



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Ιωάννης Ε. Βουβάκης – Μανουσάκης
Προπτυχιακός φοιτητής Σχολής
Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.
A.M. 011 13016

Επιβλέπων

Εμμανουήλ Βουγιούκας
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Τεκμηρίωση της σεισμικής συμπεριφοράς
υφιστάμενου κτιρίου 24 ορόφων από
οπλισμένο σκυρόδεμα μελετημένο το 1971
και πρόταση σεισμικής μόνωσης

ΑΘΗΝΑ, 2018

Copyright © 2016 Ιωάννης Βουβάκης – Μανουσάκης

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

...στη σύζυγό μου

Απρίλιος 2018

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους συνέβαλαν στην πραγματοποίηση αυτής της διπλωματικής εργασίας προσφέροντας πρόθυμα τις γνώσεις τους, πολύτιμη καθοδήγηση και υποστήριξη.

Ιδιαίτερα τον κύριο Εμμανουήλ Βουγιούκα, επιβλέποντα καθηγητή μου, για την αποδοχή, την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα καθώς και την πρόθυμη και αποτελεσματική καθοδήγηση που μου προσέφερε κατά την εκπόνησή του. Αισθάνομαι υπερήφανος για την ευκαιρία που είχα να συνεργαστώ μαζί του.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω των κύριο Ιωάννη Καπογιάννη, υποψήφιο διδάκτορα Ε.Μ.Π., για την ουσιαστική του συμβολή και υποστήριξη που μου προσέφερε.

Τέλος, ευχαριστώ εγκάρδια τη σύζυγό μου και τους γονείς μου, για την ψυχολογική και υλική υποστήριξη που μου προσέφεραν σε αυτό το σημαντικό στάδιο της σταδιοδρομίας μου.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	A-6
ABSTRACT	A-8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ Α. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
A.1. ΓΕΝΙΚΑ.....	10
A.2. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	11
A.3. ΟΡΙΣΜΟΙ ΒΑΣΙΚΩΝ ΕΝΝΟΙΩΝ	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ Β. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ	14
B.1. ΓΝΩΡΙΜΙΑ ΜΕ ΤΟ ΚΤΙΡΙΟ.....	14
B.2. ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΦΕΡΟΝΤΟΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ Γ. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ ΦΟΡΕΑ ΥΠΟΒΑΛΛΟΜΕΝΟΥ ΣΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΟΥ	35
Γ.1. ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	35
Γ.2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	35
Γ.3. ΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ	38
Γ.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	45
Γ.5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ Δ. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ ΦΟΡΕΑ ΜΕ ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑΣ	53
Δ.1. ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	53
Δ.2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	53
Δ.3. ΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ	57
Δ.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	57
Δ.5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ	83
ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ε. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΥΡΗΝΑ ΜΕ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ (F.R.P.)	85
E.1. ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	85
E.2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	85
E.3. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	99
E.4. ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	106
E.5. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΑΝΕΛΕΓΧΟΣ	148

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΣΤ. ΠΡΟΤΑΣΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ ΜΕ ΕΦΕΔΡΑΝΑ ΤΡΙΒΗΣ ΤΥΠΟΥ TRIPLE FRICTION PENDULUM	176
ΣΤ.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	176
ΣΤ.2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	177
ΣΤ.3. ΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ	190
ΣΤ.4. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ.....	194
ΣΤ.5. ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ	206
ΣΤ.6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗ.....	221
ΣΤ.7. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΑΠΛΑ ΕΦΕΔΡΑΝΑ ΤΡΙΒΗΣ ΜΙΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ.....	232
ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ζ. ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	236
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α. ΚΩΔΙΚΑΣ ΡΥΘΜΩΝ	1
Α.1. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΜΟΝΟΒΑΘΜΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	1
Α.2. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ ΤΡΙΒΗΣ ΤΥΠΟΥ Τ.Φ.Ρ.....	9
Α.3. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ	17

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς του «Πύργου του Πειραιά», κτιρίου γνωστού και ως «Εμποροναυτιλιακό Κέντρο Πειραιά», σύμφωνα με ισχύοντες αντισεισμικούς κανονισμούς, η εκτίμηση της πραγματικής αντοχής και η πρόταση ενισχύσεων. Για το σκοπό αυτό γίνεται εφαρμογή σύγχρονων μεθόδων ανάλυσης, ελαστικών αλλά και μη ελαστικών, όπως είναι η ανελαστική υπερωθητική ανάλυση (γνωστή ως ανάλυση Pushover), καθώς και η ανελαστική ιδιομορφική ανάλυση χρονοϊστορίας (γνωστή ως Fast Nonlinear Time – History Analysis). Για την εφαρμογή των αναλύσεων γίνεται χρήση διαφόρων λογισμικών που είναι διαθέσιμα στην αγορά σήμερα, όπως το ETABS 2016 (Computers And Structures, Berkley California, USA), το SEISMOSTRUCT (Seismosoft, Pavia, Italy) καθώς και το ΡΑΦ (Τεχνικός Οίκος Λογισμικού, Ηράκλειο Κρήτης, Ελλάδα).

Στο κεφάλαιο Γ εξετάζεται η συμπεριφορά του φορέα υποβαλλόμενου στα φορτία μελέτης του. Εκτελείται ανάλυση οριζόντιας φόρτισης με φορτία έντασης όσης προβλεπόταν στον αντισεισμικό κανονισμό του 1959 (Α.Κ. '59) και στη συνέχεια εκτελείται έλεγχος επάρκειας των δομικών στοιχείων λαμβάνοντας υπόψη τον υφιστάμενο οπλισμό τους.

Στο κεφάλαιο Δ εκτελούνται οι έλεγχοι επάρκειας, κατόπιν φόρτισης του ίδιου προσομοιώματος με τα φορτία που προβλέπονται από τους σύγχρονους κανονισμούς και εκτέλεση ιδιομορφικής ανάλυσης φάσματος απόκρισης με ενιαίο συντελεστή συμπεριφοράς q . Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προκύπτει η ανάγκη ενίσχυσης του φορέα.

Στο κεφάλαιο Ε διερευνάται το ενδεχόμενο ενίσχυσης του κεντρικού πυρήνα του φορέα σε τέμνουσα, με ινοπλισμένα πολυμερή (F.R.P.). Εκτελείται στατική υπερωθητική ανάλυση και τεκμαίρεται το σημαντικό περιθώριο βελτίωσης της μετελστικής συμπεριφοράς του φορέα.

Στο κεφάλαιο ΣΤ διερευνάται μία διαφορετική προσέγγιση ενίσχυσης, με προσθήκη εφεδράνων στον υφιστάμενο φορέα προκειμένου να επιτευχθεί σεισμική μόνωση. Αποφασίζεται η καταλληλότερη θέση ορισμού του επιπέδου διαχωρισμού, γίνεται διαστασιολόγηση εφεδράνων τριβής τύπου Triple Friction Pendulum και γίνεται επεξεργασία πραγματικών σεισμικών καταγραφών προκειμένου να επιτευχθεί η προσαρμογή τους στο ελαστικό φάσμα σχεδιασμού του EC8. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η ανάλυση του φορέα πριν και μετά την επέμβαση, με εκτέλεση μη γραμμικής ανάλυσης χρονοϊστορίας (Nonlinear Time-History Analysis).

Abstract

The aim of this thesis is to investigate the seismic behavior of the "Tower of Piraeus", a building known as "Piraeus Commerce and Shipping Center", according to the anti-seismic regulations in force, the assessment of the actual resistance and the proposal of retrofitting. For this purpose, modern methods of analysis are applied, both elastic and inelastic, such as static pushover analysis, as well as non-linear time-history analysis. For the implementation of the analyzes, various software available on the market have been used, such as ETABS 2016 (Computers and Structures, Berkley California, USA), SEISMOSTRUCT (Seismosoft, Pavia, Italy) and RAF (Software Engineering House, Heraklion Crete, Greece).

Chapter C (Γ) discusses the behavior of the structure submitted to its design loads. Lateral loading analysis is carried out with loads of intensity as foreseen in the 1959 anti-seismic regulation (AK '59) and then an adequacy check of the structural elements is carried out, considering their existing dimensions and reinforcement.

In Chapter D (Δ), capacity verification is again performed, subjecting the analytical model with loading prescribed by the current regulations and performing response spectrum analysis. The results indicate that retrofitting of the structure is needed.

Chapter E investigates the outcome of increasing the shear capacity of the central core, by applying fiber reinforced polymers (F.R.P.) on its surface. Static Pushover Analysis is performed and the significant margin for improving the behavior of the structure is verified.

Chapter F (ΣT) investigates a different retrofitting approach, with the placement of bearings to the existing structure, to achieve seismic insulation. In the chapter, the most suitable position for defining the separation level is decided, Triple Friction Pendulum bearings are being designed, and processing actual seismic recordings to achieve their

adaptation to the elastic design range of EC8 is being performed. Subsequently, nonlinear time-history inelastic analysis is performed, before and after the placement of the bearings, to confirm that the results are acceptable.

Κεφάλαιο Α.

Εισαγωγή

A.1. Γενικά

Αντικείμενο του δομοστατικού πολιτικού μηχανικού είναι η επιλογή και χρήση υλικών με προδιαγεγραμμένες ιδιότητες, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για τη μόνωση του φέροντος οργανισμού έργων υποδομής, τα οποία θα μπορούν να εξυπηρετούν τις ανάγκες αντοχής, ασφάλειας, λειτουργικότητας αλλά και οικονομίας. Μία από τις κρισιμότερες δυναμικές καταπονήσεις των κατασκευών αυτών είναι οι σεισμικές, ιδιαίτερα στην Ελλάδα όπου βρίσκεται σε θέση με έντονη γεωλογική δραστηριότητα. Τίθενται επομένως τα προβλήματα της επιλογής ενός μεγέθους σχεδιασμού για τις διεγέρσεις αυτές, η επιλογή ενός αποδεκτού επιπέδου βλαβών, η καθοδήγηση του μηχανισμού απορρόφησης ενέργειας μέσω του ίδιου του σχεδιασμού των κατασκευών, καθώς και η επιλογή ενός αποδεκτού επιπέδου βλαβών, μεταξύ άλλων.

Οι απαιτήσεις των προγενέστερων αντισεισμικών κανονισμών¹ που ίσχυαν στη χώρα μας ήταν σημαντικά μικρότερες από αυτές των ισχυόντων σήμερα κανονισμών. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα η πλειοψηφία του δομικού πλούτου της χώρας να παρουσιάζει ανεπάρκειες με βάση τις σημερινές απαιτήσεις και οδήγησε στην ανάγκη προσδιορισμού μεθόδων τεκμηρίωσης, αποτίμησης και ενίσχυσης, όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο, των υφιστάμενων κατασκευών, σε περιπτώσεις όπου αυτό απαιτείται, όπως προσθήκες, αλλαγές χρήσης, νομιμοποιήσεις αυθαιρέτων², καθώς και επεμβάσεις αποκατάστασης βλαβών μετά από έντονες καταπονήσεις. Σήμερα, το ισχύον κανονιστικό πλαίσιο σχεδιασμού έναντι σεισμικών δράσεων είναι η ελεύθερη επιλογή μεταξύ του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού (Ε.Α.Κ.) ή του Ευροκώδικα 8 (EC 8), ενώ τα θέματα τεκμηρίωσης και

¹ 1959, 1985, 1994, 2000, 2010, 2013

² Ν. 4495/2017 – ΦΕΚ 167/Α/3-11-2017

ενισχύσεων υφιστάμενων κατασκευών καλύπτονται από τον Κανονισμό Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.), όπως αυτός ισχύσει σήμερα κατόπιν αναθεώρησης.

A.2. Αντικείμενο της εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται η διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς του «Πύργου του Πειραιά», κτιρίου γνωστού και ως «Εμποροναυτιλιακό Κέντρο Πειραιά», που μελετήθηκε και κατασκευάστηκε το 1971 εν ισχύ του Αντισεισμικού Κανονισμού του 1959, η εκτίμηση της πραγματικής αντοχής και η πρόταση ενισχύσεων.

Ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή για την κάθε κατηγορία ανάλυσης που εκτελείται στην παρούσα εργασία.

A.2.1. Ελαστική ανάλυση ισοδύναμης στατικής φόρτισης

Με την ελαστική ανάλυση ισοδύναμης στατικής φόρτισης, όπως αυτή προδιαγράφεται στον Α.Κ. 1959, γίνεται ένας πρώτος έλεγχος του προσομοιώματος και εκτελούνται έλεγχοι επάρκειας μελών. Με τη βοήθεια αυτού του προσομοιώματος εκτιμώνται τα χαρακτηριστικά μελών τα οποία δεν προκύπτουν από τους ξυλότυπους που υπάρχουν διαθέσιμοι.

A.2.2. Ελαστική ανάλυση φάσματος απόκρισης

Με την ελαστική ανάλυση φάσματος απόκρισης, σύμφωνα με τον EC 8 και τον ΚΑΝ.ΕΠΕ., ελέγχεται η επάρκεια των στοιχείων του φέροντος οργανισμού της κατασκευής για τις σημερινές απαιτήσεις.

A.2.3. Ανελαστική στατική υπερωθητική ανάλυση (Static Pushover Analysis)

Με την ανελαστική υπερωθητική ανάλυση ελέγχεται η ανελαστική συμπεριφορά του δομήματος, προσδιορίζεται η μέγιστη τέμνουσα βάσης, τα σημεία επιτελεστικότητας και προκύπτει ανάγκη ενισχύσεων. Η ίδια διαδικασία εκτελείται για τον ενισχυμένο φορέα.

A.2.4. Ανελαστική ιδιομορφική ανάλυση χρονοϊστορίας (Fast Nonlinear Time – History Analysis)

Με την ανελαστική ιδιομορφική ανάλυση χρονοϊστορίας ελέγχεται η συμπεριφορά της κατασκευής με πραγματικές σεισμικές καταγραφές και διερευνάται το αποτέλεσμα ενίσχυσης με εφέδρανα τριβής τύπου Triple Friction Pendulum.

A.3. Ορισμοί βασικών εννοιών

A.3.1. Τεκμηρίωση υφιστάμενης κατασκευής

Τεκμηρίωση υφιστάμενης κατασκευής ονομάζεται η διαδικασία συλλογής στοιχείων της υπόψη κατασκευής, η ανάγνωση και κατανόηση των μελετών της εφόσον υπάρχουν, η αποτύπωση του φέροντος οργανισμού και ο προσδιορισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών αυτού, των διατάξεων όπλισης, της ποιότητας των υλικών, της κατάστασης του φορέα ως προς τις υπάρχουσες βλάβες και φθορές κλπ. Για κάθε παράμετρο που διερευνάται έχει σήμερα αναπτυχθεί μία πληθώρα διαδικασιών ελέγχου, καταστροφικών και μη, όπως πυρηνοληψίες, κρουσιμετρήσεις, χαντρώματα οπλισμών, μεταξύ άλλων.

A.3.2. Αποτίμηση σεισμικής συμπεριφοράς

Αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς μίας κατασκευής είναι η ποσοτική εκτίμηση και ο έλεγχος επάρκειας της κατασκευής έναντι μίας προκαθορισμένης σεισμικής διέγερσης. Απαιτείται πάντοτε προκειμένου να ληφθεί υπεύθυνη απόφαση για την ανάγκη ή μη της ενίσχυσης ενός υφιστάμενου δομήματος. Για την εκτέλεση της διαδικασίας απαραίτητη προϋπόθεση είναι η αξιόπιστη προσομοίωση του φορέα, η οποία απαιτεί την τεκμηρίωση του δομήματος. Η διαδικασία μπορεί να εκτελεστεί με ένα πλήθος από μεθόδους ανάλυσης του στατικού προσομοιώματος, οι οποίες προδιαγράφονται στον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

A.3.3. Ενίσχυση

Ενίσχυση ονομάζεται η διαδικασία βελτίωσης της συμπεριφοράς του στατικού προσομοιώματος μίας υφιστάμενης κατασκευής, με στόχο την αύξηση της ικανότητας της

για παραλαβή φορτίων. Ενισχύσεις γίνονται σε κατασκευές γίνονται σε περίπτωση που η αποτίμηση δείξει ότι η ικανότητά τους δεν επαρκεί για την ικανοποίηση των απαιτήσεων των σύγχρονων κανονισμών. Ενισχύσεις κατασκευών μπορούν να γίνουν με μία μεγάλη ποικιλία μεθόδων. Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. προδιαγράφει πολλούς από αυτούς και δίνει αριθμητικά βοηθήματα για την διαστασιολόγηση των ενισχύσεων, ωστόσο δεν απαγορεύει την ενίσχυση και με μεθόδους στις οποίες δεν κάνει αναφορά, αφήνοντας ελευθερία στην κρίση του μηχανικού για την επιλογή τους.

Κεφάλαιο Β.

Περιγραφή του κτιρίου

B.1. Γνωριμία με το κτίριο

B.1.1. Ο Πύργος του Πειραιά – Ιστορικά στοιχεία

Ο Πύργος του Πειραιά ανοικοδομήθηκε το 1971, εντός της επταετους στρατιωτικής δικτατορίας, κατά την περίοδο δημαρχίας του Αριστείδη Σκυλίτη. Το τότε καθεστώς, θέλοντας να ισχυροποιήσει την εικόνα των μελών του και παράλληλα να ενισχύσει την εικόνα της πόλης του Πειραιά ως εμποροναυτιλιακού κέντρου, συνέλαβε την ιδέα της ανοικοδόμησης ενός κτιρίου – τοποσήμου. Η ισχύουσα οικοδομική νομοθεσία τροποποιήθηκε με τον «Αναπτυξιακό Νόμο Α.Ν. 395/68 Περί του Ύψους των Οικοδομών και της Ελευθέρως Δομήσεως» και δόθηκαν άδειες κατασκευή για μερικές δεκάδες ψηλά κτίρια, μεταξύ αυτών και του Πύργου του Πειραιά. Κατασκευάστηκε ο φέρων οργανισμός του κτιρίου, ωστόσο μετά την πτώση του καθεστώτος και έκτοτε το έργο παραμένει ημιτελές. Η τότε Δημοτική Αρχή δεν ολοκλήρωσε την κατασκευή του και οι προσπάθειες των επόμενων Δημοτικών Αρχών μέσω της διενέργειας διεθνών διαγωνισμών δεν καρποφόρησαν με αποτέλεσμα το κτίριο να μην έχει αποπερατωθεί έως και σήμερα. Το 1983, επί δημαρχίας Γιάννη Παπασπύρου πραγματοποιήθηκε η επένδυση των εξωτερικών επιφανειών του κτιρίου με γυάλινα και μεταλλικά πετάσματα. (ΧΛΥΚΑΣ, 2017)



Εικόνα Β.1 Πύργος του Πειραιά

Β.1.2. Σήμερα

Σήμερα, δεν έχει γίνει σχεδόν καμία εργασία σε οτιδήποτε αφορά τις τοιχοπληρώσεις, την ύδρευση, αποχέτευση, θέρμανση και τις ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις του κτηρίου. Οι μόνοι χώροι που έχουν εκμεταλλευτεί μέχρι σήμερα είναι οι τρεις πρώτοι όροφοι και κυρίως το ισόγειο τμήμα, στεγάζοντας δημοτικές υπηρεσίες, δημοτικές επιχειρήσεις, την Ράλλειο Σχολή, ένα κατάστημα ηλεκτρικών ειδών στο ισόγειο, ένα ΚΕΠ, μεταξύ άλλων. Οι υπερκείμενοι όροφοι του κτιρίου δεν χρησιμοποιήθηκαν ποτέ. (Χατζαράς, 2015)



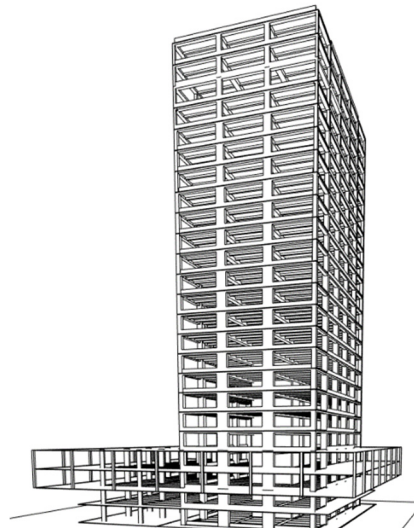
Εικόνα Β.2 Ο πύργος του Πειραιά σήμερα.



B.2. Μορφολογία του φέροντος οργανισμού του κτιρίου

B.2.1. Διαθέσιμα στοιχεία

Κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας διατίθετο κάποια από τα εγκεκριμένα σχέδια ξυλοτύπων της οικοδομικής άδειας του ακινήτου. Ενδεικτικά παρατίθενται ορισμένα από τα σχέδια στο παρών κεφάλαιο. Από τα σχέδια αυτά μπόρεσε να γίνει κατανοητή η γεωμετρία του φορέα καθώς και να εξαχθούν πληροφορίες για τη γεωμετρία καθώς και για κάποιες διατάξεις όπλισης υποστυλωμάτων και δοκών.

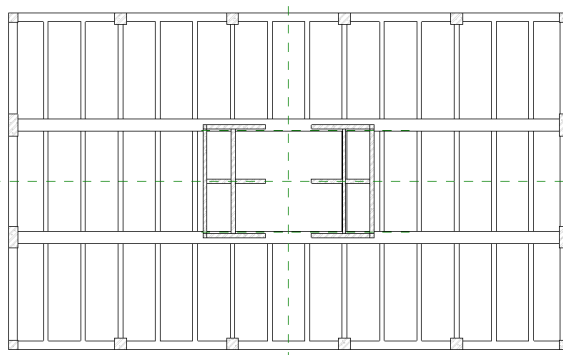


B.2.2. Γενικά

Ο φέρων οργανισμός του κτιρίου είναι κατασκευασμένος από οπλισμένο σκυρόδεμα. Στον τυπικό όροφο του κτιρίου (Εικόνα B.15) παρατηρείται ένας κεντρικός πυρήνας από τοιχώματα, ο οποίος περιβάλλεται από τα περιμετρικά υποστυλώματα. Εμφαίνονται ισχυρές δοκοί οι οποίες συνδέουν τον κεντρικό πυρήνα με τα ακραία υποστυλώματα και ταυτόχρονα στηρίζουν δευτερεύοντες δοκούς οι οποίες διατάσσονται ανά σταθερές αποστάσεις και φέρουν με τη σειρά τους τα φορτία των αμφιέρειστων πλακών.

Εικόνα B.3 Προοπτικό Φέροντος Οργανισμού. (Προσωπικό αρχείο γράφοντος)

Παρατηρείται «τακτοποιημένη» και συμμετρική διάταξη των στοιχείων, με απλό και σαφή κάναβο ανά απόσταση 8.30 m. Από τους ξυλότυπους που διατίθενται σε διάφορες στάθμες παρατηρείται συστηματική χρήση των ίδιων διατομών και διατάξεων όπλισης για τις δοκούς, σε όλους τους ορόφους. Έχουν όλες συνήθη μορφή πλακοδοκού, με εξαίρεση τις περιμετρικές, οι οποίες είναι μορφής L και είναι ημι-



Εικόνα B.4 Σχηματική Άνοψη Τυπικού Ορόφου. (Προσωπικό αρχείο γράφοντος)

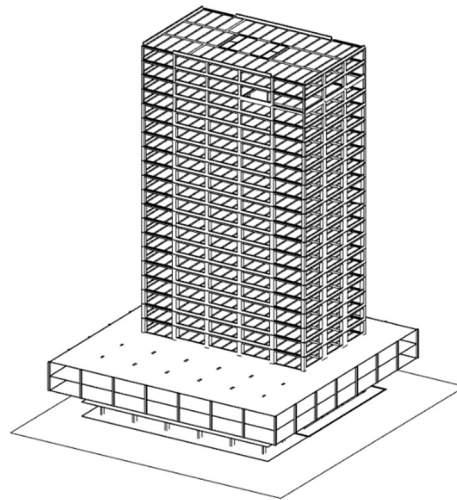
ανεστραμμένες. Όλα τα υποστυλώματα έχουν ορθογωνική διατομή η οποία μεταβάλλεται καθ' ύψος.

Το κτίριο έχει 3 υπόγειες στάθμες, από τις οποίες βατές είναι οι 2, ενώ η 3^η δεν είναι επισκέψιμη. Η θεμελίωση του κτιρίου, όπως φαίνεται στο σχέδιο της άδειας με θέμα «*Ευλότυπος και Τομές Θεμελίωσης*», αποτελείται από δύο ισχυρές πλάκες, ύψους 0.50 m η πάνω και 1.00 m η κάτω, οι οποίες ενώνονται μεταξύ τους με τοιχία ύψους 3.00 m και πάχους 1.45 m, που διατάσσονται ανά συγκεκριμένες αποστάσεις και στις δύο διευθύνσεις, δημιουργώντας «κυψέλες» στη στάθμη του 3^{ου} υπογείου (Εικόνα Β.18, Εικόνα Β.19). Η διάταξη των δύο οριζόντιων πλακών που συνδέονται μεταξύ τους με τόσο ισχυρά στοιχεία είναι ικανή να πακτώσει την ανωδομή, επομένως αυτή μελετάται από την οροφή του 3^{ου} υπογείου και άνω. Η απόληξη των τοιχωμάτων στη θεμελίωση φαίνεται στην Εικόνα Β.10.

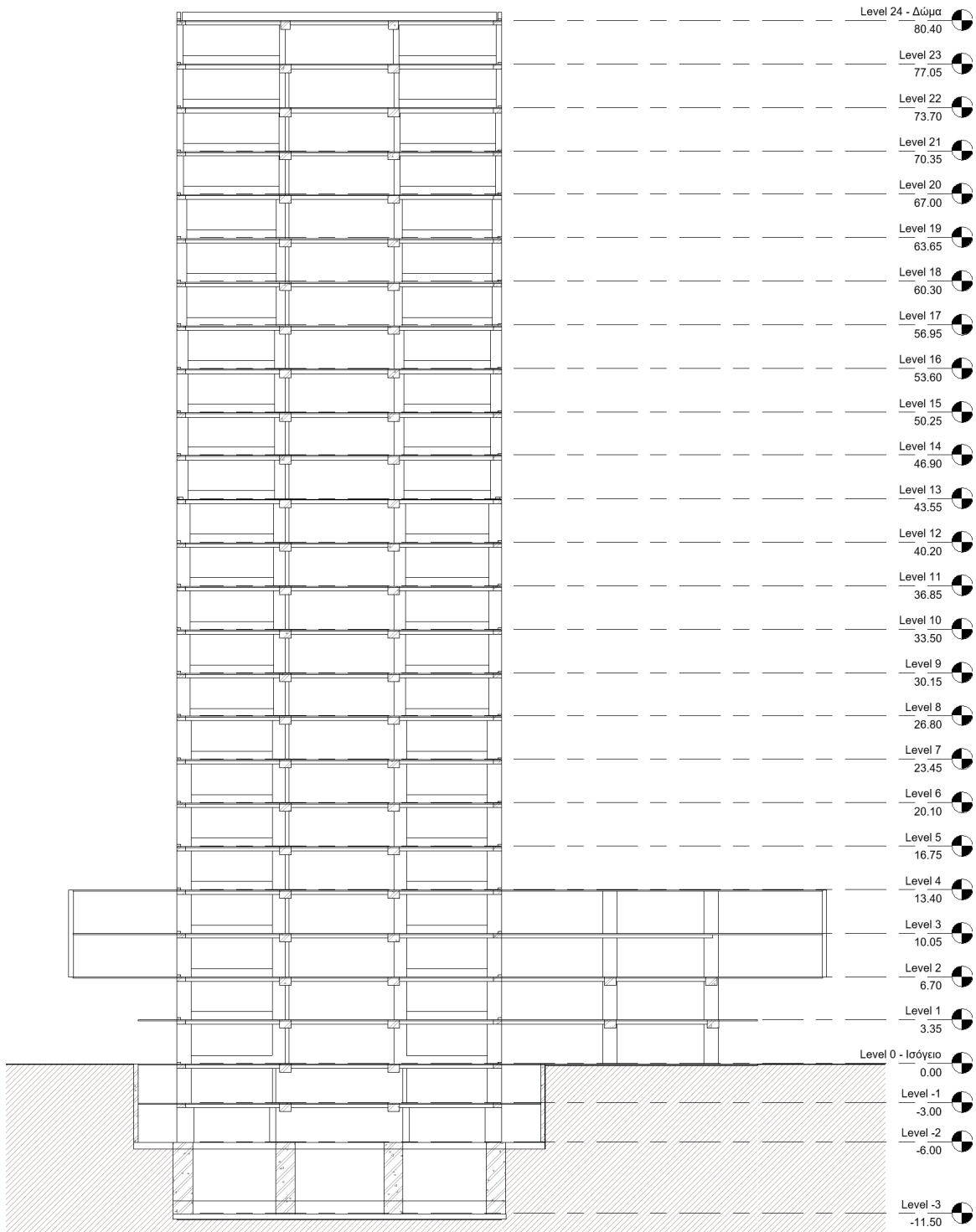
Στις χαμηλότερες στάθμες, και συγκεκριμένα στα επίπεδα του 1^{ου}, 2^{ου}, 3^{ου} και 4^{ου} ορόφου το περίγραμμα της κατασκευής επεκτείνεται και καλύπτει αρκετά μεγαλύτερη επιφάνεια, με πολύ χαρακτηριστική δημιουργία προβόλων, οι οποίοι καλύπτουν όλο το περίγραμμα της κατασκευής και έχουν άνοιγμα 8.30 m. Για την υποστήριξη του επιπλέον τμήματος υπάρχουν επιπλέον 12 υποστυλώματα, τα οποία θεμελιώνονται σε διαφορετική στάθμη σε σχέση με το κεντρικό κτίριο. Στη στάθμη του 22^{ου} ορόφου, το δάπεδο κατασκευάζεται μόνο σε τμήμα αυτού, ώστε να σχηματίζεται ένας χώρος με μεγαλύτερο ελεύθερο ύψος στη στάθμη του 21^{ου} ορόφου (Εικόνα Β.6).



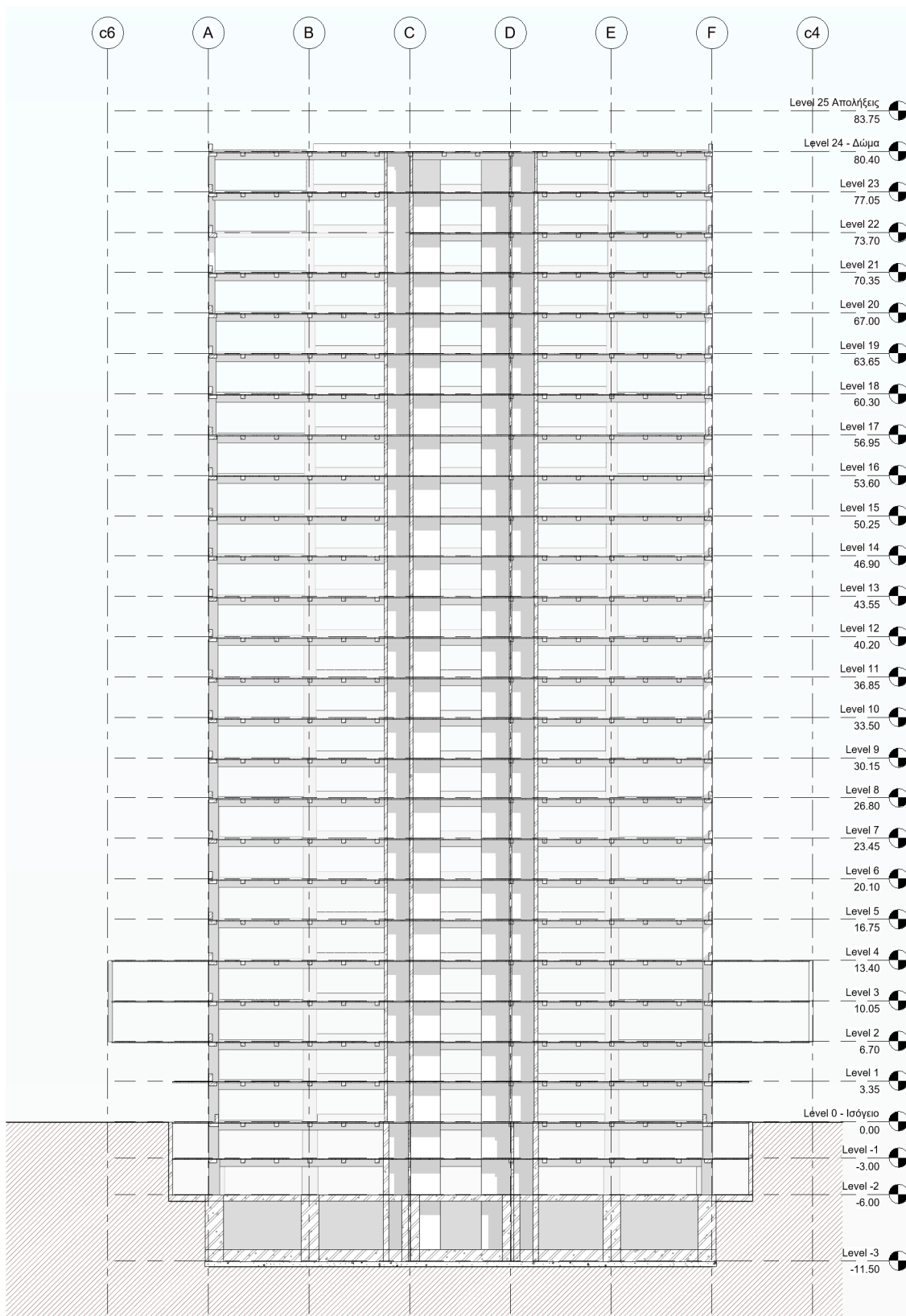
Εικόνα Β.6 21ος Όροφος



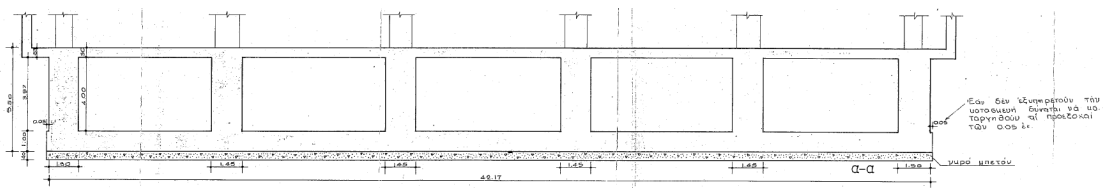
Εικόνα Β.5 Αξονομετρικό Φέροντος Οργανισμού (Προσωπικό αρχείο γράφοντος)



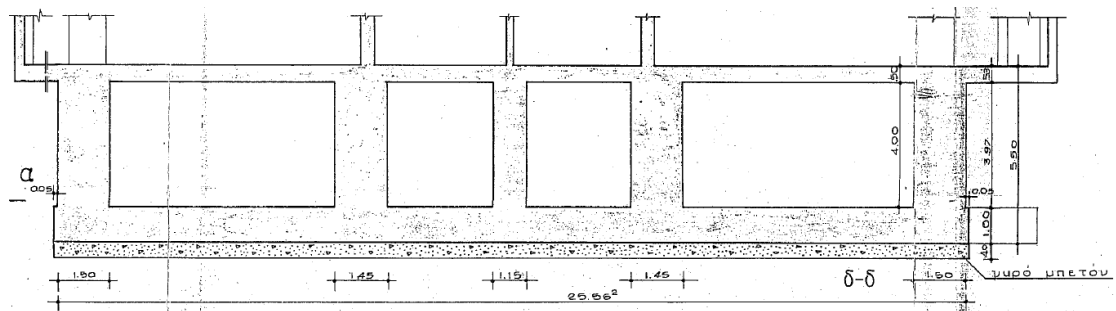
Εικόνα Β.7 Σχηματική τομή 1 (Προσωπικό αρχείο γραφοντος)



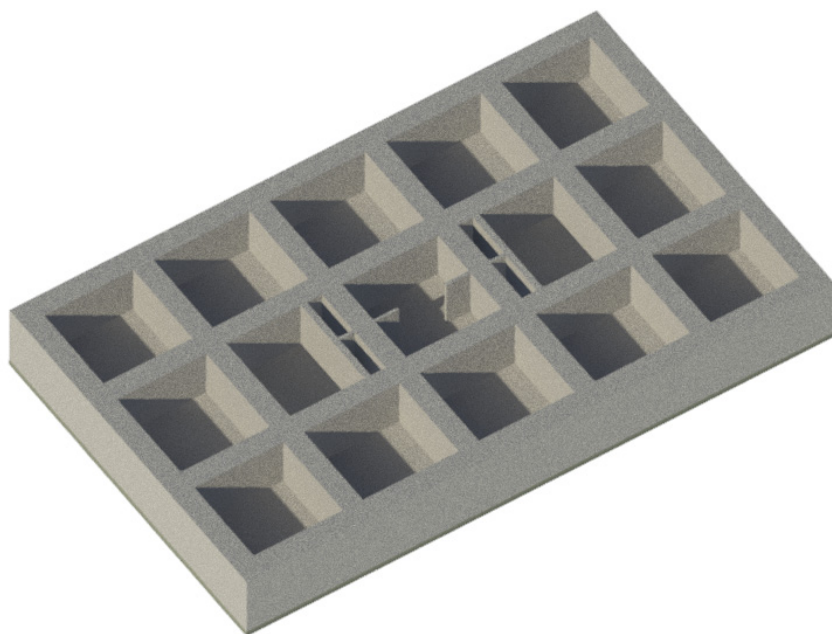
Εικόνα Β.8 Σχηματική τομή 2 (Προσωπικό αρχείο γράφοντος)



Εικόνα Β.9. Τομή θεμελίωσης (στατικά σχέδια οικοδομικής άδειας)



Εικόνα Β.10. Τομή θεμελίωσης (στατικά σχέδια οικοδομικής άδειας)



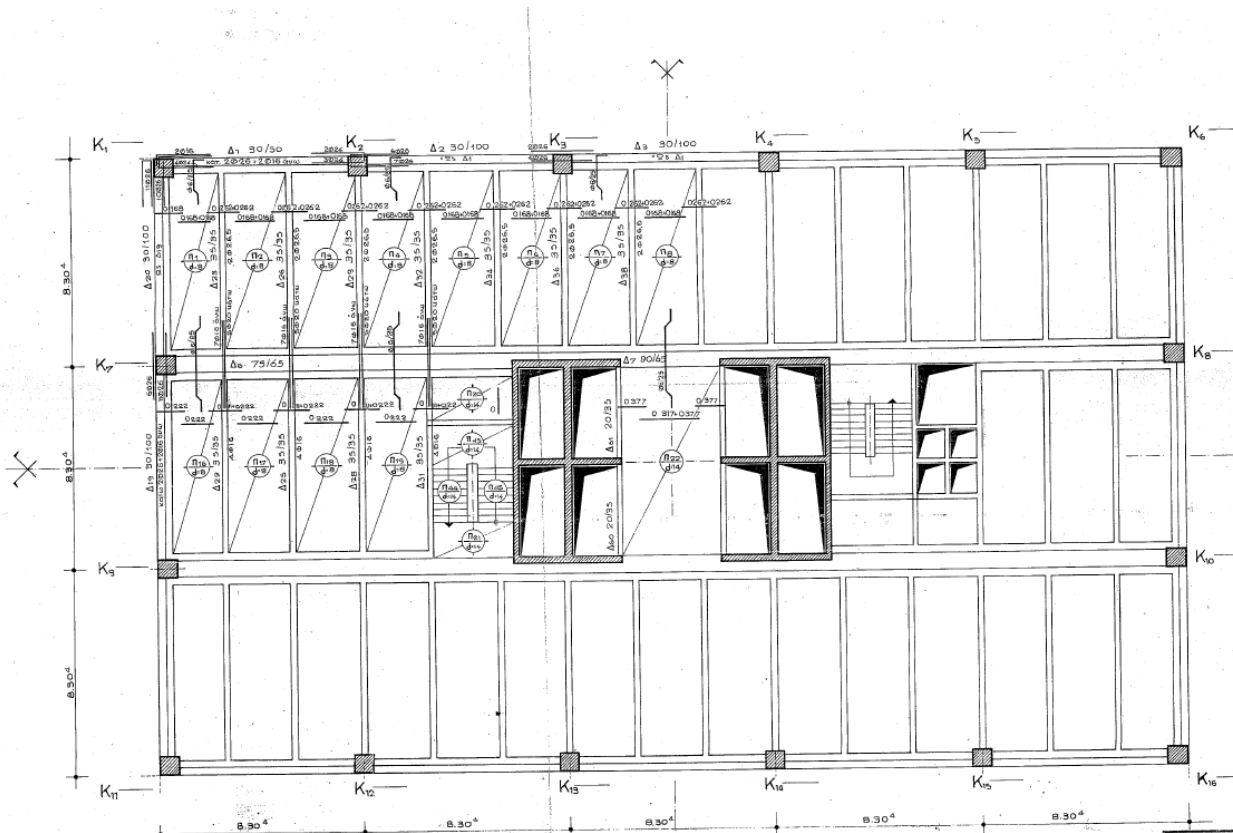
Εικόνα Β.11. 3D Κάτοψη της στάθμης του 3ου υπογείου. (Προσωπικό αρχείο του γράφοντος)



Εικόνα Β.12. Μονοαξονική 3D τομή του φορέα. (Προσωπικό Αρχείο του γράφοντος)



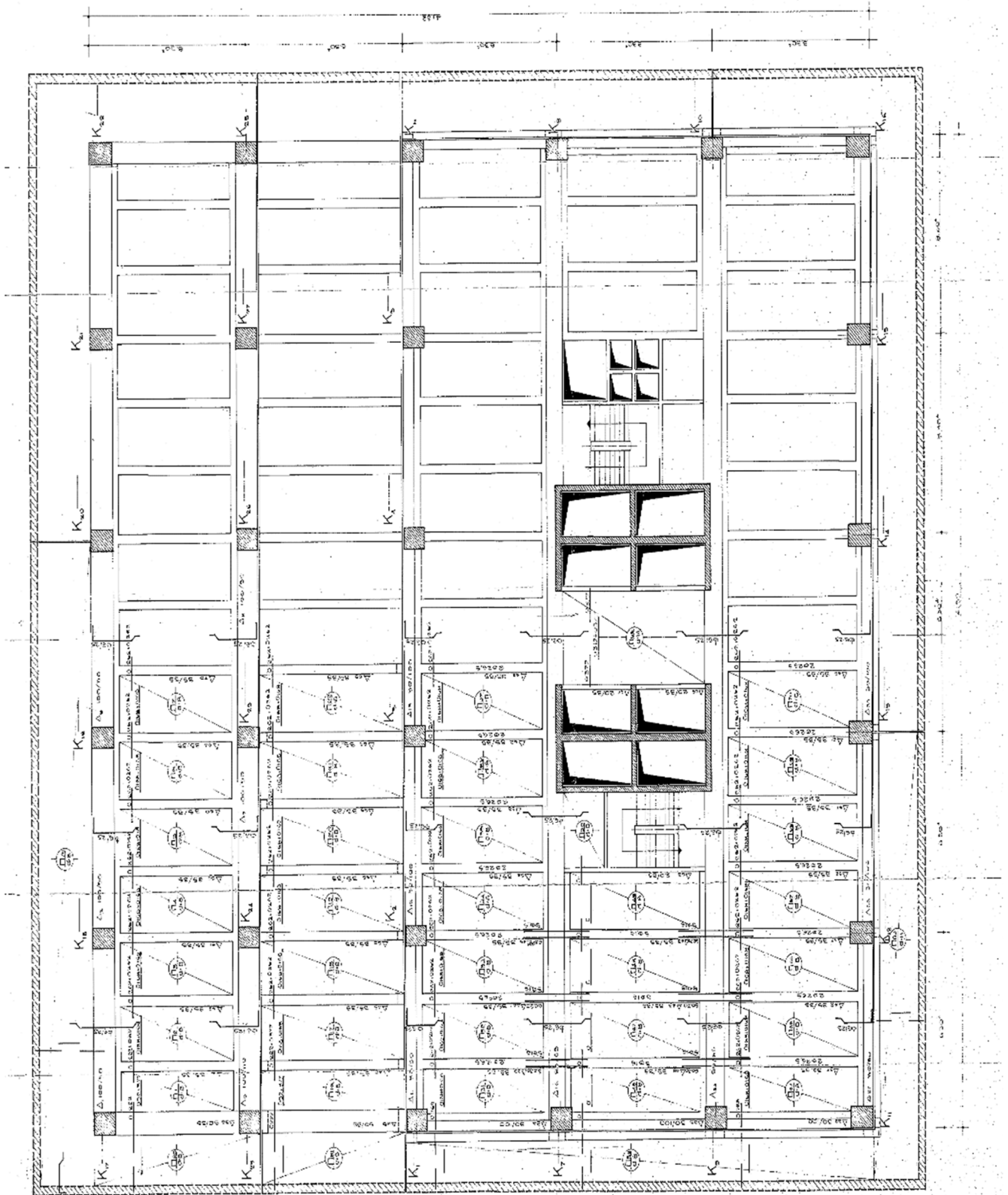
Εικόνα Β.13. Διαξονική 3D τομή του φορέα. (Προσωπικό αρχείο του γράφοντος)



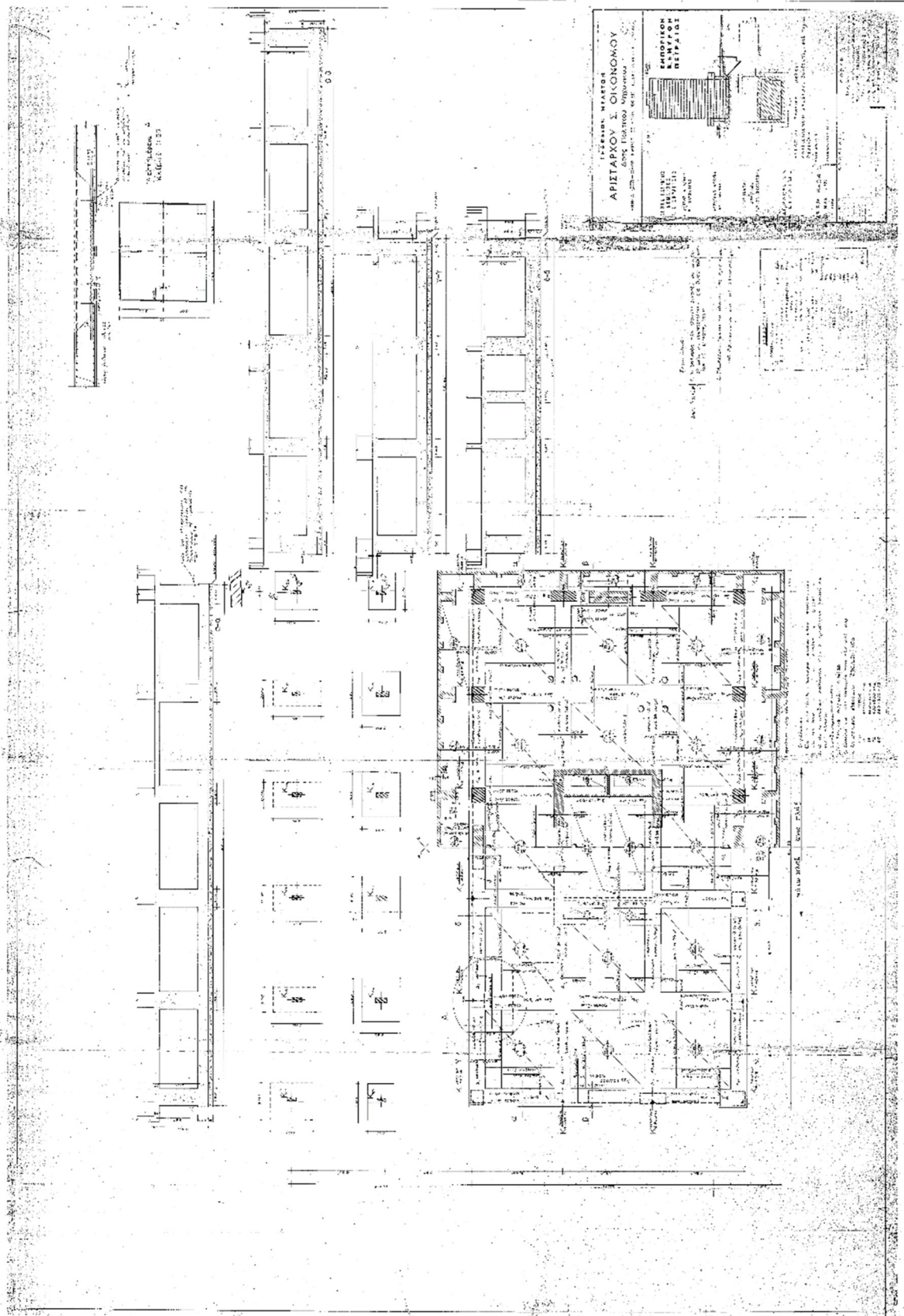
Εικόνα Β.15 Ευλότυπος τυπικού ορόφου, από τα εγκεκριμένα σχέδια της οικοδομικής άδειας

ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΦΟΡΤΙΣΤΟΣ	
1. ΠΟΙΟΤΗΣ ΥΛΙΚΩΝ	
1.1	ΣΚΥΡΟΣΕΜΑ : Β 300
1.2	ΧΑΛΥΨ : ΠΛΑΚΩΝ : St. IV III B
	Δ.Σ.Κ.ΩΝ : St. III B 82/05
	ΣΥΝΔΕΤΗΡΩΝ : St. III B
	ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ : St. III B
2. ΦΟΡΤΙΑ	
2.1	ΙΣΙΑ ΒΑΡΗ : ΣΚΥΡΟΣΕΜΑ $\kappa_1 = 2400 \text{ Kg/m}^2$
	ΟΠΤΟΠΛ. ΔΡΟΜΙΚΗ $\kappa_2 = 210 \text{ Kg/m}^2$
	ΜΠΑΤΙΚΗ $\kappa_3 = 360 \text{ »}$
2.2	ΩΦΕΛ. ΦΟΡΤΙΑ: ΠΛΑΚΩΝ ΟΡΟΦΩΝ $p = 200 \text{ »}$
	ΠΛΑΚΩΣ ΔΩΜΑΤΟΣ $p = 200 \text{ »}$
	ΚΛΙΜΑΚΩΝ $p = 350 \text{ »}$
	ΕΣΩΣΤΩΝ $p = 500 \text{ »}$
2.3	ΕΠΙΚΛΑΥΣΙΣ: ΠΛΑΚΩΝ ΟΡΟΦΩΝ $\kappa_1 = 130 \text{ »}$
	ΠΛΑΚΩΣ ΔΩΜΑΤΟΣ $\kappa_2 = 200 \text{ »}$
	ΚΛΙΜΑΚΩΝ $\kappa_3 = 150 \text{ »}$
	ΕΣΩΣΤΩΝ $\kappa_4 = 130 \text{ »}$
3	ΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ $i = 0.05$

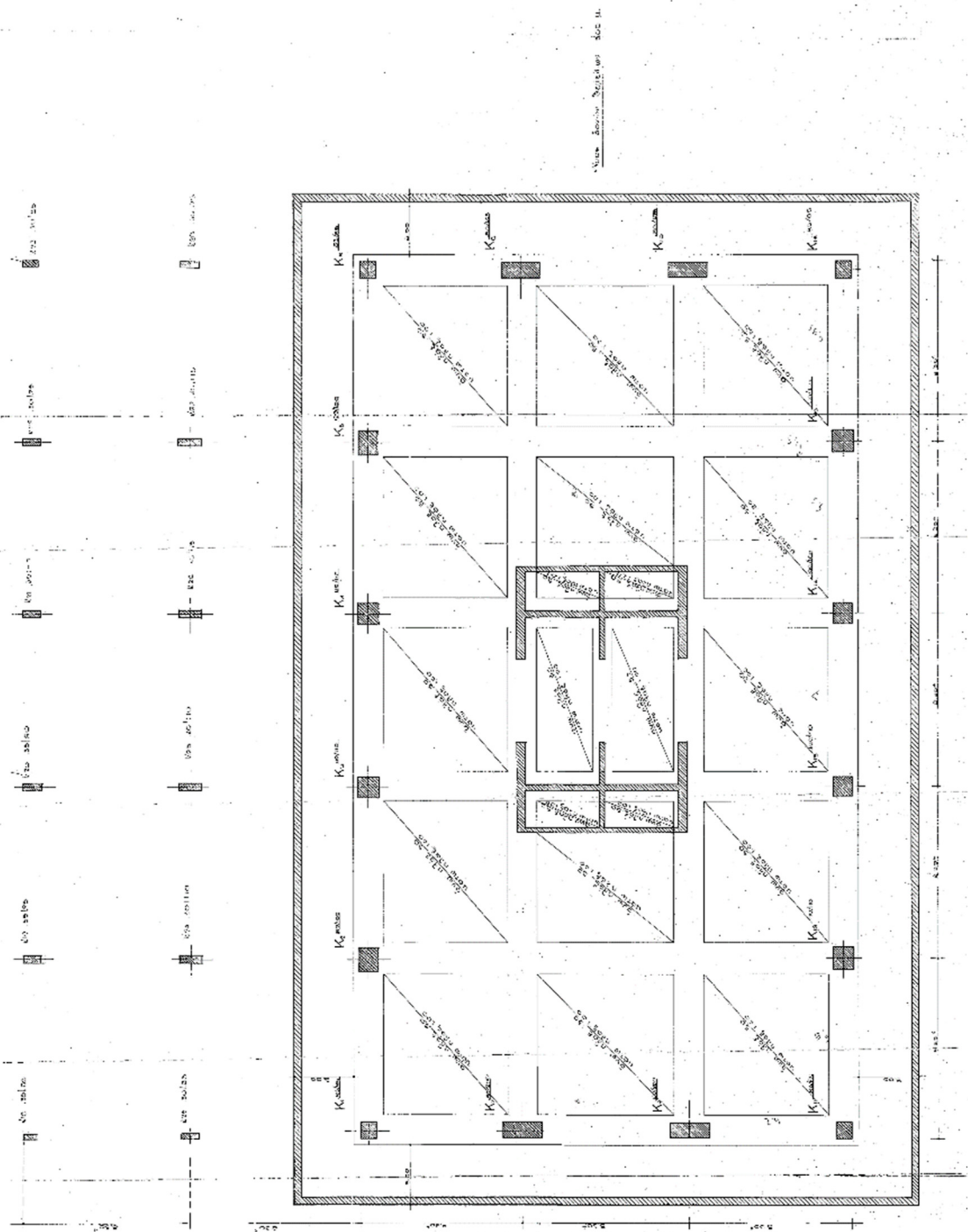
Εικόνα Β.14 Παραδοχές Μελέτης (στατικά σχέδια οικοδομικής άδειας)



Εικόνα Β.17 Ευλότυπος Οροφής Ισογείου



Εικόνα Β.18 Ευλότυπος - Τομές Θεμελίων



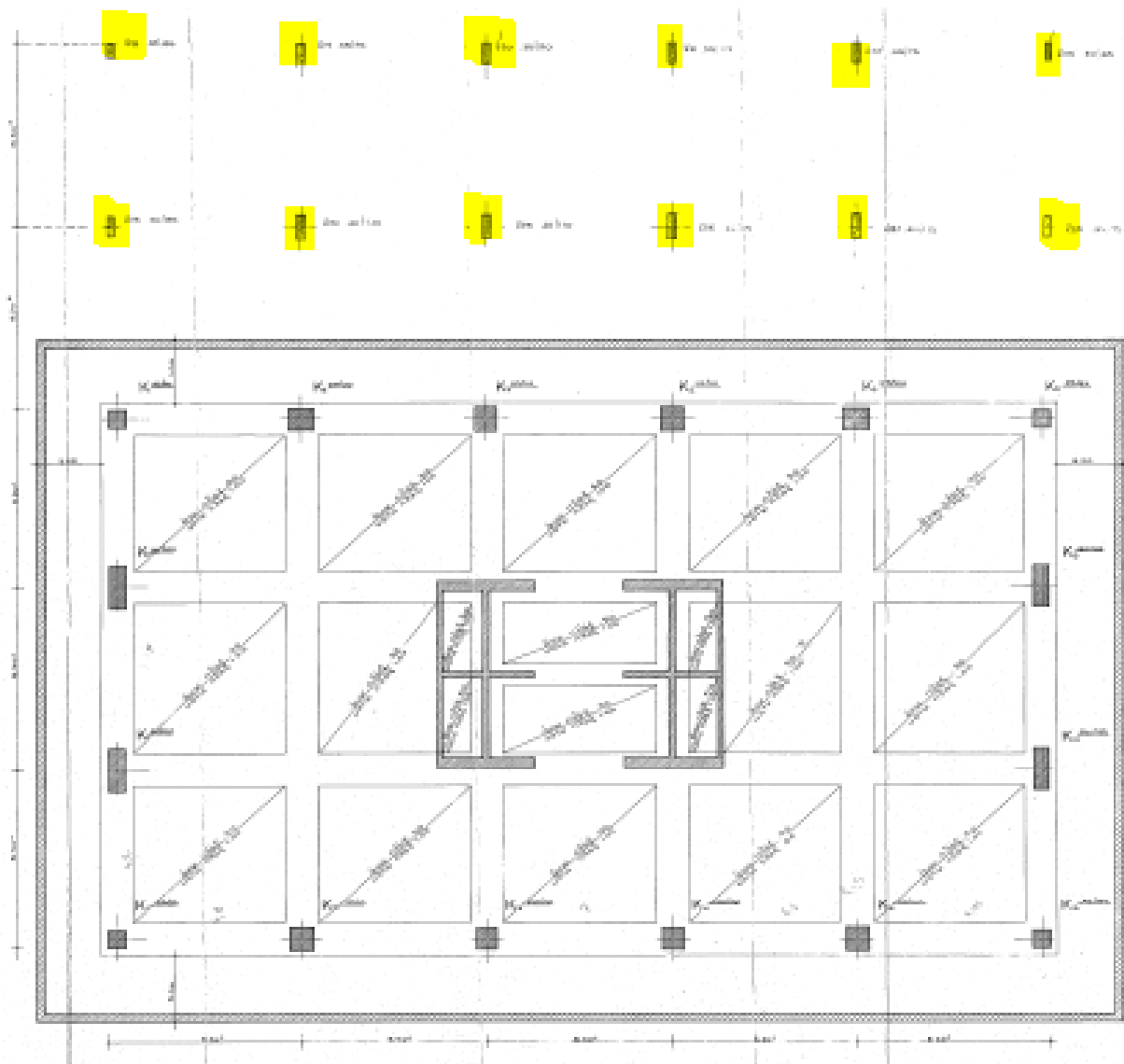
Εικόνα Β.19 Ευλότυπος Θεμελίωσης

Β.2.3. Παραδοχές

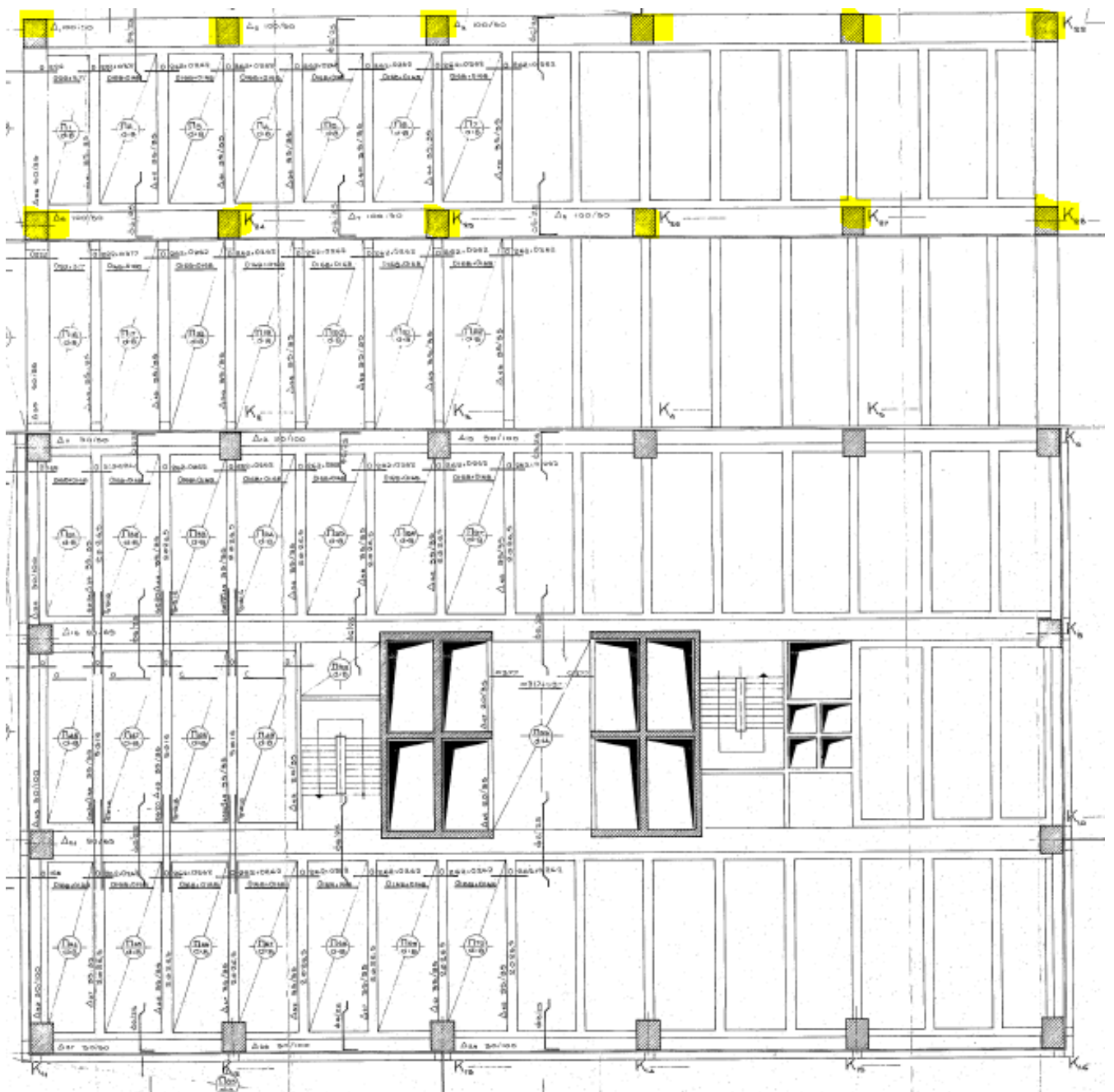
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν περιπτώσεις στα στατικά σχέδια της οικοδομικής άδειας στα οποία παρατηρείται αμφισημία σε ό,τι αφορά τις διαστάσεις δομικών, τον οπλισμό τους και τα λοιπά χαρακτηριστικά τους. Ενδεικτικά αναφέρονται ορισμένα παραδείγματα.

Διατομή υποστυλωμάτων τμήματος διευρυμένης επιφάνειας ορόφων στις χαμηλότερες στάθμες.

Στα επίπεδα του 1^{ου}, 2^{ου}, 3^{ου} και 4^{ου} ορόφου όπου η επιφάνεια διευρύνεται υπάρχουν επιπλέον 12 υποστυλώματα για την υποστήριξη της κατασκευής. Η διατομή των υποστυλωμάτων αυτών επιλέχθηκε κατά παραδοχή, διότι στα σχέδια θεμελίωσης απεικονίζεται διαφορετική διατομή από αυτή του ξυλότυπου οροφής ισογείου. Θεωρήθηκε ότι δεν είναι δυνατόν να αυξάνεται η διατομή καθ' ύψος των στοιχείων αυτών.



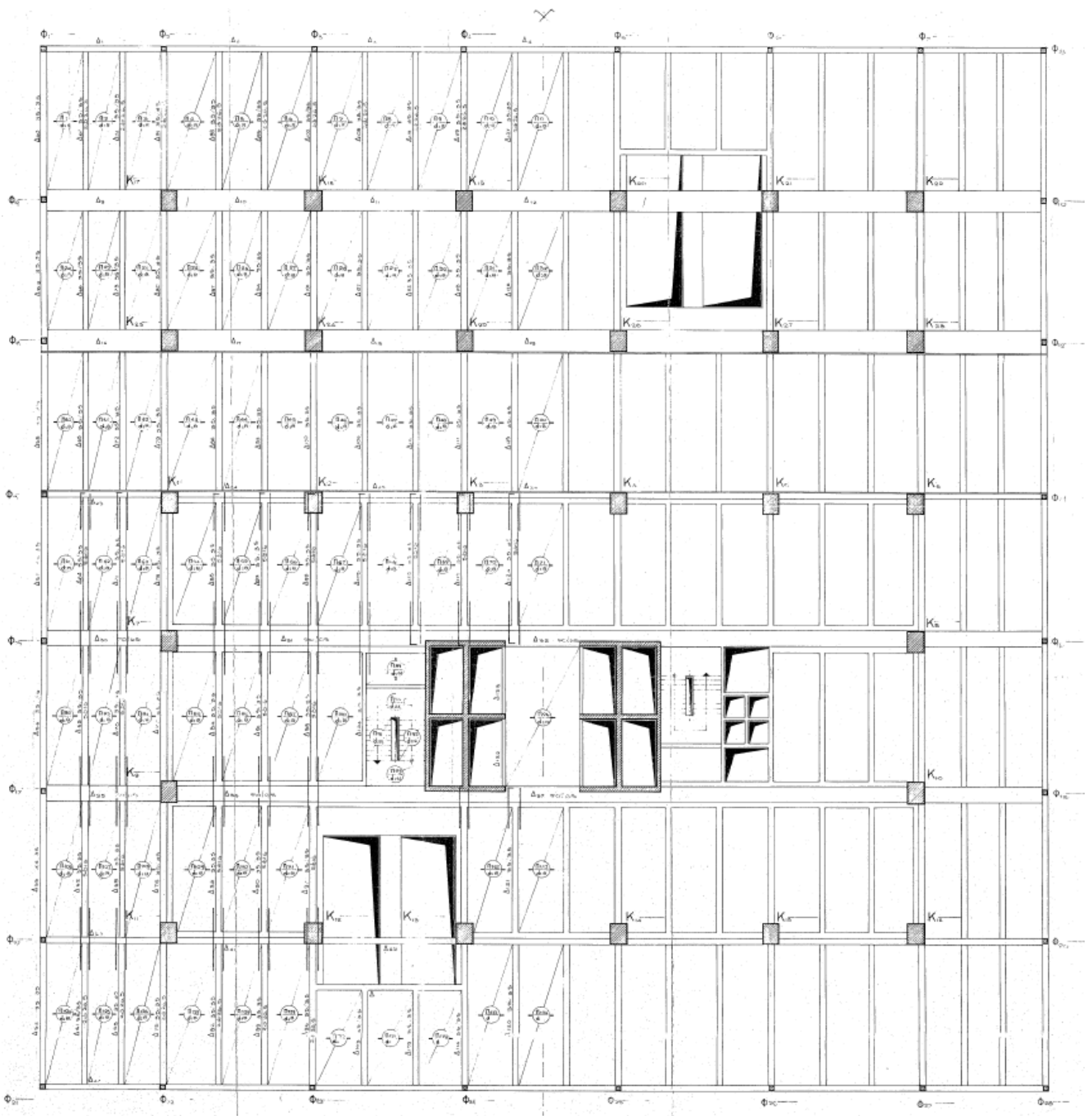
Εικόνα Β.20. Απόσπασμα από τον ξυλότυπο θεμελίωσης της οικοδομικής άδειας.



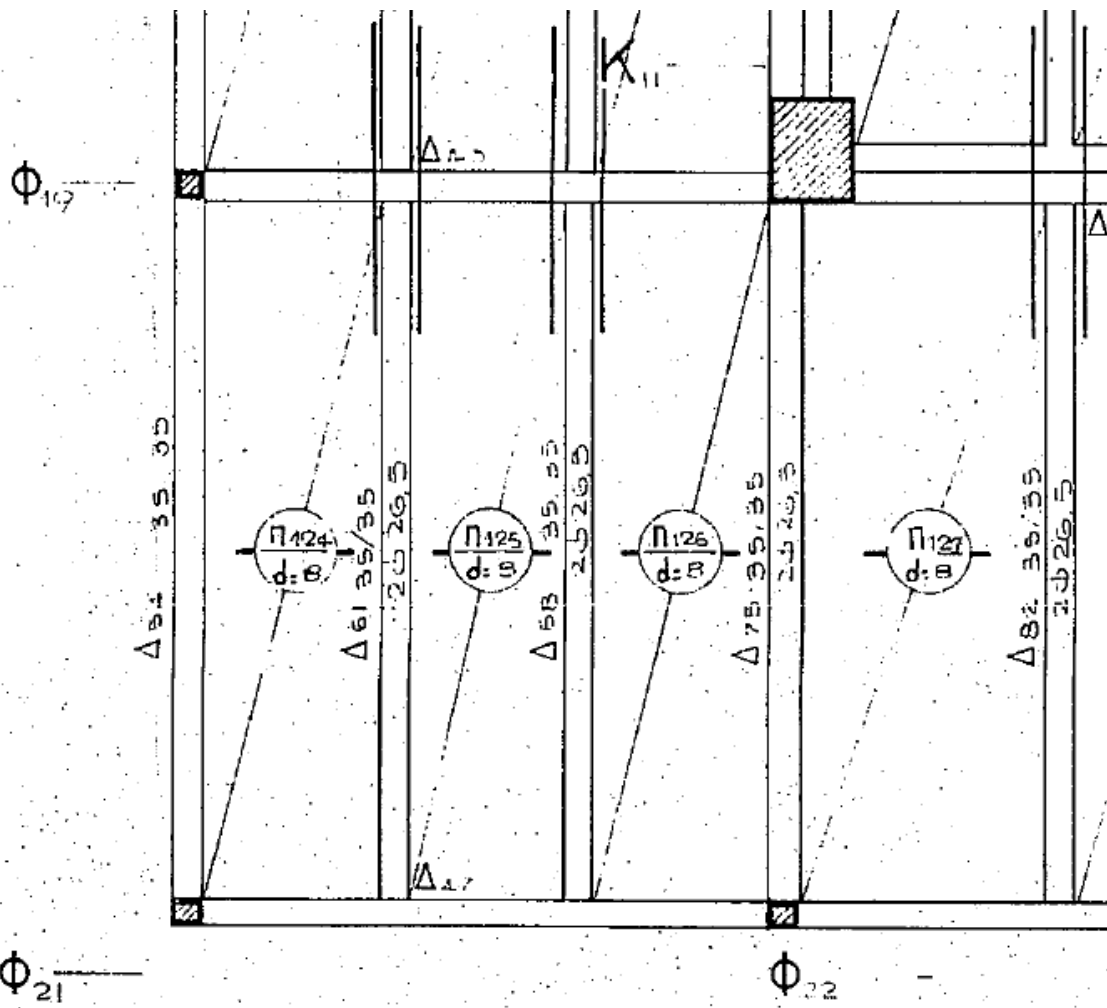
Εικόνα Β.21. Απόσπασμα από τον ξυλότυπο οροφής ισογείου της οικοδομικής άδειας.

Δοκοί και φυτευτά υποστυλώματα τμήματος διευρυμένης επιφάνειας ορόφων στις χαμηλότερες στάθμες

Στον ξυλότυπο οροφής τυπικού ορόφου για την 3^η και 4^η στάθμη (Εικόνα Β.22 και Εικόνα Β.23), όπου διαμορφώνεται μία ζώνη – πρόβολος περιμετρικά σε όλο το περίγραμμα της κάτοψης, απεικονίζονται φυτευτά υποστυλώματα και δοκοί, των οποίων η διατομή μετρούμενη βάση κλίμακας σχεδίασης (καθώς δεν αναγράφεται αριθμητικά) προκύπτει 35x35 εκ. Ωστόσο ή κατασκευή είναι αδύνατον να υλοποιήθηκε στις διαστάσεις αυτές, αφού για τα μόνιμα φορτία μόνον απαιτείται οπλισμός που υπερβαίνει τα υλοποιήσιμα όρια. Όπως εξηγείται και παρακάτω στην παρούσα εργασία, οι διατομές των στοιχείων αυτών προσαρμόστηκαν έτσι ώστε να μην προκαλούν προβλήματα αριθμητικών ασταθειών κατά την εκτέλεση αναλύσεων, δίχως ωστόσο να επιχειρηθεί η επαρκής διαστασιολόγηση αυτών.



Εικόνα Β.22. Ξυλότυπος οροφής 3ης και 4ης στάθμης από τα στατικά της οικοδομικής άδειας.



Εικόνα Β.23. Εστίαση στην κάτω αριστερή γωνία της υπερκείμενης εικόνας

Κεφάλαιο Γ.

Ανάλυση του υφιστάμενου φορέα υποβαλλόμενου στα φορτία μελέτης του

Γ.1. Μέθοδος ανάλυσης

Προκειμένου να επιβεβαιωθεί ότι τα στοιχεία που εμφανίζονται στα σχέδια της οικοδομικής άδειας έχουν πράγματι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που απεικονίζονται³, καθώς και να επιβεβαιωθεί ότι οι παραδοχές που έγιναν για τα στοιχεία για τα οποία δεν υπήρχαν δεδομένα, εκτελείται **ανάλυση ισοδύναμης στατικής φόρτισης**. Η ένταση της οριζόντιας φόρτισης υπολογίζεται κατά τις διατάξεις του κανονισμού που ίσχυε κατά την ανέγερση του κτιρίου (Α.Κ. '59)⁴.

Γ.2. Θεωρητικό υπόβαθρο της ανάλυσης

Γ.2.1. Περιγραφή της μεθόδου

Στο στατικό προσομοίωμα, εκτός από τα κατακόρυφα φορτία επιβάλλονται οριζόντια φορτία, στα κέντρα βάρους του κάθε διαφράγματος. Ο προσδιορισμός των φορτίων αυτών μπορεί να γίνει με διάφορες κατανομές της σεισμικής τέμνουσας (ορθογωνική, τριγωνική, ιδιομορφική) και σε κάθε περίπτωση λαμβάνεται υπόψη η μάζα του κάθε διαφράγματος. Οι δυνάμεις επιβάλλονται στις δυο διευθύνσεις (X και Y) ξεχωριστά και προκύπτουν οι περιβάλλουσες των εντατικών μεγεθών των μελών του φορέα. Οι τιμές των εντατικών μεγεθών επαλληλίζονται με αυτές της στατικής φόρτισης για τα μόνιμα και κινητά φορτία.

³ Για κάποια στοιχεία οι πληροφορίες που λαμβάνονταν από τους ξυλότυπους ήταν αμφίσημες, όπως για παράδειγμα οι διατομές των υποστυλωμάτων του τμήματος διευρυμένης επιφάνειας ορόφων στις χαμηλότερες στάθμες.

⁴ Β.Δ. 26/19 - 2 -1959 (ΦΕΚ 36Α / 26-2-1959)

Για τα τελικά μεγέθη εκτελείται έλεγχος επάρκειας των διαστάσεων και των οπλισμών των στοιχείων.

Η μέθοδος πλεονεκτεί ως προς την απλότητά της. Δεν απαιτεί απαραίτητα την εκτέλεση δυναμικών/ιδιομορφικών αναλύσεων⁵, με αποτέλεσμα να έχει ελάχιστη απαίτηση σε υπολογιστική ισχύ.

Ωστόσο η μέθοδος ενέχει σημαντικά μειονεκτήματα. Το πεδίο εφαρμογής της περιορίζεται σε κατασκευές των οποίων οι πρώτες ιδιομορφές είναι μεταφορικές και συγκεντρώνουν μεγάλο ποσοστό ενεργοποιούμενης μάζας. Επιπροσθέτως, αγνοείται η (έστω μικρή) επιρροή που έχουν οι ανώτερες ιδιομορφές στον τρόπο ταλάντωσης της κατασκευής.

Γ.2.2. Σύντομο ιστορικό

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι την περίοδο ανέγερσης της κατασκευής ήταν υπολογιστικά αδύνατον να χρησιμοποιηθεί ένα χωρικό προσομοίωμα της κατασκευής και η επίλυση γινόταν τμηματικά και με παραδοχές. Για παράδειγμα, οι δοκοί επιλύονταν ανεξάρτητα ως δοκοί πολλών ανοιγμάτων, με παραδοχές για τις διάφορες στηρίξεις. Επίσης, σε ό,τι αφορά τους ελέγχους επάρκειας, αυτοί δεν γίνονταν σε όρους οριακών καταστάσεων αστοχίας αλλά οριακών τιμών για τις τάσεις.

⁵ Ωστόσο για εφαρμογή των σύγχρονων κανονισμών όπως ΕΑΚ ή EC8 απαιτείται ιδιομορφική ανάλυση για τον έλεγχο εφαρμοσιμότητας της μεθόδου, τον προσδιορισμό της περιόδου ταλάντωσης των δεσποζουσών ιδιομορφών ανά διεύθυνση και την ιδιομορφική κατανομή των δυνάμεων στα διαφράγματα.

Άρθρον 6:

1. Διὰ τὸν ἀντισεισμικὸν ὑπολογισμὸν τῶν φερόντων στοιχείων θὰ ἐφαρμόζηται ἡ ἀκριβὴς Ἑλληνικὴ μέθοδος ὑπολογισμοῦ ἢ μία τῶν εὐρέως παραδεδεγμένων ἄλλων ἐπιστημονικῶν μεθόδων.

2. Ἐπὶ περιπτώσεων συνήθων οἰκοδομικῶν ἔργων ἐπιτρέπεται ὅπως διὰ τὴν ἀνάλειπιν φέροντος ὀργανισμοῦ ἐκ τοιχωμάτων διατομῶν L,T,I κλπ. (σχ. I) αἱ διατομαὶ αὗται ὑποκαθίστανται ὑπὸ τοιούτων ὀρθογωνικῶν.

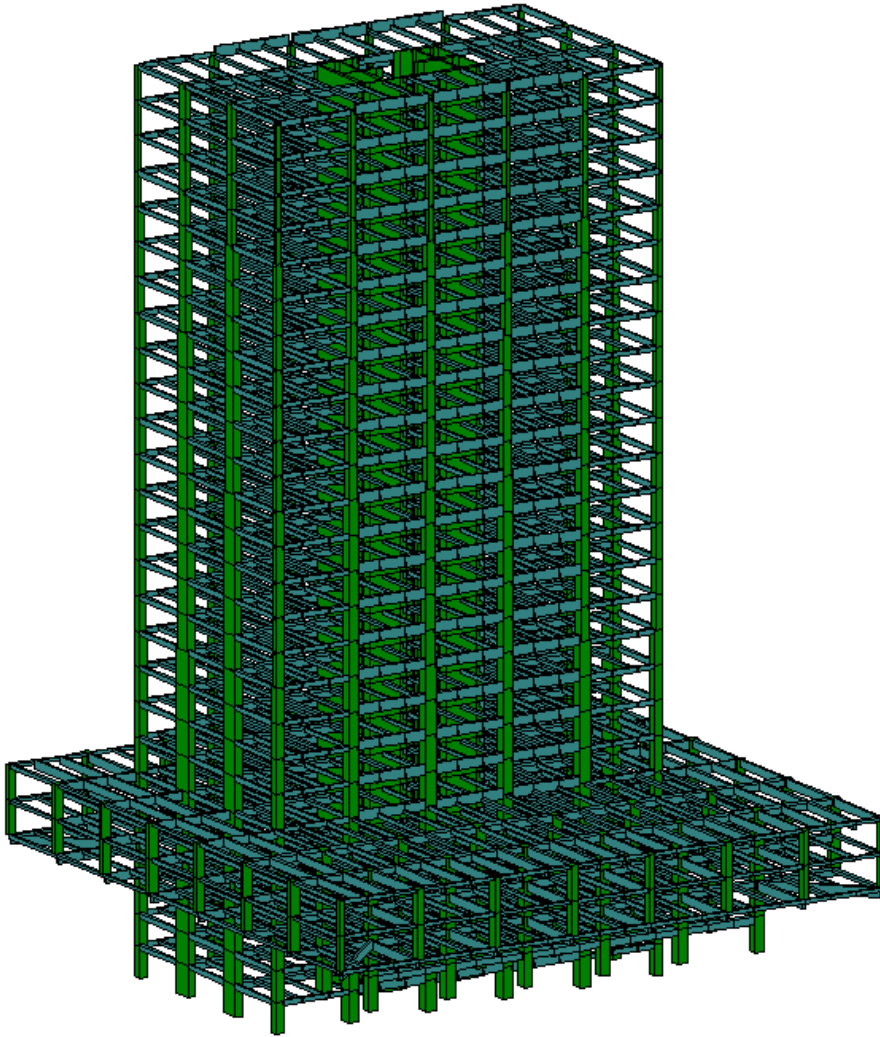
3. α) Ἐπὶ οἰκοδομῶν μετὰ φέροντος σκελετοῦ ἐξ ὠπλισμένου σκυροδέματος ἕκαστον τῶν ἐπὶ τοῦ πολυγώνου τῆς περιμετρικῆς στηρίξεως φερόντων στοιχείων, κατακορύφων καὶ ὀριζοντίων, θὰ ἐλέγχεται, ἀφ' ἑνὸς μὲν βάσει τῶν ἐξαγομῶν τοῦ κατὰ τὴν ἀκριβῆ μέθοδου κανονικοῦ ἀντισεισμικοῦ ὑπολο-

Εἰκόνα Γ.1 Απόσπασμα ἀπὸ τον Α.Κ. '59

Ἐννοιες ὅπως ἡ πλαστιμότητα, οἱ πλαστικὲς ἀρθρώσεις καὶ οἱ στάθμες ἐπιτελεστικότητας δὲν ὑπῆρχαν στα κανονιστικὰ κείμενα ἐκείνης τῆς ἐποχῆς, με ἀποτέλεσμα οἱ κατασκευὲς νὰ σχεδιάζονται ἐλαστικά.

Γ.3. Στατικό προσομοίωμα

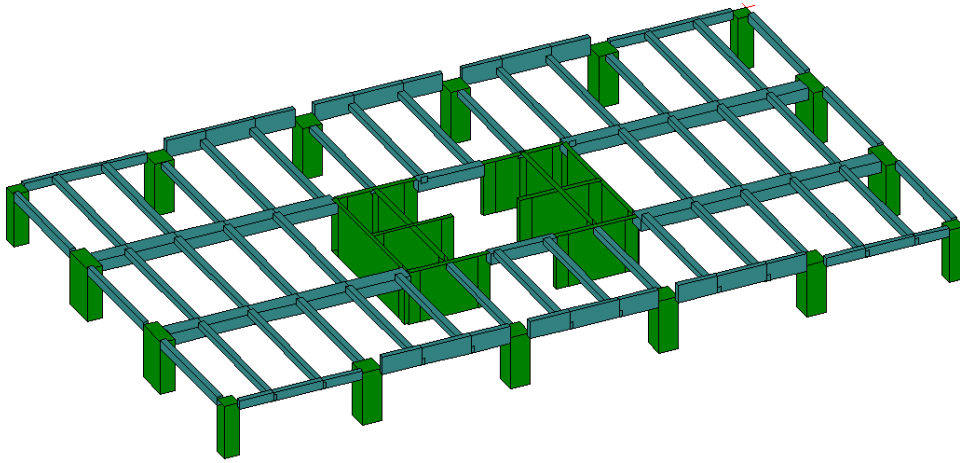
Για την εκτέλεση της ανάλυσης με ισοδύναμη στατική φόρτιση ο φορέας προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα ΡΑΦ.



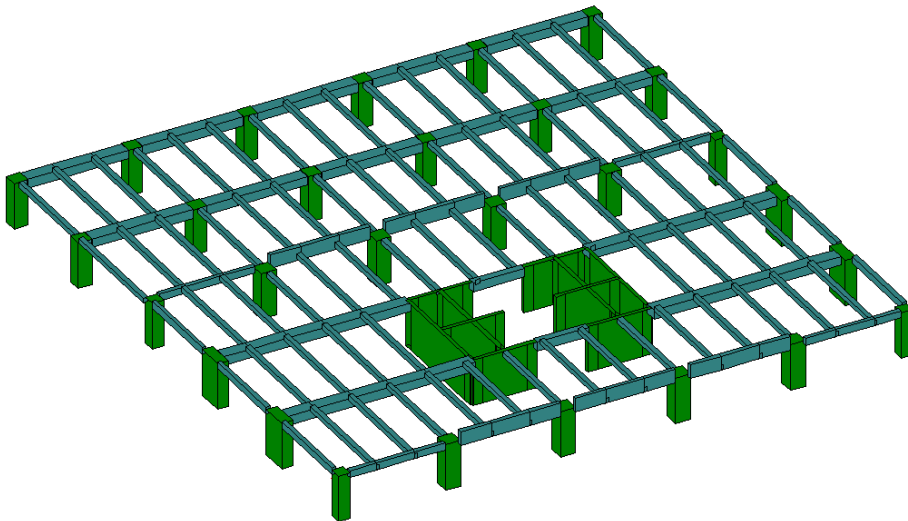
Εικόνα Γ.2 Χωρικό Προσομοίωμα Κατασκευής (ΡΑΦ)

Γ.3.1. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

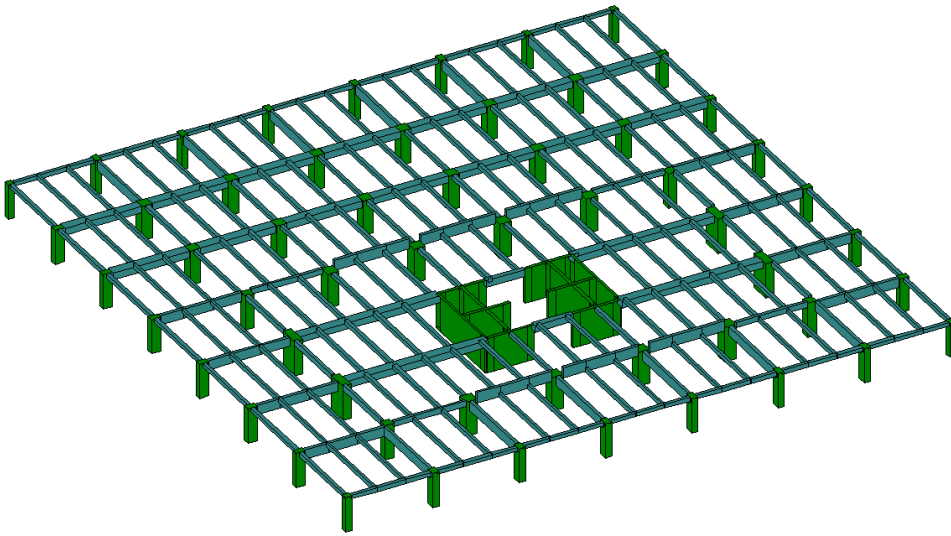
Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται τα δομικά στοιχεία των διαφόρων σταθμών του κτιρίου.



Εικόνα Γ.3 Τυπική μορφή στάθμης



Εικόνα Γ.4. Στάθμη 1 (Οροφή Ισογείου)



Εικόνα Γ.5. Στάθμες 2, 3, 4

Πίνακας Γ.1 Διατομές Υποστυλωμάτων Στάθμης -1

Θέση	Διατομή (cm)	Οπλισμός
Γωνιακά	130/130	32Φ18
Μεγάλη Πλευρά	130/130	40Φ18
Μικρή Πλευρά	240/90	90Φ18

Πίνακας Γ.2 Διατομές Τοιχωμάτων

Διεύθυνση μεγάλης πλευράς	Διατομή (cm)	Οπλισμός
X	460/30	Πλέγμα Φ10/15 στις δύο πλευρές
Y, εσωτερικά τοιχώματα	830/30	
Y, εξωτερικά τοιχώματα	830/25	

Πίνακας Γ.3 Διατομές Δοκών Πύργου

Θέση	Περιγραφή	Διατομή (cm)	Οπλισμός
Περιμετρικά	Μεγάλη πλευρά, ενδιάμεσα	Διατομή L Ύψος: 100 Πλάτος: 65 Πάχος κορμού: 30 Πάχος πέλματος: 35	8Φ20 άνω 8Φ20 κάτω 12Φ12 ενδιάμεσα

Θέση	Περιγραφή	Διατομή (cm)	Οπλισμός
		<i>Η πλάκα ενώνεται με το πάνω μέρος του πέλματος.</i>	
	Μικρή πλευρά καθώς και άκρα μεγάλης πλευράς	<u>Διατομή L</u> Ύψος: 50 Πλάτος: 65 Πάχος κορμού: 30 Πάχος πέλματος: 35 <i>Η πλάκα ενώνεται με το πάνω μέρος του πέλματος.</i>	4Φ20 άνω 4Φ20 κάτω 6Φ12 ενδιάμεσα
Εσωτερικά	Μεγάλη πλευρά	65/90 γενικά 65/50 στη σύζευξη των τοιχωμάτων	15Φ24 άνω 15Φ24 κάτω 6Φ12 ενδιάμεσα
	Μικρή πλευρά	35/35	6Φ20 άνω 6Φ20 κάτω 4Φ12 ενδιάμεσα

Πίνακας Γ.4 Διατομές Υποστυλωμάτων Στάθμης 1ου Υπογείου

Θέση	Διατομή (cm)	Οπλισμός
Γωνιακά	85/85	32Φ18
Μεγάλη Πλευρά	120/110	40Φ18
Μικρή Πλευρά	200/80	70Φ18

Τα υπόλοιπα στοιχεία μένουν αμετάβλητα

Πίνακας Γ.5 Διατομές Υποστυλωμάτων Ζώνης 1 (στάθμες 1 έως 8)

Θέση	Διατομή (cm)	Οπλισμός
Γωνιακά	85/85	32Φ18
Μεγάλη Πλευρά	110/110	40Φ18
Μικρή Πλευρά	200/80	70Φ18

Πίνακας Γ.6 Διατομές Υποστυλωμάτων Ζώνης 2 (στάθμες 9 έως 13)

Θέση	Διατομή (cm)	Οπλισμός
Γωνιακά	75/75	24Φ18
Μεγάλη Πλευρά	100/100	40Φ18
Μικρή Πλευρά	180/75	60Φ18

Πίνακας Γ.7 Διατομές Υποστυλωμάτων Ζώνης 3 (στάθμες 14 έως 17)

Θέση	Διατομή (cm)	Οπλισμός
Γωνιακά	70/70	20Φ18
Μεγάλη Πλευρά	90/85	30Φ18
Μικρή Πλευρά	160/70	54Φ18

Πίνακας Γ.8 Διατομές Υποστυλωμάτων Ζώνης 4 (στάθμες 18 έως 20)

Θέση	Διατομή (cm)	Οπλισμός
Γωνιακά	60/60	16Φ18
Μεγάλη Πλευρά	85/75	26Φ18
Μικρή Πλευρά	135/60	40Φ18

Πίνακας Γ.9 Διατομές Υποστυλωμάτων Ζώνης 5 (στάθμες 21 έως 24)

Θέση	Διατομή (cm)	Οπλισμός
Γωνιακά	40/40	14Φ18
Μεγάλη Πλευρά	65/50	16Φ18
Μικρή Πλευρά	95/50	26Φ18

Στις στάθμες 1, 2, 3, 4, τα επιπλέον υποστυλώματα έχουν διατομή 100/100 και οπλισμό 28Φ18. Τα φυτευτά υποστυλώματα έχουν διατομή 90/60 και οπλισμό 18Φ18, εκτός από τα γωνιακά φυτευτά που έχουν διατομή 60/60 και οπλισμό 20Φ18. Οι δοκοί που συνδέονται με τα φυτευτά υποστυλώματα έχουν διατομή 60/30 και συνολικό οπλισμό 12Φ18 κατανεμημένο άνω και κάτω, ενώ οι λοιπές δοκοί έχουν διατομές 35/35, 65/90, και διατάξεις όπως στην υπόλοιπη κατασκευή (Πίνακας Γ.3).

Όλες οι πλάκες έχουν πάχος 8 cm.

Γ.3.2. Φορτία και υλικά

Τα φορτία καθώς και οι τιμές αντοχής των υλικών ελήφθησαν από τα αναγραφόμενα στις παραδοχές της μελέτης (Εικόνα Β.14 Παραδοχές Μελέτης).

Μέγεθος	Τιμή
Μόνιμο φορτίο πλακών	1.30 KN/m ²
Μόνιμο φορτίο κλιμάκων	1.30 KN/m ²

Κινητό φορτίο πλακών	1.50 KN/m^2
Κινητό φορτίο κλιμάκων	3.50 KN/m^2
Ποιότητα Σκυροδέματος	<p style="text-align: center;">B300</p> $f_{ck} = 25000 \text{ KPa}$ $f_{cm} = 33000 \text{ KPa}$ $w = 25.0 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}$ $E = 3.10 \cdot 10^7 \text{ KPa}$
Ποιότητα Χάλυβα Οπλισμού (Διαμήκη & Συνδετήρων)	<p style="text-align: center;">Stahl III</p> $f_{yk} = 410000 \text{ KPa}$ $f_{ym} = 450000 \text{ KPa}$ $w = 78.50 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}$ $E = 2.00 \cdot 10^8 \text{ KPa}$

Γ.3.3. Λεπτομέρειες προσομοίωσης

Στο λογισμικό ΡΑΦ οι πλάκες επιλύονται ανεξάρτητα από τον υπόλοιπο φορέα με τη μέθοδο RIEPER-MARTENS. Έπειτα καθορίζονται οι επιφάνειες φόρτισης σύμφωνα με τις συνθήκες στήριξης τους και μεταβιβάζονται τα φορτία τους στις δοκούς. Τα τοιχώματα προσομοιώνονται ως γραμμικά στοιχεία και η συρραφή τους επιτυγχάνεται με πλασματικές πλήρως άκαμπτες ράβδους, οι οποίες συνδέουν τους κόμβους αρχής και τέλους αυτών σε κάθε στάθμη, προκειμένου να προσομοιωθεί το κυψελωτό σχήμα των πυρήνων.

Γ.3.4. Κανονιστικά μεγέθη

ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Θεωρείται ότι η αποτίμηση της κατασκευής γίνεται με «ικανοποιητική στάθμη αξιοπιστίας δεδομένων»⁶, επομένως οι συντελεστές ασφαλείας είναι $\gamma_c = 1.30$, $\gamma_s = 1.15$. Για την επιλογή κατηγορίας συντελεστή γ_{sd} θεωρείται ότι ο φορέας είναι «χωρίς βλάβες και χωρίς επεμβάσεις» $\rightarrow \gamma_{sd} = 1.00$. Τα αδρανειακά χαρακτηριστικά των διατομών απομειώνονται,

⁶ Επιλέχθηκε αυτή η τιμή, ωστόσο αναγνωρίζεται ότι για την επίτευξη αυτής της στάθμης αξιοπιστίας προηγούνται

ανάλογα με τον τύπο και τη θέση του κάθε στοιχείου, σύμφωνα με τον πίνακα Σ.4.1. του κανονισμού.

A.K. '59

Σύμφωνα με τις διατάξεις του A.K. '59, ο υπολογισμός της οριζόντιας δύναμης προκύπτει από το κατακόρυφο φορτίο του κάθε ορόφου N_{zi} (που προκύπτει από μόνιμα $G+$ κινητά Q), πολλαπλασιασμένη με έναν σεισμικό συντελεστή ε :

$$H_{zi} = \varepsilon \cdot N_{zi} \quad (1)$$

Για την επιλογή του σεισμικού συντελεστή ε θεωρείται κατηγορία σημαντικότητας I (Ασθενώς σεισμόπληκτες περιοχές), σεισμική επικινδυνότητα εδάφους α (εδάφη μικράς σεισμικής επικινδυνότητας), σπουδαιότητα κτιρίου συνήθης.

$$\varepsilon = 0.04$$

Γ.3.5. Εκτελούμενοι έλεγχοι

Με τον προσδιορισμό των περιβαλλουσών των εντατικών μεγεθών για κάθε στοιχείο, και με δεδομένα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τις διατάξεις όπλισης των διατομών, συγκρίνονται οι δράσεις με τις αντοχές και κρίνεται η επάρκεια ή όχι των στοιχείων. Οι δοκοί ελέγχονται σε κάμψη σε μία διεύθυνση, διάτμηση σε μία διεύθυνση και στρέψη, ενώ τα υποστυλώματα και τα τοιχία σε διαξονική κάμψη και διάτμηση. Δεν εκτελούνται έλεγχοι που εισήχθησαν με νεότερα κανονιστικά πλαίσια, όπως ο έλεγχος περισφιγξης, οι ικανοτικοί έλεγχοι και ο έλεγχος ανηγμένης αξονικής δύναμης, μεταξύ άλλων. Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι οι έλεγχοι αυτοί γίνονται με βάση την ισχύουσα σήμερα μεθοδολογία και γνώση (σε όρους οριακής κατάστασης αστοχίας), με τις σχέσεις του EC2.

Γ.4. Αποτελέσματα της ανάλυσης

Κατανομή οριζόντιων δυνάμεων

Στάθμη	<i>Nzi</i>	<i>Hzi</i>
-1	7834.76	313.39
0	7927.07	317.08
1	8220.78	328.83
2	23740.40	949.61
3	23555.67	942.23
4	23810.24	952.41
5	8021.24	320.85
6	8021.24	320.85
7	8021.24	320.85
8	7882.24	315.29
9	7758.14	310.33
10	7758.14	310.33
11	7758.14	310.33
12	7758.14	310.33
13	7628.75	305.15
14	7515.54	300.62
15	7515.54	300.62
16	7515.54	300.62
17	7399.09	295.96
18	7300.01	292.00
19	7300.01	292.00
20	7105.68	284.23
21	6943.81	277.75
22	6943.81	277.75
23	6943.81	277.75
24	6323.72	252.95

Εντατικά μεγέθη

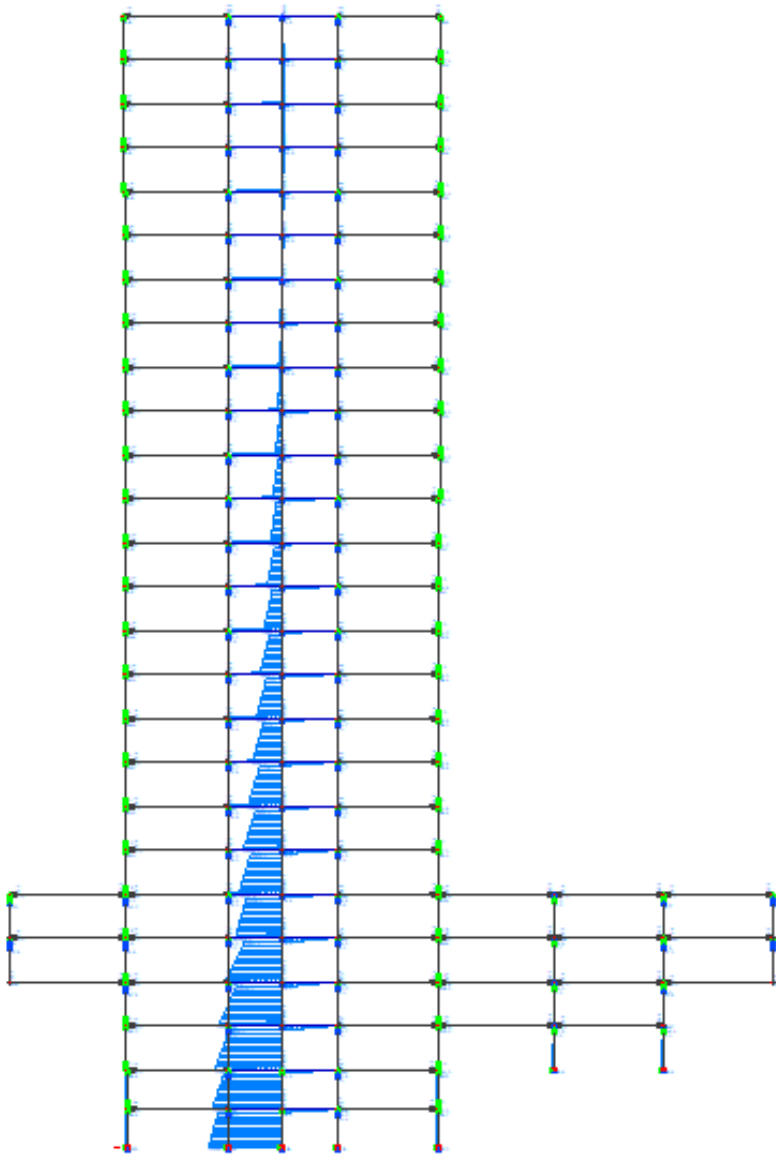
Οι οριζόντιες δυνάμεις επιβάλλονται στα κέντρα μάζας των διαφραγμάτων και προκύπτουν τα εντατικά μεγέθη των μελών για κάθε περίπτωση φόρτισης. Στο Σχήμα Γ.1 παρατηρείται ότι τα ισχυρά τοιχώματα παραλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος της σεισμικής δράσης.

Έλεγχοι επάρκειας

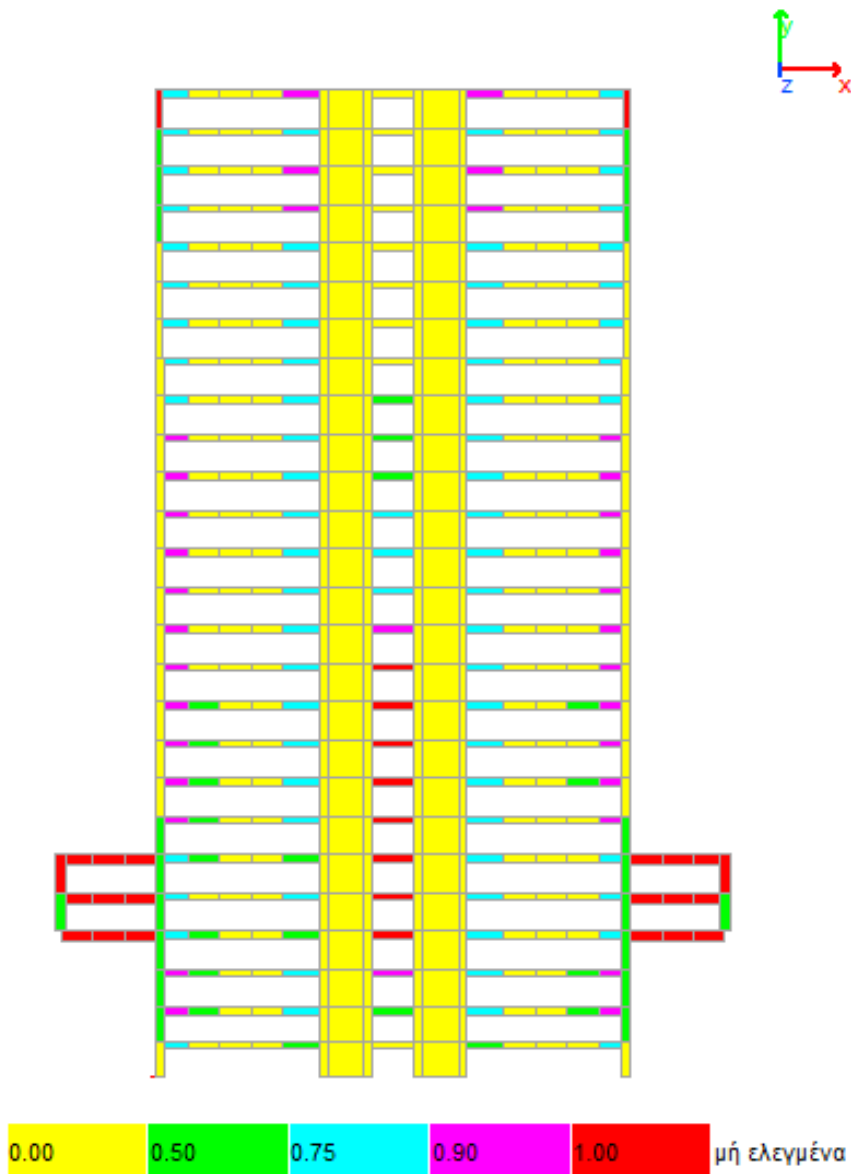
Στη συνέχεια εκτελούνται οι έλεγχοι επάρκειας των μελών για όλους τους συνδυασμούς φόρτισης. Για κάθε στοιχείο εκτελούνται έλεγχοι (σε κάμψη, διάτμηση, στρέψη κλπ.) και

προκύπτει η τιμή του λόγου εξάντλησης ($C. R. = \frac{\text{απαίτηση}}{\text{ιακανότητα}}$). Η δυσμενέστερη τιμή εξ' αυτών χαρακτηρίζει το μέλος. Στη συνέχεια, για καλύτερη εποπτεία, τα μέλη χρωματίζονται με βάση μία χρωματική κλίμακα, σύμφωνα με το αποτέλεσμα που προκύπτει. Κατόπιν εκτέλεσης των ελέγχων επάρκειας διαπιστώνεται γενικά καλή εικόνα για τα περισσότερα στοιχεία (Σχήμα Γ.2). Εξαιρέση αποτελούν τα στοιχεία που απαρτίζουν τα τμήματα των προβόλων στις χαμηλότερες στάθμες, όπου προκύπτει έντονη ανεπάρκεια σε καμπτική αντοχή⁷. Εκτός από αυτά, παρατηρούνται μικρές ανεπάρκειες στα υποστυλώματα του τελευταίου ορόφου καθώς και σε κάποιες δοκούς σύζευξης τοιχωμάτων. Στο Σχήμα Γ.4 παρατηρείται η οριακή ανεπάρκεια μίας τυπικής δοκού σύζευξης τοιχωμάτων, που βρίσκεται στο μέσο του κατώτερου ήμιου τμήματος καθ' ύψος της κατασκευής. Στο Σχήμα Γ.5 παρατηρείται η οριακή ανεπάρκεια των γωνιακών υποστυλωμάτων της τελευταίας στάθμης, που μπορεί να αποδοθεί στην ανεπάρκεια αξονικής δύναμης. Τέλος, σημειώνεται ότι ανεπάρκειες δοκών του περιγράμματος του πύργου στα ανώτερα επίπεδα, οι οποίες φαίνονται στο Σχήμα Γ.3, είναι κι αυτές οριακές, με λόγους εξάντλησης της τάξεως του 1.20.

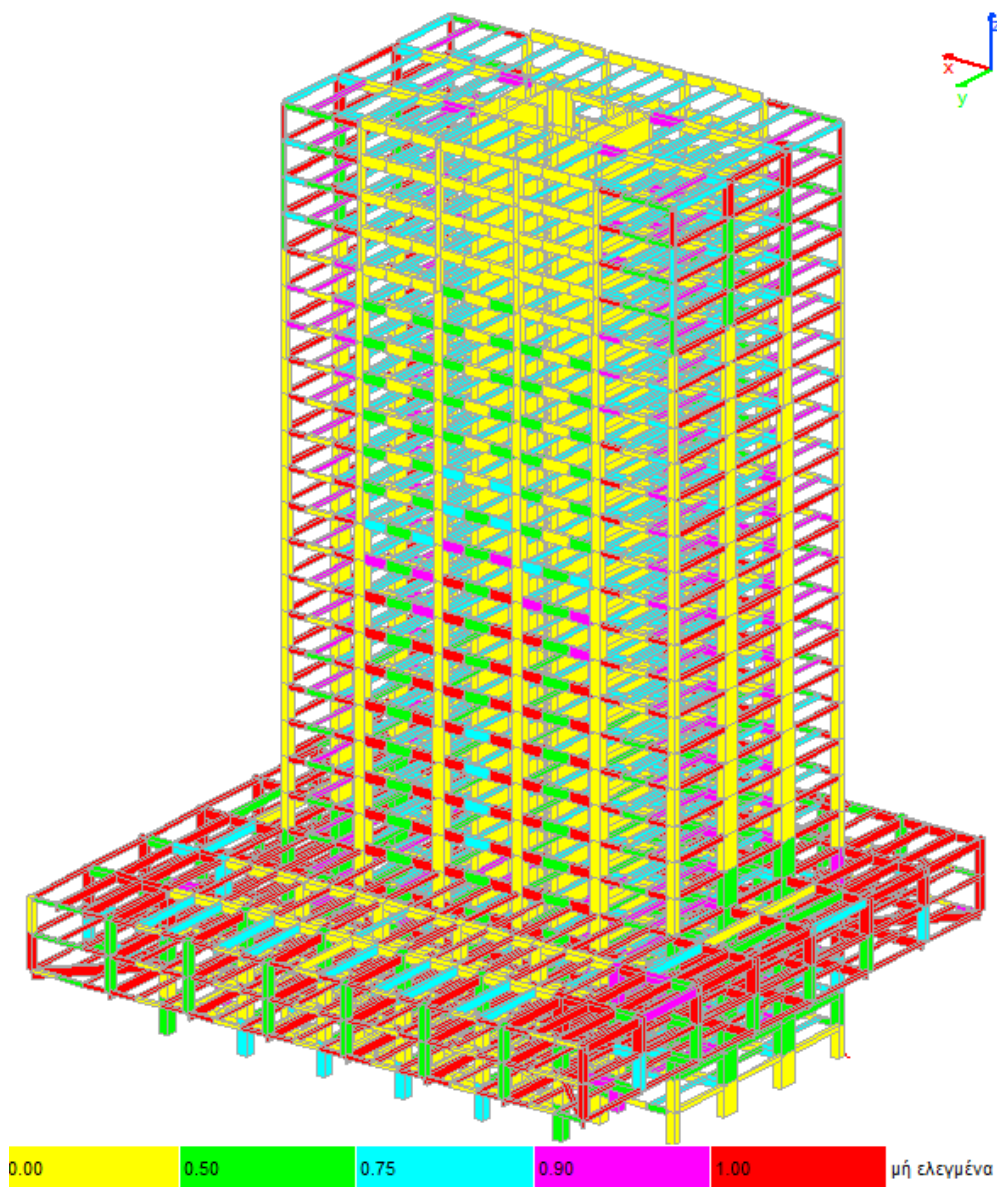
⁷ Οι διατομές αυτές στα εγκεκριμένα σχέδια ξυλοτύπων της κατασκευής φαίνονται πολύ μικρότερης διατομής (30/30, για δοκούς & υποστυλώματα!), ενώ δεν αναγράφονται οπλισμοί. Υπήρξε μεγάλη ασάθεια στα αποτελέσματα, επομένως υπήρξε επέμβαση από τον γράφων για επιλογή διαστάσεων και οπλισμών ώστε να περιοριστεί η ανεπάρκεια, προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα εκτέλεσης των αναλύσεων που ακολουθούν.



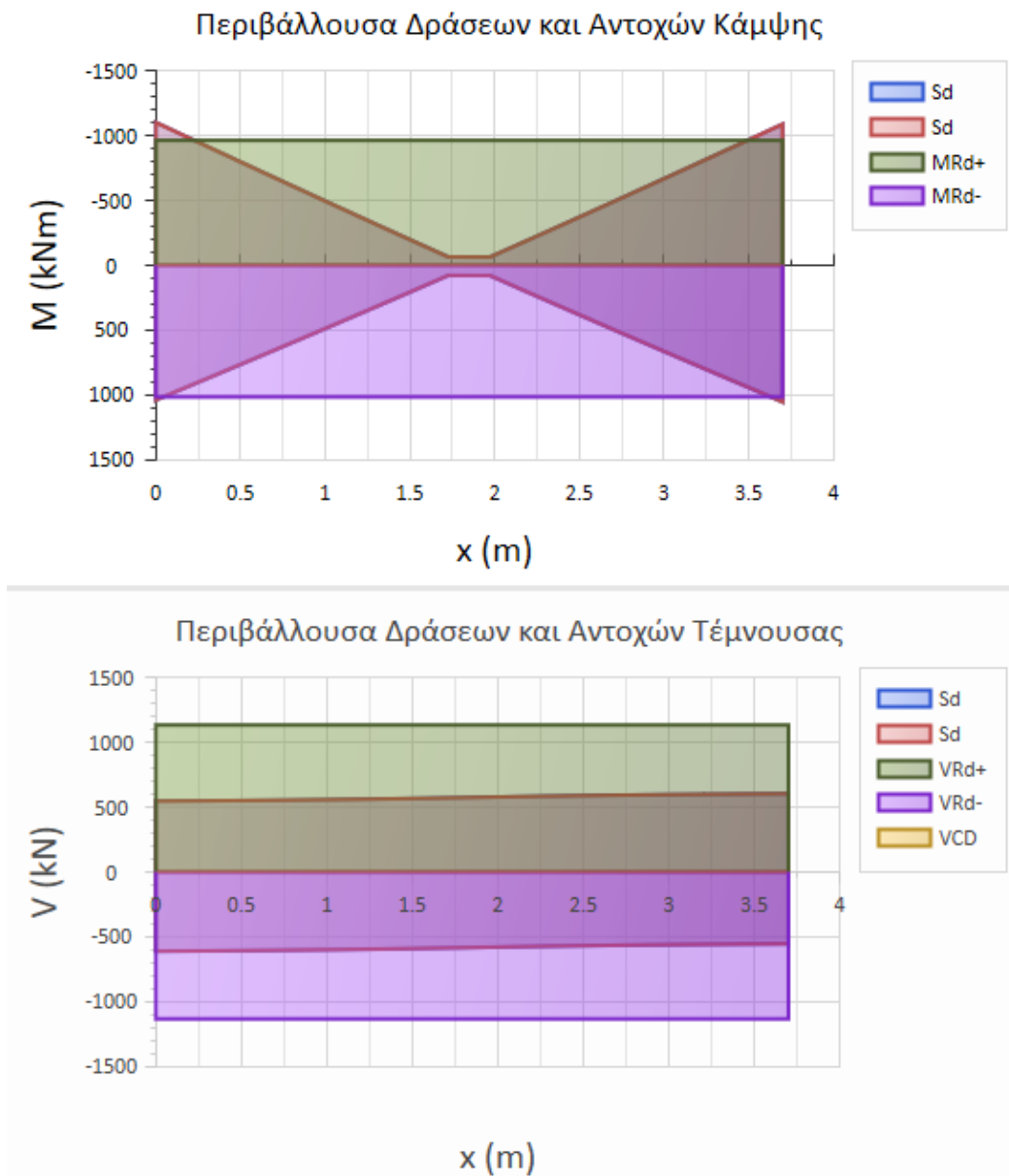
Σχήμα Γ.1 Καμπτικές ροπές σε μεσαίο πλαίσιο



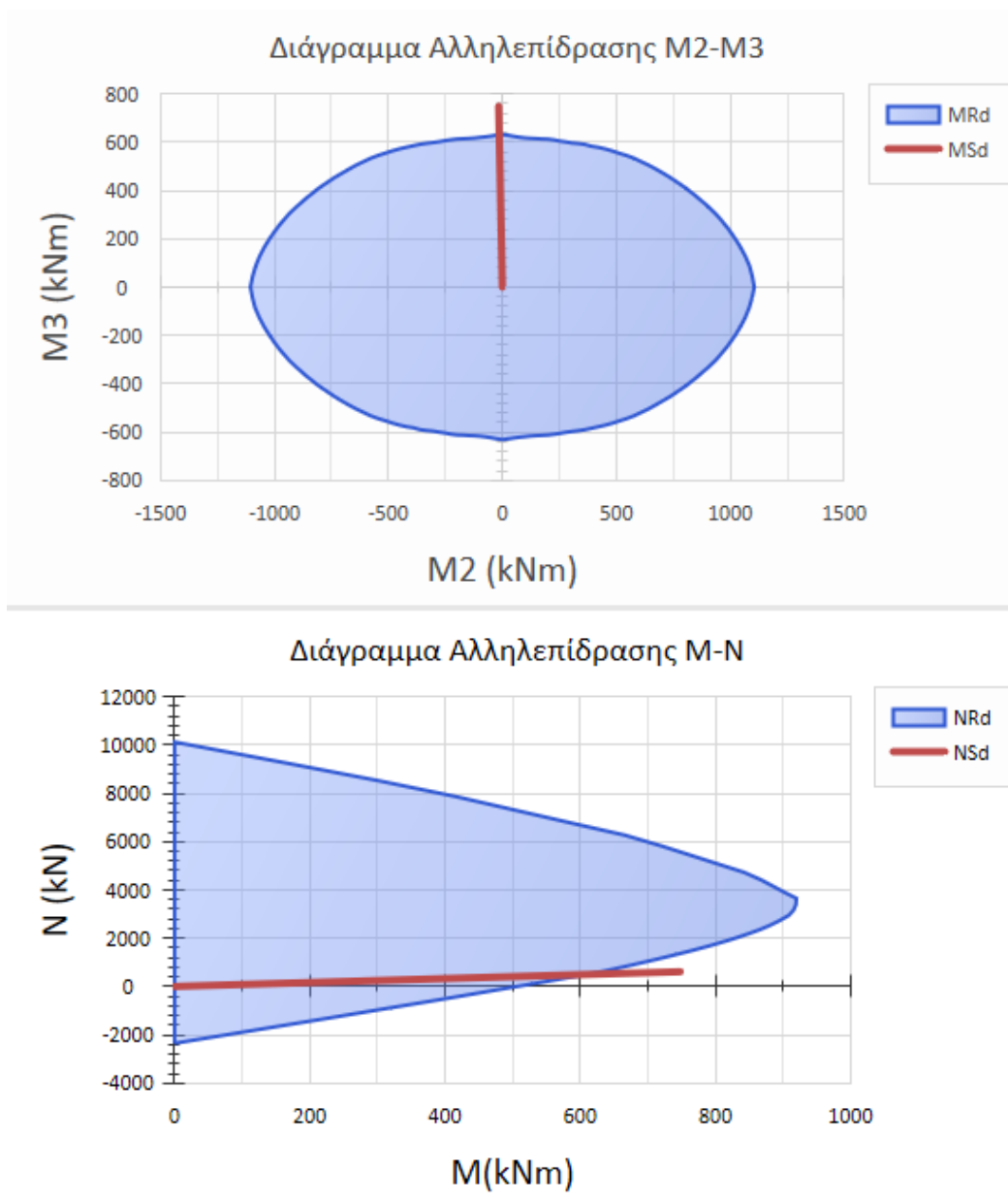
Σχήμα Γ.2 Έλεγχος Επάρκειας. Ενδεικτική τομή



Σχήμα Γ.3 Έλεγχοι Επάρκειας. Αξονομετρικό



Σχήμα Γ.4 Διαγράμματα δράσεων - αντοχών δοκού σύζευξης τοιχωμάτων. Λόγος Εξάντλησης 1.14



Σχήμα Γ.5 Διάγραμμα αλληλεπίδρασης M-N υποστυλώματος. Λόγος Εξάντλησης 1.23

Γ.5. Συμπεράσματα

Από την εκτέλεση της ανάλυσης οριζόντιας φόρτισης για το κτίριο σύμφωνα με τις προδιαγραφές φόρτισης του Α.Κ. '59, συμπεραίνεται ότι σε γενικό βαθμό ικανοποιούνται οι έλεγχοι αντοχών σε κάμψη, τέμνουσα και στρέψη. Ελάχιστα στοιχεία της ανωδομής είναι οριακά ανεπαρκή. Εξαιρέση ωστόσο αποτελούν τα δομικά στοιχεία που απαρτίζουν τους προβόλους που διαμορφώνονται στις χαμηλές στάθμες 1, 2 και 3, για τα οποία

συμπεραίνεται ότι είναι αδύνατον να κατασκευάστηκαν με τις διατομές που απεικονίζονται στα εγκεκριμένα σχέδια της οικοδομικής άδειας.

Τα στοιχεία αυτά διαστασιολογήθηκαν εκ νέου προκειμένου να μετριάσουν φαινόμενα αριθμητικών ασταθειών που απέτρεπαν την εφαρμογή των επόμενων αναλύσεων. Στην παρούσα ανάλυση παρουσιάζονται με τις νέες διατομές τους.

Κεφάλαιο Δ.

Ανάλυση του υφιστάμενου φορέα με σύγχρονες μεθόδους και έλεγχος κριτηρίων μορφολογίας

Δ.1. Μέθοδος ανάλυσης

Με το προσομοίωμα της προηγούμενης ανάλυσης εκτελείται **ιδιομορφική ανάλυση φάσματος** απόκρισης με ενιαίο συντελεστή συμπεριφοράς q , με τις προδιαγραφές του EC8, προκειμένου να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Δ.2. Θεωρητικό υπόβαθρο της ανάλυσης

Δ.2.1. Περιγραφή της μεθόδου

Γενικά στοιχεία

Η μέθοδος της ελαστικής ανάλυσης φάσματος απόκρισης είναι από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους αντισεισμικής ανάλυσης κατασκευών. Αυτό οφείλεται στα σημαντικά πλεονεκτήματα που έχει. Σε αντίθεση με τη γραμμική στατική ανάλυση, η ιδιομορφική ανάλυση φάσματος απόκρισης υπόκειται σε σημαντικά λιγότερους περιορισμούς πρακτικής εφαρμογής. Με τη μέθοδο αυτή λαμβάνεται υπόψη η επιρροή όλων των τρόπων ταλάντωσης του φορέα, ανεξαρτήτως των χαρακτηριστικών αυτού όπως της κανονικότητας, του πλήθους διαφραγμάτων ανά στάθμη κλπ. Οι περιπτώσεις στις οποίες η εφαρμογή της μεθόδου δεν είναι δόκιμη είναι λίγες και αρκετά ασυνήθιστες, όπως για παράδειγμα η περίπτωση όπου απαιτείται η προσομοίωση κρουστικών φαινομένων μεταξύ διαφραγμάτων, η ακριβής προσομοίωση υστερητικών συστημάτων (π.χ. εφέδρανα, αποσβεστήρες κ.α.), και λοιπές περιπτώσεις στις οποίες η ανάλυση χρονοϊστορίας είναι μονόδρομος.

Μειονέκτημα της μεθόδου αυτής (όπως και της ανάλυσης με ισοδύναμη στατική φόρτιση) αποτελεί το γεγονός ότι ως ελαστική ανάλυση που είναι, αδυνατεί να προσομοιώσει τη

μετελαστική συμπεριφορά των κατασκευών, οι οποίες μάλιστα στις περισσότερες περιπτώσεις επίτηδες σχεδιάζονται να μπουκ στην πλαστική περιοχή σε ενδεχόμενη καταπόνηση από τη σεισμική δράση σχεδιασμού, προκειμένου μεγάλο μέρος της ενέργειάς της να απορροφηθεί από τις βλάβες που θα συμβούν στο φορέα, λύση-συμβιβασμός που οδηγεί σε σημαντική μείωση του κόστους κατασκευής. Παρόλα αυτά, η μέθοδος έχει προσαρμοστεί έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη αυτό το γεγονός, με την εισαγωγή του **συντελεστή συμπεριφοράς q** , ο οποίος διαιρεί τη σεισμική δράση σχεδιασμού και οι τιμές του λαμβάνονται κανονιστικά και έχουν προκύψει εμπειρικά. Γίνεται δηλαδή η θεώρηση ότι η μέγιστη δράση που πλήξει τον φορέα σχετίζεται με την ίδια την αντοχή που έχει ο φορέας. Με μεγαλύτερη δράση ο φορέας διαρρέει, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται πλαστικές παραμορφώσεις δίχως επιπλέον αύξηση των εντατικών μεγεθών του. Έχει παρατηρηθεί και είναι καλά τεκμηριωμένο το γεγονός ότι οι μετακινήσεις ενός ελαστικού ταλαντωτή με αυτές ενός ελαστοπλαστικού δεν διαφέρουν σημαντικά, όταν αυτοί υποβάλλονται στην ίδια διέγερση. Με βάση τα παραπάνω, εν τέλει εκτελείται ελαστική ανάλυση με μειωμένες δράσεις και προσδιορίζονται εντατικά μεγέθη και μετακινήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε ένα σύστημα που στην πραγματικότητα υποβαλλόμενο στη δράση σχεδιασμού δίχως την απομείωση θα αναπτύξει έντονη μετελαστική συμπεριφορά.

Το παραπάνω οδηγεί στην ανάγκη εξασφάλισης ότι η μετελαστική συμπεριφορά θα είναι προβλέψιμη. Έτσι, έχουν αναπτυχθεί ειδικά κριτήρια σχεδιασμού και πρόσθετοι έλεγχοι. Ο EC8 προδιαγράφει συγκεκριμένους τρόπους όπλισης προκειμένου να εξασφαλίζεται ότι ο φορέας θα έχει πράγματι την απαιτούμενη πλαστιμότητα που προκύπτει από την παραδοχή του συντελεστή συμπεριφοράς q , για να παραμορφωθεί πλαστικά. Με επιπλέον ελέγχους που καλούνται «ικανοτικοί έλεγχοι» αποφεύγονται δυσοίωνες καταστάσεις όπως αστοχίες μαλακού ορόφου ή δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων σε υποστυλώματα εν γένει, ενώ με ελέγχους ικανοτικής τέμνουσας εξασφαλίζεται για κάθε στοιχείο ότι η πλάστιμη αστοχία σε κάμψη θα προηγηθεί με βεβαιότητα έναντι της ψαθυρής και απρόβλεπτης αστοχίας σε τέμνουσα.

Βήματα της μεθόδου (σύντομη παρουσίαση)

Εκτελείται ιδιομορφική ανάλυση του χωρικού προσομοιώματος και προσδιορίζεται ένα ικανό πλήθος ιδιομορφών⁸ και καταγράφεται η περίοδος T_n και η διανυσματική της έκφραση Φ_n . Υπολογίζονται οι **συντελεστές συμμετοχής** στην κάθε διεύθυνση Γ_{Xn} , Γ_{Yn} , Γ_{Zn}

$$\Gamma_{en} = \frac{\Phi_n^T x M x I_e}{\Phi_n^T x M x \Phi_n} \quad (\Delta.1)$$

M είναι το μητρώο μάζας του φορέα και I_e είναι το διάνυσμα μετάθεσης (ένα διάνυσμα με στοιχεία ίσα με 1 για τους μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας παράλληλους στην εξεταζόμενη διεύθυνση «e»). Έπειτα υπολογίζονται οι **ενεργές ιδιομορφικές μάζες** στην κάθε διεύθυνση

$$M_{en} = \frac{(\Phi_n^T x M x I_e)^2}{\Phi_n^T x M x \Phi_n} \quad (\Delta.2)$$

Θεωρητικά το σύνολο των ενεργών ιδιομορφικών μαζών σε μία διεύθυνση για όλες τις ιδιομορφές του φορέα είναι ίσο με τη συνολική μάζα του φορέα. Ωστόσο ικανοποιητικά αποτελέσματα λαμβάνονται ακόμη κι αν αγνοηθούν οι ανώτερες ιδιομορφές από ένα σημείο και έπειτα, κερδίζοντας σε υπολογιστικό φόρτο. Οι κανονισμοί προβλέπουν ότι το ποσοστό της ιδιομορφικής μάζας που λαμβάνεται υπόψη πρέπει να υπερβαίνει το 90% της συνολικής μάζας του φορέα, για κάθε διεύθυνση. Σε άλλη περίπτωση θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη περισσότερες ιδιομορφές. Για κάθε ιδιομορφή n υπολογίζεται η **φασματική μετακίνηση** S_d από δεδομένο φάσμα επιτάχυνσης σχεδιασμού.

$$S_{ed} = \left(\frac{T_n}{2\pi}\right)^2 S_{ea}(T_n) \quad (\Delta.3)$$

⁸ Ο χαρακτηρισμός «ικανό» εξηγείται παρακάτω.

Από τη γνωστή πλέον μετακίνηση υπολογίζεται το **διάνυσμα μετακινήσεων** των κόμβων του φορέα, χρησιμοποιώντας το διάνυσμα της ιδιομορφής, τη μετακίνηση και τον αντίστοιχο συντελεστή ιδιομορφικής συμμετοχής,

$$U_{en} = \left(\frac{T_n}{2\pi}\right)^2 S_{ea}(T_n) \cdot \Gamma_{en} \cdot \Phi_n \quad (\Delta.4)$$

Από τις γνωστές πλέον μετακινήσεις προκύπτουν για κάθε ιδιομορφή τα εντατικά μεγέθη των στοιχείων. Ο τρόπος συνδυασμού των μεγίστων τιμών των εντατικών μεγεθών είναι προσεγγιστικός, επειδή οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές της απόκρισης. Για την πραγματοποίηση του συνδυασμού αυτού με το ελάχιστο δυνατό σφάλμα έχουν αναπτυχθεί κανόνες όπως ο C.Q.C., που εφαρμόζεται δίχως περιορισμούς και ο S.R.S.S., που για την εφαρμογή του θα πρέπει οι ιδιομορφές που συνδυάζονται να είναι «ανεξάρτητες» (δηλαδή να ισχύει $T_i < 0.90 T_{i+1} \forall i$, θεωρώντας ότι οι περίοδοι έχουν ταξινομηθεί με αύξουσα σειρά). Τέλος, για τις περιπτώσεις όπου απαιτείται η γνώση ενός εντατικού μεγέθους δεδομένης της εμφάνισης κάποιου άλλου (π.χ. διαξονική κάμψη), ομοίως έχουν αναπτυχθεί κανόνες προσδιορισμού χωρικής επαλληλίας.

Η παραπάνω περιγραφή είχε στόχο την παρουσίαση των βασικών εννοιών της μεθόδου, ωστόσο η μέθοδος μπορεί να γενικευθεί και να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις εξαιρετικά πιο ανεπτυγμένων προσομοιωμάτων, με έντονες υπολογιστικές απαιτήσεις και ιδιαιτερότητες, όπως για παράδειγμα πολλαπλά διαφράγματα (ή/και ημιάκαμπτα διαφράγματα ή καθόλου διαφράγματα), μέλη – υποφορείς που απαρτίζονται από πεπερασμένα στοιχεία και συνδυάζονται με γραμμικά στοιχεία, για να αναφέρουμε μερικά από αυτά.

Δ.3. Στατικό προσομοίωμα

Δ.3.1. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά, φορτία και υλικά

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά δεν μεταβάλλονται. Βλ. παρ. Γ.3.1 (σελ. 38). Ομοίως αμετάβλητα παραμένουν τα φορτία και τα υλικά του φορέα. Βλ. παρ. Γ.3.2 (σελίδα 42).

Δ.3.2. Κανονιστικά μεγέθη

Για την εκτέλεση της παρούσας ανάλυσης και των ελέγχων επάρκειας θεωρείται Κατηγορία Πλαστιμότητας Μέση, $q = 3.50$ (Table 5.1 EC8), κατηγορία σπουδαιότητας II, σεισμική ζώνη Z1, εδαφικός τύπος C. Για κατηγορία Β «Χώροι Γραφείων» οι συντελεστές μεταβλητών δράσεων προκύπτουν $\psi_0 = 0.7$, $\psi_1 = 0.50$, $\psi_2 = 0.30$. Η ανάλυση εκτελείται με τέσσερις θέσεις μάζας με τυχαματική εκκεντρότητα 5%, και τέλος εκτελείται ανεξάρτητος έλεγχος στρεπτικής ευαισθησίας κατά το «ισοδύναμο μονόροφο» (EC8 4.2.3.2(6).(7).(8))

Δ.4. Αποτελέσματα της ανάλυσης

Δ.4.1. Γενικοί έλεγχοι

Έχοντας πλέον εκτελέσει ιδιομορφική ανάλυση, δίνεται η δυνατότητα αξιολόγησης του φορέα σύμφωνα με ορισμένους γενικούς ελέγχους που προβλέπονται στα κανονιστικά κείμενα.

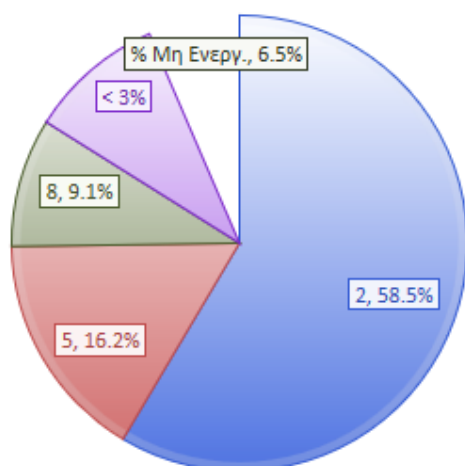
Ποσοστό ενεργοποιούμενης μάζας

Η ανάλυση εκτελείται για 4 θέσεις μάζας, λαμβάνοντας υπόψη 12 ιδιομορφές ταλάντωσης. Το ποσοστό ενεργοποιούμενης μάζας στην κάθε διεύθυνση και για κάθε ιδιομορφή παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα.

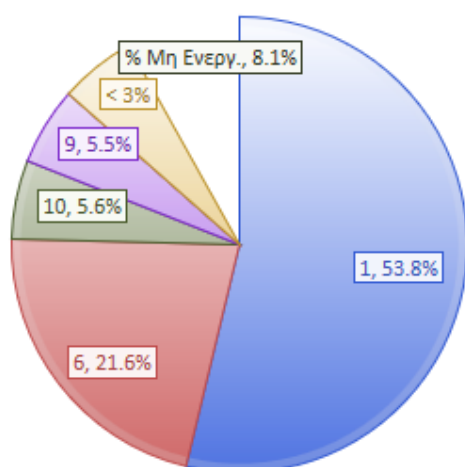
Διεύθυνση X				Διεύθυνση Y			
Θ.Μ. 1	Θ.Μ. 2	Θ.Μ. 3	Θ.Μ. 4	Θ.Μ. 1	Θ.Μ. 2	Θ.Μ. 3	Θ.Μ. 4
93.5%	93.5%	93.6%	93.6%	91.9%	92.0%	91.8%	91.8%

Σε κάθε περίπτωση το ποσοστό είναι $> 90\%$, επομένως τα αποτελέσματα της ανάλυσης κρίνονται αξιόπιστα. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται γραφικά το ποσοστό ενεργοποιούμενης μάζας για καλύτερη εποπτεία.

% Ενεργοποιούμενης Μάζας ανά Ιδιομορφή | Δx | Θ.Μ.1



% Ενεργοποιούμενης Μάζας ανά Ιδιομορφή | Δy | Θ.Μ.1



Σχήμα Δ.1. Ποσοστό ενεργοποιούμενης μάζας ανά διεύθυνση.

Στρεπτική ευαισθησία διαφραγμάτων

Ένα κτίριο είναι στρεπτικά εύκαμπτο στην περίπτωση που σε οποιονδήποτε από τους ορόφους του ισχύει η σχέση

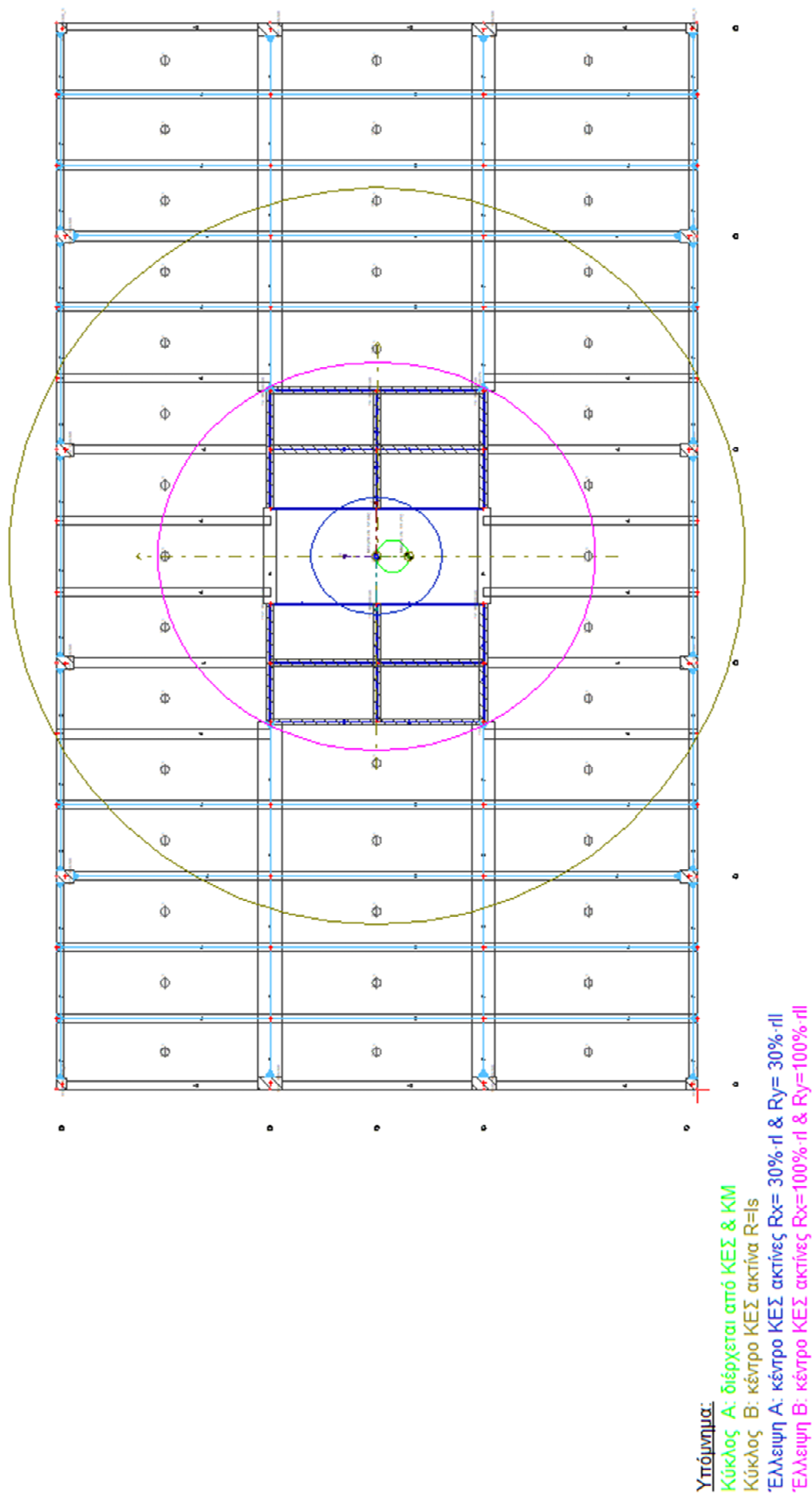
$$r_x > l_s \text{ είτε } r_y > l_s \quad (2)$$

όπου $r_{x,y} = \sqrt{\frac{u_{i,y,x}^{(y,x)}}{\theta_i^{(M)}}}$ είναι οι ακτίνες δυστρεψίας του ορόφου

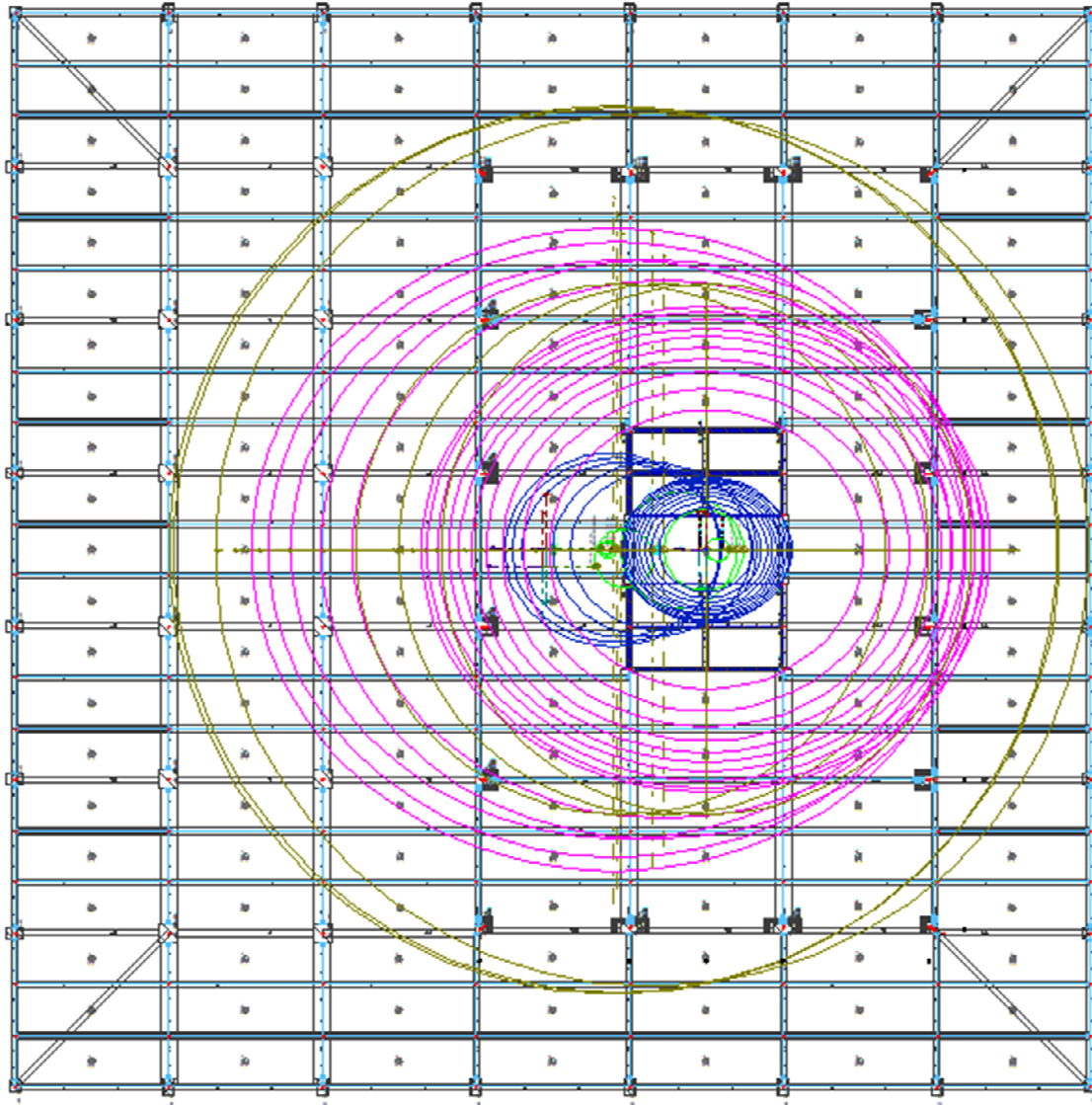
και $l_s = \sqrt{\frac{I_{KM}}{m}}$ είναι η ακτίνα αδρανείας του ορόφου.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα Δ.2, το κριτήριο δεν ικανοποιείται (ο ροζ κύκλος βρίσκεται εντός του καφέ). Ίδια εικόνα παρατηρείται σε όλες τις στάθμες (Σχήμα Δ.3). Στον πίνακα της σελίδας (62) παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για τη θέση μάζας 1, η οποία προκύπτει για μετατόπιση του κέντρου βάρους κατά X με φορά προς τα αρνητικά του άξονα. Αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν για τις υπόλοιπες 3 θέσεις μάζας.

Επομένως εξαγεται το συμπέρασμα ότι το σύστημα είναι στρεπτικά εύκαμπτο.



Σχήμα Δ.2 Στρεπτική Δυσκαμψία 24ης Στάθμης



Σχήμα Δ.3 Στρεπτική Δυσκαμψία

Πίνακας Δ.1. Στρεπτική Ευκαμψία (Θέση Μάζας 1)

Στάθμη	rI	rII	eol	$eoll$	eo	ls	$eol \leq 0.3 \cdot rI$	$eoll \leq 0.3 \cdot rII$	$Ls \leq rI$	$Ls \leq rII$
Σ-1	13.2	15.4	2.06	0	2.06	14.3	×	✓	×	✓
Σ0	14.6	16.8	2.07	2.29	3.09	14.3	×	×	×	✓
Σ1	15.7	17.9	2.08	4.19	4.68	14.3	×	×	×	✓
Σ2	16.6	18.9	2.91	3.84	4.82	24	×	✓	✓	✓
Σ3	17.4	19.5	2.8	3.58	4.54	24	×	✓	✓	✓
Σ4	15.7	17.9	3.8	5.92	7.03	23.6	✓	✓	✓	✓
Σ5	12.9	15.1	2.06	0	2.06	14.3	×	✓	×	✓
Σ6	12.9	15.1	2.06	0	2.06	14.3	×	✓	×	✓
Σ7	12.9	15.1	2.06	0	2.06	14.3	×	✓	×	✓
Σ8	12.5	14.5	2.06	0	2.06	14.3	×	✓	×	✓
Σ9	12	13.9	2.06	0	2.06	14.3	×	✓	✓	✓
Σ10	12	13.9	2.06	0	2.06	14.3	×	✓	✓	✓
Σ11	12	13.9	2.06	0	2.06	14.3	×	✓	✓	✓
Σ12	12	13.9	2.06	0	2.06	14.3	×	✓	✓	✓
Σ13	11.5	13.4	2.06	0	2.06	14.3	×	✓	✓	✓
Σ14	11	12.7	2.06	0	2.06	14.3	×	✓	✓	✓
Σ15	11	12.7	2.06	0	2.06	14.3	×	✓	✓	✓
Σ16	11	12.7	2.06	0	2.06	14.3	×	✓	✓	✓
Σ17	10.3	11.9	2.06	0	2.06	14.3	×	✓	✓	✓
Σ18	9.61	11	2.06	0	2.06	14.3	×	✓	✓	✓
Σ19	9.61	11	2.06	0	2.06	14.3	×	✓	✓	✓
Σ20	8.71	9.9	2.06	0	2.06	14.3	×	✓	✓	✓
Σ21	7.55	8.5	2.06	0	2.06	14.3	×	✓	✓	✓
Σ22	7.55	8.5	2.06	0	2.06	14.3	×	✓	✓	✓
Σ23	7.55	8.5	2.06	0	2.06	14.3	×	✓	✓	✓
Σ24	7.55	8.5	2.06	0	2.06	14.3	×	✓	✓	✓

Έλεγχος ποσοστού σεισμικής τέμνουσας τοιχωμάτων

Για την εκτέλεση του ελέγχου του ποσοστού σεισμικής τέμνουσας των τοιχωμάτων, ο φορέας υποβάλλεται σε οριζόντια φόρτιση και προσδιορίζεται το ποσοστό n_V της συνολικής τέμνουσας της στάθμης της θεμελίωσης $\Sigma V_{ολ}$, το οποίο παραλαμβάνεται από τοιχώματα ΣV_{Wall} .

Υπολογίζοντας την τιμή του εν λόγω ποσοστού, ο φορέας χαρακτηρίζεται αναλόγως, σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας Δ.2. Κατάταξη φορέων σύμφωνα με το ποσοστό σεισμικής τέμνουσας τοιχωμάτων

n_V	Σύστημα
0.00 ~ 0.30	Σύστημα πλαισίων
0.30 ~ 0.65	Μεικτό σύστημα
0.65 ~ 1.00	Σύστημα τοιχωμάτων

Από την επίλυση, προκύπτει η τιμή $\Sigma V_{Wall} = 5495.54 \text{ KN}$, $\Sigma V_{ολ} = 7281.58 \text{ KN}$ για όλες τις θέσεις μάζας.

$$\text{Επομένως } n_V = \frac{5495.54 \text{ KN}}{7281.58 \text{ KN}} = 0.75 > 0.65$$

Συνεπώς, το κτίριο έχει σύστημα τοιχωμάτων.

Κατά τις διατάξεις του EC8, κτίρια με σύστημα τοιχωμάτων απαλλάσσονται από την απαίτηση εκτέλεσης ικανοτικού ελέγχου κόμβων (βλ. εδάφιο 4.4.2.3(3)P του ΕΚ8).

Περιορισμός της σχετικής παραμόρφωσης ορόφων (Drift)

Σύμφωνα με την παρ. 4.4.3.2 του EC 8, θα πρέπει για κάθε εξεταζόμενο όροφο και για κάθε διεύθυνση (X & Y) να ισχύει η σχέση

$$d_r \cdot v = (q \cdot d_e) \cdot v \leq dr_{op} \quad (3)$$

Όπου q ο συντελεστής συμπεριφοράς, v ο συντελεστής μείωσης που λαμβάνει υπόψη τη μικρότερη περίοδο επαναφοράς της σεισμικής δράσεις που συνδέεται με την απαίτηση περιορισμού των βλαβών και εξαρτάται από την κατηγορία σπουδαιότητας, d_r οι υπολογιστικές τιμές των σχετικών παραμορφώσεων του κάθε ορόφου, d_e η τιμή της σχετικής μετακίνησης του ορόφου (λαμβάνεται ως η διαφορά των μέσων οριζόντιων μετακινήσεων για τους σεισμικούς συνδυασμούς δράσεων), dr_{op} η οριακά επιτρεπόμενη τιμή σχετικής μετακίνησης ορόφου. $dr_{op} = \alpha \cdot h$, όπου h το ύψος του εξεταζόμενου ορόφου. Η τιμή α λαμβάνεται από τον παρακάτω πίνακα.

α	Περίπτωση
$\alpha = 0.0050$	Κτίρια με ψαθυρά μη φέροντα στοιχεία
$\alpha = 0.0075$	Κτίρια με πλάστιμα μη φέροντα στοιχεία
$\alpha = 0.0100$	Κτίρια με μη φέροντα στοιχεία μη επηρεαζόμενα από τις παραμορφώσεις του φορέα

Επιλέγεται η πρώτη περίπτωση. **Ο έλεγχος ικανοποιείται σε κάθε στάθμη, για όλες τις θέσεις μάζας.** Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας Δ.3 Έλεγχος dr , θέση μάζας 1

Στάθμη	$dx \cdot v$ (mm)	Έλεγχος	dr, op (mm)		$dy \cdot v$ (mm)	Έλεγχος	dr, op (mm)	
Σ-1	1.21	<	15	✓	0.95	<	15	✓
Σ0	2.21	<	15	✓	1.78	<	15	✓
Σ1	3.4	<	16.75	✓	3.3	<	16.75	✓
Σ2	4.4	<	16.75	✓	4.22	<	16.75	✓
Σ3	4.55	<	16.75	✓	4.59	<	16.75	✓
Σ4	4.43	<	16.75	✓	4.8	<	16.75	✓
Σ5	4.88	<	16.75	✓	5.1	<	16.75	✓
Σ6	5.04	<	16.75	✓	5.53	<	16.75	✓
Σ7	5.1	<	16.75	✓	5.92	<	16.75	✓
Σ8	5.09	<	16.75	✓	6.26	<	16.75	✓
Σ9	5.08	<	16.75	✓	6.57	<	16.75	✓
Σ10	4.99	<	16.75	✓	6.85	<	16.75	✓
Σ11	4.89	<	16.75	✓	7.11	<	16.75	✓
Σ12	4.77	<	16.75	✓	7.34	<	16.75	✓

Στάθμη	$dx \cdot v$ (mm)	Έλεγχος	dr, op (mm)		$dry \cdot v$ (mm)	Έλεγχος	dr, op (mm)	
Σ13	4.63	<	16.75	✓	7.55	<	16.75	✓
Σ14	4.54	<	16.75	✓	7.75	<	16.75	✓
Σ15	4.39	<	16.75	✓	7.93	<	16.75	✓
Σ16	4.26	<	16.75	✓	8.08	<	16.75	✓
Σ17	4.11	<	16.75	✓	8.21	<	16.75	✓
Σ18	4.01	<	16.75	✓	8.34	<	16.75	✓
Σ19	3.86	<	16.75	✓	8.42	<	16.75	✓
Σ20	3.7	<	16.75	✓	8.47	<	16.75	✓
Σ21	3.64	<	16.75	✓	8.54	<	16.75	✓
Σ22	3.46	<	16.75	✓	8.54	<	16.75	✓
Σ23	3.32	<	16.75	✓	8.53	<	16.75	✓
Σ24	3.17	<	16.75	✓	8.48	<	16.75	✓

Πίνακας Δ.4. Έλεγχος dr , θέση μάζας 2

Στάθμη	$dx \cdot v$ (mm)	Έλεγχος	dr, op (mm)		$dry \cdot v$ (mm)	Έλεγχος	dr, op (mm)	
Σ-1	1.22	<	15	✓	0.94	<	15	✓
Σ0	2.22	<	15	✓	1.78	<	15	✓
Σ1	3.42	<	16.75	✓	3.3	<	16.75	✓
Σ2	4.43	<	16.75	✓	4.22	<	16.75	✓
Σ3	4.58	<	16.75	✓	4.61	<	16.75	✓
Σ4	4.46	<	16.75	✓	4.8	<	16.75	✓
Σ5	4.9	<	16.75	✓	5.08	<	16.75	✓
Σ6	5.05	<	16.75	✓	5.51	<	16.75	✓
Σ7	5.11	<	16.75	✓	5.9	<	16.75	✓
Σ8	5.1	<	16.75	✓	6.24	<	16.75	✓
Σ9	5.09	<	16.75	✓	6.56	<	16.75	✓
Σ10	5	<	16.75	✓	6.84	<	16.75	✓
Σ11	4.89	<	16.75	✓	7.1	<	16.75	✓
Σ12	4.77	<	16.75	✓	7.33	<	16.75	✓
Σ13	4.64	<	16.75	✓	7.54	<	16.75	✓
Σ14	4.55	<	16.75	✓	7.74	<	16.75	✓
Σ15	4.4	<	16.75	✓	7.91	<	16.75	✓
Σ16	4.27	<	16.75	✓	8.07	<	16.75	✓
Σ17	4.12	<	16.75	✓	8.19	<	16.75	✓
Σ18	4.01	<	16.75	✓	8.32	<	16.75	✓
Σ19	3.87	<	16.75	✓	8.4	<	16.75	✓
Σ20	3.7	<	16.75	✓	8.45	<	16.75	✓
Σ21	3.65	<	16.75	✓	8.51	<	16.75	✓
Σ22	3.47	<	16.75	✓	8.51	<	16.75	✓
Σ23	3.32	<	16.75	✓	8.5	<	16.75	✓
Σ24	3.18	<	16.75	✓	8.44	<	16.75	✓

Πίνακας Δ.5. Έλεγχος dr , θέση μάζας 3

Στάθμη	$dx \cdot v$ (mm)	Έλεγχος	dr, op (mm)		$dry \cdot v$ (mm)	Έλεγχος	dr, op (mm)	
Σ-1	1.2	<	15	✓	1	<	15	✓
Σ0	2.1	<	15	✓	1.8	<	15	✓
Σ1	3.3	<	16.8	✓	3.2	<	16.8	✓
Σ2	4.3	<	16.8	✓	4.1	<	16.8	✓
Σ3	4.4	<	16.8	✓	4.3	<	16.8	✓
Σ4	4.4	<	16.8	✓	4.7	<	16.8	✓
Σ5	4.9	<	16.8	✓	5.1	<	16.8	✓
Σ6	5.1	<	16.8	✓	5.5	<	16.8	✓
Σ7	5.2	<	16.8	✓	5.9	<	16.8	✓
Σ8	5.2	<	16.8	✓	6.2	<	16.8	✓
Σ9	5.2	<	16.8	✓	6.6	<	16.8	✓
Σ10	5.1	<	16.8	✓	6.8	<	16.8	✓
Σ11	5	<	16.8	✓	7.1	<	16.8	✓
Σ12	4.9	<	16.8	✓	7.3	<	16.8	✓
Σ13	4.8	<	16.8	✓	7.5	<	16.8	✓
Σ14	4.7	<	16.8	✓	7.7	<	16.8	✓
Σ15	4.5	<	16.8	✓	7.9	<	16.8	✓
Σ16	4.4	<	16.8	✓	8.1	<	16.8	✓
Σ17	4.2	<	16.8	✓	8.2	<	16.8	✓
Σ18	4.1	<	16.8	✓	8.3	<	16.8	✓
Σ19	4	<	16.8	✓	8.4	<	16.8	✓
Σ20	3.8	<	16.8	✓	8.5	<	16.8	✓
Σ21	3.7	<	16.8	✓	8.6	<	16.8	✓
Σ22	3.6	<	16.8	✓	8.6	<	16.8	✓
Σ23	3.4	<	16.8	✓	8.6	<	16.8	✓
Σ24	3.3	<	16.8	✓	8.6	<	16.8	✓

Πίνακας Δ.6. Έλεγχος dr , θέση μάζας 4

Στάθμη	$dx \cdot v$ (mm)	Έλεγχος	dr, op (mm)		$dry \cdot v$ (mm)	Έλεγχος	dr, op (mm)	
Σ-1	1.2	<	15	✓	1	<	15	✓
Σ0	2.1	<	15	✓	1.9	<	15	✓
Σ1	3.2	<	16.8	✓	3.4	<	16.8	✓
Σ2	4.2	<	16.8	✓	4.4	<	16.8	✓
Σ3	4.4	<	16.8	✓	4.8	<	16.8	✓
Σ4	4.3	<	16.8	✓	5	<	16.8	✓

Σ5	4.6	<	16.8	✓	5.3	<	16.8	✓
Σ6	4.8	<	16.8	✓	5.7	<	16.8	✓
Σ7	4.8	<	16.8	✓	6.1	<	16.8	✓
Σ8	4.9	<	16.8	✓	6.4	<	16.8	✓
Σ9	4.9	<	16.8	✓	6.7	<	16.8	✓
Σ10	4.8	<	16.8	✓	7	<	16.8	✓
Σ11	4.7	<	16.8	✓	7.2	<	16.8	✓
Σ12	4.6	<	16.8	✓	7.4	<	16.8	✓
Σ13	4.4	<	16.8	✓	7.6	<	16.8	✓
Σ14	4.4	<	16.8	✓	7.8	<	16.8	✓
Σ15	4.2	<	16.8	✓	8	<	16.8	✓
Σ16	4.1	<	16.8	✓	8.2	<	16.8	✓
Σ17	3.9	<	16.8	✓	8.3	<	16.8	✓
Σ18	3.8	<	16.8	✓	8.4	<	16.8	✓
Σ19	3.6	<	16.8	✓	8.5	<	16.8	✓
Σ20	3.5	<	16.8	✓	8.6	<	16.8	✓
Σ21	3.4	<	16.8	✓	8.6	<	16.8	✓
Σ22	3.2	<	16.8	✓	8.6	<	16.8	✓
Σ23	3.1	<	16.8	✓	8.6	<	16.8	✓
Σ24	2.9	<	16.8	✓	8.6	<	16.8	✓

Έλεγχος επιρροής φαινομένων 2^{ης} τάξης

Προκειμένου να ληφθούν υπόψη φαινόμενα 2^{ης} τάξης, ο EC8 στην παρ. 4.4.2.2(2),(3),(4)P προδιαγράφει την ακόλουθη διαδικασία.

Για κάθε όροφο υπολογίζονται οι συντελεστές ευαισθησίας σχετικής μετακίνησης, από τη σχέση $\theta = \frac{N_{ολ} \cdot dr}{V_{ολ} \cdot h} = \frac{N_{ολ} \cdot q \cdot de}{V_{ολ} \cdot h}$. Στη συνέχεια ανάλογα με την τιμή του συντελεστή ευαισθησίας σχετικής μετακίνησης, προσδιορίζεται ο συντελεστής επαύξησης των μεγεθών έντασης κατά X ή κατά Y από τον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας Δ.7. Τιμές του συντελεστή επαύξησης μεγεθών έντασης

θ	$m_{P-\Delta}$
$\theta < 0.1$	$m_{P-\Delta} = 1$
$0.1 < \theta < 0.2$	$m_{P-\Delta} = \frac{1}{(1 - \theta)}$
$\theta > 0.3$	Απαιτείται ανασχεδιασμός του φορέα

Προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα.

Πίνακας Δ.8. Επιρροή φαινομένων Ρ-Δ, θέση μάζας 1

Στάθμη	Νολ	Νολx	Δελx	θx		Νολy	Δελy	θy	
Σ-1	222305.69	6694.53	0.69	3%	✓	7539.69	0.541	2%	✓
Σ0	214339.1	6940.45	1.27	5%	✓	7639.47	1.019	3%	✓
Σ1	235451.57	10198.38	1.94	5%	✓	11115.29	1.886	4%	✓
Σ2	224703.43	10394.97	2.51	6%	✓	10606.79	2.41	5%	✓
Σ3	201847.02	9466.3	2.6	6%	✓	10459.25	2.626	5%	✓
Σ4	178820.15	8611.3	2.53	5%	✓	8970.53	2.743	6%	✓
Σ5	154339.78	6965.21	2.79	6%	✓	6782.23	2.914	7%	✓
Σ6	146280.79	6801.38	2.88	6%	✓	6270.79	3.163	8%	✓
Σ7	138197.65	6639.28	2.91	6%	✓	5849.42	3.38	8%	✓
Σ8	130114.5	6474.14	2.91	6%	✓	5520.83	3.574	9%	✓
Σ9	122031.36	6237.87	2.9	6%	✓	5104.94	3.757	9%	✓
Σ10	114145.03	6099.36	2.85	6%	✓	4720.97	3.916	10%	✓
Σ11	106258.7	5984.27	2.79	5%	✓	4427.37	4.061	10%	x
Σ12	98372.38	5904.75	2.72	5%	✓	4191.53	4.194	10%	x
Σ13	90486.05	5898.56	2.65	4%	✓	4074.03	4.315	10%	x
Σ14	82599.72	5783.72	2.59	4%	✓	4020.78	4.43	10%	✓
Σ15	74892.66	5787.81	2.51	3%	✓	4050.53	4.529	9%	✓
Σ16	67185.6	5713.96	2.43	3%	✓	4126.42	4.618	8%	✓
Σ17	59478.54	5644.96	2.35	3%	✓	4191.8	4.692	7%	✓
Σ18	51771.47	5430.86	2.29	2%	✓	4207.11	4.764	6%	✓
Σ19	44225.63	5217.59	2.2	2%	✓	4130.65	4.811	5%	✓
Σ20	36679.79	4982.37	2.11	2%	✓	3917.26	4.841	5%	✓
Σ21	29133.94	4331.5	2.08	1%	✓	3516.9	4.879	4%	✓
Σ22	21850.46	3808.16	1.98	1%	✓	2986.24	4.877	4%	✓
Σ23	14566.97	3072.13	1.9	1%	✓	2271.3	4.874	3%	✓
Σ24	7283.49	2589.24	1.81	1%	✓	1861.88	4.843	2%	✓

Πίνακας Δ.9. Επιρροή φαινομένων Ρ-Δ, θέση μάζας 2

Στάθμη	Νολ	Νολx	Δελx	θx		Νολy	Δελy	θy	
Σ-1	222306	6727.9	0.7	3%	✓	7429.6	0.54	2%	✓

Στάθμη	Νολ	Volx	Δελx	θx		Volγ	Δελγ	θγ	
Σ0	214339	6989.6	1.3	5%	✓	7535.7	1.02	3%	✓
Σ1	235452	10314	2	5%	✓	11011	1.89	4%	✓
Σ2	224703	10530	2.5	6%	✓	10497	2.41	5%	✓
Σ3	201847	9567.4	2.6	6%	✓	10379	2.63	5%	✓
Σ4	178820	8755.3	2.6	5%	✓	8786.6	2.74	6%	✓
Σ5	154340	7078.5	2.8	6%	✓	6723.9	2.9	7%	✓
Σ6	146281	6933.4	2.9	6%	✓	6232.8	3.15	8%	✓
Σ7	138198	6781.1	2.9	6%	✓	5824.7	3.37	8%	✓
Σ8	130115	6620.6	2.9	6%	✓	5504.9	3.57	9%	✓
Σ9	122031	6381.2	2.9	5%	✓	5097.2	3.75	10%	✓
Σ10	114145	6239.1	2.9	5%	✓	4718.1	3.91	10%	✓
Σ11	106259	6117.2	2.8	5%	x	4427.9	4.06	10%	x
Σ12	98372.4	6029.9	2.7	4%	x	4194	4.19	10%	x
Σ13	90486.1	6018.1	2.7	4%	x	4075.3	4.31	9%	x
Σ14	82599.7	5893.4	2.6	3%	✓	4018.9	4.42	9%	✓
Σ15	74892.7	5892	2.5	3%	✓	4039.8	4.52	8%	✓
Σ16	67185.6	5813.3	2.4	3%	✓	4105.6	4.61	7%	✓
Σ17	59478.5	5743.1	2.4	2%	✓	4162.2	4.68	6%	✓
Σ18	51771.5	5528.8	2.3	2%	✓	4173.3	4.75	5%	✓
Σ19	44225.6	5319	2.2	2%	✓	4096.9	4.8	5%	✓
Σ20	36679.8	5088.7	2.1	1%	✓	3886	4.83	4%	✓
Σ21	29133.9	4436.6	2.1	1%	✓	3501.3	4.86	4%	✓
Σ22	21850.5	3912.5	2	1%	✓	2977.4	4.86	3%	✓
Σ23	14567	3166.1	1.9	1%	✓	2271.1	4.86	2%	✓
Σ24	7283.49	2666.4	1.8	3%	✓	1883.7	4.83	2%	✓

Πίνακας Δ.10. Επιρροή φαινομένων P-Δ, θέση μάζας 3

Στάθμη	Νολ	Volx	Δελx	θx		Volγ	Δελγ	θγ	
Σ-1	222306	6337.7	0.7	3%	✓	8016.9	0.54	2%	✓
Σ0	214339	6419.1	1.2	5%	✓	8097.6	1	3%	✓
Σ1	235452	9287.7	1.9	5%	✓	11455	1.83	4%	✓
Σ2	224703	9211.9	2.5	6%	✓	10972	2.34	5%	✓
Σ3	201847	8574.3	2.5	6%	✓	10667	2.48	5%	✓
Σ4	178820	7793.7	2.5	6%	✓	9327.5	2.66	5%	✓
Σ5	154340	6390.7	2.8	7%	✓	7015.8	2.9	7%	✓
Σ6	146281	6173.8	2.9	7%	✓	6448.9	3.16	7%	✓
Σ7	138198	5963.9	3	7%	✓	5979.2	3.37	8%	✓
Σ8	130115	5743.5	3	7%	✓	5604.2	3.57	9%	✓
Σ9	122031	5474	3	7%	✓	5115.6	3.75	9%	✓
Σ10	114145	5237.8	2.9	7%	✓	4662.2	3.91	10%	✓

Στάθμη	Νολ	Νολχ	Δελχ	θχ		Νολγ	Δελγ	θγ	
Σ11	106259	5027.4	2.9	6%	x	4307.9	4.05	10%	x
Σ12	98372.4	4860.9	2.8	6%	x	4027.3	4.19	11%	x
Σ13	90486.1	4759.3	2.7	5%	x	3905.1	4.31	10%	x
Σ14	82599.7	4663.4	2.7	5%	✓	3856.7	4.42	10%	✓
Σ15	74892.7	4652	2.6	4%	✓	3945	4.53	9%	✓
Σ16	67185.6	4634	2.5	4%	✓	4092	4.62	8%	✓
Σ17	59478.5	4627.7	2.4	3%	✓	4228.3	4.7	7%	✓
Σ18	51771.5	4529.6	2.4	3%	✓	4291.7	4.77	6%	✓
Σ19	44225.6	4424.5	2.3	2%	✓	4257.3	4.82	5%	✓
Σ20	36679.8	4274.1	2.2	2%	✓	4065.3	4.86	5%	✓
Σ21	29133.9	3726.1	2.1	2%	✓	3648.7	4.91	4%	✓
Σ22	21850.5	3284.8	2	1%	✓	3088.2	4.92	4%	✓
Σ23	14567	2619.4	1.9	1%	✓	2279.6	4.92	3%	✓
Σ24	7283.49	2215	1.9	1%	✓	1642.6	4.9	2%	✓

Πίνακας Δ.11. Επιρροή φαινομένων Ρ-Δ, θέση μάζας 4

Στάθμη	Νολ	Νολχ	Δελχ	θχ		Νολγ	Δελγ	θγ	
Σ-1	222306	6482.8	0.7	3%	✓	8256.8	0.57	2%	✓
Σ0	214339	6759.8	1.2	5%	✓	8336.3	1.07	3%	✓
Σ1	235452	9766.8	1.9	5%	✓	12019	1.97	4%	✓
Σ2	224703	10082	2.4	6%	✓	11492	2.5	5%	✓
Σ3	201847	9219.2	2.5	6%	✓	11211	2.73	5%	✓
Σ4	178820	8584.2	2.4	5%	✓	9577	2.87	6%	✓
Σ5	154340	7124.5	2.6	6%	✓	7322	3.01	7%	✓
Σ6	146281	7101	2.7	6%	✓	6741	3.26	7%	✓
Σ7	138198	7030.1	2.8	6%	✓	6249.6	3.47	8%	✓
Σ8	130115	6937.8	2.8	5%	✓	5851.6	3.66	8%	✓
Σ9	122031	6735.8	2.8	5%	✓	5395.2	3.83	9%	✓
Σ10	114145	6632.5	2.7	5%	✓	4975.5	3.98	10%	✓
Σ11	106259	6517.3	2.7	5%	x	4662.2	4.12	10%	x
Σ12	98372.4	6409.7	2.6	4%	x	4425.3	4.25	10%	x
Σ13	90486.1	6368.2	2.5	4%	x	4312	4.36	10%	x
Σ14	82599.7	6173.8	2.5	3%	✓	4290.9	4.48	9%	✓
Σ15	74892.7	6113.7	2.4	3%	✓	4340.7	4.57	8%	✓
Σ16	67185.6	5962.3	2.3	3%	✓	4431.7	4.66	7%	✓
Σ17	59478.5	5826.6	2.2	2%	✓	4499.6	4.74	7%	✓
Σ18	51771.5	5535	2.2	2%	✓	4509.2	4.81	6%	✓
Σ19	44225.6	5254.3	2.1	2%	✓	4414.3	4.86	5%	✓
Σ20	36679.8	4975.8	2	2%	✓	4175.9	4.89	4%	✓
Σ21	29133.9	4296.5	1.9	1%	✓	3732.6	4.93	4%	✓

Στάθμη	<i>Nολ</i>	<i>Volx</i>	<i>Δελx</i>	<i>θx</i>		<i>Volγ</i>	<i>Δελγ</i>	<i>θγ</i>	
Σ22	21850.5	3769.1	1.8	1%	✓	3173.8	4.93	4%	✓
Σ23	14567	3061.2	1.8	1%	✓	2439.5	4.93	3%	✓
Σ24	7283.49	2596.3	1.7	0%	✓	2029.4	4.9	2%	✓

Παρατηρούμε ότι στις στάθμες 11, 12 και 13 ο έλεγχος οριακά απαιτεί να ληφθούν υπόψη φαινόμενα δευτέρας τάξης. Από όλους τους συντελεστές επαύξησης που προκύπτουν, ο μέγιστος έχει τιμή 1.12.

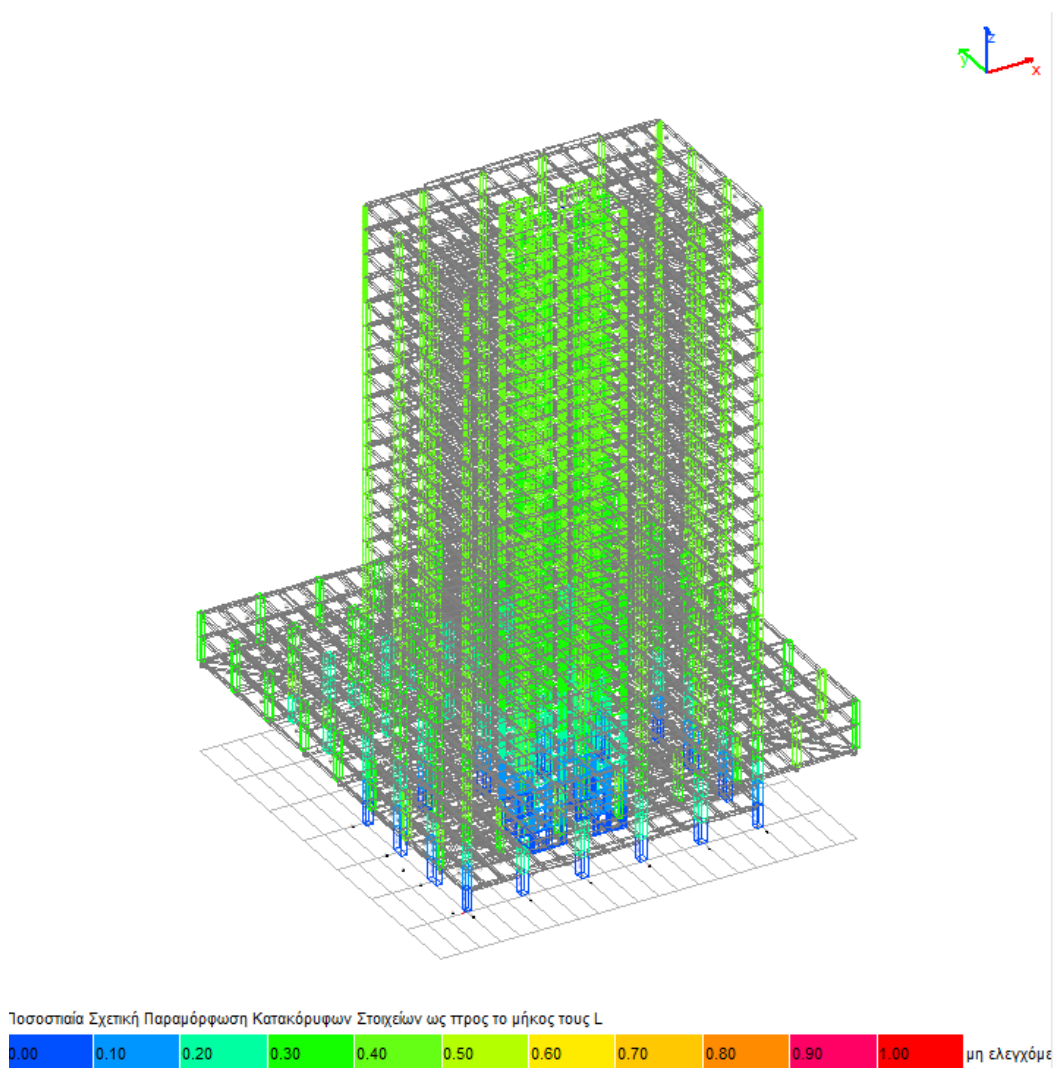
Μέγεθος & κατανομή σχετικών παραμορφώσεων ορόφων

Είναι κοινώς γνωστό ότι η πλειοψηφία των σεισμικών βλαβών οφείλονται στο μέγεθος των σχετικών μετακινήσεων (drift) των υποστυλωμάτων σε κάθε θέση. Ανάλογα με το μέγεθος αυτό, μπορούν να εκτιμηθούν έμμεσα οι αναμενόμενες σεισμικές βλάβες στα φέροντα και μη στοιχεία του κτιρίου. Στον παρακάτω πίνακα που έχει συνταχθεί από την Ευρωπαϊκή Σεισμολογική Επιτροπή (European Seismological Commission) παρουσιάζονται τα όρια της σχετική μετακίνησης και οι αναμενόμενες βλάβες στα φέροντα και μη στοιχεία.

Πίνακας Δ.12. Ορισμός επιπέδου βλάβης για κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα

<i>Definizione</i> (EMS98)	$\frac{Drift}{h}$ [%]
SD = null, NSD = null	< 1
SD = null, NSD = slight	1 – 2.5
SD = slight, NSD = moderate	2.5 – 5
SD = moderate, NSD = heavy	5 – 10
SD = heavy, NSD = very heavy	10 – 15
Destruction	> 15

Με τα αποτελέσματα της ιδιομορφικής ανάλυσης διαθέσιμα υπολογίζονται οι μέγιστες τιμές για κάθε στοιχείο και για όλους τους συνδυασμούς φόρτισης και τα αποτελέσματα συνοψίζονται στο Σχήμα Δ.4.

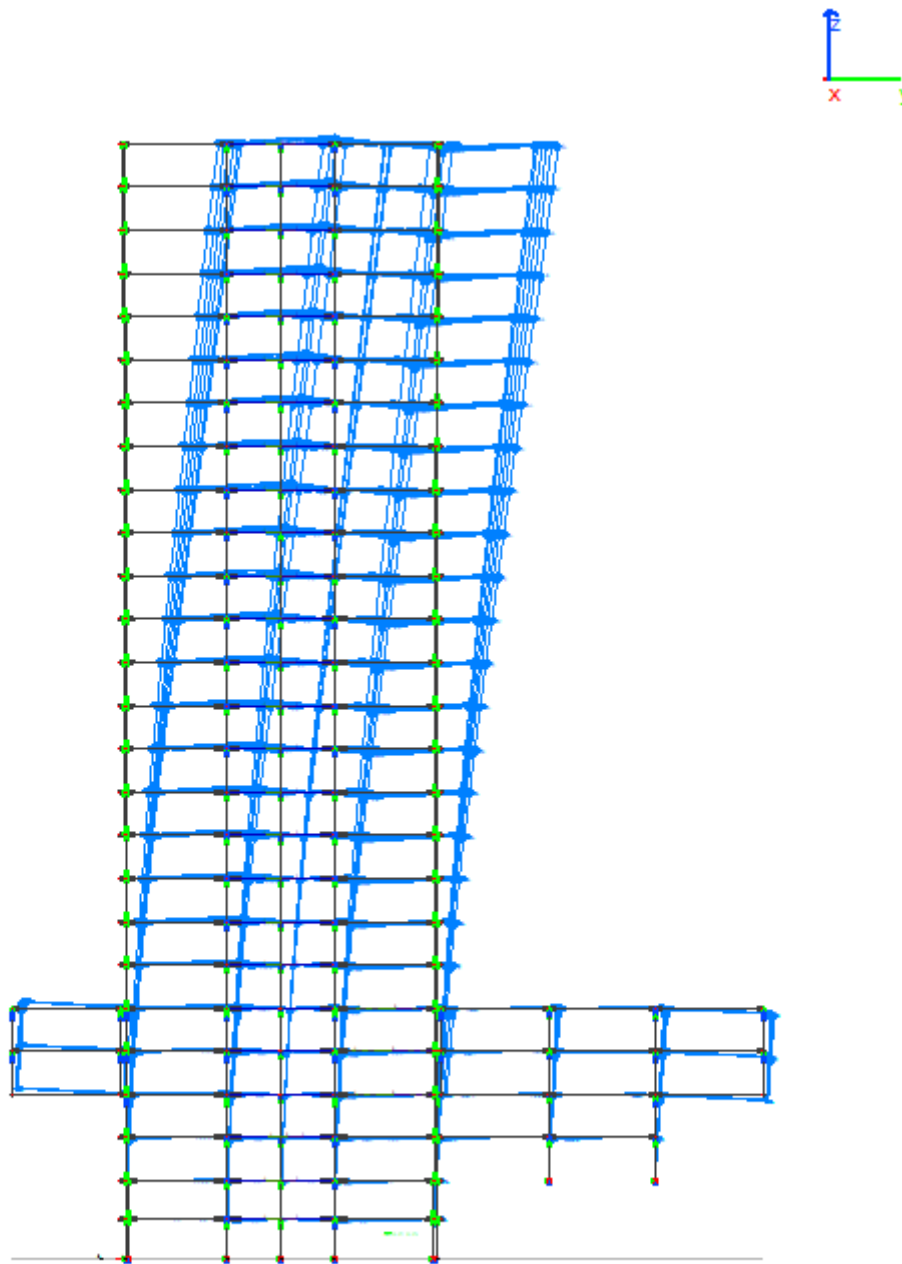


Σχήμα Δ.4. Σχετική παραμόρφωση κατακόρυφων στοιχείων

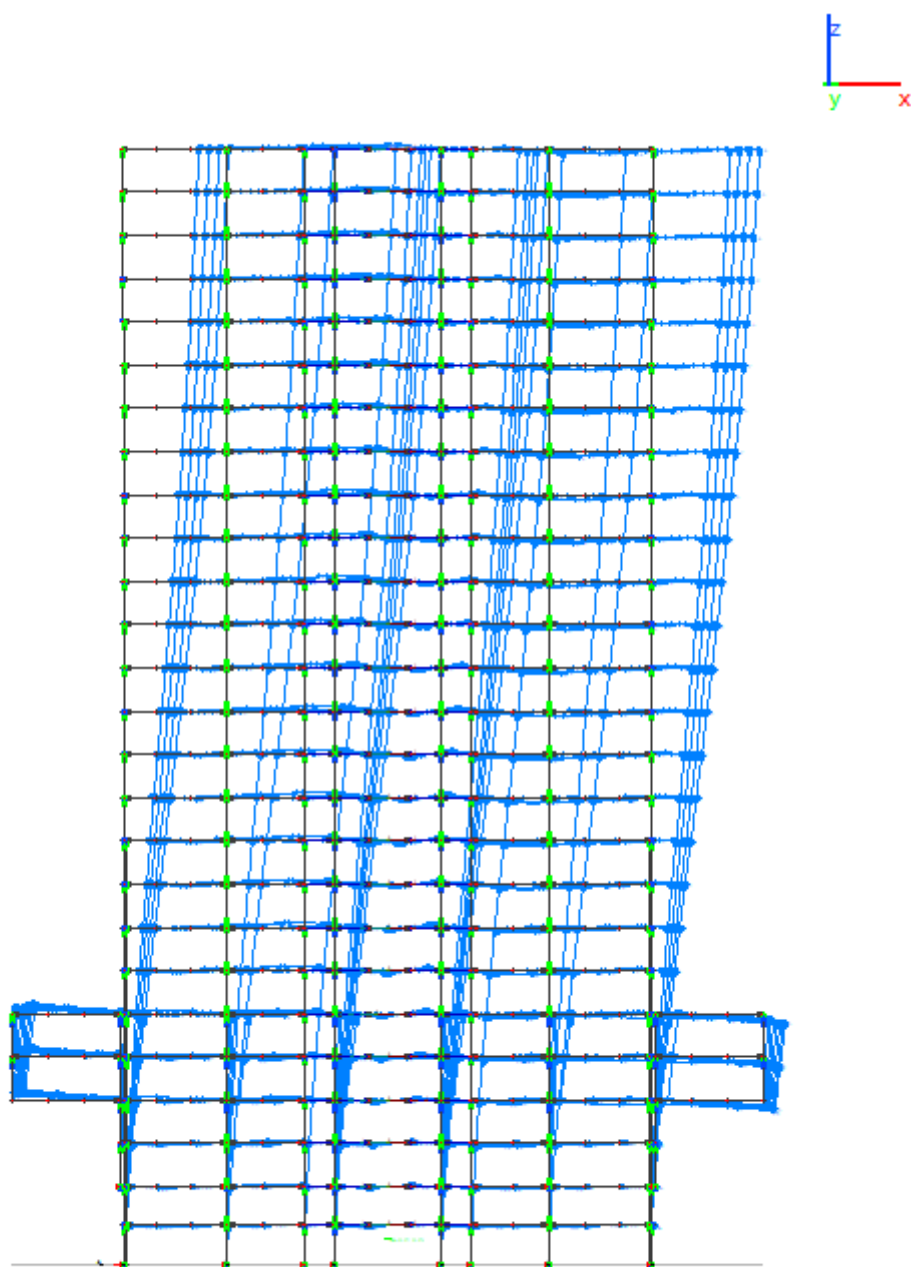
Παρατηρείται **ικανοποιητική συμπεριφορά**, με έντονη επικράτηση τιμών της τάξης του 0.50%.

Δ.4.2. Ιδιομορφές και ιδιοπερίοδοι

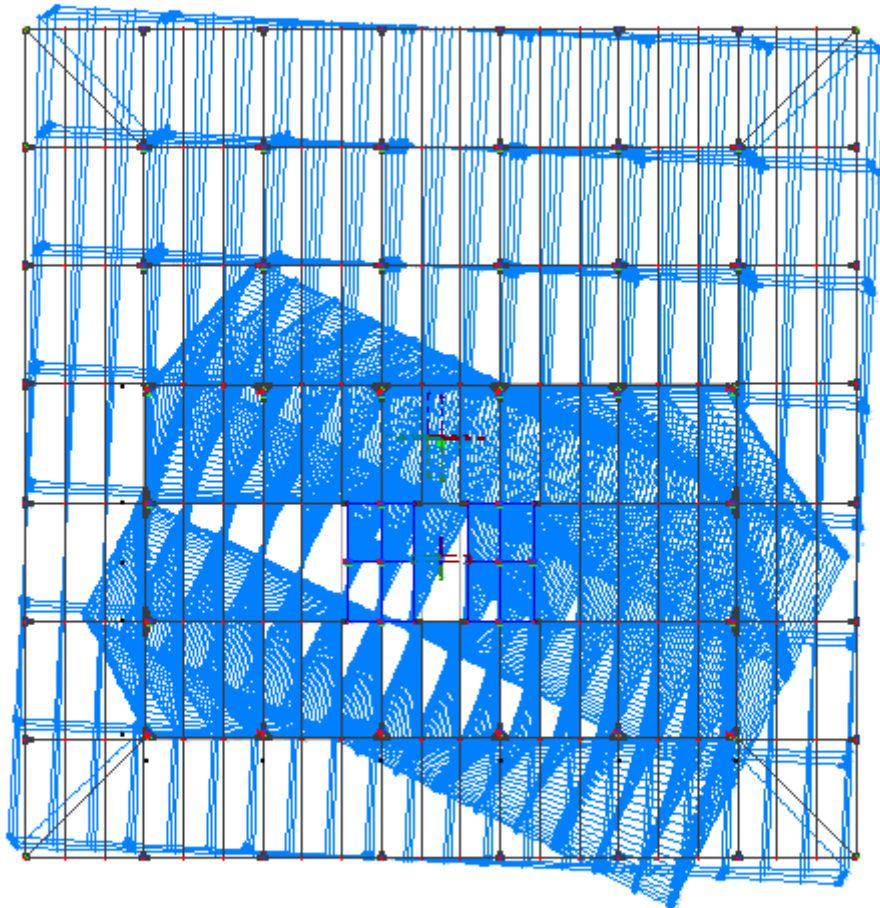
Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται οι έξι πρώτες ιδιομορφές ταλάντωσης, από τις 12 που προέκυψαν από την ανάλυση, για τη θέση μάζας 1. Αντίστοιχη εικόνα με ανεπαίσθητες οπτικά διαφοροποιήσεις προκύπτει για τις υπόλοιπες 3 θέσεις μάζας.



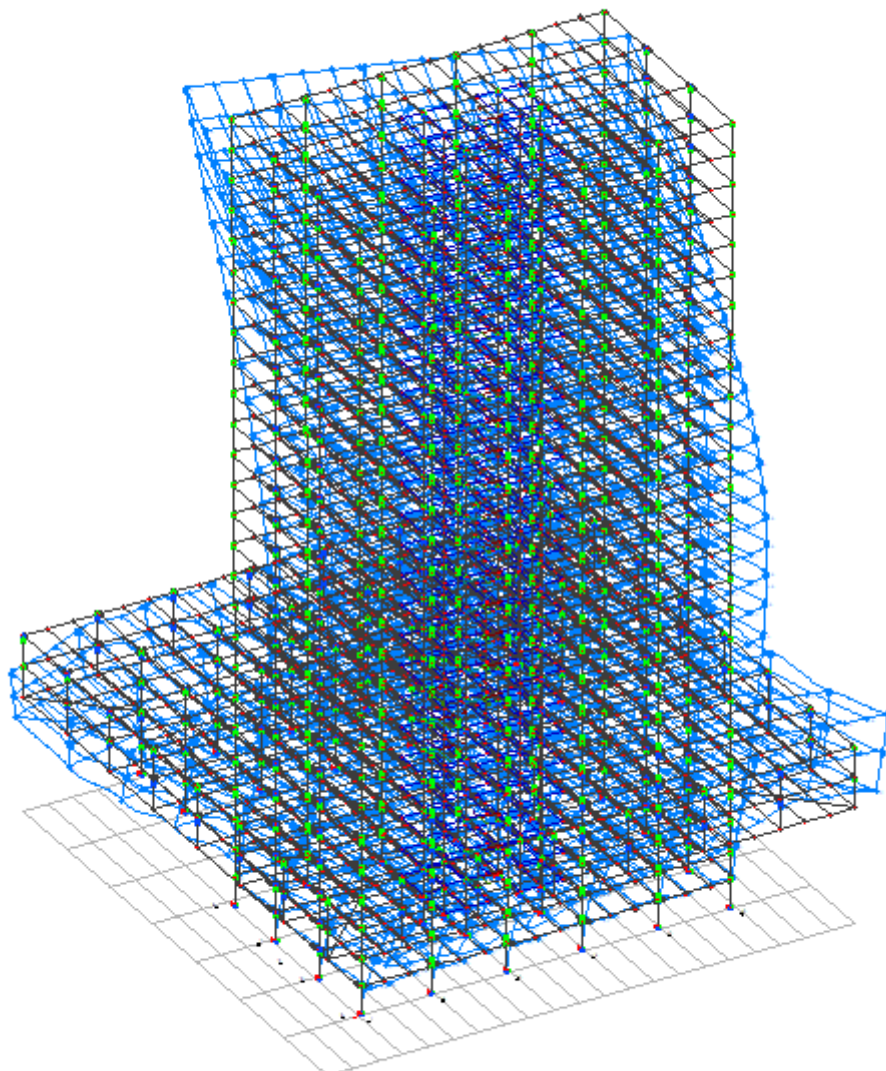
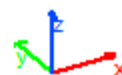
[δ]-Παραμόρφωση: Θέση Μάζας 1 Ιδιομορφή 1 Περίοδος T= 2.74976 sec



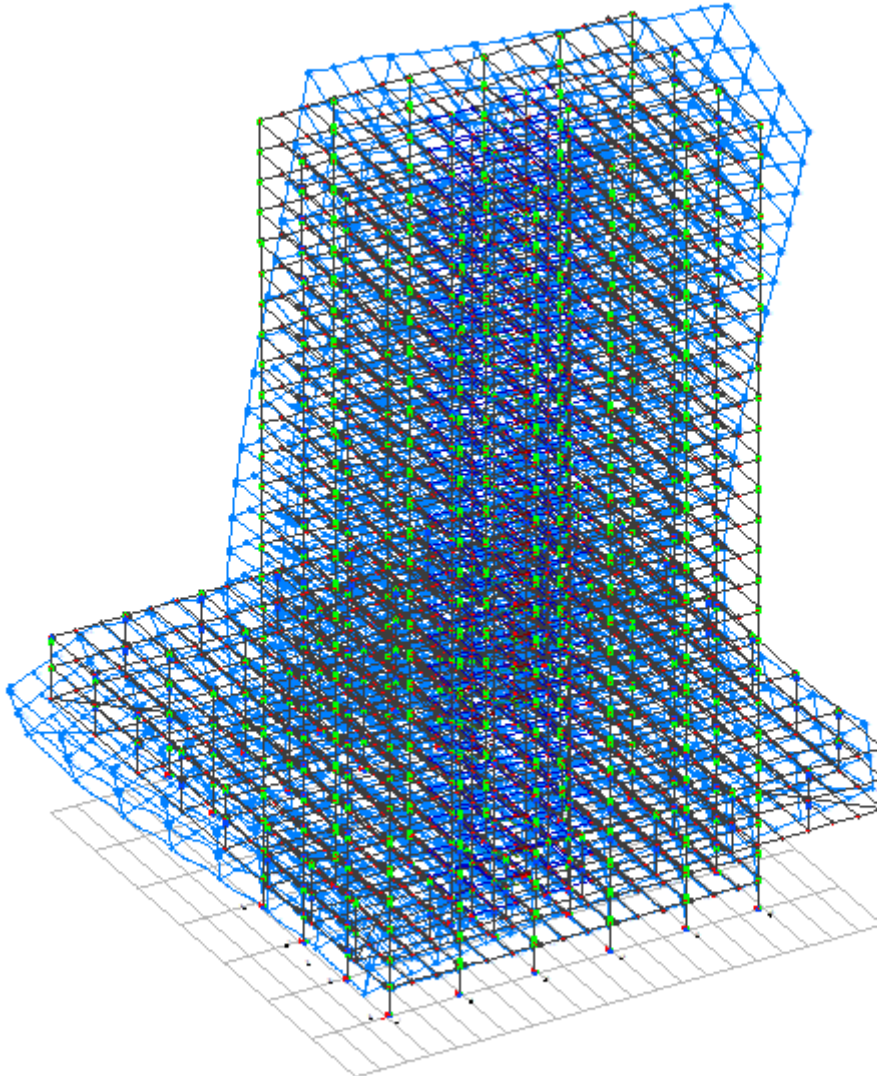
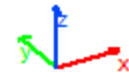
[δ]-Παραμόρφωση: Θέση Μάζας 1 Ιδιομορφή 2 Περίοδος $T= 2.14969$ sec



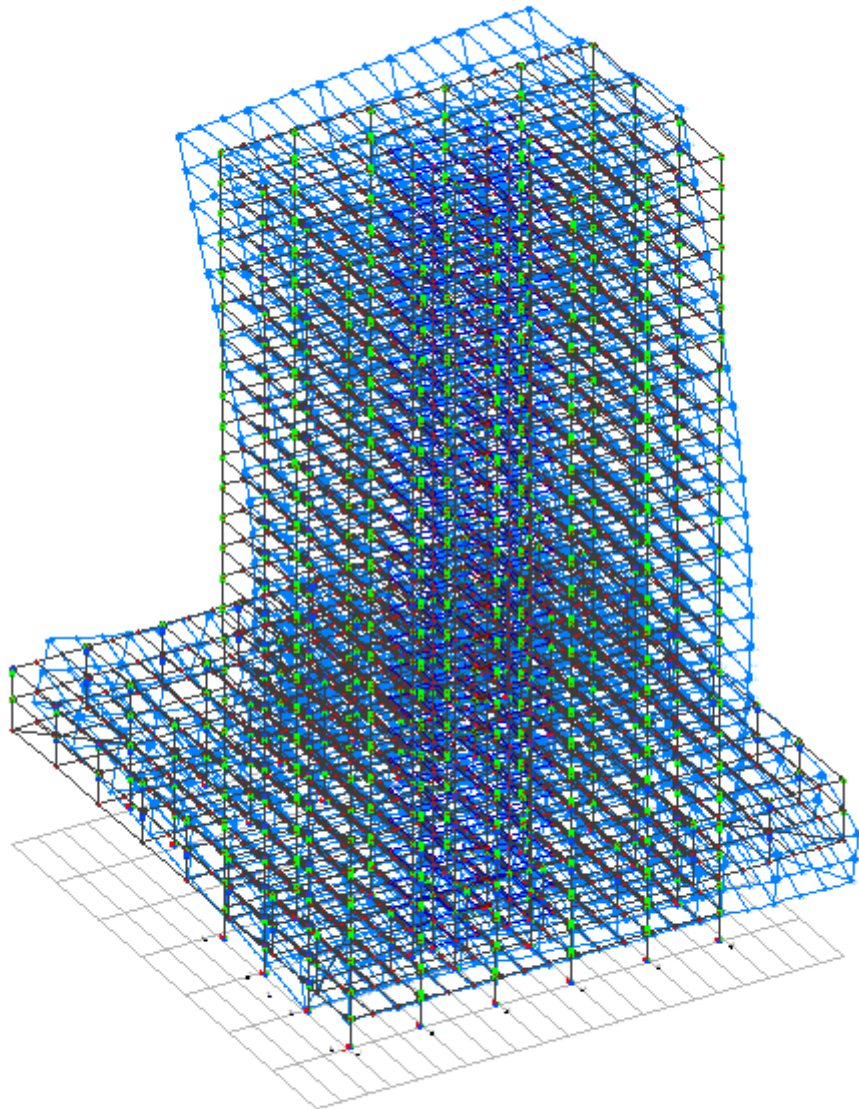
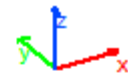
[δ]-Παραμόρφωση: Θέση Μάζας 1 Ιδιομορφή 3 Περίοδος $T= 1.76053 \text{ sec}$



[δ]-Παραμόρφωση: Θέση Μάζας 1 Ιδιομορφή 4 Περίοδος $T= 0.71355$ sec

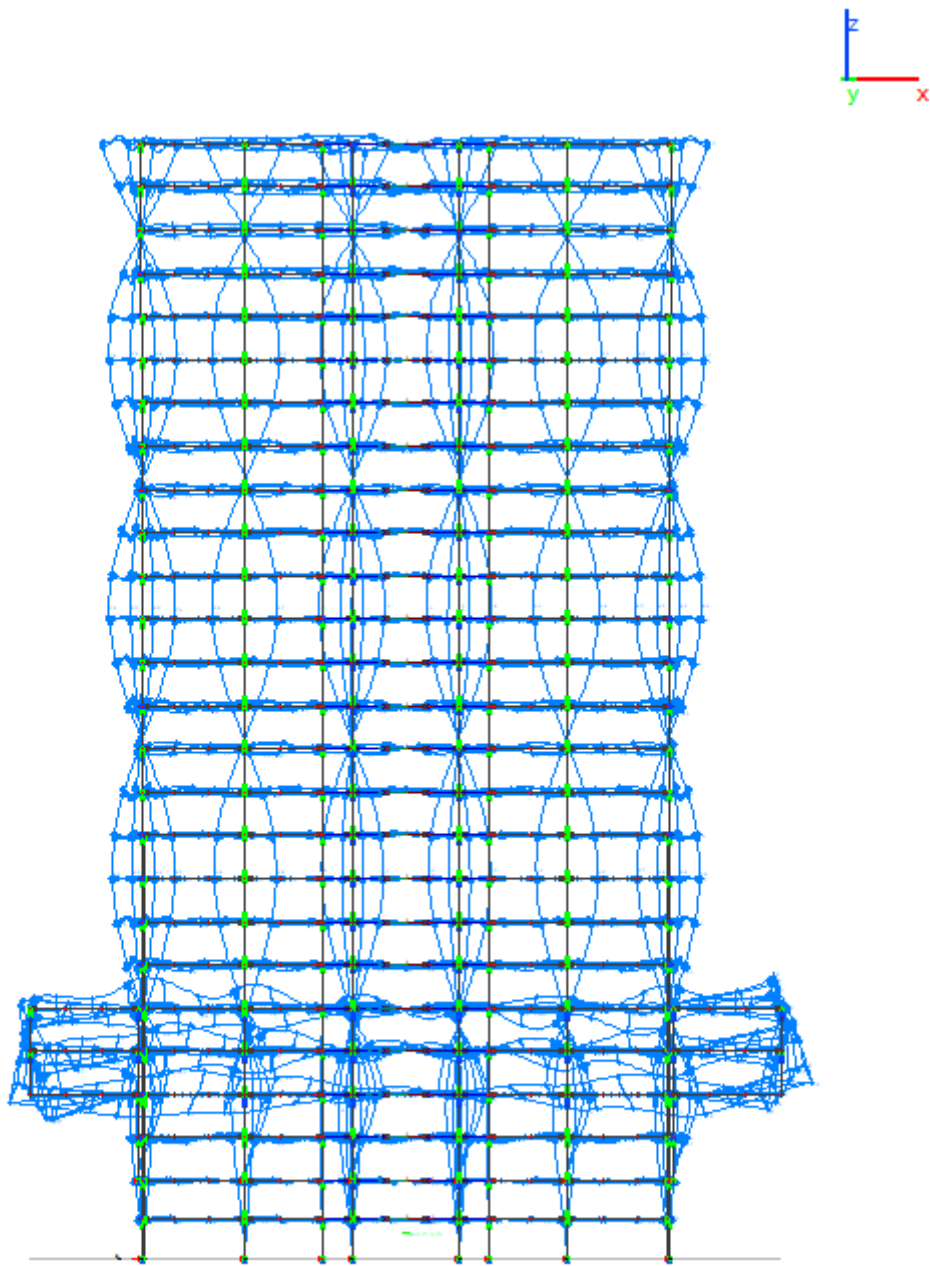


[δ]-Παραμόρφωση: Θέση Μάζας 1 Ιδιομορφή 5 Περίοδος T= 0.66110 sec

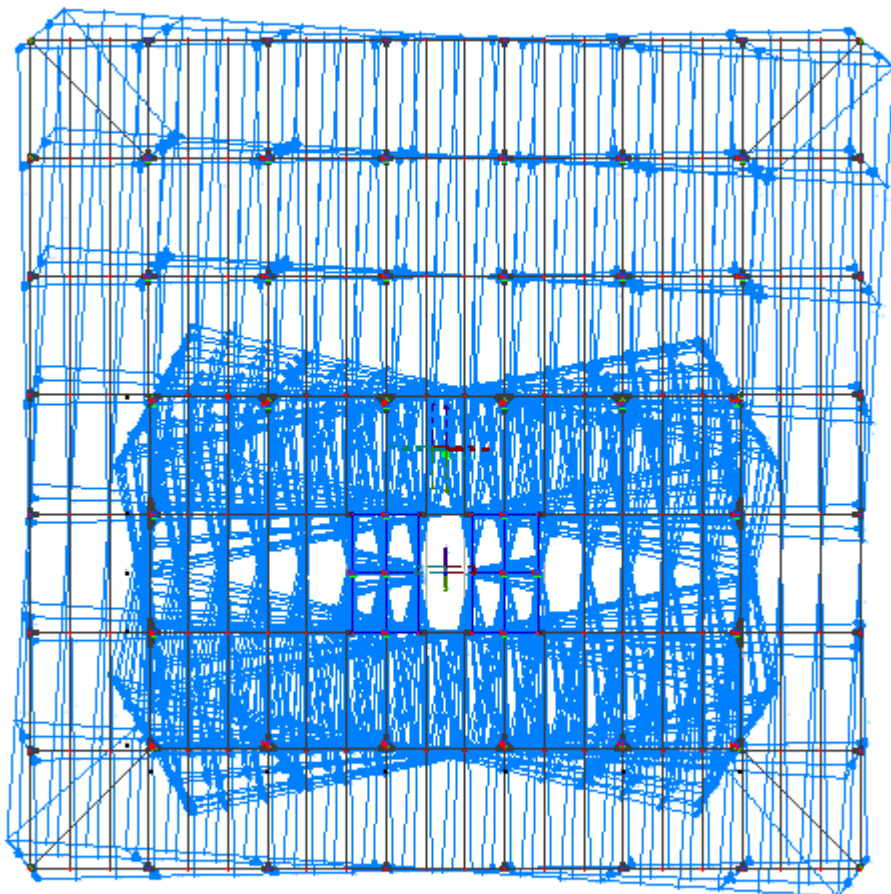


[δ]-Παραμόρφωση: Θέση Μάζας 1 Ιδιομορφή 6 Περίοδος $T= 0.57677$ sec

Τέλος, παρουσιάζεται ενδεικτικά η 12^η ιδιομορφή.



[δ]-Παραμόρφωση: Θέση Μάζας 1 Ιδιομορφή 12 Περίοδος $T= 0.18792 \text{ sec}$



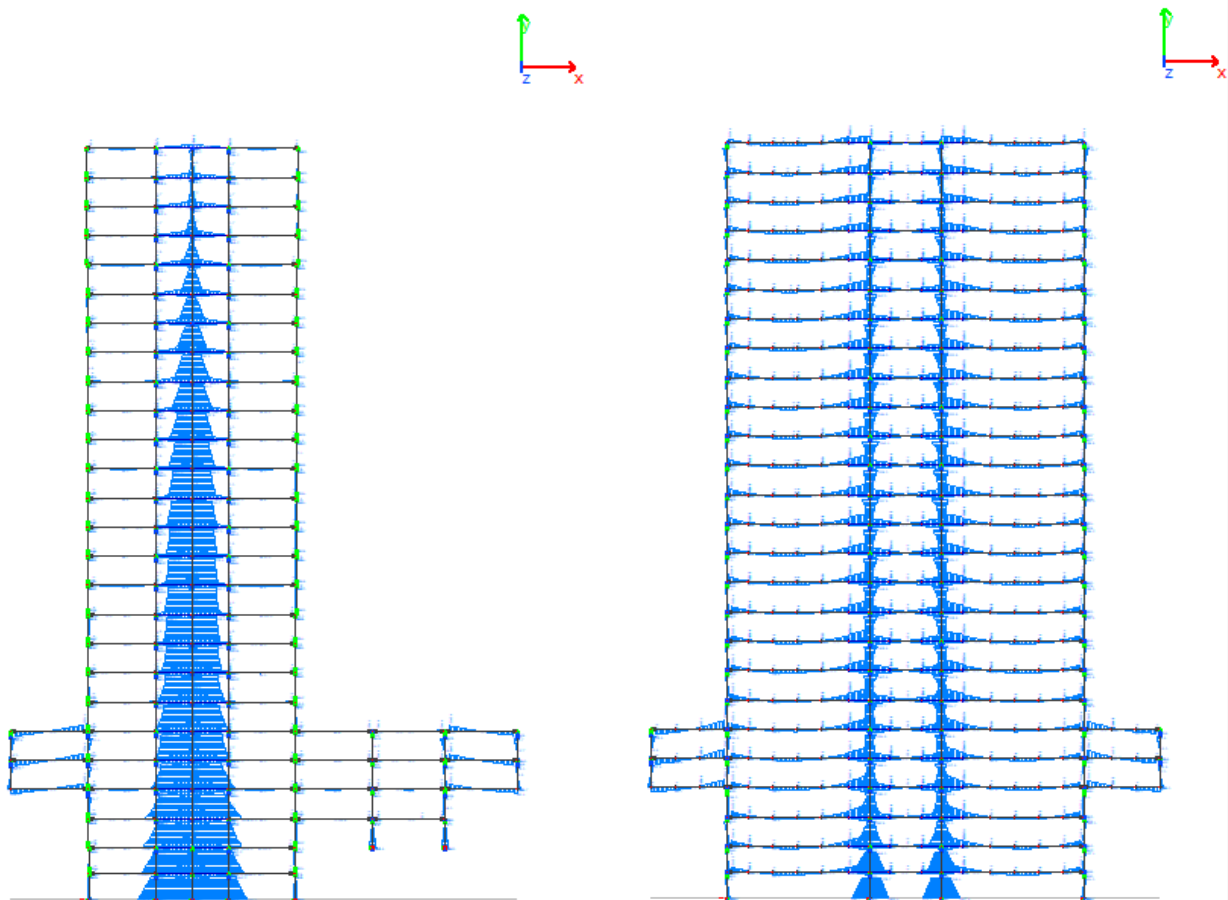
[δ]-Παραμόρφωση: Θέση Μάζας 1 Ιδιομορφή 12 Περίοδος $T= 0.18792 \text{ sec}$

Αριθμητικές τιμές για την 1^η θέση μάζας παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Ιδιομορφική Ανάλυση Κτιρίου														
α/α	Θέση Μάζας	Ιδιομορφή	Φασματικές Περίοδοι Συχνότητες				Φασματικές Επιταχύνσεις		Συντελεστές Συμμετοχής		Ποσοστό Ενεργοποιούμενης Μάζας			
			T	f	ω	ω^2	a_x	a_y	v_x	v_y	m_x	m_y	Σm_x	Σm_y
			[s]	[Hz]	[rad/s]	[(rad/s) ²]	[m/s ²]		[-]		[%]			
1	E1	No1	2.74976	0.36367	2.28500	5.22120	0.31392	0.31392	-2.35980	119.3687	0.021	53.762	0.021	53.762
2		No2	2.14969	0.46518	2.92283	8.54292	0.35986	0.35986	124.5504	3.43489	58.531	0.045	58.552	53.806
3		No3	1.76053	0.56801	3.56891	12.73711	0.43946	0.43946	26.86700	-8.47862	2.724	0.271	61.275	54.078
4		No4	0.71355	1.40144	8.80548	77.53649	1.08515	1.08515	27.66651	-24.7333	2.888	2.308	64.163	56.386
5		No5	0.66110	1.51264	9.50421	90.32998	1.17127	1.17127	-65.6000	-22.4212	16.237	1.897	80.400	58.282
6		No6	0.57677	1.73379	10.89371	118.67293	1.28931	1.28931	10.70430	-75.7211	0.432	21.634	80.832	79.916
7		No7	0.45392	2.20305	13.84216	191.60551	1.28931	1.28931	13.43903	15.01963	0.681	0.851	81.514	80.767
8		No8	0.36952	2.70622	17.00367	289.12467	1.28931	1.28931	-49.2295	1.89078	9.144	0.013	90.658	80.781
9		No9	0.27912	3.58270	22.51077	506.73495	1.28931	1.28931	2.36306	-38.2514	0.021	5.521	90.679	86.301
10		No10	0.27109	3.68875	23.17710	537.17807	1.28931	1.28931	1.27421	38.49558	0.006	5.591	90.685	91.893
11		No11	0.22689	4.40736	27.69224	766.86006	1.28931	1.28931	-27.3194	-0.78104	2.816	0.002	93.501	91.895
12		No12	0.18792	5.32147	33.43581	1117.95353	1.28412	1.28412	2.69949	1.82511	0.027	0.013	93.528	91.907

Δ.4.3. Εντατικά μεγέθη

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται η μορφή των περιβαλλουσών των καμπτικών ροπών του φορέα από όλους τους συνδυασμούς φόρτισης.

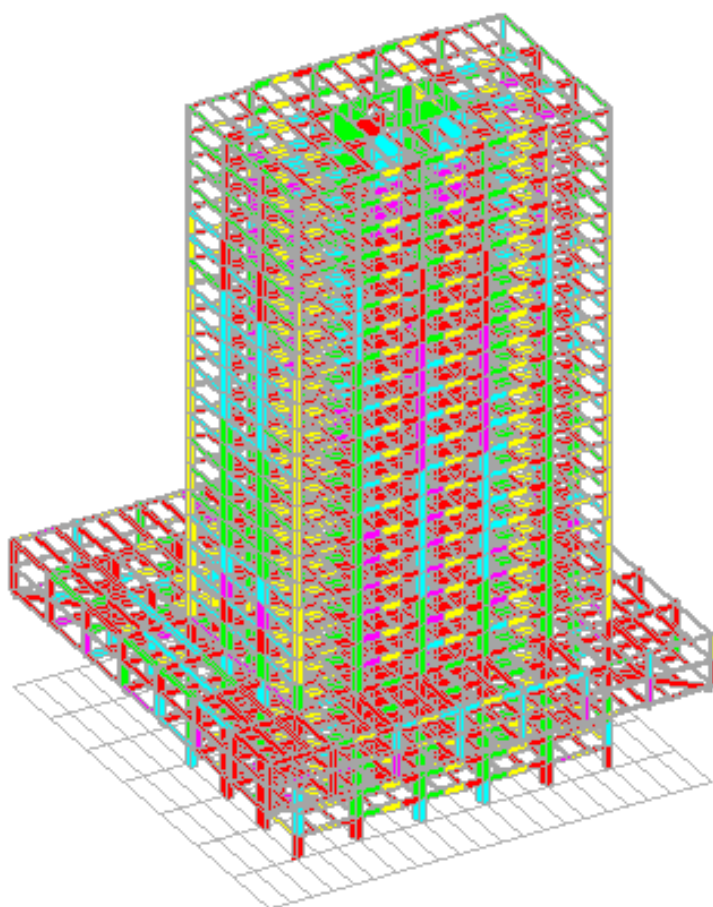


Περιβάλλουσες : [M]-Καμπτικές Ροπές

Περιβάλλουσες : [M]-Καμπτικές Ροπές

Δ.4.4. Έλεγχοι επάρκειας

Εκτελούνται εκ νέου οι έλεγχοι επάρκειας των στοιχείων, από τους οποίους προκύπτει γενικά κακή εικόνα, με πολύ περισσότερα στοιχεία να κρίνονται ανεπαρκή, σε σχέση με την προηγούμενη ανάλυση.



Εικόνα Δ.1. Έλεγχοι Επάρκειας μελών για την ιδιομορφική ανάλυση φάσματος απόκρισης



Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ελέγχων επάρκειας σε κάμψη και διάτμηση των τοιχωμάτων, που είναι τα κρίσιμότερα στοιχεία της κατασκευής, στη θέση όπου αυτά πακτώνονται στη θεμελίωση.

	Εξάντληση σε κάμψη	Εξάντληση σε τέμνουσα
T10-Σ-1	0.34	0.98
T4-Σ-1	0.35	1.28
T6-Σ-1	0.28	1
T3-Σ-1	0.31	0.95
T8-Σ-1	0.27	1.14
T11-Σ-1	0.33	0.97
T9-Σ-1	0.27	0.57
T5-Σ-1	0.28	1
T2-Σ-1	0.35	1.28
T12-Σ-1	0.31	0.95

Παρατηρείται επάρκεια σε κάμψη για όλα τα τοιχώματα. Ωστόσο, ο οπλισμός για τον οποίο έγινε ο έλεγχος (πλέγμα Φ10/20 στις δύο παρειές) είναι ανεπαρκής. Ενδεικτικά, για τα στοιχεία T2 και T4 που εμφανίζουν τη μεγαλύτερη ανεπάρκεια, έχουμε $maxV_{Ed} = 1516.5 \text{ KN}$ για τον δυσμενέστερο σεισμικό συνδυασμό, $V_{Rds} = 1181.8$, επομένως $C.R. = \frac{1516.5}{1181.8} = 1.28$. $V_{Rdmax} = 8624.4$.

Δ.5. Συμπεράσματα – συζήτηση

Ο έλεγχος της κατασκευής με εκτέλεση ιδιομορφική ανάλυση φάσματος απόκρισης με ενιαίο συντελεστή συμπεριφοράς q δείχνει ότι υπάρχουν εκτενείς ανεπάρκειες. Κρίνεται απαραίτητη η ενίσχυση των δομικών στοιχείων της κατασκευής προκειμένου να οδηγηθεί ο λόγος εξάντλησης αυτών κάτω από τη μονάδα. Στο σημείο αυτό ο μηχανικός διαθέτει μία πληθώρα επιλογών για το πως θα προχωρήσει. Υπάρχει το ενδεχόμενο προσομοίωσης του ενισχυμένου φορέα και επανεκτέλεση της ίδιας ανάλυσης έως ότου προκύψει επάρκεια για όλα τα δομικά στοιχεία. Ωστόσο προς όφελος της οικονομίας, δύναται η διεξαγωγή πιο προχωρημένων αναλύσεων με λιγότερες παραδοχές από αυτές που ενέχει η ιδιομορφική ανάλυση φάσματος με ενιαίο συντελεστή συμπεριφοράς.

Μία από αυτές τις επιλογές είναι η εκτέλεση ιδιομορφικής ανάλυσης φάσματος, με τη διαφορά ότι ο συντελεστής συμπεριφοράς της κατασκευής δεν θα επιλέγεται κανονιστικά και κατά παραδοχή, αλλά προκύπτει από μία διαδικασία αξιολόγησης της πλαστιμότητας των δομικών στοιχείων του φορέα (μέσω των διαγραμμάτων ροπών – γωνιών στροφής χορδής

αυτών). Η μέθοδος αυτή ονομάζεται «ιδιομορφική ανάλυση φάσματος με τοπικούς δείκτες m » και προτείνεται στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. Ωστόσο αυτή η μέθοδος δεν παρουσιάζεται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Μία άλλη επιλογή είναι η εκτέλεση μη γραμμικής ανάλυσης, όπως η «Ανελαστική Στατική Υπερωθητική Ανάλυση (Pushover Analysis)» για τον προσδιορισμό της ικανότητας, της απαίτησης σχεδιασμού και της συμπεριφοράς της κατασκευής πριν και μετά την ενίσχυση. Με την εξέλιξη αυτής της μεθόδου εγκαταλείπονται αρκετές παραδοχές και αντικαθίστανται από νέα δεδομένα που χαρακτηρίζουν την κατασκευή και τα δομικά της στοιχεία, με αποτέλεσμα την ακριβέστερη προσομοίωσή της, γεγονός που κατά κανόνα οδηγεί σε μικρότερες απαιτήσεις ενίσχυσης. Η μέθοδος αυτή θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο Ε.

Διερεύνηση της μετελαστικής συμπεριφοράς του φορέα και πρόταση ενίσχυσης του πυρήνα με ινοπλισμένα πολυμερή (F.R.P.).

E.1. Μέθοδος ανάλυσης

Εφοδιασμένοι με τα αποτελέσματα των προηγούμενων αναλύσεων προχωράμε στην περαιτέρω διερεύνηση του φορέα ανοίγοντας ένα νέο κεφάλαιο στο οποίο εξετάζεται η μετελαστική συμπεριφορά της κατασκευής, με εκτέλεση **ανελαστικής στατικής υπερωθητικής ανάλυσης (Static Pushover Analysis)**. Διερευνάται η συμπεριφορά της υφιστάμενης κατασκευής και το αποτέλεσμα που θα είχε η ενίσχυση μελών με ινοπλισμένα πολυμερή.

E.2. Θεωρητικό υπόβαθρο

E.2.1. Η γενική ιδέα της μεθόδου

Η στατική υπερωθητική ανάλυση προέκυψε από την επιθυμία για πρόγνωση και παρακολούθηση της συμπεριφοράς μίας κατασκευής αφότου αυτή περάσει στην ανελαστική περιοχή. Αποτελεί εφαρμογή της ανελαστικής στατικής. Απαιτεί δεδομένη τη γνώση της ανελαστικής συμπεριφοράς των επιμέρους στοιχείων που απαρτίζουν το φορέα και μέσω αυτής γίνεται πρόβλεψη της συμπεριφοράς του ίδιου του φορέα. Ένα εξαιρετικά απλοποιημένο παράδειγμα αποτελεί ένα υποστυλώμα πρόβολος το οποίο καταπονείται με ένα επαυξητικό οριζόντιο φορτίο στην κεφαλή του. Καθώς το φορτίο αυξάνεται, η ροπή στη βάση του προβόλου αυξάνεται ανάλογα. Στη βάση του στοιχείου μπορεί να γίνει η θεώρηση ότι υπάρχει μία άρθρωση που συνδέει την ανωδομή (πρόβολος) με την υποδομή (στηρίξη) και έχει αρχικά άπειρη στρωφική δυσκαμψία. Αν είναι γνωστή η ανελαστική σχέση της στρωφικής δυσκαμψίας της άρθρωσης συναρτήσει της εξωτερικά επιβαλλόμενης

ροπής, μπορεί να υπολογιστεί η μετακίνηση στην κορυφή του προβόλου για κάθε τιμή του επαυξητικού φορτίου, η οποία θα είναι επίσης ανελαστική. Η σχέση της τέμνουσας βάσης του φορέα (το επαυξητικό φορτίο στην περίπτωση μας) συναρτήσει της μετακίνησης του κόμβου ελέγχου (η κορυφή του προβόλου στην περίπτωση μας) είναι η **καμπύλη ικανότητας** ή **καμπύλη αντίστασης** του φορέα. Έπειτα η ικανότητα του φορέα, όπως εκφράζεται μέσω της καμπύλης, αξιολογείται συνυπολογίζοντας την απαίτηση του φάσματος σχεδιασμού, με συγκεκριμένη διαδικασία, και τέλος ο φορέας κρίνεται ως προς την επάρκεια/ανεπάρκειά του.

E.2.2. Περιγραφή της μεθόδου & βασικές έννοιες

Ακολουθεί η περιγραφή της μεθόδου, η οποία γίνεται με σταδιακή επεξήγηση βασικών εννοιών.

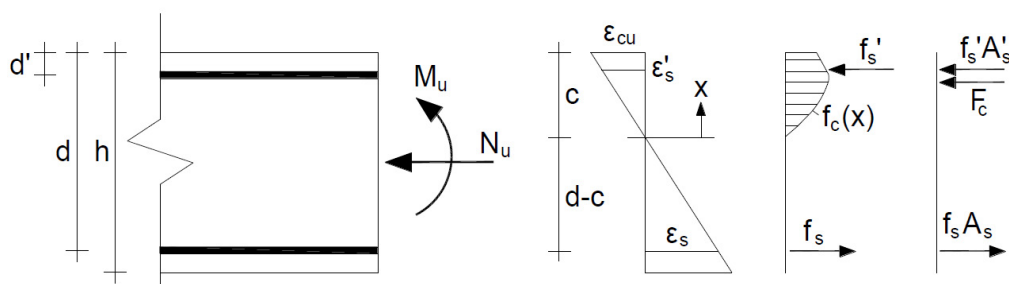
Πλαστική άρθρωση

Κάθε απειροστό τμήμα ενός στοιχείου που αποτελεί μέρος ενός φορέα έχει πράγματι μία συγκεκριμένη σχέση δράσης – παραμόρφωσης η οποία δεν είναι ποτέ γραμμική (ελαστική) και εξαρτάται από πολυάριθμες παραμέτρους, όπως η γεωμετρία της διατομής, η όπλισή της και οι αγκυρώσεις αυτής, η περίοφιγξη, η ποιότητα των υλικών, η τρέχουσα εντατική κατάσταση, η παρελθοντική εντατική κατάσταση, αλλά και πολλές άλλες παράμετροι που αμελούνται στην πράξη ως επουσιώδους σημασίας, όπως η θερμοκρασία, η ποιότητα σκυροδέτησης, η ενανθράκωση / διάβρωση και η γήρανση εν γένει κλπ. Ένας τρόπος μαθηματικής προσομοίωσης αυτής της συμπεριφοράς, για καμπτικές καταπονήσεις γραμμικών στοιχείων, είναι η θεώρηση των πλαστικών αρθρώσεων. Θεωρείται ότι σε προκαθορισμένες θέσεις ενός στοιχείου (πρακτικά στα άκρα) μετά την υπέρβαση του ορίου καμπτικής αντοχής λύεται η συνέχεια με εισαγωγή μίας ελευθέρωσης και πλέον επιτρέπεται η σχετική στροφή των τμημάτων που περιβάλλουν την άρθρωση. Η παραδοχή του απειροστού μήκους της πλαστικής άρθρωσης φυσικά δεν είναι ρεαλιστική, αφού η περιοχή στην οποία έχει διαρρεύσει ένα στοιχείο πάντα καταλαμβάνει κάποιο τμήμα του.

Το τμήμα αυτό ονομάζεται μήκος της πλαστικής άρθρωσης και λαμβάνεται υπόψη στις αναλύσεις.

Διάγραμμα ροπών – καμπυλοτήτων διατομής

Το διάγραμμα ροπών – καμπυλοτήτων μίας διατομής είναι η συσχέτιση της εξωτερικά επιβαλλόμενης ροπής M που καταπονεί τη συγκεκριμένη διατομή, σε σχέση με την αντίστοιχη καμπυλότητα $\kappa = \frac{1}{R}$ στην ίδια θέση. Από την κλασσική μηχανική, η καμπυλότητα μίας μονοαξονικά καμπτόμενης διατομής μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει των παραμορφώσεων των ακραίων ινών της σύμφωνα με τη σχέση $\kappa = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{h}$. Ο υπολογισμός του μεγέθους της ροπής αντίστασης της διατομής μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας κλειστές μαθηματικές εκφράσεις, όπως ενδεικτικά παρουσιάζονται οι εξισώσεις (E.1) και (E.2)⁹



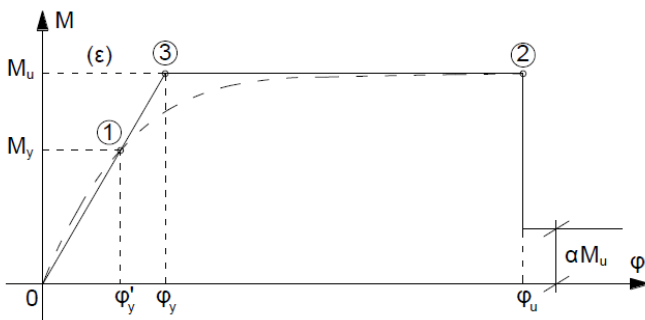
Σχήμα E.1 Ορισμός μεγεθών

⁹ Για πιο περίπλοκες περιπτώσεις, όπως π.χ. διαξονική κάμψη, απαιτείται αριθμητική προσομοίωση – βελτιστοποίηση για τον προσδιορισμό των μεγεθών.

$$N_u = \int_0^x (f_c \cdot b) dx + A'_s \cdot f'_s + A_s \cdot f_s \rightarrow x = \dots \quad (\text{E.1})$$

$$M(x) = \int_0^x \left(f_c \cdot b \cdot \left(\frac{h}{2} - c + x \right) \right) dx - A'_s \cdot f'_s \cdot \left(\frac{h}{2} - d' \right) + A_s \cdot f_s \cdot \left(d - \frac{h}{2} \right) \quad (\text{E.2})$$

Με ανάλογο τρόπο για χαρακτηριστικές θέσεις παραμόρφωσης της διατομής (διαρροή οπλισμού, αστοχία σκυροδέματος κλπ.) κατασκευάζεται το διάγραμμα ροπών – καμπυλοτήτων της διατομής. Υπάρχει επιπλέον η δυνατότητα να συμπεριληφθεί η επίδραση της περισφιγξης, με διάφορους νόμους που προκύπτουν κατά κανόνα με επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων. Τα σύγχρονα κανονιστικά πλαίσια απαιτούν τη χρήση διγραμμικών διαγραμμάτων ροπών-καμπυλοτήτων. Επομένως, το διάγραμμα στη συνέχεια, ανεξαρτήτως του αριθμού μετελαστικών κλάδων που έχει, διγραμμικοποιείται (Σχήμα E.2) σε έναν αρχικό ελαστικό κλάδο που χαρακτηρίζει την ενεργό δυσκαμψία της διατομής, και έναν οριζόντιο μετελαστικό κλάδο. Τέλος, για αποφυγή αριθμητικής αστάθειας κατά την ανάλυση, μετά την ανάπτυξη της οριακής καμπυλότητας της διατομής επιτρέπεται συνήθως η αποδοχή μίας παραμένουσας αντοχής ως ποσοστό της M_u , το οποίο συνήθως λαμβάνεται 20%.



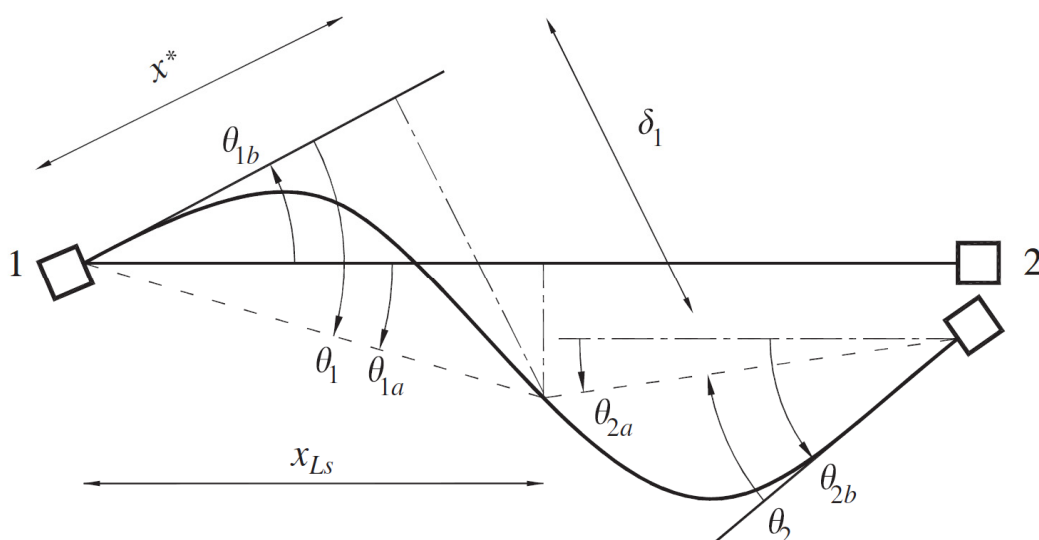
Σχήμα Ε.2 Διγραμμικοποίηση διαγράμματος ροπών - καμπυλοτήτων

Διάγραμμα ροπών – στροφών πλαστικής άρθρωσης

Σύμφωνα με τη σχέση $\theta = \int_{x_1}^{x_2} \kappa(x) dx$ η οποία συνδέει τις καμπυλότητες κ με τη στροφή θ , μπορεί να γίνει μετασχηματισμός του διαγράμματος ροπών – καμπυλοτήτων διατομής σε διάγραμμα ροπών – στροφών πλαστικής άρθρωσης. Ωστόσο εισάγεται μία επιπλέον παράμετρος προς προσδιορισμό, η οποία είναι το μήκος της πλαστικής άρθρωσης, για το οποίο υπάρχουν σχέσεις στη βιβλιογραφία, που προκύπτουν κατά κανόνα με επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων.

Διάγραμμα ροπής – στροφής χορδής δομικού στοιχείου

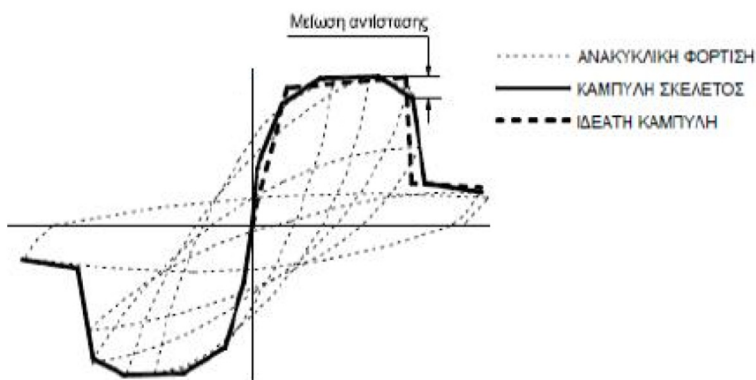
Για την ανάλυση και τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του φορέα θα μπορούσε να γίνει χρήση των διαγραμμάτων ροπών – στροφών πλαστικών αρθρώσεων, με θεώρηση πλαστικών αρθρώσεων σε κρίσιμες θέσεις, όπως τα άκρα κάθε στοιχείου. Ωστόσο, με αυτόν τον τρόπο θα ήταν αδύνατο να ληφθεί υπόψη η επίδραση των τεμνουσών δυνάμεων στη μεταλαστική συμπεριφορά των μελών, η οποία είναι εξίσου σημαντική με τις ροπές κάμψης. Δεδομένου ότι η συμπεριφορά ενός στοιχείου το οποίο έχει αστοχήσει σε τέμνουσα παύει να είναι πλάσιμη και είναι εξαιρετικά απρόβλεπτη (σε σημείο που ενδέχεται το στοιχείο πλέον να αδυνατεί να φέρει έστω τα κατακόρυφα φορτία), είναι εξαιρετικής σημασίας η παρακολούθηση του μεγέθους της τέμνουσας. Θα μπορούσε να θεωρηθεί ένα διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων V συναρτήσει της γωνιακής παραμόρφωσης γ των στοιχείων, όμως προκειμένου να μπορεί να συνυπολογίζεται η επίδραση των ροπών κάμψης και των τεμνουσών δυνάμεων ταυτόχρονα, οι κανονισμοί (EC8, ΚΑΝ.ΕΠΕ.) προτείνουν τη χρήση διαγραμμάτων ροπής M – γωνίας στροφής χορδής θ_{CR} .



Σχήμα Ε.3. Γεωμετρικός ορισμός γωνίας στροφής χορδής.

Γωνία στροφής χορδής του άκρου ενός γραμμικού στοιχείου ονομάζεται η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του νοητού τμήματος που συνδέει το άκρο με το σημείο μηδενισμού των ροπών του στοιχείου, και της εφαπτόμενης στο άκρο ευθείας (δεδομένης της πλήρους πάκτωσης του άκρου στον κόμβο). Έχουν προταθεί επιπλέον ορισμοί και υπολογιστικές μέθοδοι προσδιορισμού και παρακολούθησης του μεγέθους αυτού κατά την εκτέλεση ανελαστικών αναλύσεων. (Romão, et al., 2009)

Η κατασκευή των διαγραμμάτων έχει ιδεατή μορφή, η οποία βασίζεται στην καμπύλη – σκελετό της συμπεριφοράς σε ανακυκλική φόρτιση, όπως φαίνεται στο Σχήμα Ε.4.



Σχήμα Ε.4. Καμπύλη Μ-θ άκρου στοιχείου

Παρακολουθώντας το μέγεθος της γωνίας στροφής χορδής, δίνεται η δυνατότητα ταυτόχρονης αξιολόγησης της συνεισφοράς της τέμνουσας στην απόκριση του μέλους, με τη χρήση αναλυτικών σχέσεων που υπάρχουν στη βιβλιογραφία και προτείνονται στους κανονισμούς, οι οποίες συνήθως προκύπτουν από επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων.

Συγκεκριμένα, κατά τις διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ, η γωνία στροφής χορδής στη διαρροή υπολογίζονται από τις σχέσεις (Ε.3) για δοκούς – υποστυλώματα και (Ε.4) για τοιχία.

$$\theta_y = \left(\frac{1}{r}\right)_y \cdot \frac{L_s + a_{VZ}}{3} + 0.0014 \left(1 + 1.5 \cdot \frac{h}{L_s}\right) + \frac{\left(\frac{1}{r}\right)_y \cdot d_b \cdot f_y}{8\sqrt{f_c}} \quad (\text{Ε.3})$$

$$\theta_y = \left(\frac{1}{r}\right)_y \cdot \frac{L_s + a_{VZ}}{3} + 0.0013 + \frac{\left(\frac{1}{r}\right)_y \cdot d_b \cdot f_y}{8 \cdot \sqrt{f_{ck}}} \quad (\text{Ε.4})$$

L_s είναι ο λόγος μεταξύ της ροπής κάμψης M και της τέμνουσας δύναμης V . a_v είναι τιμή ίση με 1.00 εάν η τιμή της τέμνουσας δύναμης V_{R1} , που προκαλεί διαγώνια ρηγμάτωση στο μέλος, είναι μικρότερη από την τιμή της τέμνουσας δύναμης τη στιγμή της διαρροής $V_{Mu} = \frac{M_y}{L_s}$, διαφορετικά έχει τιμή 0.

Η οριακή τιμή της γωνίας στροφής χορδής υπολογίζεται από τις σχέσεις

$$\theta_{um} = 0.016 \cdot (0.3^v) \cdot \left[\frac{\max(0.01; \omega')}{\max(0.01; \omega)} \cdot f_c \right]^{0.225} \cdot (a_s)^{0.35} \cdot 25^{\left(a \cdot \rho_s \cdot \frac{f_{yw}}{f_c}\right)} \cdot (1.25^{(100 \cdot \rho_d)}) \cdot \frac{1}{\gamma_{Rd}} \quad (\text{E.5})$$

(Σ.8a)
ΚΑΝ.ΕΠΕ.

$$\theta_{um} = 0.009 \cdot (0.3^v) \cdot \left[\frac{\max(0.01; \omega')}{\max(0.01; \omega)} \cdot f_c \right]^{0.225} \cdot (a_s)^{0.35} \cdot \frac{2^{\left(a \cdot \rho_{sx} \cdot \frac{f_{yw}}{f_c}\right)}}{5} \cdot (1.25^{(100 \cdot \rho_d)}) \cdot \frac{1}{\gamma_{Rd}} \quad (\text{E.6})$$

(Σ.8a)
ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Οι τιμές που προκύπτουν από τις εξισώσεις (E.5) και (E.6) διαιρούνται με την τιμή 1.20 σε περίπτωση που η διαστασιολόγηση των μελών έγινε με τους κανονισμούς προ του 1985.

Η αντοχή σε τέμνουσα υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση.

$$V_R = \frac{h - x}{2 \cdot L_s} \cdot \min\{N; 0.55A_c \cdot f_c\} + (1 - 0.05 \cdot \min\{5; \mu_\theta^{pl}\}) \cdot [0.16 \cdot \max\{0.5; 100 \rho_{tot}\} \cdot (1 - 0.16 \cdot \min\{5; a_s\}) \cdot \sqrt{f_c} \cdot A_c + V_w] \quad (\text{E.7})$$

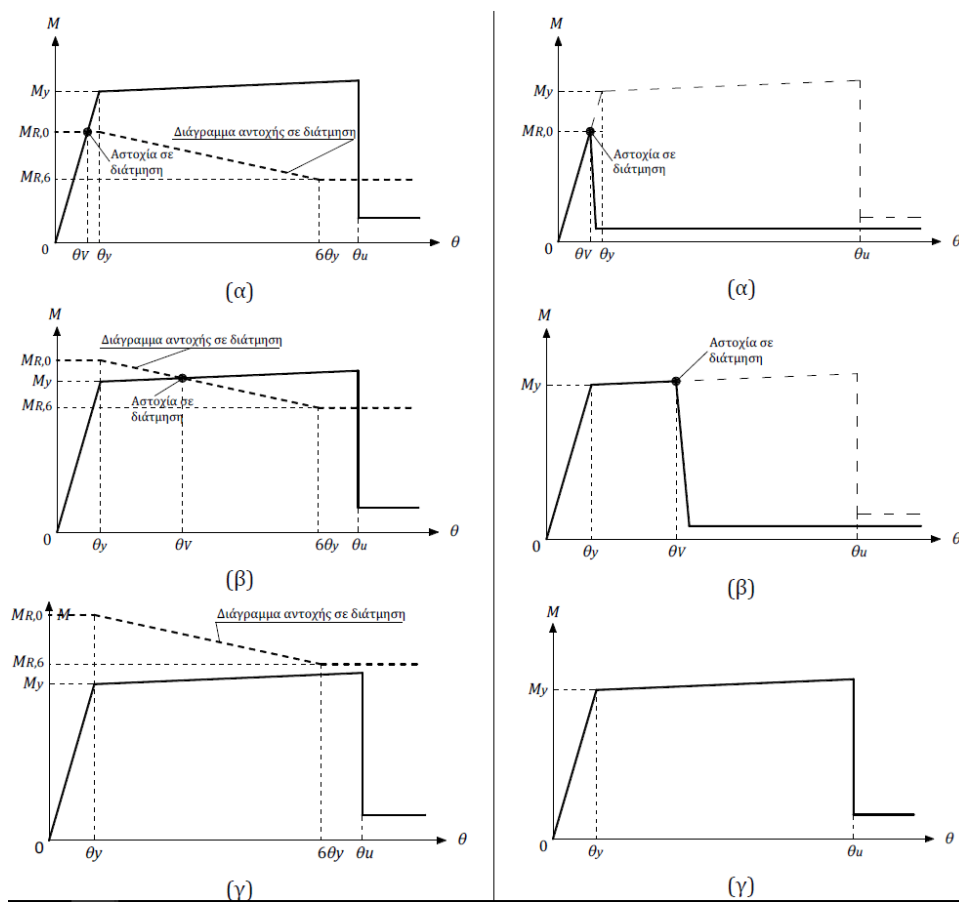
Η αντοχή σε τέμνουσα ενός τοιχώματος δεν μπορεί να ληφθεί μεγαλύτερη από την τιμή που αντιστοιχεί στην αστοχία λόγω σύνθλιψης κορμού $V_{R,max}$, η οποία υπό συνθήκες ανακυκλιζόμενης φόρτισης υπολογίζεται από το Παράρτημα 7C του ΚΑΝ.ΕΠΕ., σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση.

$$V_{R,max} = 0.85 \cdot (1 - 0.06 \cdot \min\{5; \mu_\theta^{pl}\}) \cdot \left(1 + 1.8 \cdot \min\left\{0.15; \frac{N}{A_c \cdot f_c}\right\}\right) \cdot (1 + 0.25 \cdot \max\{1.75; 100 \rho_{tot}\}) \cdot (1 - 0.2 \cdot \min\{2; a_s\}) \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_w \cdot z \quad (\text{E.8})$$

Η αντοχή σε τέμνουσα V_R για υποστυλώματα με λόγο $a_s < 2.00$ δεν θα πρέπει να λαμβάνεται μεγαλύτερη από την τιμή που αντιστοιχεί στη σύνθλιψη της θλιβόμενης διαγωνίου κατά τη στιγμή της διαρροής, $V_{R,max}$, η οποία υπό συνθήκες ανακυκλιζόμενης φόρτισης υπολογίζεται από το Παράρτημα 7C του ΚΑΝ.ΕΠΕ., σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση.

$$V_{R,max} = \frac{4}{7} \cdot (1 - 0.02 \cdot \min\{5; \mu_{\theta}^{pl}\}) \cdot \left(1 + 1.35 \cdot \frac{N}{A_c \cdot f_c}\right) \cdot (1 + 0.45 \cdot (100 \rho_{tot})) \cdot \sqrt{\min\{40; f_c\}} \cdot b_w \cdot z \cdot \sin(2\delta) \quad (E.9)$$

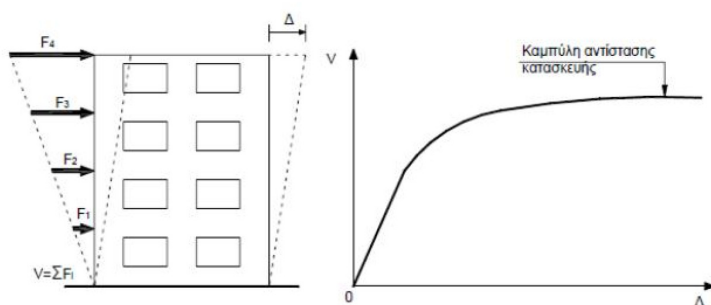
$$\tan(\delta) = \frac{h}{2 \cdot L_s} = \frac{0.50}{a_s}$$



Σχήμα Ε.5. Επιρροή της τέμνουσας στην συμπεριφορά των μελών

Καμπύλη ικανότητας

Γνωρίζοντας την μεταλαστική συμπεριφορά των στοιχείων και εκτελώντας τη μη γραμμική στατική υπερωθητική ανάλυση προκύπτει η καμπύλη ικανότητας του φορέα, η οποία εκφράζει τη μεταλαστική συμπεριφορά του.



Ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα

Αν και είναι διαισθητικά κατανοητό να εκφραστεί η καμπύλη ικανότητας συναρτήσει διατμητικής δύναμης βάσης και μετακίνησης οροφής, μία μαθηματικά καλύτερη λύση που συμφωνεί περισσότερο με τον ορισμό της σεισμικής έντασης συναρτήσει φασματικών μεγεθών είναι να παρουσιαστεί η καμπύλη ικανότητας συναρτήσει οριζόντιας δύναμης και μετακίνησης ενός ισοδύναμου συστήματος με έναν βαθμό ελευθερίας. (Fardis, et al., 2011)

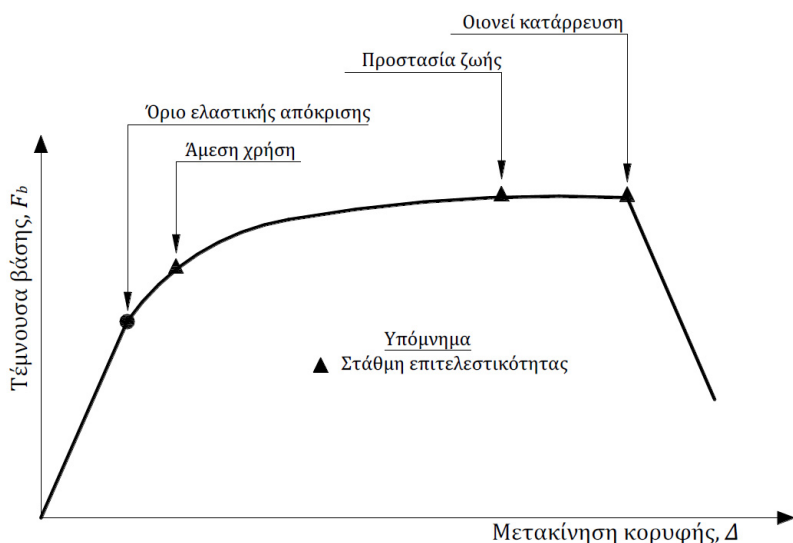
Η θεώρηση αυτή εξυπηρετεί ιδιαίτερα για τον προσδιορισμό των σημείων επιτελεστικότητας.

Διγραμμικοποίηση καμπύλης ικανότητας

Η καμπύλη ικανότητας που προκύπτει από την ανάλυση αποτελείται από πολλά ευθύγραμμα τμήματα που προκύπτουν από τα επιμέρους βήματα της επαυξητικής φόρτισης. Μέρος της διαδικασίας προσδιορισμού του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος αποτελεί και η ελαστική – πλήρως πλαστική εξιδανίκευση της καμπύλης ικανότητας. Αυτό επιτυγχάνεται με διάφορους κανόνες που έχουν προταθεί, όπως αυτών των «ίσων εμβαδών».

Στάθμες επιτελεστικότητας

Γνωρίζοντας την μετελαστική συμπεριφορά των στοιχείων, μπορούν να οριστούν οι στάθμες επιτελεστικότητας, που είναι χαρακτηριστικές θέσης – ορόσημα στην συμπεριφορά τους. Ορίζεται η στάθμη επιτελεστικότητας «Άμεσης Χρήσης (Immediate Occupancy)» ή «Περιορισμού Βλαβών (Damage Limitation)» που αντιστοιχεί στο σημείο διαρροής, «Οιονεί Κατάρρευσης (Near Collapse ή Collapse Prevention)» που αντιστοιχεί στο σημείο οριακής παραμόρφωσης, καθώς και «Προστασίας Ζωής (Life Safety)» ή «Περιορισμού των βλαβών (Damage Limitation)», που βρίσκεται σε ενδιάμεση θέση και προδιαγράφεται κανονιστικά. Επομένως για δεδομένη τιμή παραμόρφωσης ενός στοιχείου, μπορεί να χαρακτηριστεί η στάθμη επιτελεστικότητας στην οποία βρίσκεται. Αντίστοιχα, για τον φορέα, ορίζονται οι στάθμες επιτελεστικότητας επί της καμπύλης ικανότητάς του, κρίνοντας κατά περίπτωση σε κάθε θέση αυτής τις στάθμες επιτελεστικότητας όλων των στοιχείων του. Στο Εδάφιο 2.1(1)P του EN1998-3 δίνονται οι θεμελιώδεις απαιτήσεις του



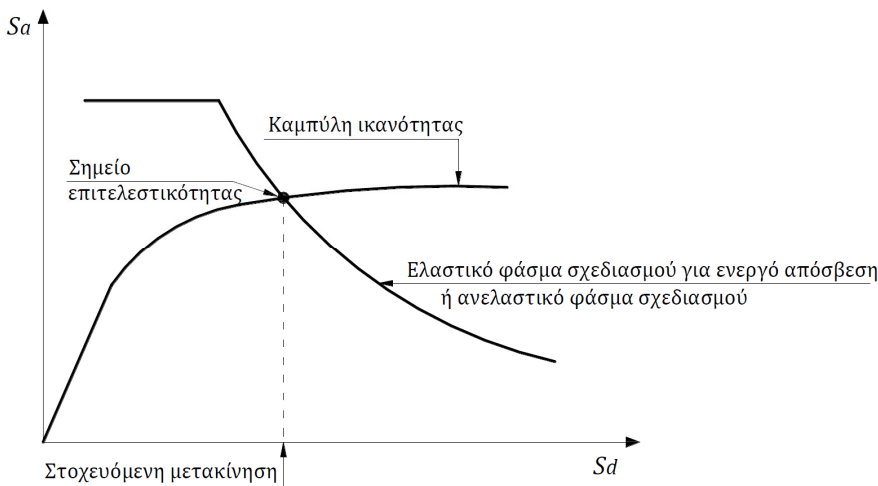
Σχήμα Ε.6. Στάθμες επιτελεστικότητας φορέα. (Ψυχάρης, 2016)

κανονισμού όσον αφορά στην συμπεριφορά των κτιρίων. Οι απαιτήσεις αυτές συνδέονται με τον καθορισμό της κατάστασης (δηλ. του επιπέδου) των βλαβών. Οι τρεις στάθμες επιτελεστικότητας γίνονται κατανοητές μέσω του ακόλουθου πίνακα.

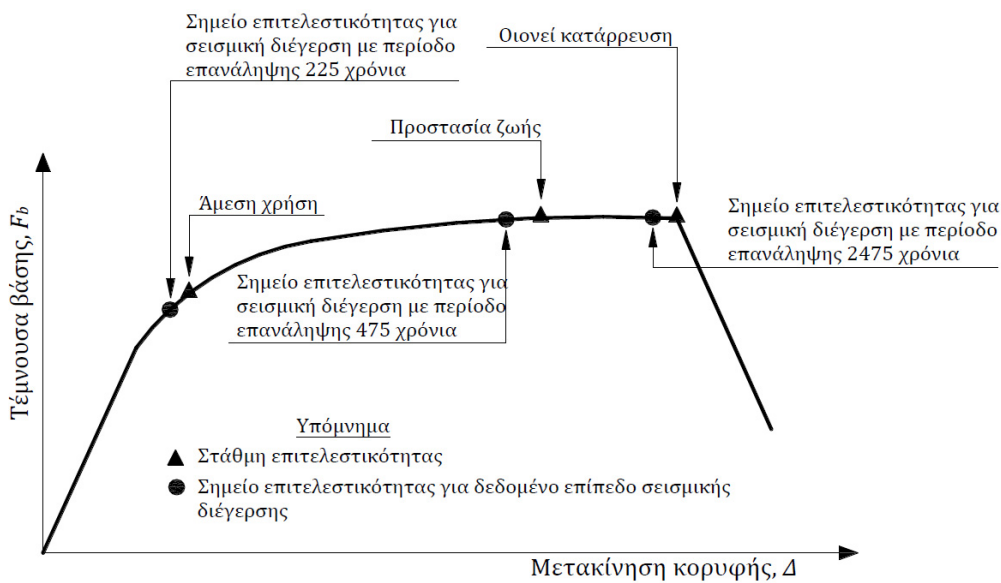
Σ.Ε.	Πλευρική αντοχή και δυσκαμψία	Σχετικές παραμορφώσεις ορόφων	Μη φέροντα στοιχεία	Αντοχή έναντι κατακόρυφων δυνάμεων	Απομένουσα αντοχή σε σεισμό	Δυνατότητα επισκευής
A.X.	Σχεδόν πλήρης	Αμελητέες	Κατανεμημένες ρηγματώσεις, επισκευάσιμες βλάβες	Πλήρης	Σχεδόν ίδια με αυτή προ του σεισμού	Δεν είναι απαραίτητη
Π.Ζ.	Χαμηλή έως μέτρια	Μόνιμες αλλά μέτριες	Εμφάνιση βλαβών αλλά όχι εκτός επιπέδου	Ικανοποιητική	Ικανοποιητική για σειμούς μέτριας έντασης	Μη οικονομική
Ο.Κ.	Χαμηλή ως ανεπαρκής	Μόνιμες και σημαντικές	Κατάρρευση του μεγαλύτερου ποσοστού τους	Οριακά επαρκής	Μηδενική για σειμούς μέτριας έντασης	ΟΧΙ

Μετακίνηση – στόχος

Οι στάθμες επιτελεστικότητας συσχετίζονται με επίπεδα σεισμικής διέγερσης που αντιστοιχούν σε σειμούς με συγκεκριμένες περιόδους επαναφοράς. Για τον EC 8 οι τιμές αυτές δίνονται στα εθνικά προσαρτήματα. Για την Ελλάδα, είναι 225 χρόνια, 475 χρόνια και 2475 χρόνια, που αντιστοιχούν σε πιθανότητα υπέρβασης 20%, 10% και 2% αντίστοιχα, για διάρκεια ζωής έργου 50 έτη. Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. ωστόσο ορίζει δύο σημεία επιτελεστικότητας. Η μετακίνηση – στόχος που προκύπτει για κάθε ένα από τα σεισμικά γεγονότα ονομάζεται σημείο επιτελεστικότητας. Τα σημεία επιτελεστικότητας μπορούν να προκύψουν με εφαρμογή του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος και τομή της καμπύλης ικανότητας του ισοδύναμου μονοβάθμιου από τα φάσματα σχεδιασμού για τα σεισμικά γεγονότα υπό μορφή A.D.R.S. Στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. προδιαγράφεται εναλλακτική μέθοδος, στην οποία τα σημεία επιτελεστικότητας προσδιορίζονται από συντελεστές που προκύπτουν από πίνακες. Στην παρούσα εργασία θα γίνει εφαρμογή της πρώτης μεθόδου.



Σχήμα Ε.7 Στοχευόμενη μετακίνηση ισοδύναμου μονοβάθμιου. (Ψυχάρης, 2016)



Σχήμα Ε.8. Σημεία επιτελεστικότητας. (Ψυχάρης, 2016)

Ε.2.3. Περιορισμοί της μεθόδου

Η μη γραμμική στατική υπερωθητική ανάλυση αποτελεί μία ακριβέστερη προσέγγιση σε ό,τι αφορά τη μετελαστική συμπεριφορά μίας κατασκευής. Συνεπώς θα πρέπει να αποφεύγεται να εκτελείται με δεδομένα τα οποία δεν είναι αξιόπιστα. Απαιτείται καλή

τεκμηρίωση της κατασκευής και εξασφάλιση τουλάχιστον ικανοποιητικής στάθμης αξιοπιστίας (ΚΑΝ.ΕΠΕ.).

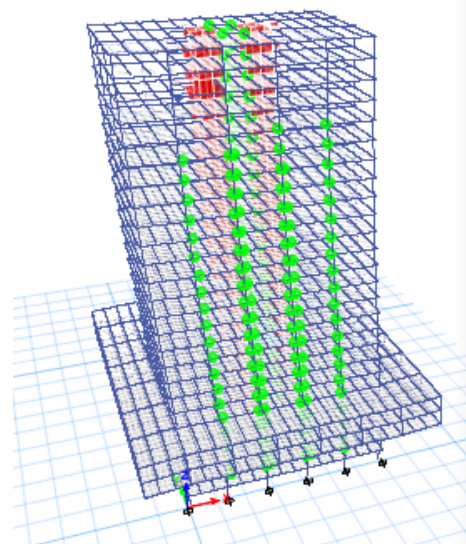
Απαιτείται επίσης να ελέγχεται ότι η επιρροή των ανώτερων ιδιομορφών στην συμπεριφορά της κατασκευής δεν είναι σημαντική, διότι αυτό αποτελεί μία παραδοχή της ανάλυσης (βλ. ισοδύναμο μονοβάθμιο). Σε αντίθετη περίπτωση ωστόσο, μπορεί να εκτελεστεί αυτή η ανάλυση, αλλά θα πρέπει τα αποτελέσματα της να συνδυάζονται με συμπληρωματική ελαστική δυναμική ανάλυση. Για να γίνει ο έλεγχος αυτός, μπορεί να θεωρηθεί ότι η επιρροή των ανώτερων ιδιομορφών είναι σημαντική όταν η τέμνουσα σε κάθε όροφο που προκύπτει από τη δυναμική ελαστική ανάλυση για το 90% της ιδιομορφικής μάζας, F_{tot} , υπερβαίνει το 130% εκείνης από την ανάλυση με βάση μόνο την πρώτη ιδιομορφή σε κάθε διεύθυνση, F_1 . Η ανάλυση μπορεί να εκτελεστεί όταν $1.30 F_1 \geq F_{tot}$ σε κάθε διάφραγμα.

Τέλος, η μέθοδος ενδέχεται να οδηγήσει σε αναξιόπιστα αποτελέσματα στην περίπτωση ύπαρξης περισσότερων του ενός διαφραγμάτων ανά στάθμη, είτε μεμονωμένων μαζών σε κόμβους, διότι γίνεται η παραδοχή κατανεμημένης μάζας στα διαφράγματα και φόρτιση του κέντρου βάρους τους.

Ε.3. Προβλήματα προσομοίωσης

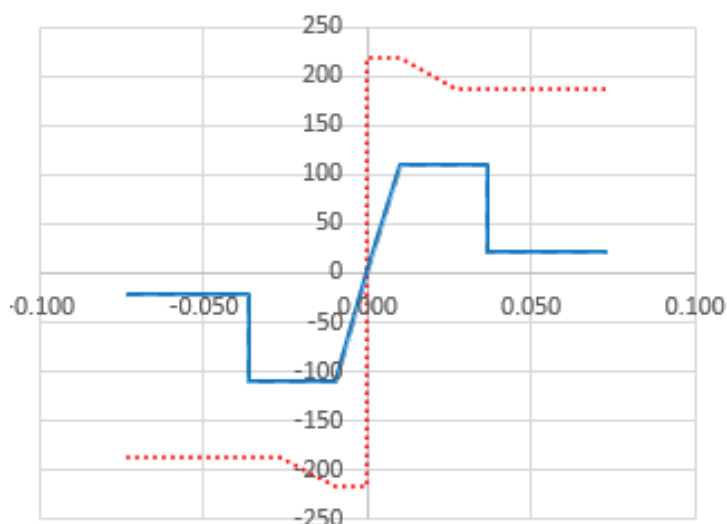
Ε.3.1. Λογισμικό ETABS & γωνία στροφής χορδής

Για την εκτέλεση της συγκεκριμένης ανάλυσης έγινε μεγάλη προετοιμασία από τον γράφων ώστε να δημιουργηθεί ένα προσομοίωμα στο λογισμικό ETABS. Για κάθε στοιχείο του φορέα έγινε ο υπολογισμός των διαγραμμάτων ροπής – γωνίας στροφής χορδής κατά τις διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και εισήχθησαν στο προσομοίωμα ως «User Defined Nonlinear Hinges». Ωστόσο, παρά την ολοκλήρωση του προσομοιώματος και της ανάλυσης του, τα αποτελέσματα εγκαταλείφθηκαν, καθώς κρίθηκαν εξαιρετικά αναξιόπιστα.

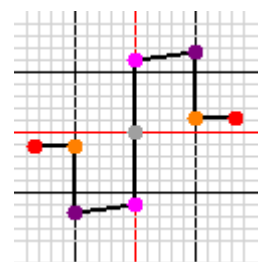


```

$ FRAME HINGE PROPERTIES
HINGE "FH_Story9_C2_3_up" BEHAVIOR "Deformation Controlled" DK
HINGE "FH_Story9_C2_3_up" "E" -10 -0.2
HINGE "FH_Story9_C2_3_up" "D" -1.4 -0.2
HINGE "FH_Story9_C2_3_up" "C" -1.4 -1
HINGE "FH_Story9_C2_3_up" "B" 0.1
HINGE "FH_Story9_C2_3_up" "B" 0.1
HINGE "FH_Story9_C2_3_up" "C" 1.4 1
HINGE "FH_Story9_C2_3_up" "D" 1.4 0.2
HINGE "FH_Story9_C2_3_up" "E" 8 0.2
HINGE "FH_Story9_C2_3_up" MOMENTSFP 5453428628.63139 ROTP
HINGE "FH_Story9_C2_3_up" IO 0 LS 1 CP 1.4 :IO 0 :LS -1 :CP -1.4
HINGE "FH_Story9_C2_3_down" BEHAVIOR "Deformation Controlled"
HINGE "FH_Story9_C2_3_down" "E" -10 -0.2
HINGE "FH_Story9_C2_3_down" "D" -1.4 -0.2
HINGE "FH_Story9_C2_3_down" "C" -1.4 -1
HINGE "FH_Story9_C2_3_down" "B" 0.1
HINGE "FH_Story9_C2_3_down" "B" 0.1
HINGE "FH_Story9_C2_3_down" "C" 1.4 1
HINGE "FH_Story9_C2_3_down" "D" 1.4 0.2
HINGE "FH_Story9_C2_3_down" "E" 8 0.2
HINGE "FH_Story9_C2_3_down" MOMENTSFP 5453428628.63139 RO
HINGE "FH_Story9_C2_3_down" IO 0 LS 1 CP 1.4 :IO 0 :LS -1 :CP -1.4
HINGE "FH_Story9_C1_3_up" BEHAVIOR "Deformation Controlled" DK
HINGE "FH_Story9_C1_3_up" "E" -10 -0.2
HINGE "FH_Story9_C1_3_up" "D" -1.4 -0.2
HINGE "FH_Story9_C1_3_up" "C" -1.4 -1
HINGE "FH_Story9_C1_3_up" "B" 0.1
HINGE "FH_Story9_C1_3_up" "C" 1.4 1
HINGE "FH_Story9_C1_3_up" "D" 1.4 0.2
HINGE "FH_Story9_C1_3_up" "E" 8 0.2
HINGE "FH_Story9_C1_3_up" MOMENTSFP 5464255816.91529 ROTP
HINGE "FH_Story9_C1_3_up" IO 0 LS 1 CP 1.4 :IO 0 :LS -1 :CP -1.4
HINGE "FH_Story9_C1_3_down" BEHAVIOR "Deformation Controlled"
HINGE "FH_Story9_C1_3_down" "E" -10 -0.2
HINGE "FH_Story9_C1_3_down" "D" -1.4 -0.2
HINGE "FH_Story9_C1_3_down" "C" -1.4 -1
HINGE "FH_Story9_C1_3_down" "B" 0.1
HINGE "FH_Story9_C1_3_down" "B" 0.1
HINGE "FH_Story9_C1_3_down" "C" 1.4 1
HINGE "FH_Story9_C1_3_down" "D" 1.4 0.2
HINGE "FH_Story9_C1_3_down" "E" 8 0.2
HINGE "FH_Story9_C1_3_down" MOMENTSFP 5464255816.91529 RO
HINGE "FH_Story9_C1_3_down" IO 0 LS 1 CP 1.4 :IO 0 :LS -1 :CP -1.4
HINGE "FH_Story9_C9_3_up" BEHAVIOR "Deformation Controlled" DK
HINGE "FH_Story9_C9_3_up" "E" -10 -0.2
HINGE "FH_Story9_C9_3_up" "D" -1.4 -0.2
    
```



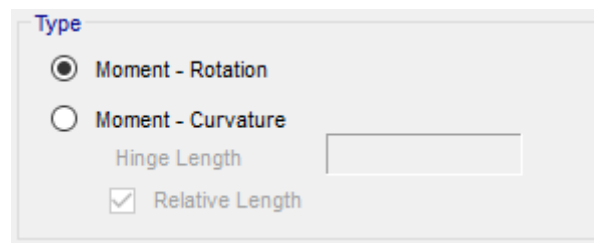
Ο λόγος που έγινε αυτό είναι ότι το λογισμικό ETABS δεν έχει τη δυνατότητα παρακολούθησης του μεγέθους της γωνίας στροφής χορδής.



Στο λογισμικό ETABS το στατικό προσομοίωμα δημιουργείται από γραμμικά – ελαστικά στοιχεία (Frame Elements, Shell Elements, Wall elements κλπ.). Έπειτα στις θέσεις των γραμμικών μελών όπου ο χρήστης επιθυμεί να προσομοιώσει φαινόμενα μη γραμμικότητας, ορίζονται πλαστικές αρθρώσεις. Η επιλογή των μελών και των θέσεων γίνεται πάντα από το χρήστη. Τα αντικείμενα «Frame/Wall Nonlinear Hinges» που μπορεί να ορίσει ο χρήστης σε σχέση με την καμπτική ροπή, συσχετίζουν την καμπτική ροπή είτε με την γωνία στροφής της πλαστικής άρθρωσης, είτε με την καμπυλότητα, δεδομένου του μήκους της πλαστικής άρθρωσης (που είναι πρακτικά ισοδύναμο). Όπως φαίνεται στα σχήματα δεξιά, η συμπεριφορά του σημείου στο οποίο έχει εισαχθεί πλαστική άρθρωση είναι η εξής. Αρχικά η στροφή της άρθρωσης είναι μηδενική (σαν να μην υπάρχει καθόλου) μέχρις ότου αναπτυχθεί η ροπή SF .

Point	Moment/SF	Rotation/SF
E-	-0.2	-0.025
D-	-0.2	-0.015
C-	-1.1	-0.015
B-	-1	0
A	0	0
B	1	0
C	1.1	0.015
D	0.2	0.015
E	0.2	0.025

Σχήμα Ε.9. Πίνακας εισαγωγής



Στη συνέχεια, η άρθρωση αποκτά πλαστική στροφή, που καθορίζεται από τις λοιπές τιμές που εισάγονται στον πίνακα. Το μέγεθος της στροφής αφορά αποκλειστικά το σημείο που βρίσκεται η άρθρωση, επομένως η πρόσθετη ελαστική παραμόρφωση του στοιχείου είναι ανεξάρτητη. Υπάρχει επίσης η επιλογή αυτόματου προσδιορισμού των παραμέτρων και κατασκευής των σχέσεων, σύμφωνα με τις σχέσεις του αμερικάνικου κανονισμού FEMA

356 (Automatic FEMA frame hinges), ωστόσο και πάλι τα μεγέθη παραμόρφωσης που παρακολουθούνται από το πρόγραμμα παραμένουν τα ίδια. Με αναστροφή της φόρτισης του στοιχείου, η άρθρωση αποφορτίζεται ταυτόχρονα με τη μείωση της ελαστικής παραμόρφωσης του στοιχείου, ενώ η γενικότερη υστερητική συμπεριφορά της άρθρωσης καθορίζεται με διάφορους νόμους που μπορεί να επιλέξει ο χρήστης.

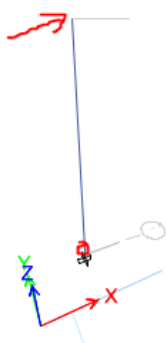
Η βασική ένσταση στη χρήση αυτού του προσομοιώματος είναι ότι η γωνία στροφής χορδής, με τον τρόπο που αυτή ορίζεται (βλ. Παρ. E.2.2 σελίδα 86) συμπεριλαμβάνει και την ελαστική παραμόρφωση του στοιχείου. Για την ακρίβεια πρόκειται για μία εντελώς διαφορετική γωνία από τη γωνία στροφής μίας θεωρούμενης άρθρωσης στο άκρο του στοιχείου. Συνεπώς η εισαγωγή τιμών για την γωνία στροφής χορδής διαρροής και αστοχίας ως παραμέτρους για την γωνία στροφής ενός «frame element nonlinear hinge» του ETABS ενέχει σημαντικό σφάλμα, αφού πρόκειται για μεγέθη διαφορετικής φύσης.

Point B represents yielding. No deformation occurs in the hinge up to point B, regardless of the deformation value specified for point B. The displacement (rotation) at point B will be subtracted from the deformations at points C, D, and E. Only the plastic deformation beyond point B will be exhibited by the hinge. [...]. Prior to reaching point B, all deformation is linear and occurs in the Frame element itself, not the hinge. Plastic deformation beyond point B occurs in the hinge in addition to any elastic deformation that may occur in the element.

(Donà, 2016)

Παράδειγμα επιβεβαίωσης

Προς επιβεβαίωση των ισχυρισμών, ο αναγνώστης καλείται να διατρέξει στο εγχειρίδιο χρήση του προγράμματος (Computers & Structures, Inc, 2016). Ωστόσο πολλές αναφορές για την προσομοίωση με «plastic hinges» υπάρχουν στη βιβλιογραφία. Ενδεικτικά, παρατίθεται απόσπασμα. (Donà, 2016). Ωστόσο παρουσιάζεται επιπλέον ένα απλό παράδειγμα.



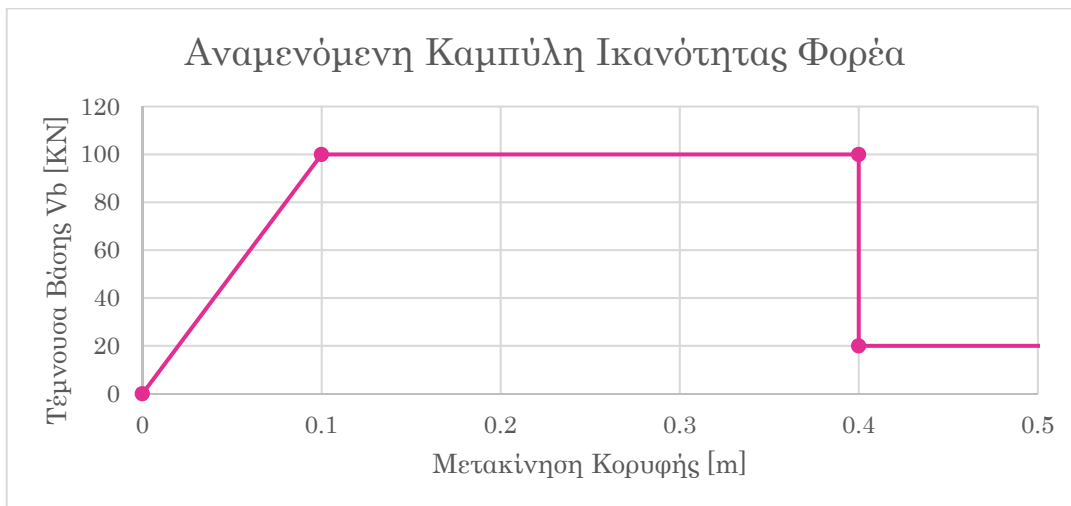
Σχήμα Ε.10. Πρόβολος

Έστω ο πρόβολος που απεικονίζεται στο Σχήμα Ε.10, ύψους 10m με ροπή διαρροής $M_y = 1000 \text{ KNm}$, γωνία στροφής χορδής στη διαρροή $\theta_{CR,y} = 0.01 \text{ rad}$, και στην αστοχία $\theta_{CR,u} = 0.04 \text{ rad}$.

Για τον συγκεκριμένο πρόβολο, η αναμενόμενη καμπύλη ικανότητας θα χαρακτηρίζεται από τις τιμές

$$\delta_y = L \cdot \theta_y = 10 \text{ m} \cdot 0.01 = 0.10 \text{ m}, \delta_u = 0.40 \text{ m}, V_{max} = \frac{M_y}{L} = \frac{1000 \text{ KNm}}{10 \text{ m}} = 100 \text{ KN}.$$

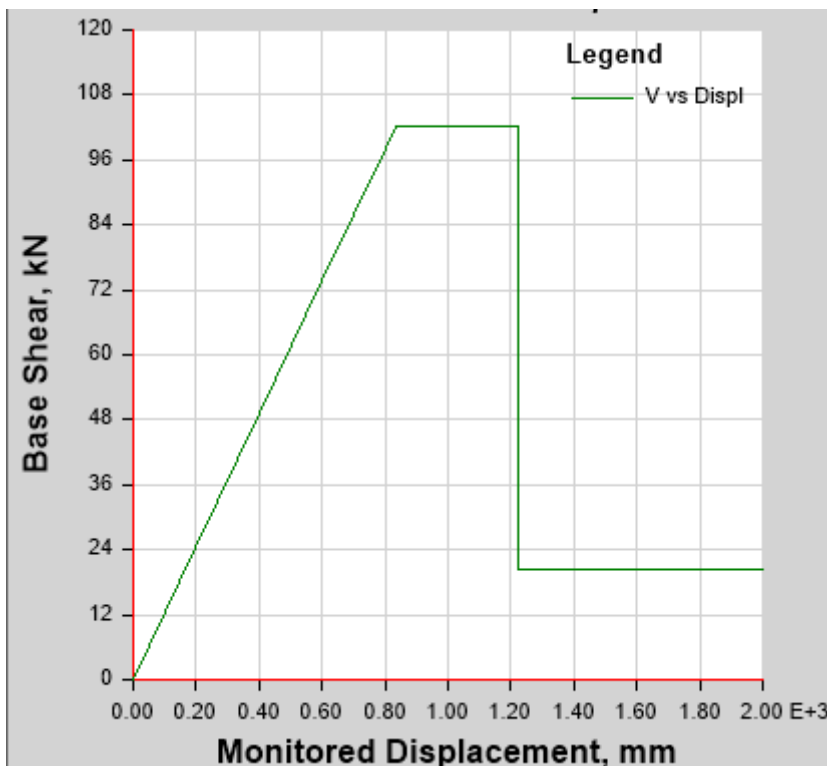
Η αναμενόμενη καμπύλη ικανότητας παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα Ε.11. Καμπύλη Ικανότητας

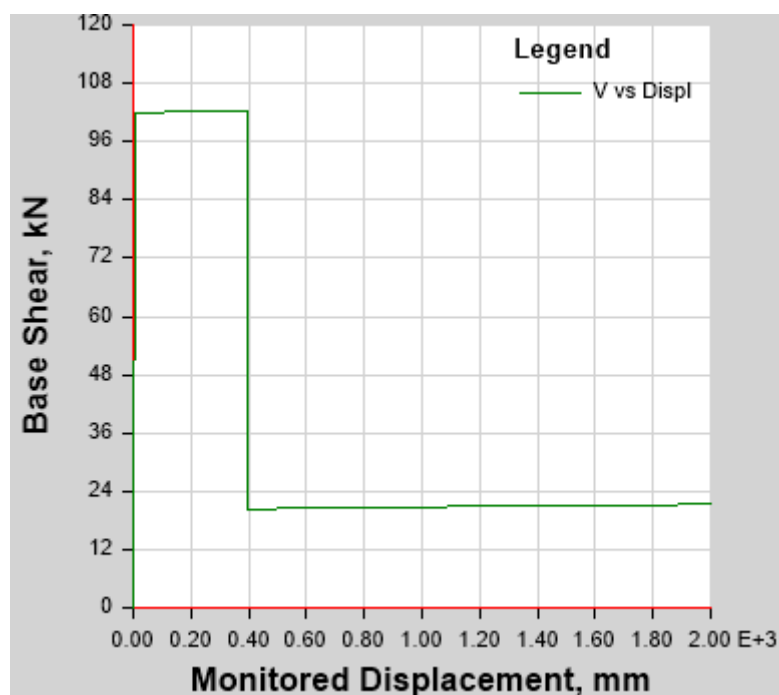
Γίνεται εισαγωγή των τιμών στο λογισμικό. Τα χαρακτηριστικά της διατομής που χρησιμοποιείται είναι $A = 0.14063 \text{ m}^2$, $E = 24855.58 \text{ MPa}$, $I = 0.001647949 \text{ m}^4$

Κατόπιν εκτέλεσης της ανάλυσης λαμβάνεται η ακόλουθη καμπύλη ικανότητας του φορέα.



Η ελαστική βύθιση του προβόλου με τα δεδομένα αδρανειακά χαρακτηριστικά είναι $\Delta = \frac{PL^3}{3EI} = \frac{100 \text{ KN} \cdot 10^3 \text{ m}^3}{3 \cdot 24 \cdot 855 \cdot 580 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} \cdot 0.001647949 \text{ m}^4} = 0.81 \text{ m}$. Επιβεβαιώνεται ότι η μετελαστική συμπεριφορά του στοιχείου δεν καθορίστηκε αποκλειστικά από τα χαρακτηριστικά που εισήχθησαν ως δεδομένα στην πλαστική άρθρωση. Αντίθετα, το αποτέλεσμα της ανάλυσης αποτελεί έναν συνδυασμό της μετελαστικής συμπεριφοράς της πλαστικής άρθρωσης και της ελαστικής συμπεριφοράς του μέλους.

Τροποποιούμε τη δυσκαμψία του μέλους, εισάγοντας μία πολύ μεγάλη τιμή για το μέγεθος της ροπής αδράνειας. Στην περίπτωση αυτή, επιτυγχάνεται η μετρίαση της επίδρασης των αδρανειακών χαρακτηριστικών του μέλους.



Στο νέο διάγραμμα παρατηρείται η απουσία του ελαστικού κλάδου, ενώ κατά τα λοιπά η συμπεριφορά είναι η αναμενόμενη.

Το συμπέρασμα αυτών των εφαρμογών είναι ότι το μέγεθος της γωνίας διαρροής που εισάγεται στο λογισμικό δεν επηρεάζει άμεσα τη συμπεριφορά της πλαστικής άρθρωσης. Η στροφή της άρθρωσης όσο αυτή φορτίζεται με ροπή μικρότερη της ροπής διαρροής είναι

πράγματι μηδενική. Το μέγεθος της γωνίας διαρροής χρησιμοποιείται ως αναφορά προκειμένου να συμπληρωθεί ο πίνακας των λοιπών μεγεθών στροφής με μεγέθη ανηγμένα ως προς αυτήν (βλ. Σχήμα Ε.9. Πίνακας εισαγωγής).

Συμπεραίνεται ότι παρερμηνεύοντας το μέγεθος της γωνίας στροφής άρθρωσης με τη γωνία στροφής χορδής του άκρου ενός μέλους εν τέλει υπερεκτιμάται η πλαστιμότητα του φορέα, αφού οι μετακινήσεις περιλαμβάνουν πρόσθετες ελαστικές παραμορφώσεις. Συνεπώς τα αποτελέσματα από μία τέτοια ανάλυση κρίνονται αναξιόπιστα. Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αιτία που το λογισμικό δεν είναι κατάλληλο για την εκτέλεση της ανάλυσης δεν αποδίδεται σε αδυναμία υπολογιστικής ισχύος (κάθε άλλο), αλλά στο γεγονός ότι δεν έχει προκύψει η ανάγκη της αγοράς στην οποία απευθύνεται, για παρακολούθηση του συγκεκριμένου μεγέθους. *Οι αμερικάνικοι κανονισμοί καθορίζουν όρια για την γωνία στροφής πλαστικής άρθρωσης, όχι για την γωνία στροφής χορδής μελών.* (Βλ. ASCE 41-06, 2007, καθώς και (Giannopoulos, 2009)).

Ε.3.2. Λογισμικό ΡΑΦ

Το λογισμικό ΡΑΦ στην τρέχουσα έκδοσή του (6.7.3.3.) διαθέτει τη δυνατότητα εκτέλεσης στατικής υπερωθητικής ανάλυσης, ακριβώς όπως προδιαγράφεται στις κανονιστικές διατάξεις, των ευρωκωδικών είτε του ΚΑΝ.ΕΠΕ., και συνοδεύεται από πολύ καλά τεκμηριωμένους οδηγούς χρήσης. Ωστόσο παρά την επιτυχή εκτέλεση των ελέγχων εφαρμοσιμότητας και τον υπολογισμό των διαγραμμάτων ροπών – γωνιών στροφής χορδής των μελών, η ίδια η ανάλυση για το συγκεκριμένο στατικό προσομοίωμα δεν μπόρεσε να εκτελεστεί, πιθανόν λόγω του πολύ υπέρογκου πλήθους στοιχείων του φορέα.¹⁰

¹⁰ Παρά το γεγονός αυτό, άποψη του γράφοντος είναι ότι ο εν λόγω λογισμικό είναι εξαιρετικό και συστήνεται ανεπιφύλακτα η χρήση του.

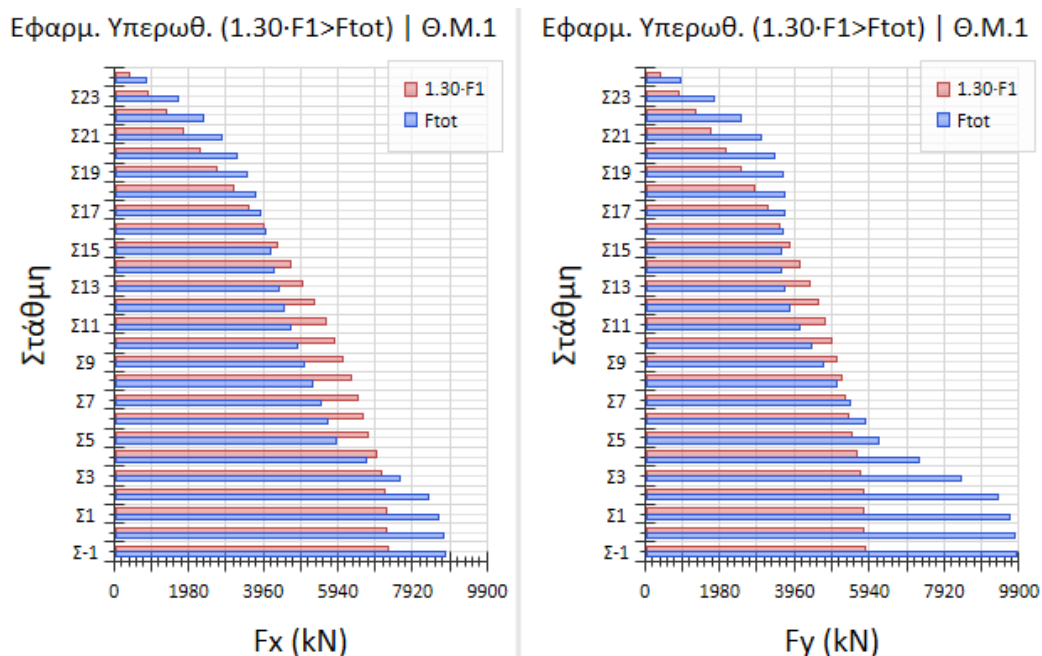
Ε.4. Εκτέλεση της ανάλυσης

Ε.4.1. Έλεγχοι Εφαρμοσιμότητας

Στο πρόγραμμα ΡΑΦ εκτελούνται αρχικά οι απαραίτητοι έλεγχοι εφαρμοσιμότητας της στατικής υπερωθητικής ανάλυσης.

- ✓ Το κτίριο διαθέτει πράγματι ένα διάφραγμα ανά στάθμη.

Ωστόσο ο έλεγχος της επιρροής των ανώτερων ιδιομορφών δεν ικανοποιείται για αρκετές στάθμες. Ο έλεγχος συνοψίζεται στο ακόλουθο σχήμα.¹¹



Σχήμα Ε.12. Επιρροή ανώτερων ιδιομορφών.

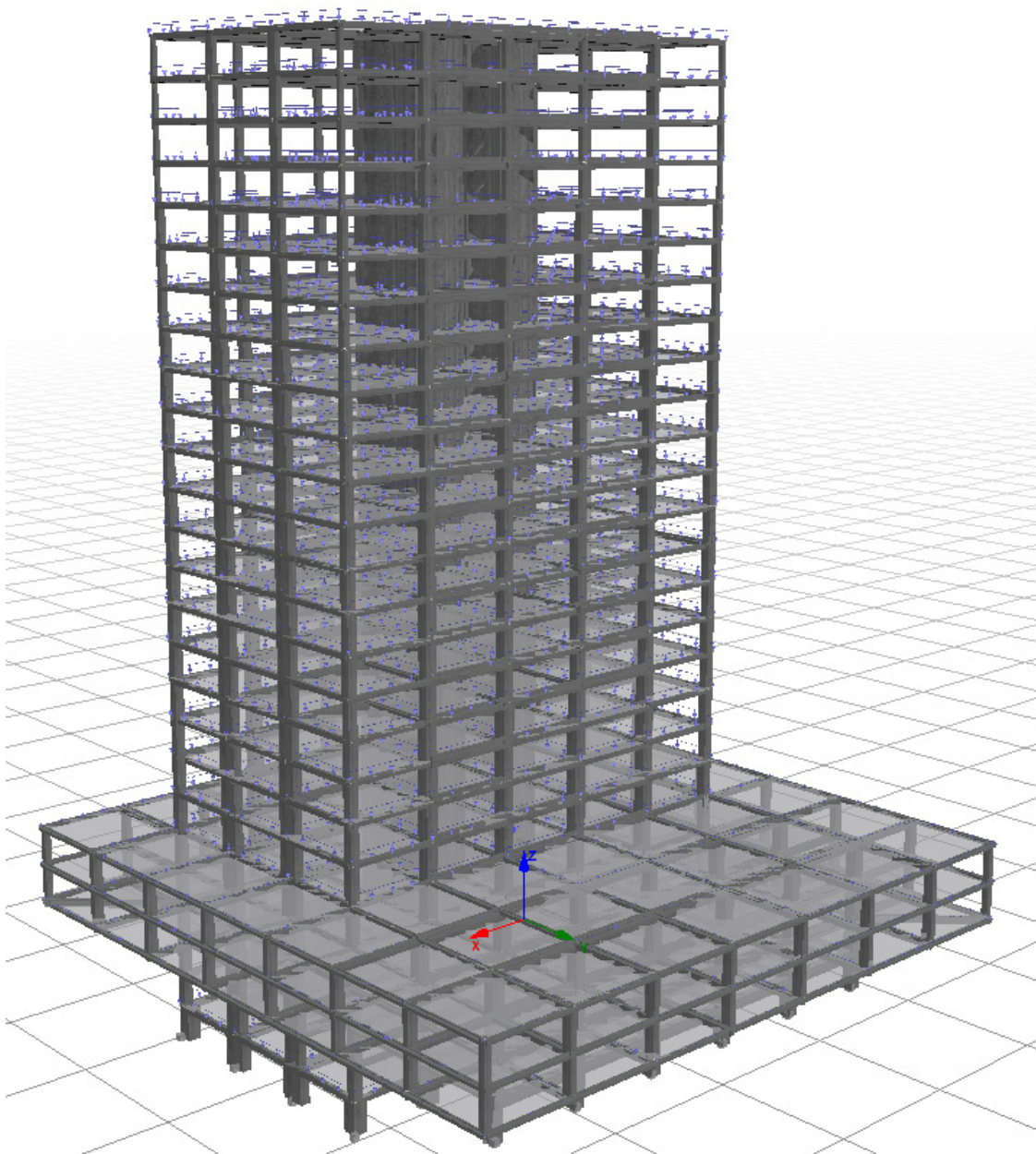
Επίσης, εξαιτίας της μειωμένης επιφάνειας του 22^{ου} ορόφου, προκύπτουν κόμβοι που δεν συμμετέχουν στο διάφραγμα της εν λόγω στάθμης, με αποτέλεσμα να έχουν μεμονωμένες

¹¹ Ωστόσο, δεδομένου ότι ο έλεγχος δεν ικανοποιείται σχετικώς οριακά, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας τα αποτελέσματα της στατικής ανελαστικής υπερωθητικής ανάλυσης θα χρησιμοποιηθούν δίχως συνδυασμό τους με αντίστοιχα αποτελέσματα ελαστικής ιδιομορφικής ανάλυσης.

επικόμβιες μάζες. Παρόλα αυτά, η ανάλυση εκτελείται αναγνωρίζοντας την ενδεχόμενη απόκλιση των αποτελεσμάτων.

Ε.4.2. Ανάλυση με το λογισμικό SEISMOSTRUCT

Στο λογισμικό SEISMOSTRUCT μεταφέρονται όλα τα δεδομένα του στατικού προσομοιώματος, όπως ακριβώς περιγράφονται στην παράγραφο Γ.3 της σελίδας (38).



Σχήμα Ε.13. Στατικό Προσομοίωμα στο SEISMOSTRUCT

Στον παρακάτω πίνακα απεικονίζονται οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους της κάθε στάθμης καθώς και τα αδρανειακά μεγέθη.

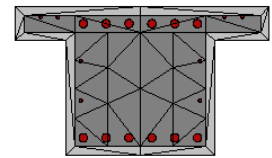
Πίνακας Ε.1. Κέντρα βάρους και αδρανειακά μεγέθη.

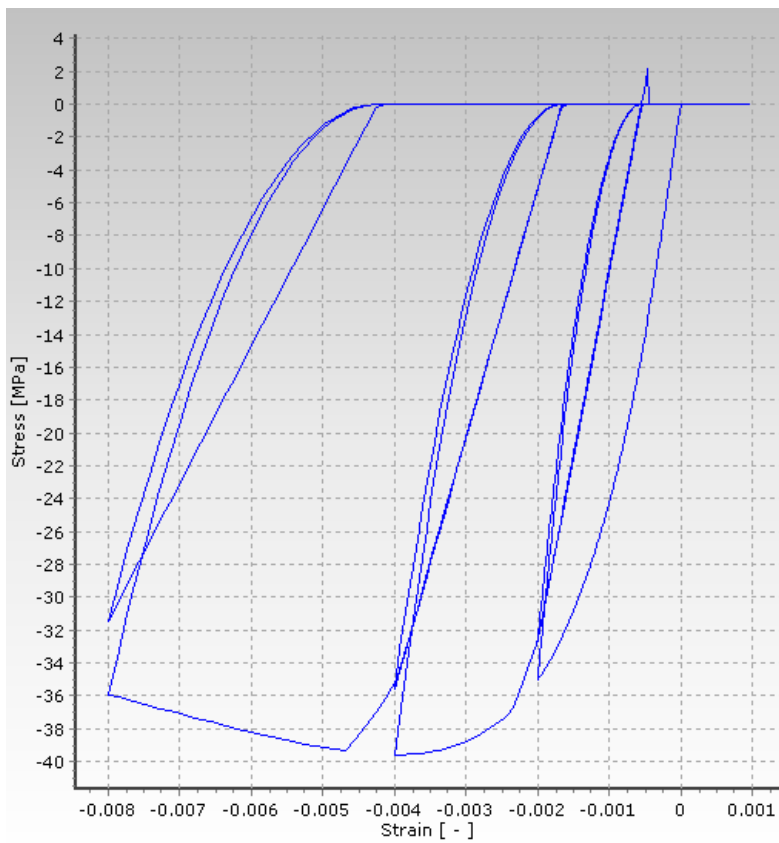
Στάθμη	X_{cm} [cm]	Y_{cm} [cm]	Μάζα m [Mg]	Ροπή αδράνειας I_z [Mg · m ²]
Σ24	20.74	12.451	324.25	86907.69
Σ23	20.741	12.451	372.15	99752.56
Σ22	28.31	12.449	257.70	40853.58
Σ21	20.741	12.451	372.15	99752.56
Σ20	20.742	12.451	387.58	105196.64
Σ19	20.742	12.451	407.38	112330.97
Σ18	20.742	12.451	407.38	112330.97
Σ17	20.742	12.451	414.01	115428.92
Σ16	20.742	12.451	421.52	119099.01
Σ15	20.742	12.451	421.52	119099.01
Σ14	20.742	12.451	421.52	119099.01
Σ13	20.743	12.451	435.85	123500.35
Σ12	20.743	12.45	453.40	128968.72
Σ11	20.743	12.45	453.40	128968.72
Σ10	20.743	12.45	453.40	128968.72
Σ9	20.743	12.45	453.40	128968.72
Σ8	20.743	12.45	465.41	133368.02
Σ7	20.743	12.45	479.58	138608.48
Σ6	20.743	12.45	479.58	138608.48
Σ5	20.743	12.45	479.58	138608.48
Σ4	20.743	12.45	1278.71	680046.97
Σ3	20.743	12.45	1385.64	767093.71
Σ2	20.743	12.45	1371.28	755161.07
Σ1	20.743	12.45	909.03	314630.12
Σ0	20.743	12.45	470.32	136219.59
Σ-1	20.743	12.45	490.83	147031.42

Ο υπολογισμός της γωνίας στροφής χορδής στην διαρροή, στην αστοχία, καθώς και της μέγιστης ικανότητας παραλαβής τέμνουσας, γίνονται σύμφωνα με τις διατάξεις του ΚΑΝ.ΕΠΕ. (βλ. θεωρητικό υπόβαθρο).

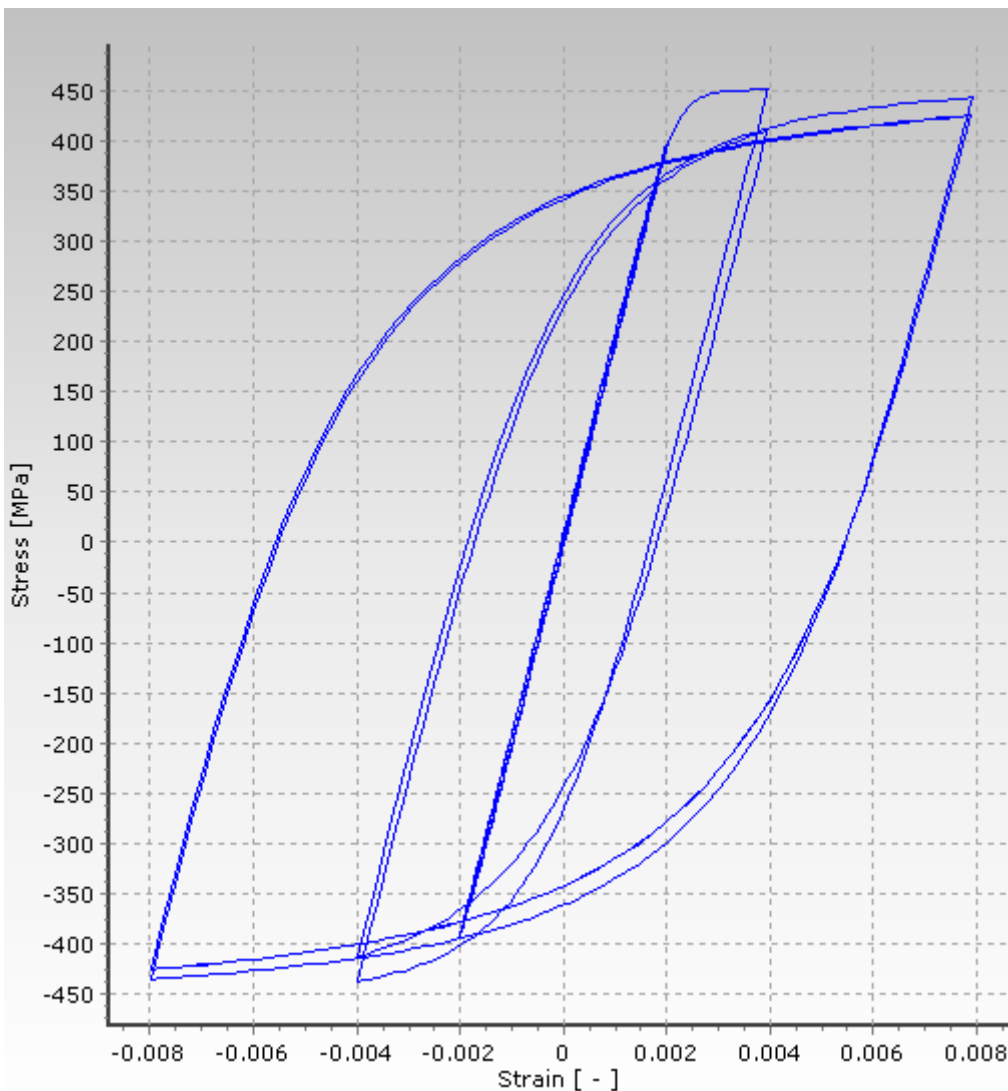
Συγκεκριμένα, κατά την ολοκλήρωση κάθε βήματος της ανάλυσης και για κάθε στοιχείο, υπολογίζονται η γωνία στροφής χορδής στην διαρροή και την αστοχία του στοιχείου από τις σχέσεις (Ε.3), (Ε.4), (Ε.5) και (Ε.6). Επίσης υπολογίζεται η αντοχή σε τέμνουσα με εφαρμογή των σχέσεων (Ε.7), (Ε.8), (Ε.9).

Όσον αφορά τη ροπή διαρροής, αυτή δεν υπολογίζεται από κάποια κλειστή σχέση, αλλά προκύπτει με εφαρμογή της μεθόδου κατανεμημένης πλαστικότητας. Σε κάθε στοιχείο ορίζεται ένα πλήθος διατομών ελέγχου και κάθε διατομή διακριτοποιείται σε ίνες. Σε κάθε βήμα της ανάλυσης γίνεται αριθμητική ολοκλήρωση των τάσεων της κάθε ίνας, οι οποίες υπολογίζονται από τα χαρακτηριστικά και την υστερητική συμπεριφορά του υλικού από το οποίο αυτή αποτελείται (είτε σκυρόδεμα είτε χάλυβας οπλισμού), έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι συνθήκες ισορροπίας κάθε κόμβου. Η αριθμητική διαδικασία αυτή είναι επαναληπτική, επομένως κάθε βήμα της ανάλυσης απαιτεί αρκετά υπο-βήματα προκειμένου να ολοκληρωθεί.





Σχήμα Ε.14. Υστερητική συμπεριφορά σκυροδέματος Β300 (για συντελεστή περίσφιγξης 1.20).



Σχήμα E.15. Υστερητική συμπεριφορά χάλυβα οπλισμού Stahl III.

Όταν ένα μέλος υπερβεί την τιμή της γωνίας στροφής χορδής στην αστοχία, η αντοχή του σε κάμψη ορίζεται να απομειώνεται στο 20% της αρχικής αντοχής. Τέλος, στην περίπτωση αστοχίας μέλους σε τέμνουσα, γίνεται αποδοχή μίας πλασματικής απομένουσας αντοχής 5% για λόγους αποφυγής αριθμητικής αστάθειας κατά την επίλυση.

Κατανομή φόρτισης

Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. επιβάλλει τη χρήση δύο τουλάχιστον διαφορετικών κατανομών φόρτισης, ενώ η ανάλυση συνιστάται να εκτελείται για 4 μετατοπισμένες θέσεις μάζας, όπως και στην

περίπτωση της ιδιομορφικής ανάλυσης φάσματος. Επίσης, σε κάθε ανάλυση σε μία διεύθυνση, θα πρέπει να επιβάλλεται ταυτόχρονα το 30% της φόρτισης και στην άλλη διεύθυνση, και με τα δύο πρόσημα. Επομένως έχουμε 4 θέσεις μάζας \times 8 συνδυασμούς φορτίσεων κατά X και Y με εναλλασσόμενα πρόσημα και ποσοστά \times 2 κατανομές φόρτισης, συνολικά 64 αναλύσεις που απαιτείται να εκτελεστούν. Στα πλαίσια όμως της παρούσας εργασίας, θα εκτελεστεί η ανάλυση μόνο για τριγωνική κατανομή φόρτισης, επιβαλλόμενη στα κέντρα μάζας των διαφραγμάτων δίχως μετατόπιση, με ταυτόχρονη εφαρμογή φορτίου στις δύο διευθύνσεις και για όλες τις πιθανές φορές (8 αναλύσεις).

Για τον υπολογισμό της τριγωνικής κατανομής τέμνουσας θεωρείται τέμνουσα βάσης $V_b = 100 \text{ KN}$ και έπειτα λαμβάνοντας υπόψη το υψόμετρο αλλά και τη μάζα για το κάθε διάφραγμα, υπολογίζεται το επαυξητικό φορτίο αυτού, σύμφωνα με την εξίσωση (E.10).

$$F_i = \frac{m_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^N \{m_i \cdot z_i\}} \cdot V_b \quad (\text{E.10})$$

Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας E.2. Τριγωνική κατανομή φόρτισης.

z [m]	m [Mg]	$m \cdot z$ [Mg · m]	F_i [KN]
86.40	324.25	28014.91	5.44
83.05	372.15	30906.97	6.00
79.70	257.70	20538.73	3.99
76.35	372.15	28413.58	5.52
73.00	387.58	28293.09	5.49
69.65	407.38	28374.28	5.51
66.30	407.38	27009.55	5.24
62.95	414.01	26061.93	5.06
59.60	421.52	25122.78	4.88
56.25	421.52	23710.67	4.60
52.90	421.52	22298.57	4.33
49.55	435.85	21596.61	4.19

Κεφάλαιο Ε

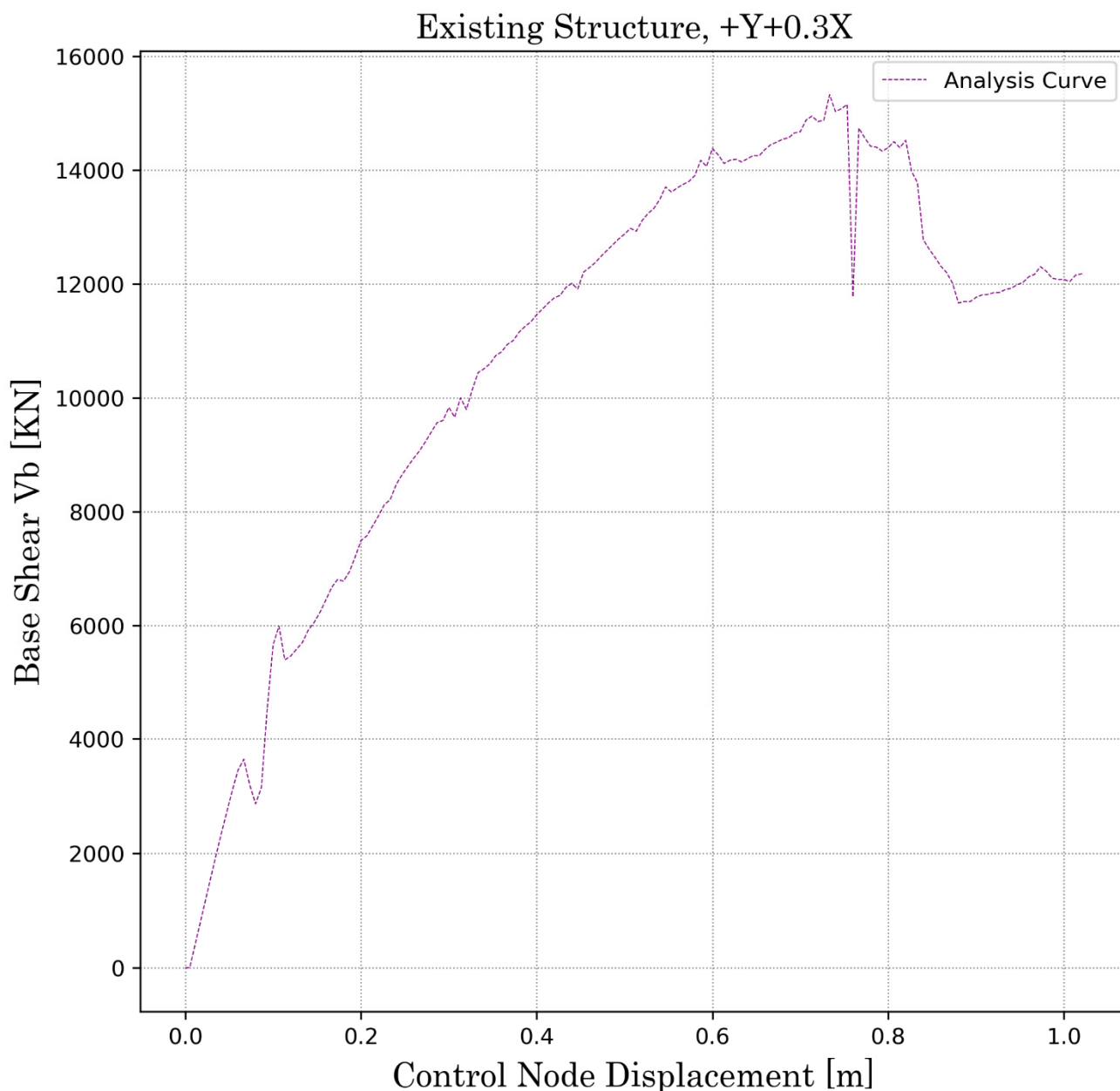
z [m]	m [Mg]	$m \cdot z$ [Mg · m]	F_i [kN]
46.20	453.40	20947.06	4.07
42.85	453.40	19428.17	3.77
39.50	453.40	17909.28	3.48
36.15	453.40	16390.39	3.18
32.80	465.41	15265.29	2.96
29.45	479.58	14123.56	2.74
26.10	479.58	12516.97	2.43
22.75	479.58	10910.39	2.12
19.40	1278.71	24807.01	4.82
16.05	1385.64	22239.56	4.32
12.70	1371.28	17415.29	3.38
9.35	909.03	8499.40	1.65
6.00	470.32	2821.93	0.55
3.00	490.83	1472.48	0.29
Άθροισμα		515088.46	100.00

Από τον τρόπο υπολογισμού της κατανομής προκύπτει ότι αυτή είναι ανεξάρτητη από τη διεύθυνση επιβολής του φορτίου, εν αντιθεση με την ιδιομορφή κατανομή. Επομένως θα χρησιμοποιηθεί η ίδια κατανομή φόρτισης και για τις δύο διευθύνσεις, με ταυτόχρονη επιβολή του 30% του φορτίου στην άλλη.

Εκτέλεση της ανάλυσης κατά $Y + 0.3 X$

Ικανότητα της κατασκευής

Base Shear - Displacement Capacity Curve

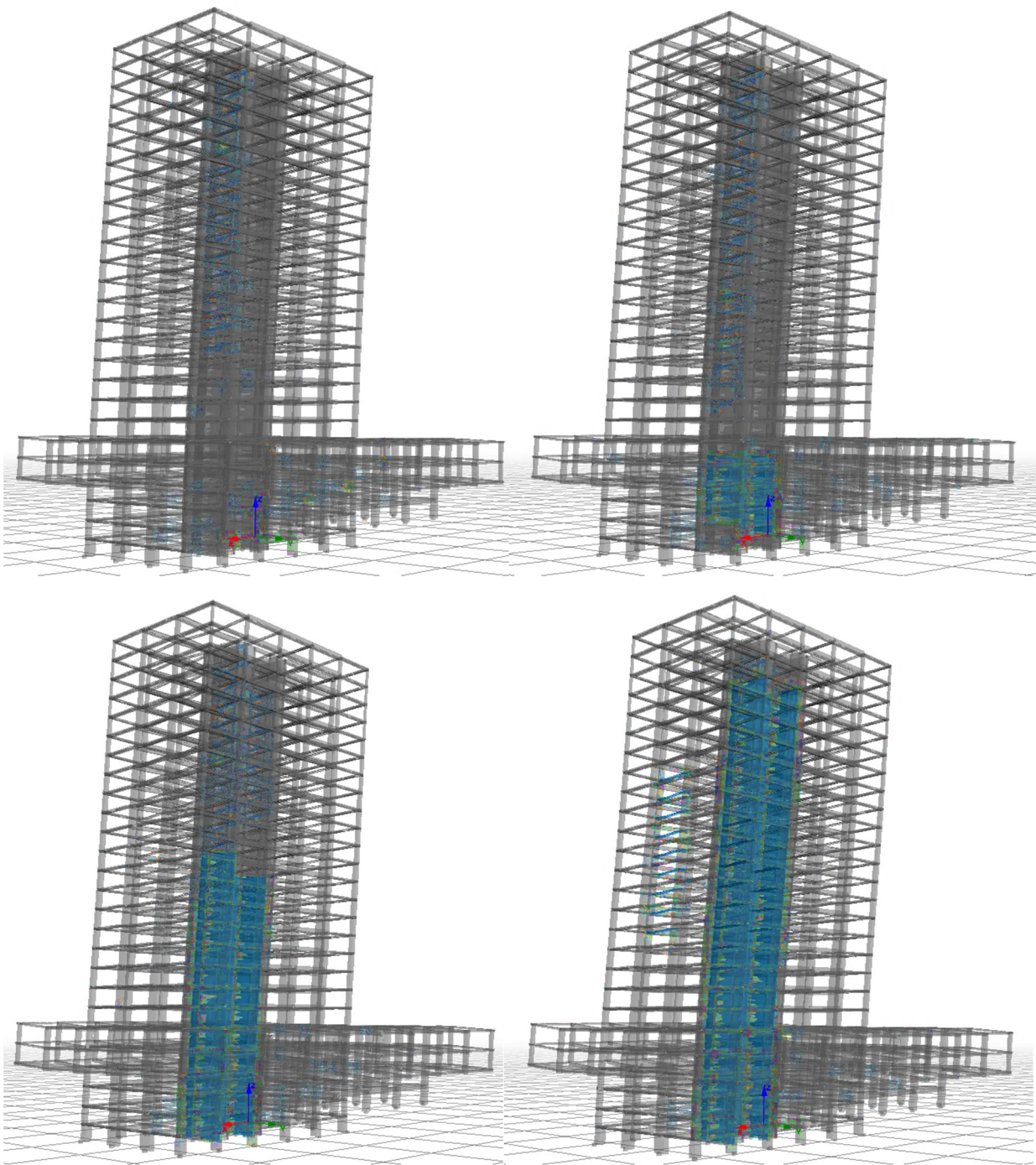


Σχήμα Ε.16. Καμπύλη ικανότητας στη διεύθυνση +X

Συμπεριφορά του φορέα

Οι πρώτες υπερβάσεις της τιμής που ορίζει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. για τη γωνία στροφής χορδής στη διαρροή συμβαίνουν όταν η τέμνουσα βάσης V_b αρχίζει να πλησιάζει την τιμή 14 000 kN.

Έπειτα καθώς οι μετακινήσεις αυξάνονται, πυρήνας αστοχεί ψαθυρά λόγω υπέρβασης της οριακής του αντοχής σε τέμνουσα, διαδοχικά από τις χαμηλότερες στάθμες προς τα επάνω, με αποτέλεσμα ο φορέας να παύει να έχει τη δυνατότητα παραλαβής φορτίου. Έπειτα ακολουθούν ζεύγη τιμών φορτίου – μετακίνησης τα οποία είναι αναξιόπιστα, καθώς το κυρίαρχο στοιχείο δυσκαμψίας του φορέα έχει αστοχήσει ψαθυρά. Τέλος, η ανάλυση διακόπτεται στην τιμή μετακίνησης $\delta = 1.02 \text{ m}$ λόγω αριθμητικής αστάθειας. Στην Εικόνα Ε.1 παρουσιάζεται η διαδοχή της αστοχίας λόγω υπέρβασης της οριακής τιμής αντοχής σε τέμνουσα, για τον κεντρικό πυρήνα του φορέα. Οι εικόνες αυτές αντιστοιχούν στον καθοδικό κλάδο της καμπύλης ικανότητας.

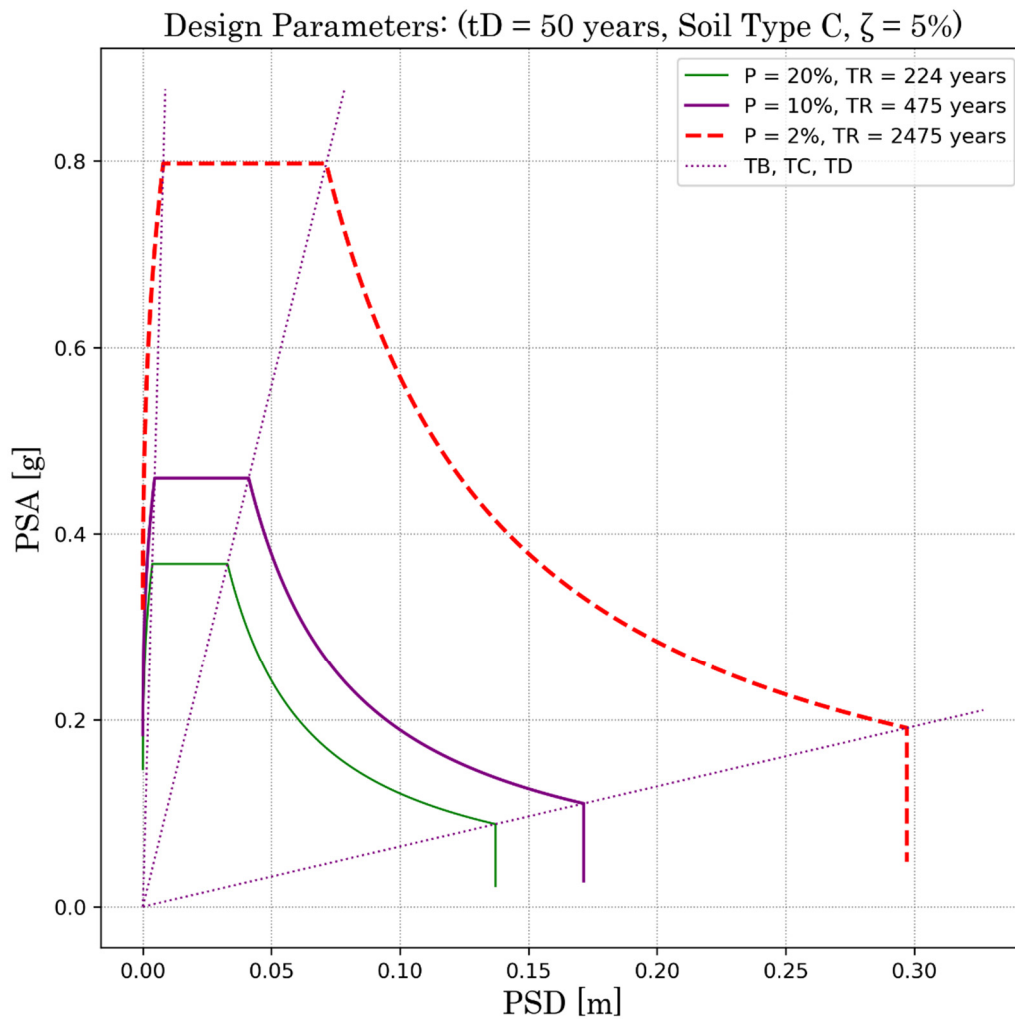


Εικόνα Ε.1. Συμπεριφορά του φορέα

Προσδιορισμός της απαίτησης

Προκειμένου να προσδιοριστεί η απαίτηση, γίνεται ο υπολογισμός του φάσματος σχεδιασμού του EC8 σε μορφή A.D.R.S. για 3 περιόδους επαναφοράς. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο ακόλουθο σχήμα.

S.R.S.S. Spectra - Eurocode 8



Σχήμα Ε.17. Φάσμα ADRS EC 8

Στη συνέχεια η καμπύλη ικανότητας του φορέα μετατρέπεται σε φάσμα ικανότητας, μέσω εφαρμογής του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος, σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις.

$$Sa_i = \frac{V_{bi}}{m_{tot} \cdot a} \quad (E.11)$$

$$Sd_i = \frac{\Delta_i}{\Gamma} \quad (E.12)$$

Όπου $\Gamma = \frac{\sum m_i \varphi_i}{\sum m_i \varphi_i^2}$ ο συντελεστής συμμετοχής της 1^{ης} ιδιομορφής κατά τη Χ διεύθυνση, $a = \Gamma \frac{\sum m_i \varphi_i}{m_{ολ}}$. Ο υπολογισμός των δύο αυτών ποσοτήτων παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα.

Level	Φ	m	$m \Phi$	$m \cdot \Phi^2$
Story24	1.000	324	324	324
Story23	0.909	372	338	308
Story22	0.909	258	234	213
Story21	0.818	372	304	249
Story20	0.818	388	317	259
Story19	0.818	407	333	273
Story18	0.727	407	296	215
Story17	0.727	414	301	219
Story16	0.636	422	268	171
Story15	0.636	422	268	171
Story14	0.545	422	230	125
Story13	0.545	436	238	130
Story12	0.455	453	206	94
Story11	0.455	453	206	94
Story10	0.364	453	165	60
Story9	0.364	453	165	60
Story8	0.273	465	127	35
Story7	0.273	480	131	36
Story6	0.182	480	87	16
Story5	0.182	480	87	16
Story4	0.091	1279	116	11
Story3	0.091	1386	126	11
Story2	0.091	1371	125	11
Story1	0.031	909	28	1
Story 0	0.015	470	7	0
Story -1	0.004	491	2	0

Level	ϕ	m	$m \phi$	$m \cdot \phi^2$
		14267	5031	3101

$$\sum m_i \phi_i = 5031$$

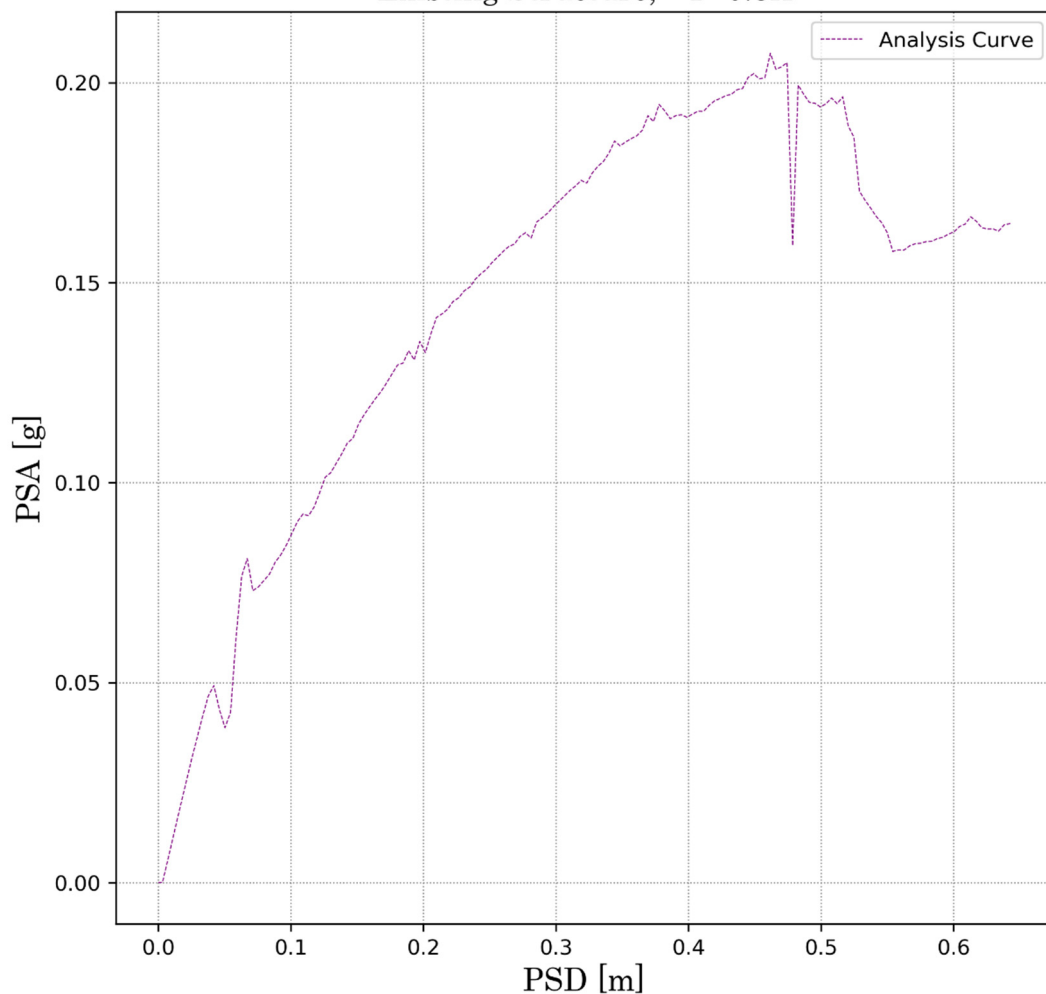
$$\Gamma = 1.622704663946$$

$$\alpha = 0.57227564680$$

Με εκτέλεση των πράξεων προκύπτει η καμπύλη του παρακάτω σχήματος.

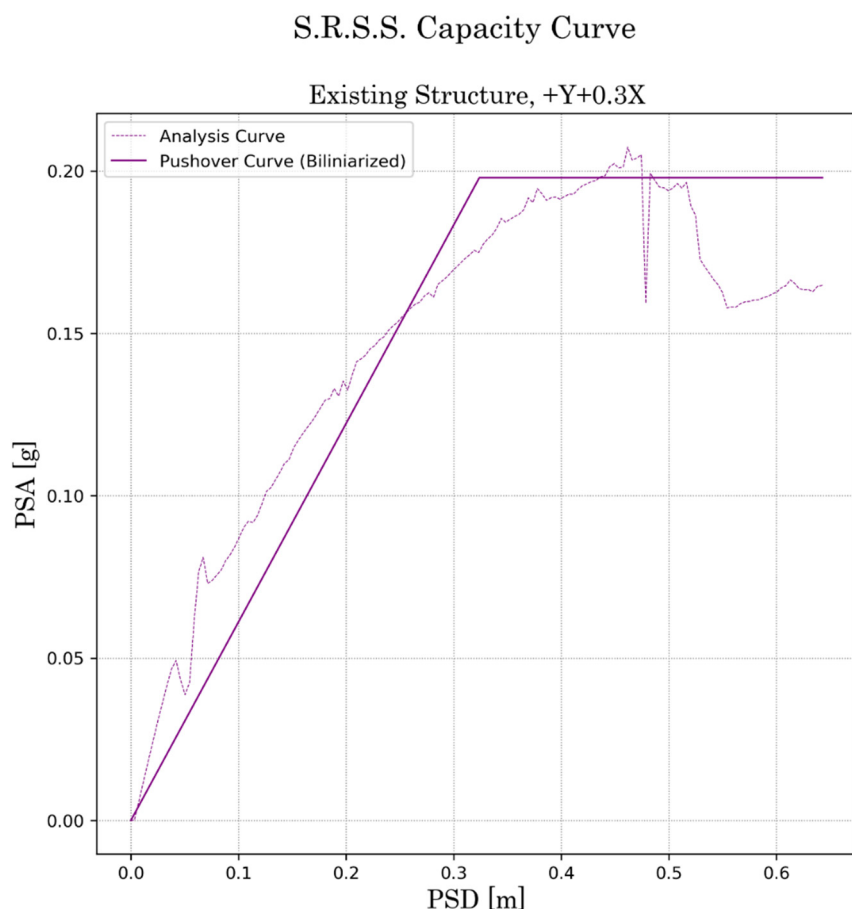
S.R.S.S. Capacity Curve

Existing Structure, +Y+0.3X



Σχήμα Ε.18. Καμπύλη ικανότητας ανάλυσης ισοδύναμου μονοβάθμιου

Η καμπύλη αυτή πρέπει να μετατραπεί σε διγραμμική, προκειμένου να προσδιοριστεί η ισοδύναμη ιδιοπερίοδος και τα σημεία επιτελεστικότητας. Επιλέγεται η μέθοδος των ίσων εμβαδών. Σύμφωνα με τη μέθοδο, η καμπύλη ικανότητας εξιδανικεύεται σε έναν ελαστικό και έναν πλήρως πλαστικό μεταλαστικό κλάδο. Προκειμένου να γίνει αυτό, προσδιορίζεται η μέγιστη φασματική επιτάχυνση, η οποία αποτελεί τη φασματική επιτάχυνση διαρροής Sa_y . Με δεδομένη την τιμή αυτή, επιχειρείται ο προσδιορισμός της μετακίνησης διαρροής Sd_y για την οποία η διγραμμική καμπύλη και η καμπύλη της ανάλυσης περικλείουν το ίδιο εμβαδόν. Για την εκτέλεση της διαδικασίας έγινε προγραμματισμός της μεθόδου σε γλώσσα Python. Ο κώδικας στο σύνολό του παρατίθεται στο παράρτημα Α. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της διγραμμικοποίησης του φάσματος ικανότητας.



Σχήμα Ε.19. Διγραμμικοποίηση φάσματος ικανότητας

Από τη διαδικασία εξιδανίκευσης της καμπύλης προκύπτουν η οριακή μετακίνηση της κατασκευής καθώς και η μετακίνηση διαρροής της. Επιλέγεται η χρήση αυτών των τιμών προκειμένου να προσδιοριστούν οι στάθμες επιτελεστικότητας του φορέα.

Γίνεται χρήση των ακόλουθων σχέσεων.

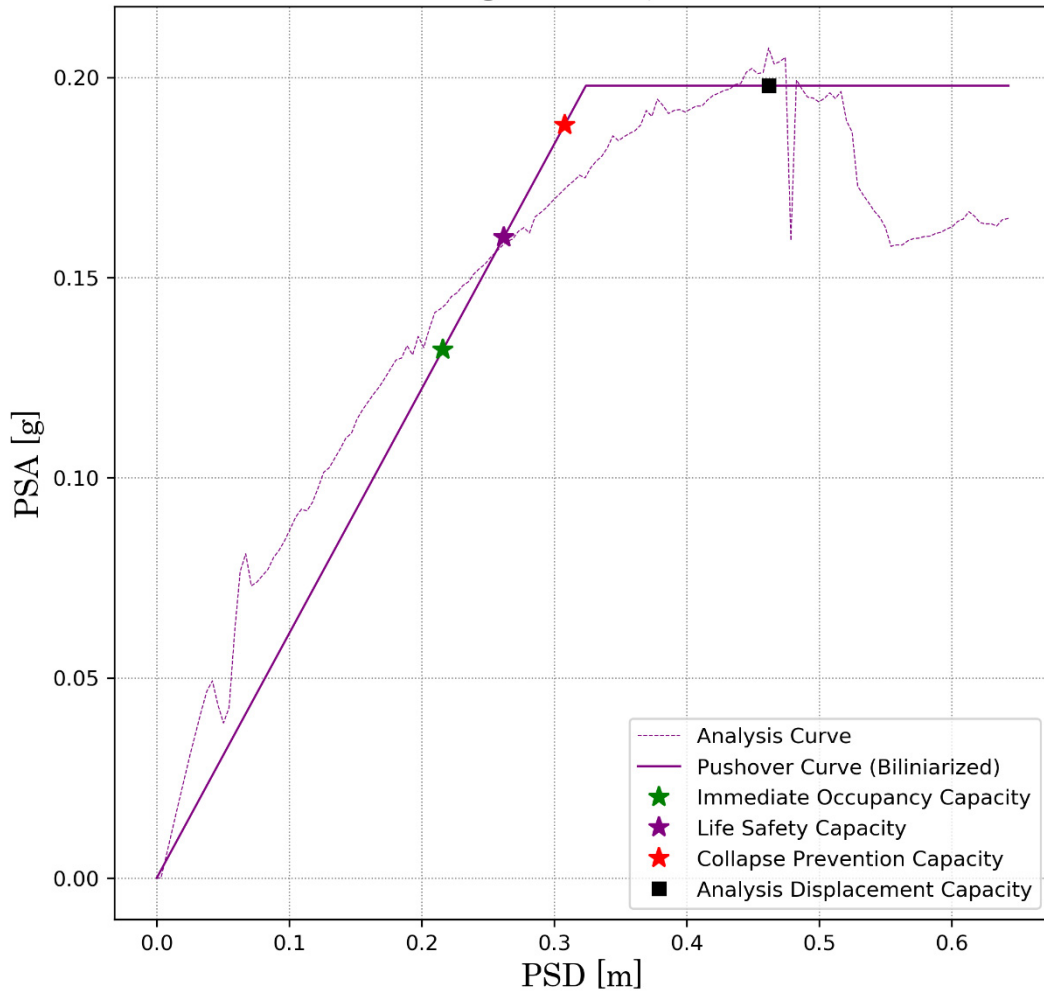
$$Sd_{AX} = \frac{Sd_y}{\gamma_{Rd} = 1.50} \quad (\text{E.13})$$

$$Sd_{OK} = \frac{Sd_{max}}{\gamma_{Rd} = 1.50} \quad (\text{E.14})$$

$$Sd_{\Pi Z} = \frac{1}{2} \cdot \frac{Sd_{AX} + Sd_{OK}}{\gamma_{Rd} = 1.50} \quad (\text{E.15})$$

S.R.S.S. Capacity Curve

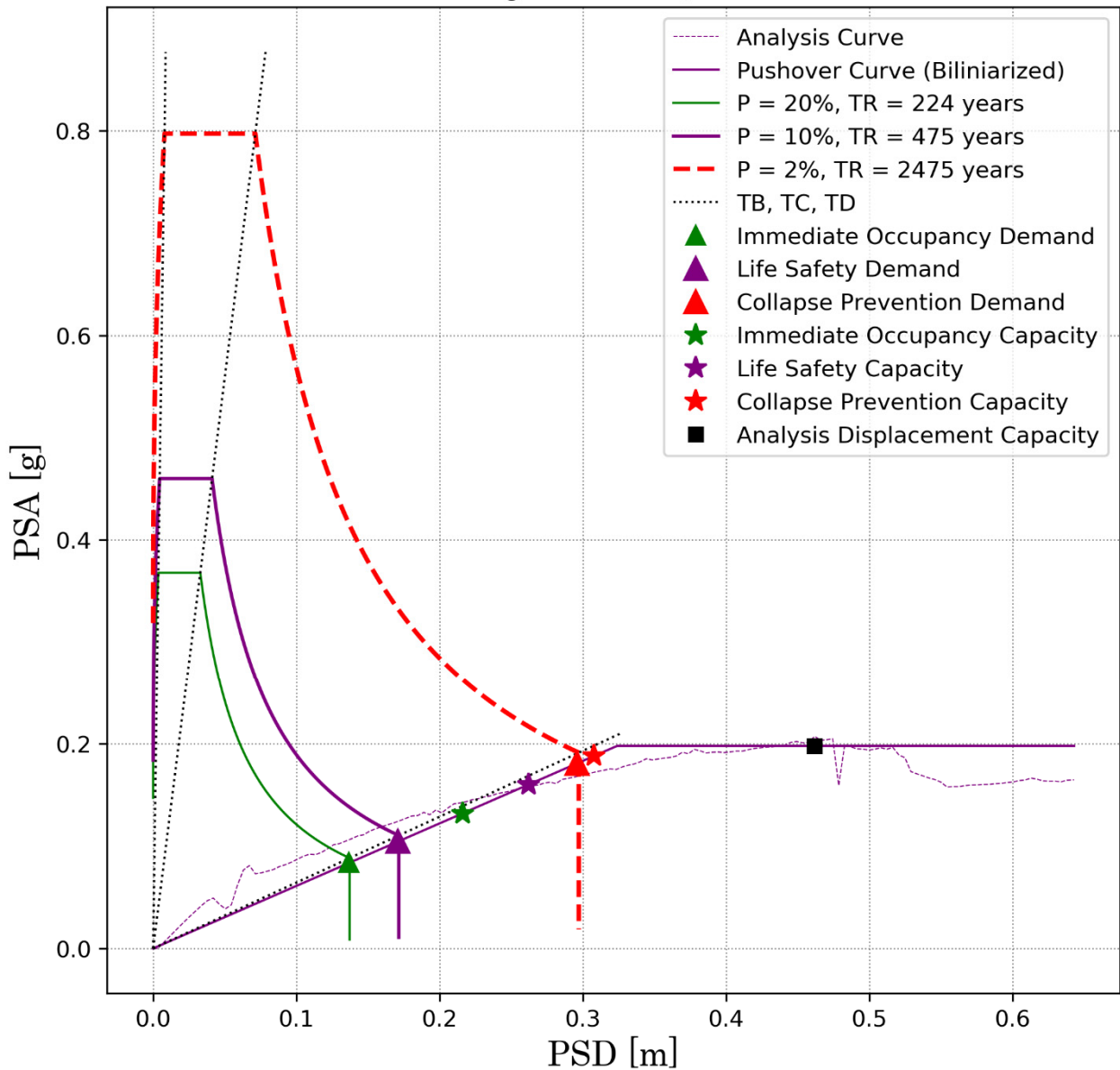
Existing Structure, +Y+0.3X



Στη συνέχεια η εξιδανικευμένη καμπύλη αντιπαραβάλλεται με τα φάσματα σχεδιασμού και προκύπτουν τα σημεία επιτελεστικότητας, από την τομή τους.

S.R.S.S. Capacity & Demand Curves

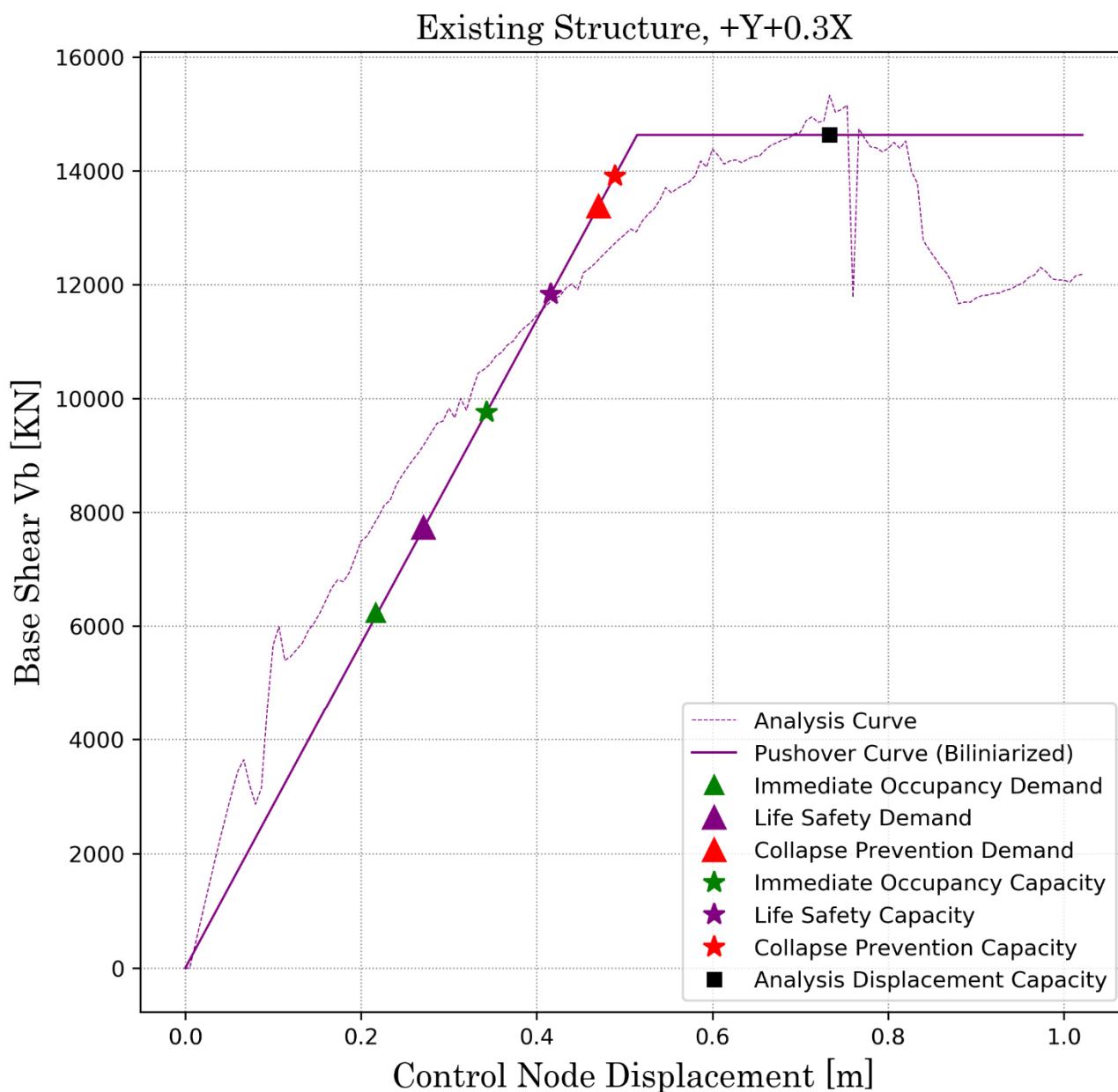
Existing Structure, +Y+0.3X



Σχήμα Ε.20. Σημεία επιτελεστικότητας. Y + 0.3 X

Κάνοντας την αντίστροφη διαδικασία ανάγουμε το ισοδύναμο μονοβάθμιο στο φορέα, από όπου προκύπτει η τελική καμπύλη ικανότητας επί της οποίας απεικονίζονται οι στάθμες επιτελεστικότητας της κατασκευής καθώς και τα σημεία επιτελεστικότητας.

Base Shear - Displacement Capacity & Demand Curves



Σχήμα Ε.21. Καμπύλη ικανότητας και στοχευόμενη μετακίνηση. Y + 0.3 X

Παρατηρούμε ότι η απαίτηση προηγείται της ικανότητας και για τις τρεις στάθμες επιτελεσιμότητας. Επομένως η κατασκευή έχει επαρκή αντοχή. Στον παρακάτω πίνακα γίνεται η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης.

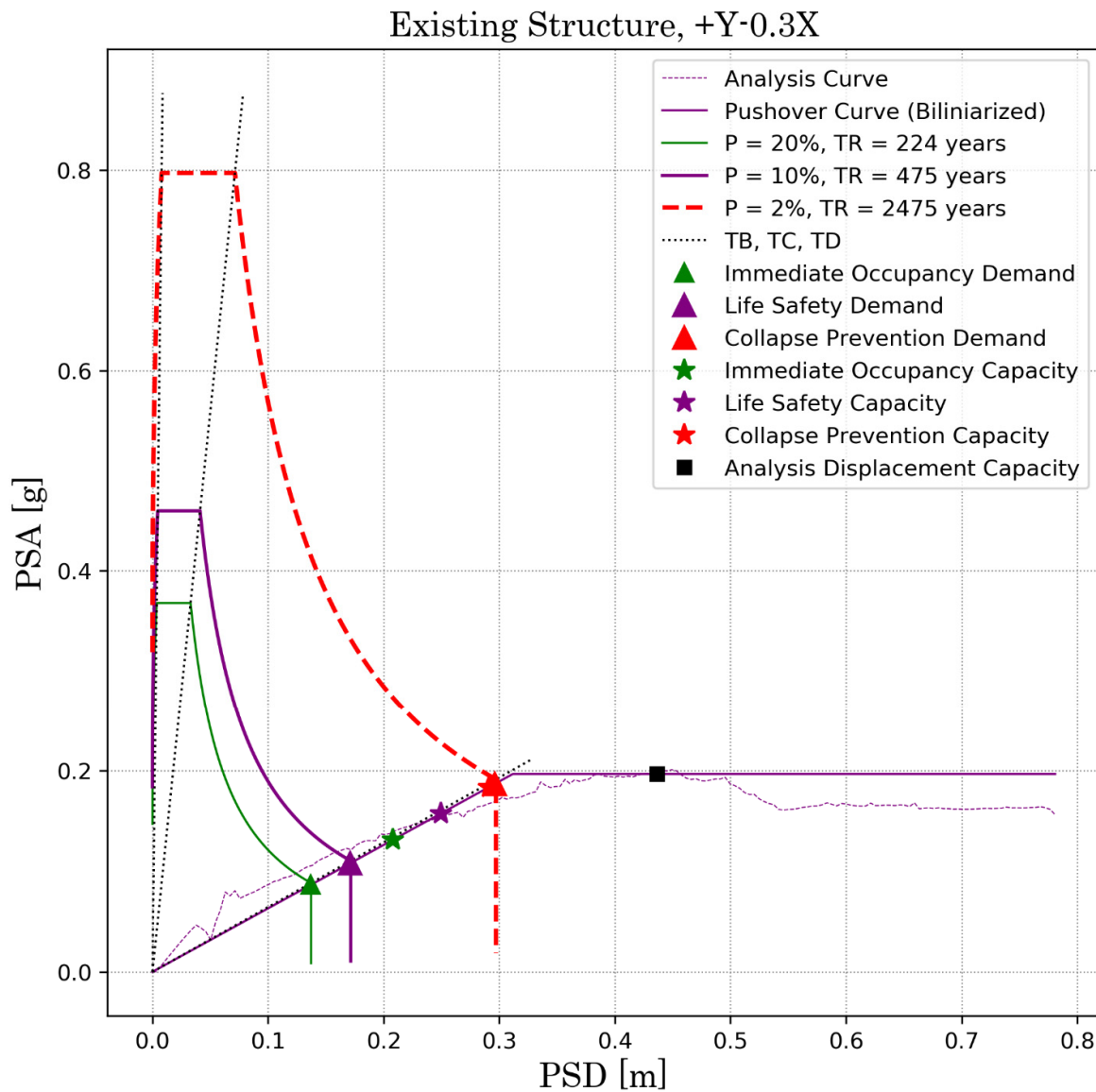
Πίνακας Ε.3. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων. Ανάλυση Y + 0.3 X.

Περίοδος ισοδύναμου μονοβάθμιου T^*	8.03 s		
Μετακίνηση διαρροής φορέα Sd_y	0.320 m		
Μετακίνηση στην αστοχία Sd_{max}	0.462 m		
Τέμνουσα βάσης διαρροής φορέα $V_{b,y}$	15 325 KN		
Στάθμη Επιτελεστικότητας	Απαίτηση [m]	Ικανότητα [m]	Λόγος Εξάντλησης
Άμεση Χρήση	0.217	0.343	0.63
Προστασία Ζωής	0.271	0.416	0.65
Οιονεί Κατάρρευση	0.470	0.489	0.96
Αξιολόγηση αποτελέσματος			ΟΡΙΑΚΗ ΕΠΙΡΚΕΙΑ

Εκτέλεση της ανάλυσης κατά $Y - 0.3 X$

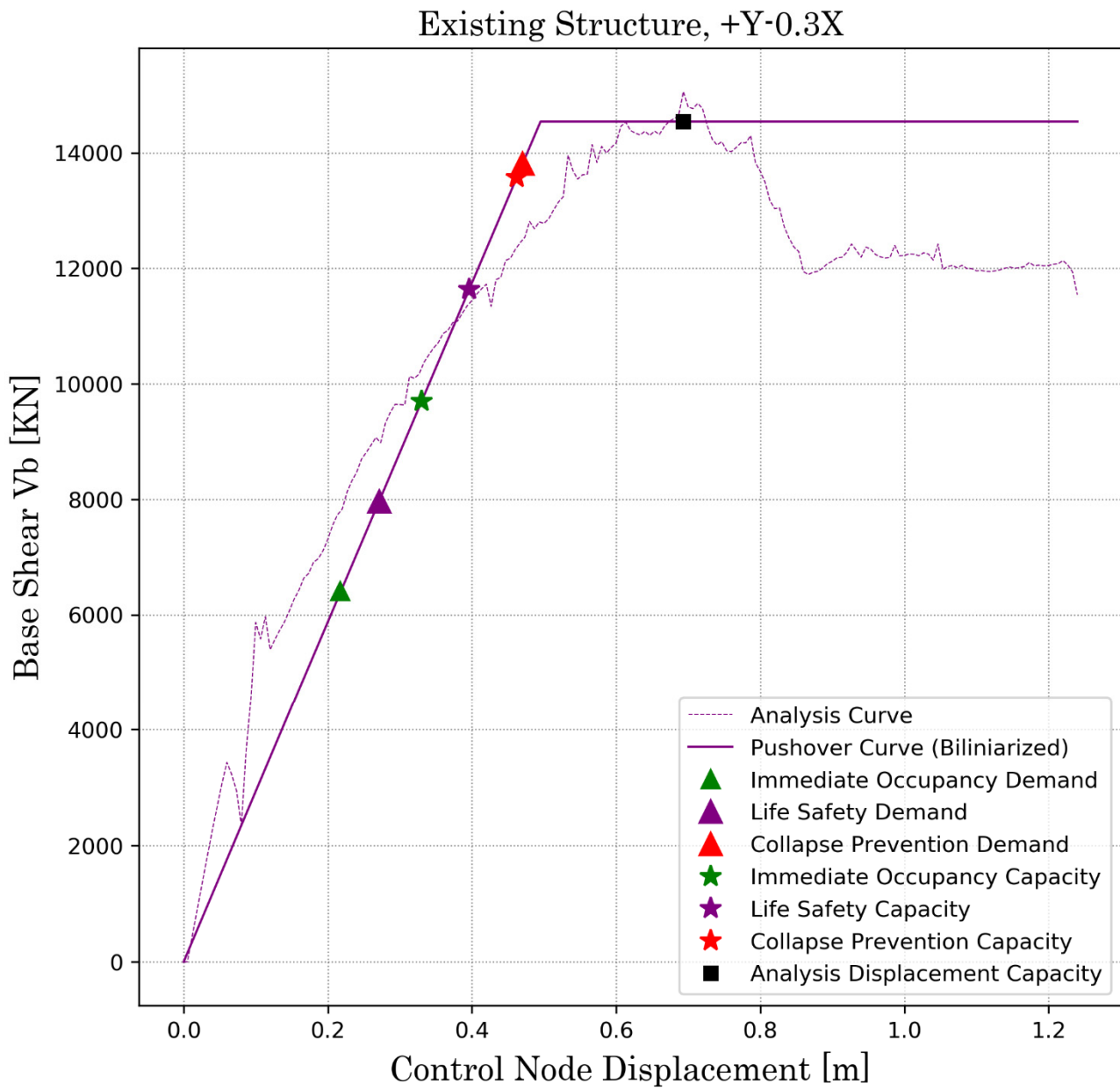
Ακολουθείται η ίδια διαδικασία από την οποία προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα.

S.R.S.S. Capacity & Demand Curves

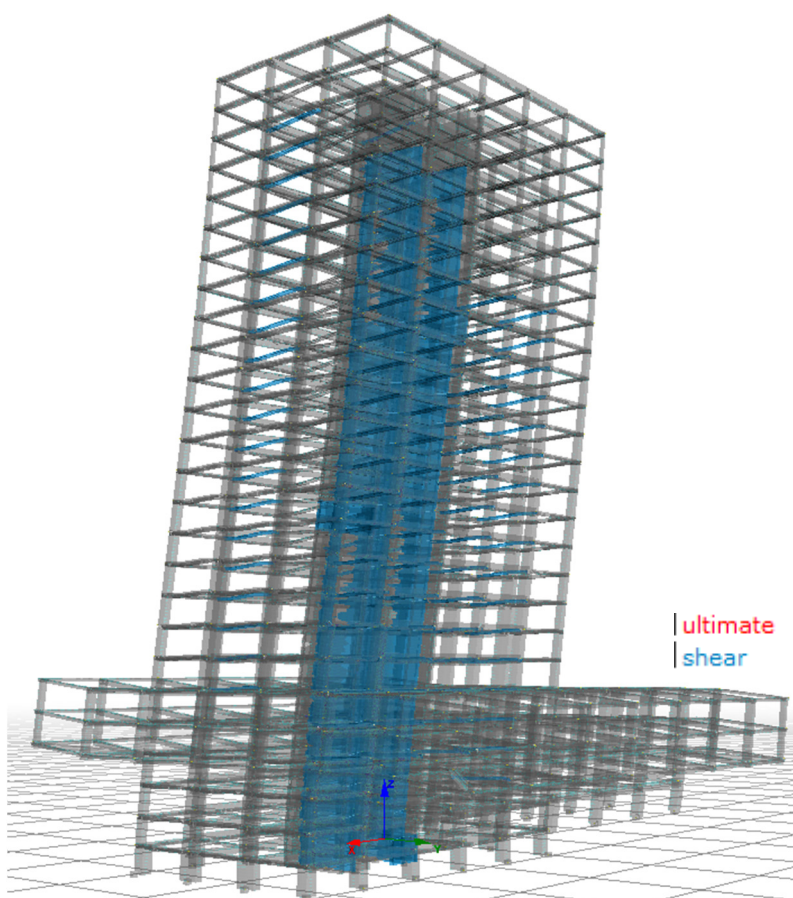


Σχήμα Ε.22. Σημεία επιτελεστικότητας. $Y - 0.3 X$

Base Shear - Displacement Capacity & Demand Curves



Σχήμα Ε.23. Καμπύλη ικανότητας και στοχευόμενη μετακίνηση. Y - 0.3 X



Εικόνα Ε.2. Συμπεριφορά του φορέα.

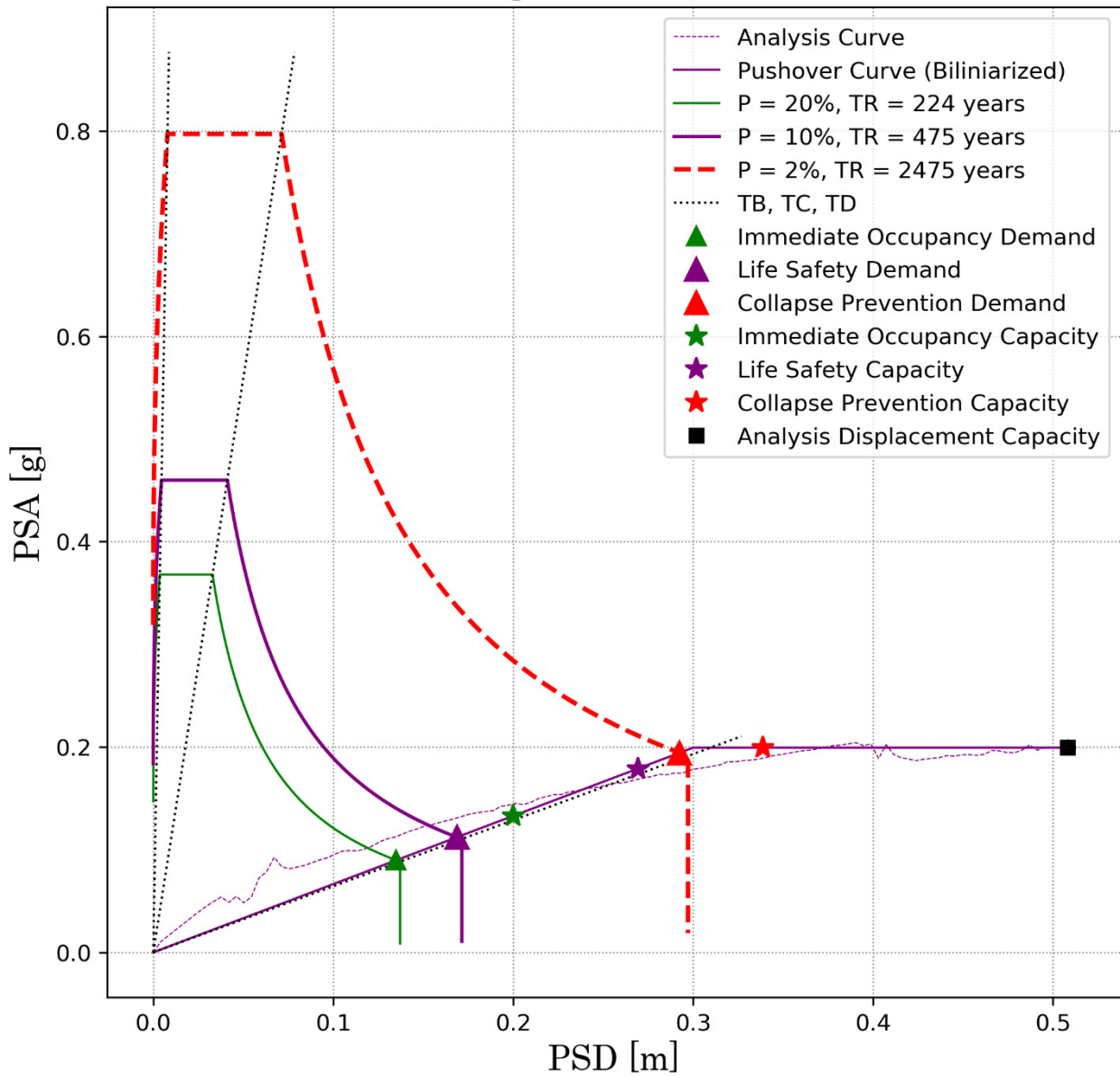
Πίνακας Ε.4. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων. Ανάλυση Y - 0.3 X.

Περίοδος ισοδύναμου μονοβάθμιου T^*	7.91 s		
Μετακίνηση διαρροής φορέα Sd_y	0.311 m		
Μετακίνηση στην αστοχία Sd_{max}	0.437 m		
Τέμνουσα βάσης διαρροής φορέα $V_{b,y}$	15 062 KN		
Στάθμη Επιτελεστικότητα	Απαίτηση [m]	Ικανότητα [m]	Λόγος Εξάντλησης
Άμεση Χρήση	0.216	0.330	0.66
Προστασία Ζωής	0.271	0.396	0.68
Οιονεί Κατάρρευση	0.470	0.462	1.0
Αξιολόγηση αποτελέσματος			ΟΡΙΑΚΗ ΑΝΕΠΑΡΚΕΙΑ

Εκτέλεση της ανάλυσης κατά - Y + 0.3 X

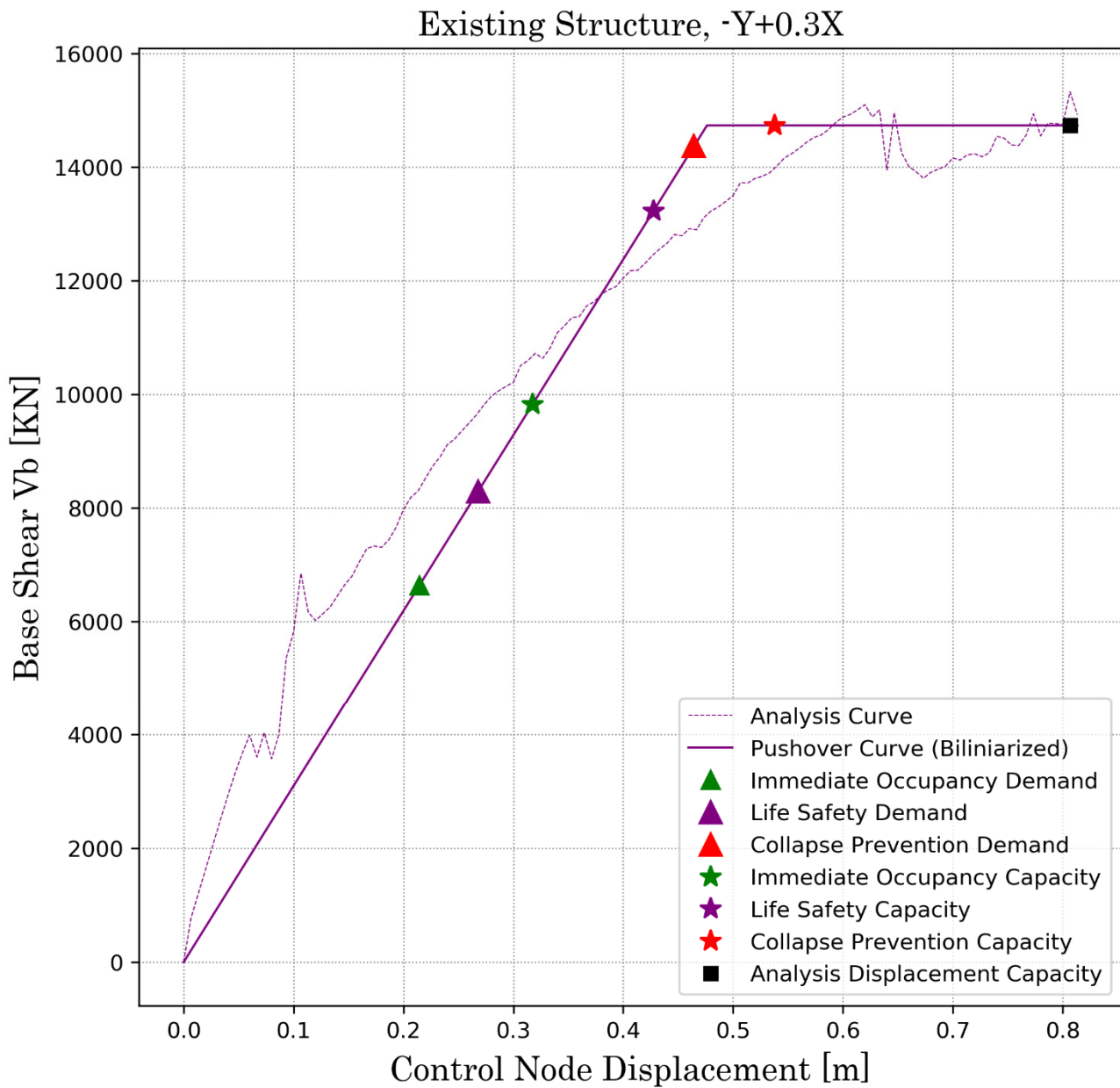
S.R.S.S. Capacity & Demand Curves

Existing Structure, -Y+0.3X

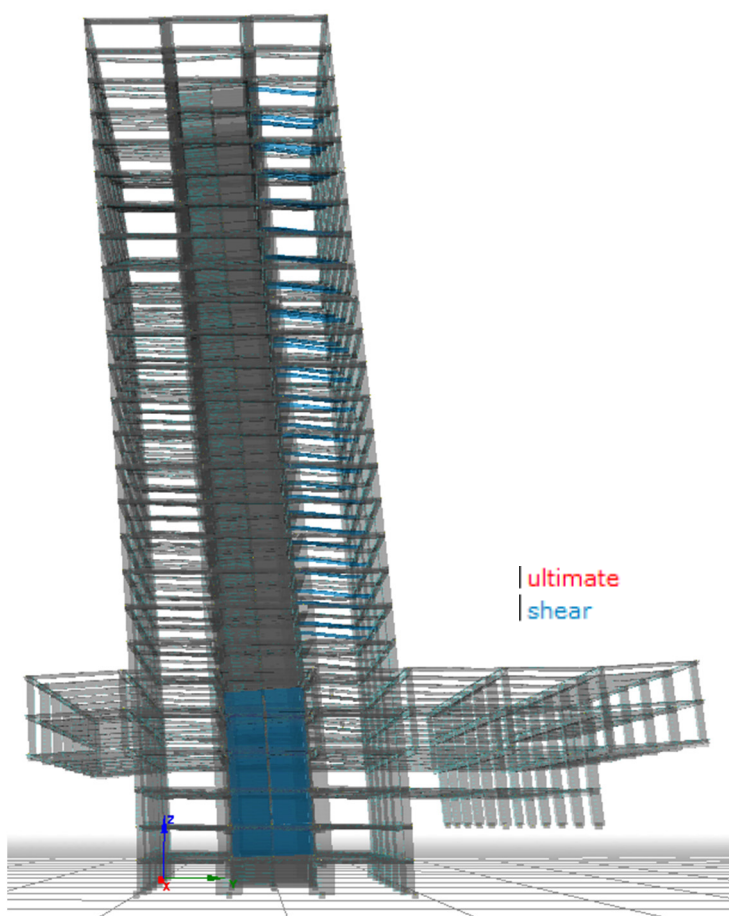


Σχήμα Ε.24. Σημεία επιτελεστικότητας. - Y + 0.3 X

Base Shear - Displacement Capacity & Demand Curves



Σχήμα Ε.25. Καμπύλη ικανότητας και στοχευόμενη μετακίνηση. - Y + 0.3 X



Εικόνα Ε.3. Συμπεριφορά του φορέα.

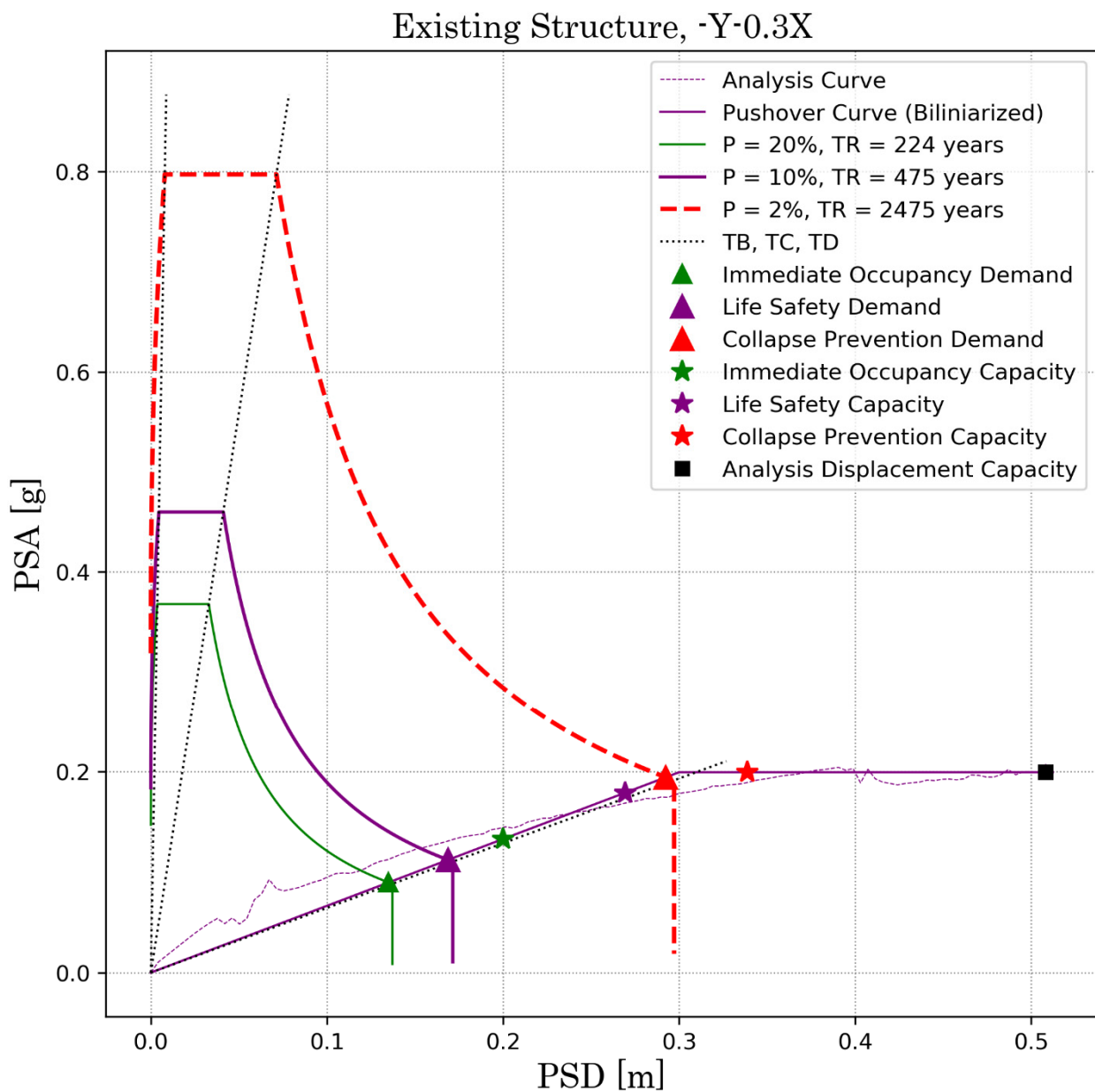
Πίνακας Ε.5. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων. Ανάλυση - Y + 0.3 X.

Περίοδος ισοδύναμου μονοβάθμιου T^*	7.70 s
Μετακίνηση διαρροής φορέα Sd_y	0.300 m
Μετακίνηση στην αστοχία Sd_{max}	0.437 m
Τέμνουσα βάση διαρροής φορέα $V_{b,y}$	15 327 KN

Στάθμη Επιτελεσιμότητας	Απαίτηση [m]	Ικανότητα [m]	Λόγος Εξάντλησης
Άμεση Χρήση	0.214	0.318	0.68
Προστασία Ζωής	0.268	0.428	0.63
Οιονεί Κατάρρευση	0.464	0.538	0.86
Αξιολόγηση αποτελέσματος			ΕΠΑΡΚΕΙΑ

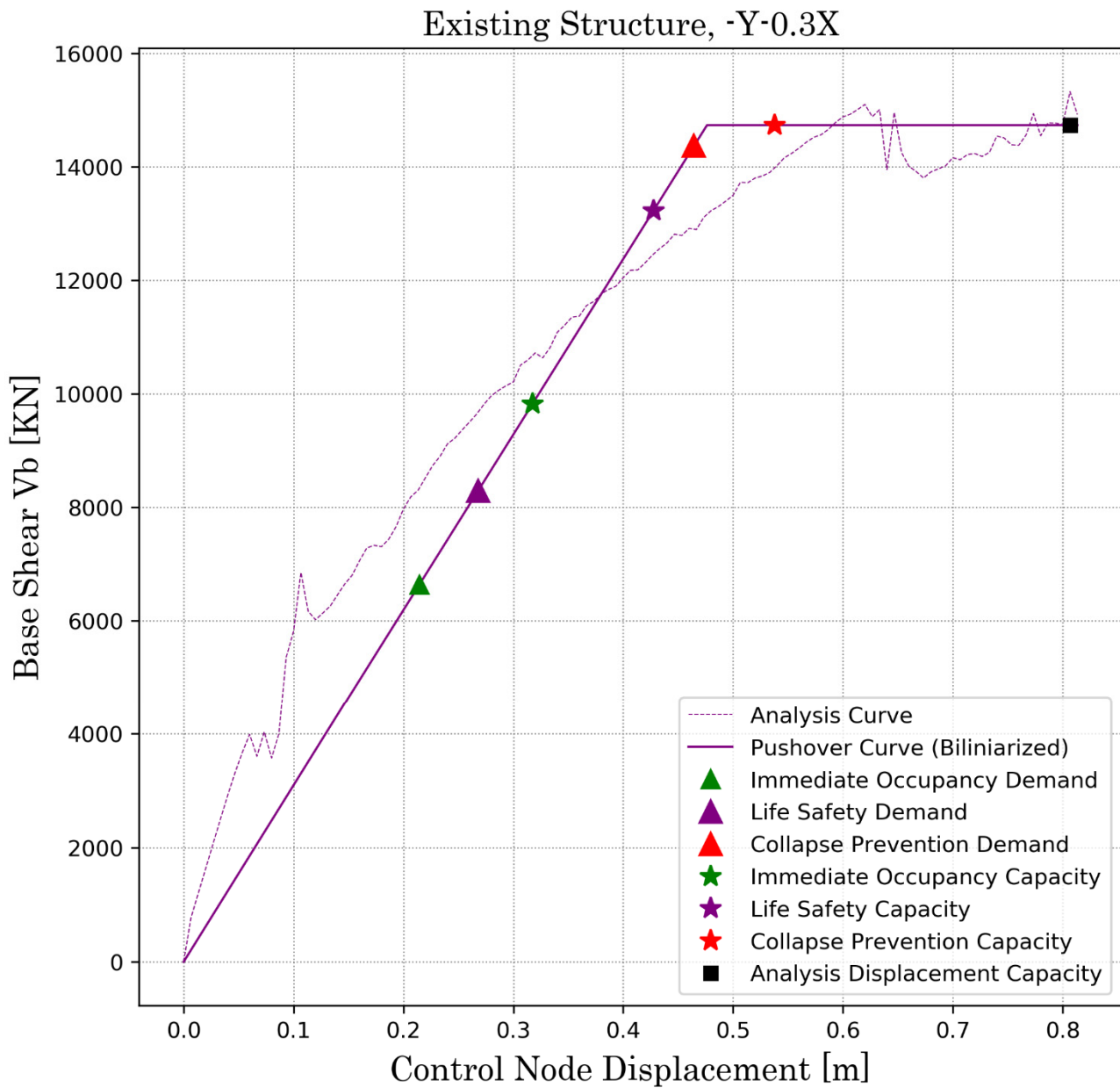
Εκτέλεση της ανάλυσης κατά - Y - 0.3 X

S.R.S.S. Capacity & Demand Curves

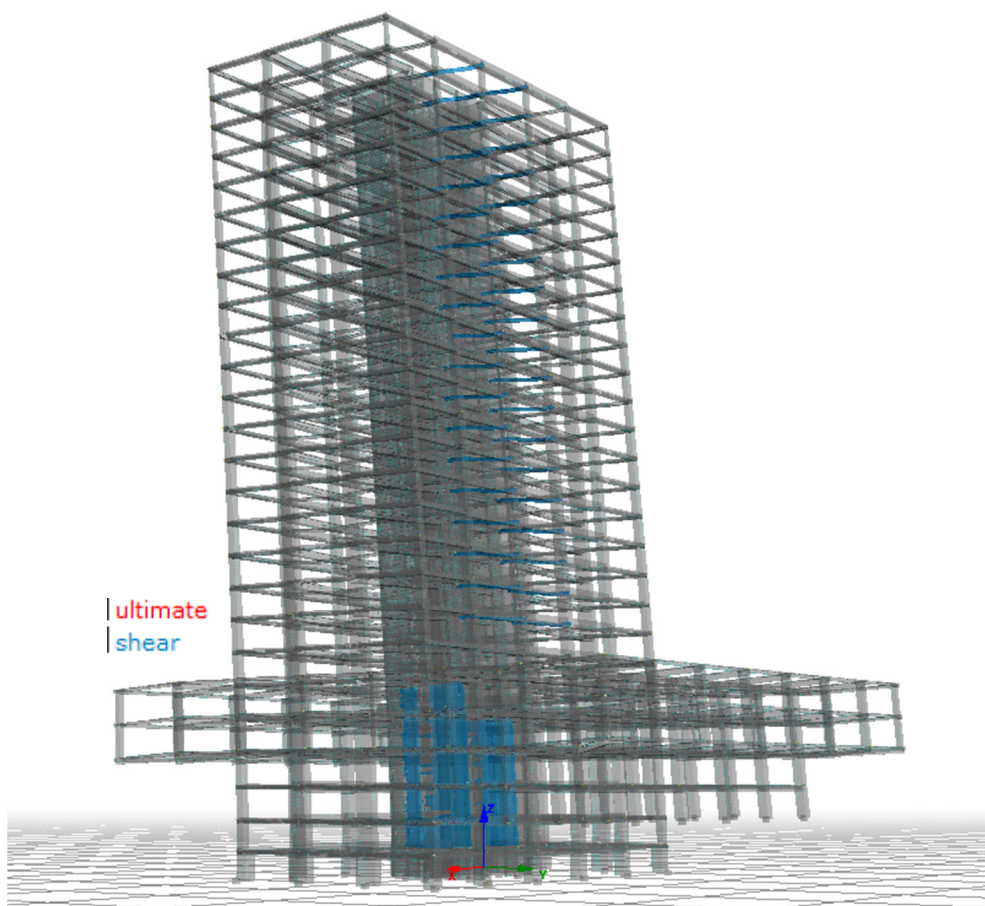


Σχήμα Ε.26. Σημεία επιτελεστικότητας. - Y - 0.3 X

Base Shear - Displacement Capacity & Demand Curves



Σχήμα Ε.27. Καμπύλη ικανότητας και στοχευόμενη μετακίνηση. - Y - 0.3 X



Εικόνα Ε.4. Συμπεριφορά του φορέα.

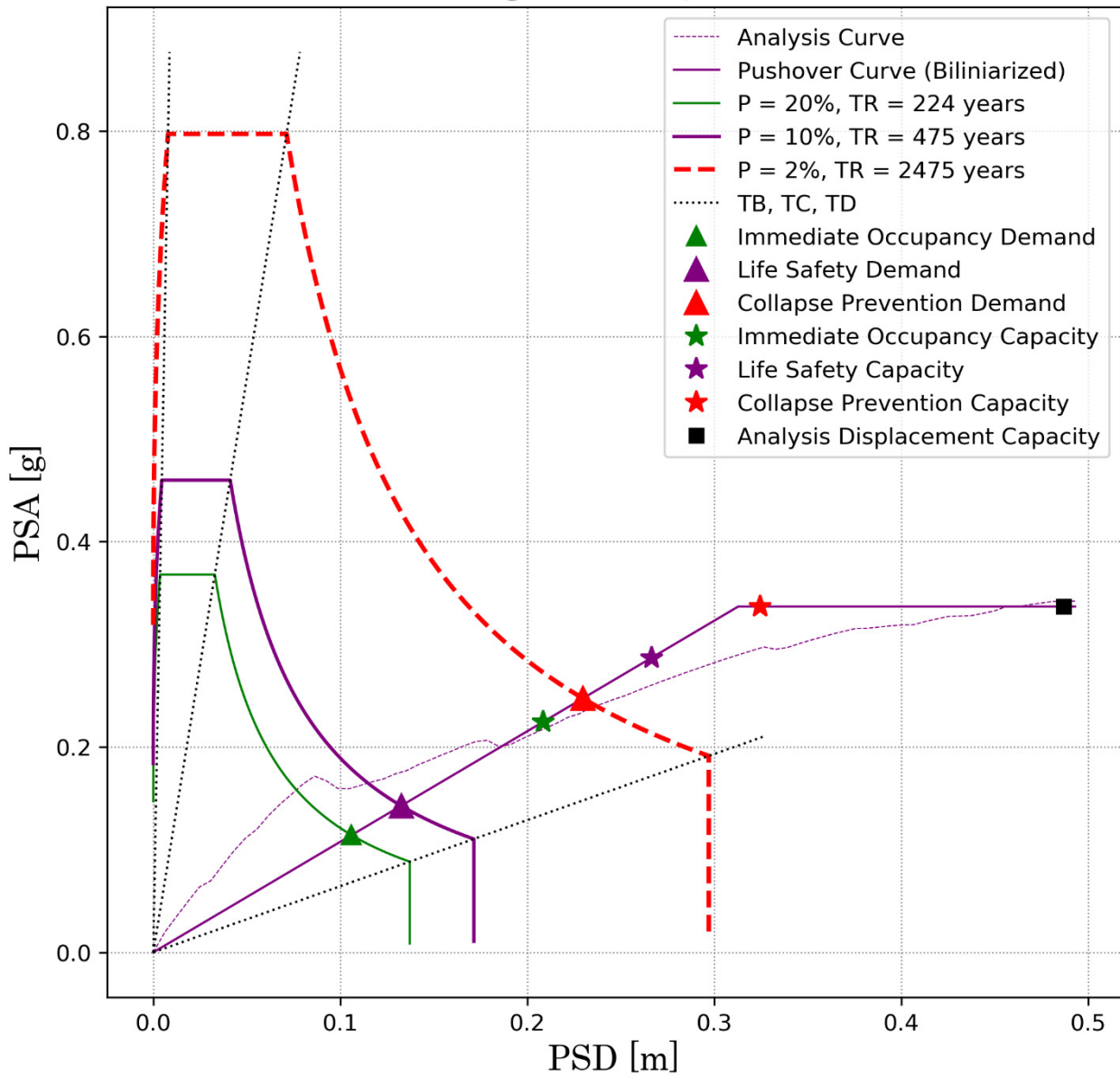
Πίνακας Ε.6. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων. Ανάλυση - Y - 0.3 X.

Περίοδος ισοδύναμου μονοβάθμιου T^*	7.70 s		
Μετακίνηση διαρροής φορέα Sd_y	0.300 m		
Μετακίνηση στην αστοχία Sd_{max}	0.508 m		
Τέμνουσα βάσης διαρροής φορέα $V_{b,y}$	15 327 KN		
Στάθμη Επιτελεστικότητας	Απαιτήση [m]	Ικανότητα [m]	Λόγος Εξάντλησης
Άμεση Χρήση	0.214	0.318	0.68
Προστασία Ζωής	0.268	0.428	0.63
Οιονεί Κατάρρευση	0.464	0.538	0.86
Αξιολόγηση αποτελέσματος			ΕΠΑΡΚΕΙΑ

Εκτέλεση της ανάλυσης κατά X + 0.3 Y

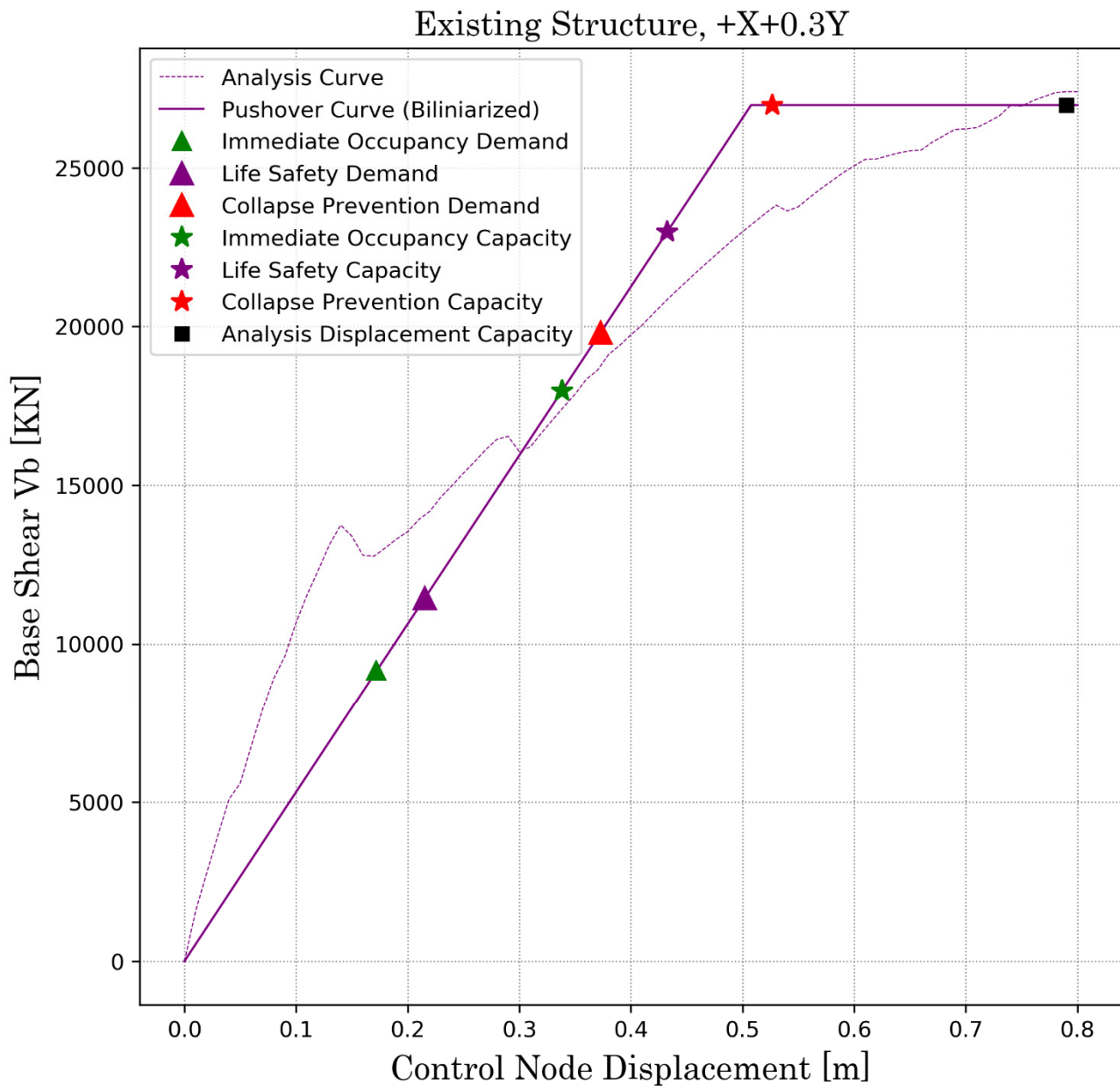
S.R.S.S. Capacity & Demand Curves

Existing Structure, +X+0.3Y

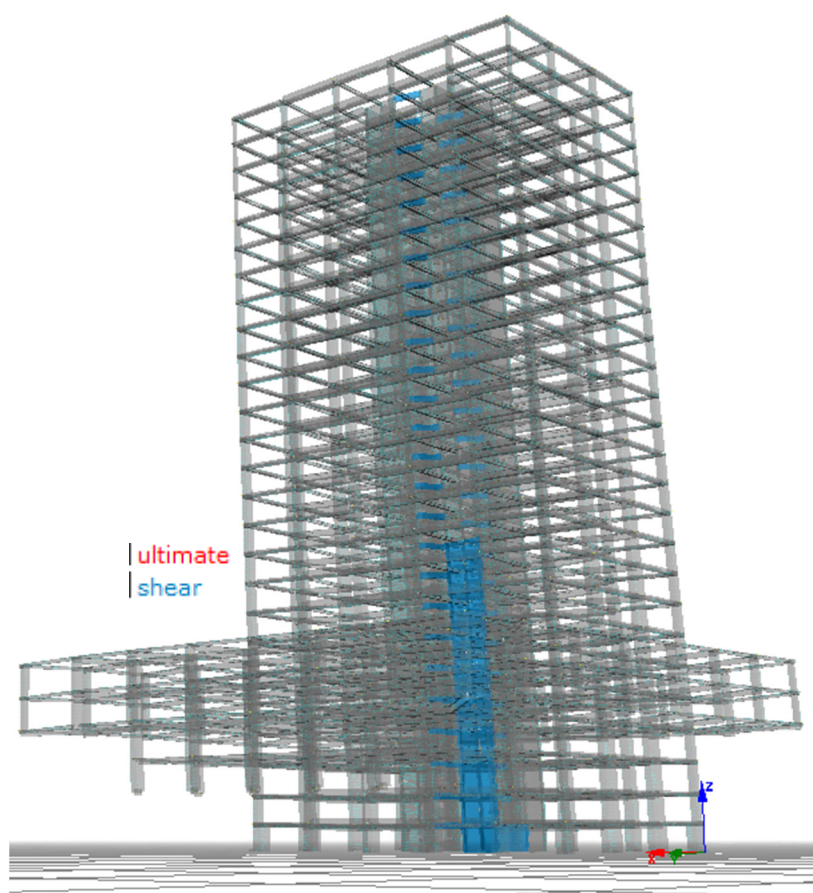


Σχήμα Ε.28. Σημεία επιτελεστικότητας. X + 0.3 Y

Base Shear - Displacement Capacity & Demand Curves



Σχήμα Ε.29. Καμπύλη ικανότητας και στοχευόμενη μετακίνηση. X + 0.3 Y



Εικόνα Ε.5. Συμπεριφορά του φορέα.

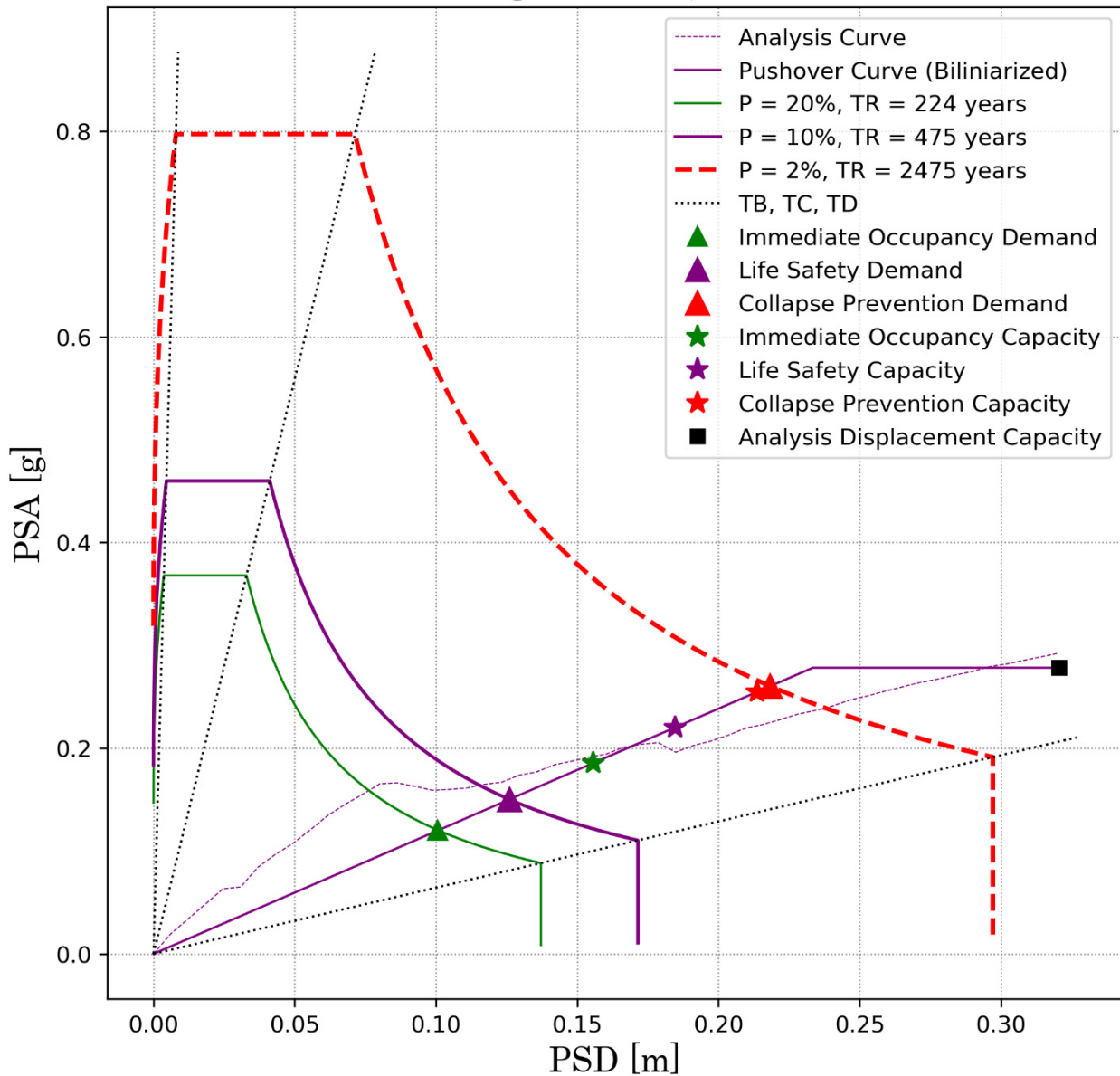
Πίνακας Ε.7. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων. Ανάλυση X + 0.3 Y

Περίοδος ισοδύναμου μονοβάθμιου T^*	6.06 s		
Μετακίνηση διαρροής φορέα Sd_y	0.313 m		
Μετακίνηση στην αστοχία Sd_{max}	0.487 m		
Τέμνουσα βάσης διαρροής φορέα $V_{b,y}$	27 400 KN		
Στάθμη Επιτελεστικότητας	Απαίτηση [m]	Ικανότητα [m]	Λόγος Εξάντλησης
Άμεση Χρήση	0.172	0.338	0.51
Προστασία Ζωής	0.215	0.433	0.50
Οιονεί Κατάρρευση	0.373	0.527	0.71
Αξιολόγηση αποτελέσματος			ΕΠΙΡΚΕΙΑ

Εκτέλεση της ανάλυσης κατά $X - 0.3 Y$

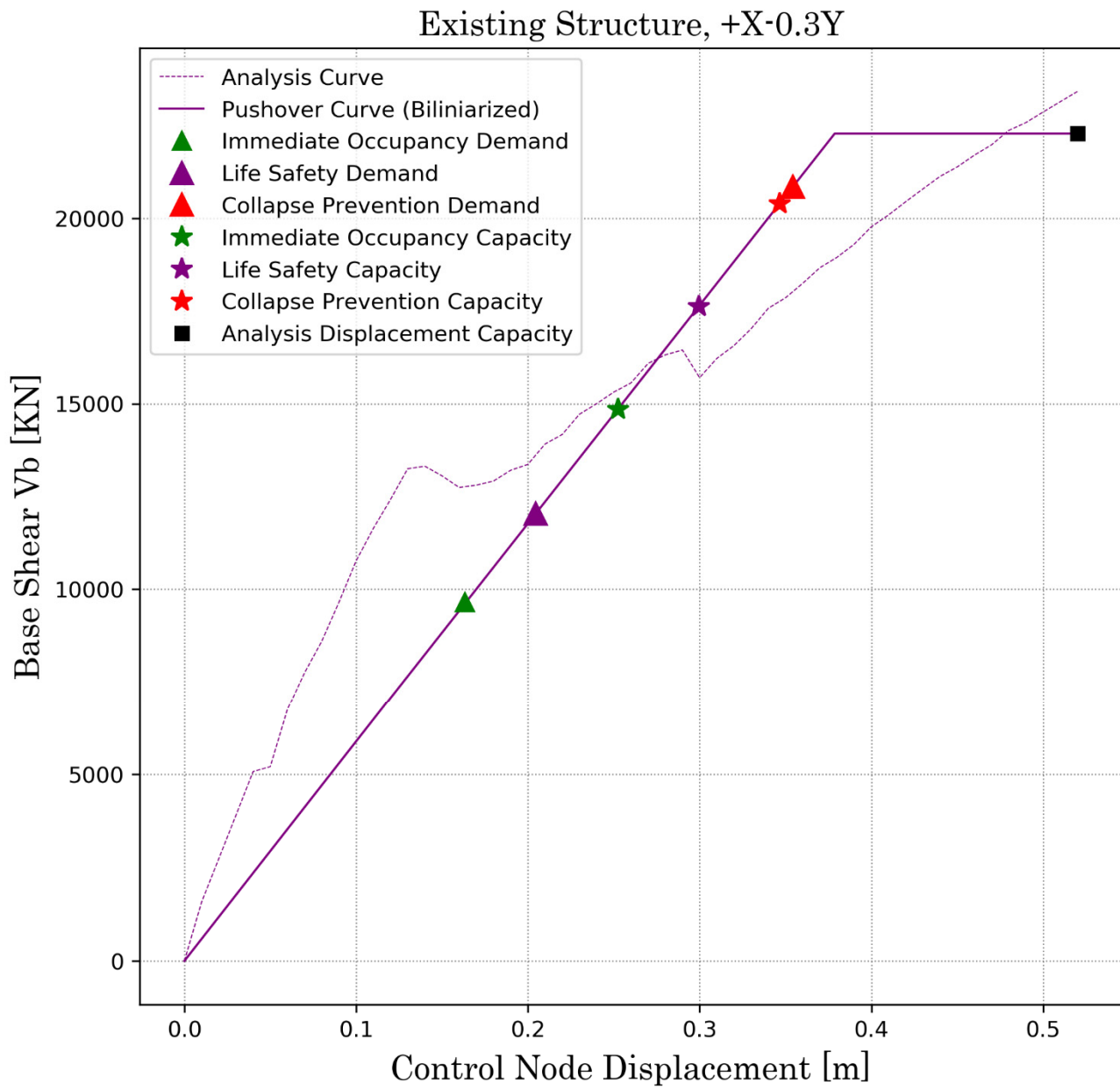
S.R.S.S. Capacity & Demand Curves

Existing Structure, +X-0.3Y

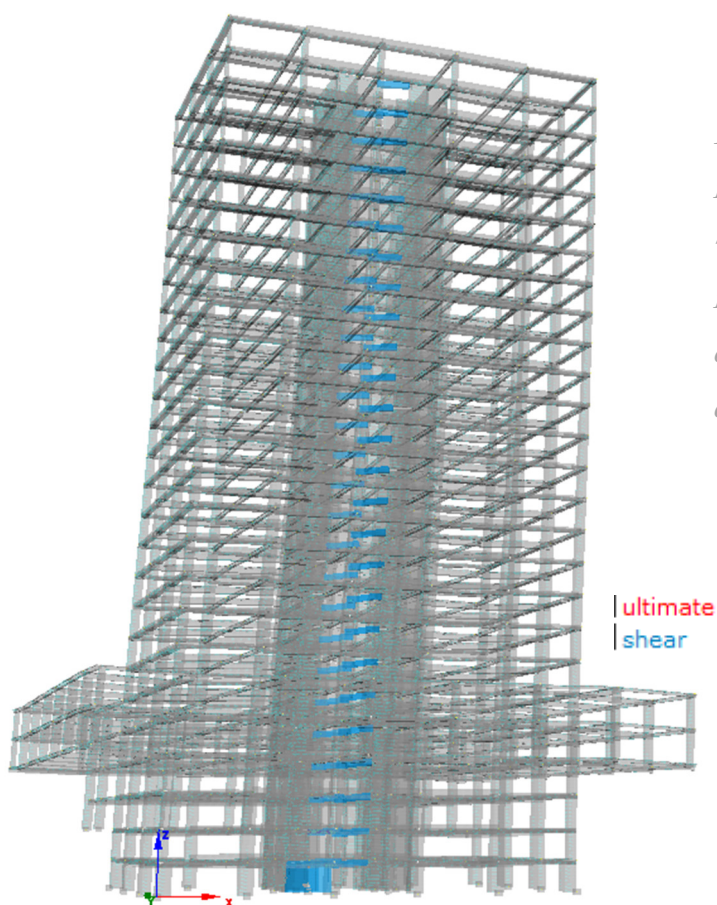


Σχήμα Ε.30. Σημεία επιτελεστικότητας. $X - 0.3 Y$

Base Shear - Displacement Capacity & Demand Curves



Σχήμα Ε.31. Καμπύλη ικανότητας και στοχευόμενη μετακίνηση. X - 0.3 Y



Εμφανίζονται τα αποτελέσματα ενός βήματος πριν την αστοχία. Στο επόμενο βήμα αστοχούν ταυτόχρονα τα λοιπά μέλη της βάσης του πυρήνα, ωστόσο λόγω αριθμητικών ασταθειών δεν αποθηκεύτηκε η παραμορφωμένη εικόνα από το λογισμικό για εκείνο το βήμα.

Εικόνα Ε.6. Συμπεριφορά του φορέα.

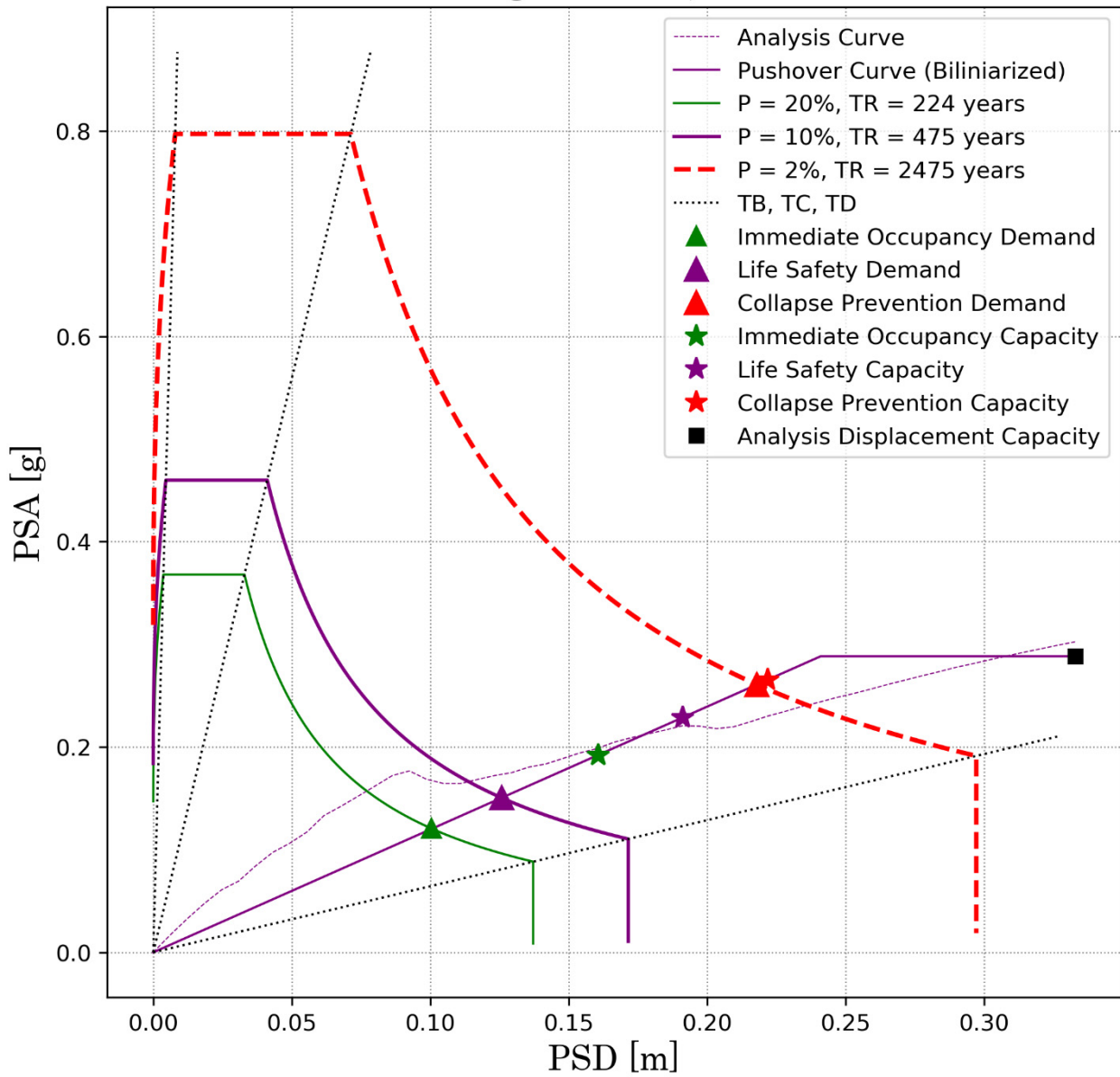
Πίνακας Ε.8. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων. Ανάλυση X - 0.3 Y

Περίοδος ισοδύναμου μονοβάθμιου T^*	5.75 s		
Μετακίνηση διαρροής φορέα Sd_y	0.233 m		
Μετακίνηση στην αστοχία Sd_{max}	0.320 m		
Τέμνουσα βάση διαρροής φορέα $V_{b,y}$	23 417 KN		
Στάθμη Επιτελεστικότητας	Απαίτηση [m]	Ικανότητα [m]	Λόγος Εξάντλησης
Άμεση Χρήση	0.163	0.252	0.64
Προστασία Ζωής	0.204	0.300	0.58
Οιονεί Κατάρρευση	0.354	0.347	1.02
Αξιολόγηση αποτελέσματος			ΟΡΙΑΚΗ ΑΝΕΠΑΡΚΕΙΑ

Εκτέλεση της ανάλυσης κατά - X + 0.3 Y

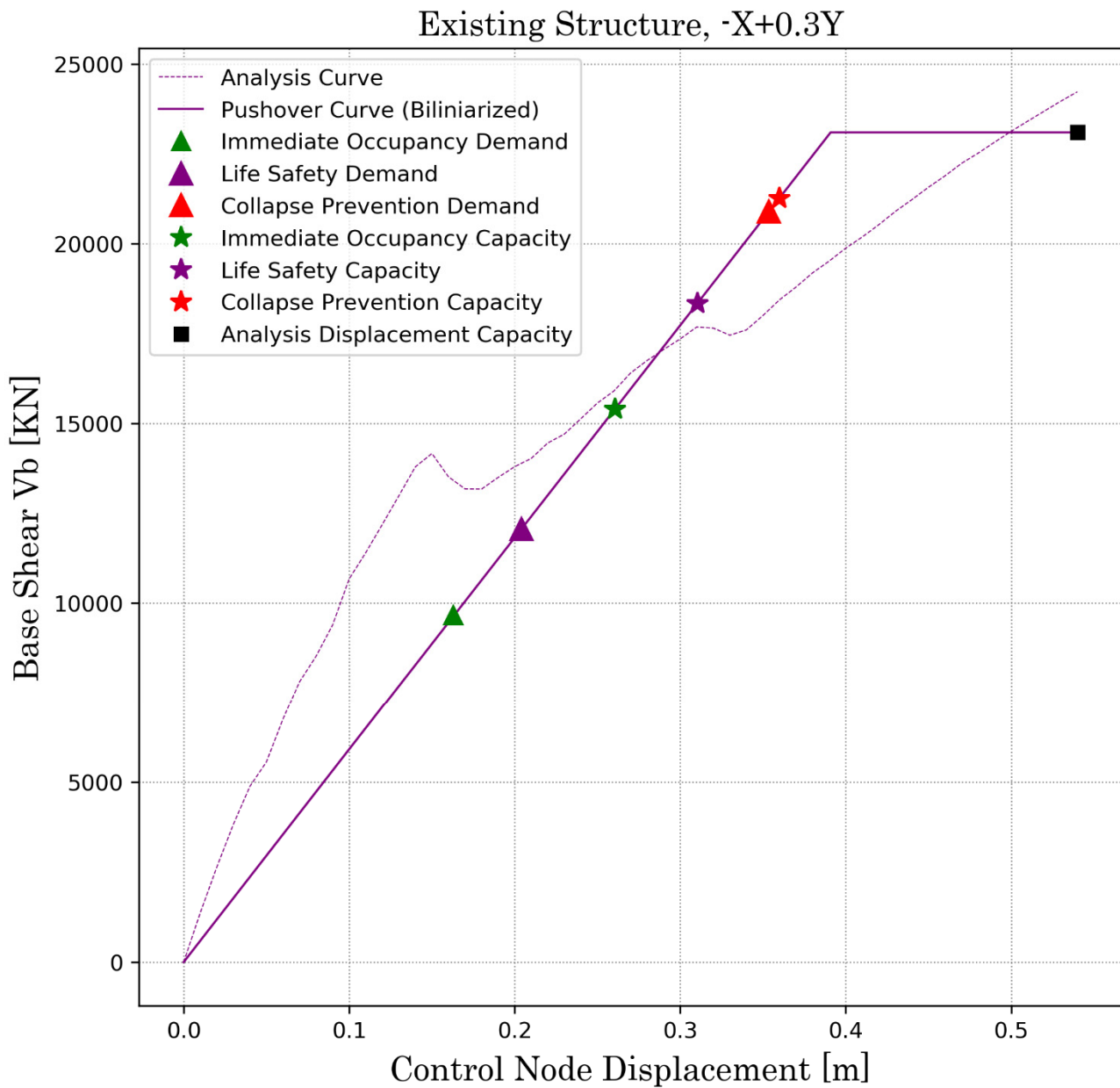
S.R.S.S. Capacity & Demand Curves

Existing Structure, -X+0.3Y

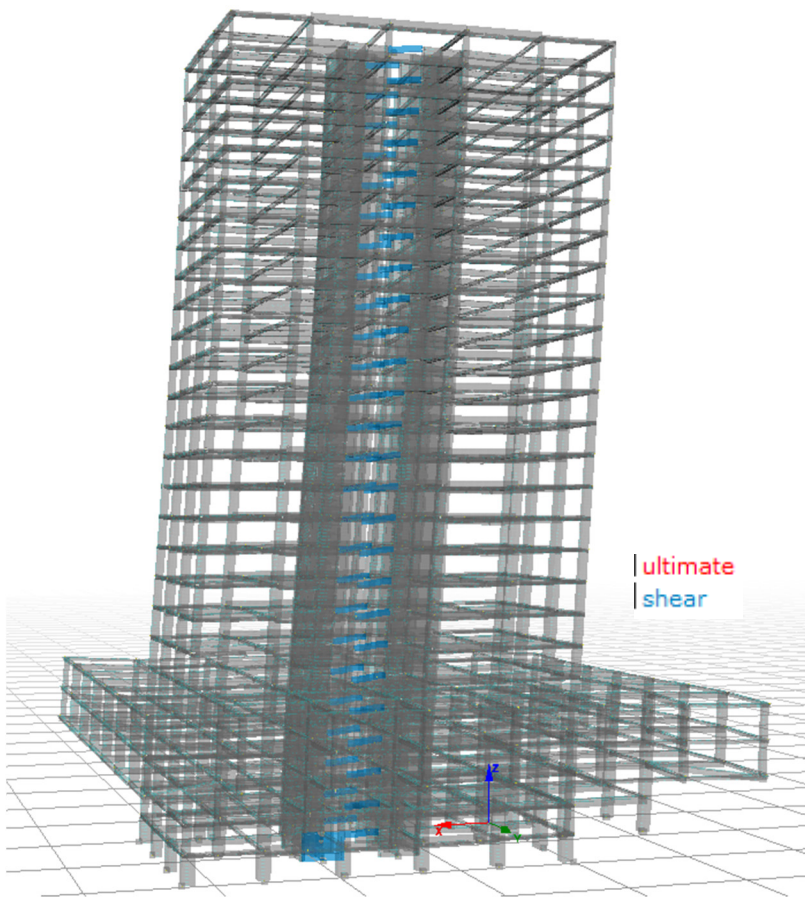


Σχήμα Ε.32. Σημεία επιτελεστικότητας. - X + 0.3 Y

Base Shear - Displacement Capacity & Demand Curves



Σχήμα Ε.33. Καμπύλη ικανότητας και στοχευόμενη μετακίνηση. - X + 0.3 Y



Εικόνα Ε.7. Συμπεριφορά του φορέα.

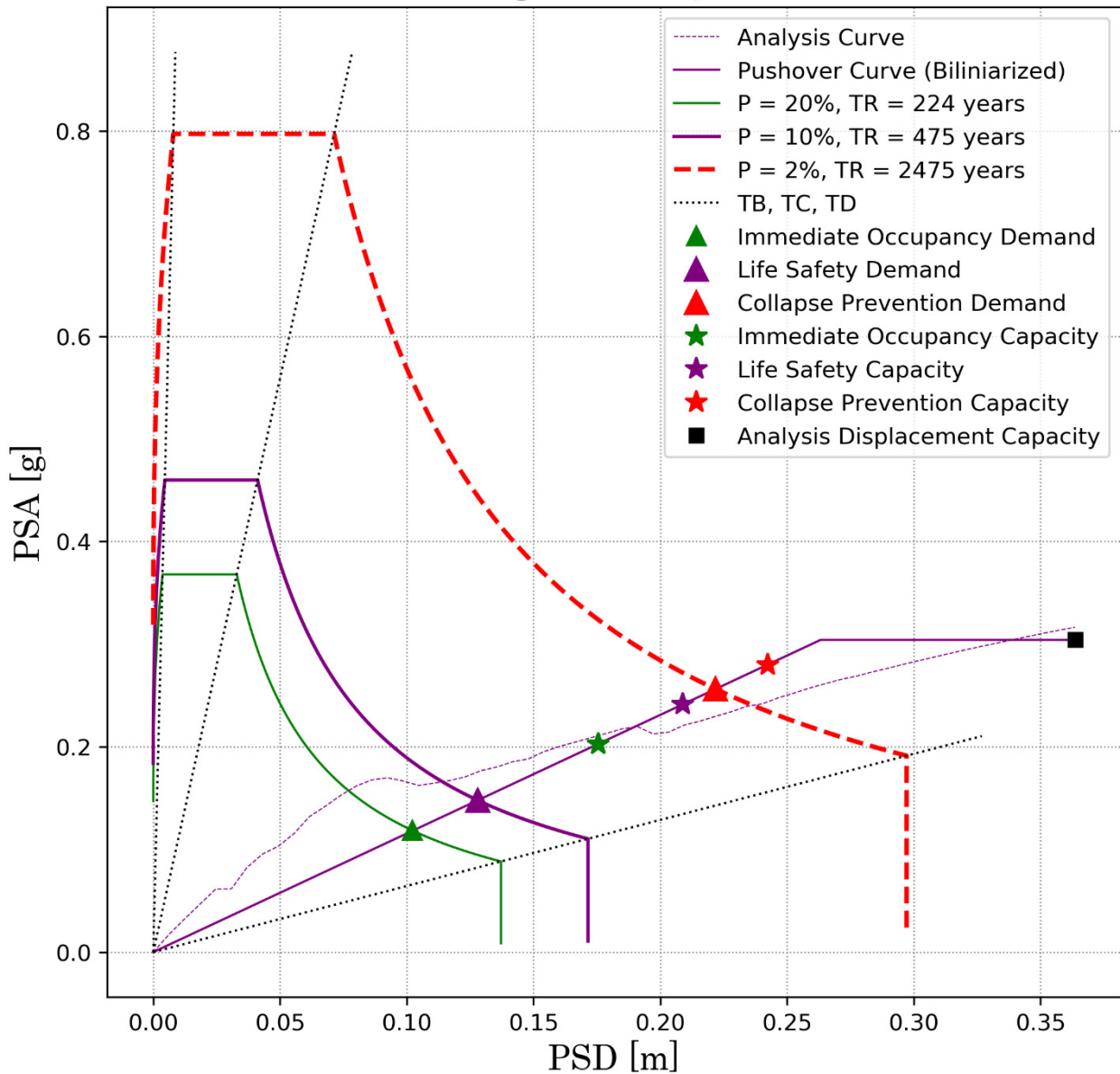
Πίνακας Ε.9. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων. Ανάλυση - X + 0.3 Y

Περίοδος ισοδύναμου μονοβάθμιου T^*	5.74 s		
Μετακίνηση διαρροής φορέα Sd_y	0.241 m		
Μετακίνηση στην αστοχία Sd_{max}	0.332 m		
Τέμνουσα βάσης διαρροής φορέα $V_{b,y}$	24 224 KN		
Στάθμη Επιτελεστικότητας	Απαίτηση [m]	Ικανότητα [m]	Λόγος Εξάντλησης
Άμεση Χρήση	0.163	0.261	0.63
Προστασία Ζωής	0.204	0.310	0.66
Οιονεί Κατάρρευση	0.354	0.360	0.98
Αξιολόγηση αποτελέσματος			ΟΡΙΑΚΗ ΕΠΑΡΚΕΙΑ

Εκτέλεση της ανάλυσης κατά - X - 0.3 Y

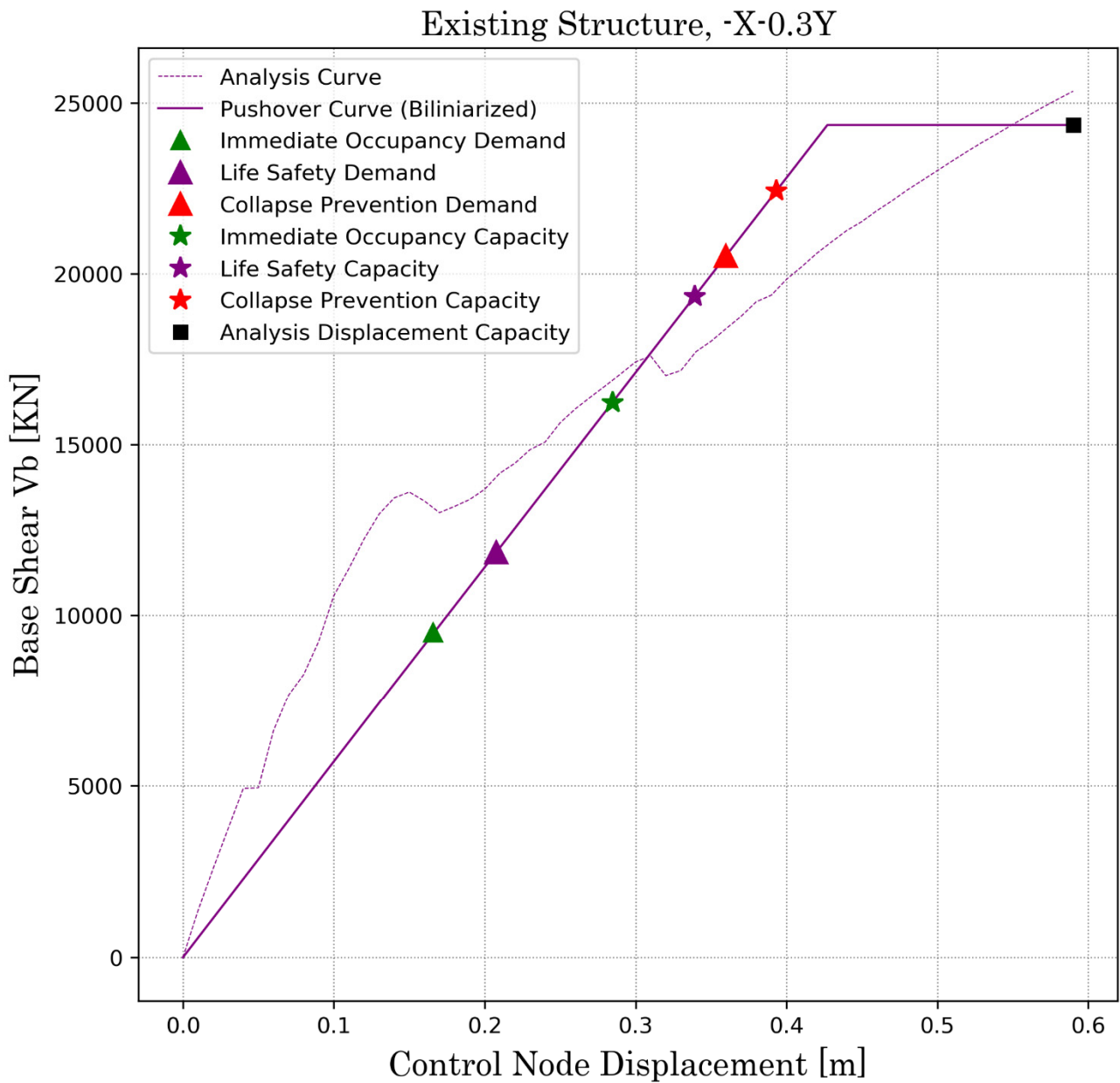
S.R.S.S. Capacity & Demand Curves

Existing Structure, -X-0.3Y

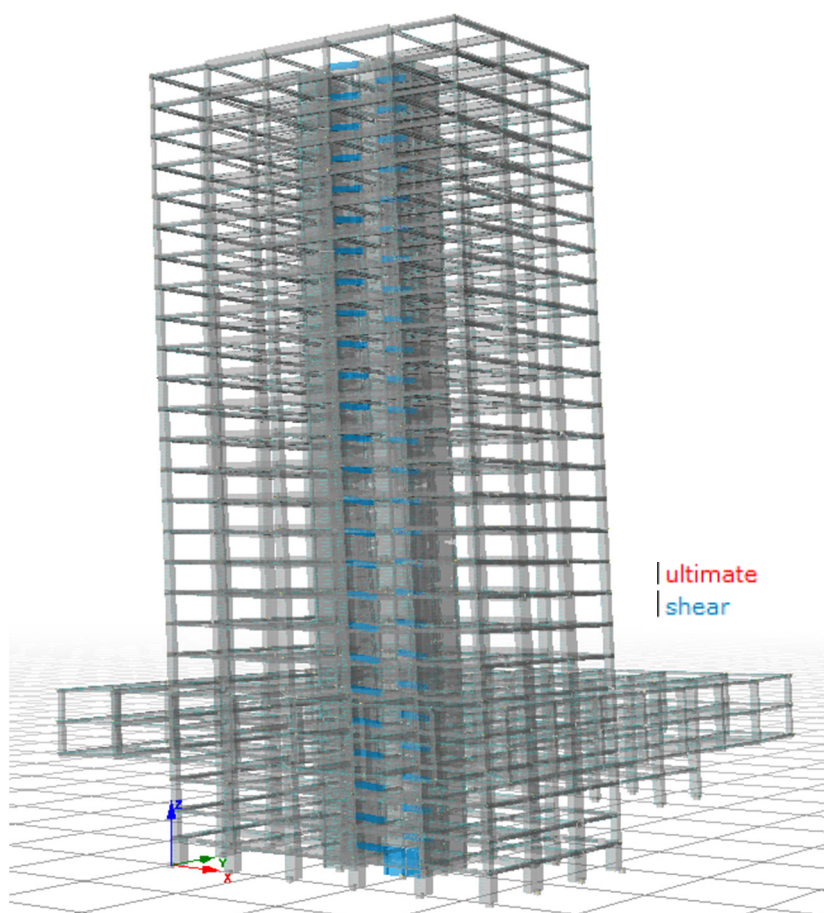


Σχήμα Ε.34. Σημεία επιτελεστικότητας. - X - 0.3 Y

Base Shear - Displacement Capacity & Demand Curves



Σχήμα Ε.35. Καμπύλη ικανότητας και στοχευόμενη μετακίνηση. - X - 0.3 Y



Εικόνα Ε.8. Συμπεριφορά του φορέα.

Πίνακας Ε.10. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων. Ανάλυση - X - 0.3 Y

Περίοδος ισοδύναμου μονοβάθμιου T^*	5.84 s		
Μετακίνηση διαρροής φορέα Sd_y	0.263 m		
Μετακίνηση στην αστοχία Sd_{max}	0.364 m		
Τέμνουσα βάσης διαρροής φορέα $V_{b,y}$	25 352 KN		
Στάθμη Επιτελεστικότητα	Απαίτηση [m]	Ικανότητα [m]	Λόγος Εξάντλησης
Άμεση Χρήση	0.166	0.285	0.58
Προστασία Ζωής	0.208	0.339	0.61
Οιονει Κατάρρευση	0.360	0.393	0.92
Αξιολόγηση αποτελέσματος			ΟΡΙΑΚΗ ΕΠΙΡΚΕΙΑ

E.4.3. Σύνοψη Αποτελεσμάτων

Ανάλυση	Y+0.3X	Y-0.3X	-Y+0.3X	-Y-0.3X	X+0.3Y	X-0.3Y	-X+0.3Y	-X-0.3Y
T^* [s]	8.03	7.91	7.70	7.70	6.06	5.75	5.74	5.84
Sd_y [m]	0.320	0.311	0.300	0.300	0.313	0.233	0.241	0.263
$V_{b,y}$ [KN]	15 325	15 062	15 327	15 327	27 400	23 417	24 224	25 352
$C.R._{AX}$	0.63	0.66	0.68	0.68	0.51	0.64	0.63	0.58
$C.R._{ΠZ}$	0.65	0.68	0.63	0.63	0.50	0.58	0.66	0.61
$C.R._{OK}$	0.96	1.00	0.86	0.86	0.71	1.02	0.98	0.92

Ε.5. Ενίσχυση και επανέλεγχος

Από το αποτέλεσμα της ανάλυσης που προηγήθηκε προκύπτει ότι η κατασκευή είναι οριακά ανεπαρκής. Παράλληλα παραμένει το πρόβλημα της ψαθυρής αστοχίας της Διαθέτοντας σύστημα τοιχωμάτων, το μεγαλύτερο ποσοστό της στιβαρότητας της κατασκευής προέρχεται από τον πυρήνα (βλ. και παράγραφο Γ.3.5, σελ. 44), όπου εκτελείται σχετικός έλεγχος. Ωστόσο η αστοχία σε τέμνουσα προηγείται της αστοχίας σε κάμψη. Στην παρούσα ενότητα θα εξεταστεί το αποτέλεσμα της ενίσχυσης του πυρήνα της κατασκευής με ινοπλισμένα πολυμερή, προκειμένου να μπορέσει να γίνει πλήρης εκμετάλλευση της διαθέσιμης πλαστιμότητας που θα προκύψει δίχως την πρόωρη αστοχία σε τέμνουσα.

Όλα τα τοιχώματα του πυρήνα ενισχύονται με δύο στρώσεις του προϊόντος SikaWrap® - 380C Quadri, το οποίο έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά.

Κατασκευαστής	Sika
Σειρά	SikaWrap® 380 C Quadri
Τύπος ινών	Ίνες άνθρακα
Διεύθυνση ινών	0°, 90°, 45°, -45° (quadriaxial)
Εφαρμογή	Στεγνή
Ο κατασκευαστής προτείνει:	θιξοτροπική εποξειδική ρητίνη Sikadur®-330
Πάχος ινών (mm)	0.1880
Εφελκυστική αντοχή (MPa)	4510.00
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	230
Παραμόρφωση θραύσης	1.90%
Βάρος	380 gr/m ²

Η στρογγύλευση των γωνιών για την επικόλληση των ινοπλισμένων πολυμερών γίνεται με ακτίνα $R = 4.00 \text{ cm}$. Η ενίσχυση θα γίνει σε όλο το μήκος του πυρήνα καθ' ύψος.¹²

¹² Ωστόσο, προφανώς για λόγους οικονομίας, θα πρέπει να εξεταστεί το ενδεχόμενο επάρκειας με τμηματική ενίσχυση μόνο. Η παραμετρική ανάλυση δεν εκτελείται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Ε.5.1. Προκαταρκτικός υπολογισμός Αντοχή πριν την ενίσχυση

Ενδεικτικά γίνεται ο αναλυτικός υπολογισμός της αντοχής σε τέμνουσα βάσει των διατάξεων του EC8 για το τοίχωμα που παραλαμβάνει τη δράση κατά Υ διαστάσεων 830/30 cm. Με αντίστοιχο τρόπο γίνεται ο υπολογισμός και για το τοίχωμα διαστάσεων 830/25 cm που επίσης ανθίστανται σε αυτή τη διεύθυνση. Είναι δεδομένο ότι η τιμή V_{Rdc} είναι επαρκής.

$$V_{Rds} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot 0.90 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot (1 + \cot a) \cdot \sin a$$

$$= \frac{2\Phi 10}{15} \cdot 0.90 \cdot 8.30 \text{ m} \cdot 450000 \text{ KPa} \cdot (1 + 1) \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = 4918.27 \text{ KN}$$

Αντοχή μετά την ενίσχυση

Η τέμνουσα αντοχής σχεδιασμού λόγω οπλισμού διάτμησης V_{Rd3} υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση

$$V_{Rd3} = V_{cd} + V_{wd,υπ} + V_{sj}$$

Η τέμνουσα δύναμη V_{sj} που παραλαμβάνεται από το μανδύα σύνθετου υλικού υπολογίζεται από τη σχέση

$$V_{sj} = \sigma_{wd} \cdot \rho_w \cdot b_w \cdot (0.9 \cdot h) \cdot (\cot \theta + \cot a) \cdot \sin^2 a$$

$$\theta = 45^\circ$$

Για τον υπολογισμό της τάσης σ_{wd} του μανδύα,

$$\sigma_{wd} = \varepsilon_{fd,e} \cdot E_f$$

Για μανδύες κλειστού τύπου η ενεργός παραμόρφωση του υνοπλισμένου πολυμερούς μπορεί να υπολογιστεί ως

$$\varepsilon_{fd,e} = \min \left[0.17 \varepsilon_{fud} \cdot \left(\frac{f_{cm}^{\frac{2}{3}}}{E_f \cdot \rho_w} \right)^{0.30} ; \frac{0.006}{\gamma_{fi}} \right]$$

Όπου με f_{cm} συμβολίζουμε τη μέση θλιπτική τάση του σκυροδέματος σε MPa, το E_f λαμβάνεται σε GPa, ενώ οι

συντελεστές ασφαλείας γ_{fl} και γ_{fb} παίρνουν τις τιμές 1.25 και 1.30, αντίστοιχα. Επίσης, ε_{fud} είναι η τιμή σχεδιασμού της παραμόρφωσης θραύσης του ινοπλισμένου πολυμερούς, η οποία δίνεται από τη σχέση $\varepsilon_{fud} = \frac{\varepsilon_{fuk}}{\gamma_f}$. Για ίνες άνθρακα είναι $\gamma_f = 1.30$.

$\rho_w = \frac{2 \cdot n \cdot t_j}{b_w \cdot \sin \alpha}$ όπου n ο αριθμός στρώσεων και t_j το πάχος μίας στρώσης.

$$\rho_w = \frac{2 \cdot 2 \text{ στρώσεις} \cdot 0.1880 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{0.30 \text{ m} \cdot \sin 45} = 3.54496 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{f d, e} = \min \left[0.17 \cdot \frac{1.9\%}{1.30} \cdot \left(\frac{33^{\frac{2}{3}} \text{ MPa}}{230 \cdot 3.54496 \cdot 10^{-3}} \right)^{0.30}; \frac{0.006}{1.25} \right]$$

$$= \min[5.3157 \cdot 10^{-3}; 4.8 \cdot 10^{-3}] = 4.8 \cdot 10^{-3}$$

$$\sigma_{wd} = 4.8 \cdot 10^{-3} \cdot 230000 \text{ MPa} = 1104 \text{ MPa}$$

$$V_{sj} = 1104 \cdot 10^3 \text{ KPa} \cdot 3.54496 \cdot 10^{-3} \cdot 0.30 \text{ m} \cdot (0.9 \cdot 8.30 \text{ m}) \cdot (\cot 45 + \cot 45) \cdot \sin^2 45 = 8770.45 \text{ KN}$$

Παρατηρούμε ότι με την σωστή εφαρμογή δύο στρώσεων του υλικού μπορεί να επιτευχθεί αύξηση της αντοχής σε τέμνουσα 3852 KN, δηλαδή αύξηση αντοχής κατά 78%. Ανάλογο είναι το ποσοστό για τα υπόλοιπα τοιχώματα.

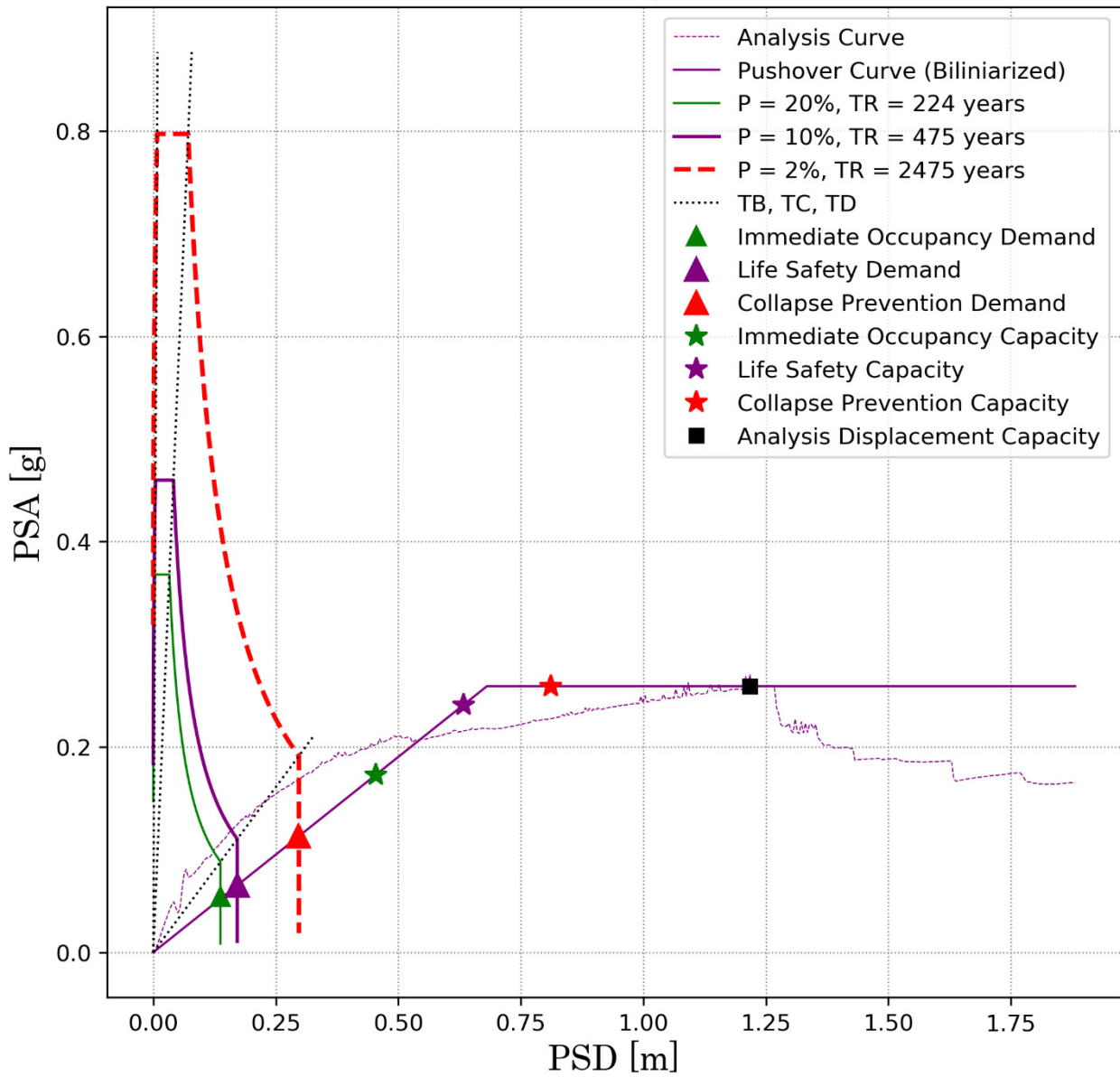
Ε.5.2. Επανελέγχος του φορέα

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και οι παραμορφωμένες καταστάσεις της κατασκευής για την οριακή μετακίνηση αυτής.

Εκτέλεση της ανάλυσης κατά $Y + 0.3 X$

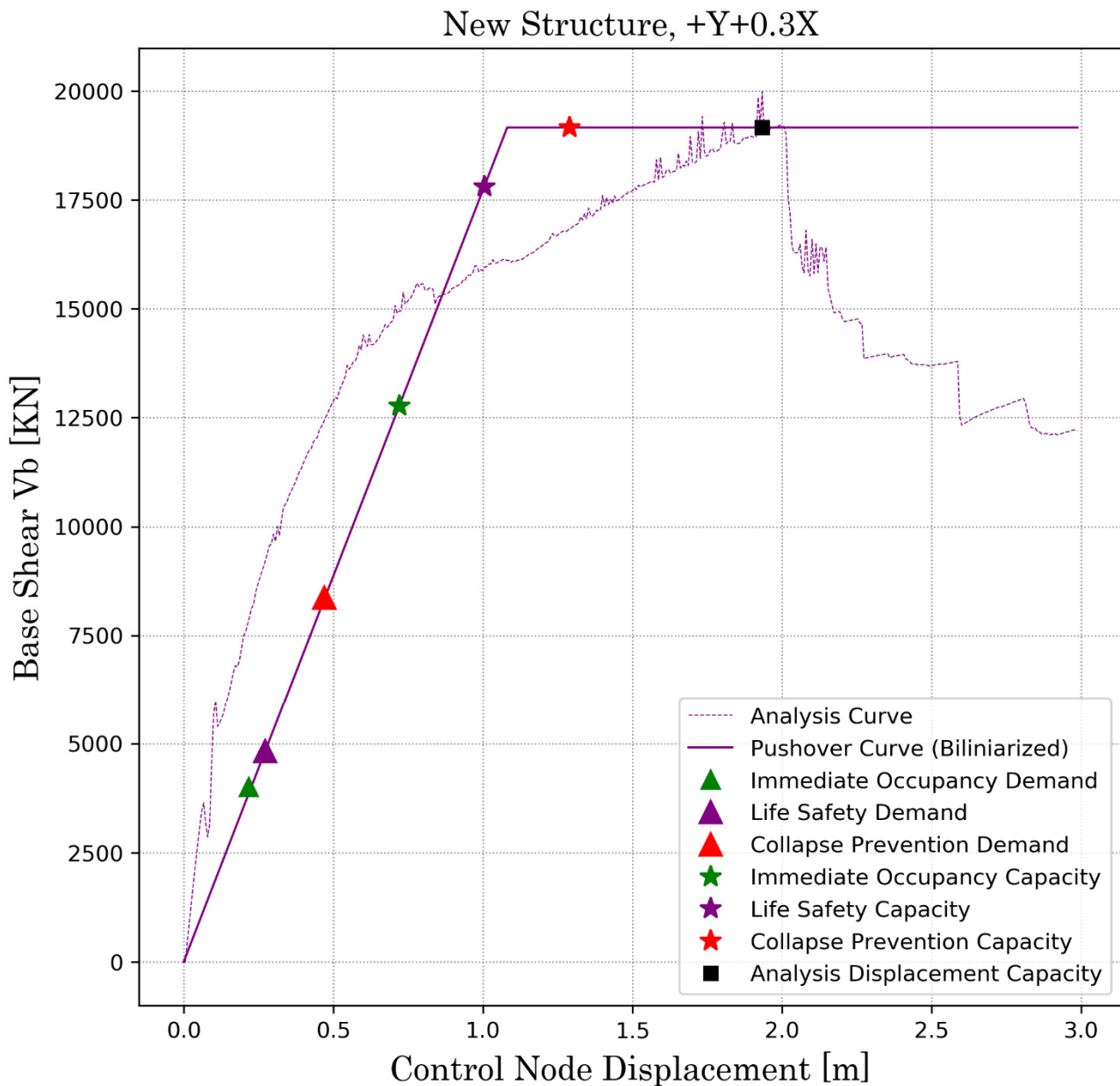
S.R.S.S. Capacity & Demand Curves

New Structure, +Y+0.3X

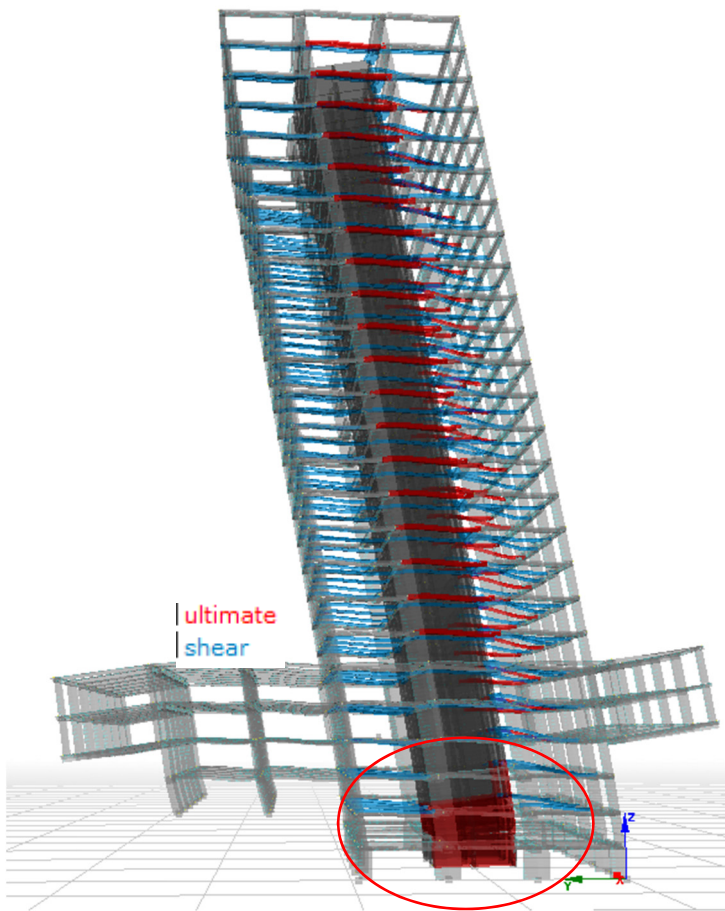


Σχήμα Ε.36. Σημεία επιτελεστικότητας. $Y + 0.3 X$

Base Shear - Displacement Capacity & Demand Curves



Σχήμα Ε.37. Καμπύλη ικανότητας και στοχευόμενη μετακίνηση. Y + 0.3 X



Εικόνα Ε.9. Συμπεριφορά του φορέα

Πίνακας Ε.11. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων. Ανάλυση Y + 0.3 X.

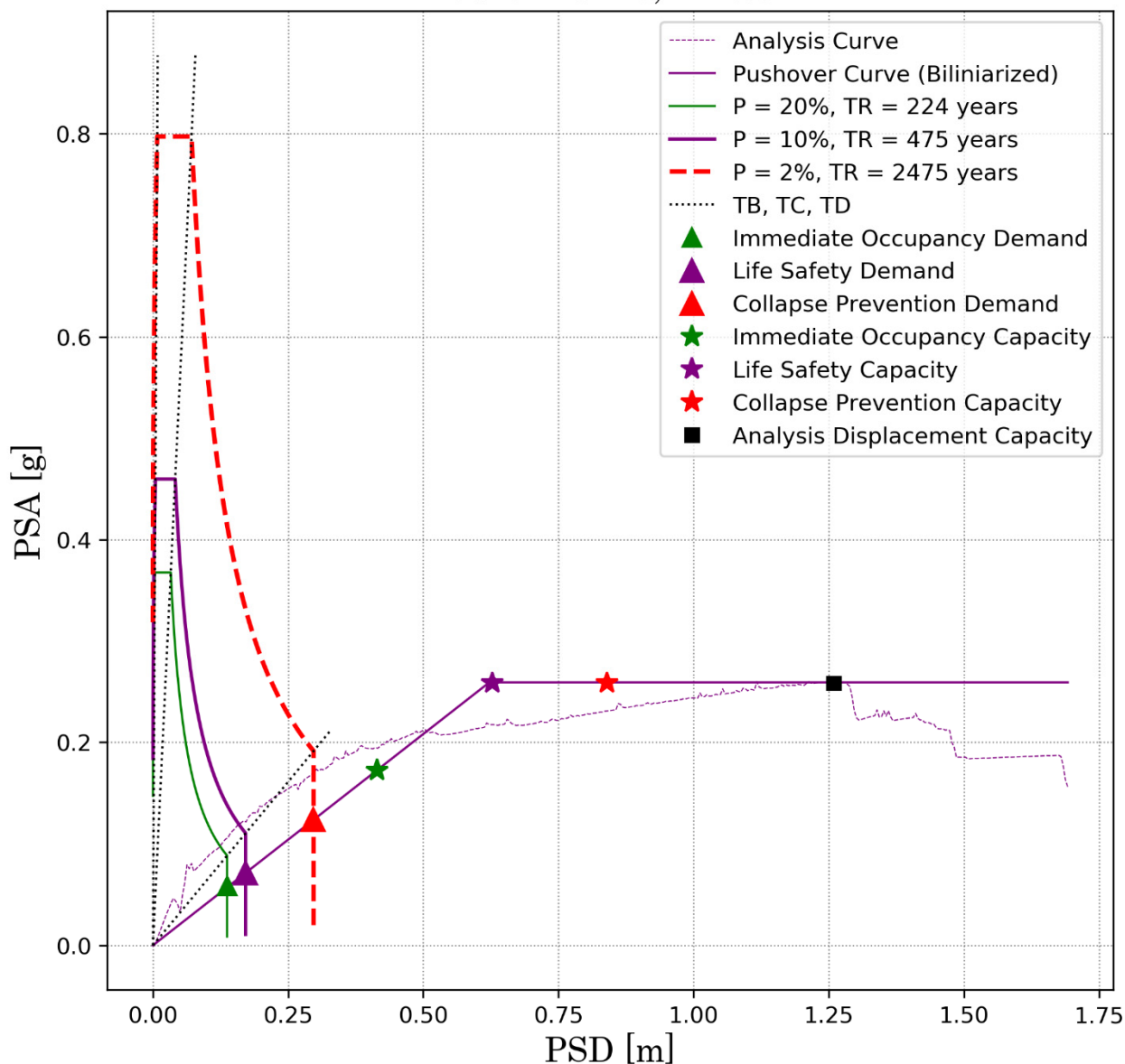
Περίοδος ισοδύναμου μονοβάθμιου T^*	10.18 s
Μετακίνηση διαρροής φορέα Sd_y	0.68 m
Μετακίνηση στην αστοχία Sd_{max}	1.22 m
Τέμνουσα βάσης διαρροής φορέα $V_{b,y}$	19 984 KN

Στάθμη Επιτελεσιμότητας	Απαίτηση [m]	Ικανότητα [m]	Λόγος Εξάντλησης
Άμεση Χρήση	0.217	0.721	0.30
Προστασία Ζωής	0.272	1.005	0.27
Οιονεί Κατάρρευση	0.471	1.289	0.37
Αξιολόγηση αποτελέσματος			ΕΠΑΡΚΕΙΑ

Εκτέλεση της ανάλυσης κατά $Y - 0.3 X$

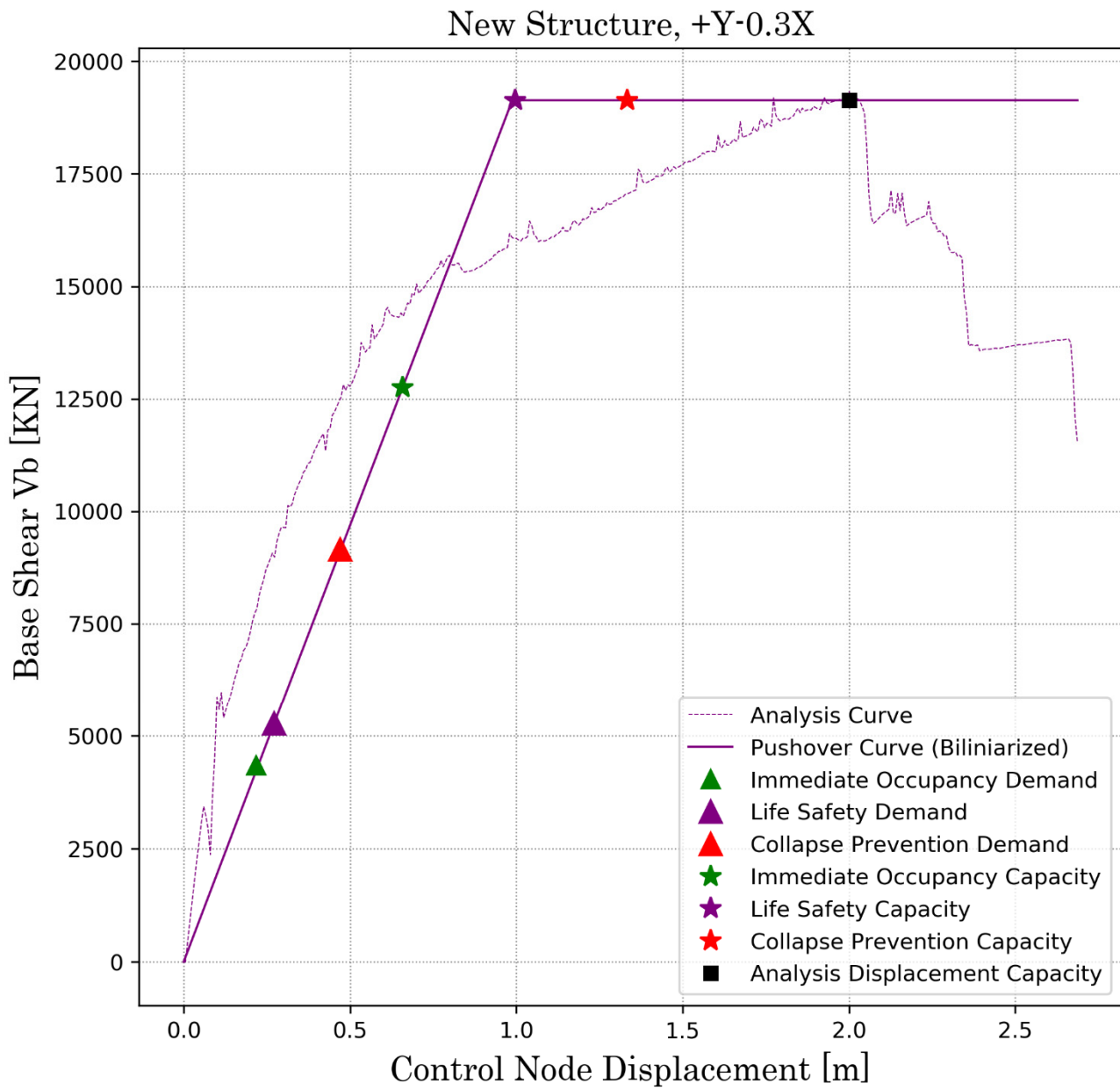
S.R.S.S. Capacity & Demand Curves

New Structure, +Y-0.3X

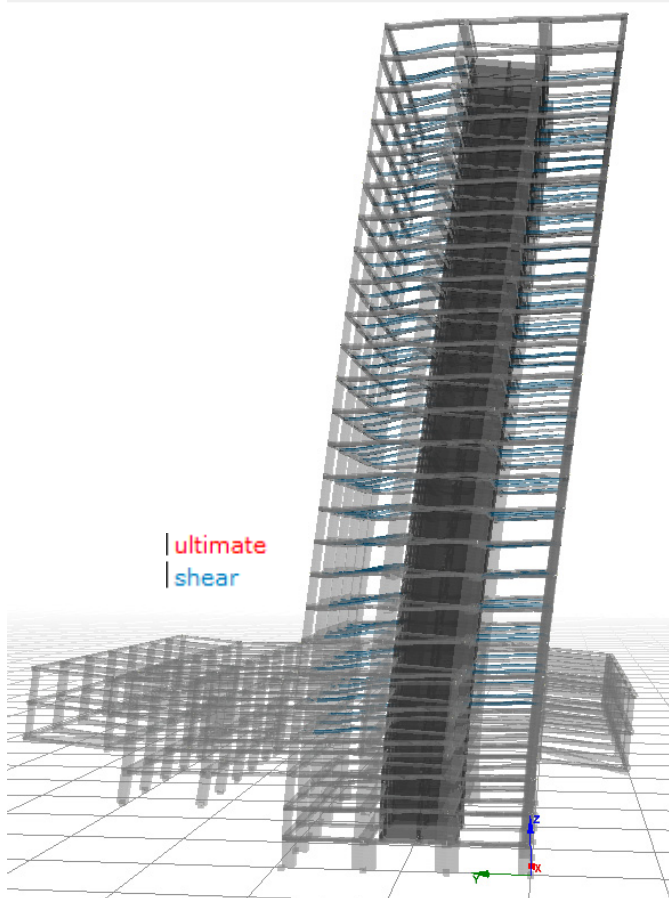


Σχήμα Ε.38. Σημεία επιτελεστικότητας. $Y - 0.3 X$

Base Shear - Displacement Capacity & Demand Curves



Σχήμα Ε.39. Καμπύλη ικανότητας και στοχευόμενη μετακίνηση. Y - 0.3 X



Εικόνα Ε.10. Συμπεριφορά του φορέα

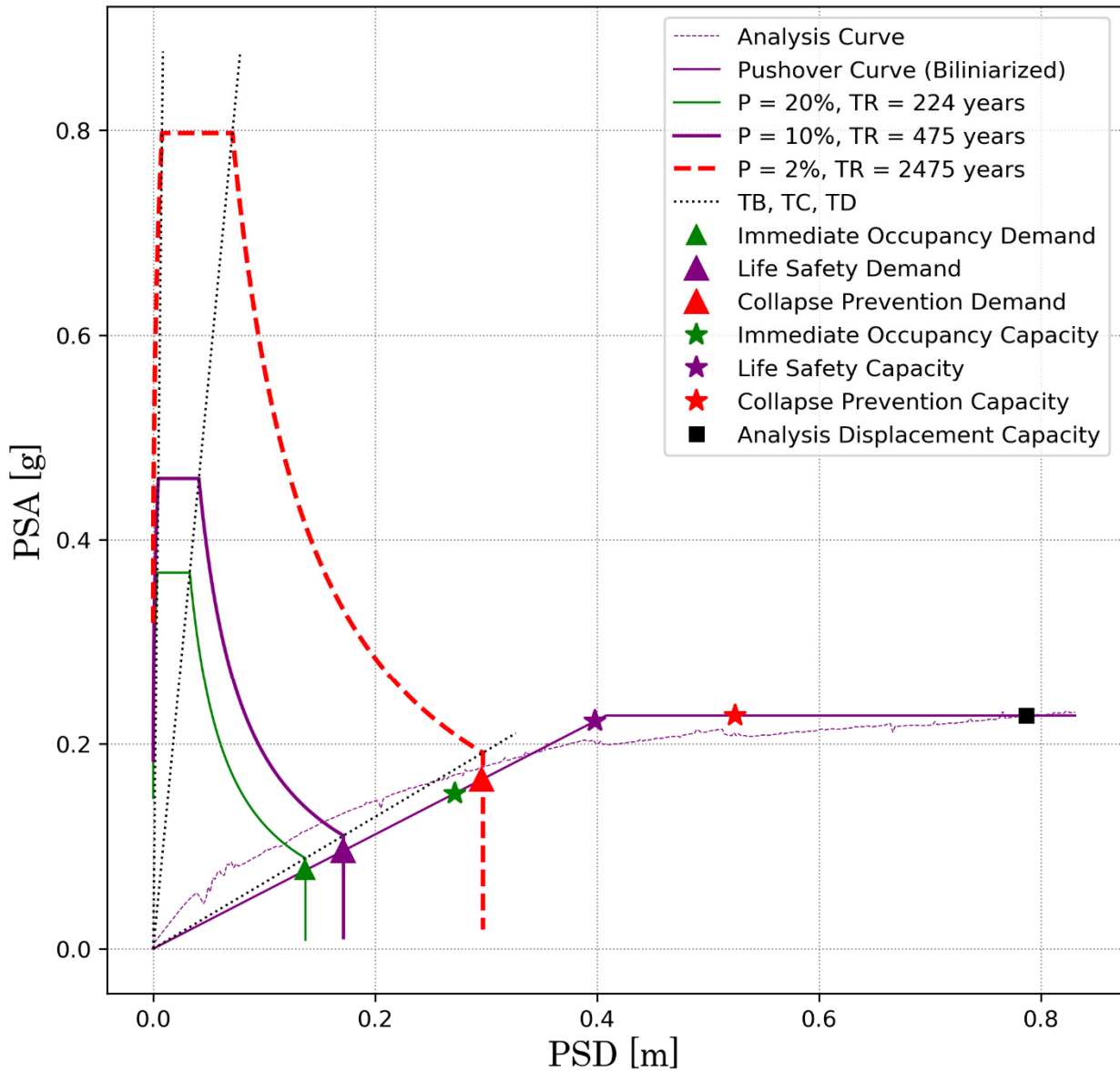
Πίνακας Ε.12. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων. Ανάλυση Y - 0.3 X.

Περίοδος ισοδύναμου μονοβάθμιου T^*		9.74 s	
Μετακίνηση διαρροής φορέα Sd_y		0.62 m	
Μετακίνηση στην αστοχία Sd_{max}		1.26 m	
Τέμνουσα βάσης διαρροής φορέα $V_{b,y}$		19 340 KN	
Στάθμη Επιτελεστικότητα	Απαίτηση [m]	Ικανότητα [m]	Λόγος Εξάντλησης
Άμεση Χρήση	0.217	0.659	0.33
Προστασία Ζωής	0.272	1.000	0.27
Οιονεί Κατάρρευση	0.471	1.333	0.35
Αξιολόγηση αποτελέσματος			ΕΠΙΡΚΕΙΑ

Εκτέλεση της ανάλυσης κατά $-Y + 0.3 X$

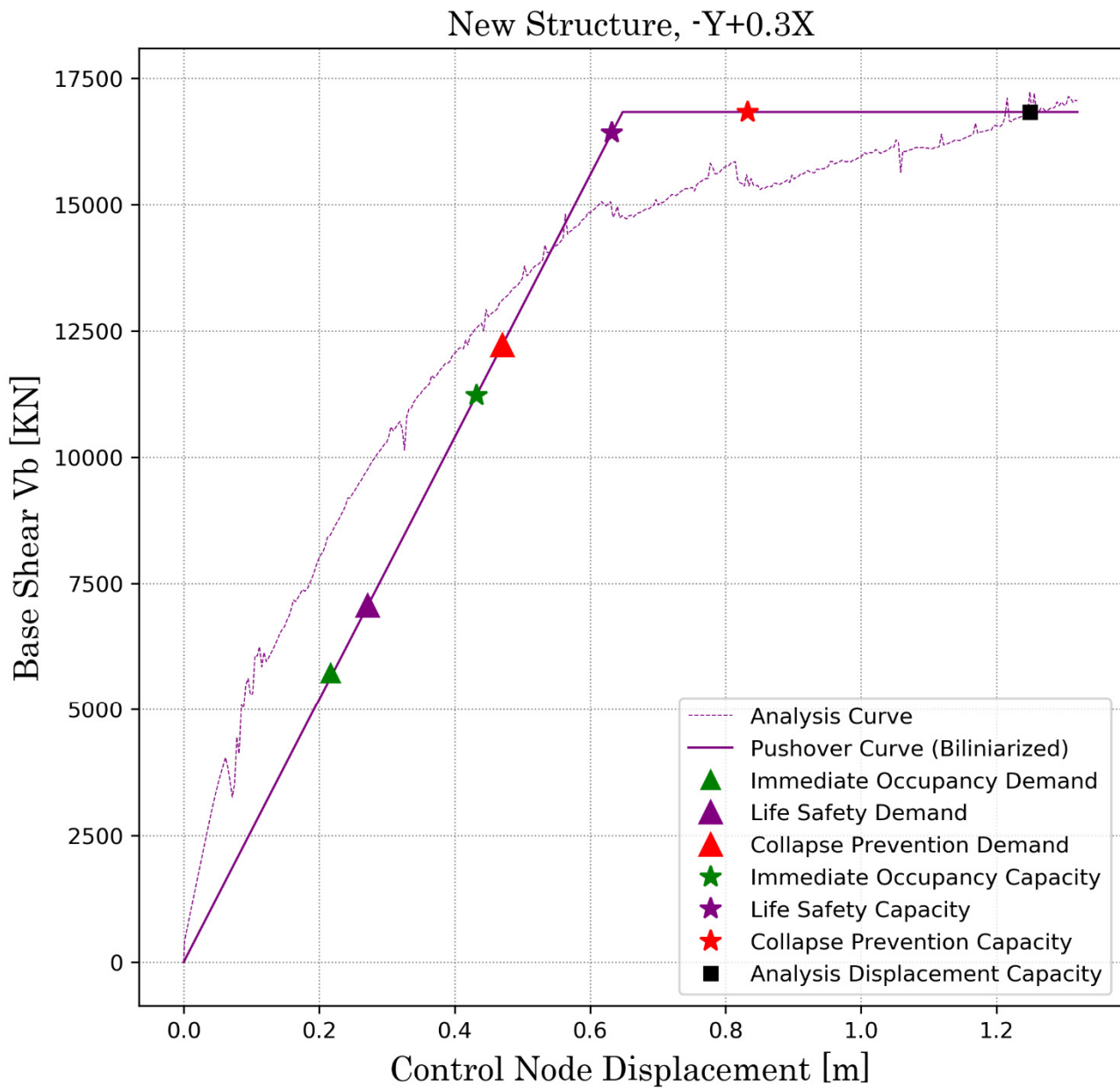
S.R.S.S. Capacity & Demand Curves

New Structure, $-Y+0.3X$

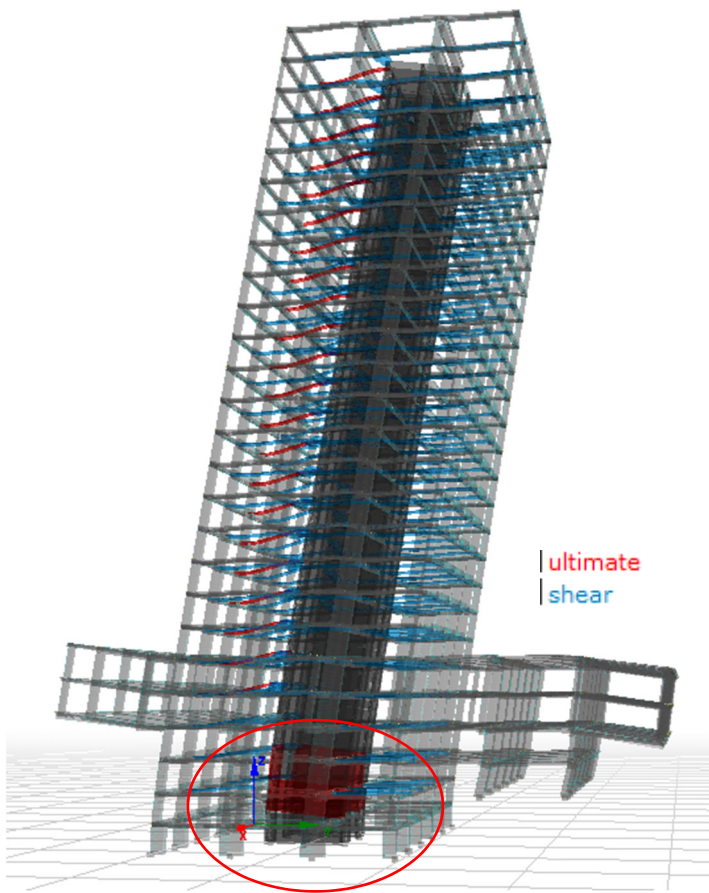


Σχήμα Ε.40. Σημεία επιτελεστικότητας. $-Y + 0.3 X$

Base Shear - Displacement Capacity & Demand Curves



Σχήμα Ε.41. Καμπύλη ικανότητας και στοχευόμενη μετακίνηση. -Y + 0.3 X



Εικόνα Ε.11. Συμπεριφορά του φορέα

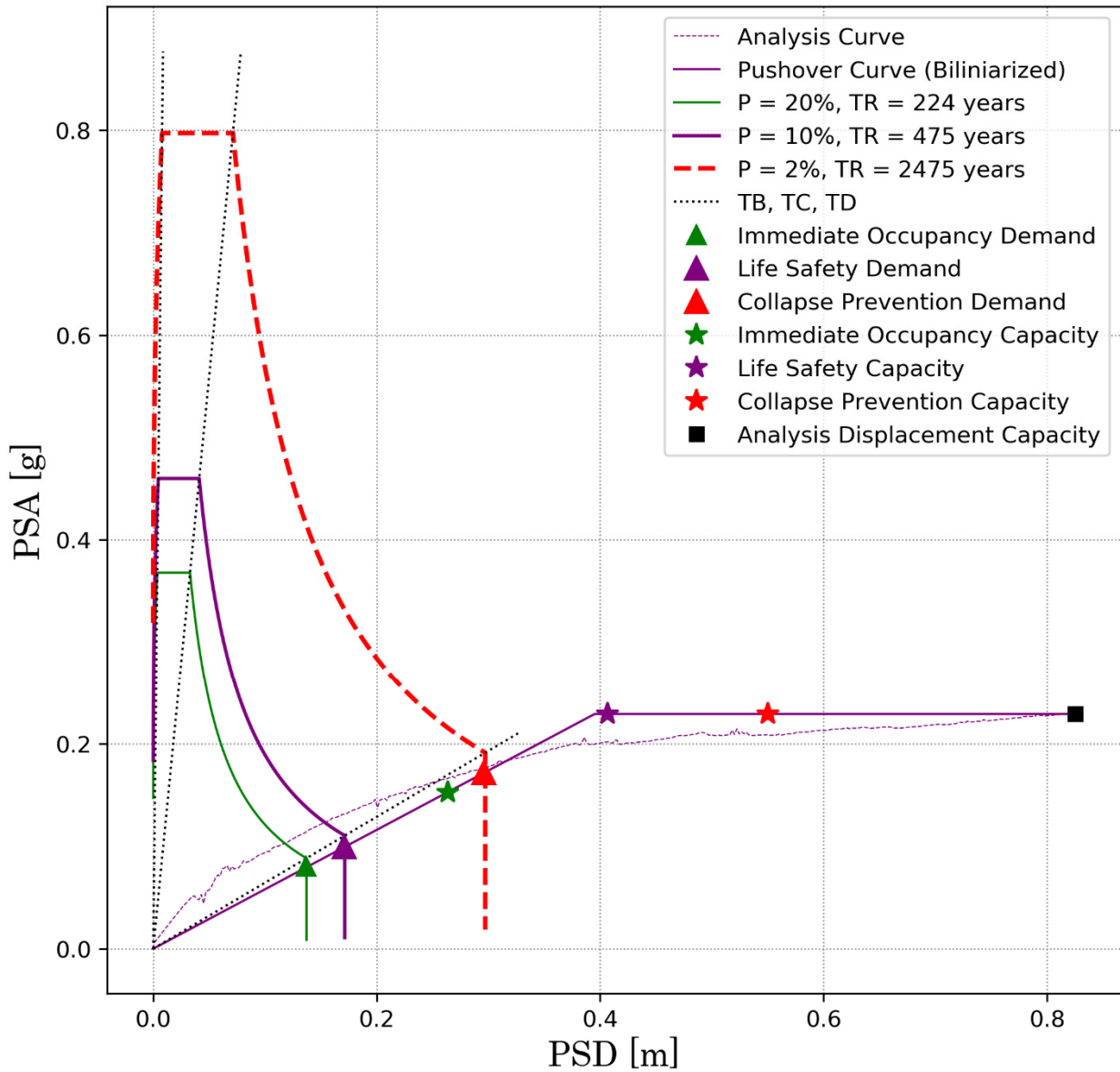
Πίνακας Ε.13. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων. Ανάλυση -Y + 0.3 X.

Περίοδος ισοδύναμου μονοβάθμιου T^*	8.41 s		
Μετακίνηση διαρροής φορέα Sd_y	0.408 m		
Μετακίνηση στην αστοχία Sd_{max}	0.787 m		
Τέμνουσα βάσης διαρροής φορέα $V_{b,y}$	17 232 KN		
Στάθμη Επιτελεστικότητας	Απαίτηση [m]	Ικανότητα [m]	Λόγος Εξάντλησης
Άμεση Χρήση	0.217	0.6432	0.50
Προστασία Ζωής	0.271	0.632	0.43
Οιονεί Κατάρρευση	0.470	0.833	0.56
Αξιολόγηση αποτελέσματος			ΕΠΙΡΚΕΙΑ

Εκτέλεση της ανάλυσης κατά $-Y - 0.3X$

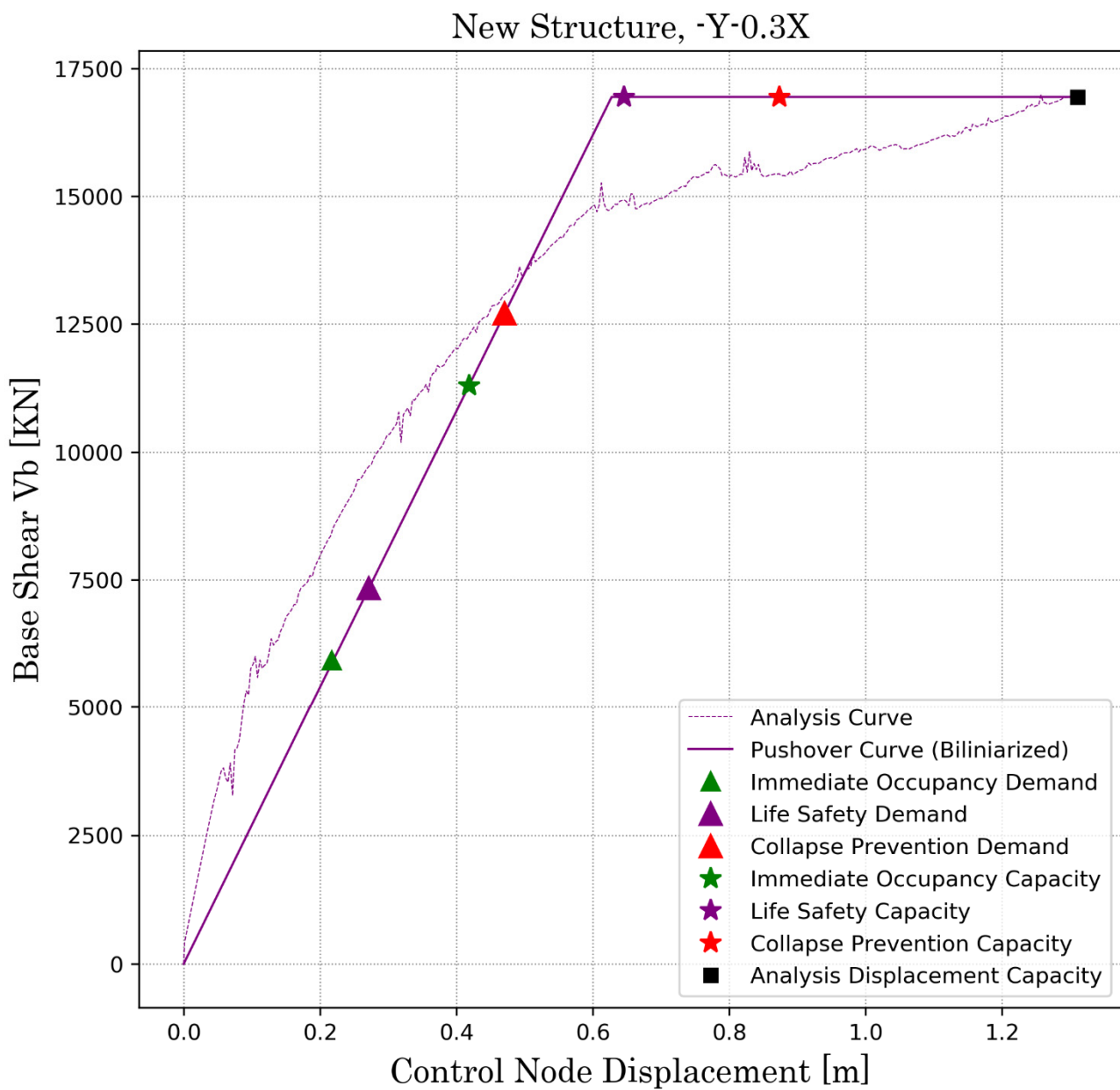
S.R.S.S. Capacity & Demand Curves

New Structure, $-Y-0.3X$

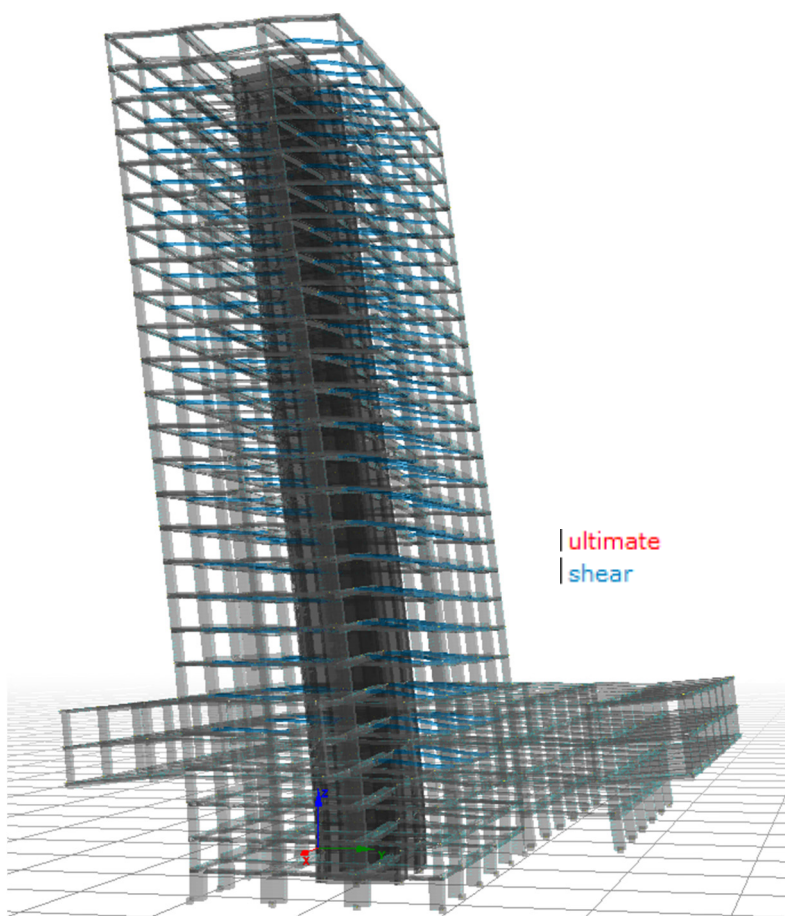


Σχήμα Ε.42. Σημεία επιτελεστικότητας. $-Y - 0.3X$

Base Shear - Displacement Capacity & Demand Curves



Σχήμα Ε.43. Καμπύλη ικανότητας και στοχευόμενη μετακίνηση. -Y - 0.3 X



Εικόνα Ε.12. Συμπεριφορά του φορέα

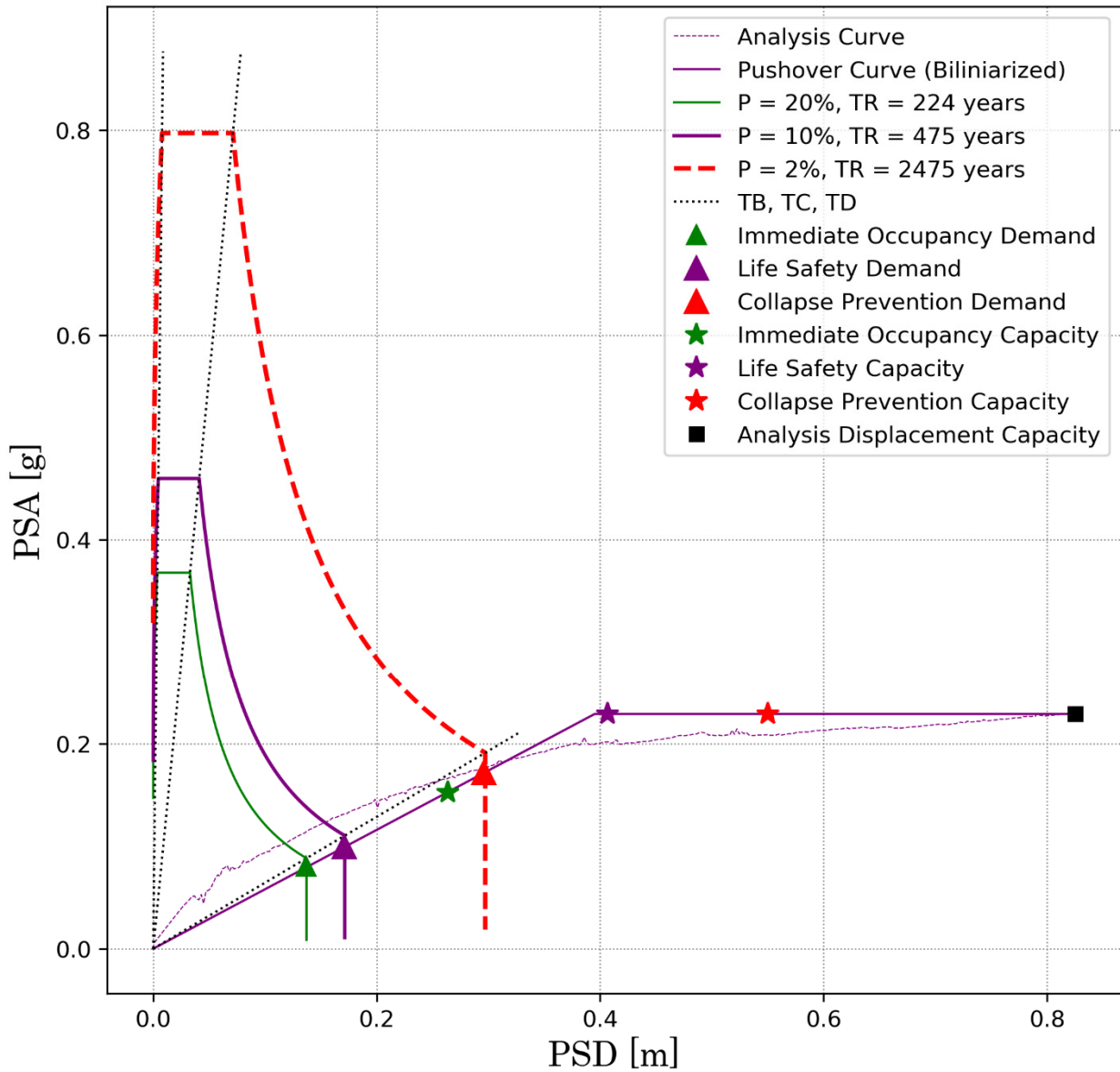
Πίνακας Ε.14. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων. Ανάλυση -Y - 0.3 X.

Περίοδος ισοδύναμου μονοβάθμιου T^*	8.25 s		
Μετακίνηση διαρροής φορέα Sd_y	0.40 m		
Μετακίνηση στην αστοχία Sd_{max}	0.825 m		
Τέμνουσα βάση διαρροής φορέα $V_{b,y}$	17 000 KN		
Στάθμη Επιτελεστικότητας	Απαιτήση [m]	Ικανότητα [m]	Λόγος Εξάντλησης
Άμεση Χρήση	0.217	0.418	0.52
Προστασία Ζωής	0.271	0.646	0.50
Οιονεί Κατάρρευση	0.470	0.874	0.54
Αξιολόγηση αποτελέσματος			ΕΠΑΡΚΕΙΑ

Εκτέλεση της ανάλυσης κατά $X + 0.3 Y$

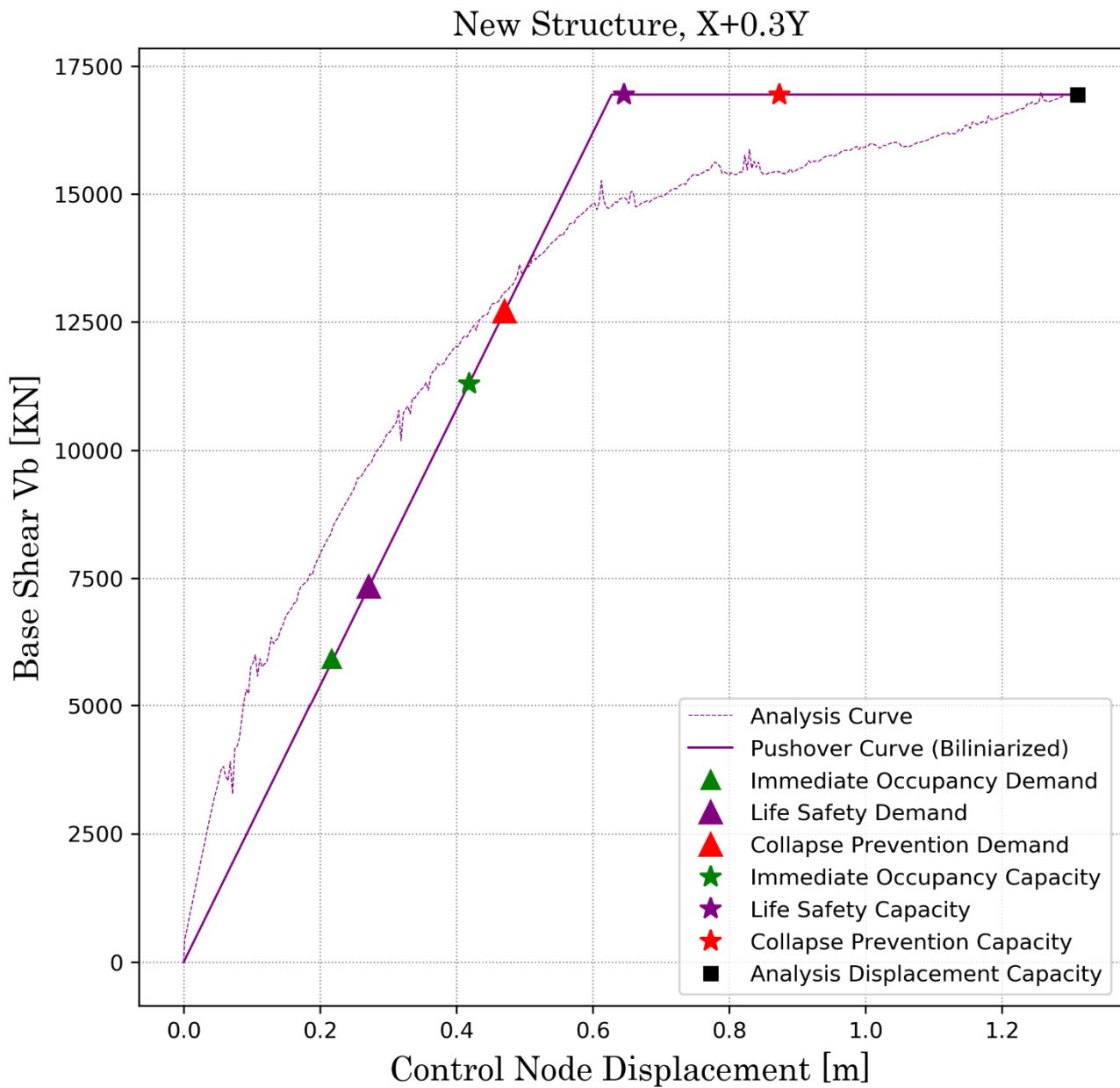
S.R.S.S. Capacity & Demand Curves

New Structure, X+0.3Y

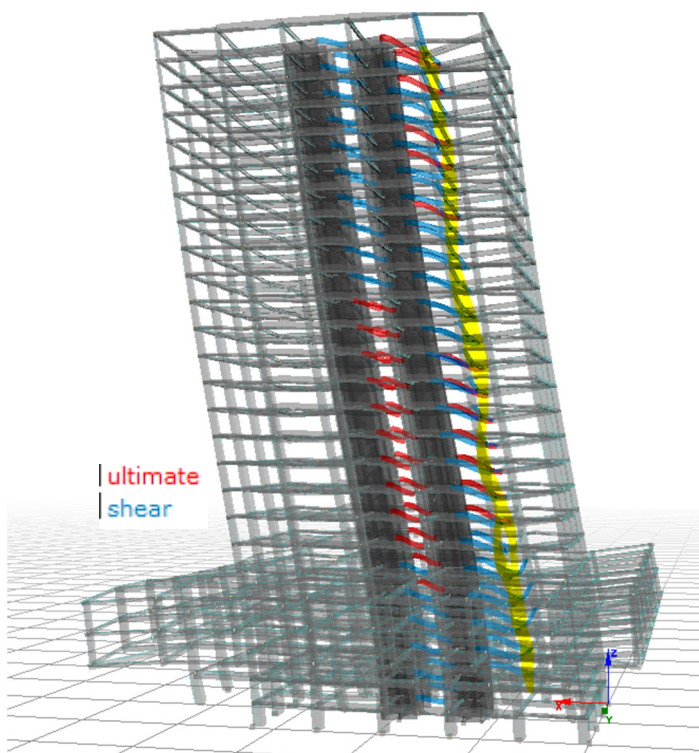


Σχήμα Ε.44. Σημεία επιτελεστικότητας. $X + 0.3 Y$

Base Shear - Displacement Capacity & Demand Curves



Σχήμα Ε.45. Καμπύλη ικανότητας και στοχευόμενη μετακίνηση. X + 0.3 Y



Εικόνα Ε.13. Συμπεριφορά του φορέα

Η ανάλυση τερματίζεται λόγω μερικής κατάρρευσης δοκών. Ωστόσο ο πυρήνας παραμένει στη μετελαστική περιοχή δίχως να αστοχεί πρόωρα σε τέμνουσα.

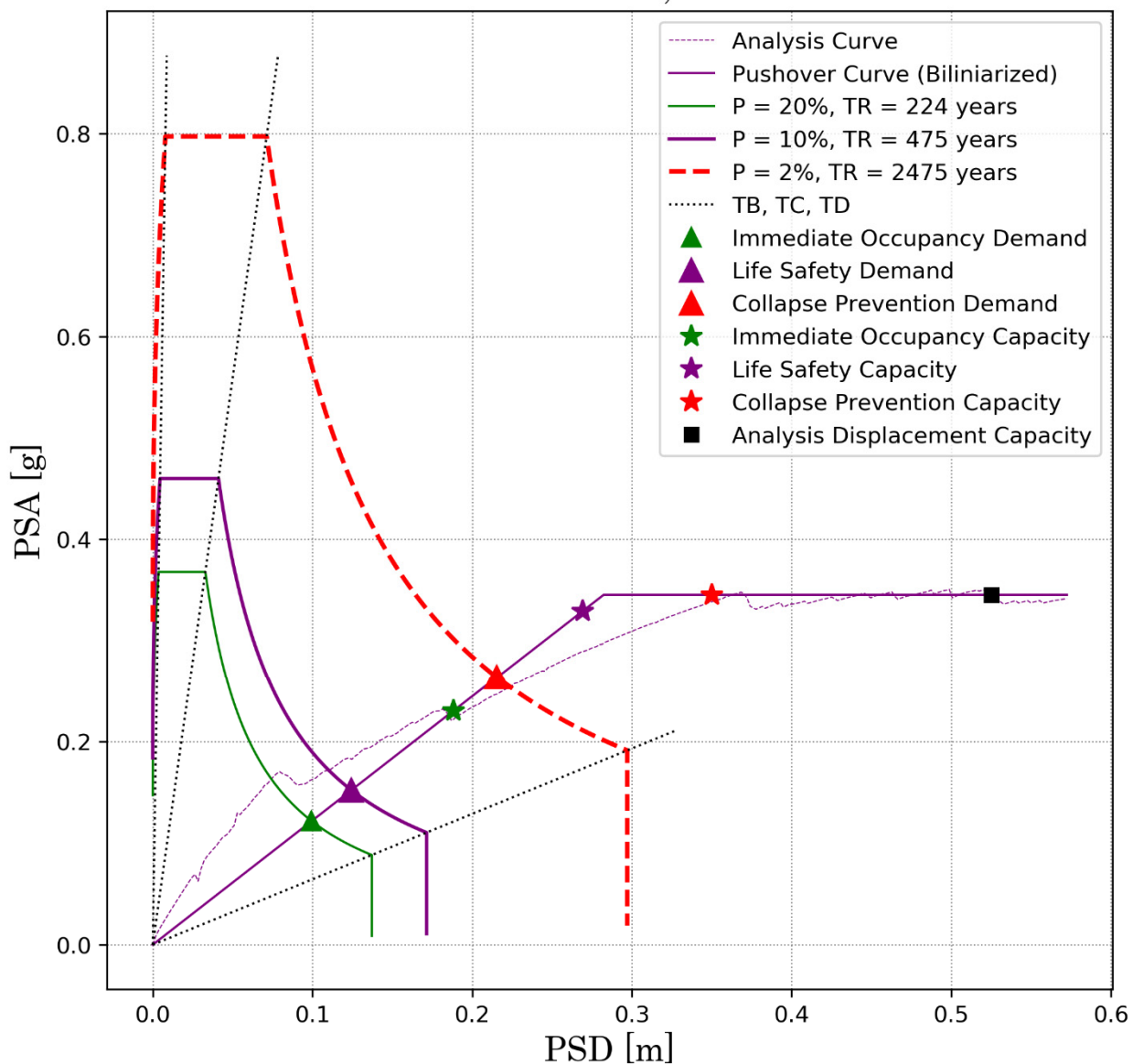
Πίνακας Ε.15. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων. Ανάλυση X + 0.3 Y

Περίοδος ισοδύναμου μονοβάθμιου T^*	5.97 s		
Μετακίνηση διαρροής φορέα Sd_y	0.320 m		
Μετακίνηση στην αστοχία Sd_{max}	0.909 m		
Τέμνουσα βάσης διαρροής φορέα $V_{b,y}$	26 487 KN		
Στάθμη Επιτελεστικότητας	Απαίτηση [m]	Ικανότητα [m]	Λόγος Εξάντλησης
Άμεση Χρήση	0.166	0.339	0.49
Προστασία Ζωής	0.208	0.651	0.32
Οιονει Κατάρρευση	0.360	0.962	0.37
Αξιολόγηση αποτελέσματος			ΕΠΙΡΚΕΙΑ

Εκτέλεση της ανάλυσης κατά X - 0.3 Y

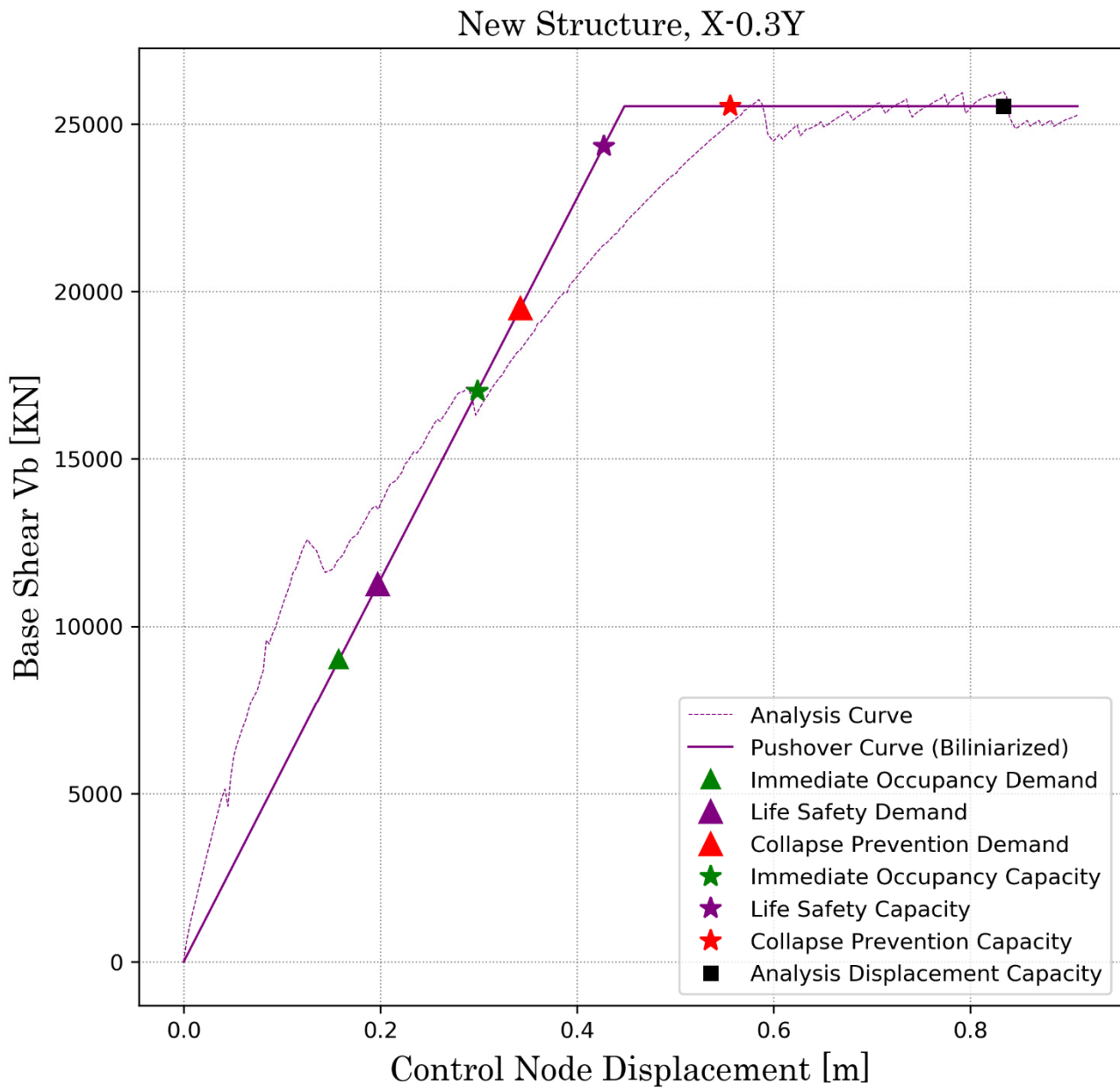
S.R.S.S. Capacity & Demand Curves

New Structure, X-0.3Y

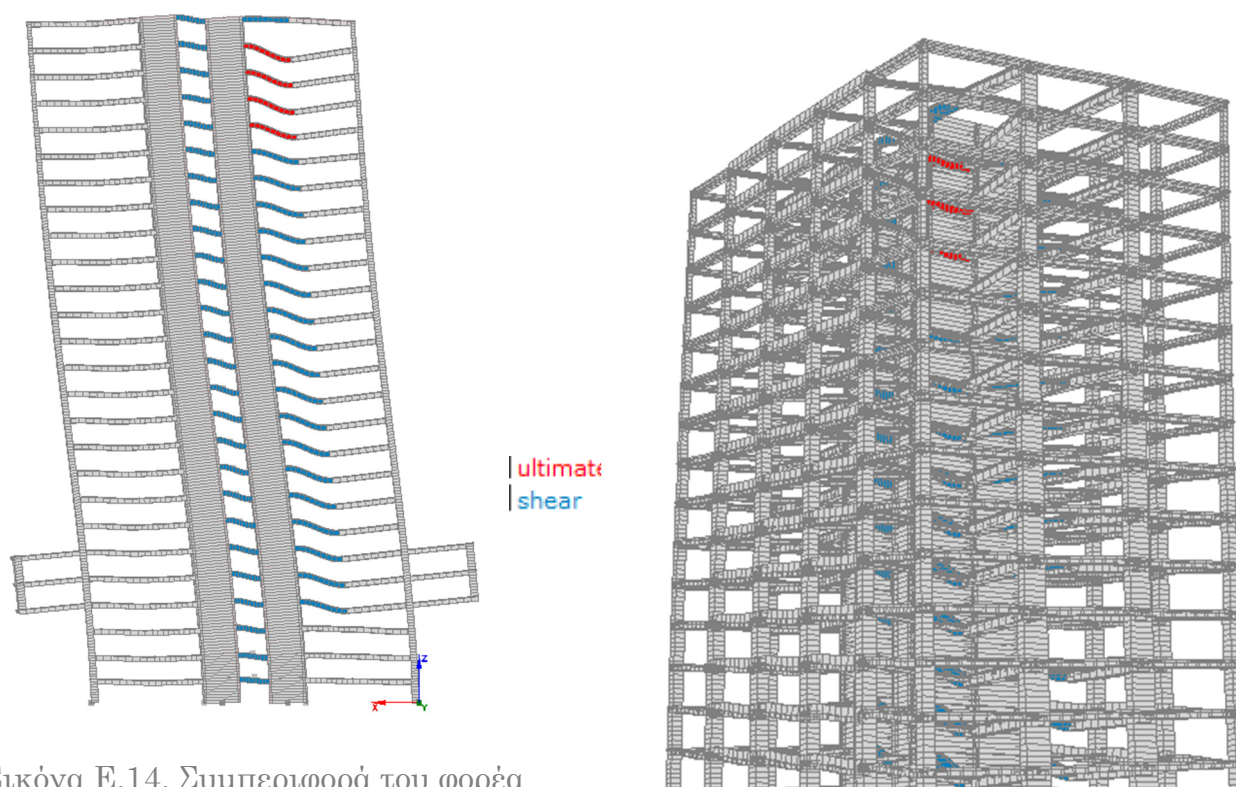


Σχήμα Ε.46. Σημεία επιτελεστικότητας. X - 0.3 Y

Base Shear - Displacement Capacity & Demand Curves



Σχήμα Ε.47. Καμπύλη ικανότητας και στοχευόμενη μετακίνηση. X - 0.3 Y



Εικόνα Ε.14. Συμπεριφορά του φορέα

Η ανάλυση, όπως και πριν, τερματίζεται λόγω μερικής κατάρρευσης δοκών. Ωστόσο ο πυρήνας παραμένει στη μεταλαστική περιοχή δίχως να αστοχεί πρόωρα σε τέμνουσα.

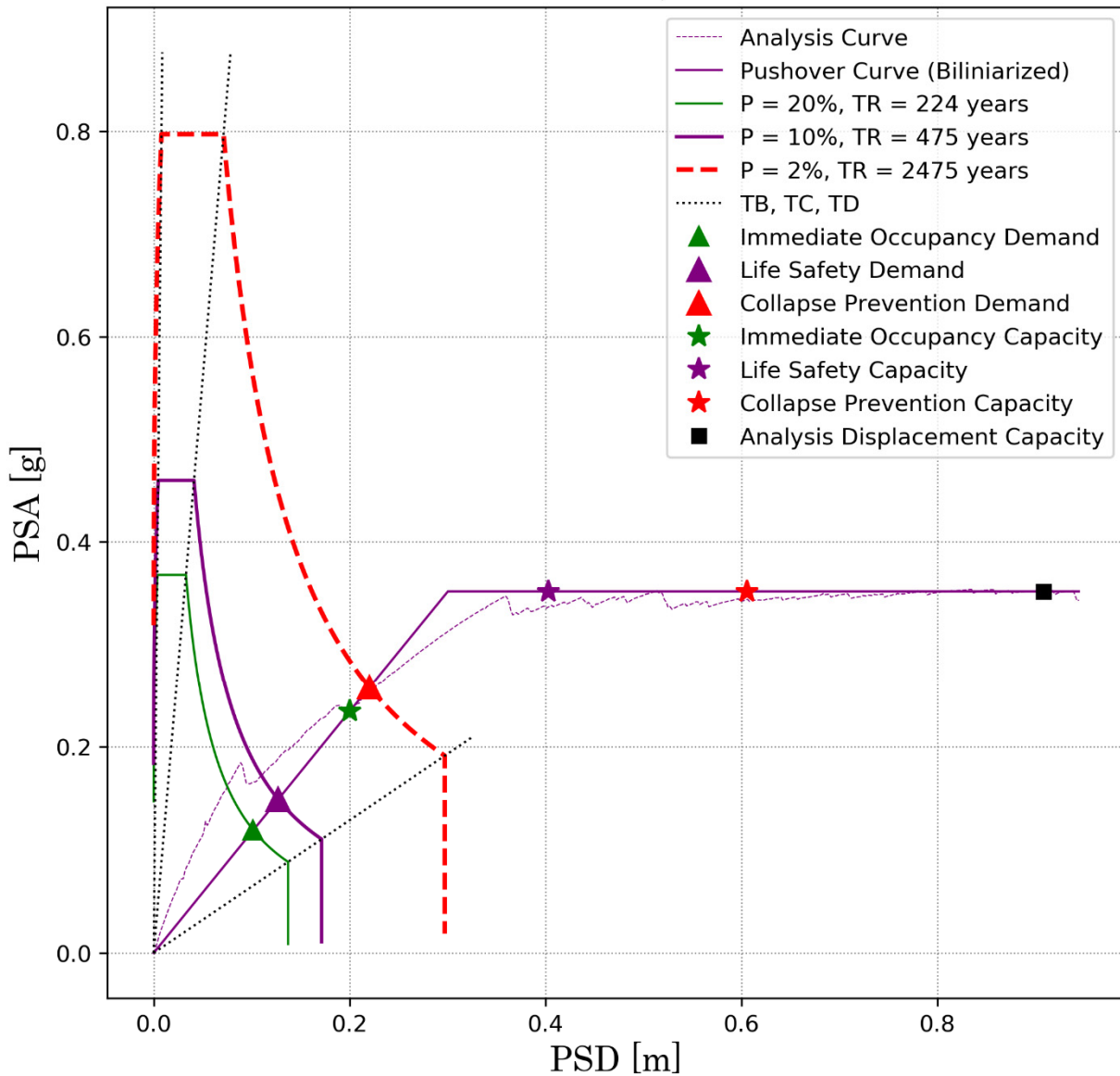
Πίνακας Ε.16. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων. Ανάλυση X - 0.3 Y

Περίοδος ισοδύναμου μονοβάθμιου T^*	5.68 s		
Μετακίνηση διαρροής φορέα Sd_y	0.282 m		
Μετακίνηση στην αστοχία Sd_{max}	0.525 m		
Τέμνουσα βάσης διαρροής φορέα $V_{b,y}$	25 973 KN		
Στάθμη Επιτελεστικότητας	Απαίτηση [m]	Ικανότητα [m]	Λόγος Εξάντλησης
Άμεση Χρήση	0.158	0.299	0.53
Προστασία Ζωής	0.198	0.427	0.46
Οιονει Κατάρρευση	0.342	0.556	0.62
Αξιολόγηση αποτελέσματος	ΕΠΑΡΚΕΙΑ		

Εκτέλεση της ανάλυσης κατά - X + 0.3 Y

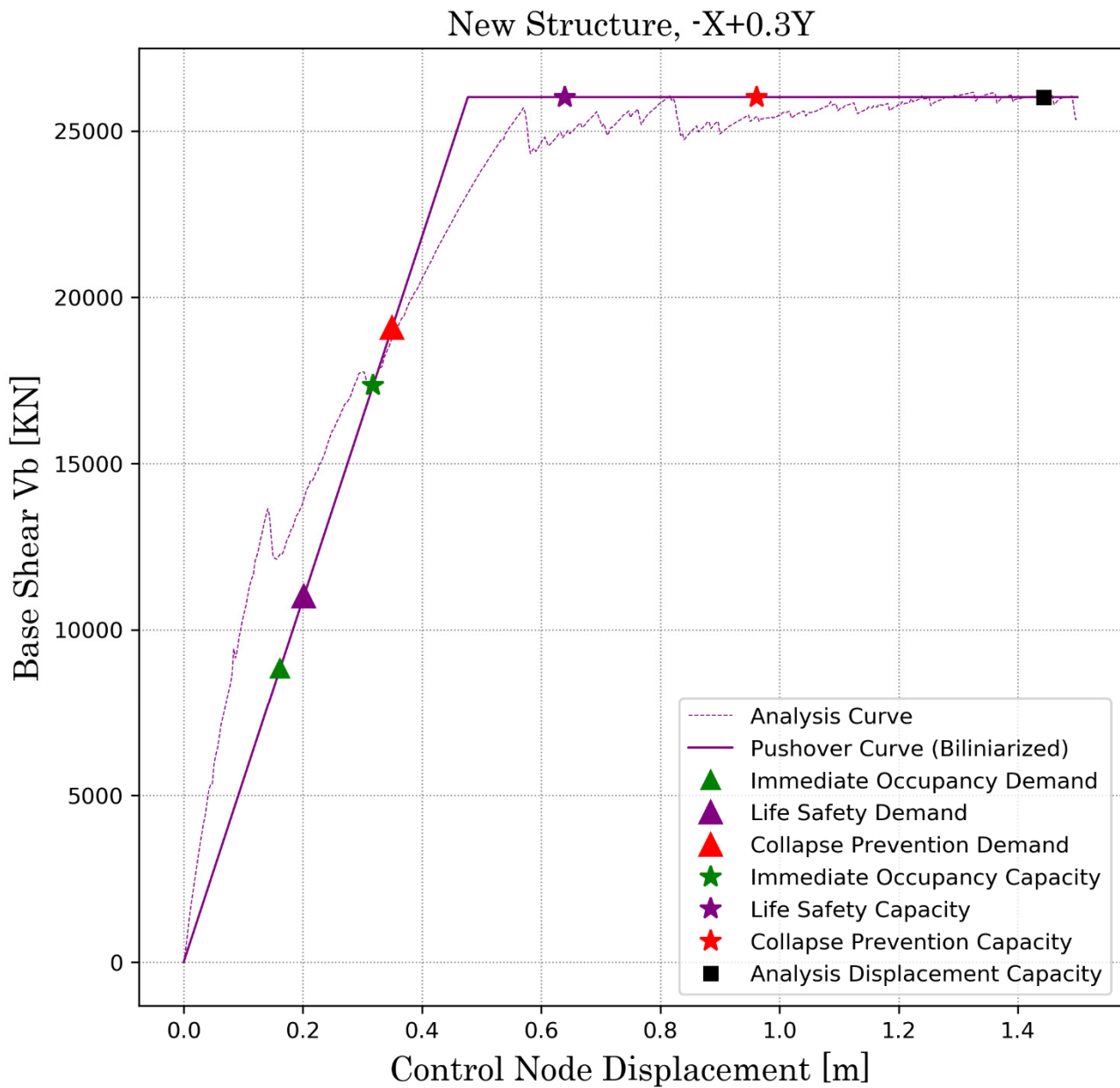
S.R.S.S. Capacity & Demand Curves

New Structure, -X+0.3Y

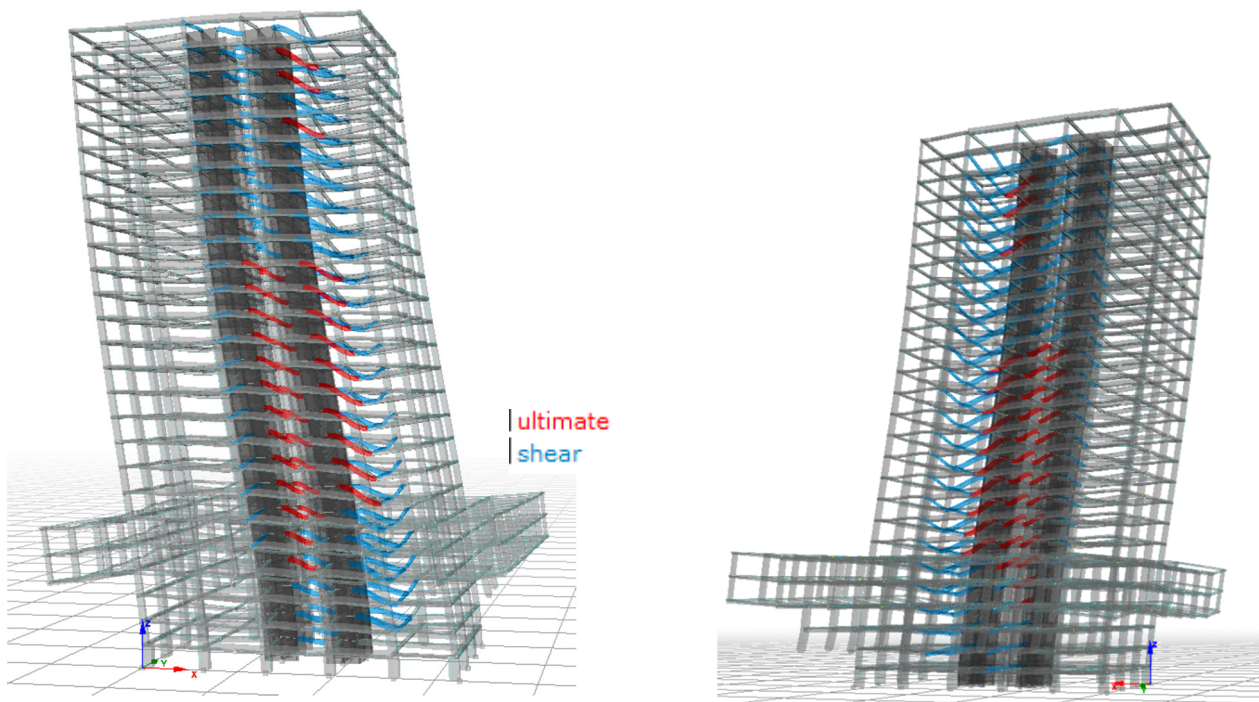


Σχήμα Ε.48. Σημεία επιτελεστικότητας. - X + 0.3 Y

Base Shear - Displacement Capacity & Demand Curves



Σχήμα Ε.49. Καμπύλη ικανότητας και στοχευόμενη μετακίνηση. - X + 0.3 Y



Εικόνα Ε.15. Συμπεριφορά του φορέα

Η ανάλυση, όπως και πριν, τερματίζεται λόγω μερικής κατάρρευσης δοκών. Ωστόσο ο πυρήνας παραμένει στη μετελαστική περιοχή δίχως να αστοχεί πρόωρα σε τέμνουσα.

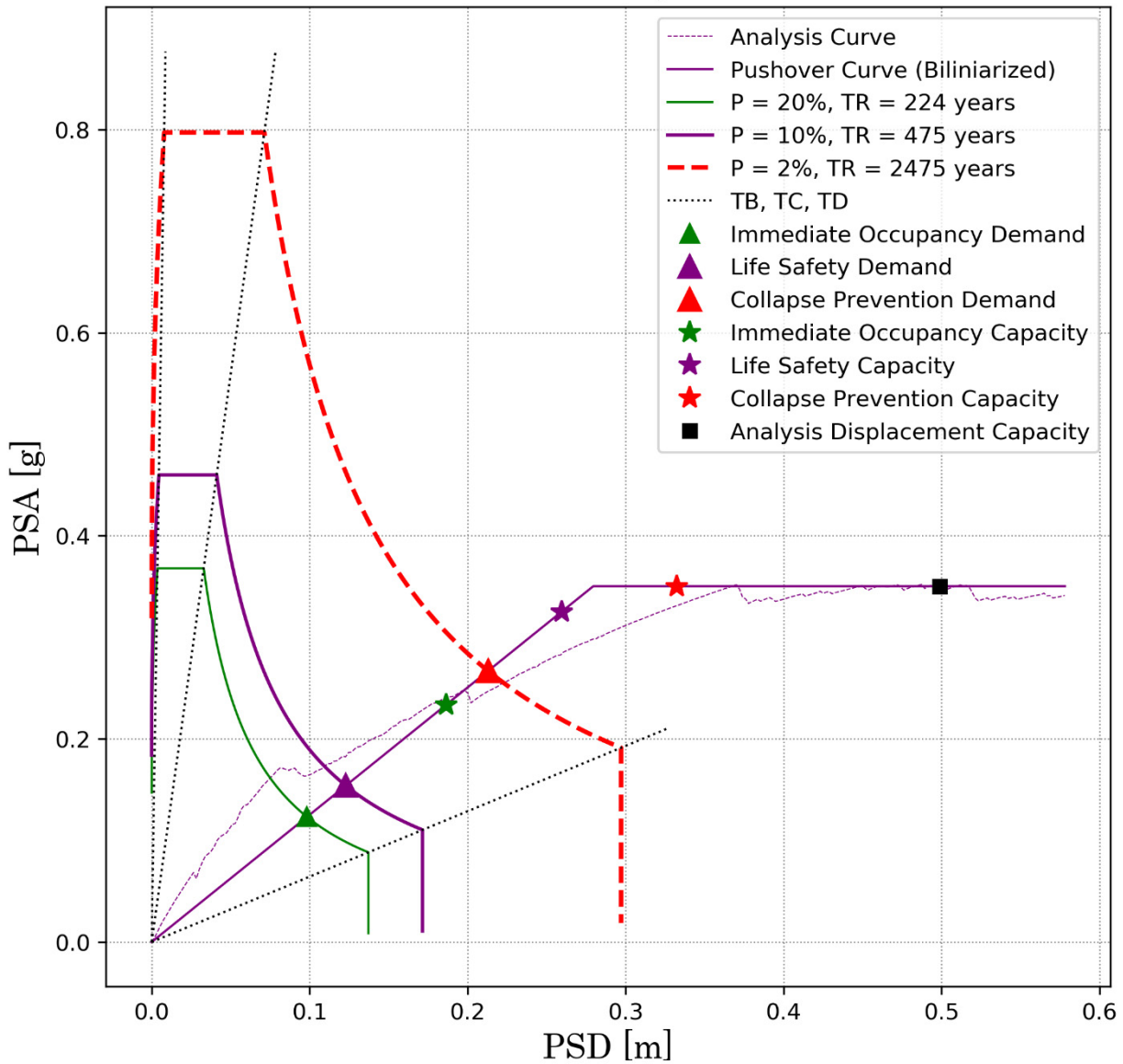
Πίνακας Ε.17. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων. Ανάλυση - X + 0.3 Y

Περίοδος ισοδύναμου μονοβάθμιου T^*	5.80 s		
Μετακίνηση διαρροής φορέα Sd_y	0.300 m		
Μετακίνηση στην αστοχία Sd_{max}	0.909 m		
Τέμνουσα βάσης διαρροής φορέα $V_{b,y}$	26 177 KN		
Στάθμη Επιτελεστικότητας	Απαίτηση [m]	Ικανότητα [m]	Λόγος Εξάντλησης
Άμεση Χρήση	0.161	0.318	0.51
Προστασία Ζωής	0.202	0.640	0.32
Οιονεί Κατάρρευση	0.350	0.962	0.36
Αξιολόγηση αποτελέσματος			ΕΠΙΡΚΕΙΑ

Εκτέλεση της ανάλυσης κατά - X - 0.3 Y

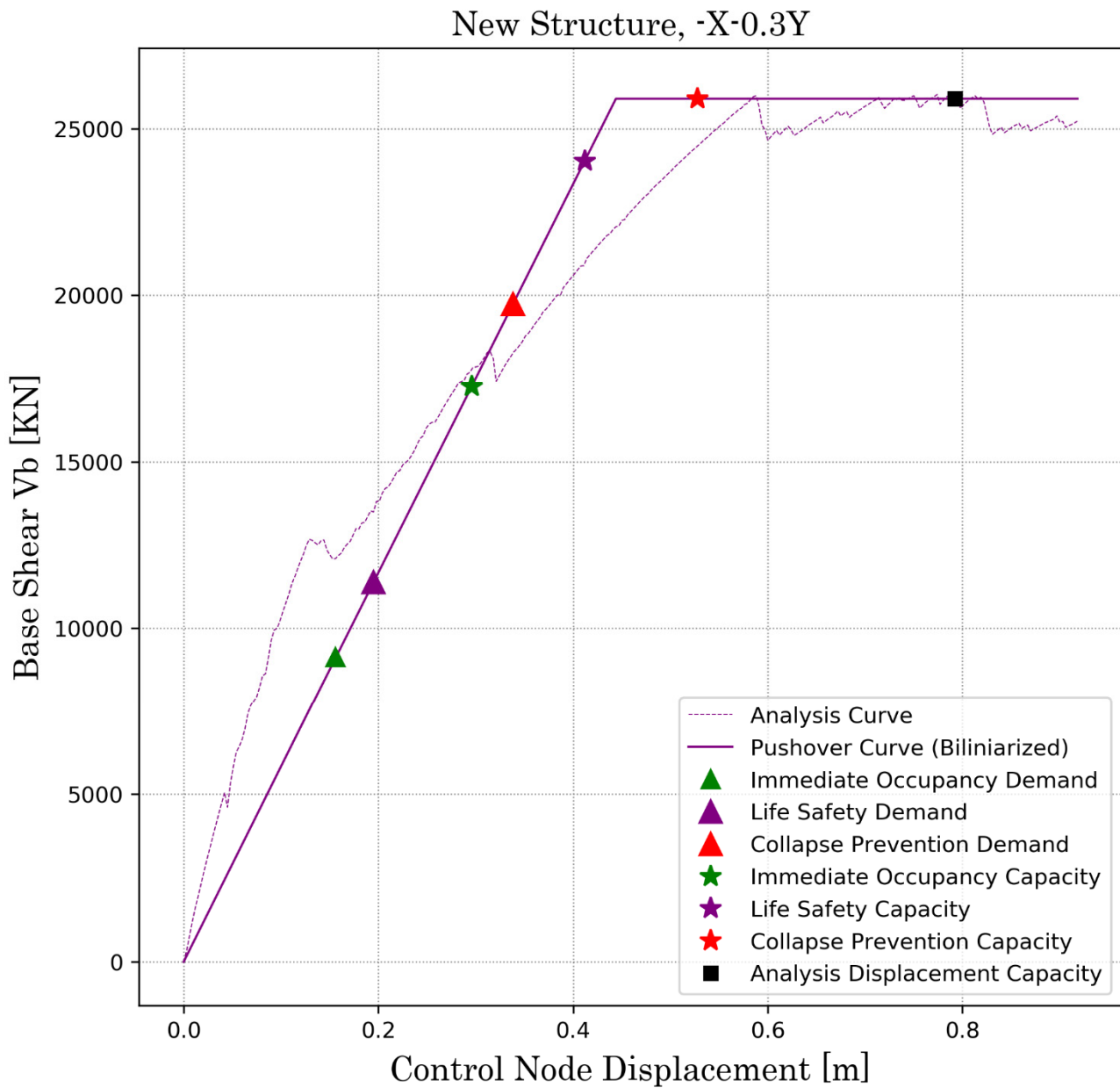
S.R.S.S. Capacity & Demand Curves

New Structure, -X-0.3Y

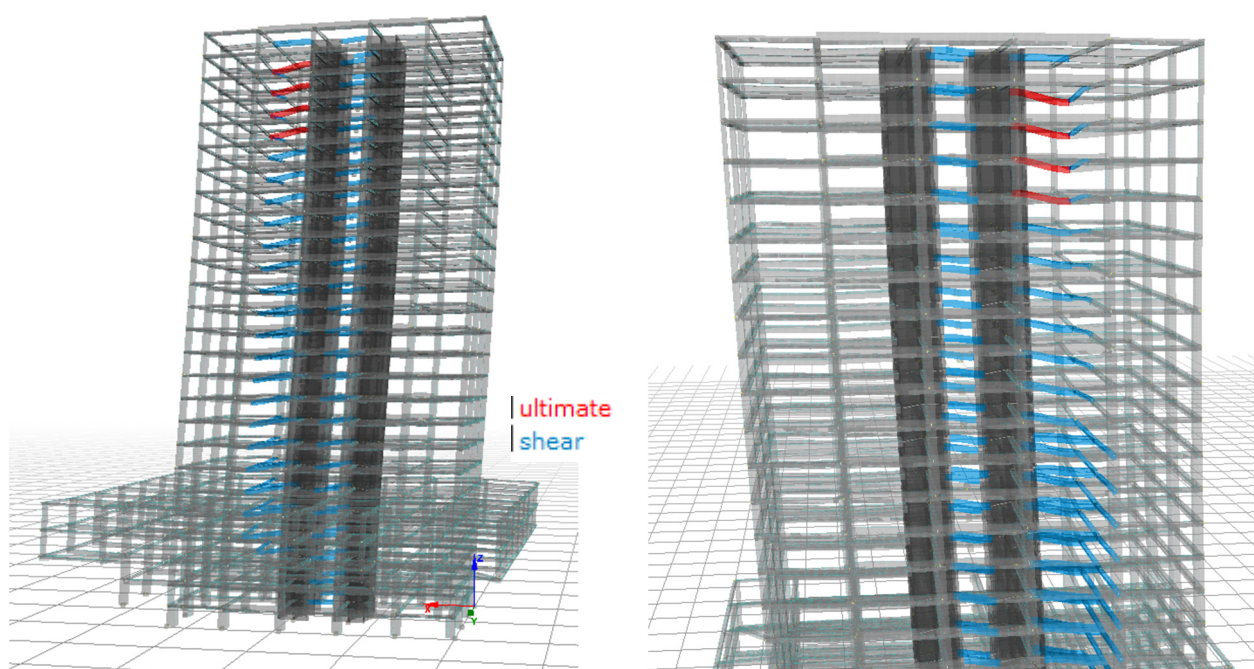


Σχήμα Ε.50. Σημεία επιτελεστικότητας. - X - 0.3 Y

Base Shear - Displacement Capacity & Demand Curves



Σχήμα Ε.51. Καμπύλη ικανότητας και στοχευόμενη μετακίνηση. - X - 0.3 Y



Εικόνα Ε.16. Συμπεριφορά του φορέα

Η ανάλυση, όπως και πριν, τερματίζεται λόγω μερικής κατάρρευσης δοκών. Ωστόσο ο πυρήνας παραμένει στη μεταλαστική περιοχή δίχως να αστοχεί πρόωρα σε τέμνουσα.

Πίνακας Ε.18. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων. Ανάλυση - X - 0.3 Y

Περίοδος ισοδύναμου μονοβάθμιου T^*	5.61 s		
Μετακίνηση διαρροής φορέα Sd_y	0.280 m		
Μετακίνηση στην αστοχία Sd_{max}	0.499 m		
Τέμνουσα βάσης διαρροής φορέα $V_{b,y}$	26 119 KN		
Στάθμη Επιτελεστικότητας	Απαιτηση [m]	Ικανότητα [m]	Λόγος Εξάντλησης
Άμεση Χρήση	0.156	0.296	0.53
Προστασία Ζωής	0.195	0.412	0.47
Οιονεί Κατάρρευση	0.338	0.528	0.64
Αξιολόγηση αποτελέσματος			ΕΠΙΡΚΕΙΑ

Ε.5.3. Σύνοψη Αποτελεσμάτων

Πριν την ενίσχυση

Πίνακας Ε.19. Σύνοψη αποτελεσμάτων ανάλυσης Pushover πριν την ενίσχυση του πυρήνα

Ανάλυση	Y+0.3X	Y-0.3X	-Y+0.3X	-Y-0.3X	X+0.3Y	X-0.3Y	-X+0.3Y	-X-0.3Y
T^* [s]	8.03	7.91	7.70	7.70	6.06	5.75	5.74	5.84
Sd_y [m]	0.320	0.311	0.300	0.300	0.313	0.233	0.241	0.263
$V_{b,y}$ [KN]	15 325	15 062	15 327	15 327	27 400	23 417	24 224	25 352
$C.R_{AX}$	0.63	0.66	0.68	0.68	0.51	0.64	0.63	0.58
$C.R_{\Pi Z}$	0.65	0.68	0.63	0.63	0.50	0.58	0.66	0.61
$C.R_{OK}$	0.96	1.00	0.86	0.86	0.71	1.02	0.98	0.92

Μετά την ενίσχυση

Πίνακας Ε.20. Σύνοψη αποτελεσμάτων ανάλυσης Pushover μετά την ενίσχυση του πυρήνα

Ανάλυση	Y+0.3X	Y-0.3X	-Y+0.3X	-Y-0.3X	X+0.3Y	X-0.3Y	-X+0.3Y	-X-0.3Y
T^* [s]	10.18	9.74	8.41	8.25	5.97	5.68	5.80	5.61
Sd_y [m]	0.68	0.62	0.408	0.40	0.320	0.282	0.300	0.280
$V_{b,y}$ [KN]	19 984	19 340	17 232	17 000	26 487	25 973	26 177	26 119
$C.R_{AX}$	0.30	0.33	0.50	0.52	0.49	0.53	0.51	0.53
$C.R_{\Pi Z}$	0.27	0.27	0.43	0.50	0.32	0.46	0.32	0.47
$C.R_{OK}$	0.37	0.35	0.56	0.54	0.37	0.62	0.36	0.64

Η συμπεριφορά της κατασκευής μετά την ενίσχυση είναι εμφανώς βελτιωμένη. Περαιτέρω βελτίωση είναι βέβαιο ότι θα υπήρχε σε περίπτωση ενίσχυσης των δοκών της ανωδομής που συνδέονται με αυτόν, και κυρίως αυτών που καταρρέουν τοπικά αναγκάζοντας σε τερματισμό της αναλύσεως μετά την ενίσχυση (βλ. συμπεριφορά κατασκευής για τις αναλύσεις αυτές).

Κεφάλαιο ΣΤ.

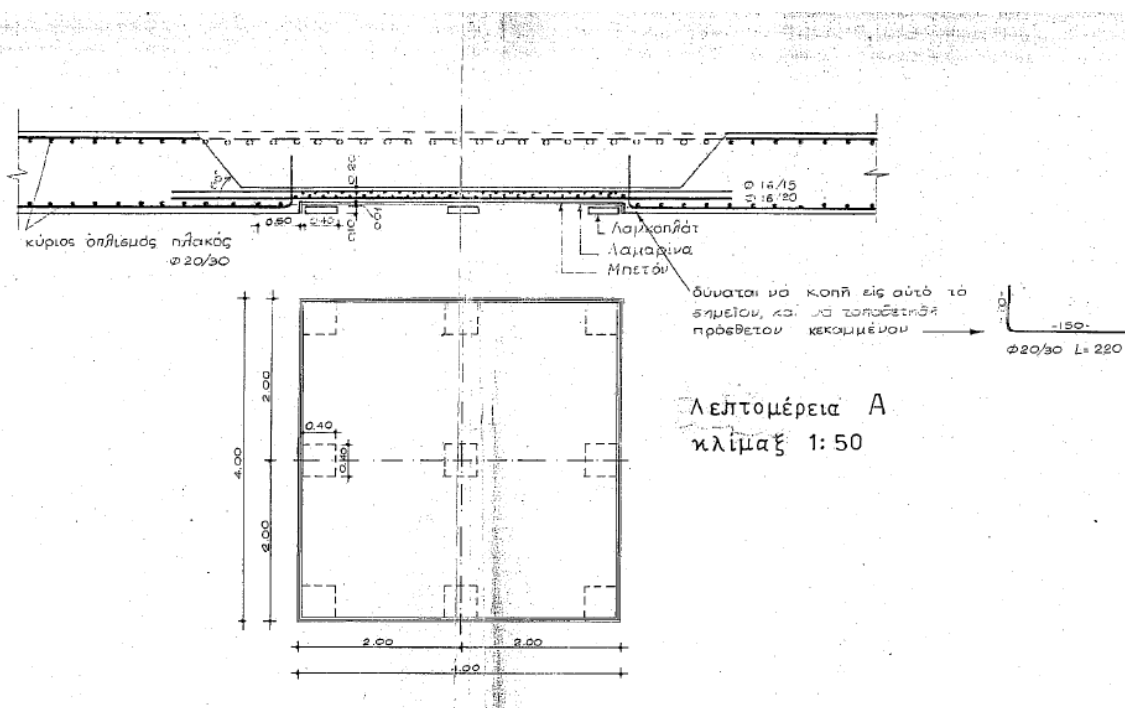
Πρόταση σεισμικής μόνωσης του φορέα με εφένδρανα τριβής τύπου Triple Friction Pendulum

ΣΤ.1. Εισαγωγή

Ως μία διαφορετική προσέγγιση της ενίσχυσης εξετάζεται η **σεισμική μόνωση** της κατασκευής. Για την επίτευξη του στόχου αυτού επιλέγεται να εξεταστεί η επίδραση της εκ των υστέρων προσθήκης στον υφιστάμενο φορέα εφενδράνων τριβής, με δημιουργία ενός οριζόντιου επιπέδου διαχωρισμού στην οροφή του ισογείου.

ΣΤ.1.1. Υποψία υπάρχουσας σεισμικής μόνωσης

Από όλα τα διαθέσιμα στατικά σχέδια της οικοδομικής άδειας, παρατηρήθηκε η ύπαρξη λεπτομερειών που αφορούν εφένδρανα μόνο στο σχέδιο με θέμα «Ευλότυπος και τομές Θεμελίων». Στα ακόλουθα σχήματα παρατίθενται σχετικά αποσπάσματα.



7. Απαιτούμενα	εφέδρανα	HERCULES HCa
Τεμ.	Τύπος	
16	450×600×84	
16	500×600×84	
72	400×500×84	
60	250×200×52	

Η λεπτομέρεια Α αποτελεί την περιγραφή κάποιας μορφής εφεδράνων τριβής. Ωστόσο, το πάχος της πλάκας, που απεικονίζεται στην λεπτομέρεια Α, μετρούμενο βάσει της κλίμακας είναι 1.00 m επομένως πρόκειται για την κάτω πλάκα¹³, δηλαδή το δάπεδο του 3^{ου} υπογείου. Επιπλέον τα εφέδρανα εμφανίζονται εγκιβωτισμένα εντός εσοχής της πλάκας. Συμπεραίνεται ότι η πλάκα αυτή έρχεται σε άμεση επαφή με το υποκείμενο beton καθαριότητας. Αυτό, σε συνδυασμό με την ύπαρξη της επιπλέον κατασκευής για την υποστήριξη της διεύρυνσης των χαμηλότερων επιπέδων, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα εφέδρανα αυτά, αν τελικά υλοποιήθηκαν όπως απεικονίζεται στη λεπτομέρεια Α, είναι αδύνατον να προσφέρουν ένα σαφές επίπεδο διαχωρισμού και αποσύζευξης της κίνησης της κατασκευής από του εδάφους.

ΣΤ.2. Θεωρητικό υπόβαθρο

ΣΤ.2.1. Ανάλυση κατασκευών με σεισμικές καταγραφές

Η ανάλυση κατασκευών με σεισμικές καταγραφές αναπτύχθηκε στη δεκαετία του 1970 για ερευνητικούς σκοπούς. Σήμερα χάρτη στην ευρεία διαθεσιμότητα προγραμμάτων ηλεκτρονικού υπολογιστή με δυνατότητα εκτέλεσης της μεθόδου, είναι αρκετά πιο συνηθισμένη. Η πρακτική εφαρμογή της είναι μεγάλη στην περίπτωση φορέων με σεισμική μόνωση, καθώς η ανελαστική συμπεριφορά του φορέα καθορίζεται από λίγα στοιχεία (τους σεισμικούς μονωτήρες), που έχουν υστερητική συμπεριφορά. Η σεισμική δράση περιγράφεται από χρονοϊστορίες της κίνησης του εδάφους που συμμορφώνονται κατά μέσο όρο με το ελαστικό φάσμα απόκρισης για απόσβεση 5%, το οποίο ορίζει τη σεισμική δράση. Συνεπώς για την εκτέλεση της ανάλυσης θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα

¹³ Στο αναφερόμενο σχέδιο η οροφή του 3^{ου} υπογείου δηλώνεται ως «άνω πλαξ» και έχει πάχος 0.50 m, ενώ το δάπεδο του 3^{ου} υπογείου χαρακτηρίζεται ως «κάτω πλαξ» με πάχος 1.00 m, μετρούμενο δίχως το υποκείμενο beton καθαριότητας.

εισόδου σεισμικές καταγραφές προσαρμοσμένες στο φάσμα σχεδιασμού. Πρέπει να χρησιμοποιηθούν πάνω από τρεις καταγραφές, ενώ στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν πάνω από 7 δύναται να λαμβάνεται ο μέσος όρος των μεγεθών απόκρισης για τον σχεδιασμό (διαφορετικά χρησιμοποιείται η μέγιστη τιμή από όλες τις αναλύσεις). Η ανάλυση μπορεί να εκτελεστεί με ιδιομορφική επαλληλία είτε με άμεση ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης.

ΣΤ.2.2. Σεισμική μόνωση

Εισαγωγικά στοιχεία

Η αντισεισμική προστασία των συμβατικών κατασκευών βασίζεται στην απορρόφηση ενέργειας που συμβαίνει στον φορέα, ο οποίος με κατάλληλο σχεδιασμό φροντίζεται να έχει επαρκή πλαστιμότητα ώστε να μπορεί να επιβιώσει από έναν «καταστροφικό» σεισμό δίχως να καταρρεύσει. Ωστόσο, τις τελευταίες δεκαετίες, νέες στρατηγικές έχουν αναπτυχθεί και έχουν βρει ευρεία εφαρμογή σε κατασκευές δημοσίου ενδιαφέροντος καθώς και λοιπά έργα υποδομής (π.χ. γέφυρες). Αντί η απορρόφηση της σεισμικής ενέργειας να καταναλώνεται σε βλάβες σε ολόκληρο το δόμημα, συγκεντρώνεται σε συγκεκριμένες θέσεις, με χρήση ειδικών συσκευών, όπως ελαστομερή εφέδρανα ή εφέδρανα ολίσθησης, ιξωδών ή υστερητικών συσκευών απορρόφησης ενέργειας και επαναφοράς, μεταξύ άλλων. Με τον τρόπο αυτό οι αδρανειακές δυνάμεις που δρουν στην ανωδομή μειώνονται δραστικά, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται υψηλότερα επίπεδα αντισεισμικής προστασίας. Υπάρχουν δυο κυρίαρχες στρατηγικές, η απορρόφηση ενέργειας (απόσβεση) και η σεισμική μόνωση. Στην πρώτη περίπτωση εισάγονται στο φορέα στοιχεία τα οποία αυξάνουν σημαντικά την απόσβεσή του, μέσω ταχύτατης απορρόφησης ενέργειας. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση της δυναμικής παραμόρφωσης του φορέα. Στη δεύτερη περίπτωση προκαλείται απόζευξη της κίνησης εδάφους – κατασκευής, μέσω εισαγωγής μίας έντονης ασυνέχειας στην κατανομή της πλευρικής δυσκαμψίας. Το επίπεδο διαχωρισμού διαιρεί την κατασκευή στο τμήμα της υποδομής (substructure) και της ανωδομής (superstructure). Ανάλογα με τον τύπο των μονωτήρων που επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν, η συμπεριφορά τους μπορεί να κυμαίνεται από σχεδόν γραμμική (π.χ. σχεδόν ιξωδο-ελαστική) έως έντονα μη γραμμική

(π.χ. ελαστο-πλαστική), επιτρέποντας την εφαρμογή διαφορετικών στρατηγικών μόνωσης. (Fardis, et al., 2011)

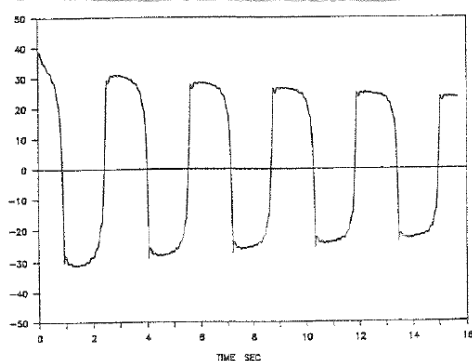
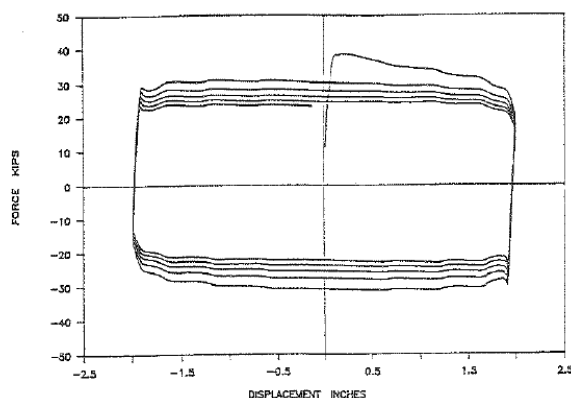
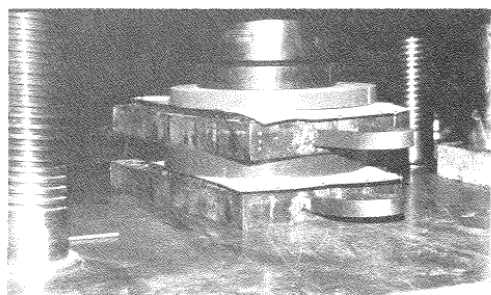
Στρατηγικές σεισμικής μόνωσης

Σε ό,τι αφορά την σεισμική μόνωση, μπορεί να γίνει διάκριση δύο στρατηγικών. Στην πρώτη στρατηγική κυρίαρχος στόχος του σχεδιασμού είναι η επιμήκυνση της ιδιοπεριόδου. Για την επίτευξη αυτού του στόχου χρησιμοποιούνται μονωτήρες που συμπεριφέρονται σχεδόν ελαστικά. Στη δεύτερη στρατηγική κυρίαρχος στόχος του σχεδιασμού είναι ο περιορισμός των εντατικών μεγεθών της ανωδομής. Η μείωση επιτυγχάνεται με περιορισμό της δύναμης που μπορεί να ασκηθεί από τις συσκευές στο φορέα, με την ίδια λογική που έχει ο ικανοτικός σχεδιασμός. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται μονωτήρες με έντονα μη γραμμική συμπεριφορά. Από τις δύο στρατηγικές η πρώτη είναι πολύ πιο συχνά χρησιμοποιούμενη. Η δεύτερη χρησιμοποιείται λιγότερο συχνά, στην περίπτωση που ο περιορισμός των δυνάμεων είναι πολύ πιο κρίσιμος (π.χ. ενίσχυση μίας υφιστάμενης κατασκευής) ή όταν η επιμήκυνση της ιδιοπεριόδου δεν δύναται να αποφέρει σημαντικά αποτελέσματα και προσεγγίζει τα τεχνολογικά και κατασκευαστικά όρια (π.χ. κατασκευές με μεγάλη ιδιοπερίοδο εξ' αρχής).

ΣΤ.2.3. Εφέδρανα τριβής

Για την κατασκευή που εξετάζεται στην παρούσα εργασία προκρίνεται η στρατηγική του περιορισμού των δυνάμεων, διότι στόχευση αποκλειστικά στην επιμήκυνση της περιόδου είναι ευνόητο ότι δεν θα έχει αποτέλεσμα. Οι βρόγχοι υστέρησης των εφεδράνων τριβής έχουν ιδανικά χαρακτηριστικά για να εξυπηρετήσουν τον στόχο της στρατηγικής μείωσης των δυνάμεων.

Αρχικά καθώς αυξάνεται το φορτίο δεν καταγράφονται μετακινήσεις, έως ότου το φορτίο φτάσει στην τιμή $T = \mu \cdot N$. Έπειτα η δύναμη παραμένει $\mu \cdot N$ και συσσωρεύονται μετακινήσεις. Με την αποφόρτιση και αντιστροφή του φορτίου καταγράφεται μείωση της δύναμης κατά $2 \cdot \mu \cdot N$ και η διαδικασία συνεχίζεται ομοίως.



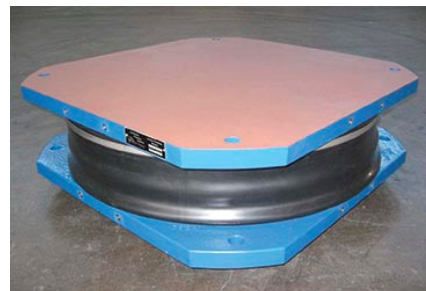
Σχήμα ΣΤ.1. Βρόγχος υστέρησης εφεδράνου τριβής. Πηγή: (Constantinou, et al., 1988)

ΣΤ.2.4. Εφεδράνα τριβής τύπου Triple Friction Pendulum

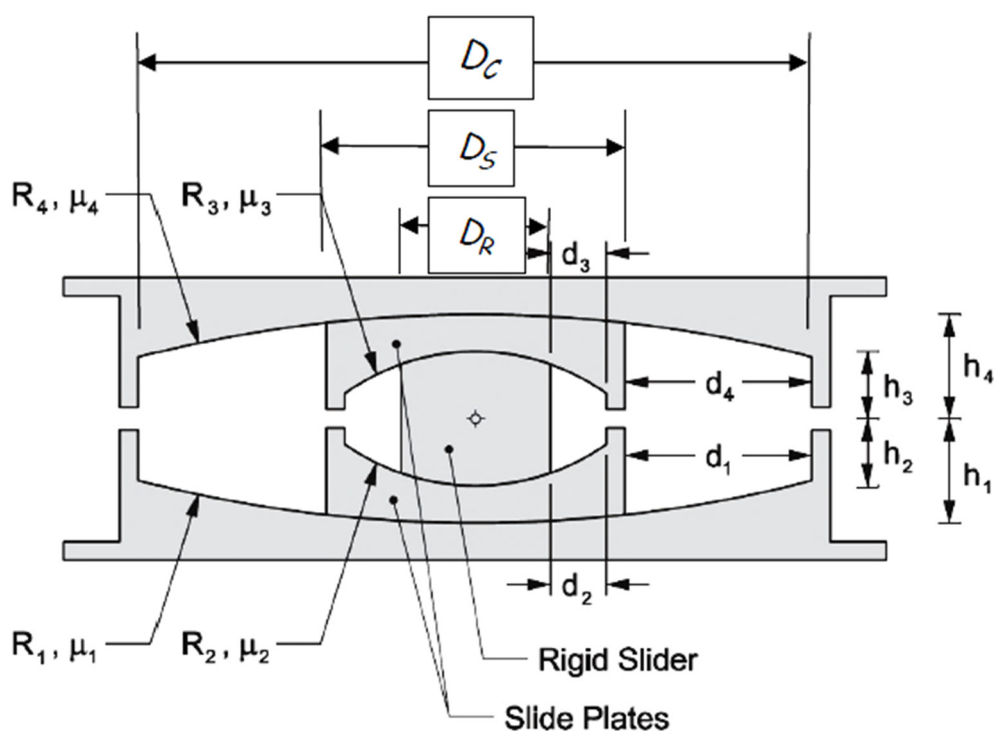
Το παράδειγμα που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο δεν θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη σεισμική μόνωση μίας πραγματικής κατασκευής, διότι η συμπεριφορά του εφεδράνου παραμένει η ίδια ανεξαρτήτως της τιμής της μετακίνησης. Συνεπώς για διαφορετικά επίπεδα επιτελεστικότητας της κατασκευής και διαφορετικά επίπεδα σεισμικής διέγερσης, δεν θα ήταν δυνατό να βελτιστοποιηθεί η συμπεριφορά του συστήματος μόνωσης ώστε να αποκρίνεται ανάλογα. Αυτή η επιδίωξη ονομάζεται «προσαρμοστική συμπεριφορά».

Με τον όρο «προσαρμοστική συμπεριφορά» νοείται ότι η δυσκαμψία και ενεργός τριβή μεταβάλλονται σε προβλεπόμενες τιμές σε υπολογίσιμες και ελεγχόμενες μετακινησιακές εντάσεις. (Fenz & Constantinou, 2007)

Προκειμένου να ελέγχονται οι μετακινήσεις σε μεγάλους σεισμούς ενώ ταυτόχρονα να λειτουργεί αποδοτικά η το σύστημα της σεισμικής μόνωσης σε σεισμούς χαμηλής και μέσης έντασης, απαιτείται ένα σύστημα μόνωσης το οποίο να είναι (α) πολύ δύσκαμπτο με μικρή απόσβεση για τις διεγέρσεις χαμηλής ισχύος, (β) εύκαμπτο με αυξημένη απόσβεση για μικρούς σεισμούς, (γ) πολύ εύκαμπτο με ακόμη μεγαλύτερη απόσβεση για τον σεισμό σχεδιασμού και τέλος, (δ) δύσκαμπτο για διεγέρσεις πέραν των ορίων του σεισμού σχεδιασμού. (Kelly, 1999) (HALL, 1999)



Για την επίτευξη του προαναφερθέντος στόχου προτάθηκαν ενεργητικά και ημι-ενεργητικά συστήματα μόνωσης, ωστόσο με κατάλληλο σχεδιασμό είναι δυνατόν η ίδια επίτευξη να γίνει με παθητικά συστήματα μόνωσης. Το αποτέλεσμα αυτού του σχεδιασμού ήταν τα εφέδρανα τριβής τύπου Triple Pendulum. Για τις αρχές λειτουργίας, καθώς και το μαθηματικό υπόβαθρο για τον αριθμητικό υπολογισμό των σχέσεων δύναμης – μετατόπισης ο αναγνώστης καλείται να ανατρέξει στις δημοσιεύσεις των (Fenz & Constantinou, 2007). Ακολουθεί μία συνοπτική παρουσίαση που προέρχεται από αυτή την πηγή.



Σχήμα ΣΤ.2. Τομή κατά τη διάμετρο ενός εφεδράνου TFP. Πηγή: (Fenz & Constantinou, 2007)

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται η τομή ενός εφεδράνου τύπου Triple Friction Pendulum. Το εφεδράνο, από έξω προς τα μέσα αποτελείται από δύο άκαμπτες κοίλες πλάκες που διαμορφώνουν 2 σφαιρικές επιφάνειες ολίσθησης, έπειτα άλλη μία φορά την ίδια διάταξη η οποία αυτή τη φορά δρα και ως ολισθήρας και τέλος έναν ακόμη άκαμπτο ολισθήρα. Τα μεγέθη που αναγράφονται στο σχήμα αποτελούν παραμέτρους σχεδιασμού, οι οποίες επηρεάζουν τη συμπεριφορά του εφεδράνου όπως περιγράφεται παρακάτω. R είναι η ακτίνα καμπυλότητας τυχούσας επιφάνειας ολίσθησης, μ ο συντελεστής τριβής, d τα γεωμετρικά ελεύθερα περιθώρια μετακίνησης και h τα ύψη των στοιχείων.

Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιείται η ισοδύναμη ακτίνα

$$R_{i,eff} = R_i - h_i \quad (\Sigma\text{T.1})$$

καθώς και το ενεργό ελεύθερο περιθώριο μετακίνησης

$$d_{i,act} = d_i \cdot \frac{R_{i,eff}}{R_i} \quad (\Sigma\text{T.2})$$

Για οποιαδήποτε σφαιρική επιφάνεια ολίσθησης όπου ο ολίσθηρας έχει εκτραπεί κατά d_i και είναι μετακινούμενος, η δύναμη επαναφοράς $F_{dr,i}$ που δέχεται ο ολίσθηρας από την επιφάνεια ολίσθησης προέρχεται από τον όρο της μεταβολής γωνίας έδρασης $W \cdot \frac{d_{i,act}}{R_{i,eff}}$ και από τον όρο της τριβής που ανθίστανται στη μετακίνηση με μέγεθος $F_{fi} = \mu \cdot W$.

$$F_{dr,i} = \frac{W}{R_{i,eff}} \cdot d_{i,act} + F_{fi} \quad (\Sigma\text{T.3})$$

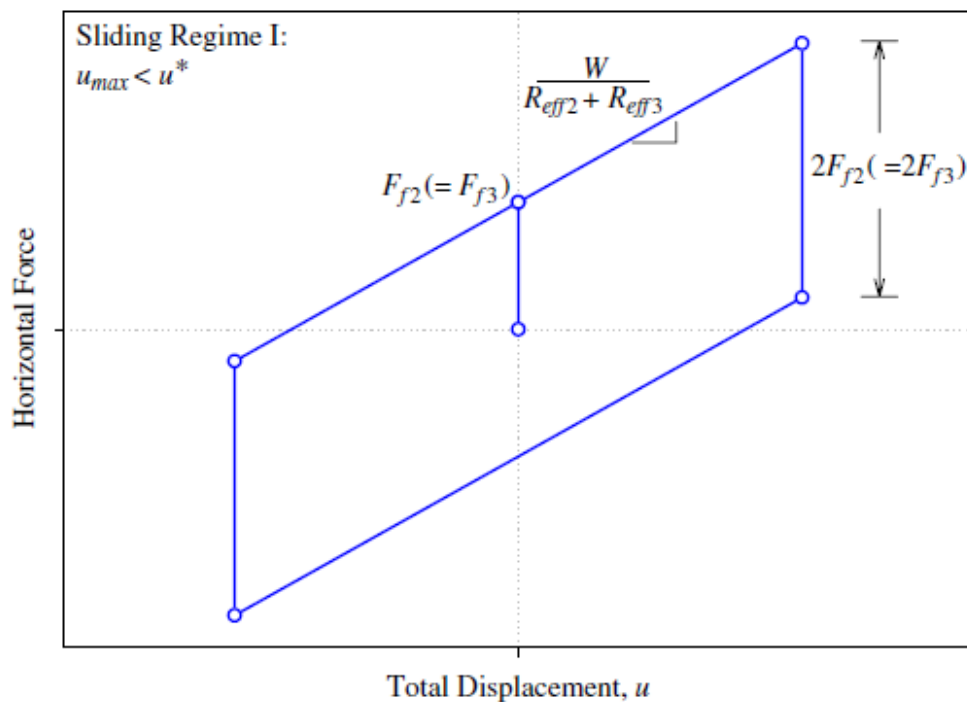
Η αλληλουχία ενεργοποίησης και παύσης της ολίσθησης επί των διαφόρων επιφανειών καθορίζεται από την σύγκριση των σχετικών τιμών των μεγεθών F_{fi} και $F_{dr,i}$.

Η τυπική διαμόρφωση των εφεδράνων TFP είναι με μεγάλες και ίσες ακτίνες για τις εξωτερικές κοίλες πλάκες και μικρές και ίσες ακτίνες για τις εσωτερικές. $R_{eff1,4} \gg R_{eff2,3}$. Οι σταθερές τριβής επιλέγονται ώστε το εφέδρανο να έχει υψηλή δυσκαμψία και χαμηλή τριβή αρχικά και σταδιακά να μειώνεται η δυσκαμψία και να αυξάνεται η τριβή καθώς οι μετακινήσεις μεγαλώνουν. Αυτό επιτυγχάνεται με τιμές για την τριβή $\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 < \mu_4$.

Επιδιώκεται η επαφή ολίσθηρα επί των δίσκων τερματισμού να προηγηθεί επί των επιφανειών 1 είτε 4, έναντι των 2 και 3. Δεδομένου ότι η κίνηση ξεκινά επί των επιφανειών 2 και 3, αυτό εξασφαλίζεται όταν ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις.

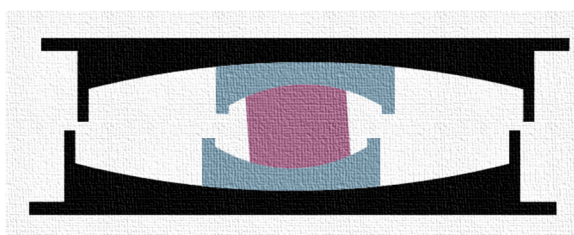
$$d_{2,act} > (\mu_1 - \mu_2) \cdot R_{2,eff} \quad \text{και} \quad d_{3,act} > (\mu_4 - \mu_3) \cdot R_{3,eff} \quad (\Sigma\text{T.4})$$

Η πρώτη ολίσθηση συμβαίνει μεταξύ των επιφανειών 2 και 3, όταν η εξωτερική δύναμη F λάβει την τιμή $F = F_2 = F_3$. Μέχρι τότε ο ολισθήρας παραμένει στην ίδια θέση.



(Fenz & Constantinou, 2007)

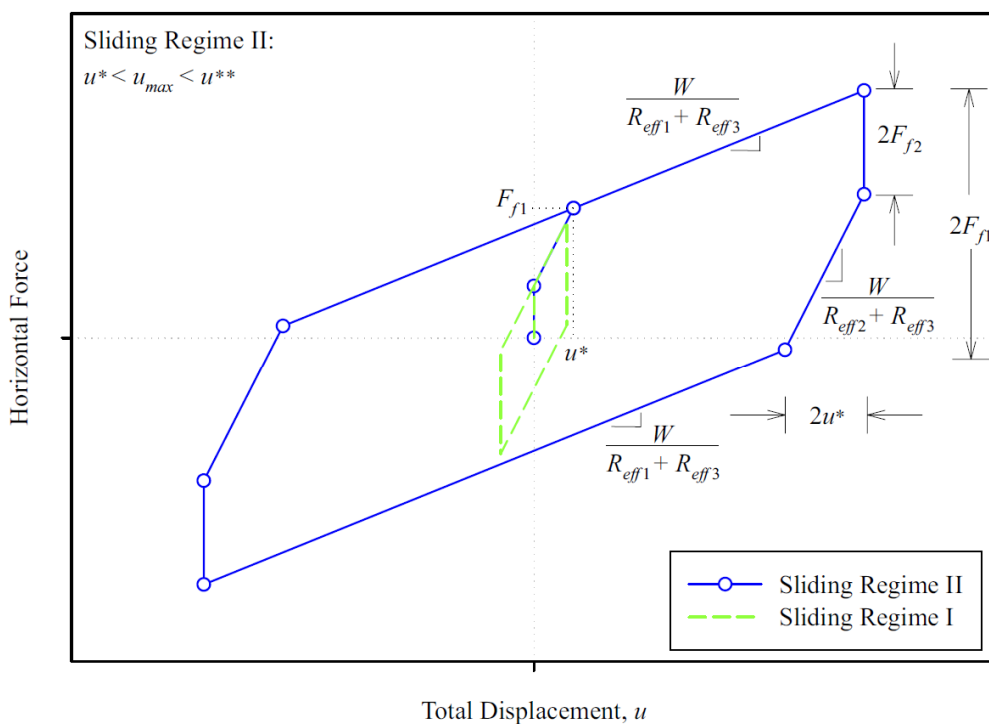
Η δυσκαμψία του 1^{ου} κλάδου είναι $+\infty$ ενώ του δεύτερου $\frac{W}{R_{2,eff} + R_{3,eff}}$.



$$\text{Όταν } F = F_{f1} \tag{ΣΤ.5}$$

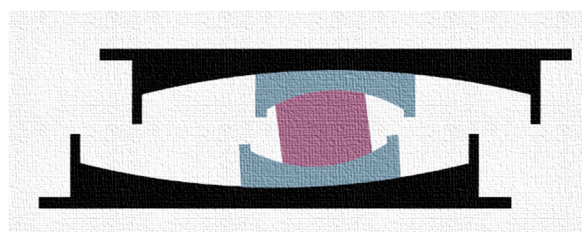
η ολίσθηση μεταπίπτει από τις επιφάνειες 2 3 στην επιφάνεια 1, δίχως επαφή σε δίσκο τερματισμού. Αυτό συμβαίνει για μετακίνηση

$$u^o = (\mu_1 - \mu_2) \cdot R_{2,eff} + (\mu_1 - \mu_3) \cdot R_{3,eff} \tag{ΣΤ.6}$$



(Fenz & Constantinou, 2007)

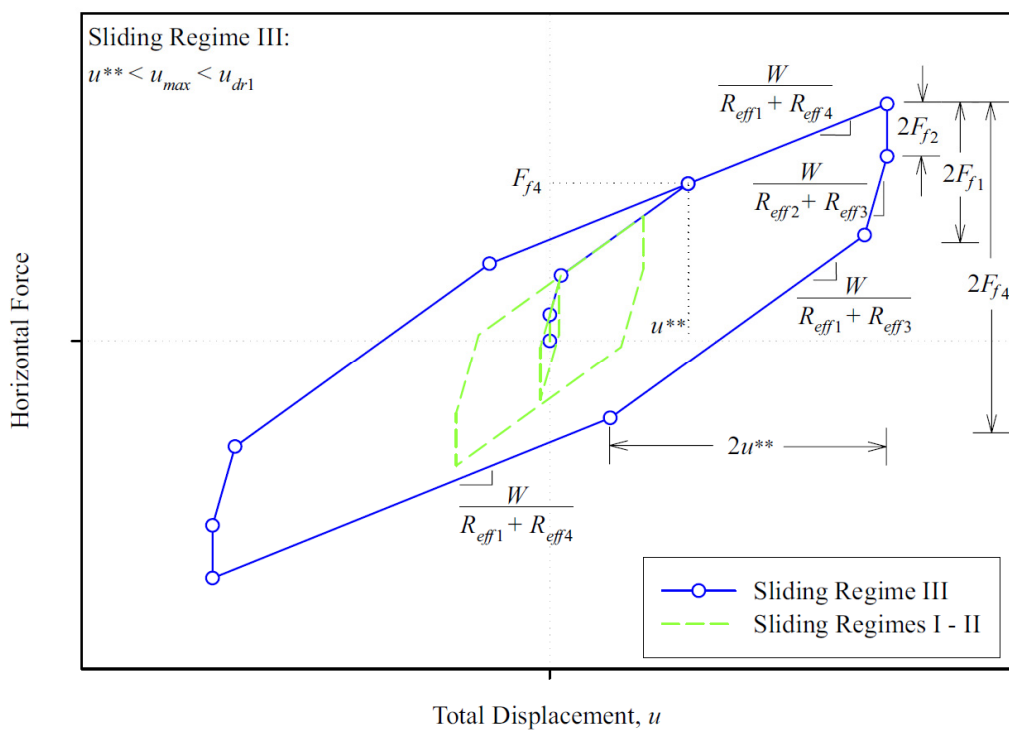
Η ολίσθηση συνεχίζεται στις επιφάνειες 1 – 3 μ ε δυσκαμψία $\frac{W}{R_{1,eff} + R_{3,eff}}$.



$$\text{Όταν } F = F_{f4} \quad (\Sigma\text{T.7})$$

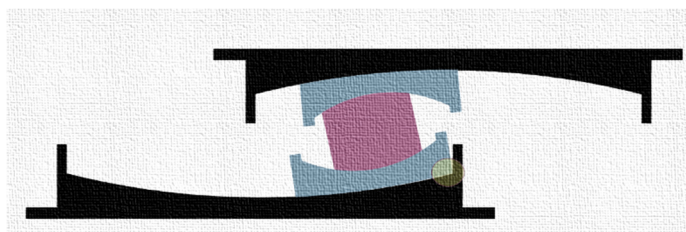
η ολίσθηση μεταπίπτει από την επιφάνεια 1 στην επιφάνεια 4, δίχως επαφή σε δισκο-τερματισμού. Αυτό συμβαίνει για μετακίνηση

$$u^{oo} = u^o + (\mu_4 - \mu_1) \cdot (R_{1,eff} + R_{3,eff}) \quad (\Sigma\text{T.8})$$



(Fenz & Constantinou, 2007)

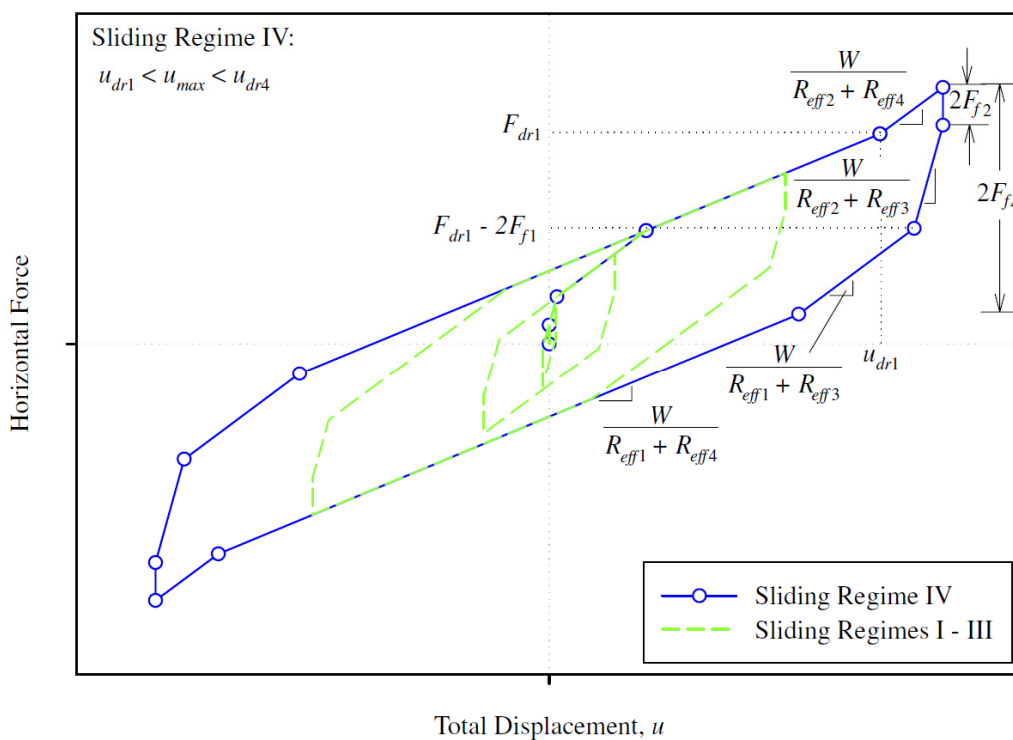
Η ολίσθηση συνεχίζει στις επιφάνειες 1 – 4 με δυσκαμψία $\frac{W}{R_{1,eff} + R_{4,eff}}$.



Επαφή του ολισθήρα με τον δίσκο τερματισμού της επιφάνειας 1 οδηγεί σε αναγκαστική μετάπτωση της ολίσθησης από τις επιφάνειες 1 – 4 στις επιφάνειες 2 – 4. Αυτό συμβαίνει για τις τιμές δύναμης και μετακίνησης

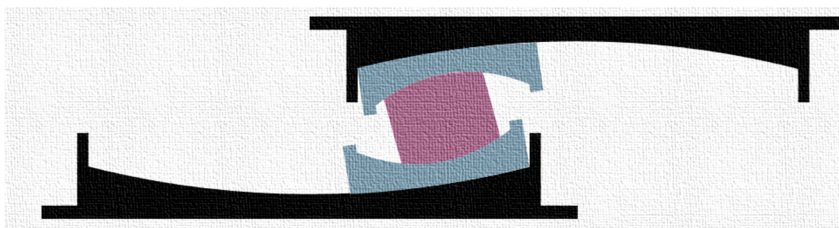
$$F = F_{dr,1} = \frac{W}{R_{1,eff}} \cdot d_{1,act} + F_{f1} \quad (\Sigma T.9)$$

$$u_{dr1} = u^{oo} + d_1 \left(1 + \frac{R_{4,eff}}{R_{1,eff}} \right) - (\mu_4 - \mu_1) \cdot (R_{1,eff} + R_{4,eff}) \quad (\Sigma T.10)$$



(Fenz & Constantinou, 2007)

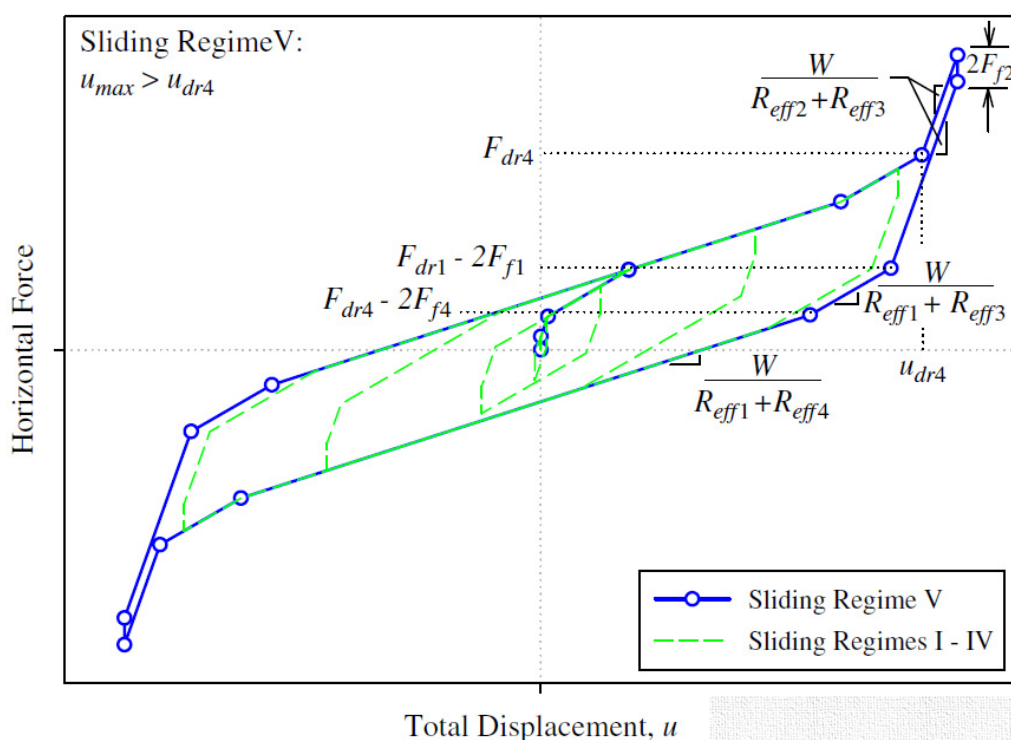
Η ολίσθηση συνεχίζει στις επιφάνειες 2 – 4 με δυσκαμψία $\frac{W}{R_{2,eff} + R_{4,eff}}$.



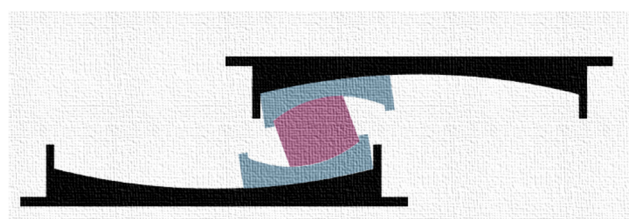
Επαφή του ολισθήρα με τον δίσκο τερματισμού της επιφάνειας 4 οδηγεί σε αναγκαστική μετάπτωση της ολίσθησης στις επιφάνειες 2 και 3. Αυτό συμβαίνει για τις τιμές δύναμης και μετακίνησης

$$F = F_{dr,4} = \frac{W}{R_{4,eff}} \cdot d_{4,act} + F_{f4} \quad (\Sigma\text{T.11})$$

$$u_{dr4} = u_{dr1} + \left[\left(\frac{d_{4,act}}{R_{4,eff}} + \mu_4 \right) - \left(\frac{d_{1,act}}{R_{1,eff}} + \mu_1 \right) \right] \cdot (R_{2,eff} + R_{4,eff}) \quad (\Sigma\text{T.12})$$



(Fenz & Constantinou, 2007)



Η ολίσθηση συνεχίζεται στις επιφάνειες 2 – 3 με δυσκαμψία $\frac{W}{R_{2,eff} + R_{3,eff}}$, μέχρι να υπάρξει επαφή με τον δίσκο τερματισμού των επιφανειών 2 και 3. Περεταίρω μετακίνηση δεν επιτρέπεται από το εφέδρανο, με αποτέλεσμα η επιπλέον αντίστασή του να είναι ανάλογη της επιπλέον δράσης.

Κατασκευαστικοί περιορισμοί

Παρόλο που από την προηγούμενη ανάλυση οι τιμές για τον συντελεστή τριβής παρουσιάζονται ως παράμετροι σχεδιασμού, στην πράξη υπάρχουν κατασκευαστικοί περιορισμοί που επιβάλλουν τη χρήση συγκεκριμένων τιμών. Επιπροσθέτως από επεξεργασία πειραματικών δεδομένων έχει προκύψει ότι το αξονικό φορτίο, παρά το γεγονός ότι θεωρητικά είναι ένα μέγεθος που απλοποιείται, στην πράξη προκύπτει ότι επηρεάζει τον συντελεστή τριβής.

Ο συντελεστής τριβής μεταξύ των επιφανειών ολίσθησης μπορεί να λαμβάνεται από την ακόλουθη σχέση, όπου P η πίεση διεπιφανείας σε MPa.¹⁴

$$\mu = 0.122 - \frac{0.01 \cdot P[KPa]}{6894.757} \quad (\Sigma\text{T.13})$$

Η εξίσωση αυτή έχει προκύψει από πειραματικά δεδομένα και έχει βαθμονομηθεί για το εύρος τιμών $P \in [13\ 800\ KPa, 62\ 000\ KPa]$. Η επιφάνεια ολίσθησης 4 ωστόσο, θα πρέπει να έχει μεγαλύτερο σταθερό όρο (εδώ εφαρμόζεται 0.1464) (προκύπτει από κατασκευή με υλικό διαφορετικής κατεργασίας). (Fenz & Constantinou, 2007)

Επίσης το ελάχιστο πάχος για τις εσωτερικές κοίλες πλάκες θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 254 mm. Το ελάχιστο πάχος υπολογίζεται άμεσα από την ακόλουθη σχέση.

$$\frac{(h_1 + h_4) - (h_2 + h_3)}{2} \geq 0.0254\ m \quad (\Sigma\text{T.14})$$

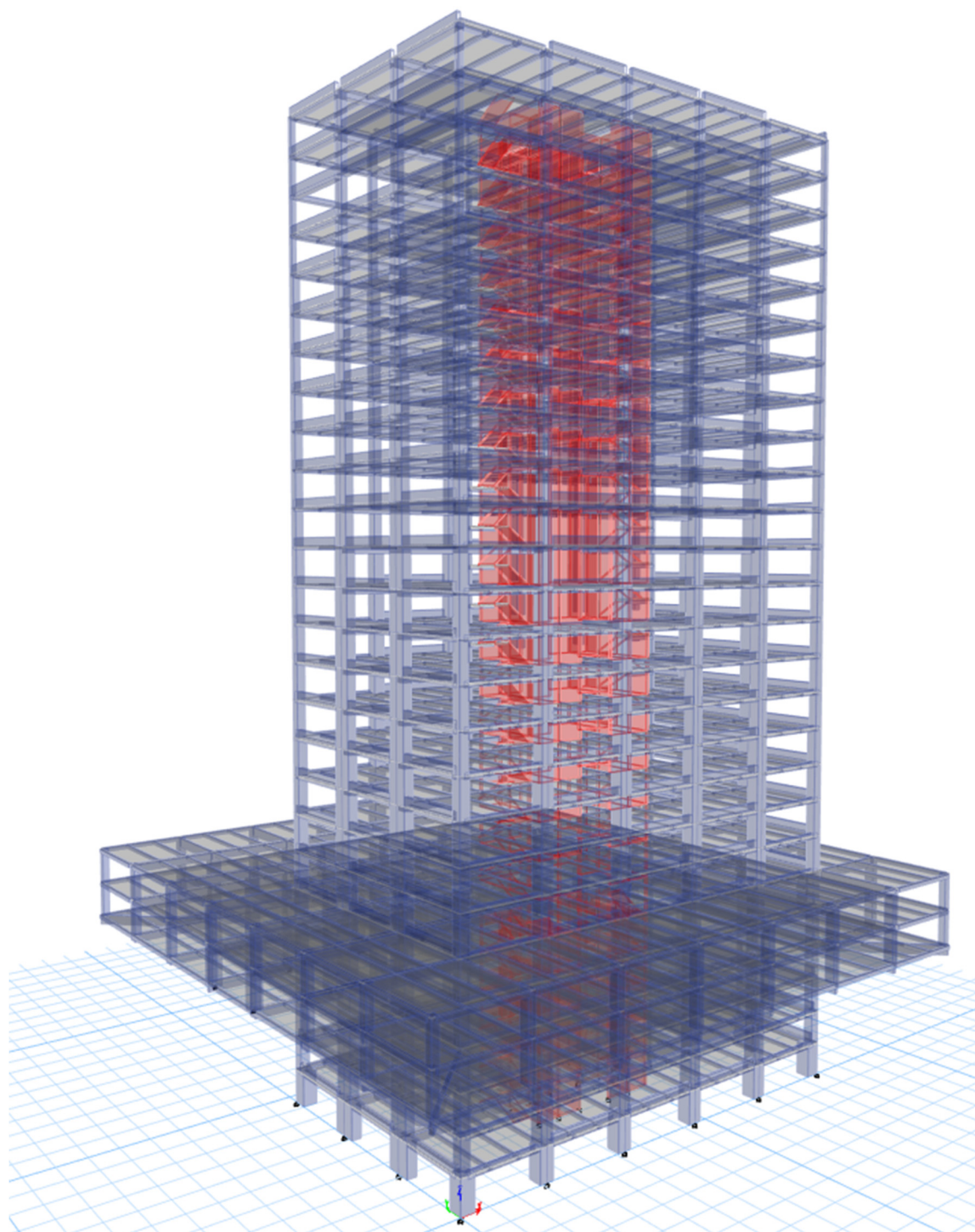
Τέλος, η εσωτερική ομάδα ολισθήρων θα πρέπει να έχει κοντόχονδρο σχήμα για να αποτραπεί οποιαδήποτε αστάθεια. Ένα ικανό κριτήριο είναι το ακόλουθο.

$$\frac{h_2 + h_3}{D_r} \leq 1.00 \quad (\Sigma\text{T.15})$$

¹⁴ Στη σχέση έχει γίνει μετατροπή μονάδων από Imperial σε SI, από τον γράφων.

ΣΤ.3. Στατικό προσομοίωμα

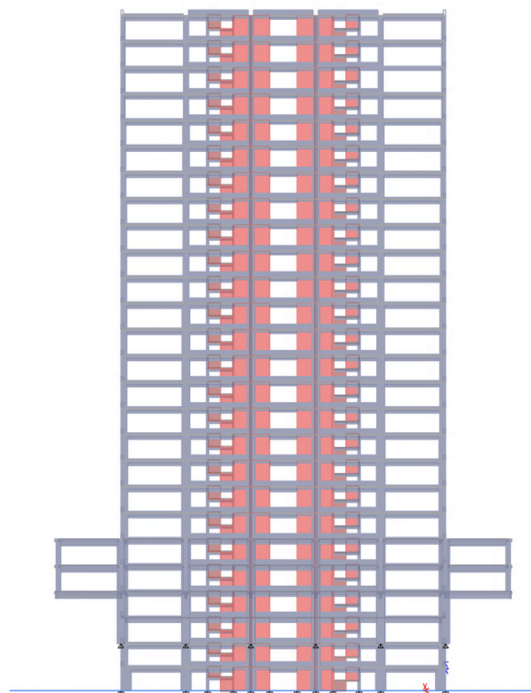
Στο λογισμικό ETABS προσομοιώνεται ο φορέας με όλα τα δεδομένα του στατικού προσομοιώματος, όπως ακριβώς περιγράφονται στην παράγραφο Γ.3 της σελίδας (38).



Εικόνα ΣΤ.1. Προοπτικό προσομοιώματος ETABS

ΣΤ.3.1. Λεπτομέρειες προσομοίωσης

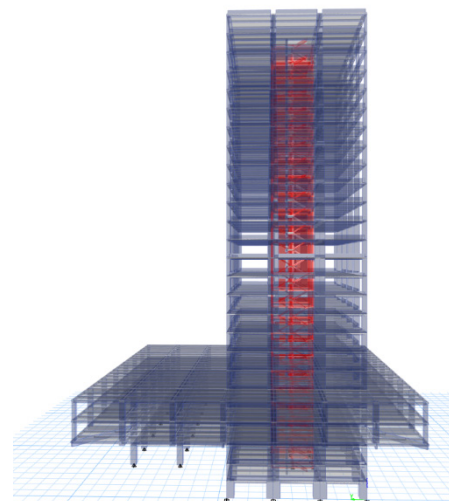
Ιδιαιτερότητα αποτελεί ο τρόπος προσομοίωσης των τοιχωμάτων και των πλακών, διότι στο ETABS υπάρχει η δυνατότητα χρήσης επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωσή τους. Η δε σύνδεσή τους με τα γραμμικά μέλη εκτελείται αυτόματα από το λογισμικό και ελέγχθηκε από τον γράφον με απλά παραδείγματα. Επομένως προκρίθηκε η επιλογή αυτών των στοιχείων, για την ακριβέστερη προσομοίωση των χαρακτηριστικών τους. Επίσης χάρη στην άνεση και φιλικότητα προς το χρήστη που προσφέρει το λογισμικό, δόθηκε η ευκαιρία προσομοίωσης και κάποιων οπών των πλακών, καθώς και των κλιμακοστασίων.



Εικόνα ΣΤ.2. Όψη στατικού προσομοιώματος ETABS

ΣΤ.3.2. Σύγκριση προσομοιωμάτων ΡΑΦ & ETABS

Στα πλαίσια ελέγχου επιβεβαίωσης, αφότου ολοκληρώθηκε η προσομοίωση του φορέα, εκτελέστηκε ιδιομορφική ανάλυση στο λογισμικό ETABS για 4 μετατοπισμένες θέσεις μάζας, προκειμένου να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα του λογισμικού ΡΑΦ.

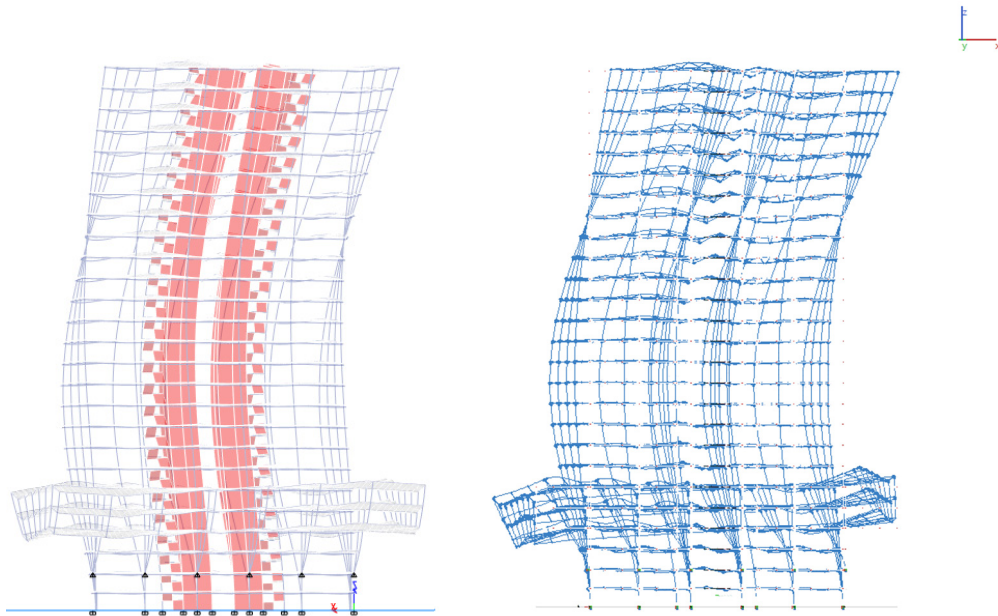


Θέση Μάζας	Ιδιομορφή	ETABS	ΡΑΦ	Διαφορά με ETABS	Ποσοστό
1	1	2.57	2.75	0.18	7%
	2	2.56	2.15	-0.41	16%
	3	1.96	1.76	-0.20	10%
	4	0.78	0.71	-0.07	9%
	5	0.76	0.66	-0.10	13%
	6	0.55	0.58	0.02	4%
	7	0.46	0.45	-0.01	2%

Πρόταση σεισμικής μόνωσης του φορέα με εφέδρανα τριβής τύπου Triple Friction Pendulum

Θέση Μάζας	Ιδιομορφή	ETABS	ΡΑΦ	Διαφορά με ETABS	Ποσοστό
2	8	0.39	0.37	-0.02	4%
	9	0.27	0.28	0.01	4%
	10	0.25	0.27	0.02	9%
	11	0.23	0.23	0.00	1%
	12	0.18	0.19	0.01	3%
	1	2.58	2.76	0.18	7%
	2	2.56	2.15	-0.41	16%
	3	1.96	1.76	-0.20	10%
	4	0.79	0.72	-0.07	9%
	5	0.76	0.66	-0.10	13%
	6	0.55	0.57	0.02	4%
	7	0.46	0.45	-0.01	2%
3	8	0.39	0.37	-0.02	4%
	9	0.27	0.28	0.01	5%
	10	0.25	0.27	0.02	9%
	11	0.23	0.23	0.00	1%
	12	0.18	0.19	0.01	3%
	1	2.56	2.74	0.17	7%
	2	2.56	2.13	-0.43	17%
	3	1.96	1.78	-0.19	10%
	4	0.80	0.69	-0.11	14%
	5	0.75	0.67	-0.07	10%
	6	0.55	0.59	0.04	6%
	7	0.47	0.46	-0.01	2%
4	8	0.38	0.36	-0.02	5%
	9	0.27	0.28	0.01	3%
	10	0.25	0.27	0.03	11%
	11	0.22	0.22	0.00	0%
	12	0.18	0.19	0.00	2%
	1	2.58	2.74	0.16	6%
	2	2.56	2.20	-0.36	14%
	3	1.95	1.72	-0.23	12%
	4	0.78	0.73	-0.04	6%
	5	0.77	0.62	-0.14	19%
	6	0.55	0.59	0.04	6%
	7	0.46	0.45	-0.01	2%
8	0.39	0.37	-0.02	5%	
9	0.27	0.28	0.01	4%	
10	0.25	0.27	0.02	10%	
11	0.23	0.23	0.00	0%	
12	0.18	0.19	0.01	3%	

Παρατηρούμε ότι οι διαφορές είναι μικρές. Οι παραμορφωμένες εικόνες που λαμβάνονται από τα δύο προγράμματα για την 5^η ιδιομορφή, στην οποία εντοπίζεται η μεγαλύτερη απόκλιση, είναι οι ακόλουθες.



Εικόνα ΣΤ.4. ETABS.
5^η ιδιομορφή

Εικόνα ΣΤ.3 ΡΑΦ.
5^η ιδιομορφή

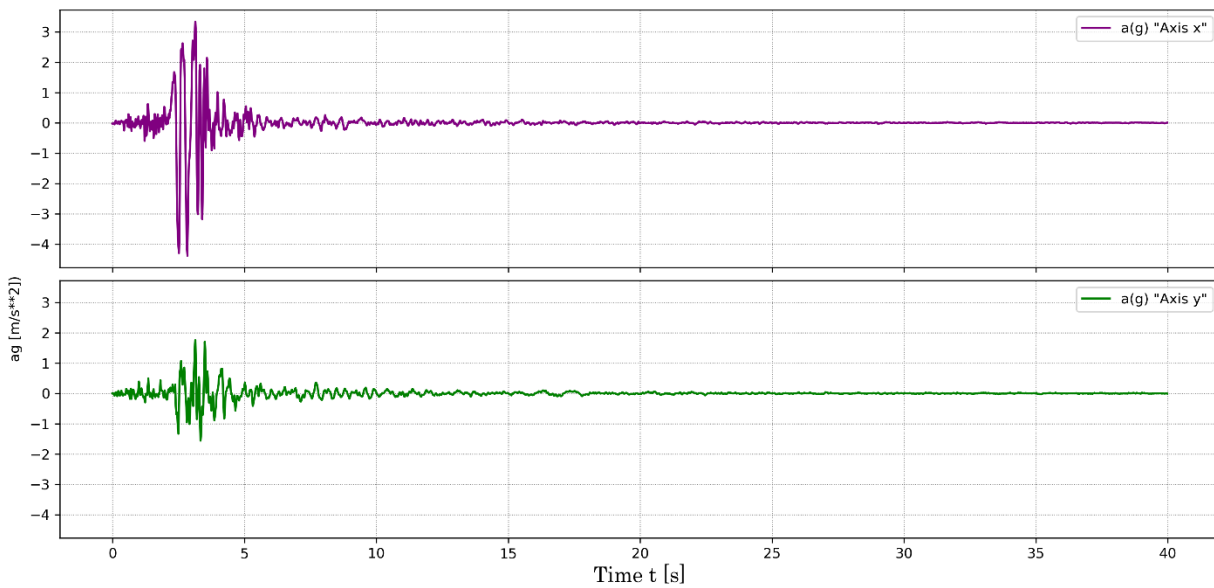
Οι ιδιομορφές που έχουν την μεγαλύτερη απόκλιση για την περίοδο οπτικά προκύπτουν ίδιες. Συμπεραίνεται ότι και οι υπόλοιπες, που ταυτίζονται περισσότερο θα έχουν ίδια μορφή. Δεδομένου ότι η ιδιομορφική ανάλυση περιλαμβάνει ως δεδομένα τη μάζα, τα φορτία (ως μάζα) και τη δυσκαμψία του φορέα, **συμπεραίνεται ότι τα δύο προσομοιώματα έχουν καλή συσχέτιση**. Οι διαφοροποιήσεις αποδίδονται στο γεγονός ότι στο λογισμικό ETABS τα τοιχώματα έχουν προσομοιωθεί με πεπερασμένα στοιχεία. Το ίδιο έχει γίνει για τις πλάκες των ορόφων, καθώς και τις κλίμακες, με αποτέλεσμα να λαμβάνεται υπόψη η μικρή συμμετοχή που έχουν στη δυσκαμψία του φορέα.

ΣΤ.4. Προετοιμασία σεισμικών καταγραφών

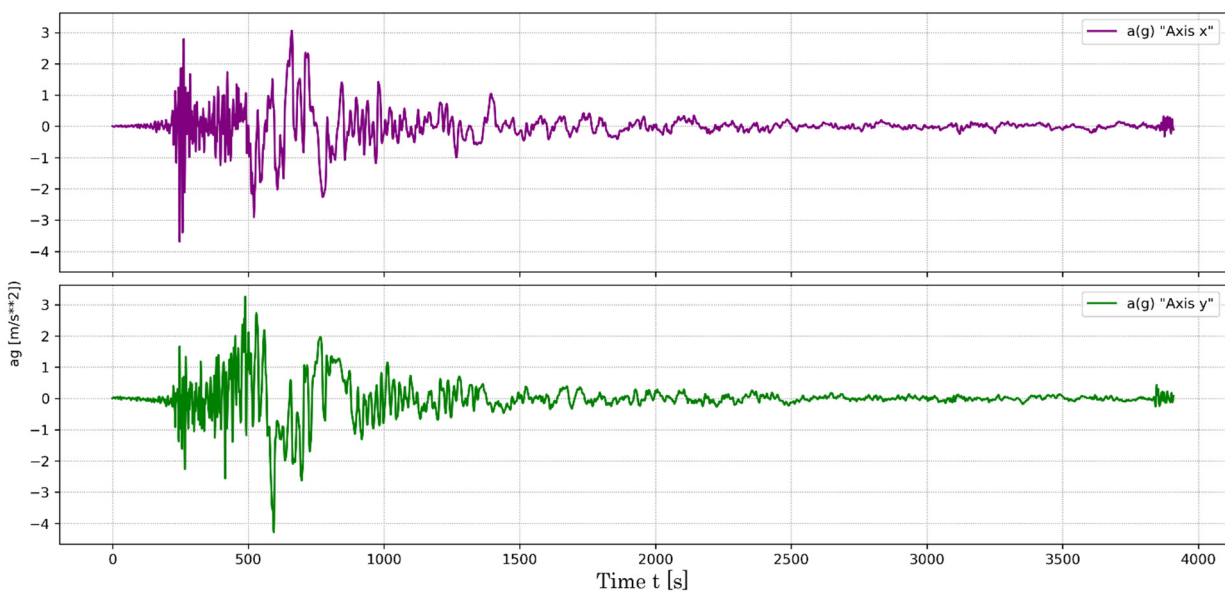
ΣΤ.4.1. Σεισμικές καταγραφές της ανάλυσης

Επιλέχθηκαν 5 σεισμικές καταγραφές με τιμές επιτάχυνσης και για τις δύο διευθύνσεις, για την εκτέλεση της ανάλυσης. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι καταγραφές.

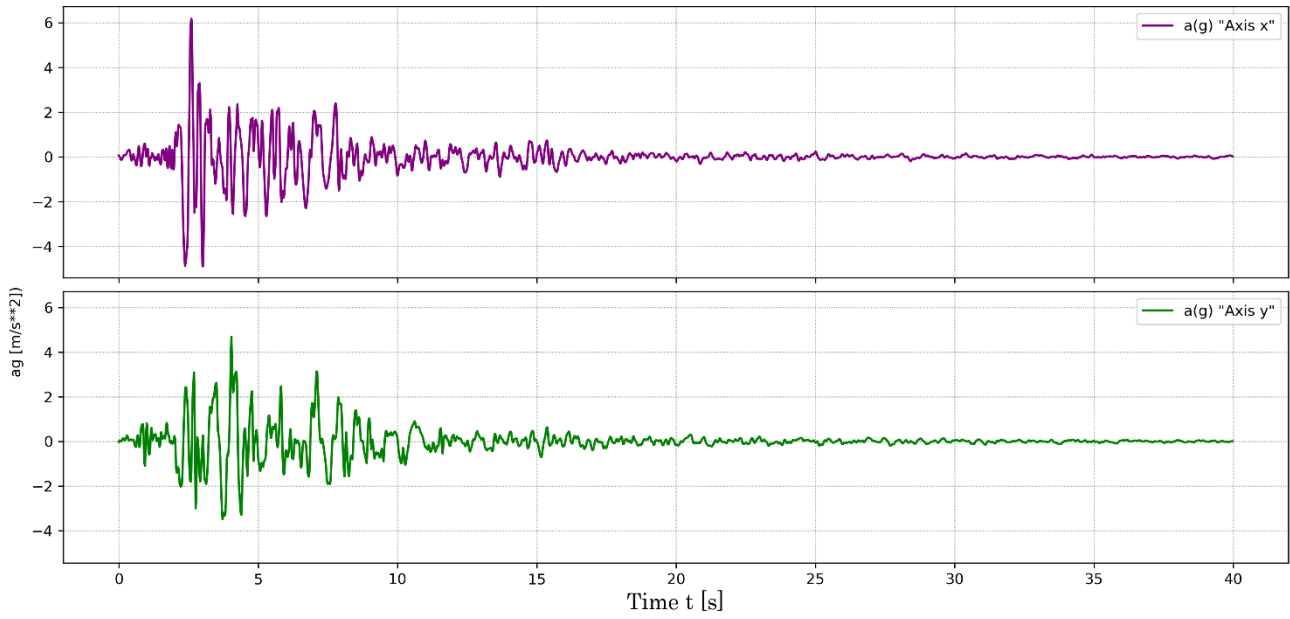
Time-History Plot: ~ ALTADENA ~



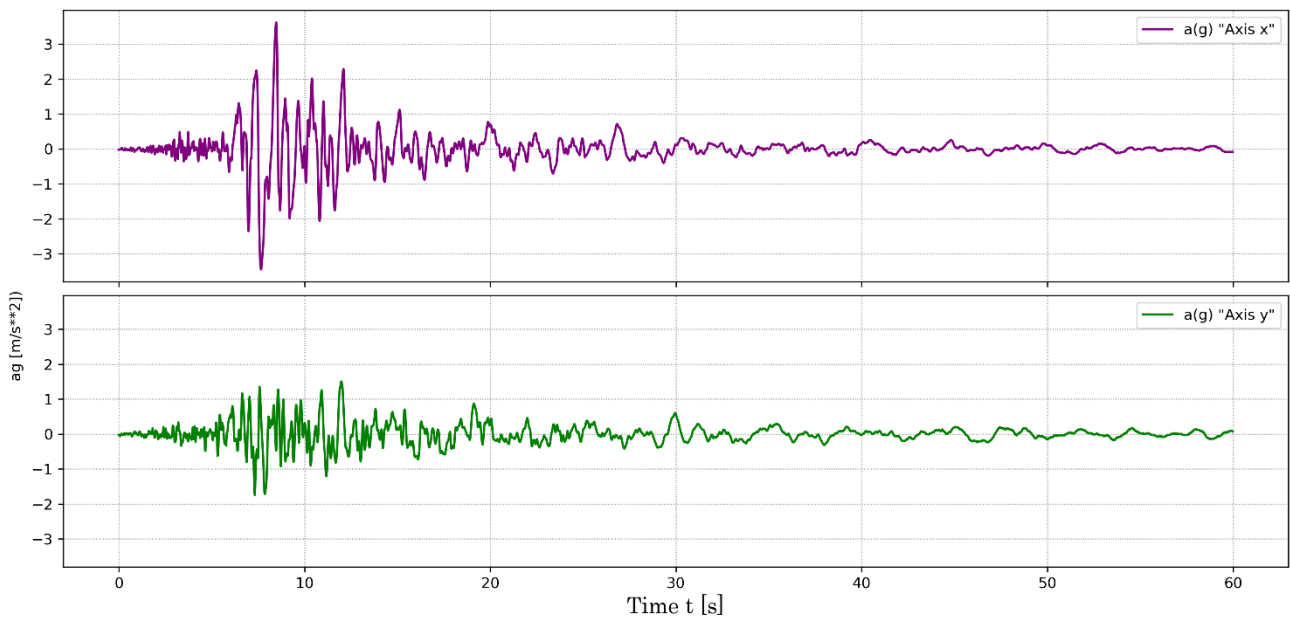
Time-History Plot: ~ ARRAY06 ~



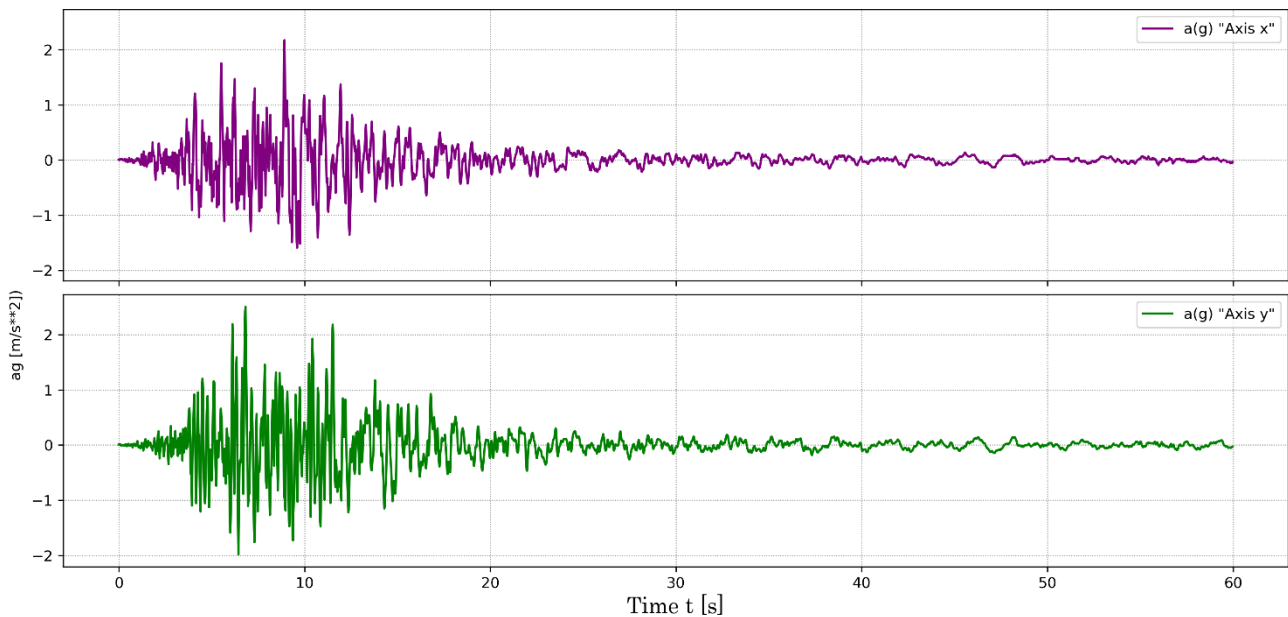
Time-History Plot: ~ CORRALIT ~



Time-History Plot: ~ HOLLISTE ~



Time-History Plot: ~ LACC_NOR ~



ΣΤ.4.2. Προσαρμογή των καταγραφών στο φάσμα του EC 8

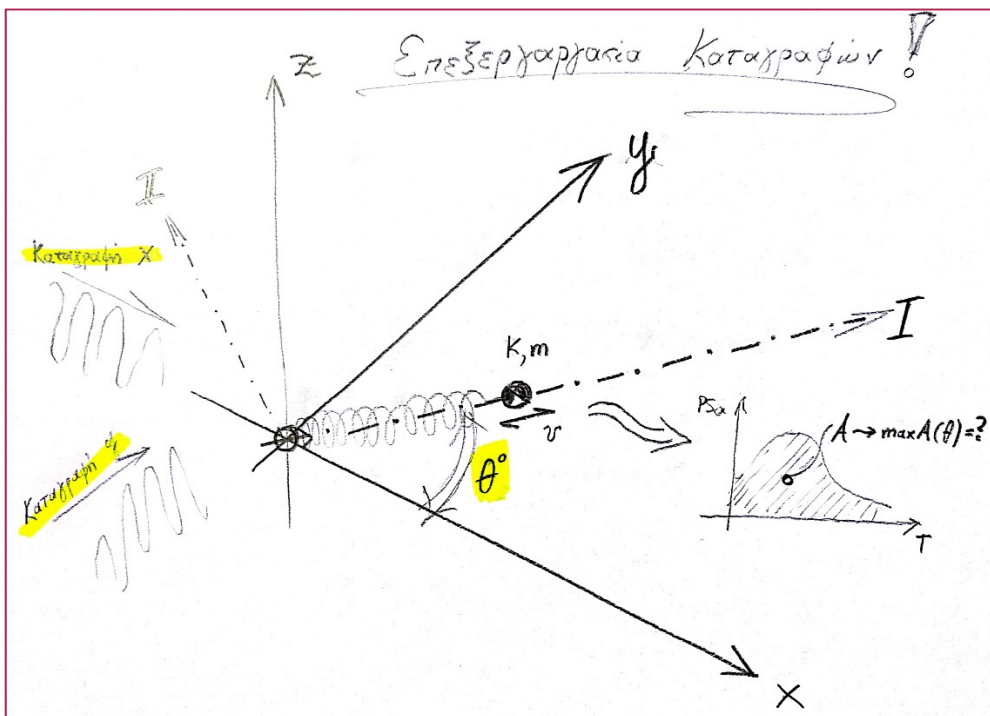
Επειδή οι καταγραφές είναι σε 2 διευθύνσεις, προκειμένου αυτές να προσαρμοστούν στο ελαστικό φάσμα σχεδιασμού του EC 8, εκτελείται η ακόλουθη ανάλυση.

Γενική περιγραφή της μεθοδολογίας

Υπολογίζεται το δυσμενέστερο ελαστικό φάσμα επιταχύνσεων το οποίο μπορεί να προκύψει με περιστροφή των δύο αξόνων. Αφότου προσδιοριστεί η απαιτούμενη γωνία στροφής, υπολογίζεται για το προκύπτον φάσμα με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων ο απαιτούμενος πολλαπλασιαστικός συντελεστής προκειμένου το φάσμα να πλησιάζει όσο το δυνατόν περισσότερο το ελαστικό φάσμα του EC 8. Τέλος αποθηκεύονται οι νέες τιμές της διέγερσης για χρήση στο λογισμικό.

Παρουσίαση της διαδικασίας ανάλυσης για την 1^η σεισμική καταγραφή (~ALTADENA~).

Θεωρείται ένας μονοβάθμιος ταλαντωτής με διεύθυνση ταλάντωσης τον άξονα I , ο οποίος σχηματίζει με το σύστημα αξόνων XY γωνία θ . Στη συνέχεια υποβάλλεται στη σεισμική διέγερση, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα ΣΤ.3. Μονοβάθμιος ταλαντωτής σε τυχούσα διεύθυνση.

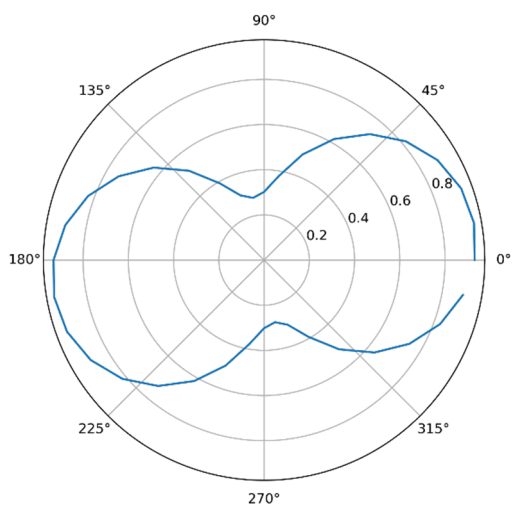
Η διέγερση στην εγκάρσια διεύθυνση δεν επηρεάζει τον ταλαντωτή. Στη διαμήκη διεύθυνση η διέγερση μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση.

$$a_{gI} = a_{gX} \cdot \cos(\theta) + a_{gY} \cdot \sin(\theta) \quad (\Sigma\text{T.16})$$

Έχοντας προσδιορίσει τα ζεύγη χρόνου – επιτάχυνσης στον θεωρούμενο άξονα I , υπολογίζεται το φάσμα της σεισμικής καταγραφής, για ένα μεγάλο εύρος περιόδων, με εφαρμογή της μεθόδου Newmark (CHOPRA, 2007), με θεώρηση σταθερών επιταχύνσεων

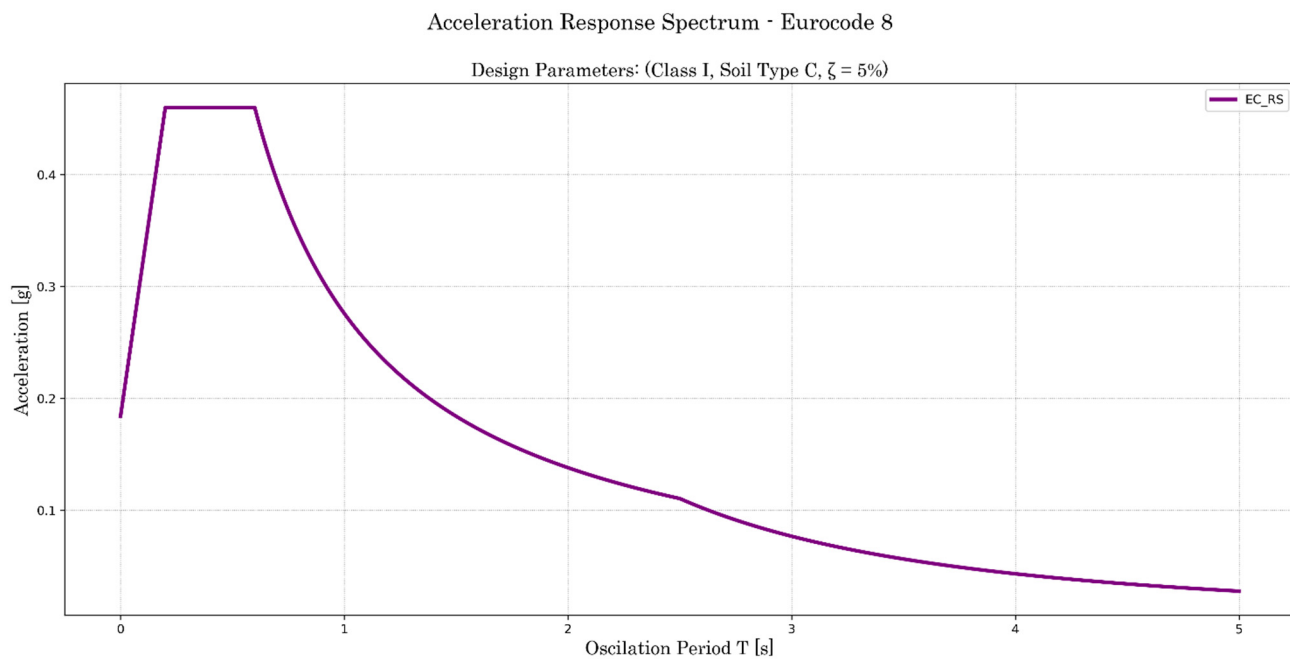
(προτιμήθηκε διότι συγκλίνει πάντα, εν αντίθεση με των γραμμικώς μεταβαλλόμενων επιταχύνσεων). Έπειτα, για το φάσμα που προκύπτει υπολογίζεται με αριθμητική ολοκλήρωση με τον κανόνα Simpson η περικλειόμενη επιφάνεια. Έχοντας προγραμματίσει την εκτέλεση των παραπάνω ενεργειών για δεδομένη γωνία στροφής αξόνων, με εφαρμογή μεθόδων βελτιστοποίησης, και συγκεκριμένα με εφαρμογή «Sequential Least Squares Programming (SLSQP)» προκύπτει η ταχύτατη βέλτιστη επιλογή της γωνίας που μεγιστοποιεί την επιφάνεια κάτω από το φάσμα, με τις λιγότερες δυνατές επαναλήψεις, οι οποίες είναι αρκετά χρονοβόρες, λόγω του μεγάλου όγκου των απαιτούμενων υπολογισμών. Στο παράρτημα Α παρατίθεται ο κώδικας σε γλώσσα Python που αναπτύχθηκε για την εκτέλεση των πράξεων.

Για λόγους παρουσίασης, υπολογίζοντας την επιφάνεια του φάσματος του άξονα Ι για χαρακτηριστικές τιμές της γωνίας στροφής αξόνων, για την σεισμική καταγραφή ~ALTADENA~ προκύπτει Σχήμα ΣΤ.4. Είναι εμφανές ότι η γωνία επηρεάζει σημαντικά (για τη συγκεκριμένη σεισμική καταγραφή) την προκύπτουσα σεισμική ενέργεια. Όπως θα περιμέναμε, υπάρχει συμμετρία μεταξύ των δύο ημικυκλίων (ισοδυναμεί με αλλαγή προσήμου για την επιτάχυνση του ταλαντωτή, που απλοποιείται λόγω λήψης της απολύτου μέγιστης τιμής για την επιτάχυνση αυτού). Η μεγιστοποίηση επιτυγχάνεται για γωνία 9.41 deg.



Σχήμα ΣΤ.4. Φασματική επιφάνεια συναρτήσεως γωνίας ταλαντωτή.

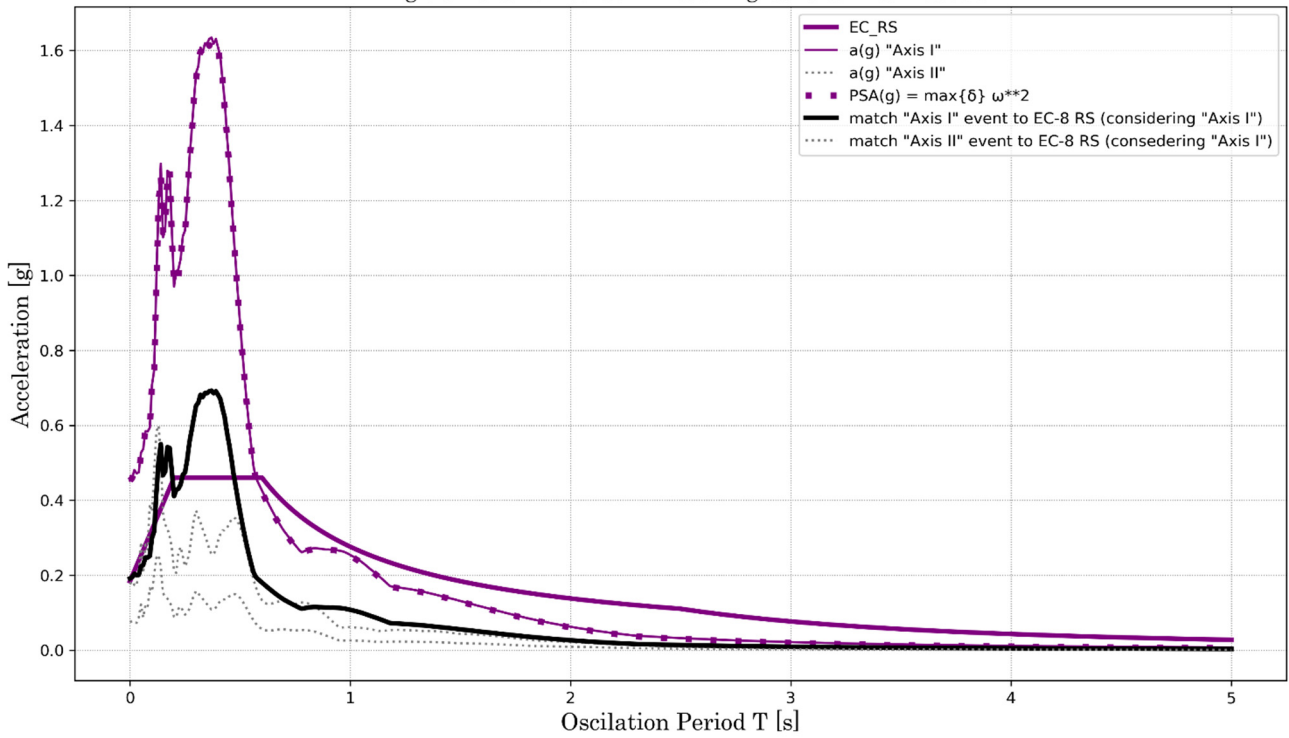
Έχοντας πλέον προσδιορίσει τη γωνία θ , προκύπτει το «δυσμενέστερο» φάσμα, το οποίο θα πρέπει να προσαρμοστεί στο ελαστικό φάσμα του EC 8.



Με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, επιλέγεται ο κατάλληλος πολλαπλασιαστικός συντελεστής ο οποίος ελαχιστοποιεί το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών των επιταχύνσεων για όλες τις χαρακτηριστικές περιόδους στις οποίες έχει γίνει υπολογισμός για τα δύο φάσματα. Με τον ίδιο συντελεστή πολλαπλασιάζονται οι τιμές των επιταχύνσεων για τις χρονοϊστορίες των αξόνων I και II και αποθηκεύονται για να χρησιμοποιηθούν στο λογισμικό για την ανάλυση του φορέα. Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τις καταγραφές.

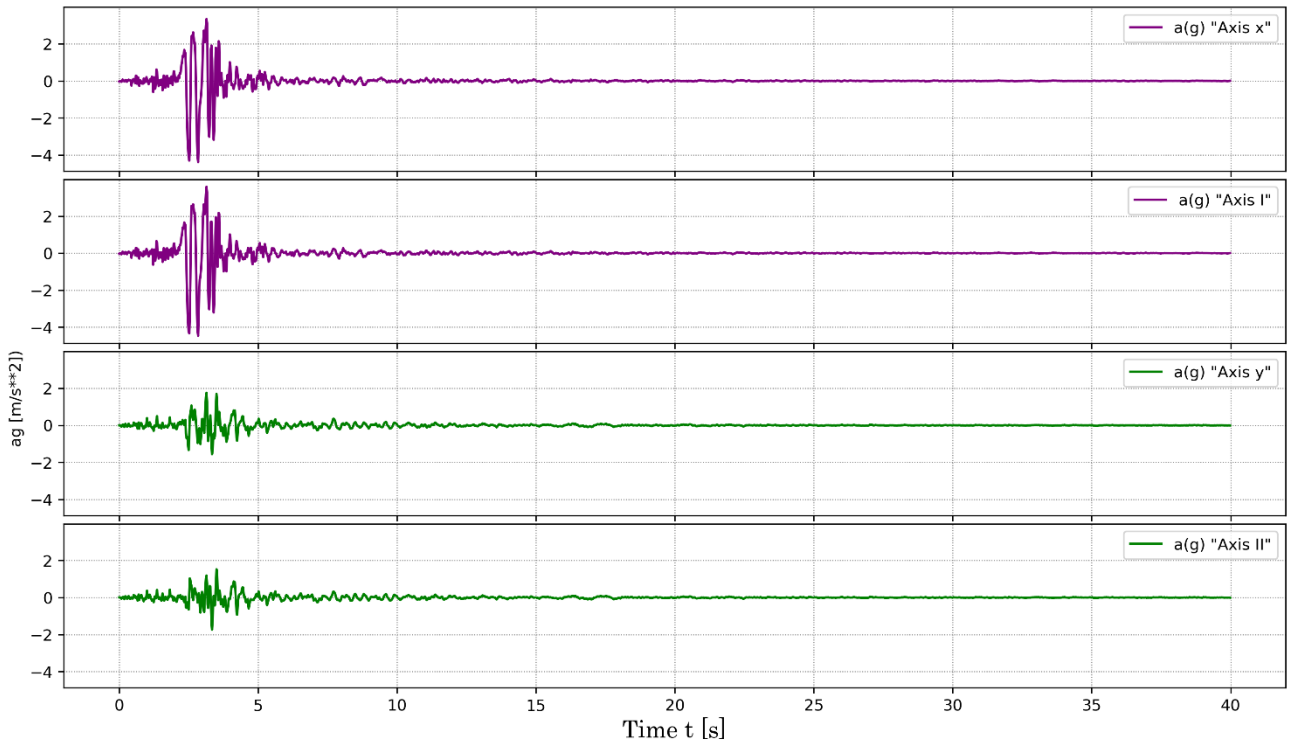
Event: ~ ALTADENA ~

Angle of rotation: 9.408° - Matching Constant: 0.4235958



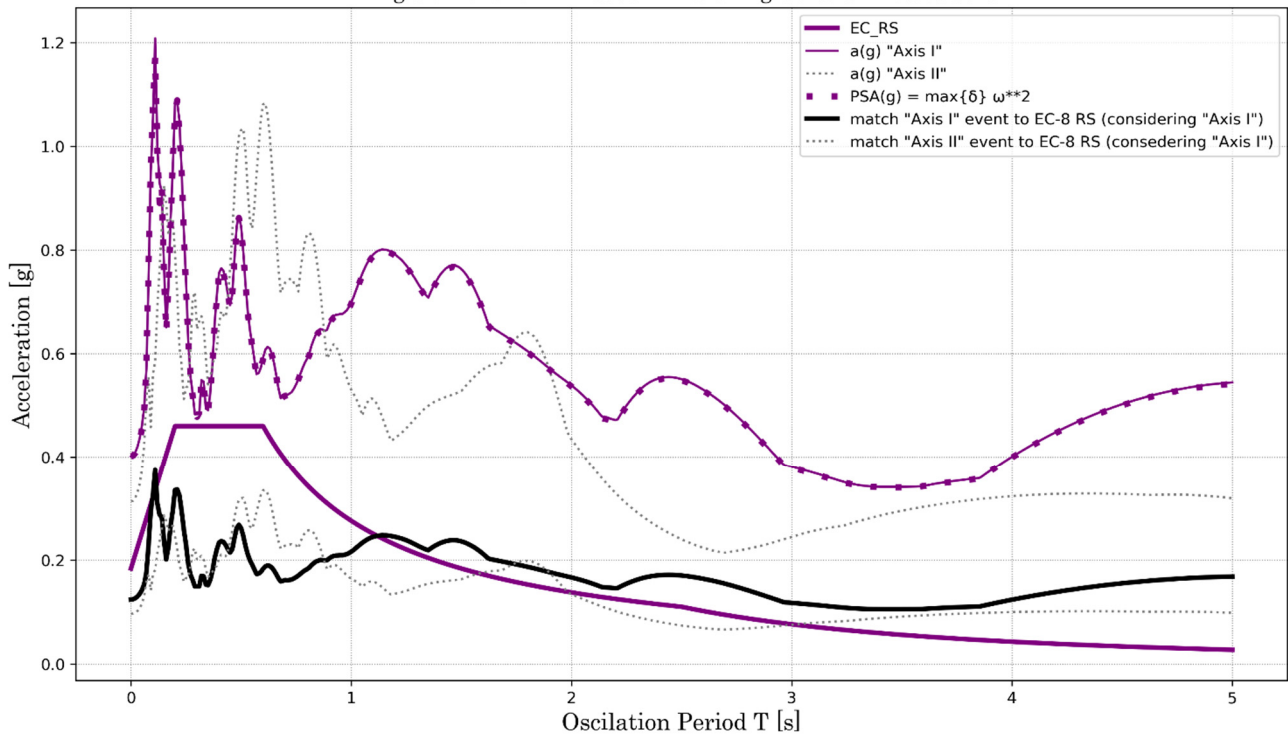
Time-History Plot: ~ ALTADENA ~

Angle of rotation: 9.408°



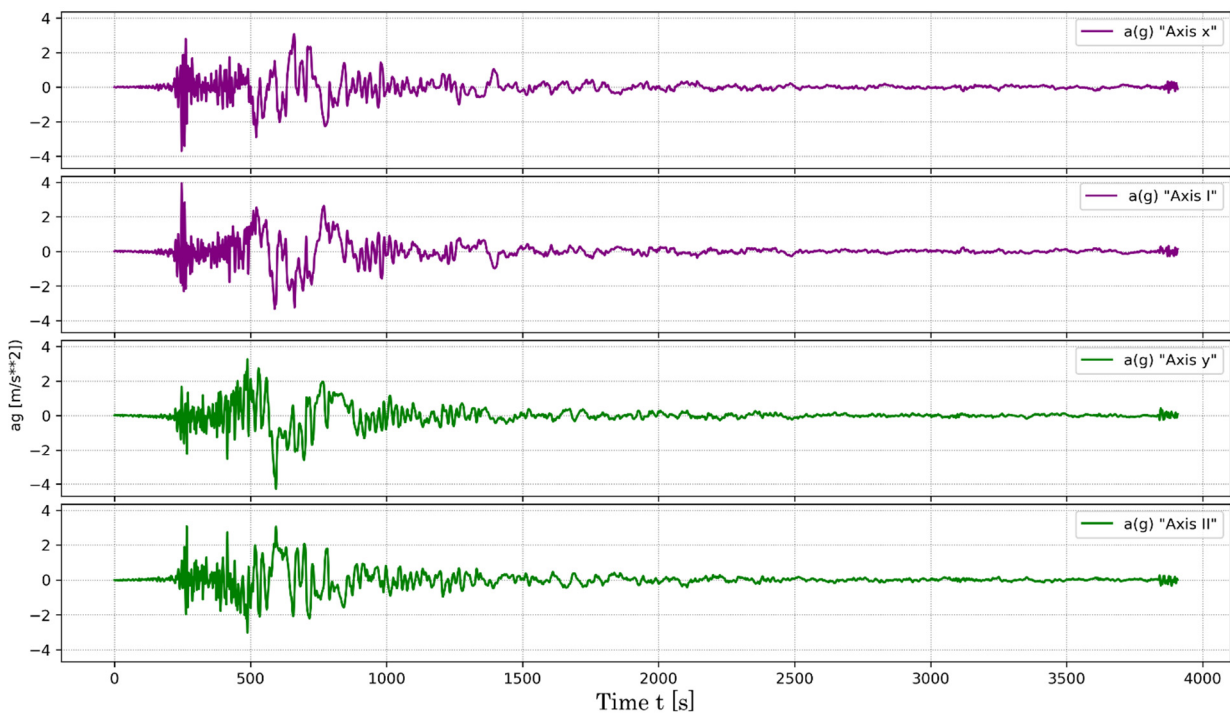
Event: ~ ARRAY06 ~

Angle of rotation: 142.770° - Matching Constant: 0.3096719



Time-History Plot: ~ ARRAY06 ~

Angle of rotation: 142.770°

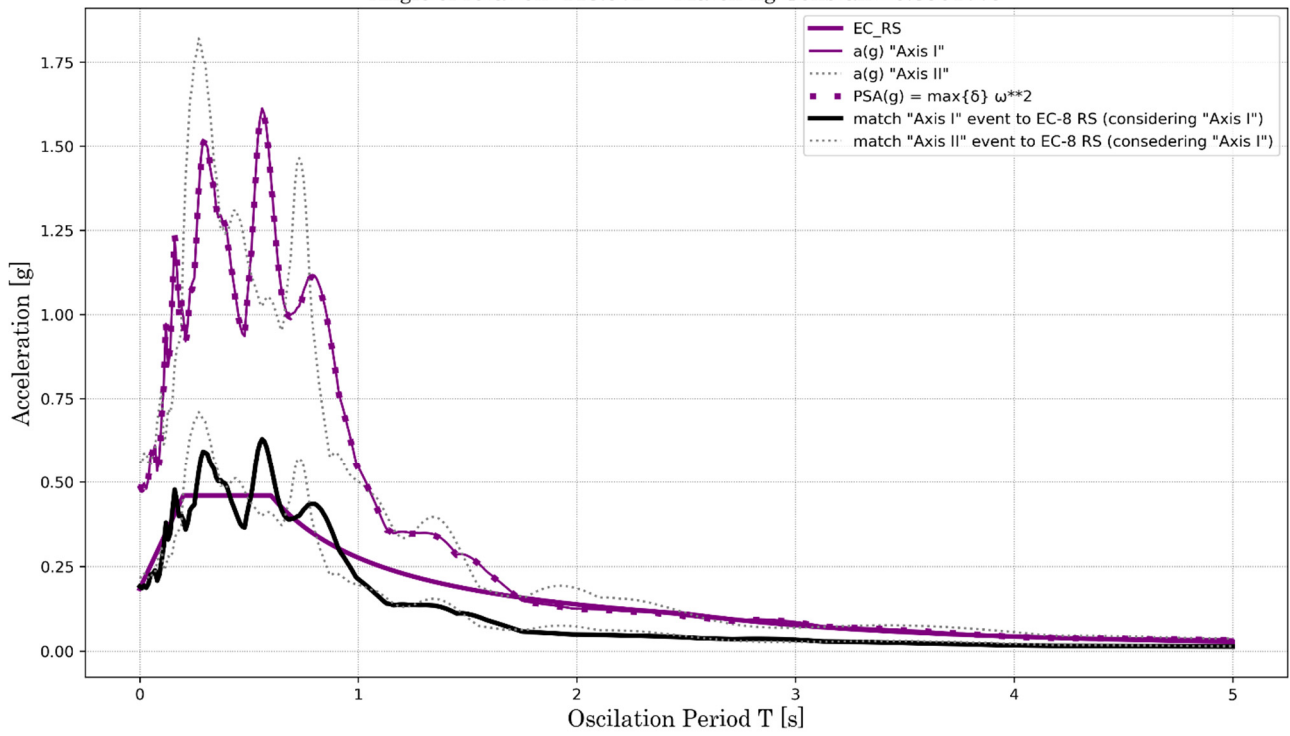


15

¹⁵ (Οι τιμές του άξονα του χρόνου πρέπει να πολλαπλασιαστούν με 0.02)

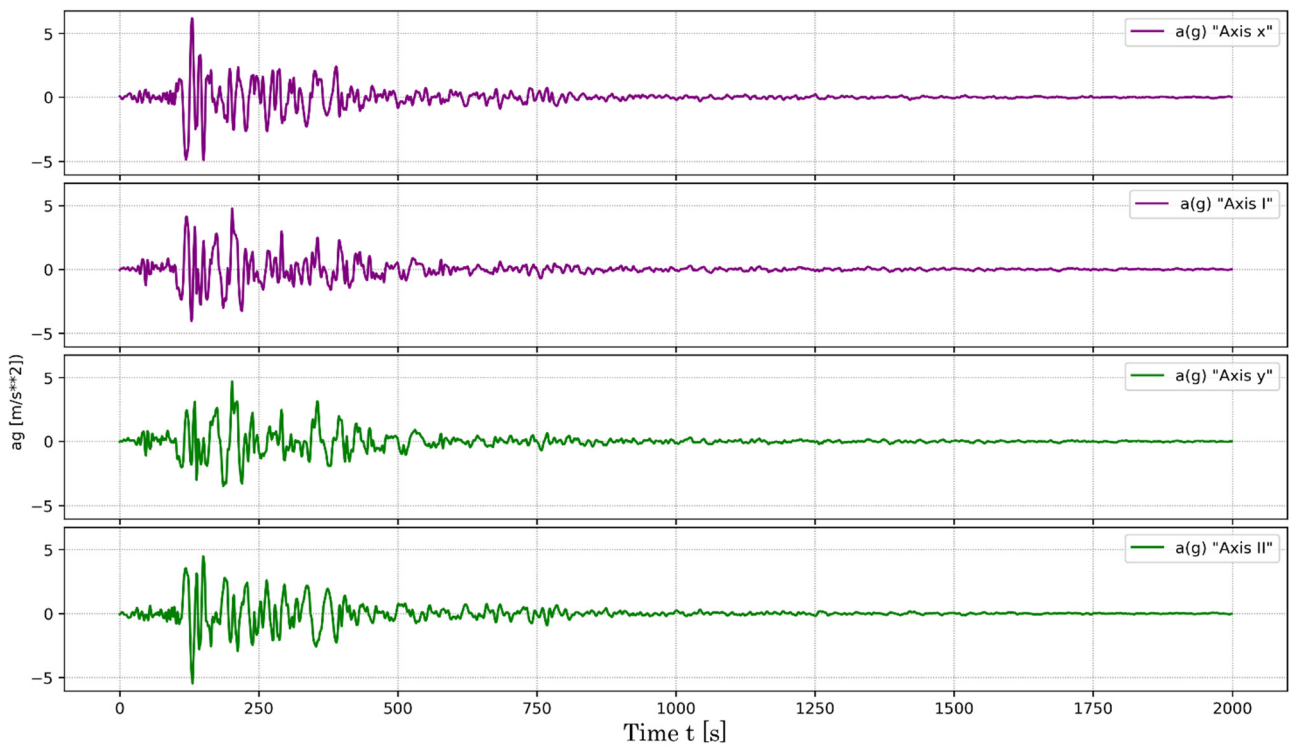
Event: ~ CORRALIT ~

Angle of rotation: 113.972° - Matching Constant: 0.3901779



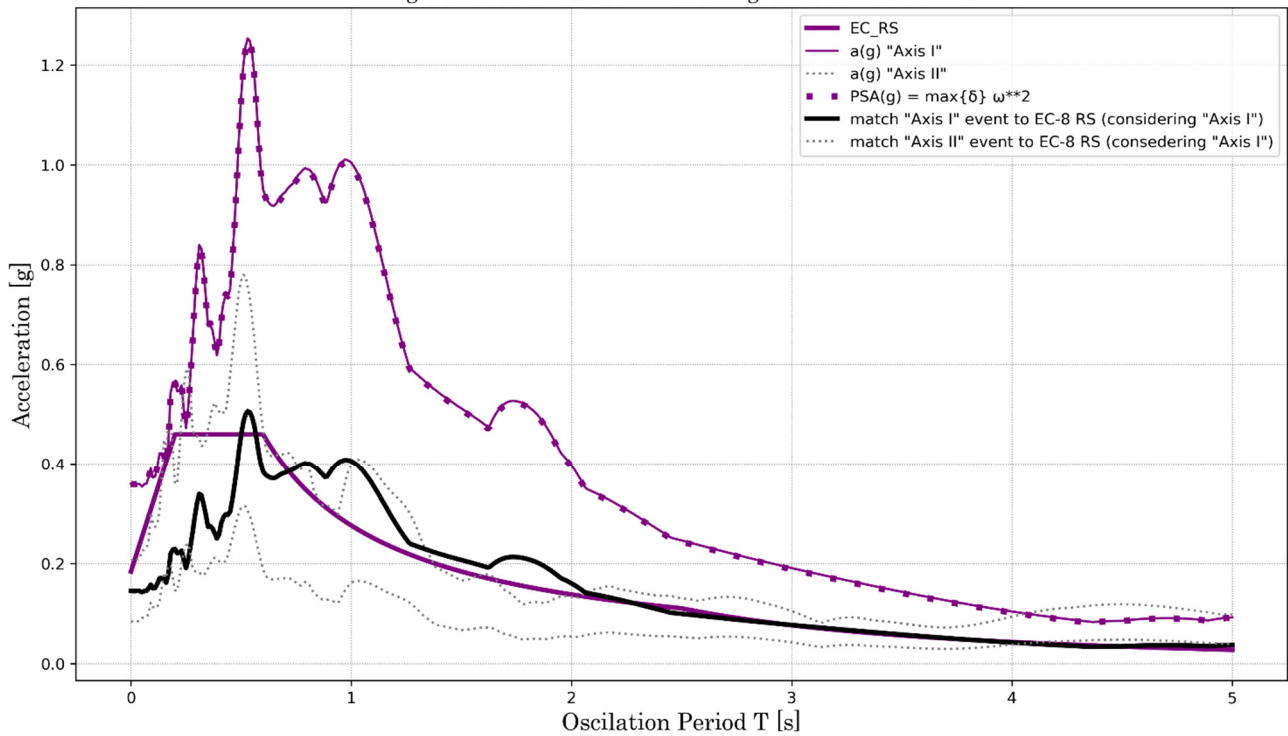
Time-History Plot: ~ CORRALIT ~

Angle of rotation: 113.972°

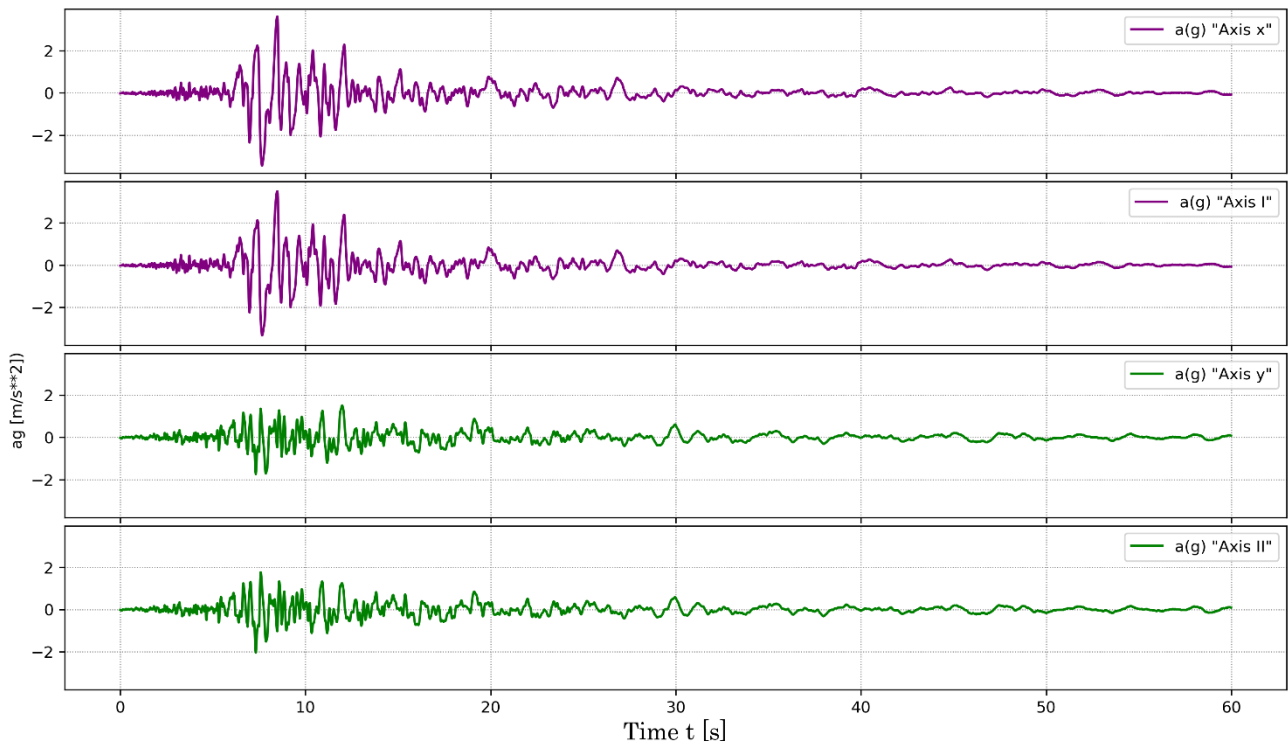


Event: ~ HOLLISTE ~

Angle of rotation: 8.975° - Matching Constant: 0.4041271

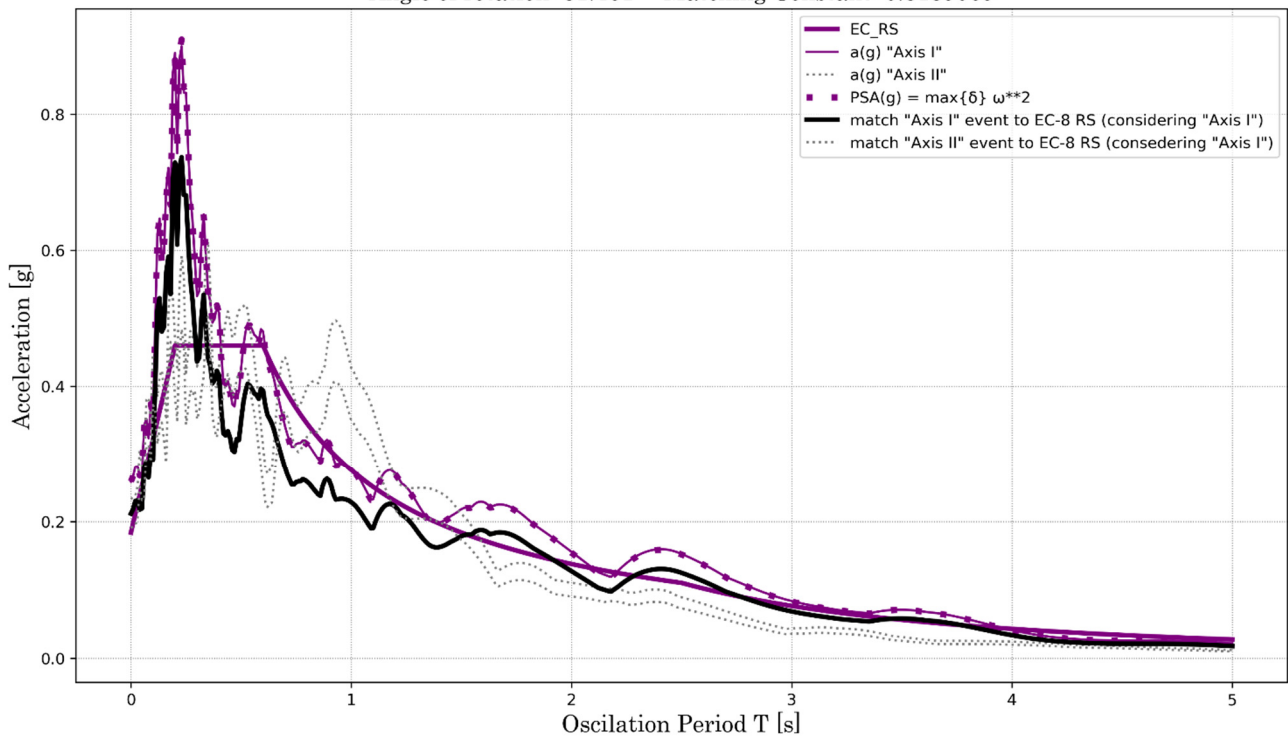


Angle of rotation: 8.975°



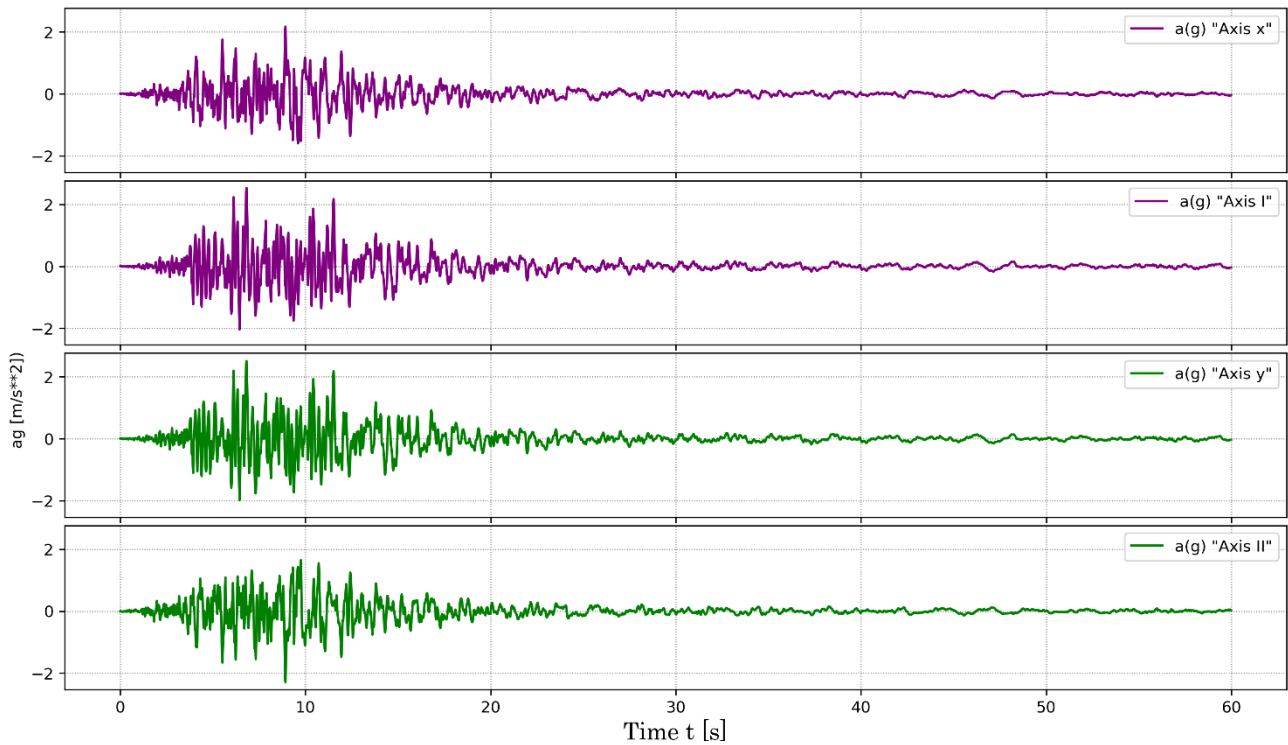
Event: ~ LACC_NOR ~

Angle of rotation: 81.461° - Matching Constant: 0.8189069



Time-History Plot: ~ LACC_NOR ~

Angle of rotation: 81.461°



ΣΤ.5. Προκαταρκτικές αναλύσεις και διαστασιολόγηση εφεδράνων

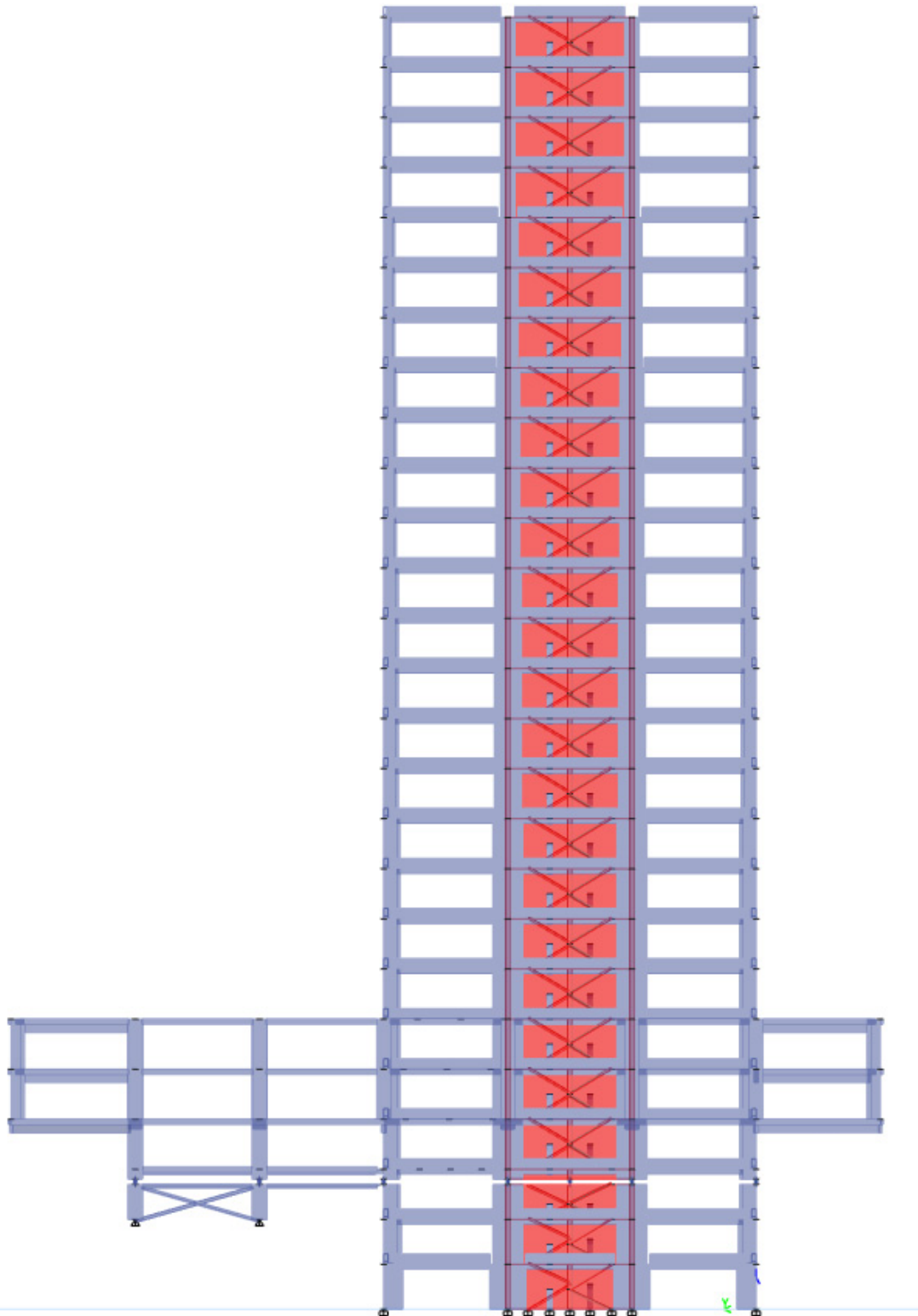
ΣΤ.5.1. Επίπεδο διαχωρισμού

Στο στατικό προσομοίωμα του φορέα ορίζεται το επίπεδο διαχωρισμού. Η επιλογή αυτού θα γινόταν στην οροφή του 3^{ου} υπογείου, όπου γίνεται η πάκτωση των στοιχείων του πύργου (βλ. Β.2, σελ. 16). Ωστόσο λόγω της ύπαρξης των σταθμών διευρυμένης επιφάνειας, δημιουργείται πρόβλημα λόγω της ανισόσταθμης θεμελίωσης. Συνεπώς επιλέγεται η δημιουργία του επιπέδου διαχωρισμού στην οροφή του ισογείου, όπως φαίνεται στην Εικόνα ΣΤ.5 και στην Εικόνα ΣΤ.6. Το επίπεδο διαχωρισμού πρακτικώς υλοποιείται μέσω δύο επιπέδων, που ορίζονται από την οροφή και τη βάση των εφεδράνων που τοποθετούνται στα δομικά στοιχεία. Το επίπεδο της βάσης οφείλει να ενισχυθεί, διότι μετά την επέμβαση χάνει τη διαφραγματική του λειτουργία, η οποία είναι σημαντική για την ομοιόμορφη μεταφορά των τεμνουσών δυνάμεων μεταξύ των στοιχείων από το επίπεδο αυτό και κάτω.¹⁶

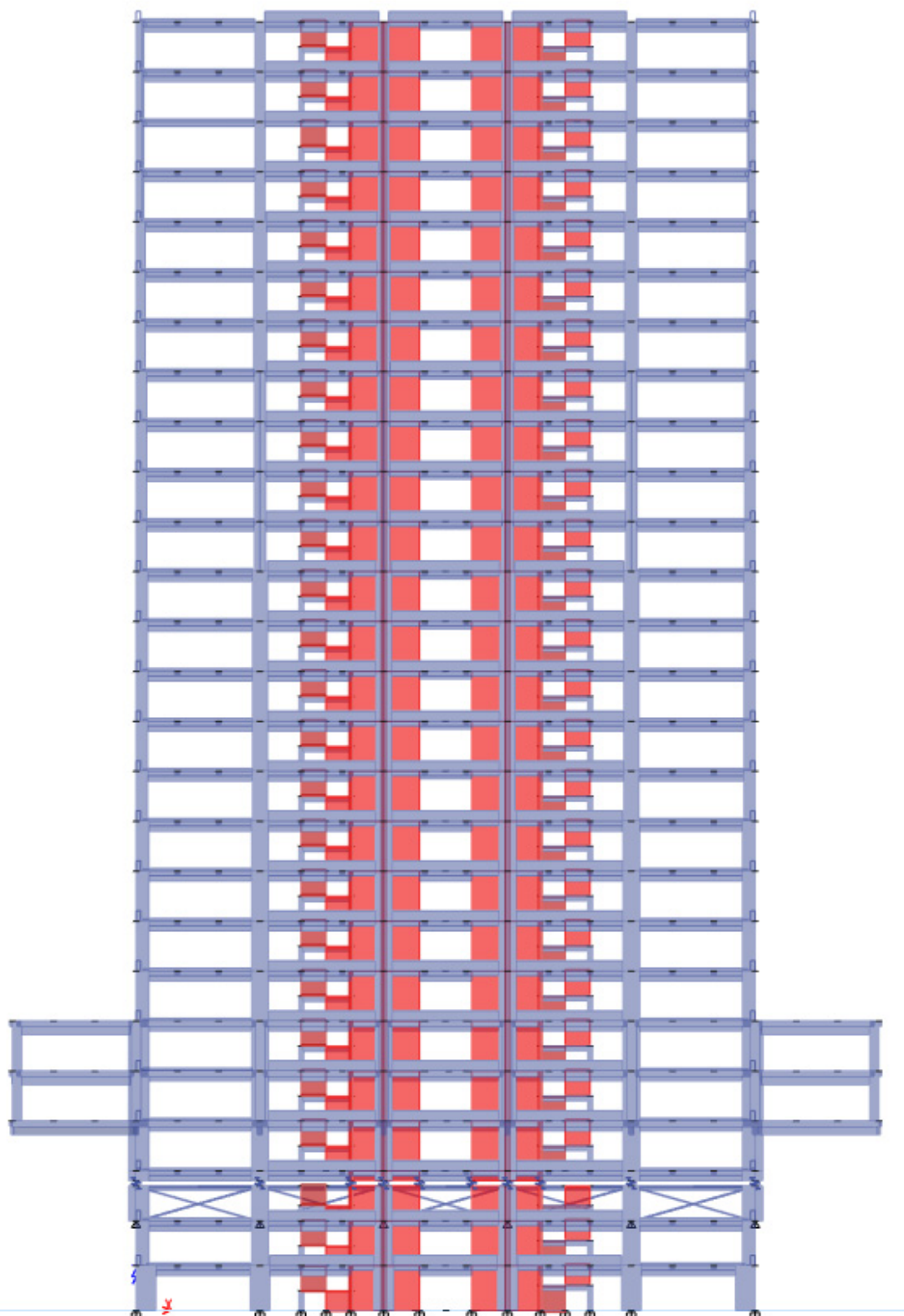
Στην της σελίδας 209 παρουσιάζονται οι θέσεις στις οποίες επιλέγεται η τοποθέτηση εφεδράνων.

Τα εφέδρανα εισάγονται με διαίρεση των μελών στο επίπεδο διαχωρισμού και αποκοπή των τμημάτων ύψους όσο το ύψος των εφεδράνων, και στη συνέχεια εισαγωγή συνδέσμων («links») στους οποίους εισάγονται τα χαρακτηριστικά που καθορίζουν την απόκρισή τους.

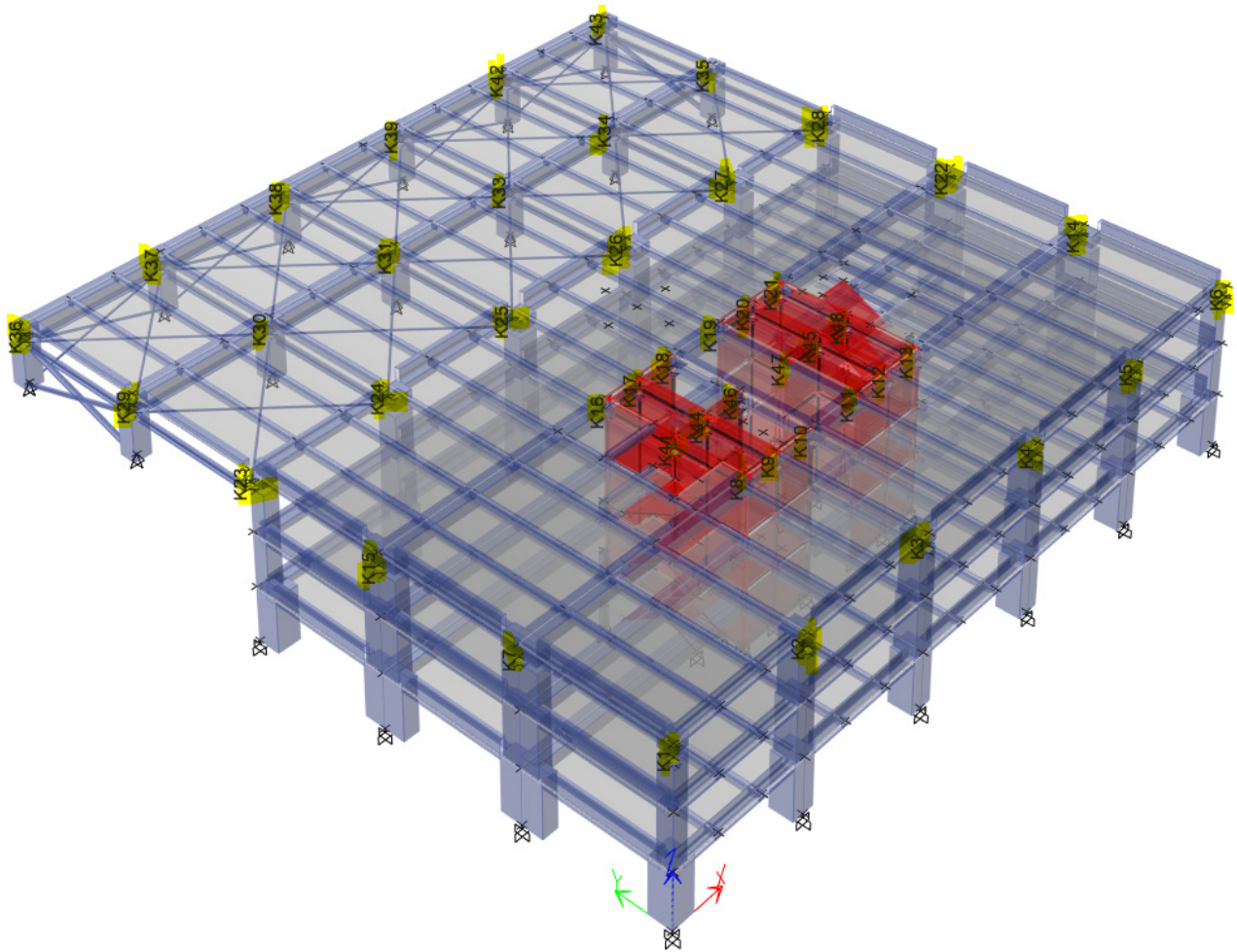
¹⁶ Έγινε «αυθαίρετη» επιλογή μεταλλικών στοιχείων για την ενίσχυση. Στο περιγράμμα κάλυψης του πυρήνα δεν τοποθετήθηκαν λόγω υπέρβασης του μέγιστου αριθμού μελών που μπορούσαν να προσομοιωθούν από τον υπολογιστή του γράφοντος.



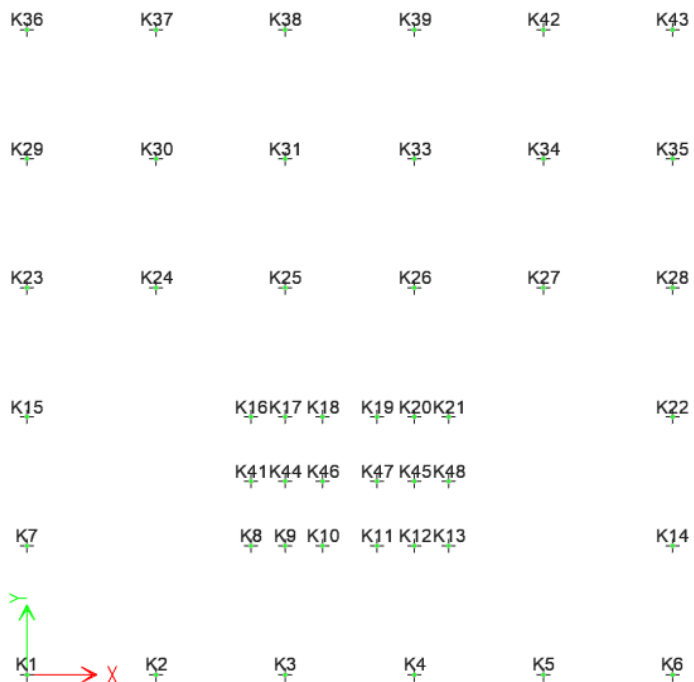
Εικόνα ΣΤ.5. Επίπεδο Διαχωρισμού. Όψη yz



Εικόνα ΣΤ.6. Επίπεδο Διαχωρισμού. Όψη xz



Εικόνα ΣΤ.7. Θέσεις τοποθέτησης εφεδράνων



Εικόνα ΣΤ.8.

Αρίθμηση
εφεδράνων.

ΣΤ.5.2. Προκαταρκτικές αναλύσεις

Για τη διαστασιολόγηση των εφενδράνων, εκτελούνται τρεις προκαταρκτικές αναλύσεις. Αρχικά, εκτελείται ανάλυση FNA για όλες τις σεισμικές καταγραφές έχοντας ορίσει μηδενική δυσκαμψία στους συνδέσμους. Η ανάλυση εκτελείται με δημιουργία μίας περίπτωσης φόρτισης «ψευδο-χρονοϊστορίας» στην οποία επιβάλλονται αργά τα φορτία του συνδυασμού $G + 0.3Q$ και στην συνέχεια δύο περιπτώσεων φόρτισης για κάθε ζεύγος σεισμικής καταγραφής (μία φορά $X \rightarrow I, Y \rightarrow II$, και μία $X \rightarrow II, Y \rightarrow -I$) που η εκτέλεσή τους ξεκινά από το τέλος της πρώτης ανάλυσης. Προηγείται όλων αυτών η εκτέλεση μίας ιδιομορφικής ανάλυσης με διανύσματα Ritz, όπου ορίζεται η απαίτηση να ληφθούν τόσες ιδιομορφές όσες απαιτούνται για υπέρβαση τουλάχιστον του 99% της ιδιομορφικής μάζας.

Ακολουθεί επεξεργασία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, από την οποία λαμβάνονται οι μέγιστες μετακινήσεις για κάθε link. Έπειτα για κάθε χρονοϊστορία¹⁷ καταγράφεται η μέγιστη τιμή που παρατηρείται από όλα τα links, ανά διεύθυνση. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας ΣΤ.1. Μέγιστη μετακίνηση

Χρονοϊστορία	U_x (mm)	U_y (mm)
ALTADENA_RS_match_Y Max	8.479	10.488
ALTADENA_RS_match_Y Min	49.37	30.309
ALTADENA_RS_match_X Max	14.536	44.788
ALTADENA_RS_match_X Min	20.459	3.988
CORRALIT_RS_match_Y Max	75.053	55.545
CORRALIT_RS_match_Y Min	105.12	62.982
CORRALIT_RS_match_X Max	59.409	92.664
CORRALIT_RS_match_X Min	57.066	78.907
HOLLISTE_RS_match_Y Max	471.441	406.084
HOLLISTE_RS_match_Y Min	83.551	168.241
HOLLISTE_RS_match_X Max	373.066	87.207
HOLLISTE_RS_match_X Min	172.405	468.423
LACC_NOR_RS_match_Y Max	322.104	370.695
LACC_NOR_RS_match_Y Min	40.862	67.632
LACC_NOR_RS_match_X Max	366.992	38.396
LACC_NOR_RS_match_X Min	70.378	349.464
Max	471.441	468.423

¹⁷ Η αναφορά σε «X» και «Y» στις αναλύσεις χρονοϊστορίας δεν σημαίνει ότι ο σεισμός υποβάλλεται μόνο σε μία διεύθυνση. Ο σεισμός υποβάλλεται σε δύο διευθύνσεις, όμως ο άξονας «I» (βλ. παράγραφο ΣΤ.4.2) ταυτίζεται με τον εκάστοτε άξονα «X» ή «Y», ανάλογα με την αναφορά.

Οι μετακινήσεις αυτές αποτελούν ένα πάνω όριο, καθώς τα εφέδρανα θα έχουν κάποια δυσκαμψία που θα οδηγήσει αναμφίβολα στον περιορισμό τους. Ωστόσο αποτελούν χρήσιμα μεγέθη αναφοράς για τα ελεύθερα περιθώρια μετακίνησης και τις διαστάσεις εν γένει που θα επιλεγούν.

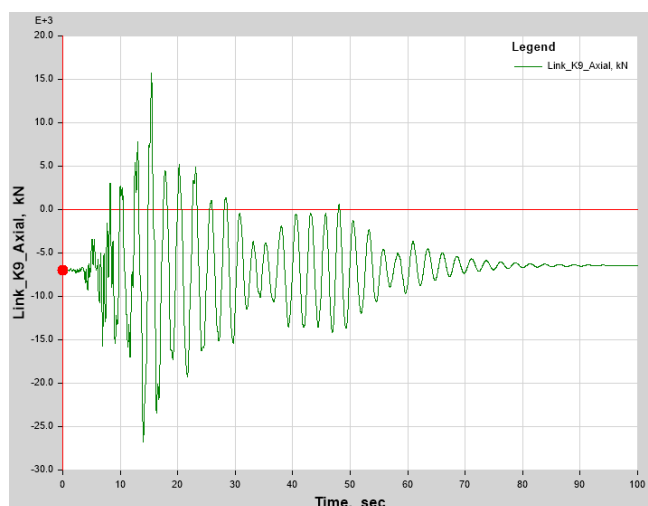
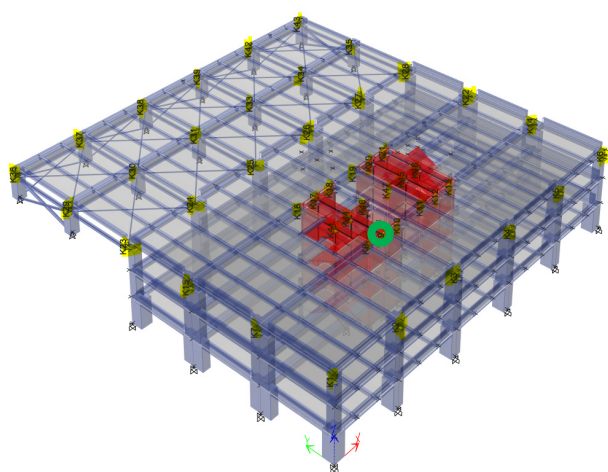
Στη συνέχεια, εκτελείται εκ νέου ανάλυση FNA όπως και πριν, έχοντας αυτή τη φορά εισάγει μία πολύ μεγάλη τιμή (πρακτικώς άπειρη) για την πλευρική δυσκαμψία των συνδέσμων. Από την ανάλυση αυτή λαμβάνεται για κάθε σύνδεσμο η μέγιστη τιμή για την τέμνουσα. Η διαστασιολόγηση των εφεδράνων γίνεται έτσι ώστε η τέμνουσα δύναμη του εφεδράνου στο πέρας του τελευταίου κλάδου μειωμένης δυσκαμψίας (μέγεθος F_{dr4}) να ισούται με ένα ποσοστό της αρχικής τιμής (46%), ίδιο για όλα τα εφέδρανα. Κάθε εφέδρανο εξετάζεται ξεχωριστά. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

Πίνακας ΣΤ.2. Μέγιστες τέμνουσες δυνάμεις συνδέσμων δίχως ελευθέρωση μετακίνησης

Link	$maxV$	$design$	Link	$maxV$	$design$
1	278	128	24	243	112
2	222	102	25	381	175
3	352	162	26	383	176
4	351	161	27	230	106
5	230	106	28	525	242
6	257	118	29	1 005	462
7	433	199	30	209	96
8	2 397	1102	31	193	89
9	2 825	1300	33	178	82
10	1 052	484	34	179	82
11	965	444	35	1 110	511
12	2 766	1272	36	1 424	655
13	2 154	991	37	827	380
14	416	192	38	821	377
15	419	193	39	824	379
16	2 268	1043	41	4 585	2109
17	3 027	1392	42	875	403
18	1 201	553	43	1 371	631
19	1 099	506	44	5 957	2740

Link	maxV	design	Link	maxV	design
20	3 042	1399	45	5 766	2652
21	3 122	1436	46	520	239
22	399	183	47	533	245
23	549	252	48	5 355	2463

Από την τελευταία ανάλυση προκύπτουν επίσης οι αξονικές δυνάμεις επί των συνδέσμων. Οι αξονικές δυνάμεις μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του σεισμικού γεγονότος. Σε ορισμένες περιπτώσεις μάλιστα έχουμε αντιστροφή προσήμου. Ενδεικτικά παρουσιάζεται η απόκριση του link K9 για την καταγραφή Lacc_Nor_RS_match_Y, όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη αντιστροφή προσήμου.



Σχήμα ΣΤ.5. Αξονική Link K9 για την καταγραφή Lacc_Nor_RS_match_Y.

Προκειμένου να διαστασιολογηθούν τα εφέδρανα λαμβάνεται υπόψη η ασυμπτωτική τιμή της αξονικής δύναμης, στο πέρας του σεισμικού γεγονότος, θεωρώντας ότι οι διακυμάνσεις θα μειωθούν δραστικά μετά την εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης.

Link	Αξονική (KN)	Link	Αξονική (KN)
1	7 018	24	7 833
2	8 441	25	7 874
3	8 472	26	7 935
4	8 516	27	7 904
5	8 492	28	6 061
6	7 168	29	2 654
7	13 691	30	2 004
8	4 846	31	2 020
9	7 013	33	2 020
10	1 899	34	2 005
11	1 891	35	2 648
12	6 811	36	3 749
13	4 499	37	2 590
14	13 998	38	2 612
15	13 796	39	2 612
16	4 763	41	7 472
17	6 978	42	2 590
18	1 887	43	3 742
19	1 873	44	10 476
20	6 771	45	10 167
21	4 505	46	1 881
22	13 835	47	1 875
23	6 018	48	6 981

Διαστασιολόγηση εφεδράνων

Μετά από διαδικασία βελτιστοποίησης για την επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων σχεδιασμού, έτσι ώστε να ικανοποιούνται όλοι οι έλεγχοι που αφορούν τον συμβατικό σχεδιασμό, την πίεση των επιφανειών ολίσθησης, την επιθυμητή μορφή των βρόγχων υστέρησης ώστε να μεγιστοποιείται η ικανότητα σε μετακίνηση και να διατηρούνται οι δυνάμεις στα επιθυμητά όρια, προκύπτει το ακόλουθο αποτέλεσμα.

Παρουσιάζεται ως παράδειγμα η διαστασιολόγηση του υπ' αριθμό 41 εφεδράνου (που τοποθετείται στον πυρήνα). Όλα τα υπόλοιπα διαστασιολογούνται ομοίως.

Επιλέγεται $D_c = 1.20 \text{ m}$. Επιθυμούμε ελάχιστη διάμετρο στις επιφάνειες ολίσθησης 2, 3 για μεγιστοποίηση του ελεύθερου περιθωρίου μετακίνησης.

$$D_c = D_s + 2 \cdot d_1 \quad (\Sigma\text{T.17})$$

$$D_s = D_R + 2 \cdot (d_2 + 0.05) \quad (\Sigma\text{T.18})$$

$$D_R = D_c - 2 \cdot (d_1 + d_2) - 0.10 \quad (\Sigma\text{T.19})$$

Επιδιώκεται $\max(d_1 + d_2)$ επομένως θα εξαντληθεί το άνω όριο της πίεσης στις επιφάνειες ολίσθησης 2, 3.

$$P_{23} < \frac{W}{\frac{\pi}{4} \cdot D_R^2} = 62 \text{ MPa} \Rightarrow D_R > \sqrt{\frac{W \text{ (KN)}}{\frac{\pi}{4} \cdot 62 \text{ 000 KPa}}} \quad (\Sigma\text{T.20})$$

$$D_R > \sqrt{\frac{W \text{ (KN)}}{\frac{\pi}{4} \cdot 62 \text{ 000 KPa}}} \Rightarrow D_c > \sqrt{\frac{W \text{ (KN)}}{\frac{\pi}{4} \cdot 62 \text{ 000 KPa}}} + 2 \cdot (d_1 + d_2) - 0.10 \Rightarrow$$

$$(d_1 + d_2) < \frac{D_c - \sqrt{\frac{W \text{ (KN)}}{\frac{\pi}{4} \cdot 62 \text{ 000 KPa}}} - 0.10}{2} \quad (\Sigma\text{T.21})$$

Για το κάτω όριο της πίεσης των επιφανειών ολίσθησης, θα πρέπει να ισχύει

$$D_s < \sqrt{\frac{W \text{ (KN)}}{\frac{\pi}{4} \cdot 13 \text{ 800 KPa}}} \quad (\Sigma\text{T.22})$$

Με αντικατάσταση της εξίσωσης (ΣΤ.17) στην (ΣΤ.22) προκύπτει

$$d_1 > \frac{D_c - \sqrt{\frac{W (KN)}{\frac{\pi}{4} \cdot 13\,800 (KPa)}}}{2} \quad (\Sigma\text{T.23})$$

Η μετακίνηση τη στιγμή της επαφής του ολισθήρα με τον δίσκο περιορισμού μετακίνησης της επιφάνειας 4 προκύπτει με εφαρμογή της εξίσωσης (ΣΤ.12), ενώ η τιμή της δύναμης προκύπτει από την εξίσωση (ΣΤ.11).

Εκτελούμε τις πράξεις.

$$\begin{aligned} \min D_R &= \sqrt{\frac{W (KN)}{\frac{\pi}{4} \cdot 62\,000 KPa}} = \sqrt{\frac{7472 (KN)}{\frac{\pi}{4} \cdot 62\,000 KPa}} = 0.392 m \\ \max(d_1 + d_2) &= \frac{D_c - \sqrt{\frac{W (KN)}{\frac{\pi}{4} \cdot 62\,000 KPa}} - 0.10}{2} = \frac{1.20 m - 0.392 m - 0.10 m}{2} = 0.354 m \\ \min d_1 &= \frac{1.20 m - \sqrt{\frac{7472 (KN)}{\frac{\pi}{4} \cdot 13\,800 (KPa)}}}{2} = \frac{1.20 m - 0.830 m}{2} = 0.185 m \end{aligned}$$

Επιλέγεται $d_1 = 0.307 m$ ($= \max(d_1 + d_2) \cdot 86.8\%^{18}$). Επομένως $d_2 = 0.047$.

$h_1 = h_4 = 0.10 m$, $h_2 = h_3 = 0.06 m$ για όλα τα εφάδρανα, $D_s = 0.585 m$, $D_R = 0.392$.

Επιλέγεται επίσης $R_1 = 1.593 m$, $R_2 = 0.36 m$. Με εφαρμογή των εξισώσεων που περιγράφονται στην παράγραφο 0, προκύπτουν τα μεγέθη $R_{1,eff} = R_{4,eff} = 1.493 m$, $R_{2,eff} = R_{3,eff} = 0.302 m$, $d_{1,act} = d_{4,act} = 0.288 m$, $d_{2,act} = d_{3,act} = 0.039 m$, $P_{1,4} = 27\,779 KPa$, $\mu_1 = 0.082$, $\mu_4 = 0.106$, $Pr_{2,3} = 62\,000 KPa$ (επιδιωκόμενο \Rightarrow αναμενόμενο), $\mu_{2,3} = 0.032$. $F_{f1} = 611 KN$, $F_{f2,3} = 240 KN$, $F_{f4} = 793 KN$. $u' = 30 mm$, $u'' = 74 mm$, $u_{dr,1} = 577 mm$, $u_{dr,4} = 621 mm$, $u_{max} = 654 mm$. $F_{dr,1} = 2\,052 KN$, $F_{dr,4} = 2\,235 KN$, $F_{max} = 2\,646 KN$. Για το συγκεκριμένο εφάδρανο (υπ' αριθμό 41) η μέγιστη επιτρεπόμενη τέμνουσα μετά την ενίσχυση έχει προκύψει $V_{max} = 2109 KN$. Επομένως η διαφορά είναι μόλις 125 KN και κρίνεται αποδεκτή. Εκτελούνται οι έλεγχοι των εξισώσεων (ΣΤ.14), (ΣΤ.15) και ελέγχεται το μέγεθος της πίεσης που απαιτεί η εξίσωση (ΣΤ.13) (παράγραφος 0).

¹⁸ Το ίδιο ποσοστό εφαρμόζεται και στα υπόλοιπα εφάδρανα.

$$\frac{(h_1 + h_4) - (h_2 + h_3)}{2} = \frac{2 \cdot 0.10 - 2 \cdot 0.06}{2} = 0.04 \text{ m} > 0.0254 \text{ m} \quad \text{OK}$$

$$\frac{h_2 + h_3}{D_r} = \frac{2 \cdot 0.03}{0.392} = 0.306 < 1 \quad \text{OK}$$

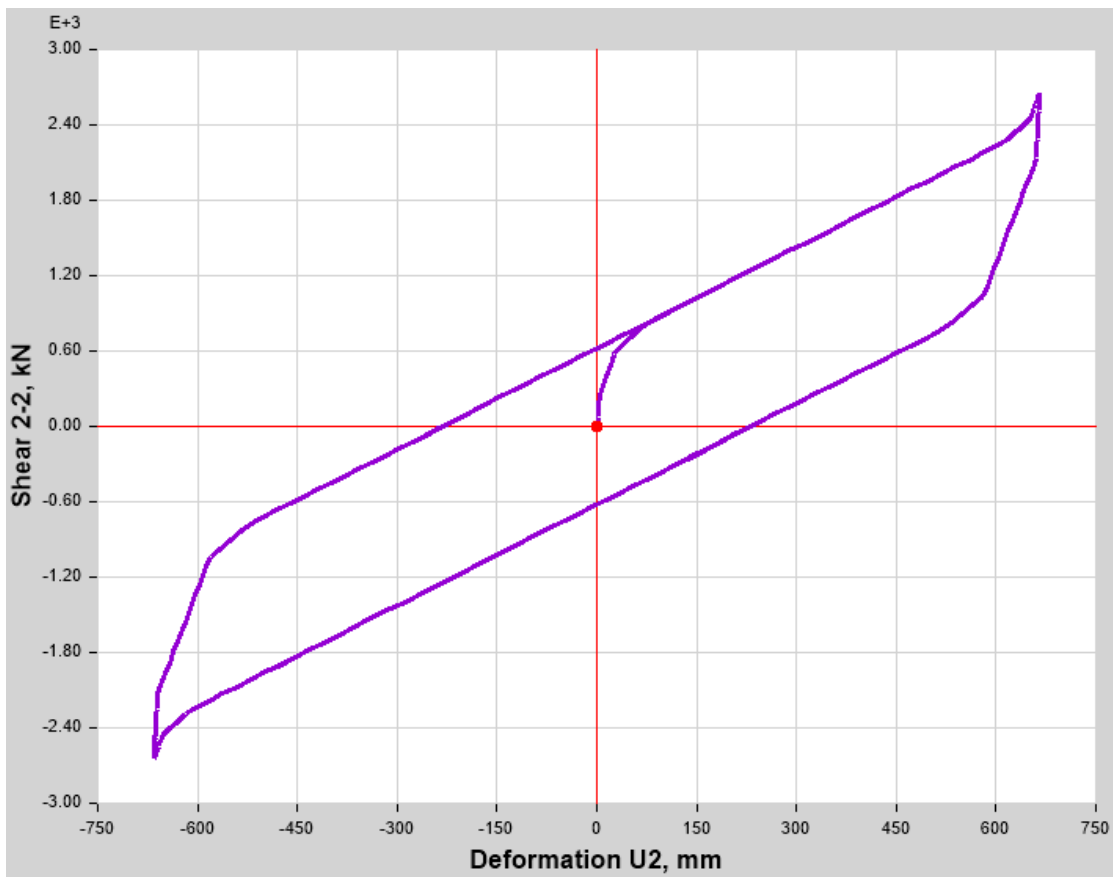
$$P_{1,4} = 27\,779 \text{ KPa} \geq 13\,800 \text{ MPa} \quad \text{OK}$$

$$Pr_{2,3} = 62\,000 \text{ KPa} \leq 62\,000 \text{ MPa} \quad \text{OK}$$

Ο σχεδιασμός είναι αποδεκτός.

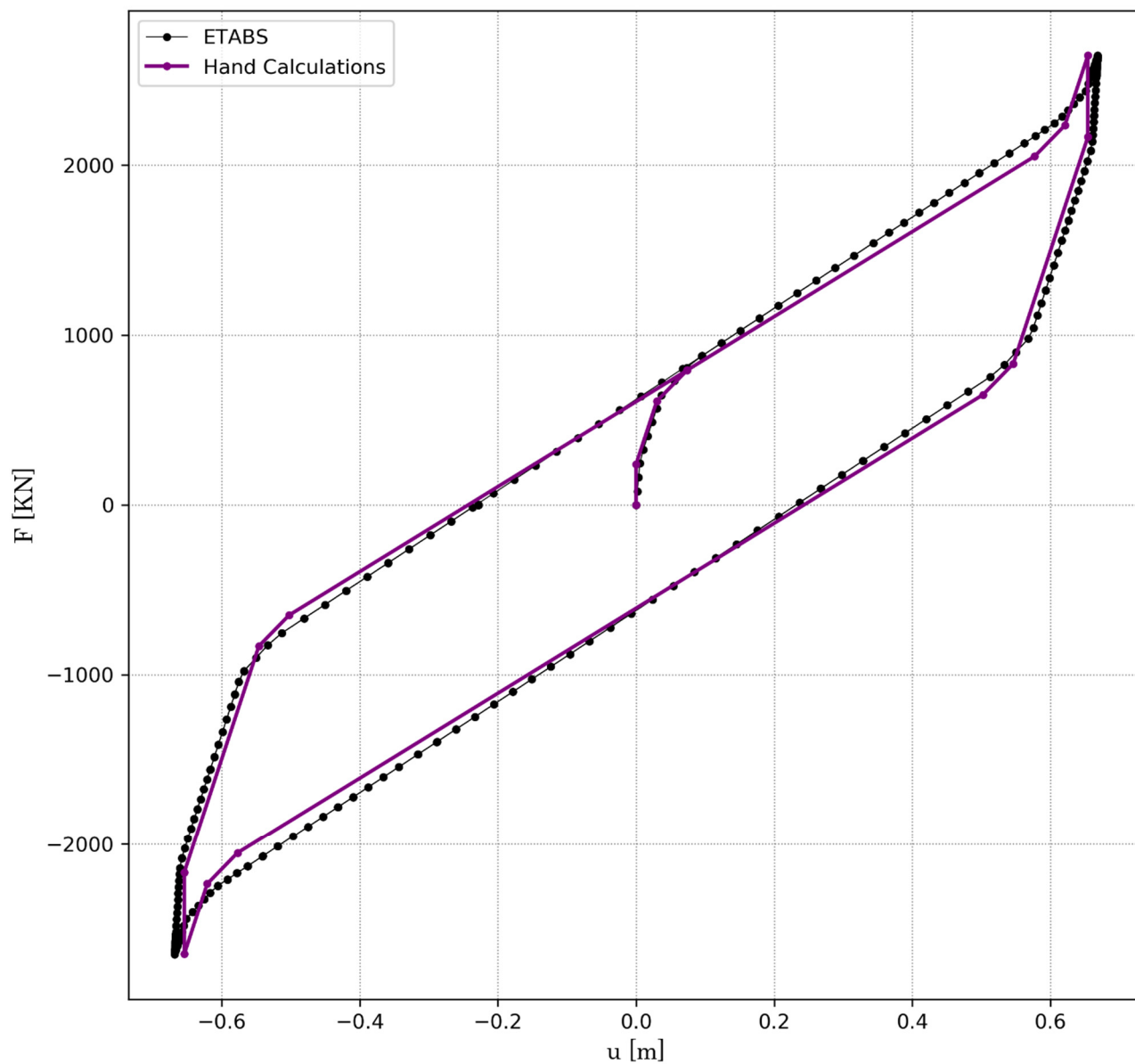
Με εκτέλεση περαιτέρω πράξεων, προκύπτουν τα ζεύγη δύναμης – μετακίνησης για τον βρόγχο υστέρησης του εφεδράνου.

Για τα εφένδρανα τριβής τύπου TFP, το λογισμικό ETABS έχει ενσωματώσει ένα εξειδικευμένο link, με το οποίο εισάγοντας τις παραμέτρους σχεδιασμού των εφεδράνων (ακτίνες, ελεύθερα περιθώρια μετακίνησης, συντελεστές τριβής κλπ.), υπάρχει η δυνατότητα ακριβούς πρόβλεψης της συμπεριφοράς τους όταν υποβάλλονται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η υστερητική συμπεριφορά για ημιτονοειδή φόρτιση του εφεδράνου στο ETABS.



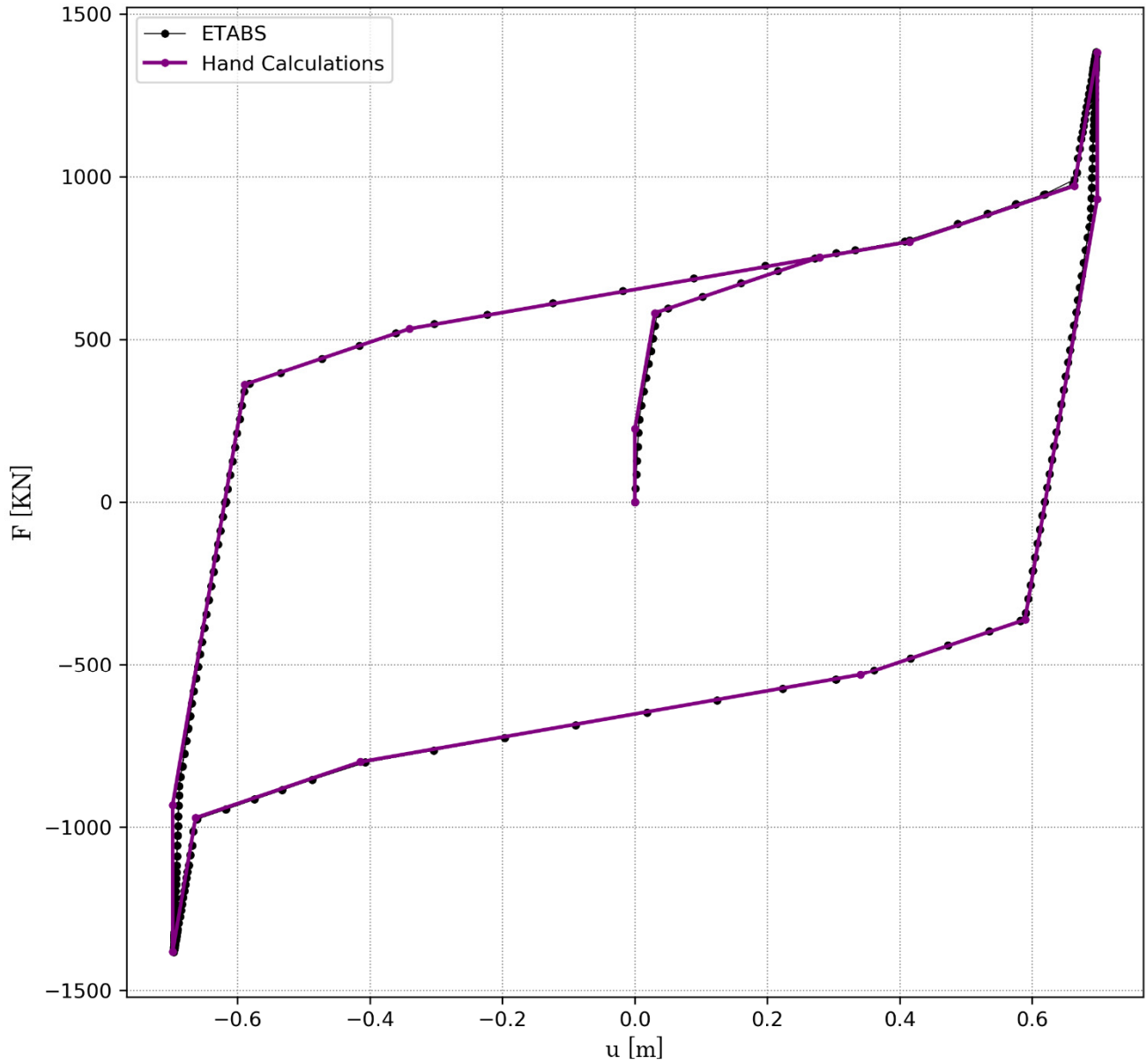
Από το σχήμα που ακολουθεί φαίνεται πως η αριθμητική επίλυση με εφαρμογή των σχέσεων συμπίπτει με το μοντέλο που χρησιμοποιείται από το λογισμικό για την πρόβλεψη της υστερητικής συμπεριφοράς.

Force - Displacement Relationship



Σχήμα ΣΤ.6. Σύγκριση της υστερητικής συμπεριφοράς για το εφέδρανο 41.

Force - Displacement Relationship



Σχήμα ΣΤ.7. Σύγκριση της υστερητικής συμπεριφοράς για το εφέδρανο 1.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι παράμετροι σχεδιασμού που υπολογίστηκαν για όλα τα εφέδρανα.

Πίνακας ΣΤ.3. Παράμετροι σχεδιασμού εφεδράνων.

	D_c	D_r	d_1	d_2	h_1	h_2	R_1	R_2	μ_1	μ_4	μ_{23}
1	1.2	0.380	0.313	0.048	0.1	0.06	10.000	0.356	0.083	0.107	0.032
2	1.2	0.416	0.297	0.045	0.1	0.06	10.000	0.375	0.080	0.104	0.032
3	1.2	0.417	0.296	0.045	0.1	0.06	10.000	0.376	0.080	0.104	0.032
4	1.2	0.418	0.296	0.045	0.1	0.06	10.000	0.376	0.079	0.104	0.032
5	1.2	0.418	0.296	0.045	0.1	0.06	10.000	0.376	0.080	0.104	0.032
6	1.2	0.384	0.311	0.047	0.1	0.06	10.000	0.358	0.082	0.107	0.032
7	1.2	0.530	0.247	0.038	0.1	0.06	10.000	0.443	0.071	0.096	0.032
8	1.2	0.315	0.340	0.052	0.1	0.06	2.800	0.325	0.089	0.113	0.032
9	1.2	0.379	0.313	0.048	0.1	0.06	3.930	0.356	0.083	0.107	0.032
10	1.2	0.197	0.392	0.060	0.1	0.06	2.790	0.275	0.102	0.126	0.032
11	1.2	0.197	0.392	0.060	0.1	0.06	3.340	0.275	0.102	0.126	0.032
12	1.2	0.374	0.315	0.048	0.1	0.06	3.910	0.353	0.083	0.108	0.032
13	1.2	0.304	0.345	0.053	0.1	0.06	3.090	0.319	0.090	0.114	0.032
14	1.2	0.536	0.245	0.037	0.1	0.06	10.000	0.447	0.071	0.095	0.032
15	1.2	0.532	0.246	0.037	0.1	0.06	10.000	0.445	0.071	0.095	0.032
16	1.2	0.313	0.342	0.052	0.1	0.06	3.060	0.323	0.089	0.113	0.032
17	1.2	0.379	0.313	0.048	0.1	0.06	3.265	0.355	0.083	0.107	0.032
18	1.2	0.197	0.392	0.060	0.1	0.06	2.130	0.275	0.102	0.126	0.032
19	1.2	0.196	0.392	0.060	0.1	0.06	2.489	0.275	0.102	0.126	0.032
20	1.2	0.373	0.316	0.048	0.1	0.06	3.049	0.352	0.083	0.108	0.032
21	1.2	0.304	0.345	0.053	0.1	0.06	1.528	0.319	0.090	0.114	0.032
22	1.2	0.533	0.246	0.037	0.1	0.06	10.000	0.445	0.071	0.095	0.032
23	1.2	0.352	0.325	0.049	0.1	0.06	10.000	0.342	0.085	0.110	0.032
24	1.2	0.401	0.303	0.046	0.1	0.06	10.000	0.367	0.081	0.105	0.032
25	1.2	0.402	0.303	0.046	0.1	0.06	10.000	0.368	0.081	0.105	0.032
26	1.2	0.404	0.302	0.046	0.1	0.06	10.000	0.369	0.081	0.105	0.032
27	1.2	0.403	0.303	0.046	0.1	0.06	10.000	0.368	0.081	0.105	0.032
28	1.2	0.353	0.324	0.049	0.1	0.06	10.000	0.342	0.085	0.110	0.032
29	1.2	0.233	0.376	0.057	0.1	0.06	7.388	0.289	0.098	0.122	0.032
30	1.2	0.203	0.389	0.059	0.1	0.06	10.000	0.277	0.101	0.126	0.032
31	1.2	0.204	0.389	0.059	0.1	0.06	10.000	0.277	0.101	0.125	0.032
33	1.2	0.204	0.389	0.059	0.1	0.06	10.000	0.277	0.101	0.125	0.032
34	1.2	0.203	0.389	0.059	0.1	0.06	10.000	0.277	0.101	0.126	0.032
35	1.2	0.233	0.376	0.057	0.1	0.06	5.189	0.289	0.098	0.122	0.032
36	1.2	0.277	0.357	0.054	0.1	0.06	6.337	0.307	0.093	0.117	0.032
37	1.2	0.231	0.377	0.057	0.1	0.06	10.000	0.288	0.098	0.122	0.032
38	1.2	0.232	0.377	0.057	0.1	0.06	10.000	0.288	0.098	0.122	0.032
39	1.2	0.232	0.377	0.057	0.1	0.06	10.000	0.288	0.098	0.122	0.032
41	1.2	0.392	0.307	0.047	0.1	0.06	1.593	0.362	0.082	0.106	0.032
42	1.2	0.231	0.377	0.057	0.1	0.06	13.061	0.288	0.098	0.122	0.032
43	1.2	0.277	0.357	0.054	0.1	0.06	7.257	0.307	0.093	0.117	0.032
44	1.2	0.464	0.276	0.042	0.1	0.06	1.567	0.402	0.076	0.100	0.032

	D_c	D_r	d_1	d_2	h_1	h_2	R_1	R_2	μ_1	μ_4	μ_{23}
45	1.2	0.457	0.279	0.042	0.1	0.06	1.598	0.398	0.076	0.101	0.032
46	1.2	0.197	0.392	0.060	0.1	0.06	10.000	0.275	0.102	0.126	0.032
47	1.2	0.196	0.392	0.060	0.1	0.06	10.000	0.275	0.102	0.126	0.032
48	1.2	0.379	0.313	0.048	0.1	0.06	1.146	0.355	0.083	0.107	0.032

ΣΤ.6. Ανάλυση μετά την ενίσχυση

Μετά την εισαγωγή όλων των παραμέτρων σχεδιασμού στους συνδέσμους, εκτελέστηκε εκ νέου η ανάλυση. Ωστόσο, υπήρξαν προβλήματα σύγκλισης τα οποία έπαιτα από επίμονες και επανειλημμένες απόπειρες δεν κατέστη εφικτό να λυθούν.

Για τις περισσότερες αναλύσεις των σεισμικών καταγραφών, μετά την ολοκλήρωση της ανάλυσης επιβολής των κατακόρυφων φορτίων $G + 0.3W$ (βλ. περιγραφή της διαδικασίας στην ενότητα (ΣΤ.5.2)), αμέσως μετά τη μετάβαση στο πρώτο βήμα της ουσιαστικής ανάλυσης, το λογισμικό διέκοπτε τη διαδικασία λόγω αριθμητικής αστάθειας. Πιθανολογείται ότι το πρόβλημα οφείλεται στο ίδιο το λογισμικό, διότι αδυνατεί να υποβάλλει τα απαιτούμενα διανύσματα φόρτισης κατά την αξονική διεύθυνση $U1$ των links για τον υπολογισμό των ιδιομορφών Ritz, θεωρώντας ότι δεν έχουν μάζα, ενώ μάζα έχει οριστεί. Διαπιστώθηκε επίσης ότι για οποιονδήποτε άλλο τύπο link, εκτός από triple pendulum isolator, οι αναλύσεις εκτελούνται δίχως κανένα πρόβλημα!

```
*** WARNING ***  
FOR STARTING LOAD VECTOR:      LINK/DEF =      K1/U1  
LOAD IS APPLIED TO ONE OR MORE MASSLESS DEGREES OF FREEDOM,  
CORRESPONDING RITZ MODES MAY BE UNAVAILABLE OR INACCURATE FOR DYNAMICS  
  
*** WARNING ***  
FOR STARTING LOAD VECTOR:      LINK/DEF =      K2/U1  
LOAD IS APPLIED TO ONE OR MORE MASSLESS DEGREES OF FREEDOM,  
CORRESPONDING RITZ MODES MAY BE UNAVAILABLE OR INACCURATE FOR DYNAMICS  
  
*** WARNING ***  
FOR STARTING LOAD VECTOR:      LINK/DEF =      K3/U1  
LOAD IS APPLIED TO ONE OR MORE MASSLESS DEGREES OF FREEDOM,  
CORRESPONDING RITZ MODES MAY BE UNAVAILABLE OR INACCURATE FOR DYNAMICS  
  
*** WARNING ***  
FOR STARTING LOAD VECTOR:      LINK/DEF =      K4/U1  
LOAD IS APPLIED TO ONE OR MORE MASSLESS DEGREES OF FREEDOM,  
CORRESPONDING RITZ MODES MAY BE UNAVAILABLE OR INACCURATE FOR DYNAMICS  
  
*** WARNING ***
```

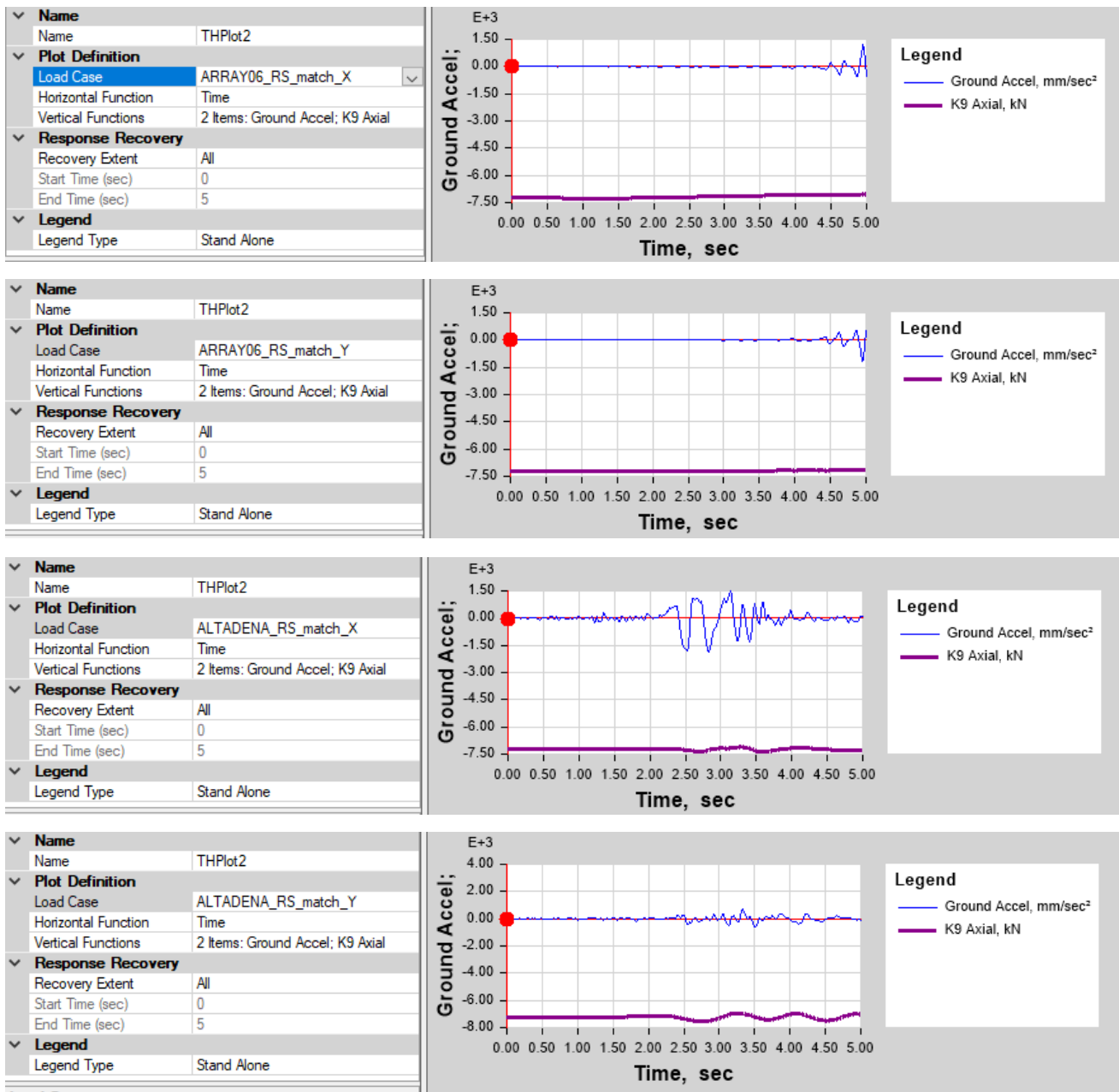
Για κάποιες από τις αναλύσεις χρονοϊστορίας εκτελέστηκαν μερικά βήματα συνήθως περίπου 8 δευτερολέπτων και έπειτα η ανάλυση σταματούσε λόγω μη αποδεκτής απόκλισης.

```
*** WARNING ***  
CONVERGENCE FAILURE OCCURED IN  
CASE: HOLLISTE_RS_MATCH_X  
AT TIME STEP      14, RELATIVE ERROR = 1.798E+308
```

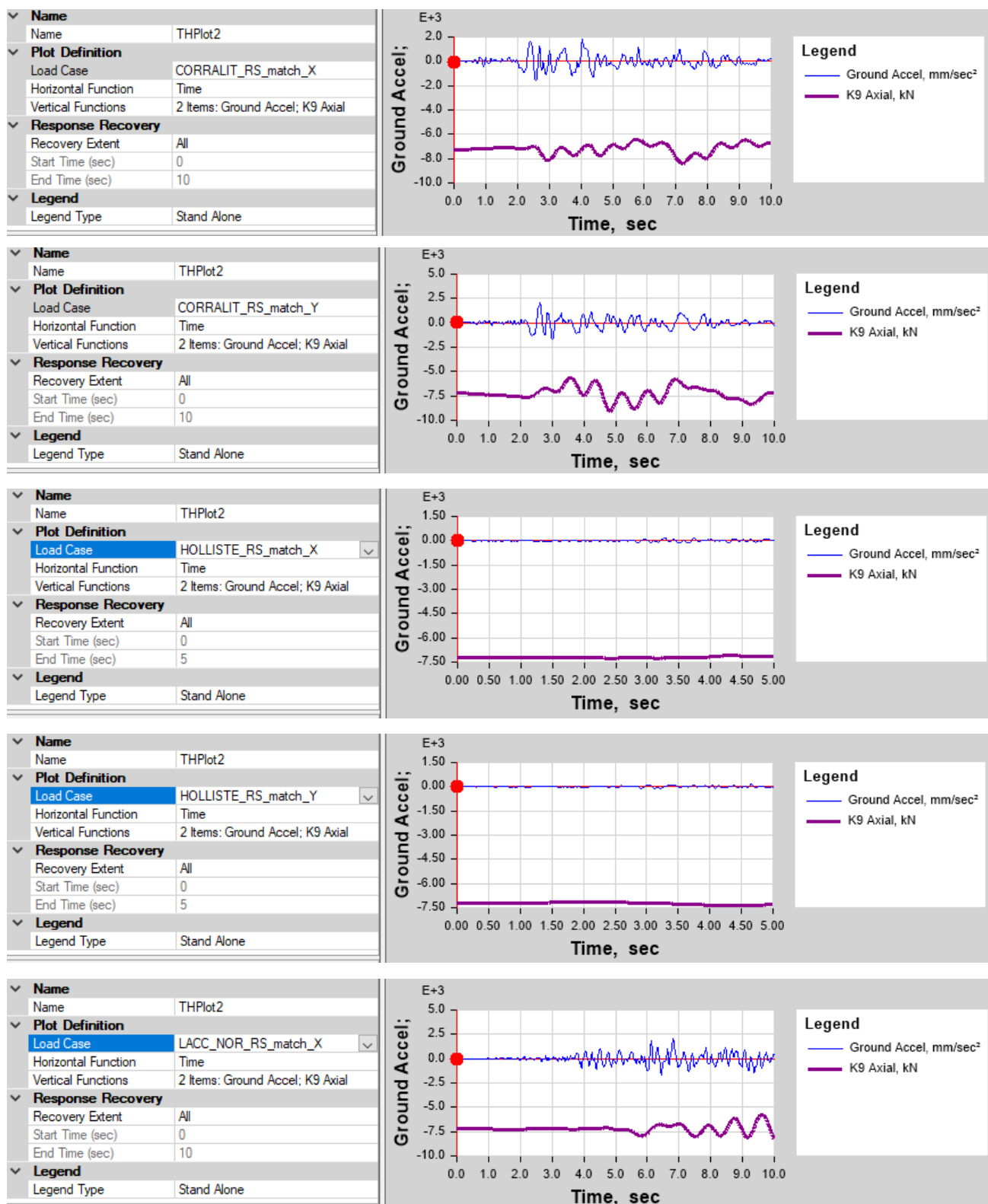
Ωστόσο, έστω με αυτά τα αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν ορισμένα συμπεράσματα.

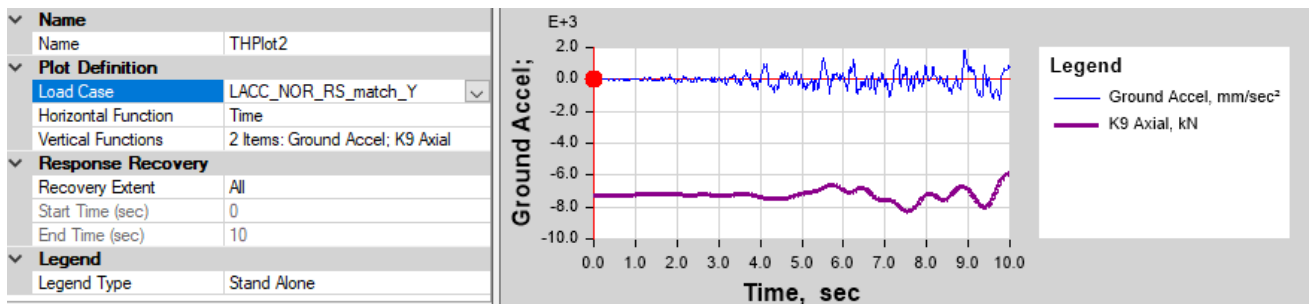
ΣΤ.6.1. Δεν παρατηρείται UPLIFT εφεδράνων

Παρόλο που για την ανάλυση που έγινε δίχως διακοπή της συνέχειας εντοπίστηκε εφελκυσμός για το link K9 και τον συνδυασμό «Lacc_Nor_RS_match_Y», με την ανάλυση μετά την ενίσχυση η αξονική παρά τις διακυμάνσεις που έχει, παραμένει πάντα θλιπτική.

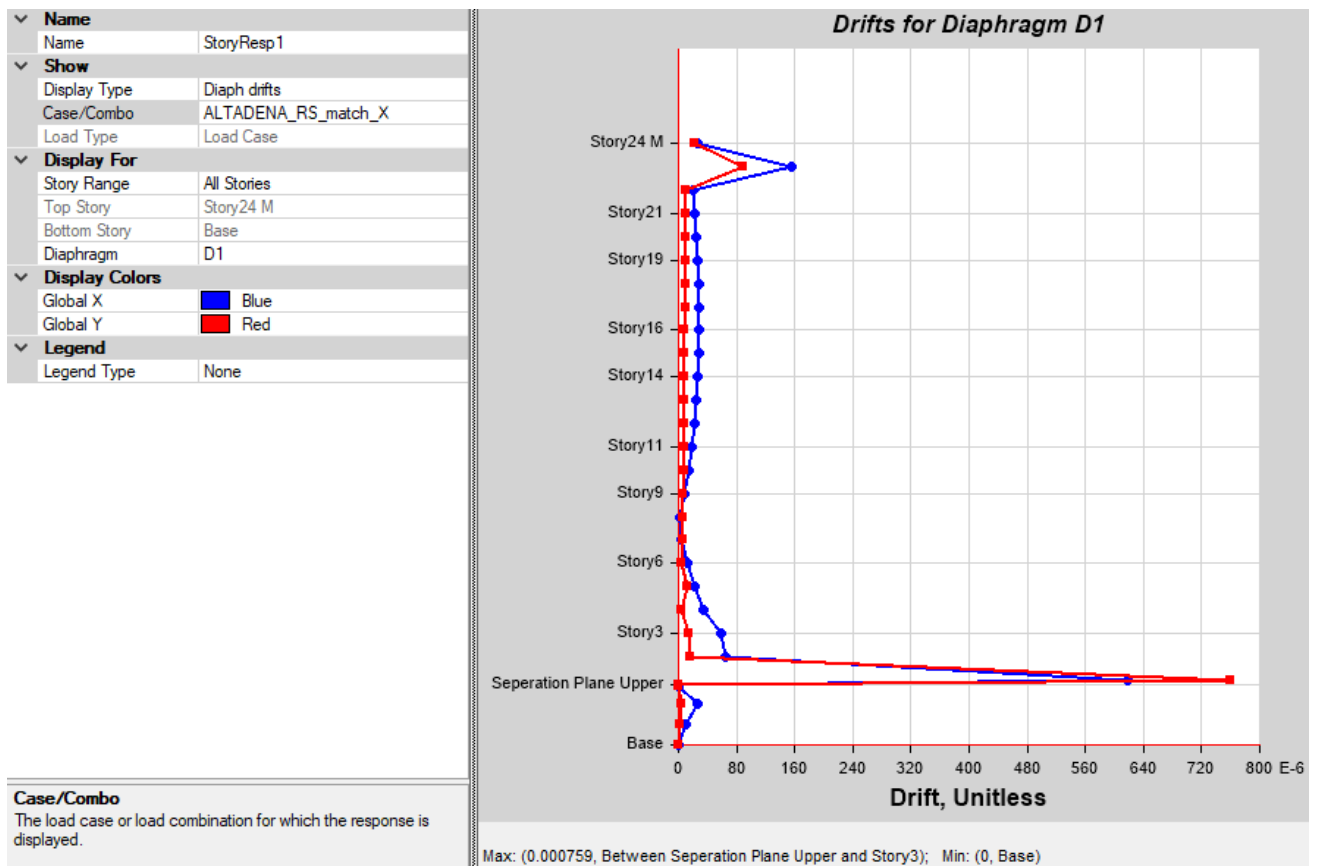


Πρόταση σεισμικής μόνωσης του φορέα με εφάδρανα τριβής τύπου Triple Friction Pendulum

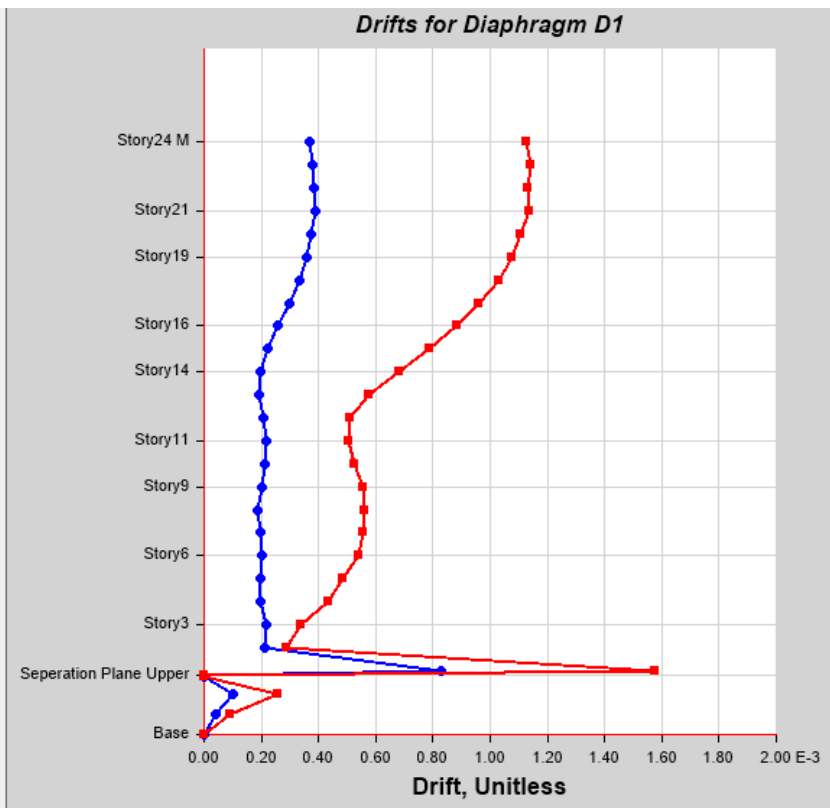




ΣΤ.6.2. Οι σχετικές μετακινήσεις ορόφων (drifts) περιορίζονται σημαντικά



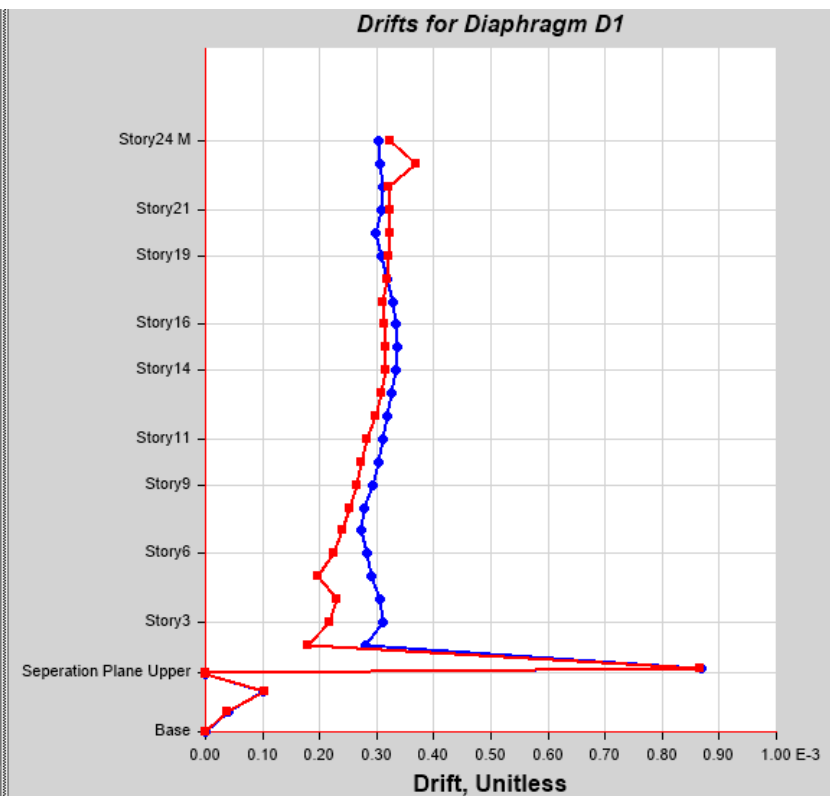
Name	
Name	StoryResp1
Show	
Display Type	Diaph drifts
Case/Combo	ALTADENA_RS_match_Y
Output Type	Max
Load Type	Load Case
Display For	
Story Range	All Stories
Top Story	Story24 M
Bottom Story	Base
Diaphragm	D1
Display Colors	
Global X	Blue
Global Y	Red
Legend	
Legend Type	None



Max: (0.001576, Between Separation Plane Upper and Story3); Min: (0, Base)

Case/Combo
The load case or load combination for which the response is displayed.

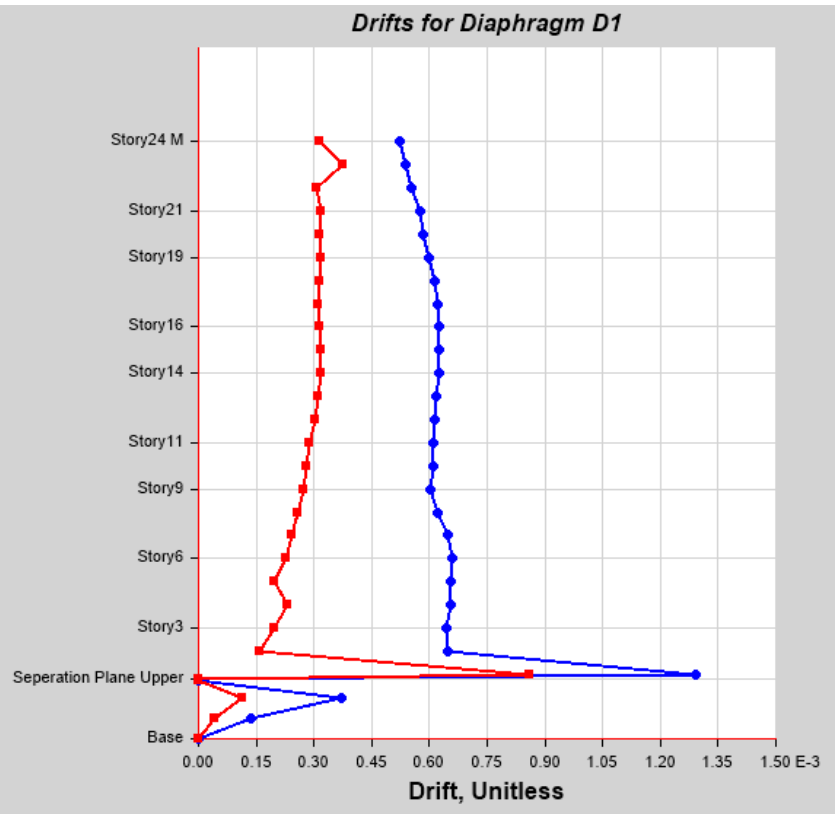
Name	
Name	StoryResp1
Show	
Display Type	Diaph drifts
Case/Combo	ARRAY06_RS_match_X
Output Type	Max
Load Type	Load Case
Display For	
Story Range	All Stories
Top Story	Story24 M
Bottom Story	Base
Diaphragm	D1
Display Colors	
Global X	Blue
Global Y	Red
Legend	
Legend Type	None



Max: (0.000868, Between Separation Plane Upper and Story3); Min: (0, Base)

Case/Combo
The load case or load combination for which the response is displayed.

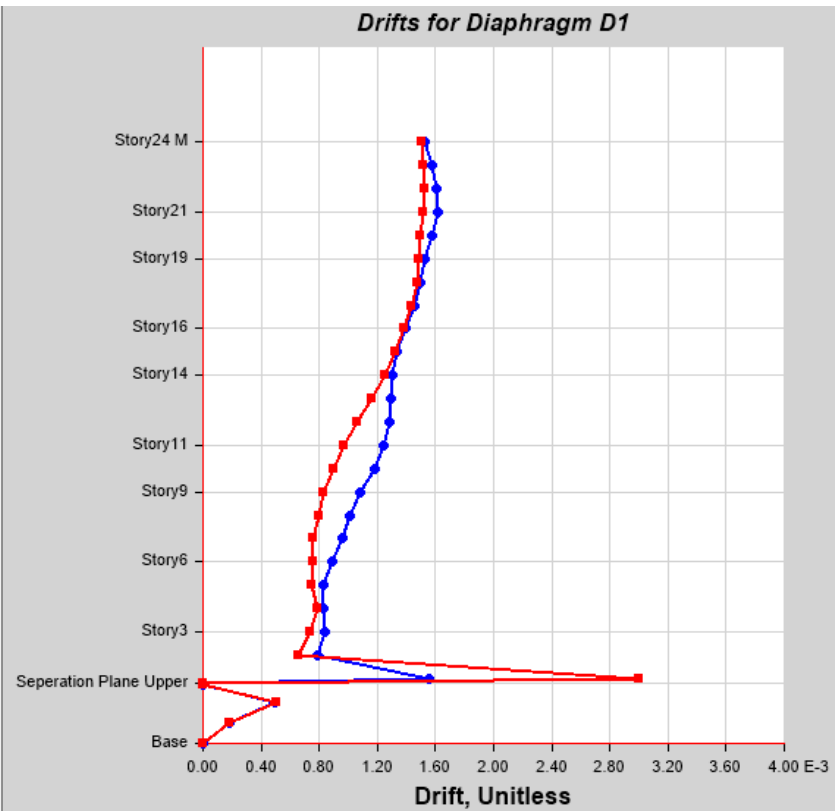
Name	
Name	StoryResp 1
Show	
Display Type	Diaph drifts
Case/Combo	ARRAY06_RS_match_Y
Output Type	Max
Load Type	Load Case
Display For	
Story Range	All Stories
Top Story	Story24 M
Bottom Story	Base
Diaphragm	D1
Display Colors	
Global X	Blue
Global Y	Red
Legend	
Legend Type	None



Case/Combo
The load case or load combination for which the response is displayed.

Max: (0.00129, Between Separation Plane Upper and Story3); Min: (0, Base)

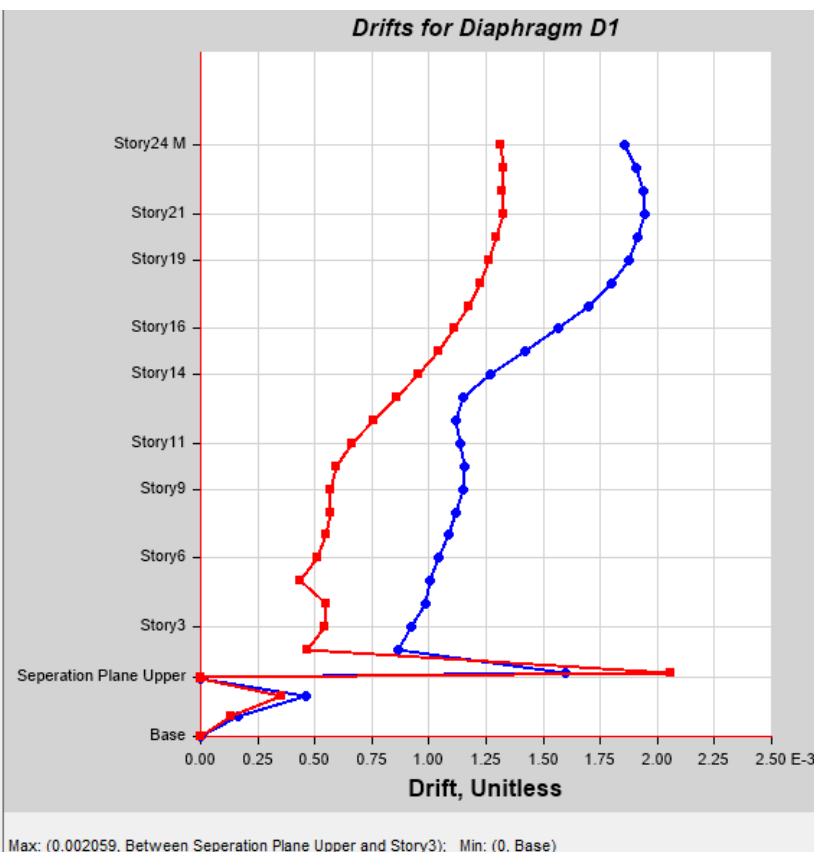
Name	
Name	StoryResp 1
Show	
Display Type	Diaph drifts
Case/Combo	CORRALIT_RS_match_X
Output Type	Max
Load Type	Load Case
Display For	
Story Range	All Stories
Top Story	Story24 M
Bottom Story	Base
Diaphragm	D1
Display Colors	
Global X	Blue
Global Y	Red
Legend	
Legend Type	None



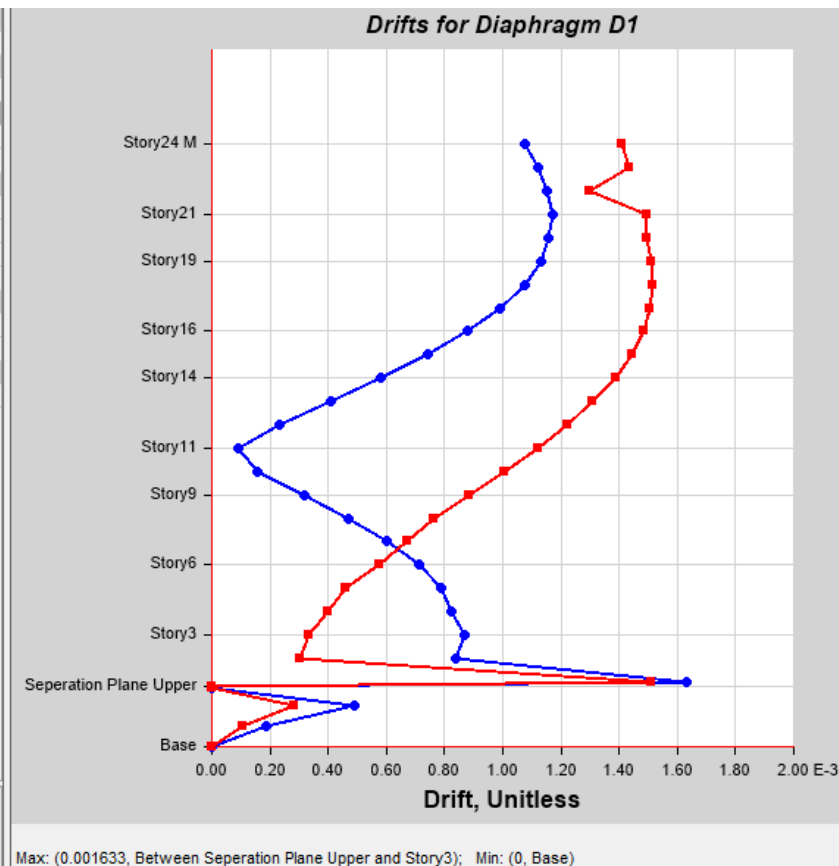
Case/Combo
The load case or load combination for which the response is displayed.

Max: (0.003002, Between Separation Plane Upper and Story3); Min: (0, Base)

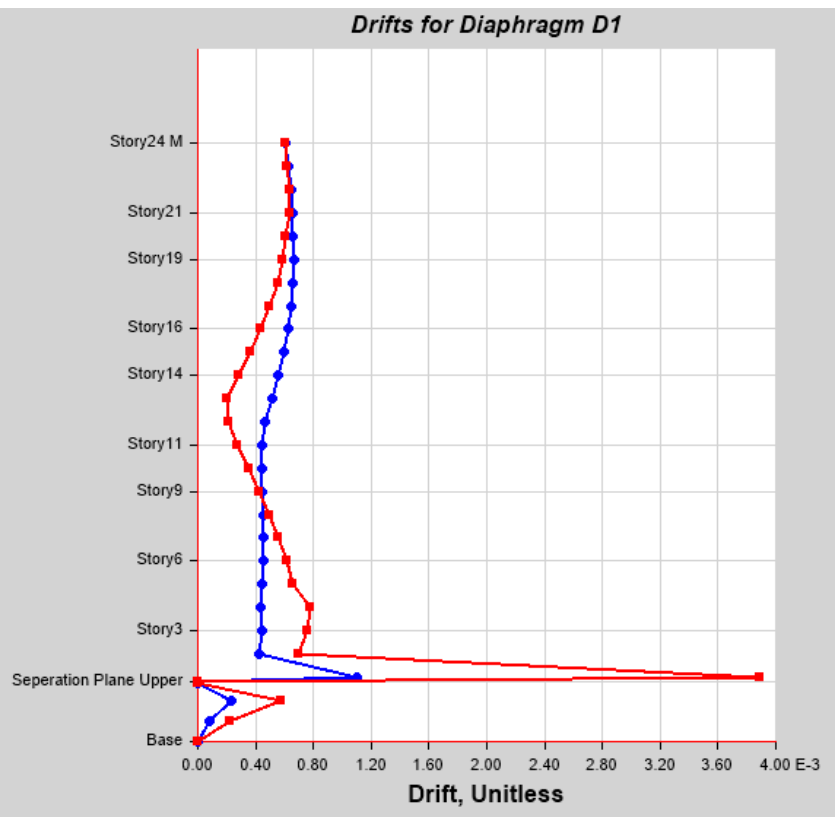
Name	StoryResp1
Show	
Display Type	Diaph drifts
Case/Combo	CORRALIT_RS_match_Y
Output Type	Max
Load Type	Load Case
Display For	
Story Range	All Stories
Top Story	Story24 M
Bottom Story	Base
Diaphragm	D1
Display Colors	
Global X	Blue
Global Y	Red
Legend	
Legend Type	None



Name	StoryResp1
Show	
Display Type	Diaph drifts
Case/Combo	HOLLISTE_RS_match_X
Output Type	Max
Load Type	Load Case
Display For	
Story Range	All Stories
Top Story	Story24 M
Bottom Story	Base
Diaphragm	D1
Display Colors	
Global X	Blue
Global Y	Red
Legend	
Legend Type	None



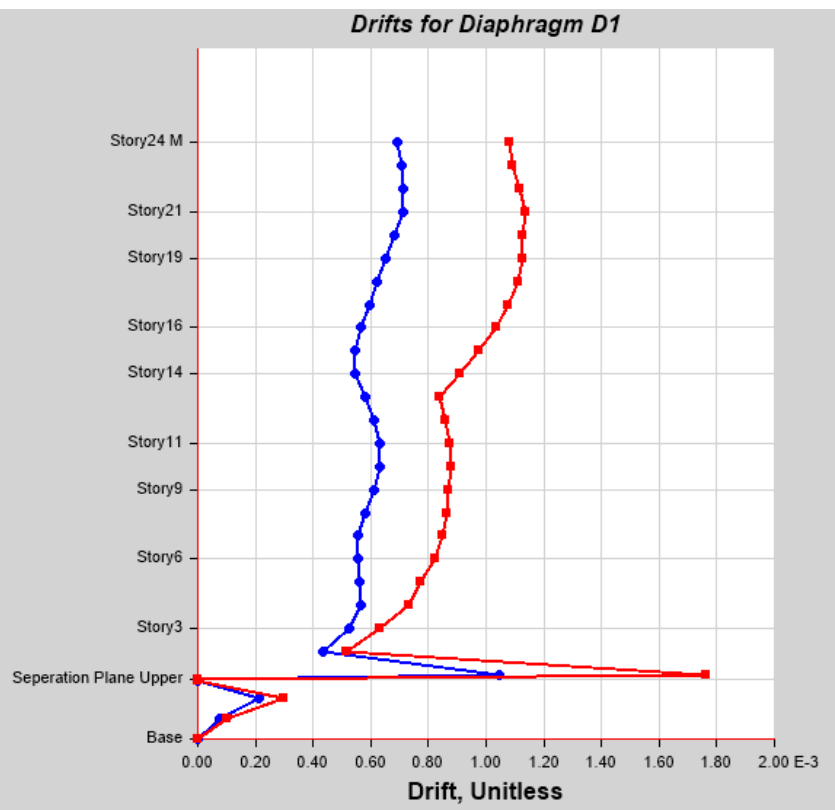
Name	
Name	StoryResp 1
Show	
Display Type	Diaph drifts
Case/Combo	HOLLISTE_RS_match_Y
Output Type	Max
Load Type	Load Case
Display For	
Story Range	All Stories
Top Story	Story24 M
Bottom Story	Base
Diaphragm	D1
Display Colors	
Global X	Blue
Global Y	Red
Legend	
Legend Type	None



Case/Combo
The load case or load combination for which the response is displayed.

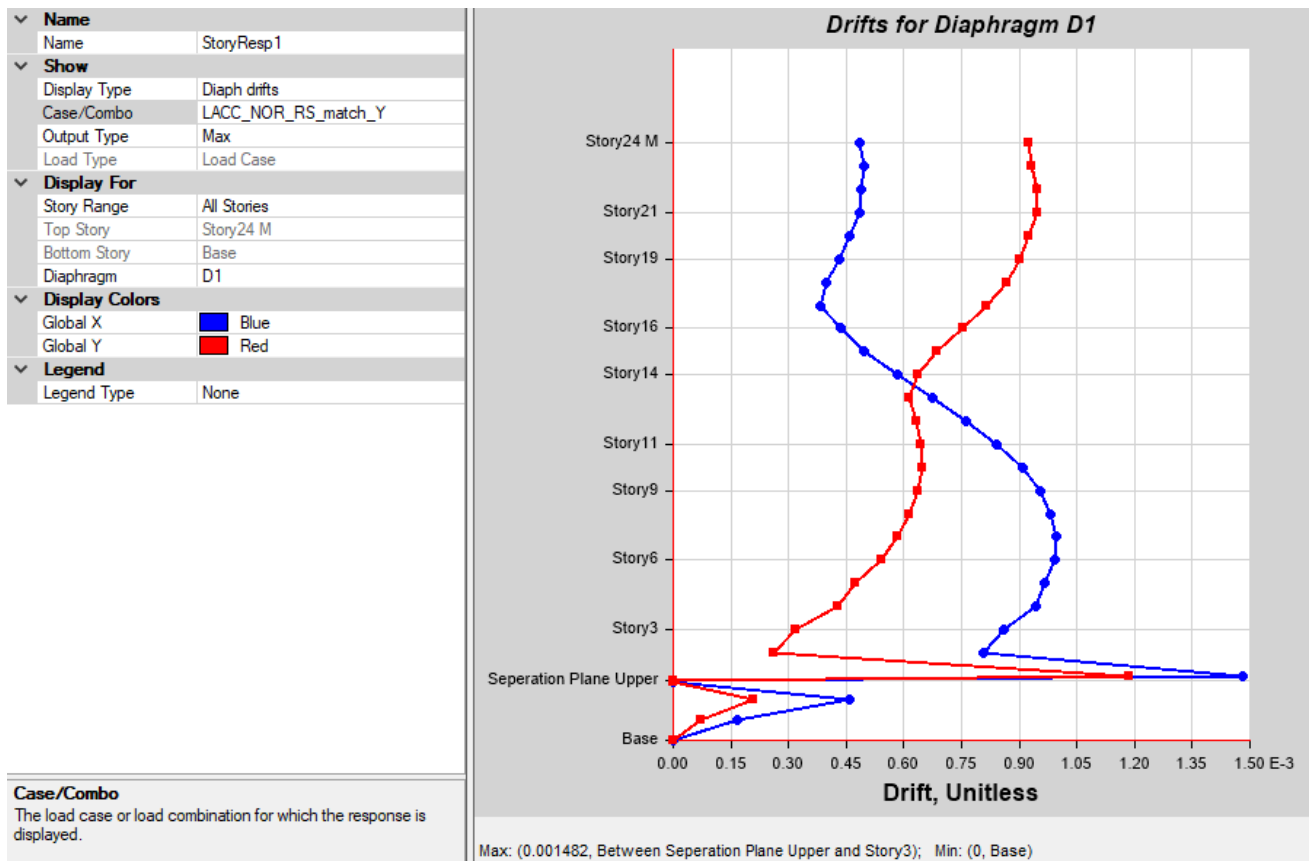
Max: (0.003887, Between Separation Plane Upper and Story3); Min: (0, Base)

Name	
Name	StoryResp 1
Show	
Display Type	Diaph drifts
Case/Combo	LACC_NOR_RS_match_X
Output Type	Max
Load Type	Load Case
Display For	
Story Range	All Stories
Top Story	Story24 M
Bottom Story	Base
Diaphragm	D1
Display Colors	
Global X	Blue
Global Y	Red
Legend	
Legend Type	None



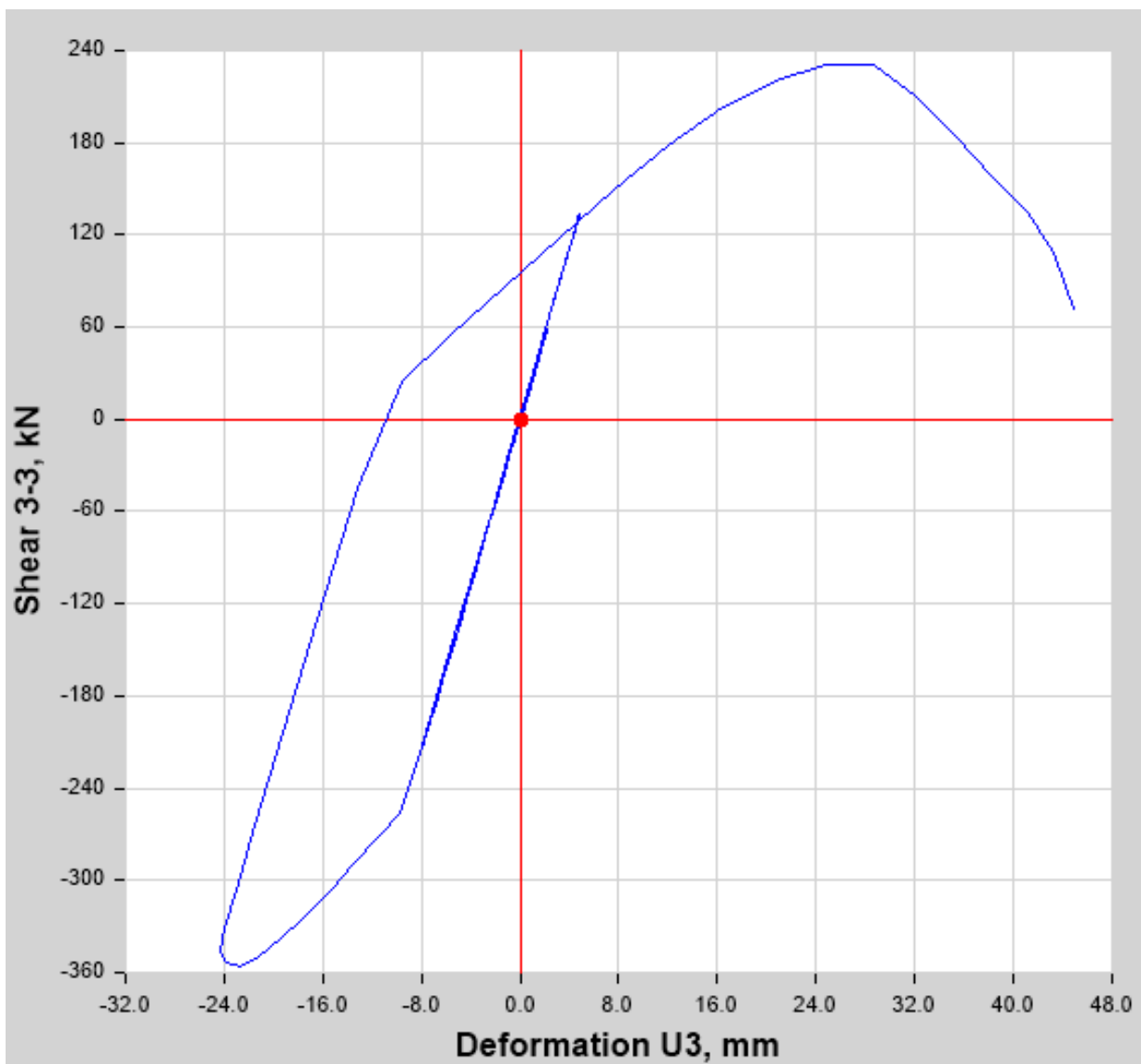
Case/Combo
The load case or load combination for which the response is displayed.

Max: (0.001762, Between Separation Plane Upper and Story3); Min: (0, Base)

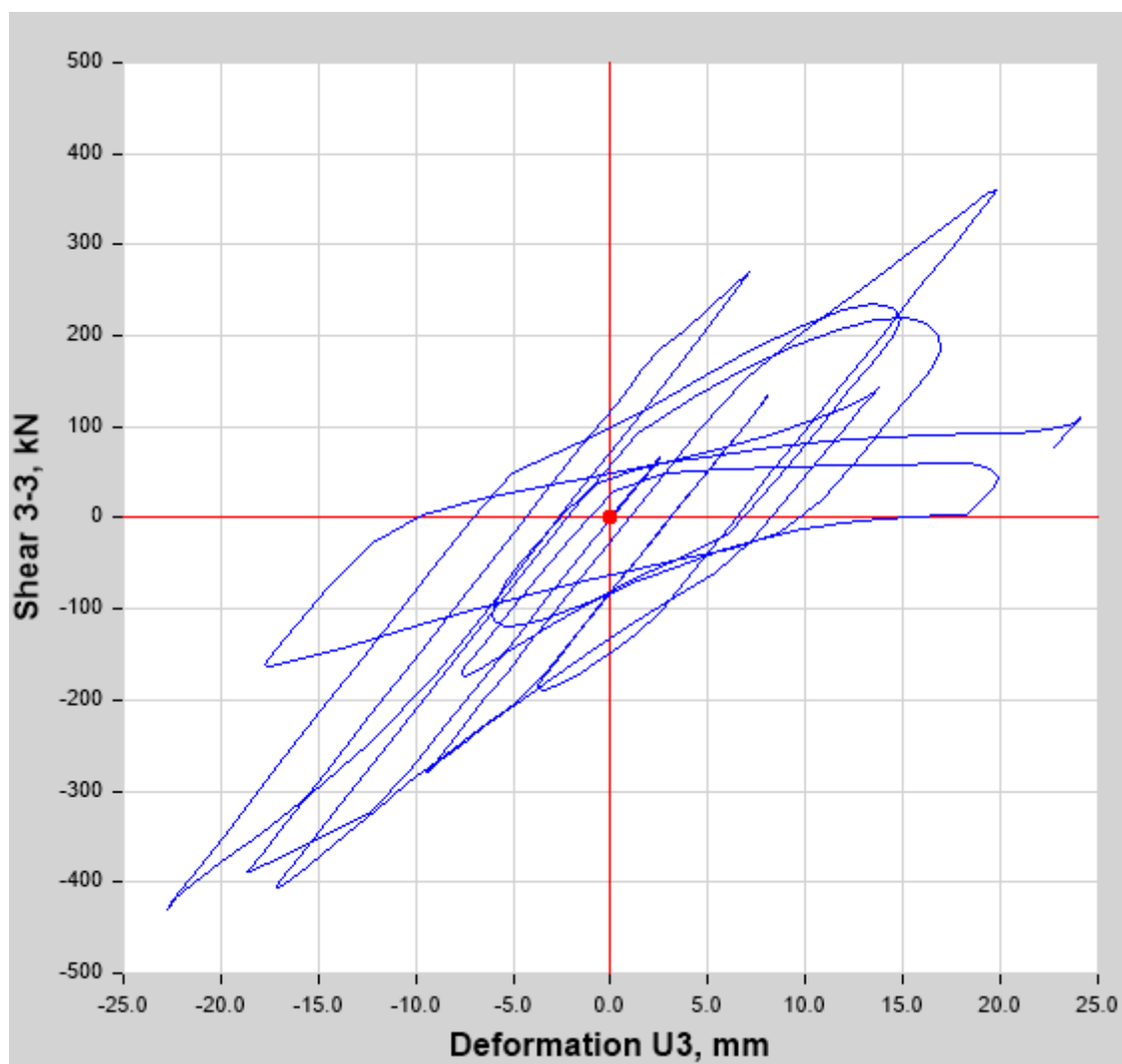


ΣΤ.6.3. Απαιτείται ανασχεδιασμός των εφεδράνων

Παρατηρούνται ως επί το πλείστον μικρές μετακινήσεις των εφεδράνων. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι υπάρχει περιθώριο ανασχεδιασμού τους για περαιτέρω μείωση των δράσεων της ανωδομής. Κατόπιν επεξεργασίας των αποτελεσμάτων, η μεγαλύτερη μετακίνηση που καταγράφεται συμβαίνει στο εφέδρανο K13, για την περίπτωση φόρτισης «HOLLISTE_RS_match_Y Max», κατά τη διεύθυνση Y, με τιμή μόλις 46 mm. Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται ο αντίστοιχος βρόγχος υστέρησης.



Παρουσιάζεται επίσης ο βρόγχος υστέρησης για το ίδιο στοιχείο, για την περίπτωση φόρτισης «CORRALIT_RS_match_X».



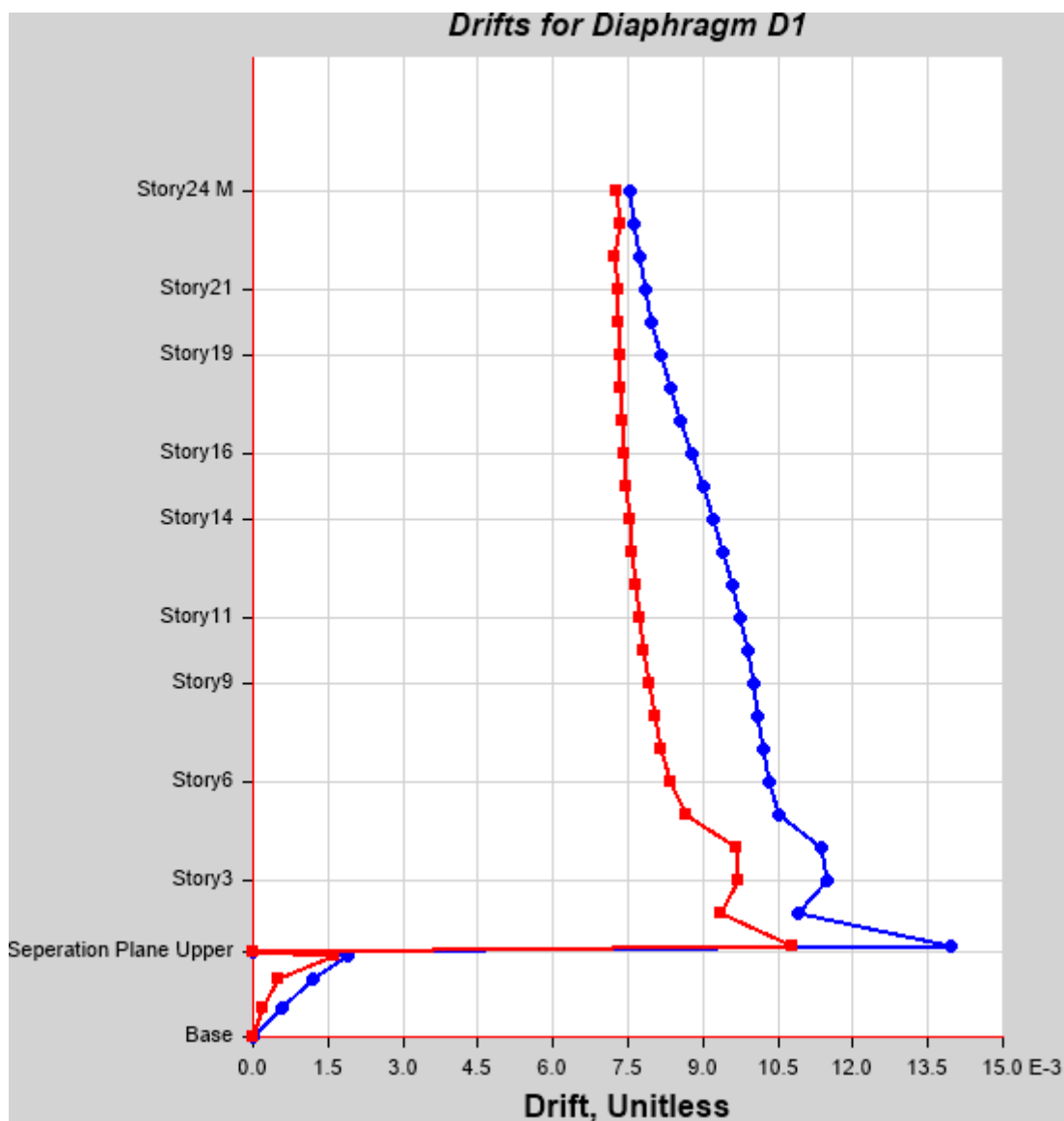
ΣΤ.7. Ανάλυση με απλά εφέδρανα τριβής μιας επιφάνειας ολίσθησης

Λόγω των προβλημάτων που προέκυψαν με τη χρήση του link των εφεδράνων τύπου TFP, επιλέχθηκε, για λόγους πληρότητας της παρούσας εργασίας, η εκτέλεση μίας επιπλέον σειράς αναλύσεων, με χρήση ενός link που οδηγεί σε πιο ευσταθείς λύσεις.

Για λόγους απλότητας και συντομίας της παρούσας ενότητας, χρησιμοποιείται για όλες τις θέσεις το ίδιο εφέδρανο τριβής, το οποίο έχει συντελεστή τριβής $\mu = 0.10$ και ακτίνα $R = 0.60 \text{ m}$. Ωστόσο αναγνωρίζεται η ανάγκη διερεύνησης των βέλτιστων παραμέτρων για κάθε θέση, όπως έγινε στην προηγούμενη ενότητα.

ΣΤ.7.1. Drifts Ορόφων

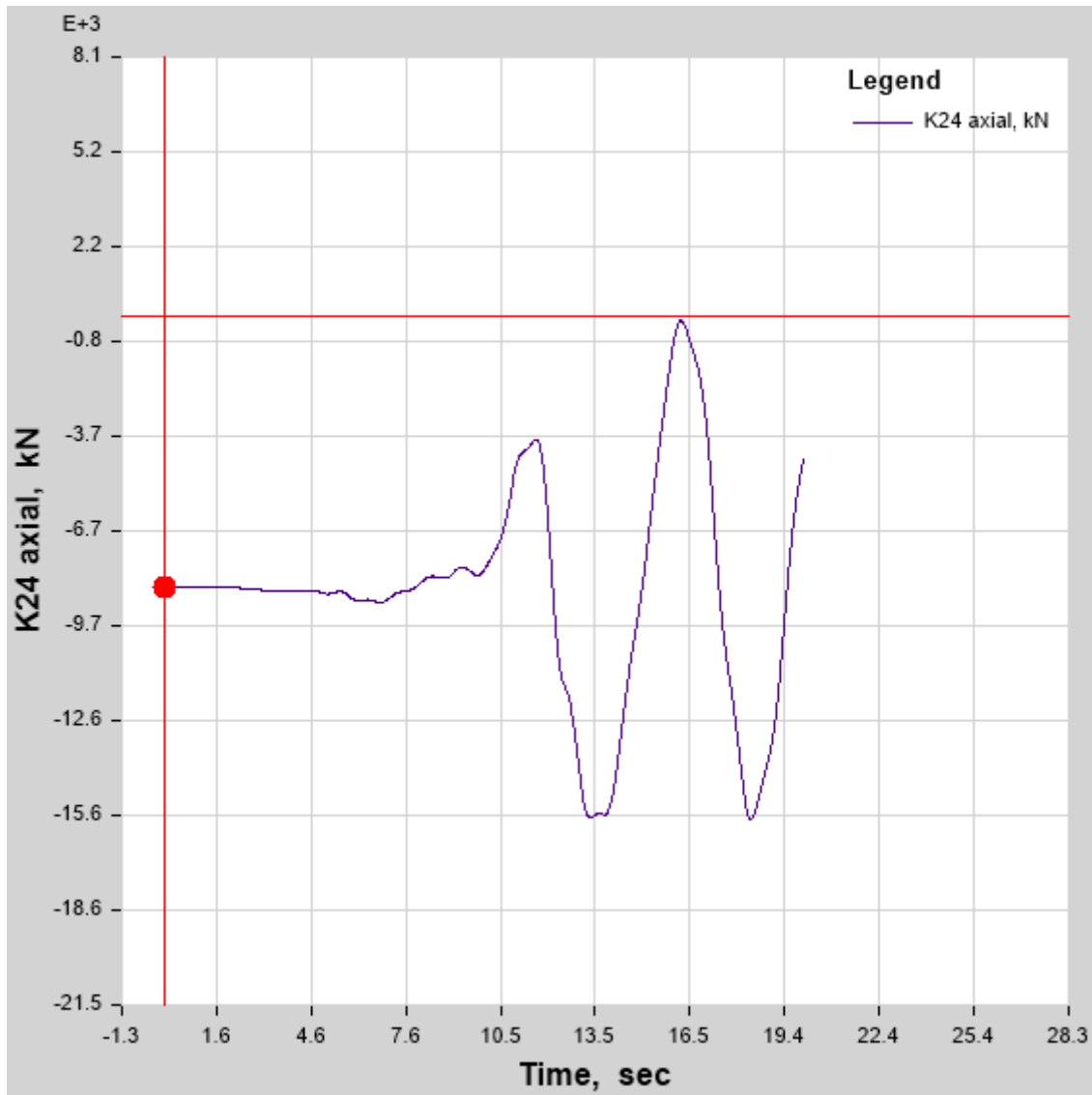
Η μέγιστη καταγραφή για τα drifts των ορόφων (με εξαίρεση του επιπέδου διαχωρισμού) παρατηρείται για την περίπτωση φόρτισης «ARRAY06_RS_match_Y».



Παραμένει ωστόσο εντός των αποδεκτών ορίων (< 25%). (βλ. Δ.4.1).

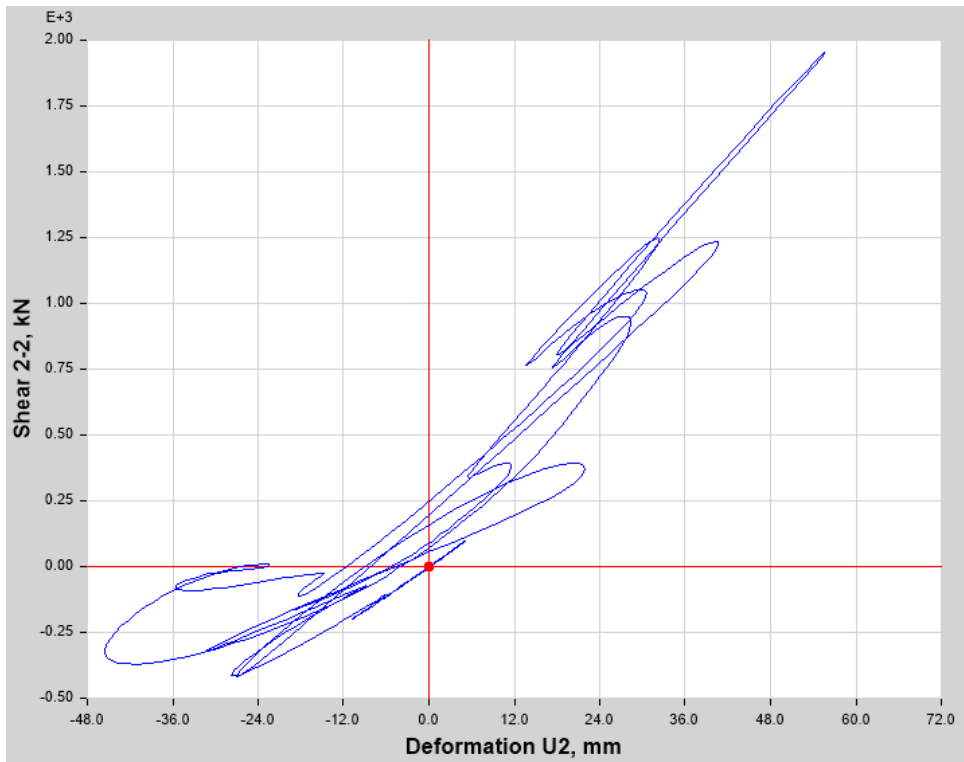
ΣΤ.7.2. Δεν παρατηρείται UPLIFT εφεδράνων

Η ελάχιστη θλιπτική δύναμη εφεδράνου που καταγράφεται είναι 118.50 KN, στο εφεδράνο K24, για την περίπτωση φόρτισης «ARRAY06_RS_match_Y». Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η χρονοϊστορία του μεγέθους αυτού για το συγκεκριμένο στοιχείο.

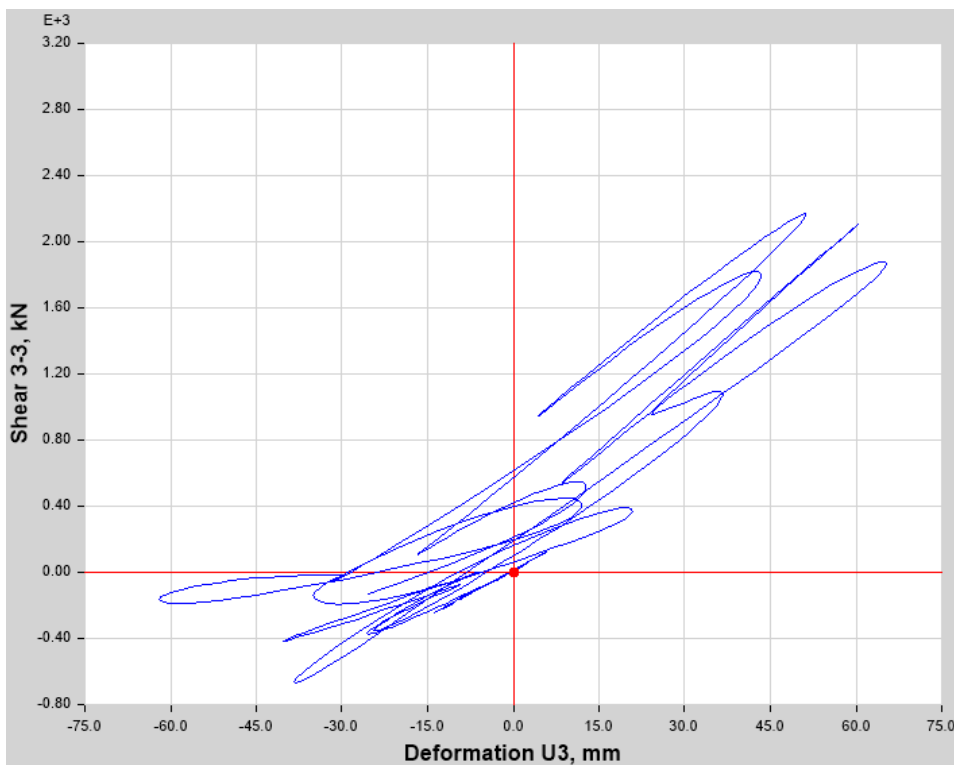


Για το ίδιο στοιχείο παρουσιάζονται οι βρόγχοι υστέρησης για τις δύο διευθύνσεις.

Διεύθυνση X



Διεύθυνση Y



Κεφάλαιο Ζ.

Σύνοψη αποτελεσμάτων – Συζήτηση

Στην παρούσα εργασία έγινε αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας του «Πύργου του Πειραιά», από την οποία διαπιστώθηκε ότι επιβάλλονται ενισχύσεις του φορέα προκειμένου να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των σύγχρονων κανονισμών. Το γεγονός αυτό αποτέλεσε ευκαιρία για διερεύνηση δύο εναλλακτικών προτάσεων ενίσχυσης.

Πρώτα, εξετάστηκε το ενδεχόμενο ενίσχυσης του κεντρικού πυρήνα της κατασκευής με **ινοπλισμένα πολυμερή (F.R.P.)**, διότι διαπιστώθηκε ότι αστοχεί ψαθυρά σε τέμνουσα προτού προλάβει να αναπτυχθεί η οριακή αντοχή στη βάση του. Για τη διερεύνηση της επιρροής της εν λόγω ενίσχυσης αναλύθηκε ο φορέας στην υφιστάμενη και στην ενισχυμένη κατάσταση με στατική ανελαστική υπερωθητική ανάλυση (Static Pushover Analysis). Το αποτέλεσμα ήταν **η σημαντική βελτίωση της πλαστιμότητας του φορέα**, η οποία κατόπιν της ενίσχυσης του πυρήνα, πλέον περιορίζεται από ψαθυρές αστοχίες λοιπών μελών, με πιο καθοριστική την τμηματική κατάρρευση δοκών της ανωδομής. Ωστόσο ο λόγος εξάντλησης εν συνόλω περιορίζεται δραστικά.

Έπειτα, εξετάστηκε το ενδεχόμενο διαχωρισμού της κατασκευής σε ανωδομή και υποδομή, στο επίπεδο της οροφής του ισογείου, και **προσθήκη εφεδράνων τριβής τύπου Triple Friction Pendulum**. Η επιλογή αυτή αποτέλεσε αφορμή για εμβάθυνση στο αντικείμενο της σεισμικής μόνωσης, στη διαστασιολόγηση εφεδράνων τύπου TFP, καθώς και της μεθοδολογίας εκτέλεσης ανάλυσης χρονοϊστορίας με σεισμικές καταγραφές, προσαρμοσμένες στο φάσμα σχεδιασμού του EC8. Ωστόσο αντιμετωπίστηκαν σημαντικά προβλήματα σύγκλισης των αναλύσεων χρονοϊστορίας με χρήση του αντίστοιχου αντικειμένου «link» στο λογισμικό, με αποτέλεσμα να μην είναι διαθέσιμη η απόκριση της κατασκευής για ολόκληρο το χρονικό διάστημα των καταγραφών.

Συμπεραίνεται ότι υπάρχει σημαντικό περιθώριο βελτίωσης της απόκρισης της κατασκευής υποβαλλόμενης σε σεισμικές δράσεις.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α. Κώδικας Python

A.1. Υπολογισμός σημείων επιτελεστικότητας με εφαρμογή ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος

```
In [66]: input_files_path = u"E:/Documents/10ο Διπλωματική Εργασία/PYTHON/Target_Disp1_input"  
output_dir = u"E:/Documents/10ο Διπλωματική Εργασία/PYTHON/Target_Disp1_output"
```

```
In [67]: myfile = u"New Structure, +Y+0.3X.txt"
```

```
In [68]: m_tot = 14267  
# X direction  
gamma = 1.622704663946  
alpha = 0.57227564680  
# Y direction  
#gamma = 1.588  
#alpha = 0.528193
```

Calculating Eurocode 8 S.R.S.S. Spectra

```
In [69]: # Values of period T [s] that will be calculated to create the response spectra  
t = np.arange(0.0,8,0.01)  
t[0] = 1e-8  
t[-1] = 8  
print len(t)  
800
```

```
In [70]: omega = 2.*np.pi/t
```

```
In [71]: # calculating EC8 reponse spectrums  
varlist = [] # gather input for multithreading operation  
for i in range(0,len(t)):  
    varlist.append((0.16, 0.80, 'C', 0.05, t[i]))  
if __name__ == '__main__':  
    ec_spectrum = Parallel(n_jobs=8)(delayed(EC_RS) (agR, gamma_i, soil_class, zeta, Tn) for agR, gamma_i, soil_class, zeta, Tn in varlist)  
  
# storing data  
RS_PSA_I = np.array(ec_spectrum)[: ,0]  
  
varlist = [] # gather input for multithreading operation  
for i in range(0,len(t)):  
    varlist.append((0.16, 1.00, 'C', 0.05, t[i]))  
if __name__ == '__main__':  
    ec_spectrum = Parallel(n_jobs=8)(delayed(EC_RS) (agR, gamma_i, soil_class, zeta, Tn) for agR, gamma_i, soil_class, zeta, Tn in varlist)  
  
# storing data  
RS_PSA_II = np.array(ec_spectrum)[: ,0]  
  
varlist = [] # gather input for multithreading operation  
for i in range(0,len(t)):  
    varlist.append((0.16, 1.733, 'C', 0.05, t[i]))  
if __name__ == '__main__':  
    ec_spectrum = Parallel(n_jobs=8)(delayed(EC_RS) (agR, gamma_i, soil_class, zeta, Tn) for agR, gamma_i, soil_class, zeta, Tn in varlist)  
  
# storing data  
RS_PSA_IV = np.array(ec_spectrum)[: ,0]
```

```
In [72]: RS_PSD_I = RS_PSA_I*9.81/(omega**2.00)  
RS_PSD_II = RS_PSA_II*9.81/(omega**2.00)  
RS_PSD_IV = RS_PSA_IV*9.81/(omega**2.00)
```

```
In [73]: TB_PSD = [0, max(RS_PSA_IV)*1.10*9.81/((2*np.pi/np.array(ec_spectrum)[0,1])**2.00)]  
TB_PSA = [0, max(RS_PSA_IV)*1.10]  
TC_PSD = [0, max(RS_PSA_IV)*1.10*9.81/((2*np.pi/np.array(ec_spectrum)[0,2])**2.00)]  
TC_PSA = [0, max(RS_PSA_IV)*1.10]  
TD_PSD = [0, max(RS_PSD_IV)*1.10]  
TD_PSA = [0, max(RS_PSD_IV)*1.10/9.81*((2*np.pi/np.array(ec_spectrum)[0,3])**2.00)]
```

Processing the results of pushover analysis across one axis of a building and determining the target displacement implementing the equivalent one degree-of-freedom system

We will need...

```
In [62]: import pandas as pd
import os
import glob
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from joblib import Parallel, delayed
from scipy.optimize import fsolve, minimize_scalar
from scipy.interpolate import interp1d
from scipy.integrate import simps
```

```
In [63]: # To display the plots instantly on the notebook
%pylab inline
```

Populating the interactive namespace from numpy and matplotlib

```
E:\Users\Ioannis\Anaconda2\envs\Env1\lib\site-packages\IPython\core\magics\pylab.py:161: UserWarning: pylab import has clobbered these variables: ['f', 'gamma']
'%matplotlib' prevents importing * from pylab and numpy
"\n%matplotlib' prevents importing * from pylab and numpy"
```

Function Definitions

```
In [64]: def EC_RS(agR, gamma_i, soil_class, zeta, Tn):
        """ Eurocode Response Spectrum
        This function calculates the pseudo spectral ground acceleration
        according to EC8, given the values of ag_R,  $\gamma_i$ , soil class
         $\zeta$  and a value for the modal period.
        It returns an array of values for compatability purposes, which are
        the maximum ground acceleration possible for any value for the period,
        the given period and the corresponding pseudo spectral ground acceleration"""
        ag = agR*gamma_i
        soil_classes = ["A", "B", "C", "D", "E"]
        index = soil_classes.index(soil_class)
        T_B = [0.15, 0.15, 0.20, 0.20, 0.15][index]
        T_C = [0.40, 0.50, 0.60, 0.80, 0.50][index]
        T_D = 2.50
        S = [1.00, 1.20, 1.15, 1.35, 1.40][index]
        h = max(np.sqrt(0.10/(zeta+0.05)), 0.55)
        ag_max_g = ag * S * h * 2.50

        if Tn > T_D:
            psa = ag * S * h * 2.50 * T_C * T_D / Tn**2.00
        elif Tn > T_C:
            psa = ag * S * h * 2.50 * T_C / Tn
        elif Tn > T_B:
            psa = ag_max_g
        elif Tn > 0.00:
            psa = ag * S * (1.00 + Tn/T_B * (h*2.50-1.00))
        else:
            print "Abnormal value for period T = " + Tn

        a_max_osc = psa

        return [psa, T_B, T_C, T_D]
```

```
In [65]: def find_area(Sdy, Sd, Sa):
        # Linearization of curve

        Sdmax = Sd[argmax(Sa)]

        Say = max(Sa)

        Sd_lin = np.array([0, Sdy, max(Sd)])

        Sa_lin = np.array([0, Say, Say])

        # Calculating area

        # interpolating for common x values

        f = interp1d(Sd, Sa)

        Sd_new = np.linspace(0.00, Sdmax, num=1000, endpoint=True)

        Sa_new = f(Sd_new)

        f2 = interp1d(Sd_lin, Sa_lin)

        Sa_lin_new = f2(Sd_new)

        area = simps(Sa_lin_new, dx=Sdmax/1000.00)-simps(Sa_new, dx=Sdmax/1000.00)
        return abs(area)
```

Parameters


```

In [74]: # visualization
csfont = {'fontname':'Century'}
plt.figure(figsize=(8, 8), dpi= 75, facecolor='w', edgecolor='k')
plt.suptitle("S.R.S.S. Spectra - Eurocode 8",fontsize=18,**csfont)
plt.title(u'Design Parameters: (tD = 50 years, Soil Type C,  $\zeta = 5\%$ )',fontsize=15,**csfont)

plt.plot(RS_PSD_I, RS_PSA_I, color = 'green', linestyle='-', label = 'P = 20%, TR = 224 years',linewidth=1)
plt.plot(RS_PSD_II, RS_PSA_II, color = 'purple', linestyle='-', label = 'P = 10%, TR = 475 years',linewidth=1.50)
plt.plot(RS_PSD_IV, RS_PSA_IV, color = 'red', linestyle='--', label = 'P = 2%, TR = 2475 years',linewidth=2)

plt.plot(TB_PSD, TB_PSA, color = 'purple', linestyle=':', label = "TB, TC, TD",linewidth=1.00)
plt.plot(TC_PSD, TC_PSA, color = 'purple', linestyle=':', linewidth=1.00)
plt.plot(TD_PSD, TD_PSA, color = 'purple', linestyle=':', linewidth=1.00)

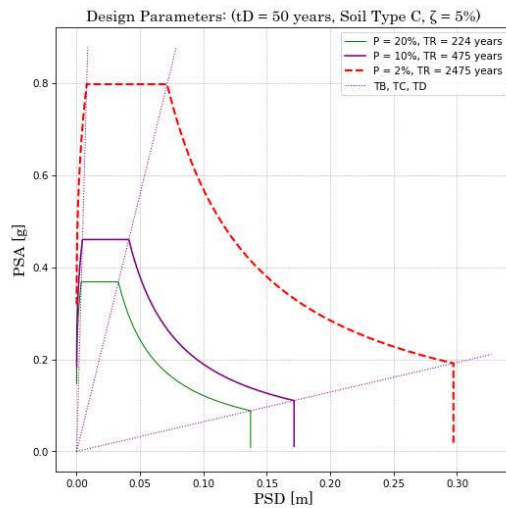
plt.legend()
plt.ylabel('PSA [g]',fontsize=15,**csfont)
plt.xlabel('PSD [m]',fontsize=15,**csfont)
plt.grid(color='grey', linestyle=':', linewidth=0.6)

plt.savefig("SRSS_SPECTR.pdf", facecolor='w', edgecolor='w',
orientation='landscape', papertype='A4', format=None,
transparent=False, bbox_inches='tight', pad_inches=0.8,
frameon=None)
plt.savefig("SRSS_SPECTR.pdf.png", facecolor='w', edgecolor='w',
orientation='landscape', papertype='A4', format=None,
transparent=False, bbox_inches='tight', pad_inches=0.8,frameon=None)

plt.show()

```

S.R.S.S. Spectra - Eurocode 8



Collecting Data

```

In [75]: os.chdir(input_files_path)
with open(myfile) as file:
    dat = np.loadtxt(file, skiprows=1)

```

```

In [76]: d = dat[:,0]
Vb = dat[:,1]

```

```

In [77]: Sa = Vb/m_tot/alpha/9.81

```

```

In [78]: Sd = d/gamma

```

Bilinearization of base shear - displacement curve

```

In [79]: func = lambda x: find_area(x, Sd, Sa)
res = minimize_scalar(func, bounds =(0.00,Sd[argmax(Sa)]),method='bounded')

```

```

In [80]: Sdy = res.x
Say = np.average(Sa[np.argmax(Sa)-8:np.argmax(Sa)+8])
Sd_max = Sd[np.argmax(Sa)]

```

```

In [81]: Sd_lin = np.array([0, Sdy, max(Sd)])
Sa_lin = np.array([0, Say, Say])

```

Determination of capacity performance points of the structure

Determination of Demand Performance Points

```
In [82]: Sd_IO = Sdy/1.50 # Immediate occupancy (Άμεση Χρήση)
Sd_CP = Sd_max/1.50 # Collapse Prevention (Όχι κεί Κατάρρευση)
Sd_LS = (Sdy + Sd_max)/2.00/1.50 # Life Safety (Προστασία Ζωής)
```

Immediate Occupancy

```
In [83]: # interpolating for common x values
Sd_max_I = min(max(Sd_lin),max(RS_PSD_I))

f = interp1d(Sd_lin, Sa_lin)

Sd_lin_new_I = np.linspace(1e-8, Sd_max_I, num=100000, endpoint=True)

Sa_lin_new_I = f(Sd_lin_new_I)

Sa_IO = f(Sd_IO)

f2 = interp1d(RS_PSD_I, RS_PSA_I)

RS_PSA_new_I = f2(Sd_lin_new_I)

# find the index where two curves intersect
idx_I = np.argwhere(np.diff(np.sign(Sa_lin_new_I - RS_PSA_new_I)) != 0).reshape(-1) + 0
if len(idx_I) != 1:
    idx_I = idx_I[0]
```

Life Safety

```
In [84]: # interpolating for common x values
Sd_max_II = min(max(Sd_lin),max(RS_PSD_II))

f = interp1d(Sd_lin, Sa_lin)

Sd_lin_new_II = np.linspace(0.001, Sd_max_II, num=100000, endpoint=True)

Sa_lin_new_II = f(Sd_lin_new_II)

Sa_LS = f(Sd_LS)

f2 = interp1d(RS_PSD_II, RS_PSA_II)

RS_PSA_new_II = f2(Sd_lin_new_II)

# find the index where two curves intersect
idx_II = np.argwhere(np.diff(np.sign(Sa_lin_new_II - RS_PSA_new_II)) != 0).reshape(-1) + 0
if len(idx_II) != 1:
    idx_II = idx_II[0]
```

Collapse Prevention

```
In [85]: # interpolating for common x values
Sd_max_IV = min(max(Sd_lin),max(RS_PSD_IV))

f = interp1d(Sd_lin, Sa_lin)

Sd_lin_new_IV = np.linspace(0.001, Sd_max_IV, num=100000, endpoint=True)

Sa_lin_new_IV = f(Sd_lin_new_IV)

Sa_CP = f(Sd_CP)

Sa_max = f(Sd_max)

f2 = interp1d(RS_PSD_IV, RS_PSA_IV)

RS_PSA_new_IV = f2(Sd_lin_new_IV)

# find the index where two curves intersect
idx_IV = np.argwhere(np.diff(np.sign(Sa_lin_new_IV - RS_PSA_new_IV)) != 0).reshape(-1) + 0
if len(idx_IV) != 1:
    idx_IV = idx_IV[0]
```

Output

```

In [86]: # visualization
csfont = {'fontname':'Century'}
plt.figure(figsize=(8, 8), dpi= 75, facecolor='w', edgecolor='k')
plt.suptitle("S.R.S.S. Capacity & Demand Curves",fontsize=18,**csfont)
plt.title(myfile[:-4],fontsize=15,**csfont)

plt.plot(Sd, Sa, color = 'purple', linestyle='--', label = 'Analysis Curve', linewidth=0.50)
plt.plot(Sd_lin, Sa_lin, color = 'purple', linestyle='-', label = 'Pushover Curve (Bilinearized)',linewidth=1)

plt.plot(RS_PSD_I, RS_PSA_I, color = 'green', linestyle='-', label = 'P = 20%, TR = 224 years',linewidth=1)
plt.plot(RS_PSD_II, RS_PSA_II, color = 'purple', linestyle='-', label = 'P = 10%, TR = 475 years',linewidth=1.50)
plt.plot(RS_PSD_IV, RS_PSA_IV, color = 'red', linestyle='-', label = 'P = 2%, TR = 2475 years',linewidth=2)

plt.plot(TB_PSD, TB_PSA, color = 'black', linestyle=':', label = "TB, TC, TD",linewidth=1.00)
plt.plot(TC_PSD, TC_PSA, color = 'black', linestyle=':', linewidth=1.00)
plt.plot(TD_PSD, TD_PSA, color = 'black', linestyle=':', linewidth=1.00)

plt.plot(Sd_lin_new_I[idx_II], RS_PSA_new_I[idx_II], '^', color = 'green', markersize = 8, label = 'Immediate Occupancy Demand')
plt.plot(Sd_lin_new_II[idx_II], RS_PSA_new_II[idx_II], '^', color = 'purple', markersize = 10, label = 'Life Safety Demand')
plt.plot(Sd_lin_new_IV[idx_IV], RS_PSA_new_IV[idx_IV], '^', color = 'red', markersize = 10, label = 'Collapse Prevention Demand')

plt.plot(Sd_IO, Sa_IO, '*', color = 'green', markersize = 10, label = 'Immediate Occupancy Capacity')
plt.plot(Sd_LS, Sa_LS, '*', color = 'purple', markersize = 10, label = 'Life Safety Capacity')
plt.plot(Sd_CP, Sa_CP, '*', color = 'red', markersize = 10, label = 'Collapse Prevention Capacity')
plt.plot(Sd_max, Sa_max, 's', color = 'black', markersize = 6, label = 'Analysis Displacement Capacity')

plt.ylabel('PSA [g]',fontsize=15,**csfont)
plt.xlabel('PSD [m]',fontsize=15,**csfont)

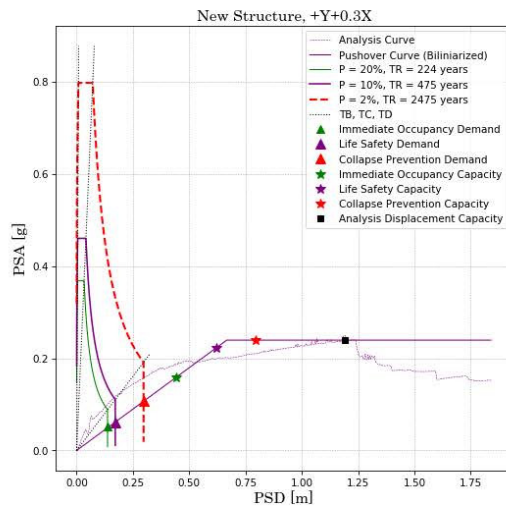
plt.legend()
plt.grid(color='grey', linestyle=':', linewidth=0.6)

plt.savefig(myfile[:-4]+".SRSS.pdf", facecolor='w', edgecolor='w',
orientation='landscape', papertype='A4', format=None,
transparent=False, bbox_inches='tight', pad_inches=0.8,
frameon=None)
plt.savefig(myfile[:-4]+".SRSS.png", facecolor='w', edgecolor='w',
orientation='landscape', papertype='A4', format=None,
transparent=False, bbox_inches='tight', pad_inches=0.8,frameon=None)

plt.show()

```

S.R.S.S. Capacity & Demand Curves



```

In [87]: # visualization
csfont = {'fontname':'Century'}
plt.figure(figsize=(8, 8), dpi= 75, facecolor='w', edgecolor='k')
plt.suptitle("Base Shear - Displacement Capacity & Demand Curves",fontsize=18,**csfont)
plt.title(myfile[:-4],fontsize=15,**csfont)

plt.plot(Sd*gamma, Sa*m_tot*alpha*9.81, color = 'purple', linestyle='--', label = 'Analysis Curve',linewidth=0.50)
plt.plot(Sd_lin*gamma, Sa_lin*m_tot*alpha*9.81, color = 'purple', linestyle='-', label = 'Pushover Curve (Bilinearized)',linewidth=1)

plt.plot(Sd_lin_new_I[idx_II]*gamma, RS_PSA_new_I[idx_II]*m_tot*alpha*9.81, '^', color = 'green', markersize = 8, label = 'Immediate Occupa')
plt.plot(Sd_lin_new_II[idx_II]*gamma, RS_PSA_new_II[idx_II]*m_tot*alpha*9.81, '^', color = 'purple', markersize = 10, label = 'Life Safety')
plt.plot(Sd_lin_new_IV[idx_IV]*gamma, RS_PSA_new_IV[idx_IV]*m_tot*alpha*9.81, '^', color = 'red', markersize = 10, label = 'Collapse Prevent')

plt.plot(Sd_IO*gamma, Sa_IO*m_tot*alpha*9.81, '^', color = 'green', markersize = 10, label = 'Immediate Occupancy Capacity')
plt.plot(Sd_LS*gamma, Sa_LS*m_tot*alpha*9.81, '^', color = 'purple', markersize = 10, label = 'Life Safety Capacity')
plt.plot(Sd_CP*gamma, Sa_CP*m_tot*alpha*9.81, '^', color = 'red', markersize = 10, label = 'Collapse Prevention Capacity')
plt.plot(Sd_max*gamma, Sa_max*m_tot*alpha*9.81, 's', color = 'black', markersize = 6, label = 'Analysis Displacement Capacity')

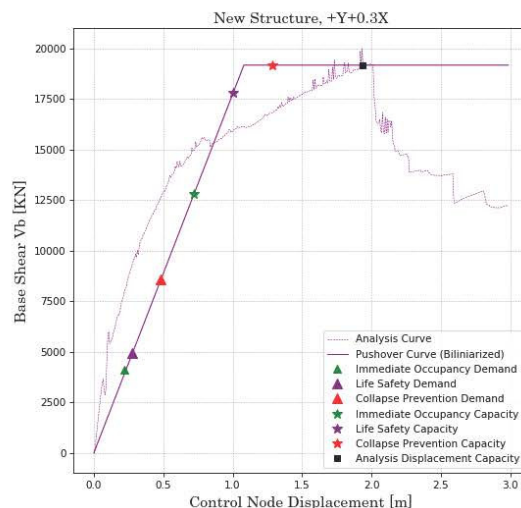
plt.ylabel('Base Shear Vb [KN]',fontsize=15,**csfont)
plt.xlabel('Control Node Displacement [m]',fontsize=15,**csfont)
plt.legend()
plt.grid(color='grey', linestyle=':', linewidth=0.6)

plt.savefig(myfile[:-4]+".pdf", facecolor='w', edgecolor='w',
orientation="landscape", papertype='A4', format=None,
transparent=False, bbox_inches='tight', pad_inches=0.8,
frameon=None)
plt.savefig(myfile[:-4]+".png", facecolor='w', edgecolor='w',
orientation="landscape", papertype='A4', format=None,
transparent=False, bbox_inches='tight', pad_inches=0.8,frameon=None)

plt.show()

```

Base Shear - Displacement Capacity & Demand Curves



```

In [88]: # T*
2.0*np.pi*np.sqrt(Sdy/Say) # [s]

```

```

Out[88]: 10.48492224894213

```

```

In [89]: print Sdy, Sd_max # [m]

```

```

0.6662398424127097 1.191424442756354

```

```

In [90]: #Vb,max
max(Sa)*m_tot*alpha*9.81 # [KN]

```

```

Out[90]: 19984.095

```

```

In [91]: # Αντίεση
print Sd_lin_new_I[idx_II]*gamma, Sd_lin_new_II[idx_II]*gamma, Sd_lin_new_IV[idx_IV]*gamma
[0.22216019] [0.2777033] [0.4812816]

```

```

In [92]: # Ικανότητα
print Sd_IO*gamma, Sd_LS*gamma, Sd_CP*gamma
0.728740330598348 1.0848134998632505 1.2888866666666667

```

```

In [93]: # Λόγος Εξάντλησης
print Sd_lin_new_I[idx_II]/Sd_IO, Sd_lin_new_II[idx_II]/Sd_LS, Sd_lin_new_IV[idx_IV]/Sd_CP
[0.30823887] [0.27637298] [0.37340878]

```

```
In [82]: Sd_IO = Sdy/1.50 # Immediate occupancy (Άμεση Χρήση)
Sd_CP = Sd_max/1.50 # Collapse Prevention (Όχι κεί Κατάρρευση)
Sd_LS = (Sdy + Sd_max)/2.00/1.50 # Life Safety (Προστασία Ζωής)
```

Immediate Occupancy

```
In [83]: # interpolating for common x values
Sd_max_I = min(max(Sd_lin),max(RS_PSD_I))

f = interp1d(Sd_lin, Sa_lin)

Sd_lin_new_I = np.linspace(1e-8, Sd_max_I, num=100000, endpoint=True)

Sa_lin_new_I = f(Sd_lin_new_I)

Sa_IO = f(Sd_IO)

f2 = interp1d(RS_PSD_I, RS_PSA_I)

RS_PSA_new_I = f2(Sd_lin_new_I)

# find the index where two curves intersect
idx_I = np.argwhere(np.diff(np.sign(Sa_lin_new_I - RS_PSA_new_I)) != 0).reshape(-1) + 0
if len(idx_I) != 1:
    idx_I = idx_I[0]
```

Life Safety

```
In [84]: # interpolating for common x values
Sd_max_II = min(max(Sd_lin),max(RS_PSD_II))

f = interp1d(Sd_lin, Sa_lin)

Sd_lin_new_II = np.linspace(0.001, Sd_max_II, num=100000, endpoint=True)

Sa_lin_new_II = f(Sd_lin_new_II)

Sa_LS = f(Sd_LS)

f2 = interp1d(RS_PSD_II, RS_PSA_II)

RS_PSA_new_II = f2(Sd_lin_new_II)

# find the index where two curves intersect
idx_II = np.argwhere(np.diff(np.sign(Sa_lin_new_II - RS_PSA_new_II)) != 0).reshape(-1) + 0
if len(idx_II) != 1:
    idx_II = idx_II[0]
```

Collapse Prevention

```
In [85]: # interpolating for common x values
Sd_max_IV = min(max(Sd_lin),max(RS_PSD_IV))

f = interp1d(Sd_lin, Sa_lin)

Sd_lin_new_IV = np.linspace(0.001, Sd_max_IV, num=100000, endpoint=True)

Sa_lin_new_IV = f(Sd_lin_new_IV)

Sa_CP = f(Sd_CP)

Sa_max = f(Sd_max)

f2 = interp1d(RS_PSD_IV, RS_PSA_IV)

RS_PSA_new_IV = f2(Sd_lin_new_IV)

# find the index where two curves intersect
idx_IV = np.argwhere(np.diff(np.sign(Sa_lin_new_IV - RS_PSA_new_IV)) != 0).reshape(-1) + 0
if len(idx_IV) != 1:
    idx_IV = idx_IV[0]
```

Output

A.2. Διαστασιολόγηση εφεδράνων τριβής τύπου T.F.P.

Design of TFP bearings and calculating Etabs Parameters

...we will need

```
In [1]: import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
import os
import pprint
```

```
In [2]: # To display the plots instantly on the notebook
%pylab inline
```

Populating the interactive namespace from numpy and matplotlib

```
In [3]: # To display multiple output from single cells
#from IPython.core.interactiveshell import InteractiveShell
#InteractiveShell.ast_node_interactivity = "all"
```

Function definitions

```

In [4]: def pendulum(inp):
# Units:
# Length [m]
# Force [kN]
R1 = inp['R1']
R2 = inp['R2']
R3 = R2
R4 = R1
h1 = inp['h1']
h2 = inp['h2']
h3 = h2
h4 = h1
d1 = inp['d1']
d2 = inp['d2']
d3 = d2
d4 = d1
Dc = inp['Dc']
Ds = Dc-2.0*d4
Dr = Ds-2.00*(d3+0.05)
Axial_Force = inp['Axial_Force']
fr4_over_fr1 = inp['fr4_over_fr1']

R1_eff = R1 - h1
R2_eff = R2 - h2
R3_eff = R3 - h3
R4_eff = R4 - h4
d1_act = d1 * R1_eff/R1
d2_act = d2 * R2_eff/R2
d3_act = d3 * R3_eff/R3
d4_act = d4 * R4_eff/R4

Area = np.pi/4.00 * Ds**2
Pr14 = Axial_Force/Area # KPa

ksi_to_kpa = 6894.7572932

### Friction between surface 1
fr1_slow = 0.122-0.01*Pr14/ksi_to_kpa

fr1_fast = fr1_slow - 0.015

### Friction between surface 4
fr4_slow = fr4_over_fr1*0.122-0.01*Pr14/ksi_to_kpa

fr4_fast = fr4_slow - 0.015

### Friction between surfaces 2 and 3
Area = np.pi/4.00 * Dr**2
Pr23 = Axial_Force/Area # KPa

fr23_slow = 0.122-0.01*Pr23/ksi_to_kpa

fr23_fast = fr23_slow - 0.005

fr1 = fr1_slow
fr2 = fr23_slow
fr3 = fr23_slow
fr4 = fr4_slow

# Calculation of the Force - Displacement relationship of the bearing

# Check for inadequate design parameter selection to verify standard configuration
design_adequate = True
fail_reason = ""
if R4_eff < R2_eff:
    design_adequate = False
    fail_reason = "R4<R2"
elif fr3 > fr4:
    design_adequate = False
    fail_reason = "fr3 > fr4"
elif fr1 > fr4:
    design_adequate = False
    fail_reason = "fr1 > fr4"
elif d1_act < (fr4-fr1)*R1_eff:
    design_adequate = False
    fail_reason = "d1_act < (fr4-fr1)*R1_eff"
elif d2_act < (fr1-fr2)*R2_eff:
    design_adequate = False
    fail_reason = "d2_act < (fr1-fr2)*R2_eff"
elif d3_act < (fr4-fr3)*R3_eff:
    design_adequate = False
    fail_reason = "d3_act < (fr4-fr3)*R3_eff"
elif (h2+h3)/Dr >= 1.00:
    design_adequate = False
    fail_reason = "(h2+h3)/Dr >= 1.00. The inner slider assembly should be squat to ensure stability. An appropriate criterion is to sat
elif h1 + h4 <= h2 + h3 + 2.00*0.0254:
    design_adequate = False
    fail_reason = "h1 + h4 <= h2 + h3 + 2.00*0.0254. The minimum thickness of the small concave plates should be at least 0.0254 m"
elif Ds < 0:
    design_adequate = False
    fail_reason = "Ds = Dc-2.0*d4 must be positive"
elif Dr < 0:
    design_adequate = False
    fail_reason = "Dr = Ds-2.00*(d3+0.05) must be positive"
elif fr1 < 0:
    design_adequate = False
    fail_reason = "fr1 < 0"

```



```

elif (Pr23/1000. < 13.7) or (Pr23/1000. > 62.5):
    # Check if 13.8 Mpa < Pr23 < 62 Mpa
    design_adequate = False
    fail_reason = "Pr23 not in [13.8 ... 62 Mpa] = " + str(Pr23/1000.)
elif (Pr14/1000. < 13.7) or (Pr14/1000. > 62.5):
    # Check if 13.8 Mpa < Pr14 < 62 Mpa
    design_adequate = False
    fail_reason = "Pr14 not in [13.8 ... 62 Mpa] = " + str(Pr14/1000.)

Ff1 = fr1 * Axial_Force
Ff2 = fr2 * Axial_Force
Ff3 = fr3 * Axial_Force
Ff4 = fr4 * Axial_Force

u_1star = (fr1 - fr2) * R2_eff + (fr1 - fr3) * R3_eff
u_2star = u_1star + (fr4 - fr1) * (R1_eff + R3_eff)
u_dr1 = u_2star + d1_act * (1.00 + R4_eff/R1_eff) - (fr4 - fr1) * (R1_eff + R4_eff)
u_dr4 = u_dr1 + ((d4_act/R4_eff + fr4) - (d1_act/R1_eff + fr1)) * (R2_eff + R4_eff)
u_max = d1_act + d2_act + d3_act + d4_act

k1 = Axial_Force/R1_eff
k4 = Axial_Force/R4_eff
k23 = Axial_Force/(R2_eff + R3_eff)
k13 = Axial_Force/(R1_eff + R3_eff)
k14 = Axial_Force/(R1_eff + R4_eff)

F_dr1 = k1*d1_act + Ff1
F_dr4 = k4*d4_act + Ff4
F_max = k23*(u_max - u_dr4) + F_dr4

u = np.zeros(1)
F = np.zeros(1)
vec_u = np.zeros(1)
vec_F = np.zeros(1)

# Initial Conditions
u[0] = 0.00
F[0] = 0.00

# End of Sliding regime I. Force increases until sliding occurs between surfaces 2 and 3
u = np.append(u, 0.00)
F = np.append(F, Ff2) # Ff2 = Ff3

# End of Sliding regime II. Sliding transists from surfaces 2 and 3 to surfaces 3 and 1
u = np.append(u, u_1star)
F = np.append(F, Ff1) # if1 < Ff4

# End of Sliding regime III. Sliding transists from surfaces 3 and 1 to surfaces 4 and 1
u = np.append(u, u_2star)
F = np.append(F, Ff4) # if4 > Ff1

# End of Sliding regime IV. Contact is made with the displacement restrainer on surface 1. Sliding continues between surfaces 2 and 4
u = np.append(u, u_dr1)
F = np.append(F, F_dr1)

# End of Sliding regime V. Contact is made with the displacement restrainer on surface 4. Sliding continues between surfaces 2 and 3
u = np.append(u, u_dr4)
F = np.append(F, F_dr4)

# End of Sliding. Contact is made with the displacement restrainer on surfaces 2 and 3. No further sliding allowed.
u = np.append(u, u_max)
F = np.append(F, F_max)

# Force unloads until sliding on surfaces 2 and 3 occurs
u = np.append(u, u_max)
F = np.append(F, F_max - 2.00 * Ff2)

# sliding on surfaces 2 and 3 transists to surfaces 1 and 3
Df = F_max - 2.00 * Ff2 - (F_dr1 - 2.00 * Ff1)
Du = Df / k23
u = np.append(u, u[-1] - Du)
F = np.append(F, F[-1] - Df)

# sliding on surfaces 1 and 3 transists to surfaces 1 and 4
Df = Df - F[-1] - (F_dr4 - 2.00 * Ff4)
Du = Df / k13
u = np.append(u, u[-1] - Du)
F = np.append(F, F[-1] - Df)

# Contact is made with the displacement restrainer on surface 1. Sliding continues between surfaces 2 and 4
u = np.append(u, -u[4])
F = np.append(F, -F[4])

# Contact is made with the displacement restrainer on surface 4. Sliding continues between surfaces 2 and 3
u = np.append(u, -u[5])
F = np.append(F, -F[5])

# End of Sliding. Contact is made with the displacement restrainer on surfaces 2 and 3. No further sliding allowed.
u = np.append(u, -u[6])
F = np.append(F, -F[6])

# Force unloads until sliding on surfaces 2 and 3 occurs
u = np.append(u, -u[7])
F = np.append(F, -F[7])

# sliding on surfaces 2 and 3 transists to surfaces 1 and 3
u = np.append(u, -u[8])
F = np.append(F, -F[8])

# sliding on surfaces 1 and 3 transists to surfaces 1 and 4
u = np.append(u, -u[9])
F = np.append(F, -F[9])

```

```

# cycles continue
u = np.append(u, u[3])
F = np.append(F, F[3])

results = {'u': u, 'F': F, 'check': [design_adequate, fail_reason], 'Friction': [fr1, fr2, fr4], 'R_eff': [R1_eff, R2_eff]}

return results

```

Data Import directly from notebook

```

In [5]: # quick import from excel file
bearing_data = """
1  10.00000  0.35594 0.100  0.060  0.31264 0.04754 1.20  7018.26 1.20
2  10.00000  0.37539 0.100  0.060  0.29671 0.04512 1.20  8440.54 1.20
3  10.00000  0.37581 0.100  0.060  0.29637 0.04507 1.20  8472.13 1.20
4  10.00000  0.37641 0.100  0.060  0.29590 0.04500 1.20  8516.47 1.20
5  10.00000  0.37608 0.100  0.060  0.29616 0.04504 1.20  8492.17 1.20
6  10.00000  0.35802 0.100  0.060  0.31089 0.04728 1.20  7168.03 1.20
7  10.00000  0.44343 0.100  0.060  0.24728 0.03760 1.20  13690.76 1.20
8  2.80000  0.32453 0.100  0.060  0.34050 0.05178 1.20  4845.51 1.20
9  3.93000  0.35586 0.100  0.060  0.31270 0.04755 1.20  7012.89 1.20
10 2.79000  0.27514 0.100  0.060  0.39170 0.05957 1.20  1898.70 1.20
11 3.34000  0.27499 0.100  0.060  0.39188 0.05960 1.20  1890.57 1.20
12 3.91000  0.35305 0.100  0.060  0.31508 0.04792 1.20  6811.41 1.20
13 3.09000  0.31925 0.100  0.060  0.34548 0.05254 1.20  4498.98 1.20
14 10.00000  0.44731 0.100  0.060  0.24471 0.03721 1.20  13998.13 1.20
15 10.00000  0.44477 0.100  0.060  0.24639 0.03747 1.20  13796.44 1.20
16 3.06000  0.32328 0.100  0.060  0.34166 0.05196 1.20  4763.07 1.20
17 3.26500  0.35538 0.100  0.060  0.31310 0.04761 1.20  6978.43 1.20
18 2.13000  0.27491 0.100  0.060  0.39197 0.05961 1.20  1886.68 1.20
19 2.48921  0.27465 0.100  0.060  0.39228 0.05966 1.20  1873.10 1.20
20 3.04898  0.35248 0.100  0.060  0.31556 0.04799 1.20  6771.10 1.20
21 1.52819  0.31933 0.100  0.060  0.34540 0.05253 1.20  4504.75 1.20
22 10.00000  0.44525 0.100  0.060  0.24607 0.03742 1.20  13834.95 1.20
23 10.00000  0.34179 0.100  0.060  0.32483 0.04940 1.20  6017.85 1.20
24 10.00000  0.36716 0.100  0.060  0.30334 0.04613 1.20  7832.89 1.20
25 10.00000  0.36771 0.100  0.060  0.30288 0.04606 1.20  7873.52 1.20
26 10.00000  0.36855 0.100  0.060  0.30220 0.04596 1.20  7935.41 1.20
27 10.00000  0.36812 0.100  0.060  0.30255 0.04601 1.20  7903.65 1.20
28 10.00000  0.34241 0.100  0.060  0.32429 0.04932 1.20  6060.83 1.20
29 7.38829  0.28906 0.100  0.060  0.37608 0.05719 1.20  2654.06 1.20
30 10.00000  0.27717 0.100  0.060  0.38935 0.05921 1.20  2004.23 1.20
31 10.00000  0.27747 0.100  0.060  0.38901 0.05916 1.20  2019.95 1.20
33 10.00000  0.27747 0.100  0.060  0.38901 0.05916 1.20  2019.85 1.20
34 10.00000  0.27717 0.100  0.060  0.38935 0.05921 1.20  2004.51 1.20
35 5.18946  0.28895 0.100  0.060  0.37619 0.05721 1.20  2647.95 1.20
36 6.33727  0.30745 0.100  0.060  0.35698 0.05429 1.20  3748.56 1.20
37 10.00000  0.28793 0.100  0.060  0.37730 0.05738 1.20  2590.22 1.20
38 10.00000  0.28831 0.100  0.060  0.37689 0.05731 1.20  2611.81 1.20
39 10.00000  0.28831 0.100  0.060  0.37689 0.05731 1.20  2611.77 1.20
41 1.59316  0.36222 0.100  0.060  0.30739 0.04675 1.20  7472.28 1.20
42 13.06072  0.28793 0.100  0.060  0.37730 0.05738 1.20  2590.23 1.20
43 7.25657  0.30734 0.100  0.060  0.35709 0.05430 1.20  3741.86 1.20
44 1.56740  0.40228 0.100  0.060  0.27610 0.04199 1.20  10475.53 1.20
45 1.59784  0.39826 0.100  0.060  0.27909 0.04244 1.20  10167.31 1.20
46 10.00000  0.27481 0.100  0.060  0.39210 0.05963 1.20  1881.16 1.20
47 10.00000  0.27468 0.100  0.060  0.39224 0.05965 1.20  1874.66 1.20
48 1.14553  0.35542 0.100  0.060  0.31307 0.04761 1.20  6981.06 1.20
"""

```

```

In [6]: bearing_data_array = np.fromstring(bearing_data, sep=" ")
bearing_data_array = bearing_data_array.reshape((len(bearing_data_array)//10, 10))

```

Calculations

```

In [12]: i = 39-1

TFP_data = {'R1': bearing_data_array[i,1], 'R2': bearing_data_array[i,2], 'h1': bearing_data_array[i,3], 'h2': bearing_data_array[i,4], 'd1':
pend = pendulum(TFP_data)

print pend['check']

# visualization
csfont = {'fontname':'Century'}
fig = plt.figure(figsize=(5, 5), dpi= 75, facecolor='w', edgecolor='k')
plt.subplot("Force - Displacement Relationship",fontsize=14,**csfont)
plt.title("",fontsize=12,**csfont)
lwt = 1.80
plt.plot(pend['u'], pend['F'], '.', color = 'purple', linestyle='-', linewidth=lwt, label = "Hand Calculations")
plt.ylabel('F [KN]',fontsize=12,**csfont)
plt.xlabel('u [m]',fontsize=12,**csfont)
plt.grid(color='grey', linestyle=':', linewidth=0.6)

plt.legend()
df = pd.DataFrame(data={'u': pend['u'], 'F': pend['F']})
print df[:7]

etabs_diameter = (TFP_data['Dc']-2.0*TFP_data['d1'])-2.00*(TFP_data['d2']-0.05)
etabs_area = np.pi * (etabs_diameter)**2.00/4.00
etabs_height = TFP_data['h2']
etabs_mass = etabs_area * (2.00*etabs_height)*7850.00/1.20 # assuming it is not completely solid, units: kg
etabs_weight = etabs_mass/1000.00 * 0.81 # kN
etabs_inertia23 = 1.00/4.00*etabs_mass/1000.00*(etabs_diameter/2.00)**2 # ton*m**2
etabs_stiff1 = 210.00e6 * etabs_area / etabs_height / 1.20 # kn/m
etabs_damping1 = 2*np.sqrt(etabs_stiff1*etabs_mass)* 0.05 # kn*s/m. See Analysis Reference Manual
etabs_height_outer = 2.00*TFP_data['h1']
etabs_height_inner = 2.00*TFP_data['h2']
etabs_stiff23a = 81.00e6 * etabs_area / etabs_height / 1.20 # kn/m
etabs_stiff23b = TFP_data['Axial_Force'] / etabs_height # kn/m
etabs_stiff23 = min(etabs_stiff23a, etabs_stiff23b) # See Analysis Reference Manual
etabs_outer_top_fr_slow = pend['Friction'][2]
etabs_outer_top_fr_fast = pend['Friction'][2]
etabs_outer_top_rate = 0.00
etabs_outer_top_radius = pend['R_eff'][0]
etabs_outer_top_stop = TFP_data['d1']*1000.
etabs_outer_bottom_fr_slow = pend['Friction'][0]
etabs_outer_bottom_fr_fast = pend['Friction'][0]
etabs_outer_bottom_rate = 0.00
etabs_outer_bottom_radius = pend['R_eff'][0]
etabs_outer_bottom_stop = TFP_data['d1']*1000.
etabs_inner_top_fr_slow = pend['Friction'][1]
etabs_inner_top_fr_fast = pend['Friction'][1]
etabs_inner_top_rate = 0.00
etabs_inner_top_radius = pend['R_eff'][1]
etabs_inner_top_stop = TFP_data['d2']*1000.

parameter = []
value = []
parameter.append("etabs_mass")
value.append(etabs_mass)
parameter.append("etabs_weight")
value.append(etabs_weight)
parameter.append("etabs_inertia23")
value.append(etabs_inertia23)
parameter.append("etabs_stiff1")
value.append(etabs_stiff1)
parameter.append("etabs_damping1")
value.append(etabs_damping1)
parameter.append("etabs_height_outer")
value.append(etabs_height_outer)
parameter.append("etabs_height_inner")
value.append(etabs_height_inner)
parameter.append("etabs_stiff23")
value.append(etabs_stiff23)
parameter.append("etabs_outer_top_fr_slow")
value.append(etabs_outer_top_fr_slow)
parameter.append("etabs_outer_top_radius")
value.append(etabs_outer_top_radius)
parameter.append("etabs_outer_top_stop")
value.append(etabs_outer_top_stop)
parameter.append("etabs_outer_bottom_fr_slow")
value.append(etabs_outer_bottom_fr_slow)
parameter.append("etabs_outer_bottom_fr_fast")
value.append(etabs_outer_bottom_fr_fast)
parameter.append("etabs_inner_top_fr_slow")
value.append(etabs_inner_top_fr_slow)
parameter.append("etabs_inner_top_radius")
value.append(etabs_inner_top_radius)
parameter.append("etabs_inner_top_stop")
value.append(etabs_inner_top_stop)
print "\n \n"
print "Isolator_" + str(int(bearing_data_array[i,0]))
df_to_print = pd.DataFrame({'Parameter': parameter, 'value': value})
df_to_print['value'] = df_to_print['value'].map('{0:.5f}'.format)
df_to_print

[ True, '' ]

```

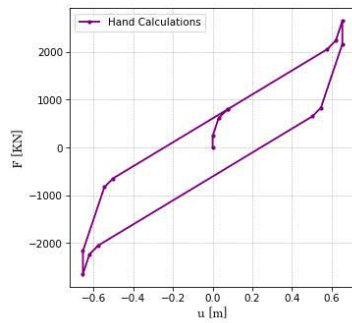
	F	u
0	0.00000	0.00000
1	239.654296	0.00000
2	610.553977	0.030002
3	792.877609	0.073810
4	2052.282460	0.577135
5	2234.606092	0.620942
6	2645.794158	0.654203

Isolator_41

Out[12]:

	Parameter	value
0	etabs_mass	215.86987
1	etabs_weight	2.11768
2	etabs_inertia23	0.00472
3	etabs_stiff1	802064282.57961
4	etabs_damping1	41610.27692
5	etabs_height_outer	0.20000
6	etabs_height_inner	0.12000
7	etabs_stiff23	124538.00000
8	etabs_outer_top_fr_slow	0.10611
9	etabs_outer_top_radius	1.49316
10	etabs_outer_top_stop	307.39000
11	etabs_outer_bottom_fr_slow	0.08171
12	etabs_inner_top_fr_slow	0.03207
13	etabs_inner_top_radius	0.30222
14	etabs_inner_top_stop	46.75000

Force - Displacement Relationship



In []:

```
In [8]: links = pd.DataFrame({'R1':bearing_data_array[:,1],
                             'R2':bearing_data_array[:,2],
                             'h1':bearing_data_array[:,3],
                             'h2':bearing_data_array[:,4],
                             'd1':bearing_data_array[:,5],
                             'd2':bearing_data_array[:,6],
                             'Dc':bearing_data_array[:,7],
                             'Axial_Force':bearing_data_array[:,8],
                             'fr4_over_fr1':bearing_data_array[:,9]}, index = bearing_data_array[:,0])
```

In [9]: links

Out[9]:

	Axial_Force	Dc	R1	R2	d1	d2	fr4_over_fr1	h1	h2	
1.0	7018.26	1.2	10.00000	0.35584	0.31264	0.04754		1.2	0.1	0.06
2.0	8440.54	1.2	10.00000	0.37539	0.29671	0.04512		1.2	0.1	0.06
3.0	8472.13	1.2	10.00000	0.37581	0.29637	0.04507		1.2	0.1	0.06
4.0	8516.47	1.2	10.00000	0.37641	0.29590	0.04500		1.2	0.1	0.06
5.0	8492.17	1.2	10.00000	0.37608	0.29616	0.04504		1.2	0.1	0.06
6.0	7168.03	1.2	10.00000	0.35802	0.31089	0.04728		1.2	0.1	0.06
7.0	13690.76	1.2	10.00000	0.44343	0.24728	0.03780		1.2	0.1	0.06
8.0	4945.51	1.2	2.80000	0.32453	0.34050	0.05178		1.2	0.1	0.06
9.0	7012.89	1.2	3.93000	0.35586	0.31270	0.04755		1.2	0.1	0.06
10.0	1898.70	1.2	2.79000	0.27514	0.39170	0.05957		1.2	0.1	0.06
11.0	1890.57	1.2	3.34000	0.27499	0.39188	0.05960		1.2	0.1	0.06
12.0	6811.41	1.2	3.91000	0.35305	0.31508	0.04792		1.2	0.1	0.06
13.0	4498.98	1.2	3.09000	0.31925	0.34548	0.05254		1.2	0.1	0.06
14.0	13998.13	1.2	10.00000	0.44731	0.24471	0.03721		1.2	0.1	0.06
15.0	13796.44	1.2	10.00000	0.44477	0.24639	0.03747		1.2	0.1	0.06
16.0	4763.07	1.2	3.06000	0.32328	0.34166	0.05196		1.2	0.1	0.06
17.0	6978.43	1.2	3.26500	0.35538	0.31310	0.04761		1.2	0.1	0.06
18.0	1886.68	1.2	2.13000	0.27491	0.39197	0.05961		1.2	0.1	0.06
19.0	1873.10	1.2	2.48921	0.27465	0.39228	0.05966		1.2	0.1	0.06
20.0	6771.10	1.2	3.04898	0.35248	0.31556	0.04799		1.2	0.1	0.06
21.0	4504.75	1.2	1.52819	0.31933	0.34540	0.05253		1.2	0.1	0.06
22.0	13634.95	1.2	10.00000	0.44525	0.24607	0.03742		1.2	0.1	0.06
23.0	6017.85	1.2	10.00000	0.34179	0.32483	0.04940		1.2	0.1	0.06
24.0	7832.89	1.2	10.00000	0.36716	0.30334	0.04613		1.2	0.1	0.06
25.0	7873.52	1.2	10.00000	0.36771	0.30288	0.04606		1.2	0.1	0.06
26.0	7935.41	1.2	10.00000	0.36855	0.30220	0.04596		1.2	0.1	0.06
27.0	7803.65	1.2	10.00000	0.36812	0.30255	0.04601		1.2	0.1	0.06
28.0	6060.83	1.2	10.00000	0.34241	0.32429	0.04932		1.2	0.1	0.06
29.0	2654.06	1.2	7.38829	0.28906	0.37608	0.05719		1.2	0.1	0.06
30.0	2004.23	1.2	10.00000	0.27717	0.38935	0.05921		1.2	0.1	0.06
31.0	2019.95	1.2	10.00000	0.27747	0.38901	0.05916		1.2	0.1	0.06
33.0	2019.85	1.2	10.00000	0.27747	0.38901	0.05916		1.2	0.1	0.06
34.0	2004.51	1.2	10.00000	0.27717	0.38935	0.05921		1.2	0.1	0.06
35.0	2647.95	1.2	5.18946	0.28895	0.37619	0.05721		1.2	0.1	0.06
36.0	3748.56	1.2	6.33727	0.30745	0.35898	0.05429		1.2	0.1	0.06
37.0	2590.22	1.2	10.00000	0.28793	0.37730	0.05738		1.2	0.1	0.06
38.0	2611.81	1.2	10.00000	0.28831	0.37689	0.05731		1.2	0.1	0.06
39.0	2611.77	1.2	10.00000	0.28831	0.37689	0.05731		1.2	0.1	0.06
41.0	7472.28	1.2	1.59316	0.36222	0.30739	0.04675		1.2	0.1	0.06
42.0	2590.23	1.2	13.06072	0.28793	0.37730	0.05738		1.2	0.1	0.06
43.0	3741.86	1.2	7.25657	0.30734	0.35709	0.05430		1.2	0.1	0.06
44.0	10475.53	1.2	1.56740	0.40228	0.27610	0.04199		1.2	0.1	0.06
45.0	10167.31	1.2	1.59784	0.39826	0.27909	0.04244		1.2	0.1	0.06
46.0	1881.16	1.2	10.00000	0.27481	0.39210	0.05963		1.2	0.1	0.06
47.0	1874.66	1.2	10.00000	0.27468	0.39224	0.05965		1.2	0.1	0.06
48.0	6981.06	1.2	1.14553	0.35542	0.31307	0.04761		1.2	0.1	0.06

Create string to paste in \$et file, in order to define the links

In [10]: os.chdir("E:\ETABS")

```

In [11]: with open("LinkProperties.txt", "w") as text_file:
        for index, row in links.iterrows():
            TFP_data = links.loc[index].to_dict()
            pend = pendulum(TFP_data)
            etabs_diameter = (TFP_data['Dc']-2.0*TFP_data['d1'])-2.00*(TFP_data['d2']-0.05)
            etabs_area = np.pi * (etabs_diameter)**2.00/4.00
            etabs_height = TFP_data['h2']
            etabs_mass = etabs_area * (2.00*etabs_height)*7850.00/1.20 # assuming it is not completely solid, units: kg
            etabs_weight = etabs_mass/1000.00 * 9.81 # kN
            etabs_inertia23 = 1.00/4.00*etabs_mass/1000.00*(etabs_diameter/2.00)**2 # ton*m**2
            etabs_stiff1 = 210.00e6 * etabs_area / etabs_height / 1.20 # kn/m
            etabs_damping1 = 2*np.sqrt(etabs_stiff1*etabs_mass)* 0.05 # kn*s/m. See Analysis Reference Manual
            etabs_height_outer = 2.00*TFP_data['h1']
            etabs_height_inner = 2.00*TFP_data['h2']
            etabs_stiff23a = 81.00e6 * etabs_area / etabs_height / 1.20 # kn/m
            etabs_stiff23b = TFP_data['Axial_Force'] / etabs_height # kn/m
            etabs_stiff23 = min(etabs_stiff23a, etabs_stiff23b) # See Analysis Reference Manual
            etabs_outer_top_fr_slow = pend['Friction'][2]
            etabs_outer_top_fr_fast = pend['Friction'][2]
            etabs_outer_top_rate = 0.00
            etabs_outer_top_radius = pend['R_eff'][0]
            etabs_outer_top_stop = TFP_data['d1']*1000.
            etabs_outer_bottom_fr_slow = pend['Friction'][0]
            etabs_outer_bottom_fr_fast = pend['Friction'][0]
            etabs_outer_bottom_rate = 0.00
            etabs_outer_bottom_radius = pend['R_eff'][0]
            etabs_outer_bottom_stop = TFP_data['d1']*1000.
            etabs_inner_top_fr_slow = pend['Friction'][1]
            etabs_inner_top_fr_fast = pend['Friction'][1]
            etabs_inner_top_rate = 0.00
            etabs_inner_top_radius = pend['R_eff'][1]
            etabs_inner_top_stop = TFP_data['d2']*1000.
            text_file.writelines(' LINKPROP "Isolator_" + str(int(index)) + "' TYPE "TRIPLE PENDULUM ISOLATOR" MASS ' + str(etabs_mass*0.001)
            text_file.writelines(' LINKPROP "Isolator_" + str(int(index)) + "' DOF "U1" KE ' + str('{0:.6E}'.format(etabs_stiff1)) + ' CE ' +
            text_file.writelines(' LINKPROP "Isolator_" + str(int(index)) + "' DOF "U2" KE ' + str("{0:.0f}".format(etabs_stiff23)) + ' NONL)
            text_file.writelines(' LINKPROP "Isolator_" + str(int(index)) + "' DOF "U3" KE ' + str("{0:.0f}".format(etabs_stiff23)) + ' NONL)

```

A.3. Επεξεργασία σεισμικών καταγραφών

Fitting time - history ground acceleration functions to the regulatory elastic response spectrum of Eurocode 8 using Python

..we will need

```
In [1]: import pandas as pd
import os
import glob
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from joblib import Parallel, delayed
from scipy.optimize import minimize, minimize_scalar
from scipy.integrate import simps
```

```
In [2]: # To display the plots instantly on the notebook
%pylab inline

Populating the interactive namespace from numpy and matplotlib
```

Function Definitions

```
In [3]: def EC_RS(agR, gamma_i, soil_class, zeta, Tn):
        """ Eurocode Response Spectrum
        This function calculates the pseudo spectral ground acceleration
        according to EC8, given the values of ag_R,  $\gamma_i$ , soil class
         $\zeta$  and a value for the modal period.
        It returns an array of values for compatability purposes, which are
        the maximum ground acceleration possible for any value for the period,
        the given period and the corresponding pseudo spectral ground acceleration"""
        ag = agR*gamma_i
        soil_classes = ["A", "B", "C", "D", "E"]
        index = soil_classes.index(soil_class)
        T_B = [0.15, 0.15, 0.20, 0.20, 0.15][index]
        T_C = [0.40, 0.50, 0.60, 0.80, 0.50][index]
        T_D = 2.50
        S = [1.00, 1.20, 1.15, 1.35, 1.40][index] ; del index
        h = max(np.sqrt(0.10/(zeta+0.05)), 0.55)
        ag_max_g = ag * S * h * 2.50

        if Tn > T_D:
            psa = ag * S * h * 2.50 * T_C * T_D / Tn**2.00
        elif Tn > T_C:
            psa = ag * S * h * 2.50 * T_C / Tn
        elif Tn > T_B:
            psa = ag_max_g
        elif Tn > 0.10:
            psa = ag * S * (1.00 + Tn/T_B * (h*2.50-1.00))
        else:
            print "Abnormal value for period T = " + Tn

        a_max_osc = psa

        return [ag_max_g, Tn, a_max_osc, psa]
```

```
In [4]: def read_th_file(file1, file12):
        """ Read time - history file.
        This function is used in order to reshape the input files given with the installation of ETABS.
        There are 3 files for every event. Every file corresponds to an axis, x, y and z respectively. In each file,
        there are eight values per line, of ground acceleration in units cm/s**2. The time step is constant and equal
        to .02. For the analysis required, the excitation along the z axis is currently omitted by this function.
        The function returns a list containing two numpy arrays with all the values in the right order from each of
        the two files regarding the axis x and y."""
        # Reading File
        agx = pd.read_table(file1,delim_whitespace=True,names=[1,2,3,4,5,6,7,8],skiprows=2,squeeze=True)
        agy = pd.read_table(file12,delim_whitespace=True,names=[1,2,3,4,5,6,7,8],skiprows=2,squeeze=True)
        # Forming Array
        agx = agx.stack()
        agx = agx.reset_index()
        agx.drop(['level_0', 'level_1'], axis=1, inplace=True)
        agx.columns = ['agx']
        agx = agx['agx'].values # convert from series to numpy array

        agx = agx /100.0 # cm/s2 to m/s2 # final np array

        agy = agy.stack()
        agy = agy.reset_index()
        agy.drop(['level_0', 'level_1'], axis=1, inplace=True)
        agy.columns = ['agy']
        agy = agy['agy'].values # convert from series to numpy array

        agy = agy /100.0 # cm/s2 to m/s2 # final np array

        # purging excess points
        least_points = min(len(agx),len(agy))
        agx = agx[0:least_points]
        agy = agy[0:least_points]

        return [agx, agy]
```

```
In [5]: def interpolation_RS(ag, Tn):
        """ Interpolate into a Response Spectrum
        This function calculates a response spectrum given a time history properly formatted, as
        described in the function -read_th_file-, along with an array of desired period values. """
        omega = 2.00*np.pi/Tn # without damping
        mass = 1 # kg, oscillator mass
        zeta = 0.05 # damping percentage
        c = 2.00 * zeta * omega * mass # oscillator damping constant
        k = omega**2.00 * mass # oscillator stiffness
        gamma = 0.50 ; beta = 0.25 # newmark parameters
        force = -mass * ag # force that acts on oscillator
        steps = len(force)
        Dt = 0.02
        # variable initialization
        a = np.zeros(steps) # acceleration of oscillator relative to ground
        u = np.zeros(steps) # velocity of oscillator relative to ground
        x = np.zeros(steps) # position of oscillator relative to ground
        p = np.zeros(steps) # newmark argument
        Da = np.zeros(steps) # step variation variables
        Du = np.zeros(steps)
        Dx = np.zeros(steps)
        Dp = np.zeros(steps)
        Dforce = np.zeros(steps)
        # initial conditions
        u[0] = 0.00
        x[0] = 0.00
        # initial calculations
        a[0] = (force[0]-c*u[0]-k*x[0])/mass
        k_nmrk = k + gamma/(beta*Dt)*c+1.0/(beta*Dt**2.00)*mass
        c_a = 1.00/(beta*Dt)*mass + gamma/beta*c ; c_b = 1.00/(2.00*beta)*mass + Dt * (gamma/(2.00*beta)-1)*c
        Dforce[0:steps-1] = [force[i] - force[i-1] for i in range(1,steps)]
        # iterative calculations
        for i in range (0,steps-1):
            Dp[i] = Dforce[i] + c_a * u[i] + c_b * a[i]
            Dx[i] = Dp[i]/k_nmrk
            Du[i] = gamma/(beta*Dt)*Dx[i] - gamma/beta*u[i] + Dt*(1.00-gamma/(2.00*beta))*a[i]
            Da[i] = 1.00/(beta*Dt**2.00)*Dx[i] - 1.00/(beta*Dt)*u[i]-1.00/(2.00*beta)*a[i]
            x[i+1] = x[i] + Dx[i]
            u[i+1] = u[i] + Du[i]
            a[i+1] = a[i] + Da[i]

        ag_in_g_units = ag/9.81
        a_in_g_units = a/9.81
        a_nonrelative = a_in_g_units + ag_in_g_units
        ag_max_g = np.absolute(ag_in_g_units).max()
        a_max_osc = np.absolute(a_nonrelative).max()
        psa = np.absolute(x).max()*omega**2.00/9.81

        return [ag_max_g, Tn, a_max_osc, psa]
```

```
In [6]: def calc_spectral_area(angle, periods, agx, agy):
        """Calculate spectral area.
        In order to determine the major axis of the seismic event, using this function it is possible to
        calculate a response spectrum diagram that corresponds to an excitation that is a spatial combination
        of the two orthogonal excitations initially provided in the files, given the angle of rotation of the axes, and
        applying that excitation to an oscillator that always has a fixed direction.
        The major axis I of the seismic event will lie at the angle where the excitation of the oscillator
        in general gets maximized.
        It is being theorized that the area under the response spectrum curve represents the objective function that
        is to be maximized. This area, which has units of velocity (m/s) is being returned by this function"""
        angle = np.radians(angle) # converting to radians
        ag = agx * np.cos(angle) + agy * np.sin(angle)
        # preparing input for TH function
        varlist = [] # gather input for multithreading operation
        for i in range(0,len(t)):
            varlist.append((ag, t[i]))
        if __name__ == '__main__':
            spectrum = Parallel(n_jobs=8)(delayed(interpolation_RS) (var1, var2) for var1, var2 in varlist)
            spectrum_arr = np.array(spectrum)
            # calculating area
            area =.simps(spectrum_arr[:,2], dx=0.01)

        return area
```

This function has been withdrawn

```
def maximize_by_angle(angles, periods, agx, agy): """Maximize excitation by altering the angle. Please read the definition of the function -calc_spectral_area-. This
supplementary function """ areas = [] varlist = [] # gather input for multithreading operation for i in range(0,len(angles)): varlist.append((angles[i], t, agx, agy)) if name ==
'main': areas = Parallel(n_jobs=8)(delayed(calc_spectral_area) (angles, periods, agx, agy) for angles, periods, agx, agy in varlist) location = areas.index(max(areas)) return
angles[location]
```

```
In [7]: def determine_angle_of_axis1(agx, agy, t):
        """Determine the angle of rotation of the x - y axes in response to the major axis of the excitation.
        This function passes the time history functions along axes x and y, agx and agy respectively, to the function
        -calc_spectral_area-. Additionally the function uses optimization algorithms to determine the value of the angle
        in order to maximize the output.
        Once the angle is being determined, it is returned by the function. """
        func = lambda x: 1.00/calc_spectral_area(x, t, agx, agy)
        ang = minimize_scalar(func, bounds =(0.00,180.00),method='bounded')
        return ang
```



```

In [8]: def calc_initial_response_spectrum(angle, periods, agx, agy):
        """Calculate the response spectra along axes I and II of the seismic event.
        The term initial is being used because afterwards the resulting response spectra
        will be transformed accordingly, in order to fit with the target curve.
        The function requires the angle of rotation of the x - y axes in response to the major axis of the excitation,
        the time history functions along axes x and y and the period values to perform the calculation.
        It returns two numpy arrays, which correspond to the axes I and II respectively, containing
        the values of the periods, the maximum ground acceleration encountered, the maximum absolute accelerations of the
        oscillators and the pseudo accelerations which is defined as maximum displacement times rotational frequency squared,
        in order for them to be compared with the actual values of the maximum accelerations. """
        angle = np.radians(angle) # converting to radians
        ag = agx * np.cos(angle) + agy * np.sin(angle) # rotating the axes to match Axis I
        th1 = ag
        # preparing input for TH function
        varlist = [] # gather input for multithreading operation
        for i in range(0, len(t)):
            varlist.append((ag, t[i]))
        if __name__ == '__main__':
            spectrum = Parallel(n_jobs=8)(delayed(interpolation_RS)(var1, var2) for var1, var2 in varlist)
        spectrum_a1 = np.array(spectrum) # data type conversion
        angle = angle + np.pi/2.00 #
        ag = agx * np.cos(angle) + agy * np.sin(angle) # rotating the axes to match Axis II
        th2 = ag
        # and repeat operation
        # preparing input for TH function
        varlist = [] # gather input for multithreading operation
        for i in range(0, len(t)):
            varlist.append((ag, t[i]))
        if __name__ == '__main__':
            spectrum = Parallel(n_jobs=8)(delayed(interpolation_RS)(var1, var2) for var1, var2 in varlist)
        spectrum_a2 = np.array(spectrum) # data type conversion
        return [spectrum_a1, spectrum_a2, th1, th2]

```

```

In [9]: def __main__(file_group):
# Import time history functions
# go to the directory
os.chdir(time_history_file_dir)
[agx, agy] = read_th_file(file_group[0],file_group[1])
# Determine angle
ang_result = determine_angle_of_axis1(agx, agy, t)
if not ang_result.success:
    print "Error determining axis 1"
else:
    angle = ang_result.x
# Calculate Response Spectrum for major and minor axes
[spectrum_a1, spectrum_a2, th1, th2] = calc_initial_response_spectrum(angle, t, agx, agy)
# Determine match parameter to the response spectrum to the target curve considering axis I
C_match = minimize(lambda C_match: np.sum((spectrum_a1[:,2]*C_match - ec_spectrum[:,2])**2.00), 0.20, method='SLSQP').x[0]

# change directory
os.chdir(output_dir)

# Plot RS Data
csfont = {'fontname':'Century'}
plt.figure(figsize=(14, 8), dpi= 300, facecolor='w', edgecolor='k')
plt.suptitle("Event: ~ " + file_group[0][:-5]+" ~", fontsize=18,**csfont)
plt.title("Angle of notation: "+str('{0:.3f}'.format(angle))+u"° - Matching Constant: "+ str('{0:.7f}'.format(C_match)),fontsize=15,**csfont)
plt.plot(ec_spectrum[:,1], ec_spectrum[:,3], color = 'purple', linestyle='-', label = 'EC_RS',linewidth=3)
plt.plot(spectrum_a1[:,1], spectrum_a1[:,2], color = 'purple', linestyle='-', label = 'a(g) "Axis I"', linewidth=3)
plt.plot(spectrum_a2[:,1], spectrum_a2[:,2], color = 'grey', linestyle='-', label = 'a(g) "Axis II"', linewidth=3)
plt.plot(spectrum_a1[:,1], spectrum_a1[:,3], color = 'purple', linestyle='-', label = u'PSA(g) = max{δ} ω**2', dashes=(1, 3),linewidth=4.0)
plt.plot(spectrum_a1[:,1], spectrum_a1[:,2]*C_match, color = 'black', linestyle='-', label = 'match "Axis I" event to EC-8 RS (considering', linewidth=3)
plt.plot(spectrum_a2[:,1], spectrum_a2[:,2]*C_match, color = 'grey', linestyle='-', label = 'match "Axis II" event to EC-8 RS (considering', linewidth=3)
plt.legend()
plt.ylabel("Acceleration [g]",fontsize=15,**csfont)
plt.xlabel("Oscillation Period T [s]",fontsize=15,**csfont)
plt.grid(color='grey', linestyle=':', linewidth=0.6)
plt.savefig(file_group[0][:-5]+"_RS.pdf", facecolor='w', edgecolor='w',
orientation='landscape', papertype='A4', format=None,
transparent=False, bbox_inches='tight', pad_inches=0.8,
frameon=None)
plt.savefig(file_group[0][:-5]+"_RS.png", facecolor='w', edgecolor='w',
orientation='landscape', papertype='A4', format=None,
transparent=False, bbox_inches='tight', pad_inches=0.8,frameon=None)
plt.show()
plt.close()

# Plot TH Data
f, (ax1, ax2, ax3, ax4) = plt.subplots(4, sharex=True, sharey=True,figsize=(14, 8), dpi= 300, facecolor='w', edgecolor='k')
f.suptitle("Time-History Plot: ~ " + file_group[0][:-5]+" ~", fontsize=15,**csfont)
ax1.plot(np.arange(0.00,Float(len(th1))),agx, color = 'purple', linestyle='-', label = 'a(g) "Axis x"')
ax2.plot(np.arange(0.00,Float(len(th1))),th1, color = 'purple', linestyle='-', label = 'a(g) "Axis I"')
ax3.plot(np.arange(0.00,Float(len(th1))),agy, color = 'green', linestyle='-', label = 'a(g) "Axis y"')
ax4.plot(np.arange(0.00,Float(len(th1))),th2, color = 'green', linestyle='-', label = 'a(g) "Axis II"')
plt.xlabel("Time t [s]",fontsize=15,**csfont)
f.text(0.90, 0.95, 'Angle of notation: '+str('{0:.3f}'.format(angle))+u"°", ha='right', va='top')
f.text(0.1, 0.50, 'ag [m/s**2]', ha='right', va='top', rotation = 90)
ax1.grid(color='grey', linestyle=':', linewidth=0.6)
ax2.grid(color='grey', linestyle=':', linewidth=0.6)
ax3.grid(color='grey', linestyle=':', linewidth=0.6)
ax4.grid(color='grey', linestyle=':', linewidth=0.6)
f.subplots_adjust(hspace=0.05)
ax1.legend(); ax2.legend();ax3.legend();ax4.legend()

plt.savefig(file_group[0][:-5]+"_TH.pdf", facecolor='w', edgecolor='w',
orientation='landscape', papertype='A4', format=None,
transparent=False, bbox_inches='tight', pad_inches=0.8,
frameon=None)
plt.savefig(file_group[0][:-5]+"_TH.png", facecolor='w', edgecolor='w',
orientation='landscape', papertype='A4', format=None,
transparent=False, bbox_inches='tight', pad_inches=0.8,frameon=None)

numpy.savetxt(str(file_group[0][:-5]+"_RS_match_1.TH"), spectrum_a1[:,2]*C_match)
numpy.savetxt(str(file_group[0][:-5]+"_RS_match_2.TH"), spectrum_a2[:,2]*C_match)
numpy.savetxt(str(file_group[0][:-5]+"_TH_match_1.TH"), th1*C_match)
numpy.savetxt(str(file_group[0][:-5]+"_TH_match_2.TH"), th2*C_match)

```

Parameters

In [10]: time_history_file_dir = "C:\Program Files\Computers and Structures\ETABS 2016\Time History Functions"
output_dir = u"E:\Documents\100 Διαπλασματική Εργασία\PYTHON\Output"

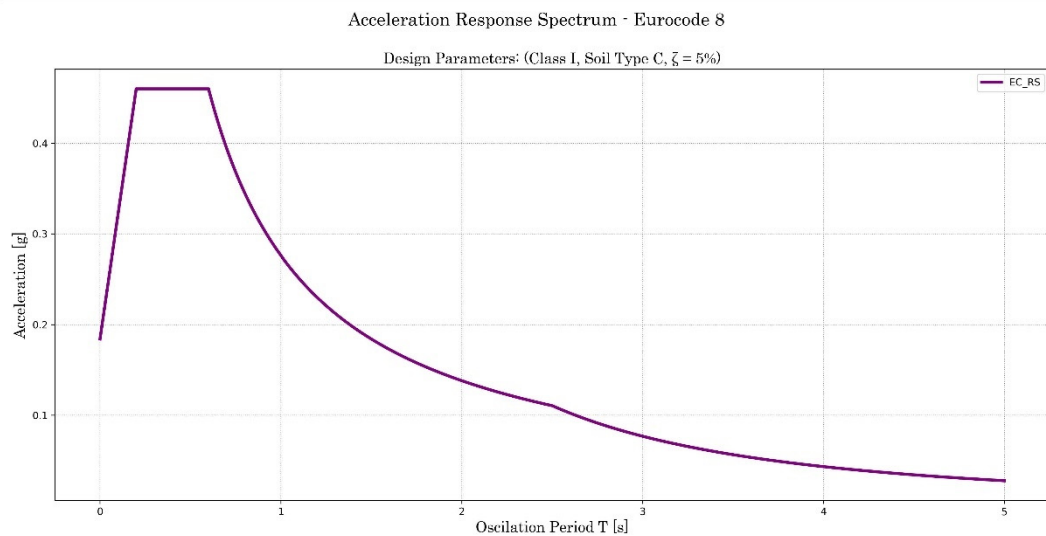
In [11]: # Values of the modal excitation period that will be calculated to create the response spectra
t = np.arange(0.0,5,0.01)
t[0] = 1e-8
t[-1] = 5
print len(t)
500

Calculation of the target curve - Response Spectrum of Eurocode 8

```
In [12]: # calculating EC8 reponse spectrum
varlist = [] # gather input for multithreading operation
for i in range(0,len(t)):
    varlist.append((0.16, 1.00, 'C', 0.05, t[i]))
if __name__ == '__main__':
    ec_spectrum = Parallel(n_jobs=8)(delayed(EC_RS) (agR, gamma_i, soil_class, zeta, Tn) for agR, gamma_i, soil_class, zeta, Tn in varlist)

# storing data
ec_spectrum = np.array(ec_spectrum)
```

```
In [13]: # visualization
csfont = {'fontname':'Century'}
plt.figure(figsize=(18, 8), dpi= 300, facecolor='w', edgecolor='k')
plt.suptitle("Acceleration Response Spectrum - Eurocode 8",fontsize=18,**csfont)
plt.title(u'Design Parameters: (Class I, Soil Type C,  $\zeta = 5\%$ )',fontsize=15,**csfont)
plt.plot(ec_spectrum[:,1], ec_spectrum[:,3], color = 'purple', linestyle='-', label = 'EC_RS',linewidth=3)
plt.legend()
plt.ylabel('Acceleration [g]',fontsize=15,**csfont)
plt.xlabel('Oscillation Period T [s]',fontsize=15,**csfont)
plt.grid(color='grey', linestyle=':', linewidth=0.6)
plt.show()
```



```
In [14]: # go to the directory
os.chdir(time_history_file_dir)
# get a list of all the files with a suffix ".TH"
file_list = glob.glob(u"**.TH")
len(file_list)
```

Out[14]: 42

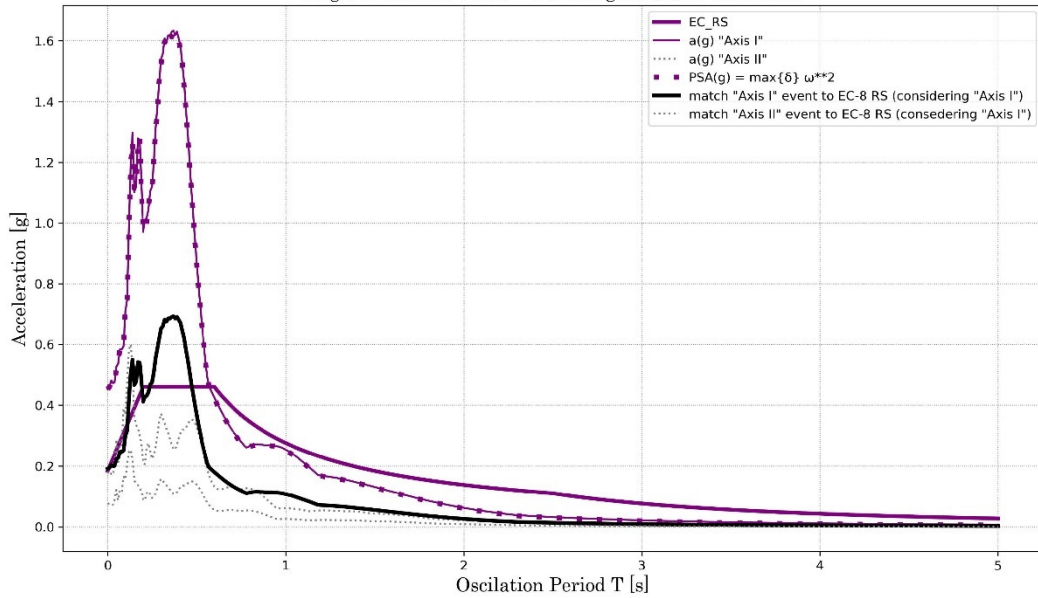
```
In [15]: file_groups = []
for i in np.arange(0,len(file_list)/3,3):
    file_groups.append([file_list[i],file_list[i+1],file_list[i+2]])
len(file_groups)
```

Out[15]: 5

In [16]: `_main_(file_groups[0])`

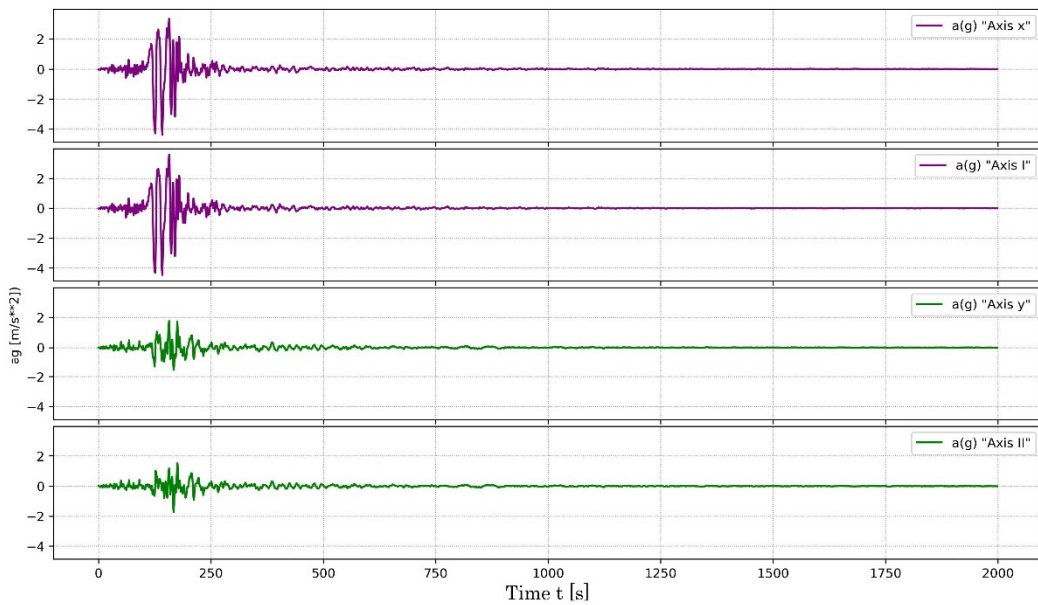
Event: ~ ALTADENA ~

Angle of rotation: 9.408° - Matching Constant: 0.4235958



Time-History Plot: ~ ALTADENA ~

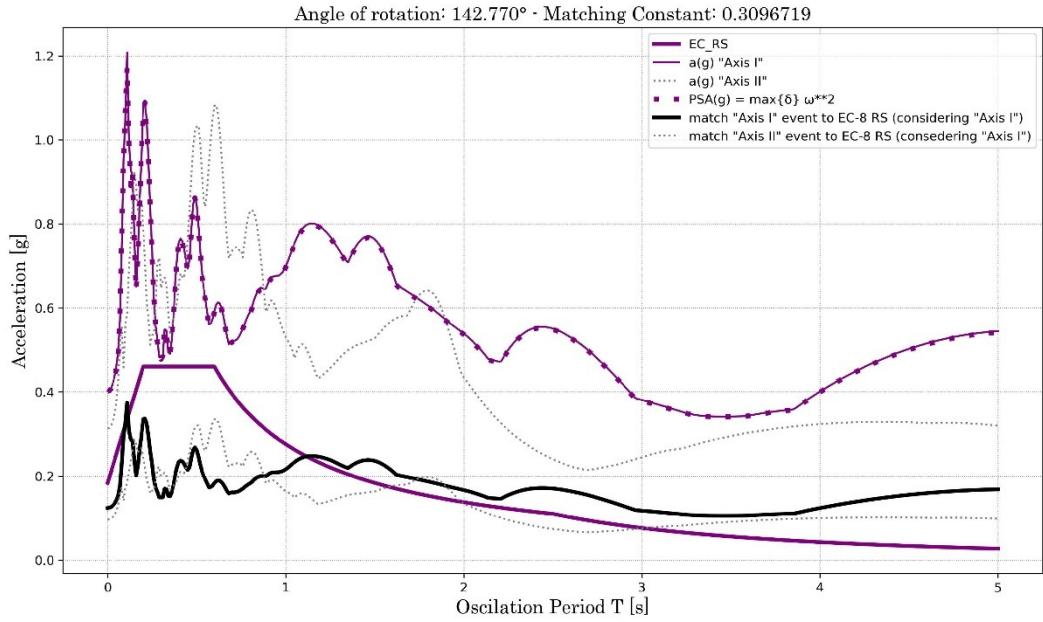
Angle of rotation: 9.408°



In []:

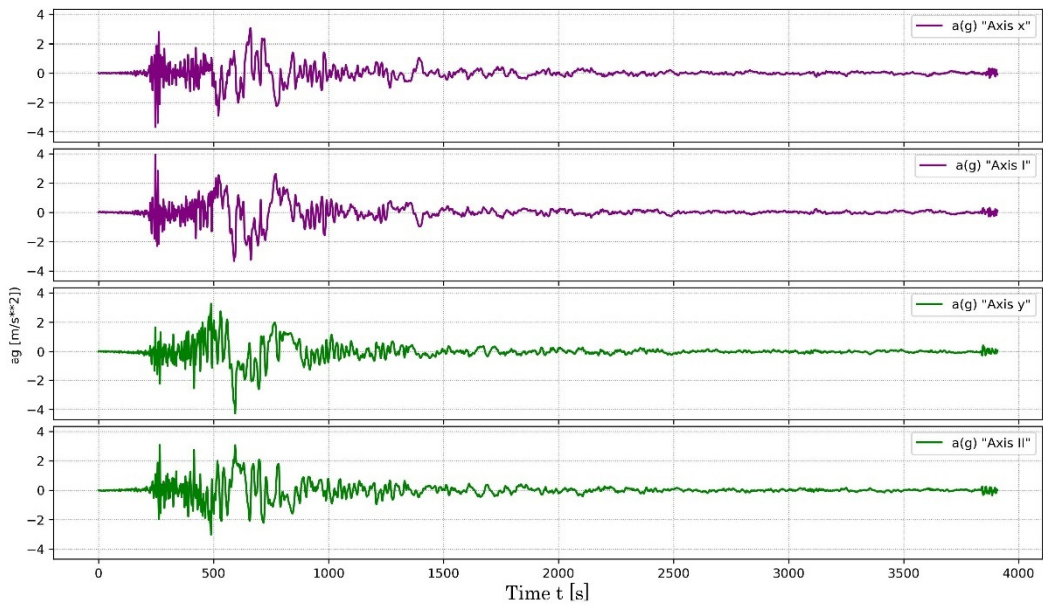
In [17]: `_main_(file_groups[1])`

Event: ~ ARRAY06 ~



Time-History Plot: ~ ARRAY06 ~

Angle of rotation: 142.770°

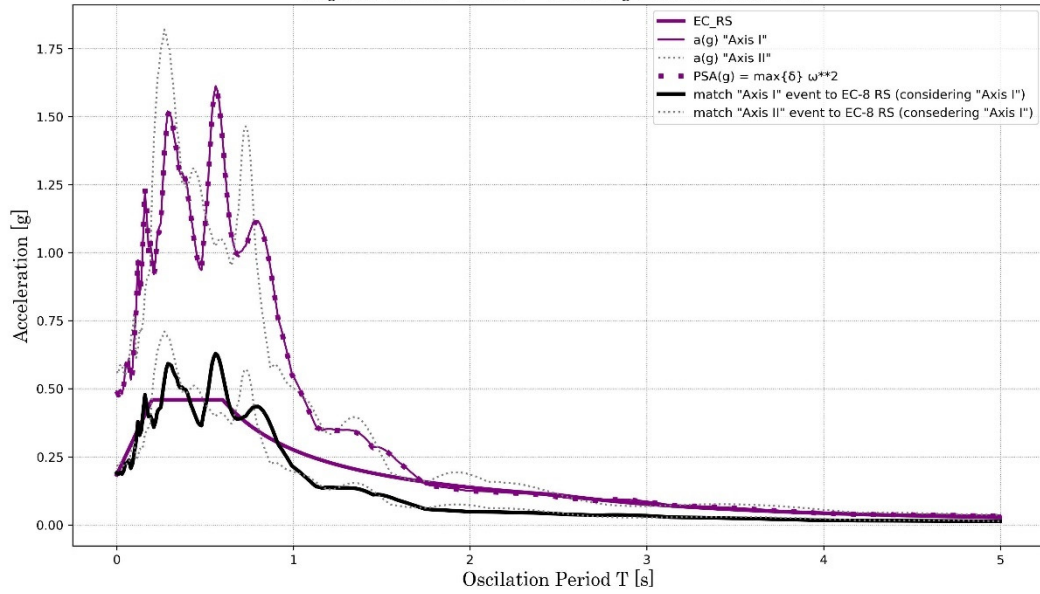


In []:

In [18]: `_main_(file_groups[2])`

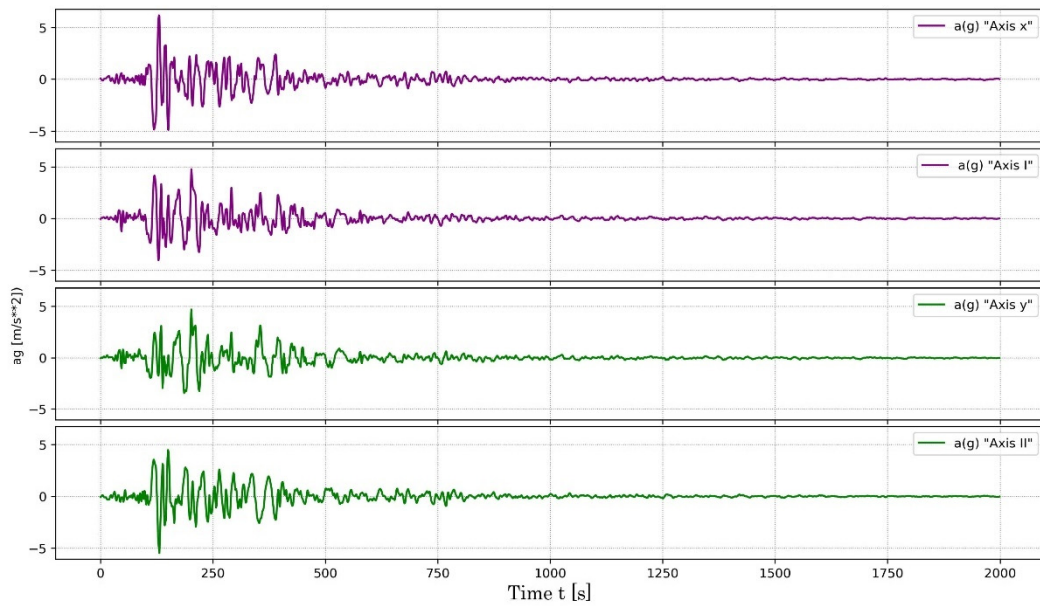
Event: ~ CORRALIT ~

Angle of rotation: 113.972° - Matching Constant: 0.3901779



Time-History Plot: ~ CORRALIT ~

Angle of rotation: 113.972°

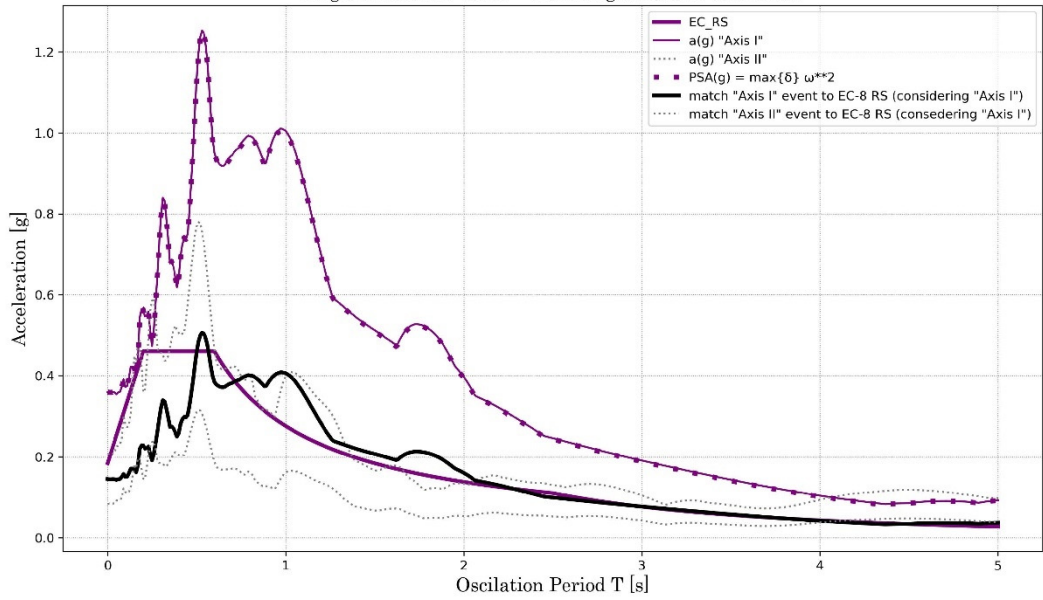


In []:

In [19]: `_main_(file_groups[3])`

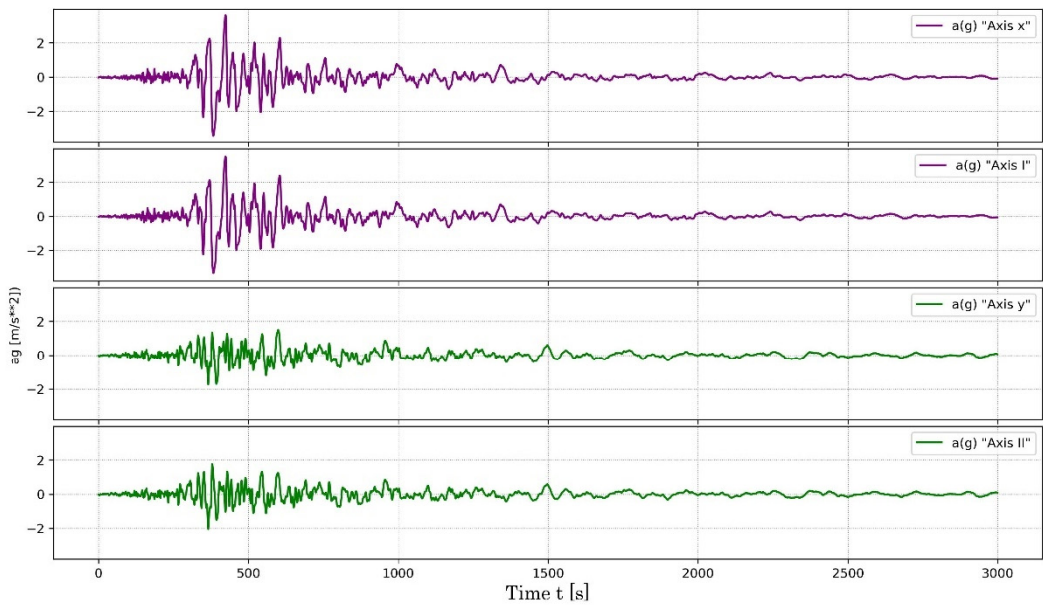
Event: ~ HOLLISTE ~

Angle of rotation: 8.975° - Matching Constant: 0.4041271



Time-History Plot: ~ HOLLISTE ~

Angle of rotation: 8.975°

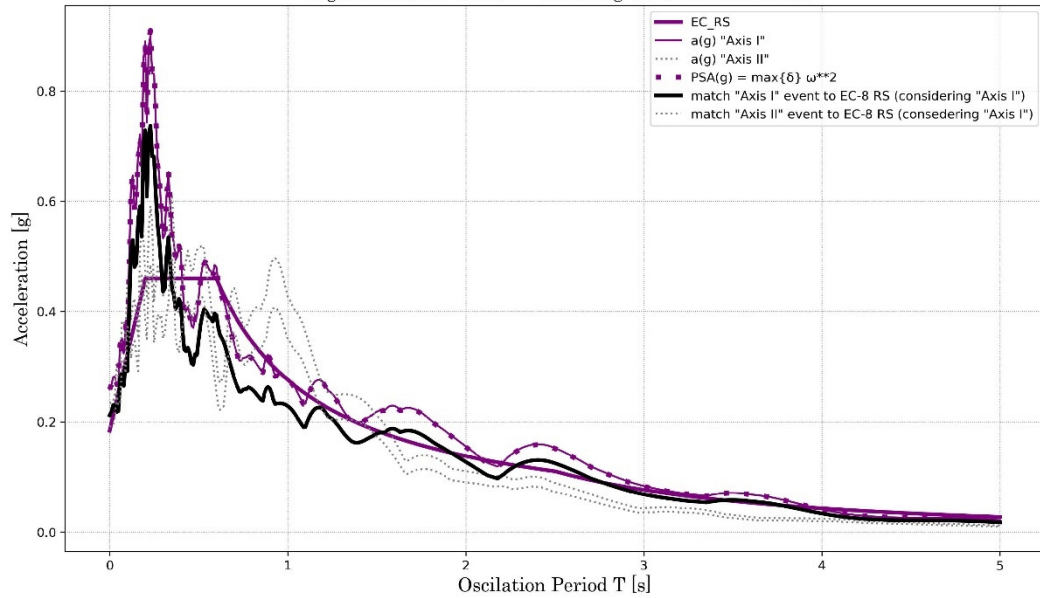


In []:

In [20]: `_main_(file_groups[4])`

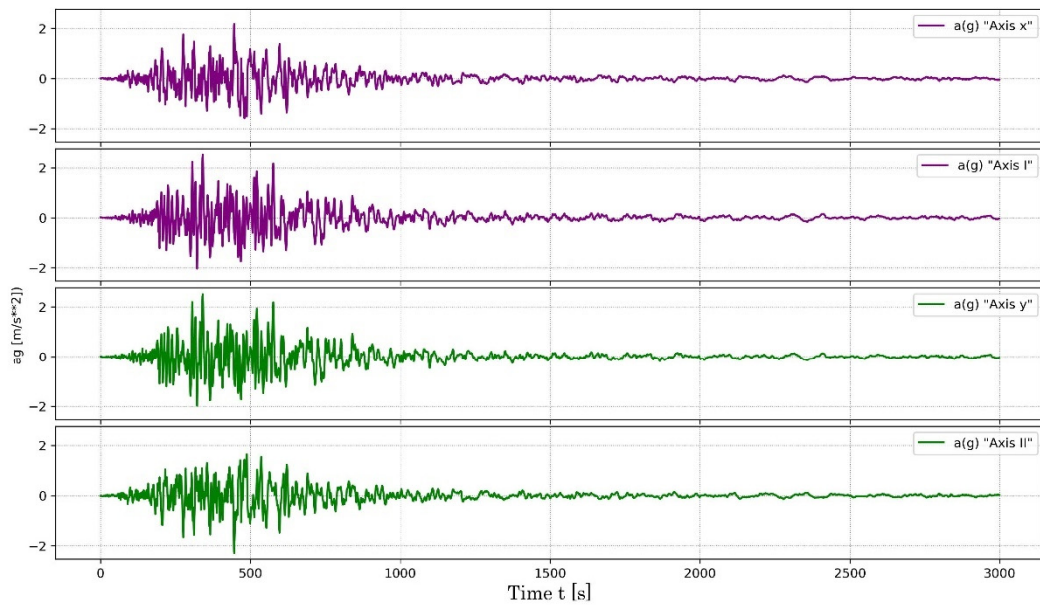
Event: ~ LACC_NOR ~

Angle of rotation: 81.461° - Matching Constant: 0.8189069



Time-History Plot: ~ LACC_NOR ~

Angle of rotation: 81.461°



Συντομογραφίες

A.K. '59	Αντισεισμικός Κανονισμός του 1959
ΚΑΝ.ΕΠΕ.	Κανονισμός Επεμβάσεων
ΕC8	Ευροκώδικας 8
T.F.P.	Triple Friction Pendulum

Ευρετήριο Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ Γ.1 ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΣΤΑΘΜΗΣ -1	40
ΠΙΝΑΚΑΣ Γ.2 ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ.....	40
ΠΙΝΑΚΑΣ Γ.3 ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΔΟΚΩΝ ΠΥΡΓΟΥ	40
ΠΙΝΑΚΑΣ Γ.4 ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΣΤΑΘΜΗΣ 1ΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ.....	41
ΠΙΝΑΚΑΣ Γ.5 ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΖΩΝΗΣ 1 (ΣΤΑΘΜΕΣ 1 ΕΩΣ 8)	41
ΠΙΝΑΚΑΣ Γ.6 ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΖΩΝΗΣ 2 (ΣΤΑΘΜΕΣ 9 ΕΩΣ 13)	41
ΠΙΝΑΚΑΣ Γ.7 ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΖΩΝΗΣ 3 (ΣΤΑΘΜΕΣ 14 ΕΩΣ 17)	42
ΠΙΝΑΚΑΣ Γ.8 ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΖΩΝΗΣ 4 (ΣΤΑΘΜΕΣ 18 ΕΩΣ 20)	42
ΠΙΝΑΚΑΣ Γ.9 ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΖΩΝΗΣ 5 (ΣΤΑΘΜΕΣ 21 ΕΩΣ 24)	42
ΠΙΝΑΚΑΣ Δ.1. ΣΤΡΕΠΤΙΚΗ ΕΥΚΑΜΨΙΑ (ΘΕΣΗ ΜΑΖΑΣ 1)	62
ΠΙΝΑΚΑΣ Δ.2. ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΦΟΡΕΩΝ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΠΟΣΟΣΤΟ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΜΝΟΥΣΑΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ	63
ΠΙΝΑΚΑΣ Δ.3 ΈΛΕΓΧΟΣ dr , ΘΕΣΗ ΜΑΖΑΣ 1	64
ΠΙΝΑΚΑΣ Δ.4. ΈΛΕΓΧΟΣ dr , ΘΕΣΗ ΜΑΖΑΣ 2	65
ΠΙΝΑΚΑΣ Δ.5. ΈΛΕΓΧΟΣ dr , ΘΕΣΗ ΜΑΖΑΣ 3	66
ΠΙΝΑΚΑΣ Δ.6. ΈΛΕΓΧΟΣ dr , ΘΕΣΗ ΜΑΖΑΣ 4	66
ΠΙΝΑΚΑΣ Δ.7. ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΠΑΥΞΗΣΗΣ ΜΕΓΕΘΩΝ ΕΝΤΑΣΗΣ	67
ΠΙΝΑΚΑΣ Δ.8. ΕΠΙΡΡΟΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ Ρ-Δ, ΘΕΣΗ ΜΑΖΑΣ 1.....	68
ΠΙΝΑΚΑΣ Δ.9. ΕΠΙΡΡΟΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ Ρ-Δ, ΘΕΣΗ ΜΑΖΑΣ 2.....	68
ΠΙΝΑΚΑΣ Δ.10. ΕΠΙΡΡΟΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ Ρ-Δ, ΘΕΣΗ ΜΑΖΑΣ 3.....	69
ΠΙΝΑΚΑΣ Δ.11. ΕΠΙΡΡΟΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ Ρ-Δ, ΘΕΣΗ ΜΑΖΑΣ 4.....	70
ΠΙΝΑΚΑΣ Δ.12. ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΒΛΑΒΗΣ ΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	71

ΠΙΝΑΚΑΣ Ε.1. ΚΕΝΤΡΑ ΒΑΡΟΥΣ ΚΑΙ ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΑ ΜΕΓΕΘΗ.	108
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε.2. ΤΡΙΓΩΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ.	112
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε.3. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ. ΑΝΑΛΥΣΗ $Y + 0.3 X$	125
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε.4. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ. ΑΝΑΛΥΣΗ $Y - 0.3 X$	128
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε.5. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ. ΑΝΑΛΥΣΗ $-Y + 0.3 X$	131
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε.6. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ. ΑΝΑΛΥΣΗ $-Y - 0.3 X$	134
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε.7. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ. ΑΝΑΛΥΣΗ $X + 0.3 Y$	137
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε.8. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ. ΑΝΑΛΥΣΗ $X - 0.3 Y$	140
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε.9. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ. ΑΝΑΛΥΣΗ $-X + 0.3 Y$	143
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε.10. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ. ΑΝΑΛΥΣΗ $-X - 0.3 Y$	146
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε.11. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ. ΑΝΑΛΥΣΗ $Y + 0.3 X$	153
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε.12. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ. ΑΝΑΛΥΣΗ $Y - 0.3 X$	156
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε.13. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ. ΑΝΑΛΥΣΗ $-Y + 0.3 X$	159
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε.14. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ. ΑΝΑΛΥΣΗ $-Y - 0.3 X$	162
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε.15. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ. ΑΝΑΛΥΣΗ $X + 0.3 Y$	165
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε.16. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ. ΑΝΑΛΥΣΗ $X - 0.3 Y$	168
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε.17. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ. ΑΝΑΛΥΣΗ $-X + 0.3 Y$	171
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε.18. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ. ΑΝΑΛΥΣΗ $-X - 0.3 Y$	174
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε.19. ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ PUSHOVER ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΟΥ ΠΥΡΗΝΑ	175
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε.20. ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ PUSHOVER ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΟΥ ΠΥΡΗΝΑ	175
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΤ.1. ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ	210
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΤ.2. ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΕΜΝΟΥΣΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΔΙΧΩΣ ΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ.....	211

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΤ.3. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ.....	220
--	-----

Ευρετήριο Εικόνων & Σχημάτων

ΕΙΚΟΝΑ Β.1 ΠΥΡΓΟΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΙΑ.....	14
ΕΙΚΟΝΑ Β.2 Ο ΠΥΡΓΟΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΙΑ ΣΗΜΕΡΑ.....	15
ΕΙΚΟΝΑ Β.3 ΠΡΟΟΠΤΙΚΟ ΦΕΡΟΝΤΟΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥ. (ΠΡΟΣΩΠΙΚΟ ΑΡΧΕΙΟ ΓΡΑΦΟΝΤΟΣ).....	16
ΕΙΚΟΝΑ Β.4 ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΟΨΗ ΤΥΠΙΚΟΥ ΟΡΟΦΟΥ. (ΠΡΟΣΩΠΙΚΟ ΑΡΧΕΙΟ ΓΡΑΦΟΝΤΟΣ).....	16
ΕΙΚΟΝΑ Β.5 ΑΞΟΝΟΜΕΤΡΙΚΟ ΦΕΡΟΝΤΟΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥ (ΠΡΟΣΩΠΙΚΟ ΑΡΧΕΙΟ ΓΡΑΦΟΝΤΟΣ).....	18
ΕΙΚΟΝΑ Β.6 21ΟΣ ΌΡΟΦΟΣ.....	18
ΕΙΚΟΝΑ Β.7 ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΤΟΜΗ 1 (ΠΡΟΣΩΠΙΚΟ ΑΡΧΕΙΟ ΓΡΑΦΟΝΤΟΣ).....	19
ΕΙΚΟΝΑ Β.8 ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΤΟΜΗ 2 (ΠΡΟΣΩΠΙΚΟ ΑΡΧΕΙΟ ΓΡΑΦΟΝΤΟΣ).....	20
ΕΙΚΟΝΑ Β.9. ΤΟΜΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ (ΣΤΑΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ ΟΙΚΟΔΟΜΙΚΗΣ ΑΔΕΙΑΣ).....	21
ΕΙΚΟΝΑ Β.10. ΤΟΜΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ (ΣΤΑΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ ΟΙΚΟΔΟΜΙΚΗΣ ΑΔΕΙΑΣ).....	21
ΕΙΚΟΝΑ Β.11. 3D ΚΑΤΟΨΗ ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΟΥ 3ΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ. (ΠΡΟΣΩΠΙΚΟ ΑΡΧΕΙΟ ΤΟΥ ΓΡΑΦΟΝΤΟΣ).....	21
ΕΙΚΟΝΑ Β.12. ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ 3D ΤΟΜΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ. (ΠΡΟΣΩΠΙΚΟ ΑΡΧΕΙΟ ΤΟΥ ΓΡΑΦΟΝΤΟΣ).....	22
ΕΙΚΟΝΑ Β.13. ΔΙΑΞΟΝΙΚΗ 3D ΤΟΜΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ. (ΠΡΟΣΩΠΙΚΟ ΑΡΧΕΙΟ ΤΟΥ ΓΡΑΦΟΝΤΟΣ).....	23
ΕΙΚΟΝΑ Β.14 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ (ΣΤΑΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ ΟΙΚΟΔΟΜΙΚΗΣ ΑΔΕΙΑΣ).....	24
ΕΙΚΟΝΑ Β.15 ΞΥΛΟΤΥΠΟΣ ΤΥΠΙΚΟΥ ΟΡΟΦΟΥ, ΑΠΟ ΤΑ ΕΓΚΕΚΡΙΜΕΝΑ ΣΧΕΔΙΑ ΤΗΣ ΟΙΚΟΔΟΜΙΚΗΣ ΑΔΕΙΑΣ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ.....	24
ΕΙΚΟΝΑ Β.16 ΞΥΛΟΤΥΠΟΣ ΟΡΟΦΗΣ 24ΟΥ ΟΡΟΦΟΥ.....	25
ΕΙΚΟΝΑ Β.17 ΞΥΛΟΤΥΠΟΣ ΟΡΟΦΗΣ ΙΣΟΓΕΙΟΥ.....	26
ΕΙΚΟΝΑ Β.18 ΞΥΛΟΤΥΠΟΣ - ΤΟΜΕΣ ΘΕΜΕΛΙΩΝ.....	27

ΕΙΚΟΝΑ Β.19 ΞΥΛΟΤΥΠΟΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ	28
ΕΙΚΟΝΑ Β.20. ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΞΥΛΟΤΥΠΟ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΟΙΚΟΔΟΜΙΚΗΣ ΑΔΕΙΑΣ.....	30
ΕΙΚΟΝΑ Β.21. ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΞΥΛΟΤΥΠΟ ΟΡΟΦΗΣ ΙΣΟΓΕΙΟΥ ΤΗΣ ΟΙΚΟΔΟΜΙΚΗΣ ΑΔΕΙΑΣ.....	31
ΕΙΚΟΝΑ Β.22. ΞΥΛΟΤΥΠΟΣ ΟΡΟΦΗΣ 3ΗΣ ΚΑΙ 4ΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΑΠΟ ΤΑ ΣΤΑΤΙΚΑ ΤΗΣ ΟΙΚΟΔΟΜΙΚΗΣ ΑΔΕΙΑΣ.	33
ΕΙΚΟΝΑ Β.23. ΕΣΤΙΑΣΗ ΣΤΗΝ ΚΑΤΩ ΑΡΙΣΤΕΡΗ ΓΩΝΙΑ ΤΗΣ ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ	34
ΕΙΚΟΝΑ Γ.1 ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ ΑΠΟ ΤΟΝ Α.Κ. '59	37
ΕΙΚΟΝΑ Γ.2 ΧΩΡΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ (ΡΑΦ)	38
ΕΙΚΟΝΑ Γ.3 ΤΥΠΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΣΤΑΘΜΗΣ	39
ΕΙΚΟΝΑ Γ.4. ΣΤΑΘΜΗ 1 (ΟΡΟΦΗ ΙΣΟΓΕΙΟΥ)	39
ΕΙΚΟΝΑ Γ.5. ΣΤΑΘΜΕΣ 2, 3, 4.....	40
ΕΙΚΟΝΑ Δ.1. ΈΛΕΓΧΟΙ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΜΕΛΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ	82
ΕΙΚΟΝΑ Ε.1. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ	116
ΕΙΚΟΝΑ Ε.2. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ.....	128
ΕΙΚΟΝΑ Ε.3. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ.....	131
ΕΙΚΟΝΑ Ε.4. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ.....	134
ΕΙΚΟΝΑ Ε.5. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ.....	137
ΕΙΚΟΝΑ Ε.6. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ.....	140
ΕΙΚΟΝΑ Ε.7. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ.....	143
ΕΙΚΟΝΑ Ε.8. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ.....	146
ΕΙΚΟΝΑ Ε.9. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ.....	153
ΕΙΚΟΝΑ Ε.10. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ.....	156
ΕΙΚΟΝΑ Ε.11. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ.....	159

ΕΙΚΟΝΑ Ε.12. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ	162
ΕΙΚΟΝΑ Ε.13. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ	165
ΕΙΚΟΝΑ Ε.14. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ	168
ΕΙΚΟΝΑ Ε.15. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ	171
ΕΙΚΟΝΑ Ε.16. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ	174
ΕΙΚΟΝΑ ΣΤ.1. ΠΡΟΟΠΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ETABS	190
ΕΙΚΟΝΑ ΣΤ.2. Όψη στατικού προσομοιώματος ETABS	191
ΕΙΚΟΝΑ ΣΤ.3 ΡΑΦ. 5η ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ.....	193
ΕΙΚΟΝΑ ΣΤ.4. ETABS. 5η ΙΔΙΟΜΟΡΦΗ	193
ΕΙΚΟΝΑ ΣΤ.5. ΕΠΙΠΕΔΟ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ. Όψη yz	207
ΕΙΚΟΝΑ ΣΤ.6. ΕΠΙΠΕΔΟ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ. Όψη xz	208
ΕΙΚΟΝΑ ΣΤ.7. ΘΕΣΕΙΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ.....	209
ΕΙΚΟΝΑ ΣΤ.8. ΑΡΙΘΜΗΣΗ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ.	209
ΣΧΗΜΑ Γ.1 ΚΑΜΠΤΙΚΕΣ ΡΟΠΕΣ ΣΕ ΜΕΣΑΙΟ ΠΛΑΙΣΙΟ.....	47
ΣΧΗΜΑ Γ.2 Έλεγχοι Επαρκείας. Ενδεικτική τομή	48
ΣΧΗΜΑ Γ.3 Έλεγχοι Επαρκείας. Αξονομετρικό	49
ΣΧΗΜΑ Γ.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΡΑΣΕΩΝ - ΑΝΤΟΧΩΝ ΔΟΚΟΥ ΣΥΖΕΥΣΗΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΩΝ. ΛΟΓΟΣ ΕΞΑΝΤΛΗΣΗΣ 1.14....	50
ΣΧΗΜΑ Γ.5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ Μ-Ν ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ. ΛΟΓΟΣ ΕΞΑΝΤΛΗΣΗΣ 1.23	51
ΣΧΗΜΑ Δ.1. ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΟΥΜΕΝΗΣ ΜΑΖΑΣ ΑΝΑ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ.	58
ΣΧΗΜΑ Δ.2 ΣΤΡΕΠΤΙΚΗ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ 24ΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ.....	60
ΣΧΗΜΑ Δ.3 ΣΤΡΕΠΤΙΚΗ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ	61

ΣΧΗΜΑ Δ.4. ΣΧΕΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	72
ΣΧΗΜΑ Ε.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΓΕΘΩΝ	87
ΣΧΗΜΑ Ε.2 ΔΙΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΡΟΠΩΝ - ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΩΝ.....	89
ΣΧΗΜΑ Ε.3. ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΣ ΟΡΙΣΜΟΣ ΓΩΝΙΑΣ ΣΤΡΟΦΗΣ ΧΟΡΔΗΣ.	90
ΣΧΗΜΑ Ε.4. ΚΑΜΠΥΛΗ Μ-Θ ΑΚΡΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ	91
ΣΧΗΜΑ Ε.5. ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΤΕΜΝΟΥΣΑΣ ΣΤΗΝ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΜΕΛΩΝ	93
ΣΧΗΜΑ Ε.6. ΣΤΑΘΜΕΣ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΦΟΡΕΑ. (ΨΥΧΑΡΗΣ, 2016)	95
ΣΧΗΜΑ Ε.7 ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΜΟΝΟΒΑΘΜΙΟΥ. (ΨΥΧΑΡΗΣ, 2016)	97
ΣΧΗΜΑ Ε.8. ΣΗΜΕΙΑ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ. (ΨΥΧΑΡΗΣ, 2016)	97
ΣΧΗΜΑ Ε.9. ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ	100
ΣΧΗΜΑ Ε.10. ΠΡΟΒΟΛΟΣ.....	102
ΣΧΗΜΑ Ε.11. ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ	103
ΣΧΗΜΑ Ε.12. ΕΠΙΡΡΟΗ ΑΝΩΤΕΡΩΝ ΙΔΙΟΜΟΡΦΩΝ.	106
ΣΧΗΜΑ Ε.13. ΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΣΤΟ SEISMOSTRUCT	108
ΣΧΗΜΑ Ε.14. ΥΣΤΕΡΗΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ Β300 (ΓΙΑ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗΣ 1.20).	110
ΣΧΗΜΑ Ε.15. ΥΣΤΕΡΗΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΧΑΛΥΒΑ ΟΠΛΙΣΜΟΥ STAHL III.....	111
ΣΧΗΜΑ Ε.16. ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ +X	114
ΣΧΗΜΑ Ε.17. ΦΑΣΜΑ ADRS EC 8	117
ΣΧΗΜΑ Ε.18. ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΜΟΝΟΒΑΘΜΙΟΥ.....	119
ΣΧΗΜΑ Ε.19. ΔΙΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ	120
ΣΧΗΜΑ Ε.20. ΣΗΜΕΙΑ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ. $Y + 0.3 X$	123
ΣΧΗΜΑ Ε.21. ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ. $Y + 0.3 X$	124

ΣΧΗΜΑ Ε.22. ΣΗΜΕΙΑ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ. $Y - 0.3 X$	126
ΣΧΗΜΑ Ε.23. ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ. $Y - 0.3 X$	127
ΣΧΗΜΑ Ε.24. ΣΗΜΕΙΑ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ. $- Y + 0.3 X$	129
ΣΧΗΜΑ Ε.25. ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ. $- Y + 0.3 X$	130
ΣΧΗΜΑ Ε.26. ΣΗΜΕΙΑ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ. $- Y - 0.3 X$	132
ΣΧΗΜΑ Ε.27. ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ. $- Y - 0.3 X$	133
ΣΧΗΜΑ Ε.28. ΣΗΜΕΙΑ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ. $X + 0.3 Y$	135
ΣΧΗΜΑ Ε.29. ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ. $X + 0.3 Y$	136
ΣΧΗΜΑ Ε.30. ΣΗΜΕΙΑ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ. $X - 0.3 Y$	138
ΣΧΗΜΑ Ε.31. ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ. $X - 0.3 Y$	139
ΣΧΗΜΑ Ε.32. ΣΗΜΕΙΑ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ. $- X + 0.3 Y$	141
ΣΧΗΜΑ Ε.33. ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ. $- X + 0.3 Y$	142
ΣΧΗΜΑ Ε.34. ΣΗΜΕΙΑ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ. $- X - 0.3 Y$	144
ΣΧΗΜΑ Ε.35. ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ. $- X - 0.3 Y$	145
ΣΧΗΜΑ Ε.36. ΣΗΜΕΙΑ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ. $Y + 0.3 X$	151
ΣΧΗΜΑ Ε.37. ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ. $Y + 0.3 X$	152
ΣΧΗΜΑ Ε.38. ΣΗΜΕΙΑ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ. $Y - 0.3 X$	154
ΣΧΗΜΑ Ε.39. ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ. $Y - 0.3 X$	155
ΣΧΗΜΑ Ε.40. ΣΗΜΕΙΑ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ. $-Y + 0.3 X$	157
ΣΧΗΜΑ Ε.41. ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ. $-Y + 0.3 X$	158
ΣΧΗΜΑ Ε.42. ΣΗΜΕΙΑ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ. $-Y - 0.3 X$	160
ΣΧΗΜΑ Ε.43. ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ. $-Y - 0.3 X$	161

ΣΧΗΜΑ Ε.44. ΣΗΜΕΙΑ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ. $X + 0.3 Y$	163
ΣΧΗΜΑ Ε.45. ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ. $X + 0.3 Y$	164
ΣΧΗΜΑ Ε.46. ΣΗΜΕΙΑ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ. $X - 0.3 Y$	166
ΣΧΗΜΑ Ε.47. ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ. $X - 0.3 Y$	167
ΣΧΗΜΑ Ε.48. ΣΗΜΕΙΑ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ. $- X + 0.3 Y$	169
ΣΧΗΜΑ Ε.49. ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ. $- X + 0.3 Y$	170
ΣΧΗΜΑ Ε.50. ΣΗΜΕΙΑ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ. $- X - 0.3 Y$	172
ΣΧΗΜΑ Ε.51. ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ. $- X - 0.3 Y$	173
ΣΧΗΜΑ ΣΤ.1. ΒΡΟΓΧΟΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ ΤΡΙΒΗΣ. ΠΗΓΗ: (CONSTANTINOU, ET AL., 1988).....	180
ΣΧΗΜΑ ΣΤ.2. ΤΟΜΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟ ΕΝΟΣ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ ΤΡΡ. ΠΗΓΗ: (FENZ & CONSTANTINOU, 2007).....	182
ΣΧΗΜΑ ΣΤ.3. ΜΟΝΟΒΑΘΜΙΟΣ ΤΑΛΑΝΤΩΤΗΣ ΣΕ ΤΥΧΟΥΣΑ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ.	197
ΣΧΗΜΑ ΣΤ.4. ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΓΩΝΙΑΣ ΤΑΛΑΝΤΩΤΗ.	199
ΣΧΗΜΑ ΣΤ.5. ΑΞΟΝΙΚΗ LINK Κ9 ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ LACC_NOR_RS_MATCH_Y.	212
ΣΧΗΜΑ ΣΤ.6. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΥΣΤΕΡΗΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΕΦΕΔΡΑΝΟ 41.	218
ΣΧΗΜΑ ΣΤ.7. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΥΣΤΕΡΗΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΕΦΕΔΡΑΝΟ 1.	219

Βιβλιογραφία

ASCE 41-06-2007, χ.χ. s.l.:s.n.

CHOPRA, A. K., 2007. *ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ. Θεωρία και εφαρμογές στη σεισμική μηχανική*. 3η Έκδοση επιμ. NJ, USA: Εκδόσεις πρωτοτύπου Pearson Education Inc. / Ελληνικής Έκδοσης Μ. Γκιούρδας.

Computers & Structures, Inc, 2016. *CSI Analysis Reference Manual, For SAP2000®, ETABS®, SAFE® and CSiBridge®*. Berkeley, California, USA <3: Computers & Structures, Inc..

Constantinou, M. & M. A. & R. A., 1990. Teflon Bearings in Base Isolation II: Modeling. *Journal of Structural Engineering-asce - J STRUCT ENG-ASCE*. 116. 10.1061/(ASCE)0733-9445(1990)116:2(455)..

Constantinou, M. C., Reinhorn, A. M. & Mokha, A., 1988. *Teflon Bearings in Aseismic Base Isolation: Experimental Studies and Mathematical Modeling*. New York: National Center For Earthquake Engineering Research.

Donà, M., 2016. Finite Element Modelling with Plastic Hinges.

Fardis, M. N. και συν., 2011. *Οδηγός σχεδιασμού σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8: Αντισεισμικός Σχεδιασμός Κατασκευών*. Αθήνα: Κλειδάριθμος.

Fenz, D. & Constantinou, M., 2007. *Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: Experimental verification*. New York: John Wiley & Sons Ltd..

Fenz, D. M. & Constantinou, M. C., 2007. *Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: Theory*. New York: John Wiley & Sons Ltd..

Giannopoulos, I., 2009. *Seismic Assessment of a RC Building according to FEMA 356 and Eurocode 8*. s.l.:16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, 21-23/10/ 2009, Πάφος, Κύπρος.

HALL, J., 1999. Στο: *Discussion of "The role of damping in seismic isolation"*. *Earthquake engineering and structural dynamics*. s.l.:s.n., pp. 28(12):1717-1720.

Kelly, J., 1999. Στο: *The role of damping in seismic isolation*. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. s.l.:s.n., pp. 28(1):3-20.

Romão, X., Delgado, R. & Costa, A., 2009. *Practical aspects of demand and capacity evaluation of RC members in the context of EC8-3*. s.l.:Wiley.

Χατζαράς, Χ., 2015. *vice.com*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://www.vice.com/gr/article/kbqn83/pyrgos-peiraia-emporonautiliako-kentro-fwtografies>

[Πρόσβαση 09 05 2018].

ΧΛΥΚΑΣ, Α., 2017. *ΕΡΕΥΝΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΚΤΗΡΙΟΥ ΤΟΥ ΕΜΠΟΡΟΝΑΥΤΙΛΙΑΚΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ ΣΤΟΝ ΠΕΙΡΑΙΑ, ΓΝΩΣΤΟΥ ΚΑΙ ΩΣ "Ο ΠΥΡΓΟΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΙΑ"*. ΑΘΗΝΑ: s.n.

Ψυχάρης, Ι. Ν., 2016. *ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ*. Αθήνα: s.n.