



ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
«ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ»

Διπλωματική Εργασία

Επίδραση της Προσομοίωσης της Απόσβεσης στην Απόκριση
Σεισμικά Απομονωμένης Μεταλλικής Κατασκευής

Σκουμπόπουλος Κ. Αθανάσιος

Επιβλέπων καθηγητής: Παπαγιαννόπουλος Γεώργιος

Πάτρα
Μάιος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
«ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ»

Διπλωματική Εργασία

Επίδραση της Προσομοίωσης της Απόσβεσης στην Απόκριση
Σεισμικά Απομονωμένης Μεταλλικής Κατασκευής

Σκουμπόπουλος Κ. Αθανάσιος

Επιτροπή επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων καθηγητής Α
ΠΑΠΑΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ
Καθηγητής
Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο

Επιβλέπων καθηγητής Β
ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΠΟΥΛΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ
Σ.Ε.Π.
Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο

Πάτρα
Μάιος 2026

Περίληψη - Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σκοπό την εξέταση των διαφορών που προκύπτουν από τη χρήση διαφορετικών μοντέλων απόσβεσης στην απόκριση σεισμικά απομονωμένων μεταλλικών κατασκευών με συνδέσμους δυσκαμψίας (CBFs). Συγκεκριμένα, με τη χρήση του προγράμματος ETABS, αρχικά σχεδιάστηκε με φασματική ανάλυση, ένα εννιαώροφο μεταλλικό κτίριο σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες 3 και 8. Έπειτα, στο εν λόγω κτίριο σχεδιάστηκε σεισμική απομόνωση βάσης με ελαστομερή εφέδρανα (LRB). Στο σεισμικά απομονωμένο κτίριο έγιναν μη-γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας για επιλεγμένα επιταχυνσιογραφήματα. Για τη μη-γραμμική συμπεριφορά των μελών του μεταλλικού κτιρίου χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο σημειακών πλαστικών αρθρώσεων.

Σε κάθε μία από τις αναλύσεις χρονοϊστορίας χρησιμοποιήθηκαν για την ανωδομή εναλλακτικά τέσσερα μοντέλα για το μητρώο απόσβεσης: i) Rayleigh, ii) αναλογικό του μητρώου δυσκαμψίας (Stiffness Proportional), iii) με επαλληλία ιδιομορφικών μητρώων (Modal Damping) iv) με απόσβεση υλικού (Material Damping). Γίνεται σύγκριση συγκεκριμένων δεικτών απόκρισης του κτιρίου αλλά και του συστήματος απομόνωσης, ώστε να προσδιοριστούν οι διαφορές και να αναδειχθεί η σημασία της επιλογής του μοντέλου απόσβεσης σε σεισμικά απομονωμένα μεταλλικά κτίρια κατά την ανάλυσή τους.

Λέξεις κλειδιά : Απόσβεση κατασκευής, μεταλλικές κατασκευές, σεισμική απομόνωση βάσης, μη-γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας.

Abstract

The present diploma thesis aims to investigate the differences arising from the use of different damping models in the seismic response of base-isolated steel structures. Using the ETABS software, a nine-story steel building was initially designed using response spectrum analysis in accordance with Eurocodes 3 and 8. Subsequently, a seismic base isolation system using lead rubber bearings was designed for the same building. Nonlinear time-history analyses were then performed on the base-isolated structure using selected accelerograms. Member yielding was simulated through concentrated and plastic hinges.

For each of the aforementioned time-history analyses, four different damping models were assigned to the superstructure, namely: i) Rayleigh damping, ii) stiffness-proportional damping, iii) modal damping based on the superposition of modal damping matrices and iv) material damping. Specific seismic response results of the building and of the isolation system are compared in order to identify the differences caused by the assumed damping model and to assess the significance of damping-model selection in the numerical simulation of base-isolated steel buildings.

Keywords: structural damping, steel structures, seismic base isolation, nonlinear time-history analysis.

Περιεχόμενα:

Περίληψη - Πρόλογος.....	1
Abstract.....	2
Περιεχόμενα:	3
1. Εισαγωγή.....	4
1.1 Σκοπός της εργασίας.....	4
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	5
2.1 Απόσβεση κατασκευών	5
2.2 Σεισμική Απομόνωση Βάσης	5
2.3 Δημοσιεύσεις στο αντικείμενο.....	6
3. Εφαρμογή της μεθόδου	9
3.1 Επίλυση του πακτωμένου κτιρίου.....	9
3.2 Φορτία	9
3.3 Τελικές διατομές σχεδιασμού	13
3.4 Σύστημα σεισμικής απομόνωσης βάσης	16
3.5 Μοντέλα απόσβεσης	18
3.6 Επιταχυνσιογραφήματα.....	21
4. Αποτελέσματα Αναλύσεων	25
4.1 Πλαστικές αρθρώσεις	25
4.3 Μέγιστες και ελάχιστες μετακινήσεις ορόφων	56
4.4 Παραμένουσες μετακινήσεις ορόφων	66
4.5 Τέμνουσες επιπέδου έδρασης συσκευών απομόνωσης.....	76
4.6 Τέμνουσες πλάκας έδρασης του κτιρίου	78
4.7 Μέγιστες μετακινήσεις εφεδράνων	80
4.8 Μέγιστες εφελκύστηκες και θλιπτικές δυνάμεις εφεδράνων.....	81
4.9 Δείκτες παραμενουσών μετακινήσεων ορόφων (RIDR).....	81
5. Συμπεράσματα	91
6. Βιβλιογραφία	92
7. Παράρτημα.....	94

1. Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της εργασίας

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία έχει ως βασικό σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης που ασκεί η επιλογή του μοντέλου απόσβεσης στη σεισμική απόκριση σεισμικά απομονωμένων μεταλλικών κατασκευών. Παρότι η απόσβεση αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη δυναμική συμπεριφορά μιας κατασκευής, η πραγματική φυσική της προέλευση είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη, καθώς οφείλεται σε συνδυασμό μηχανισμών, όπως η εσωτερική τριβή των υλικών, οι συνδέσεις των δομικών στοιχείων, οι μικρορηγματώσεις, η αλληλεπίδραση εδάφους–θεμελίωσης κλπ. Για τον λόγο αυτό, στις αριθμητικές αναλύσεις η απόσβεση δεν μπορεί να προσδιοριστεί άμεσα, αλλά προσεγγίζεται μέσω κατάλληλων μαθηματικών προσομοιωμάτων. Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου αποκτά ακόμη μεγαλύτερη σημασία στις σεισμικά απομονωμένες κατασκευές, όπου η ύπαρξη των εφεδράνων μεταβάλλει ουσιαστικά τη δυναμική συμπεριφορά του φορέα και η λανθασμένη εισαγωγή ιξώδους απόσβεσης μπορεί να δημιουργήσει τεχνητή μείωση των σεισμικών απαιτήσεων. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως *damping leakage*, δηλαδή ανεπιθύμητη διάχυση της απόσβεσης και ενδέχεται να οδηγήσει σε σημαντικές αποκλίσεις στα αποτελέσματα μιας σεισμικής ανάλυσης.

Η εργασία φιλοδοξεί να συμβάλει στην εξέταση και κατανόηση των προτεινόμενων από τη διεθνή βιβλιογραφία μοντέλων απόσβεσης στις δυναμικές αναλύσεις σεισμικά απομονωμένων μεταλλικών κτιρίων και συγκεκριμένα να αναδείξει, με την διεξαγωγή μη-γραμμικών αναλύσεων χρονοϊστορίας, τις συνέπειες που έχει η επιλογή του μοντέλου απόσβεσης σε κρίσιμα μεγέθη απόκρισης.

Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου, αναπτύσσεται ένα τρισδιάστατο αριθμητικό προσομοίωμα εννιαώροφου μεταλλικού κτιρίου με συγκεντρικούς συνδέσμους δυσκαμψίας (CBFs), το οποίο αρχικά σχεδιάζεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις των Ευρωκωδίκων 3 & 8 και στη συνέχεια εξοπλίζεται με σύστημα σεισμικής απομόνωσης βάσης αποτελούμενο από εφέδρανα μολύβδου–ελαστομερούς (Lead Rubber Bearings – LRBs). Η σεισμική απόκριση του φορέα αξιολογείται μέσω μη-γραμμικών αναλύσεων χρονοϊστορίας για επιλεγμένα επιταχυνσιογραφήματα, ενώ η ανελαστική συμπεριφορά της ανωδομής προσομοιώνεται με σημειακές πλαστικές αρθρώσεις. Στο ίδιο δομικό μοντέλο εφαρμόζονται διαφορετικές προσεγγίσεις προσομοίωσης της απόσβεσης, ώστε να είναι δυνατή η άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων χωρίς να μεταβάλλονται τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της κατασκευής.

Ειδικότερα, εξετάζονται τέσσερις διαφορετικές μέθοδοι προσομοίωσης της απόσβεσης: η απόσβεση κατά Rayleigh, η απόσβεση κατ’ αναλογία του μητρώου δυσκαμψίας (Stiffness Proportional Damping), η απόσβεση μέσω επαλληλίας ιδιομορφικών μητρώων (Modal Damping) και η απόσβεση υλικού (Material Damping). Η συγκριτική αξιολόγηση των παραπάνω μοντέλων πραγματοποιείται μέσω της εξέτασης κρίσιμων μεγεθών απόκρισης, όπως η ανάπτυξη πλαστικών αρθρώσεων, οι μέγιστες και παραμένουσες μετακινήσεις των ορόφων, οι τέμνουσες δυνάμεις ορόφων, ο δείκτης παραμένουσας σχετικής μετακίνησης των ορόφων (Residual Interstory Drift Ratio – RIDR) καθώς και η μέγιστη μετακίνηση και αξονική δύναμη των εφεδράνων.

Στην εργασία παρουσιάζεται κατά σειρά :

- Το θέμα που πραγματεύεται
- Ο σκοπός της εργασίας
- Βιβλιογραφική αναφορά
- Επίλυση του πακτωμένου κτιρίου του κτιρίου το συστήματος απομόνωσης
- Τα υπό διερεύνηση προσομοιώματα απόσβεσης
- Αποτελέσματα και σύγκριση μεγεθών απόκρισης

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Απόσβεση κατασκευών

Η απόσβεση στις κατασκευές αποτελεί έναν από τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη δυναμική τους συμπεριφορά έναντι σεισμικών, ανεμικών ή άλλων δυναμικών δράσεων. Κατά τη διάρκεια μιας ταλάντωσης, η κατασκευή δέχεται ενέργεια από την εξωτερική διέγερση και αντιδρά μέσω της μάζας, της δυσκαμψίας και των μηχανισμών απώλειας ενέργειας που διαθέτει. Η απόσβεση εκφράζει ακριβώς αυτήν την ικανότητα του συστήματος να καταναλώνει ή να διαχέει μέρος της εισερχόμενης ενέργειας, μειώνοντας σταδιακά το πλάτος των ταλαντώσεων.

Σε μια ιδανική ελαστική κατασκευή χωρίς απόσβεση, η ενέργεια που εισάγεται στο σύστημα θα διατηρούνταν και η ταλάντωση θα συνεχιζόταν χωρίς μείωση. Στις πραγματικές κατασκευές, όμως, μέρος της ενέργειας χάνεται λόγω διαφόρων φυσικών μηχανισμών, όπως η εσωτερική τριβή των υλικών, η ανάπτυξη μικρορρηγματώσεων, η τριβή στις συνδέσεις, η αλληλεπίδραση μεταξύ φερόντων και μη-φερόντων στοιχείων, η αλληλεπίδραση εδάφους-θεμελίωσης κλπ. Οι μηχανισμοί αυτοί περιορίζουν την ένταση της απόκρισης και συμβάλλουν στη μείωση των μετακινήσεων, των επιταχύνσεων και των εσωτερικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στην κατασκευή.

Η απόσβεση έχει ιδιαίτερη σημασία στον αντισεισμικό σχεδιασμό, επειδή η σεισμική δράση επιβάλλει στην κατασκευή επαναλαμβανόμενες και διαφορετικών τύπων (π.χ. εγγύς πεδίο) μετακινήσεις της βάσης της. Όσο μεγαλύτερη είναι η ικανότητα της κατασκευής ή του συστήματος προστασίας να αποσβένει ενέργεια, τόσο μικρότερη είναι συνήθως η σεισμική απαίτηση που μεταφέρεται στα φέροντα στοιχεία. Για τον λόγο αυτό, η απόσβεση λαμβάνεται υπόψη στις δυναμικές αναλύσεις μέσω κατάλληλων μαθηματικών προσομοιαμάτων, ενώ συχνά εκφράζεται ως ποσοστό της κρίσιμης απόσβεσης τις απόσβεσής εκείνης δηλαδή για την οποία το σύστημα δεν εκτελεί ταλάντωση.

Στη δυναμική ανάλυση μιας κατασκευής η εξίσωση κίνησης γράφεται συνήθως ως: $[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\}$ όπου $[M]$ είναι το μητρώο μάζας, $[K]$ το μητρώο δυσκαμψίας και $[C]$ το μητρώο απόσβεσης. Το πρόβλημα είναι ότι, ενώ η μάζα και η δυσκαμψία μπορούν να υπολογιστούν καθαρά από τη γεωμετρία, τα υλικά και τις συνοριακές συνθήκες, η απόσβεση δεν είναι άμεσα προσδιορίσιμη. Όπως εξηγήθηκε και παραπάνω η πραγματική απόσβεση μιας κατασκευής προέρχεται από πολλούς μηχανισμούς και επομένως είναι δύσκολο να κατασκευαστεί ένα «φυσικό» μητρώο απόσβεσης με την ίδια σαφήνεια που κατασκευάζονται τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας. Το πρόβλημα ορισμού του μητρώου απόσβεσης γίνεται ακόμα πιο δύσκολο όταν η υπό εξέταση κατασκευή διαθέτει σύστημα σεισμικής απομόνωσης ή άλλες συσκευές ανάλωσης ενέργειας. Ωστόσο, σημειώνεται ότι ο νόμος απόσβεσης των συσκευών απομόνωσης και των συσκευών ανάλωσης ενέργειας έχει σαφή μαθηματική περιγραφή.

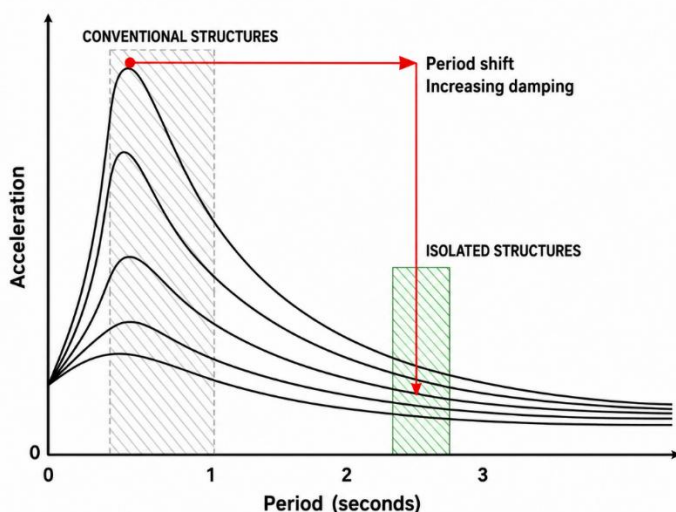
2.2 Σεισμική Απομόνωση Βάσης

Η σεισμική απομόνωση βάσης είναι μια μέθοδος αντισεισμικού σχεδιασμού κατά την οποία η ανωδομή μιας κατασκευής αποσυνδέεται, σε σημαντικό βαθμό, από την άμεση κίνηση του εδάφους μέσω ειδικών διατάξεων (συσκευών απομόνωσης) που τοποθετούνται συνήθως μεταξύ θεμελίωσης και κτιρίου. Σε αντίθεση με τη συμβατική αντισεισμική φιλοσοφία, όπου η κατασκευή σχεδιάζεται ώστε να παραλάβει τις σεισμικές δυνάμεις μέσω της αντοχής και της πλαστιμότητας των δομικών της στοιχείων, η σεισμική απομόνωση βάσης επιδιώκει να περιορίσει εξ αρχής τη σεισμική ενέργεια και τις επιταχύνσεις που μεταφέρονται στην ανωδομή. Η βασική αρχή της μεθόδου είναι ότι, κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, το έδαφος και η θεμελίωση μπορούν να κινηθούν έντονα, ενώ το κτίριο επάνω από το επίπεδο απομόνωσης εκδηλώνει κίνηση στερεού σώματος και με σημαντικά μικρότερες μετακινήσεις και επιταχύνσεις σε σχέση με την κλασική περίπτωση απευθείας θεμελίωσης του στο

έδαφος. Η δυναμική θεωρία της σεισμικής απομόνωσης βάσης περιγράφεται αναλυτικά σε πληθώρα βιβλίων και δημοσιεύσεων, ενδεικτικά αναφέρονται οι Naeim & Kelly (1999) και Chopra (2017).

Η απομόνωση επιτυγχάνεται με τη χρήση διαφόρων συσκευών απομόνωσης, όπως ελαστομεταλλικά εφέδρανα, εφέδρανα μολύβδου-ελαστικού (LRB), συστήματα ολίσθησης ή άλλα μηχανικά συστήματα που προσφέρουν μεγάλη οριζόντια ευκαμψία και πρόσθετη απόσβεση. Οι διατάξεις αυτές επιτρέπουν ελεγχόμενη σχετική μετακίνηση μεταξύ εδάφους και ανωδομής, ενώ ταυτόχρονα μεταφέρουν με ασφάλεια τα κατακόρυφα φορτία της κατασκευής. Με αυτόν τον τρόπο η κύρια παραμόρφωση συγκεντρώνεται στο επίπεδο της απομόνωσης και όχι στα φέροντα στοιχεία του κτιρίου, γεγονός που συμβάλλει στη μείωση των βλαβών στον φέροντα οργανισμό αλλά και στα μη-φέροντα στοιχεία και τον εξοπλισμό του κτιρίου.

Αν σχεδιαστεί σωστά η σεισμική απομόνωση βάσης, θα οδηγήσει σε αύξηση της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου της κατασκευής λόγω τις χαμηλής δυσκαμψίας των συσκευών απομόνωσης, ώστε το σύστημα να οδηγηθεί σε ευμενέστερες περιοχές των φασμάτων απόκρισης. Έτσι μειώνονται οι αδρανειακές δυνάμεις, η τέμνουσα βάσης και οι σχετικές μετακινήσεις μεταξύ των ορόφων του κτιρίου. Παράλληλα, όταν το σύστημα διαθέτει μηχανισμό απόσβεσης στη στάθμη απομόνωσης, μέρος της σεισμικής ενέργειας απορροφάται ή διαχέεται στο επίπεδο της απομόνωσης, περιορίζοντας περαιτέρω τη σεισμική απαίτηση στην ανωδομή.



Εικόνα 1 : Επίδραση της αύξησης της ιδιοπεριόδου στα δυναμικά μεγέθη.

Σήμερα υπάρχουν αρκετοί διεθνείς κανονισμοί για τον σχεδιασμό και την διαστασιολόγηση των αντισεισμικών κατασκευών που περιλαμβάνουν το θέμα της σεισμικής απομόνωσης.

Οι κυριότεροι από αυτούς είναι : ο Ευρωκώδικας 8, ο Αμερικανικός ASCE 7-22, ο Νεοζηλανδικός NZS 1170.5, ο Ιαπωνικός BSL και ο Χιλιανός NCh 2745. Στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση του Ευρωκώδικα 8 και όπου αυτός δεν έχει προβλέψεις χρησιμοποιούνται οι διατάξεις του ASCE 7-22. Λεπτομερής διαδικασία σχεδιασμού με του Ευρωκώδικες και τους Αμερικανικούς κανονισμούς μπορεί να βρεθεί στους Χατζηγεωργίου & Παπαγιανόπουλος (2021).

2.3 Δημοσιεύσεις στο αντικείμενο

Οι Pant et al. (2013) συγκρίνουν αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών σε σεισμική τράπεζα ενός τριώροφου κτιρίου μειωμένης κλίμακας με αποτελέσματα τρισδιάστατων αριθμητικών προσομοιώσεων πεπερασμένων στοιχείων σε κτίριο από σκυρόδεμα με σύστημα απομόνωσης βάσης με εφέδρανα ελαστομερούς υψηλής απόσβεσης (HDRB). Η ανάλυση επικεντρώνεται σε μη γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας άμεσης ολοκλήρωσης, εξετάζοντας πολλές διαφορετικές παραλλαγές της

απόσβεσης κατά Rayleigh, της απόσβεσης κατ' αναλογία του μητρώου μάζας, της απόσβεσης κατ' αναλογία του μητρώου δυσκαμψίας άλλα και της απόσβεσης μέσω επαλληλίας ιδιομορφικών μητρώων. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι για το μοντέλο Rayleigh ο υπολογισμός των συντελεστών α και β δίνει πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα λαμβάνοντας $\xi=1\%$ αντί για $\xi=5\%$ που θεωρείται συμβατικά, ότι ή απόσβεση κατ' αναλογία του μητρώου δυσκαμψίας δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα όταν χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των συντελεστών της η ιδιοπερίοδος της απομονωμένης κατασκευής λαμβάνοντας υπόψη τη μετελαστική δυσκαμψία του συστήματος απομόνωσης ενώ για το μοντέλο επαλληλίας ιδιομορφικών μητρώων προέκυψαν καλύτερα αποτελέσματα όταν έδωσαν μηδενική απόσβεση στις ιδιοπεριόδους που ήταν μεγαλύτερες από την 1^η ιδιοπερίοδο της πακτωμένης κατασκευής και 5% απόσβεση σε όλες τις άλλες από ότι όταν έδωσαν 5% απόσβεση σε όλες.

Η εργασία των Anajafi et al. (2020) εξετάζει τις συνέπειες που μπορεί να έχει η λανθασμένη προσομοίωση της ιξώδους απόσβεσης σε κτίρια με σεισμική απομόνωση βάσης. Συγκεκριμένα, μελετά το φαινόμενο που οι συγγραφείς ονομάζουν damping leakage, δηλαδή την ανεπιθύμητη εισαγωγή πρόσθετης απόσβεσης στις ανώτερες ιδιοπεριόδους λόγω της χρήσης της πρώτης ιδιοπεριόδου της σεισμικά μονωμένης κατασκευής για των υπολογισμό των γραμμικών συντελεστών του μητρώου απόσβεσης. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να οδηγήσει σε τεχνητή μείωση των σεισμικών απαιτήσεων, όπως των μετακινήσεων των μονωτήρων, των επιταχύνσεων ορόφων και των αποκρίσεων που σχετίζονται με τις ανώτερες ιδιοπεριόδους. Οι συγγραφείς αφού προσομοιώσουν πλαίσιο κατασκευής στο λογισμικό SAP2000 καταλήγουν ότι πιο κατάλληλη λύση είναι η χρήση απόσβεσης κατ' αναλογία της δυσκαμψίας στην ανωδομή, όπου ο συντελεστής β_k υπολογίζεται με βάση τη δεύτερη ιδιοπερίοδο του σεισμικά μονωμένου κτιρίου.

Στην εργασία των Kitayama and Constantinou (2023). αναλύεται πλαίσιο εξάωροφου σεισμικά μονωμένου κτιρίου χαλύβδινης ανωδομής. Οι συγγραφείς εξετάζουν την ανωδομή αφενός με καμπτικά πλαίσια και αφετέρου με κεντρικά διασυνδεδεμένα. Εξετάζονται τρεις τύποι σεισμικής απομόνωσης βάσης, τριπλά εκκρεμή τριβής (triple friction pendulum bearings — TFP) χωρίς τοίχωμα περιορισμού μετακίνησης, TFP με τοίχωμα περιορισμού μετακίνησης, και διπλά κοίλα εκκρεμή τριβής — DC χωρίς τοίχωμα περιορισμού μετακίνησης. Το πλαίσιο σχεδιάζεται σύμφωνα τις απαιτήσεις του ASCE/SEI 7–16 και μέσω μη γραμμικών αναλύσεων στο πρόγραμμα OpenSees εξετάζεται η επίδραση που έχει ο τρόπος προσομοίωσης της εγγενούς απόσβεσης στην υπολογιζόμενη σεισμική απόκριση και στην πιθανότητα κατάρρευσης. Η απόσβεση προσομοιώνεται με τα μοντέλα μηδενικής απόσβεσης στην ανωδομή, επαλληλίας ιδιομορφικών μητρώων, Zareian-Medina (element-specific initial stiffness proportional damping), εικονικών γραμμικών ιξωδών αποσβεστήρων σε κάθε όροφο με απόσβεση ανάλογη της δυσκαμψίας του ορόφου και εικονικών γραμμικών ιξωδών αποσβεστήρων σε κάθε όροφο με σταθερή απόσβεση. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι με εξαίρεση το μοντέλο μηδενικής απόσβεσης στην ανωδομή τα υπόλοιπα μοντέλα ήταν πολύ κοντά στα αποτελέσματα και προτείνουν τη χρήση του μοντέλου των εικονικών γραμμικών ιξωδών αποσβεστήρων σε κάθε όροφο με σταθερή απόσβεση ως απλούστερο στη χρήση αλλά και υπολογιστικά ελαφρύτερο.

Σε άλλη εργασία οι Kitayama και Constantinou (2025) αναλύουν στο πρόγραμμα OpenSees εξάωροφα πλαίσια κατασκευών από χάλυβα. Συγκεκριμένα αναλύουν ένα καμπτικό πλαίσιο και ένα πλαίσιο με κεντρικά διασυνδεδεμένους συνδέσμους δυσκαμψίας. Εξετάζουν τις παραπάνω περιπτώσεις τόσο με συμβατική θεμελίωση όσο και σεισμικά απομονωμένες με συσκευές εκκρεμών τριβής (friction pendulums). Η απόσβεση εξετάστηκε με δύο μοντέλα. Στο πρώτο με σταθερή απόσβεση ίση με την τυπική για όλες τις ιδιομορφές, εκτός από την απομονωμένη όπου λήφθηκε ίση με 0 και στο δεύτερο όπου η προσομοίωση έγινε με γραμμικούς ιξώδης αποσβεστήρες για κάθε όροφο με χαρακτηριστικά τέτοια ώστε να προκύπτει για τις κατασκευές με συμβατική θεμελίωση απόσβεση ίση με την τυπική στην 1^η ιδιομορφή, ενώ στις απομονωμένες απόσβεση ίση με την τυπική για την 2^η ιδιομορφή. Η τυπική απόσβεση δοκιμάστηκε για όλες τις ακέραιες τιμές μεταξύ 1% και 5%.

Οι Kitayama και Constantinou (2025) χρησιμοποίησαν τα δεδομένα των αναλύσεων χρονοϊστορίας για να φτιάξουν και να συγκρίνουν καμπύλες ευθραυστότητας για την κατάρρευση των

κατασκευών. Τα συμπεράσματα τους περιληπτικά είναι ότι η θεώρηση της τυπικής απόσβεσης και του μοντέλου απόσβεσης δίνουν μεγαλύτερες διαφορές στην πιθανότητα κατάρρευσης των μη απομονωμένων κατασκευών. Ενώ προτείνουν τη χρήση της σταθερής απόσβεσης για κάθε ιδιομορφή στην ανάλυση απομονωμένων κατασκευών και τη χρήση του μοντέλου των γραμμικών ιξωδών αποσβεστήρων για τις κατασκευές με συμβατική θεμελίωση.

Στην εργασία των Tian et al. (2025) αναλύεται πενταώροφο μεταλλικό κτίριο με πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος. Πιο αναλυτικά το κτίριο εξετάζεται μία φορά με καμπτικά πλαίσια με συμβατική θεμελίωση και με σύστημα απομόνωσης βάσης με εφέδρανα ελαστομερούς-μολύβδου (LRB) καθώς και μία φορά με κεντρικά διασυνδεδεμένα πλαίσια με συμβατική θεμελίωση και με συσκευές σεισμικής απομόνωσης. Η προσομοίωση γίνεται στο πρόγραμμα OpenSees και λαμβάνονται υπόψη τριών ειδών σεισμικές κινήσεις 1) μακριά από την κατασκευή, 2) στο εγγύς πεδίο της κατασκευής χωρίς εμφάνιση παλμού, 3) στο εγγύς πεδίο τη κατασκευής με εμφάνιση παλμού στο επιταχυνσιογράφημα. Χρησιμοποιήθηκαν ένα μοντέλο σταθερής απόσβεσης για κάθε ιδιομορφή και το μοντέλο Rayleigh. Μεταξύ άλλων οι ερευνητές της εν λόγω εργασίας οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι για τα σεισμικά απομονωμένα κτίρια η χρήση του μοντέλου απόσβεσης Rayleigh σε σχέση με το μοντέλο σταθερής απόσβεσης οδηγεί σε μικρότερες επιταχύνσεις ορόφων και μικρότερες μετακινήσεις στο σύστημα σεισμικής απομόνωσης, ειδικά στις σεισμικές κινήσεις μακριά από την κατασκευή, ενώ φαίνεται να μην επηρεάζει σημαντικά τις παραμένουσες μετακινήσεις των ορόφων. Παρατήρησαν ότι οι μέσες διαφορές που προκύπτουν από την χρήση διαφορετικών μοντέλων απόσβεσης είναι ίδιες ανεξάρτητα από το είδος της σεισμικής κίνησης.

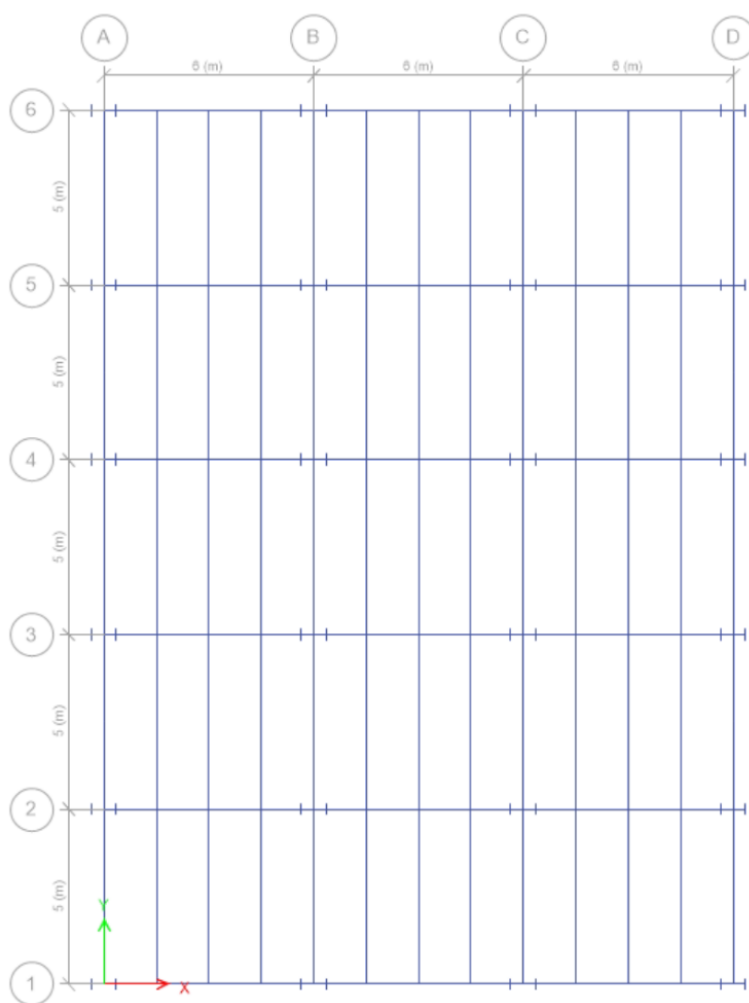
Στην εργασία των Fei et al. (2022) μελετήθηκε η επίδραση του μοντέλου απόσβεσης σε σεισμικά απομονωμένο με εφέδρανα ελαστομερούς-μολύβδου, πενταώροφο μεταλλικό κτίριο με πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν το μοντέλο απόσβεσης κατά Rayleigh και το μοντέλο σταθερής απόσβεσης. Έγιναν αναλύσεις χρονοϊστορίας στο πρόγραμμα OpenSees για τη σεισμική κίνηση El Centro καταλλήλως τροποποιημένη και για δυναμική καταπόνηση από περιβαλλοντικές δονήσεις όπου χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από κίνηση υπόγειου σιδηρόδρομου. Οι μελετητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι όσο αφορά τις περιβαλλοντικές δονήσεις το μοντέλο σταθερής απόσβεσης έδωσε πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα ενώ όσο αφορά τις σεισμικές αναλύσεις το μοντέλο Rayleigh υποεκτίμησε τις μετακινήσεις του συστήματος απομόνωσης και τις επιταχύνσεις των ορόφων και αυτό οφείλεται στο ότι δίνει λανθασμένα υψηλές τιμές απόσβεσης στις ανώτερες ιδιομορφές.

Τέλος στην εργασία των Ryan and Polanco (2008) εξετάζονται τα προβλήματα που προκύπτουν από την χρήση του μοντέλου Rayleigh σε σεισμικά απομονωμένες κατασκευές συγκρίνοντας το με το μοντέλο απόσβεσης κατά αναλογία της δυσκαμψίας (Stiffness Proportional). Αναλύθηκαν απλουστευμένα προσομοιώματα κτιρίων 3,5 και 8 ορόφων με γραμμικές και μη γραμμικής συσκευές απομόνωσης βάσης. Παρατηρήθηκε ότι το μοντέλο Rayleigh οδήγησε σε υποεκτίμηση των μέγιστων μετακινήσεων του ανώτερου ορόφου κατά 10-25% σε σχέση με την κίνηση απαραμόρφωτου σώματος που θα έπρεπε να παρουσιάζει η ανωδομή. Οι αναλυτές προτείνουν τη χρήση του αναλογικού ως προς τη δυσκαμψία μοντέλου ως καλύτερου για την ανάλυση απομονωμένων κατασκευών.

3. Εφαρμογή της μεθόδου

3.1 Επίλυση του πακτωμένου κτιρίου

Προσομοιώνεται μεταλλικό κτίριο εννέα ορόφων με σύμμικτες πλάκες πάχους 14 cm επί χαλυβδόφυλλων. Οι δοκοί είναι συνδεδεμένες κατά την οριζόντια διεύθυνση εξασφαλίζοντας συνθήκες διαφράγματος σε κάθε στάθμη. Οι διαστάσεις των κτιρίων είναι Χ-Χ': 18.00 m (κάναβος 3*6.00 m) , Υ-Υ': 25.00 m (κάναβος 5Χ5.00 m) με ύψος ορόφων 3.00 m. Στην Υ-Υ τοποθετήθηκαν διαγώνιοι σύνδεσμοι τύπου ανεστραμμένου V στα εξωτερικά πλαίσια, με σύνδεση τύπου άρθρωσης στην ισχυρή διεύθυνση. Στη σεισμικά απομονωμένη κατασκευή προσομοιώνεται πλάκα πάχους 40 cm από οπλισμένο σκυρόδεμα, διαστάσεων 27x20 μέτρων, εδραζόμενη πάνω στο σύστημα απομόνωσης.



Εικόνα 2 : Κάναβος και τυπικός όροφος

3.2 Φορτία

Βάση της ανωτέρω παραδοχής για την χρήση λαμβάνονται υπ' όψιν τα παρακάτω φορτία :

Μόνιμα Φορτία (DEAD)

Τα ίδια βάρη των διατομών υπολογίζονται αυτόματα από το πρόγραμμα. Τα πρόσθετα μόνιμα φορτία που προσθέτονται είναι:

- Για επιστρώσεις 1,5 kN/m² σε κάθε όροφο.
- Για υαλοπετάσματα 2,0 kN/m σε όλες τις εξωτερικές δοκούς εκτός του δώματος.

c) Για εσωτερικά χωρίσματα $1,5 \text{ kN/m}$ σε όλες τις εσωτερικές κύριες δοκούς εκτός του δώματος.

Κινητά Φορτία (LIVE)

d) Κινητό φορτίο τυπικού ορόφου $2,0 \text{ kN/m}^2$.

e) Κινητό φορτίο δώματος $1,5 \text{ kN/m}^2$.

Φορτία Ανέμου (WIND)

Η θεώρηση τους δεν προσφέρει στον σκοπό της εργασίας, ωστόσο τονίζεται ότι ένα σύστημα απομόνωσης σχεδιάζεται ώστε να μην ενεργοποιείται από το φορτίο ανέμου.

Σεισμική φόρτιση του κτιρίου με συμβατική θεμελίωση

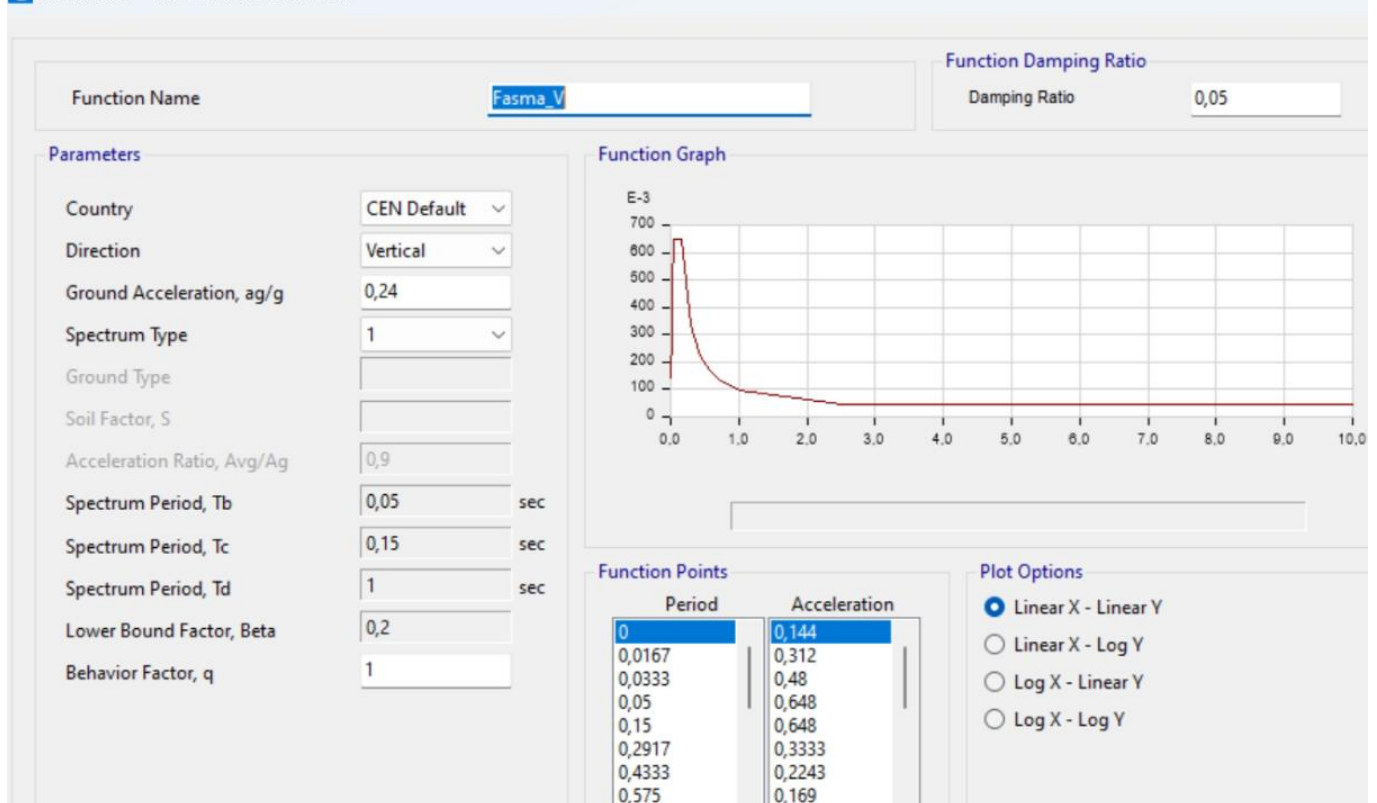
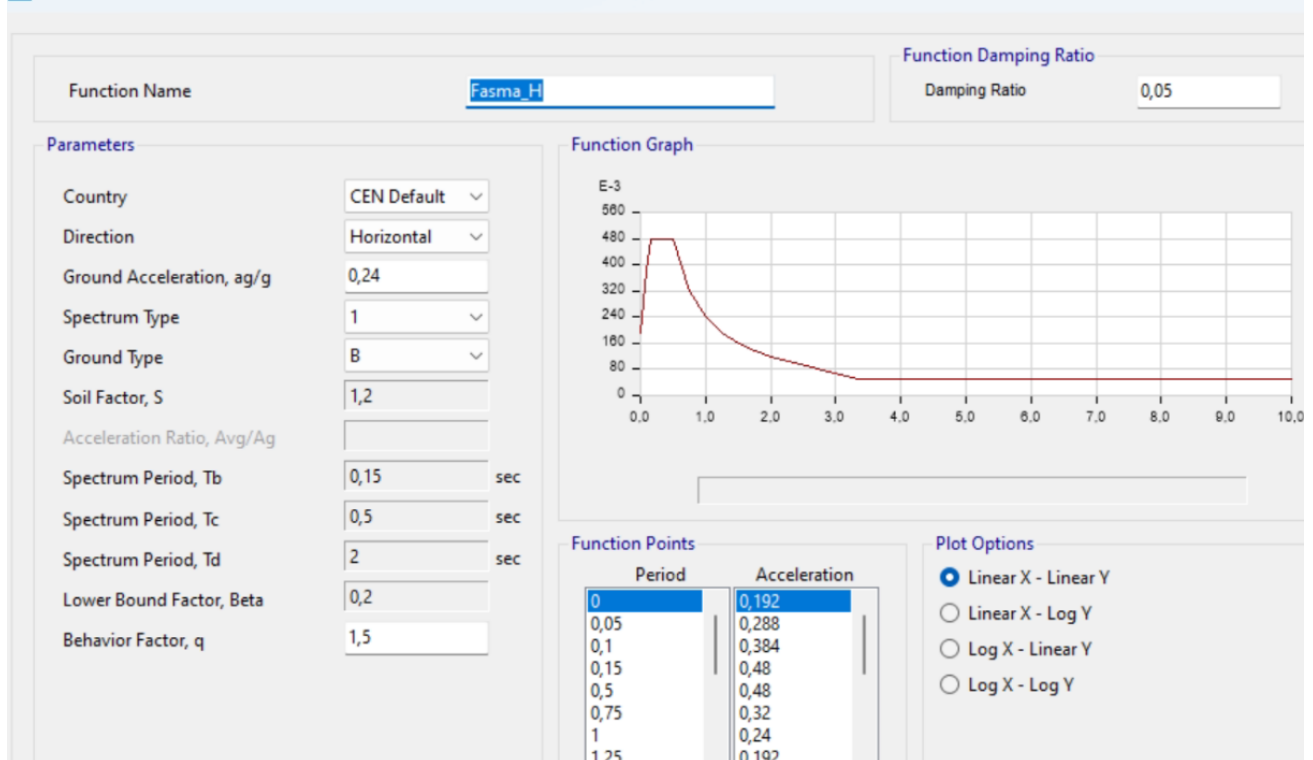
Η σεισμική δράση και οι εδαφικές συνθήκες θα ληφθούν υπ' όψιν σύμφωνα με τις προβλέψεις του EC8. Θεωρείται ότι η περιοχή κατασκευής του έργου ανήκει στην κατηγορία εδαφικών επιταχύνσεων 0.24 g και εδαφικής κατηγορίας B, με φάσμα σχεδιασμού τύπου 1 στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση με τις ακόλουθες παραμέτρους:

Διεύθυνση οριζόντια :

- | | |
|-----------------------------|--|
| 1. Εδαφική επιτάχυνση | : $\alpha=0.24$ |
| 2. Σπουδαιότητα II | : $\gamma=1$ |
| 3. Κατηγορία εδάφους | : B με τις προβλεπόμενες τιμές περιόδων , $S=1.20$ |
| 4. Συντελεστής συμπεριφοράς | : $q_x = q_y = 1.50$ |
| 5. Λόγος απόσβεσης | : 5.0% |

Διεύθυνση κατακόρυφη :

- | | |
|--|--|
| 1. Εδαφική επιτάχυνση | : $\alpha=0.24 * 0.90$ (Τύπου 1) |
| 2. Σπουδαιότητα II | : $\gamma=1$ |
| 3. Κατηγορία εδάφους | : B με τις προβλεπόμενες τιμές περιόδων , $S=1.20$ |
| 4. Συντελεστής συμπεριφοράς | : $q_x = q_y = 1.00$ |
| 5. Λόγος απόσβεσης | : 5.0% |
| 6. Για τις κατασκευές με συμβατική θεμελίωση δεν απαιτείται να συμπεριληφθεί η κατακόρυφη συνιστώσα, ενώ απαιτείται σε αυτές με απομόνωση βάσης. Τελικά λαμβάνεται υπ' όψιν σε όλες τις κατασκευές για λόγους σύγκρισης. | |



Εικόνα 3 : Φάσματα σχεδιασμού οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση

Συντελεστής συμπεριφοράς

$$q_x = q_y = 1.50 \quad q_z = 1.00$$

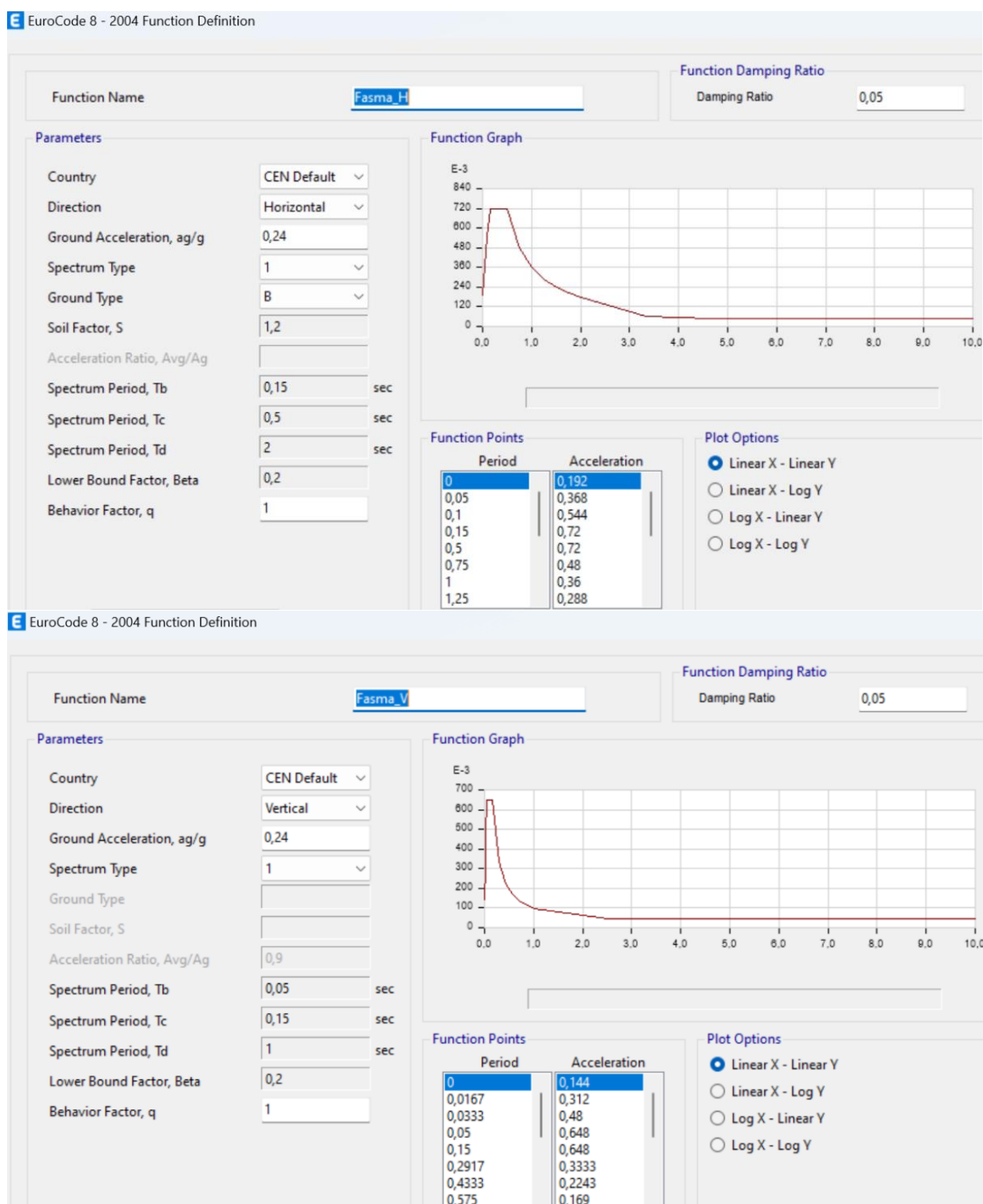
Σεισμική φόρτιση για κτίρια με απομόνωση βάσης

Για την ίδια περιοχή εδαφικών επιταχύνσεων 0.24 g και εδάφους κατηγορίας B , η σεισμική

δράση θα ληφθεί σύμφωνα με τον EC8_κεφ.3 & κεφ.10, με φάσμα τύπου 1 για μέγεθος $M > 5.5$.

Σύμφωνα με το κεφάλαιο 10 του EC8 προβλέπεται είτε πλήρης απομόνωση βάσης, άρα απαιτείται η ελαστική συμπεριφορά της κατασκευής με $q=1$, αλλά ειδικά για τα κτίρια επιτρέπεται η χρήση $q=1.50$ για την ανωδομή. Στην εργασία αυτή δεν λαμβάνεται υπ' όψιν η ευμενής διάταξη που αφορά τα κτίρια ($q=1.50$) και απαιτείται η απόλυτη ελαστική συμπεριφορά της κατασκευής ($q=1$).

Θα γίνει χρήση των ελαστικών φασμάτων απόκρισης λαμβάνοντας υπ' όψιν την απόσβεση του συστήματος κτιρίου/εφεδράνων μέσω του συντελεστή η . Λόγω της σπουδαιότητας των κτιρίων ($\eta=1.00$) δεν απαιτούνται ειδικά φάσματα για να ληφθούν υπ' όψιν τα ειδικά εδαφικά και σεισμικά χαρακτηριστικά της θέσης του κτιρίου.



Εικόνα 4 : Ελαστικά φάσματα για οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση

Ελαστικό με φάσμα Τύπου 1 του EC8 στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση με τις ακόλουθες παραμέτρους (το εθνικό προσάρτημα για τις τιμές : $T_D=2.50$ και $\beta=0.20$ δεν λαμβάνετε υπ' όψιν) :

Διεύθυνση οριζόντια (BI)

1. Τύπος Φάσματος 1
2. Εδαφική επιτάχυνση : $\alpha=0.24$
3. Σπουδαιότητα II : $\gamma=1$
4. Κατηγορία εδάφους : B με τις προβλεπόμενες τιμές περιόδων
5. Απόσβεση : αυτή του συστήματος απομόνωσης (26.0%)
6. Συντελεστής συμπεριφοράς : $\alpha_x = \alpha_y = 1.00$

Διεύθυνση κατακόρυφη (BI)

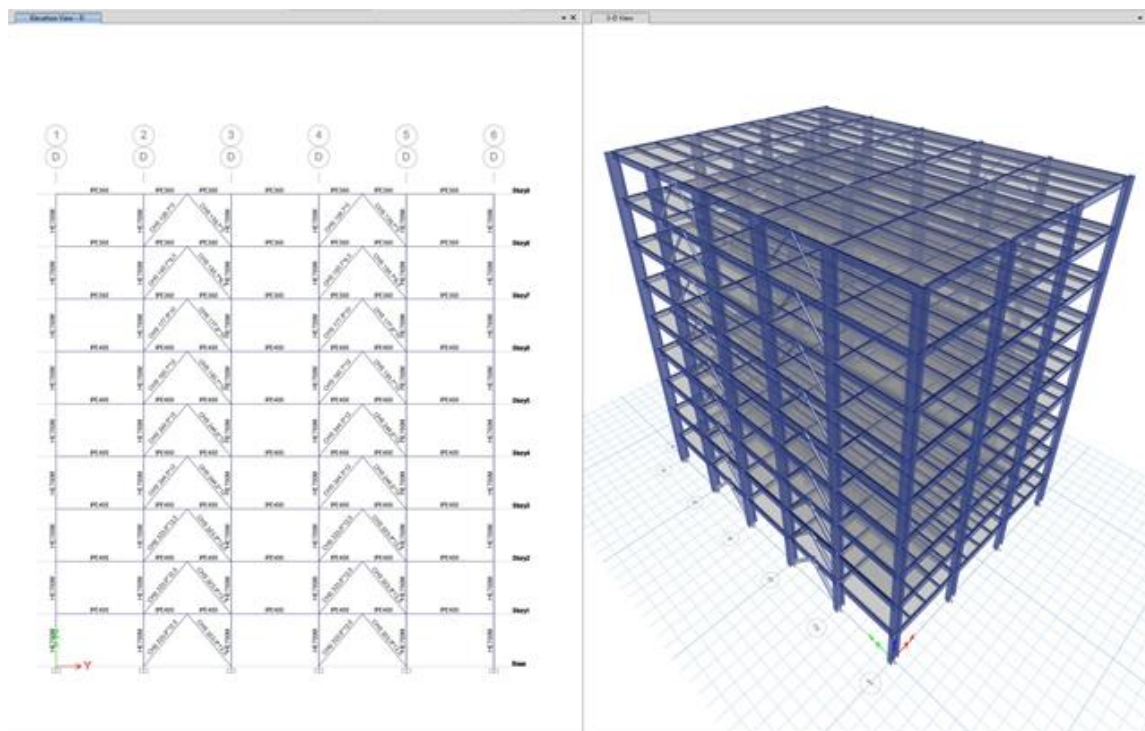
1. Τύπος Φάσματος 1
2. Εδαφική επιτάχυνση : $\alpha=0.24 * 0.90$
3. Σπουδαιότητα II : $\gamma=1$
4. Κατηγορία εδάφους : B με τις προβλεπόμενες τιμές περιόδων
5. Απόσβεση : 3.0%
6. Συντελεστής συμπεριφοράς : $\alpha_x = \alpha_y = 1.00$

3.3 Τελικές διατομές σχεδιασμού

Από την ανάλυση προέκυψαν διατομές:

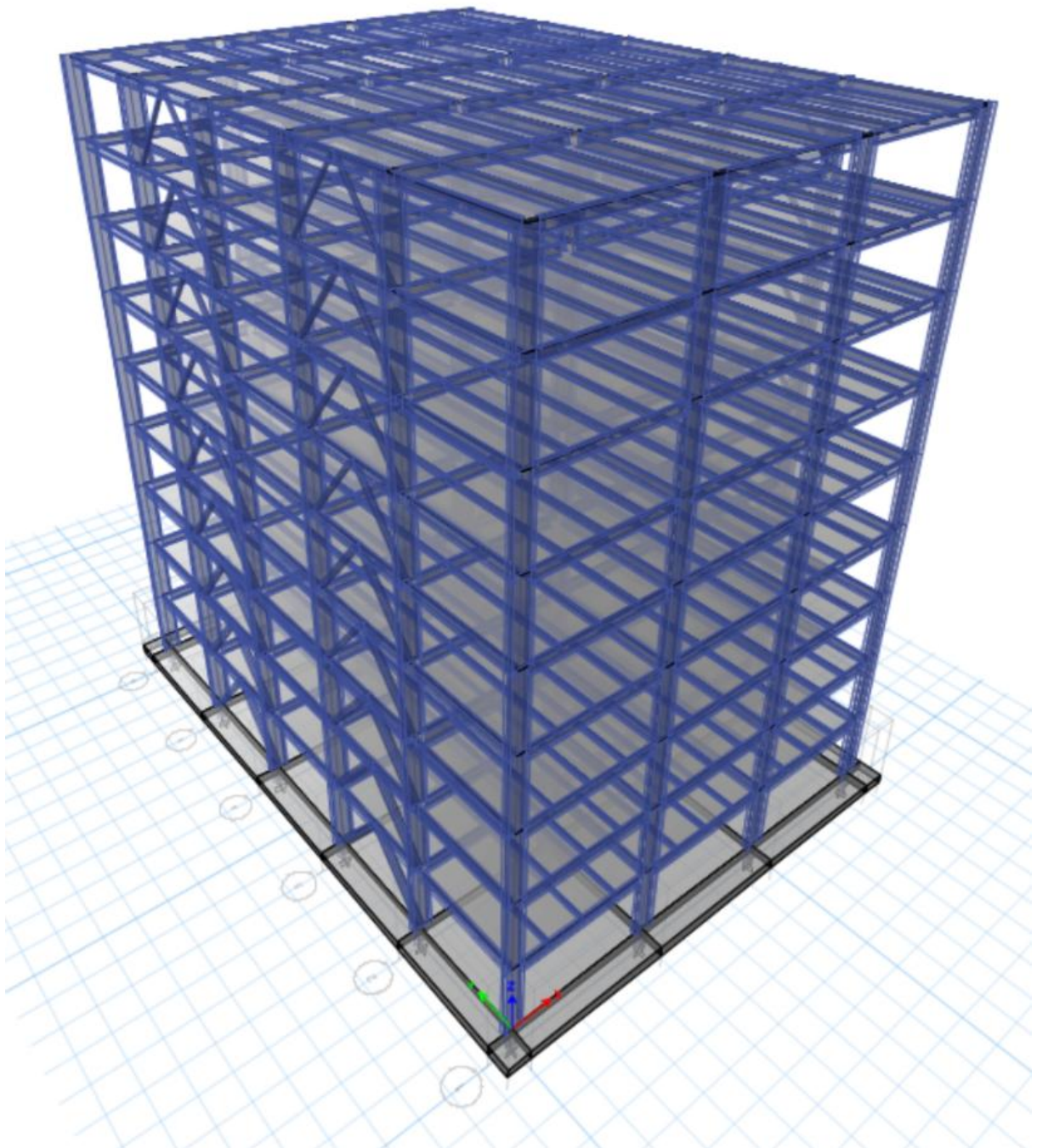
Μέλη	Διατομή	Κατηγορία Χάλυβα
Υποστυλώματα	HEM700	S355
Κύριες δοκοί ορόφων 1-4	IPE400	S275
Κύριες δοκοί ορόφων 5-9	IPE360	S275
Δευτερεύουσες δοκοί	IPE160	S275
Σύνδεσμοι ορόφων 1-3	CHS 323.9 / 12.5	S355
Σύνδεσμοι ορόφων 4-5	CHS 244.5 / 12	S355
Σύνδεσμοι ορόφου 6	CHS 193.7 / 12	S355
Σύνδεσμοι ορόφου 7	CHS 177.8 / 10	S355
Σύνδεσμοι ορόφου 8	CHS 193.7 / 6.3	S355
Σύνδεσμοι ορόφου 9	CHS 139.7 / 3	S355

Η 1^η ιδιοπερίοδος της πακτωμένης στο έδαφος κατασκευής είναι 1,22 sec.



Εικόνα 5 : Πακτωμένη στο έδαφος κατασκευή

ΙΔΙΟΠΕΡΙΟΔΟΙ ΠΑΚΤΩΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ					
Mode	Period	UX	UY	UZ	RZ
1	1,226	1	0	0	0
2	0,681	0	0,998	0	0,001
3	0,651	0	0,001	0	0,998
4	0,368	1	0	0	0
5	0,226	0	1	0	0
6	0,211	0	0	0	1
7	0,171	1	0	0	0
8	0,136	0	1	0	0
9	0,121	0	0	1	0
10	0,12	0,104	0,707	0,092	0,097
11	0,117	0,002	0	0,977	0,02
12	0,116	0	0	0	1
ΙΔΙΟΠΕΡΙΟΔΟΙ ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ					
Mode	Period	UX	UY	UZ	RZ
1	2,28	0,999	0,001	0	0
2	2,183	0,001	0,999	0	0
3	1,074	0	0	0	1
4	0,732	0,999	0	0	0
5	0,565	0	1	0	0
6	0,396	0,001	0	0	0,999
7	0,306	0,999	0	0	0,001
8	0,2	0	1	0	0
9	0,198	0	0	1	0
10	0,181	0	0,018	0	0,982
11	0,18	0	0,005	0	0,995
12	0,166	0,994	0	0	0,006



Εικόνα 6 : Σεισμικά απομονωμένη κατασκευή

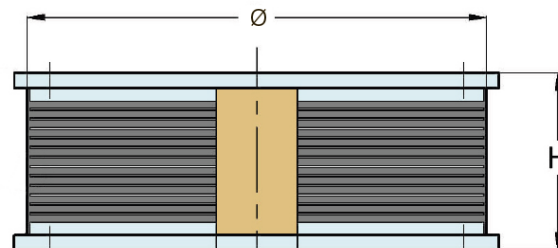
3.4 Σύστημα σεισμικής απομόνωσης βάσης

Αρχικός στόχος για τον σχεδιασμό του συστήματος απομόνωσης βάσης ήταν ο τριπλασιασμός της ιδιοπεριόδου της πακτωμένης κατασκευής. Αφού εξετάστηκε ο διαθέσιμος αριθμός LRB από διάφορες εταιρείες του εμπορίου η λύση που προσέφερε την μεγαλύτερη επαύξηση στην πρώτη ιδιοπερίοδο ήταν η συνδυαστική χρήση εφεδράνων της εταιρείας ISOSISM. Τα εφέδρανα επιλέχθηκαν ώστε αφενός να προσφέρουν τη μέγιστη ευκαμψία στην κατασκευή και αφετέρου να πληρούν του ελέγχους που απαιτεί ο κατασκευαστής ως προς τις αξονικές δυνάμεις και τις μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις. Σημειώνεται ότι σχεδιάστηκε απομόνωση σε διαφορετικά στάδια (multi-stage isolation). Για την φασματική ανάλυση λαμβάνεται υπ' όψιν το ελαστικό φάσμα απόκρισης του EC8_κεφ.3 με απόσβεση αυτή του συστήματος των μονωτήρων. Η κατακόρυφη δυσκαμψία των εφεδράνων θεωρήθηκε 150 φορές μεγαλύτερη της οριζόντιας.

Η μέγιστη κατακόρυφη δύναμη στα εφέδρανα κατά την φασματική ανάλυση είναι 3019,79 kN ενώ η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση 101 mm. Η 1^η ιδιοπερίοδος της απομονωμένης κατασκευής με βάση την τιμή της ενεργούς δυσκαμψίας των εφεδράνων είναι 2,28 sec.

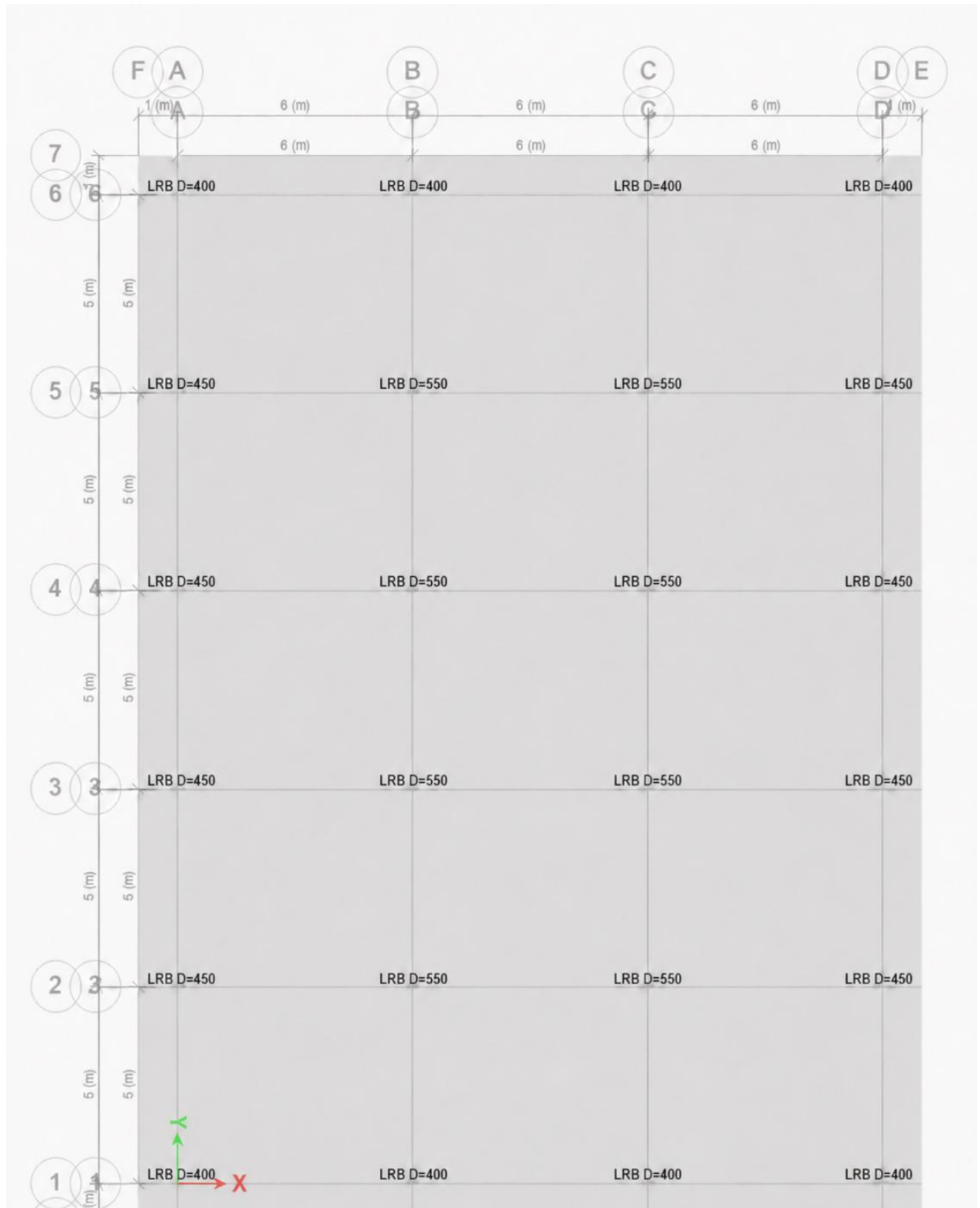
- Model LRB 0.4 - 10: Modulus $G=0.4$ MPa
- Model LRB 0.8 - 10: Modulus $G=0.8$ MPa

$\varnothing$: Isolator diameter
 T_r : Total thickness of elastomer
 H : Total height of isolator
 Δ_{max} : Maximum horizontal displacement
 V_{max} : Maximum vertical load under zero displacement
 V_{seism} : Maximum vertical load under seismic displacement
 K_r : Horizontal stiffness of the elastomer
 K_{lp} : Stiffness of the lead
 F_y : Elastic force of the lead
 K_{eff} : Effective stiffness of the isolator
 ξ_{eff} : Effective damping



Ø	T _r	LRB 0.4 - 10										LRB 0.8 - 10									
		H	Δ _{max}	V _{max}	V _{seism}	K _r	K _{lp}	F _y	K _{eff}	ξ _{eff}	H	Δ _{max}	V _{max}	V _{seism}	K _r	K _{lp}	F _y	K _{eff}	ξ _{eff}		
mm	mm	mm	mm	kN	kN	kN/mm	kN/mm	kN	kN/mm	%	mm	mm	kN	kN	kN/mm	kN/mm	kN	kN/mm	%		
Ø300	45	129	110	1430	820	0.59	5.89	34	0.87	26	129	95	2380	1550	1.12	11.17	60	1.70	27		
Ø300	70	169	170	920	290	0.38	3.79	34	0.56	26	169	150	1640	680	0.72	7.18	60	1.08	27		
Ø350	55	145	135	2200	1230	0.65	6.53	49	0.98	27	165	115	3290	2390	1.25	12.48	80	1.88	27		
Ø350	75	177	185	1610	600	0.48	4.79	49	0.72	27	197	160	2920	1350	0.92	9.15	80	1.37	27		
Ø400	60	147	150	2870	1670	0.79	7.85	60	1.15	26	167	130	3620	3200	1.50	14.99	102	2.21	26		
Ø400	90	192	225	1950	630	0.52	5.24	60	0.77	26	212	195	3540	1490	1.00	9.99	102	1.48	26		
Ø450	72	165	180	3940	2180	0.83	8.26	80	1.23	27	185	155	4580	4190	1.57	15.71	136	2.37	27		
Ø450	108	219	260	2620	770	0.55	5.51	80	0.83	27	239	230	4580	1740	1.05	10.47	136	1.59	27		
Ø500	84	197	210	4380	2360	0.87	8.67	110	1.34	28	217	180	4890	4680	1.67	16.66	165	2.50	27		
Ø500	126	257	290	2920	870	0.58	5.78	110	0.92	29	277	270	4890	1780	1.11	11.11	165	1.67	27		
Ø550	88	198	220	5460	3050	1.01	10.10	119	1.50	27	228	190	6940	5900	1.93	19.29	196	2.87	27		

Εικόνα 7 : Επιλεγμένα εφέδρανα από τον κατάλογο της ISOSISM



Εικόνα 8 : Διάταξη των εφεδράνων στην κάτοψη

3.5 Μοντέλα απόσβεσης

Παρουσιάζονται τα μοντέλα απόσβεσης που χρησιμοποιούνται στις μη γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας.

1) Μοντέλο απόσβεσης κατά Rayleigh

Το μοντέλο απόσβεσης Rayleigh είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μαθηματική προσέγγιση για την προσομοίωση της ιξώδους απόσβεσης στις δυναμικές αναλύσεις κατασκευών. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, το μητρώο απόσβεσης $[C]$ θεωρείται γραμμικός συνδυασμός του μητρώου μάζας $[M]$ και του μητρώου δυσκαμψίας $[K]$, δηλαδή:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K]$$

όπου α και β είναι οι συντελεστές Rayleigh. Ο πρώτος όρος, $\alpha[M]$, εκφράζει την απόσβεση κατ' αναλογία της μάζας και επηρεάζει κυρίως τις χαμηλές συχνότητες, ενώ ο δεύτερος όρος, $\beta[K]$, εκφράζει την απόσβεση κατ' αναλογία της δυσκαμψίας και επηρεάζει περισσότερο τις υψηλές συχνότητες.

Οι συντελεστές α και β μπορούν να υπολογισθούν έτσι ώστε να επιτυγχάνεται συγκεκριμένος λόγος απόσβεσης, για παράδειγμα 3% ή 5% της κρίσιμης απόσβεσης, σε δύο επιλεγμένες ιδιομορφές της κατασκευής καθώς για κάθε ιδιομορφή i , ο αντίστοιχος λόγος απόσβεσης δίνεται από τη σχέση

$$\xi_i = 1/2 \cdot (\alpha/\omega_i + \beta \cdot \omega_i)$$

όπου ω_i είναι η κυκλική ιδιοσυχνότητα της αντίστοιχης ιδιομορφής.

Για τη χρήση του μοντέλου Rayleigh στη σεισμικά απομονωμένη κατασκευή θεωρείται για τις δύο πρώτες απομονωμένες ιδιοπεριόδους μια πολύ μικρή τιμή απόσβεσης ($\xi=0,005$), ώστε θεωρητικά η απόσβεση τους να καθορίζεται αποκλειστικά από το διάγραμμα-τάσεων παραμορφώσεων των εφεδράνων. Με τη θεώρηση αυτή μπορούν να υπολογιστούν οι συντελεστές α και β και επομένως να δοθούν τιμές και τις υπόλοιπες ιδιοπεριόδους. Η προσέγγιση αυτή θα μπορούσε να θεωρηθεί συντηρητική καθώς οι ανώτερες ιδιομορφές που αφορούν την ανωδομή θα λάβουν τιμές απόσβεσης σημαντικά μικρότερες του 3%.

Εικόνα 9 : Εισαγωγή δεδομένων μοντέλου Rayleigh στο ETABS

2) Μοντέλο απόσβεσης κατ' αναλογία του μητρώου δυσκαμψίας (Stiffness Proportional Damping)

Πρόκειται για ειδική περίπτωση του μοντέλου Rayleigh, στην οποία το μητρώο απόσβεσης θεωρείται ανάλογο μόνο του μητρώου δυσκαμψίας της κατασκευής. Δηλαδή, η απόσβεση εκφράζεται ως: $[C] = \beta[K]$. Για τη χρήση του μοντέλου στην σεισμικά απομονωμένη κατασκευή αρχικά υπολογίζεται η τιμή του συντελεστή $A_1 = 2 * \xi / (\omega_1 + \omega_2)$, θεωρώντας μια πολύ μικρή τιμή για την απόσβεση των δύο πρώτων απομονωμένων ιδιοπεριόδων ($\xi = 0,001$). Στη συνέχεια οι αποσβέσεις των ανώτερων ιδιοπεριόδων υπολογίζονται από τον τύπο $\xi_i = A_1 * \omega_i / 2$.

Εικόνα 10 : Εισαγωγή δεδομένων μοντέλου Stiffness Proportional στο ETABS

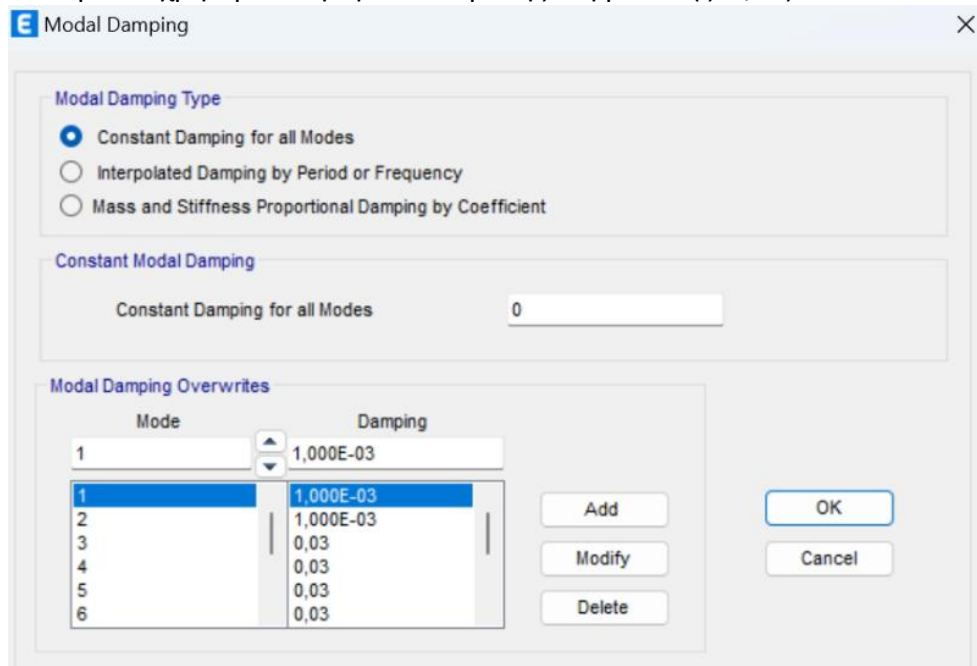
3) Μοντέλο επαλληλίας ιδιομορφικών μητρώων (Modal Damping)

Το μοντέλο ιδιομορφικής απόσβεσης ή Modal Damping είναι μια προσέγγιση κατά την οποία η απόσβεση δεν ορίζεται άμεσα ως γραμμικός συνδυασμός των μητρώων μάζας και δυσκαμψίας, όπως στο μοντέλο Rayleigh, αλλά αποδίδεται ξεχωριστά στις ιδιοπεριόδους της κατασκευής. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί να καθοριστεί διαφορετικός λόγος απόσβεσης για κάθε ιδιοπερίοδο. Το μητρώο απόσβεσης κατασκευάζεται από τη συνεισφορά των επιμέρους ιδιομορφών. Δηλαδή, η απόσβεση του συστήματος προκύπτει από την επαλληλία των ιδιομορφικών αποσβέσεων που έχουν οριστεί για τις επιλεγμένες ιδιοπεριόδους. Το μητρώο απόσβεσης μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση:

$$[C] = [M][\Phi][C_m][\Phi]^T[M]$$

όπου $[M]$ είναι το μητρώο μάζας, $[\Phi]$ είναι το μητρώο των ιδιομορφών και $[C_m]$ είναι το διαγώνιο ιδιομορφικό μητρώο απόσβεσης. Για κάθε ιδιομορφή, ο αντίστοιχος όρος του $[C_m]$ συνδέεται με τη μάζα, τη συχνότητα και τον λόγο απόσβεσης της ιδιομορφής. Όταν οι ιδιομορφές είναι κανονικοποιημένες ως προς τη μάζα, ο διαγώνιος όρος γράφεται συνήθως ως: $C_i = 2\xi_i * \omega_i$

Για τη χρήση του μοντέλου στην σεισμικά απομονωμένη κατασκευή χρησιμοποιήθηκε μια πολύ μικρή τιμή απόσβεσης ($\xi=0,001$) για την 1^η και 2^η απομονωμένες ιδιοπεριόδους καθώς και για τις ιδιοπεριόδους που αντιστοιχούν σε κατακόρυφες ιδιομορφές. Για όλες τις υπόλοιπες, δηλαδή από την 3^η έως την 8^η ιδιοπερίοδο χρησιμοποιήθηκε απόσβεσης ίση με 3% ($\xi=0,03$)



Εικόνα 11 : Εισαγωγή δεδομένων μοντέλου Modal στο ETABS

4) Απόσβεση υλικού (Material Damping)

Το μοντέλο απόσβεσης υλικού ή Material Damping είναι μια προσέγγιση κατά την οποία η απόσβεση ανατίθεται απευθείας στις ιδιότητες του υλικού, έτσι ώστε κάθε στοιχείο που χρησιμοποιεί αυτό το υλικό να συνεισφέρει τη δική του απόσβεση στο συνολικό μητρώο απόσβεσης του φορέα. Η διαδικασία είναι αυτοματοποιημένη στο πρόγραμμα ETABS και περιγράφεται στο εγχειρίδιο του προγράμματος.

Για την χρήση του μοντέλου υπολογίσθηκαν για τα υλικά τις ανωδομής ο συντελεστής μάζας και ο συντελεστής δυσκαμψίας από τις σχέσεις:

$$M_c = 2 * \xi / (\omega_1 + \omega_2)$$

$$S_c = 2 * \xi * \omega_1 * \omega_2 / (\omega_1 + \omega_2)$$

Όπου το ω_1 αντιστοιχεί στην πρώτη ιδιομορφή που αφορά κίνηση της ανωδομής και όχι του συστήματος απομόνωσης δηλαδή την 4^η ιδιομορφή του κτιρίου και το ω_2 αντιστοιχεί στην ιδιομορφή όπου αθροιστικά έχει κινητοποιηθεί το 90% της μάζας της κατασκευής, στο παρών κτίριο αυτό συμβαίνει στην 8^η ιδιομορφή. Το ξ λήφθηκε ίσο με 3% για τα χαλύβδινα στοιχεία και 5% για τις πλάκες σκυροδέματος.

Additional Material Damping

Material Name and Type

Material Name: S355
Material Type: Steel, Isotropic

Modal Damping

Damping Ratio: 0 Make Other Damping Similar...

Note: Applies to Response Spectrum and Modal Time History load cases. Also applies to Direct Integration Time History load cases where Modal Damping has been specified.

Viscous Proportional Damping

Mass Coefficient: 0.4048 1/sec Make Other Damping Similar...
Stiffness Coefficient: 0.0015 sec

Note: Applies to Direct Integration Time History load cases

OK Cancel

Additional Material Damping

Material Name and Type

Material Name: C30/37
Material Type: Concrete, Isotropic

Modal Damping

Damping Ratio: 0 Make Other Damping Similar...

Note: Applies to Response Spectrum and Modal Time History load cases. Also applies to Direct Integration Time History load cases where Modal Damping has been specified.

Viscous Proportional Damping

Mass Coefficient: 0.674 1/sec Make Other Damping Similar...
Stiffness Coefficient: 0.0025 sec

Note: Applies to Direct Integration Time History load cases

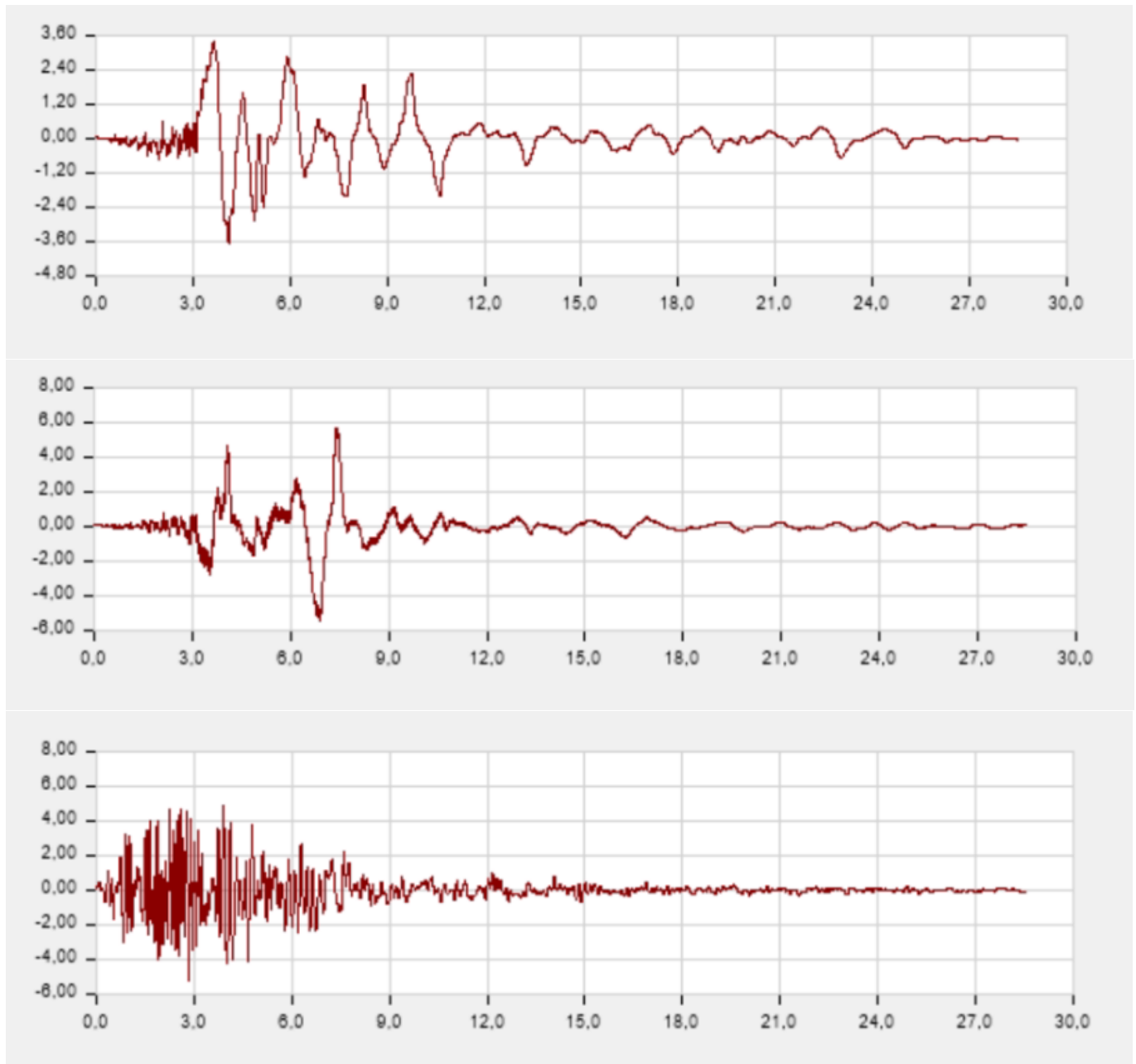
OK Cancel

Εικόνα 12 : Εισαγωγή δεδομένων μοντέλου Material Damping στο ETABS

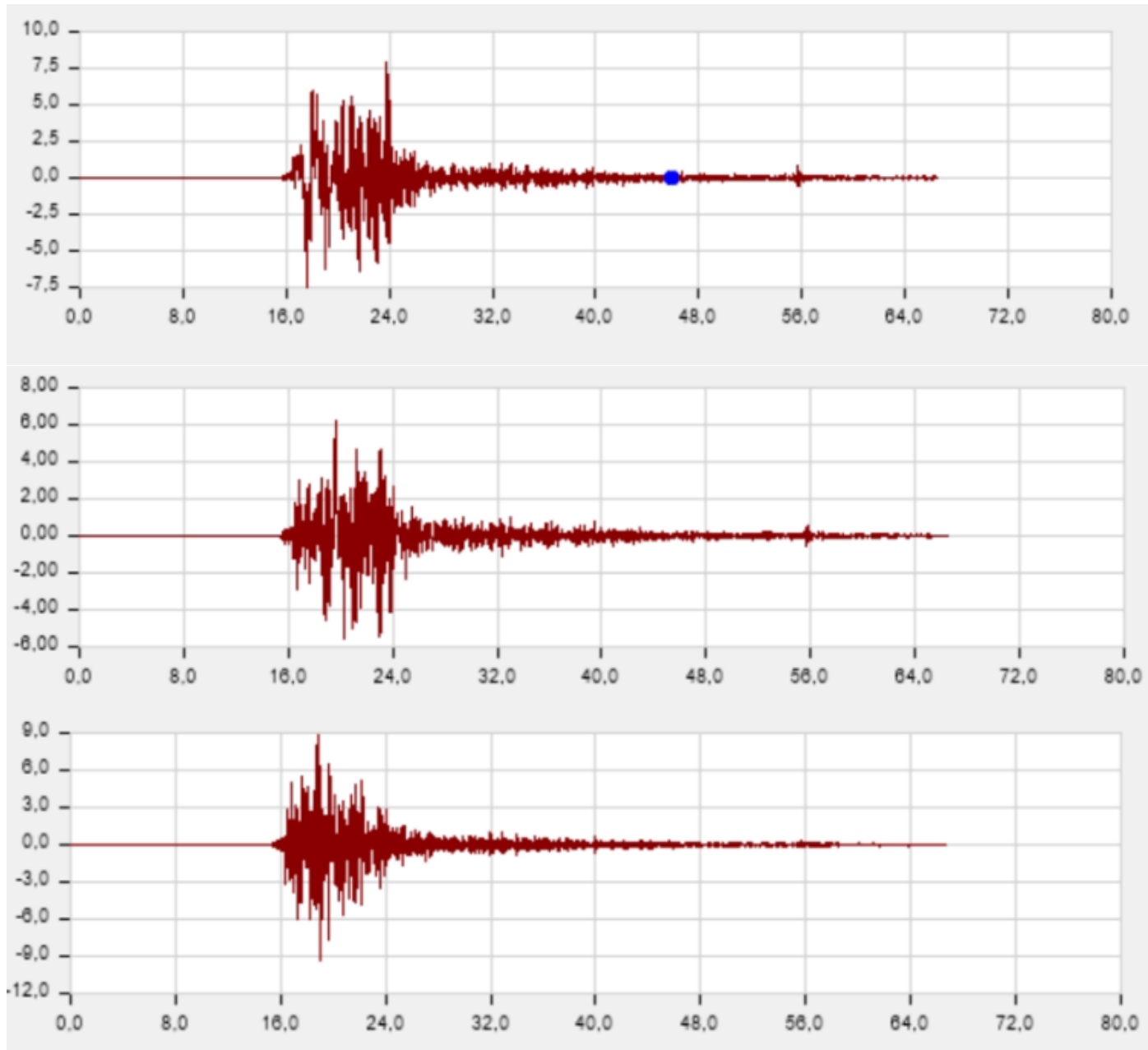
3.6 Επιταχυνσιογραφήματα

Για τις μη γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας επιλέχθηκαν τρία επιταχυνσιογραφήματα από τους σεισμούς Kobe, Sylmar και Bamiran. Για κάθε σεισμική κίνηση προσομοιώθηκε οι αντίστοιχες συνιστώσες να πλήττουν την κατασκευή υπό γωνία 0°, 45° και 90°. Έτσι για παράδειγμα παράγονται οι σεισμικές κινήσεις Kobe_1_2, Kobe_45 και Kobe_2_1 αντίστοιχα. Όλες οι αναλύσεις εμπεριέχουν

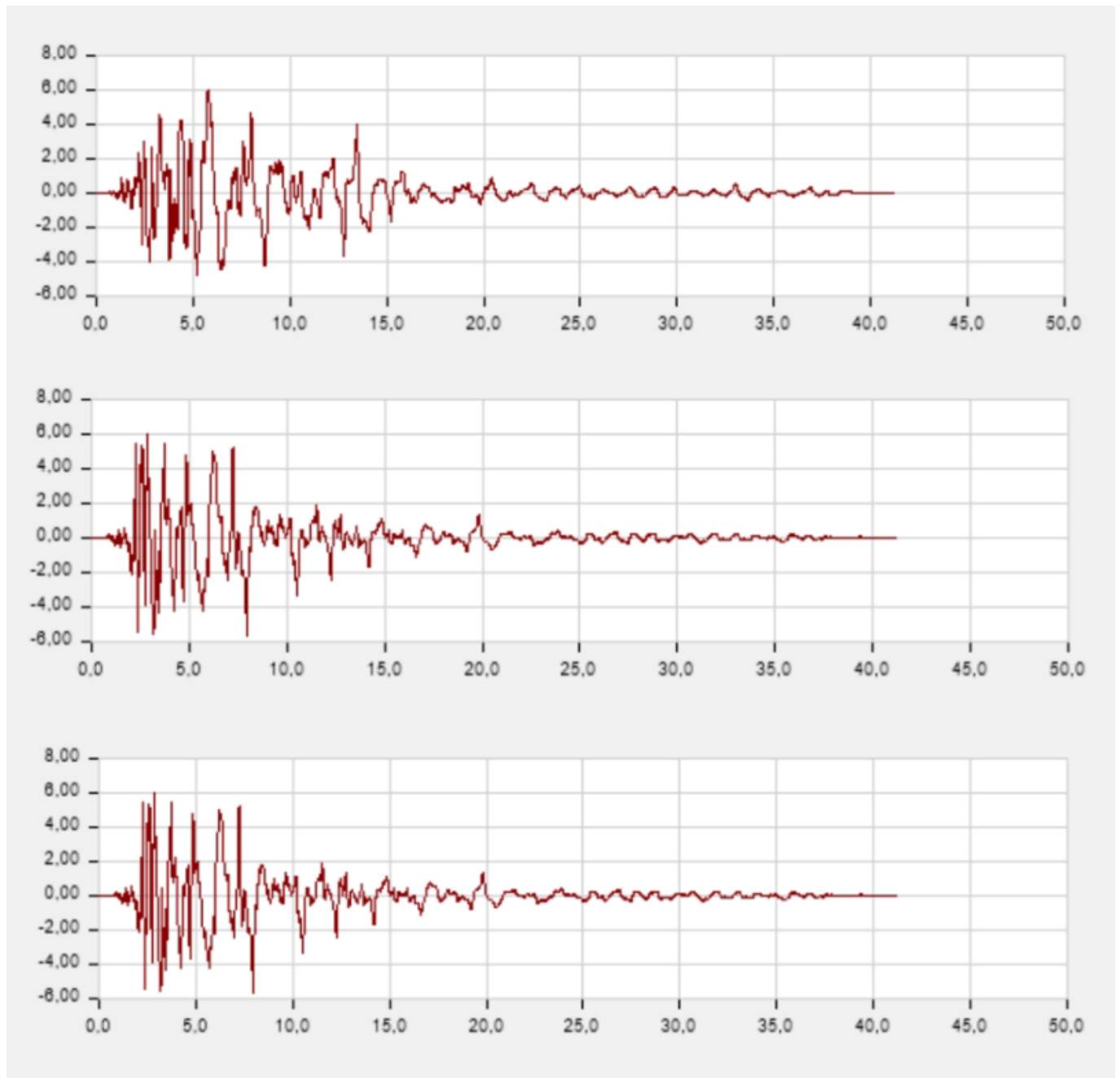
το αντίστοιχο κατακόρυφο επιταχυνσιογράφημα. Κάθε ανάλυση επαναλήφθηκε για κάθε διαφορετικό μοντέλο απόσβεσης ώστε να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 13 : Επιταχυνσιογραφήματα Sylmar_1, Sylmar_2 και Sylmar_vertical



Εικόνα 14 : Επιταχυνσιογραφήματα Bam_1, Bam_2 και Bam_vertical



Εικόνα 15 : Επιταχυνσιογράφηματα Kobe_1, Kobe_2 και Kobe_vertical

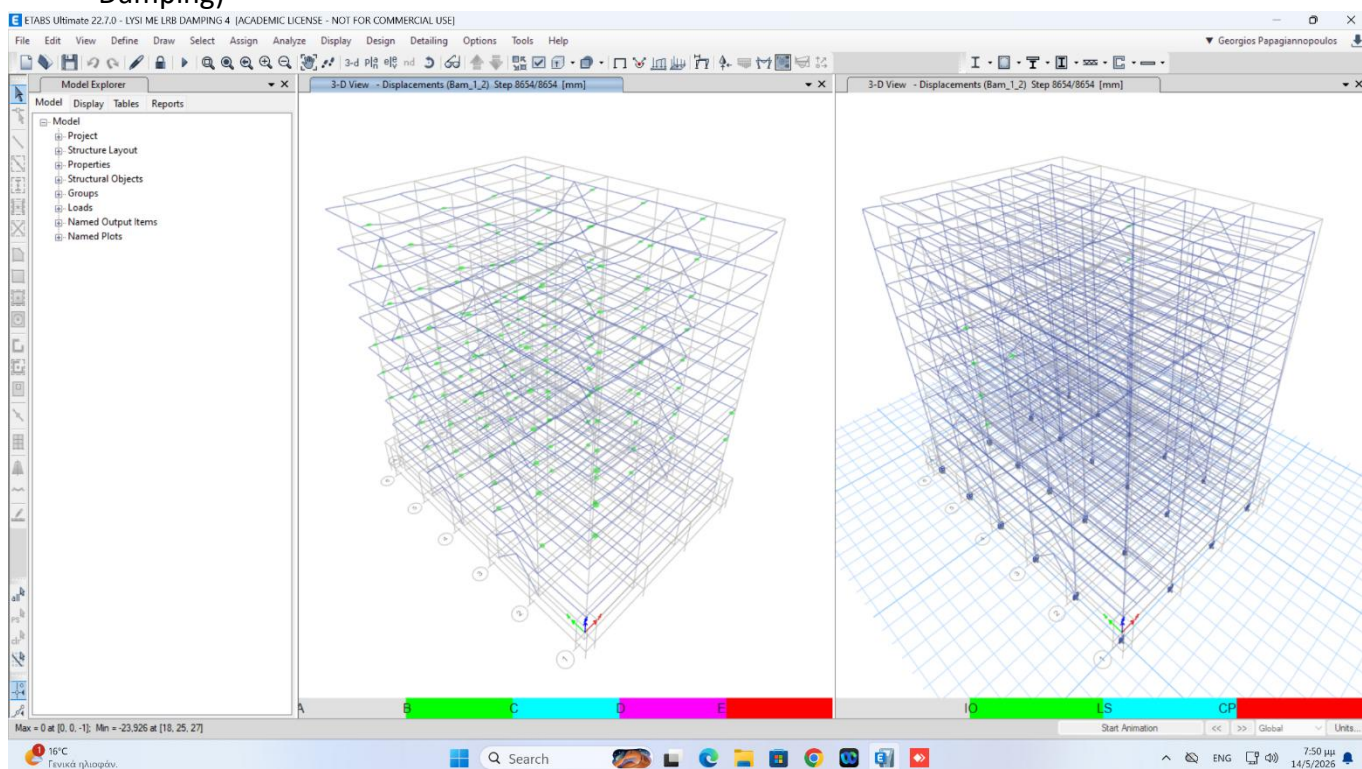
4. Αποτελέσματα Αναλύσεων

Παρουσιάζονται σε γραφήματα τα αποτελέσματα από συνολικά 36 μη γραμμικές αναλύσεις ιστορίας. Αναλυτικά θα παρουσιαστούν εικόνες από τις πλαστικές αρθρώσεις που έχουν αναπτυχθεί στην κατασκευή μετά από κάθε ανάλυση, γραφήματα με τις μέγιστες θετικές και αρνητικές επιταχύνσεις ορόφων, γραφήματα με τις μέγιστες θετικές και αρνητικές μετακινήσεις ορόφων, γραφήματα με τις παραμένουσες μετακινήσεις ορόφων, ραβδογράμματα τεμνουσών στη του συστήματος απομόνωσης και στη βάση της ανωδομής, ραβδογράμματα μέγιστων μετακινήσεων εφεδράνων, ραβδογράμματα μέγιστων θλιπτικών και εφελκυστικών δυνάμεων εφεδράνων καθώς και πίνακας υπολογισμού του δείκτη RIDR.

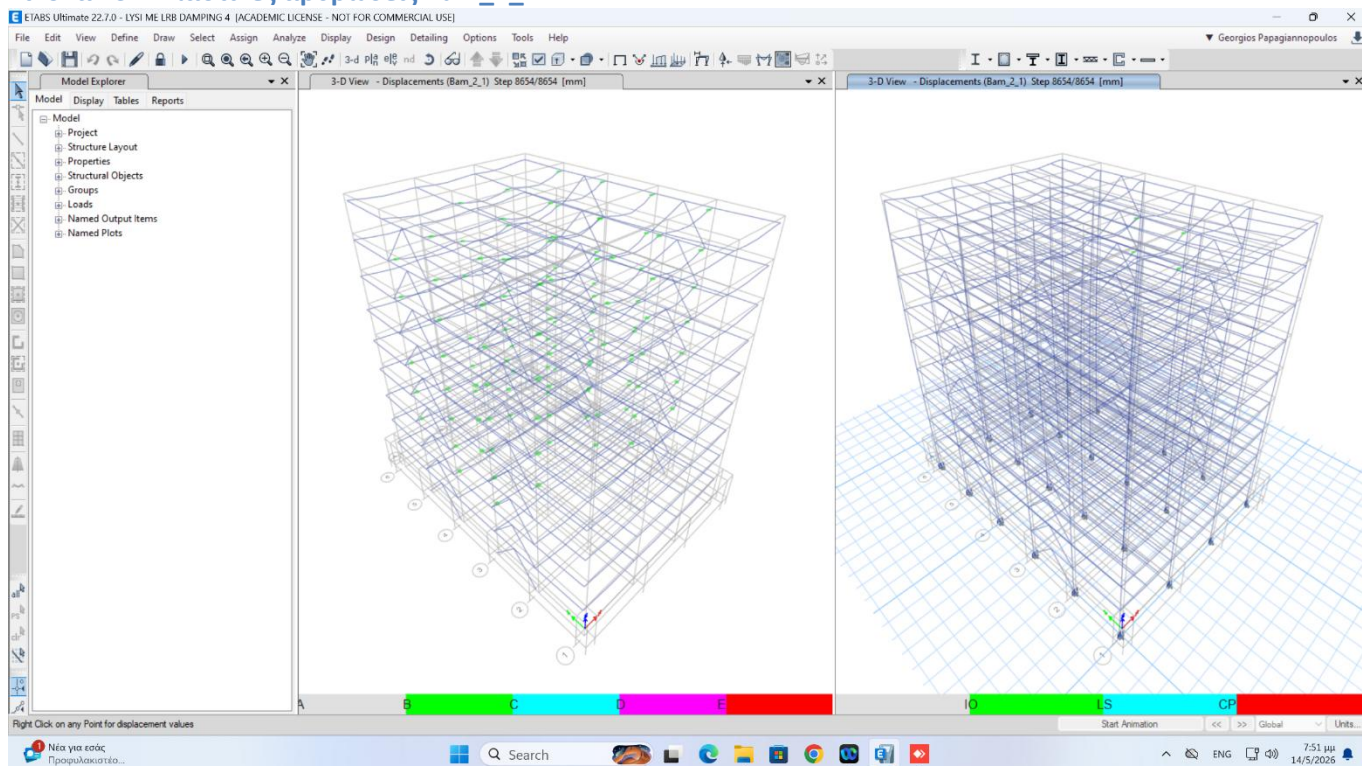
4.1 Πλαστικές αρθρώσεις

Στις Εικόνες 13-48, παρουσιάζονται οι πλαστικές αρθρώσεις που αναπτύχθηκαν στην κατασκευή από κάθε σεισμική κίνηση σε συνδυασμό με τη χρήση του αντίστοιχου μοντέλου απόσβεσης. Όλες οι πλαστικές αρθρώσεις αναπτύσσονται στις δοκούς.

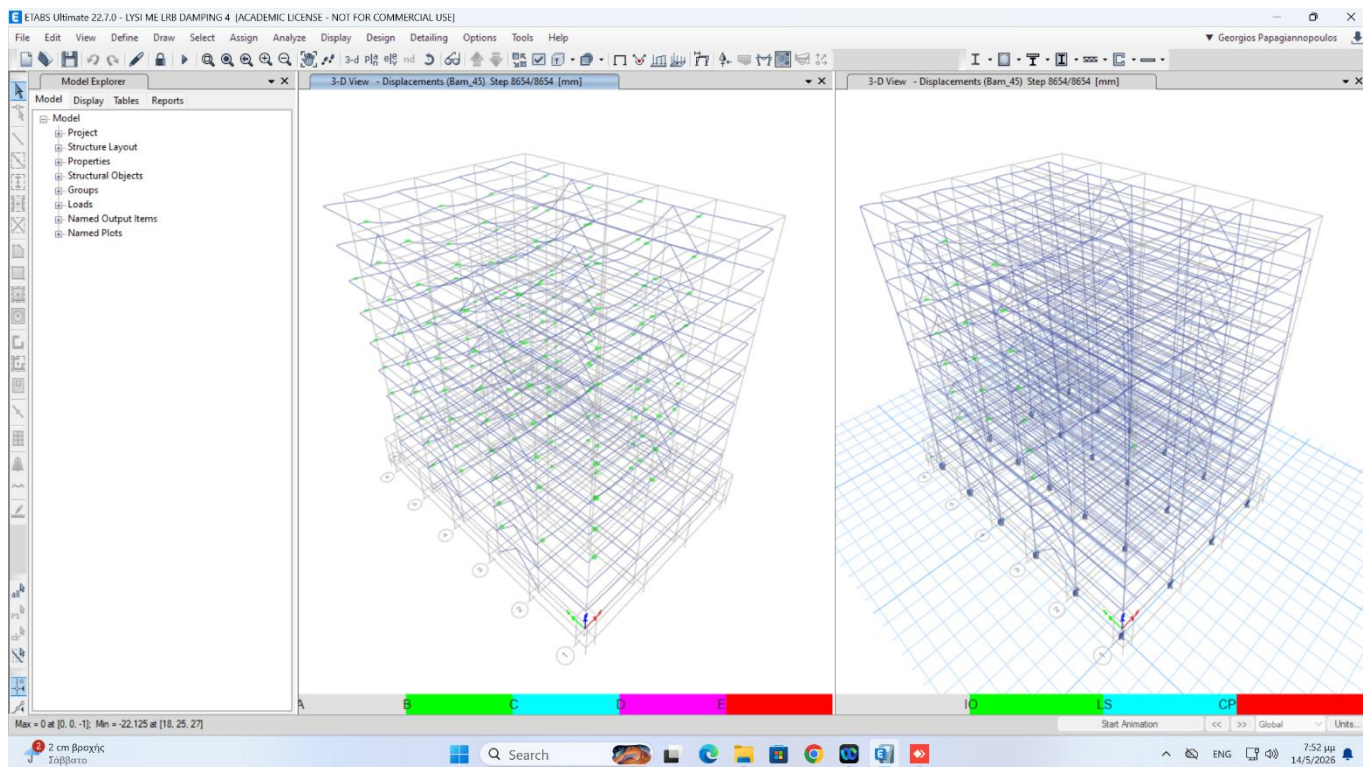
1) Απόσβεση σύμφωνα με του κύκλους υστέρησης των διατομών της ανωδομής (Material Damping)



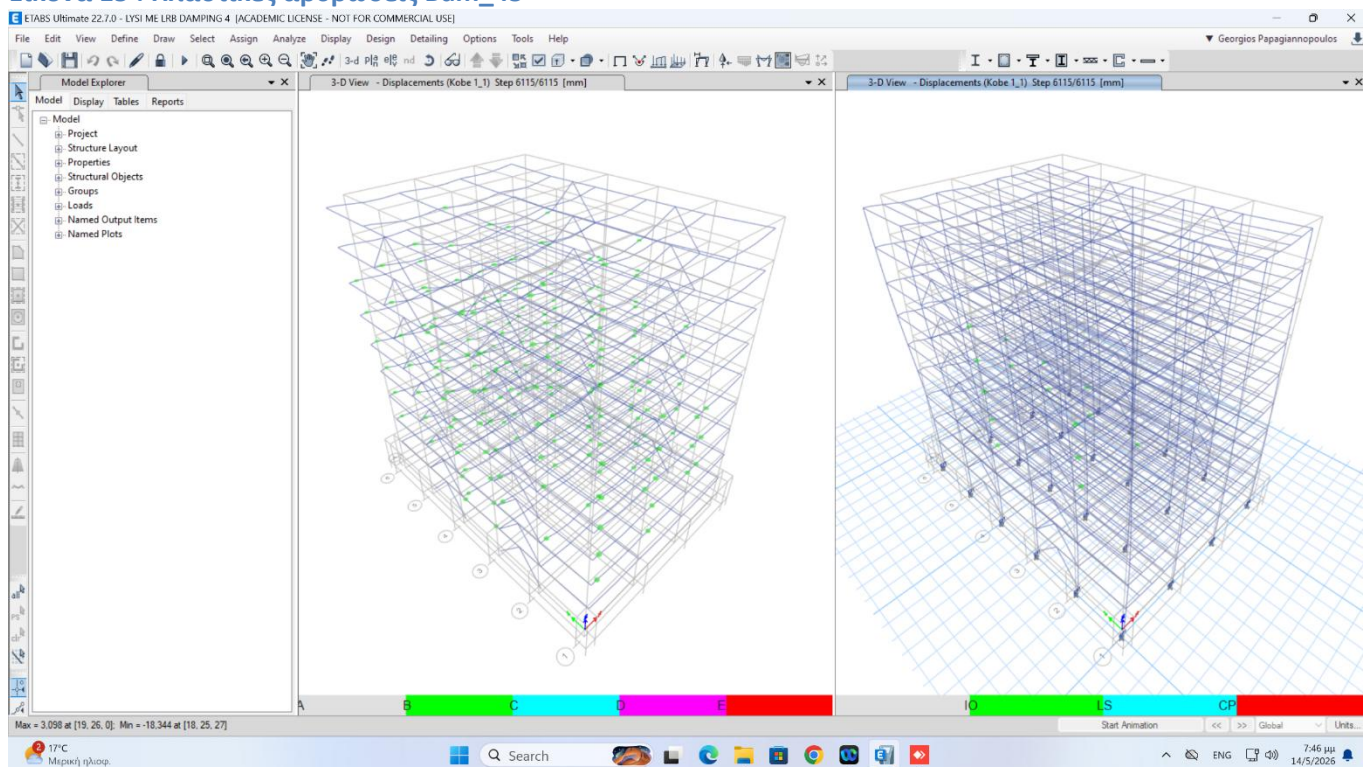
Εικόνα 13 : Πλαστικές αρθρώσεις Bam_1_2



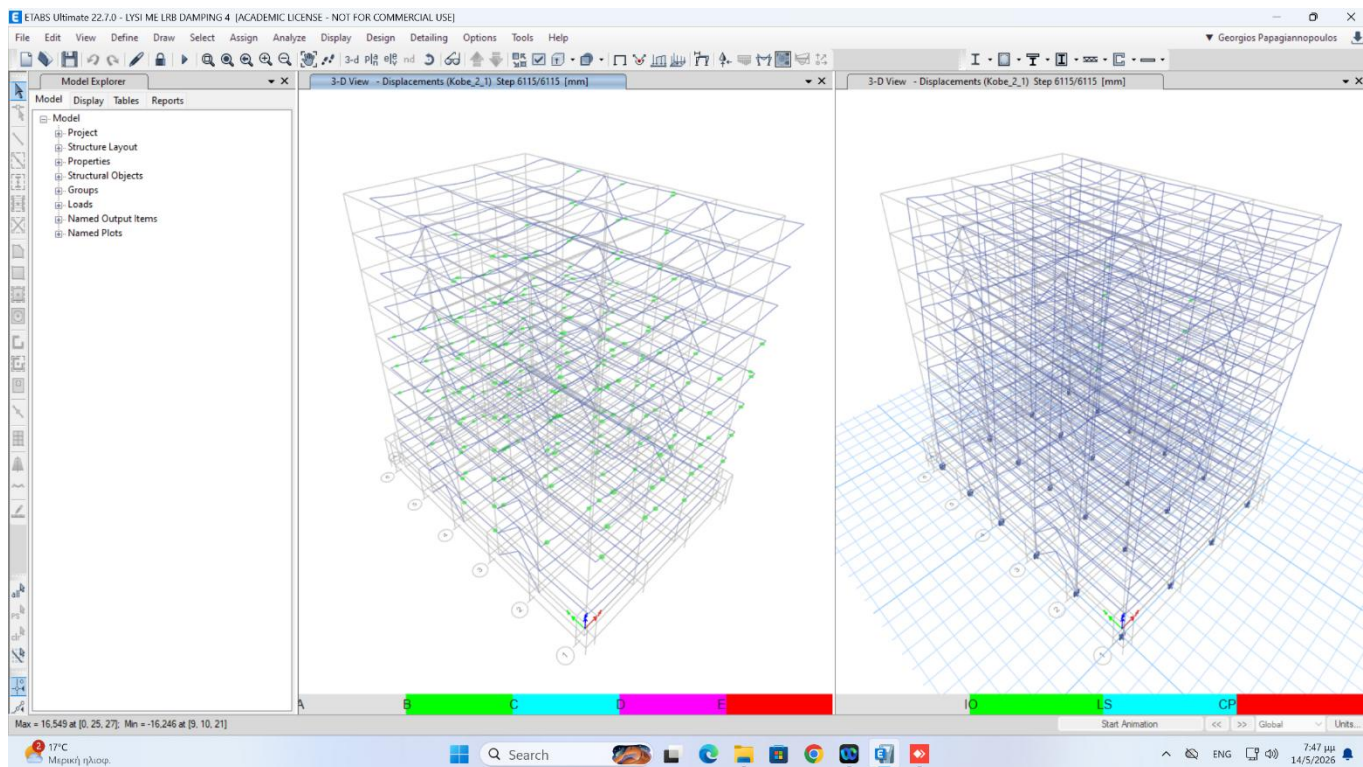
Εικόνα 14 : Πλαστικές αρθρώσεις Bam_2_1



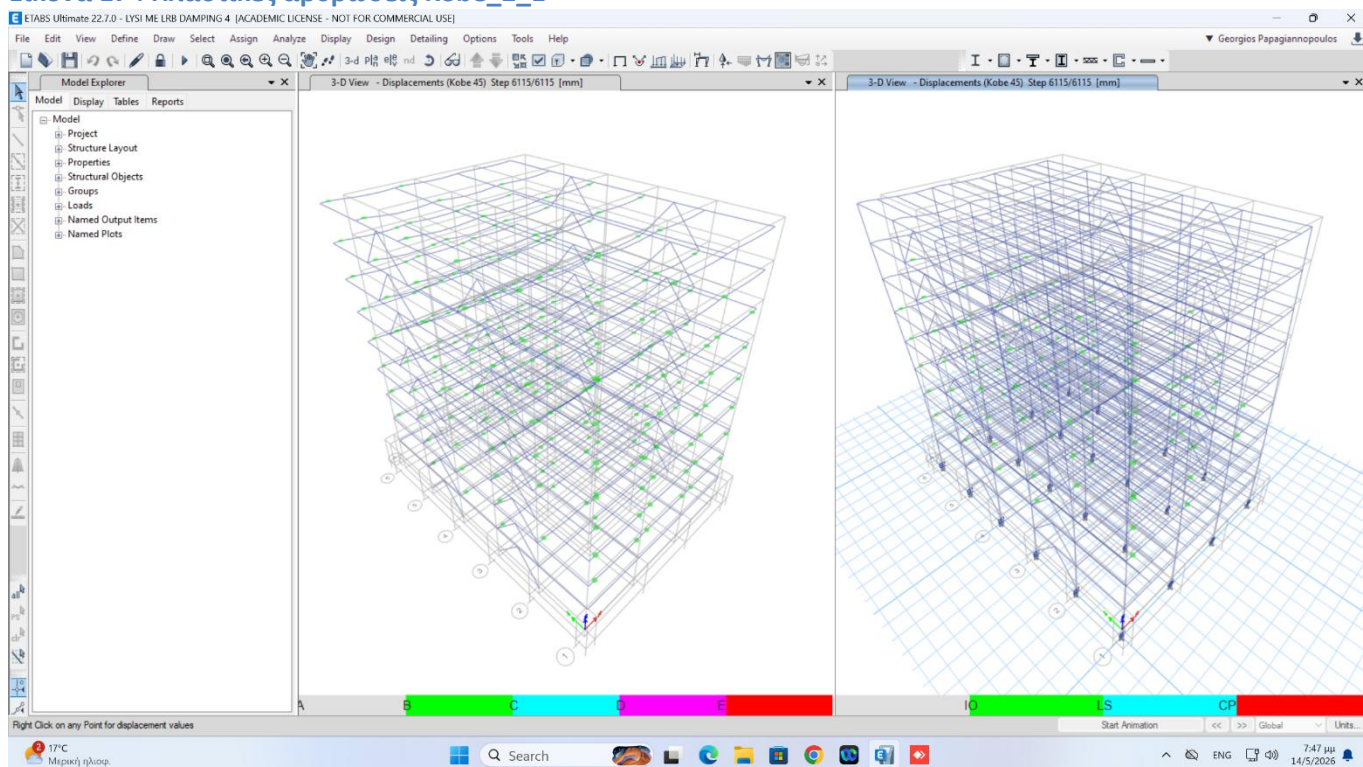
Εικόνα 15 : Πλαστικές αρθρώσεις Bam_45



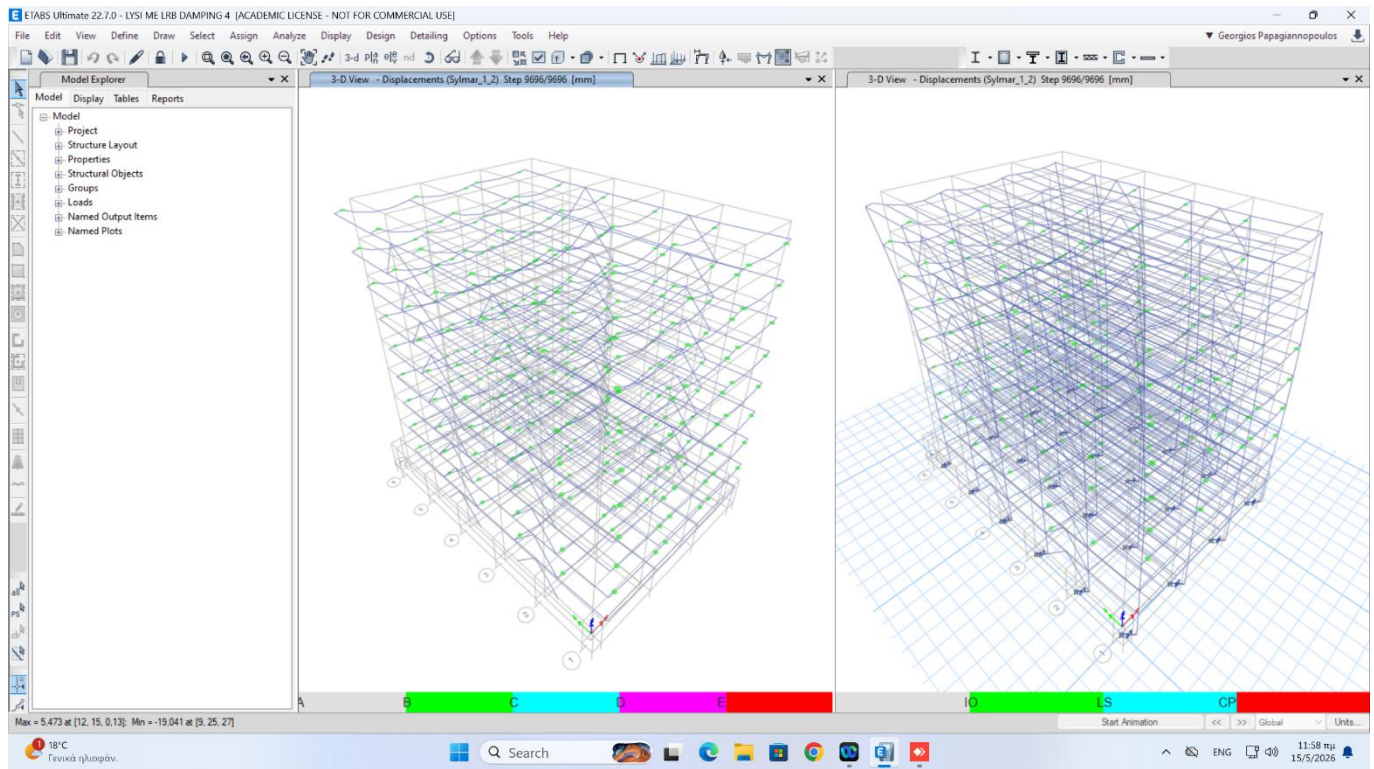
Εικόνα 16 : Πλαστικές αρθρώσεις Kobe_1_2



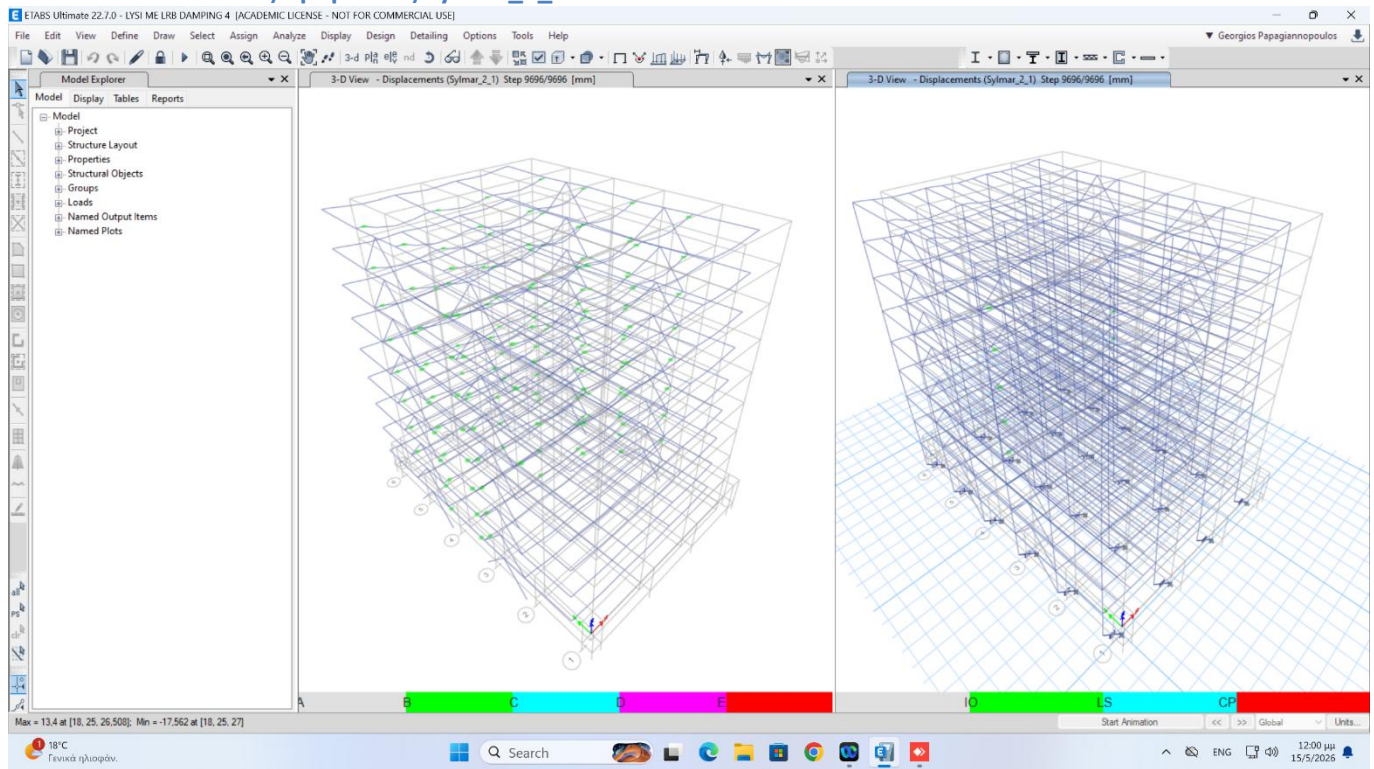
Εικόνα 17 : Πλαστικές αρθρώσεις Kobe_2_1



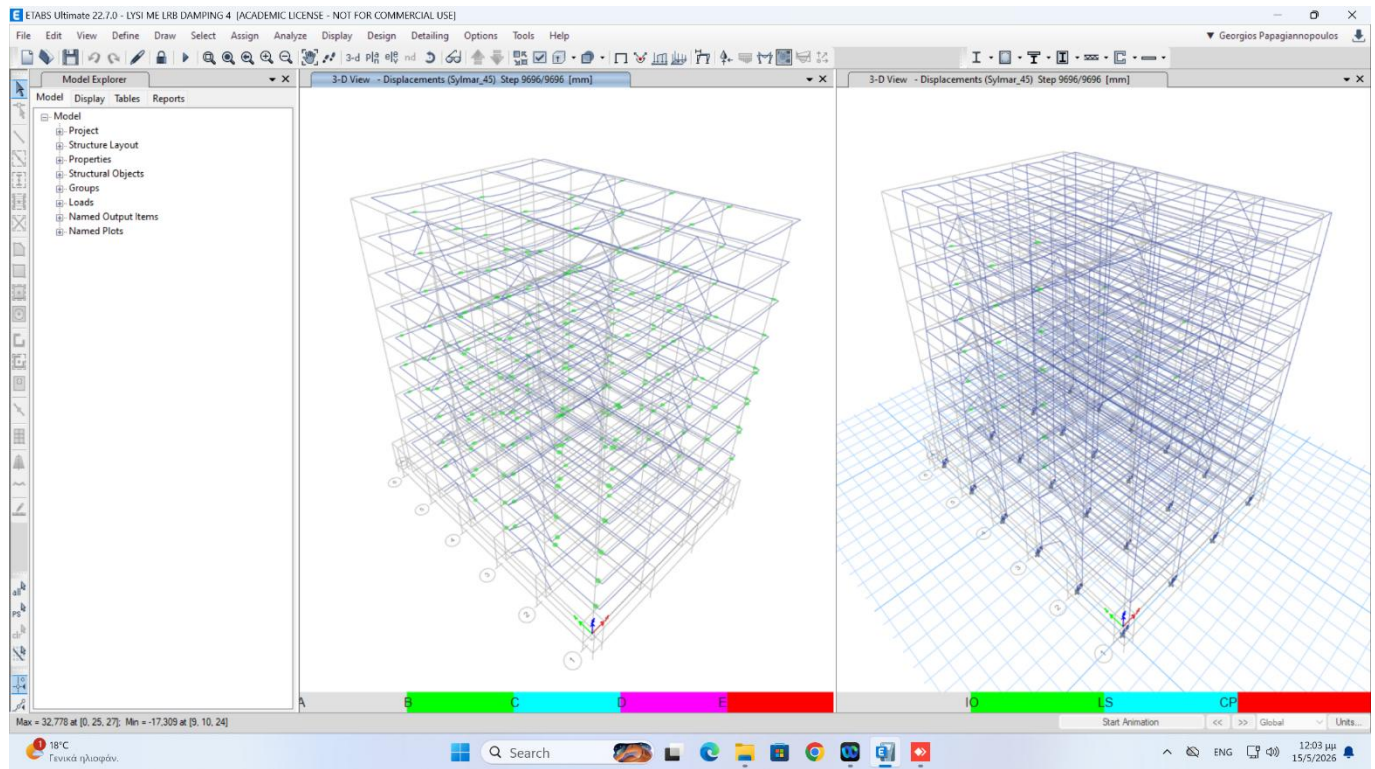
Εικόνα 18 : Πλαστικές αρθρώσεις Kobe_45



Εικόνα 19 : Πλαστικές αρθρώσεις Sylmar_1_2

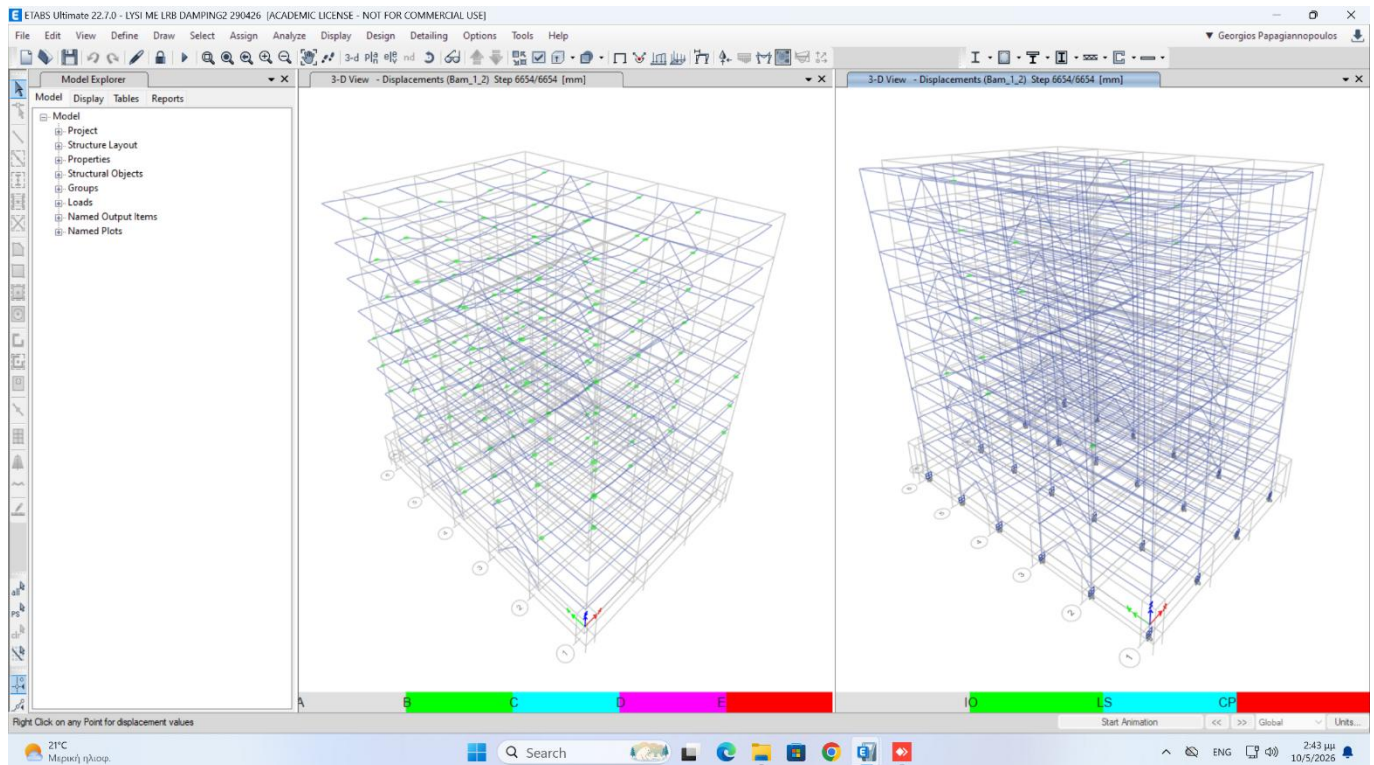


Εικόνα 20 : Πλαστικές αρθρώσεις Sylmar_2_1

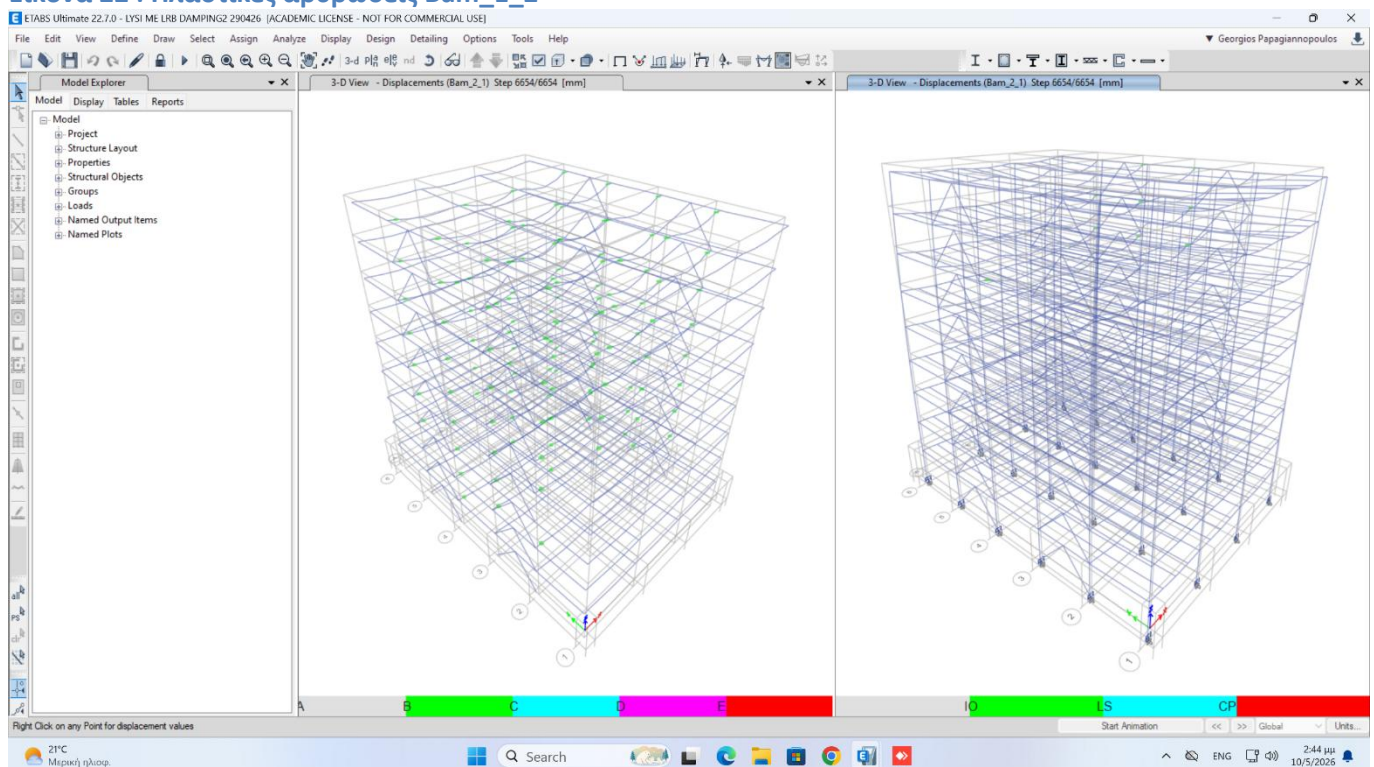


Εικόνα 21 : Πλαστικές αρθρώσεις Sylmar_45

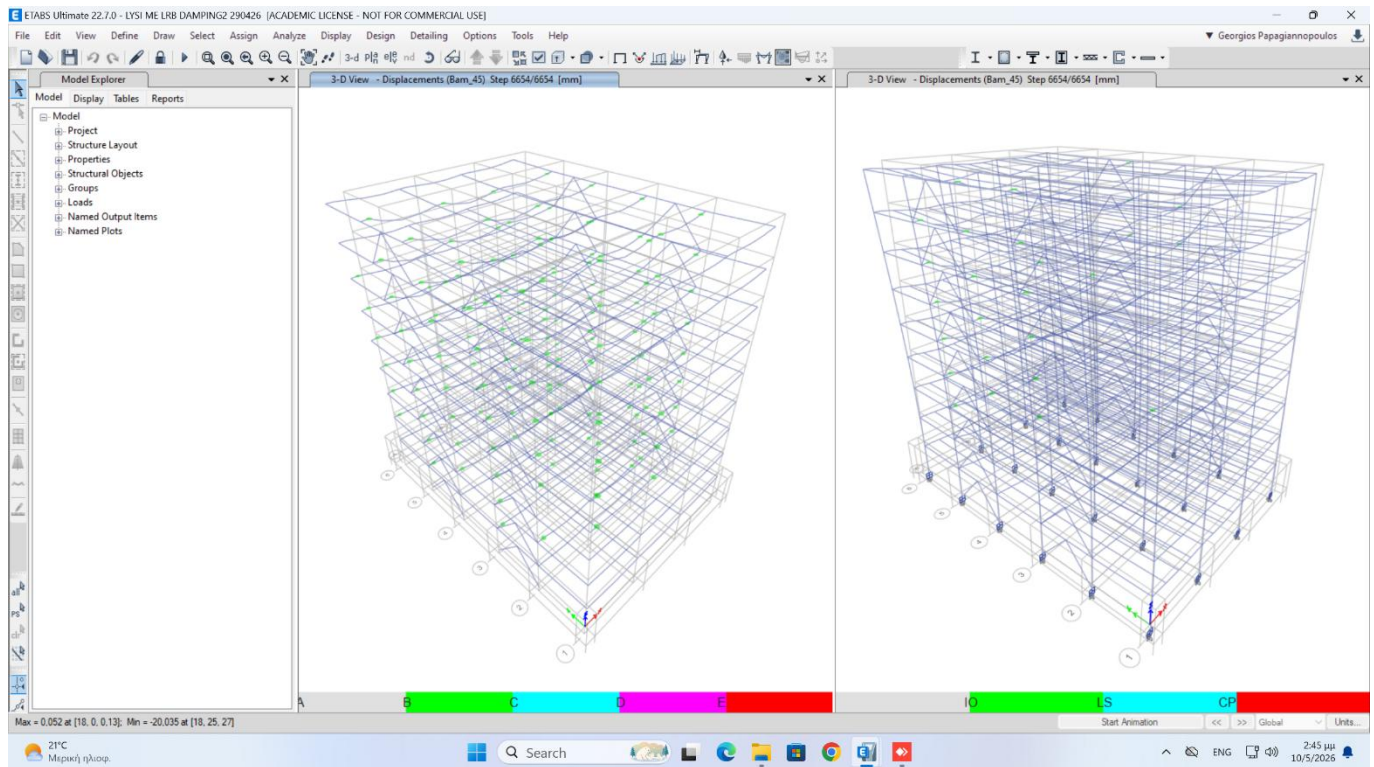
2) Μοντέλο επαλληλίας ιδιομορφικών μητρώων (Modal Damping)



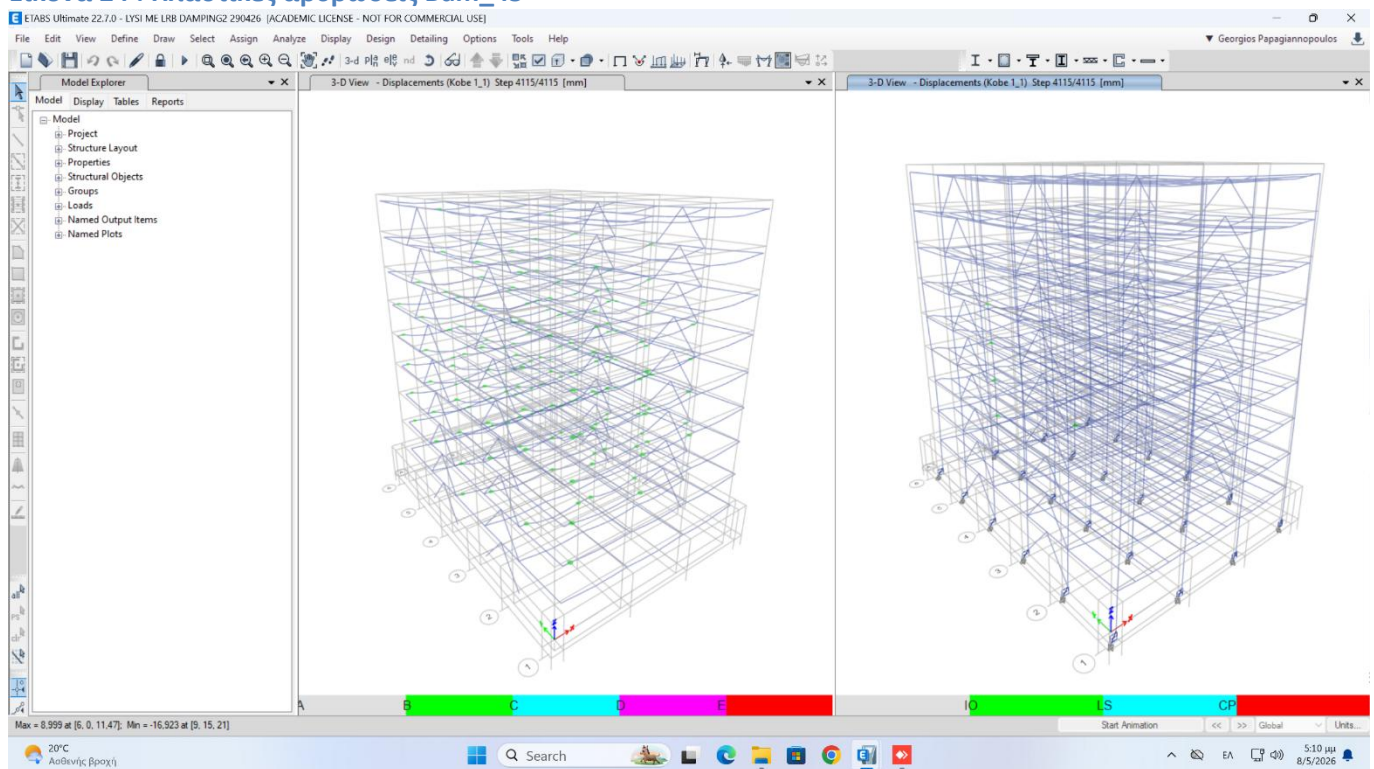
Εικόνα 22 : Πλαστικές αρθρώσεις Bam_1_2



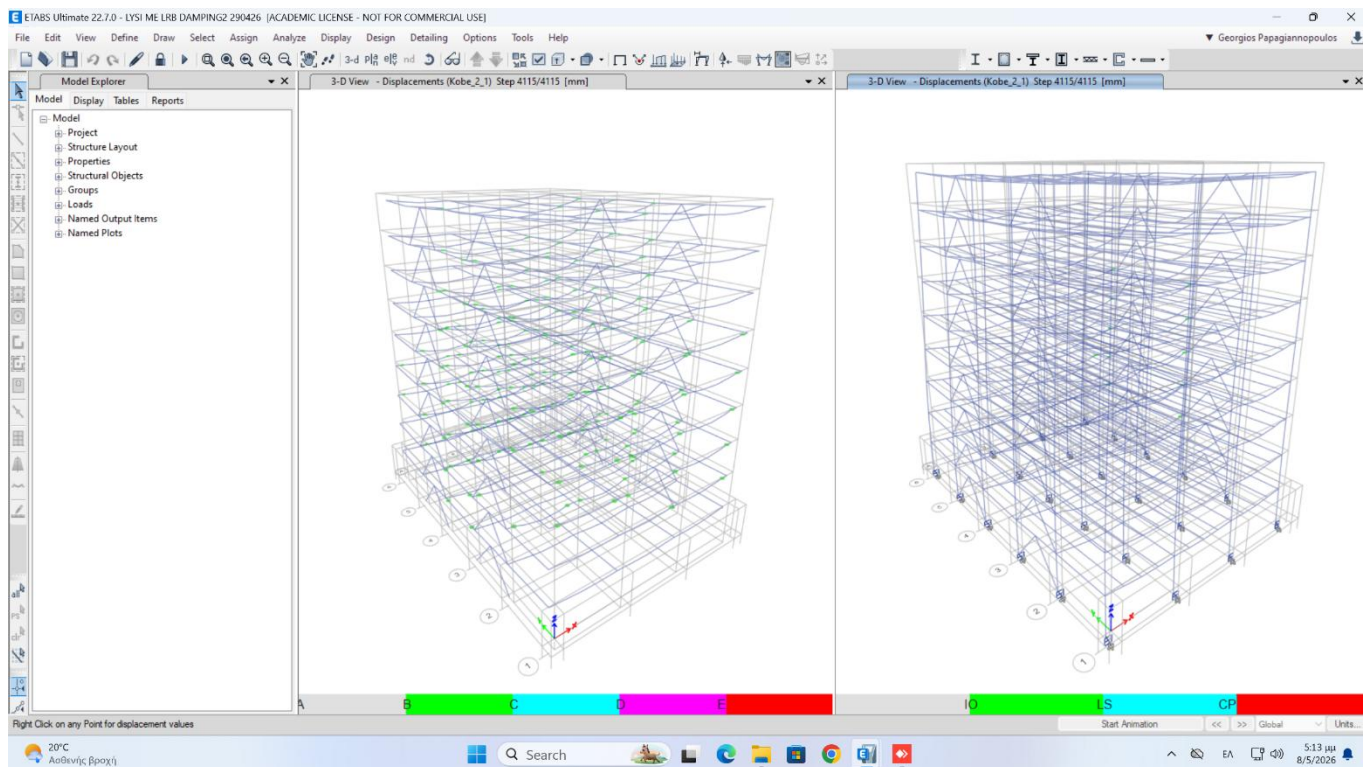
Εικόνα 23 : Πλαστικές αρθρώσεις Bam_2_1



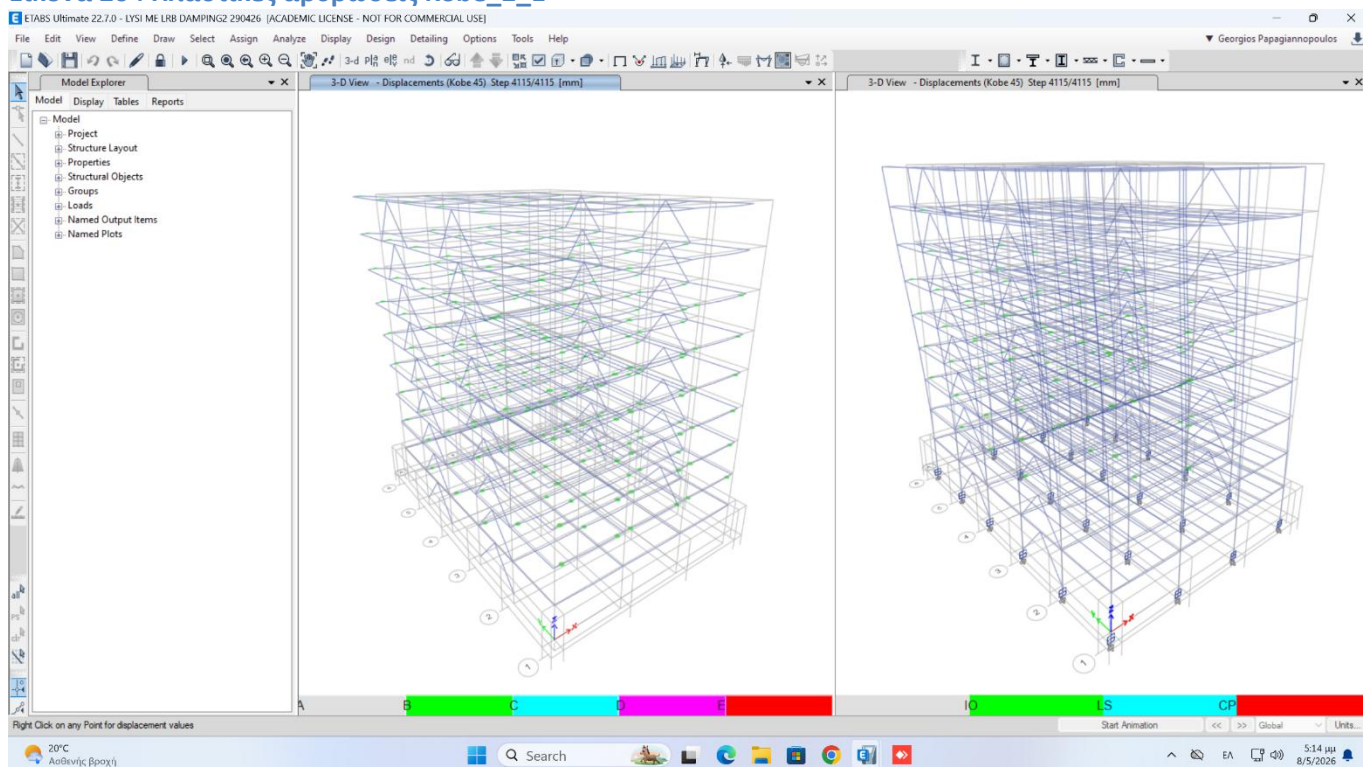
Εικόνα 24 : Πλαστικές αρθρώσεις Bam_45



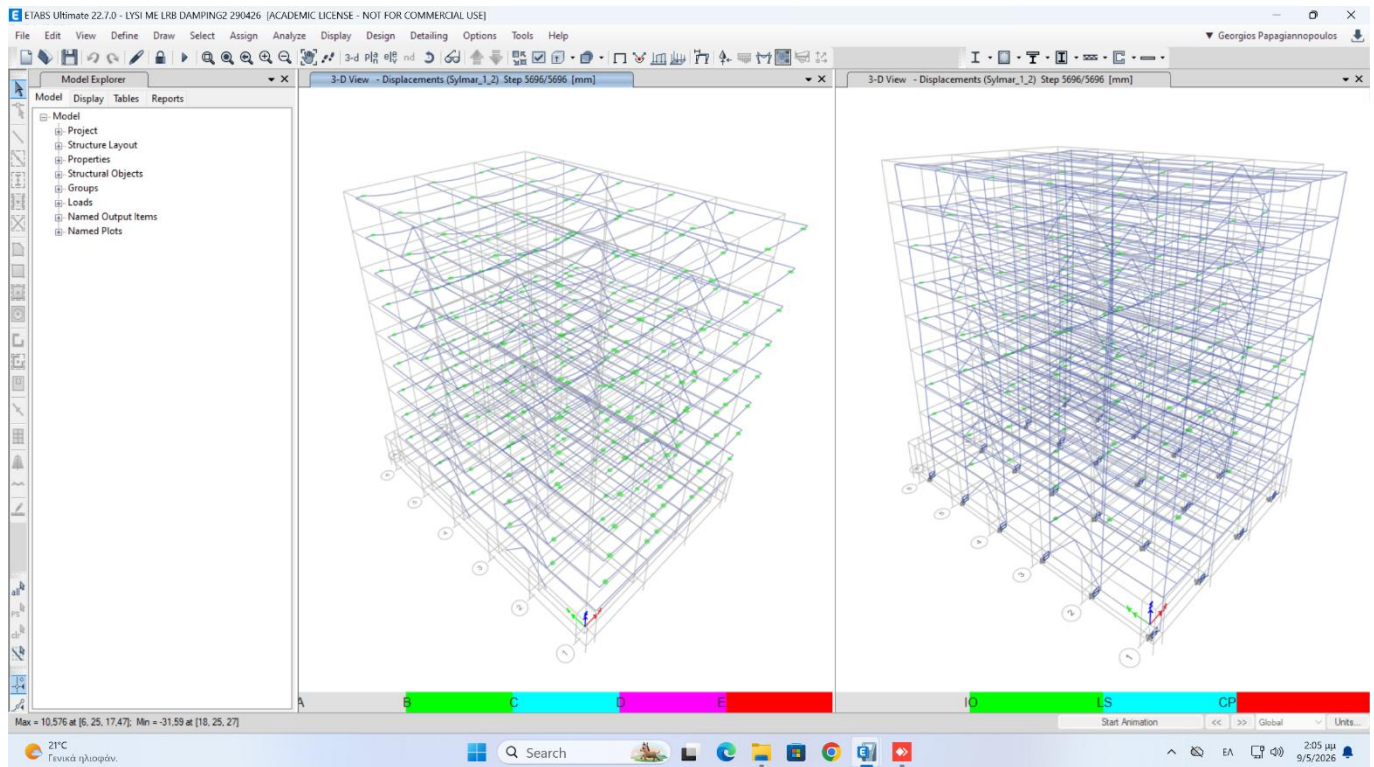
Εικόνα 25 : Πλαστικές αρθρώσεις Kobe_1_2



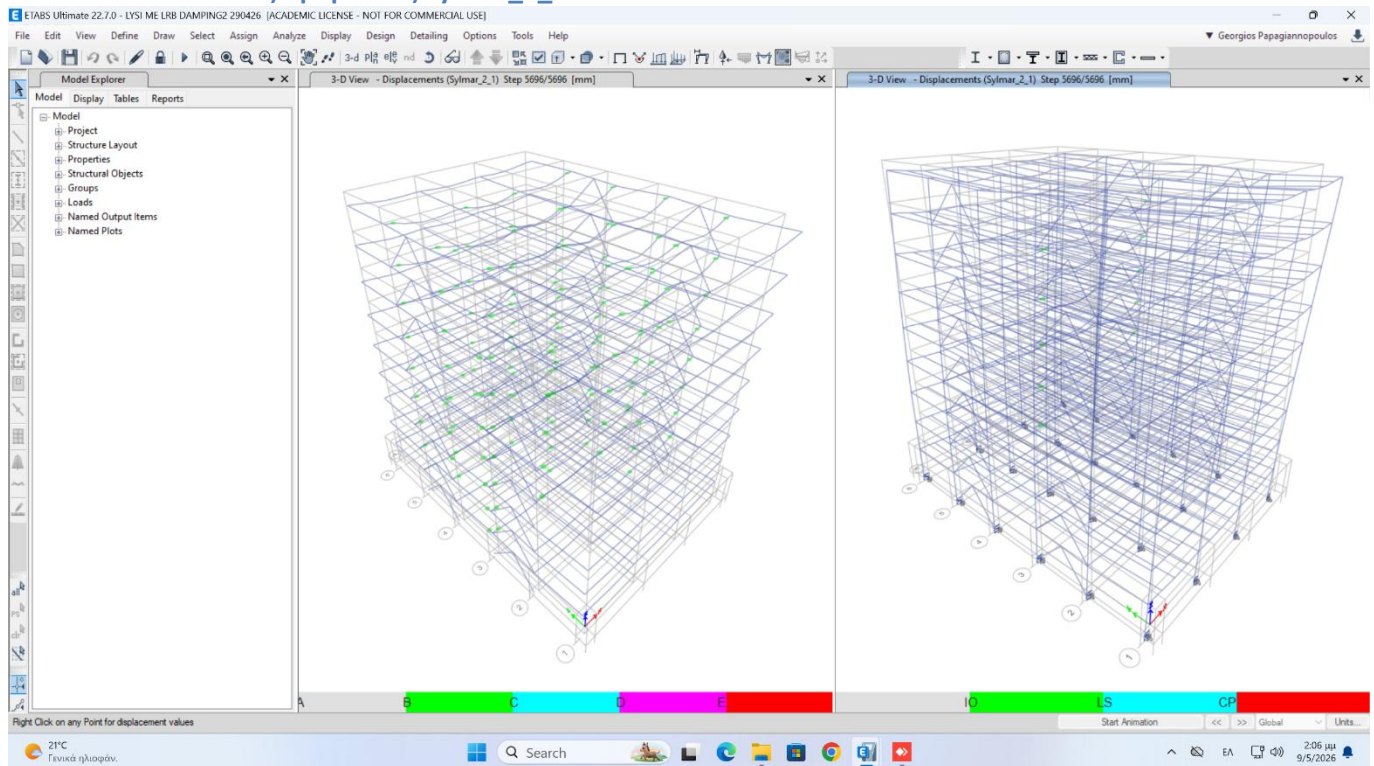
Εικόνα 26 : Πλαστικές αρθρώσεις Kobe_2_1



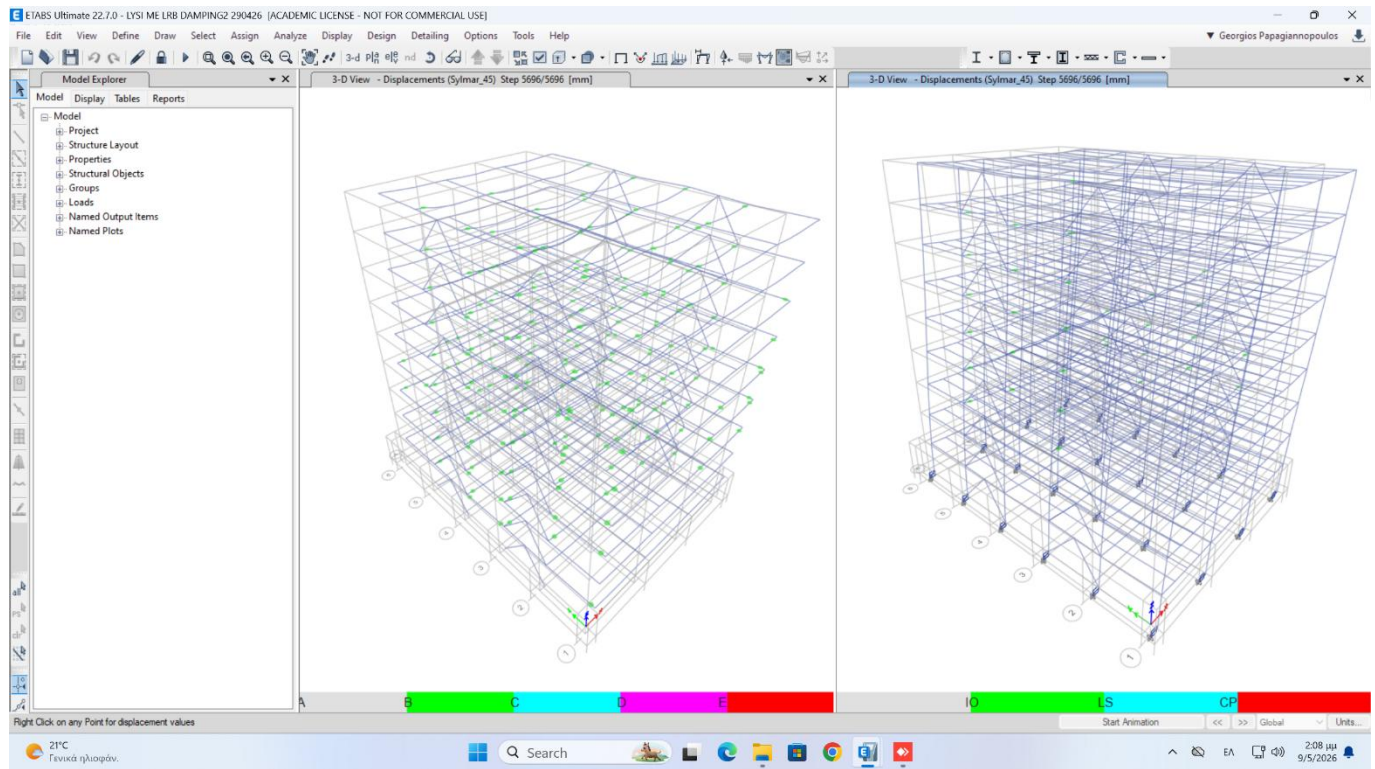
Εικόνα 27 : Πλαστικές αρθρώσεις Kobe_45



Εικόνα 28 : Πλαστικές αρθρώσεις Sylmar_1_2

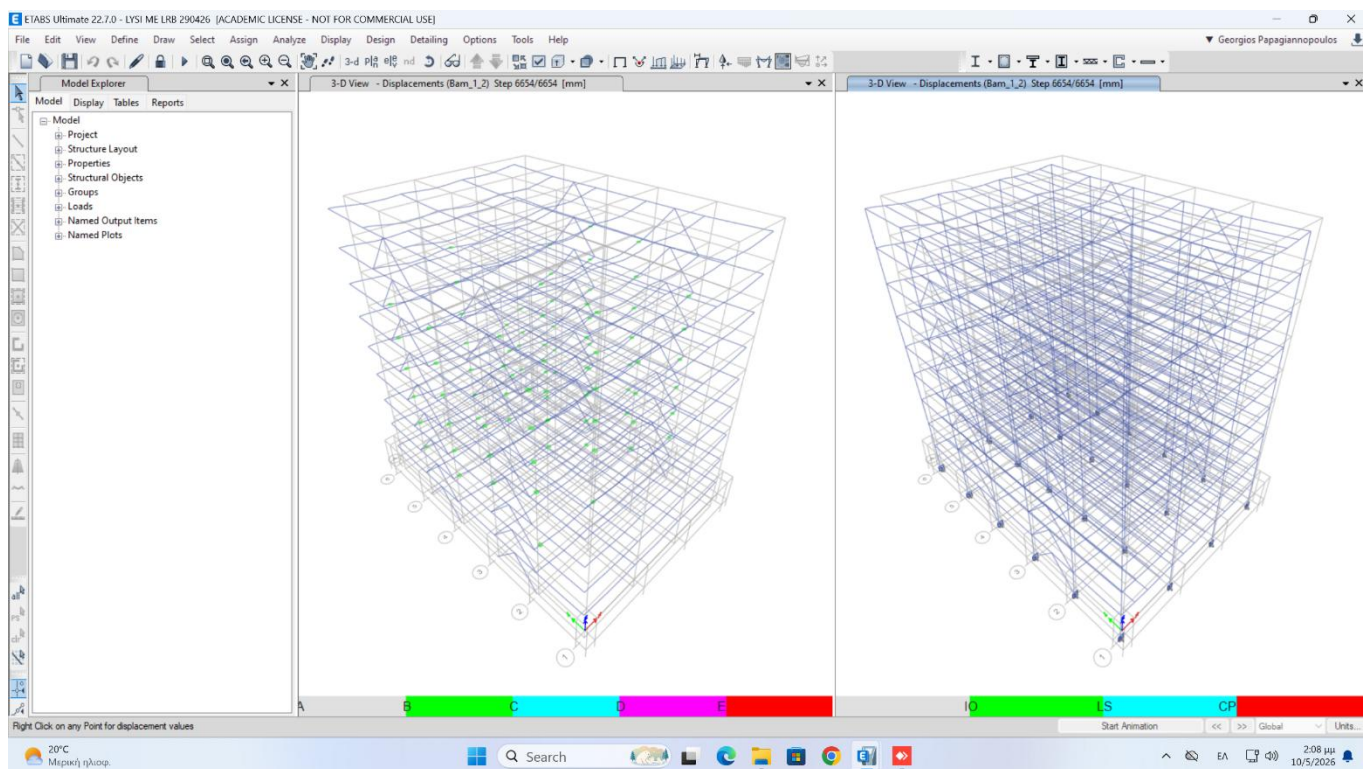


Εικόνα 29 : Πλαστικές αρθρώσεις Sylmar_2_1

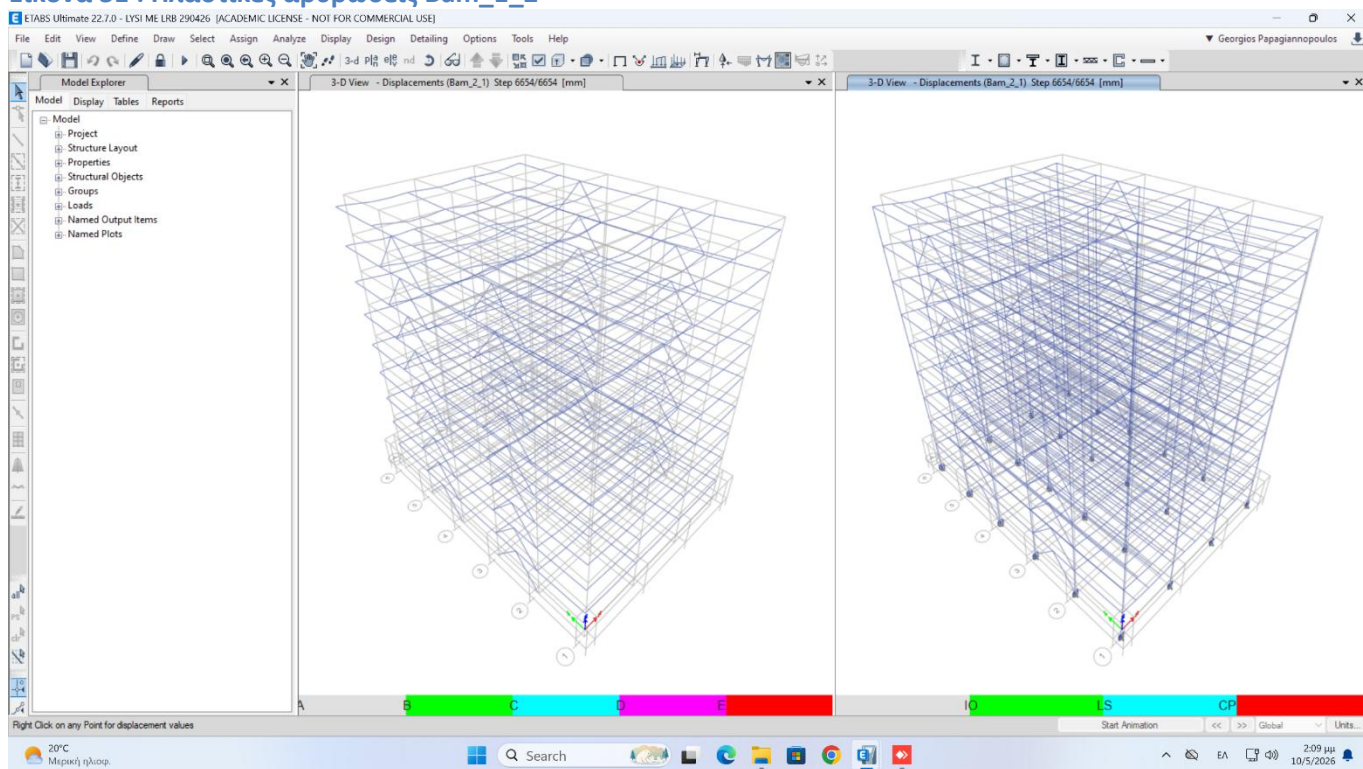


Εικόνα 30 : Πλαστικές αρθρώσεις Sylmar_45

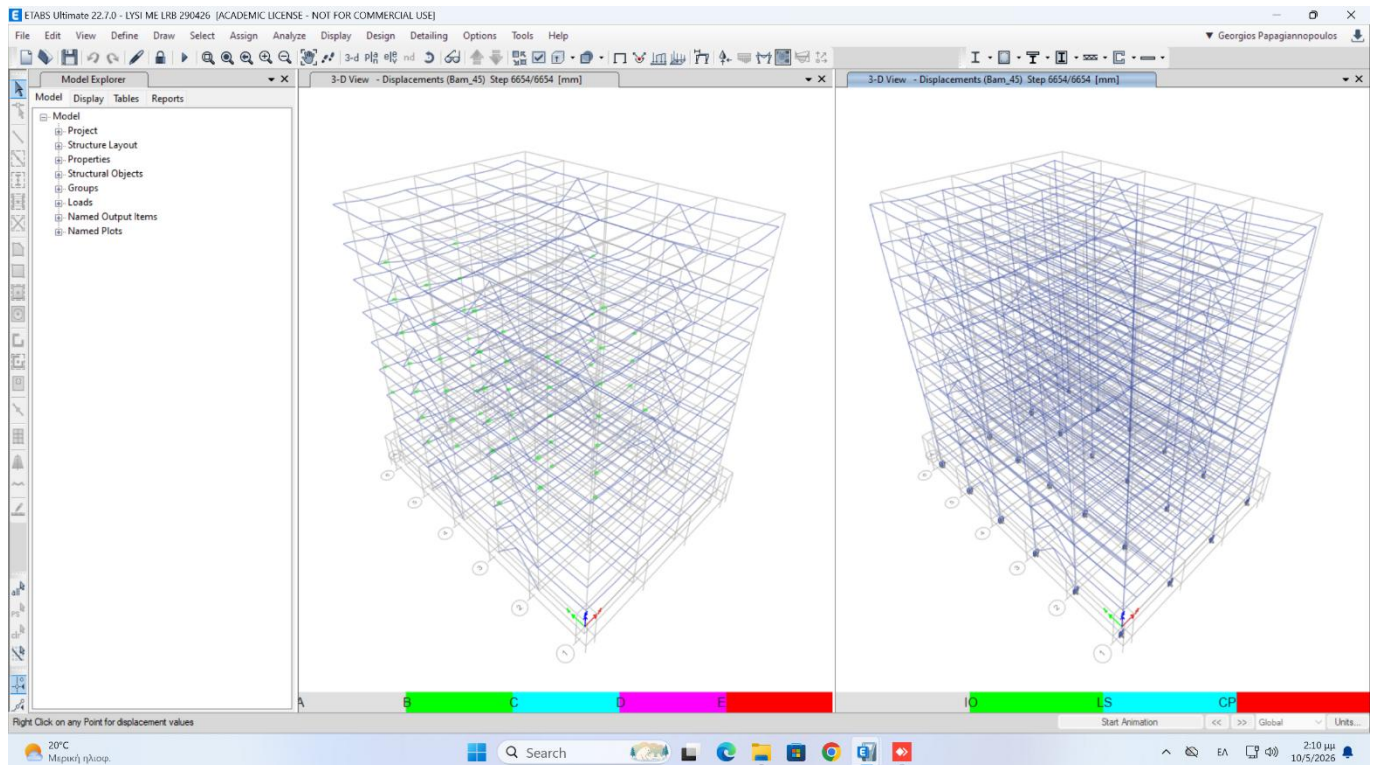
3) Μοντέλο απόσβεσης κατά Rayleigh



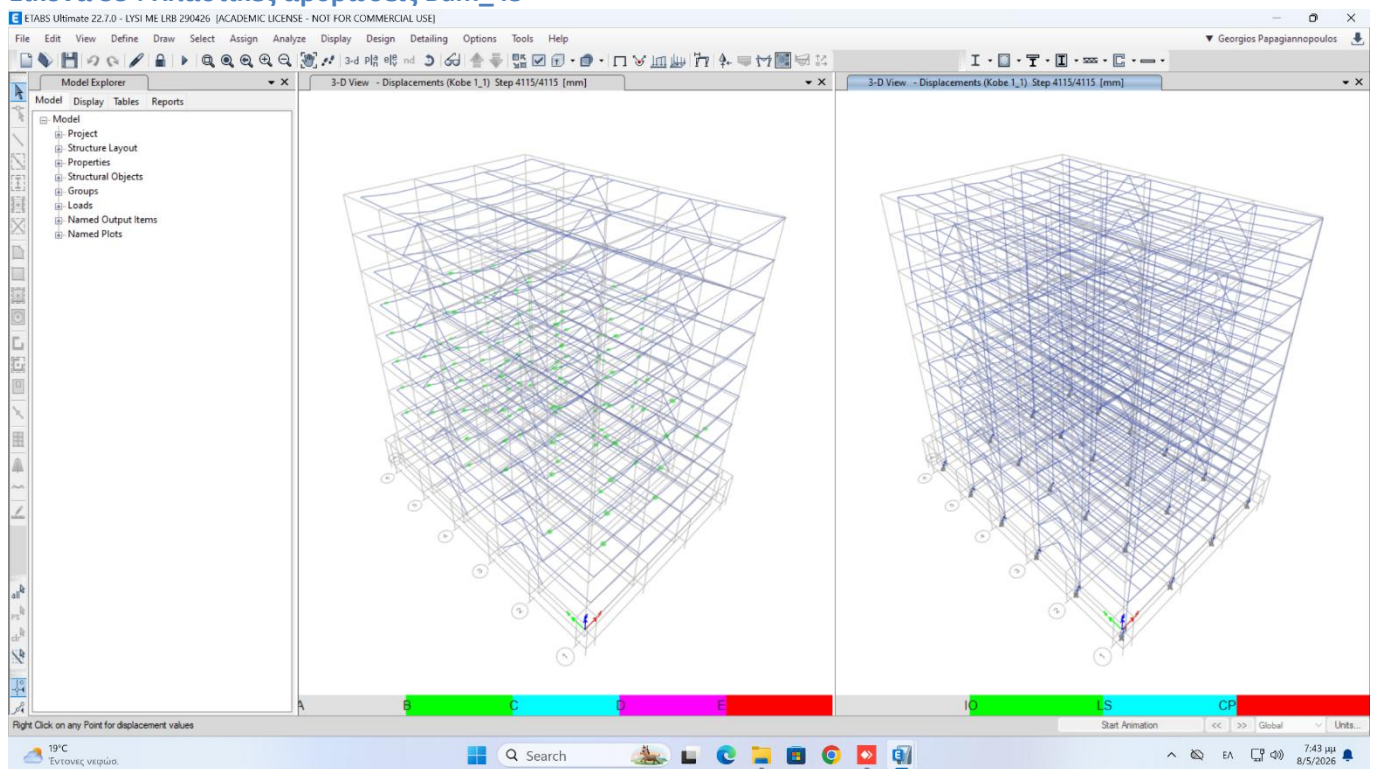
Εικόνα 31 : Πλαστικές αρθρώσεις Bam_1_2



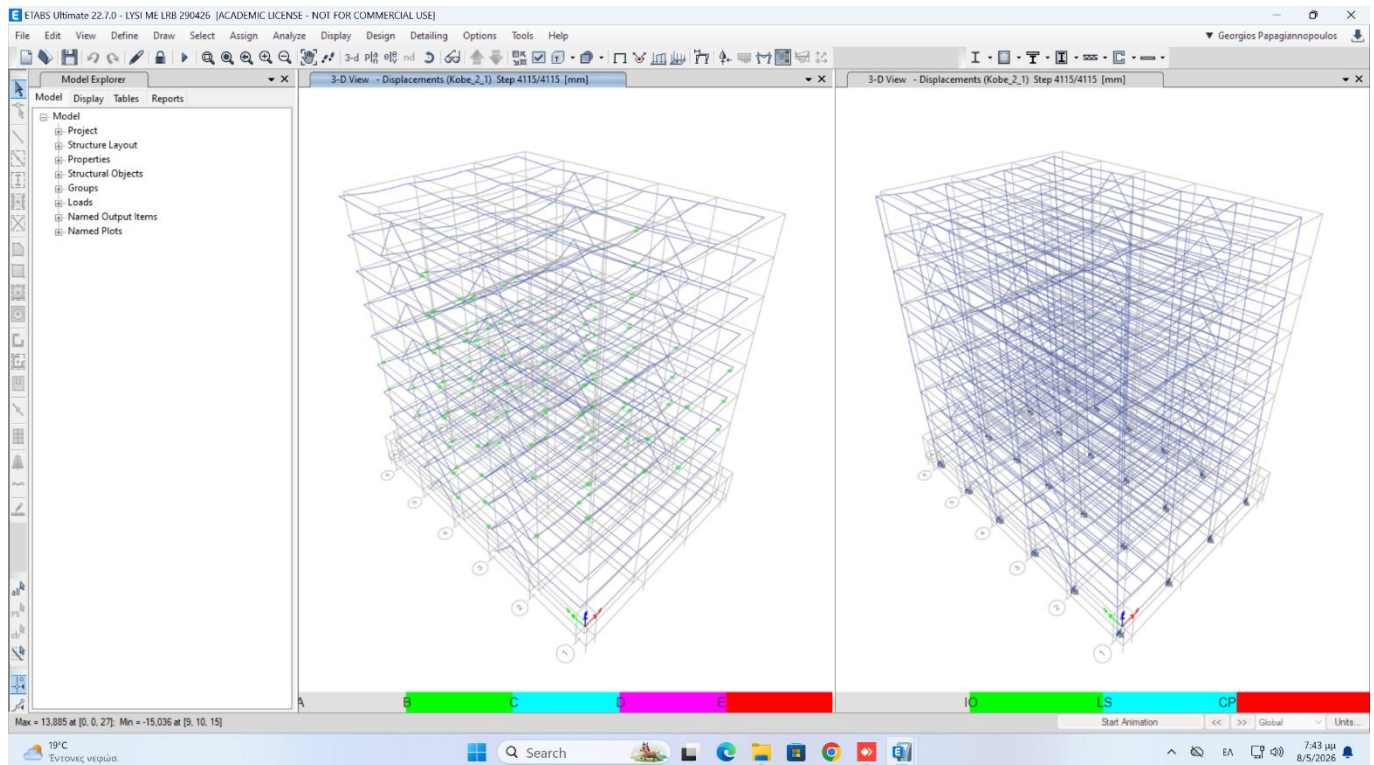
Εικόνα 32 : Πλαστικές αρθρώσεις Bam_2_1



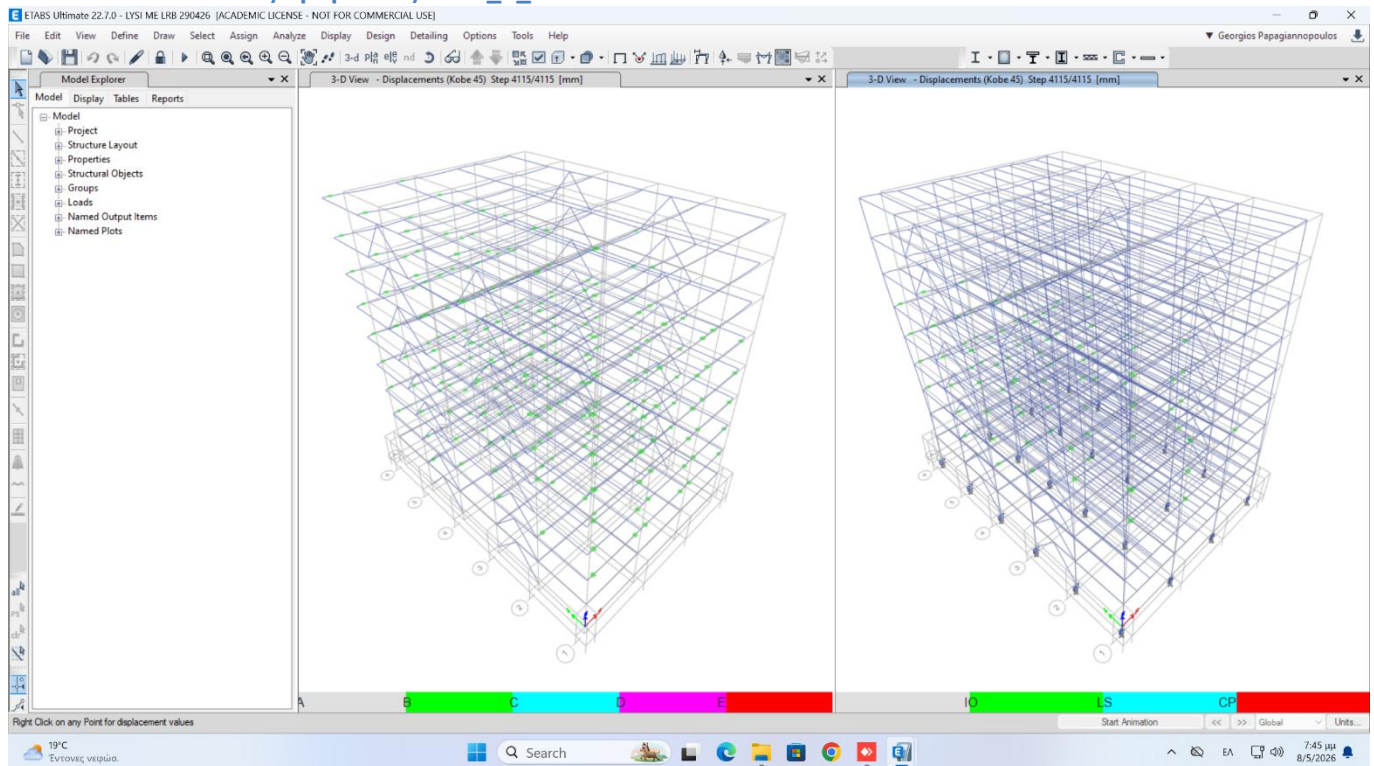
Εικόνα 33 : Πλαστικές αρθρώσεις Bam_45



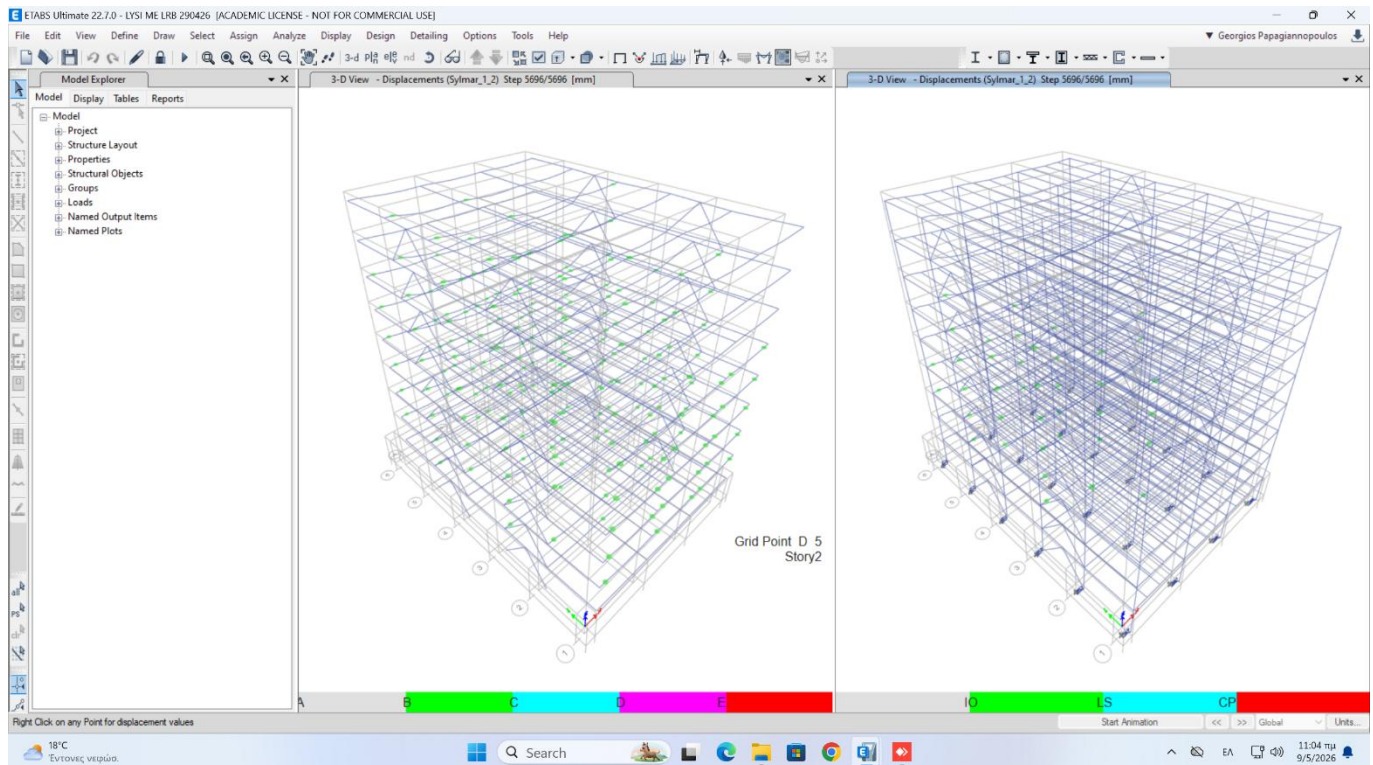
Εικόνα 34 : Πλαστικές αρθρώσεις Kobe_1_2



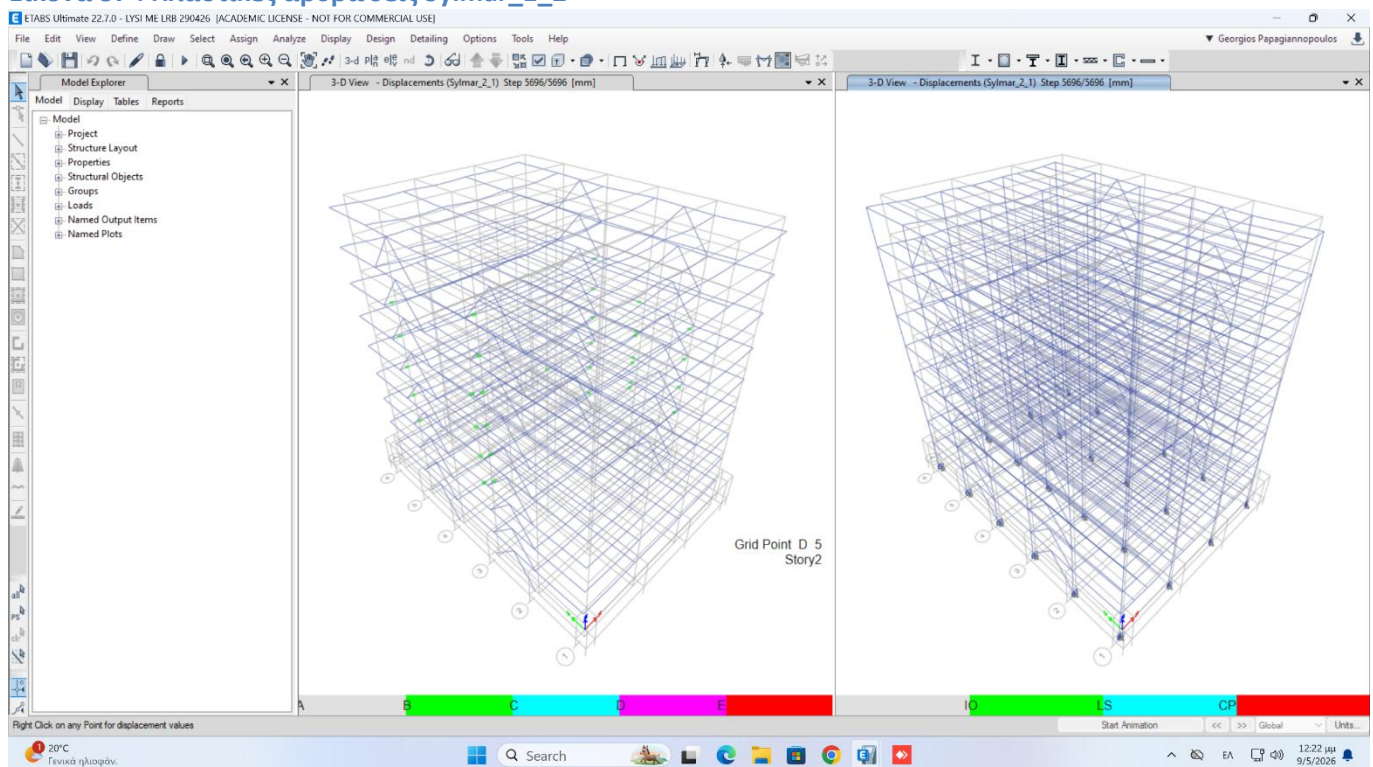
Εικόνα 35 : Πλαστικές αρθρώσεις Kobe_2_1



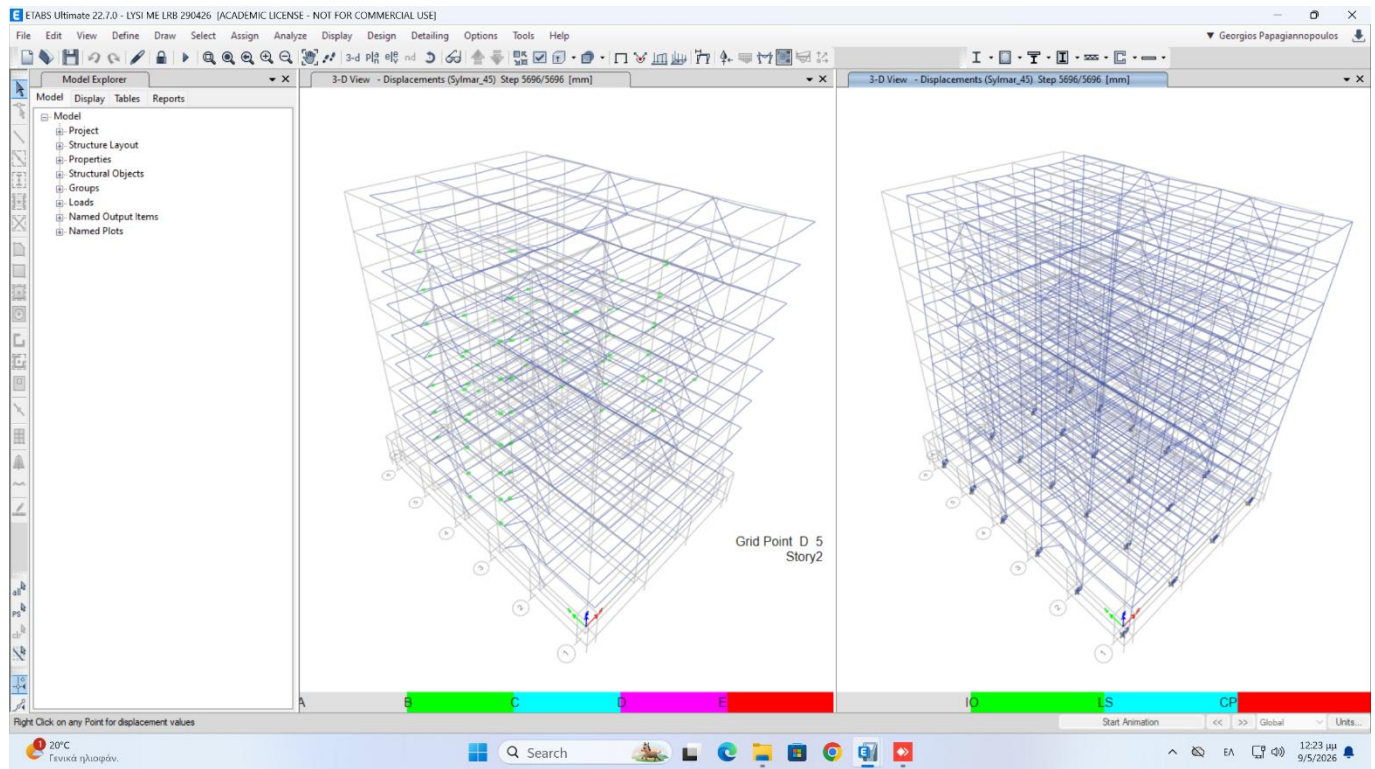
Εικόνα 36 : Πλαστικές αρθρώσεις Kobe_45



Εικόνα 37 : Πλαστικές αρθρώσεις Sylmar_1_2

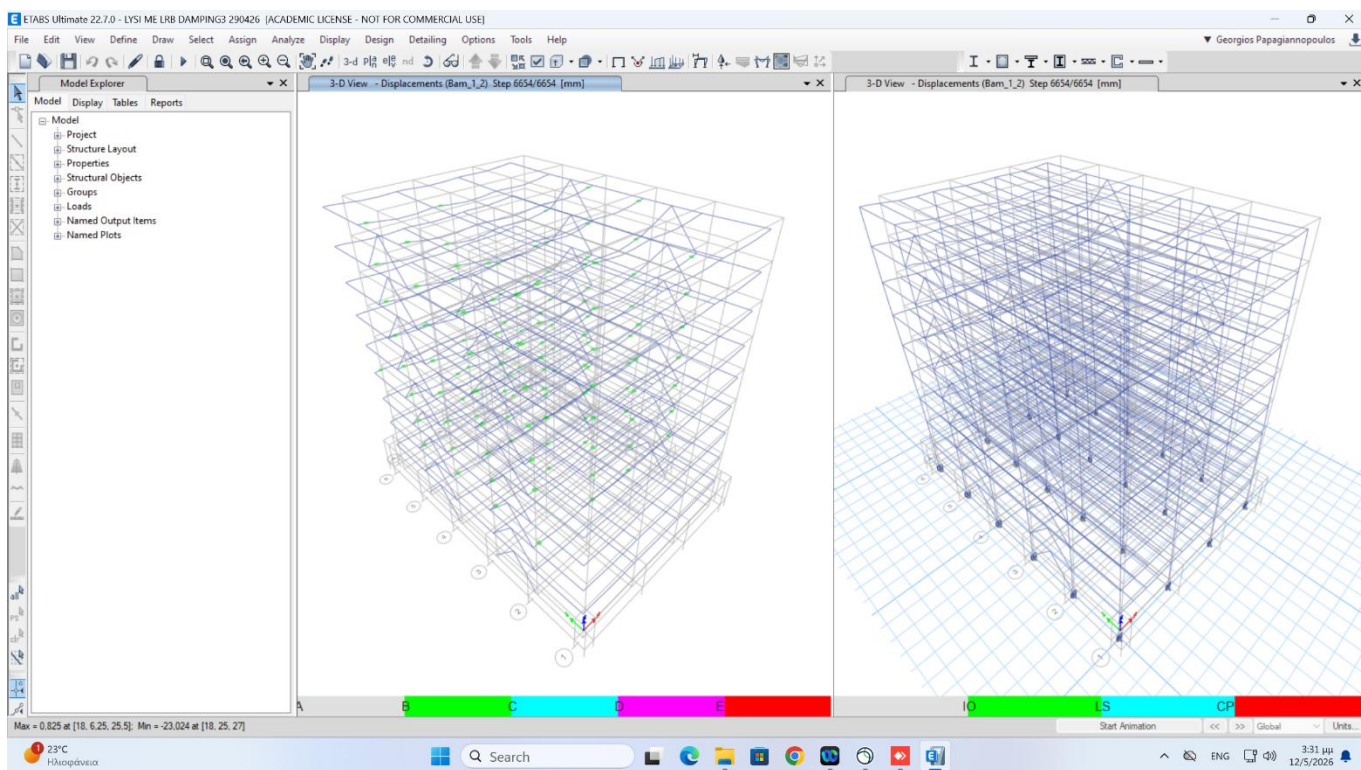


Εικόνα 38 : Πλαστικές αρθρώσεις Sylmar_2_1

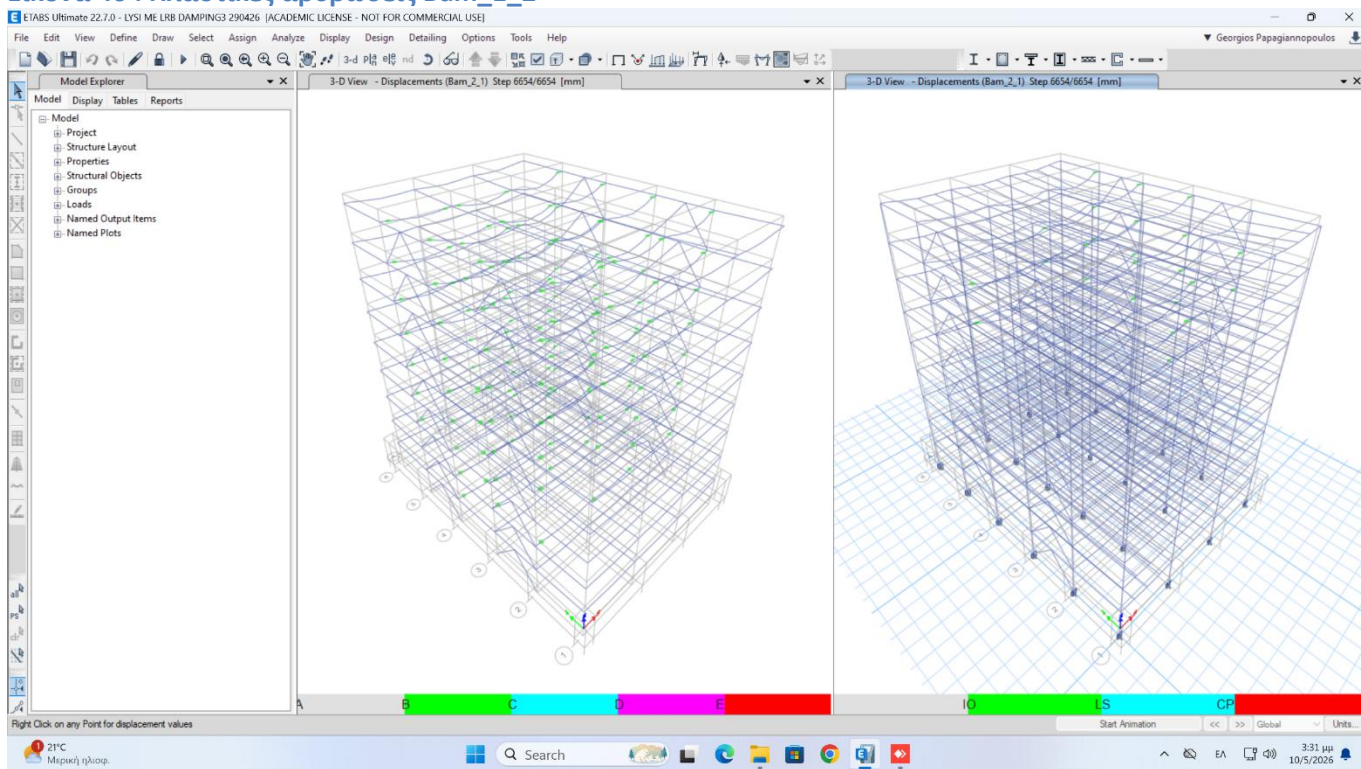


Εικόνα 39 : Πλαστικές αρθρώσεις Sylmar_45

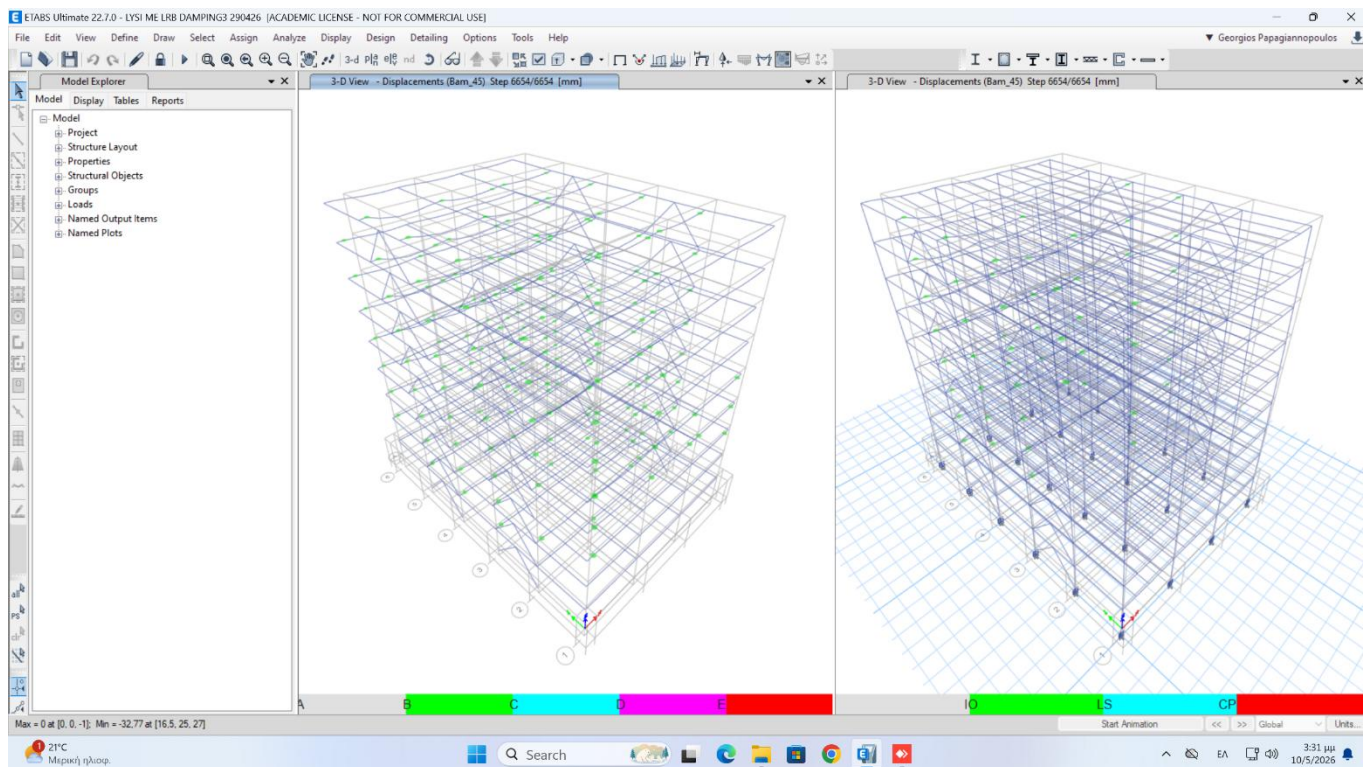
4) Μοντέλο απόσβεσης κατ' αναλογία του μητρώου δυσκαμψίας (Stiffness Proportional Damping)



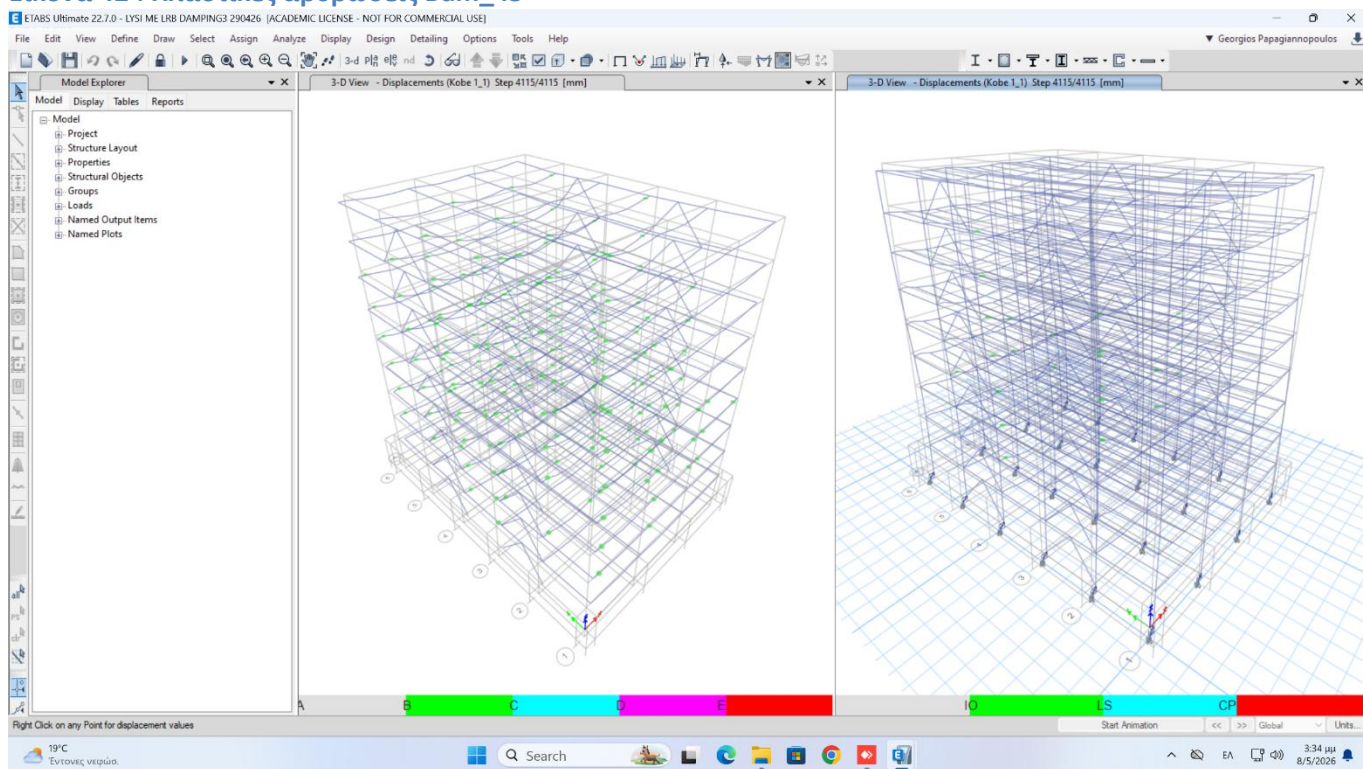
Εικόνα 40 : Πλαστικές αρθρώσεις Bam_1_2



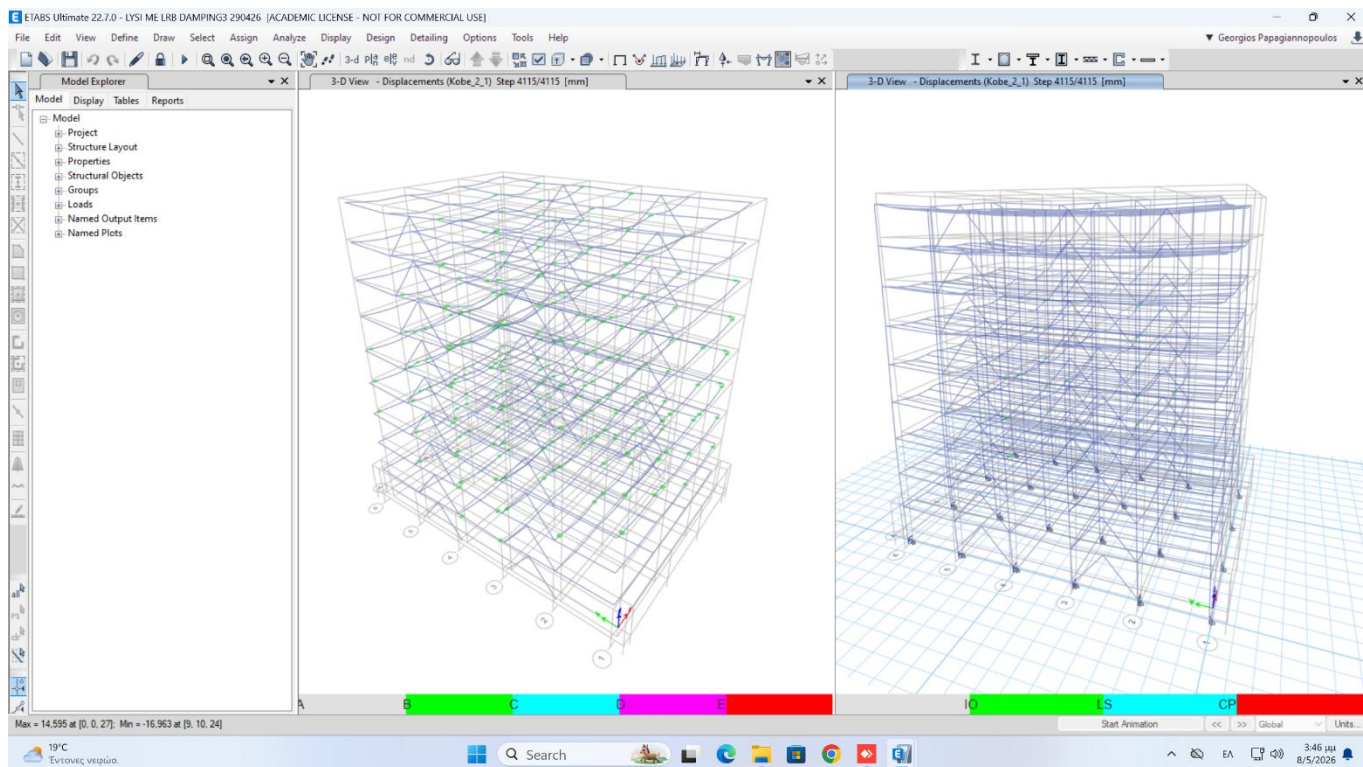
Εικόνα 41 : Πλαστικές αρθρώσεις Bam_2_1



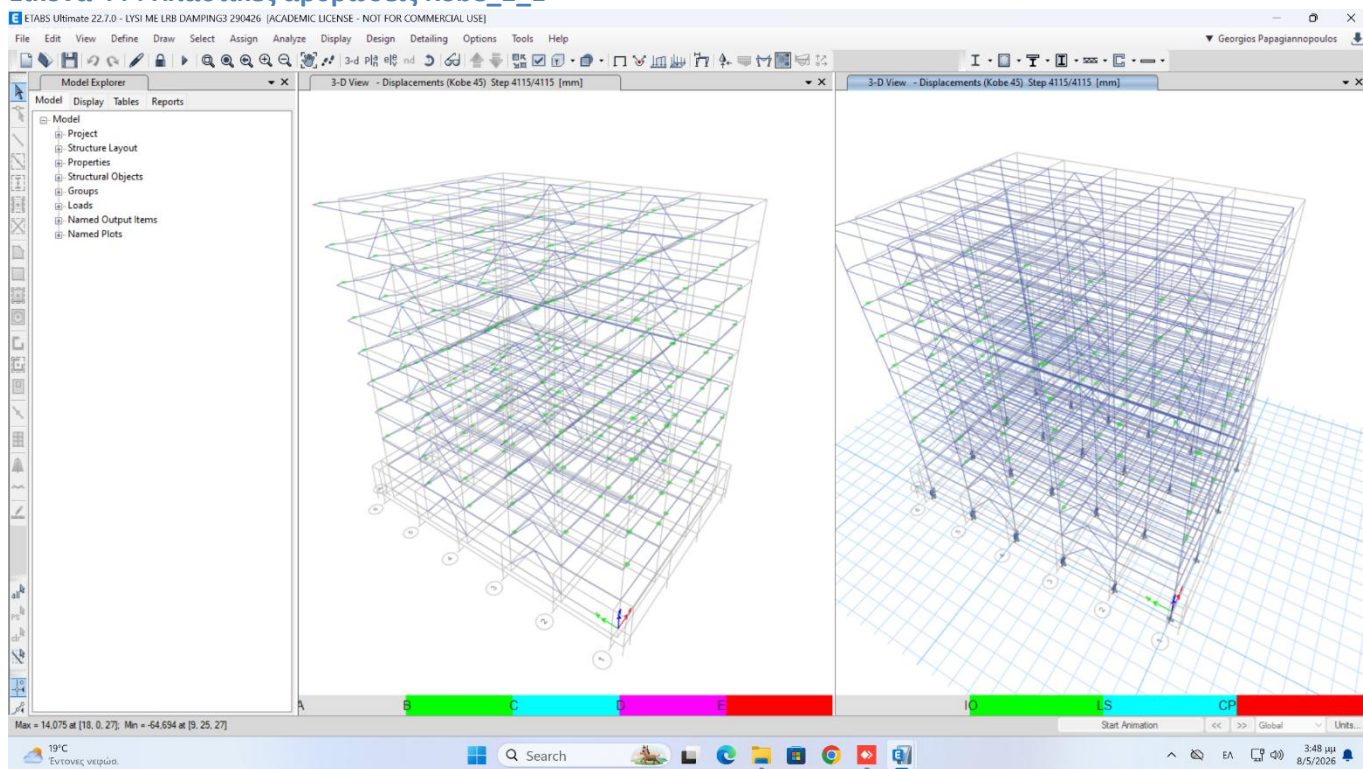
Εικόνα 42 : Πλαστικές αρθρώσεις Bam_45



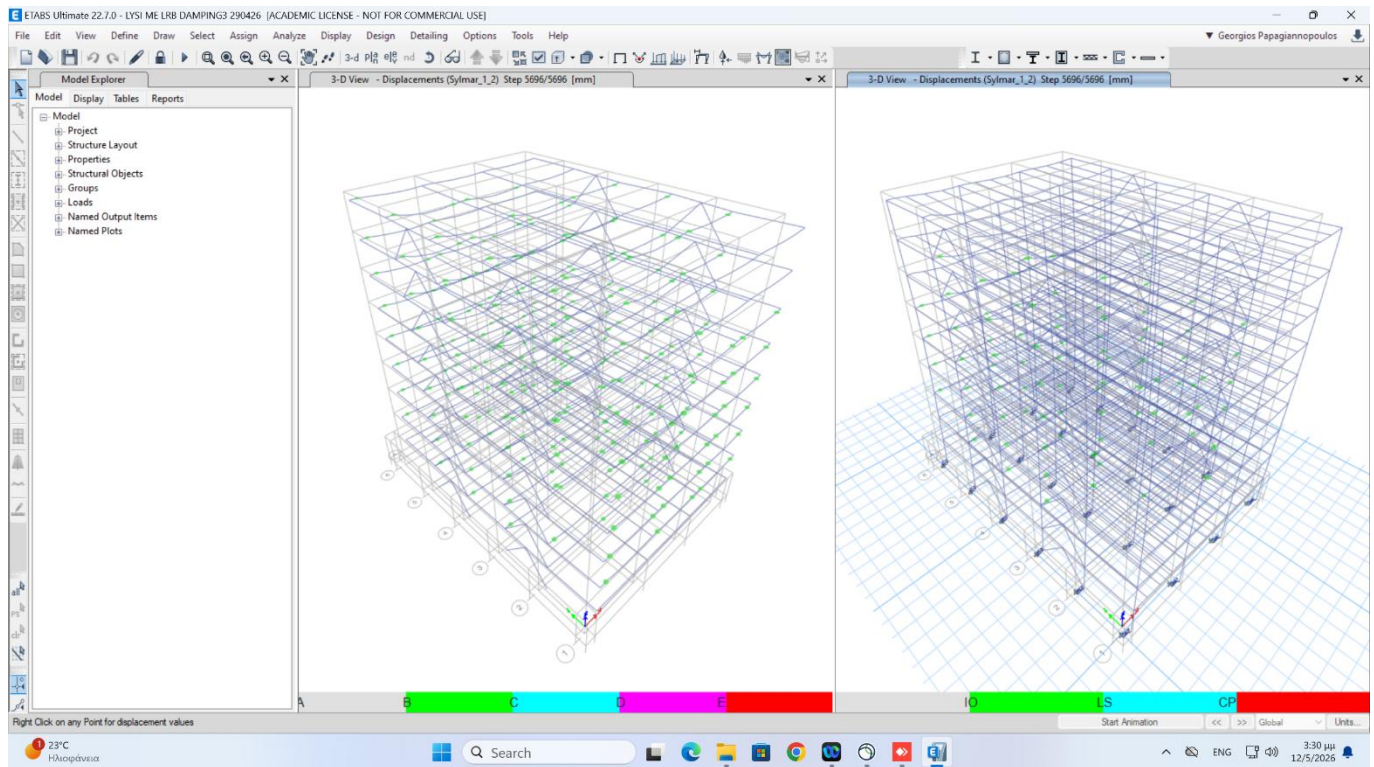
Εικόνα 43 : Πλαστικές αρθρώσεις Kobe_1_2



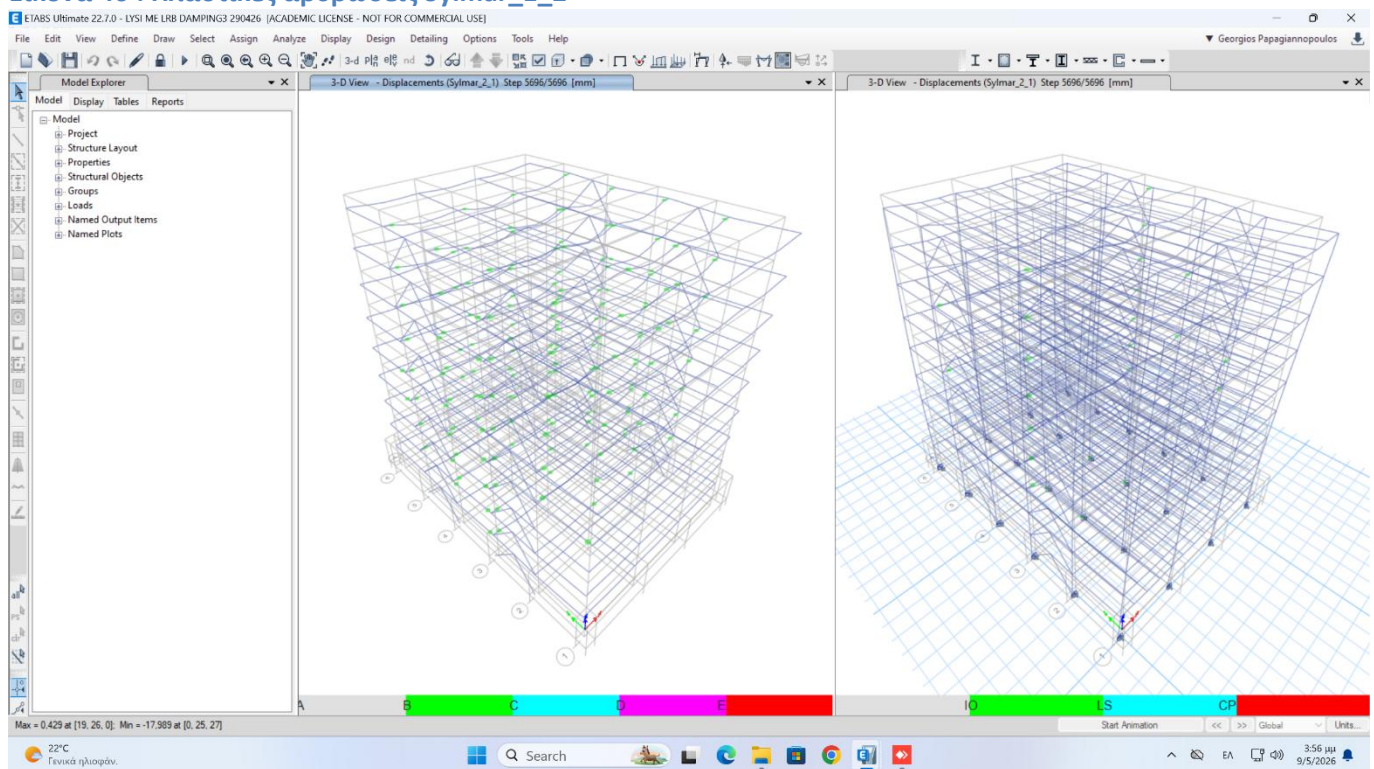
Εικόνα 44 : Πλαστικές αρθρώσεις Kobe_2_1



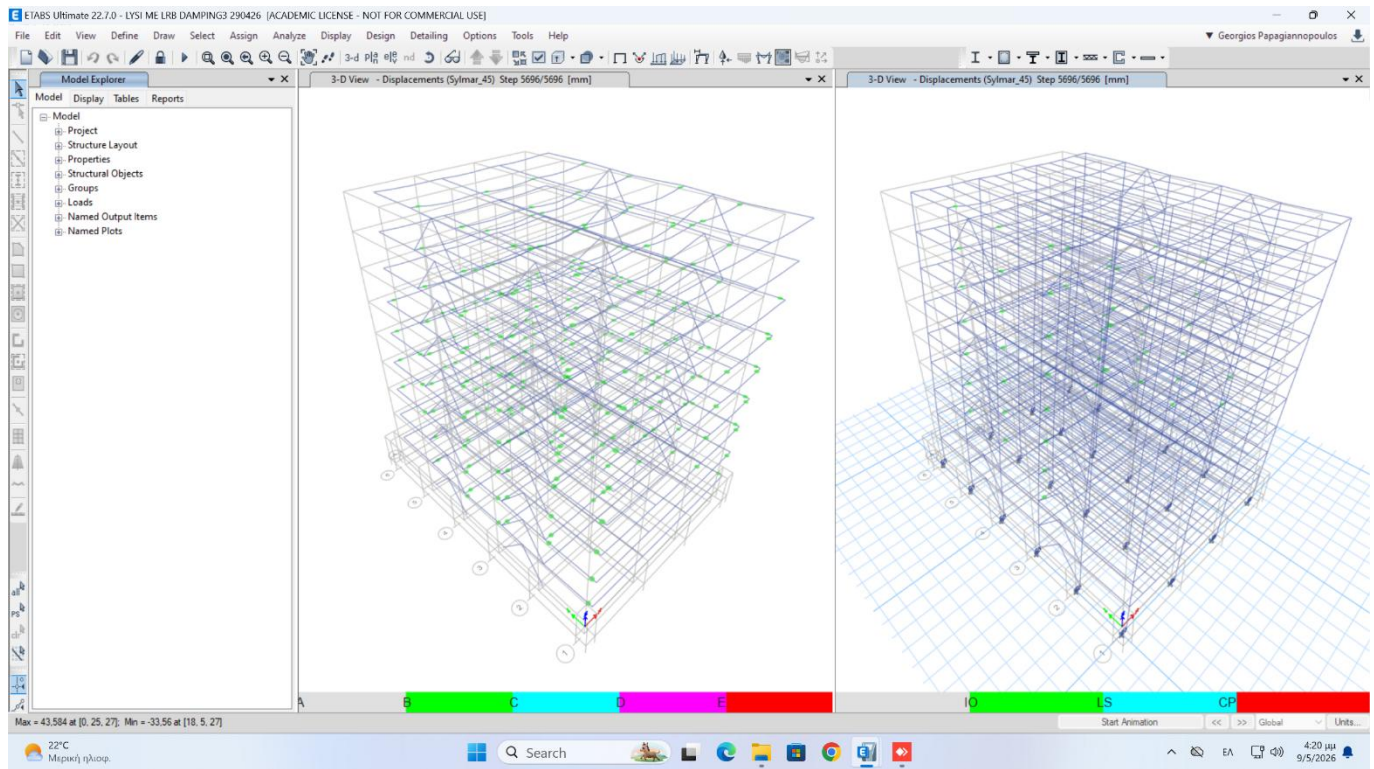
Εικόνα 45 : Πλαστικές αρθρώσεις Kobe_45



Εικόνα 46 : Πλαστικές αρθρώσεις Sylmar_1_2



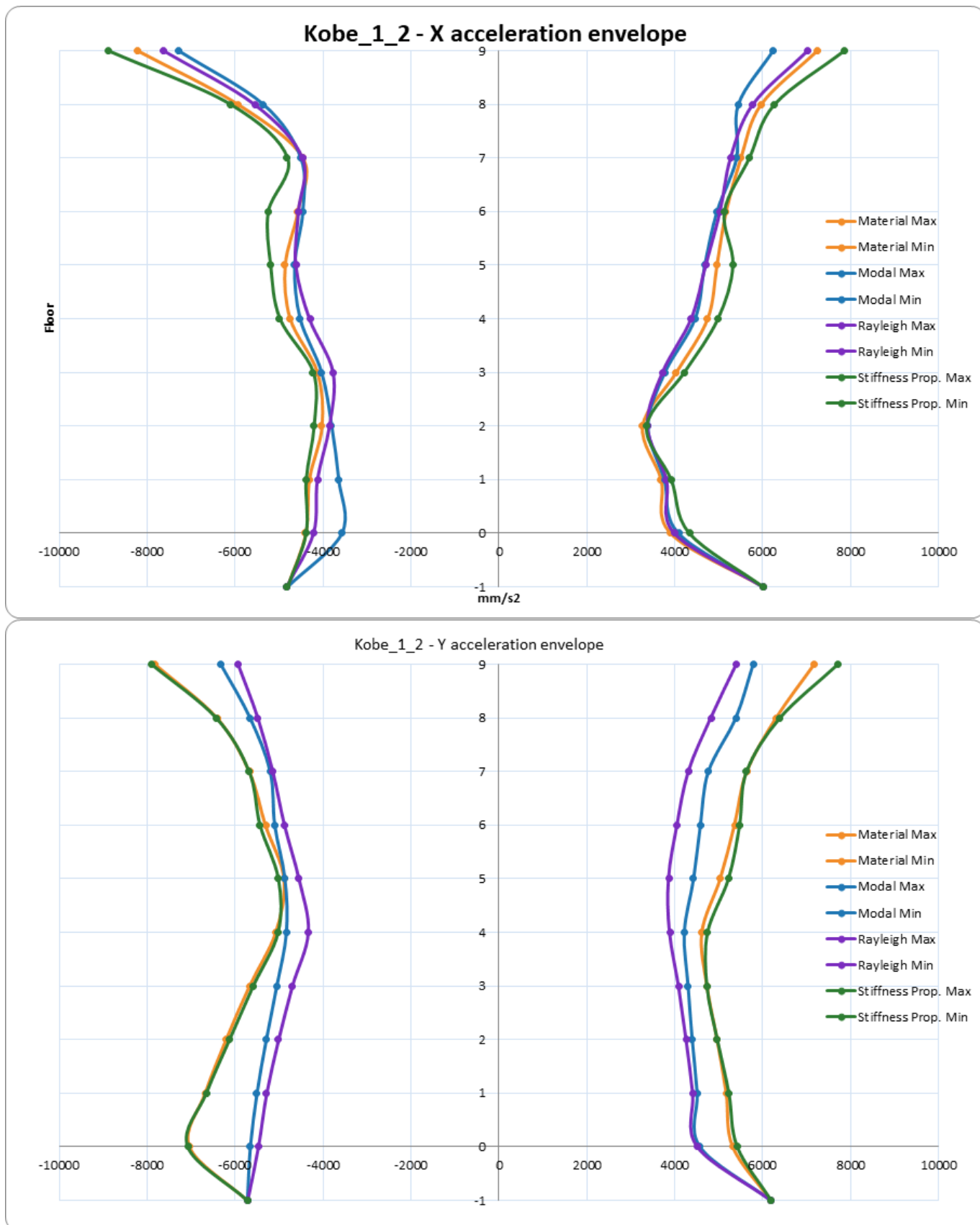
Εικόνα 47 : Πλαστικές αρθρώσεις Sylmar_2_1



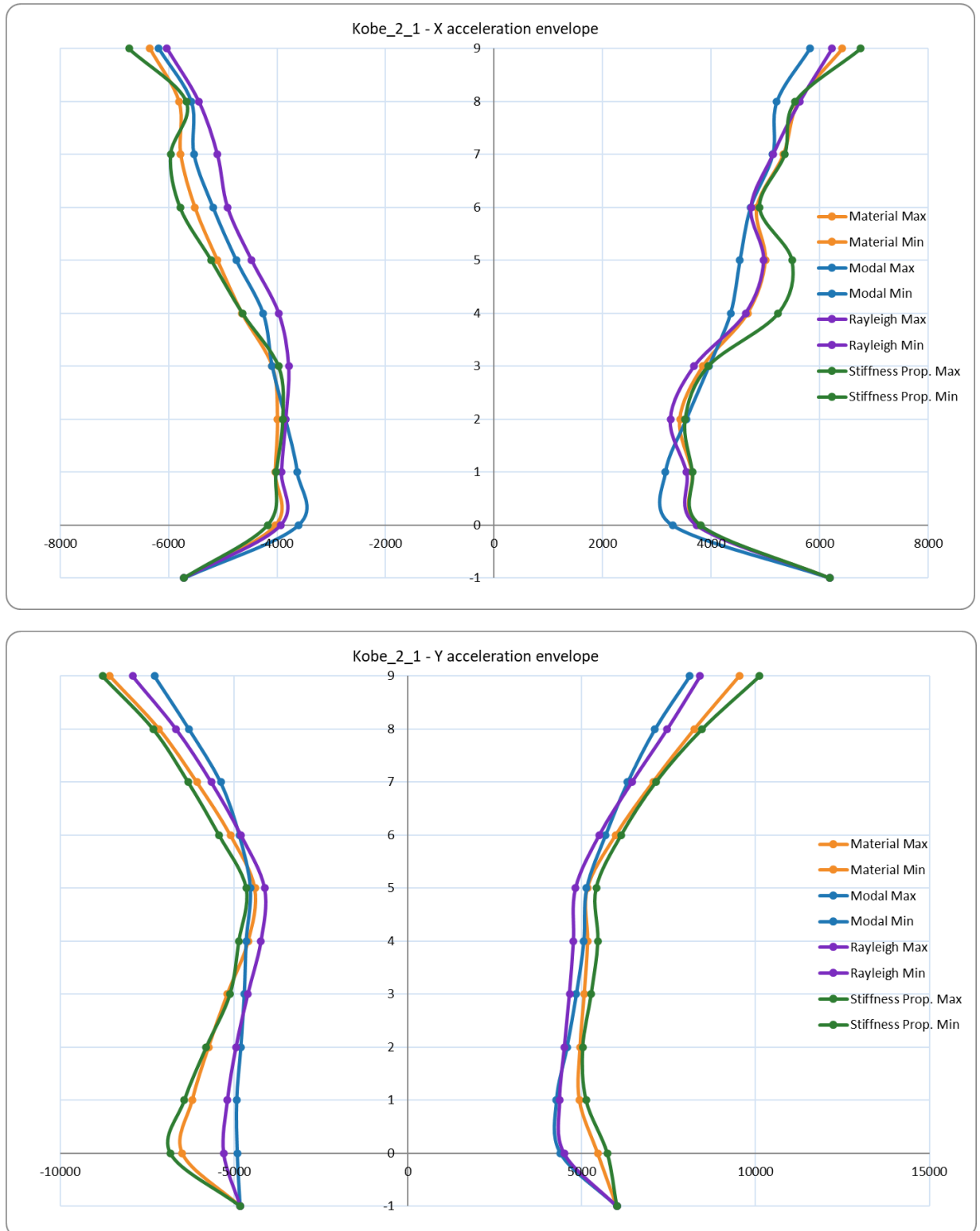
Εικόνα 48 : Πλαστικές αρθρώσεις Sylmar_45

4.2 Μέγιστες και ελάχιστες απόλυτες επιταχύνσεις ορόφων

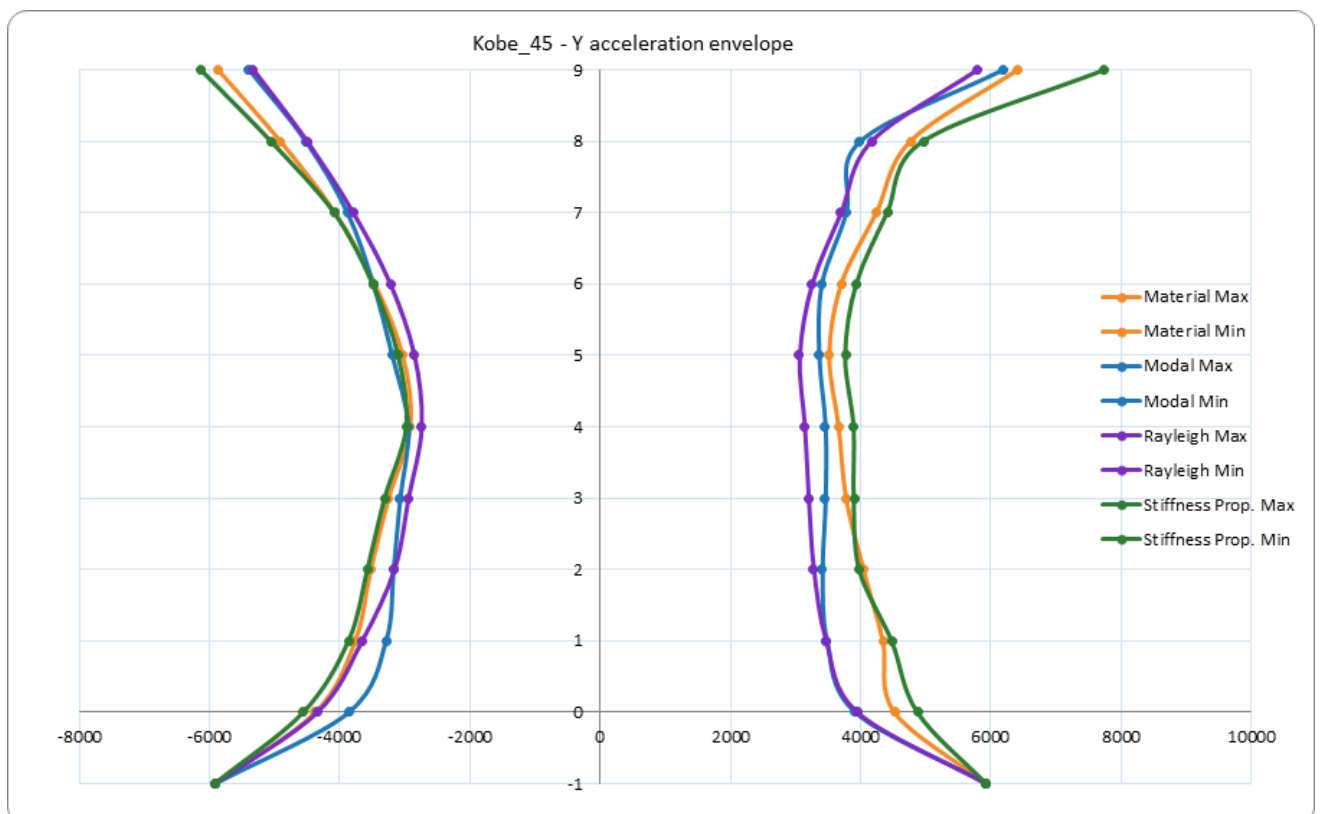
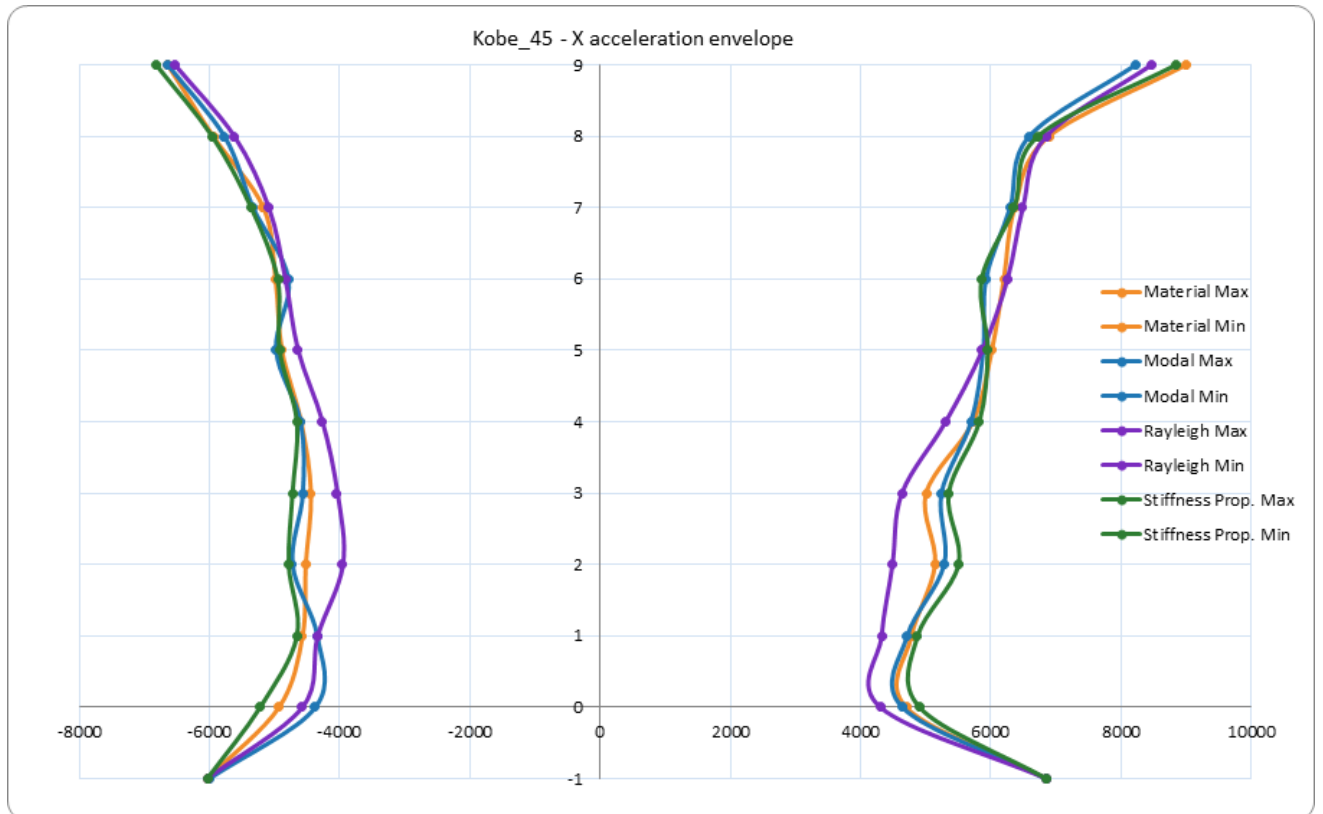
Στις Εικόνες 49-57, παρουσιάζονται οι μέγιστες και ελάχιστες απόλυτες επιταχύνσεις στις κύριες διευθύνσεις για κάθε όροφο της κατασκευής. Οι τιμές στον οριζόντιο άξονα είναι σε mm/s^2 .



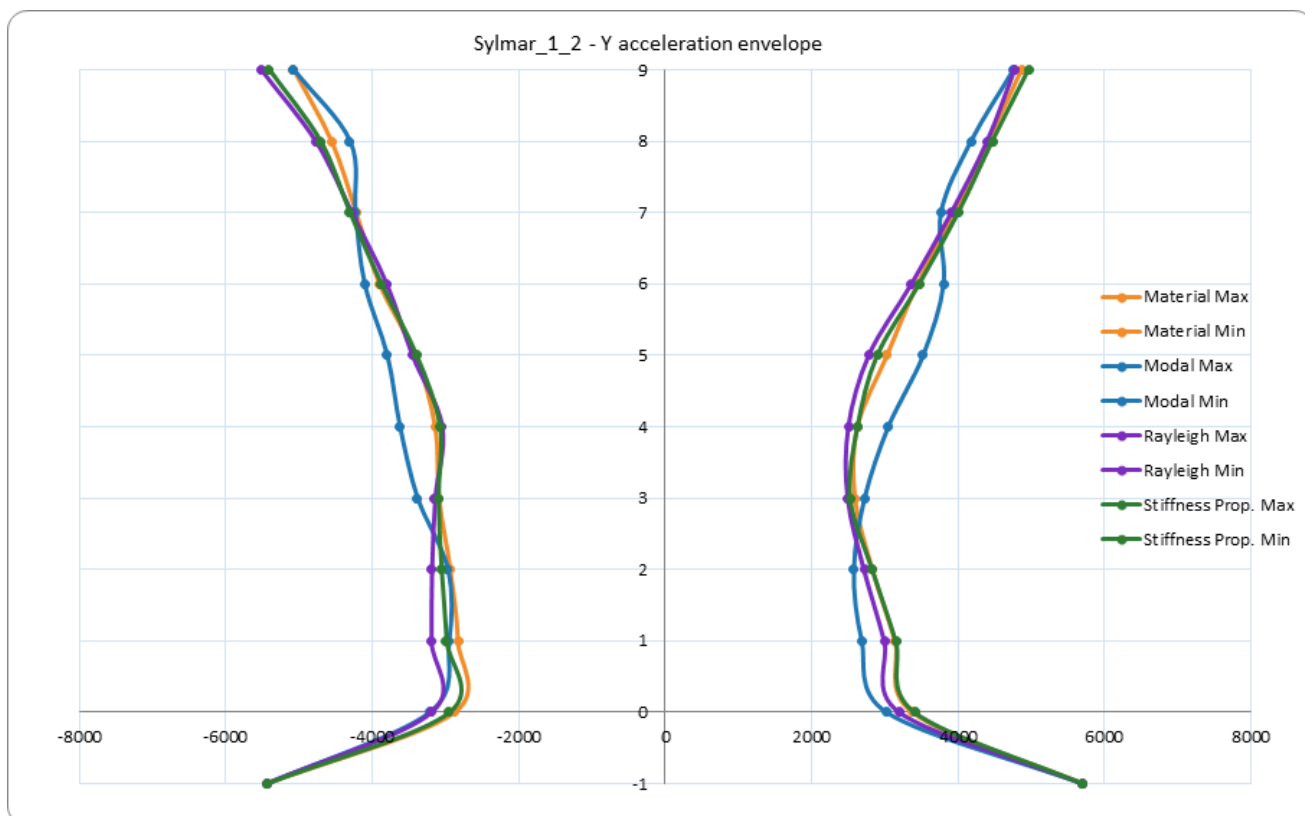
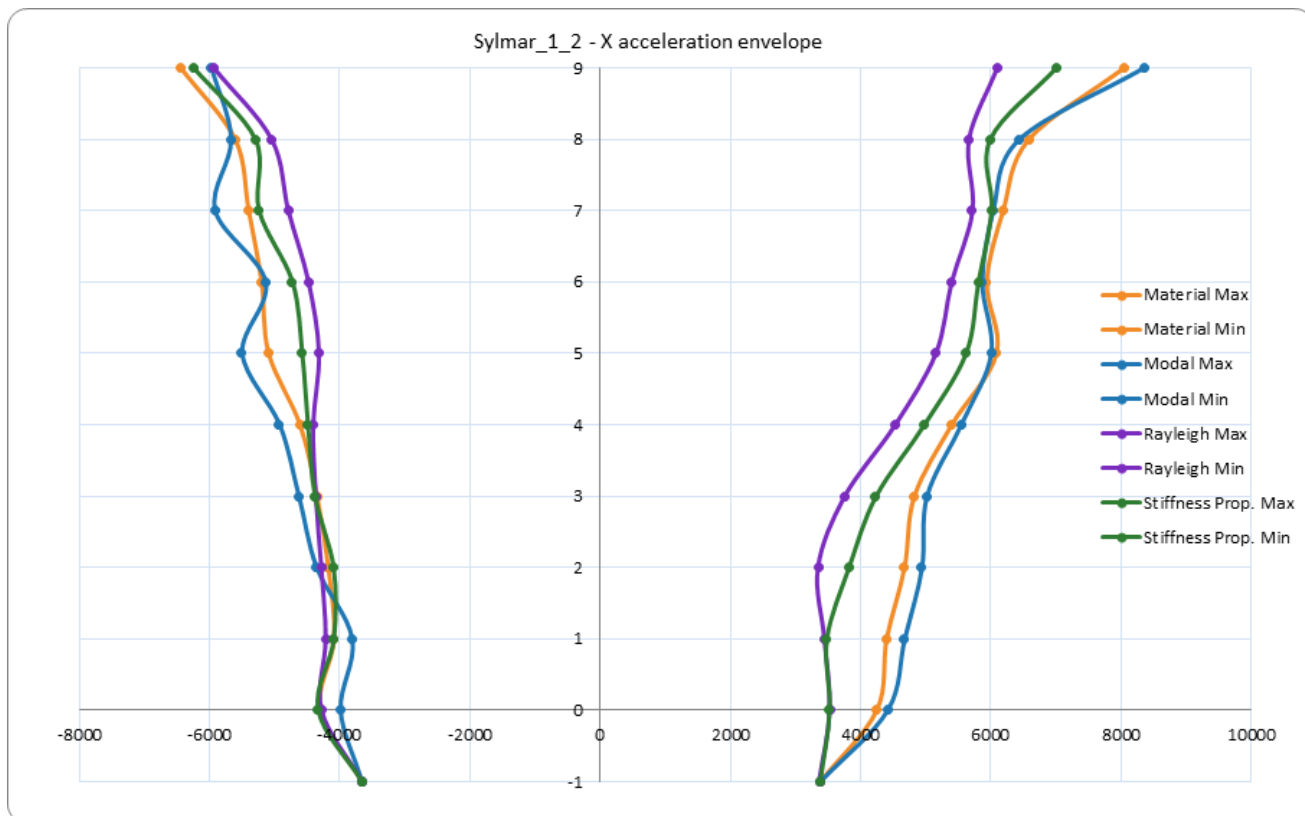
Εικόνα 49 : Μέγιστες θετικές και αρνητικές απόλυτες επιταχύνσεις Kobe_1_2



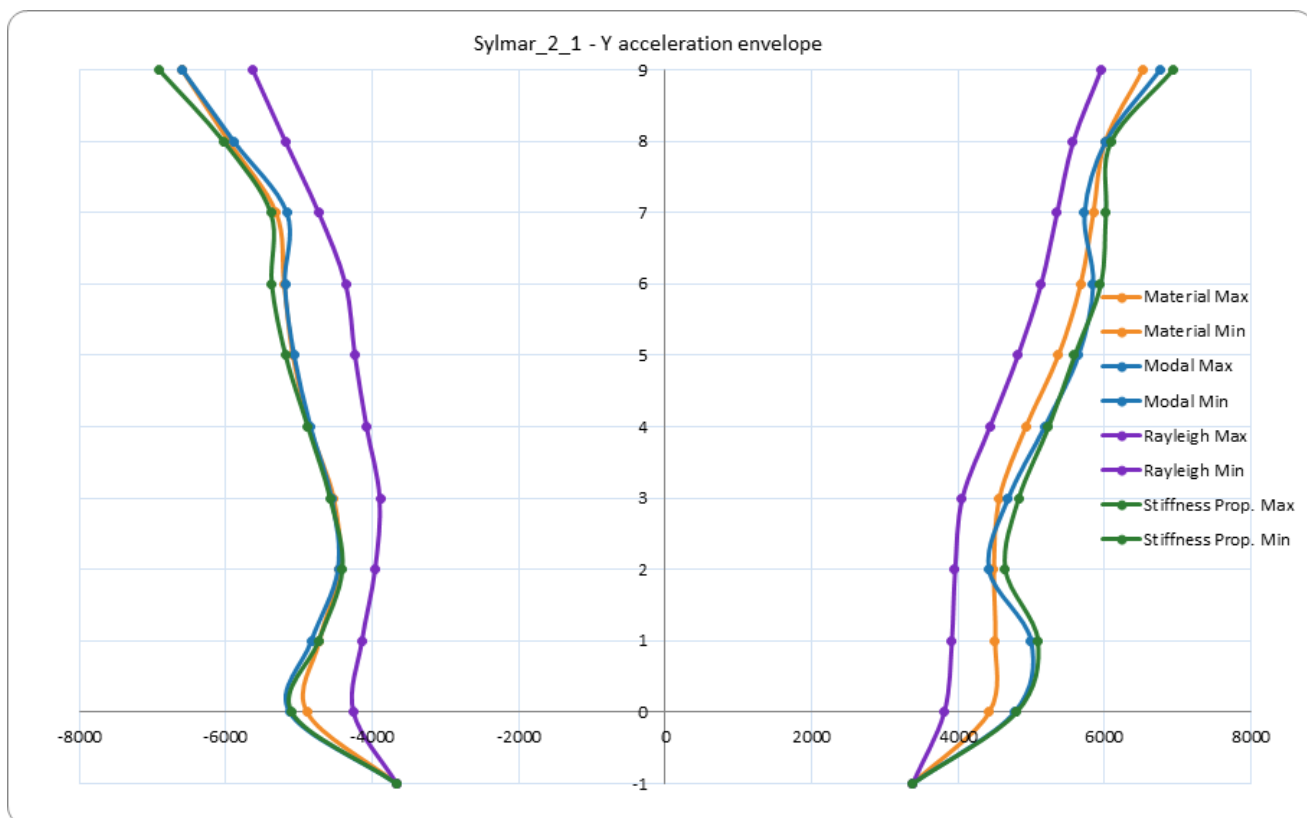
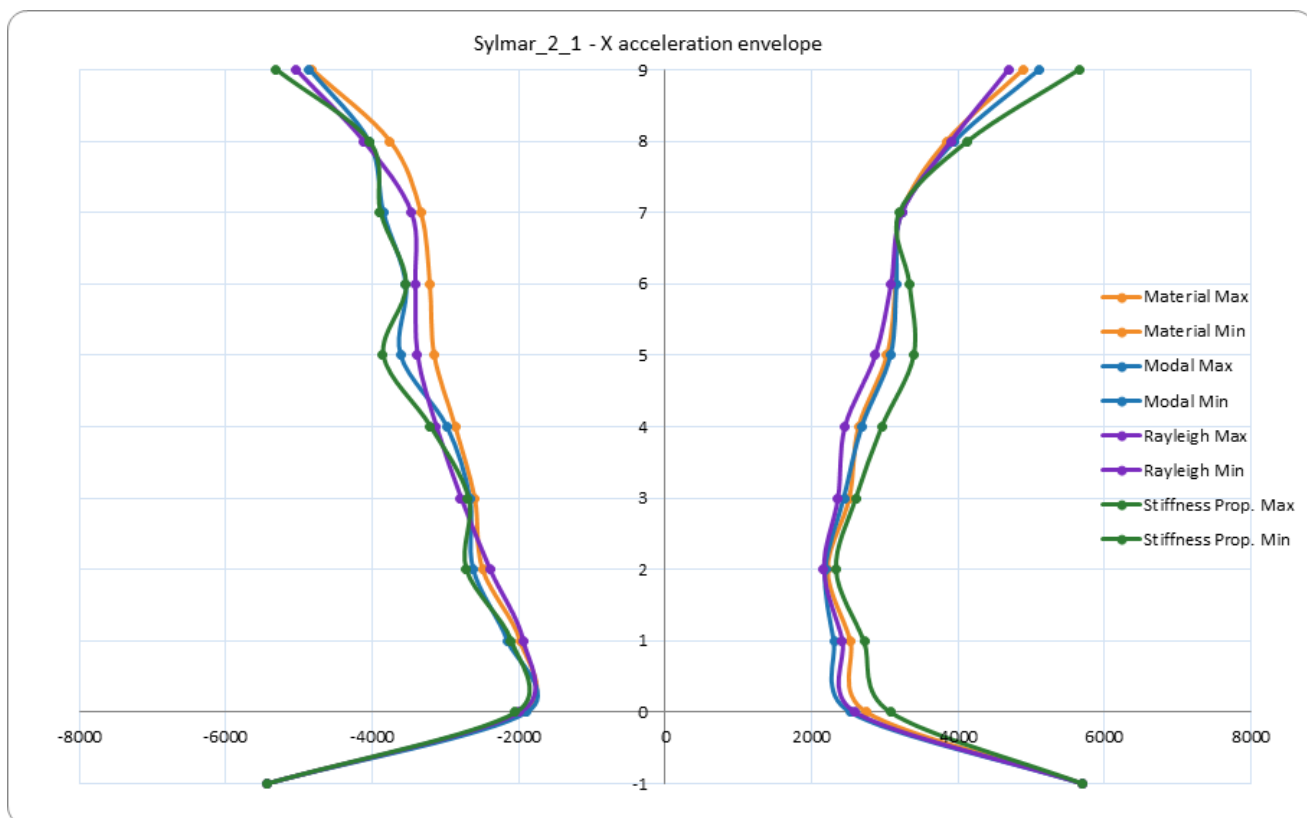
Εικόνα 50 : Μέγιστες θετικές και αρνητικές απόλυτες επιταχύνσεις Kobe_2_1



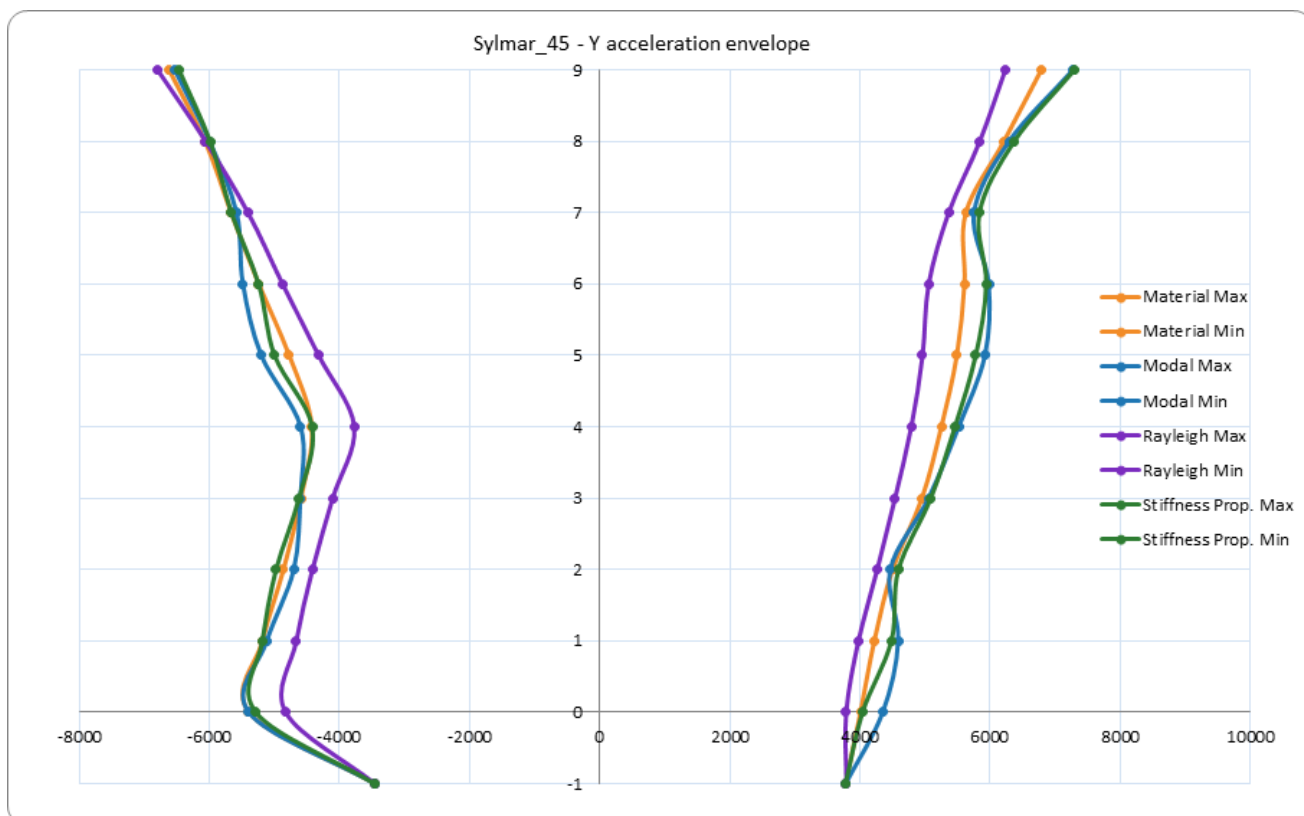
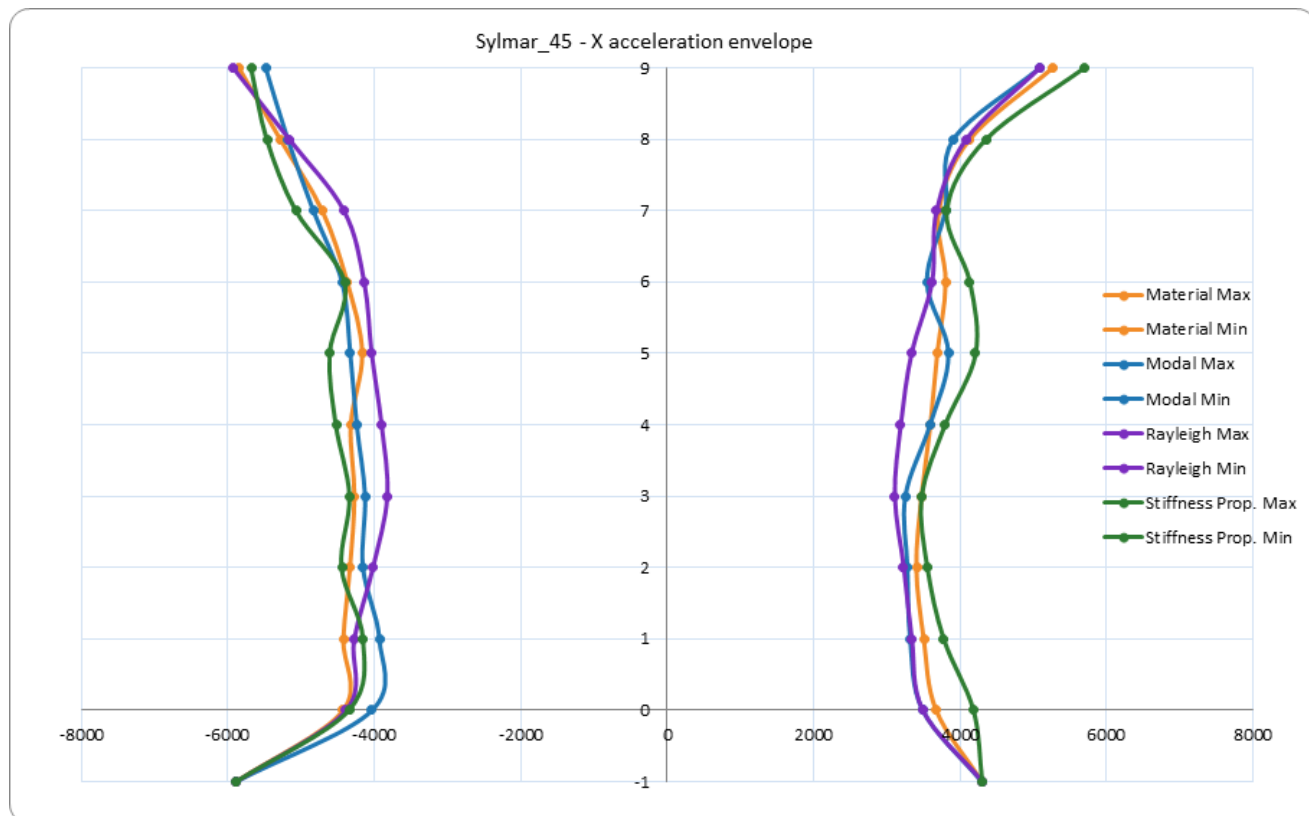
Εικόνα 51 : Μέγιστες θετικές και αρνητικές απόλυτες επιταχύνσεις Kobe_45



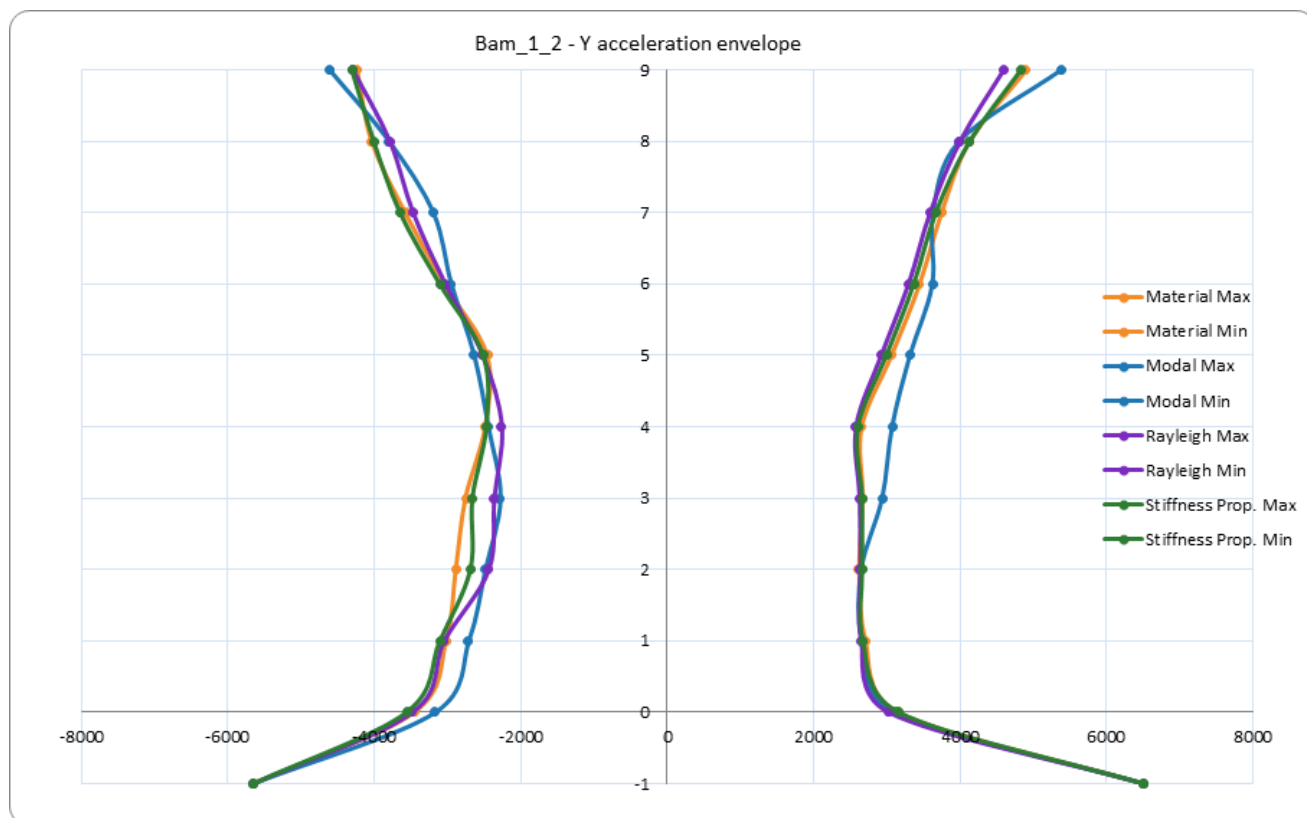
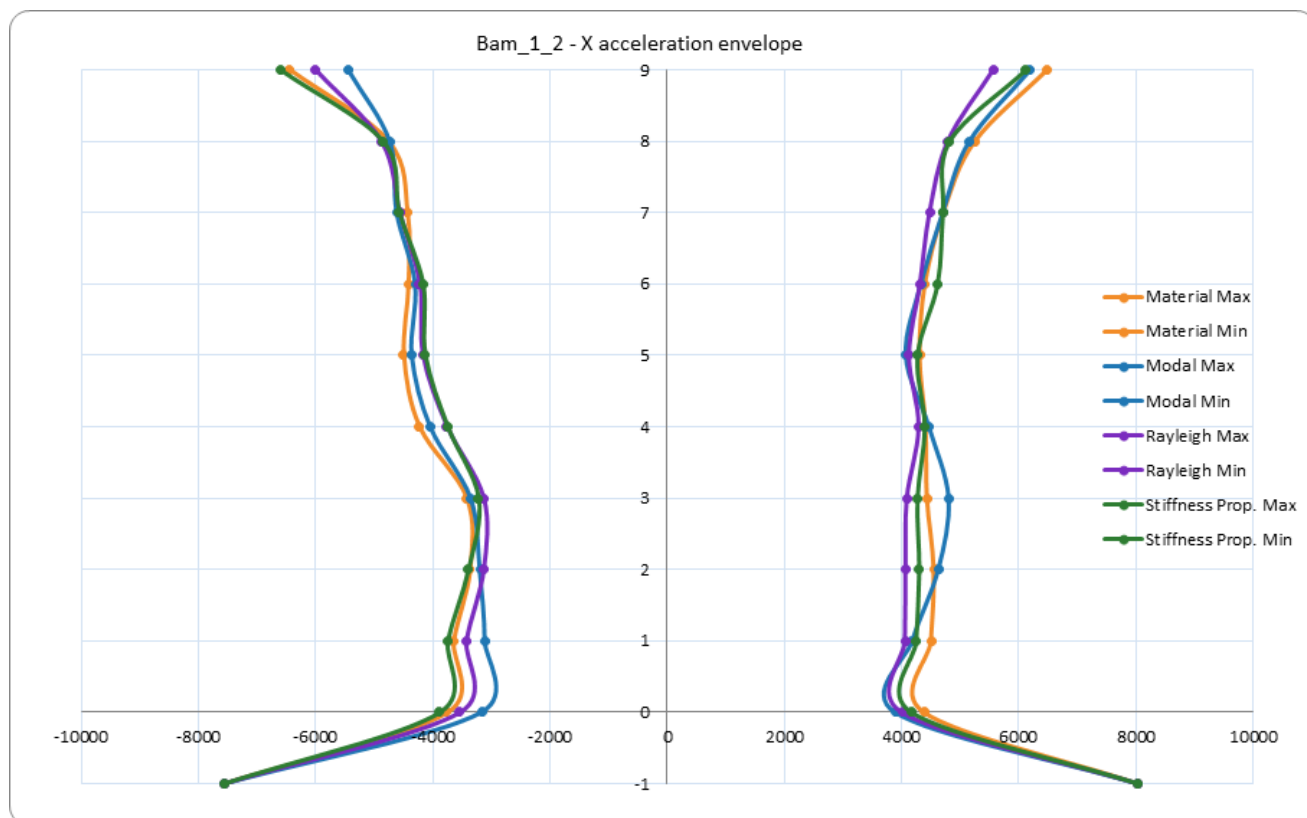
Εικόνα 52 : Μέγιστες θετικές και αρνητικές απόλυτες επιταχύνσεις Sylmar_1_2



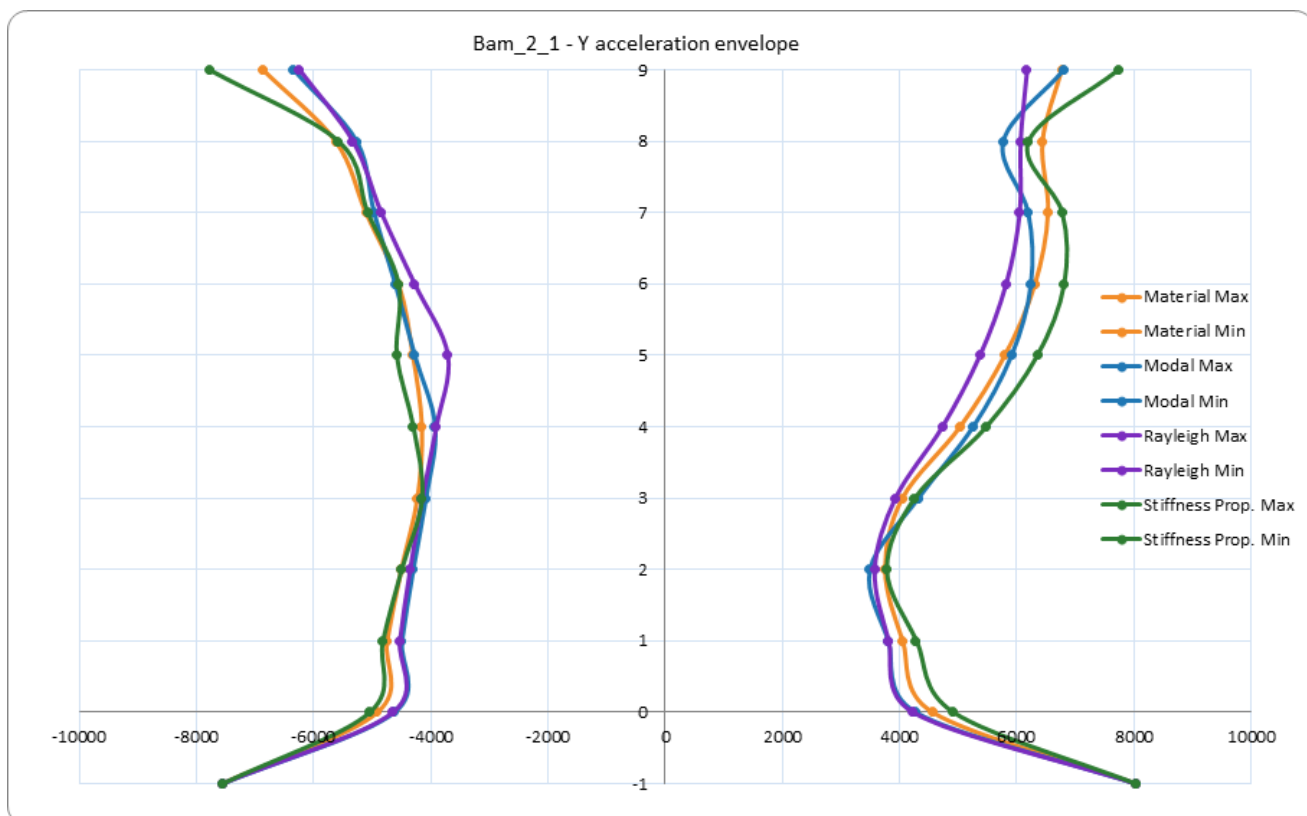
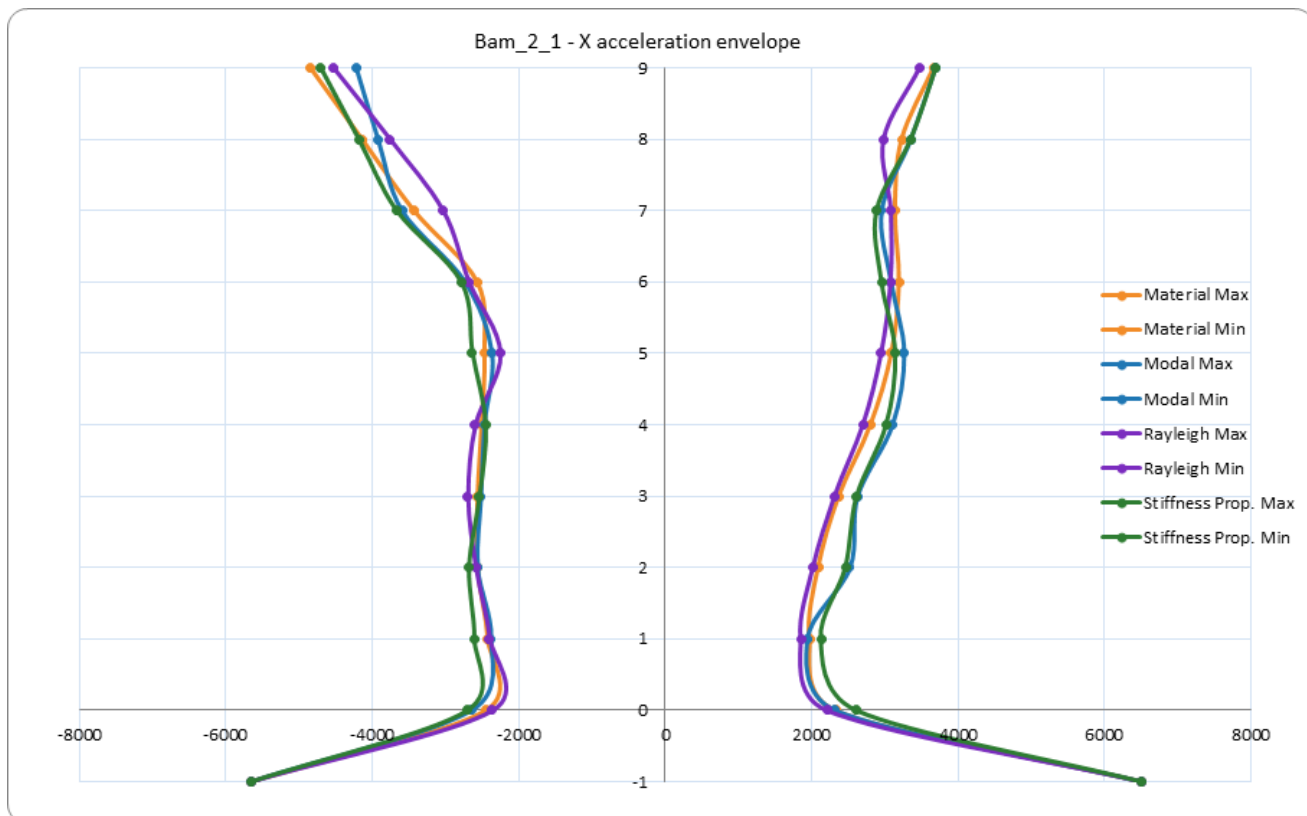
Εικόνα 53 : Μέγιστες θετικές και αρνητικές απόλυτες επιταχύνσεις Sylmar_2_1



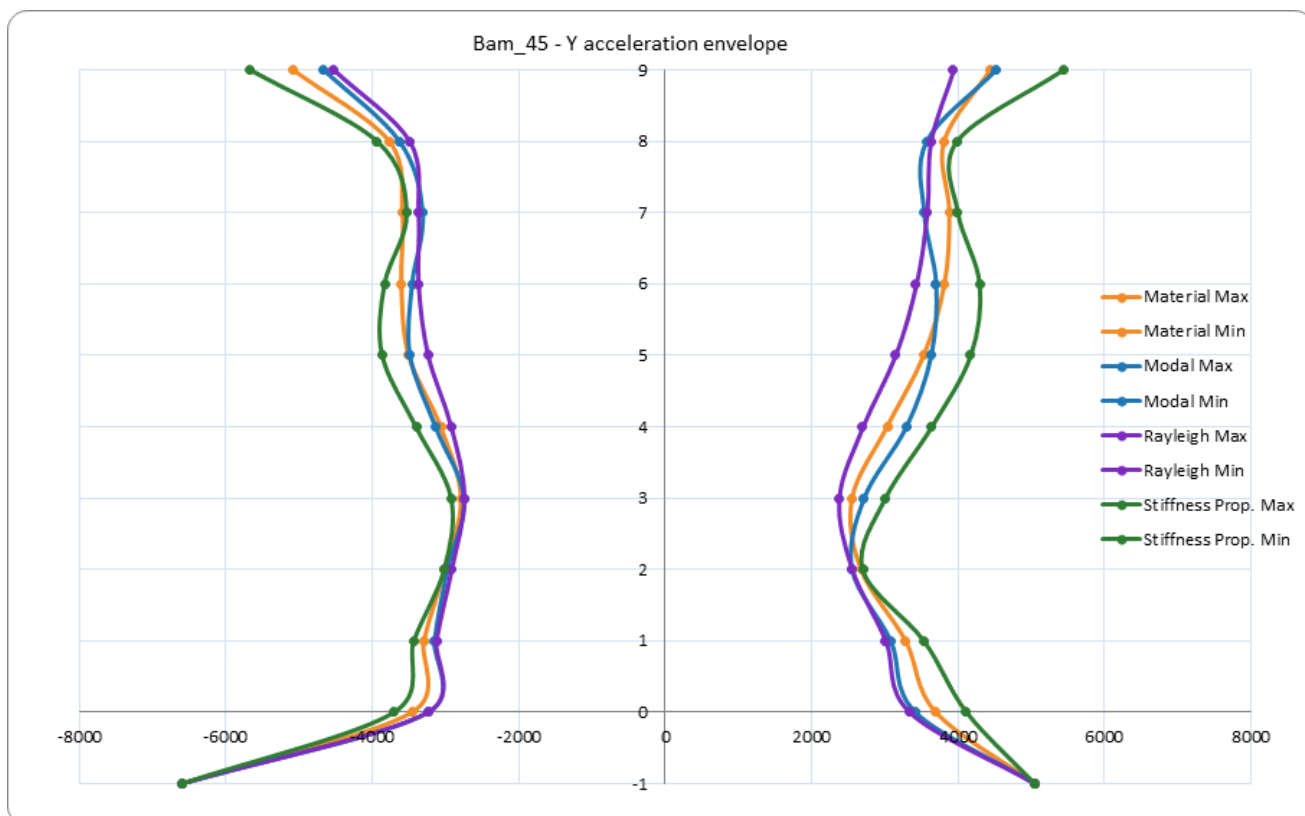
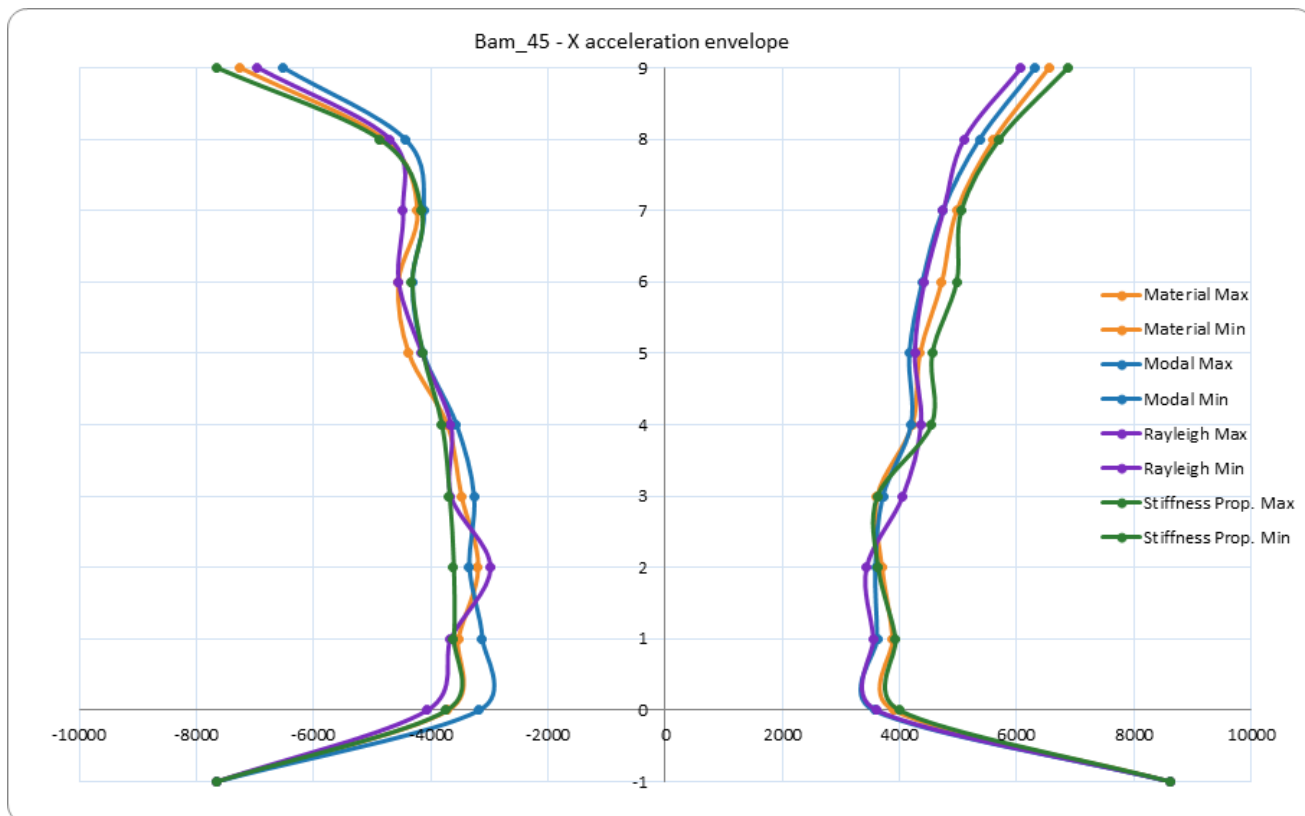
Εικόνα 54 : Μέγιστες θετικές και αρνητικές απόλυτες επιταχύνσεις Sylmar_45



Εικόνα 55 : Μέγιστες θετικές και αρνητικές απόλυτες επιταχύνσεις Bam_1_2



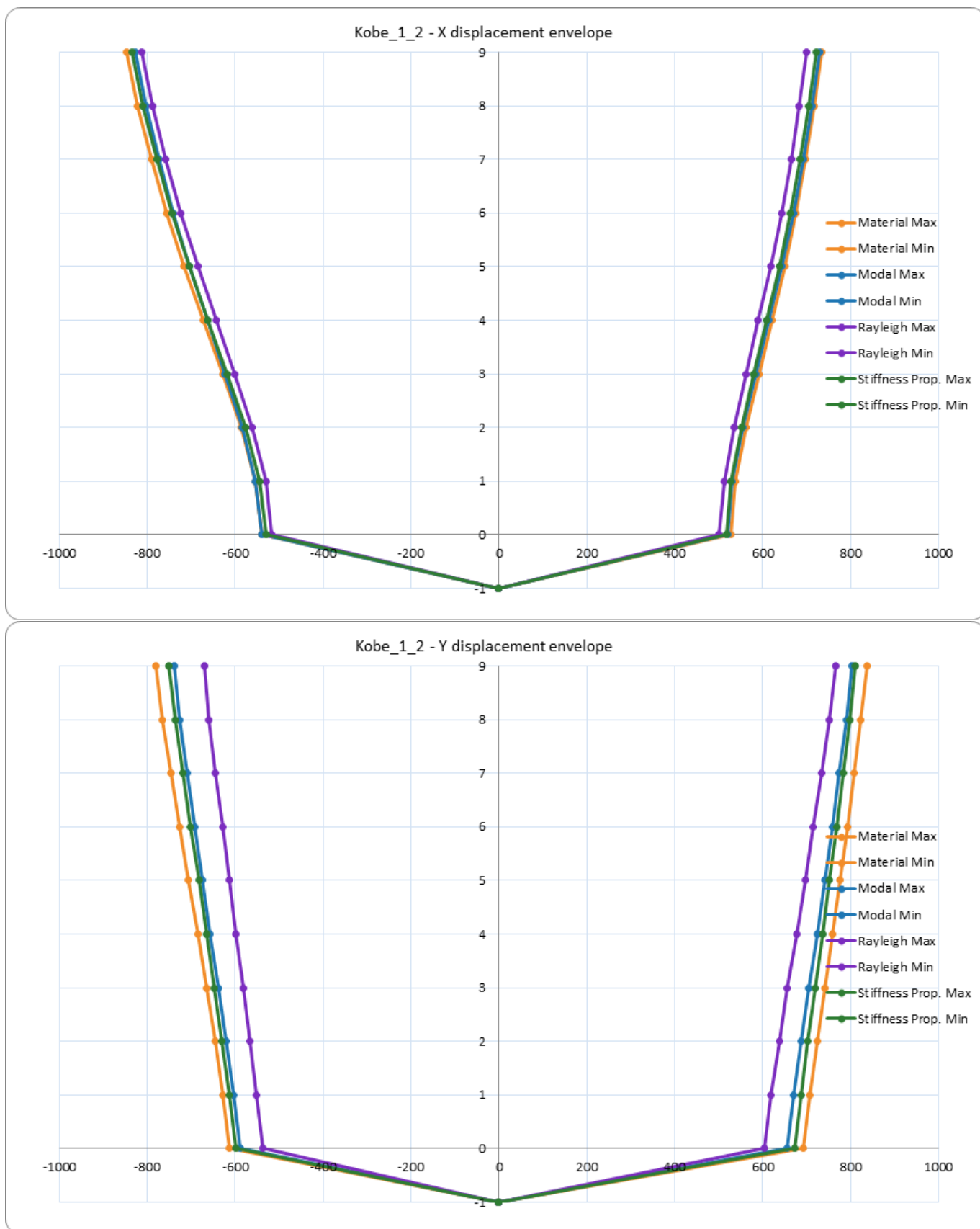
Εικόνα 56 : Μέγιστες θετικές και αρνητικές απόλυτες επιταχύνσεις Bam_2_1



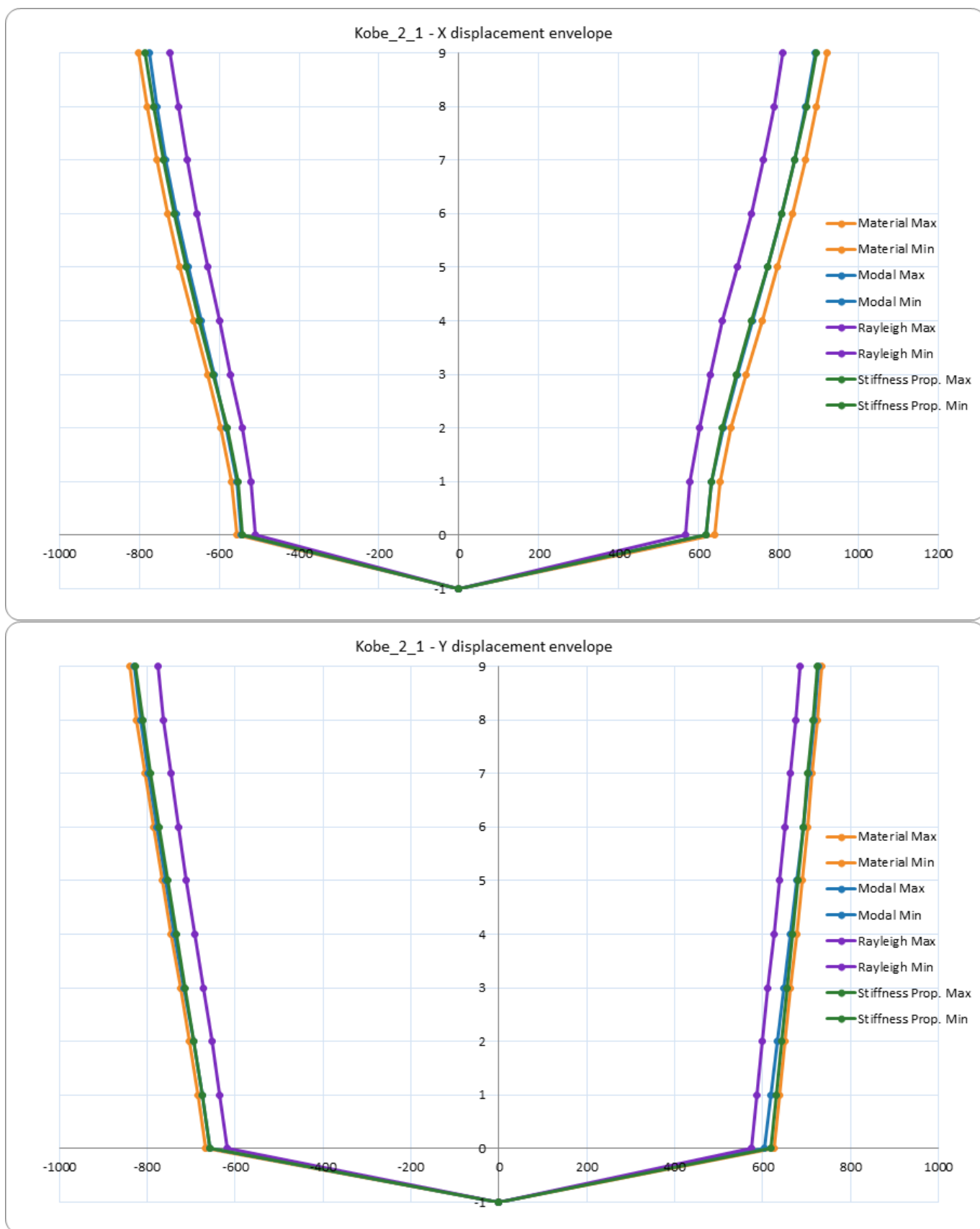
Εικόνα 57 : Μέγιστες θετικές και αρνητικές απόλυτες επιταχύνσεις Bam_45

4.3 Μέγιστες και ελάχιστες μετακινήσεις ορόφων

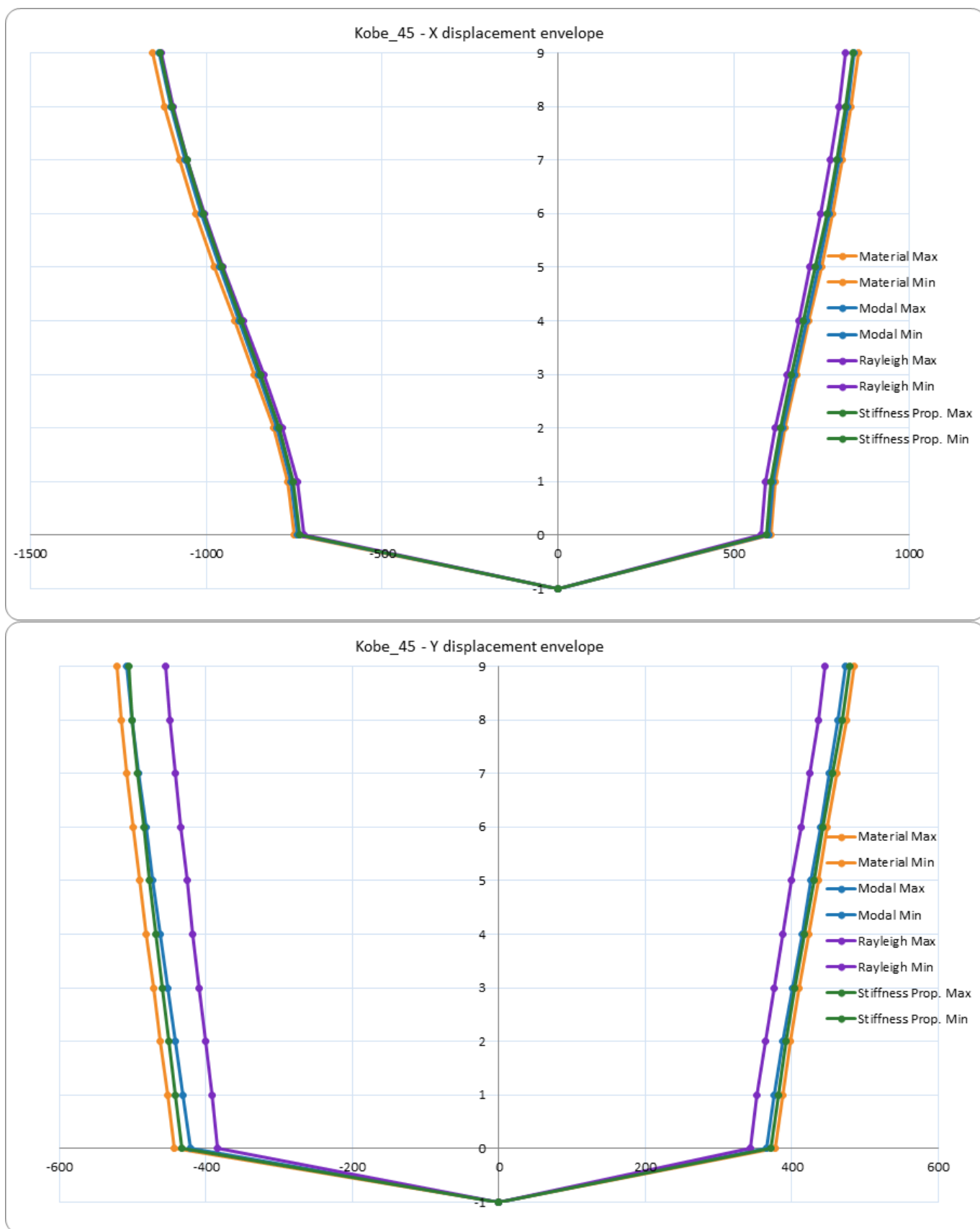
Στις Εικόνες 58-66, Παρουσιάζονται οι μέγιστες και ελάχιστες μετακινήσεις στις κύριες διευθύνσεις για κάθε όροφο της κατασκευής. Οι τιμές στον οριζόντιο άξονα είναι σε mm. Ο όροφος - 1 αποτελεί το επίπεδο έδρασης των συσκευών απομόνωσης.



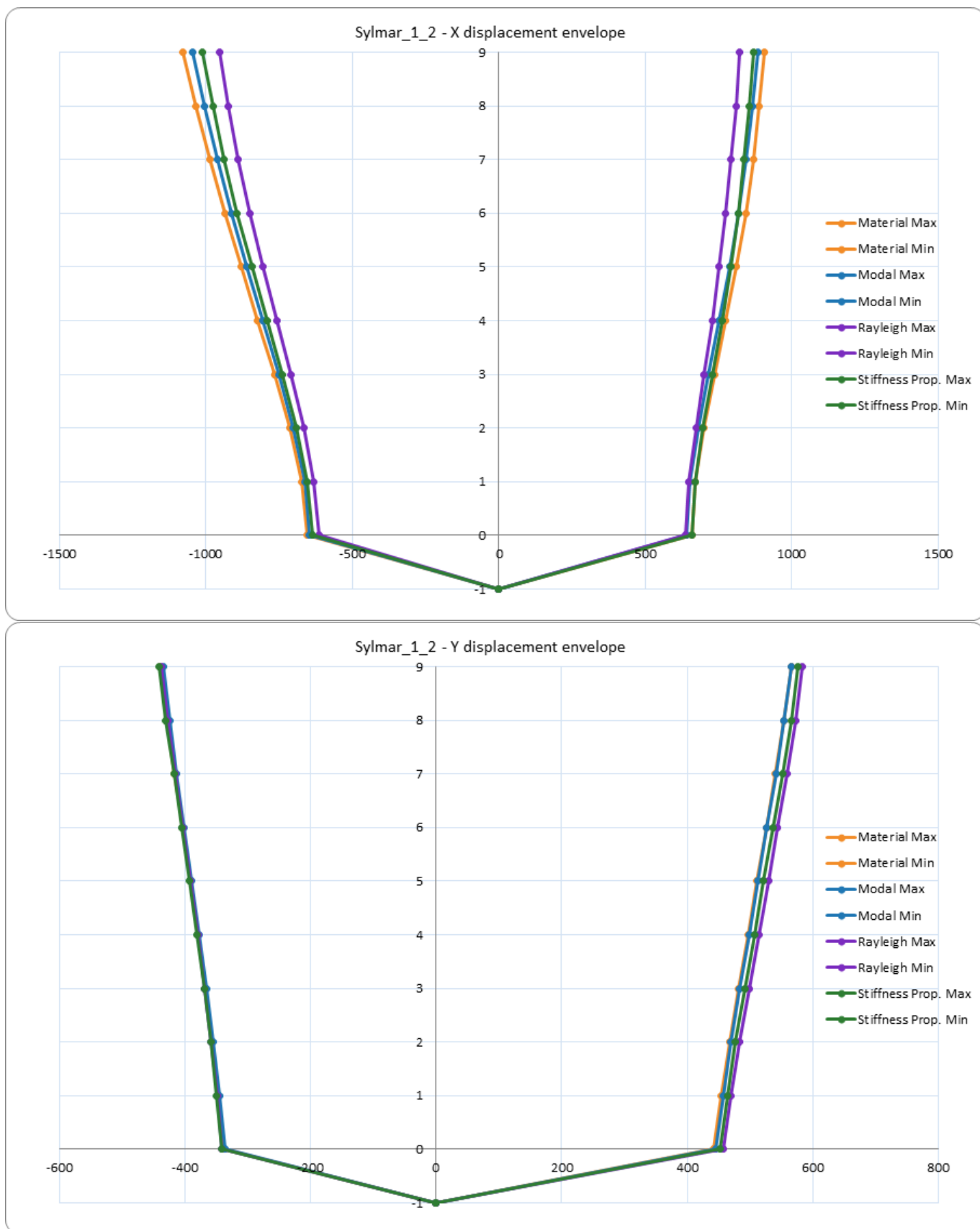
Εικόνα 58 : Μέγιστες θετικές και αρνητικές μετακινήσεις Kobe_1_2



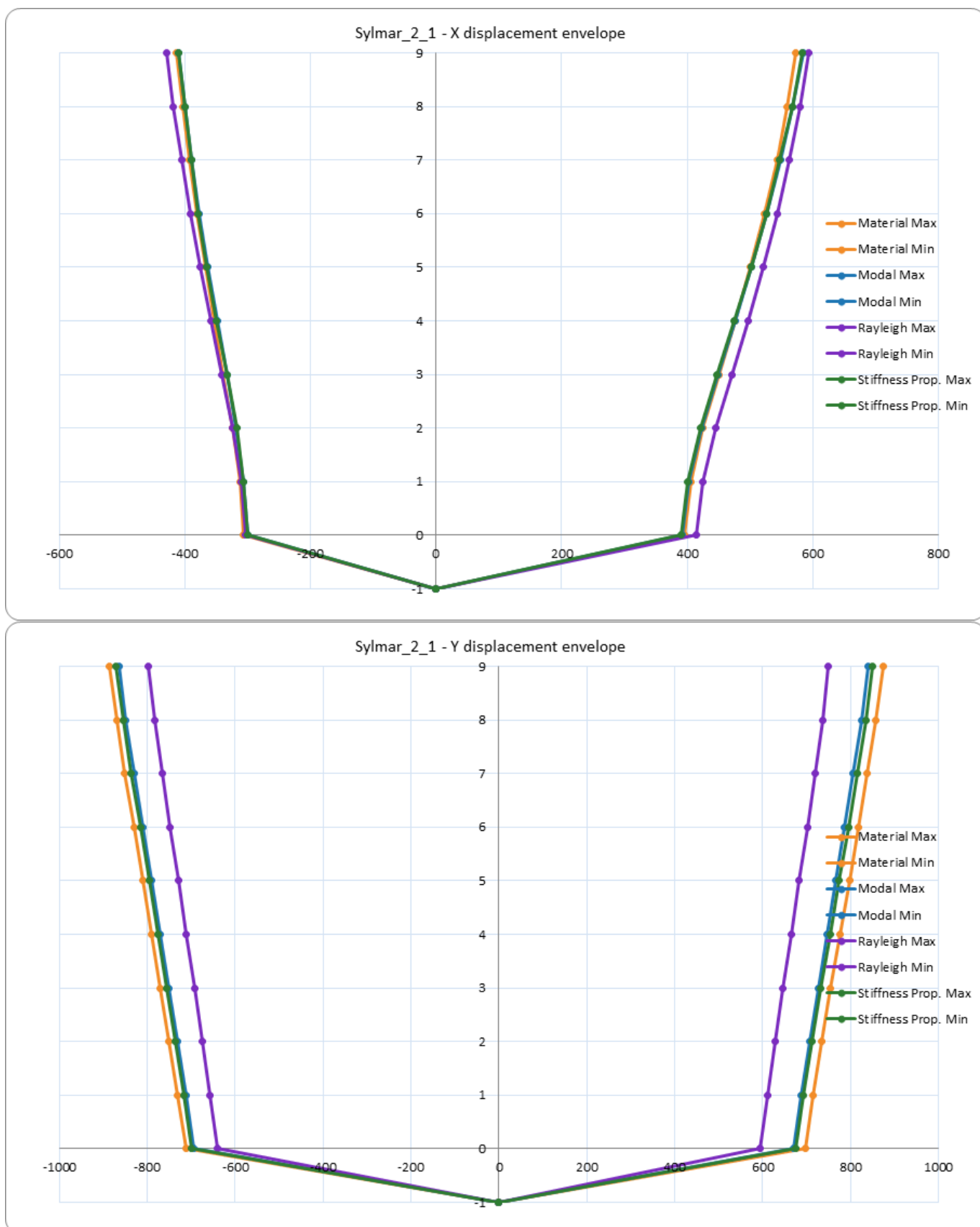
Εικόνα 59 : Μέγιστες θετικές και αρνητικές μετακινήσεις Kobe_2_1



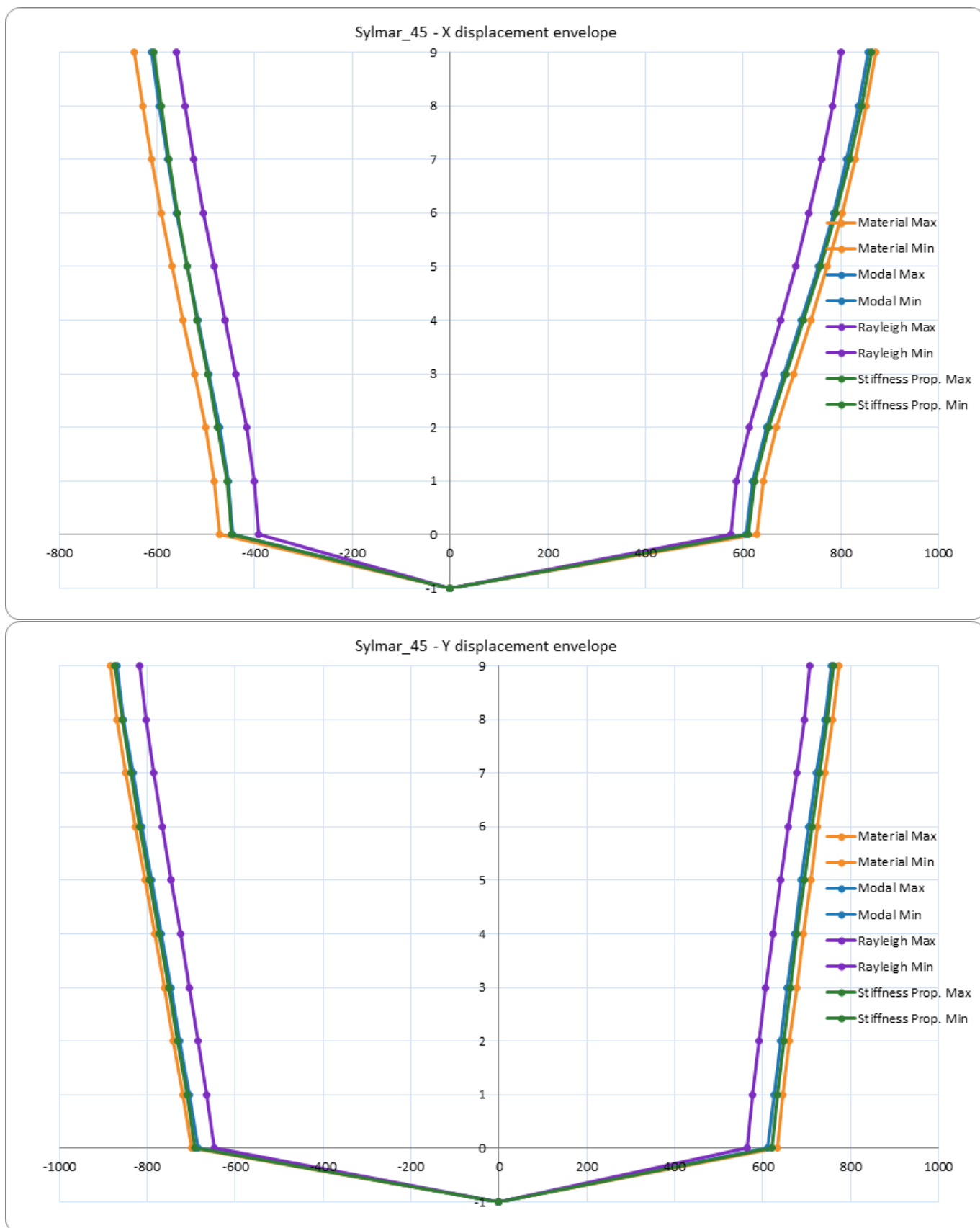
Εικόνα 60 : Μέγιστες θετικές και αρνητικές μετακινήσεις Kobe_45



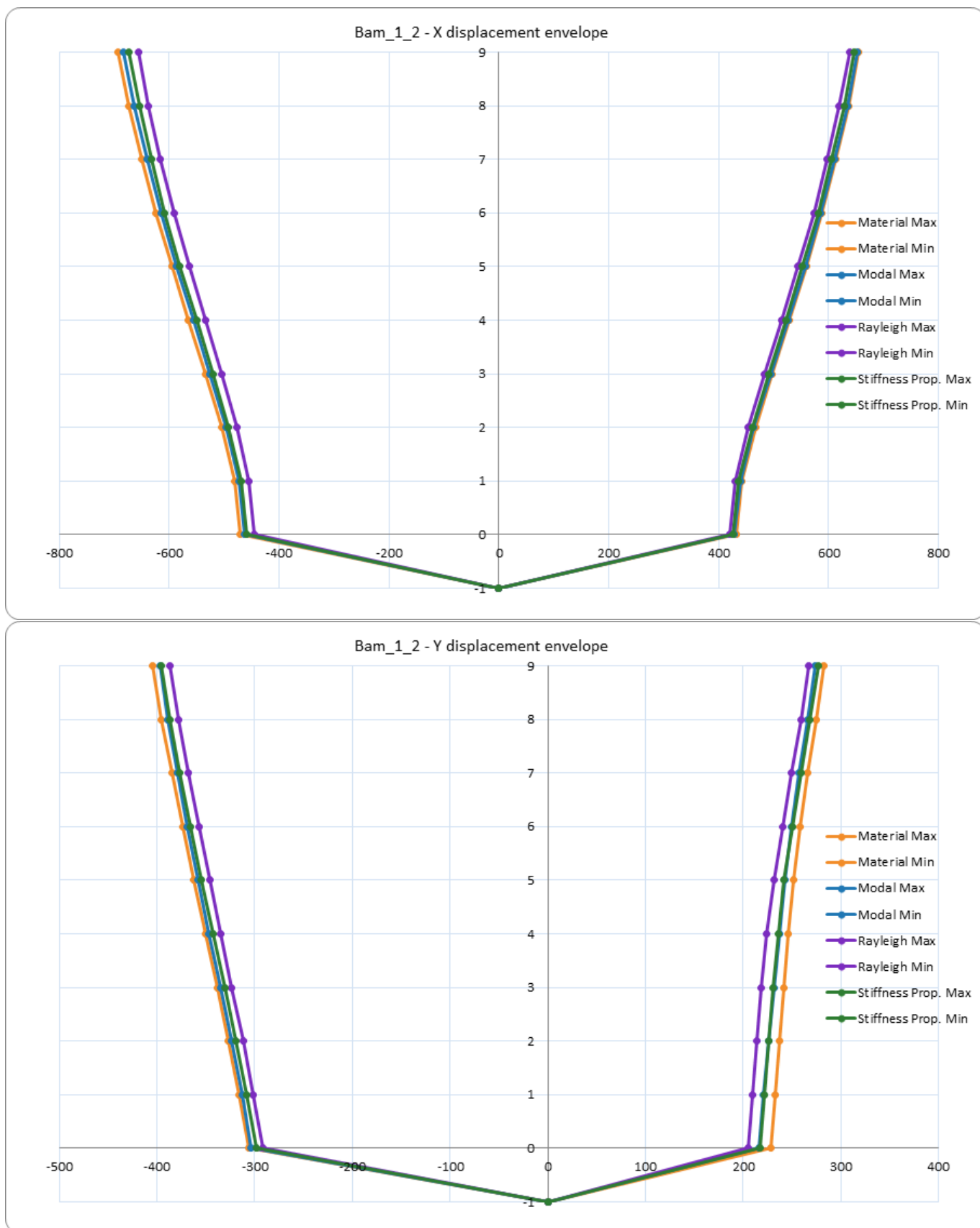
Εικόνα 61 : Μέγιστες θετικές και αρνητικές μετακινήσεις Sylmar_1_2



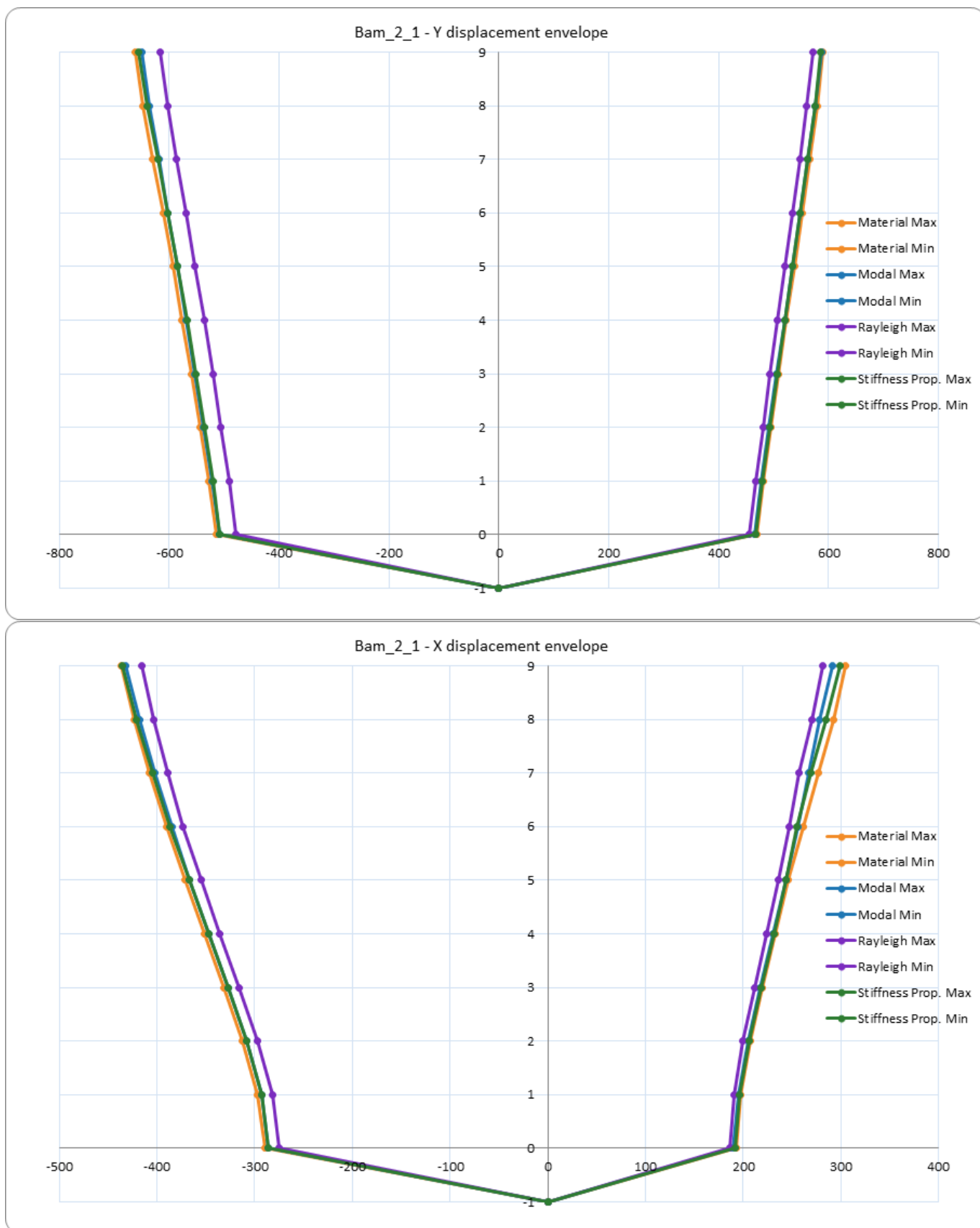
Εικόνα 62 : Μέγιστες θετικές και αρνητικές μετακινήσεις Sylmar_2_1



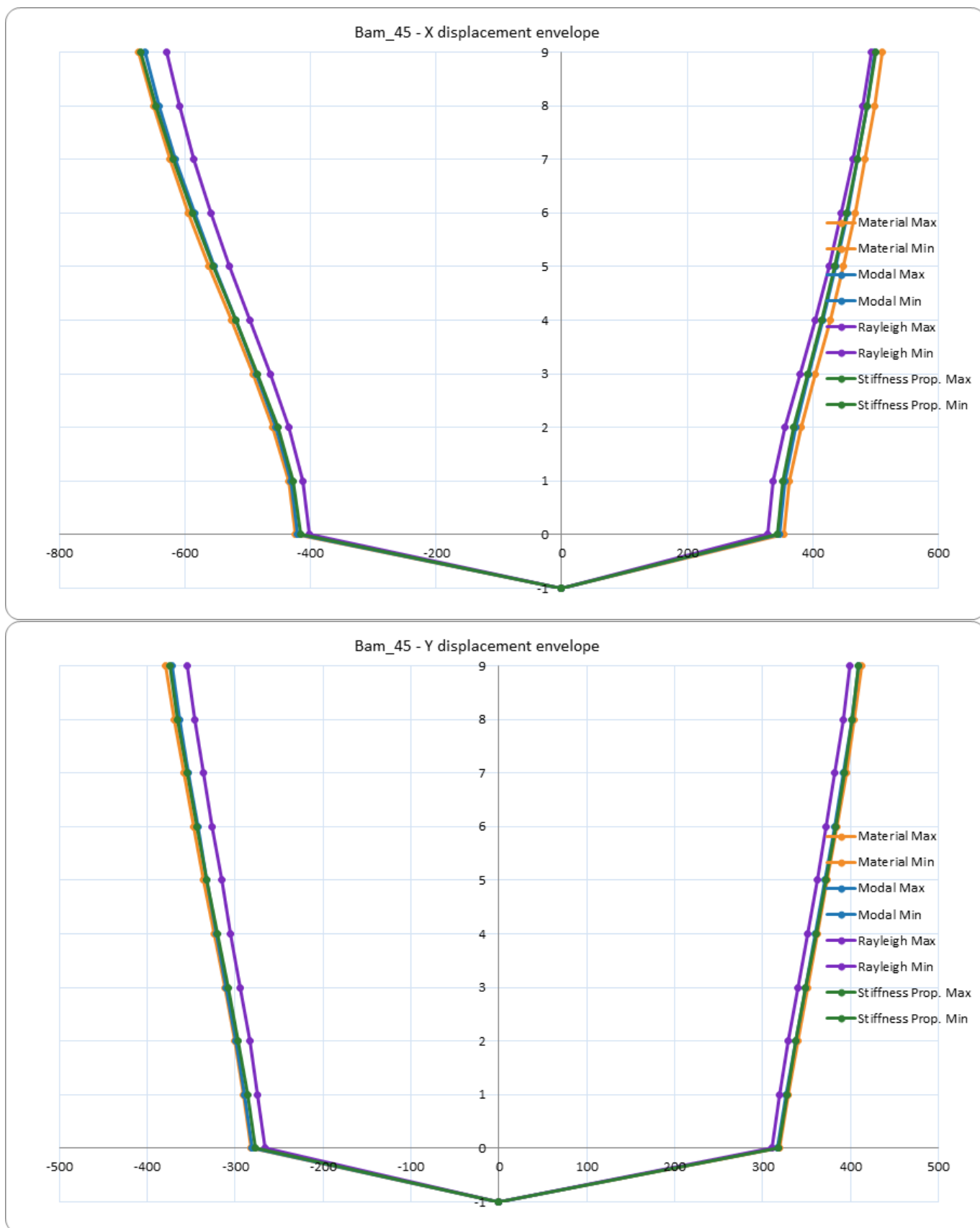
Εικόνα 63 : Μέγιστες θετικές και αρνητικές μετακινήσεις Sylmar_45



Εικόνα 64 : Μέγιστες θετικές και αρνητικές μετακινήσεις Bam_1_2



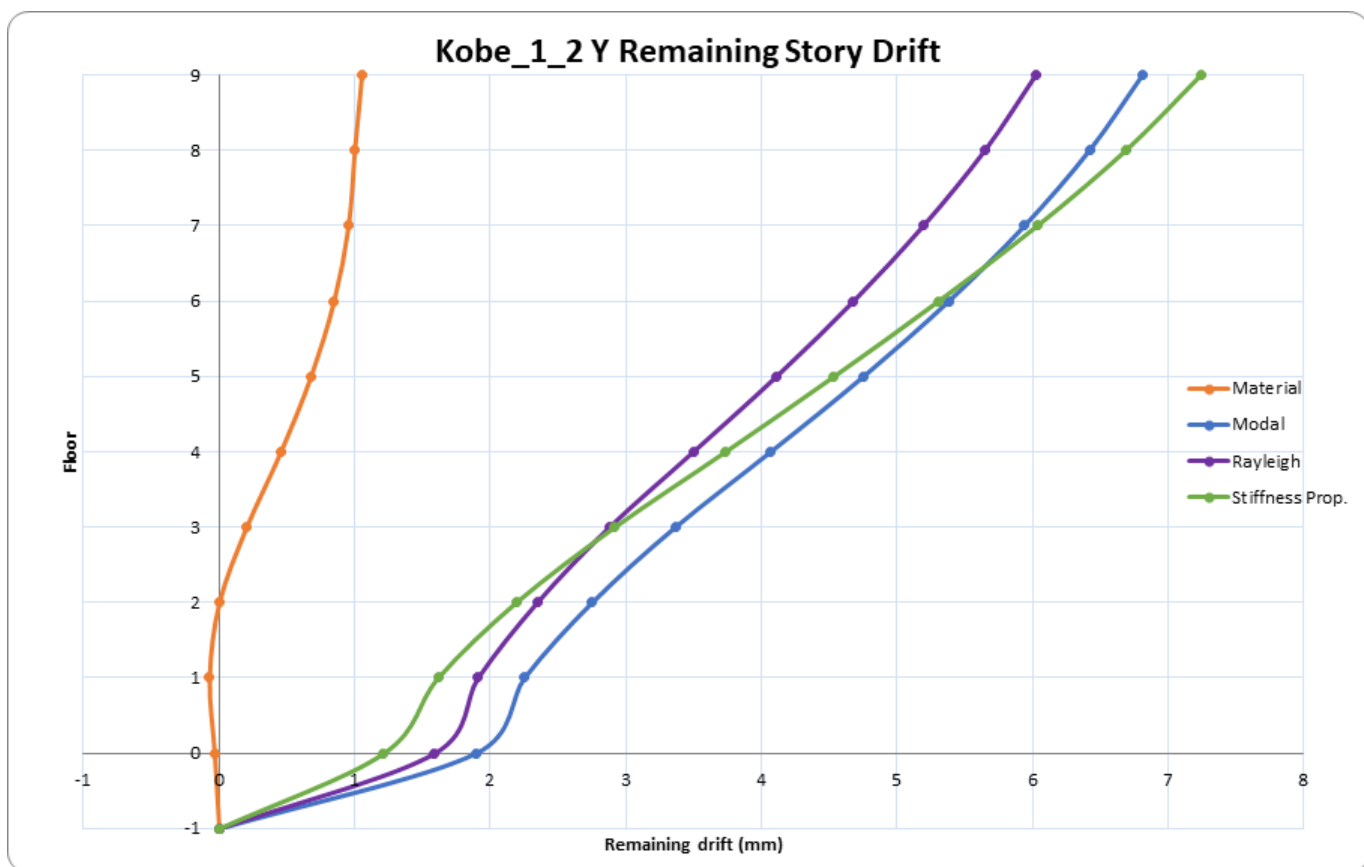
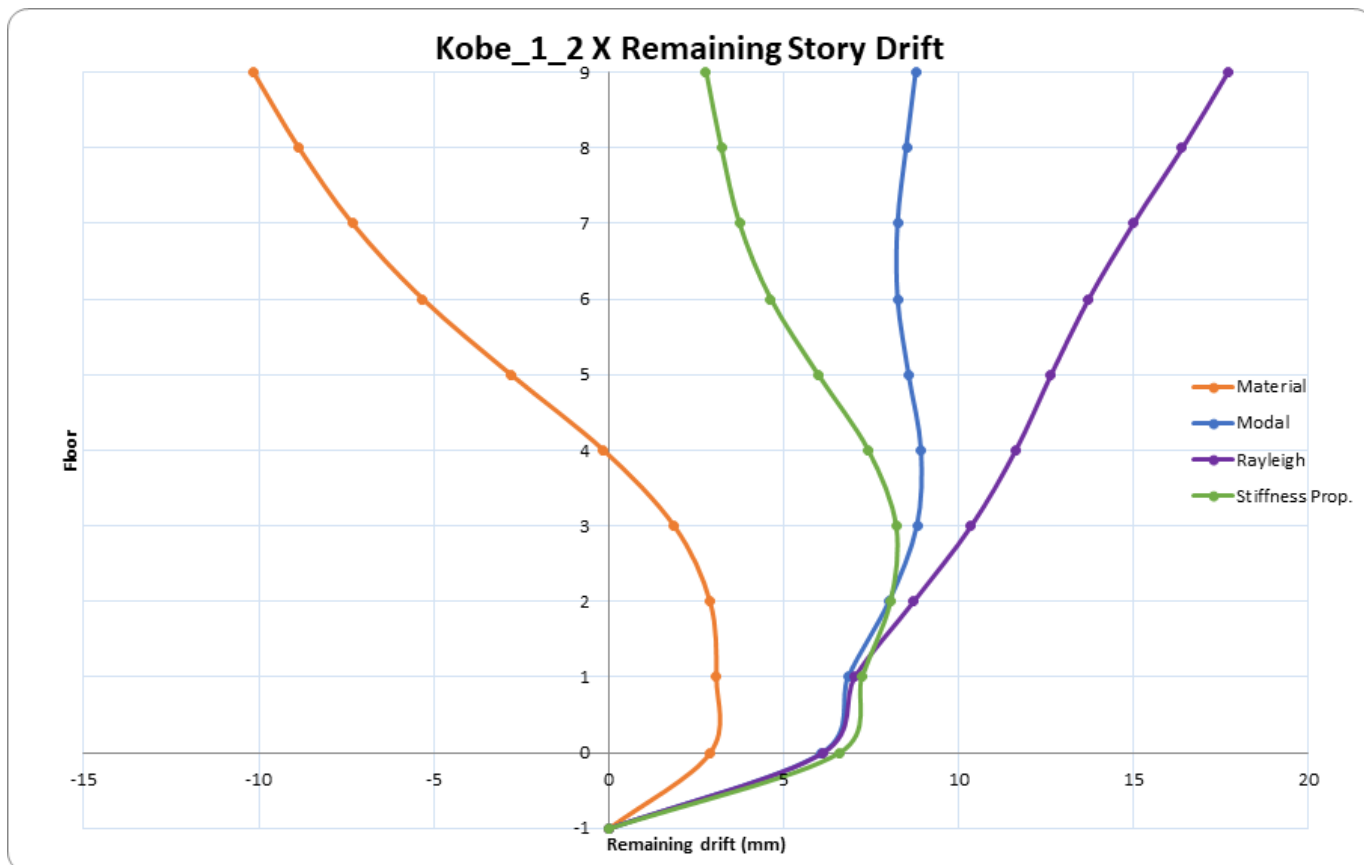
Εικόνα 65 : Μέγιστες θετικές και αρνητικές μετακινήσεις Bam_2_1



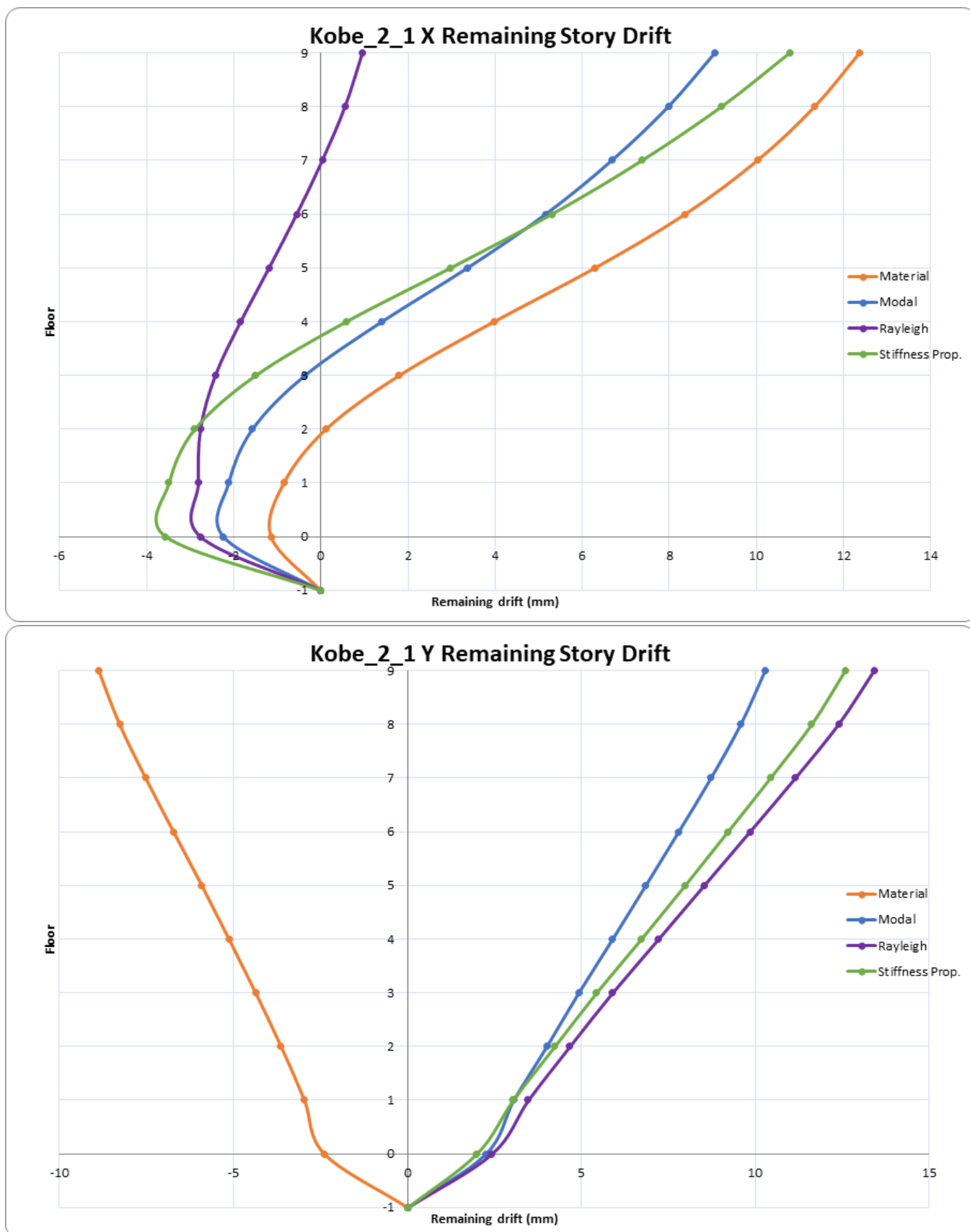
Εικόνα 66 : Μέγιστες θετικές και αρνητικές μετακινήσεις Bam_45

4.4 Παραμένουσες μετακινήσεις ορόφων

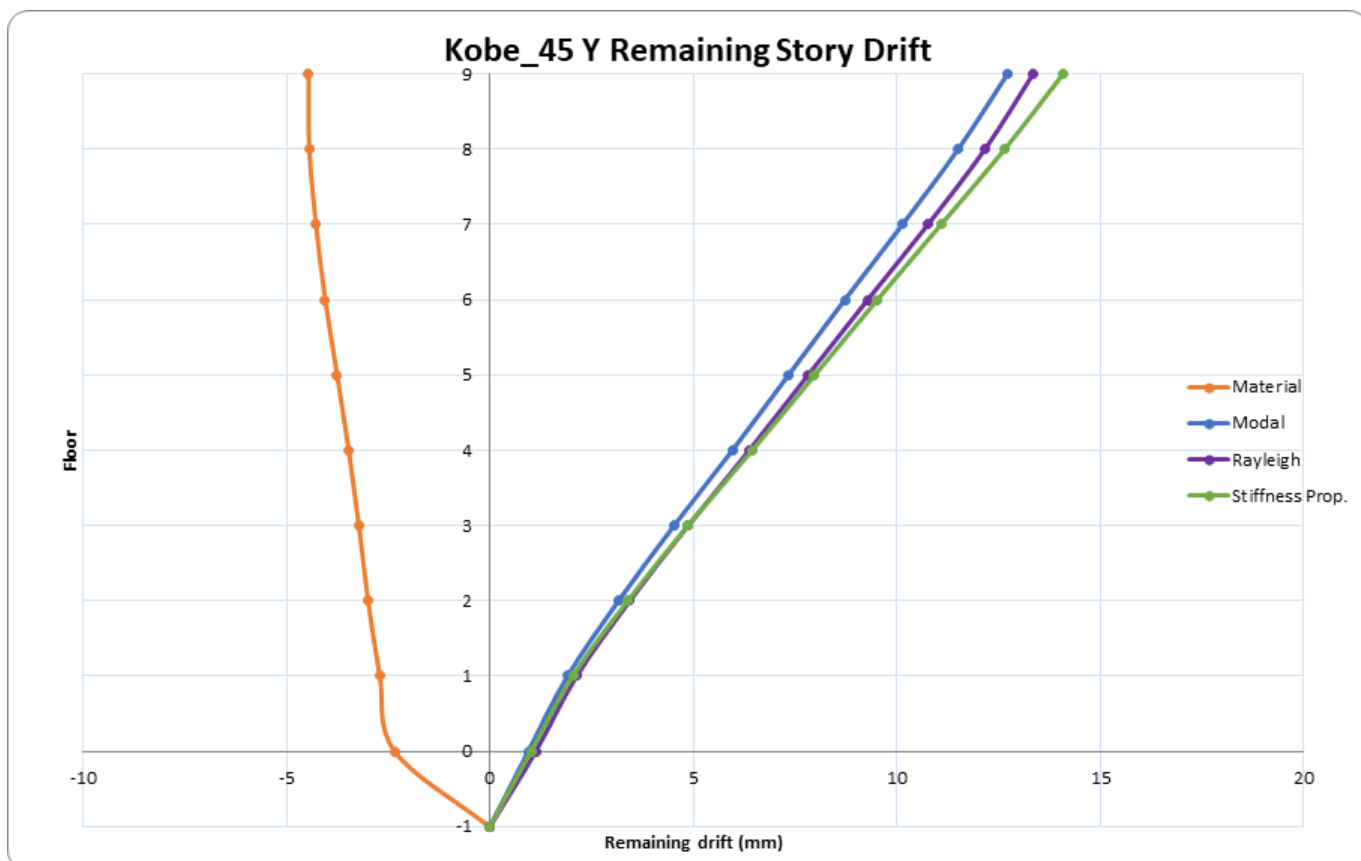
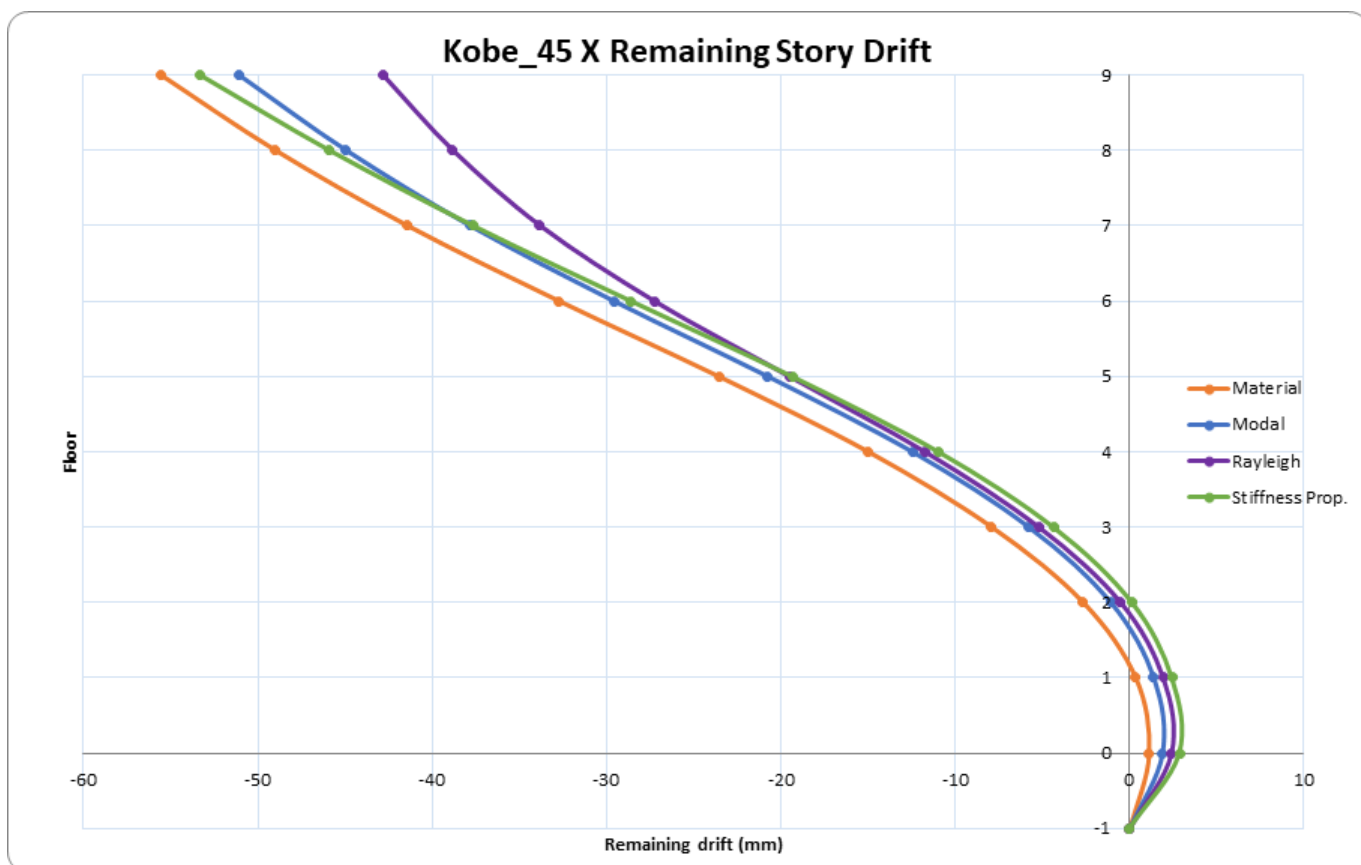
Στις Εικόνες 67-74, παρουσιάζονται οι παραμένουσες μετακινήσεις των ορόφων στο τέλος κάθε σεισμικής κίνησης. Σε όλες τις αναλύσεις αναπτύσσονται πλαστικές αρθρώσεις στην κατασκευή επομένως υπάρχουν μόνιμες μετακινήσεις. Οι διαστάσεις στον οριζόντιο άξονα είναι σε χιλιοστά.



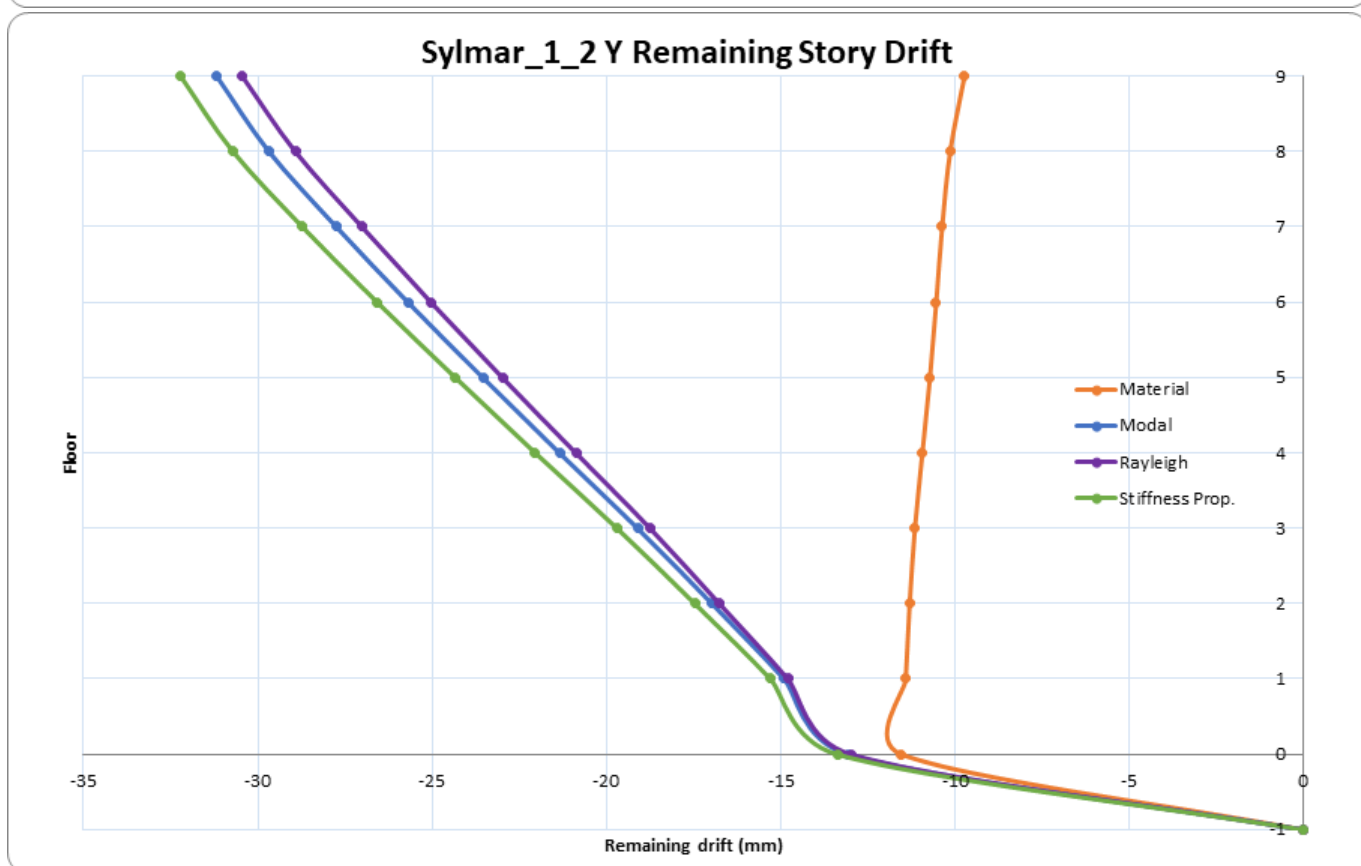
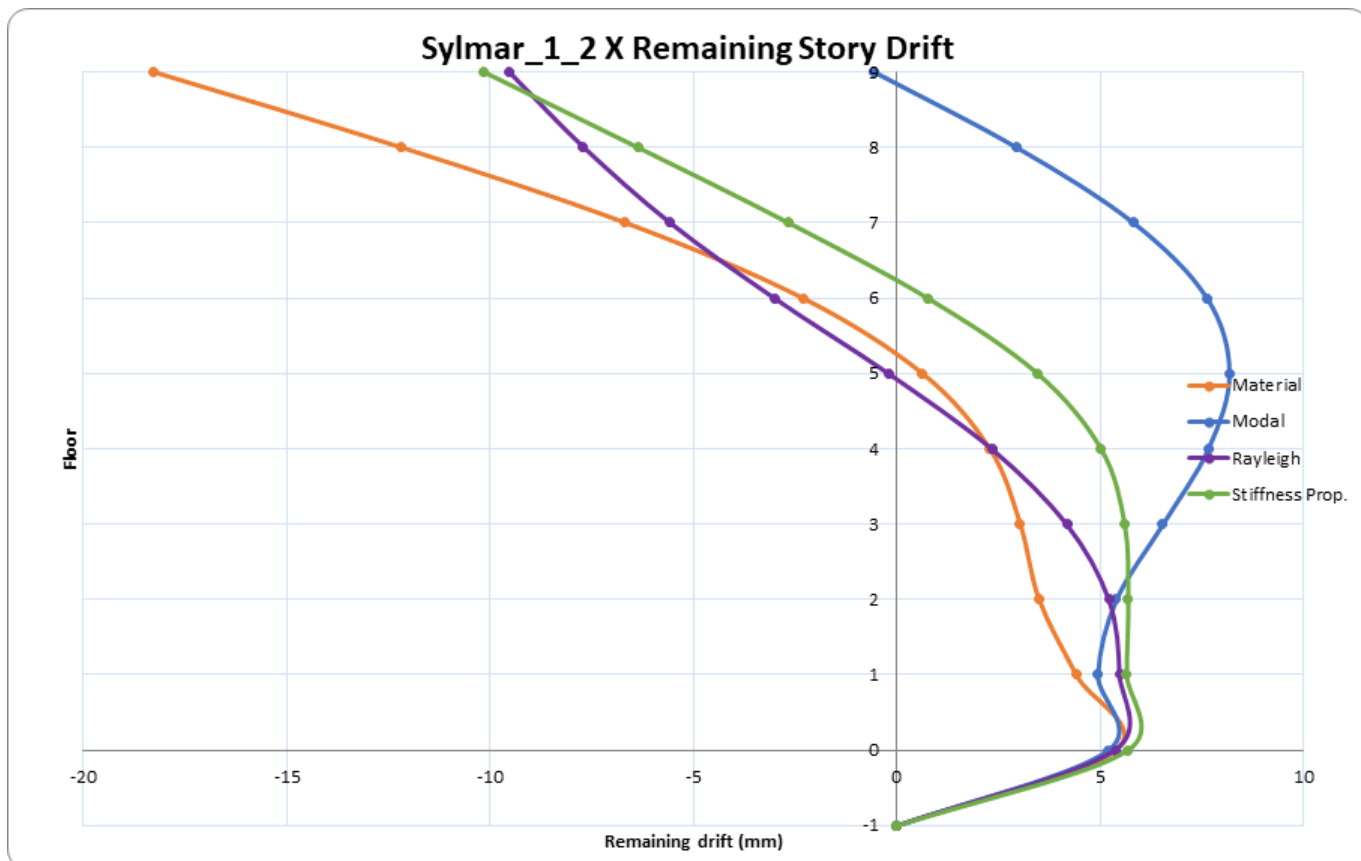
Εικόνα 67 : Παραμένουσες μετακινήσεις Kobe_1_2



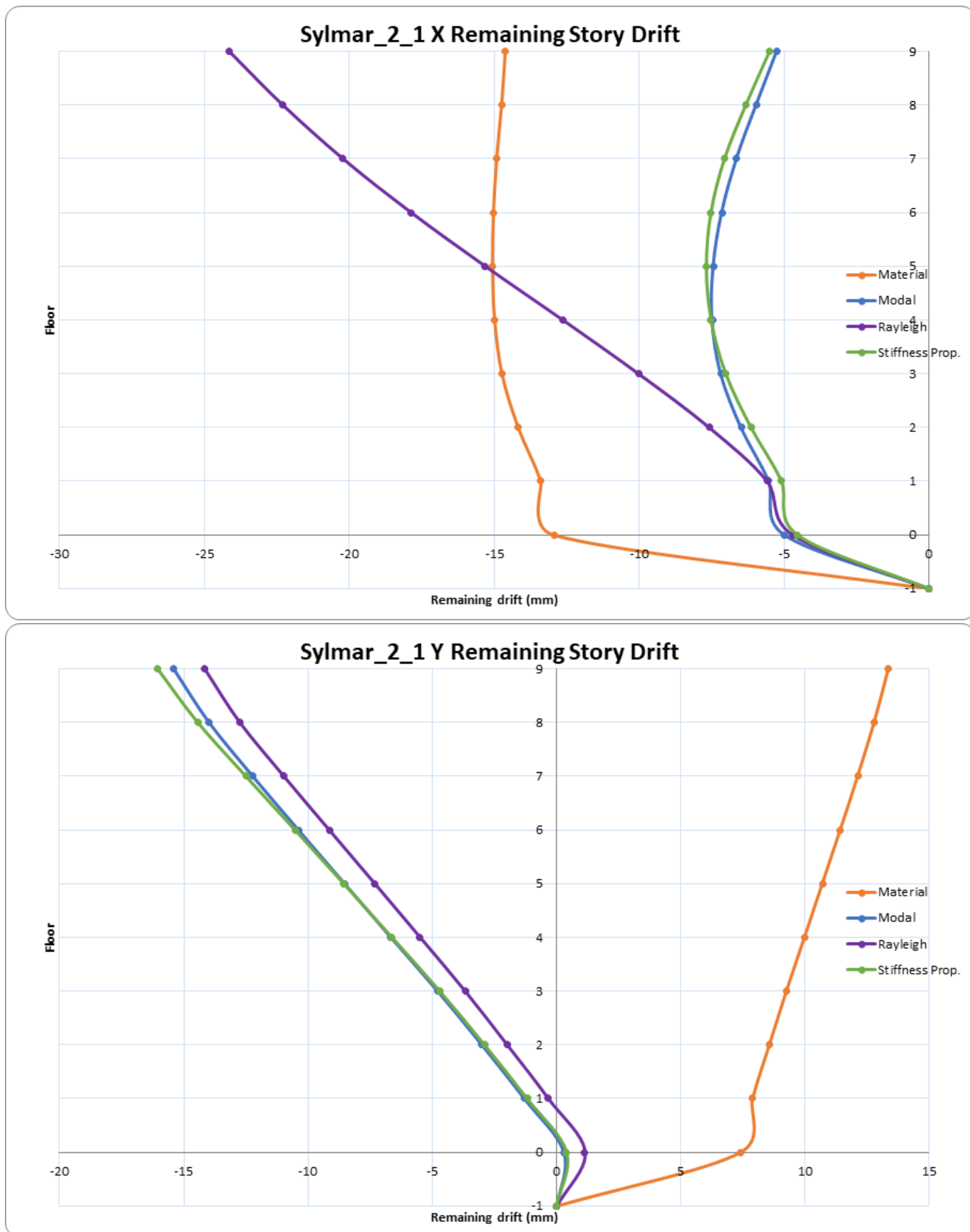
Εικόνα 68 : Παραμένουσες μετακινήσεις Kobe_2_1



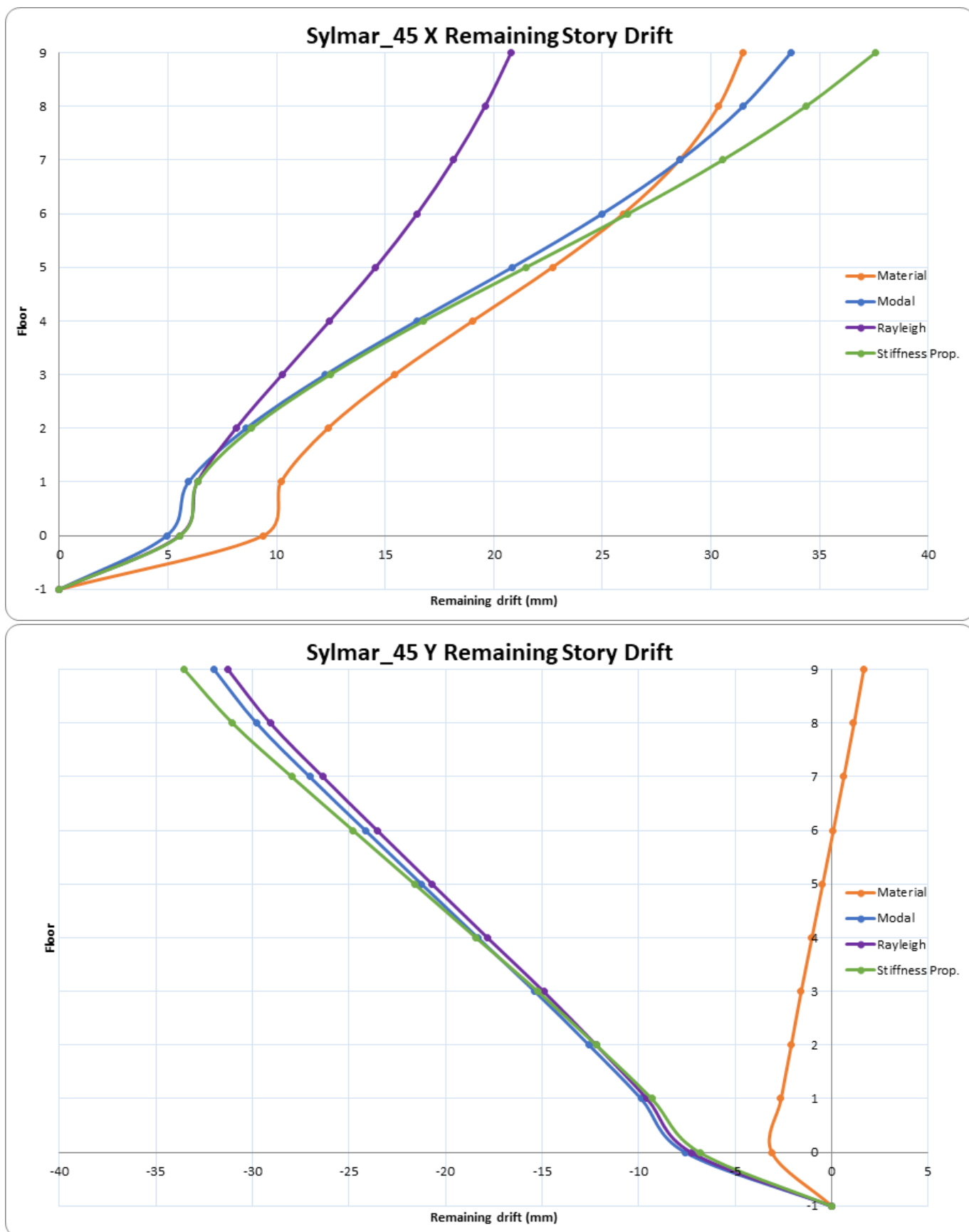
Εικόνα 69 : Παραμένουσες μετακινήσεις Kobe_45



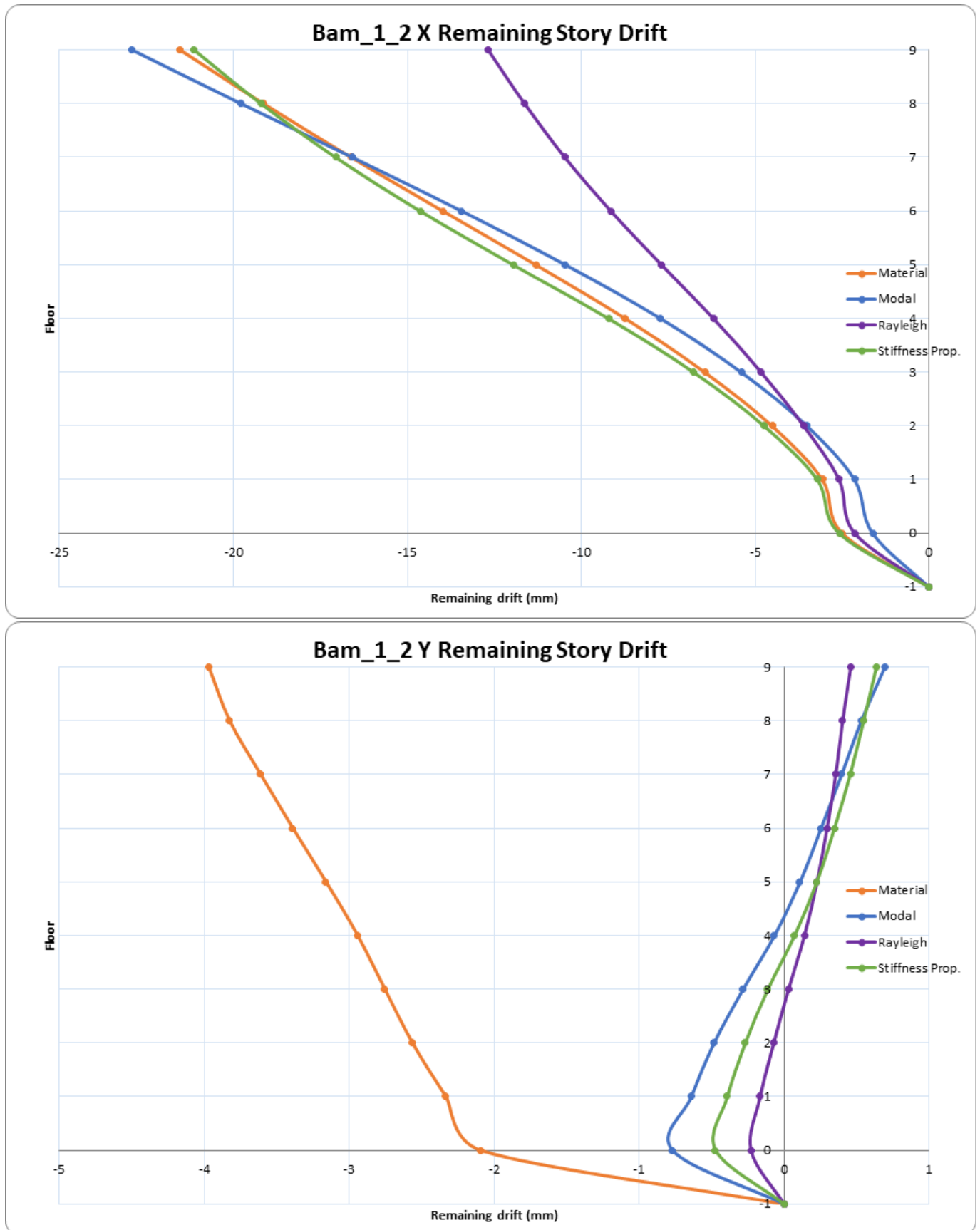
Εικόνα 70 : Παραμένουσες μετακινήσεις Sylmar_1_2



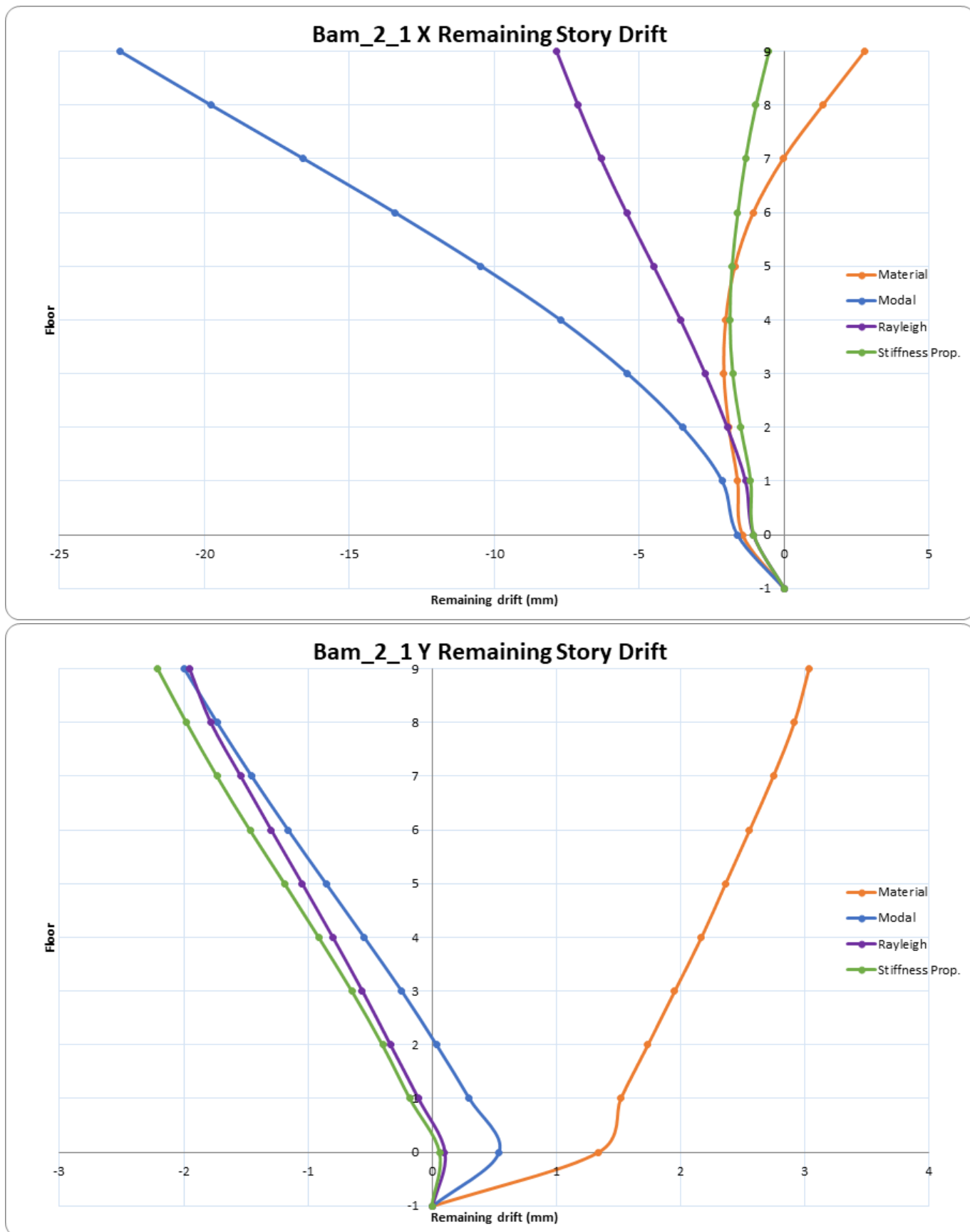
Εικόνα 71 : Παραμένουσες μετακινήσεις Sylmar_2_1



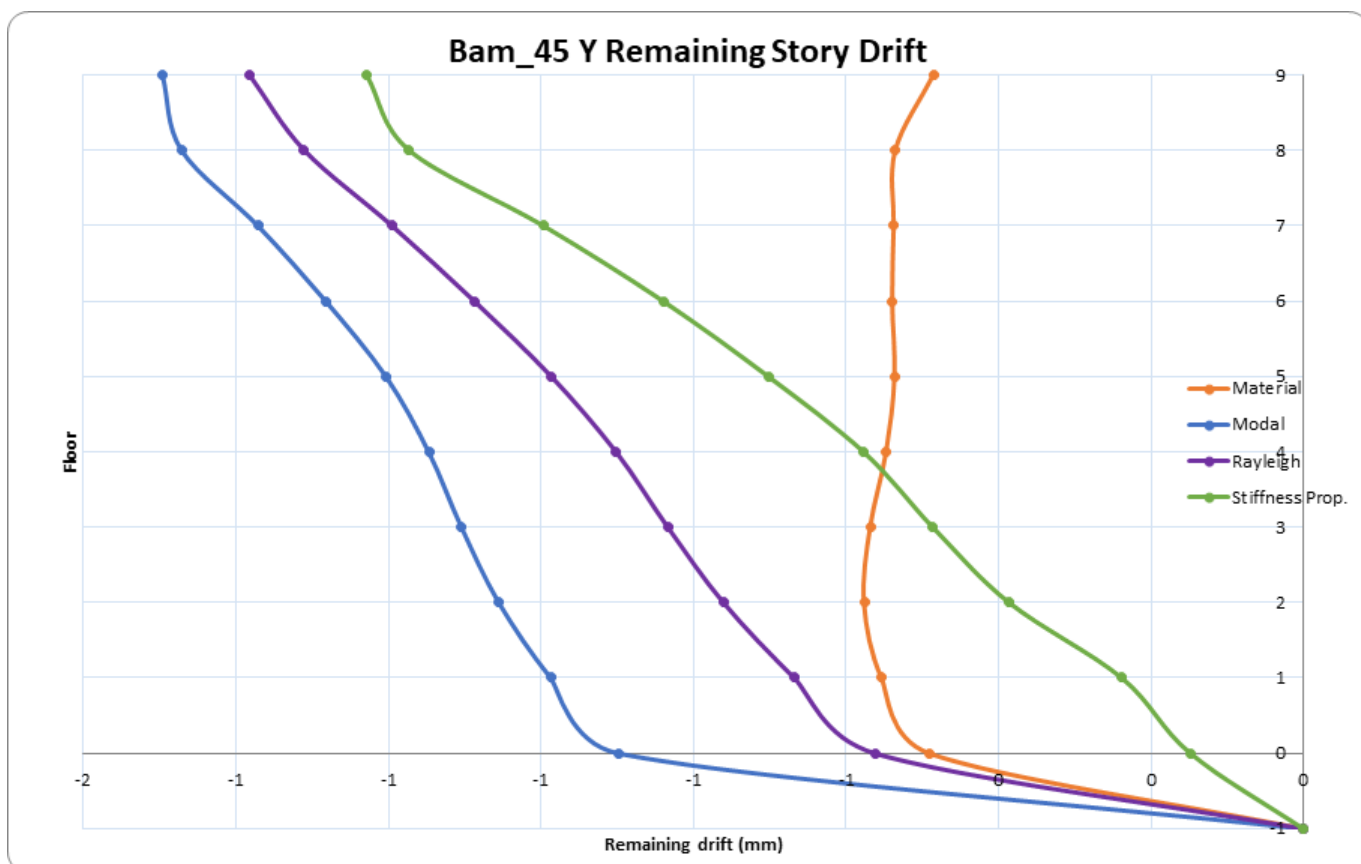
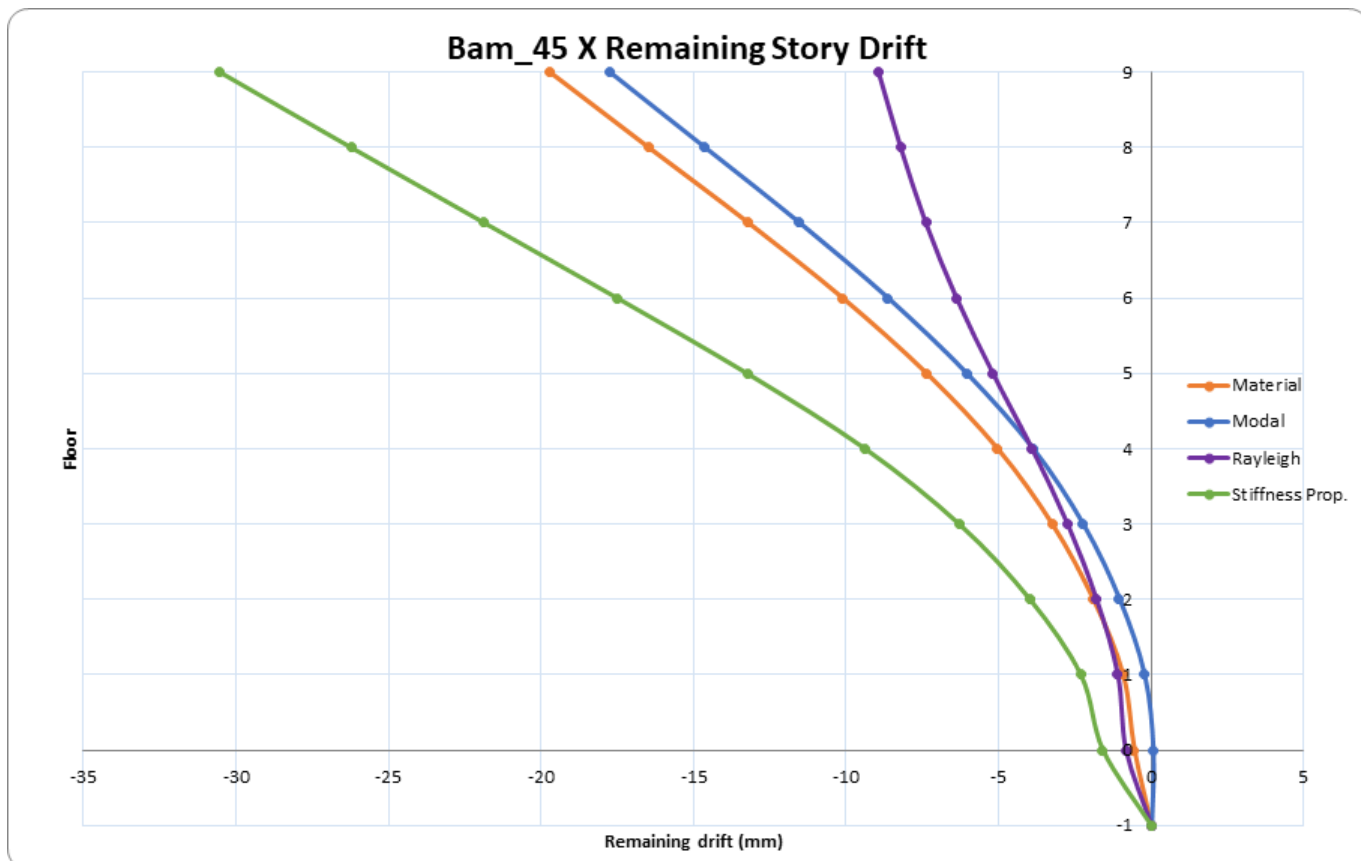
Εικόνα 72 : Παραμένουσες μετακινήσεις Sylmar_45



Εικόνα 73 : Παραμένουσες μετακινήσεις Bam_1_2



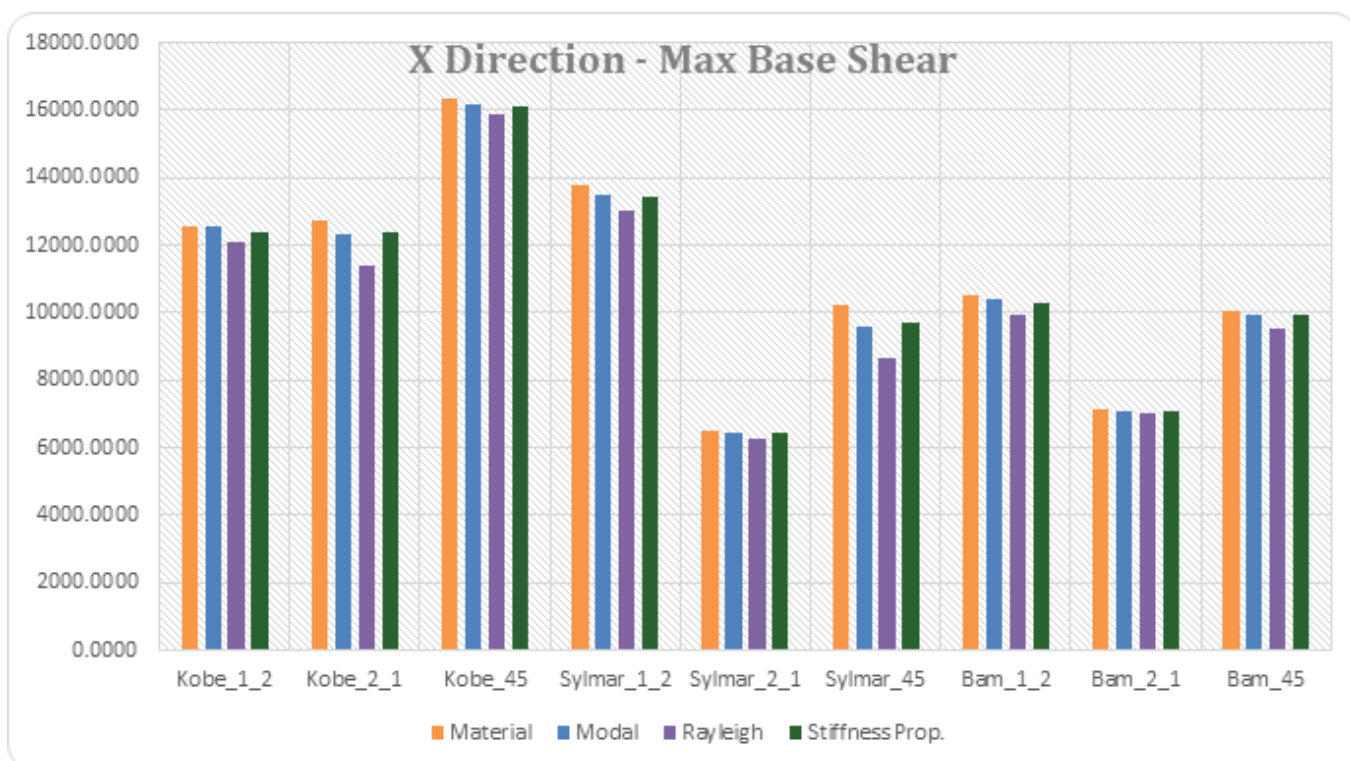
Εικόνα 74 : Παραμένουσες μετακινήσεις Bam_2_1



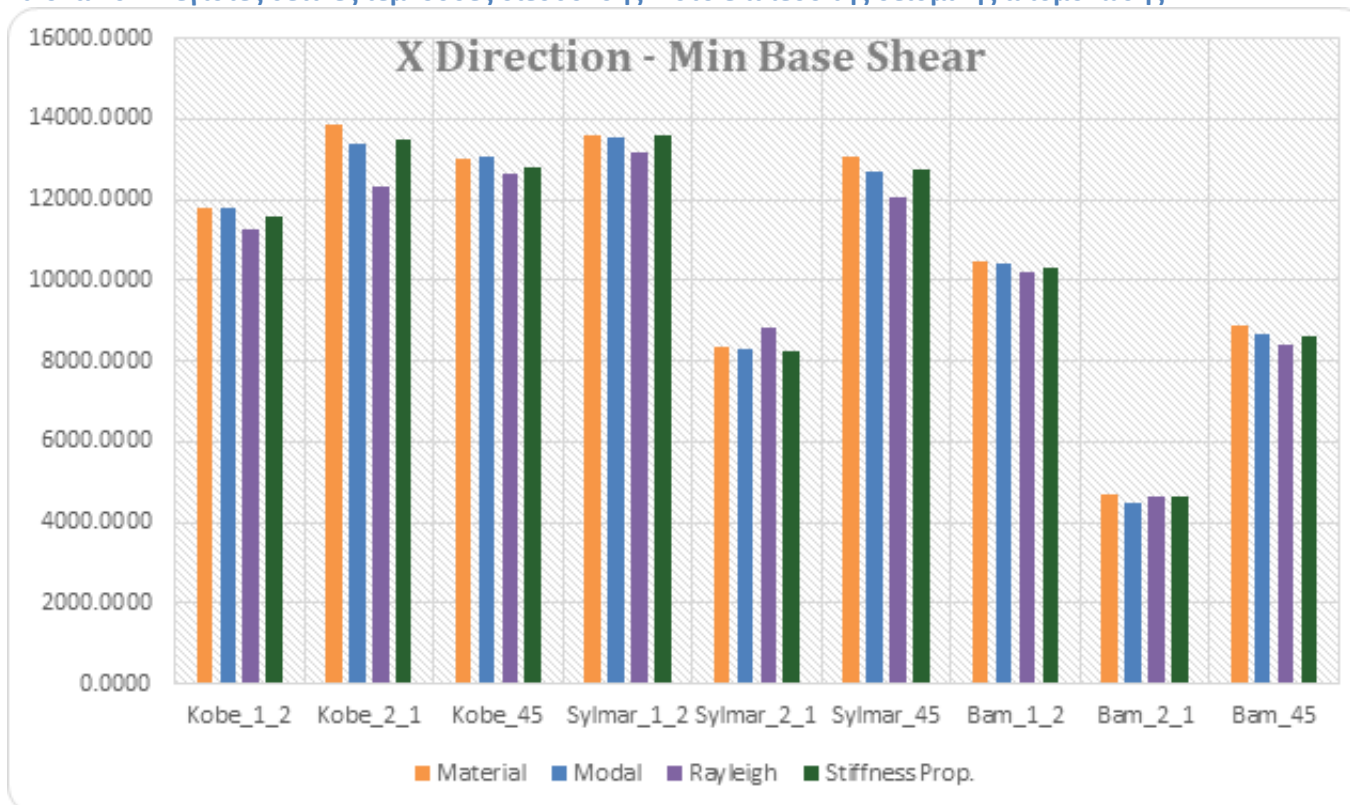
Εικόνα 75 : Παραμένουσες μετακινήσεις Bam_45

4.5 Τέμνουσες επιπέδου έδρασης συσκευών απομόνωσης

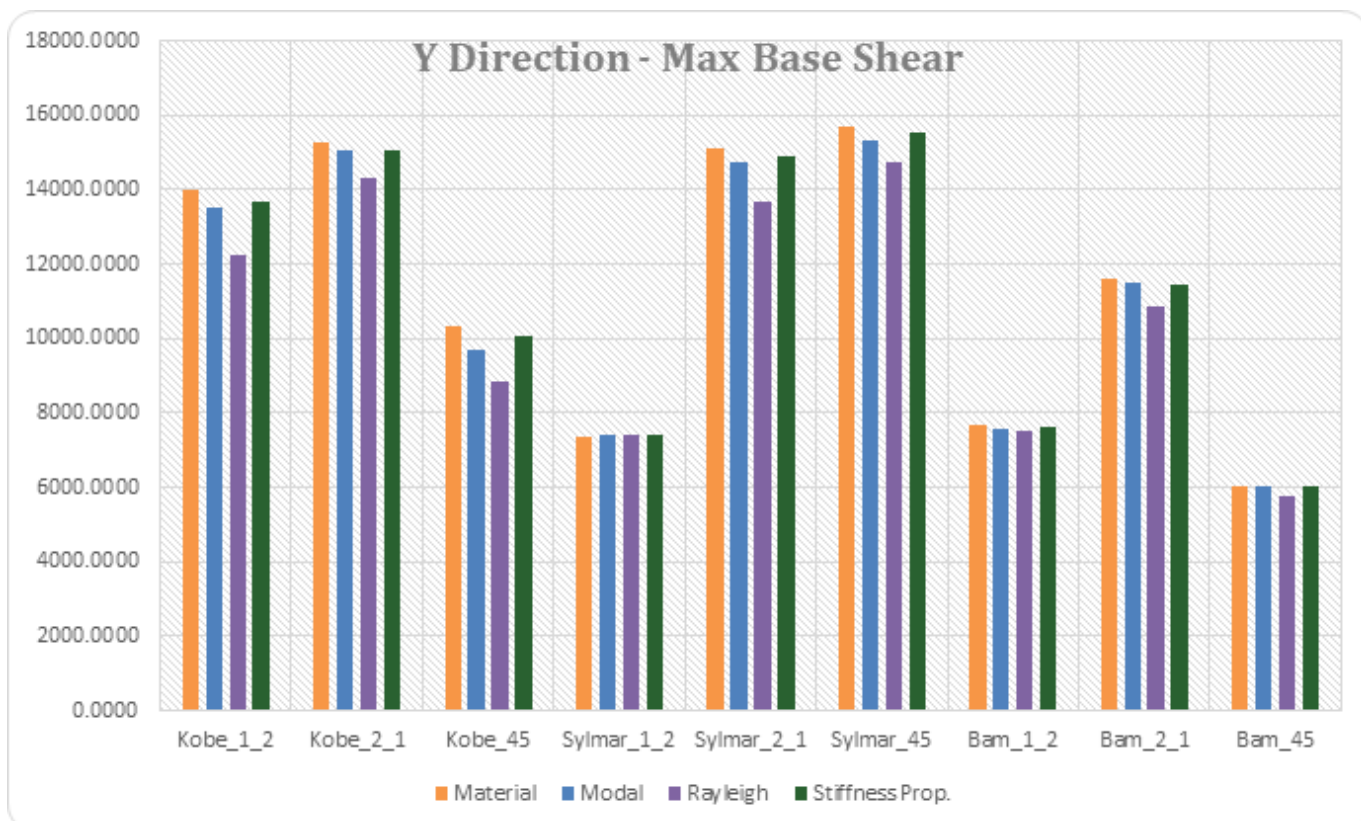
Στις Εικόνες 76-79, παρουσιάζονται οι μέγιστες τέμνουσες στο επίπεδο έδρασης των κατασκευών απομόνωσης για κάθε κύρια διεύθυνση. Οι τιμές στον κατακόρυφο άξονα είναι σε kN.



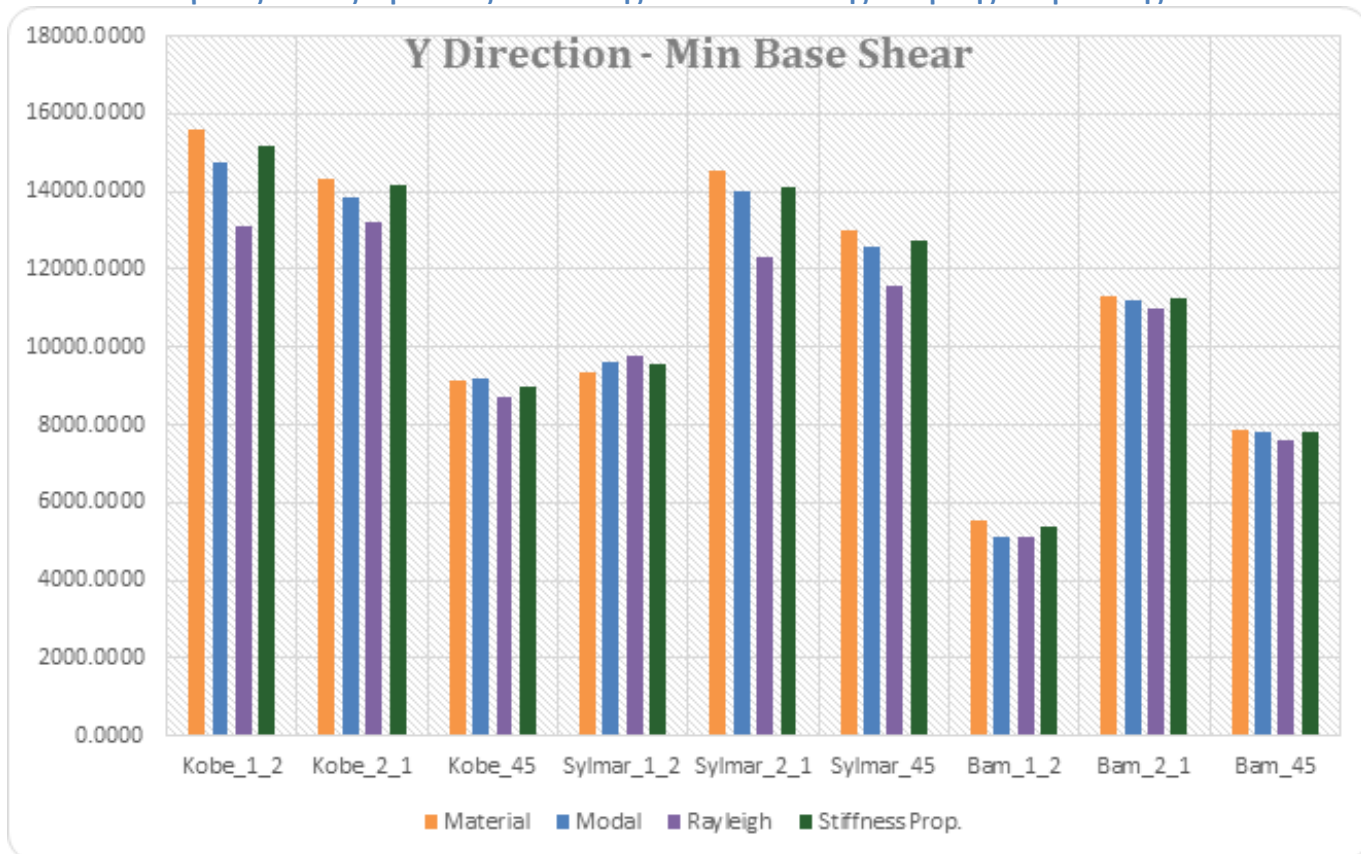
Εικόνα 76 : Μέγιστες θετικές τέμνουσες διεύθυνσης X στο επίπεδο της σεισμικής απομόνωσης



Εικόνα 77 : Μέγιστες αρνητικές τέμνουσες διεύθυνσης X στο επίπεδο της σεισμικής απομόνωσης



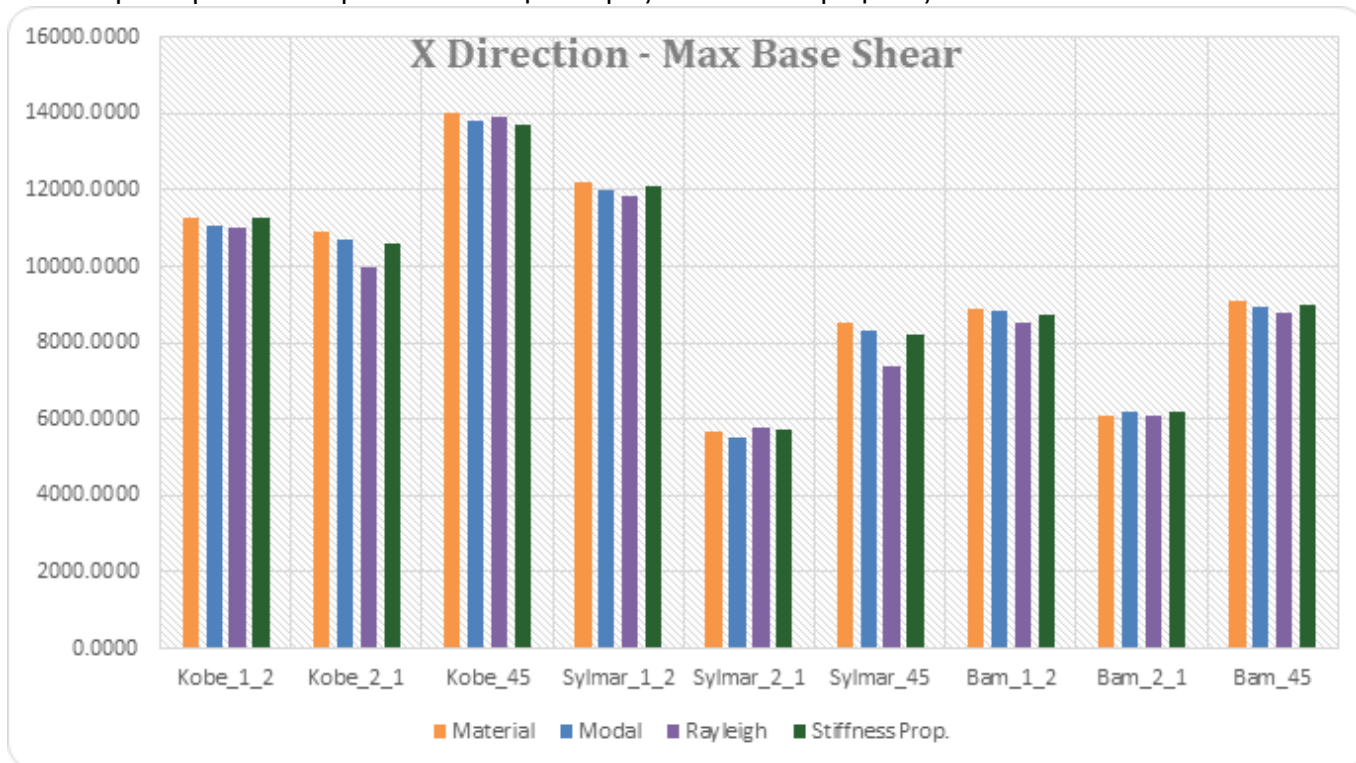
Εικόνα 78 : Μέγιστες θετικές τέμνουσες διεύθυνσης Y στο επίπεδο της σεισμικής απομόνωσης



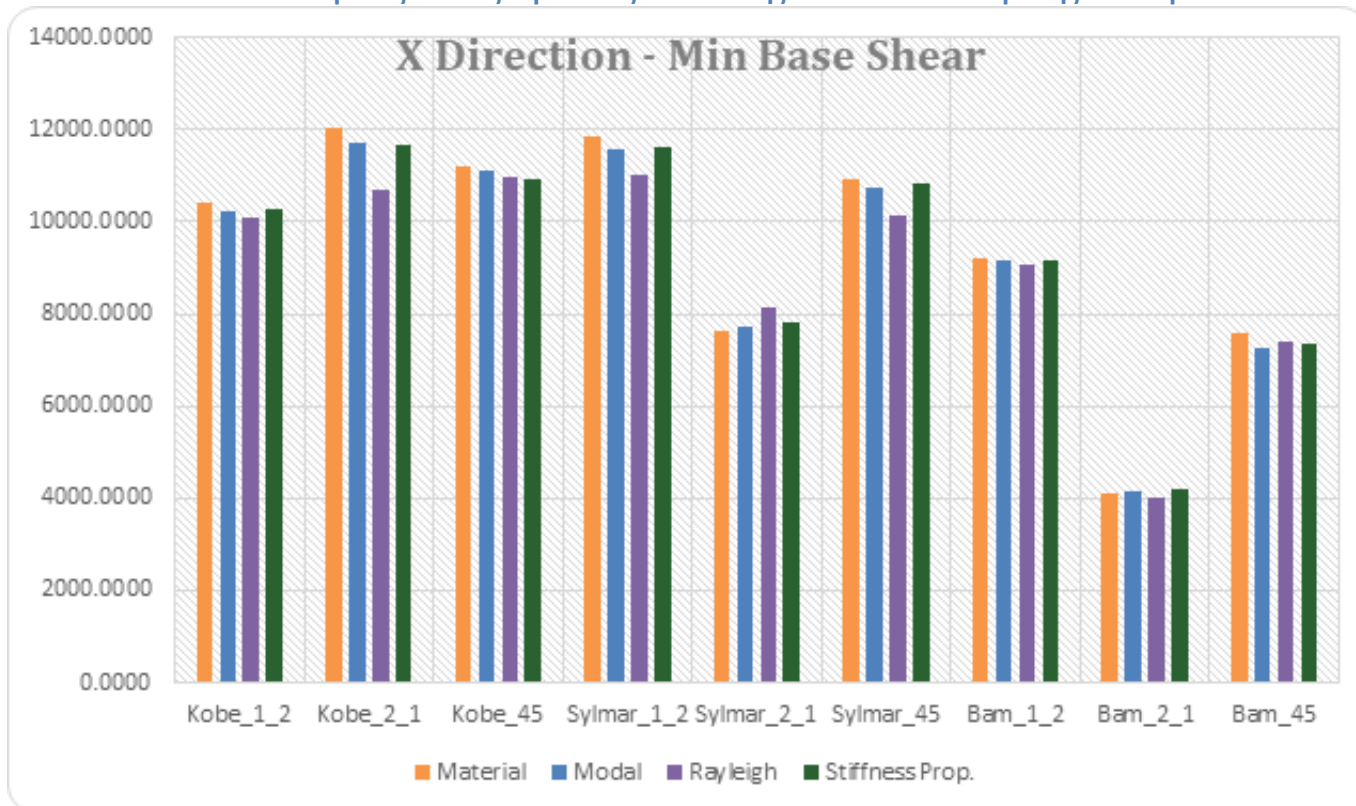
Εικόνα 79 : Μέγιστες αρνητικές τέμνουσες διεύθυνσης Y στο επίπεδο της σεισμικής απομόνωσης

4.6 Τέμνουσες πλάκας έδρασης του κτιρίου

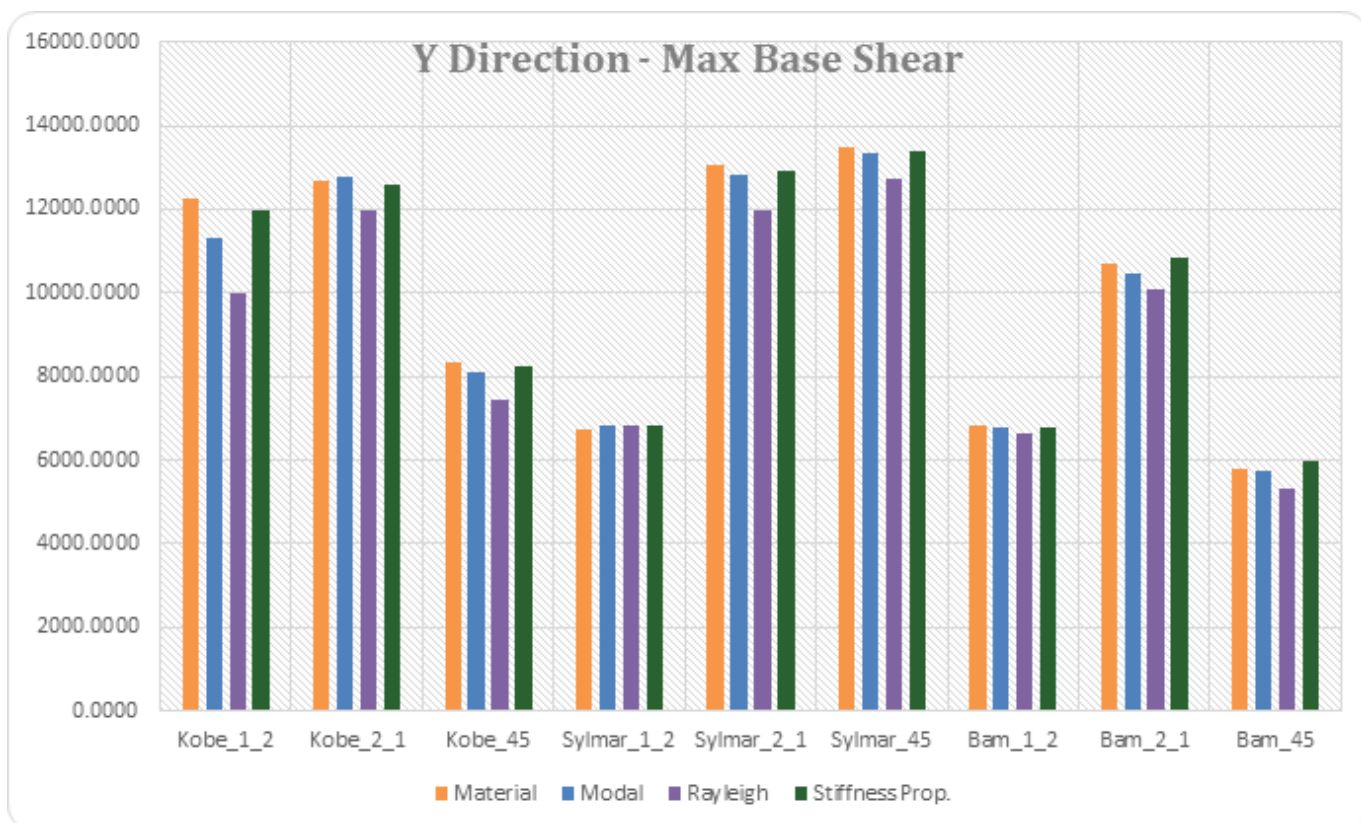
Στις Εικόνες 80-83, παρουσιάζονται οι μέγιστες τέμνουσες στο επίπεδο της πλάκας έδρασης του κτιρίου για κάθε κύρια διεύθυνση. Οι τιμές στον κατακόρυφο άξονα είναι σε kN.



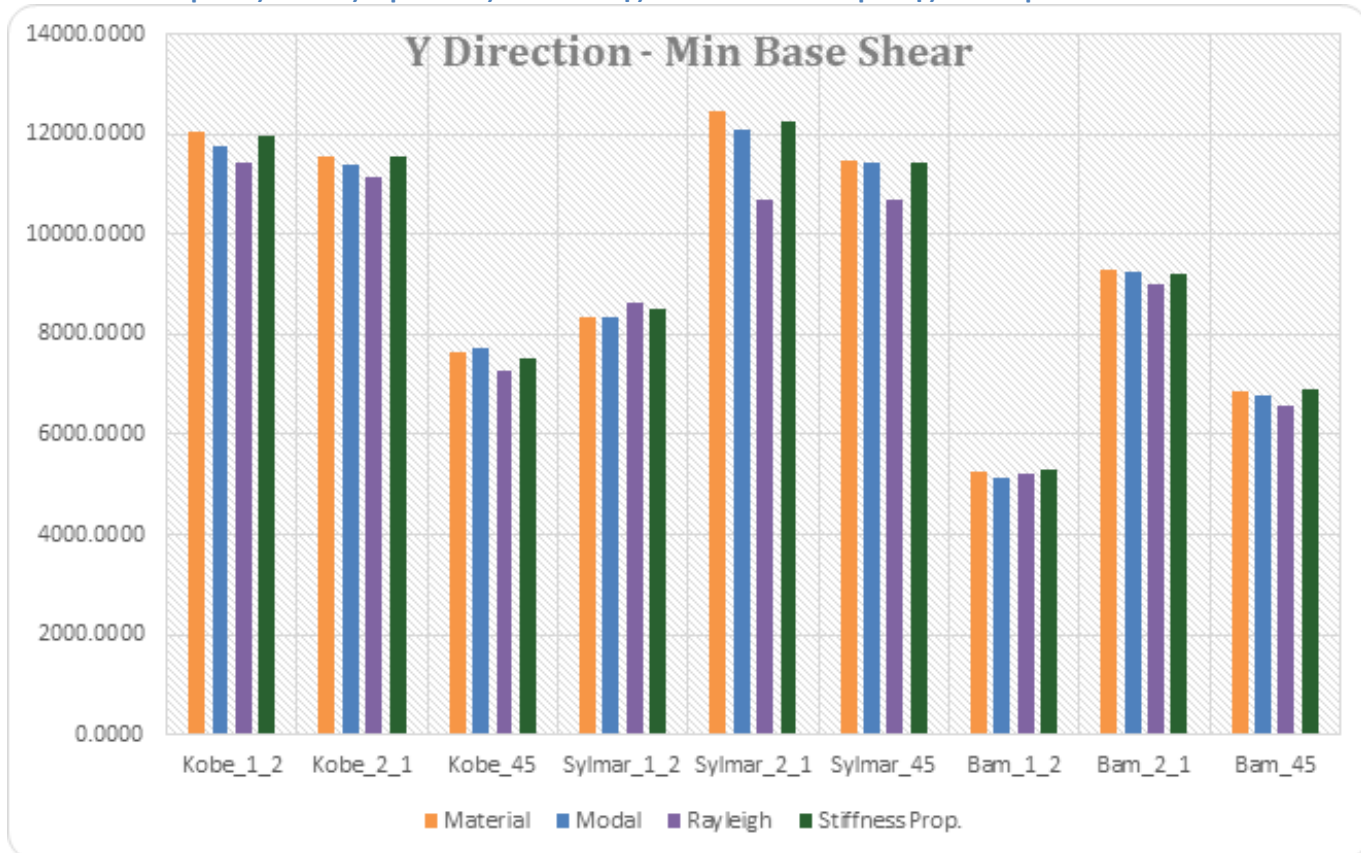
Εικόνα 80 : Μέγιστες θετικές τέμνουσες διεύθυνσης X στο επίπεδο έδρασης του κτιρίου



Εικόνα 81 : Μέγιστες αρνητικές τέμνουσες διεύθυνσης X στο επίπεδο έδρασης του κτιρίου



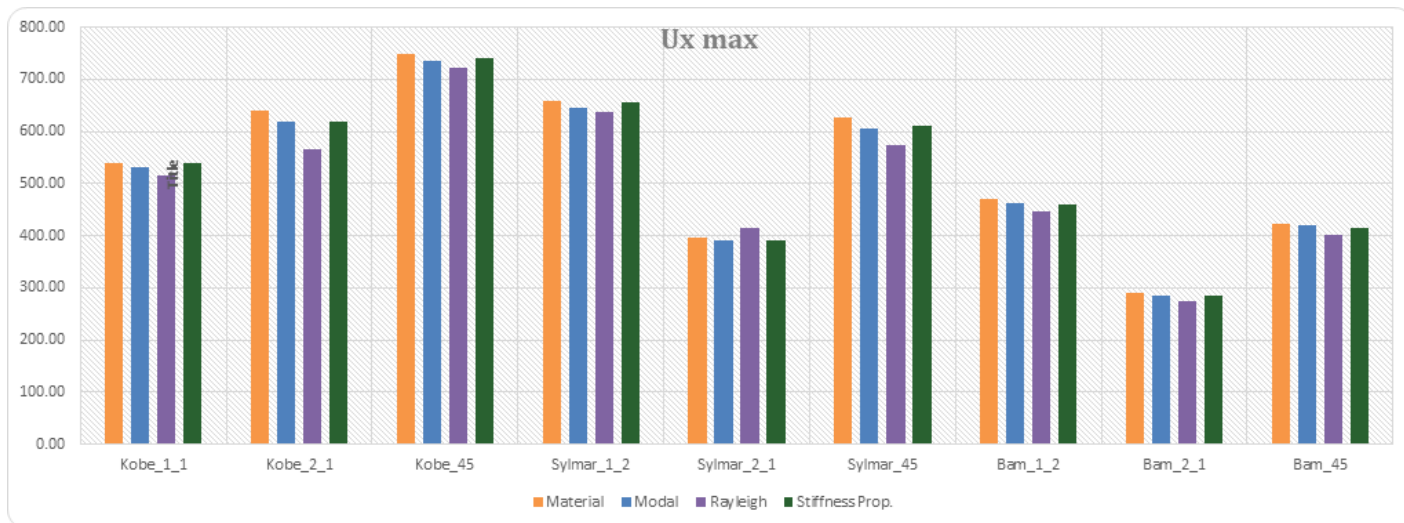
Εικόνα 82 : Μέγιστες θετικές τέμνουσες διεύθυνσης Y στο επίπεδο έδρασης του κτιρίου



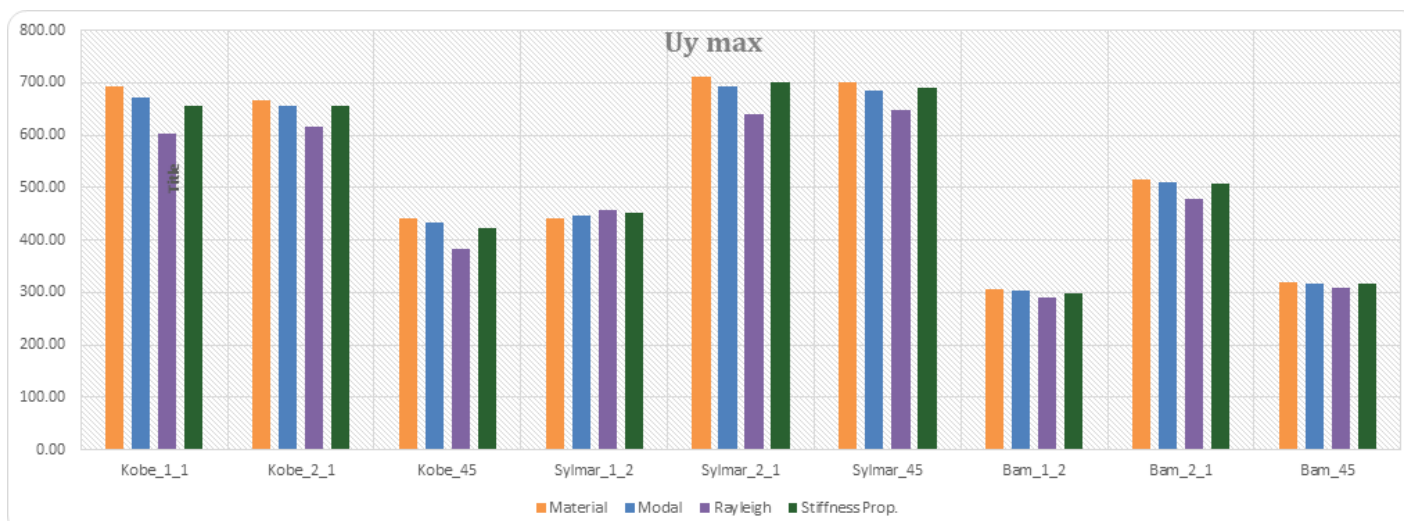
Εικόνα 83 : Μέγιστες αρνητικές τέμνουσες διεύθυνσης Y στο επίπεδο έδρασης του κτιρίου

4.7 Μέγιστες μετακινήσεις εφεδράνων

Στις Εικόνες 84-85, Παρουσιάζονται οι μέγιστες μετακινήσεις των συσκευών απομόνωσης. Οι τιμές στον κατακόρυφο άξονα είναι σε mm.



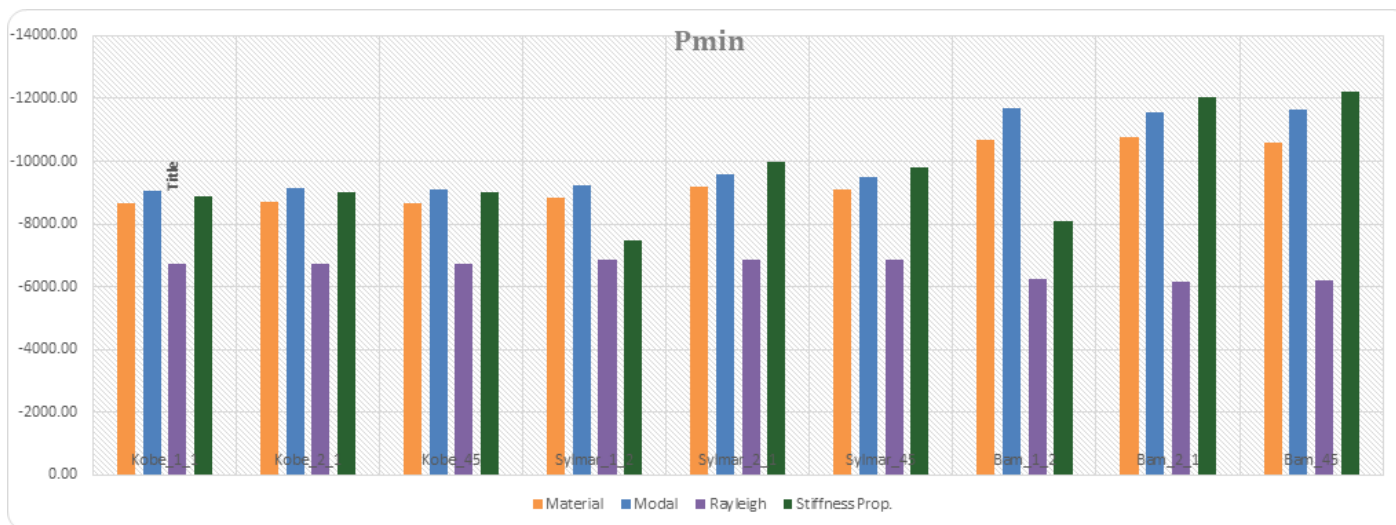
Εικόνα 84 : Μέγιστες μετακινήσεις συστήματος απομόνωσης στην διεύθυνση X



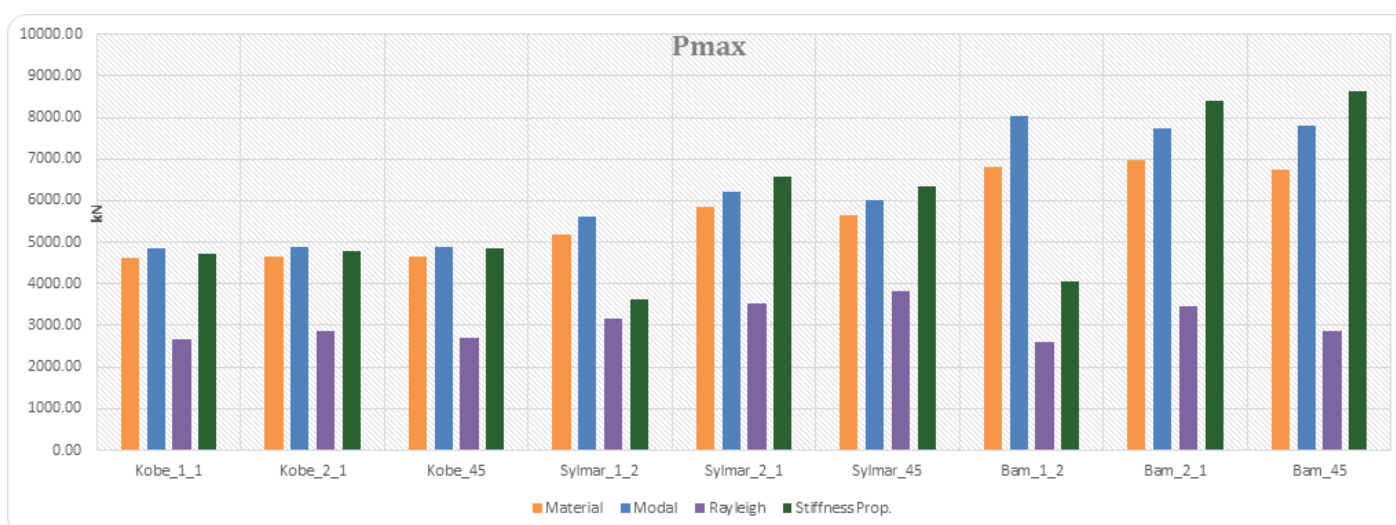
Εικόνα 85 : Μέγιστες μετακινήσεις συστήματος απομόνωσης στην διεύθυνση Y

4.8 Μέγιστες εφελκυστικές και θλιπτικές δυνάμεις εφεδράνων

Στις Εικόνες 86-87, Παρουσιάζονται οι μέγιστες και ελάχιστες δυνάμεις που αναπτύσσονται στις συσκευές απομόνωσης. Οι τιμές στον κατακόρυφο άξονα είναι σε kN.



Εικόνα 86 : Μέγιστες θλιπτικές δυνάμεις συστήματος απομόνωσης



Εικόνα 87 : Μέγιστες εφελκυστικές δυνάμεις συστήματος απομόνωσης

4.9 Δείκτες παραμενουσών μετακινήσεων ορόφων (RIDR)

Σε όλες τις αναλύσεις αναπτύσσονται πλαστικές αρθρώσεις στην κατασκευή. Δεδομένου ότι οι σεισμικές κινήσεις που εξετάζουμε είναι δυσμενέστερες του σεισμού σχεδιασμού τα αποτελέσματα συνάδουν με αυτά της βιβλιογραφίας για κτίρια με κεντρικά διασυνδεδεμένα πλαίσια. Ο λόγος των παραμενουσών μετακινήσεων κάθε ορόφου ως προς το αντίστοιχο ύψος σε πολλές περιπτώσεις ξεπερνά το όριο του 0,1% που τίθεται για σεισμικά απομονωμένες κατασκευές. Στις Εικόνες 88-105, παρουσιάζονται οι τιμές του λόγου RIDR.

Kobe_1_2				
Floor	Material	Modal	Rayleigh	Stiffness Prop.
UX9	0.043	0.009	0.043	0.015
UX8	0.051	0.008	0.047	0.017
UX7	0.067	0.000	0.043	0.030
UX6	0.084	0.010	0.036	0.045
UX5	0.088	0.012	0.034	0.048
UX4	0.067	0.004	0.042	0.026
UX3	0.034	0.027	0.055	0.005
UX2	0.006	0.039	0.056	0.027
UX1	0.006	0.025	0.030	0.022

Εικόνα 88 : Έλεγχοι Residual Interstory Drift Ratio Kobe_1_2 στη διεύθυνση X

Kobe_2_1				
Floor	Material	Modal	Rayleigh	Stiffness Prop.
UX9	0.034	0.036	0.013	0.052
UX8	0.044	0.043	0.017	0.061
UX7	0.055	0.051	0.020	0.069
UX6	0.069	0.060	0.021	0.078
UX5	0.077	0.066	0.022	0.080
UX4	0.073	0.059	0.019	0.069
UX3	0.056	0.040	0.011	0.047
UX2	0.032	0.018	0.002	0.020
UX1	0.010	0.004	0.002	0.003

Εικόνα 89 : Έλεγχοι Residual Interstory Drift Ratio Kobe_2_1 στη διεύθυνση X

Kobe_45				
Floor	Material	Modal	Rayleigh	Stiffness Prop.
UX9	0.219	0.205	0.134	0.248
UX8	0.253	0.237	0.167	0.275
UX7	0.290	0.275	0.218	0.302
UX6	0.305	0.294	0.259	0.308
UX5	0.286	0.277	0.259	0.280
UX4	0.236	0.223	0.218	0.220
UX3	0.175	0.157	0.156	0.150
UX2	0.100	0.082	0.081	0.076
UX1	0.025	0.017	0.016	0.014

Εικόνα 90 : Έλεγχοι Residual Interstory Drift Ratio Kobe_45 στη διεύθυνση X

Sylmar_1_2				
Floor	Material	Modal	Rayleigh	Stiffness Prop.
UX9	0.203	0.117	0.061	0.126
UX8	0.184	0.096	0.071	0.123
UX7	0.145	0.060	0.086	0.114
UX6	0.098	0.018	0.094	0.090
UX5	0.055	0.017	0.085	0.052
UX4	0.025	0.037	0.062	0.019
UX3	0.015	0.038	0.035	0.003
UX2	0.030	0.015	0.009	0.001
UX1	0.032	0.008	0.004	0.001

Εικόνα 91 : Έλεγχοι Residual Interstory Drift Ratio Sylmar_1_2 στη διεύθυνση X

Sylmar_2_1				
Floor	Material	Modal	Rayleigh	Stiffness Prop.
UX9	0.004	0.024	0.062	0.027
UX8	0.006	0.023	0.069	0.025
UX7	0.004	0.017	0.078	0.016
UX6	0.001	0.010	0.085	0.005
UX5	0.002	0.001	0.089	0.005
UX4	0.008	0.010	0.087	0.017
UX3	0.019	0.023	0.081	0.029
UX2	0.026	0.032	0.067	0.035
UX1	0.015	0.018	0.030	0.019

Εικόνα 92 : Έλεγχοι Residual Interstory Drift Ratio Sylmar_2_1 στη διεύθυνση X

Sylmar_45				
Floor	Material	Modal	Rayleigh	Stiffness Prop.
UX9	0.038	0.074	0.040	0.107
UX8	0.060	0.096	0.048	0.127
UX7	0.086	0.120	0.056	0.145
UX6	0.109	0.138	0.064	0.156
UX5	0.122	0.147	0.071	0.157
UX4	0.120	0.140	0.073	0.144
UX3	0.103	0.122	0.071	0.120
UX2	0.072	0.088	0.059	0.082
UX1	0.027	0.034	0.028	0.027

Εικόνα 93 : Έλεγχοι Residual Interstory Drift Ratio Sylmar_45 στη διεύθυνση X

Bam_1_2				
Floor	Material	Modal	Rayleigh	Stiffness Prop.
UX9	0.080	0.105	0.035	0.064
UX8	0.084	0.107	0.039	0.072
UX7	0.088	0.105	0.044	0.081
UX6	0.089	0.099	0.049	0.089
UX5	0.086	0.091	0.050	0.091
UX4	0.076	0.077	0.046	0.082
UX3	0.065	0.063	0.041	0.067
UX2	0.048	0.046	0.034	0.051
UX1	0.019	0.017	0.015	0.021

Εικόνα 94 : Έλεγχοι Residual Interstory Drift Ratio Bam_1_2 στη διεύθυνση X

Bam_2_1				
Floor	Material	Modal	Rayleigh	Stiffness Prop.
UX9	0.048	0.105	0.025	0.015
UX8	0.046	0.107	0.026	0.012
UX7	0.034	0.105	0.029	0.009
UX6	0.021	0.099	0.031	0.007
UX5	0.010	0.091	0.031	0.002
UX4	0.002	0.077	0.028	0.003
UX3	0.006	0.063	0.025	0.009
UX2	0.010	0.046	0.021	0.011
UX1	0.006	0.017	0.009	0.004

Εικόνα 95 : Έλεγχοι Residual Interstory Drift Ratio Bam_2_1 στη διεύθυνση X

Bam_45				
Floor	Material	Modal	Rayleigh	Stiffness Prop.
UX9	0.108	0.104	0.024	0.144
UX8	0.109	0.103	0.027	0.145
UX7	0.103	0.097	0.033	0.146
UX6	0.092	0.086	0.040	0.142
UX5	0.078	0.072	0.043	0.129
UX4	0.060	0.055	0.039	0.103
UX3	0.045	0.040	0.032	0.077
UX2	0.032	0.027	0.023	0.055
UX1	0.012	0.010	0.009	0.024

Εικόνα 96 : Έλεγχοι Residual Interstory Drift Ratio Bam_45 στη διεύθυνση X

Kobe_1_2				
Floor	Material	Modal	Rayleigh	Stiffness Prop.
UY9	0.002	0.013	0.013	0.019
UY8	0.002	0.016	0.015	0.022
UY7	0.004	0.019	0.017	0.024
UY6	0.006	0.021	0.019	0.026
UY5	0.007	0.023	0.020	0.027
UY4	0.008	0.023	0.021	0.027
UY3	0.007	0.020	0.018	0.024
UY2	0.002	0.017	0.015	0.019
UY1	0.001	0.012	0.011	0.013

Εικόνα 97 : Έλεγχοι Residual Interstory Drift Ratio Kobe_1_2 στη διεύθυνση Y

Kobe_2_1				
Floor	Material	Modal	Rayleigh	Stiffness Prop.
UY9	0.020	0.023	0.034	0.032
UY8	0.025	0.029	0.041	0.040
UY7	0.027	0.031	0.044	0.041
UY6	0.027	0.032	0.044	0.041
UY5	0.026	0.032	0.044	0.042
UY4	0.025	0.032	0.044	0.043
UY3	0.024	0.031	0.041	0.040
UY2	0.022	0.032	0.040	0.040
UY1	0.019	0.027	0.035	0.035

Εικόνα 98 : Έλεγχοι Residual Interstory Drift Ratio Kobe_2_1 στη διεύθυνση Y

Kobe_45				
Floor	Material	Modal	Rayleigh	Stiffness Prop.
UY9	0.000	0.040	0.039	0.048
UY8	0.005	0.046	0.047	0.052
UY7	0.008	0.047	0.049	0.052
UY6	0.010	0.046	0.049	0.051
UY5	0.010	0.046	0.048	0.051
UY4	0.008	0.048	0.050	0.053
UY3	0.008	0.045	0.048	0.049
UY2	0.010	0.042	0.043	0.045
UY1	0.012	0.032	0.033	0.034

Εικόνα 99 : Έλεγχοι Residual Interstory Drift Ratio Kobe_45 στη διεύθυνση Y

Sylmar_1_2				
Floor	Material	Modal	Rayleigh	Stiffness Prop.
UY9	0.014	0.050	0.051	0.050
UY8	0.008	0.064	0.064	0.066
UY7	0.006	0.068	0.066	0.071
UY6	0.006	0.072	0.068	0.075
UY5	0.007	0.073	0.070	0.076
UY4	0.007	0.075	0.071	0.078
UY3	0.005	0.071	0.066	0.074
UY2	0.004	0.069	0.066	0.072
UY1	0.004	0.061	0.060	0.064

Εικόνα 100 : Έλεγχοι Residual Interstory Drift Ratio Sylmar_1_2 στη διεύθυνση Y

Sylmar_2_1				
Floor	Material	Modal	Rayleigh	Stiffness Prop.
UY9	0.019	0.047	0.047	0.054
UY8	0.022	0.058	0.059	0.064
UY7	0.023	0.061	0.061	0.066
UY6	0.024	0.062	0.061	0.065
UY5	0.024	0.062	0.061	0.065
UY4	0.024	0.063	0.060	0.064
UY3	0.023	0.059	0.056	0.060
UY2	0.022	0.057	0.055	0.057
UY1	0.016	0.053	0.049	0.053

Εικόνα 101 : Έλεγχοι Residual Interstory Drift Ratio Sylmar_2_1 στη διεύθυνση Y

Sylmar_45				
Floor	Material	Modal	Rayleigh	Stiffness Prop.
UY9	0.017	0.073	0.073	0.083
UY8	0.018	0.092	0.090	0.102
UY7	0.018	0.096	0.094	0.106
UY6	0.018	0.097	0.095	0.106
UY5	0.018	0.097	0.096	0.106
UY4	0.019	0.098	0.097	0.107
UY3	0.017	0.094	0.091	0.101
UY2	0.018	0.090	0.088	0.096
UY1	0.016	0.076	0.076	0.083

Εικόνα 102 : Έλεγχοι Residual Interstory Drift Ratio Sylmar_45 στη διεύθυνση Y

Bam_1_2				
Floor	Material	Modal	Rayleigh	Stiffness Prop.
UY9	0.005	0.005	0.002	0.003
UY8	0.007	0.005	0.002	0.003
UY7	0.007	0.005	0.002	0.004
UY6	0.008	0.005	0.002	0.004
UY5	0.007	0.006	0.003	0.005
UY4	0.006	0.007	0.004	0.006
UY3	0.006	0.007	0.003	0.005
UY2	0.008	0.005	0.003	0.004
UY1	0.008	0.004	0.002	0.003

Εικόνα 103 : Έλεγχοι Residual Interstory Drift Ratio Bam_1_2 στη διεύθυνση Y

Bam_2_1				
Floor	Material	Modal	Rayleigh	Stiffness Prop.
UY9	0.004	0.009	0.006	0.008
UY8	0.006	0.009	0.008	0.008
UY7	0.006	0.010	0.008	0.009
UY6	0.006	0.010	0.008	0.009
UY5	0.006	0.010	0.008	0.009
UY4	0.007	0.010	0.008	0.009
UY3	0.007	0.009	0.007	0.008
UY2	0.007	0.009	0.008	0.007
UY1	0.006	0.008	0.007	0.008

Εικόνα 104 : Έλεγχοι Residual Interstory Drift Ratio Bam_2_1 στη διεύθυνση Y

Bam_45				
Floor	Material	Modal	Rayleigh	Stiffness Prop.
UY9	0.002	0.001	0.002	0.002
UY8	0.000	0.003	0.004	0.006
UY7	0.000	0.003	0.004	0.005
UY6	0.000	0.003	0.003	0.005
UY5	0.000	0.002	0.003	0.004
UY4	0.001	0.001	0.002	0.003
UY3	0.000	0.002	0.002	0.003
UY2	0.001	0.002	0.003	0.005
UY1	0.002	0.003	0.004	0.003

Εικόνα 105 : Έλεγχοι Residual Interstory Drift Ratio Bam_45 στη διεύθυνση Y

5. Συμπεράσματα

Για να γίνει σύγκριση θεωρείται ως βάση το μοντέλο απόσβεσης υλικού (Material Damping) ως το από φυσικής πλευράς σωστότερο μοντέλο για δυναμικά συστήματα με διαφορετική ικανότητα απόσβεσης σε διακριτά μέρη τους. Η γενική τάση που προκύπτει από τα δεδομένα είναι ότι το μοντέλο απόσβεσης κατά Rayleigh εμφανίζει την εντονότερη τάση υποεκτίμησης της απόκρισης σε σχέση με τον μέσο όρο των αναλύσεων.

Για τις επιταχύνσεις ορόφων, το μοντέλο απόσβεσης κατά Rayleigh παράγει τη χαμηλότερη μέση περιβάλλουσα επιταχύνσεων. Η μέση απόλυτη επιτάχυνσή του μοντέλου Rayleigh είναι περίπου 6,3% χαμηλότερη από αυτή του μοντέλου Material damping, ενώ για παράδειγμα η μέση απόλυτη επιτάχυνσή στο μοντέλο Modal Damping είναι περίπου 3,0% χαμηλότερη. Το μοντέλο Stiffness Proportional δίνει τη μεγαλύτερη μέση επιτάχυνση ορόφου, περίπου 2,2% υψηλότερη από το μοντέλο Material Damping, καθώς και τη μεγαλύτερη μέγιστη επιτάχυνση μεταξύ των μοντέλων. Αυτό δείχνει ότι κατά μέσο όρο, όσο αφορά τις επιταχύνσεις των ορόφων, το μοντέλο Stiffness Proportional αποδίδει τις πιο δυσμενείς τιμές ενώ το μοντέλο Rayleigh τις ευμενέστερες.

Για τις μέγιστες σχετικές μετακινήσεις ορόφων το μοντέλο Rayleigh δίνει την κατά μέσο όρο χαμηλότερη σχετική μετακίνηση, περίπου 6,9% χαμηλότερη από το μοντέλο Material Damping. Τα μοντέλα Modal και Stiffness Proportional δίνουν τιμές κατά μέσο όρο μόνο ελαφρώς χαμηλότερες από το μοντέλο Material Damping, περίπου κατά 2,0%. Επομένως, για τον έλεγχο της μέγιστης σχετικής μετακίνησης, το μοντέλο Rayleigh αποδίδει τις πιο ευμενείς τιμές, ενώ τα άλλα τρία μοντέλα παραμένουν σχετικά κοντά μεταξύ τους.

Για τις παραμένουσες μετακινήσεις ορόφων είναι δύσκολο να εξαχθεί συμπέρασμα. Σε 5 από τις 18 σεισμικές κινήσεις το μοντέλο Material Damping φαίνεται να μην ακολουθεί τα υπόλοιπα τρία μοντέλα. Κατά μέσο όρο το μοντέλο Material Damping φαίνεται να δίνει χαμηλότερες τιμές παραμενουσών μετακινήσεων και το μοντέλο Rayleigh τις υψηλότερες κάτι που δεν συνάδει με τα υπόλοιπα μεγέθη που συγκρίνονται. Χρειάζεται επιπλέον έρευνα ώστε να διασταυρωθούν και να εξηγηθούν τα αποτελέσματα.

Για τις τέμνουσες βάσεις ισχύει ότι και για τις μετακινήσεις. Το μοντέλο Rayleigh δίνει κατά μέσο όρο 6,0% χαμηλότερες τιμές από το μοντέλο Material Damping ενώ τα μοντέλα Modal και Stiffness Proportional δίνουν τιμές κατά μέσο όρο λιγότερο από 1,5% χαμηλότερες.

Για τις μετακινήσεις των εφεδράνων, το μοντέλο Rayleigh δίνει τις χαμηλότερες τιμές μετακινήσεων και στις δύο διευθύνσεις. Συγκεκριμένα κατά μέσο όρο στη διεύθυνση X 5,0% και στην διεύθυνση Y 7,7% χαμηλότερη από τα άλλα τρία μοντέλα που είναι κοντά μεταξύ τους.

Για τις δυνάμεις των εφεδράνων η τάση είναι ίδια αλλά η διαφορά είναι πολύ πιο έντονη. Το μοντέλο Rayleigh αποδίδει κατά μέσο όρο περίπου 45% χαμηλότερες εφελκυστικές δυνάμεις και περίπου 30% χαμηλότερες θλιπτικές σε σχέση με το μοντέλο Material Damping.

Αξίζει να αναφερθεί ότι για τις σεισμικές κινήσεις που εξετάστηκαν ξεπεράστηκαν κατά πολύ τόσο οι μέγιστες μετακινήσεις όσο και η μέγιστη θλιπτική και εφελκυστική αντοχή των συσκευών σεισμικής απομόνωσης οι οποίες είχαν σχεδιαστεί με βάση ιδιομορφική-φασματική ανάλυση.

Από τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι η επιλογή του μοντέλου απόσβεσης για την ανάλυση ενός σεισμικά απομονωμένου μεταλλικού κτιρίου επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα. Το μοντέλο κατά Rayleigh το οποίο είναι το πιο διαδεδομένο στη βιβλιογραφία φαίνεται να παρέχει σημαντικά ευμενέστερα αποτελέσματα σε σχέση με τα άλλα μοντέλα. Τα μοντέλα Modal Damping και Stiffness Proportional εμφανίζουν μικρότερες αποκλίσεις από το Material Damping το οποίο δίνει ελαφρός δυσμενέστερες τιμές στις περισσότερες αναλύσεις. Το μοντέλο Stiffness Proportional οδηγεί σε δυσμενέστερες τιμές επιταχύνσεων, ενώ το μοντέλο Modal Damping σε δυσμενέστερες δυνάμεις και μετακινήσεις στα εφέδρανα.

Οι ανωτέρω παρατηρήσεις για την επίδραση του μοντέλου απόσβεσης ισχύουν για το υπό

μελέτη κτίριο και για τις τρεις σεισμικές κινήσεις που χρησιμοποιήθηκαν. Κατά συνέπεια, οι παρατηρήσεις αυτές δεν μπορούν να γενικευθούν και χρειάζεται μεγαλύτερη διερεύνηση για να εξακριβωθεί αν το ίδιο ισχύει και σε άλλου τύπου σεισμικά απομονωμένες κατασκευές. Στην εργασία αυτή επίσης δεν εξετάστηκε η συνεισφορά της απόσβεσης κατά το ενδεχόμενο πρόσκρουσης του συστήματος σεισμικής απομόνωσης (εξάντληση του σεισμικού κενού), κάτι το οποίο θα ήταν σκόπιμο να μελετηθεί μελλοντικά σε συνδυασμό με τα μοντέλα απόσβεσης που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

6. Βιβλιογραφία

1. Pant, D.R., Wijeyewickrema, A.C. and ElGawady, M.A. (2013), Appropriate viscous damping for nonlinear time-history analysis of base-isolated reinforced concrete buildings, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(15), pp. 2321–2339. doi: 10.1002/eqe.2328
2. Anajafi, H., Medina, R.A. and Santini-Bell, E. (2020), Effects of the improper modeling of viscous damping on the first-mode and higher-mode dominated responses of base-isolated buildings, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 49(1), pp. 51–73. doi: 10.1002/eqe.3223.
3. Kitayama, S. and Constantinou, M.C. (2023), ‘Effect of modeling of inherent damping on the response and collapse performance of seismically isolated buildings’, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 52(3), pp. 571–592. doi: 10.1002/eqe.3773.
4. Kitayama, S. and Constantinou, M.C., 2025. Performance of seismically isolated and non-isolated steel-framed buildings: Sensitivity to amount and form of inherent damping. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 54(9), pp.2155–2171. <https://doi.org/10.1002/eqe.4355>.
5. Tian, Y., Chen, S., Liu, J. and Liu, Z., 2025. Performance of the uniform damping model in seismic analysis of isolated structures under near-field and far-field ground motions. *Earthquake Engineering and Resilience*, 4(3), pp.336–353. Available at: <https://doi.org/10.1002/eqe.70015>.
6. Fei, Y., Tian, Y., Huang, Y. and Lu, X., 2022. Influence of damping models on dynamic analyses of a base-isolated composite structure under earthquakes and environmental vibrations. *Engineering Mechanics*, 39(3), pp.201–211. doi:10.6052/j.issn.1000-4750.2021.07.0500.
7. Ryan, K.L. and Polanco, J., 2008. Problems with Rayleigh damping in base-isolated buildings. *Journal of Structural Engineering*, 134(11), pp.1780–1784. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:11(1780).
8. Chopra, A. K. (2017). *Dynamics of structures. Theory and applications to Earthquake Engineering*.
9. Freysinet <https://www.freyssinet.com/solution/build/seismic-protection/isisism-isolation-systems/>
10. ETABS (2020), Extended Three Dimensional Analysis of Building Systems, Version 18, Integrated Analysis, Design and Drafting of Building Systems, Computers and Structures Inc., Walnut Creek, CA, USA
11. European Committee for Standardization (CEN) (2005) EN 1993-1-1:2005 Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1: General rules and rules for buildings. Brussels: CEN.
12. European Committee for Standardization (CEN) (2004) EN 1998-1:2004 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance — Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. Brussels: CEN.
13. FEMA, Federal Emergency Management Agency. Quantification of building seismic performance factors, FEMA. Washington D.C.: Federal Emergency Management Agency
14. Naeim, F., & Kelly, J. M. (1999). Design of seismic isolated structures: from theory to practice.

John Wiley & Sons.

15. Χατζηγεωργίου Γ, Παπαγιαννόπουλος Γ [2021], Στοιχεία αντισεισμικής μηχανικής ΕΑΠ

7. Παράρτημα

Εγχειρίδιο συσκευών απομόνωσης από το site της εταιρείας Freyssinet.

<https://www.freyssinet.com/>



LRB



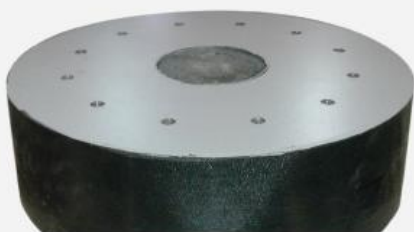
ISOSISM® Technical data sheet reference no.: FT En CV 5 1 3

General description

The ISOSISM® LRB (Lead Rubber Bearing) is an isolator designed using an elastomeric block (natural rubber or neoprene) reinforced with metal bands bonded by vulcanising. It has one or more cylindrical lead cores.

The damping provided by the ISOSISM® LRB results from the nature of the elastomeric mixture and the lead cylinder; and reduces the acceleration (through the distortion of the lead cylinder) and displacement of structures during a seismic event. It is designed and manufactured in accordance with EN 15129.

It is usually a type C isolator (fitted with outer plates) manufactured to the dimensions required for the project. It is available in square or round formats.



ISOSISM® LRB with a lead core

Applications

The ISOSISM® LRB has numerous applications in buildings, nuclear power plants, civil engineering structures, etc. It isolates the structure from the movement of the ground by forming flexible connections that increase the fundamental period of vibration of the structure to be protected and reduce its acceleration by a ratio of up to 3 to 5.

Main properties

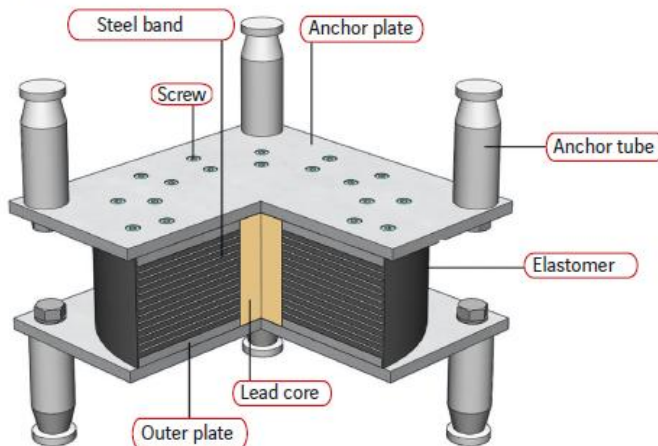
- High recentring capability;
- High damping capacity ($\xi \leq 30\%$);
- Moderate maximum displacement;
- Zero maintenance.



Arch Bridge - Basarab - Bucharest

Design

In addition to their isolating qualities, these isolators bear the vertical loads of the structure and recentre it after dynamic stress.



Behaviour

Behaviour law

The behaviour law of the ISOSISM® LRB can be modeled as follows:

There are two possible structural design approaches:

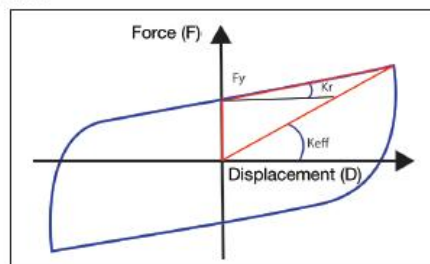
Linear calculation:

$$F = K_{eff} D$$

Non-linear calculation:

$$F = F_y + K_y D$$

F: Horizontal force
 K_{eff} : Effective stiffness
 D: Displacement
 F_y : Shear force of the lead
 K_y : Stiffness of the elastomer



The damping is obtained by the properties of the lead core and the nature of the elastomer.

Graphic representation

The device can be shown using the following graphic representation in accordance with EN 15129.

Graphic representation of an ISOSISM® LRB
plan view



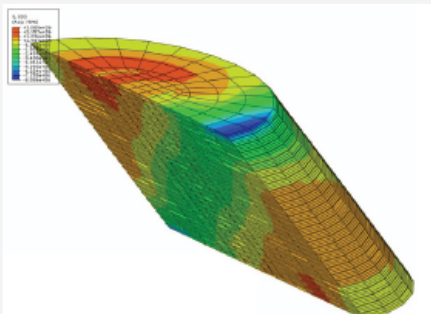
Graphic representation of an ISOSISM® LRB
elevation



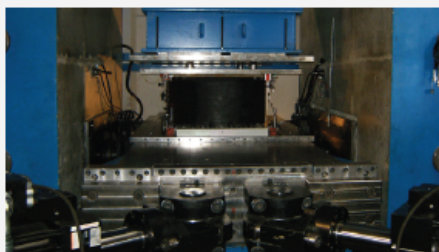
LRB isolators are shown in their deformed position in order to emphasise their lateral flexibility.

Tests

ISOSISM® LRBs have undergone numerous dynamic tests to guide and validate Freyssinet's technical development process.



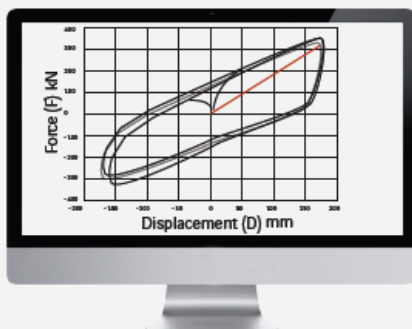
3D modeling of an ISOSISM® LRB



Testing an ISOSISM® LRB

CE marking

ISOSISM® LRB isolators can be supplied with CE marking.



Standard dynamic test curve

Freyssinet Services

Freyssinet can produce structural designs with earthquake protection devices, including LRB isolators.

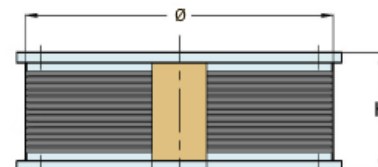
Local sales contact

Range

Two types of mixture are available for different shear modulus G values:

- Model LRB 0.4 - 10: Modulus G=0.4 MPa
- Model LRB 0.8 - 10: Modulus G=0.8 MPa

$\varnothing$: Isolator diameter
 T_e : Total thickness of elastomer
 H : Total height of isolator
 Δ_{max} : Maximum horizontal displacement
 V_{max} : Maximum vertical load under zero displacement
 V_{seism} : Maximum vertical load under seismic displacement
 K_y : Horizontal stiffness of the elastomer
 K_z : Stiffness of the lead
 F_y : Elastic force of the lead
 K_{eff} : Effective stiffness of the isolator
 ξ_{eff} : Effective damping



$\varnothing$ mm	T_e mm	H mm	Δ_{max} mm	LRB 0.4 - 10								LRB 0.8 - 10							
				V_{max} kN	V_{seism} kN	K_y kN/mm	K_z kN/mm	F_y kN	K_{eff} kN/mm	ξ_{eff} %	H mm	Δ_{max} mm	V_{max} kN	V_{seism} kN	K_y kN/mm	K_z kN/mm	F_y kN	K_{eff} kN/mm	ξ_{eff} %
Ø300	45	129	110	1430	820	0.59	5.89	34	0.87	26	129	95	2380	1550	1.12	11.17	60	1.70	27
Ø300	70	169	170	920	290	0.38	3.79	34	0.56	26	169	150	1640	680	0.72	7.18	60	1.08	27
Ø350	55	145	135	2200	1230	0.65	6.53	49	0.98	27	165	115	3290	2390	1.25	12.48	80	1.88	27
Ø350	75	177	185	1610	600	0.48	4.79	49	0.72	27	197	160	2920	1350	0.92	9.15	80	1.37	27
Ø400	60	147	150	2870	1670	0.79	7.85	60	1.15	26	167	130	3620	3200	1.50	14.99	102	2.21	26
Ø400	90	192	225	1950	630	0.52	5.24	60	0.77	26	212	195	3540	1490	1.00	9.99	102	1.48	26
Ø450	72	165	180	3940	2180	0.83	8.26	80	1.23	27	185	155	4580	4190	1.57	15.71	136	2.37	27
Ø450	108	219	260	2620	770	0.55	5.51	80	0.83	27	239	230	4580	1740	1.05	10.47	136	1.59	27
Ø500	84	197	210	4380	2360	0.87	8.67	110	1.34	28	217	180	4980	4680	1.67	16.66	165	2.50	27
Ø500	126	257	290	2920	870	0.58	5.78	110	0.92	29	277	270	4890	1780	1.11	11.11	165	1.67	27
Ø550	88	198	220	5460	3050	1.01	10.10	119	1.50	27	228	190	6940	5900	1.93	19.29	196	2.87	27
Ø550	144	275	320	3360	1000	0.62	6.17	119	0.95	28	312	310	6100	1840	1.18	11.79	196	1.75	27
Ø600	96	209	240	6540	4010	1.10	11.04	136	1.62	26	260	205	8250	7690	2.09	20.94	242	3.17	27
Ø600	144	275	350	4810	1390	0.74	7.36	136	1.09	26	332	310	8250	3120	1.40	13.96	242	2.11	27
Ø650	108	252	270	7870	4290	1.15	11.50	165	1.70	26	272	230	8650	8340	2.19	21.89	280	3.29	27
Ø650	162	330	380	5250	1530	0.77	7.67	165	1.16	27	350	350	8650	3180	1.46	14.59	280	2.19	27
Ø700	120	264	300	8590	4600	1.20	11.98	196	1.79	27	315	260	11340	8980	2.29	22.89	320	3.41	27
Ø700	170	334	410	6060	1780	0.85	8.46	196	1.28	27	390	365	11030	4040	1.62	16.16	320	2.41	27
Ø750	130	298	325	10370	5530	1.26	12.63	242	1.94	28	350	280	13000	10870	2.42	24.17	378	3.64	27
Ø750	170	354	425	7930	2540	0.97	9.66	242	1.48	28	410	365	13000	5950	1.85	18.48	378	2.79	27
Ø800	132	296	330	11220	6540	1.41	14.08	293	2.21	28	358	285	16190	12950	2.71	27.12	425	4.07	27
Ø800	176	356	440	8960	3150	1.06	10.56	293	1.66	28	426	380	16190	7220	2.03	20.34	425	3.05	27

Range given for guidance: ISOSISM® LRB isolators can be produced for larger vertical loads and displacements and for lower horizontal stiffnesses.

Structural connections

The isolators are connected to steel structures using bolts.
They are connected to concrete structures using anchor tubes or studs.



Sakarya Viaduct - Turkey

All rights reserved by FREYSSINET. Product names are trademarks of FREYSSINET.
The information in this document is subject to change. Whilst it is as accurate as possible, it is not in any way binding on FREYSSINET.