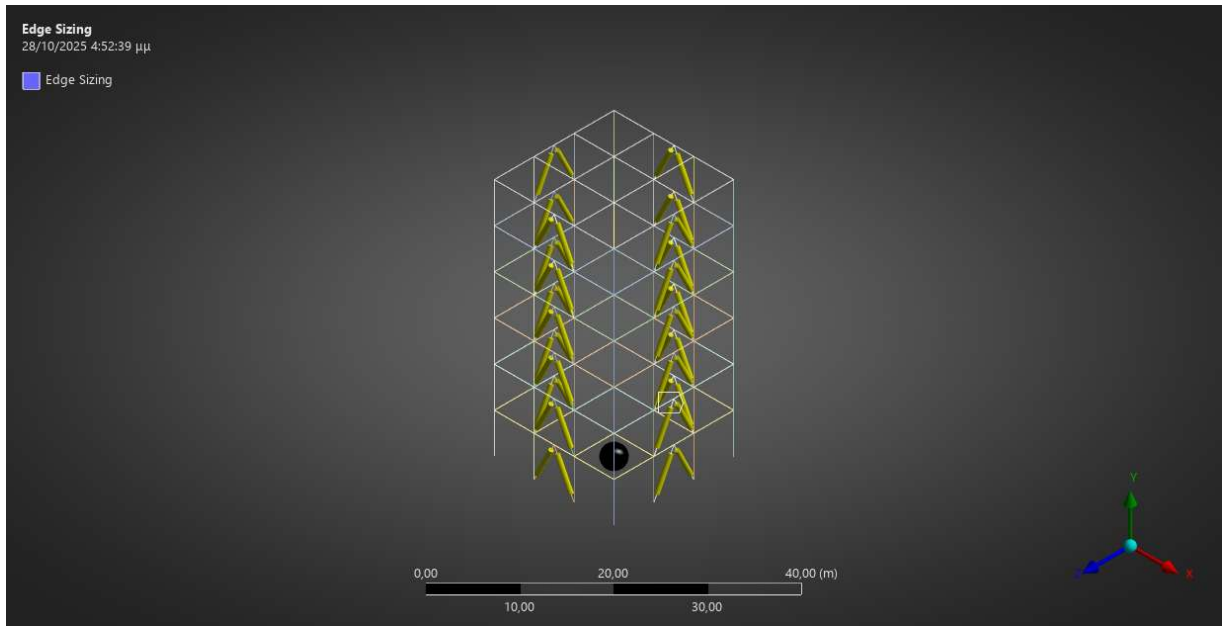
Εικόνα 10 Τοποθέτηση μεγάλης μάζας στο μοντέλο μέσω Remote Point στο περιβάλλον ANSYS

Πλέγμα (Meshing):

Για την αριθμητική ανάλυση της κατασκευής στο περιβάλλον του ANSYS, εφαρμόστηκε κατάλληλη δημιουργία πλέγματος (meshing) τόσο για τους συνδέσμους όσο και για τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία.

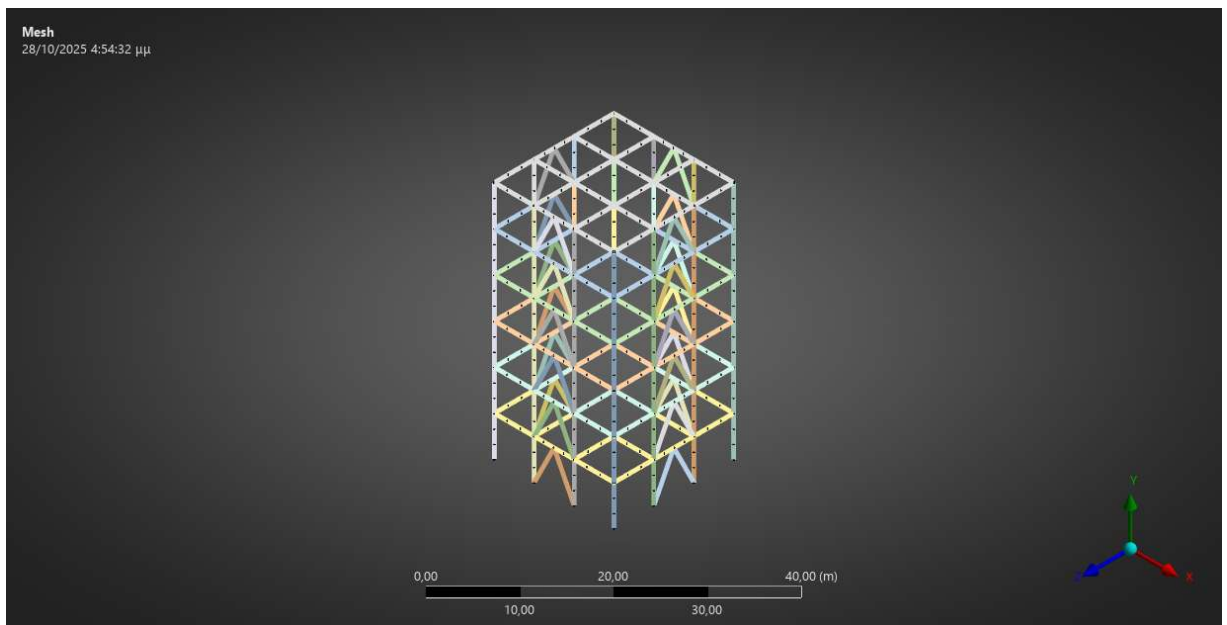
Πιο συγκεκριμένα:

- Για τους συνδέσμους(braces) χρησιμοποιήθηκε ειδική ρύθμιση πλέγματος τύπου “Edge Sizing”, ώστε να εξασφαλιστεί μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό των εντατικών μεγεθών κατά μήκος των γραμμικών τους στοιχείων, όπου αναμένονται έντονες μεταβολές τάσεων λόγω της μόνο-εφελκυστικής συμπεριφοράς.



Εικόνα 11 Meshing στους συνδέσμους

- Για τα υπόλοιπα στοιχεία της κατασκευής (δοκοί, υποστυλώματα κ.λπ.) εφαρμόστηκε προκαθορισμένο πλέγμα (default mesh), όπως ορίζεται από το λογισμικό.



Εικόνα 12 Default mesh στα υπόλοιπα δομικά στοιχεία της κατασκευής

Προσομοίωση Σεισμικής Φόρτισης (Remote Force):

Για την προσομοίωση της σεισμικής διέγερσης, εφαρμόστηκε **απομακρυσμένη δύναμη (Remote Force)** στο σημείο της μεγάλης μάζας που είχε προηγουμένως οριστεί στη βάση της κατασκευής. Η δύναμη αυτή εφαρμόστηκε κατά μήκος του άξονα Χ, ο οποίος αντιπροσωπεύει τη διεύθυνση της σεισμικής διέγερσης.

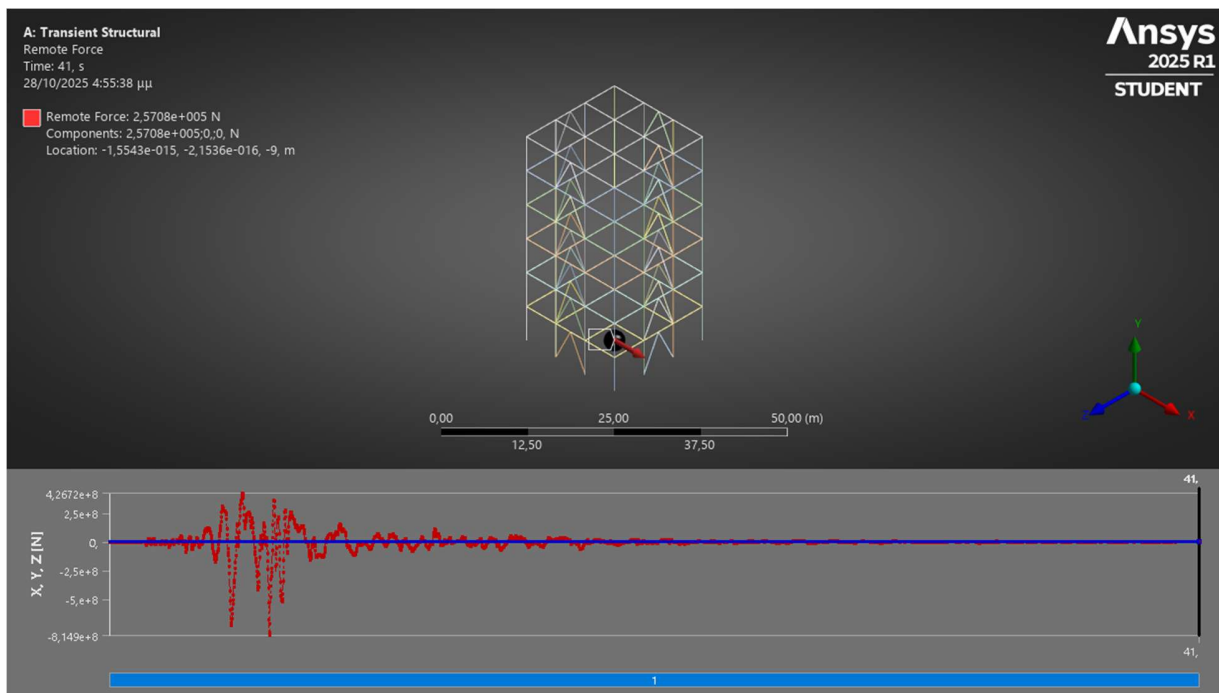
Η εφαρμοζόμενη δύναμη υπολογίστηκε σύμφωνα με τη θεμελιώδη σχέση της δεύτερης αρχής του Νεύτωνα:

$$F = m \times a$$

όπου:

- **m** είναι η μεγάλη μάζα που προσομοιώνει τη βάση του φορέα ($1,1916 \times 10^8$ kg)
- **a** είναι η σεισμική επιτάχυνση, όπως δίνεται από το επιταχυνσιογράφημα του σεισμού του Kobe (1995)

Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η εφαρμογή της σεισμικής διέγερσης ως δύναμης στη βάση, μεταφέροντας ρεαλιστικά την επίδραση του σεισμού στο δομικό σύστημα.



Εικόνα 13 Εφαρμογή σεισμικής δύναμης

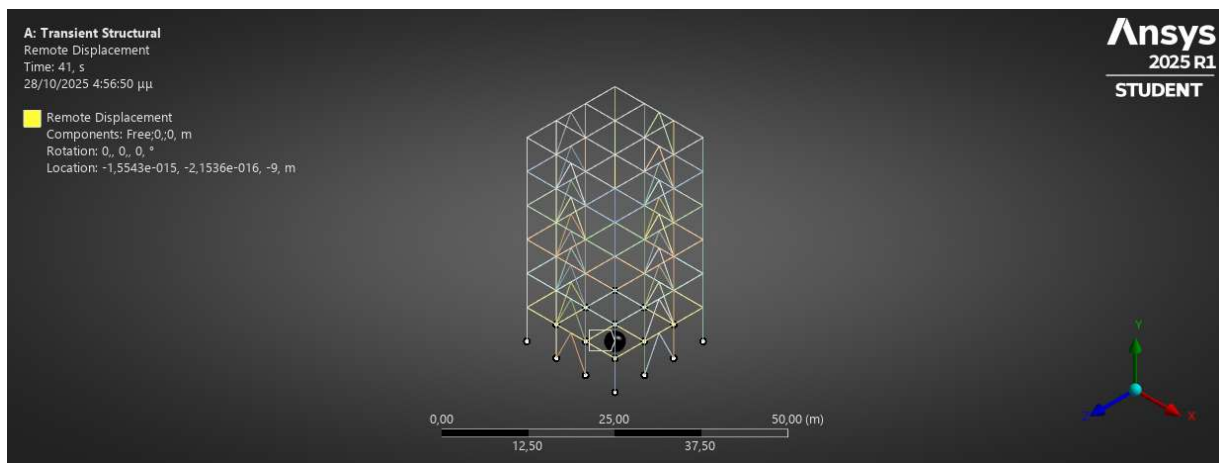
Οριακές συνθήκες (boundary conditions):

Για τον κατάλληλο καθορισμό των οριακών συνθηκών της κατασκευής, εφαρμόστηκε **Remote Displacement** στους κάτω κόμβους της κατασκευής (βάση).

Πιο συγκεκριμένα:

- Η μετατόπιση στους άξονες Y και Z έχει μηδενιστεί, περιορίζοντας την κίνηση κατακόρυφα και εγκάρσια.
- Η περιστροφή ως προς όλους τους άξονες (X, Y, Z) έχει επίσης μηδενιστεί.
- Μόνο η μετατόπιση στον άξονα X έχει οριστεί ως ελεύθερη (Free), επιτρέποντας τη σεισμική απόκριση του φορέα κατά τη διεύθυνση της φόρτισης.

Αυτή η προσέγγιση εξασφαλίζει ότι το σύστημα παραμένει επαρκώς σταθεροποιημένο, ενώ ταυτόχρονα διατηρεί τη δυνατότητα σεισμικής ταλάντωσης στη σωστή διεύθυνση. Έτσι, η προσομοίωση παραμένει ρεαλιστική και αντιπροσωπευτική της πραγματικής σεισμικής απόκρισης της κατασκευής.



Εικόνα 14 Οριακές συνθήκες κατασκευής

Ρυθμίσεις Ανάλυσης (Analysis Settings):

Για την επίλυση της δυναμικής απόκρισης του φορέα υπό σεισμική διέγερση, εφαρμόστηκαν κατάλληλες ρυθμίσεις ανάλυσης. Συγκεκριμένα, ορίστηκε χρονικό βήμα έναρξης 0,01 s, με ελάχιστο και μέγιστο χρονικό βήμα 0,00001 s και 0,01 s αντίστοιχα, επιτρέποντας στο πρόγραμμα να εφαρμόζει αυτόματη προσαρμογή χρόνου (Auto Time Stepping). Η συνολική διάρκεια της ανάλυσης καθορίστηκε στα 41 s, όσο και η διάρκεια του σεισμικού επιταχυνσιογραφήματος.

Η επιλογή Large Deflection ενεργοποιήθηκε (On), καθώς αποτελεί προϋπόθεση για την ορθή λειτουργία της συνθήκης Tension Only.

Επιπλέον, εφαρμόστηκε απόσβεση 3% μέσω της παραμέτρου Damping Ratio στο σημείο συχνότητας 1 Hz. Αυτή η τιμή απόσβεσης είναι τυπική για μεταλλικές κατασκευές και εξασφαλίζει την κατάλληλη αναπαράσταση της εσωτερικής απόσβεσης του συστήματος.

Επισημαίνεται ότι το ίδιο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε και για την περίπτωση των συνδέσμων εφελκυσμού-θλίψης, με μοναδική διαφορά την προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των συνδέσμων, οι οποίοι σε αυτήν την περίπτωση επιτρέπεται να δέχονται και θλιπτικές δυνάμεις.

3.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Για την αξιολόγηση της σεισμικής απόκρισης των δύο διατάξεων (με συνδέσμους μόνο σε εφελκυσμό και με συνδέσμους σε εφελκυσμό-θλίψη), επιλέχθηκαν συγκεκριμένοι δείκτες απόδοσης που εξάγονται από τη δυναμική ανάλυση.

Οι κύριες παράμετροι που θα αναλυθούν είναι:

- Αξονικές δυνάμεις στους συνδέσμους, ώστε να διαπιστωθεί πώς κατανέμεται το φορτίο μεταξύ των διαφόρων μελών του κτιρίου και να εντοπιστούν τυχόν ασυμμετρίες ή διαφορές στην απόκριση των δύο διατάξεων που προαναφέρθηκαν.
- Αξονικές δυνάμεις στα υποστυλώματα, για να αξιολογηθεί η καταπόνηση τους και η ενδεχόμενη διαφοροποίηση της συμπεριφοράς τους στις ανωτέρω δύο διατάξεις υπό σεισμική διέγερση.
- Μετατόπιση της στέγης (roof displacement), ως αντιπροσωπευτικό μέτρο της συνολικής παραμόρφωσης και της σχετικής ευκαμψίας κάθε διάταξης.
- Συνολική μετατόπιση (Total Deformation), η οποία δείχνει το συνολικό εύρος μετακινήσεων σε όλο το κτίριο, επιτρέποντας την αξιολόγηση της συνολικής απόκρισης και ενδεχόμενων συγκεντρώσεων μετακινήσεων.

Η επιλογή αυτών των μεγεθών γίνεται με στόχο την ποιοτική και ποσοτική σύγκριση της συμπεριφοράς των δύο διαφορετικών διατάξεων. Τα αποτελέσματα αυτά παρέχουν σαφή εικόνα για το πώς η καμπτική δυσκαμψία, οι μηχανισμοί ανάληψης φορτίων και οι ιδιότητες των συνδέσμων επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της κατασκευής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

4.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δυναμικής ανάλυσης δύο διαφορετικών τύπων συστημάτων: ενός με συνδέσμους που δέχονται μόνο εφελκυσμό (tension-only bracing) και ενός με συνδέσμους που λειτουργούν τόσο σε εφελκυσμό όσο και σε θλίψη (tension-compression bracing). Η αξιολόγηση της σεισμικής τους συμπεριφοράς έγινε με βάση βασικές παραμέτρους απόκρισης, όπως οι αξονικές δυνάμεις σε συνδέσμους και υποστυλώματα, οι μετατοπίσεις της στέγης και της κατασκευής καθ' όλη τη διάρκεια του σεισμικού γεγονότος, καθώς και οι μέγιστες και παραμένουσες μετατοπίσεις στο τέλος της διέγερσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μέσα από συγκριτικά γραφήματα χρονικής εξέλιξης, πίνακες τιμών και στιγμιότυπα εξαγόμενα από το λογισμικό ANSYS, που περιλαμβάνουν παραμορφωμένα σχήματα και χρωματικούς χάρτες μετατόπισης. Ο στόχος είναι να εντοπιστούν και να αξιολογηθούν οι διαφορές στη συμπεριφορά των δύο μοντέλων υπό σεισμική φόρτιση, με σκοπό την τεκμηρίωση των επιδόσεων και των επιπτώσεων των εφελκυσόμενων συνδέσμων στην αντισεισμική συμπεριφορά μεταλλικών κατασκευών.

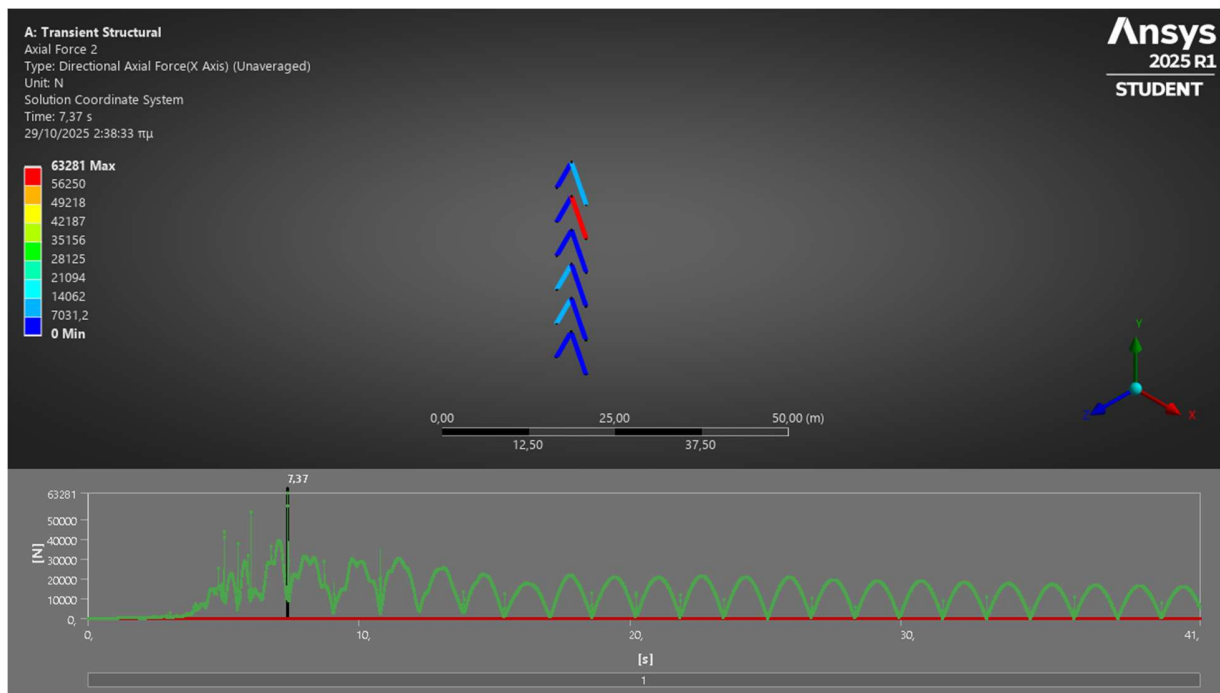
4.2 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΑΞΟΝΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η κατανομή των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στα υποστυλώματα και τις διαγώνιες ενισχύσεις του φορέα. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για τα δύο σενάρια: μόνο σε εφελκυσμό και σε εφελκυσμό/θλίψη, ώστε να αναδειχθεί η διαφοροποίηση στη συμπεριφορά των στοιχείων.

4.2.1 ΑΞΟΝΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΤΟΥΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥΣ

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται και αναλύεται η κατανομή και η ένταση των αξονικών δυνάμεων στους συνδέσμους του φορέα, για δύο διαφορετικά μοντέλα: το μοντέλο με συνδέσμους που λειτουργούν μόνο σε εφελκυσμό και το μοντέλο με συνδέσμους που λειτουργούν τόσο σε εφελκυσμό όσο και σε θλίψη.

Εφελκόμενος Σύνδεσμος



Εικόνα 15 Αξονικές δυνάμεις στους εφελκόμενους συνδέσμους

Στην Εικόνα 15 παρατηρούνται οι αξονικές δυνάμεις στους εφελκόμενους συνδέσμους. Η μέγιστη αξονική δύναμη εμφανίζεται στη χρονική στιγμή 7.37 s και είναι περίπου 63.3 kN.

Η κατανομή των δυνάμεων είναι τοπική και ασύμμετρη.

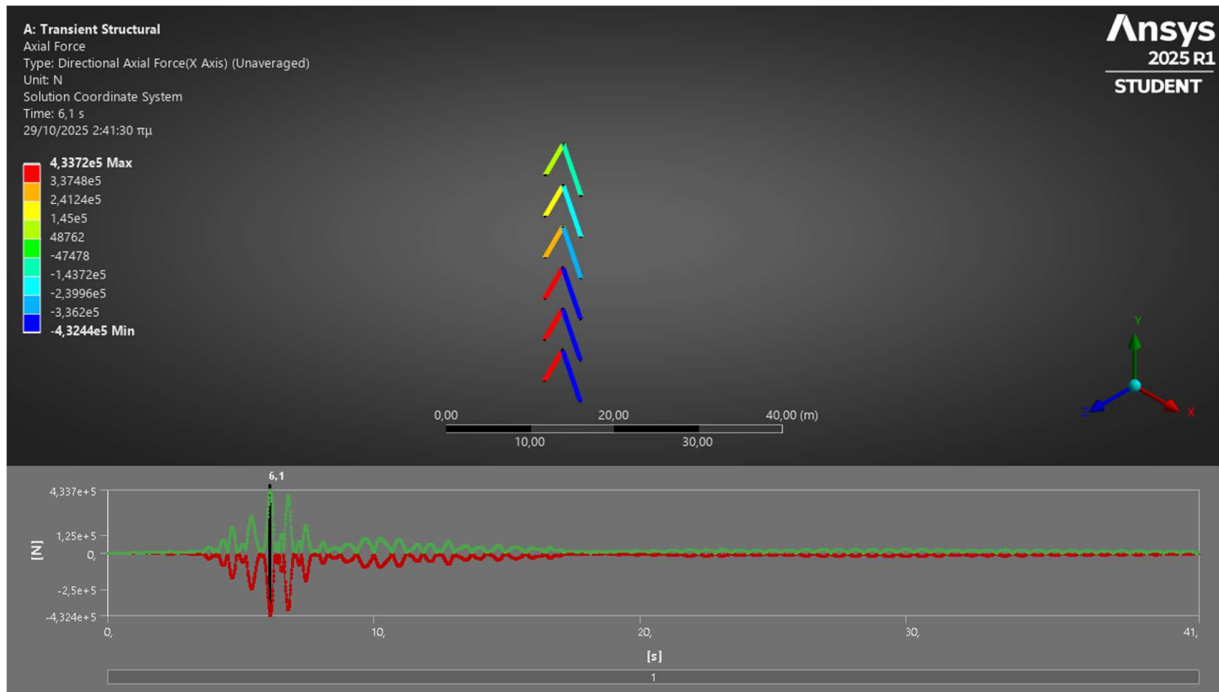
Το σύστημα παρουσιάζει χαμηλότερη δυσκαμψία και πιθανώς μεγαλύτερες μετακινήσεις.

Μετά το μέγιστο, παρατηρείται μείωση και σταθεροποίηση της δύναμης σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, υποδεικνύοντας ελλιπή αξιοποίηση του συστήματος.

Η καμπύλη έχει μικρό εύρος (μικρότερο ποσοστό συμμετοχής του συστήματος στη συνολική αντίσταση).

Η ερμηνεία του διαγράμματος επιβεβαιώνει ότι το σύστημα αξιοποιείται μονομερώς (μόνο όταν οι σύνδεσμοι βρίσκονται σε εφελκυσμό).

Σύνδεσμος εφελκυσμού-θλίψης



Εικόνα 16 Αξονικές δυνάμεις στους συνδέσμους εφελκυσμού-θλίψης

Στην Εικόνα 16 παρατηρούνται οι αξονικές δυνάμεις στους συνδέσμους εφελκυσμού-θλίψης.

Η μέγιστη δύναμη καταγράφηκε στη χρονική στιγμή 6.1 s και φτάνει τα 433.7 kN, δηλαδή περίπου 7 φορές υψηλότερη από το προηγούμενο μοντέλο.

Περισσότεροι σύνδεσμοι συμμετέχουν ταυτόχρονα στην αντίσταση, τόσο σε εφελκυσμό όσο και σε θλίψη.

Η κατανομή είναι πιο ομοιόμορφη και αποδοτική, οδηγώντας σε καλύτερη συμπεριφορά του φορέα.

Το σύστημα εμφανίζει αυξημένη δυσκαμψία.

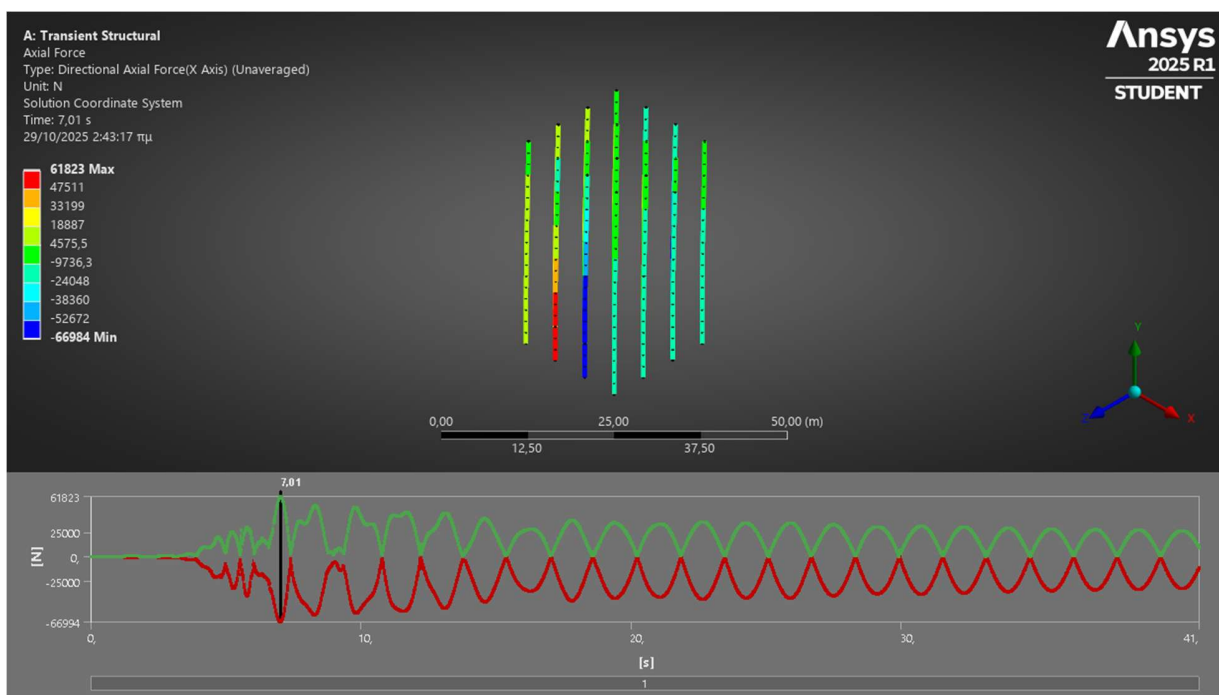
Η συμμετρική μορφή του διαγράμματος δείχνει κατανομή δυνάμεων σε όλες τις διευθύνσεις.

Το εύρος της καμπύλης είναι μεγαλύτερο σε σύγκριση με το μόνο-εφελκυστικό μοντέλο (tension-only), καθώς συμμετέχουν περισσότερα μέλη.

4.2.2 ΑΞΟΝΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΤΑ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ

Στην παρούσα ενότητα εξετάζονται οι αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στα υποστυλώματα κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης. Η ανάλυση πραγματοποιείται για τα δύο σενάρια συνδέσμων (μόνο σε εφελκυσμό και σε εφελκυσμό/θλίψη), με στόχο να διαπιστωθεί κατά πόσο διαφοροποιείται η κατανομή των αξονικών δυνάμεων στα υποστυλώματα, ανάλογα με τη μηχανική συμπεριφορά των συνδέσμων.

Εφελκυσμένος σύνδεσμος



Εικόνα 17 Αξονικές δυνάμεις στα υποστυλώματα (μοντέλο tension-only)

Στην Εικόνα 17 παρατηρούνται οι αξονικές δυνάμεις στα υποστυλώματα του μοντέλου με εφελκυσμένους συνδέσμους.

Η μέγιστη αξονική δύναμη καταγράφηκε στη χρονική στιγμή 7.01 s και φτάνει τα +61.8 kN και -66.9 kN, τιμές που δείχνουν έντονη εφελκυστική και θλιπτική φόρτιση.

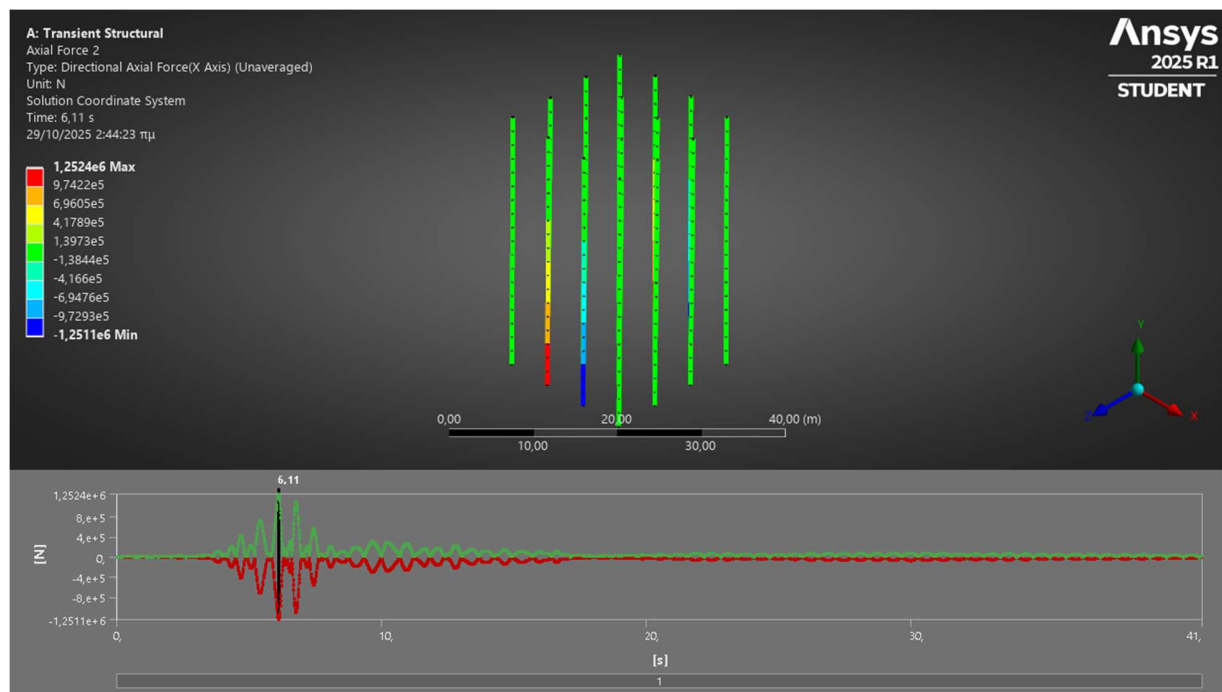
Οι δυνάμεις αναπτύσσονται ανομοιόμορφα στα υποστυλώματα, με κάποια να φέρουν κυρίως θλίψη και άλλα κυρίως εφελκυσμό.

Οι αξονικές δυνάμεις δεν κατανέμονται ομοιόμορφα μεταξύ των υποστυλωμάτων, με κάποια μέλη να παρουσιάζουν σημαντικά υψηλότερες εντάσεις σε σχέση με άλλα.

Η απόκριση του φορέα δείχνει ότι η κατανομή των φορτίων στα υποστυλώματα είναι μη ομοιόμορφη, εξαιτίας της ιδιότητας των συνδέσμων να λειτουργούν αποκλειστικά σε εφελκυσμό.

Η παρουσία έντονων περιοδικών διακυμάνσεων υποδηλώνει αυξημένες μετακινήσεις, που ενδέχεται να οδηγήσουν σε συγκεντρώσεις καταπονήσεων και πιθανές βλάβες σε σημεία επαφής ή σύνδεσης.

Σύνδεσμος εφελκυσμού-θλίψης



Εικόνα 18 Αξονικές δυνάμεις στα υποστυλώματα (μοντέλο tension-compression)

Στην Εικόνα 18 παρατηρούνται οι αξονικές δυνάμεις στα υποστυλώματα του μοντέλου με συνδέσμους εφελκυσμού-θλίψης.

Η μέγιστη δύναμη καταγράφηκε στη χρονική στιγμή 6.11 s και φτάνει τα 1.252 MN σε εφελκυσμό και -1.251 MN σε θλίψη, τιμές περίπου διπλάσιες από εκείνες του μόνο-εφελκυστικού μοντέλου, υποδεικνύοντας σημαντικά υψηλότερες καταπονήσεις στα υποστυλώματα.

Το σύστημα παρουσιάζει συμμετρική κατανομή δυνάμεων τόσο σε εφελκυσμό όσο και σε θλίψη, με πολλές δοκούς να φέρουν εναλλάξ αξονικές δυνάμεις, γεγονός που δείχνει ενεργή συμμετοχή όλων των μελών του φορέα.

Η αποφόρτιση είναι πιο άμεση σε σχέση με το μόνο-εφελκυστικό μοντέλο, με εμφανή σταθεροποίηση του συστήματος μετά τα 15 s.

Οι αξονικές δυνάμεις κατανέμονται ομοιόμορφα στα υποστυλώματα, χωρίς έντονες τοπικές συγκεντρώσεις, γεγονός που ενισχύει τη συνολική στατική απόδοση του συστήματος.

Η μορφή του διαγράμματος, με συμμετρικές κορυφές και βαθμιαία μείωση των ταλαντώσεων, αποτελεί ένδειξη καλής δυναμικής συμπεριφοράς και πλήρους ενεργοποίησης των υποστυλωμάτων.

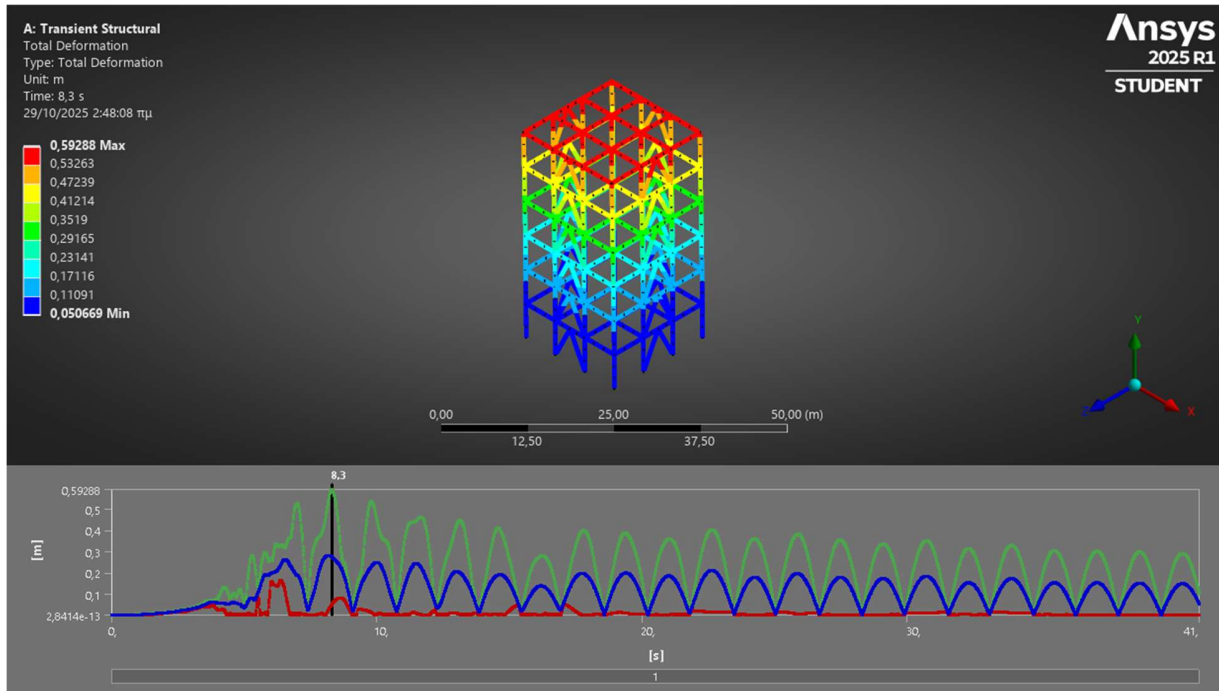
4.3 ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Η ανάλυση των μετατοπίσεων αποτελεί κρίσιμο βήμα στην αποτίμηση της δυναμικής απόκρισης μιας κατασκευής υπό σεισμική φόρτιση. Οι μετατοπίσεις είναι άμεσος δείκτης της ικανότητας παραμόρφωσης, της δυσκαμψίας και της δυνατότητας απορρόφησης ενέργειας του συστήματος. Η υπέρβαση συγκεκριμένων ορίων μετατόπισης μπορεί να οδηγήσει σε λειτουργικές βλάβες ή ακόμα και κατάρρευση.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η συνολική μετατόπιση (Total Deformation) που αφορά το συνολικό μέγεθος μετακίνησης των κόμβων της κατασκευής, καθώς και η μετατόπιση της στέγης (Roof Deformation), η οποία συνδέεται άμεσα με την πλευρική ευκαμψία του συστήματος και αποτελεί βασικό δείκτη για την εκτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς. Μέσω αυτών των μεγεθών αξιολογείται η συμπεριφορά της κατασκευής και εντοπίζονται οι περιοχές με τη μεγαλύτερη μετατόπιση.

4.3.1 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Εφελκούμενος σύνδεσμος



Εικόνα 19 Μέγιστη μετατόπιση(μοντέλο tension-only)

Στην Εικόνα 19 παρατηρείται η μέγιστη μετατόπιση του μοντέλου με εφελκούμενους συνδέσμους.

Η μέγιστη μετατόπιση καταγράφηκε στη χρονική στιγμή 8.3 s, φτάνοντας την τιμή των 0.59288 m, όπως φαίνεται στη παραπάνω εικόνα.

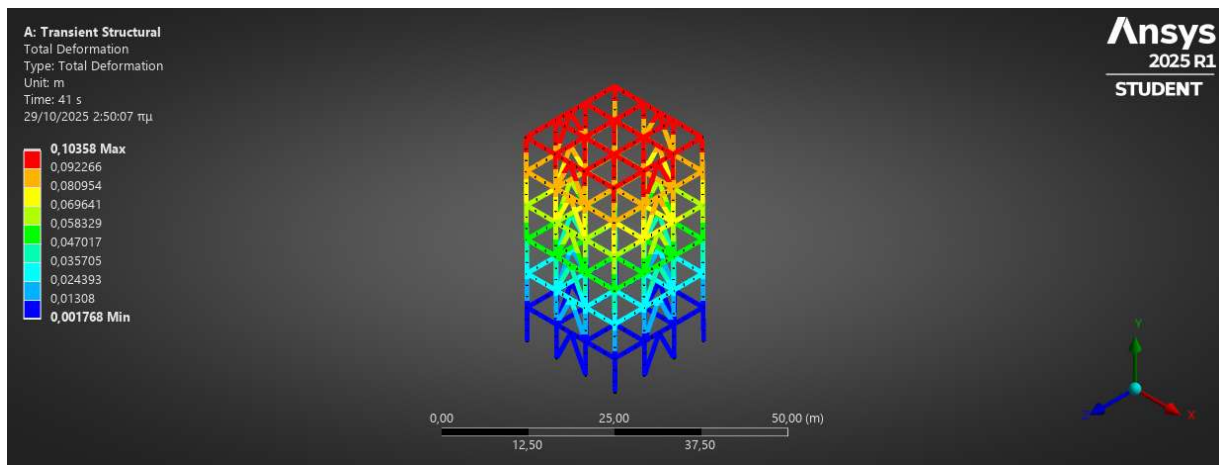
Η μετατόπιση εντοπίζεται κυρίως στο ανώτερο τμήμα της κατασκευής, γεγονός που υποδηλώνει αυξημένη πλευρική ευκαμψία και μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση των άνω ορόφων σε σχέση με τη βάση.

Η διαβάθμιση των χρωμάτων στο μοντέλο αποκαλύπτει σταδιακή αύξηση της μετατόπισης από τη βάση προς την κορυφή, με σχετικά ομοιόμορφη κατανομή στο φορέα.

Το διάγραμμα του χρόνου δείχνει έντονη ταλάντωση με υψηλό πλάτος μέχρι τη μέγιστη τιμή, ενώ στη συνέχεια παρατηρείται σταδιακή μείωση των μετατοπίσεων.

Η μορφή της καμπύλης υποδηλώνει δυναμική αστάθεια, με πολλές διακυμάνσεις τόσο πριν όσο και μετά το μέγιστο, ένδειξη συνεχούς διέγερσης του συστήματος.

Μετατόπιση στο τέλος της διέγερσης (t = 41 s):



Εικόνα 20 Μετατόπιση στο τέλος της διέγερσης(μοντέλο tension-only)

Στην Εικόνα 20 παρατηρείται η μετατόπιση του μοντέλου με εφελκόμενους συνδέσμους στο τέλος της σεισμικής διέγερσης.

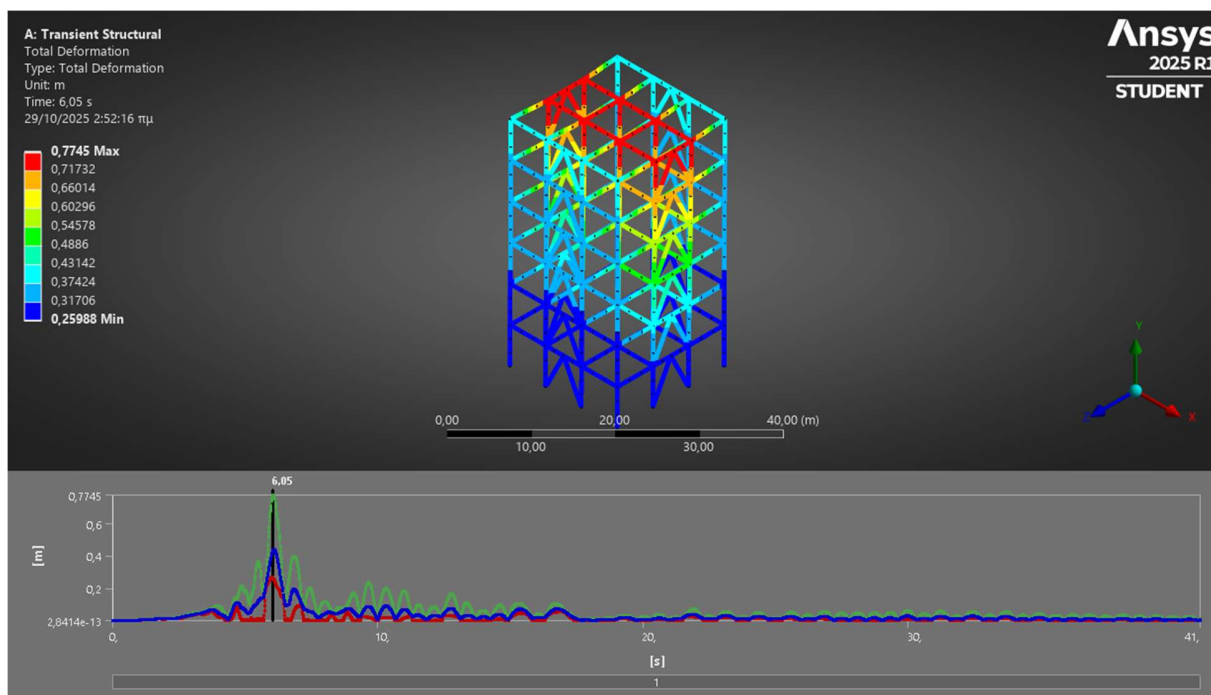
Στο τέλος της σεισμικής διέγερσης (t = 41 s), η μέγιστη μετατόπιση ανέρχεται σε 0.10358 m, δηλαδή μικρότερη από το 18% της μέγιστης τιμής που παρατηρήθηκε κατά τη μέγιστη τιμή (0.59288 m).

Παρατηρούνται παραμένουσες μετατοπίσεις, κυρίως στο ανώτερο μέρος της κατασκευής, γεγονός που υποδηλώνει μόνιμες παραμορφώσεις και ότι η κατασκευή δεν επανέρχεται πλήρως στην αρχική της θέση.

Η κατανομή των μετατοπίσεων εξακολουθεί να ακολουθεί την ίδια μορφολογία με τη μέγιστη τιμή, ενισχύοντας την άποψη ότι η κατασκευή παρουσίασε μη γραμμική απόκριση.

Η μορφή του γραφήματος δείχνει φθίνουσα αλλά συνεχιζόμενη ταλάντωση, με σταδιακή μείωση του πλάτους, χωρίς όμως πλήρη σταθεροποίηση στην αρχική θέση.

Σύνδεσμος εφελκυσμού-θλίψης



Εικόνα 21 Μέγιστη μετατόπιση(μοντέλο tension-compression)

Στην Εικόνα 21 παρατηρείται η μέγιστη μετατόπιση του μοντέλου με συνδέσμους εφελκυσμού-θλίψης.

Η μέγιστη μετατόπιση καταγράφηκε στη χρονική στιγμή $t = 6.05$ s, με τιμή 0.7745 m, δηλαδή περίπου 30% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του μοντέλου με μόνο εφελκυσμό (0.59288 m).

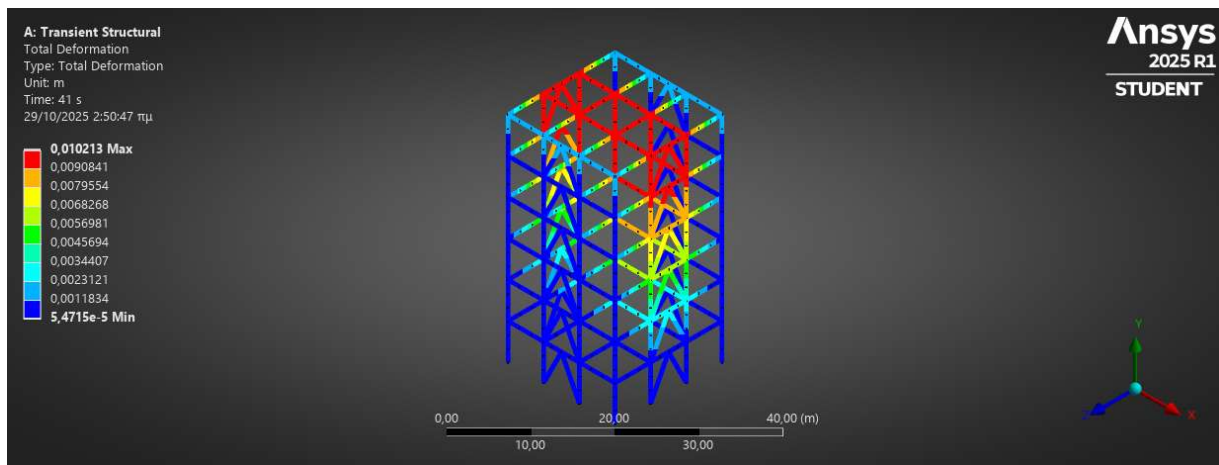
Η διαβάθμιση των χρωμάτων στο παραμορφωμένο σχήμα δείχνει εντονότερη μετατόπιση στο άνω τμήμα, όπως και προηγουμένως, ωστόσο με πιο απότομη κλίση, κάτι που υποδηλώνει πιο απότομη μεταβολή της μετατόπισης ανά όροφο.

Η παρουσία θλίψης (compression) επιτρέπει την μεγαλύτερη κινητικότητα και ελαστικότητα του φορέα, εξηγώντας την αυξημένη μετατόπιση σε σχέση με την πρώτη περίπτωση.

Από το διάγραμμα χρονικής εξέλιξης, παρατηρείται αιφνίδια αύξηση της απόκρισης πριν τα 6.05 s, που κορυφώνεται έντονα και στη συνέχεια παρουσιάζει ταχεία μείωση του πλάτους, σε αντίθεση με την πιο παρατεταμένη ταλάντωση του εφελκυστικού μοντέλου.

Η μορφή της καμπύλης υποδηλώνει περιορισμένη χρονικά ενεργοποίηση της κατασκευής, κάτι που οφείλεται στην συμμετοχή περισσότερων στοιχείων (θλιπτικών και εφελκυστικών).

Μετατόπιση στο τέλος της διέγερσης (t = 41 s):



Εικόνα 22 Μετατόπιση στο τέλος της διέγερσης(μοντέλο tension-compression)

Στην Εικόνα 22 παρατηρείται η μετατόπιση του μοντέλου με συνδέσμους εφελκυσμού-θλίψης στο τέλος της σεισμικής διέγερσης.

Στο τέλος της σεισμικής διέγερσης (t = 41 s), η μέγιστη μετατόπιση ανέρχεται σε 0.010213 m, δηλαδή μόλις 1.3% της μέγιστης τιμής που καταγράφηκε στη διάρκεια του φαινομένου (0.7745 m).

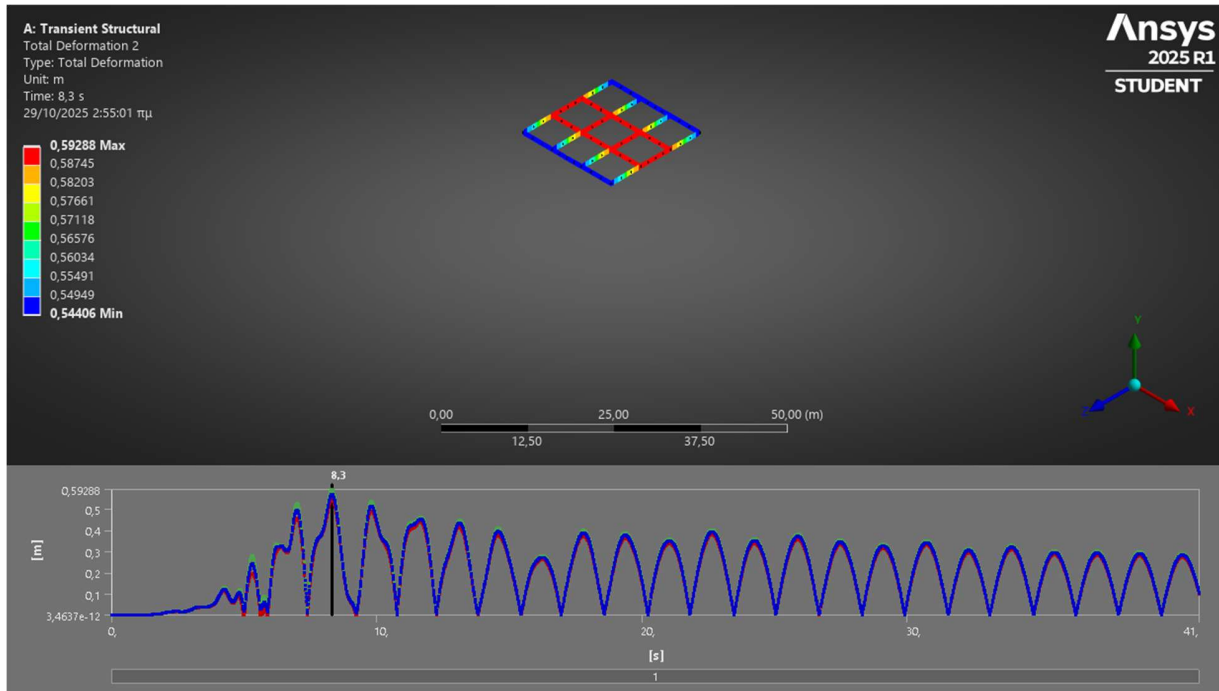
Η δραστική μείωση της μετατόπισης αποδεικνύει την αποτελεσματική μείωση της δυναμικής απόκρισης και την ικανότητα του φορέα να επανέλθει κοντά στην αρχική του θέση.

Η χρωματική κατανομή δείχνει ομοιόμορφη μείωση των μετατοπίσεων σε όλα τα επίπεδα, με το άνω τμήμα να εμφανίζει μικρή παραμένουσα μετατόπιση.

Σε αντίθεση με το μοντέλο με εφελκυσμένους συνδέσμους, εδώ δεν παρατηρούνται μόνιμες μετατοπίσεις, γεγονός που υποδηλώνει γραμμική ή ελαστική μετασεισμική συμπεριφορά.

4.3.2 ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΣΤΗ ΣΤΕΓΗ

Εφελκόμενος σύνδεσμος



Εικόνα 23 Μέγιστη μετατόπιση της στέγης(μοντέλο tension-only)

Στην Εικόνα 23 παρατηρείται η μέγιστη μετατόπιση της στέγης του μοντέλου με εφελκόμενους συνδέσμους.

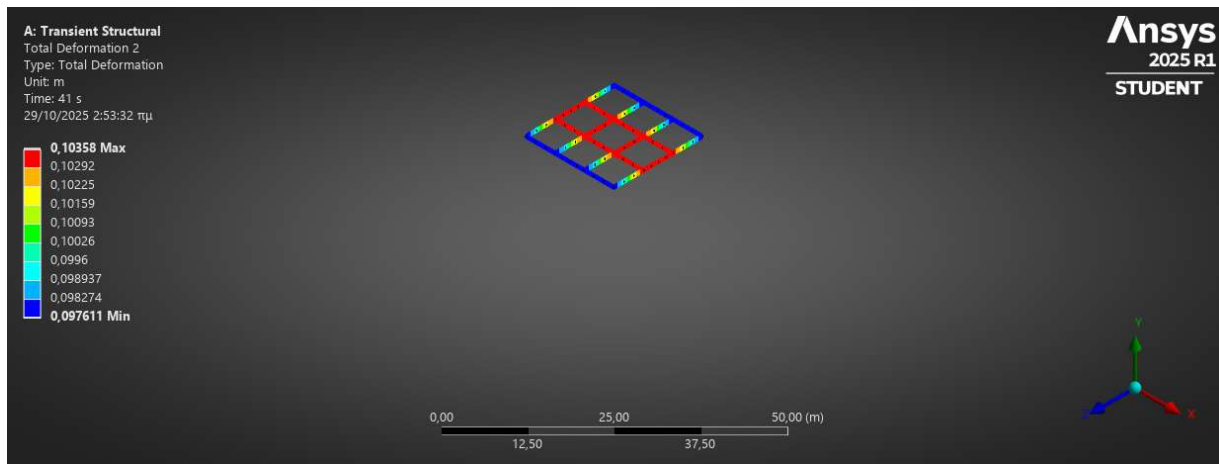
Η μέγιστη μετατόπιση της στέγης εντοπίζεται τη χρονική στιγμή $t = 8.3$ s, με τιμή 0.59288 m.

Το παραμορφωμένο σχήμα δείχνει έντονη μετατόπιση στο κέντρο του φορέα, κάτι που είναι αναμενόμενο λόγω της απουσίας θλιπτικών στοιχείων, τα οποία θα μπορούσαν να την περιορίσουν.

Στο γράφημα της χρονικής εξέλιξης παρατηρείται προοδευτική αύξηση της απόκρισης μέχρι το τοπικό μέγιστο (8.3 s), το οποίο ακολουθείται από συνεχή ταλάντωση με σταδιακή μείωση του πλάτους.

Η μορφή της καμπύλης δείχνει ότι η κατασκευή συνεχίζει να ταλαντώνεται για κάποιο χρονικό διάστημα μετά την κορύφωση, γεγονός που δείχνει παρατεταμένη δυναμική απόκριση.

Μετατόπιση στο τέλος της διέγερσης (t = 41 s):



Εικόνα 24 Μετατόπιση της στέγης στο τέλος της διέγερσης(μοντέλο tension-only)

Στην Εικόνα 24 παρατηρείται η μετατόπιση της στέγης του μοντέλου με εφελκόμενους συνδέσμους στο τέλος της σεισμικής διέγερσης.

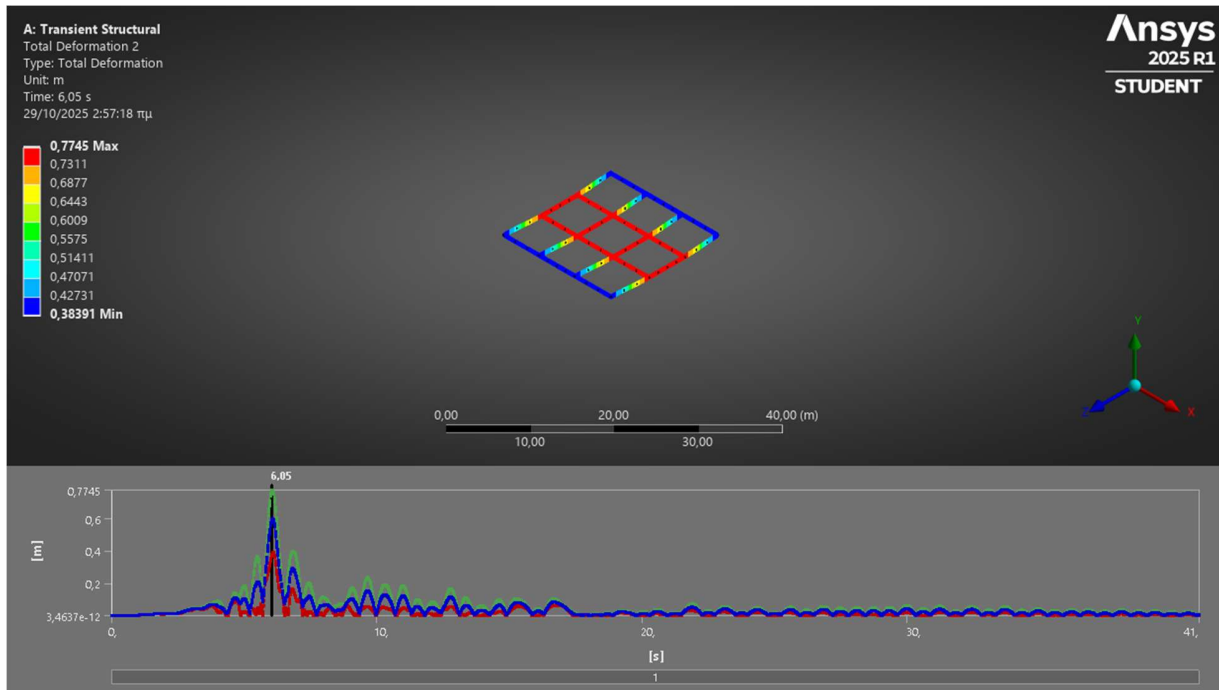
Στο πέρας της σεισμικής διέγερσης (t = 41 s), η μέγιστη συνολική μετατόπιση της στέγης ανέρχεται σε 0.10358 m, που αντιστοιχεί στο 17.5% περίπου της μέγιστης τιμής που καταγράφηκε κατά τη διάρκεια του σεισμού (0.59288 m).

Το παραμορφωμένο σχήμα υποδηλώνει παραμένουσα μετατόπιση, κυρίως στο κέντρο της στέγης, γεγονός που αποτυπώνει την αδυναμία του φορέα να επανέλθει πλήρως στην αρχική του θέση.

Η παρουσία αυτής της παραμένουσας μετατόπισης οφείλεται στην απουσία θλιπτικών στοιχείων, τα οποία θα συνέβαλαν στην αποκατάσταση της αρχικής θέσης μετά την ταλάντωση.

Η κατανομή της μετατόπισης παραμένει συμμετρική, αλλά χωρίς πλήρη επιστροφή στην αρχική θέση, γεγονός που υποδηλώνει μη γραμμική μετασεισμική συμπεριφορά.

Σύνδεσμος εφελκυσμού-θλίψης



Εικόνα 25 Μέγιστη μετατόπιση της στέγης(μοντέλο tension-compression)

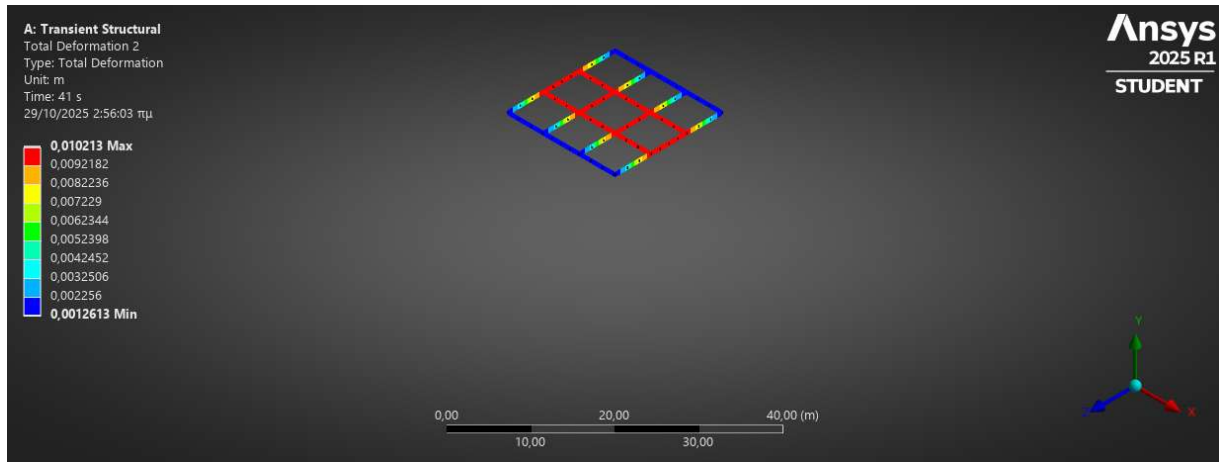
Στην Εικόνα 25 παρατηρείται η μέγιστη μετατόπιση της στέγης του μοντέλου με συνδέσμους εφελκυσμού-θλίψης.

Η μέγιστη μετατόπιση της στέγης εντοπίζεται στη χρονική στιγμή $t = 6.05$ s, με τιμή 0.7745 m, η οποία είναι σημαντικά υψηλότερη σε σχέση με το αντίστοιχο μέγιστο του εφελκυσμένου συνδέσμου (0.59288 m), γεγονός που οφείλεται στην ικανότητα των θλιπτικών στοιχείων να συνεισφέρουν στην αντίσταση της κατασκευής.

Το παραμορφωμένο σχήμα υποδεικνύει συμμετρική παραμόρφωση κατά το μέγιστο, κυρίως στο κεντρικό τμήμα της στέγης, συμβαδίζοντας με τη χρονική στιγμή της μέγιστης φόρτισης.

Από το γράφημα της χρονικής εξέλιξης της μετατόπισης, παρατηρείται ταχεία αύξηση της απόκρισης μέχρι τη μέγιστη τιμή και στη συνέχεια βαθμιαία μείωση, γεγονός που οφείλεται στη συμμετοχή θλιπτικών και εφελκυσμένων στοιχείων.

Μετατόπιση στο τέλος της διέγερσης (t = 41 s):



Εικόνα 26 Μετατόπιση της στέγης στο τέλος της διέγερσης(μοντέλο tension-compression)

Στην Εικόνα 26 παρατηρείται η μετατόπιση της στέγης του μοντέλου με συνδέσμους εφελκυσμού-θλίψης στο τέλος της σεισμικής διέγερσης.

Στο πέρας της σεισμικής διέγερσης (t = 41 s), η μέγιστη μετατόπιση της στέγης είναι μόλις 0.010213 m, δηλαδή περίπου 1.3% της αντίστοιχης μέγιστης μετατόπισης που παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια του σεισμού (0.7745 m).

Η εξαιρετικά μικρή αυτή παραμένουσα μετατόπιση επιβεβαιώνει την ικανότητα του φορέα να επανέρχεται σχεδόν πλήρως στην αρχική του γεωμετρία, γεγονός που αποδίδεται στην παρουσία τόσο θλιπτικών όσο και εφελκυσμένων στοιχείων.

Το τελικό παραμορφωμένο σχήμα παραμένει συμμετρικό και ομοιόμορφα κατανεμημένο, υποδηλώνοντας βελτιωμένη σεισμική συμπεριφορά σε σύγκριση με το μοντέλο εφελκυσμένων συνδέσμων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

5.1 ΣΥΝΟΨΗ ΚΥΡΙΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η δυναμική ανάλυση των δύο εναλλακτικών συστημάτων ανέδειξε ουσιώδεις διαφορές στη σεισμική τους απόκριση. Το σύστημα με εφελκόμενους συνδέσμους παρουσίασε μεγαλύτερες παραμένουσες μετατοπίσεις και πιο παρατεταμένη ταλάντωση μετά το πέρας της σεισμικής διέγερσης. Αντίθετα, το σύστημα με συνδέσμους εφελκυσμού-θλίψης εμφάνισε καλύτερη κατανομή εντάσεων, ταχύτερη αποφόρτιση και ουσιαστικά μηδενική παραμένουσα μετατόπιση, υποδεικνύοντας πιο ευνοϊκή μηχανική συμπεριφορά.

Οι μέγιστες μετατοπίσεις στέγης βρέθηκαν υψηλότερες στο μοντέλο εφελκυσμού-θλίψης, γεγονός που αποδίδεται στη δυνατότητα των συνδέσμων να λειτουργούν τόσο σε εφελκυσμό όσο και σε θλίψη. Ωστόσο, μόνο το μοντέλο με εφελκόμενους συνδέσμους παρουσίασε παραμένουσα μετατόπιση στο τέλος της διέγερσης.

Οι αξονικές δυνάμεις στους συνδέσμους ανέδειξαν την περιορισμένη συμβολή του συστήματος με εφελκόμενους συνδέσμους στην απορρόφηση σεισμικών φορτίων, λόγω της απουσίας λειτουργίας τους σε θλίψη. Αντίθετα, το σύστημα με συνδέσμους εφελκυσμού-θλίψης επέτρεψε τη συμμετοχή περισσότερων στοιχείων, εξασφαλίζοντας πιο ομοιόμορφη κατανομή δυνάμεων.

Τα αποτελέσματα αυτά συνοψίζουν τις βασικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των δύο μοντέλων, προσφέροντας βάση για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας των εφελκόμενων συνδέσμων ως σύστημα αντισεισμικής προστασίας σε μεταλλικές κατασκευές.

5.2 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η παρούσα μελέτη περιλαμβάνει ορισμένους περιορισμούς που αφορούν τόσο στη μοντελοποίηση όσο και στις συνθήκες ανάλυσης. Η γεωμετρία του φορέα προσομοιώθηκε σε τρισδιάστατο επίπεδο(3D), χωρίς να λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα όπως η στρέψη ή η εκτός επιπέδου συμπεριφορά. Επίσης, εξετάστηκε μία μόνο σεισμική διέγερση, γεγονός που περιορίζει τη γενίκευση των συμπερασμάτων για διαφορετικά περιεχόμενα ή σεισμικά σενάρια.

Η ανάλυση βασίστηκε αποκλειστικά σε αριθμητική προσομοίωση μέσω πεπερασμένων στοιχείων (ANSYS), χωρίς πειραματική επιβεβαίωση ή βαθμονόμηση των μοντέλων. Αυτό σημαίνει ότι πιθανές μη ιδανικές συνθήκες, όπως τριβές στους κόμβους, ανοχές συναρμολόγησης και ατέλειες κατασκευής, δεν λήφθηκαν υπόψη.

Επιπλέον, υιοθετήθηκαν απλοποιημένες υποθέσεις ως προς τη μηχανική συμπεριφορά των συνδέσμων και των υλικών, θεωρώντας τέλεια λειτουργία ως μόνο-εφελκυστικά(tension-only) ή εφελκυσμο-θλιπτικά(tension-compression) στοιχεία, χωρίς να εξετάζονται φαινόμενα όπως ο τοπικός λυγισμός, η κόπωση ή η μεταβολή των ιδιοτήτων λόγω επαναλαμβανόμενης φόρτισης.

5.3 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η περαιτέρω μελέτη των εφελκυσόμενων συστημάτων κρίνεται απαραίτητη, καθώς συνδυάζουν οικονομική κατασκευή με ικανοποιητική σεισμική απόδοση, υπό ορισμένες προϋποθέσεις. Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να επικεντρωθεί στη συμπεριφορά τέτοιων συστημάτων σε πιο πολύπλοκες κατασκευές, όπως μη συμμετρικά τρισδιάστατα ή πολυώροφα κτίρια, ώστε να ληφθούν υπόψη εκτός επιπέδου φαινόμενα, στρεπτικές επιδράσεις και η αλληλεπίδραση μεταξύ ορόφων. Επίσης, προτείνεται η ενσωμάτωση πιο ρεαλιστικών χαρακτηριστικών στη μοντελοποίηση, με στόχο την ακριβέστερη προσομοίωση της δυναμικής απόκρισης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διερεύνηση της επίδοσης των εφελκυσόμενων συνδέσμων σε συνδυασμό με σύγχρονες τεχνολογίες ή υβριδικά συστήματα για τη σεισμική ενίσχυση υφιστάμενων κατασκευών. Επιπλέον, η πειραματική επικύρωση των αριθμητικών αποτελεσμάτων, μέσω εργαστηριακών δοκιμών ή πραγματικών εφαρμογών, θεωρείται καθοριστικής σημασίας για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας και της πρακτικής αξίας του συστήματος.

Τέλος, η εφαρμογή των εφελκυσόμενων συστημάτων σε άλλους τύπους κατασκευών, όπως βιομηχανικά κτίρια ή μεταλλικές αποθήκες, θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής έρευνας, με στόχο τη βελτιστοποίηση της σεισμικής τους συμπεριφοράς με χαμηλό κόστος.

6.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Hou, H., Fu, W., Wang, W., Qu, B., Chen, Y., Chen, Y., & Qiu, C. (2018). Horizontal seismic force demands on nonstructural components in low-rise steel building frames with tension-only braces. *Engineering Structures*, 168, 852-864.
- [2] <https://engineeringdiscoveries.com/types-of-bracing-system-used-in-steel-structures/>
- [3] https://www.steelconstruction.info/Braced_frames
- [4] Wang, W., Zhou, Q., Chen, Y., Tong, L., & Chan, T. M. (2013). Experimental and numerical investigation on full-scale tension-only concentrically braced steel beam-through frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 80, 369-385.
- [5] <https://everseismic.com/>
- [6] <https://structville.com/braced-frame-structural-systems>
- [7] <https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Home>
- [8] <https://structuralsteel.pro/>
- [9] Papagiannopoulos, G. A. (2018). On the seismic behaviour of tension-only concentrically braced steel structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115, 27-35.
- [10] <https://www.tectonus.com/resources/blog/tension-only-braces-seismic>
- [11] Bartera, F., & Giacchetti, R. (2004). Steel dissipating braces for upgrading existing building frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 60(3-5), 751-769.
- [12] <https://structomat.com/>

