



ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ Ε. ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ ΠΛΑΙΣΙΑΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕΣΩ
ΕΛΑΣΤΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ**

**VULNERABILITY ANALYSIS OF FRAME STRUCTURES USING
ELASTOPLASTIC ANALYSIS**

ΚΟΥΤΣΟΠΟΔΙΩΤΗΣ ΚΟΣΜΑΣ

Μέλη εξεταστικής επιτροπής: επίκουρος καθηγητής κ.Αλευράς Παναγιώτης
μεταδιδάκτωρ ερευνήτρια κα.Βαρβάρα Χαραλαμπίδη

ΧΑΝΙΑ, 2024

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στους τρόπους εκτίμησης της τρωτότητας ενός κτιρίου, με έμφαση στην ελαστοπλαστική ανάλυση μέσω του προγράμματος MASTAN2. Το MASTAN2 επιτρέπει την εφαρμογή φορτίσεων στα δομικά στοιχεία μιας κατασκευής, ώστε να αξιολογηθεί η σεισμική συμπεριφορά και η αντοχή της σε οριακές συνθήκες. Με την ανάλυση αυτή, προσδιορίζονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις της κατασκευής, παρέχοντας μια πιο ακριβή εκτίμηση της ακαμψίας του κτιρίου, καθώς λαμβάνεται υπόψη η μη γραμμική συμπεριφορά των υλικών.

Η ελαστοπλαστική ανάλυση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στη σεισμική μηχανική, καθώς επιτρέπει την αξιολόγηση της απόδοσης των κτιρίων υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτισης, κάτι κρίσιμο για το σχεδιασμό τους. Στην παρούσα εργασία η ανάλυση εφαρμόζεται σε ένα διώροφο κτίριο κατασκευασμένο πριν το 1985, το οποίο κατέρρευσε από τον σεισμό της Αχαΐας-Ηλείας στις 8 Ιουνίου 2008. Επιπλέον γίνεται προσπάθεια εκτίμησης της απόκρισης για διαφοροποιημένα στοιχεία.

Με αυτόν τον τρόπο, η εργασία επιδιώκει να προσφέρει σημαντικές πληροφορίες για την εκτίμηση της τρωτότητας υφιστάμενων κατασκευών μέσω ελαστοπλαστικών αναλύσεων, συμβάλλοντας στη βελτίωση της σεισμικής αντοχής και ασφάλειας των κατασκευών.

ABSTRACT

The present thesis focuses on methods for assessing the vulnerability of a building, with an emphasis on elastoplastic analysis using the MASTAN2 software. MASTAN2 allows the application of loads to the structural elements of a construction in order to evaluate its seismic behavior and strength under limit conditions. Through this analysis, the stresses and deformations of the construction are determined, providing a more accurate assessment of the building's stiffness, as the nonlinear behavior of the materials is taken into account.

Elastoplastic analysis is particularly useful in seismic engineering because it allows for the evaluation of building performance under different loading conditions, which is critical for their design. In this study, the analysis is applied to a two-story building constructed before 1985, which collapsed during the Achaia-Ilia earthquake on June 8, 2008. Additionally, an effort is made to estimate the response for modified elements.

In this way, the study aims to provide significant insights into assessing the vulnerability of existing structures through elastoplastic analyses, contributing to the improvement of seismic resistance and safety of constructions.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήταν αδύνατη χωρίς την πολύτιμη υποστήριξη του επιβλέπων καθηγητή μου κ.Γεώργιου Σταυρουλάκη. Τον ευχαριστώ ιδιαίτερα για την αδιάκοπη επιστημονική του καθοδήγηση σε όλα τα στάδια της μελέτης, τις διδακτικές συμβουλές και την έμπρακτη βοήθεια στην εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην μεταδιδάκτωρ ερευνήτρια κ. Βαρβάρα Χαραλαμπίδη για την άριστη συνεργασία που είχαμε στα πλαίσια αυτής της εργασίας , τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε για να μου δώσει σημαντικά στοιχεία και εξηγήσεις πάνω στο θέμα , αλλά και για την προθυμία της και την βοήθεια, που ποτέ δεν δίστασε να μου δώσει.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω πολύ τους γονείς μου, οι οποίοι υπήρξαν πάντα ένα ανεκτίμητο στήριγμα για μένα και στους οποίους οφείλω όλη την διαδρομή των σπουδών μου, μέχρι και σήμερα.

Στους γονείς μου

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ABSTRACT	2
Ευχαριστίες	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ ΕΙΚΟΝΩΝ-ΣΧΗΜΑΤΩΝ	7
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
1.1 Γενικά	12
1.2 Σκοπός και στόχοι της διπλωματικής.....	12
1.3 Επισκόπηση της Σημασίας της Εκτίμησης της Τρωτότητας Υφιστάμενων Κατασκευών	13
2. ΕΛΑΣΤΟΠΛΑΣΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ.....	14
2.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο	14
2.2 Μέθοδοι Ελαστοπλαστικής Ανάλυσης	14
2.3 Εκτίμηση Τρωτότητας Υφιστάμενων Κατασκευών.....	15
2.4 Χρήση Λογισμικού MASTAN2	15
3.Τρωτότητα υφιστάμενων κατασκευών	16
3.1 Εισαγωγή.....	16
3.1.2 Μέθοδοι εκτίμησης.....	16
3.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την τρωτότητα	16
3.3 Στάδια Αποτίμησης	18
3.4 Κατάταξη Μεθόδων	19
4.Μέθοδοι ανάλυσης κατασκευών	20
4.1 Εισαγωγή.....	20
4.2 Ελαστικές αναλύσεις.....	21
4.2.1 Ελαστική στατική ανάλυση	21
4.2.2 Ελαστική δυναμική ανάλυση	21
4.3 Μη γραμμική στατική ανάλυση	22
4.3.1 Περιγραφή μη γραμμικής στατικής ανάλυσης	22
4.3.2 Σκοπός μη γραμμικής στατικής ανάλυσης.....	22
4.3.3 Υπολογιστική προσέγγιση μη γραμμικής στατικής ανάλυσης σε υφιστάμενα κτίρια	22
4.4 Ελαστοπλαστική Ανάλυση	26
5.Πλαστιμότητα Στοιχείων από Οπλισμένο Σκυρόδεμα	29
5.1 Εισαγωγή.....	29

5.2 Συμπεριφορά Δομικών Στοιχείων	30
5.3 Μηχανισμοί Πλαστιμότητας	32
5.4 Κανονιστικές Απαιτήσεις (Eurocode 2)	32
5.4.1 Στρατηγικές Σχεδιασμού	32
6. Περιγραφή κτιρίου	33
6.1 Περιγραφή Κατασκευής	33
6.2 Υλικά Κατασκευής	33
6.3 Γεωμετρία και οπλισμοί διατομών	36
7. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ MASTAN2	40
7.1 Προσομοίωση στο MASTAN2	40
7.1.1 Τι είναι το MASTAN2 ;	40
7.1.2 Μονάδες Μέτρησης	40
7.2 Εισαγωγή Δεδομένων	42
7.2.1 Γεωμετρία Δομής	42
7.2.2 Ιδιότητες Υλικών	44
7.2.3 Φορτία της Κατασκευής	49
8. Ανάλυση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα	53
8.1 Αποτελέσματα ελαστικής ανάλυσης πρώτης τάξης	53
8.2 Διαγράμματα Ιδιομορφών	57
8.3 Ανελαστική Ανάλυση	62
8.3.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Χ'Χ	62
8.3.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΘΕΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Υ'Υ	69
8.4 Ορισμός της δυναμικής ανάλυσης με την χρήση επιταχυνσιογραφημάτων (ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑΣ)	74
8.4.1 Καθορισμός χαρακτηριστικών των σεισμικών διεγέρσεων	79
8.5 Παράδειγμα ταλάντωσης κτιρίου στον σεισμό Χιλής	96
8.6 Προσπάθεια εκτίμησης της απόκρισης για διαφοροποιημένα στοιχεία τα οποία πιθανώς δεν είναι διαθέσιμα από οπτικές καταγραφές περιβλήματος	101
8.6.1 ΕΠΙΒΟΛΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ κατά ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Χ'Χ	101
8.6.2 ΕΠΙΒΟΛΗ ΚΑΘΕΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ κατά ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Υ'Υ	108
8.7 Συμπεράσματα	115
ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ	116
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	119

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ ΕΙΚΟΝΩΝ-ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΕΙΚΟΝΑ 1 ΚΑΜΠΥΛΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	23
ΕΙΚΟΝΑ 2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	24
ΕΙΚΟΝΑ 3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΧΑΛΥΒΑ	24
ΕΙΚΟΝΑ 4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΠΩΝ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΩΝ (Μ-Φ)	24
ΕΙΚΟΝΑ 5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΠΩΝ ΓΩΝΙΩΝ ΣΤΡΟΦΗΣ ΧΟΡΔΗΣ (Μ-Θ)	25
ΕΙΚΟΝΑ 6 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ (V-D)	25
ΕΙΚΟΝΑ 7 ΟΠΤΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΕΛΑΣΤΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ (ΠΟΛΥΓΡΑΜΜΙΚΗ, ΔΙΓΡΑΜΜΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΛΕΙΑ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ) ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ	27
ΕΙΚΟΝΑ 8 ΘΕΣΕΙΣ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΕ ΕΝΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	30
ΕΙΚΟΝΑ 9 ΘΕΣΕΙΣ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΕ ΕΝΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	31
ΕΙΚΟΝΑ 10 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΑΠΕΡΙΣΦΙΚΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ C12/15	34
ΕΙΚΟΝΑ 11 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΠΕΡΙΣΦΙΓΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ C12/15	35
ΕΙΚΟΝΑ 12 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΧΑΛΥΒΑ S220 (ΛΕΙΟΣ)	36
ΕΙΚΟΝΑ 13 ΚΑΤΟΨΗ ΙΣΟΓΕΙΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΗ ΣΤΟ AUTOCAD (ΦΙΤΝΕΟΓΛΟΥ, ΧΑΡΑΛΑΜΠΙΔΗ, 2008)	36
ΕΙΚΟΝΑ 14 ΚΑΤΟΨΗ Α' ΟΡΟΦΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ	37
ΕΙΚΟΝΑ 15 ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ 30X30	38
ΕΙΚΟΝΑ 16 ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ 35X35	38
ΕΙΚΟΝΑ 17 ΔΟΚΟΣ 20/50	39
ΕΙΚΟΝΑ 18 ΔΟΚΟΣ 20/60	39
ΕΙΚΟΝΑ 19 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΚΤΙΡΙΟΥ	42
ΕΙΚΟΝΑ 20 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΟΜΒΩΝ(NODES)	43
ΕΙΚΟΝΑ 21 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΟΚΩΝ	43
ΕΙΚΟΝΑ 22 ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ 30/30	44
ΕΙΚΟΝΑ 23 ΟΡΙΣΜΟΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ	45
ΕΙΚΟΝΑ 24 ΕΝΤΟΛΗ DEFINE MATERIAL	45
ΕΙΚΟΝΑ 25 ΕΝΤΟΛΗ ATTACH SECTION	46
ΕΙΚΟΝΑ 26 ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ 35/35	46
ΕΙΚΟΝΑ 27 ΟΡΙΣΜΟΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ	47
ΕΙΚΟΝΑ 28 ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΙ ΔΟΚΟΙ	47
ΕΙΚΟΝΑ 29 ΟΡΙΣΜΟΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ	48
ΕΙΚΟΝΑ 30 ΚΑΘΕΤΟΙ ΔΟΚΟΙ	48
ΕΙΚΟΝΑ 31 ΟΡΙΣΜΟΣ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ	49
ΕΙΚΟΝΑ 32 ΕΝΤΟΛΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΑΚΤΩΣΕΩΝ	50

ΕΙΚΟΝΑ 33 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΑΚΤΩΣΕΩΝ.....	50
ΕΙΚΟΝΑ 34 ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΤΩΝ ΔΟΚΩΝ	52
ΕΙΚΟΝΑ 35 ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ.....	52
ΕΙΚΟΝΑ 36 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΜΕΝΟ ΣΧΗΜΑ.....	53
ΕΙΚΟΝΑ 37 ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΚΟΜΒΟΥ 8	54
ΕΙΚΟΝΑ 38 ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΚΟΜΒΟΥ 7	54
ΕΙΚΟΝΑ 39 ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΚΟΜΒΟΥ 6	54
ΕΙΚΟΝΑ 40 ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΚΟΜΒΟΥ 5	54
ΕΙΚΟΝΑ 41 ΑΞΟΝΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ	55
ΕΙΚΟΝΑ 42 ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ.....	55
ΕΙΚΟΝΑ 43 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΠΩΝ ΔΟΚΩΝ	56
ΕΙΚΟΝΑ 44 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΠΩΝ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ	56
ΕΙΚΟΝΑ 45 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΙΔΙΟΜΟΡΦΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΟΔΟ $T=18.3948\text{SEC}$	57
ΕΙΚΟΝΑ 46 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΙΔΙΟΜΟΡΦΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΟΔΟ $T=5.6503\text{SEC}$	57
ΕΙΚΟΝΑ 47 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΙΔΙΟΜΟΡΦΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΟΔΟ $T=4.6874\text{SEC}$	58
ΕΙΚΟΝΑ 48 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΙΔΙΟΜΟΡΦΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΟΔΟ $T=4.0107\text{SEC}$	58
ΕΙΚΟΝΑ 49 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΙΔΙΟΜΟΡΦΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΟΔΟ $T=3.4812\text{SEC}$	59
ΕΙΚΟΝΑ 50 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΙΔΙΟΜΟΡΦΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΟΔΟ $T=3.4204\text{SEC}$	59
ΕΙΚΟΝΑ 51 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΙΔΙΟΜΟΡΦΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΟΔΟ $T=3.3859\text{SEC}$	60
ΕΙΚΟΝΑ 52 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΙΔΙΟΜΟΡΦΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΟΔΟ $T=2.8794\text{SEC}$	60
ΕΙΚΟΝΑ 53 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΙΔΙΟΜΟΡΦΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΟΔΟ $T=2.8638\text{SEC}$	61
ΕΙΚΟΝΑ 54 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΙΔΙΟΜΟΡΦΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΟΔΟ $T=2.8206\text{SEC}$	61
ΕΙΚΟΝΑ 55 ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ 1000 KN	62
ΕΙΚΟΝΑ 56 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 1000KN.....	63
ΕΙΚΟΝΑ 57 ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΠΡΩΤΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΑΡΘΡΩΣΗΣ	63
ΕΙΚΟΝΑ 58 ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 2000KN	64
ΕΙΚΟΝΑ 59 ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ 2200 KN	65
ΕΙΚΟΝΑ 60 ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ 2600KN	65
ΕΙΚΟΝΑ 61 ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ 3000 KN	66
ΕΙΚΟΝΑ 62 ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ 3500 KN	66
ΕΙΚΟΝΑ 63 ΤΕΛΙΚΗ ΑΥΞΗΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΑΙ ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ	67
ΕΙΚΟΝΑ 64 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ(APPLIED FORCE (KN) – DISPLACEMENT (MM))	68
ΕΙΚΟΝΑ 65 ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ 20000 KN	69
ΕΙΚΟΝΑ 66 ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ 21800 KN	70
ΕΙΚΟΝΑ 67 ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ 22000 KN	71
ΕΙΚΟΝΑ 68 ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ 25000 KN	71
ΕΙΚΟΝΑ 69 ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ 30000 KN	72

ΕΙΚΟΝΑ 70 ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ 40000 ΚΝ	72
ΕΙΚΟΝΑ 71 ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ 80000 ΚΝ	73
ΕΙΚΟΝΑ 72 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΟ ΣΤΑΔΙΑΚΟ ΚΑΘΕΤΟ ΦΟΡΤΙΟ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Υ΄Υ	73
ΕΙΚΟΝΑ 73 ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΗΜΑ ΠΑΤΡΑΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ L.....	75
ΕΙΚΟΝΑ 74 ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΗΜΑ ΠΑΤΡΑΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ Τ.....	75
ΕΙΚΟΝΑ 75 ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΗΜΑ ΠΑΤΡΑΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ V	76
ΕΙΚΟΝΑ 76 ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΗΜΑ ΠΥΡΓΟΥ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ L	76
ΕΙΚΟΝΑ 77 ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΗΜΑ ΠΥΡΓΟΥ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ Τ	77
ΕΙΚΟΝΑ 78 ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΗΜΑ ΠΥΡΓΟΥ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ V	77
ΕΙΚΟΝΑ 79 ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΗΜΑ ΒΑΡΘΟΛΟΜΙΟΥ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ L.....	78
ΕΙΚΟΝΑ 80 ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΗΜΑ ΒΑΡΘΟΛΟΜΙΟΥ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ Τ.....	78
ΕΙΚΟΝΑ 81 ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΗΜΑ ΒΑΡΘΟΛΟΜΙΟΥ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ V	79
ΕΙΚΟΝΑ 82 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ	80
ΕΙΚΟΝΑ 83 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ	80
ΕΙΚΟΝΑ 84 ΟΡΙΣΜΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΓΙΑ ΣΤΑΘΜΟ ΠΑΤΡΑΣ.....	80
ΕΙΚΟΝΑ 85 ΟΡΙΣΜΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΓΙΑ ΣΤΑΘΜΟ ΠΥΡΓΟΥ	81
ΕΙΚΟΝΑ 86 ΟΡΙΣΜΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΓΙΑ ΣΤΑΘΜΟ ΒΑΡΘΟΛΟΜΙΟΥ.....	81
ΕΙΚΟΝΑ 87 1Η ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΣΤΑΘΜΟΥ ΠΑΤΡΑΣ	82
ΕΙΚΟΝΑ 88 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΧΡΟΝΟΥ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΙΣΟΓΕΙΟΥ 1Η ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΠΑΤΡΑΣ	82
ΕΙΚΟΝΑ 89 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΧΡΟΝΟΥ ΙΣΟΓΕΙΟΥ ΚΑΙ Α΄ ΟΡΟΦΟΥ 1ΗΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΠΑΤΡΑΣ.....	83
ΕΙΚΟΝΑ 90 2Η ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΣΤΑΘΜΟΥ ΠΑΤΡΑΣ	83
ΕΙΚΟΝΑ 91 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΧΡΟΝΟΥ ΙΣΟΓΕΙΟΥ 2Η ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΠΑΤΡΑΣ	84
ΕΙΚΟΝΑ 92 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΧΡΟΝΟΥ ΙΣΟΓΕΙΟΥ ΚΑΙ Α΄ ΟΡΟΦΟΥ 2ΗΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΠΑΤΡΑΣ.....	84
ΕΙΚΟΝΑ 93 3Η ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΣΤΑΘΜΟΥ ΠΑΤΡΑΣ	85
ΕΙΚΟΝΑ 94 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΧΡΟΝΟΥ ΙΣΟΓΕΙΟΥ 3Η ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΠΑΤΡΑΣ	85
ΕΙΚΟΝΑ 95 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΧΡΟΝΟΥ ΙΣΟΓΕΙΟΥ ΚΑΙ Α΄ ΟΡΟΦΟΥ 3ΗΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΠΑΤΡΑΣ.....	86
ΕΙΚΟΝΑ 96 1Η ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΣΤΑΘΜΟΥ ΠΥΡΓΟΥ	86
ΕΙΚΟΝΑ 97 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΧΡΟΝΟΥ ΙΣΟΓΕΙΟΥ 1Η ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΠΥΡΓΟΥ	87
ΕΙΚΟΝΑ 98 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΧΡΟΝΟΥ ΙΣΟΓΕΙΟΥ ΚΑΙ Α΄ ΟΡΟΦΟΥ 1ΗΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΠΥΡΓΟΥ.....	87
ΕΙΚΟΝΑ 99 2Η ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΣΤΑΘΜΟΥ ΠΥΡΓΟΥ	88
ΕΙΚΟΝΑ 100 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΧΡΟΝΟΥ ΙΣΟΓΕΙΟΥ 2Η ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΠΥΡΓΟΥ	88

ΕΙΚΟΝΑ 101 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΧΡΟΝΟΥ ΙΣΟΓΕΙΟΥ ΚΑΙ Α' ΟΡΟΦΟΥ 2ΗΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΠΥΡΓΟΥ	89
ΕΙΚΟΝΑ 102 3Η ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΣΤΑΘΜΟΥ ΠΥΡΓΟΥ	89
ΕΙΚΟΝΑ 103 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΧΡΟΝΟΥ ΙΣΟΓΕΙΟΥ 3Η ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΠΥΡΓΟΥ	90
ΕΙΚΟΝΑ 104 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΧΡΟΝΟΥ ΙΣΟΓΕΙΟΥ ΚΑΙ Α' ΟΡΟΦΟΥ 3ΗΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΠΥΡΓΟΥ	90
ΕΙΚΟΝΑ 105 1Η ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΣΤΑΘΜΟΥ ΒΑΡΘΟΛΟΜΙΟΥ	91
ΕΙΚΟΝΑ 106 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΧΡΟΝΟΥ ΙΣΟΓΕΙΟΥ 1Η ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΒΑΡΘΟΛΟΜΙΟΥ.....	91
ΕΙΚΟΝΑ 107 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΧΡΟΝΟΥ ΙΣΟΓΕΙΟΥ ΚΑΙ Α' ΟΡΟΦΟΥ 1ΗΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΒΑΡΘΟΛΟΜΙΟΥ.....	92
ΕΙΚΟΝΑ 108 2Η ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΣΤΑΘΜΟΥ ΒΑΡΘΟΛΟΜΙΟΥ	92
ΕΙΚΟΝΑ 109 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΧΡΟΝΟΥ ΙΣΟΓΕΙΟΥ 2Η ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΠΥΡΓΟΥ	93
ΕΙΚΟΝΑ 110 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΧΡΟΝΟΥ ΙΣΟΓΕΙΟΥ ΚΑΙ Α' ΟΡΟΦΟΥ 2ΗΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΒΑΡΘΟΛΟΜΙΟΥ.....	93
ΕΙΚΟΝΑ 111 3Η ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΣΤΑΘΜΟΥ ΒΑΡΘΟΛΟΜΙΟΥ	94
ΕΙΚΟΝΑ 112 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΧΡΟΝΟΥ ΙΣΟΓΕΙΟΥ 3Η ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΒΑΡΘΟΛΟΜΙΟΥ.....	94
ΕΙΚΟΝΑ 113 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΧΡΟΝΟΥ ΙΣΟΓΕΙΟΥ ΚΑΙ Α' ΟΡΟΦΟΥ 3ΗΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΒΑΡΘΟΛΟΜΙΟΥ.....	95
ΕΙΚΟΝΑ 114 ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΗΜΑ ΣΕΙΣΜΟΥ ΧΙΛΗΣ 2010	96
ΕΙΚΟΝΑ 115 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΥΠΟΥ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΠΟΥ ΕΝΤΑΧΘΗΚΕ.....	96
ΕΙΚΟΝΑ 116 ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ ΚΤΙΡΙΟΥ ΣΕ ΧΡΟΝΟ $T=0\text{SEC}$	97
ΕΙΚΟΝΑ 117 ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ ΚΤΙΡΙΟΥ ΣΕ ΧΡΟΝΟ $T=12\text{SEC}$	97
ΕΙΚΟΝΑ 118 ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ ΚΤΙΡΙΟΥ ΣΕ ΧΡΟΝΟ $T=13\text{SEC}$	98
ΕΙΚΟΝΑ 119 ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ ΚΤΙΡΙΟΥ ΣΕ ΧΡΟΝΟ $T=14\text{SEC}$	98
ΕΙΚΟΝΑ 120 ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ ΚΤΙΡΙΟΥ ΣΕ ΧΡΟΝΟ $T=16\text{SEC}$	99
ΕΙΚΟΝΑ 121 ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ ΚΤΙΡΙΟΥ ΣΕ ΧΡΟΝΟ $T=16.4\text{SEC}$	99
ΕΙΚΟΝΑ 122 ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ ΚΤΙΡΙΟΥ ΣΕ ΧΡΟΝΟ $T=17.4\text{SEC}$	100
ΕΙΚΟΝΑ 123 ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ ΚΤΙΡΙΟΥ ΣΕ ΧΡΟΝΟ $T=21.3\text{SEC}$	100
ΕΙΚΟΝΑ 124 ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	101
ΕΙΚΟΝΑ 125 ΝΕΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ.....	102
ΕΙΚΟΝΑ 126 ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ 1000KN	103
ΕΙΚΟΝΑ 127 ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΠΡΩΤΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΑΡΘΡΩΣΗΣ	103
ΕΙΚΟΝΑ 128 ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ 1600 KN	104
ΕΙΚΟΝΑ 129 ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ 1850 KN	104
ΕΙΚΟΝΑ 130 ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ 2000 KN	105

ΕΙΚΟΝΑ 131 ΣΤΑΔΙΑΚΗ ΑΥΞΗΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΑΙ ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ	105
ΕΙΚΟΝΑ 132 ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ 2500 ΚΝ	106
ΕΙΚΟΝΑ 133 ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ 3000 ΚΝ	106
ΕΙΚΟΝΑ 134 ΤΕΛΙΚΗ ΑΥΞΗΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΑΙ ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ ..	107
ΕΙΚΟΝΑ 135 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΔΟΜΗΣ.	107
ΕΙΚΟΝΑ 136 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΔΥΝΑΜΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ (Χ'Χ)	108
ΕΙΚΟΝΑ 137 ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ 7000 ΚΝ	109
ΕΙΚΟΝΑ 138 ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΠΡΩΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ 8000ΚΝ ..	110
ΕΙΚΟΝΑ 139 ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ 10000ΚΝ	110
ΕΙΚΟΝΑ 140 ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ 20200ΚΝ	111
ΕΙΚΟΝΑ 141 ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ 22000ΚΝ	111
ΕΙΚΟΝΑ 142 ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ 25000ΚΝ	112
ΕΙΚΟΝΑ 143 ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ 30000ΚΝ	112
ΕΙΚΟΝΑ 144 ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ 50000ΚΝ	113
ΕΙΚΟΝΑ 145 ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΡΘΡΩΣΕΩΝ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΟ 80000ΚΝ	113
ΕΙΚΟΝΑ 146 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	114
ΕΙΚΟΝΑ 147 ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΙΚΟΝΑ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ(ΦΙΤΝΕΟΓΛΟΥ, ΧΑΡΑΛΑΜΠΙΔΗ, 2008).	116
ΕΙΚΟΝΑ 148 ΆΠΟΨΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΑΠΟ ΤΗΣ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΟΨΗ(ΦΙΤΝΕΟΓΛΟΥ, ΧΑΡΑΛΑΜΠΙΔΗ, 2008).	117
ΕΙΚΟΝΑ 149 ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ12 ΠΡΩΤΟΥ ΟΡΟΦΟΥ. ΤΟ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ ΤΟΥ ΙΣΟΓΕΙΟΥ ΕΧΕΙ ΚΑΤΑΣΤΡΑΦΕΙ ΠΛΗΡΩΣ(ΦΙΤΝΕΟΓΛΟΥ, ΧΑΡΑΛΑΜΠΙΔΗ, 2008)...	117
ΕΙΚΟΝΑ 150 ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ Κ9 ΠΡΩΤΟΥ ΟΡΟΦΟΥ. ΤΟ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ ΤΟΥ ΙΣΟΓΕΙΟΥ ΕΧΕΙ ΚΑΤΑΣΤΡΑΦΕΙ ΠΛΗΡΩΣ(ΦΙΤΝΕΟΓΛΟΥ, ΧΑΡΑΛΑΜΠΙΔΗ, 2008)...	118

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Μεγάλο ποσοστό των κτηρίων της χώρας μας έχουν κατασκευαστεί πριν από αρκετές δεκαετίες με αποτέλεσμα να μην τηρούν τους σύγχρονους Αντισεισμικούς Κανονισμούς. Η διαδικασία πλήρους αντικατάστασης των κτηρίων αυτών είναι πρακτικά αδύνατη. Για τον λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί κανονιστικά οι μεθοδολογίες αποτίμησης των υφιστάμενων κατασκευών με τις οποίες ελέγχεται η σεισμική απόκρισή τους. Μία από τις μεθόδους αποτίμησης αποτελεί η ελαστοπλαστική ανάλυση ενός κτιρίου οποία εφαρμόζεται μέσω κατάλληλων προγραμμάτων προσομοίωσης. Η ελαστοπλαστική ανάλυση αφορά τη μελέτη της συμπεριφοράς των υλικών που υφίστανται τόσο ελαστικές όσο και πλαστικές παραμορφώσεις υπό φορτίο. Εξετάζει τη μετάβαση από την ελαστική παραμόρφωση στην πλαστική παραμόρφωση, περιγράφοντας τις μη γραμμικές σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης. Χρησιμοποιείται κυρίως στην ανάλυση κατασκευών και υλικών που λειτουργούν πέρα από το ελαστικό όριο. Στην παρούσα εργασία μελετάται η συμπεριφορά μια διώροφης κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα μέσω ελαστοπλαστικής ανάλυσης ώστε να μελετηθεί η απόκριση του και οι οριακές του συνθήκες. Για τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε το MASTAN2.

1.2 Σκοπός και στόχοι της διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως κύριο σκοπό την εκτίμηση της τρωτότητας υφιστάμενων κατασκευών μέσω ελαστοπλαστικών αναλύσεων. Η εκτίμηση της τρωτότητας αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για την ασφάλεια και την αξιοπιστία των κατασκευών, ιδίως σε περιοχές με υψηλή σεισμική δραστηριότητα ή άλλες δυναμικές φορτίσεις.

Οι στόχοι της εργασίας περιλαμβάνουν:

- Τη δημιουργία και ανάλυση μαθηματικών μοντέλων για την προσομοίωση των δομικών στοιχείων των κατασκευών με τη χρήση του λογισμικού MASTAN2.
- Την εκτέλεση ελαστοπλαστικών αναλύσεων για την αξιολόγηση της αντοχής και της ευστάθειας των κατασκευών.
- Τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων με θεωρητικά πρότυπα και κανονισμούς.
- Την εξαγωγή συμπερασμάτων και την παροχή προτάσεων για βελτιώσεις και μελλοντική εργασία.

1.3 Επισκόπηση της Σημασίας της Εκτίμησης της Τρωτότητας Υφιστάμενων Κατασκευών

Η αξιολόγηση της τρωτότητας των υφιστάμενων κατασκευών είναι επιτακτική για την πρόληψη καταστροφών και την προστασία της ανθρώπινης ζωής. Οι κατασκευές υπόκεινται σε διάφορες φορτίσεις κατά τη διάρκεια του χρόνου ζωής τους, συμπεριλαμβανομένων στατικών φορτίων από το βάρος τους και δυναμικών φορτίων από σεισμούς, άνεμο και άλλους εξωτερικούς παράγοντες. Η κατανόηση της απόκρισής τους υπό τέτοιες συνθήκες είναι καθοριστική για τον ασφαλή σχεδιασμό και την ενίσχυση των κατασκευών. (Dolšek & Fajfar, 2008)

Η χρήση ελαστοπλαστικών αναλύσεων επιτρέπει μια ακριβέστερη αξιολόγηση της απόκρισης της κατασκευής λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις ελαστικές όσο και τις πλαστικές παραμορφώσεις. Αυτές οι αναλύσεις διευκολύνουν τον εντοπισμό τρωτοτήτων και την ανάπτυξη στρατηγικών ενίσχυσης, διασφαλίζοντας τη διαρκή σταθερότητα και ανθεκτικότητα των δομών. (Dolšek & Fajfar, 2008)

2. ΕΛΑΣΤΟΠΛΑΣΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Οι ελαστοπλαστικές αναλύσεις είναι μια προχωρημένη μέθοδος αξιολόγησης της απόκρισης των κατασκευών υπό φορτίο, λαμβάνουν υπόψη τόσο την ελαστική όσο και την πλαστική συμπεριφορά του υλικού. Αυτό επιτρέπει την καλύτερη προσομοίωση της πραγματικής συμπεριφοράς των κατασκευών υπό υψηλά φορτία.

2.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Η πλαστική ανάλυση βασίζεται στη θεωρία της πλαστικότητας, η οποία εξετάζει την συμπεριφορά των υλικών μετά την υπέρβαση του ορίου διαρροής. Τα βασικά σημεία περιλαμβάνουν:

Νόμος Hooke για την ελαστική περιοχή:

$$\sigma = E \times \varepsilon$$

Εξίσωση 1 Νόμος Hooke για την ελαστική περιοχή

όπου σ είναι η τάση, E το μέτρο ελαστικότητας και ε η παραμόρφωση
Smith, J., & Brown, A. (2008).

Κριτήριο Διαρροής von Mises:

$$\sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{s} : \mathbf{s}} = \sigma_y$$

Εξίσωση 2 Κριτήριο Διαρροής von Mises

όπου \mathbf{s} είναι η απόκλιση της τάσης και σ_y η τάση διαρροής
Smith, J., & Brown, A. (2008).

Πλαστική Ροή: Οι παραμορφώσεις συνεχίζουν να αυξάνονται χωρίς αύξηση της τάσης μετά την επίτευξη της τάσης διαρροής.

2.2 Μέθοδοι Ελαστοπλαστικής Ανάλυσης

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι ελαστοπλαστικής ανάλυσης, η παρούσα εργασία μελετά τις εξής:

- Στατική Ανάλυση: Χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της αντοχής της κατασκευής υπό στατικά φορτία.

- Δυναμική Ανάλυση: Αξιολογεί την απόκριση της κατασκευής υπό δυναμικά φορτία, όπως σεισμούς.
- Ανάλυση Χρονοϊστορίας : Παρέχει μια λεπτομερή χρονική απεικόνιση της απόκρισης της κατασκευής σε δυναμικά φορτία (Wang, Z., & Xian, G. (2023)).

2.3 Εκτίμηση Τρωτότητας Υφιστάμενων Κατασκευών

Η εκτίμηση της τρωτότητας των υφιστάμενων κατασκευών είναι μια διαδικασία που περιλαμβάνει την αξιολόγηση της ικανότητάς τους να φέρουν στατικά φορτία και δυναμικές καταπονήσεις. Οι κύριες προσεγγίσεις περιλαμβάνουν:

- Ποιοτική Εκτίμηση

Αξιολογούνται οι εμφανείς βλάβες, όπως ρωγμές και παραμορφώσεις.

- Ποσοτική Εκτίμηση

Περιλαμβάνει τη χρήση αναλυτικών και αριθμητικών μεθόδων για την αξιολόγηση της κατασκευής. Οι κύριες τεχνικές περιλαμβάνουν:

Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM): Προσομοιώνει την κατασκευή και υπολογίζει τις τάσεις και παραμορφώσεις.(Ferreira , 2019)(Dolšek & Fajfar, 2008)

Μέθοδος Πλαστική Ανάλυσης : Υπολογίζει την ικανότητα της κατασκευής να αντέξει φορτία πέρα από το ελαστικό όριο.(Ferreira , 2019)(Dolšek & Fajfar, 2008)

2.4 Χρήση Λογισμικού MASTAN2

Το MASTAN2 είναι ένα λογισμικό που χρησιμοποιείται ευρέως για την ανάλυση και τον σχεδιασμό των κατασκευών. Προσφέρει διάφορες δυνατότητες, όπως:

- Πλαισιακή Ανάλυση: Δίνει τη δυνατότητα για ανάλυση πολυώροφων κτιρίων και γεφυρών.
- Δυναμική Ανάλυση: Προσομοιώνει τη δυναμική απόκριση σε σεισμικά και άλλα δυναμικά φορτία.
- Ελαστοπλαστική Ανάλυση: Επιτρέπει την ανάλυση των κατασκευών λαμβάνοντας υπόψη την πλαστική παραμόρφωση.

3. ΤΡΩΤΟΤΗΤΑ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Η τρωτότητα μιας κατασκευής αναφέρεται στην ευπάθεια της σε διάφορες καταπονήσεις, στατικές και δυναμικές, όπως φυσικά φαινόμενα (σεισμοί, πλημμύρες), τεχνικές αστοχίες, ανθρώπινη παρέμβαση ή άλλες αιτίες που μπορεί να προκαλέσουν βλάβες ή ακόμα και κατάρρευση.

3.1.2 Μέθοδοι εκτίμησης

Οι μέθοδοι εκτίμησης της τρωτότητας των υφιστάμενων κατασκευών περιλαμβάνουν ποιοτικές και ποσοτικές προσεγγίσεις. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι:

Εμπειρικές Μέθοδοι : Βασίζονται σε στατιστικές αναλύσεις και δεδομένα σεισμών που έχουν συμβεί (FEMA, 2012)(Τασκάρη, 2014).

Αναλυτικές Μέθοδοι : Χρησιμοποιούν λεπτομερή μοντέλα υπολογισμών για την προσομοίωση της απόκρισης της κατασκευής σε σεισμικά φορτία. (Dolšek & Fajfar, 2008).

Μέθοδοι που βασίζονται στην επιτελεστικότητα: Περιλαμβάνουν την αξιολόγηση της απόδοσης της κατασκευής με βάση προκαθορισμένα επίπεδα επιτελεστικότητας, όπως αυτά ορίζονται από κανονισμούς όπως η FEMA και ο Ευρωκώδικας (Fardis, 2018, EN1992, EN1998).

3.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την τρωτότητα

Σεισμική τρωτότητα κτιρίου ονομάζεται ο βαθμός βλάβης-ποσοστό απώλειας της φέρουσας ικανότητας του κτιρίου που αναμένεται να συμβεί από την επενέργεια ενός σεισμού ορισμένης έντασης.

Έτσι :

Τρωτότητα κτιρίου = Απαιτούμενη σεισμική ικανότητα – Υπάρχουσα σεισμική ικανότητα / Απαιτούμενη σεισμική ικανότητα

με ελάχιστη τιμή 0 (καμιά απώλεια) και μέγιστη τιμή 1 (πλήρης απώλεια).

Οι παράμετροι που επηρεάζουν την τρωτότητα ενός κτιρίου και μπορούν να αποτιμηθούν, αναφέρονται παρακάτω:

1) Ηλικία Κατασκευής

Η ηλικία μιας κατασκευής επηρεάζει την τρωτότητά της λόγω φυσικής φθοράς και πιθανής αδυναμίας συμμόρφωσης με τις απαιτήσεις των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών. Οι παλαιότερες κατασκευές μπορεί να μην ενσωματώνουν σύγχρονη τεχνολογία, υλικά και μεθόδους ανάλυσης, καθιστώντας τις πιο επιρρεπείς σε σεισμικά φαινόμενα(FEMA, 2012).

2) Ποιότητα Υλικών

Η ποιότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται είναι κρίσιμη για την ανθεκτικότητα της κατασκευής. Υλικά κακής ποιότητας ή αλλοιωμένα με την πάροδο του χρόνου μπορεί να οδηγήσουν σε αυξημένη τρωτότητα.

3) Σχέδιο και κατασκευή

Ατέλειες στο σχεδιασμό και την κατασκευή, όπως ανεπαρκής οπλισμός ή κακή εφαρμογή κατασκευαστικών πρακτικών, αυξάνουν την τρωτότητα(Fardis, 2018).

4) Συντήρηση και επισκευές

Η τακτική συντήρηση και επισκευές διατηρούν την κατασκευή σε καλή κατάσταση και μειώνουν την τρωτότητα(FEMA, 2012).

5) Γεωμετρία και δομικά χαρακτηριστικά

Η συμμετρία και ο αριθμός των ορόφων επηρεάζουν την συμπεριφορά σε σεισμού(FEMA, 2012).

6) Φορτία

Τα φορτία που δέχεται η κατασκευή επηρεάζουν την τρωτότητα. Υπερβολικά φορτία χωρίς αντίστοιχες ενισχύσεις μπορούν να αυξήσουν τον κίνδυνο βλαβών.

7) Περιβαλλοντικές συνθήκες

Περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως η υγρασία, οι διαβρώσεις και οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις επηρεάζουν την αντοχή των υλικών και τη συνολική τρωτότητα της κατασκευής.

8) Μη κανονικότητα καθ' ύψος

Ασυνέχεια ακαμψίας

- Ασυνέχεια μάζας
- Πιλοτή
- Εύκαμπτος όροφος
- Στροφή λόγω εκκεντροτήτων
- Αλλαγή υλικών φερόντων στοιχείων καθ' ύψος

(Φιτνέογλου, Χαραλαμπίδη, 2008)

9) Δυσμενής επιρροή ποιότητας εδάφους

Έδαφος κατηγορίας Γ ή Δ

- Κατολισθαίνον έδαφος
- Διογκούμενο έδαφος
- Υψηλός υδροφόρος ορίζοντας
- Ρευστοποιούμενο έδαφος

(Φιτνέογλου, Χαραλαμπίδη 2008)

10) Προβλήματα θεμελίωσης

- Υπόσκαψη θεμελίων
- Ρωγμές από καθιζήσεις τοίχων – θεμελίων

(Φιτνέογλου, Χαραλαμπίδη 2008)

11) Προβλήματα από την μορφολογία του εδάφους

- Έδαφος κεκλιμένο
- Έδαφος επίπεδο
- Έδαφος ανομοιόμορφο

12) Κοντά υποστυλώματα

3.3 Στάδια Αποτίμησης

Η διαδικασία αποτίμησης της τρωτότητας των υφιστάμενων κατασκευών περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- **Προκαταρκτική Επιθεώρηση:** Αξιολόγηση της γενικής κατάστασης της κατασκευής μέσω οπτικής επιθεώρησης και συλλογής ιστορικών δεδομένων(Συντζιρμά, 2010).
- **Λεπτομερής Αποτίμηση:** Χρήση αναλυτικών μεθόδων και εργαλείων προσομοίωσης για την εκτίμηση της απόκρισης της κατασκευής σε διάφορα φορτία (Συντζιρμά, 2010).
- **Απόφαση για Επέμβαση:** Βασισμένη στα αποτελέσματα της αποτίμησης, λήψη απόφασης για την αναγκαιότητα επισκευών ή ενισχύσεων (Δέσποινα Β. Συντζιρμά , 2010).

3.4 Κατάταξη Μεθόδων

Σύμφωνα με τις κυριότερες μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την αποτίμηση της τρωτότητας των κατασκευών (κατά σειρά αύξουσας απαιτούμενης προσπάθειας) έχουμε τα εξής :

1. Κρίση ειδικών

Με βάση τη μέθοδο αυτή ένας ή και περισσότεροι μηχανικοί μετά από αυτοψία έχοντας λάβει υπόψη τους μια σειρά παραγόντων, όπως την αρχιτεκτονική μόρφωση του κτιρίου, τη μόρφωση του φέροντα οργανισμού, τη θεμελίωση, το ιστορικό του κτιρίου, τις λεπτομέρειες όπλισης και τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες κάνουν μια εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας του κτιρίου(Συντζιρμά,2010).

2. Σε συσχέτιση με αντισεισμικό κανονισμό

Συγκρίνεται η φέρουσα ικανότητα του κτιρίου όλου ή τμημάτων του φέροντα οργανισμού του, με τις απαιτήσεις του αντισεισμικού κανονισμού που ίσχυε κατά το χρόνο μελέτης ή κατασκευής ή άλλον πιο σύγχρονο κανονισμό (Karabinis & Eleftheriadou, 2007).

3. Εμπειρική / Στατιστική μέθοδος

Με βάση τη μέθοδο αυτή εκτιμάται εμπειρικά ο βαθμός βλάβης ενός κτιρίου λαμβάνοντας υπόψη υπάρχοντα στοιχεία που το χαρακτηρίζουν (τυπολογία, μόρφωση) κ.λ.π. Οι στατιστικές όμως μέθοδοι αγνοούν τυχόν ειδικά χαρακτηριστικά του κτιρίου, τα οποία μπορεί να έχουν μεγάλη σημασία για τη σεισμική τρωτότητα του εν λόγω κτιρίου (Φιτνέογλου, Χαραλαμπίδη 2008).

4. Απλοποιημένη αναλυτική μέθοδος / Μέθοδος "Κατωφλίου"

Με βάση απλοποιημένες σχέσεις για χαρακτηριστικούς τύπους κτιρίων προσδιορίζονται παράμετροι, όπως η Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση, η παραμόρφωση ορόφων και άλλα ως συνάρτηση της εδαφικής κίνησης. Στην περίπτωση που η επιλεγείσα παράμετρος υπερβαίνει κάποιο όριο τότε το κτίριο αναμένεται να υποστεί ορισμένα επίπεδα βλάβης. Τα όρια αυτά προσδιορίζονται εμπειρικά βάσει επεξεργασίας στοιχείων βλαβών που έχουν προκύψει από πραγματικούς σεισμούς του παρελθόντος (Φιτνέογλου, Χαραλαμπίδη 2008)

4.ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Η αξιολόγηση της σεισμικής απόκρισης των κατασκευών αποτελεί μια κρίσιμη διαδικασία μελέτης, κατά την οποία εξετάζεται η αντίδραση της κατασκευής σε σεισμικά φαινόμενα. Κατά την αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς του φορέα, εντοπίζονται τα πιθανά σημεία δημιουργίας πλαστικών αρθρώσεων κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης και η εμφάνιση βλαβών στις διατομές. Επιπλέον, η απόκριση του φορέα εκτιμάται μέσω της επιβολής σταδιακής οριζόντιας φόρτισης μέχρι την κατάρρευση(Γκουτζίκας, Ε. 2008).

Υπάρχουν τέσσερις κύριες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση των κατασκευών: η ελαστική στατική, η ελαστική δυναμική, η ανελαστική στατική και η ανελαστική δυναμική. Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. συνιστά τη χρήση τουλάχιστον μίας από αυτές τις μεθόδους αντισεισμικού υπολογισμού για την εκπόνηση οποιασδήποτε μελέτης αποτίμησης ή ανασχεδιασμού. Οι μέθοδοι αυτές διαφέρουν κυρίως ως προς την αντίληψη της συμπεριφοράς του υλικού και, κατά συνέπεια, των διατομών, κατηγοριοποιούμενες σε γραμμικές και μη γραμμικές (ή ελαστοπλαστικές), καθώς και ως προς τη θεώρηση της επιβολής των φορτίων, διακρινόμενες σε στατικές ή δυναμικές(Πυλαρινού, 2023).

Η μη γραμμική στατική ανάλυση (Pushover) είναι μία από τις δύο ανελαστικές μεθόδους που προτείνονται για την ανάλυση της μη γραμμικής συμπεριφοράς των κτιρίων ή των δομών όταν υποβάλλονται σε ισχυρές σεισμικές δονήσεις. Σύμφωνα με τους σύγχρονους κανονισμούς, η διαθέσιμη πλαστιμότητα μιας κατασκευής πρέπει κυρίως να προσδιορίζεται μέσω μιας στατικής ανελαστικής ανάλυσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η Pushover αποτελεί μια πιο απλή και αποδοτική τεχνική για την αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς μιας κατασκευής. Αντίθετα, η δυναμική ελαστοπλαστική ανάλυση ιστορίας, παρέχει μια ιδανικότερη προσέγγιση για την αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς Ένα από τα πλεονεκτήματα της δυναμικής ανελαστικής ανάλυσης είναι ότι λαμβάνει υπόψη την επίδραση των ανώτερων ιδιομορφών πριν και μετά τη διαρροή των κρίσιμων περιοχών του φορέα. Ωστόσο, όπως κάθε μέθοδος ανάλυσης, η δυναμική ανελαστική ανάλυση έχει και τα μειονεκτήματά της, και η επιλογή μεταξύ των δύο μεθόδων εξαρτάται από τις ιδιαιτερότητες της κάθε περίπτωσης (ΛΗ-Λογισμική, 2013, Γκουτζίκας, 2008).

Η ελαστική ανάλυση αποτελεί μια τεχνική που χρησιμοποιείται στον δομικό σχεδιασμό για να καθοριστεί η συμπεριφορά μιας κατασκευής υπό συγκεκριμένα σενάρια φόρτισης. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην υπόθεση ότι οι ελαστικές παραμορφώσεις των δομικών στοιχείων είναι αναστρέψιμες, δηλαδή, μόλις τα φορτία πάψουν να ασκούνται, τα στοιχεία και η κατασκευή συνολικά θα επανέλθουν στην αρχική τους κατάσταση. Η ελαστική ανάλυση παρέχει πληροφορίες για την ελαστική ικανότητα των δομών και μπορεί να

δείξει πού θα εμφανιστεί η πρώτη διαρροή, αλλά δεν είναι σε θέση να προβλέψει τον μηχανισμό αστοχίας ούτε να λάβει υπόψη την επανακατανομή των δυνάμεων κατά τη διάρκεια διαδοχικών βλαβών. Σε τέτοιες περιπτώσεις, προτιμώνται οι ανελαστικές αναλύσεις, όπως η ανάλυση Pushover, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προβλέψει την αντοχή της δομής πέρα από το όριο διαρροής της. Κατά τη διάρκεια της ανελαστικής ανάλυσης, το δομικό προσομοίωμα προσαρμόζεται λαμβάνοντας υπόψη τη μειωμένη ακαμψία των μελών που έχουν ήδη υποστεί ζημιές, επιτρέποντας στην κατασκευή να συνεχίσει να υποβάλλεται σε φορτίσεις. Ως εκ τούτου, η ελαστική ανάλυση τείνει να μην προτείνεται σε τέτοιες περιπτώσεις, καθώς αδυνατεί να προβλέψει τα κρίσιμα φαινόμενα που επηρεάζουν τη σεισμική απόδοση των δομών (Πυλαρινού, 2023) (Φέκας, 2015).

Στην συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικότερη περιγραφή για κάθε μία από τις μεθόδους που αναφέρθηκαν παραπάνω

4.2 Ελαστικές αναλύσεις

4.2.1 Ελαστική στατική ανάλυση

Η ελαστική στατική ανάλυση είναι μια θεμελιώδης μέθοδος που χρησιμοποιείται στον δομικό σχεδιασμό και την ανάλυση για να εκτιμηθεί η απόκριση μιας κατασκευής υπό στατικά φορτία. Η ελαστική στατική ανάλυση αξιολογεί την κατανομή των εσωτερικών δυνάμεων και παραμορφώσεων σε μια κατασκευή όταν αυτή υποβάλλεται σε στατικά φορτία. Υποθέτει ότι οι παραμορφώσεις είναι ελαστικές και αναστρέψιμες. Βασίζεται στις αρχές της γραμμικής ελαστικότητας, όπου οι σχέσεις μεταξύ των δυνάμεων και των παραμορφώσεων είναι γραμμικές. Χρησιμοποιεί τις εξισώσεις ισορροπίας, τη συμβατότητα των παραμορφώσεων και τους νόμους των υλικών. Στην ανάλυση αυτή, γίνεται θεώρηση γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς των διατομών και στατικής επιβολής των φορτίων. Τα υλικά και οι διατομές της προτεινόμενης κατασκευής είναι γραμμικά ελαστικά, δηλαδή δεν ξεπερνούν το όριο ελαστικότητάς τους. Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για τον σχεδιασμό κατασκευών που υπόκεινται κυρίως σε μόνιμα και μετακινούμενα φορτία. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για αντισεισμικό σχεδιασμό και την σεισμική αποτίμηση κατασκευών. Η παραπάνω μέθοδος είναι αποδεκτή σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα και τον ΚΑΝ.ΕΠΕ., οι οποίοι επιτρέπουν τη εφαρμογή της, αρκεί να πληρούνται τα κριτήρια τα οποία θέτουν (Ευρωκώδικας 2, 2010).

4.2.2 Ελαστική δυναμική ανάλυση

Η ελαστική δυναμική ανάλυση παρέχει μια πιο λεπτομερή προσέγγιση συγκριτικά με την ελαστική στατική ανάλυση, λαμβάνοντας υπόψη την δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής. Εξετάζει την απόκριση της κατασκευής σε σεισμικά φορτία μέσω της ανάλυσης των ιδιομορφών της και των αντίστοιχων συχνοτήτων τους.

4.3 Μη γραμμική στατική ανάλυση

4.3.1 Περιγραφή μη γραμμικής στατικής ανάλυσης

Η μη γραμμική στατική ανάλυση, γνωστή και ως ανάλυση push-over, εκτιμά τις ανελαστικές παραμορφώσεις των δομικών στοιχείων υπό σεισμική δράση. Παρέχει μια λεπτομερή εικόνα της συμπεριφοράς των κατασκευών πέρα από το ελαστικό όριο, καθιστώντας την ιδανική για την αποτίμηση υφιστάμενων κατασκευών

4.3.2 Σκοπός μη γραμμικής στατικής ανάλυσης

Ο κύριος στόχος της μη γραμμικής στατικής ανάλυσης είναι η εκτίμηση του μεγέθους των ανελαστικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στα δομικά στοιχεία κατά τη διάρκεια σεισμικής δράσης. Η ανάλυση αυτή συγκρίνει τις ανελαστικές παραμορφώσεις με τις επιτρεπόμενες τιμές που προσδιορίζονται βάσει της στοχευόμενης στάθμης επιτελεστικότητας και των ικανοτήτων των μελών (Karabinis & Eleftheriadou, 2007).

4.3.3 Υπολογιστική προσέγγιση μη γραμμικής στατικής ανάλυσης σε υφιστάμενα κτίρια

Κατά την αξιολόγηση ή την ανακαίνιση παλαιών κτιρίων, η ανάλυση Pushover στοχεύει στον καθορισμό της καμπύλης αντίστασης και στη συνέχεια στον προσδιορισμό του σημείου απόδοσης κάτω από μια συγκεκριμένη σεισμική διέγερση. Οι απαιτούμενες εκτιμήσεις σχετικά με παραμορφώσεις ή δυνάμεις διεξάγονται με βάση αυτό το σημείο απόδοσης. Αυτή η διαδικασία προϋποθέτει ένα ορισμένο επίπεδο κατανόησης σχετικά με τη δομική γεωμετρία, την ποιότητα του υλικού και τις ιδιαιτερότητες κατασκευής, οι οποίες μπορεί να διαφέρουν από ολοκληρωμένες έως περιορισμένες (Belinha, 2023).

Συντελεστής α_u/α_1

Ο ενιαίος συντελεστής συμπεριφοράς q μιας κατασκευής είναι σταθερός ή ανάλογος του λόγου α_u/α_1 , σύμφωνα με την τάξη της πλαστιμότητάς της (EC8-1). Ο λόγος απαιτείται από τον EC8 στην ανάλυση κατασκευών και είναι δυνατόν να προσδιοριστεί υπολογιστικά.

Ο λόγος αυτός απαρτίζεται από:

α_1 : τιμή με την οποία πρέπει να πολλαπλασιαστούν τα οριζόντια φορτία ώστε να φτάσει κάποιο μέλος της κατασκευής στην καμπτική διαρροή ενώ όλες οι άλλες φορτίσεις παραμένουν σταθερές (εμφάνιση της πρώτης πλαστικής άρθρωσης στο φέροντα οργανισμό)

α_u : τιμή με την οποία πρέπει να πολλαπλασιαστούν τα οριζόντια φορτία ώστε να δημιουργηθεί επαρκής αριθμός πλαστικών αρθρώσεων στο κτίριο για την αστάθεια του τελευταίου, ενώ όλες οι άλλες φορτίσεις παραμένουν σταθερές.

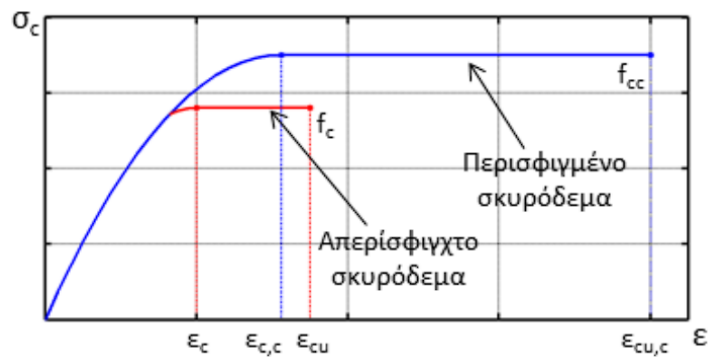
Είναι φανερό πως σε μια αμφιέριστη δοκό ο λόγος αυτός είναι ίσος με 1, διότι η δημιουργία της 1ης πλαστικής άρθρωσης εφόσον δεν υπάρχει υπεραντοχή, είναι ικανή να οδηγήσει σε κατάρρευση. Συνεπώς, όσο μεγαλύτερη είναι η ικανότητα της κατασκευής να καταναλώνει ενέργεια μέσω πλαστικών παραμορφώσεων, τόσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος αυτός (Logismiki, 2013).

Η μέγιστη τιμή του λόγου σύμφωνα με τον EC8, όταν δεν πραγματοποιείται ανάλυση Pushover είναι 1.3, ενώ για τιμές μεγαλύτερες, απαιτείται επαλήθευση με χρήση της μη γραμμικής στατικής ανάλυσης. Αυτή η επαλήθευση είναι αναγκαία, προκειμένου να είναι βέβαιο πως η κατασκευή είναι «ικανή» να αναπτύξει μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις πριν να φτάσει στο σημείο κατάρρευσης. Ωστόσο η μέγιστη τιμή του λόγου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό είναι 1.5, ακόμα και αν η ανάλυση Pushover προβλέπει μεγαλύτερο. Ενδεικτικά το διάγραμμα α-δ φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Logismiki, 2013)

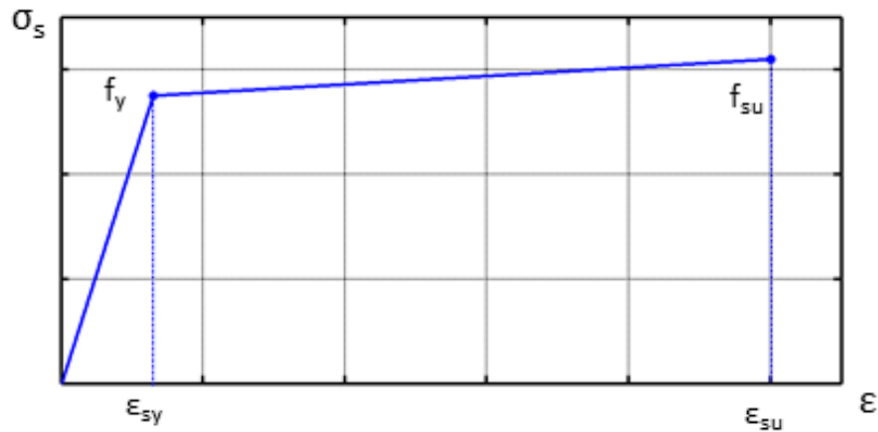


Εικόνα 1 Καμπύλη αντίστασης κατασκευής

Υλικά

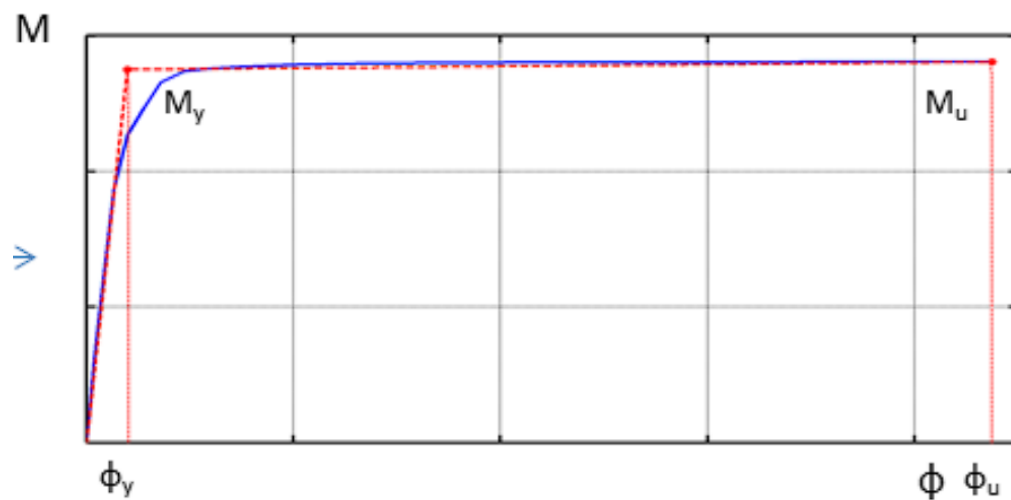


Εικόνα 2 Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων σκυροδέματος



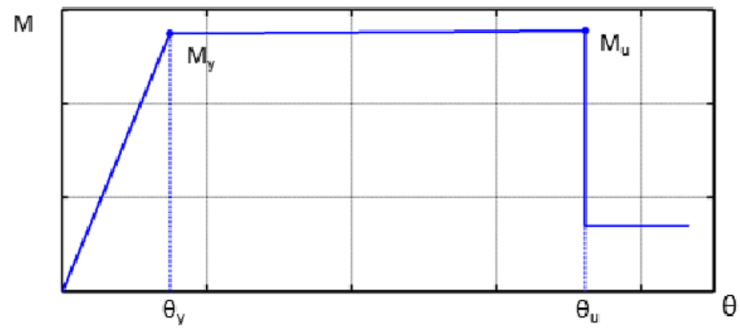
Εικόνα 3 Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων χάλυβα

Επίπεδο Διατομής



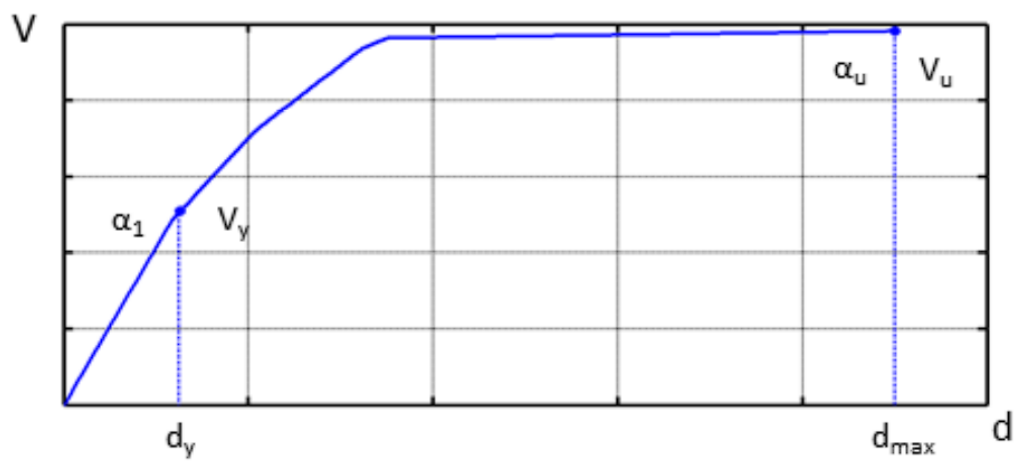
Εικόνα 4 Διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων (M-φ)

Επίπεδο Μέλους



Εικόνα 5 Διάγραμμα ροπών γωνιών στροφής χορδής (M- θ)

Επίπεδο Κατασκευής



Εικόνα 6 Διάγραμμα δύναμης μετακίνησης (V-d)

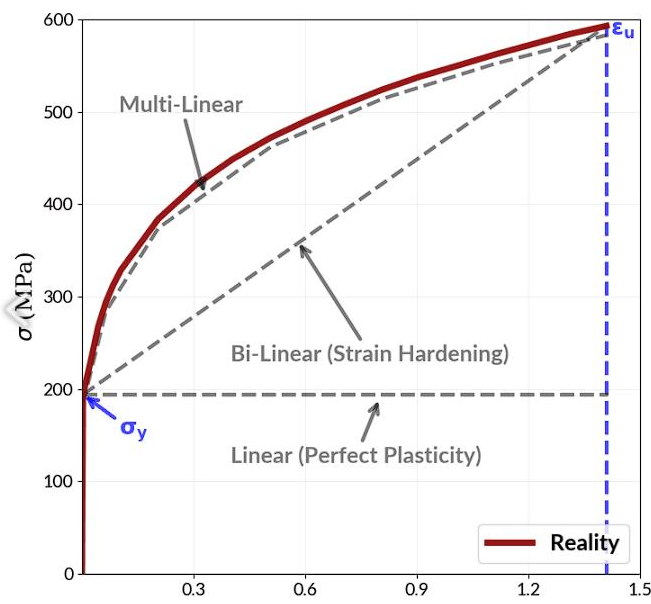
Για την εξαγωγή της καμπύλης αντίστασης απαιτείται ο προσδιορισμός της αντοχής των μελών της κατασκευής. Η διαδικασία που ακολουθείται φαίνεται στα παραπάνω σχήματα. Η πορεία εξαγωγής της καμπύλης αντίστασης ακολουθεί τη λογική της εκκίνησης από την τοπική αντοχή των κρίσιμων διατομών μέσα στην κατασκευή (άκρα των φερόντων μελών της κατασκευής) και της κατάληξης στη γενική απόκριση ολόκληρης της κατασκευής. Αρχικά ορίζονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών και χαράσσεται το διάγραμμα **ροπών-καμπυλοτήτων** των ακραίων διατομών των φερόντων μελών της κατασκευής για διάφορα επίπεδα αξονικής δύναμης. Έτσι συνεκτιμάται η αλληλεπίδραση αξονικής ορθής έντασης και διαξονικής κάμψης. Γνωρίζοντας τον τρόπο απόκρισης των κρίσιμων διατομών ενός μέλους είναι δυνατή η εύρεση της συμπεριφοράς αυτού, η οποία εκφράζεται με το διάγραμμα **ροπών-γωνιών στροφής χορδής**. Η γενικότερη απόκριση της κατασκευής υπό οριζόντια φόρτιση μπορεί πλέον να προσδιοριστεί βασιζόμενη στην απόκριση των επιμέρους μελών της (Logismiki, 2013).

4.4 Ελαστοπλαστική Ανάλυση

Η ελαστοπλαστική ανάλυση είναι ένα κρίσιμο εργαλείο στη σεισμική μηχανική για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των κατασκευών υπό σεισμική φόρτιση. Σε αυτό το είδος ανάλυσης, η συμπεριφορά του υλικού χωρίζεται σε δύο φάσεις: ελαστική και πλαστική. Η ελαστική φάση ευθύνεται για την αναστρέψιμη παραμόρφωση του υλικού, ενώ η πλαστική φάση αντιπροσωπεύει τη μη αναστρέψιμη παραμόρφωση. Κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, οι κατασκευές υπόκεινται σε δυναμική φόρτιση που μπορεί να υπερβεί το ελαστικό τους όριο, με αποτέλεσμα να παραμορφωθούν πλαστικά. Μια βασική πτυχή της ελαστοπλαστικής ανάλυσης είναι η θεώρηση της πλαστιμότητας, η οποία είναι η ικανότητα μιας κατασκευής να παραμορφώνεται πλαστικά χωρίς να χάνει την ικανότητα μεταφοράς φορτίου της.

Η ελαστοπλαστική ανάλυση προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα στον δομικό σχεδιασμό και την ανάλυση. Αρχικά, οι αλυσίδες των υλικών κατανέμονται τυχαία και όταν ασκείται δύναμη, αυτές οι αλυσίδες ισιώνουν εντός των ορίων ελαστικότητας. Αυτή η συμπεριφορά επιτρέπει μια ακριβέστερη αναπαράσταση της απόκρισης υλικού κάτω από διαφορετικά φορτία. Εφαρμόζοντας μια βέλτιστη προσέγγιση ελαστοπλαστικής ανάλυσης και σχεδιασμού, οι πλαστικές παραμορφώσεις μπορούν να περιοριστούν, ενισχύοντας έτσι τη δομική ακεραιότητα και απόδοση. Επιπλέον, η ανάπτυξη μιας απλής και αποτελεσματικής μεθόδου για τη βελτιστοποίηση τοπολογίας με βάση την αξιοπιστία για κατασκευές υπογραμμίζει περαιτέρω τα πλεονεκτήματα της ελαστοπλαστικής ανάλυσης στη διασφάλιση της δομικής ευρωστίας (Wang & Xian, 2023).

Οι εφαρμογές της ελαστοπλαστικής ανάλυσης στη μηχανική είναι ποικίλες. Διεξάγοντας μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση της σεισμικής απόδοσης μιας κατασκευής, οι μηχανικοί μπορούν να αναλύσουν τους παγκόσμιους στόχους απόδοσης και τις καταστάσεις τάσης-παραμόρφωσης για να εξασφαλίσουν δομική ασφάλεια και ανθεκτικότητα. Η μεγάλη ποικιλία εφαρμογών του μοντέλου ελαστοπλαστικού υλικού είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του υλικού υπό ακραίες συνθήκες, βοηθώντας έτσι στο σχεδιασμό κατασκευών που μπορούν να αντέξουν σε δύσκολα περιβάλλοντα (Gurmail Benipal, 2016).



Εικόνα 7 Οπτική σύγκριση μεταξύ διαφορετικών ελαστοπλαστικών μοντέλων (πολυγραμμική, διγραμμική και τέλεια πλαστικότητα) και της καμπύλης πραγματικού υλικού.

Πολυγραμμικό Μοντέλο

Η μοντελοποίηση του υλικού ως πολυγραμμικού σημαίνει την καθιέρωση των ιδιοτήτων του ως ίδιες με την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης που αποκτήθηκε από μια δοκιμή εφελκυσμού. Σε αυτό το μοντέλο, η καμπύλη σκλήρυνσης καταπόνησης σχεδιάζεται με μερικές γραμμές εφαπτόμενες στη μη γραμμική συμπεριφορά. Επομένως, στη πολυγραμμική μοντελοποίηση το υλικό συμπεριφέρεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στην πραγματικότητα (Benipal, 2016).

Διγραμμικό Μοντέλο

Το διγραμμικό μοντέλο κράτυνσης είναι παρόμοιο με το πολυγραμμικό μοντέλο, αλλά δεν λαμβάνει υπόψη ολόκληρο το ιστορικό συμπεριφοράς του υλικού. Αυτό το μοντέλο περιγράφεται επίσης από την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης, όπου οι συντελεστές που απαιτούνται για τον χαρακτηρισμό του υλικού είναι ο συντελεστής Young και ο συντελεστής της πλαστικής φάσης, όπου ο δεύτερος δεν μπορεί να είναι μικρότερος από μηδέν, ούτε μεγαλύτερος από τον συντελεστή Young. Όταν ο συντελεστής της πλαστικής φάσης αποτελεί το 99% του συντελεστή Young, το διγραμμικό μοντέλο προσομοιώνει μια γραμμική ελαστική ανάλυση. Αν ο συντελεστής της πλαστικής φάσης είναι 1% ή 0, το διγραμμικό μοντέλο προσομοιώνει τη συμπεριφορά της τέλει πλαστικότητας (Benipal, 2016).

5. ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

5.1 Εισαγωγή

Η πλαστιμότητα στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα αφορά την ικανότητα του υλικού να υποστεί πλαστικές παραμορφώσεις πριν από την αστοχία, γεγονός που είναι κρίσιμο για την ασφάλεια και την ανθεκτικότητα των κατασκευών. Η μελέτη της πλαστιμότητας περιλαμβάνει την ανάλυση της αστοχίας κάμψης, διάτμησης της συμπεριφοράς υπό συνδυασμένα φορτία, και των μηχανισμών αστοχίας του σκυροδέματος.

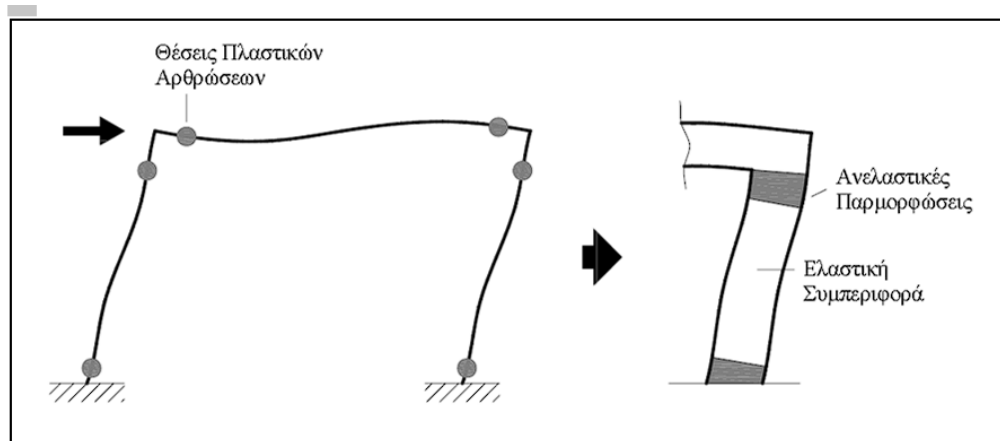
Η πλαστιμότητα στα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα εξαρτάται από τη συμπεριφορά του σκυροδέματος και του χάλυβα υπό φορτίο. Το σκυρόδεμα παρουσιάζει ψαθυρή αστοχία πρακτικά μετά την ελαστική περιοχή, ενώ ο χάλυβας οπλισμού εισέρχεται σε πλαστική περιοχή όταν ξεπεραστεί το όριο διαρροής του. Η συνεργασία αυτών των υλικών καθορίζει τη συνολική πλαστική συμπεριφορά του στοιχείου (Μπουτσάκη, 2014).

Στην αποτίμηση υφιστάμενων κτιρίων, είτε πριν είτε μετά την επέμβαση, είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη η ικανότητα του κτιρίου να "καταναλώνει" ενέργεια μέσω ανελαστικών παραμορφώσεων των μελών του. Στις ελαστικές μεθόδους ανάλυσης, η ανελαστική συμπεριφορά των μελών της κατασκευής λαμβάνεται υπόψη έμμεσα μέσω της υιοθέτησης του δείκτη συμπεριφοράς q . Στις ανελαστικές αναλύσεις απαιτείται η άμεση προσομοίωση της συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων σε όλο το φάσμα της απόκρισής τους.

Όταν επιβάλλεται αυξανόμενη ένταση σε μια κατασκευή, τα μέλη της σταδιακά εισέρχονται σε κατάσταση διαρροής και αναπτύσσουν ανελαστικές παραμορφώσεις. Η εμφάνιση πλαστικών παραμορφώσεων συνδέεται με την αντοχή των μελών και την αντίστοιχη ένταση σε διάφορες θέσεις κατά μήκος του μέλους. Εφόσον η κατανομή των εντατικών μεγεθών κατά μήκος των δοκών και των υποστυλωμάτων ενός κτιρίου που καταπονείται από κατακόρυφα φορτία και οριζόντια φορτία είναι γνωστή, είναι δυνατόν να εκτιμηθούν οι θέσεις όπου αναμένεται να αναπτυχθούν ανελαστικές παραμορφώσεις. Αυτές οι θέσεις εντοπίζονται στα άκρα (παριές) των δοκών και στην κορυφή και βάση των υποστυλωμάτων. Αρχικά, ένα μέλος μπορεί να θεωρηθεί ότι διαρρέει στην ακραία διατομή του όταν η μέγιστη τιμή της έντασης στο σημείο αυτό ξεπεράσει την αντίστοιχη αντοχή του. Στη συνέχεια, περαιτέρω αύξηση της έντασης οδηγεί σε υπέρβαση της αντοχής σε μεγαλύτερο τμήμα της ακραίας περιοχής του μέλους, όπου επεκτείνονται οι ανελαστικές παραμορφώσεις (McGuire, 2000).

Αυτή η λογική εφαρμόζεται και στο σχεδιασμό νέων κατασκευών, όπου προβλέπονται κρίσιμες περιοχές σε δοκούς και υποστυλώματα, οι οποίες εκτείνονται σε συγκεκριμένες αποστάσεις από τα άκρα των μελών και για τις οποίες λαμβάνονται αυξημένα μέτρα, όπως η πύκνωση συνδετήρων, για την αντιμετώπιση των αυξημένων απαιτήσεων παραμόρφωσης σε περιπτώσεις ακραίας σεισμικής έντασης. Συνεπώς, ένα μέλος μιας συνήθους κατασκευής που υποβάλλεται σε σεισμική φόρτιση αναμένεται να αναπτύξει ανελαστικές παραμορφώσεις σε περιοχές πεπερασμένου μήκους κοντά στα άκρα του.

Πέραν αυτών των περιοχών, η συμπεριφορά του μέλους παραμένει ελαστική και περιγράφεται από τις αρχές της αντίστοιχης θεωρίας. Οι πεπερασμένοι μήκους περιοχές στα άκρα ενός μέλους, όπου αναπτύσσονται ανελαστικές παραμορφώσεις, ονομάζονται πλαστικές αρθρώσεις(Μπουτσάκη,2014).

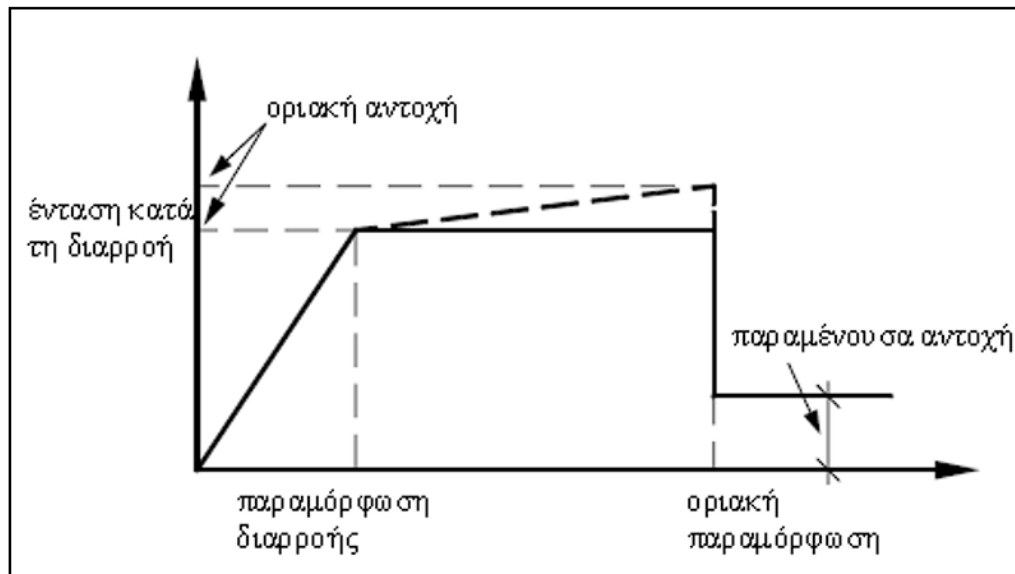


Εικόνα 8 Θέσεις των πλαστικών αρθρώσεων και περιοχές ανελαστικών παραμορφώσεων σε ένα κατασκευαστικό πλαίσιο.

5.2 Συμπεριφορά Δομικών Στοιχείων

Η συμπεριφορά της κρίσιμης περιοχής ενός δομικού στοιχείου προσομοιώνεται μέσω ενός απλοποιημένου πολυγραμμικού διαγράμματος έντασης-παραμόρφωσης. Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ., το διάγραμμα αυτό υιοθετεί μια πολυγραμμική καμπύλη με ευθύγραμμο ανελαστικό κλάδο, δηλαδή δεν λαμβάνεται υπόψη πιθανή αύξηση της αντοχής μετά τη θεωρητική διαρροή του μέλους. Συνεπώς, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των τιμών έντασης και παραμόρφωσης που αντιστοιχούν σε δύο χαρακτηριστικά σημεία του διαγράμματος: τη θεωρητική διαρροή και την εξάντληση της φέρουσας ικανότητας της κρίσιμης περιοχής(Φιτνέογλου,Χαραλαμπίδη,2008).

Για τα μέλη από οπλισμένο σκυρόδεμα, το μέγεθος έντασης που συνήθως επιλέγεται είναι η ροπή M , η οποία μπορεί να αντιστοιχεί στη μέγιστη ροπή που σχετίζεται με καμπτική ή διατμητική αστοχία στις κρίσιμες περιοχές του στοιχείου. Δεδομένου ότι ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. προτείνει την υιοθέτηση οριζόντιου μετελαστικού κλάδου στο πολυγραμμικό διάγραμμα έντασης-παραμόρφωσης που περιγράφει τη συμπεριφορά των δομικών μελών, ουσιαστικά απαιτείται ο προσδιορισμός της τιμής της ροπής M_y που αντιστοιχεί στη θεωρητική διαρροή της κρίσιμης διατομής.



Εικόνα 9 Θέσεις των πλαστικών αρθρώσεων και περιοχές ανελαστικών παραμορφώσεων σε ένα κατασκευαστικό πλαίσιο.

Η M_y δύναται να υπολογιστεί κατά τα γνωστά για τον υπολογισμό της αντοχής μελών οπλισμένου σκυροδέματος. Εναλλακτικά μπορεί να προκύψει από την σχέση που παρατίθεται παρακάτω, με δεδομένη την αντίστοιχη τιμή της καμπυλότητας διαρροής (ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2004).

$$\frac{M_y}{bd^3} = (1/r)_y \left\{ E_c \frac{\xi_y^2}{2} \left(0.5(1 + \delta') - \frac{\xi_y}{3} \right) + \left[(1 - \xi_y)\rho + (\xi_y - \delta')\rho' + \frac{\rho_y}{6}(1 - \delta') \right] \cdot (1 - \delta') \frac{E_s}{2} \right\}$$

Εξίσωση 3 Υπολογισμός M_y με γνωστή τιμή καμπυλότητας διαρροής

Όπου η καμπυλότητα στη διαρροή προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$(1/r)_y = \frac{f_y}{E_s (1 - \xi_y)d}$$

Εξίσωση 4 Σχέση υπολογισμού καμπυλότητας διαρροής

5.3 Μηχανισμοί Πλαστιμότητας

Οι κύριοι μηχανισμοί που οδηγούν σε πλαστιμότητα περιλαμβάνουν:

- **Εφελκυστικές ρωγμές:** Εμφανίζονται στις περιοχές εφελκυσμού, όπου το σκυρόδεμα δεν μπορεί να αντέξει τις τάσεις και εμφανίζει ρωγμές, με τον χάλυβα οπλισμού να αναλαμβάνει τις τάσεις.
- **Θλιπτικές ζώνες:** Στις περιοχές θλίψης, το σκυρόδεμα μπορεί να υποστεί πλαστική παραμόρφωση πριν υποστεί θραύση
- **Ολίσθηση ράβδων:** Η ολίσθηση των ράβδων οπλισμού μέσα στο σκυρόδεμα είναι ένας άλλος σημαντικός μηχανισμός που επηρεάζει την πλαστιμότητα.

5.4 Κανονιστικές Απαιτήσεις (Eurocode 2)

Σύμφωνα με τους σύγχρονους κανονισμούς, όπως ο Ευρωκώδικας 2, η πλαστιμότητα των στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι κρίσιμη για την αποφυγή καταρρεύσεων και την διασφάλιση της ασφάλειας των κατασκευών. Ο κανονισμός ορίζει συγκεκριμένα κριτήρια και μεθόδους για την εξασφάλιση της πλαστιμότητας

5.4.1 Στρατηγικές Σχεδιασμού

Οι στρατηγικές για την επίτευξη πλαστιμότητας περιλαμβάνουν:

- Σωστός σχεδιασμός των διατομών για την αποφυγή ρηγματώσεων.
- Επαρκής και ορθός οπλισμός, που εξασφαλίζει την αντοχή σε εφελκυσμό και θλίψη.
- Χρήση συνεχών ράβδων οπλισμού και κατάλληλη αγκύρωση για την αποφυγή ολίσθησης.

6.ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΤΙΡΙΟΥ

6.1 Περιγραφή Κατασκευής

Η παρούσα μελέτη αφορά σε μια κατοικία στην Αχαΐα, η οποία κατέρρευσε από το σεισμό της 8^{ης} Ιουνίου 2008 της Αχαΐας-Ηλείας, λόγω σχηματισμού μαλακού ορόφου του ισογείου.

Το κτίριο, που χτίστηκε το 1980, σχεδιάστηκε βάσει του Αντισεισμικού Κανονισμού του 1959 και του Κανονισμού Οπλισμένου Σκυροδέματος του 1954. Αποτελείται από δύο ορόφους, ένα ισόγειο με ύψος 4 μέτρα και έναν πρώτο όροφο με ύψος 3,5 μέτρα.

Η στατική δομή του κτιρίου αποτελείται από πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος, με τέσσερα πλαίσια στην κατεύθυνση $y-y'$ και τρία στην κατεύθυνση $x-x'$. Αυτά τα πλαίσια υποστηρίζουν τόσο τα φορτία βαρύτητας όσο και τα σεισμικά φορτία.

Τα υλικά κατασκευής είναι σκυρόδεμα B160 και χάλυβα St I, που αντιστοιχούν σε χαμηλότερη αντοχή από τα σύγχρονα C12/15 και λείους χάλυβας S220, σύμφωνα με τους σημερινούς κανονισμούς.

6.2 Υλικά Κατασκευής

Η ποιότητα του σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή είναι B160. Ο νόμος τάσεων παραμορφώσεων του σκυροδέματος υπολογίστηκε σύμφωνα με τις σχέσεις που αναφέρονται στον Model Code 90 για το απερίσφιγκτο σκυρόδεμα.

Ομοίως η ποιότητα χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε είναι κατηγορίας S220 λείος, τόσο για τον κύριο οπλισμό όσο και για τους συνδετήρες (ΚΑΝ.ΕΠΕ, 2022) (Ευρωκώδικας, 2010)

Τα διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων των παραπάνω υλικών παρουσιάζονται παρακάτω.

α) Σκυρόδεμα

Το διάγραμμα τάσεων του σκυροδέματος υπολογίστηκε θεωρώντας ως μέγιστη τιμή παραμόρφωσης την τιμή $\epsilon_{clim} = 0.0035$ σύμφωνα με τη σχέση:

$$\sigma_c = \frac{\frac{E_{c0}}{E_{c1}} * \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}}\right)^2}{1 + \left(\frac{E_{c0}}{E_{c1}} - 2\right) * \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}}} * f_c$$

Εξίσωση 5 Υπολογισμός τάσης-παραμόρφωσης

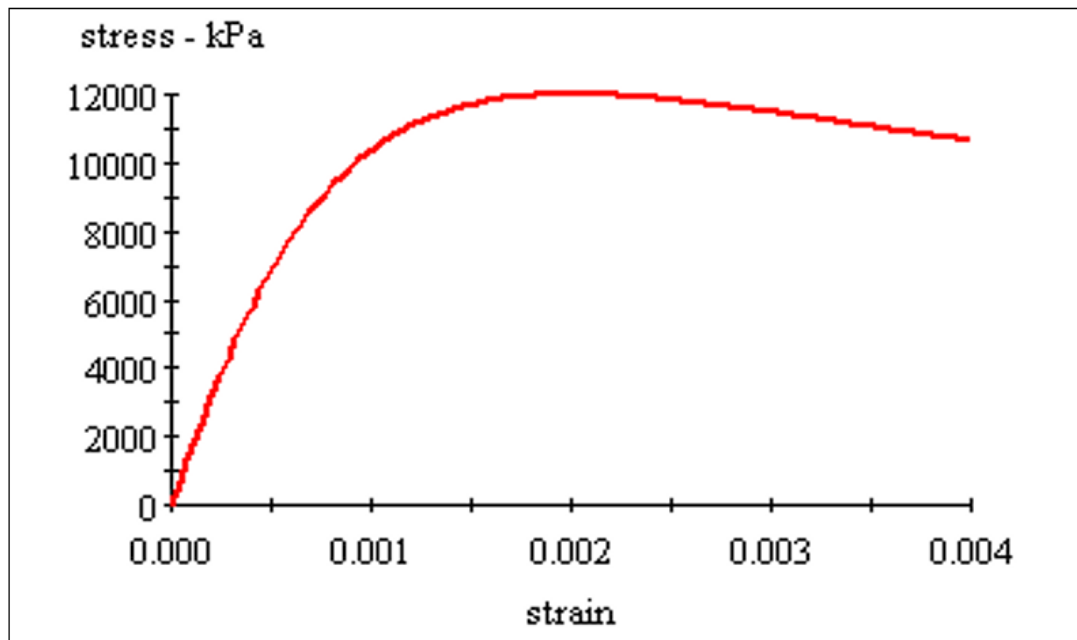
Χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή σκυροδέματος : $f_{ck} = 12 \text{ MPa}$

Το μέτρο ελαστικότητας σύμφωνα με τον Ε.Κ.Ω.Σ. 2000 είναι:

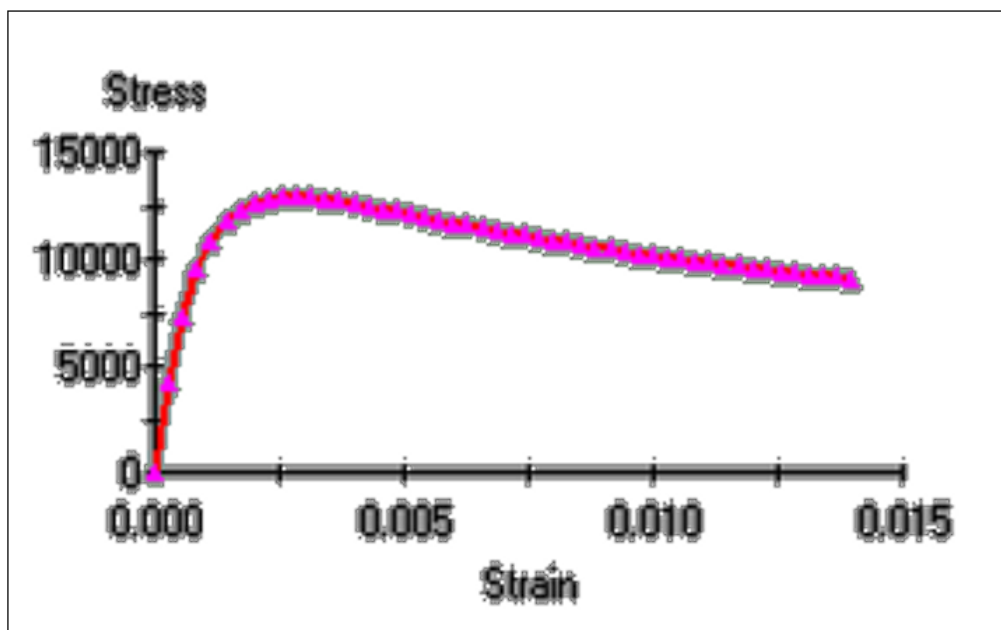
$$E_{cm} = 9.50 * (f_{ck} + 8)^{1/3} = 9.50 * (12 + 8)^{1/3} \cong 26 \text{ GPa}$$

Εξίσωση 6 Μέτρο ελαστικότητας σύμφωνα με τον Ε.Κ.Ω.Σ. 2000

Τα διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων των παραπάνω υλικών παρουσιάζονται παρακάτω(Εικόνα 10,11).



Εικόνα 10 Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων απερίσφικτου σκυροδέματος C12/15



Εικόνα 11 Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων περισφιγμένου σκυροδέματος C12/15

β) Χάλυβας

Ο νόμος τάσεων – παραμορφώσεων περιγράφεται από το προσομοίωμα του Park / Sampson το οποίο περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση Q

$$\sigma_s = f_y * \left[\frac{m * (\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}) + 2}{60 * (\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}) + 2} + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}) * (60 - m)}{2 * (30 * r + 1)^2} \right]$$

Εξίσωση 7 Εξίσωση Q (Νόμος τάσεων παραμορφώσεων)

όπου,

$$m = \left[\frac{\frac{f_u}{f_y} * (30 * r + 1)^2 - 60 * r - 1}{15 * r^2} \right]$$

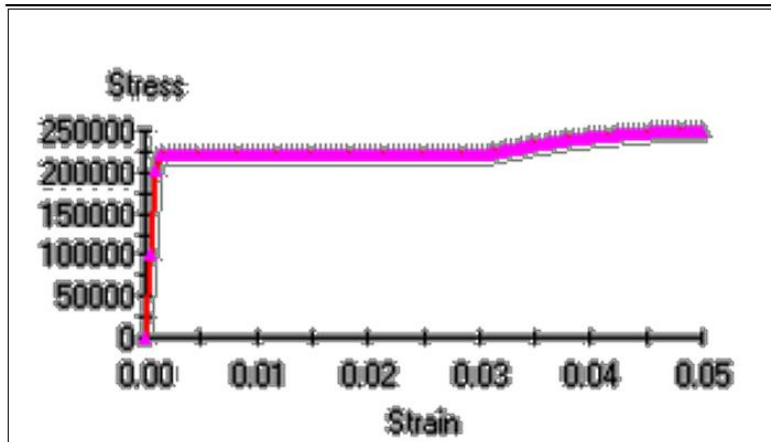
Εξίσωση 8 Υπολογισμός m

και

$$r = \varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh}$$

Εξίσωση 9 Υπολογισμός r

Το διάγραμμα τερματίζεται στη “ χρήσιμη ” οριακή παραμόρφωση εσυ αγνοώντας τον φθίνοντα κλάδο που ακολουθεί, κατά μήκος του οποίου το υλικό αστοχεί γρήγορα και με τρόπο μη ελεγχόμενο (Θεοφάνης,2005).

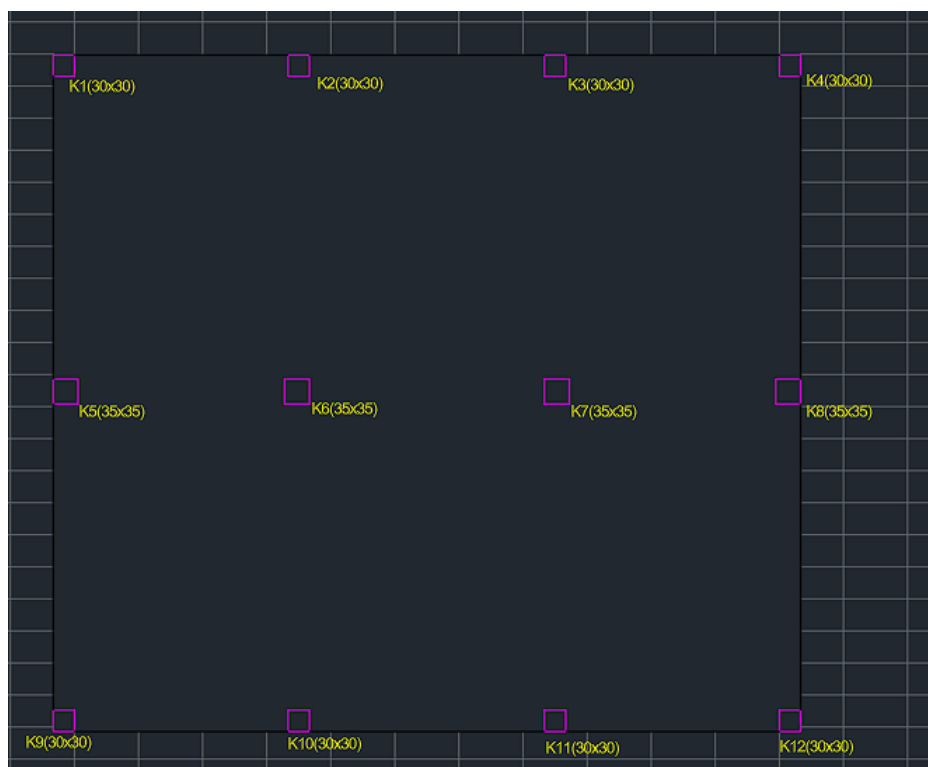


Εικόνα 12 Διάγραμμα τάσεων χάλυβα S220 (λείος)

6.3 Γεωμετρία και οπλισμοί διατομών

Υποστυλώματα

Σε κάθε όροφο υπάρχουν 12 υποστυλώματα των οποίων τα χαρακτηριστικά αλλάζουν ανά όροφο.

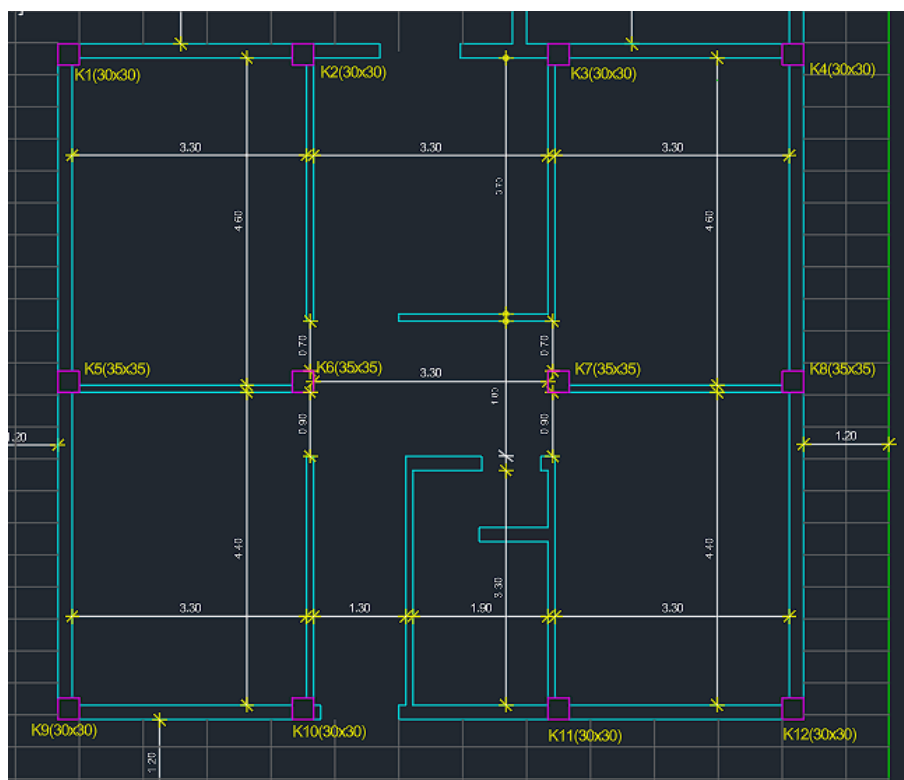


Εικόνα 13 Κάτοψη ισογείου σχεδιασμένη στο Autocad (Φιτνέογλου, Χαραλαμπίδη, 2008)

Για το ισόγειο ισχύουν τα εξής : τα υποστυλώματα εκτός των Κ5,Κ6,Κ7,Κ8 έχουν διαστάσεις 30/30 εκατοστά και καθαρή επικάλυψη σκυροδέματος 3,00 εκατοστά. Οι διαμήκεις οπλισμοί τους είναι 4 ράβδοι διατομής Φ20 και οι εγκάρσιοι οπλισμοί είναι συνδετήρες Φ6 δίτητοι τοποθετημένοι ανά 20 εκατοστά.

Τα υποστυλώματα Κ5,Κ6,Κ7,Κ8 έχουν διαστάσεις 35x35 εκατοστά και καθαρή επικάλυψη σκυροδέματος 3,00 εκατοστά. Οι διαμήκεις οπλισμοί τους είναι 4 ράβδοι διατομής Φ20 καθώς και 4 ράβδοι διατομής Φ18. Οι ράβδοι Φ20, είναι διατεταγμένες στις τέσσερις γωνίες του υποστυλώματος. Οι εγκάρσιοι οπλισμοί είναι συνδετήρες Φ6 δίτητοι τοποθετημένοι ανά 20 εκατοστά(Φιτνέογλου, Χαραλαμπίδη, 2008).

Παρακάτω φαίνεται ο πρώτος όροφος του κτηρίου (Εικόνα 14)



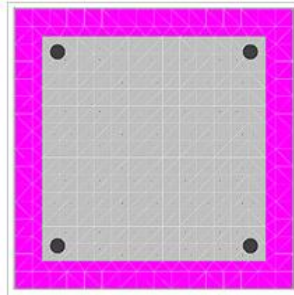
Εικόνα 14 Κάτοψη Α' Ορόφου Κτηρίου

Για τον Α' όροφο : τα τέσσερα μπροστινά και τα τέσσερα υποστυλώματα που βρίσκονται από πίσω έχουν διαστάσεις 30x30 εκατοστά και καθαρή επικάλυψη σκυροδέματος 3,00 εκατοστά. Οι διαμήκεις οπλισμοί τους είναι 4

ράβδοι διατομής $\Phi 20$ και οι εγκάρσιοι οπλισμοί είναι συνδετήρες $\Phi 6$ δίτητοι τοποθετημένοι ανά 20 εκατοστά.

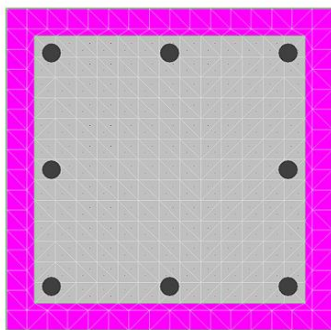
Παρακάτω παρουσιάζονται οι διατομές με τους αντίστοιχους οπλισμούς(Εικόνα 15,16)

Υποστύλωμα 30 x 30 (4 $\Phi 16$)



Εικόνα 15 Υποστύλωμα 30x30

Υποστύλωμα 35/35(4 $\Phi 20$ + 4 $\Phi 18$)

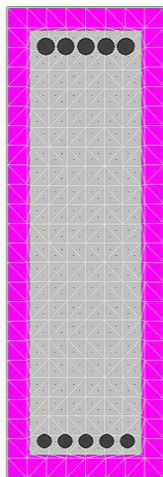


Εικόνα 16 Υποστύλωμα 35x35

ΔΟΚΟΙ

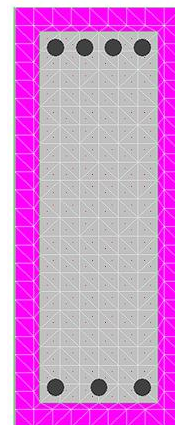
Σε κάθε όροφο του κτιρίου υπάρχουν συνολικά δεκαέξι δοκοί. Οι δοκοί που διατάσσονται κατά την διεύθυνση $x - x'$ έχουν ύψος κορμού 50 εκατοστά ενώ το πλάτος τους είναι 20 εκατοστά. Οι δοκοί που διατάσσονται κατά την διεύθυνση $z - z'$ έχουν ύψος κορμού 60 εκατοστά ενώ το πλάτος τους είναι 20 εκατοστά. Η καθαρή επικάλυψη είναι 3,00 εκατοστά και οι εγκάρσιοι συνδετήρες είναι $\Phi 6$ τοποθετημένοι ανά 20 εκατοστά. Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά δύο τυπικές διατομές.

Δοκός 20/60



Εικόνα 18 Δοκός 20/60

Δοκός 20/50



Εικόνα 17 Δοκός 20/50

7. ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ MASTAN2

7.1 Προσομοίωση στο MASTAN2

7.1.1 Τι είναι το MASTAN2 ;

Το MASTAN2 επιτρέπει σύνθετη ανάλυση φορέων τύπου πλαισίου, συμπεριλαμβανομένων γραμμικών και μη γραμμικών φορτίων. Οι δυνατότητες του λογισμικού καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα αναλύσεων, συμπεριλαμβανομένης της στατικής ισορροπίας, της γραμμικής ελαστικής ανάλυσης και της δυναμικής ανάλυσης χρονικά μεταβαλλόμενων φορτίων.

7.1.2 Μονάδες Μέτρησης

Το πρόγραμμα παρέχει δύο επιλογές όσον αφορά τις μονάδες μέτρησης

Ανάλυση σε kips και ίντσες

Με τα δεδομένα να πρέπει να μετρούνται ως εξής :

Δεδομένα εισόδου :

E and Fy = ksi,

A = in²,

I = in⁴,

Force = kips,

Moment = kip-in,

Wt. Density = k/in³

Δεδομένα εξόδου :

Παραμορφώσεις = in,

Περιστροφές = rads,

Reaction and Member Forces=kips,

Reaction and Member Moments = kip-in²

Ανάλυση σε mm και kN

Με τα δεδομένα να πρέπει να μετρούνται ως εξής :

Δεδομένα εισόδου :

E and Fy = kN/mm²

A=mm²,

I=mm⁴,

Force=kN,

Moment=kN-mm,

Wt. Density = kN/mm³,

Δεδομένα εξόδου:

Deflections=mm,

Rotations=rads,

Reaction forces=kN,

Member forces=kN,

Member moments = kN-mm

Όπου

E : είναι το μέτρο ελαστικότητας ,δηλαδή το μέτρο ακαμψίας ενός υλικού

Fy: όριο διαρροής, δηλαδή η τάση όπου αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση ενός υλικού

A: Εμβαδόν διατομής

I: Ροπή αδράνειας , δηλαδή η αντίσταση ενός τμήματος στη στρέψη

F: Εξωτερική δύναμη που εφαρμόζεται σε ένα μέλος

M: Ροπή

Wt Density: Πυκνότητα Βάρους

Deflections: Μετατόπιση από την αρχική θέση

Rotation: Περιστροφές

Reaction Forces: Δυνάμεις Αντίδρασης

Member Forces: Δυνάμεις σε μέλη

Member Moments: Ροπές σε μέλη

Στην συγκεκριμένη εργασία όλα τα στάδια επεξεργασίας και ανάλυσης έχουν υπολογιστεί βάσει δεδομένων σε **mm** και **kN**

7.2 Εισαγωγή Δεδομένων

7.2.1 Γεωμετρία Δομής

Το πρώτο στάδιο για την προσομοίωση στο MASTAN2 είναι ο ορισμός της δομικής γεωμετρίας, των συνθηκών στήριξης, τα εφαρμοζόμενα φορτία.

Αρχικά μέσω της εντολής Input Geometry δόθηκαν οι συντεταγμένες του κτιρίου οι οποίες είναι οι αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα(Εικόνα 19).

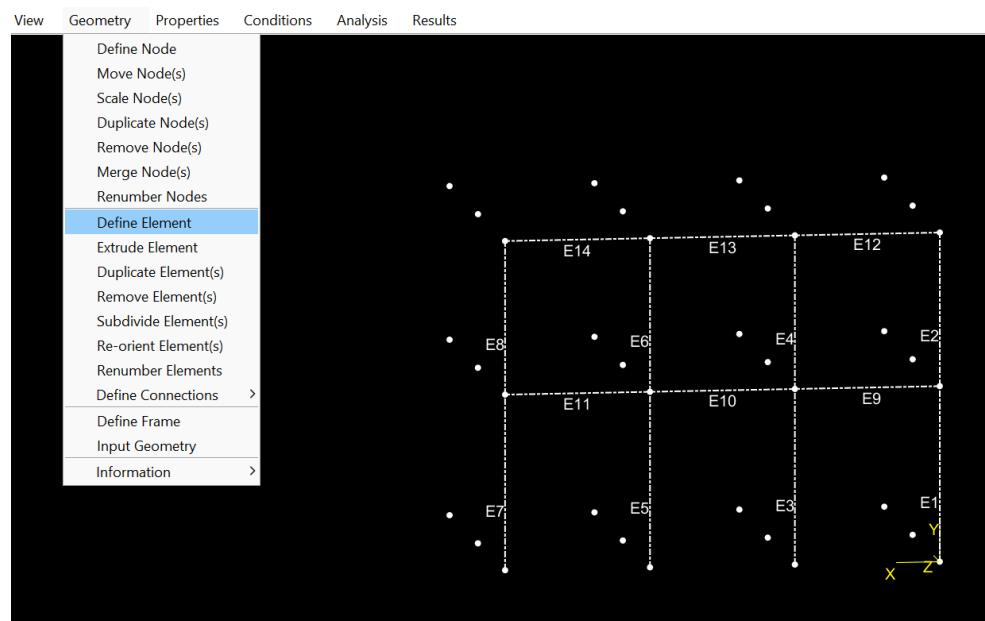
X	Y	Z
0	0	0
3300	0	0
6600	0	0
9900	0	0
0	4000	0
3300	4000	0
6600	4000	0
9900	4000	0
0	7500	0
3300	7500	0
6600	7500	0
9900	7500	0
0	0	4400
3300	0	4400
6600	0	4400
9900	0	4400
0	4000	4400
3300	4000	4400
6600	4000	4400
9900	4000	4400
0	7500	4400
3300	7500	4400
6600	7500	4400
9900	7500	4400
0	0	9000
3300	0	9000
6600	0	9000
9900	0	9000
0	4000	9000
3300	4000	9000
6600	4000	9000
9900	4000	9000
0	7500	9000
3300	7500	9000
6600	7500	9000
9900	7500	9000

Εικόνα 19 Γεωμετρικές Συντεταγμένες Κτιρίου

Κατά την εκτέλεση αυτής της εντολής με τα παραπάνω δεδομένα προκύπτει η παρακάτω κατασκευή η οποία παρέχει μόνο τους κόμβους (nodes) που δημιουργήθηκαν.

Στην συνέχεια έγιναν όλες οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων ώστε δημιουργηθούν όλα τα στοιχεία (elements) της κατασκευής (Εικόνα 21).

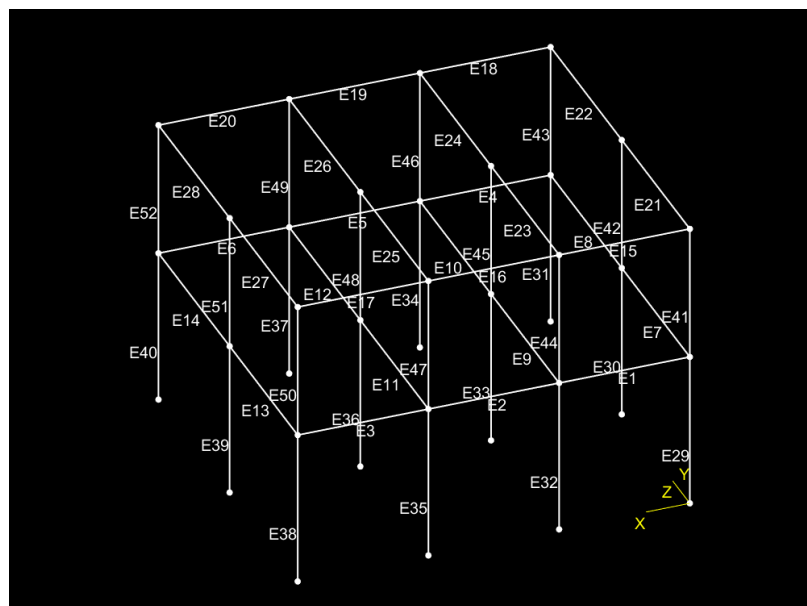
Όλες οι συνδέσεις έγιναν με την εντολή Define Elements



Εικόνα 20 Δημιουργία Κόμβων(nodes)

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται η πρόσοψη του κτιρίου έχοντας ενώσει τους κόμβους έτσι ώστε να δημιουργηθούν τα υποστυλώματα (κάθετα τμήματα), δοκοί (οριζόντια τμήματα) και να διαχωρίζεται το ισόγειο με τον πρώτο όροφο (Εικόνα 21).

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία ενώθηκαν όλοι οι κόμβοι κατάλληλα μεταξύ τους ώστε να πάρουμε την δομή του κτιρίου που χρειαζόμαστε και η οποία φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 22).



Εικόνα 21 Δημιουργία υποστυλωμάτων και δοκών

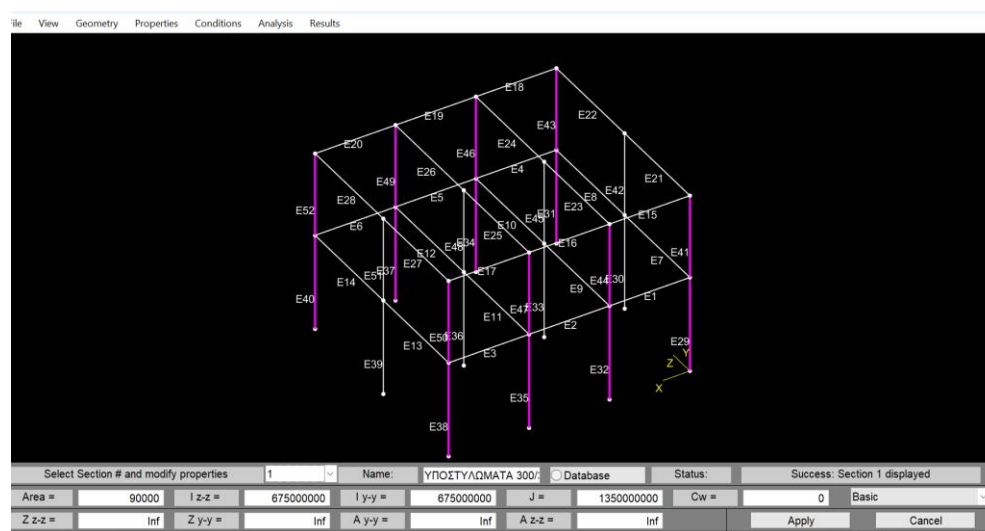
7.2.2 Ιδιότητες Υλικών

Το επόμενο βήμα είναι να καθοριστούν οι ιδιότητες των στοιχείων αυτών που δημιουργήθηκαν δηλαδή ποια είναι η ενότητα και ποιο το υλικό κατασκευής τους.

Αρχικά με την εντολή Define Section ορίστηκε μια ενότητα στοιχείων που έχουν συγκεκριμένες ιδιότητες

Έχουν δημιουργηθεί 4 διαφορετικές ενότητες

ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ 30/30



Εικόνα 22 ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ 30/30

Όπως φαίνεται παραπάνω ορίστηκαν οι ιδιότητες για τα υποστυλώματα του ισογείου και του πρώτου ορόφου

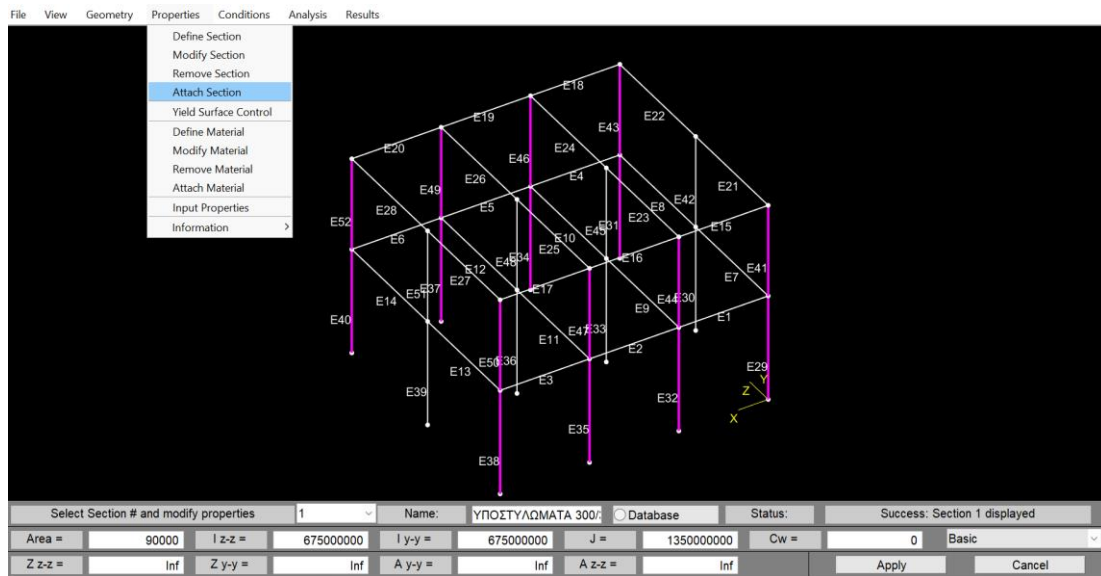
Όπου :

Area: $b \times h = 300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} = 90000 \text{ mm}^2$ και είναι το εμβαδόν της διατομής

Iy-y=Iz-z= $\frac{b \times h^3}{12} = \frac{300 \times 300^3}{12} = 675,000,000 \text{ mm}^4$ και είναι ο συντελεστής αδράνειας

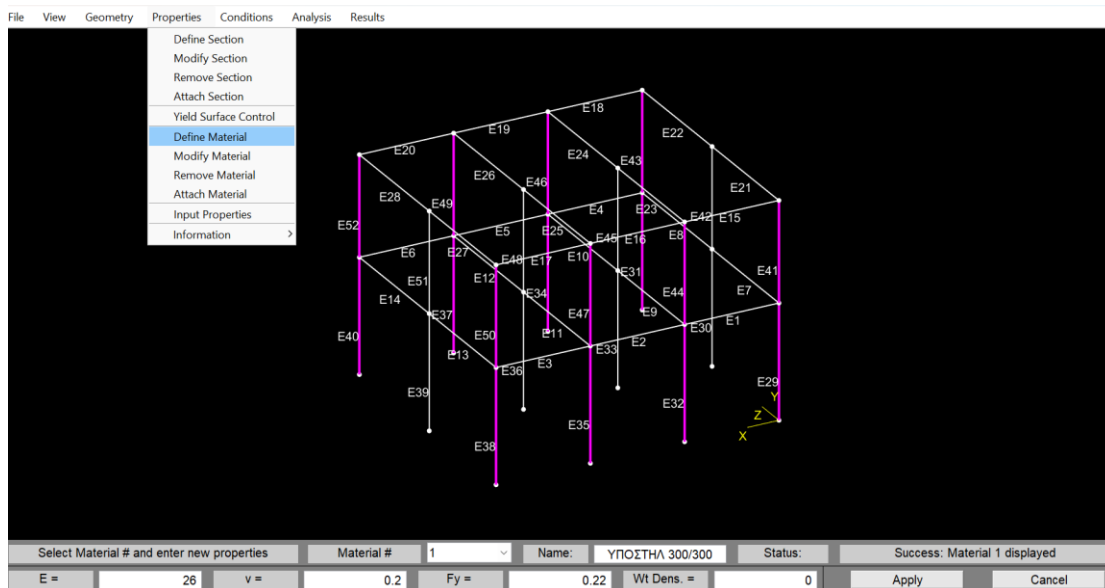
J= $\frac{b \times h}{12} (b^2 + h^2) = 1,350,000,000 \text{ mm}^4$ και είναι η πολική ροπή αδράνειας

Και στην συνέχεια μέσω της εντολής Attach Section ορίστηκαν τα υποστυλώματα τα οποία θα έχουν τις συγκεκριμένες ιδιότητες (Εικόνα 23).



Εικόνα 23 Ορισμός Ιδιοτήτων

Για να οριστούν πλήρως οι ιδιότητες του υλικού χρειάστηκε να δώσουμε περαιτέρω πληροφορίες για το υλικό μέσω της εντολής Define Material (Εικόνα 24).



Εικόνα 24 Εντολή Define Material

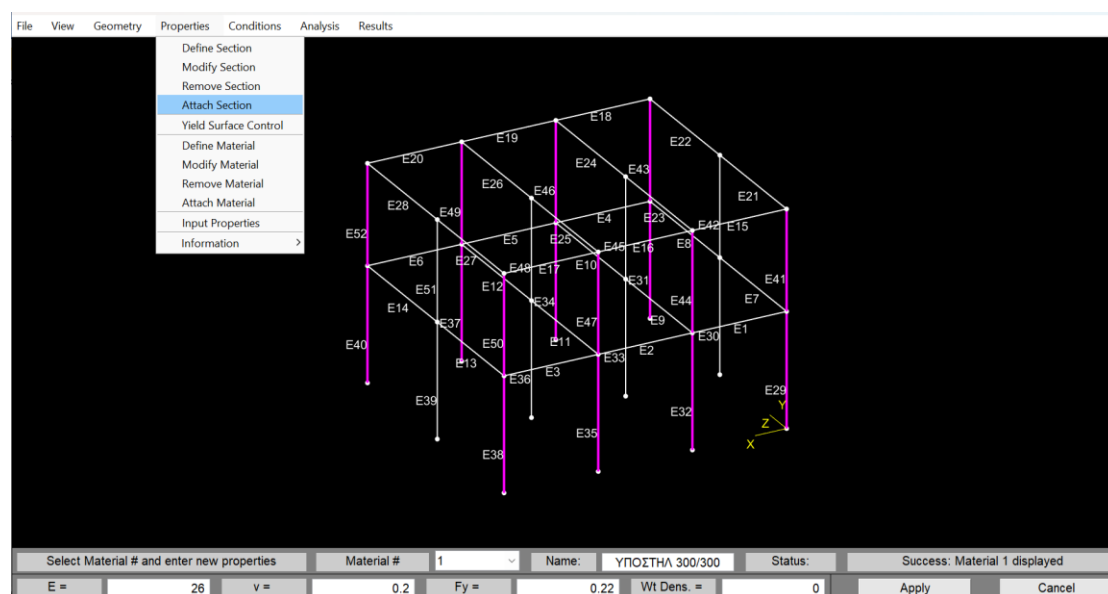
Όπου

E: Μέτρο ελαστικότητας (kN/mm^2)

ν: συντελεστής Poisson

Fy: Αντοχή διαρροής (kN/mm^2)

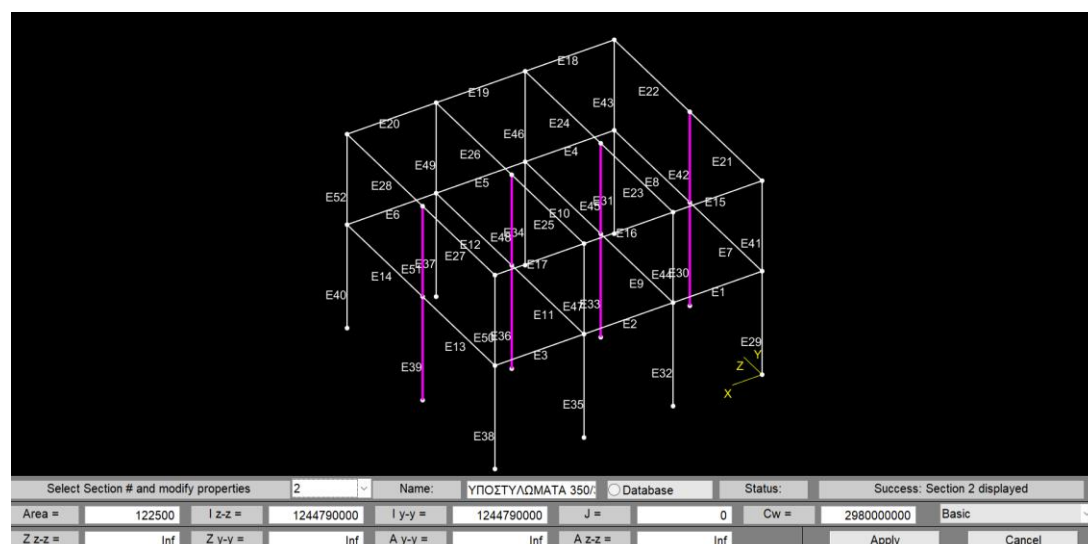
Εν τέλει μέσω της εντολής Attach Material έγινε ο τελικός ορισμός όλων των ιδιοτήτων για το συγκεκριμένο στοιχείο



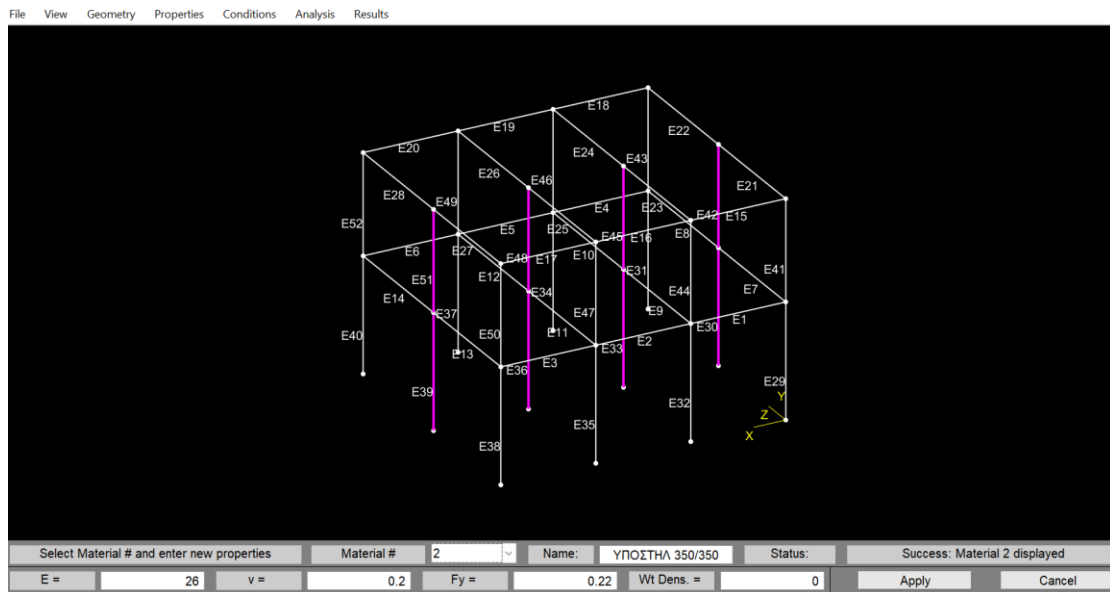
Εικόνα 25 Εντολή Attach Section

Η ίδια ακριβώς διαδικασία ακολουθήθηκε για τον ορισμό των υπόλοιπων τριών στοιχείων η οποία φαίνεται στις παρακάτω εικόνες(Εικόνες26-29).

ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ 35/35

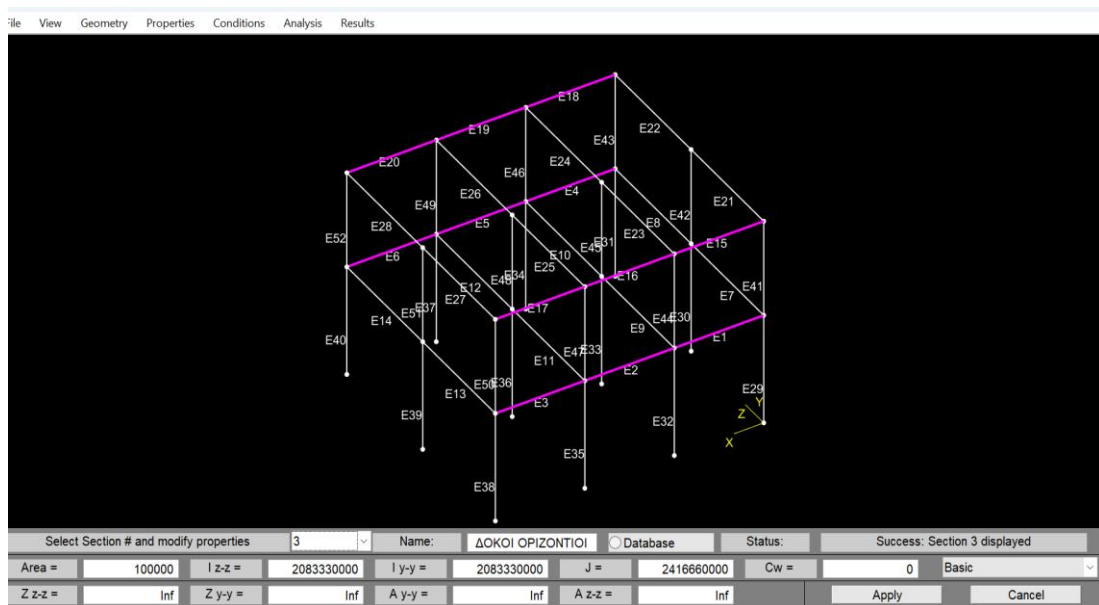


Εικόνα 26 Υποστυλώματα 35/35

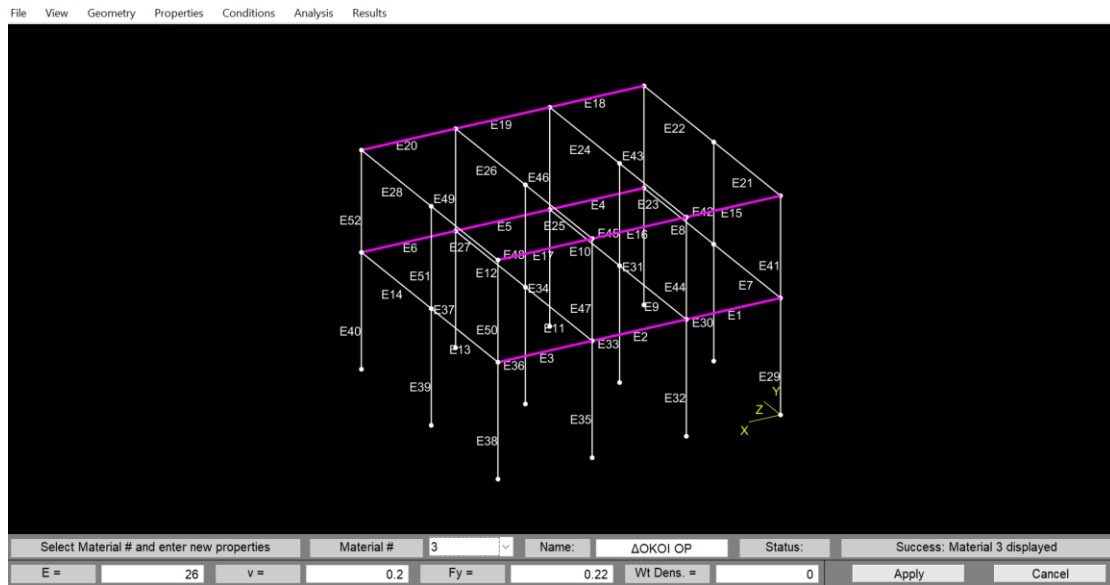


Εικόνα 27 Ορισμός Ιδιοτήτων

ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΙ ΔΟΚΟΙ 20/50

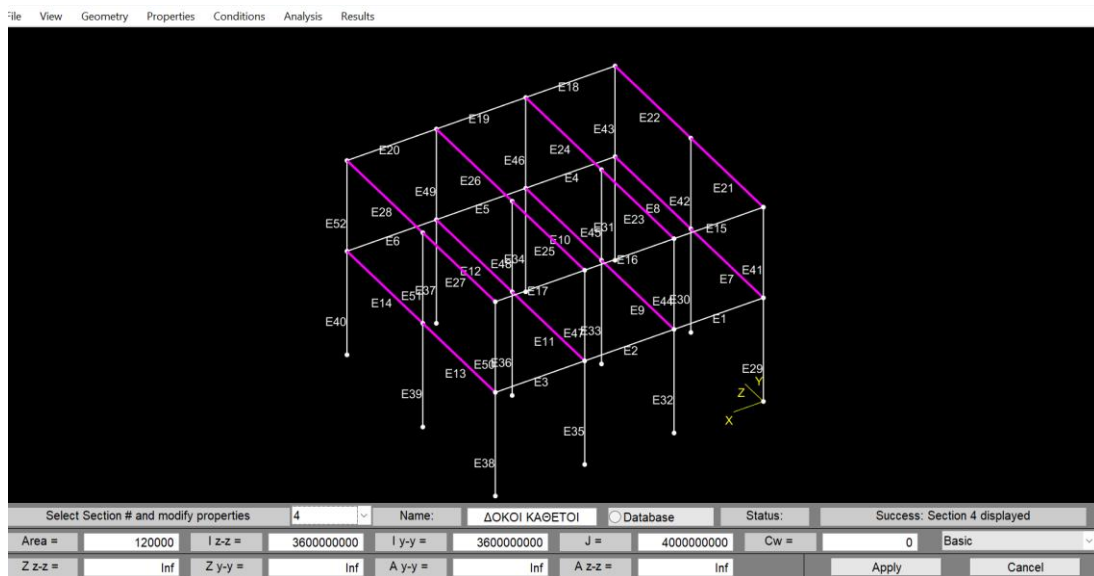


Εικόνα 28 Οριζόντιοι Δοκοί

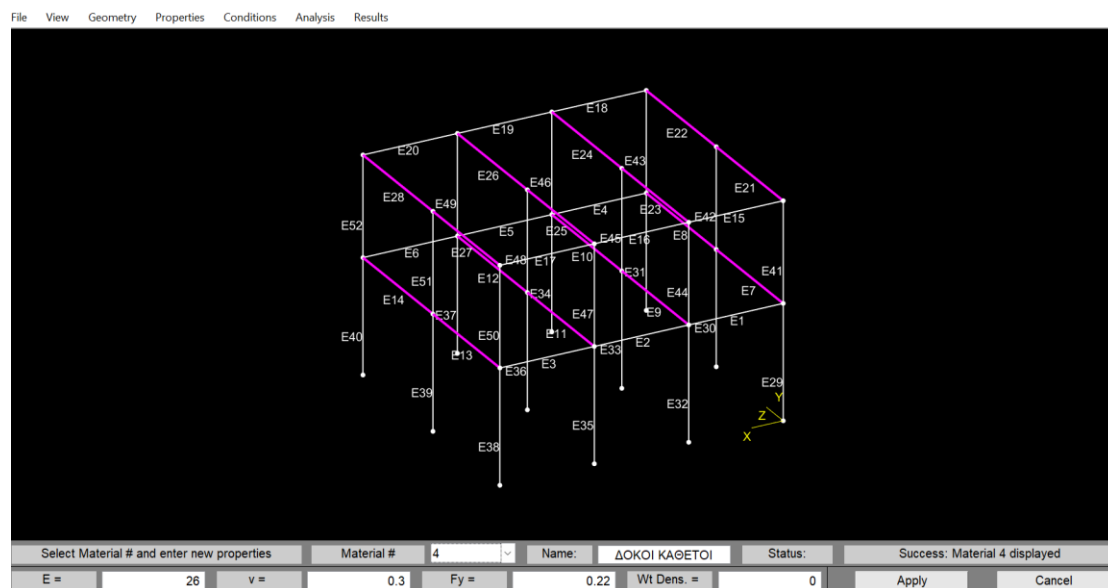


Εικόνα 29 Ορισμός Ιδιοτήτων

ΚΑΘΕΤΟΙ ΔΟΚΟΙ 20/60



Εικόνα 30 Κάθετοι Δοκοί

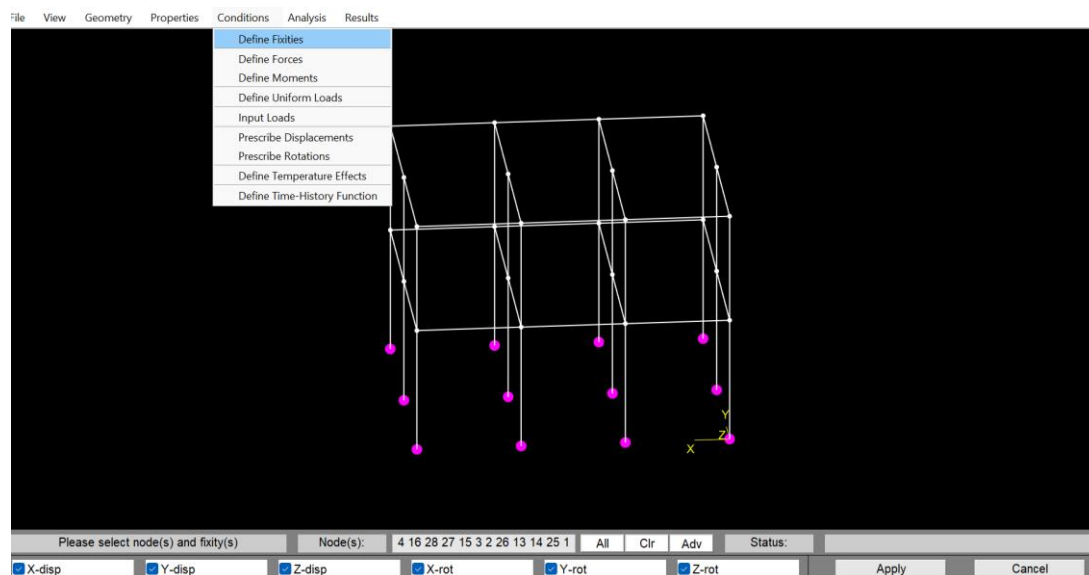


Εικόνα 31 Ορισμός Ιδιοτήτων

7.2.3 Φορτία της Κατασκευής

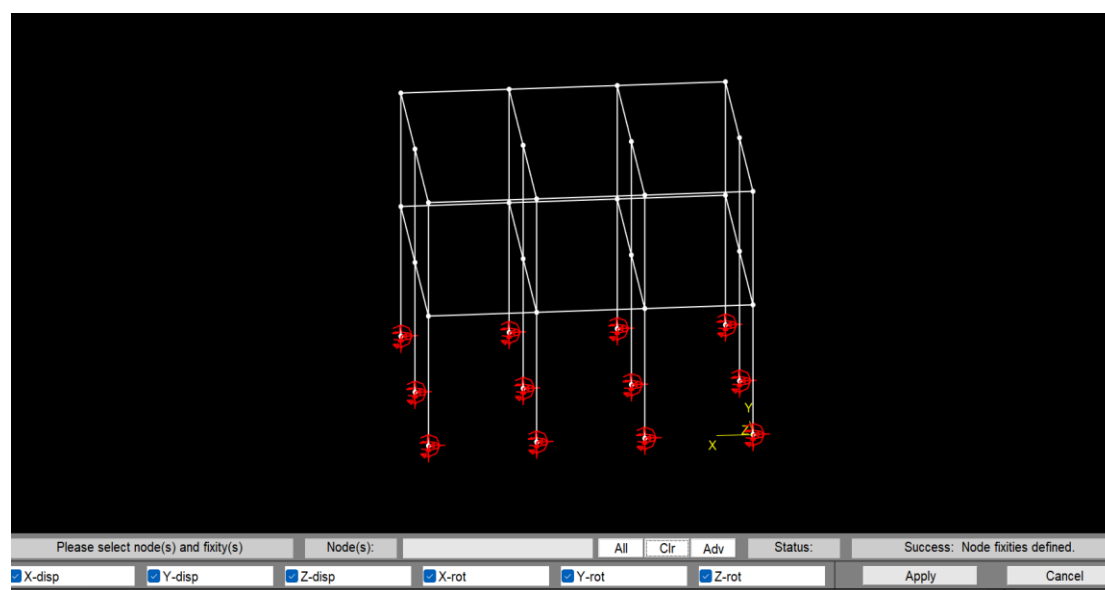
Το επόμενο βήμα ήταν οριστούν οι στηρίξεις της κατασκευής για τις οποίες έχουν επιλεχθεί πακτώσεις σε όλες τις βάσεις των υποστυλωμάτων του ισογείου.

Αυτό έγινε μέσω της εντολής Define Fixities και ορίζοντας όλους τους άξονες που υπάρχουν σταθερούς έτσι ώστε να έχουμε σταθερή θεμελίωση στην βάση της κατασκευής.



Εικόνα 32 Εντολή για την δημιουργία πακτώσεων

Πατώντας Apply εμφανίζονται όλες οι πακτώσεις (Εικόνα 33).



Εικόνα 33 Δημιουργία Πακτώσεων

Στατικά Φορτία Δοκών

Τα φορτία των δοκών προέρχονται από το ίδιο βάρος τους, από τις τοιχοποιίες και από την πλάκα. Όσον αφορά τα φορτία των πλακών και των εξωστών, κατανεμήθηκαν ως ομοιόμορφα φορτία στις δοκούς με βάσει τη μεθοδολογία των επιφανειών φόρτισης.

ΜΟΝΙΜΑ ΦΟΡΤΙΑ

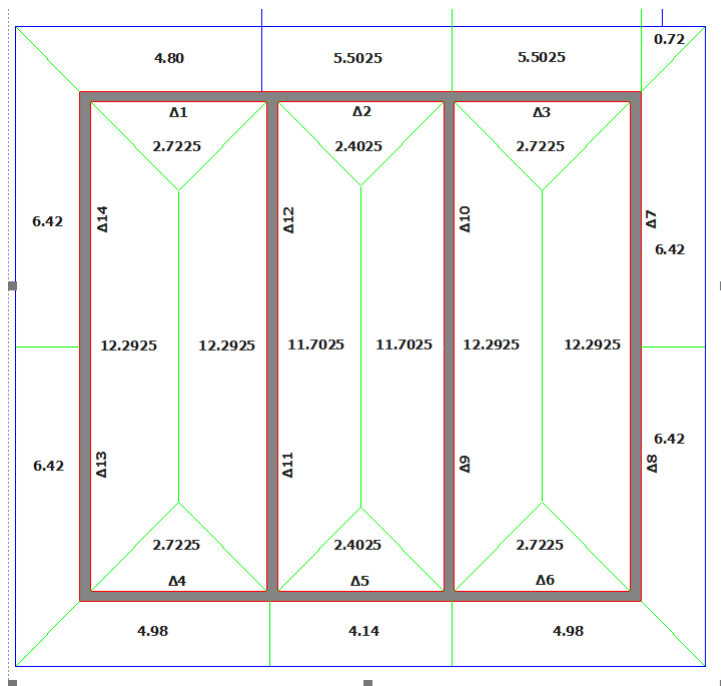
γ σκυροδέματος (kN/m ³)	24.00
g πλακών (kN/m ²)	3.36
g επικάλ (kN/m ²)	0.80
Γολικό πλακών (KN/m²)	4.16
gτοιχοποιίας (μπατική) (KN/m ²)	3.60
gτοιχοποιίας (δρομική) (KN/m ²)	2.10

Πίνακας Μόνιμων Φορτίων

ΚΙΝΗΤΑ ΦΟΡΤΙΑ

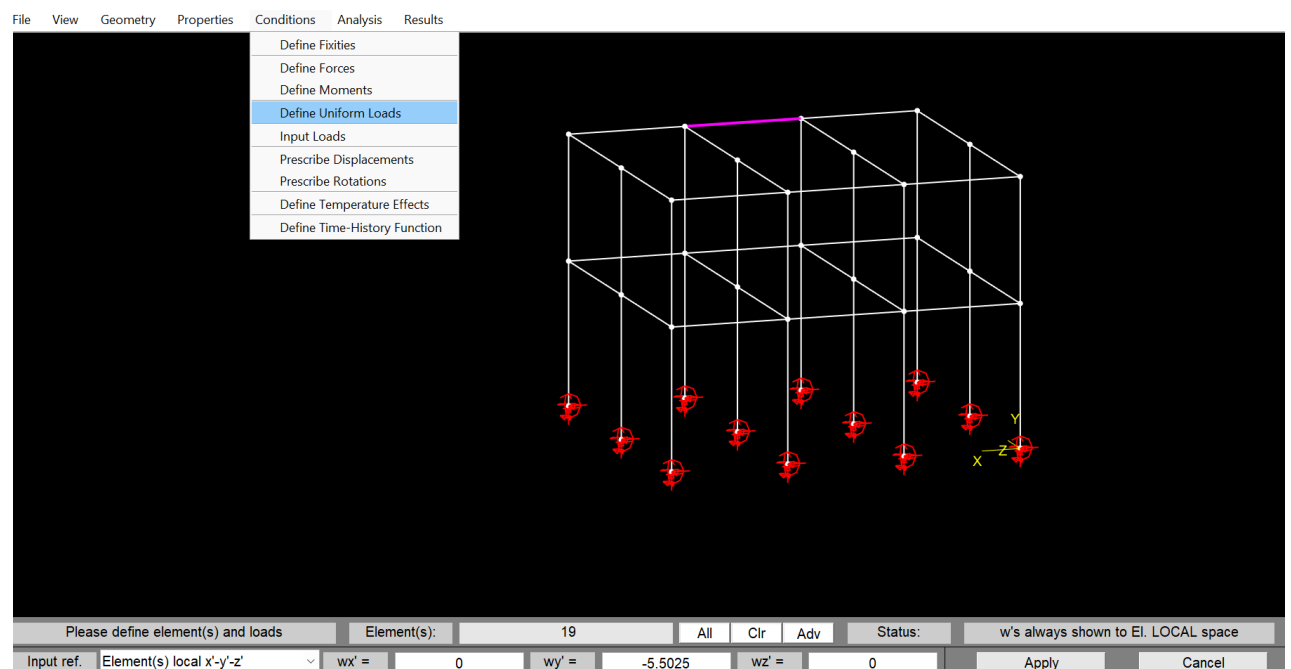
γ πλακών (kN/m ²)	2.00
q εξωστών (kN/m ²)	5.00
Γολικό πλακών (kN/m²)	7.00
ύψος πλακών (m)	0.14
ύψος Α' ορόφου (m)	3.50
ύψος Ισογείου (m)	4.00

Πίνακας Κινητών Φορτίων



Εικόνα 34 Επιφάνειες Επιρροής για τον υπολογισμό των φορτίων των δοκών

Τα φορτία της παραπάνω εικόνας (Εικόνα 35) έχουν τοποθετηθεί πάνω στις δοκούς μέσω της εντολής Uniform Loads του προγράμματος όπως φαίνεται παρακάτω

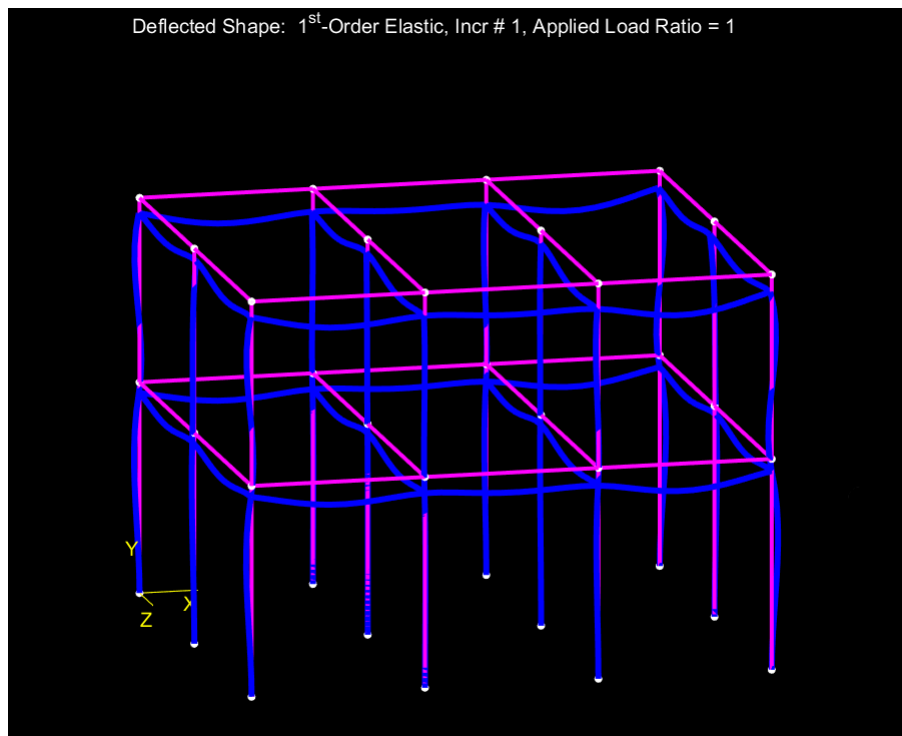


Εικόνα 35 Προσθήκη στατικών φορτίων στην κατασκευή

8. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1 Αποτελέσματα ελαστικής ανάλυσης πρώτης τάξης

Τα παρακάτω διαγράμματα προέκυψαν από την ελαστική ανάλυση πρώτης τάξης έχοντας ως φορτία στην κατασκευή μόνο τα στατικά φορτία του κτιρίου τα οποία έχουν υπολογιστεί παραπάνω (Εικόνα 35).



Εικόνα 36 Παραμορφωμένο Σχήμα

Η παραμορφωμένη μορφή της κατασκευής από την ανάλυση πρώτης τάξης δείχνει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τις παραμορφώσεις, την κατανομή των φορτίων, την στατική επάρκεια και την συμπεριφορά των συνδέσεων

Όλες οι τιμές των οριζόντιων μετατοπίσεων είναι πολύ μικρές.

Node:	8	Disp X	-0.002749
-------	---	--------	-----------

Εικόνα 37 Οριζόντια μετατόπιση κόμβου 8

Node:	7	Disp X	-0.007251
-------	---	--------	-----------

Εικόνα 38 Οριζόντια μετατόπιση κόμβου 7

Node:	6	Disp X	-0.0103
-------	---	--------	---------

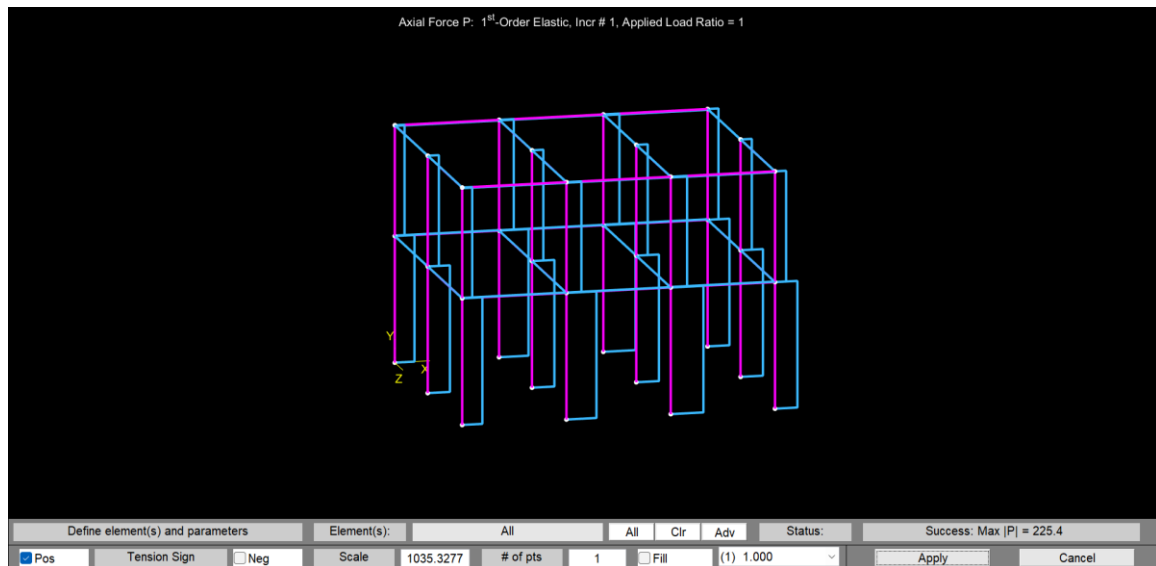
Εικόνα 39 Οριζόντια μετατόπιση κόμβου 6

Node:	5	Disp X	-0.01398
-------	---	--------	----------

Εικόνα 40 Οριζόντια μετατόπιση κόμβου 5

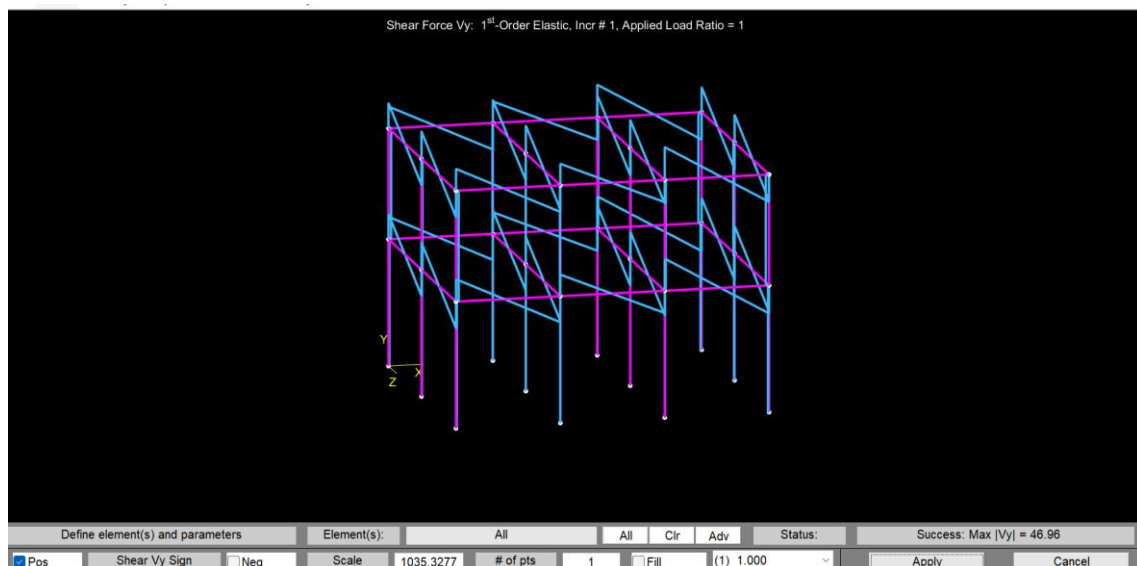
Οι παραπάνω μετατοπίσεις(εικόνες 37-40) είναι μετρημένες σε χιλιοστά (mm)

Όλες οι τιμές είναι αυτής της κλίμακας και στους υπόλοιπους κόμβους της κατασκευή άρα δεν προκύπτουν οριζόντιες



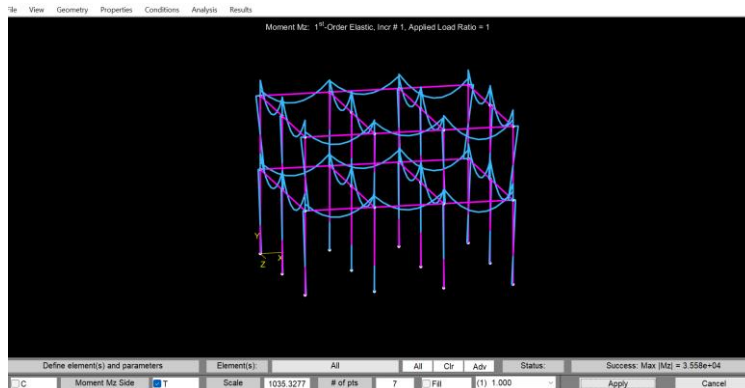
Εικόνα 41 Αξονικές Δυνάμεις

Το διάγραμμα παρουσιάζει τις αξονικές δυνάμεις που ασκούνται στα υποστυλώματα. Από αυτό μπορούμε να παρατηρήσουμε τη ανάπτυξη των αξονικών δυνάμεων κατά μήκος των υποστυλωμάτων, όπου τα κατώτερα υποστυλώματα δέχονται μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις λόγω της συγκέντρωσης φορτίων από τους πάνω ορόφους.

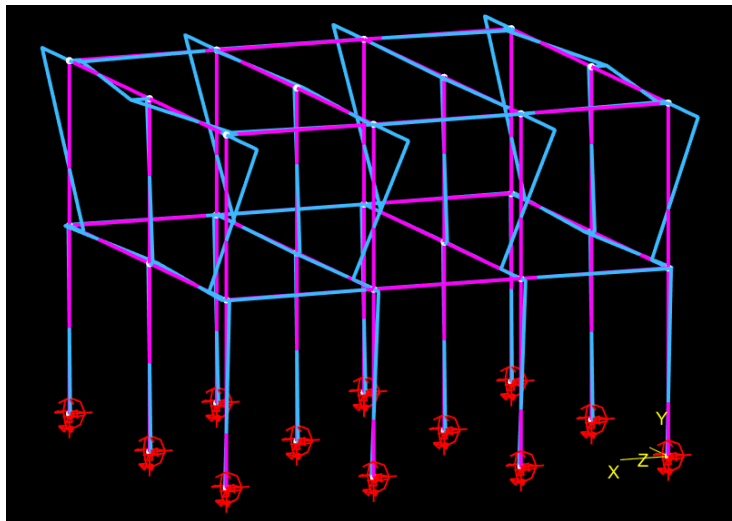


Εικόνα 42 Διατμητικές Δυνάμεις

Το διάγραμμα δίνει τη κατανομή των διατμητικών δυνάμεων σε όλη την κατασκευή, επιτρέποντας τον εντοπισμό των θέσεων με υπέρβαση της διατμητικής αντοχής των στοιχείων.



Εικόνα 43 Διάγραμμα Ροπών Δοκών

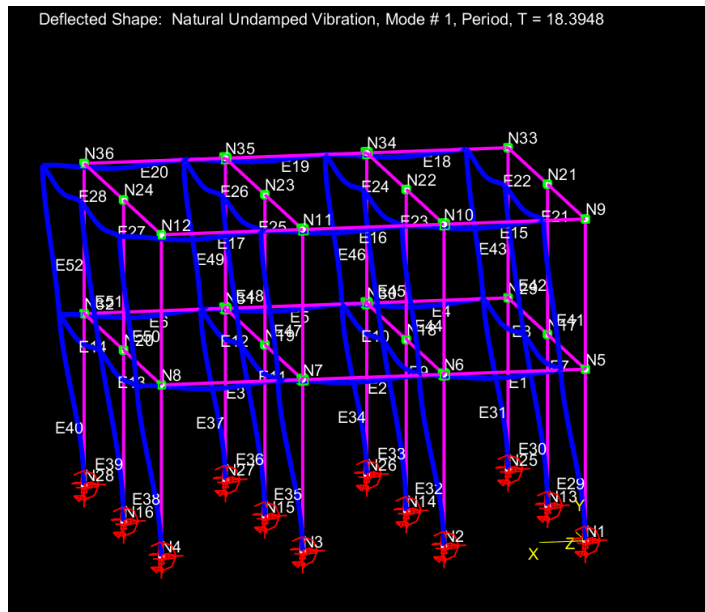


Εικόνα 44 Διάγραμμα ροπών υποστυλωμάτων

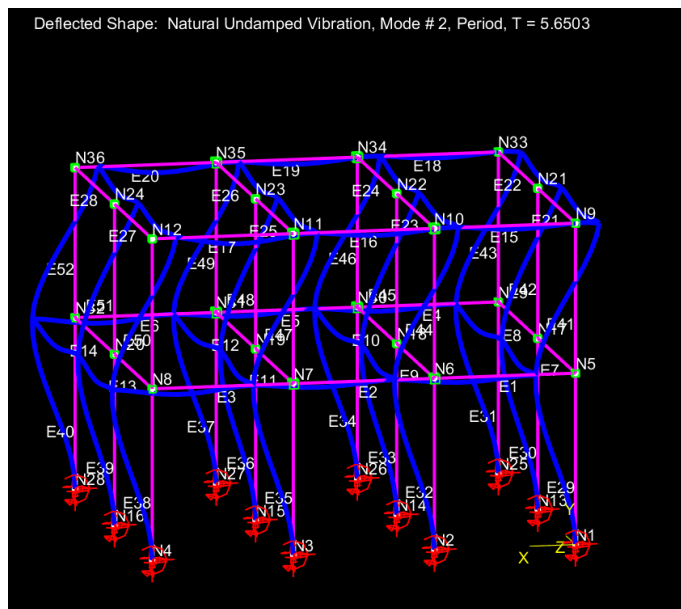
Οι ροπές κάμψης παρουσιάζουν τις μέγιστες τιμές τους στα άκρα των δοκών, κοντά στα σημεία στήριξης(κόμβοι δοκών- υποστυλωμάτων) και στο μέσον του ανοίγματος, όπου το δομικό στοιχείο υπόκειται σε υψηλές καταπονήσεις λόγω της εφαρμογής εξωτερικών φορτίων. Αυτό είναι σύμφωνο με τις αρχές της στατικής ανάλυσης, όπου τα άκρα των δοκών τυπικά δέχονται τις μεγαλύτερες στιγμές κάμψης. Τα σημεία με υψηλές ροπές απαιτούν προσεκτική ενίσχυση, ειδικά στους κόμβους.

8.2 Διαγράμματα Ιδιομορφών

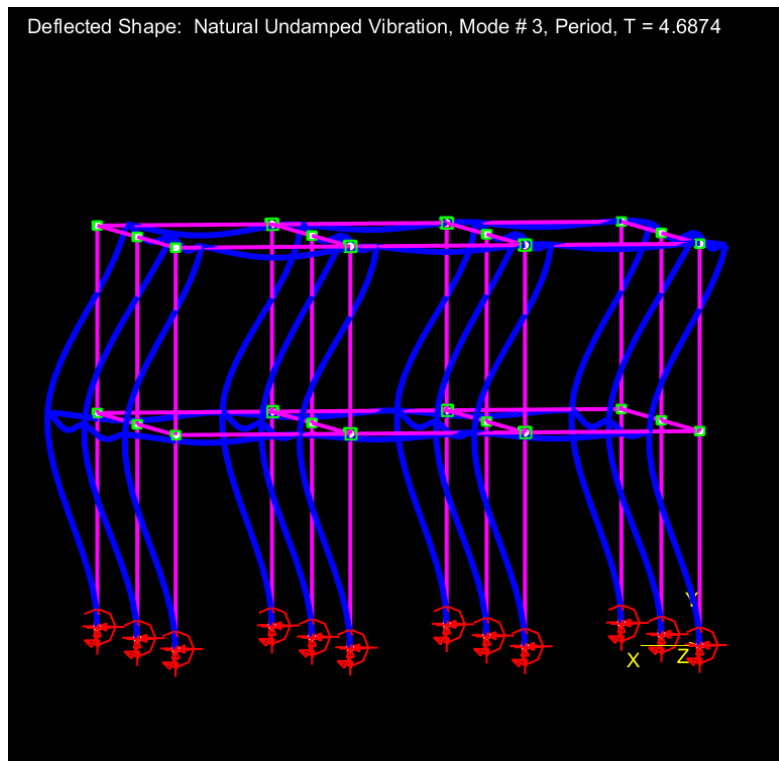
Παρακάτω έχουν αποτυπωθεί τα 10 πρώτα διαγράμματα ιδιομορφής της κατασκευής στις αντίστοιχες περιόδους



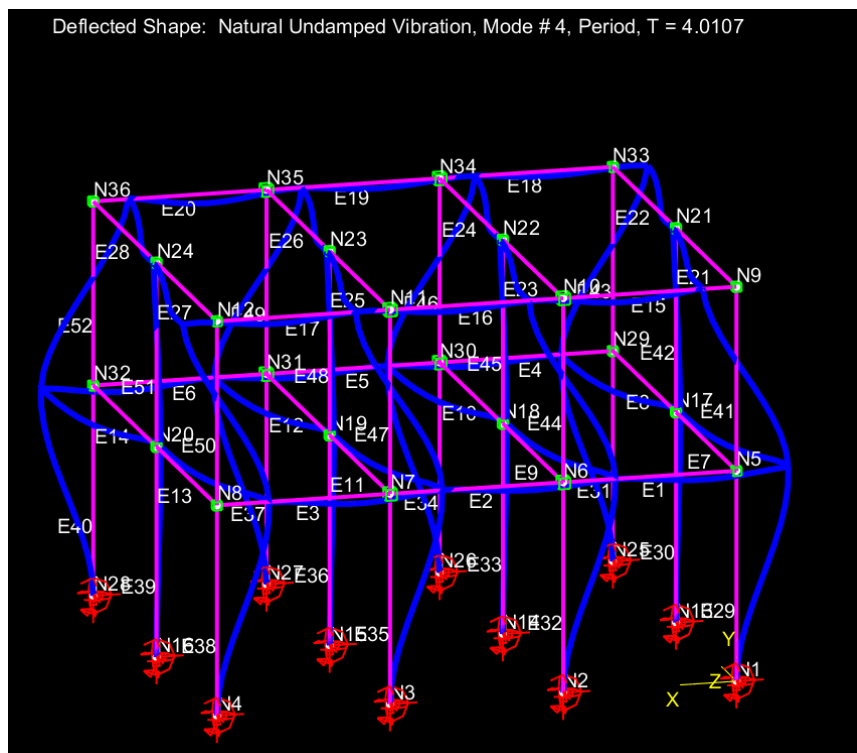
Εικόνα 45 Διάγραμμα Ιδιομορφής σε περίοδο $T=18.3948\text{sec}$



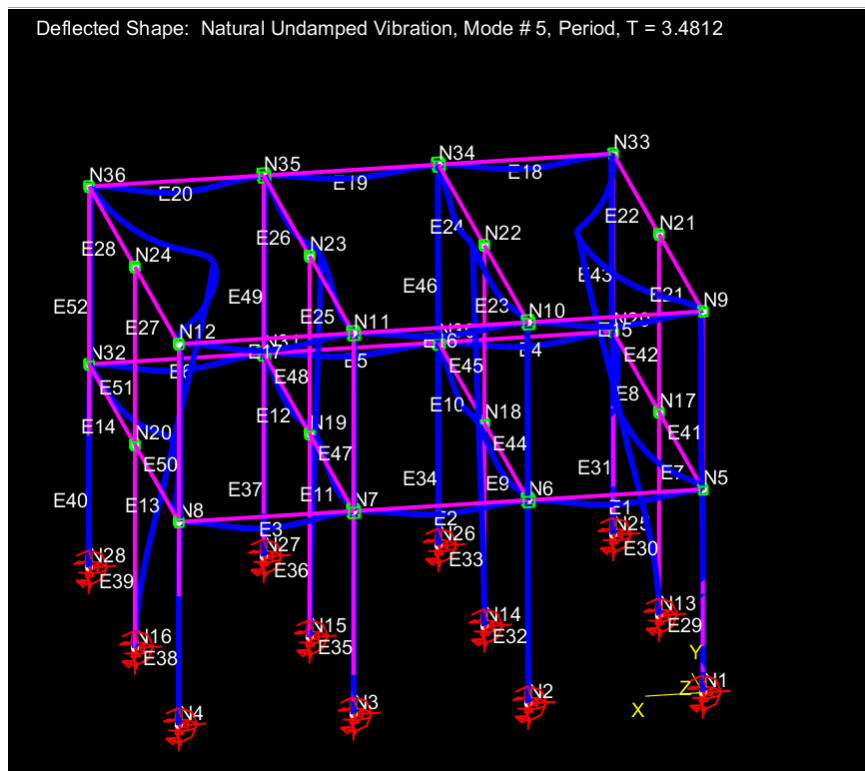
Εικόνα 46 Διάγραμμα Ιδιομορφής σε περίοδο $T=5.6503\text{sec}$



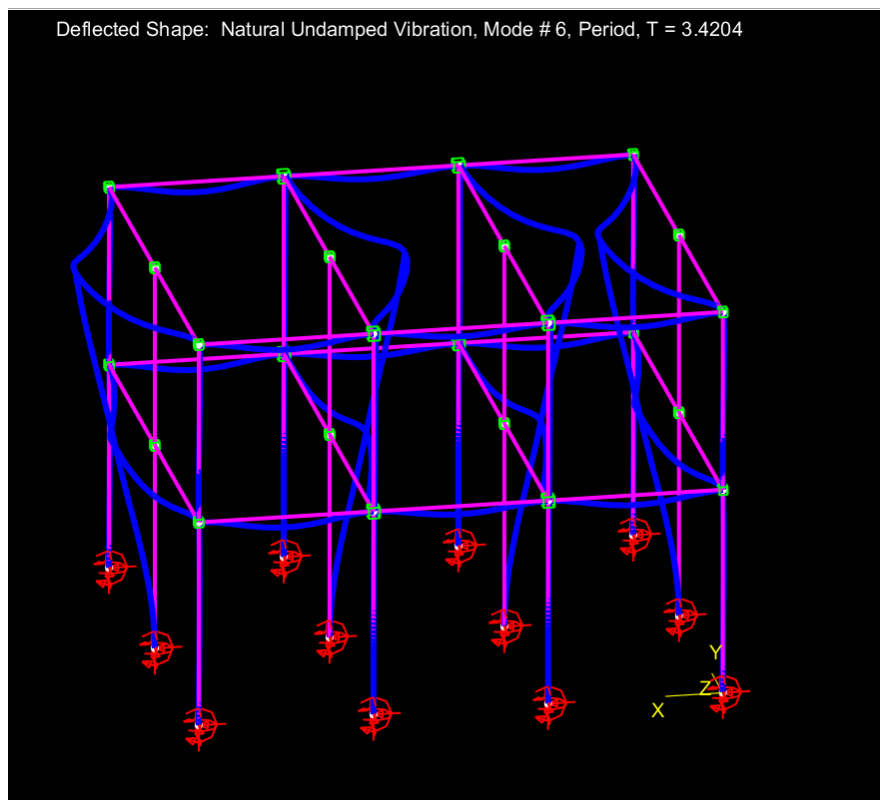
Εικόνα 47 Διάγραμμα Ιδιομορφής σε περίοδο $T=4.6874\text{sec}$



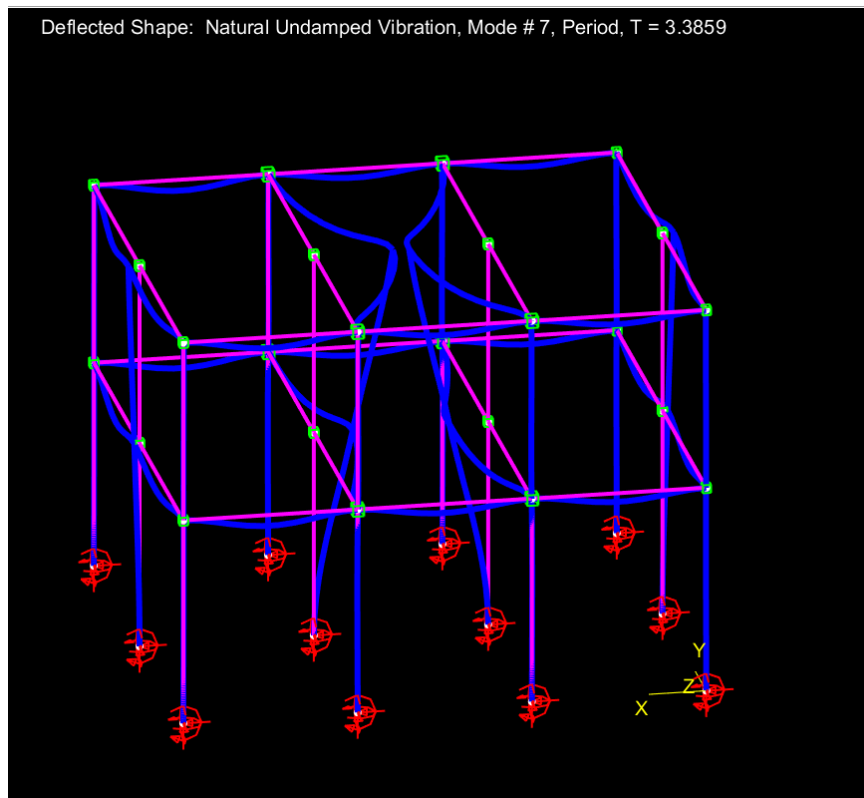
Εικόνα 48 Διάγραμμα Ιδιομορφής σε περίοδο $T=4.0107\text{sec}$



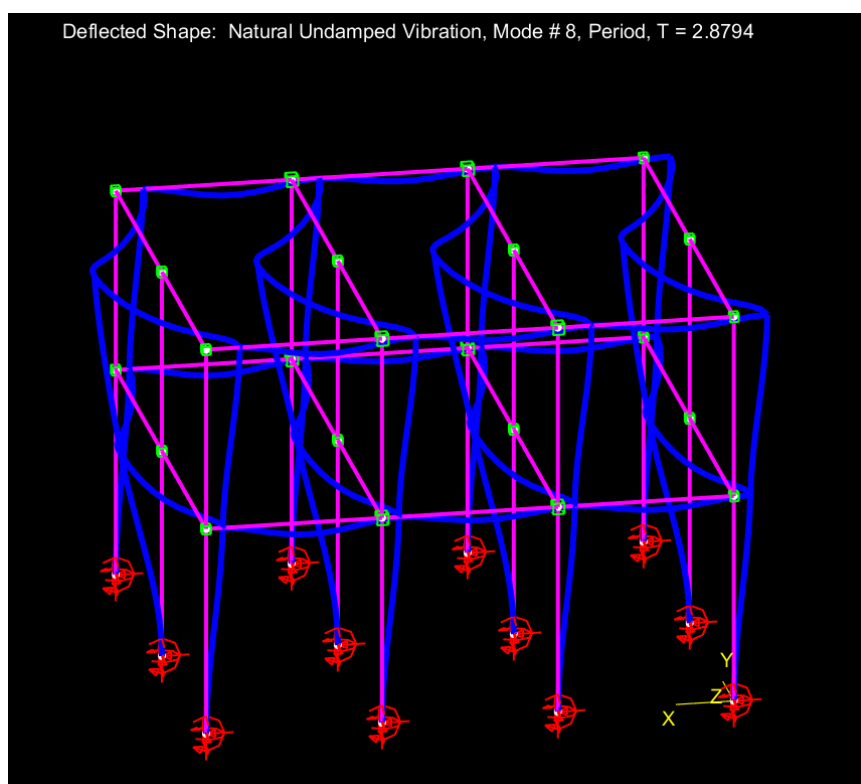
Εικόνα 49 Διάγραμμα Ιδιομορφής σε περίοδο $T=3.4812\text{sec}$



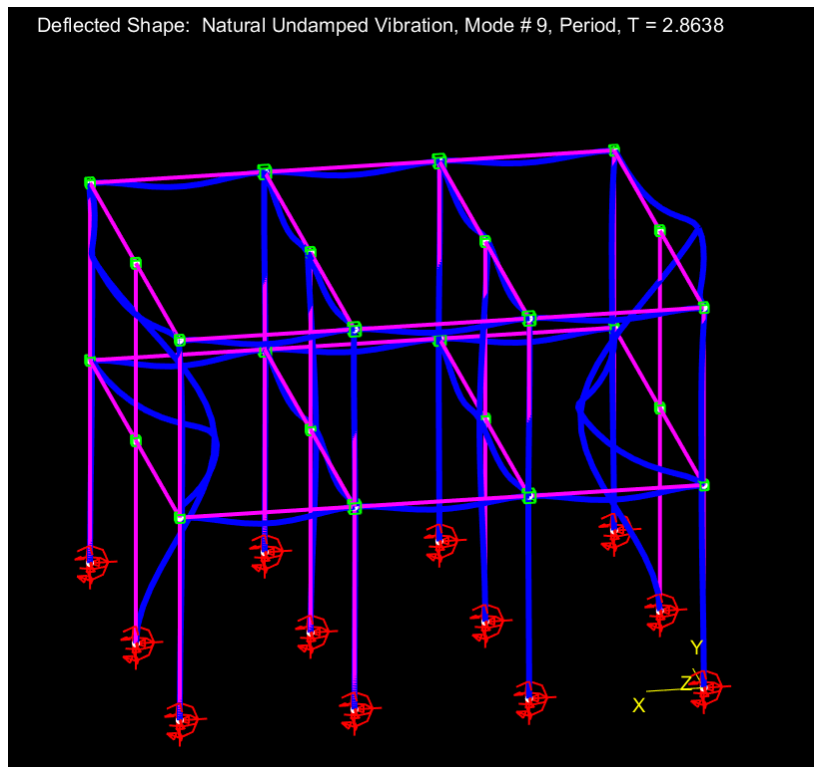
Εικόνα 50 Διάγραμμα Ιδιομορφής σε περίοδο $T=3.4204\text{sec}$



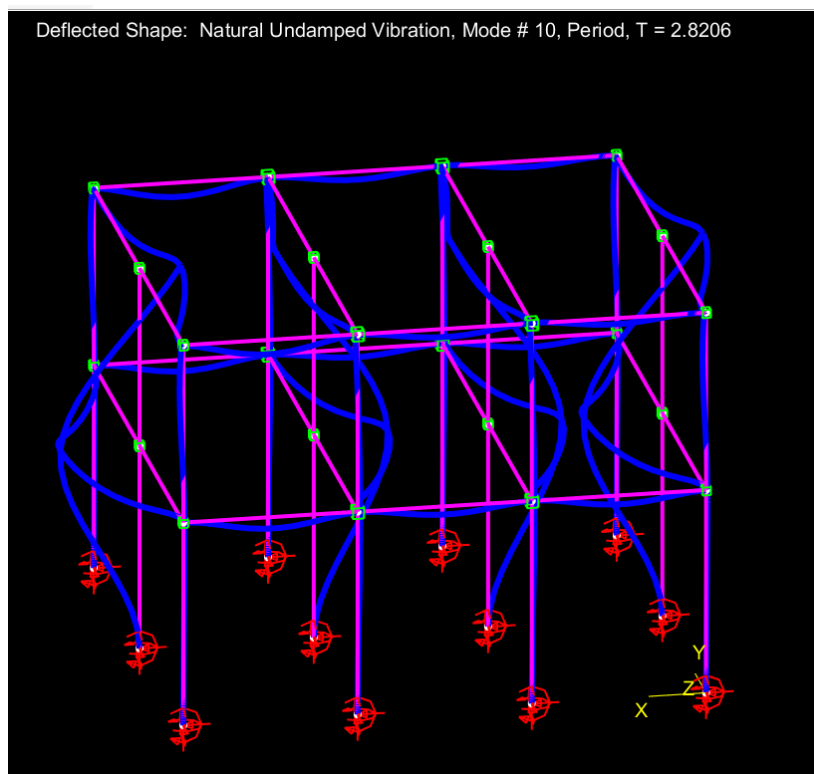
Εικόνα 51 Διάγραμμα Ιδιομορφής σε περίοδο $T=3.3859\text{sec}$



Εικόνα 52 Διάγραμμα Ιδιομορφής σε περίοδο $T=2.8794\text{sec}$



Εικόνα 53 Διάγραμμα Ιδιομορφής σε περίοδο $T=2.8638\text{sec}$



Εικόνα 54 Διάγραμμα Ιδιομορφής σε περίοδο $T=2.8206\text{sec}$

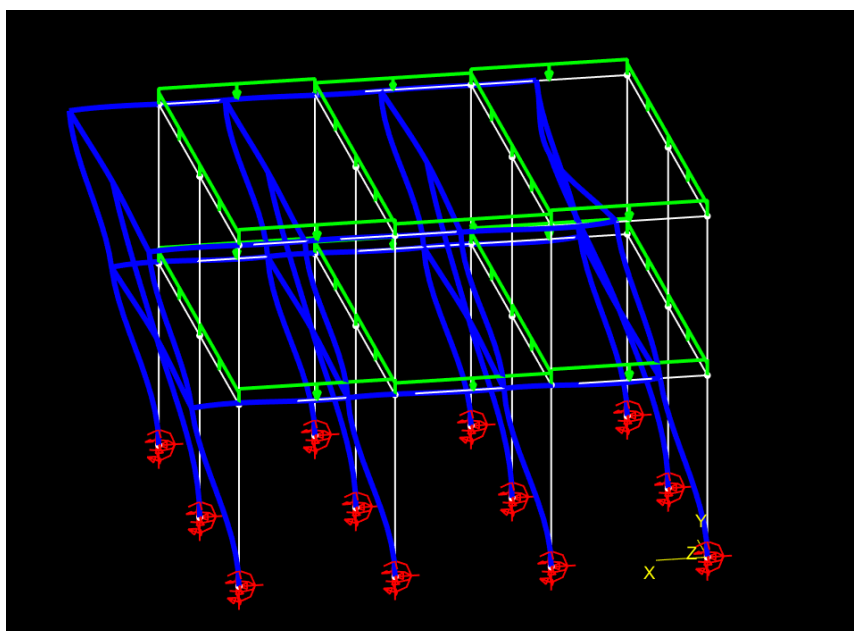
Κάθε διάγραμμα ιδιομορφής απεικονίζει τον τρόπο με τον οποίο το κτίριο ταλαντώνεται σε διαφορετικές περιόδους/συχνότητες. Οι πρώτες ιδιομορφές αντιστοιχούν στις βασικές μορφές ταλάντωσης, οι οποίες συχνά σχετίζονται με τις μεγαλύτερες παραμορφώσεις και δυναμικές αποκρίσεις. Η ανάλυση των ιδιομορφών επιτρέπει τον εντοπισμό των πιο ευαίσθητων περιοχών της κατασκευής, δηλαδή των τμημάτων που υπόκεινται σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις και συνεπώς είναι πιο επιρρεπή σε βλάβες κατά τη διάρκεια σεισμού. Με βάση τα διαγράμματα αυτά, θα καθοριστούν οι περιοχές όπου απαιτείται επιπλέον διερεύνηση για να βελτιωθεί η απόκριση της κατασκευής.

8.3 Ανελαστική Ανάλυση

8.3.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Χ'-Χ

Σε αυτή την ανάλυση εφαρμόστηκε σταδιακά οριζόντιο φορτίο στην κατασκευή δηλαδή κατά τον άξονα $x-x'$ και στην κορυφή του έτσι ώστε να διαπιστωθεί η έναρξη εμφάνισης των πρώτων πλαστικών αρθρώσεων, τότε εμφανίζονται οι πρώτες πλαστικές αρθρώσεις στην βάση της κατασκευής (πακτώσεις) καθώς και τότε εμφανίζονται πλαστικές αρθρώσεις σε όλη την κατασκευή.

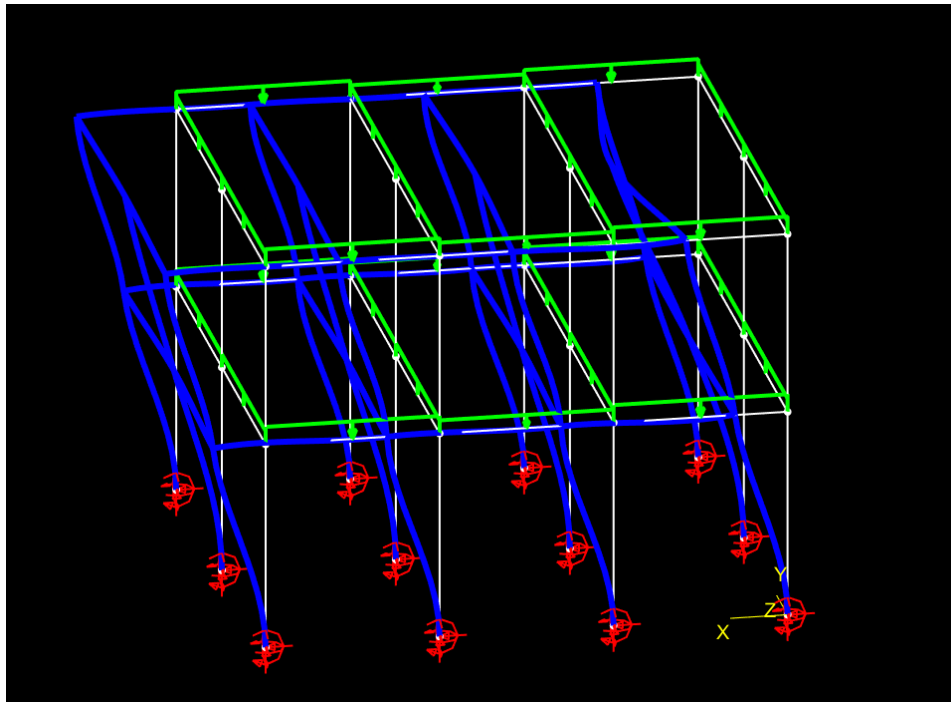
Αρχικά έγινε εφαρμογή φορτίου $P_X=1000$ kN στην κορυφή του κτιρίου οριζόντια όπως φαίνεται παρακάτω



Εικόνα 55 Ανελαστική Ανάλυση 1000 kN

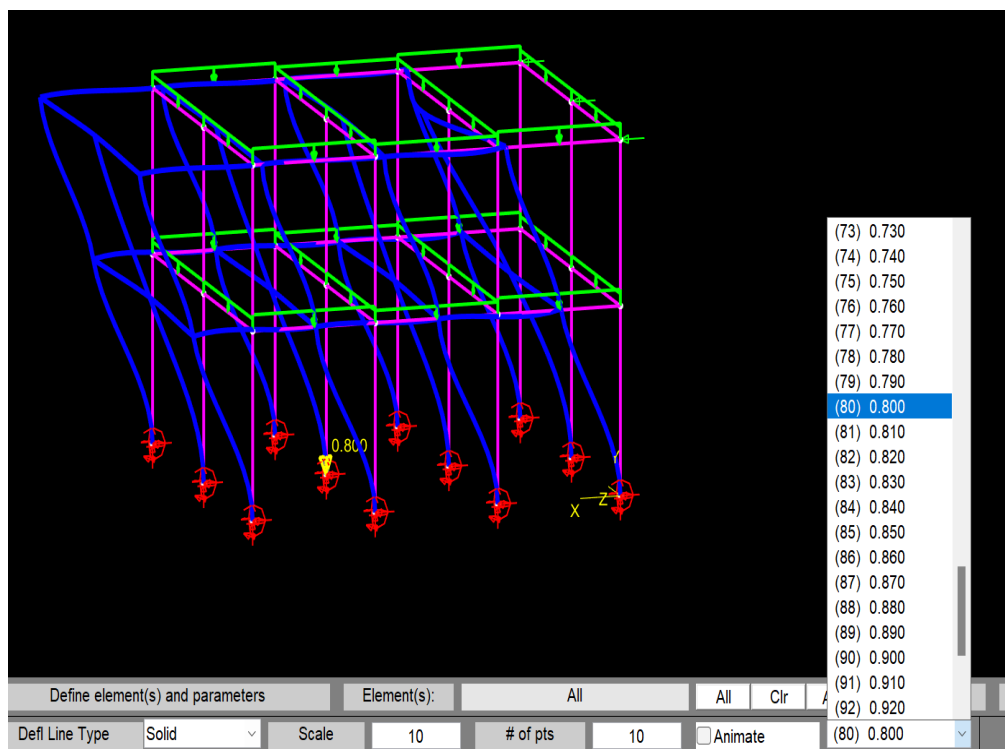
Τα πράσινα φορτία είναι τα ήδη υπάρχοντα στατικά φορτία του κτιρίου που έχουν υπολογιστεί και εισαχθεί παραπάνω(Εικόνα 35)

Αποτελέσματα Πρώτης Τάξης Ανελαστικής Ανάλυσης



Εικόνα 56 Αποτέλεσμα ανελαστικής ανάλυσης 1000kN

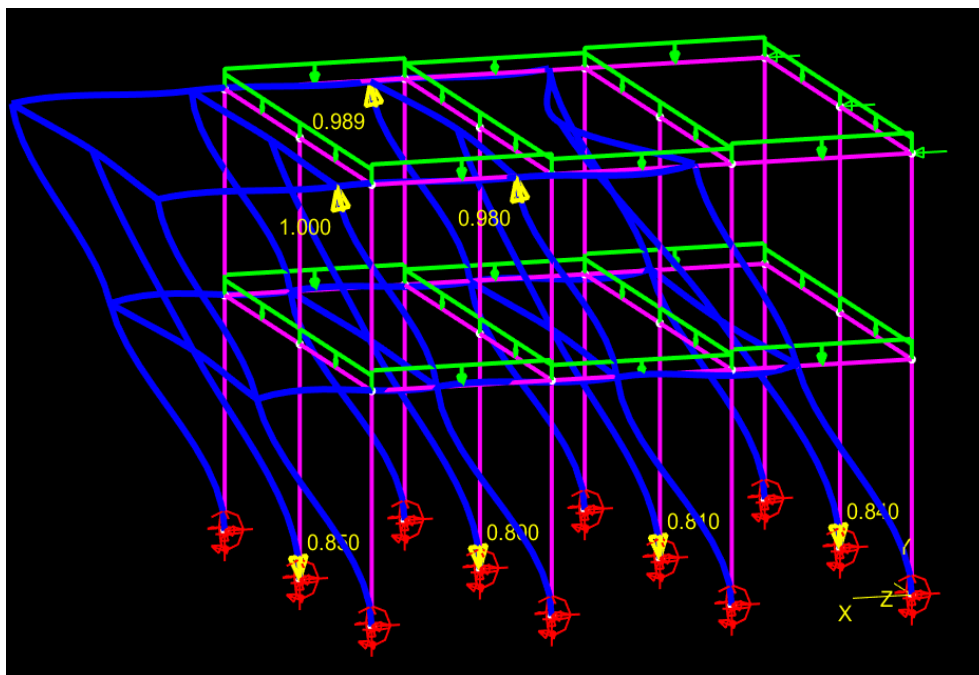
Όπως φαίνεται δεν έχουν δημιουργηθεί αρχικά πλαστικές αρθρώσεις
Αυξάνω το φορτίο σε 2000 kN και προκύπτει



Εικόνα 57 Εμφάνιση πρώτης πλαστικής άρθρωσης

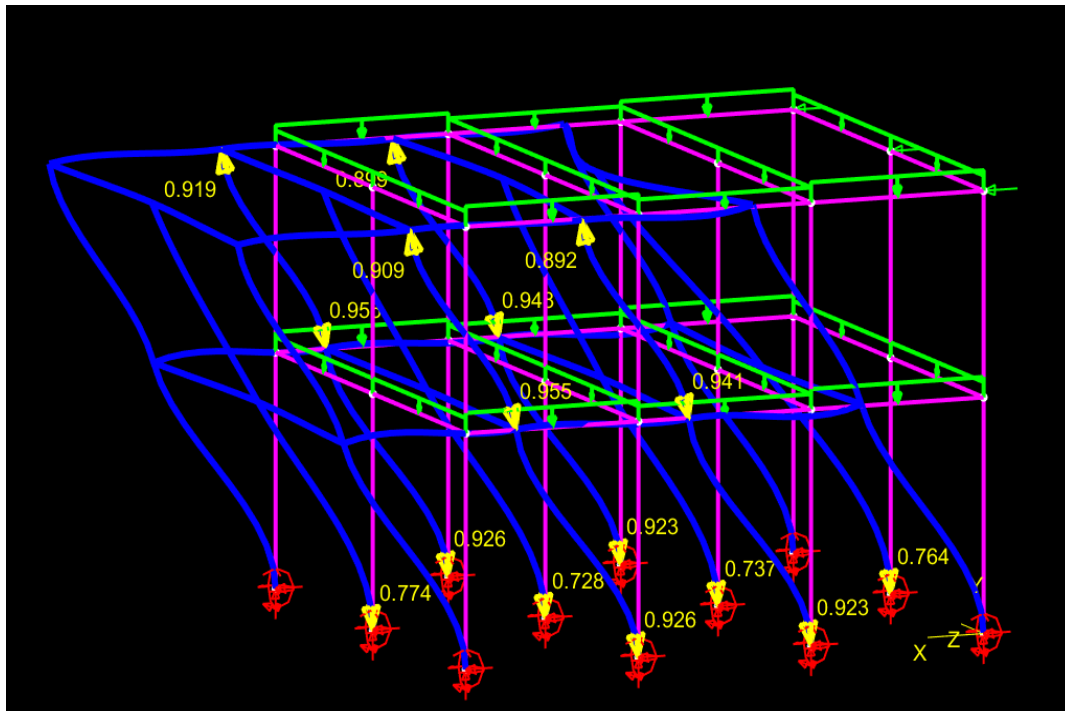
Σε αυτό το σημείο φαίνεται να εμφανίζεται η πρώτη πλαστική άρθρωση στην κατασκευή η οποία είναι και στην βάση της.

Η ανάλυση συνεχίζεται και καταλήγει σε διάγραμμα όπου εμφανίζονται και άλλες πλαστικές αρθρώσεις όπως φαίνεται παρακάτω(Εικόνα 59).



Εικόνα 58 Ολοκλήρωση ανελαστικής ανάλυσης 2000κΝ

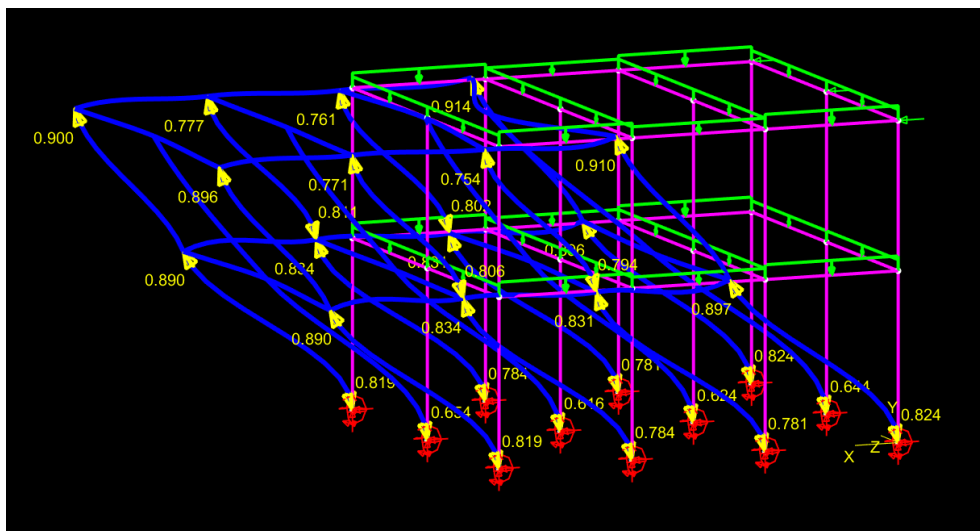
Αύξηση ξανά του φορτίου σε 2200 kN



Εικόνα 59 Ανελαστική Ανάλυση 2200 kN

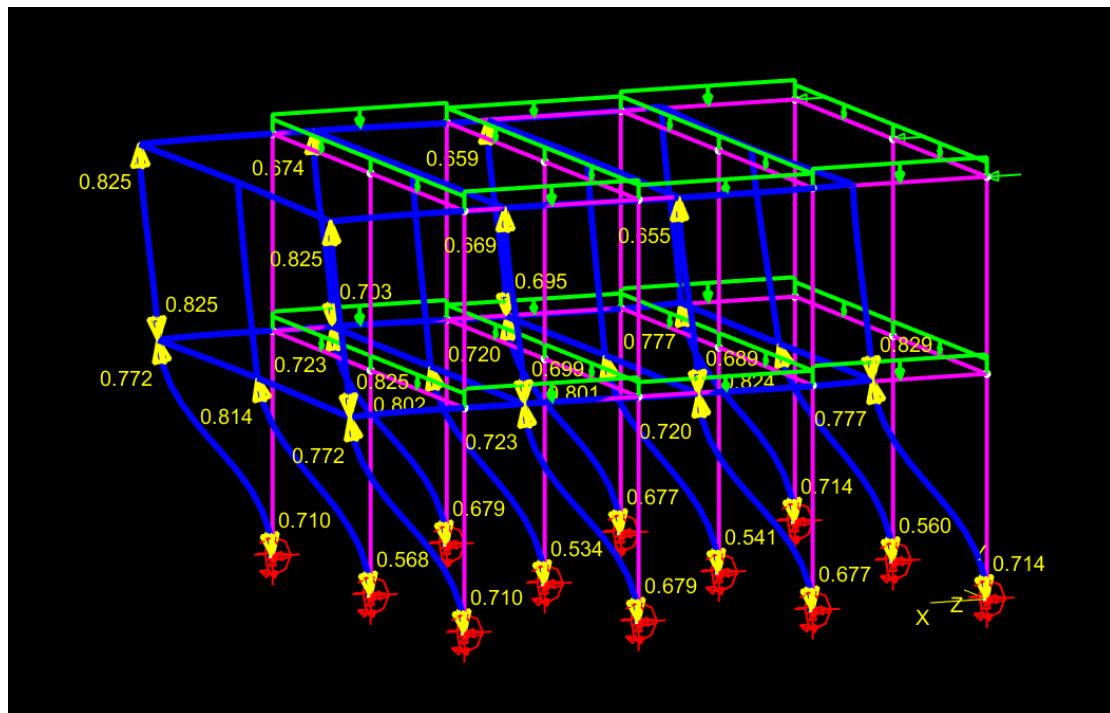
Αρχίζουν και εμφανίζονται πλαστικές αρθρώσεις σε αρκετά σημεία της κατασκευής.

Αύξηση σε 2600kN



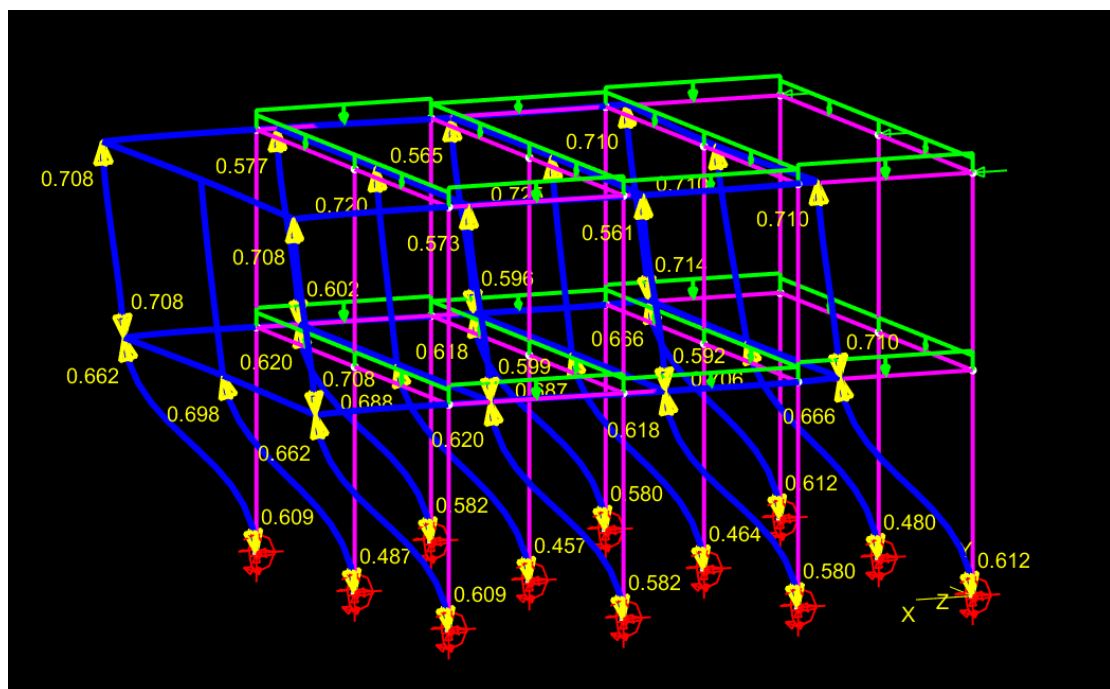
Εικόνα 60 Ανελαστική Ανάλυση 2600kN

Αύξηση του φορτίου σε 3000 kN



Εικόνα 61 Ανελαστική Ανάλυση 3000 kN

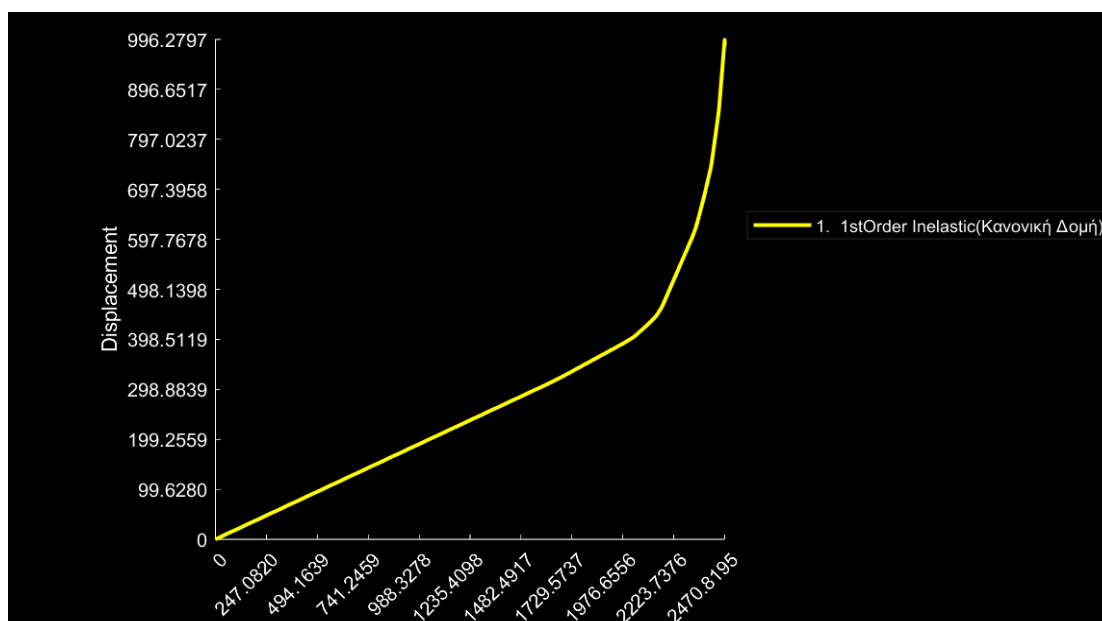
Αύξηση σε 3500kN



Εικόνα 62 Ανελαστική Ανάλυση 3500 kN

Στην τελευταία Εικόνα (Εικόνα 64) φαίνεται η απόκριση της κατασκευής υπό φορτίο των 5000 kN. Καθώς το φορτίο αυξάνεται, οι πλαστικές αρθρώσεις αρχίζουν να εμφανίζονται, καταδεικνύοντας τα σημεία όπου το υλικό εισέρχεται στη φάση της πλαστικής παραμόρφωσης. Αυτή η διαδικασία είναι σημαντική για την αξιολόγηση της συνολικής αντοχής και της πλαστιμότητας του κτιρίου, διότι επιτρέπει την κατανόηση του πώς η κατασκευή θα συμπεριφερθεί υπό υψηλά φορτία και ποια είναι τα όρια αντοχής της πριν φτάσει σε κατάσταση αστοχίας ή κατάρρευσης.

Διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης



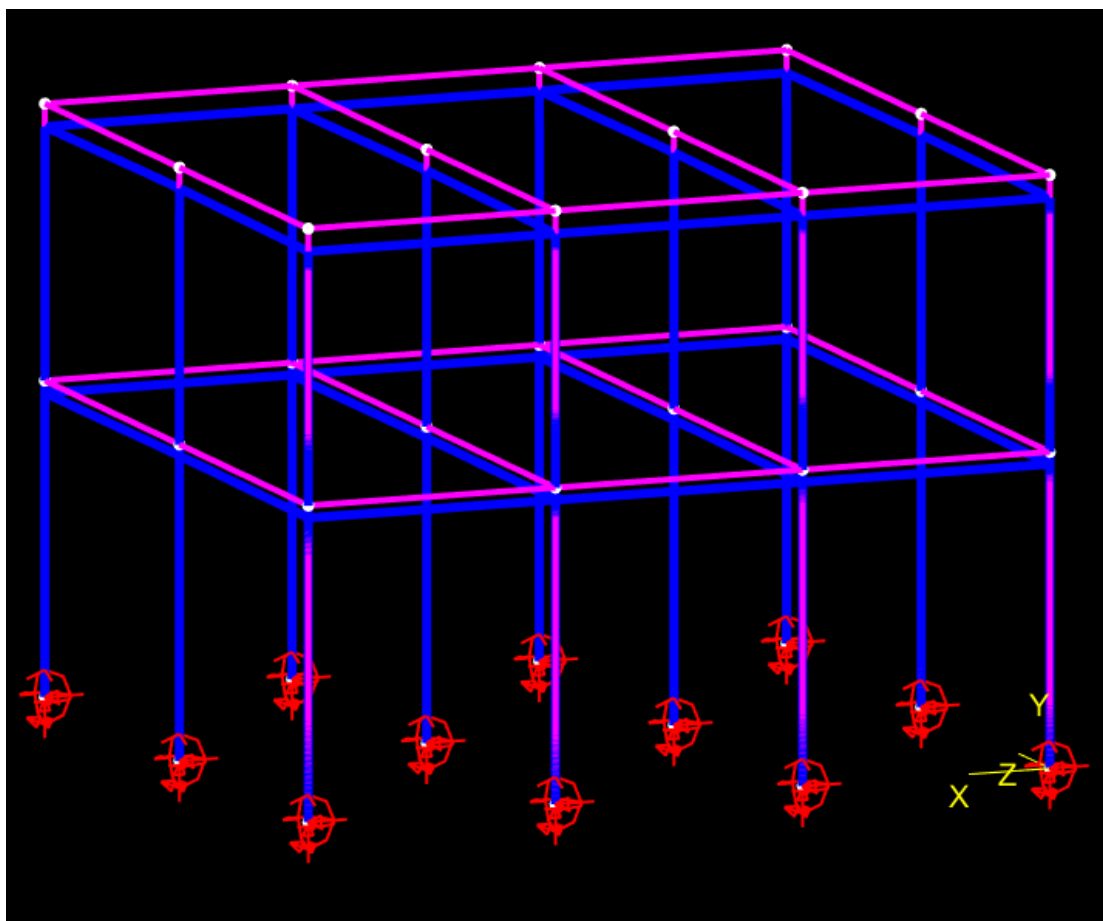
Εικόνα 64 Διάγραμμα Δύναμης Μετατόπισης(Applied Force (kN) – Displacement (mm))

Όπως φαίνεται στην παραπάνω Εικόνα, αρχικά η κατασκευή παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά, όπου η μετατόπιση αυξάνεται αναλογικά με την αύξηση της δύναμης. Αυτή η γραμμική περιοχή αντιπροσωπεύει την ελαστική φάση της κατασκευής, όπου οι παραμορφώσεις είναι αναστρέψιμες. Καθώς η εφαρμοζόμενη δύναμη αυξάνεται, το διάγραμμα αρχίζει να παρουσιάζει μια καμπύλη τάση, υποδεικνύοντας την είσοδο της κατασκευής σε ανελαστική συμπεριφορά. Στην περιοχή αυτή, οι παραμορφώσεις δεν είναι πλέον αναστρέψιμες, και η κατασκευή αναπτύσσει πλαστικές αρθρώσεις, όπως φαίνεται και στις προηγούμενες αναλύσεις. Η απότομη αύξηση της κλίσης του διαγράμματος προς το τέλος δείχνει την προοδευτική αστοχία της κατασκευής, καθώς η δομή χάνει την ακαμψία της και δεν μπορεί πλέον να αντέξει περαιτέρω αυξήσεις της δύναμης χωρίς σημαντική αύξηση της μετατόπισης.

8.3.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΘΕΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΤΟΝ ΑΞΟΝΑ $Y'Y$

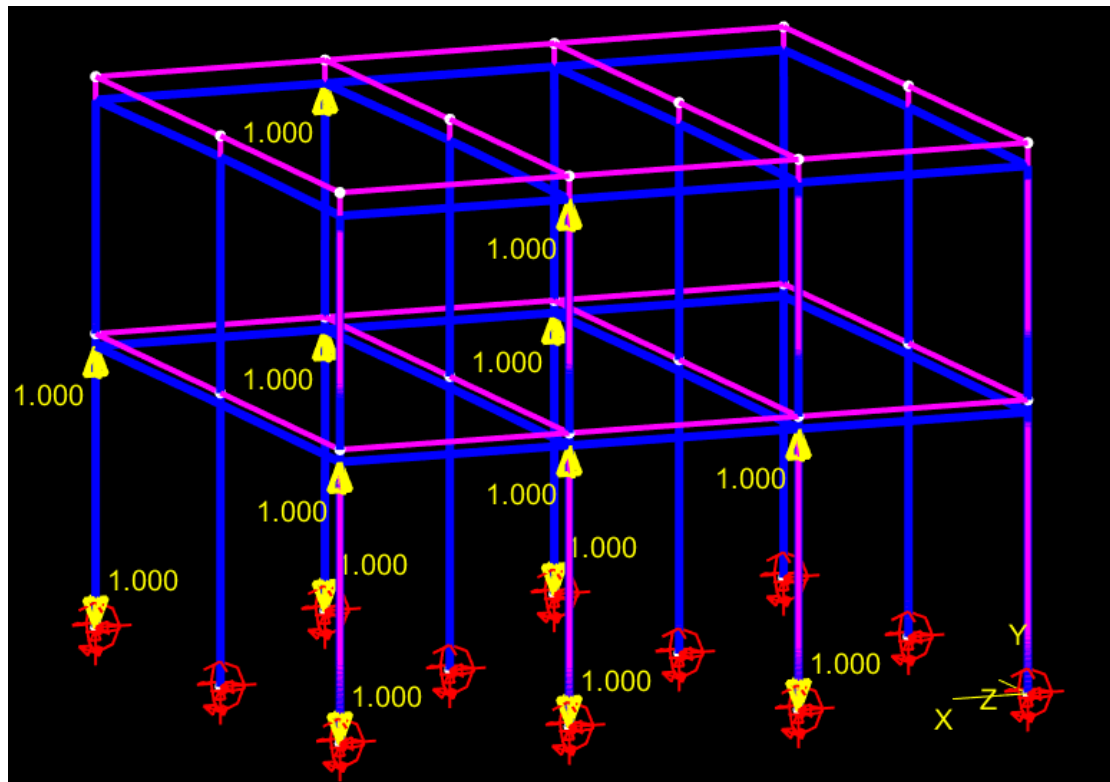
Σε αυτή την ανάλυση εφαρμόστηκε σταδιακά κάθετο φορτίο στην οροφή της κατασκευής δηλαδή κατά τον άξονα $y'-y$ έτσι ώστε να διαπιστωθεί η εμφάνιση πλαστικών αρθρώσεων.

Μέχρι την επιβολή φορτίου 20000 kN δεν παρατηρείται εμφάνιση πλαστικής άρθρωσης όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.

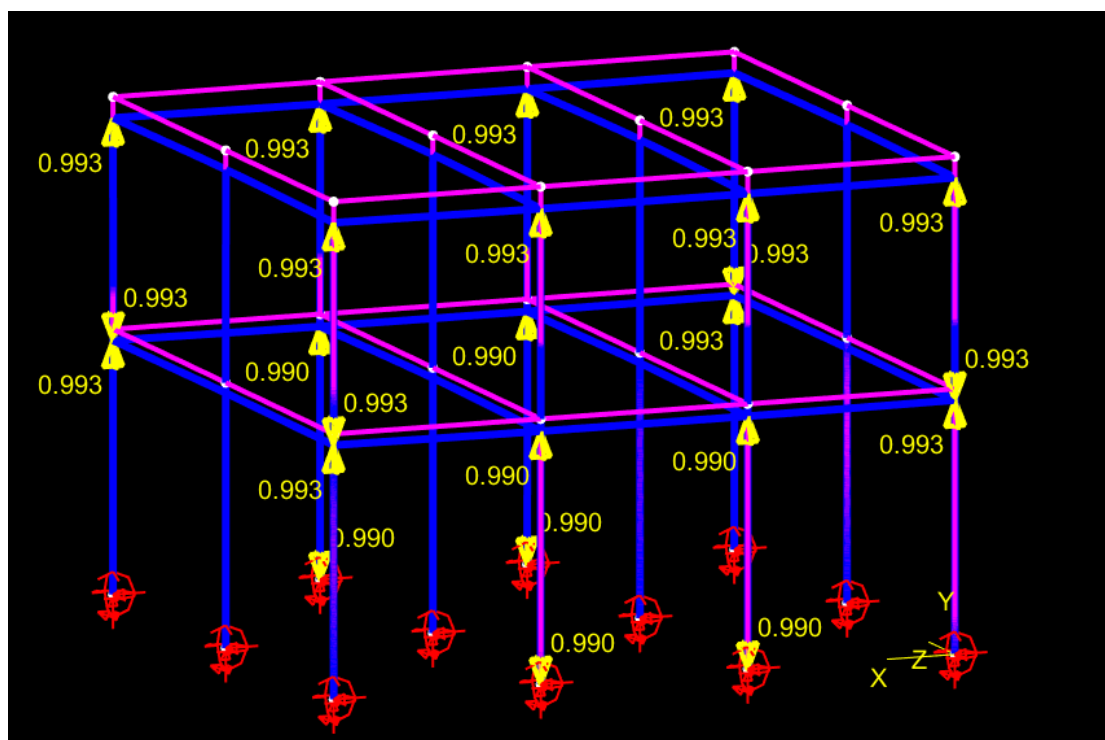


Εικόνα 65 Ανελαστική ανάλυση υπό φορτίο 20000 kN

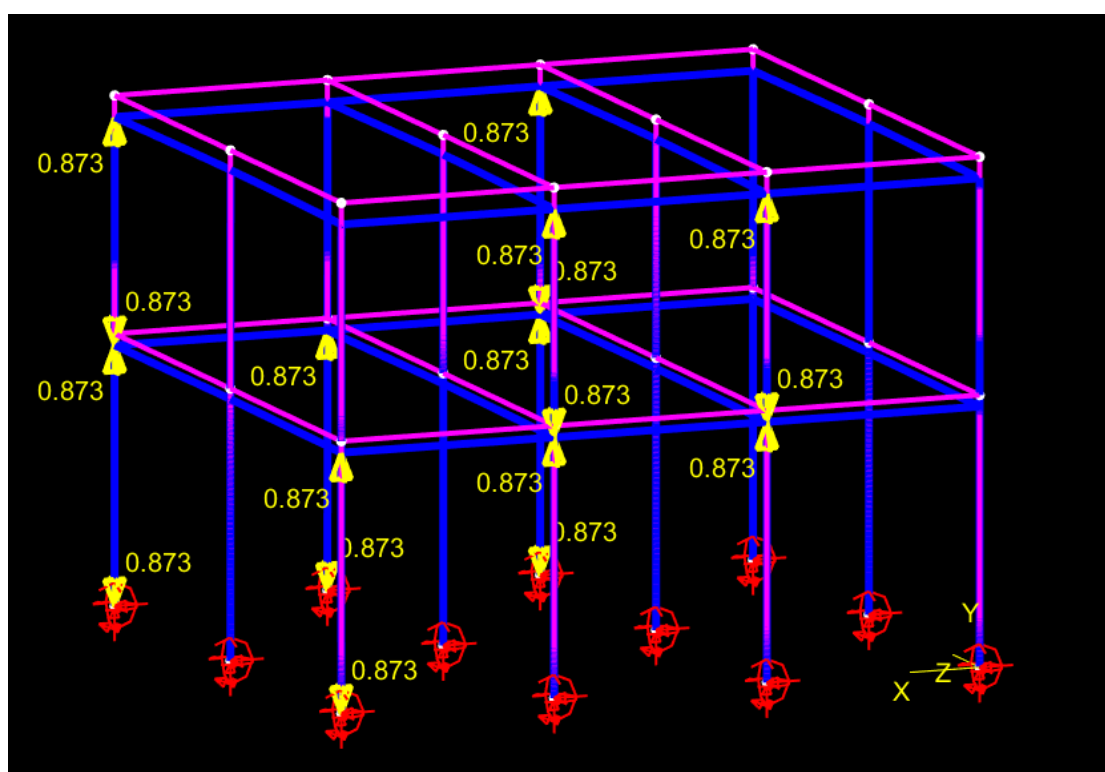
Η εμφάνιση πρώτων πλαστικών αρθρώσεων παρατηρείται υπό εφαρμοζόμενο φορτίο 21800 kN όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα(Εικόνα 66).



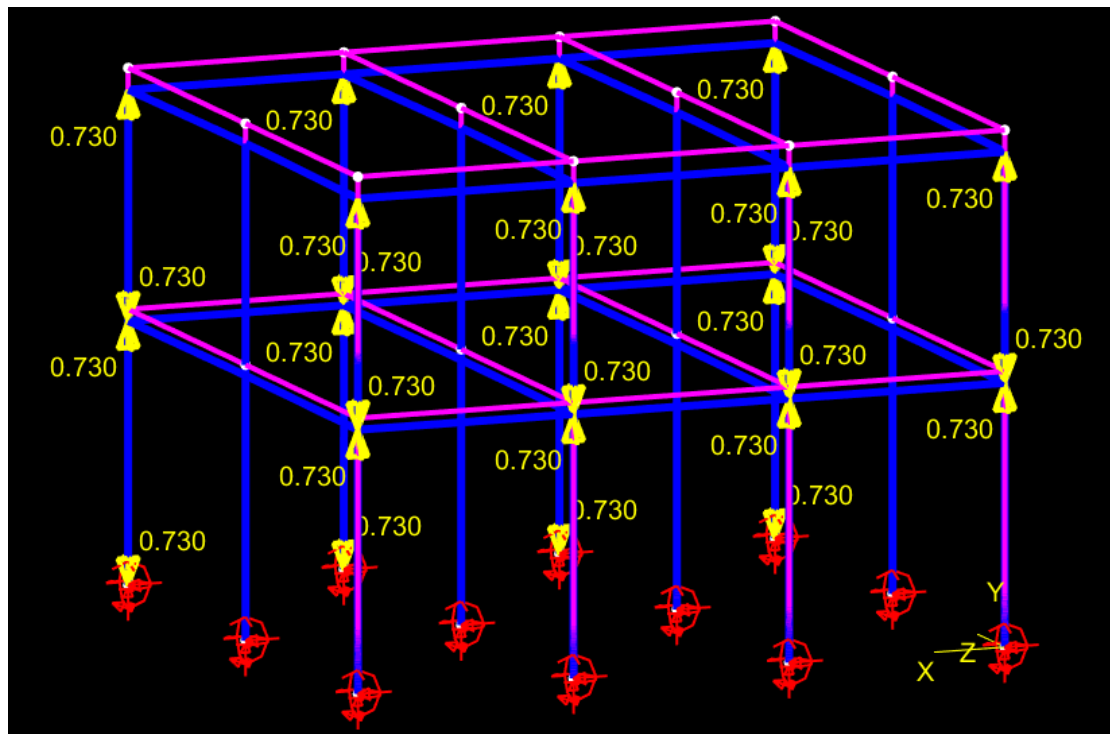
Εικόνα 66 Ανελαστική ανάλυση υπό φορτίο 21800 kN



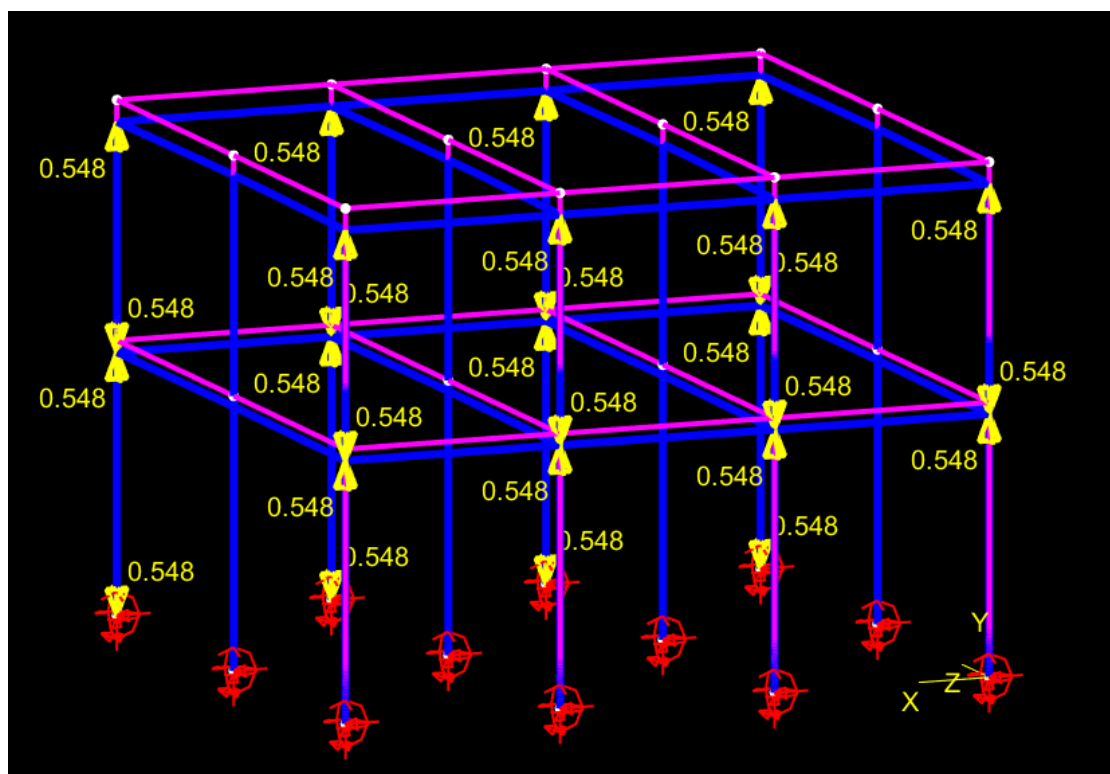
Εικόνα 67 Ανελαστική ανάλυση υπό φορτίο 22000 kN



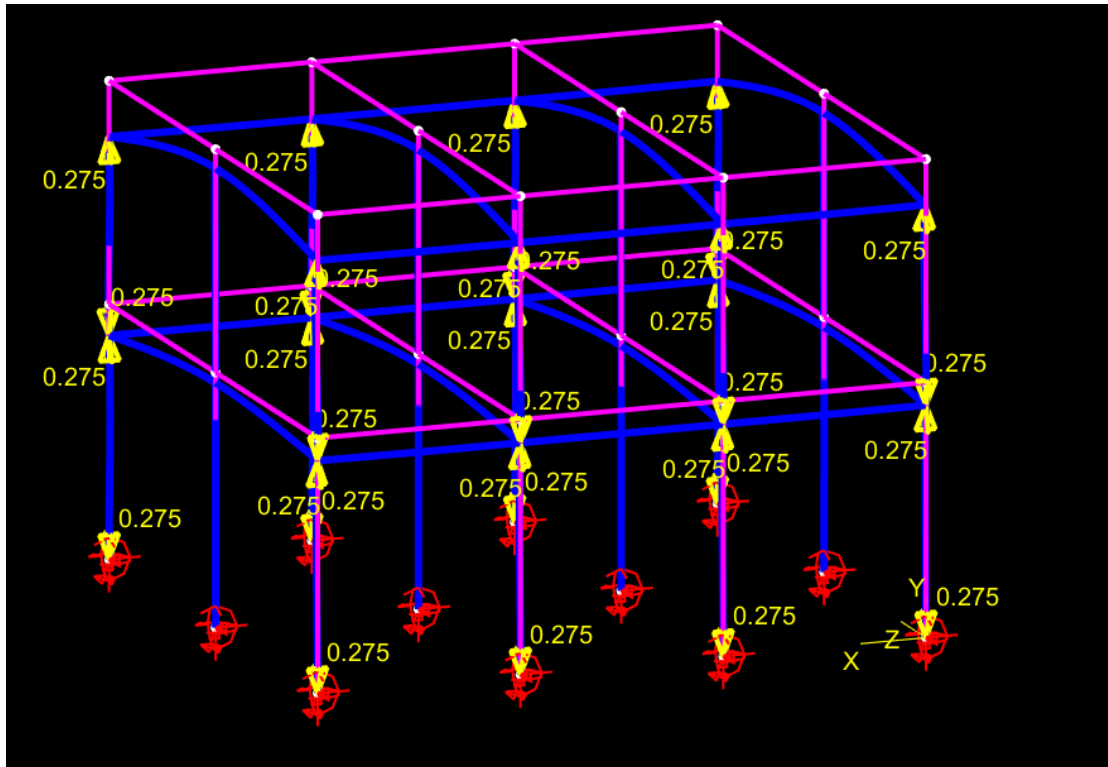
Εικόνα 68 Ανελαστική ανάλυση υπό φορτίο 25000 kN



Εικόνα 69 Ανελαστική ανάλυση υπό φορτίο 30000 kN



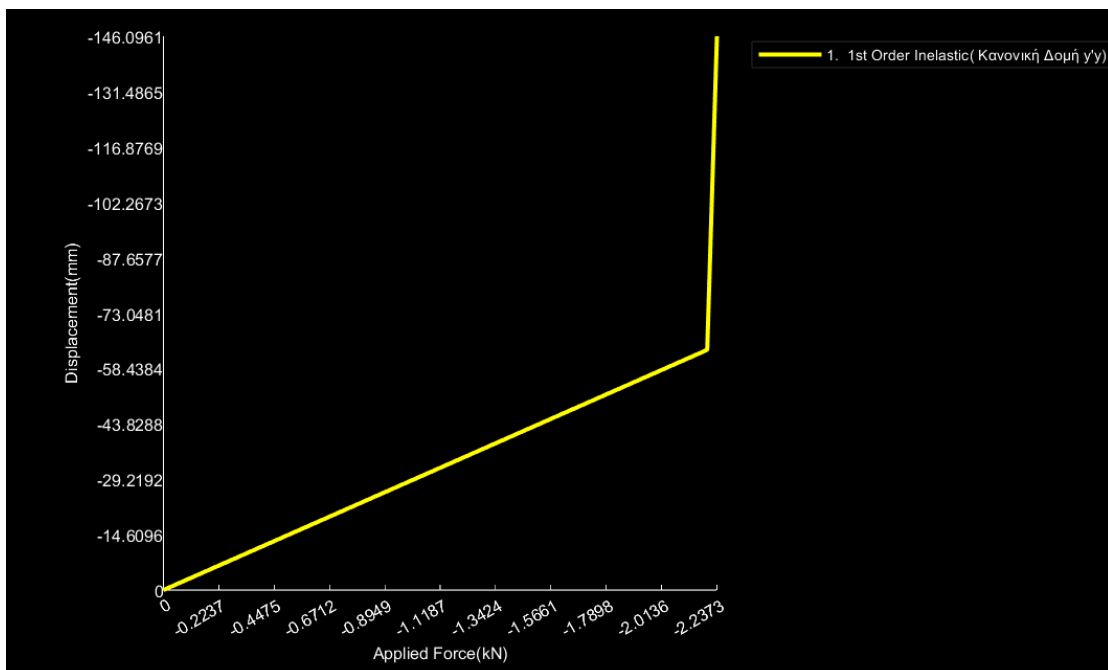
Εικόνα 70 Ανελαστική ανάλυση υπό φορτίο 40000 kN



Εικόνα 71 Ανελαστική ανάλυση υπό φορτίο 80000 kN

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται αρνητικές τιμές στους άξονες διότι το φορτίο το οποίο επιβλήθηκε ήταν κάθετο στο έδαφος, άρα και με αντίθετη φορά από αυτή του άξονα $y'y$



Εικόνα 72 Διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης για την ανελαστική ανάλυση υπό επιβαλλόμενο σταδιακό κάθετο φορτίο στον άξονα $y'y$

Καθώς αυξάνεται το επιβαλλόμενο φορτίο, η κλίση της καμπύλης αυξάνεται απότομα, υποδεικνύοντας την είσοδο της κατασκευής σε ανελαστική συμπεριφορά. Σε αυτό το στάδιο, η κατασκευή αρχίζει να αναπτύσσει πλαστικές αρθρώσεις, και οι παραμορφώσεις γίνονται μόνιμες και μη αναστρέψιμες. Η απότομη αλλαγή στην καμπύλη δηλώνει τη σημαντική μείωση της ακαμψίας της κατασκευής καθώς πλησιάζει στο όριο αστοχίας της.

8.4 Ορισμός της δυναμικής ανάλυσης με την χρήση επιταχυνσιογραφημάτων (ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΡΟΝΟΙΣΤΟΡΙΑΣ)

Για τη δυναμική ανελαστική ανάλυση, χρησιμοποιήθηκαν οι καταγραφές της εδαφικής επιτάχυνσης από το σεισμό της Αχαΐας- Ηλείας τις 8ης Ιουνίου 2008, όπως αυτές δόθηκαν από το Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (Ι.Τ.Σ.Α.Κ.).

Τα επιταχυνσιογραφήματα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία προέρχονται από τρεις διαφορετικούς σταθμούς, της Πάτρας, του Πύργου και του Βαρθολομιού και είναι αυτοί που έδωσαν τις μέγιστες επιταχύνσεις σε σχέση με τους άλλους σταθμούς τις ευρύτερης περιοχής.

Κάθε σειсмоγράφος κατέγραψε τρεις διαφορετικές συνιστώσες της σεισμικής δόνησης L, T, V. Οι οριζόντιες διευθύνσεις L, T έχουν τον προσανατολισμό του κτιρίου πάνω στο οποίο βρίσκεται ο σειсмоγράφος (μήκος και πλάτος αντίστοιχα) ενώ η V αντιστοιχεί στην κατακόρυφη συνιστώσα.

Συγκεκριμένα, οι συνιστώσες L, T του σταθμού της Πάτρας έχουν αζιμούθιο 215° και 125° αντίστοιχα, του σταθμού του Πύργου 350° και 260° και του σταθμού του Βαρθολομιού 280° και 10° .

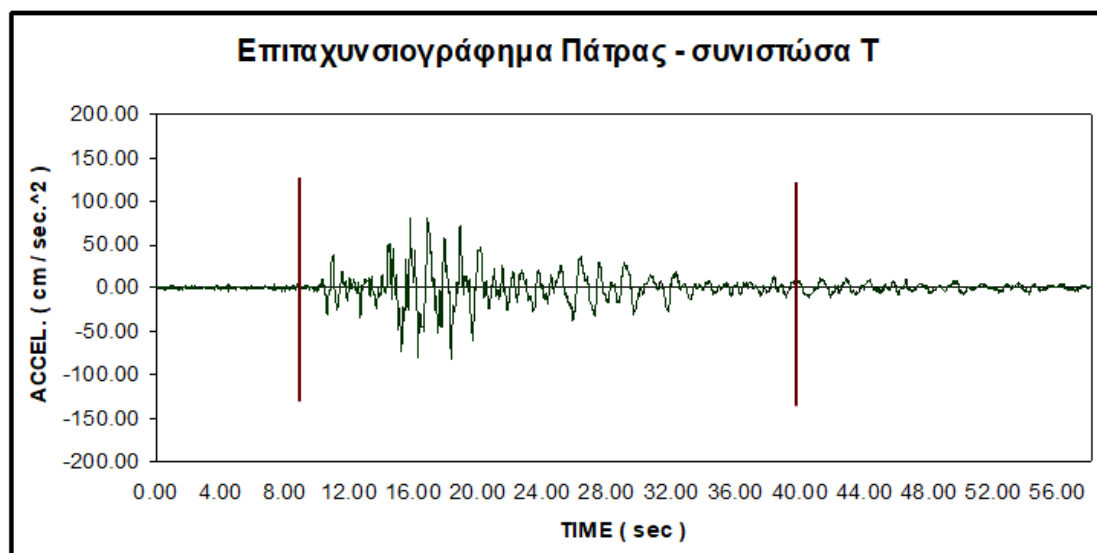
Για τις ανάγκες της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν οι χρόνοι των επιταχυνσιογραφημάτων που αντιστοιχούν στις μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις. Έτσι σε κάθε καταγραφή αφαιρέθηκαν οι αρχικοί και τελικοί χρόνοι, που αντιστοιχούσαν σε μικρές τιμές επιτάχυνσης, και διατηρήθηκαν αυτούσιοι οι ενδιάμεσοι. Συγκεκριμένα, τα επιταχυνσιογραφήματα που ελήφθησαν από το σταθμό της Πάτρας περιορίστηκαν μεταξύ του 9,5 και 41 δευτερολέπτου της πραγματικής καταγραφής , από το σταθμό του Πύργου μεταξύ του 10 και 34 δευτερολέπτου και από το σταθμό του Βαρθολομιού μεταξύ του 39,5 και 67,5 δευτερολέπτου, αντίστοιχα.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα επιταχυνσιογράφημα όπως αυτά προέκυψαν από τις καταγραφές του Ι.Τ.Σ.Α.Κ. Σε αυτά παρουσιάζεται ο συνολικός χρόνος καταγραφής καθώς και το διάστημα το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση της κατασκευής.

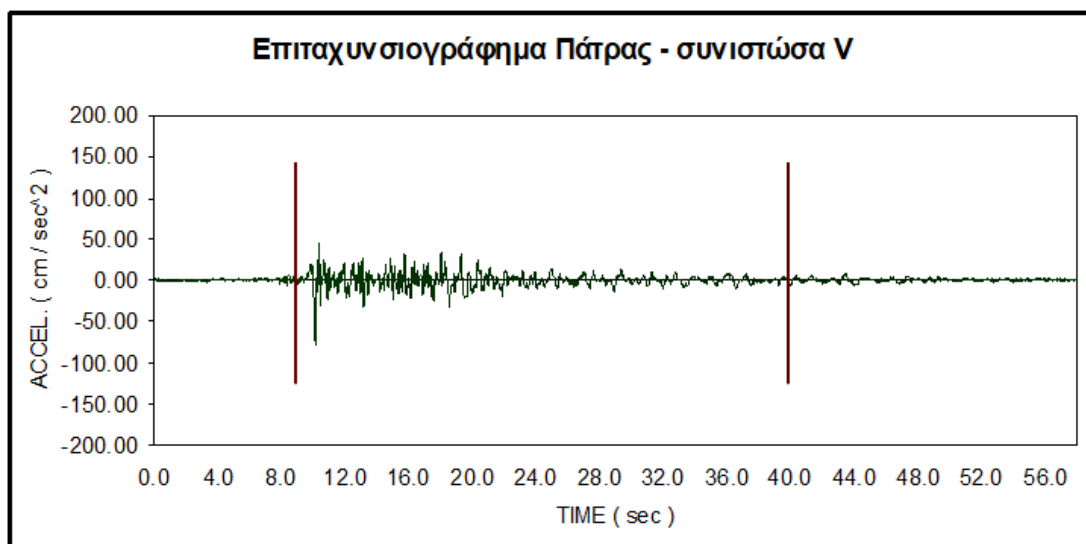
Επιταχυνσιογράφημα σταθμού Πάτρας



Εικόνα 73 Επιταχυνσιογράφημα Πάτρας συνιστώσα L

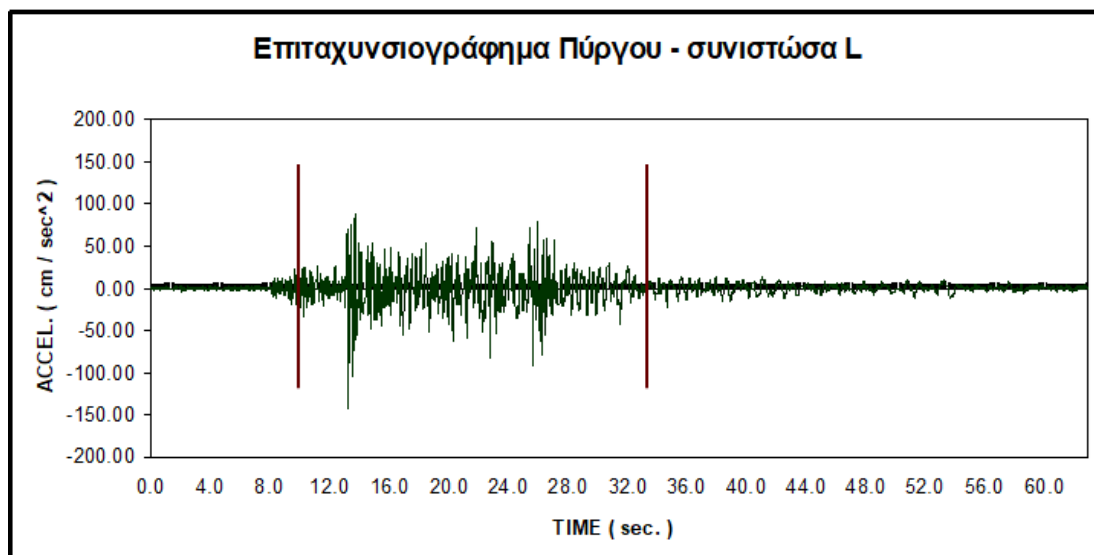


Εικόνα 74 Επιταχυνσιογράφημα Πάτρας συνιστώσα T

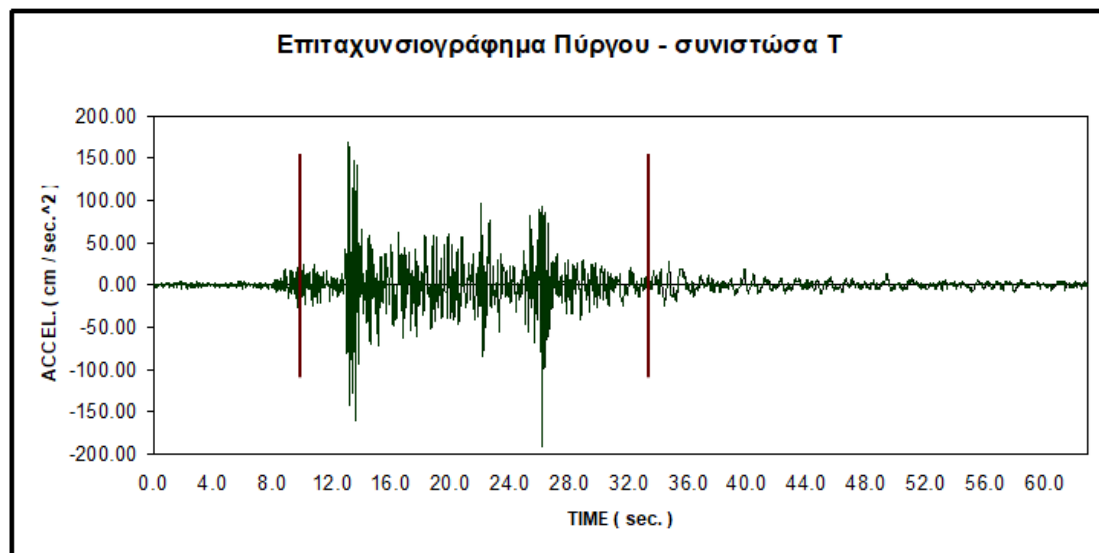


Εικόνα 75 Επιταχυνσιογράφημα Πάτρας συνιστώσα V

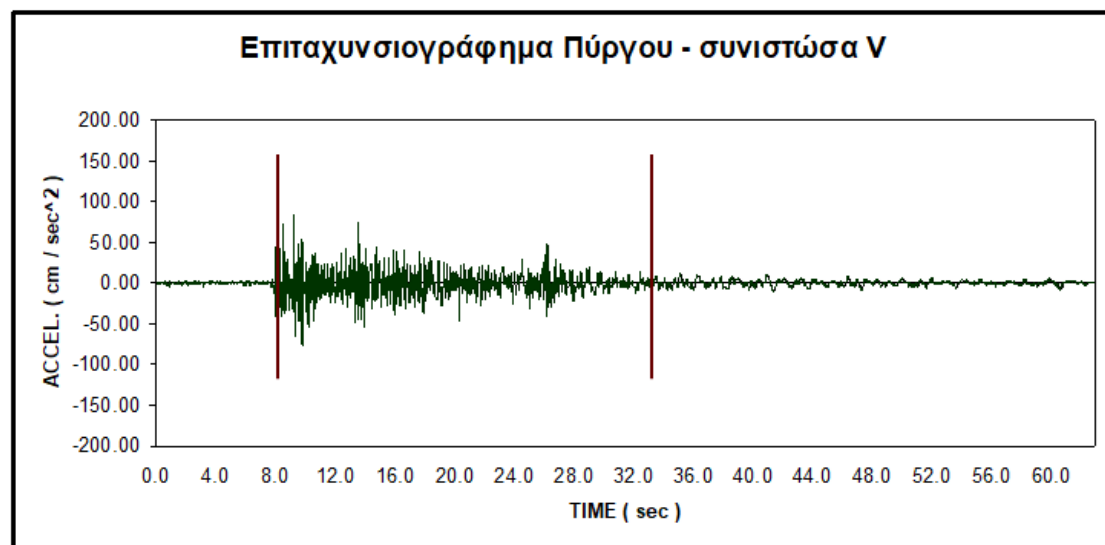
Επιταχυνσιογράφημα σταθμού Πύργου



Εικόνα 76 Επιταχυνσιογράφημα Πύργου συνιστώσα L

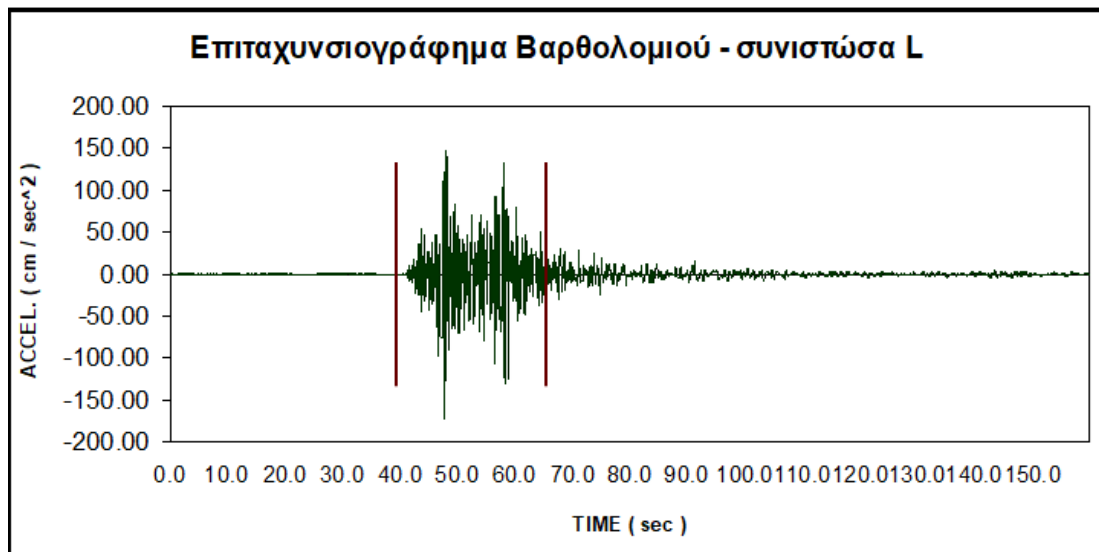


Εικόνα 77 Επιταχυνσιογράφημα Πύργου συνιστώσα T

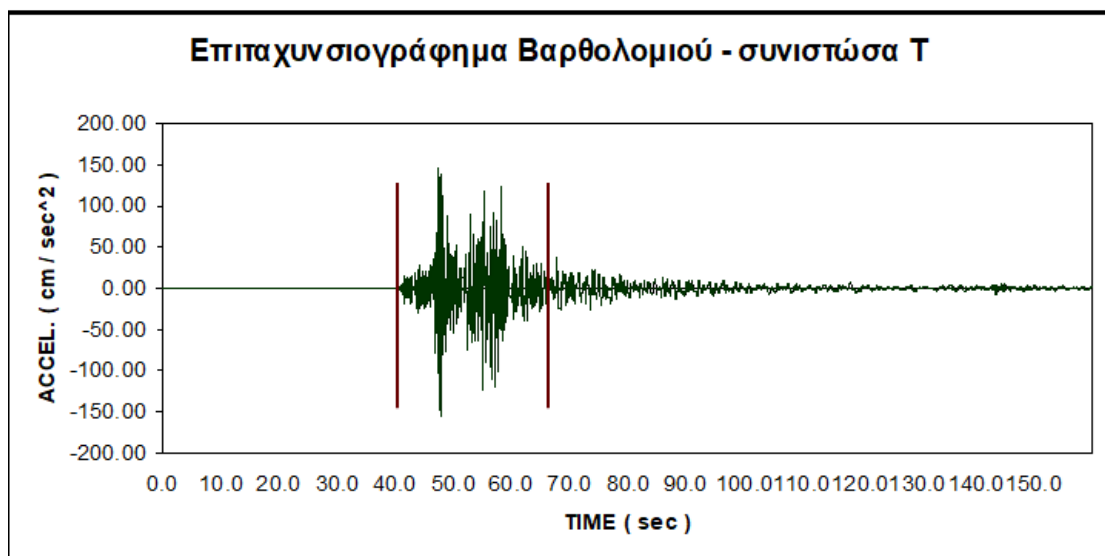


Εικόνα 78 Επιταχυνσιογράφημα Πύργου συνιστώσα V

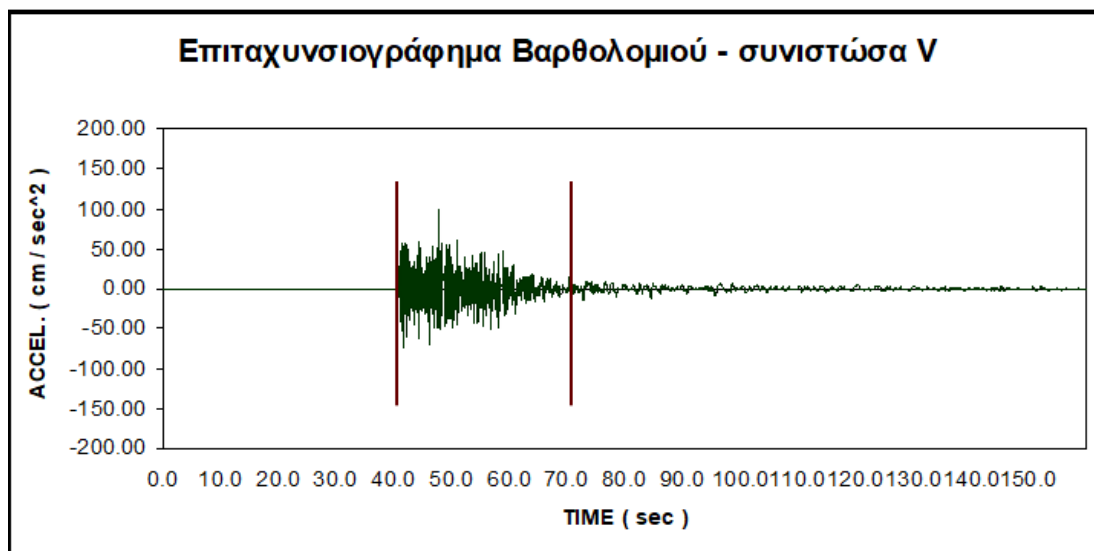
Επιταχυνσιογράφημα σταθμού Βαρθολομιού



Εικόνα 79 Επιταχυνσιογράφημα Βαρθολομιού συνιστώσα L



Εικόνα 80 Επιταχυνσιογράφημα Βαρθολομιού συνιστώσα T

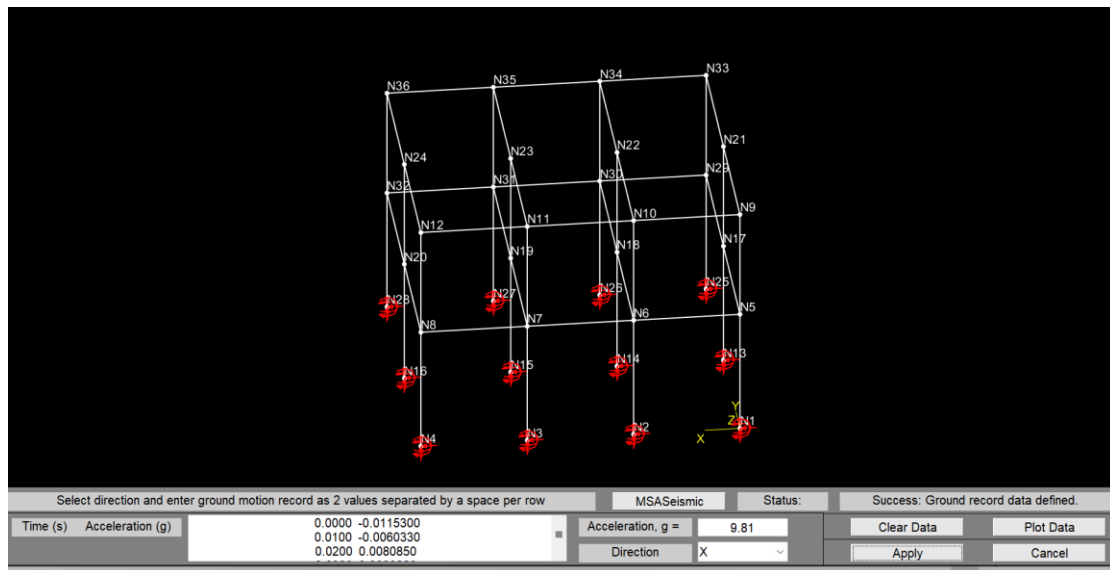


Εικόνα 81 Επιταχυνσιογράφημα Βαρθολομιού συνιστώσα V

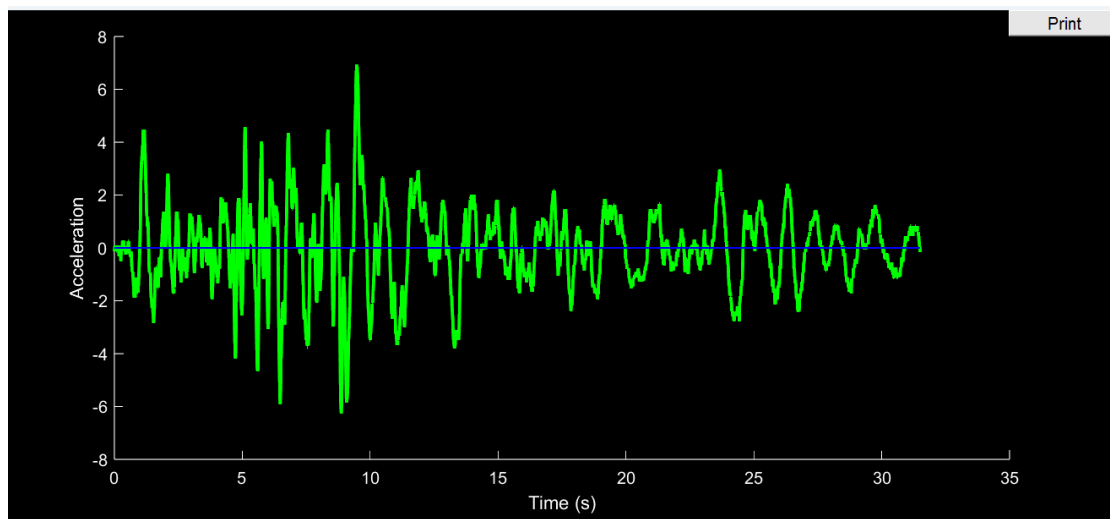
8.4.1 Καθορισμός χαρακτηριστικών των σεισμικών διεγέρσεων

Οι 9 παραπάνω σεισμικές καταγραφές εισήχθησαν στον Mastan2 μέσω των τιμών επιτάχυνσης ως εξής

Κάθε καταγραφή εισάχθηκε ξεχωριστά στο πλαίσιο Time(s) Acceleration(g)(Εικόνα82).

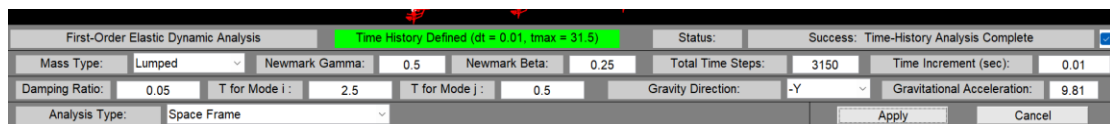


Εικόνα 82 Εισαγωγή καταγραφών σεισμών



Εικόνα 83 Διάγραμμα Καταγραφής

Ορισμός χαρακτηριστικών της δυναμικής ανάλυσης για σταθμό Πάτρας



Εικόνα 84 Ορισμός χαρακτηριστικών της δυναμικής ανάλυσης για σταθμό Πάτρας

Ορισμός Χαρακτηριστικών της δυναμικής ανάλυσης για σταθμό Πύργου

First-Order Elastic Dynamic Analysis		Time History Defined (dt = 0.01, tmax = 24)		Status:	Success: Time-History Analysis Complete				
Mass Type:	Lumped	Newmark Gamma:	0.5	Newmark Beta:	0.25	Total Time Steps:	2400	Time Increment (sec):	0.01
Damping Ratio:	0.05	T for Mode i:	2.5	T for Mode j:	0.5	Gravity Direction:	-Y	Gravitational Acceleration:	9.81
Analysis Type:	Space Frame						Apply	Cancel	

Εικόνα 85 Ορισμός Χαρακτηριστικών της δυναμικής ανάλυσης για σταθμό Πύργου

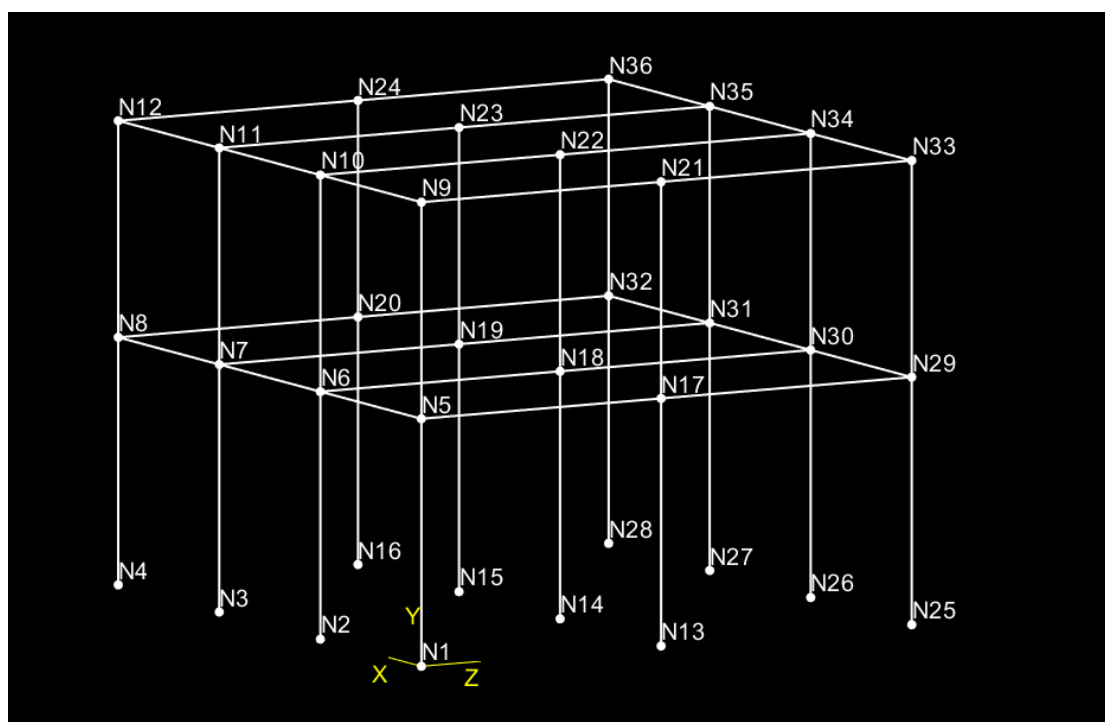
Ορισμός χαρακτηριστικών της δυναμικής ανάλυσης για σταθμό Βαρθολομιού

First-Order Elastic Dynamic Analysis		Time History Defined (dt = 0.01, tmax = 24)		Status:	Success: Time-History Analysis Complete				
Mass Type:	Lumped	Newmark Gamma:	0.5	Newmark Beta:	0.25	Total Time Steps:	5600	Time Increment (sec):	0.005
Damping Ratio:	0.05	T for Mode i:	2.5	T for Mode j:	0.5	Gravity Direction:	-Y	Gravitational Acceleration:	9.81
Analysis Type:	Planar Frame (x-y)						Apply	Cancel	

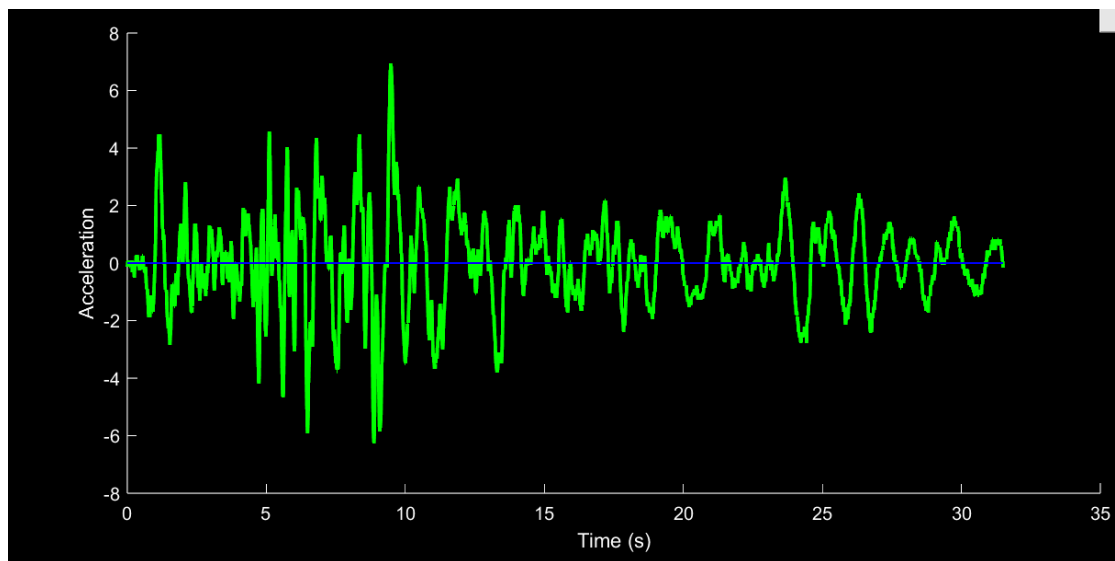
Εικόνα 86 Ορισμός χαρακτηριστικών της δυναμικής ανάλυσης για σταθμό Βαρθολομιού

Από τις παραπάνω καταγραφές προέκυψαν τα διαγράμματα μετατόπισης-χρόνου για σημείο (κολώνα) του ισογείου και του Α' Ορόφου. Στην συνέχεια σε κάθε διάγραμμα εντοπίστηκε η μέγιστη μετατόπιση.

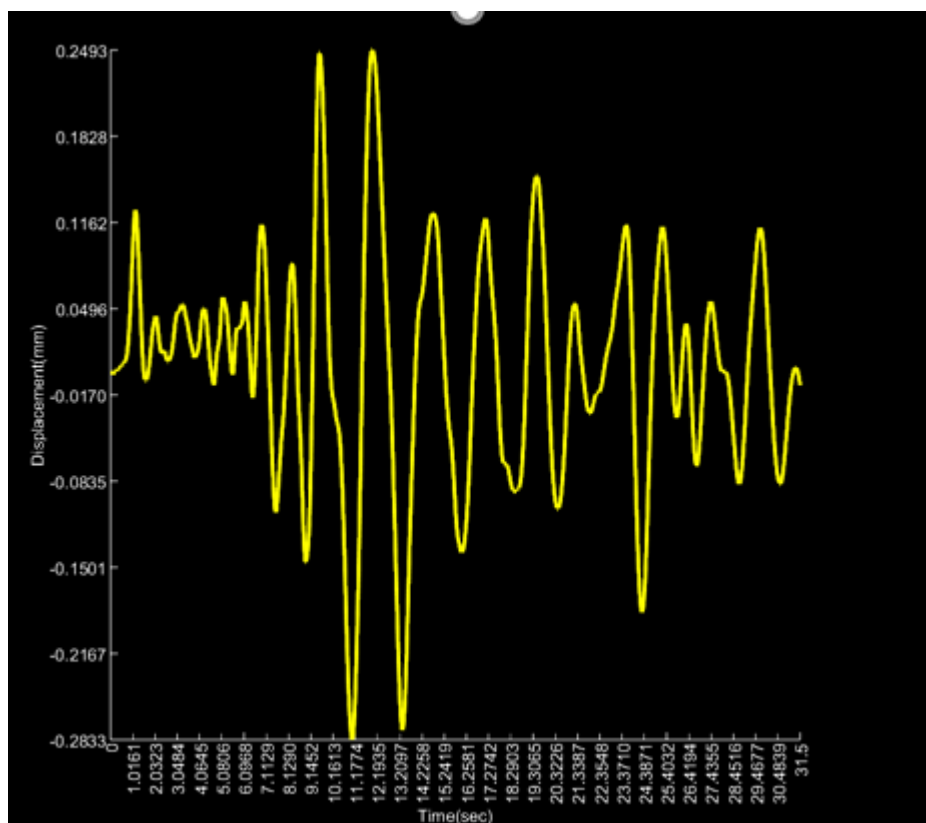
Η ανάλυση έγινε για το υποστύλωμα του ισογείου στον κόμβο N1 με άνω κόμβο N5 και για τον Α' Όροφο για το υποστύλωμα στον κόμβο N5 με άνω κόμβο N9 όπως φαίνεται παρακάτω.



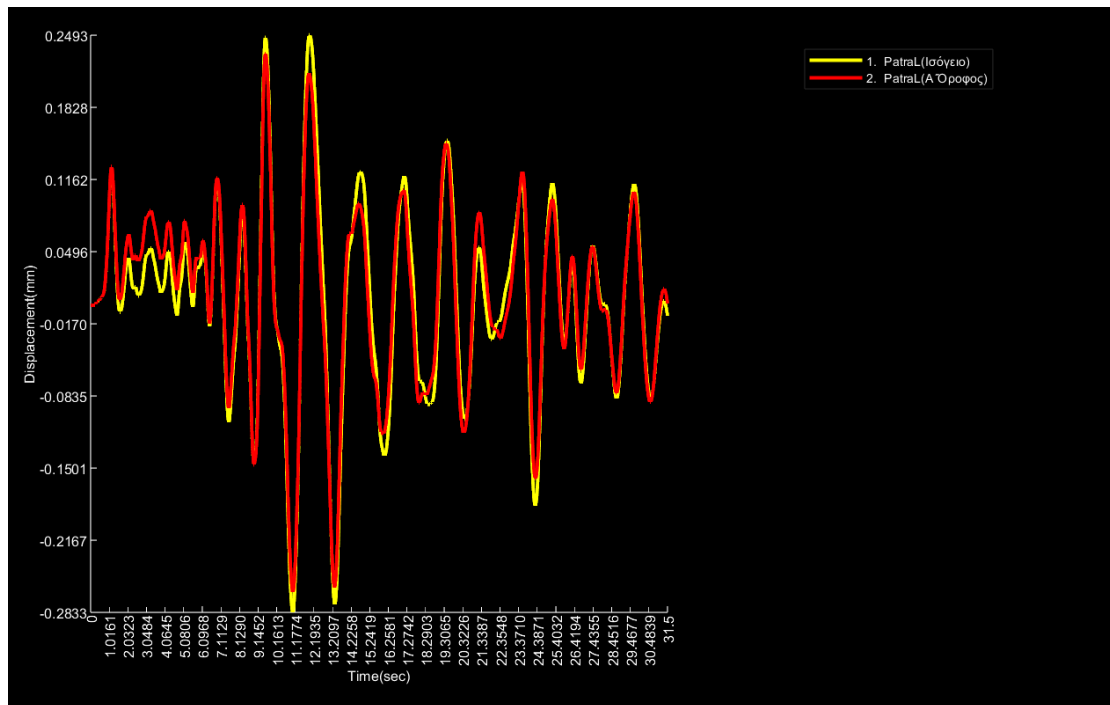
1η Καταγραφή Σταθμού Πάτρας



Εικόνα 87 1η Καταγραφή Σταθμού Πάτρας

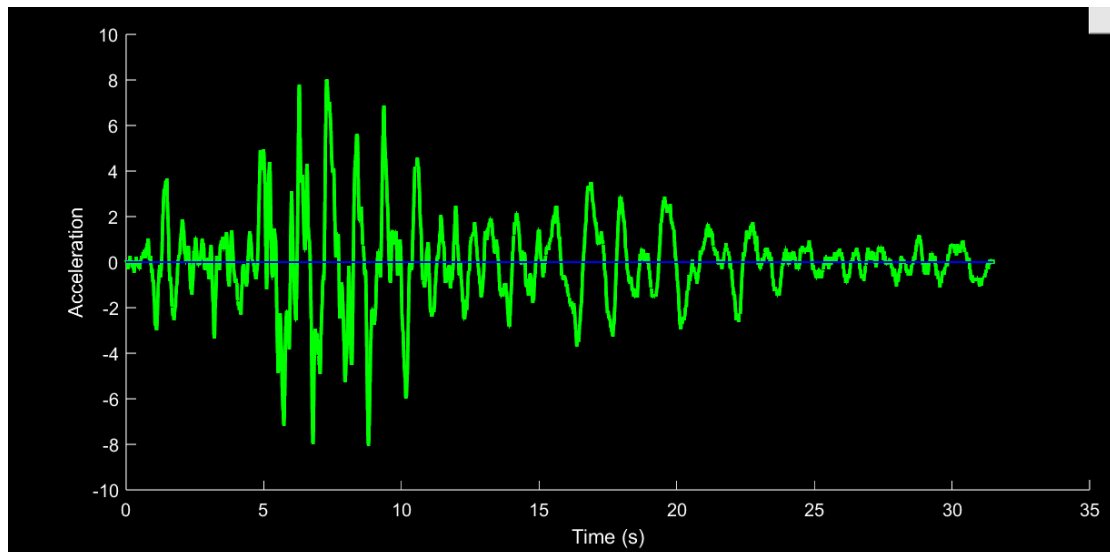


Εικόνα 88 Διάγραμμα Χρόνου Μετατόπισης Ισογείου 1η Καταγραφή Πάτρας

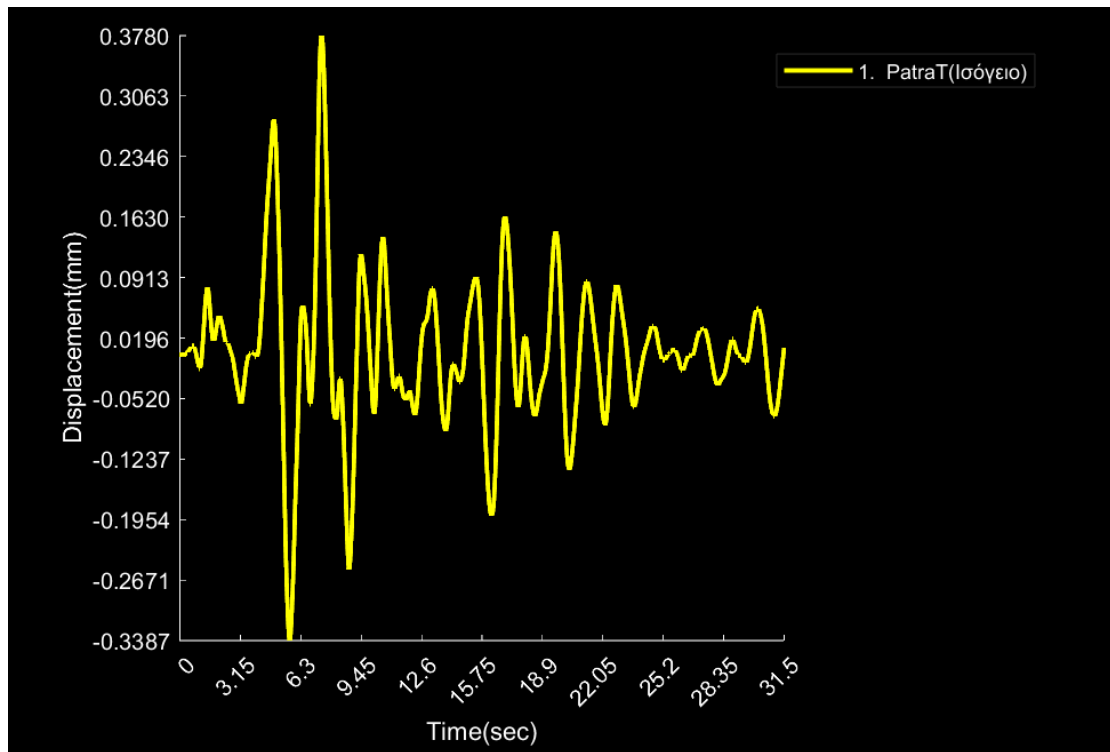


Εικόνα 89 Διάγραμμα Μετατόπισης Χρόνου ισόγειου και Α' Ορόφου 1ης Καταγραφής Πάτρας
Μέγιστη μετατόπιση 0.2492 mm για σημείο του ισόγειου.

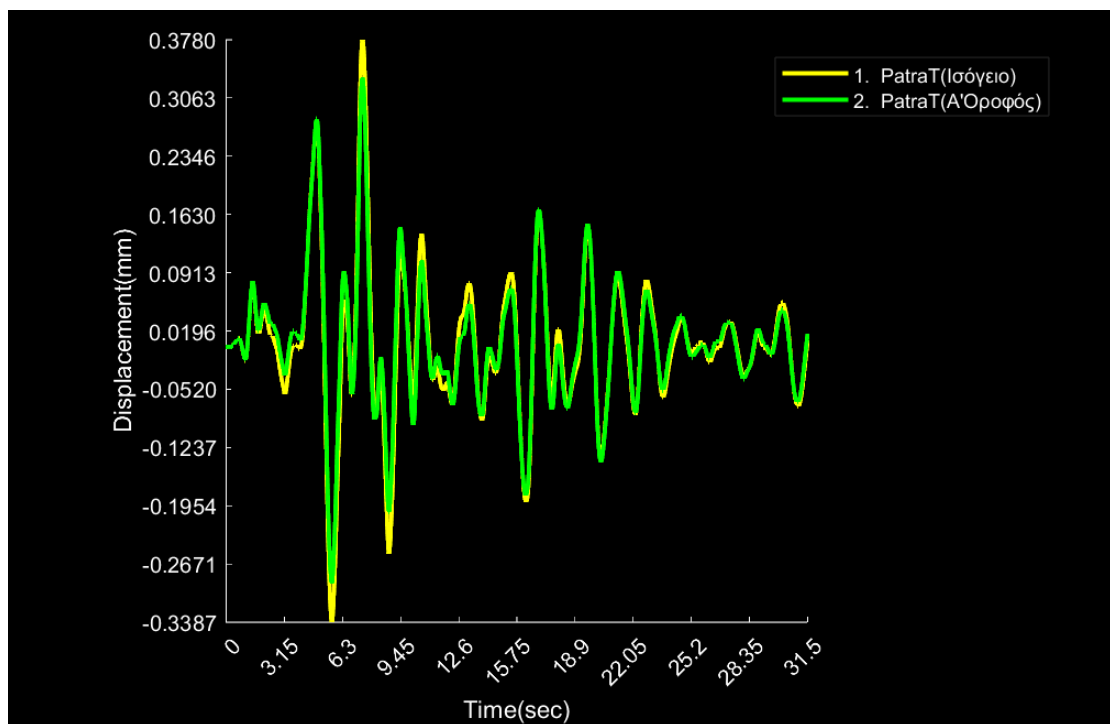
2η Καταγραφή Σταθμού Πάτρας



Εικόνα 90 2η Καταγραφή Σταθμού Πάτρας

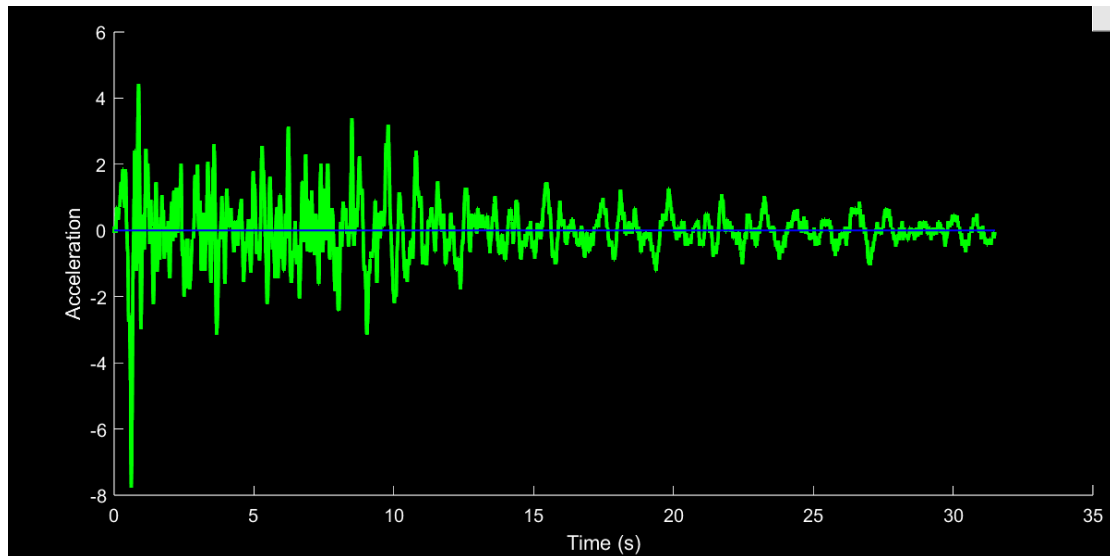


Εικόνα 91 Διάγραμμα Μετατόπισης Χρόνου ισογείου 2η Καταγραφή Πάτρας

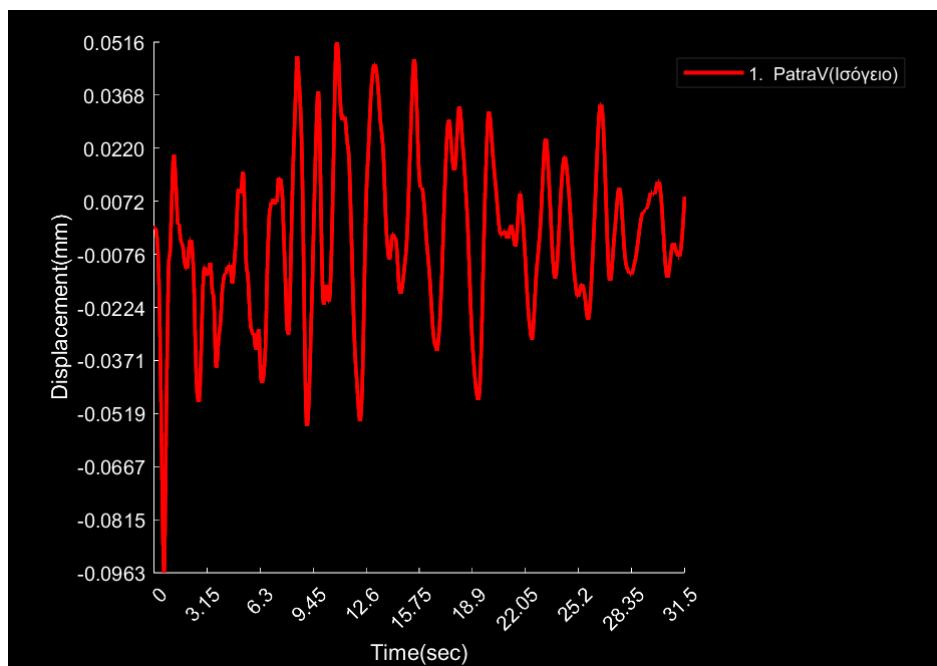


Εικόνα 92 Διάγραμμα Μετατόπισης Χρόνου ισογείου και Α' Ορόφου 2ης Καταγραφής Πάτρας
Μέγιστη μετατόπιση για σημείου του ισογείου 0.3780mm

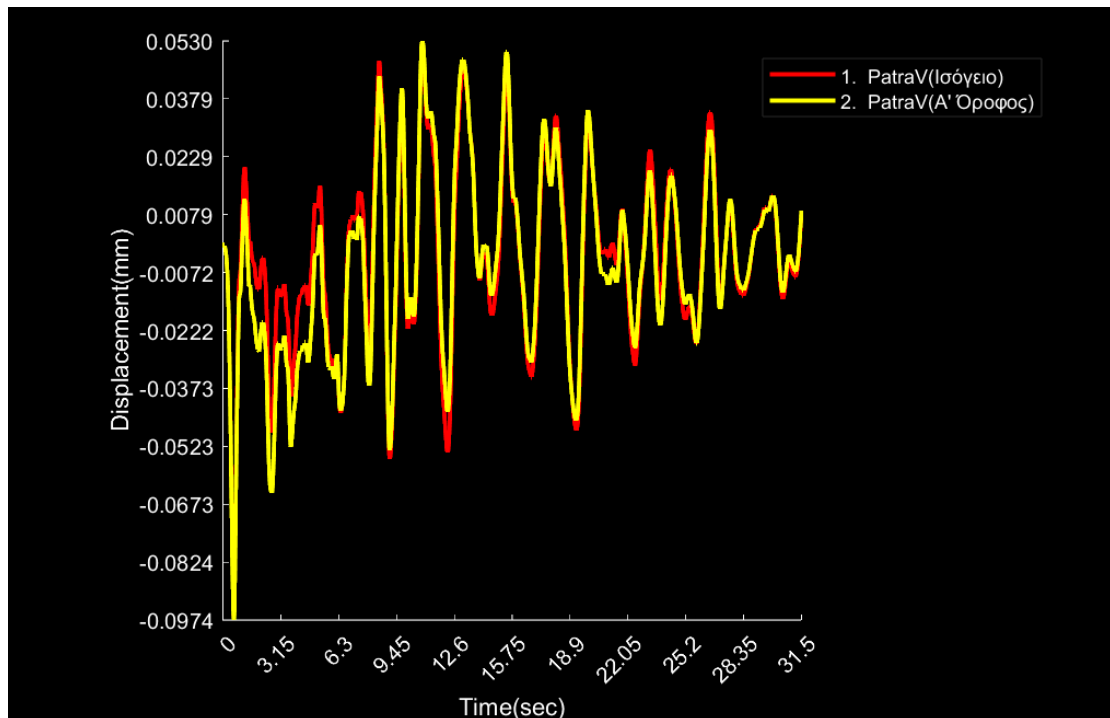
3η Καταγραφή Σταθμού Πάτρας



Εικόνα 93 3η Καταγραφή Σταθμού Πάτρας



Εικόνα 94 Διάγραμμα Μετατόπισης Χρόνου ισόγειου 3η Καταγραφή Πάτρας

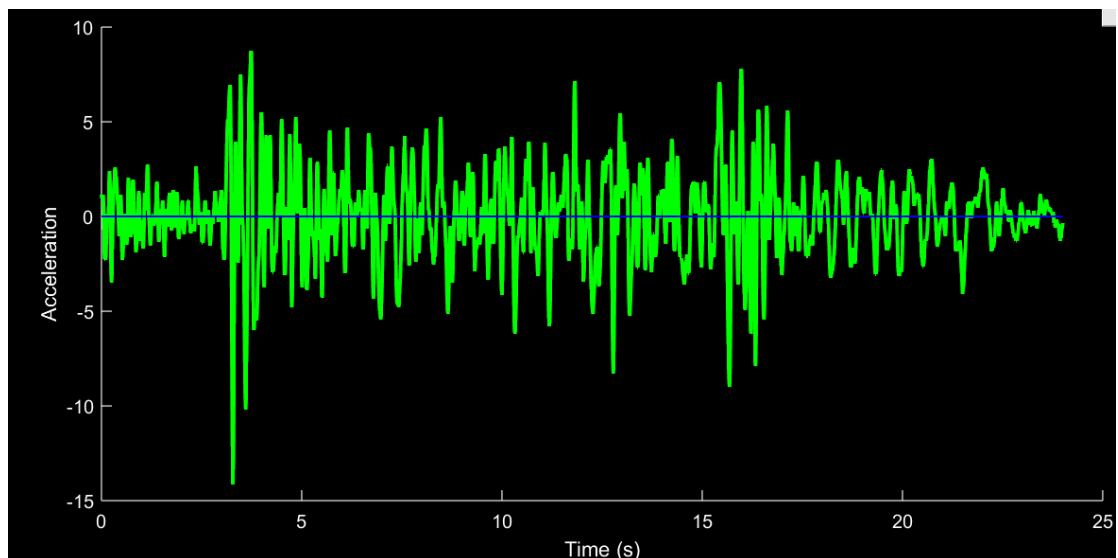


Εικόνα 95 Διάγραμμα Μετατόπισης Χρόνου ισόγειου και Α' Ορόφου 3ης Καταγραφής Πάτρας

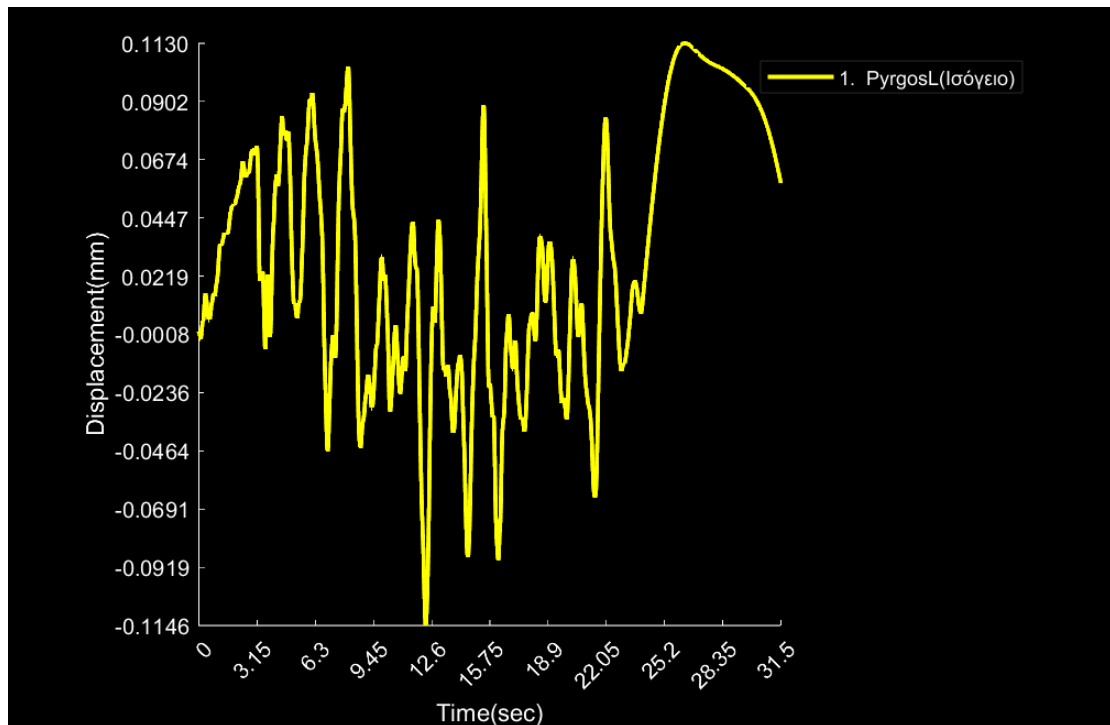
Μέγιστη μετατόπιση για σημείο του Α' Ορόφου κατά απόλυτη τιμή 0.0974 mm

Καταγραφές σταθμού Πύργου

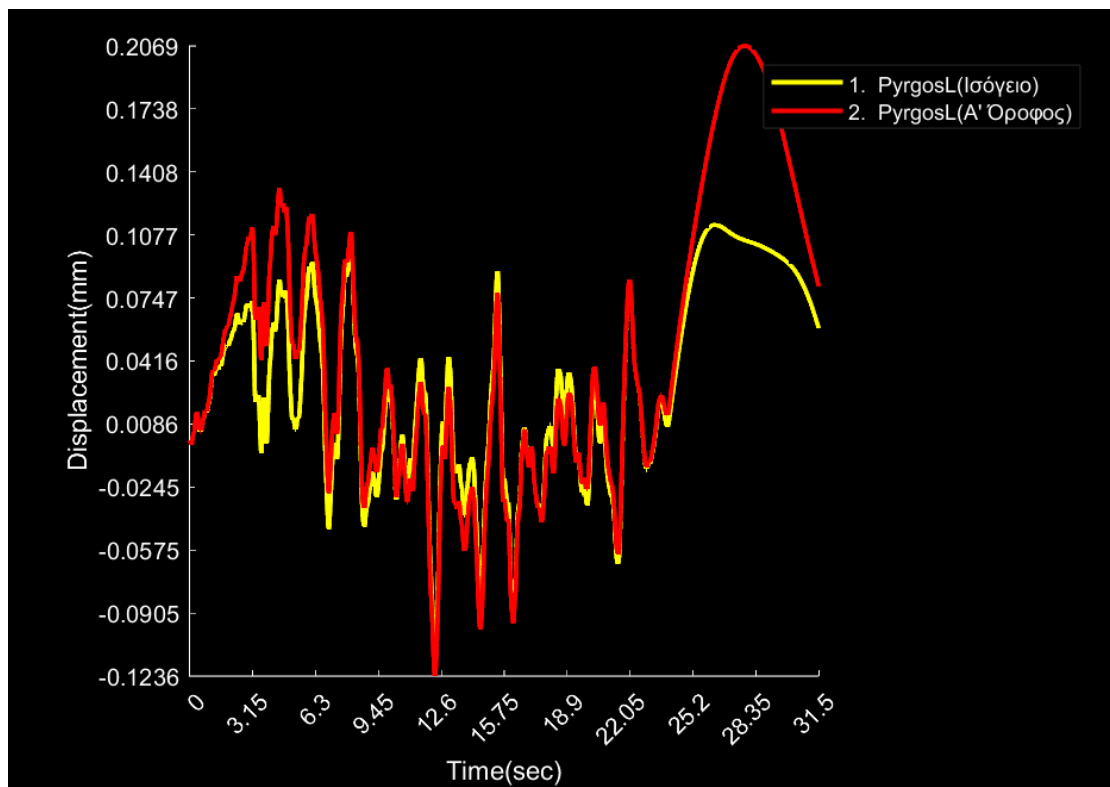
1η Καταγραφή Σταθμού Πύργου



Εικόνα 96 1η Καταγραφή Σταθμού Πύργου

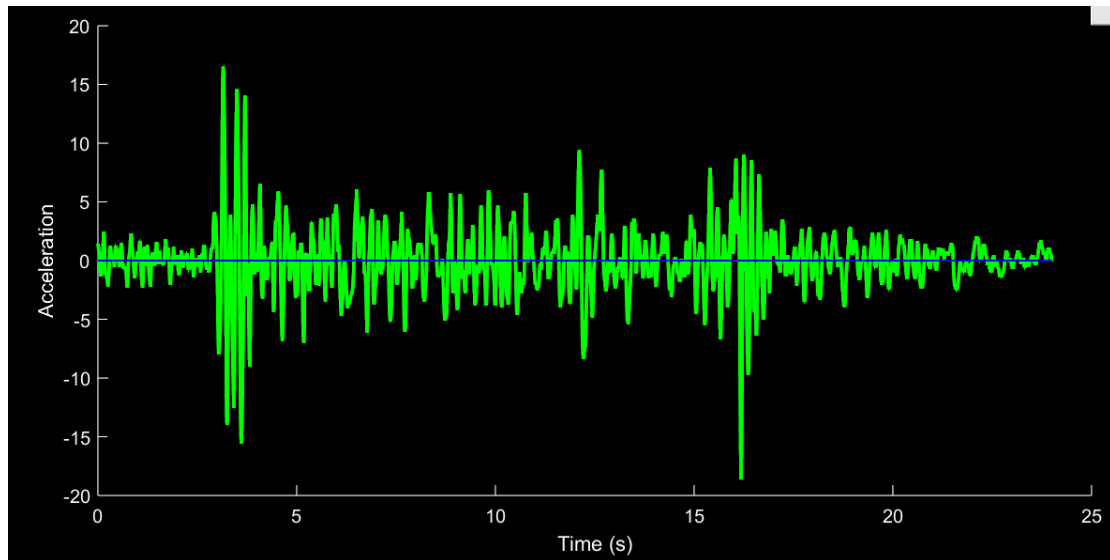


Εικόνα 97 Διάγραμμα Μετατόπισης Χρόνου ισόγειου 1η Καταγραφή Πύργου

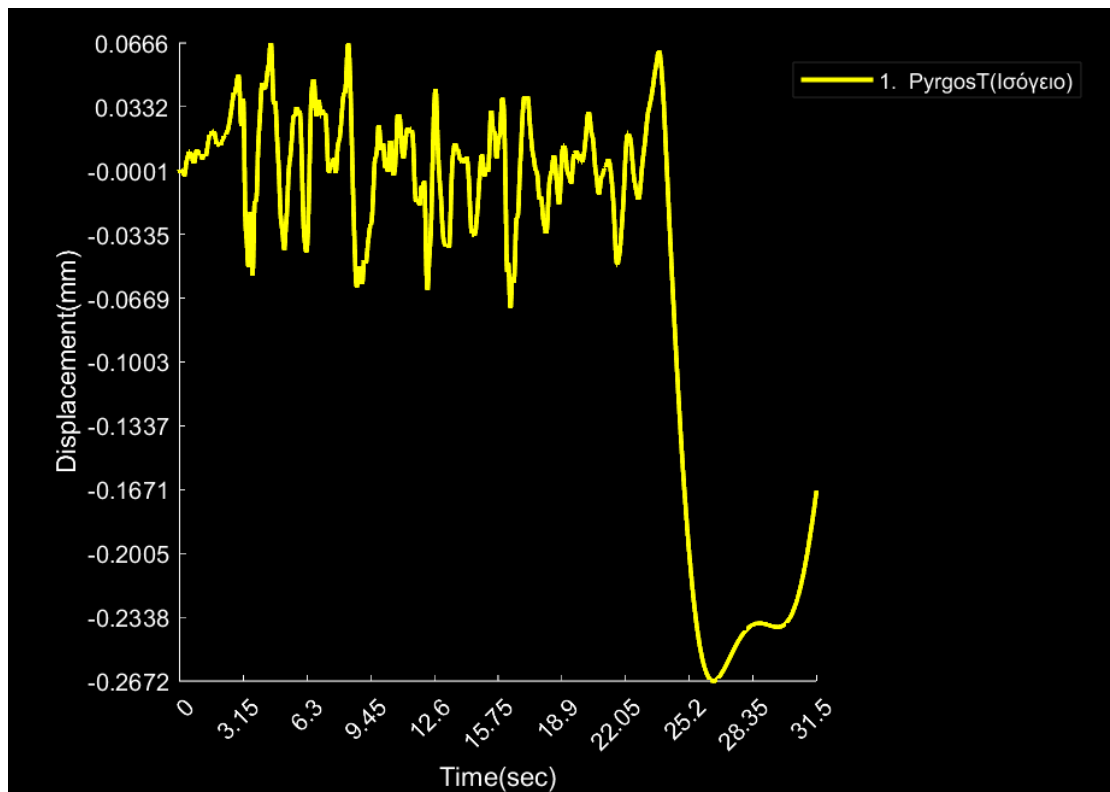


Εικόνα 98 Διάγραμμα Μετατόπισης Χρόνου ισόγειου και Α' Ορόφου 1ης Καταγραφής Πύργου
Μέγιστη μετατόπιση 0.2069mm σε σημείο του Α' Ορόφου.

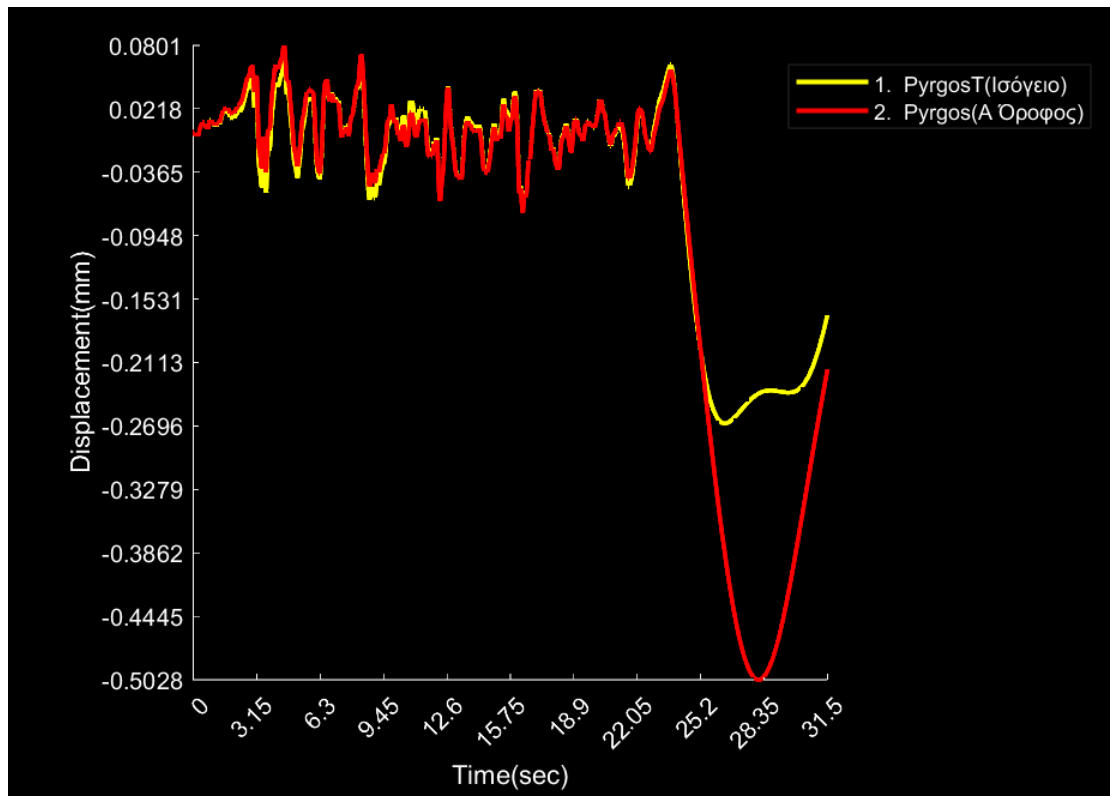
2η Καταγραφή σταθμού Πύργου



Εικόνα 99 2η Καταγραφή Σταθμού Πύργου

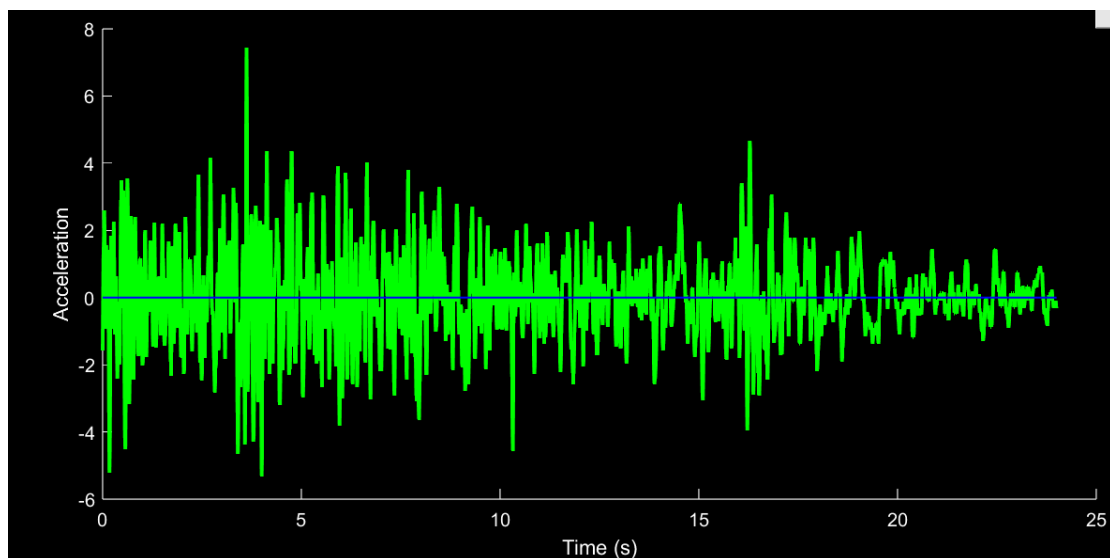


Εικόνα 100 Διάγραμμα Μετατόπισης Χρόνου ισόγειου 2η Καταγραφή Πύργου

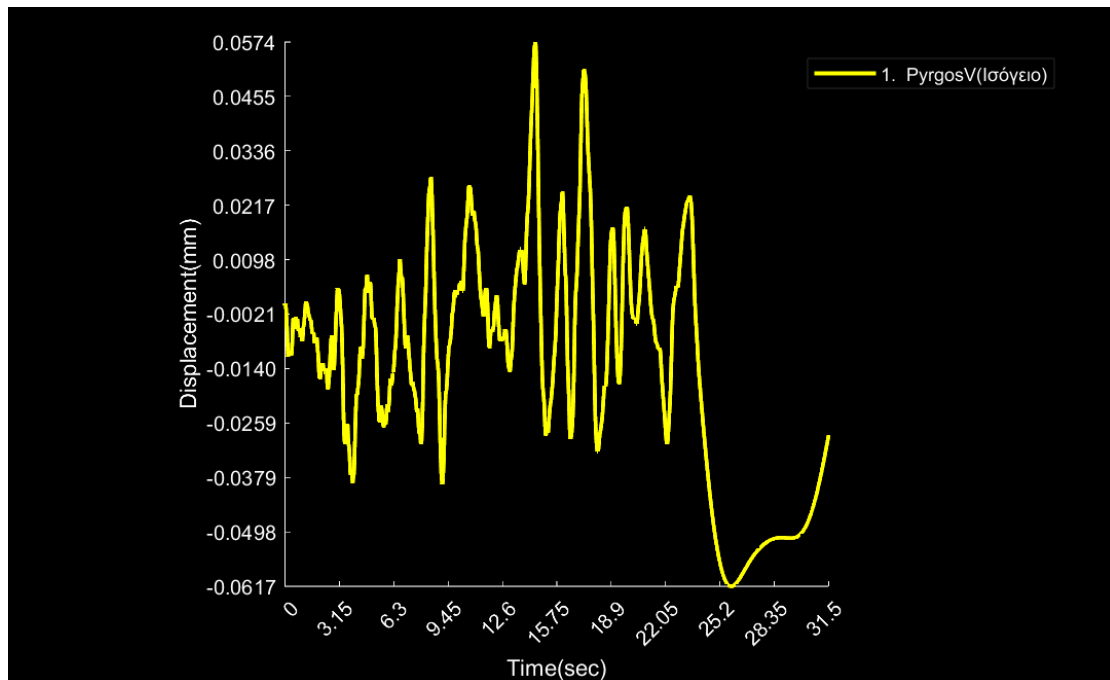


Εικόνα 101 Διάγραμμα Μετατόπισης Χρόνου ισόγειου και Α' Ορόφου 2ης Καταγραφής Πύργου
Μέγιστη μετατόπιση σε σημείο του ισόγειου στον Α' Όροφο 0.5028

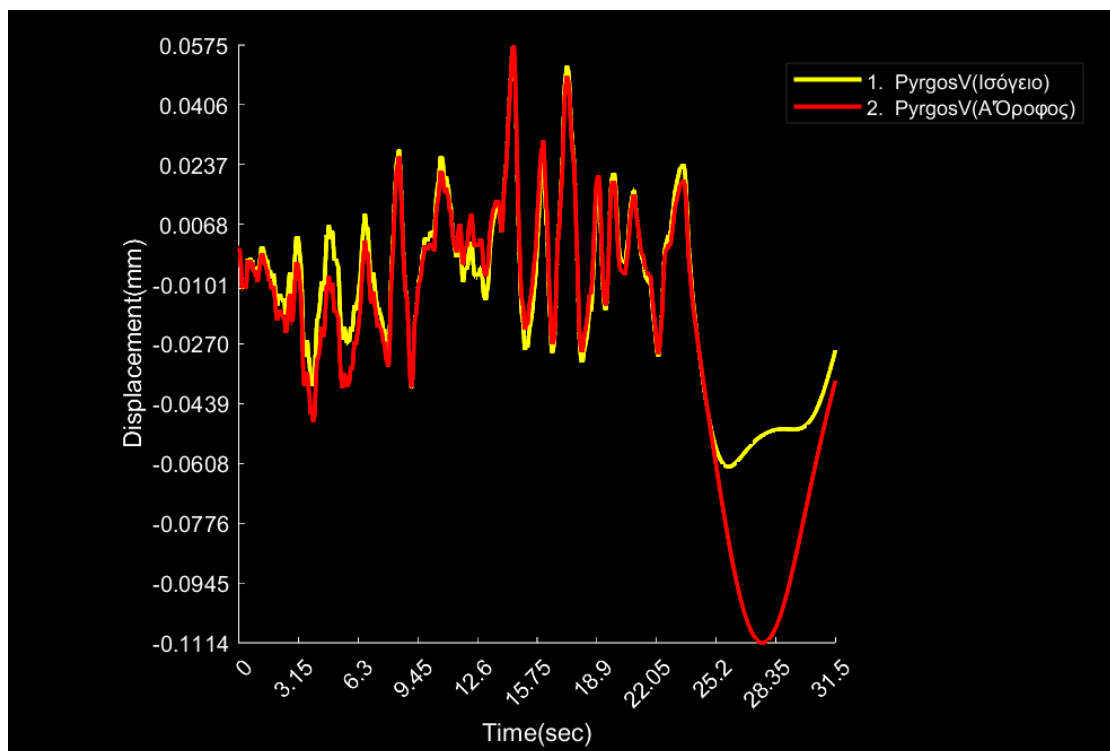
3η Καταγραφή Σταθμού Πύργου



Εικόνα 102 3η Καταγραφή Σταθμού Πύργου



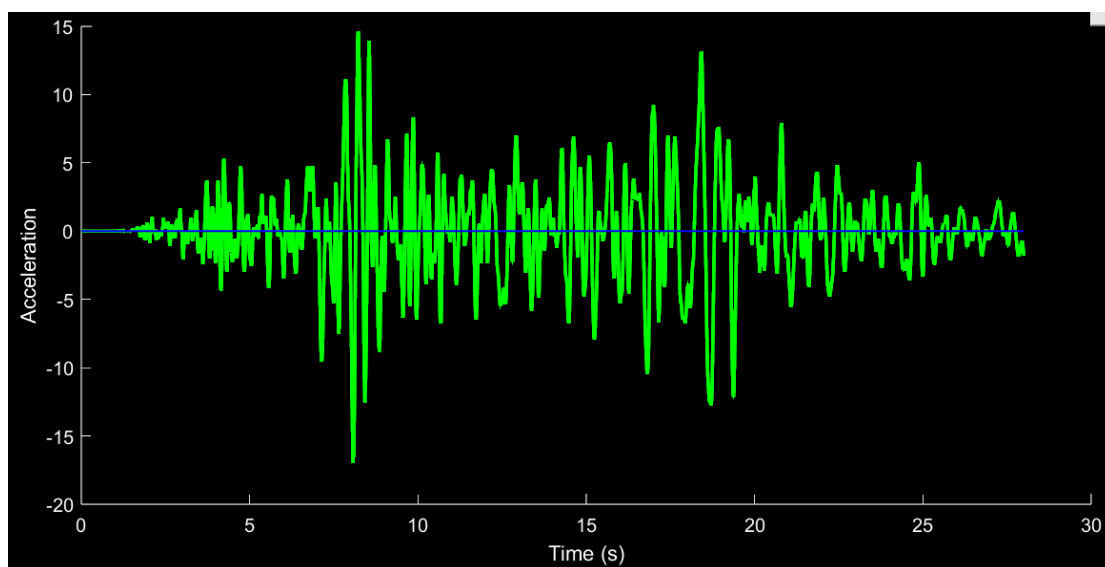
Εικόνα 103 Διάγραμμα Μετατόπισης Χρόνου ισόγειου 3η Καταγραφή Πύργου



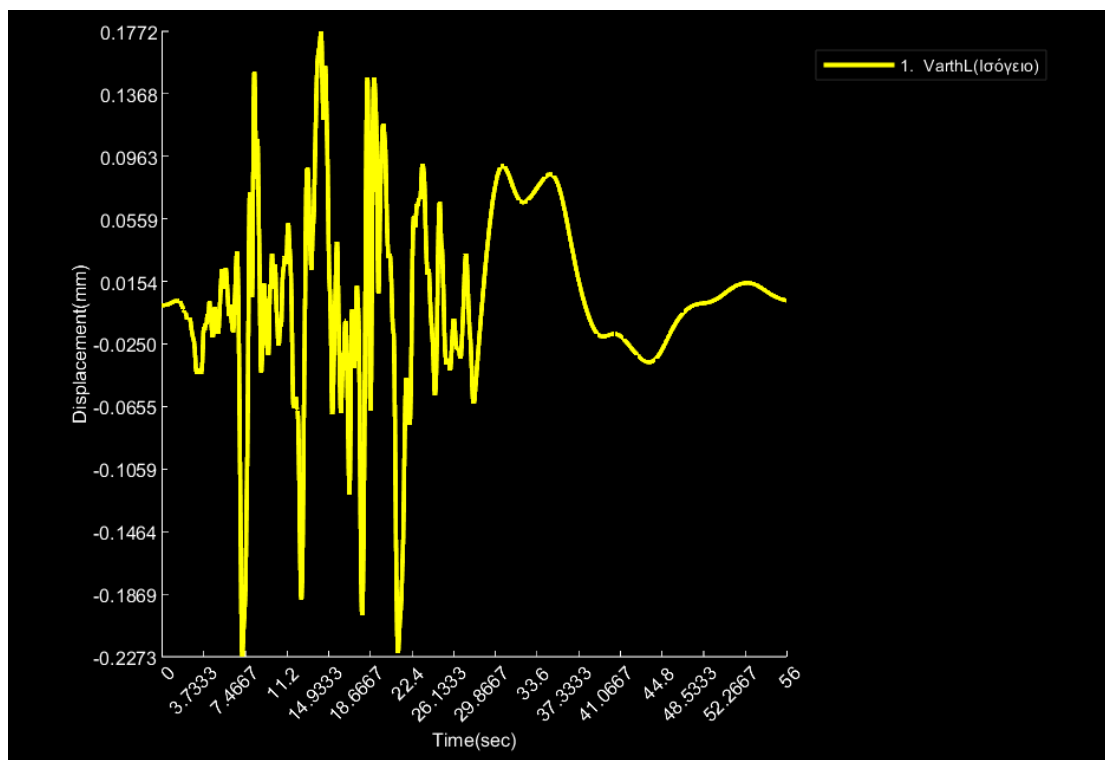
Εικόνα 104 Διάγραμμα Μετατόπισης Χρόνου ισόγειου και Α' Ορόφου 3ης Καταγραφής Πύργου
Μέγιστη μετατόπιση σε σημείο του Α' Ορόφου κατά 0.1114

Καταγραφές Σταθμού Βαρθολομιού

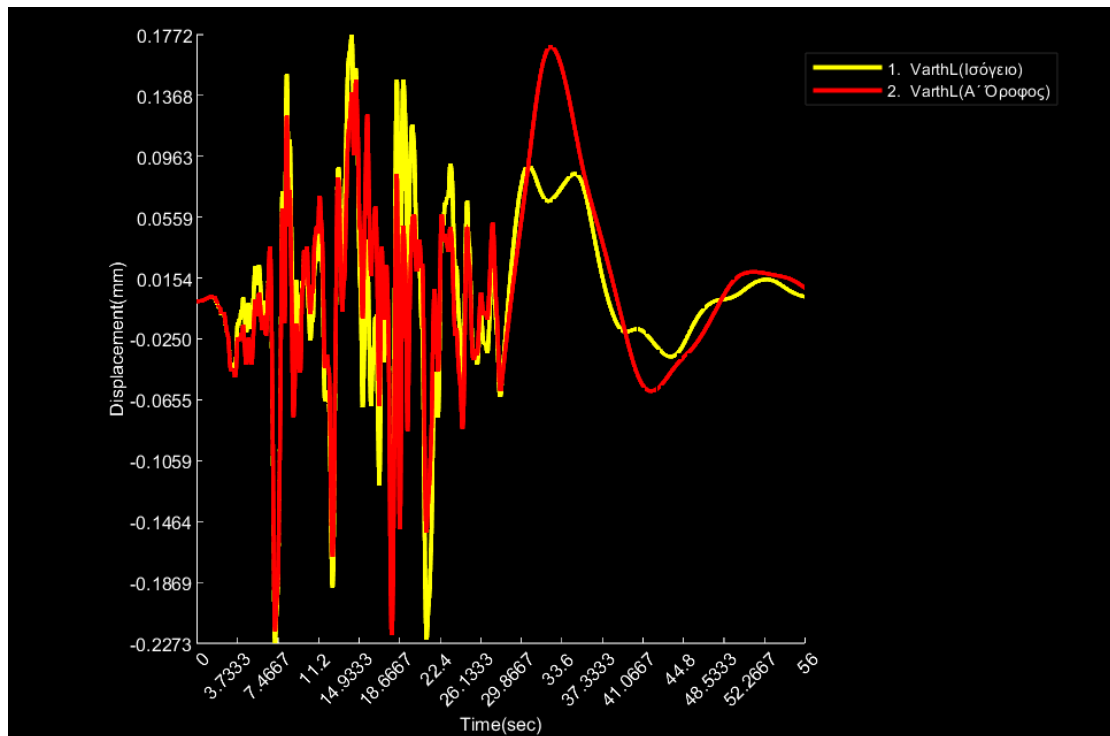
1η Καταγραφή Σταθμού Βαρθολομιού



Εικόνα 105 1η Καταγραφή Σταθμού Βαρθολομιού



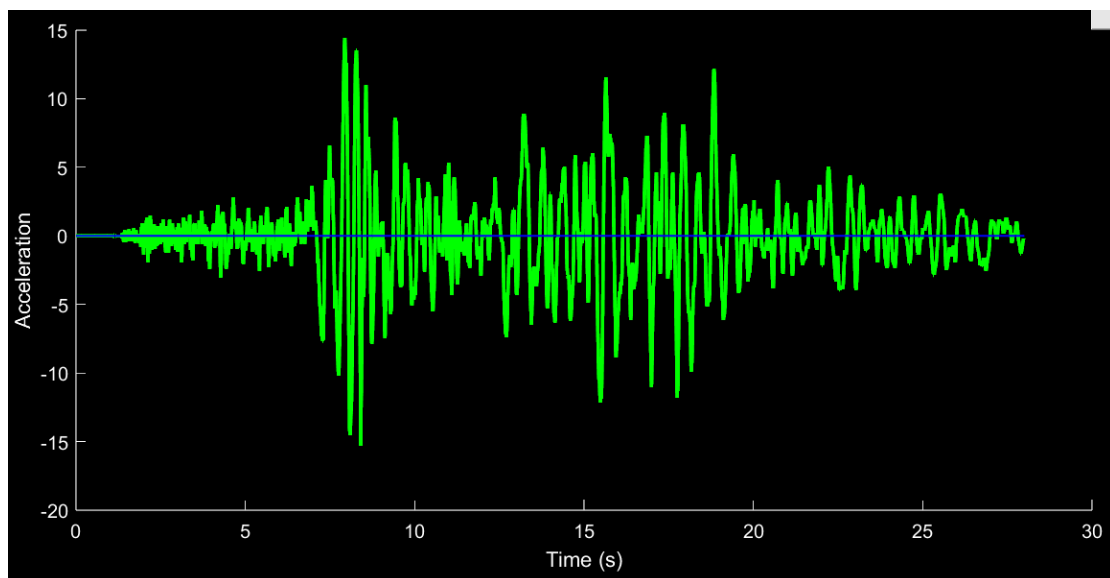
Εικόνα 106 Διάγραμμα Μετατόπισης Χρόνου ισογείου 1η Καταγραφή Βαρθολομιού



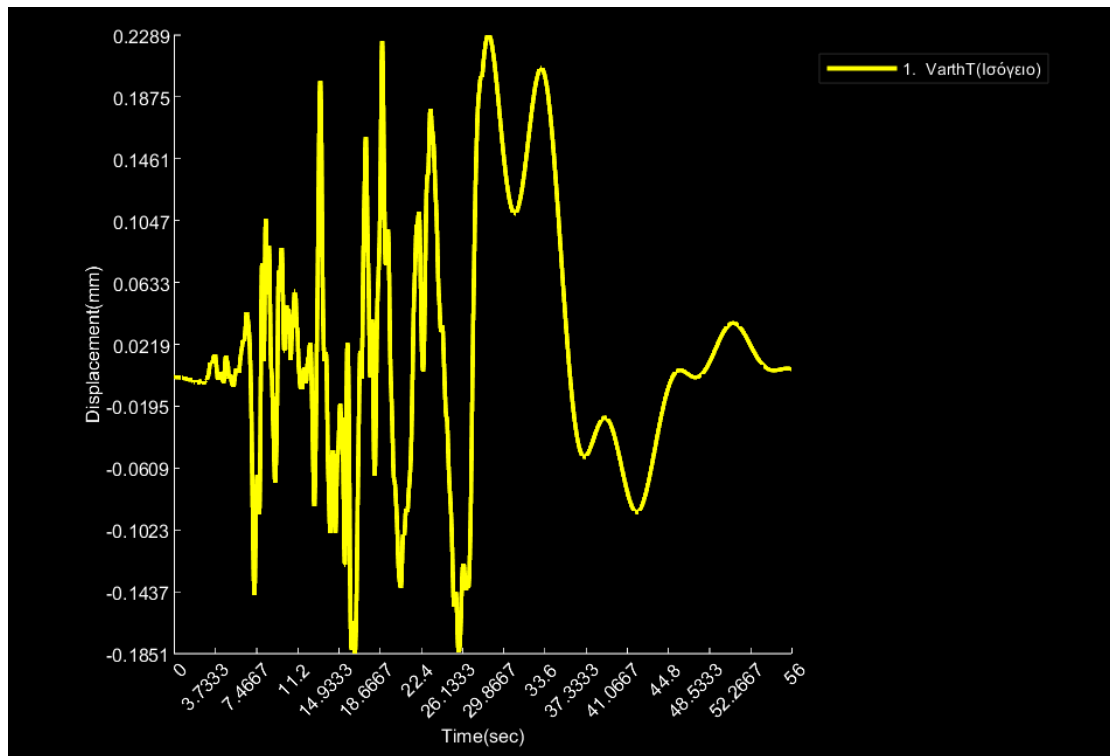
Εικόνα 107 Διάγραμμα Μετατόπισης Χρόνου ισόγειου και Α' Ορόφου της Καταγραφής Βαρθολομιού

Μέγιστη Μετατόπιση για σημείο του Α' Ορόφου κατά απόλυτη τιμή 0.2273mm

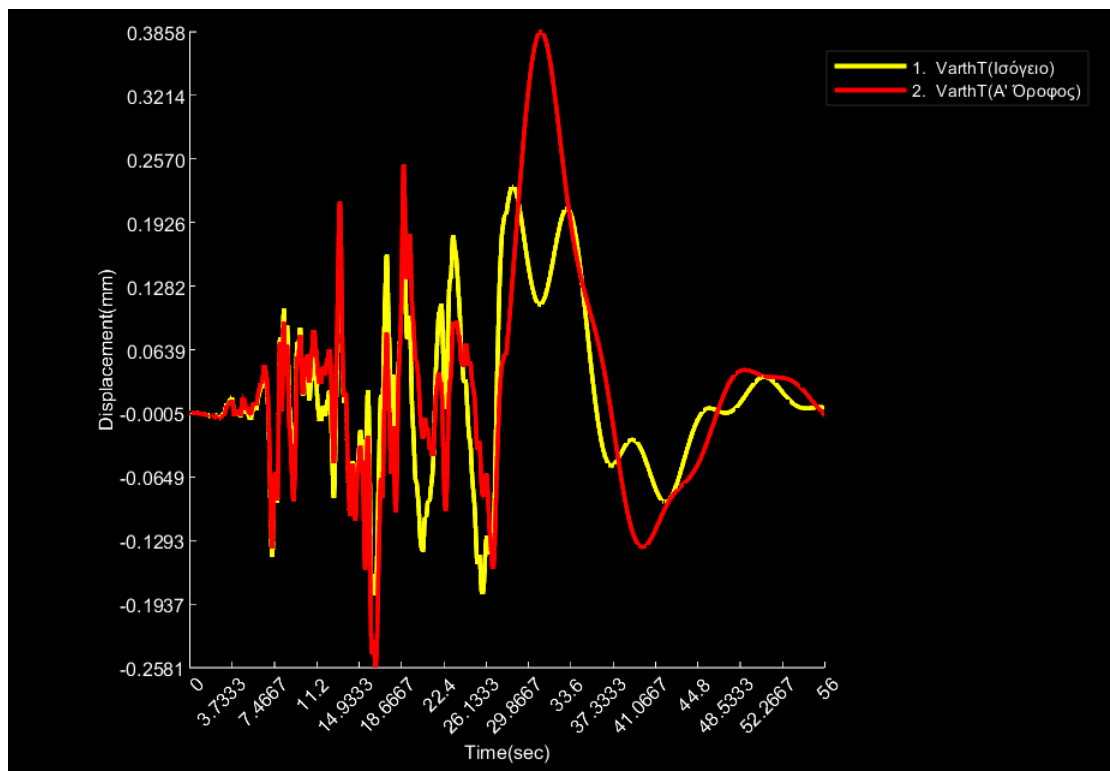
2^η Καταγραφή Σταθμού Βαρθολομιού



Εικόνα 108 2η Καταγραφή Σταθμού Βαρθολομιού



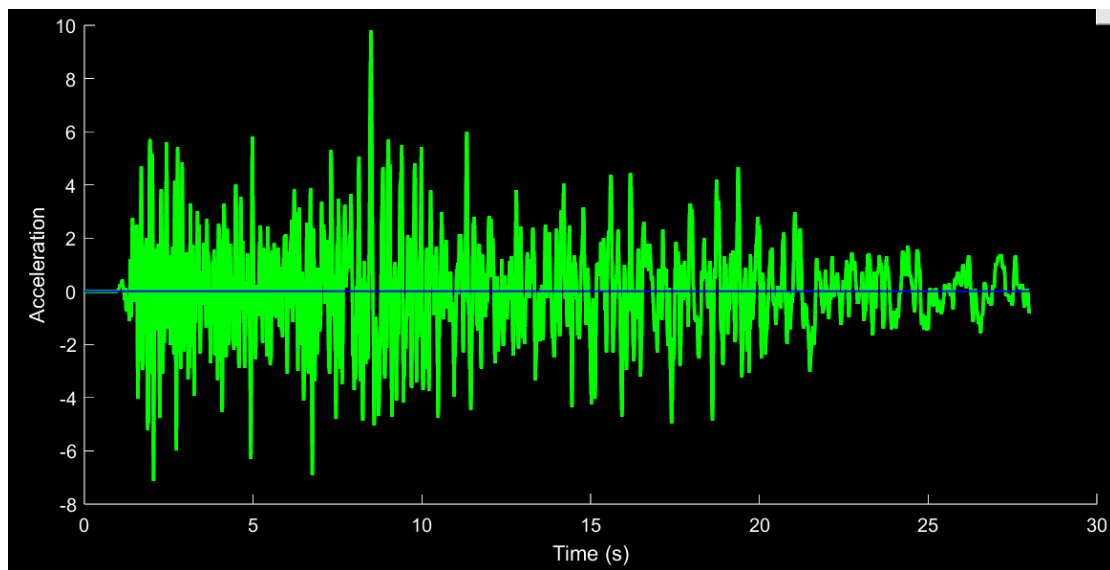
Εικόνα 109 Διάγραμμα Μετατόπισης Χρόνου ισόγειου 2η Καταγραφή Πύργου



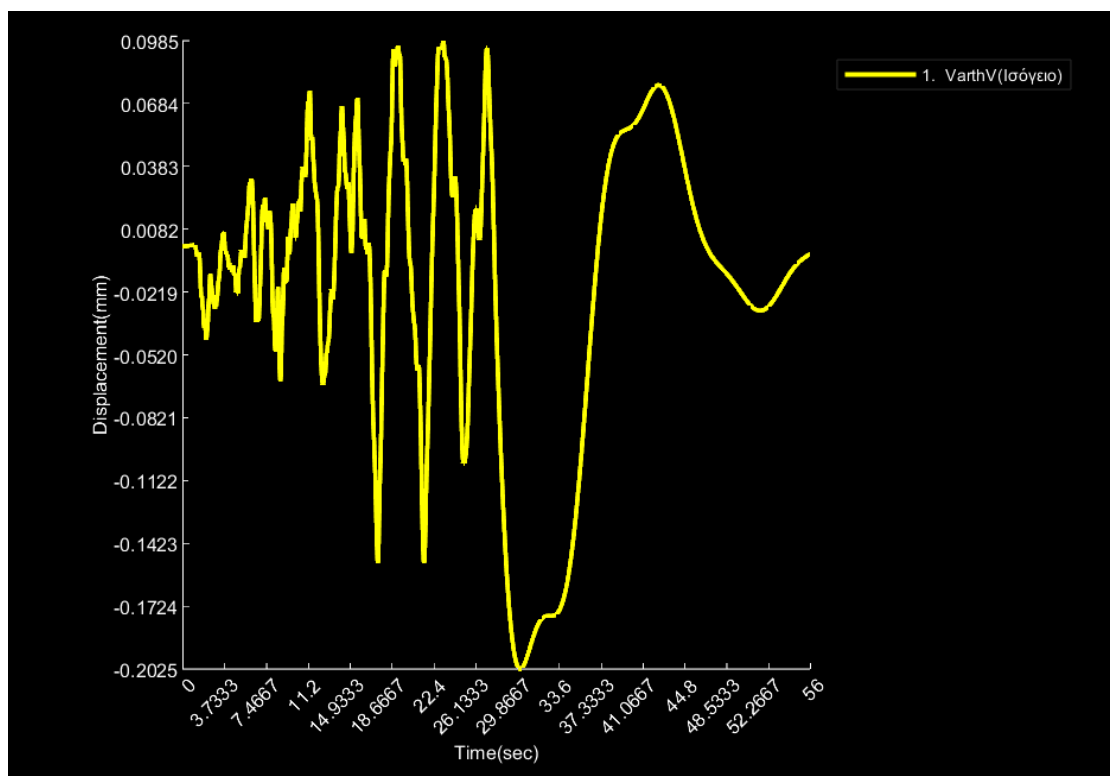
Εικόνα 110 Διάγραμμα Μετατόπισης Χρόνου ισόγειου και Α' Ορόφου 2ης Καταγραφής Βαρθολομιού

Μέγιστη Μετατόπιση για σημείο του Α' Ορόφου 0.3858mm

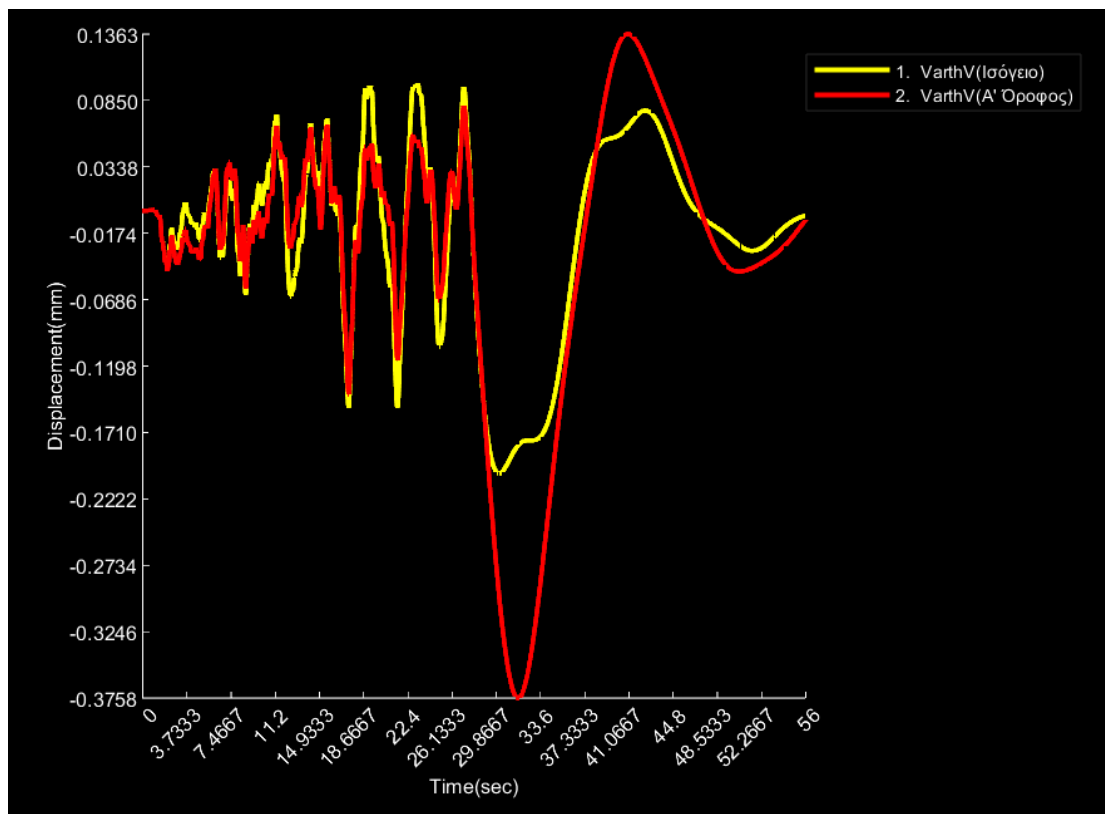
3η Καταγραφή Σταθμού Βαρθολομιού



Εικόνα 111 3η Καταγραφή Σταθμού Βαρθολομιού



Εικόνα 112 Διάγραμμα Μετατόπισης Χρόνου ισόγειου 3η Καταγραφή Βαρθολομιού



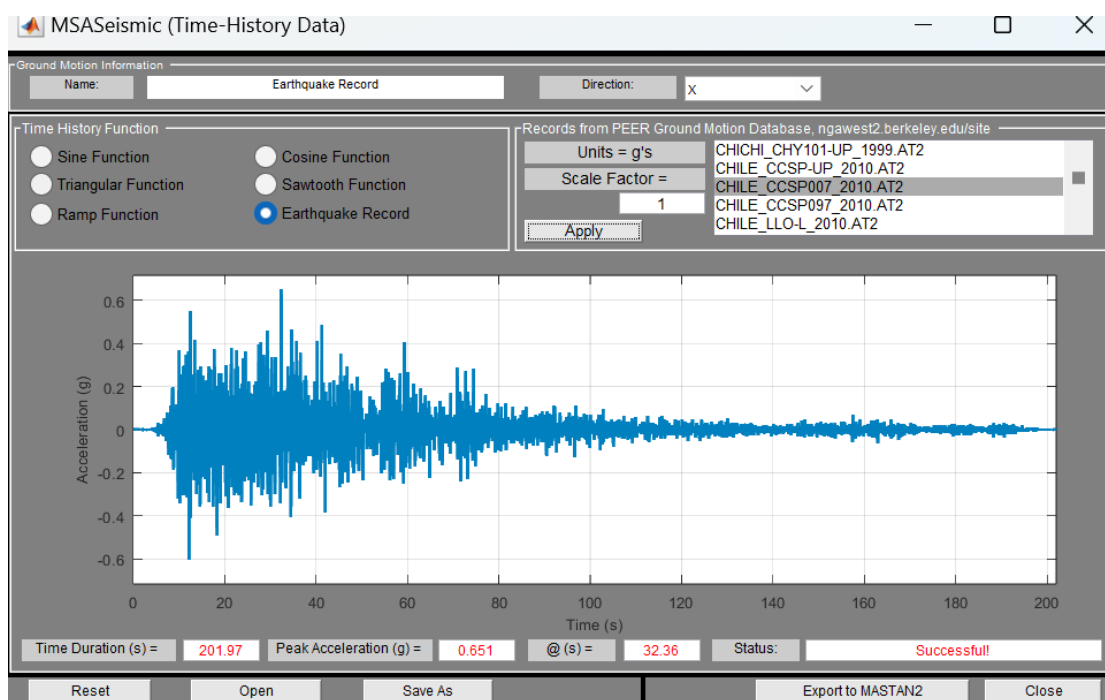
Εικόνα 113 Διάγραμμα Μετατόπισης Χρόνου ισόγειο και Α' Ορόφου 3ης Καταγραφής Βαρθολομιού

Μέγιστη Μετατόπιση για σημείο του Α' Ορόφου κατά απόλυτη τιμή 0.3758 mm

8.5 Παράδειγμα ταλάντωσης κτιρίου στον σεισμό Χιλής

Το Mastan2 έχει καταγεγραμμένους ορισμένες καταγραφές σεισμών. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε μία από αυτές ώστε να γίνει ανάλυση χρονοϊστορίας και να εκτιμηθεί η ταλάντωση του κτιρίου.

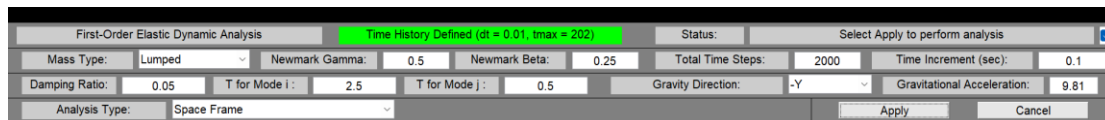
Μέσω του MSASeismic επιλέχθηκε μια συγκεκριμένη καταγραφή του σεισμού της Χιλής του 2010 με τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 114 Επιταχυνσιογράφημα Σεισμού Χιλής 2010

Στην συνέχεια αυτά τα χαρακτηριστικά ορίστηκαν ως η κίνηση του εδάφους για να δούμε την ταλάντωση του κτιρίου .

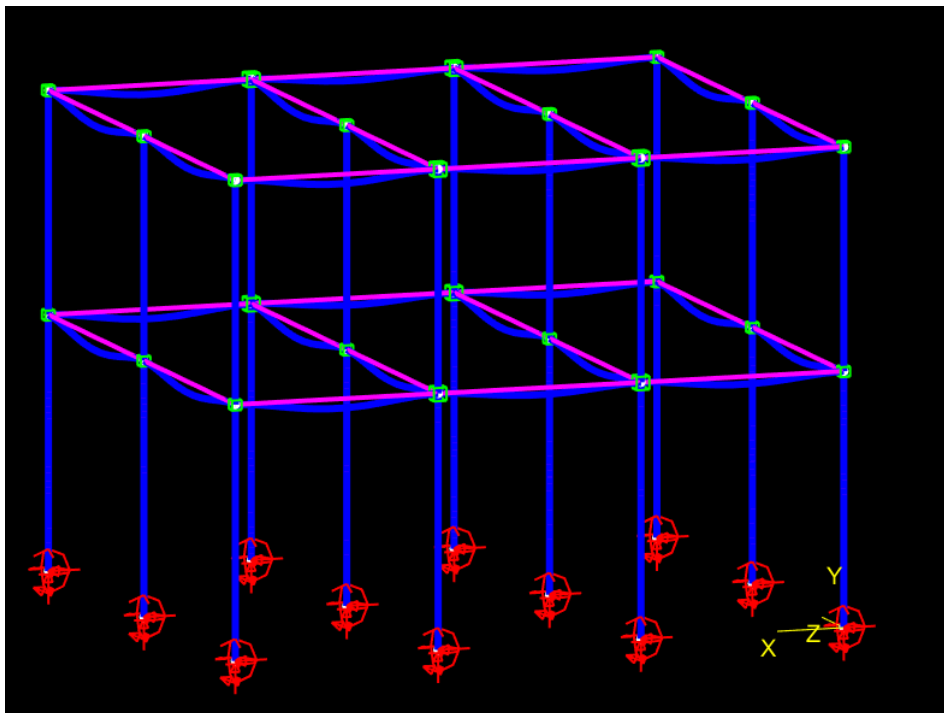
Το επόμενο βήμα είναι η επιλογή του τύπου με της ανάλυσης. Το Mastan2 έχει μοναδική επιλογή την ελαστική δυναμική ανάλυση η οποία και επιλέχθηκε.



Εικόνα 115 Επιλογή τύπου ανάλυσης για την σεισμική καταγραφή που εντάχθηκε

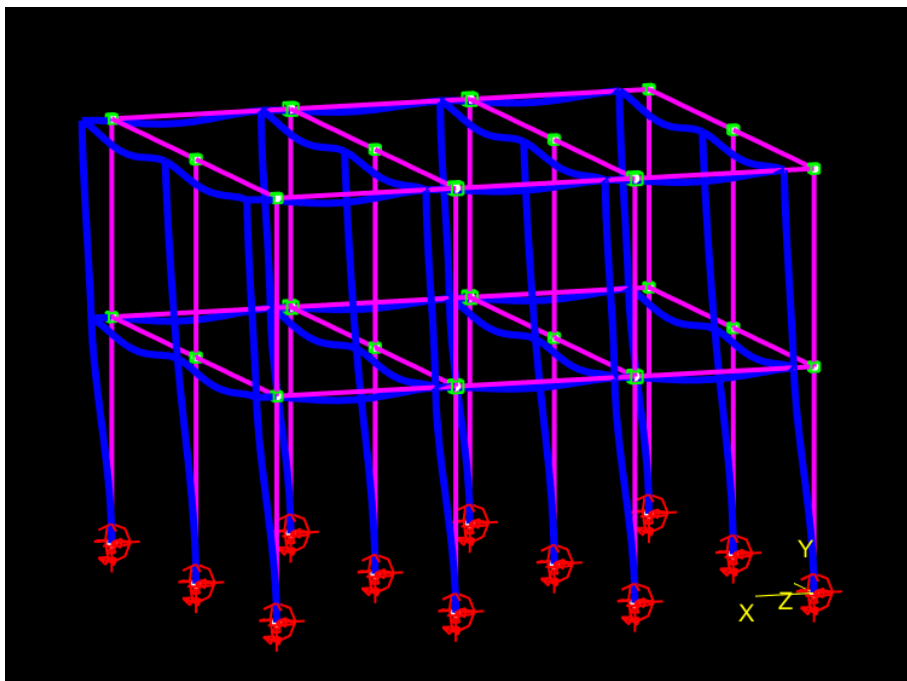
Παρακάτω φαίνεται η ταλάντωση του κτιρίου στον αντίστοιχο χρόνο

0 sec



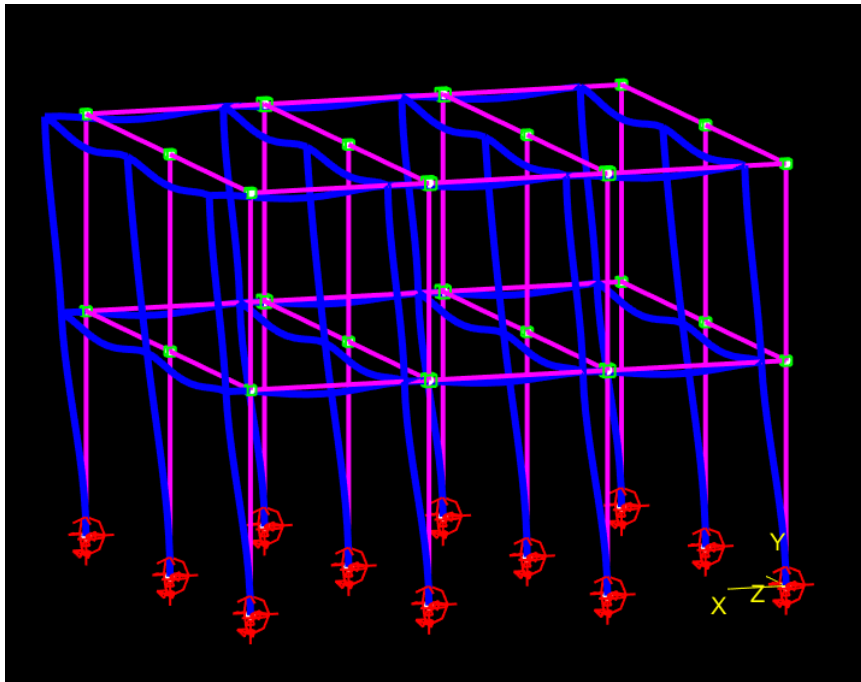
Εικόνα 116 Ταλάντωση κτιρίου σε χρόνο $T=0\text{sec}$

Η πρώτη μεγάλη ταλάντωση γίνεται σε χρόνο 12 sec



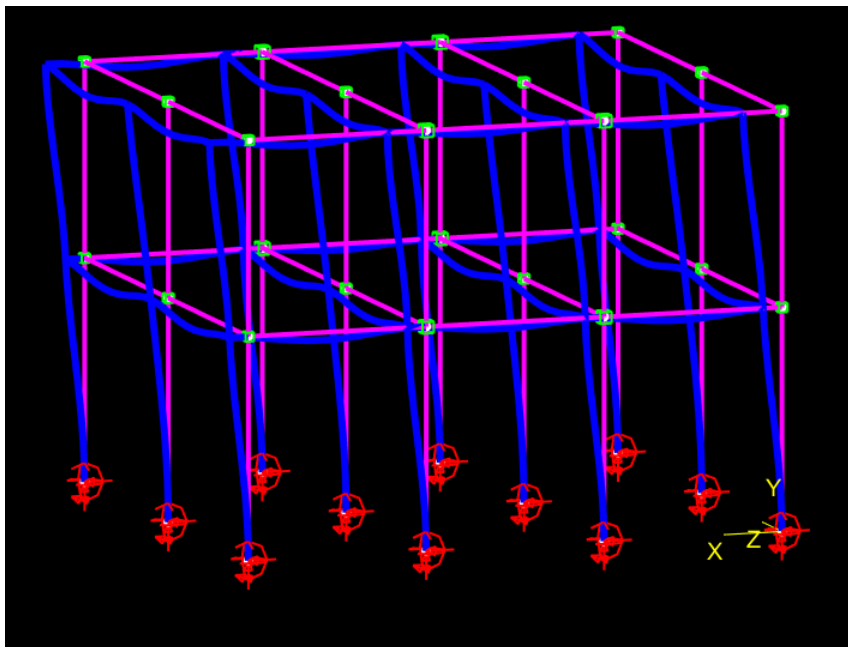
Εικόνα 117 Ταλάντωση κτιρίου σε χρόνο $T=12\text{sec}$

13 sec αύξηση ταλάντωσης



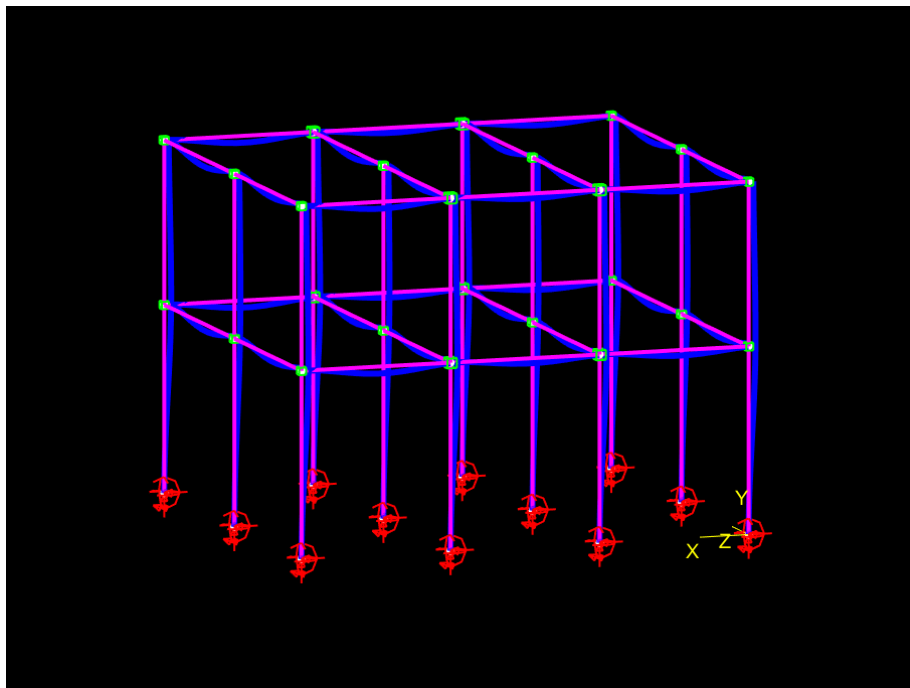
Εικόνα 118 Ταλάντωση κτιρίου σε χρόνο $T=13\text{sec}$

14 sec μέγιστη πρώτη ταλάντωση(προς τα αριστερά)



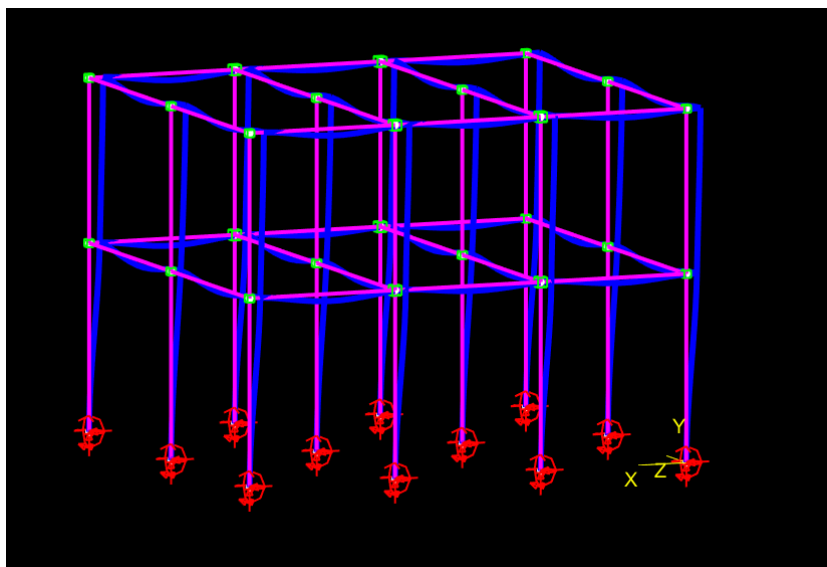
Εικόνα 119 Ταλάντωση κτιρίου σε χρόνο $T=14\text{sec}$

16 sec επιστροφή στην αρχική θέση



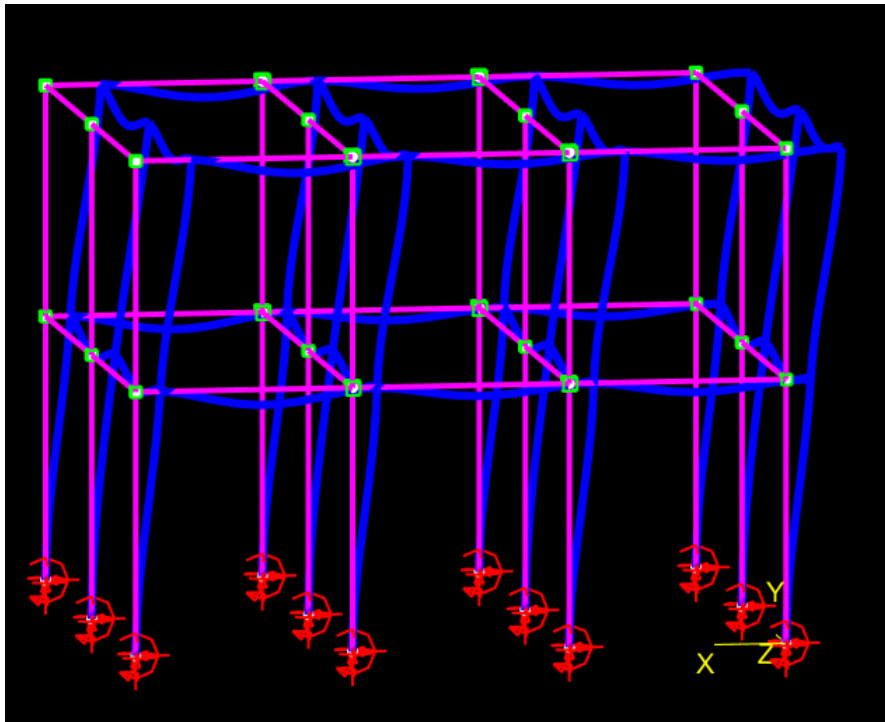
Εικόνα 120 Ταλάντωση κτιρίου σε χρόνο $T=16\text{sec}$

16.4 sec εκκίνηση ταλάντωσης προς τα δεξιά



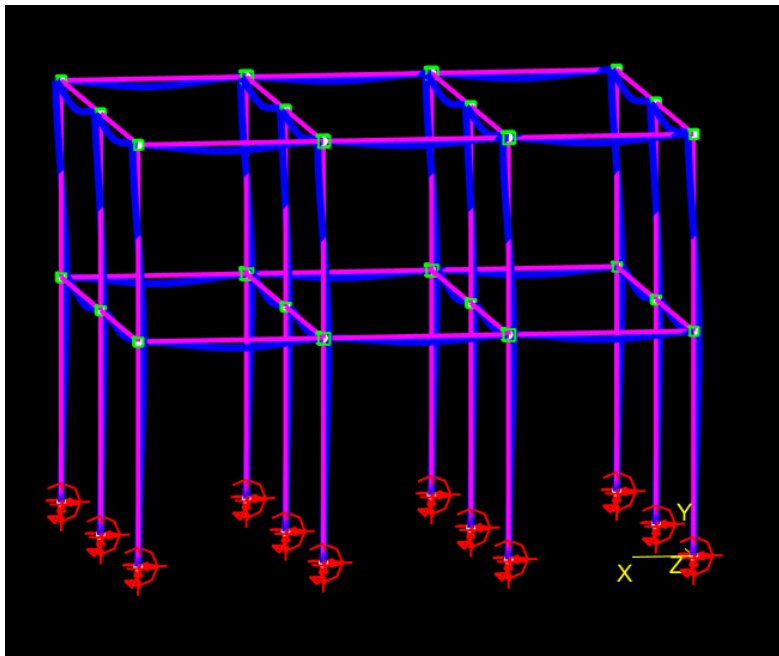
Εικόνα 121 Ταλάντωση κτιρίου σε χρόνο $T=16.4\text{sec}$

17.2 sec



Εικόνα 122 Ταλάντωση κτιρίου σε χρόνο $T=17.4\text{sec}$

21.3 sec (επιστροφή στην αρχική θέση)



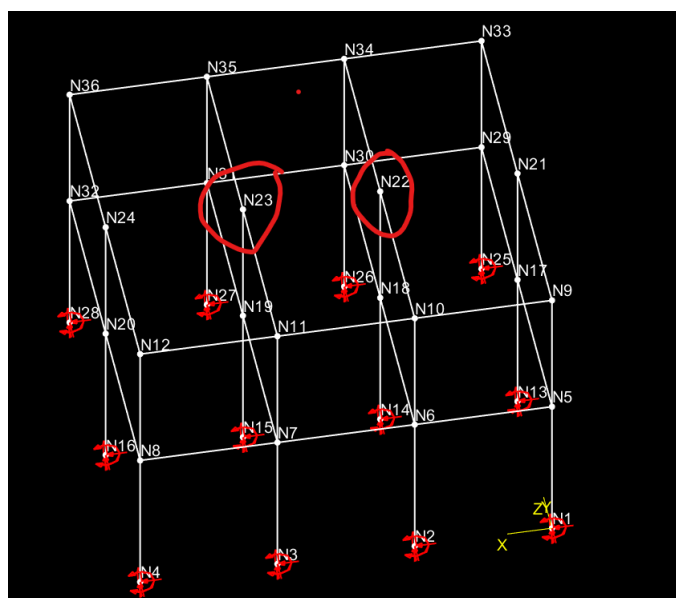
Εικόνα 123 Ταλάντωση κτιρίου σε χρόνο $T=21.3\text{sec}$

Αυτή είναι η ταλάντωση που πραγματοποιείται στο κτίριο με τον σεισμό της Χιλής που εντάχθηκε. Από τα 50 sec έως και την λήξη του (200sec) η ταλάντωση ελαττώνεται σταδιακά μέχρι το σημείο που γίνεται οριακά μηδενική και έτσι δεν υπάρχει κάποια διαφορά στο παραμορφωμένο σχήμα με το κανονικό.

8.6 Προσπάθεια εκτίμησης της απόκρισης για διαφοροποιημένα στοιχεία τα οποία πιθανώς δεν είναι διαθέσιμα από οπτικές καταγραφές περιβλήματος.

8.6.1 ΕΠΙΒΟΛΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ κατά ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Χ'Χ

Ας υποθέσουμε ότι αλλάζουμε την διατομή των υποστυλωμάτων που βρίσκονται από το κόμβο 22 και 23 και κάτω, δηλαδή και του ισογείου και του Α' Ορόφου.



Εικόνα 124 Υποστυλώματα με διαφοροποιημένη διατομή και χαρακτηριστικά

Μειώνουμε την διατομή των υποστυλωμάτων κατά 50% . Άρα τα νέα χαρακτηριστικά της διατομής είναι

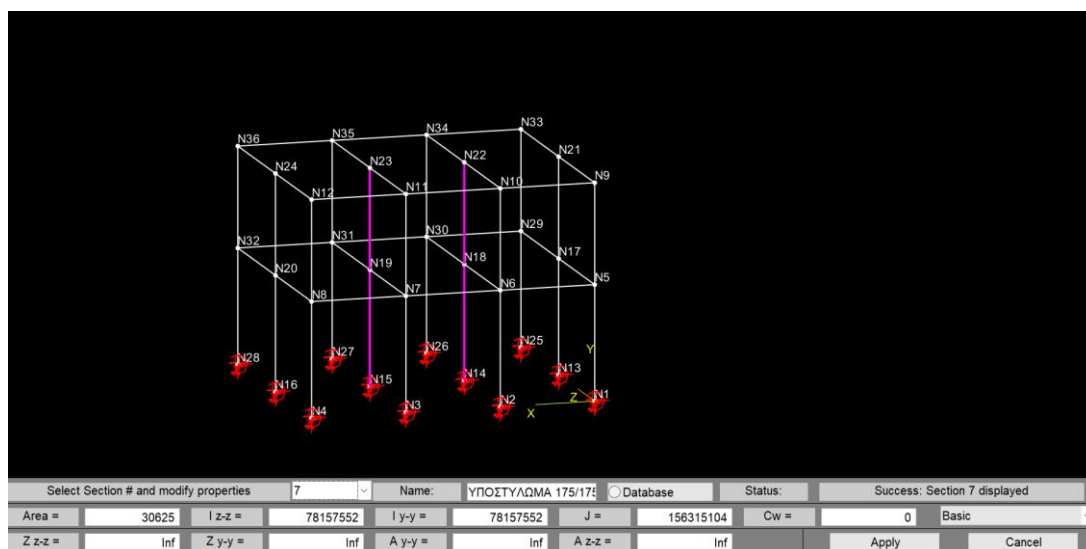
Προηγούμενη Διατομή b=350mm , h= 350 mm

Νέα Διατομή b= 175 mm , h=175mm

Area: b x h = 175 mm x 175 mm = 30625 mm² και είναι το εμβαδόν της διατομής

$I_{y-y}=I_{z-z} = \frac{b \times h^3}{12} = \frac{175 \times 175^3}{12} = 78157552 \text{ mm}^4$ και είναι ο συντελεστής αδράνειας

$J = \frac{b \times h}{12} (b^2 + h^2) = 156315104 \text{ mm}^4$ και είναι η πολική ροπή αδράνειας

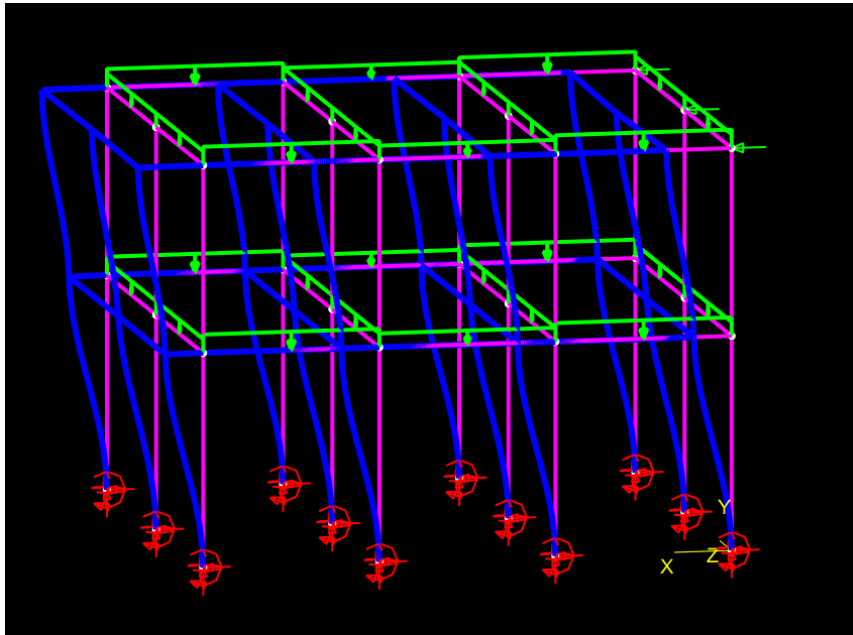


Εικόνα 125 Νέες ιδιότητες υποστυλωμάτων

Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του κτιρίου μένουν ίδια

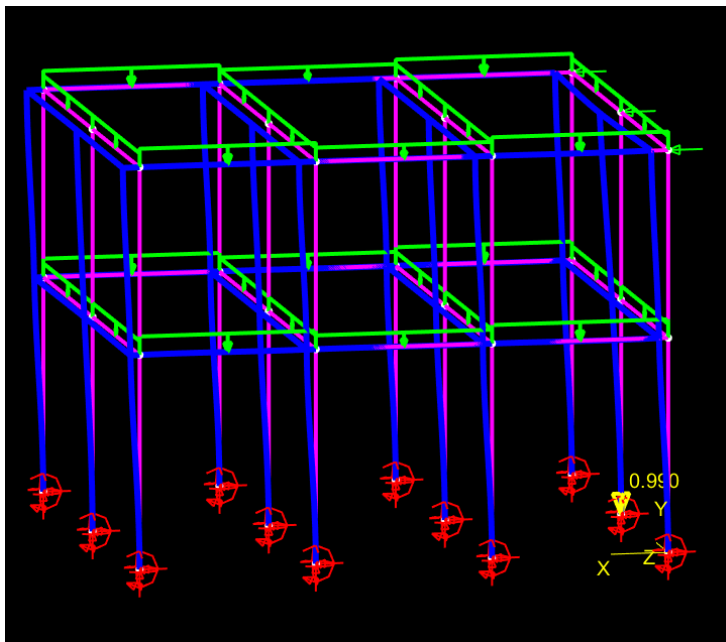
Πραγματοποιήθηκε η ίδια διαδικασία με πριν, δηλαδή σταδιακή αύξηση του οριζόντιου φορτίου(P) ώστε να παρατηρηθεί η εμφάνιση πλαστικών αρθρώσεων στην κατασκευή.

Υπό φορτίο 1000kN



Εικόνα 126 Ανελαστική Ανάλυση υπό φορτίο 1000kN

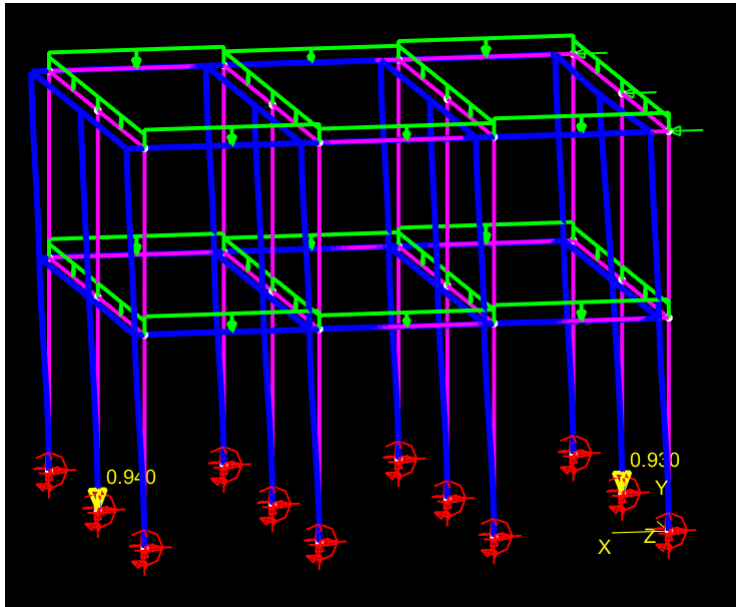
Υπό φορτίο 1500kN



Εικόνα 127 Εμφάνιση πρώτης πλαστικής άρθρωσης

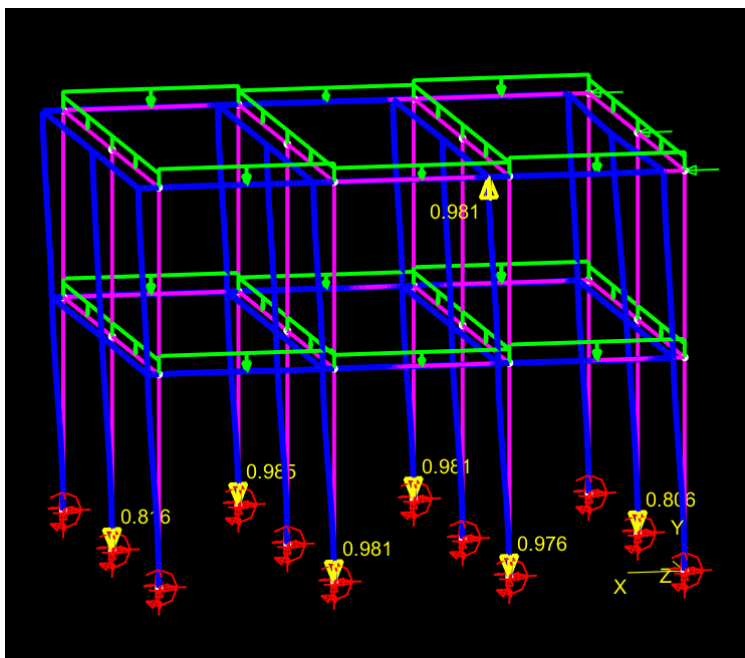
Η πρώτη πλαστική άρθρωση εμφανίζεται πλέον με εφαρμογή φορτίου 1500kN

Υπό φορτίο 1600kN



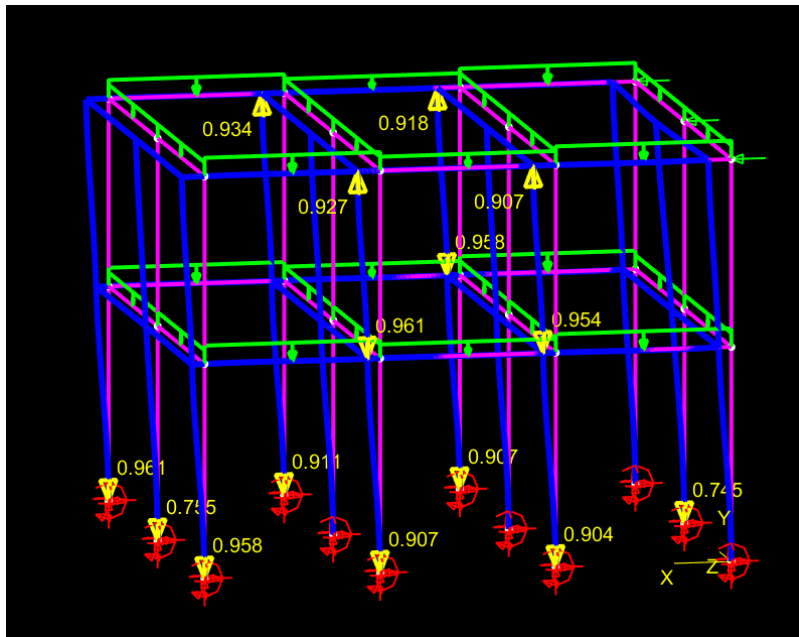
Εικόνα 128 Ανελαστική Ανάλυση υπό φορτίο 1600 kN

Υπό φορτίο 1850kN



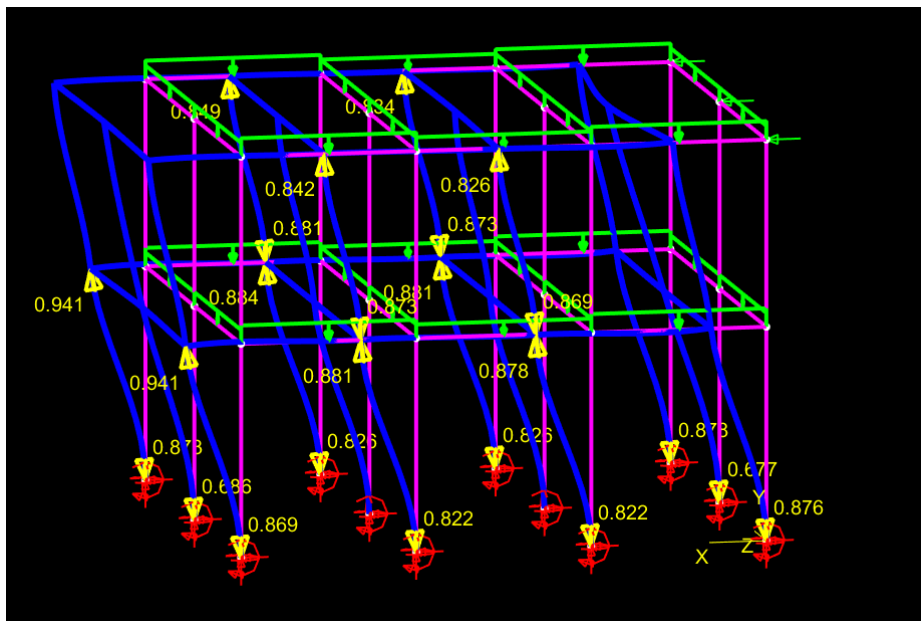
Εικόνα 129 Ανελαστική Ανάλυση υπό φορτίο 1850 kN

Υπό φορτίο 2000kN



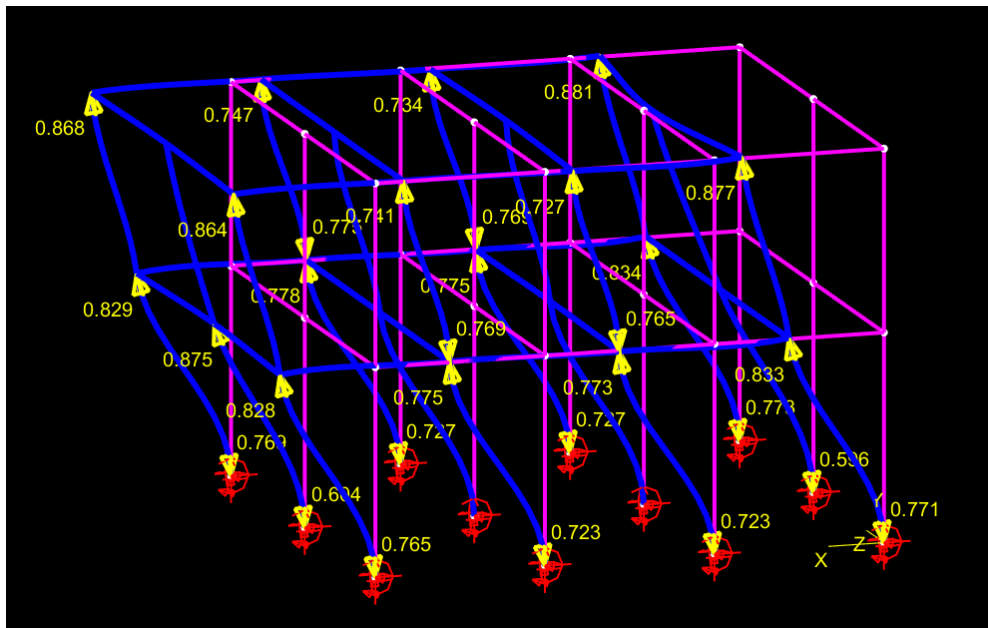
Εικόνα 130 Ανελαστική Ανάλυση υπό φορτίο 2000 kN

Υπό φορτίο 2200kN



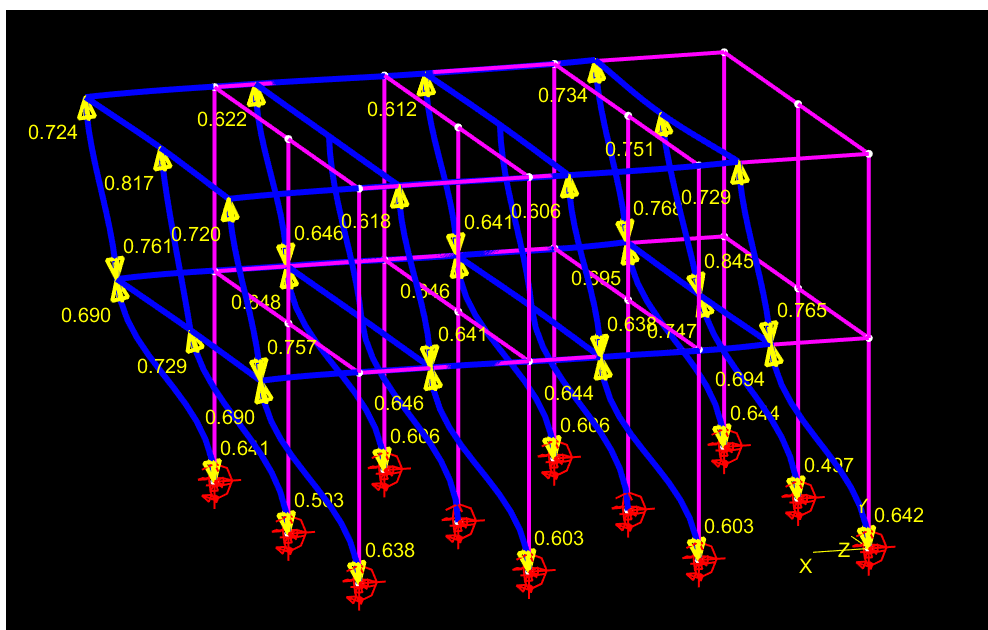
Εικόνα 131 Σταδιακή αύξηση φορτίου και εμφάνιση πλαστικών αρθρώσεων

Υπό φορτίο 2500kN



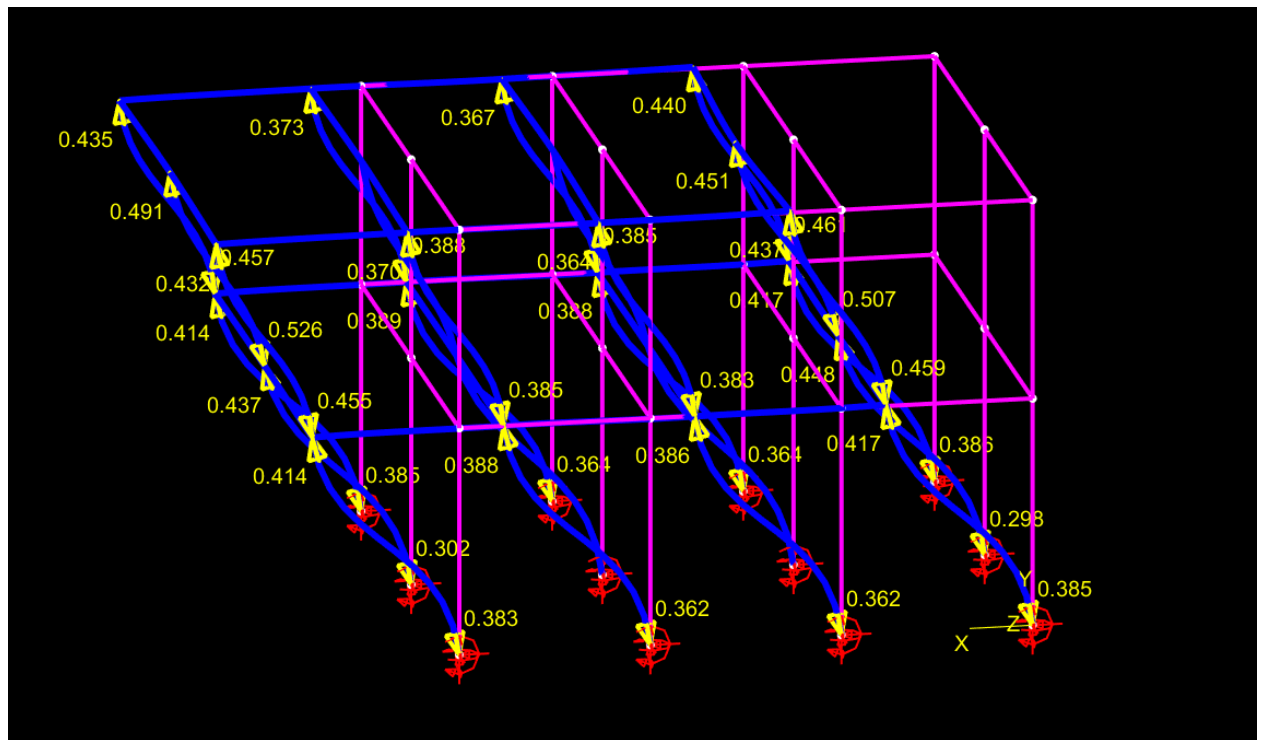
Εικόνα 132 Ανελαστική Ανάλυση υπό φορτίο 2500 kN

Υπό φορτίο 3000kN



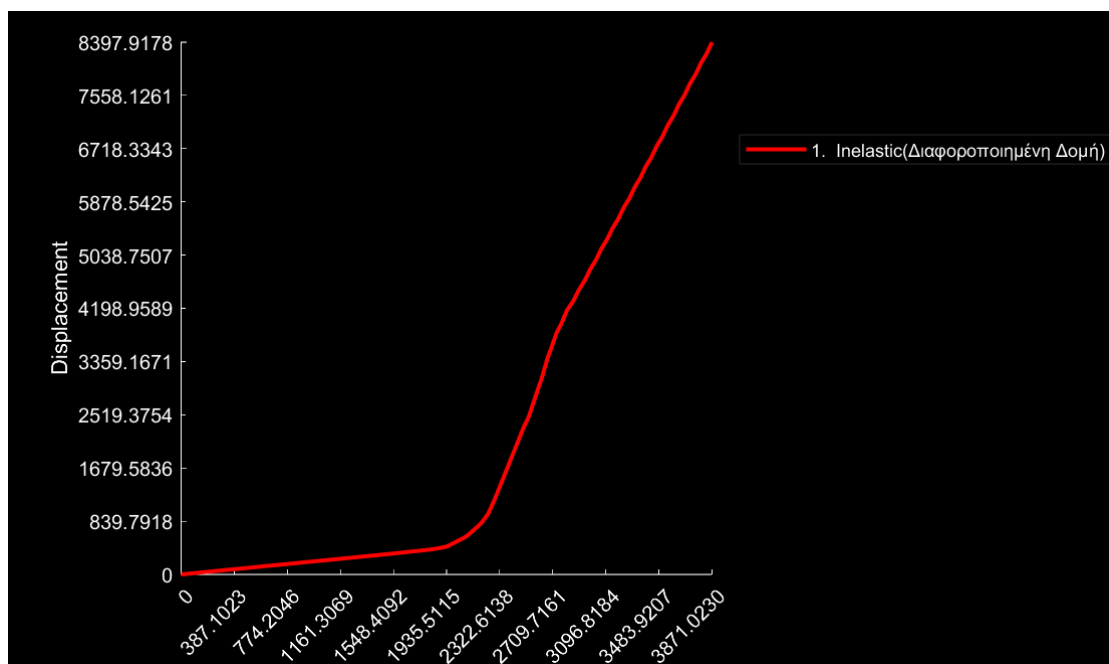
Εικόνα 133 Ανελαστική Ανάλυση υπό φορτίο 3000 kN

Υπό φορτίο 5000kN



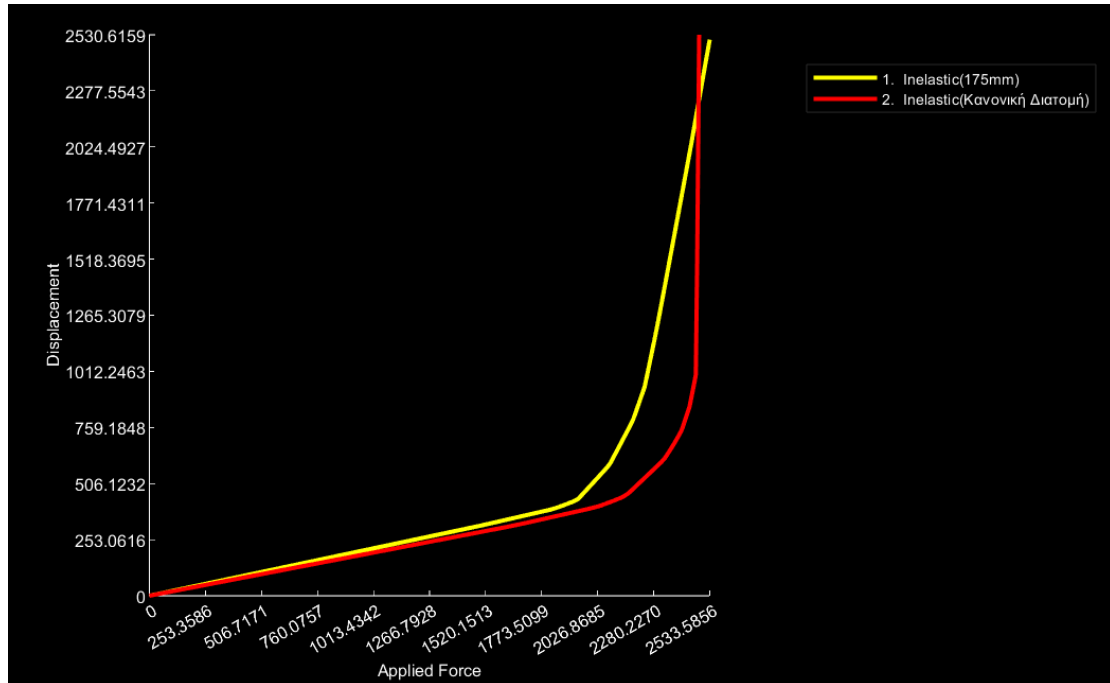
Εικόνα 134 Τελική αύξηση φορτίου και εμφάνιση πλαστικών αρθρώσεων

Διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης



Εικόνα 135 Διάγραμμα Δύναμης Μετατόπισης Διαφοροποιημένης Δομής

Σύγκριση Διαγραμμάτων Δύναμης-Μετατόπισης (επιβολή οριζόντιων φορτίσεων)



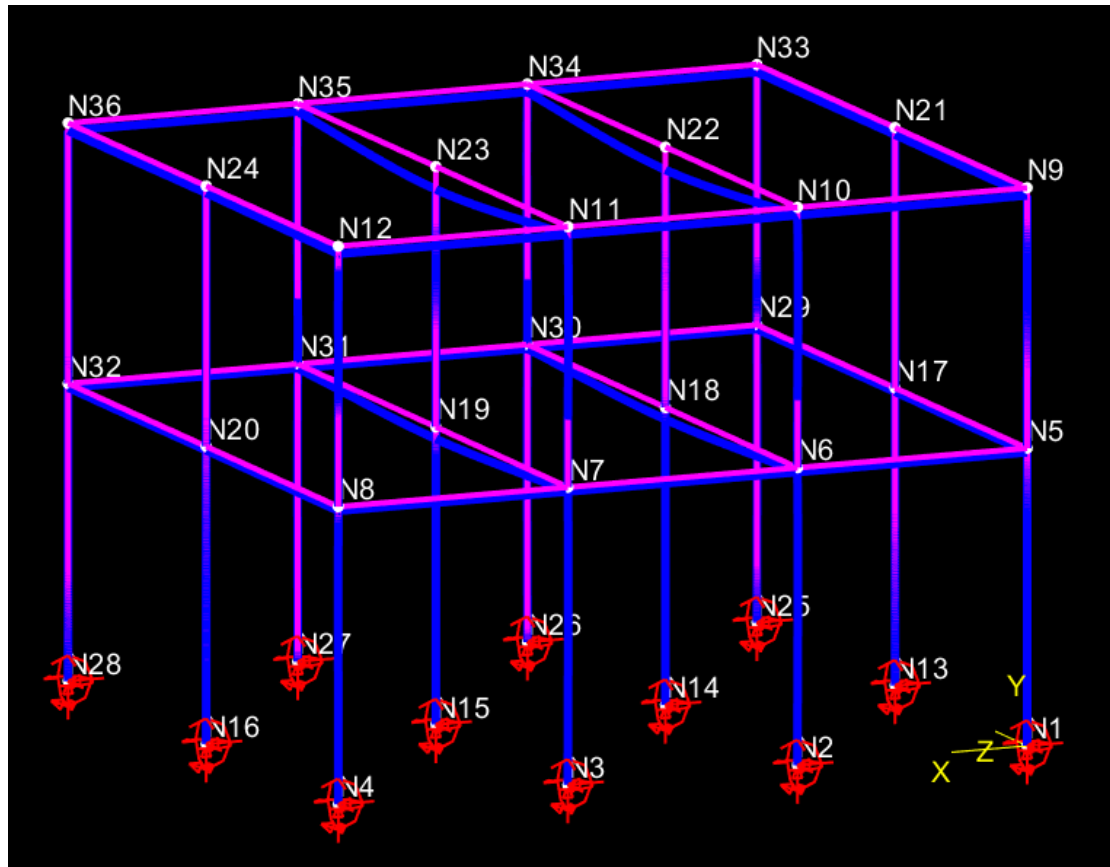
Εικόνα 136 Σύγκριση Διαγραμμάτων Δύναμης Μετατόπισης (x'x)

Όπως φαίνεται η κίτρινη καμπύλη του σεναρίου αλλαγής διατομής εμφανίζει πιο γρήγορα διαρροές και έτσι μπορούμε να πούμε ότι η κατασκευή αυτή θα καταρρεύσει γρηγορότερα κάτω από τις ίδιες συνθήκες φόρτισης.

8.6.2 ΕΠΙΒΟΛΗ ΚΑΘΕΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ κατά ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Υ'Υ

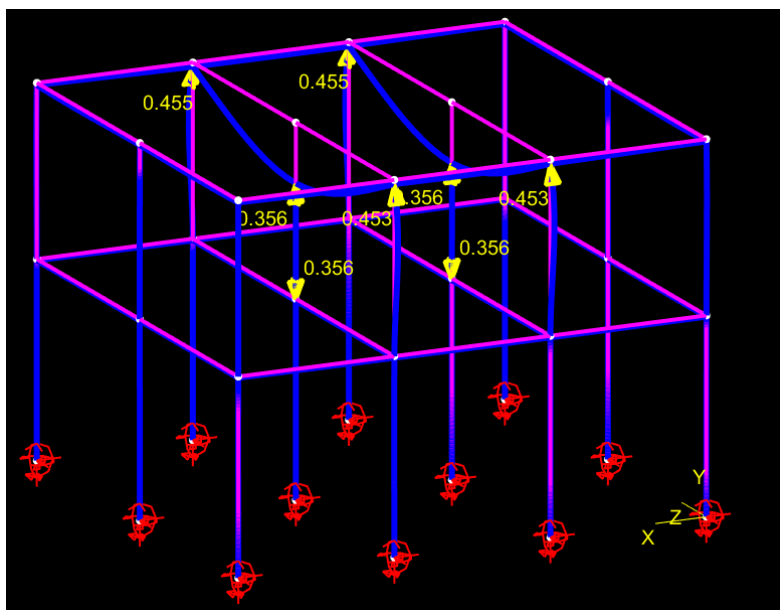
Σε αυτή την ανάλυση εφαρμόστηκε σταδιακά κάθετο φορτίο στην οροφή της κατασκευής δηλαδή κατά τον άξονα $y'-y$ έτσι ώστε να διαπιστωθεί η εμφάνιση πλαστικών αρθρώσεων.

Μέχρι την επιβολή φορτίου 7000 kN δεν παρατηρείται εμφάνιση πλαστικής άρθρωσης όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα(Εικόνα 138).

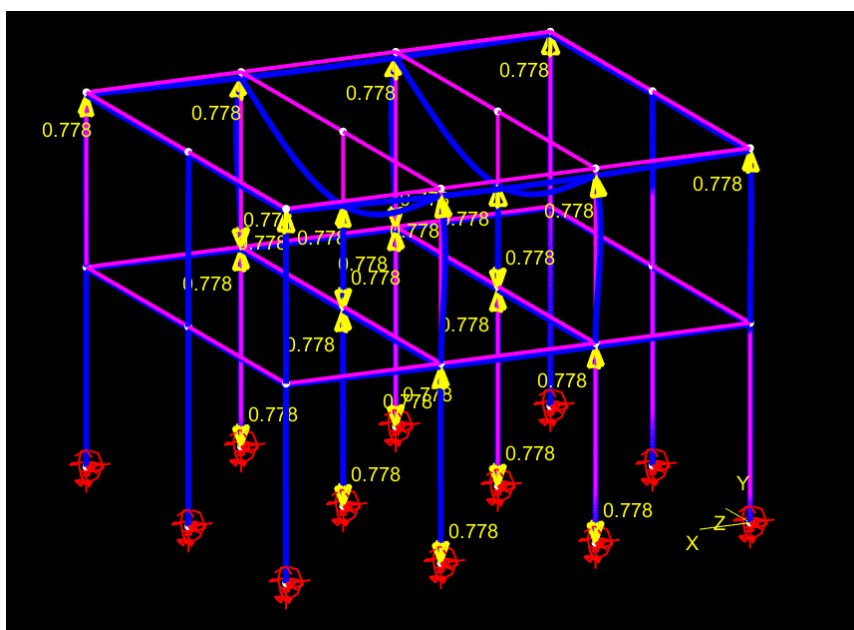


Εικόνα 137 Ανελαστική ανάλυση υπό φορτίο 7000 kN

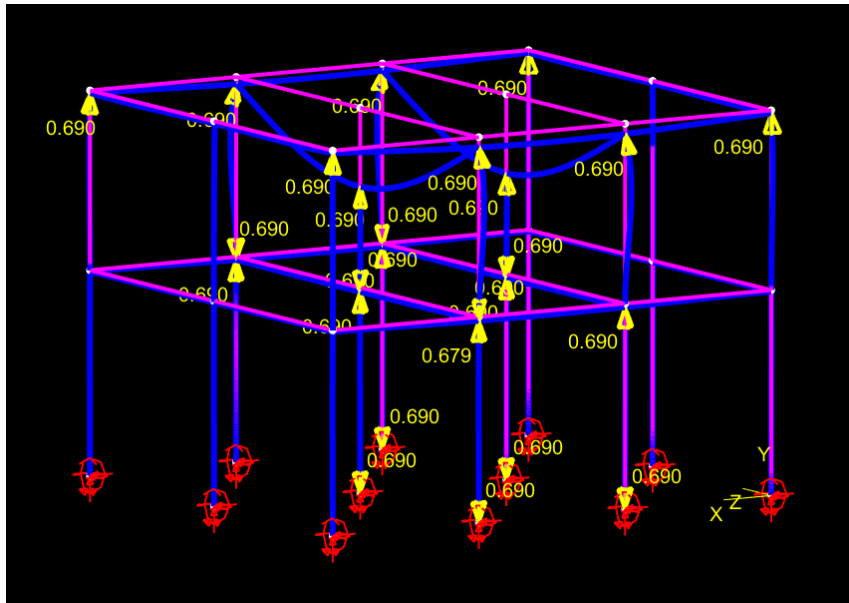
Οι πρώτες πλαστικές αρθρώσεις εμφανίζονται μετά την αύξηση του φορτίου σε 8000kN και συγκεκριμένα στα υποστυλώματα με την διαφοροποιημένη διατομή. Είναι μια λογική εξήγηση αφού μετά την αλλαγή της διατομής των υποστυλωμάτων αυτών η αντοχή τους είναι μικρότερη και υπόκεινται ευκολότερα/γρηγορότερα σε διαρροές(Εικόνα 139).



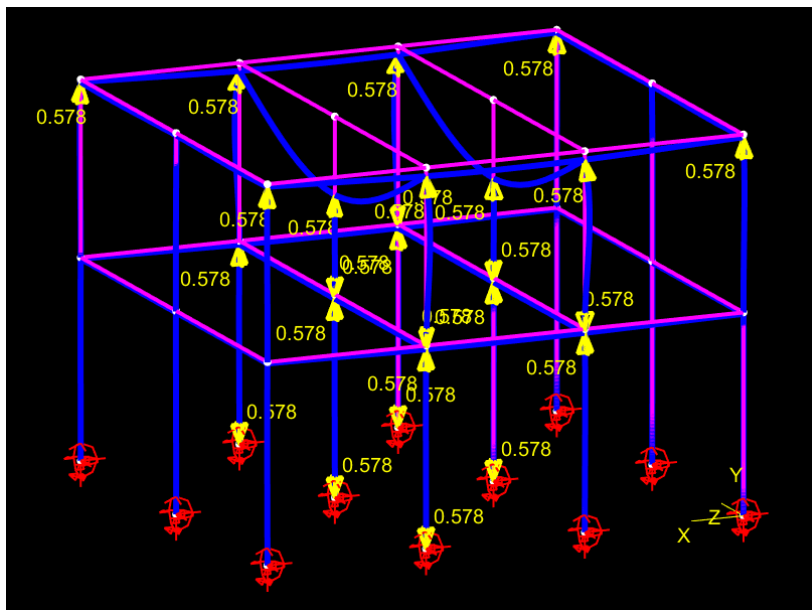
Εικόνα 140 Εμφάνιση πλαστικών αρθρώσεων υπό φορτίο 20200kN



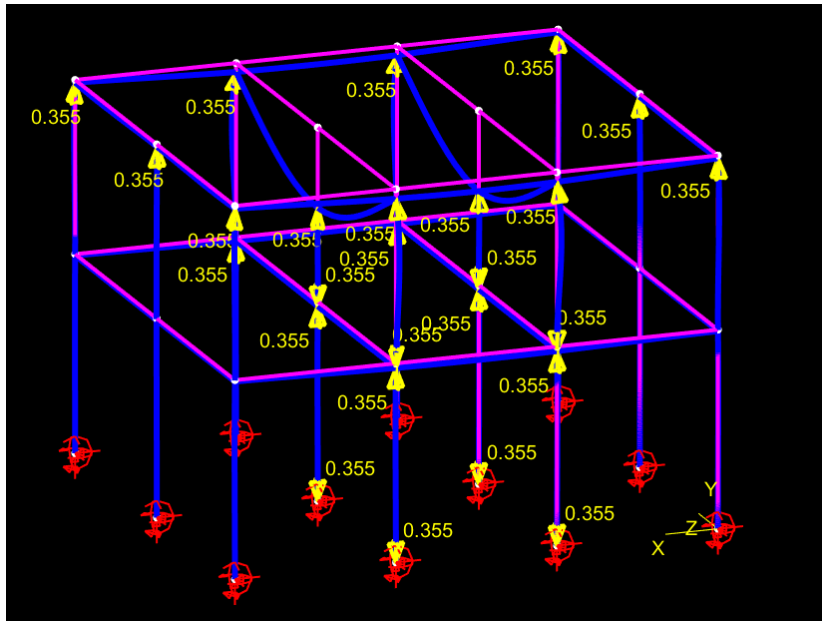
Εικόνα 141 Εμφάνιση πλαστικών αρθρώσεων υπό φορτίο 22000kN



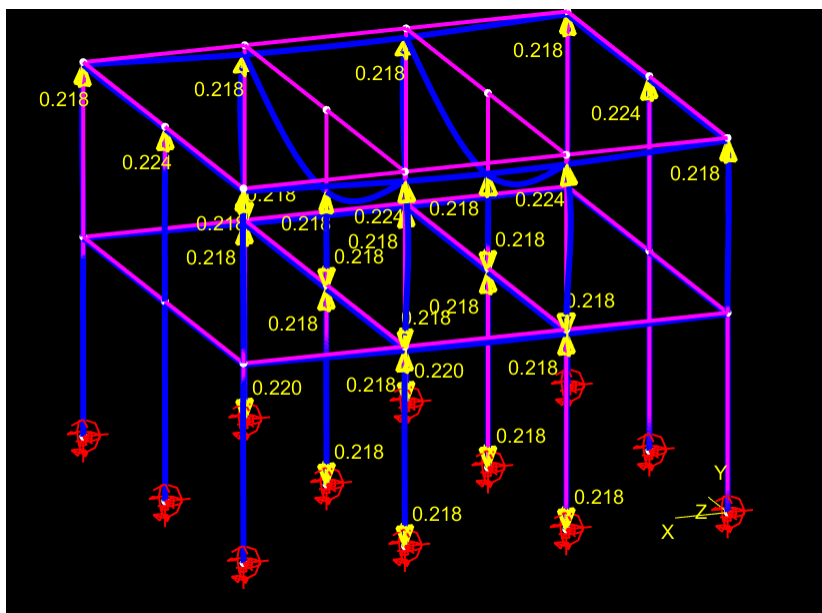
Εικόνα 142 Εμφάνιση πλαστικών αρθρώσεων υπό φορτίο 25000kN



Εικόνα 143 Εμφάνιση πλαστικών αρθρώσεων υπό φορτίο 30000kN

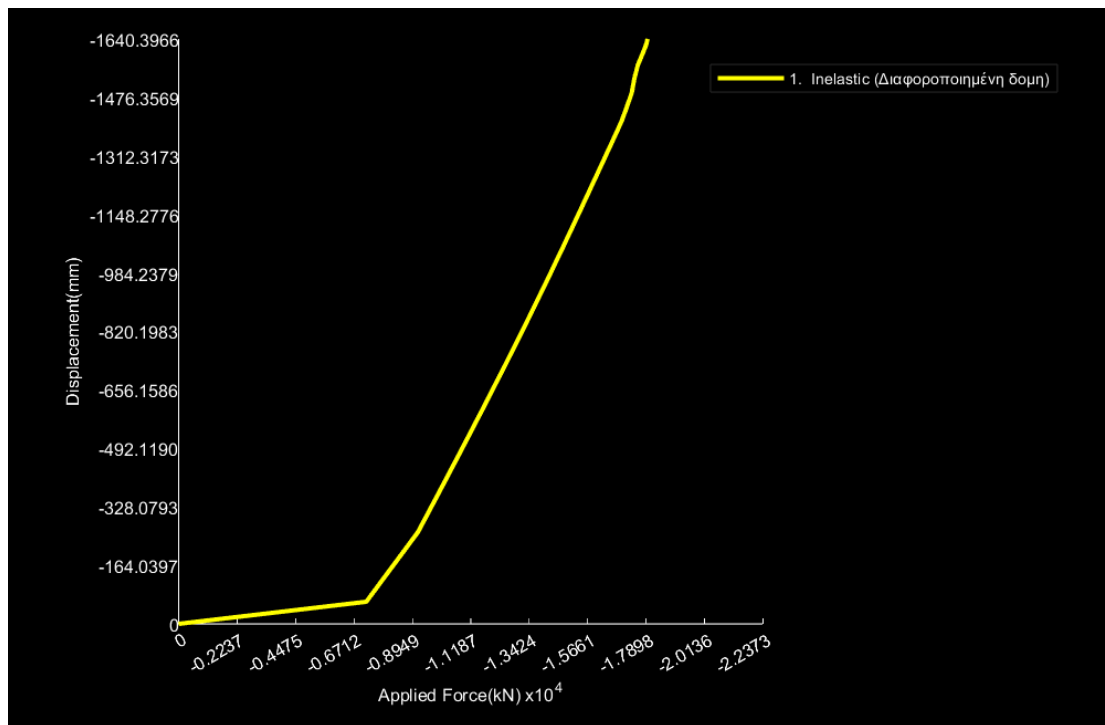


Εικόνα 144 Εμφάνιση πλαστικών αρθρώσεων υπό φορτίο 50000kN



Εικόνα 145 Εμφάνιση πλαστικών αρθρώσεων υπό φορτίο 80000kN

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΥΝΑΜΗΣ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ



Εικόνα 146 Διάγραμμα Δύναμης Μετατόπισης ανελαστικής ανάλυσης διαφοροποιημένης διατομής

8.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όσον αφορά την ελαστική ανάλυση πρώτης τάξης τα διαγράμματα των αξονικών δυνάμεων έδειξαν ότι οι μεγαλύτερες καταπονήσεις αναπτύσσονται στα κατώτερα επίπεδα της κατασκευής, κάτι που είναι αναμενόμενο καθώς τα φορτία μεταφέρονται προς τα κάτω. Επίσης η ελαστική ανάλυση έδειξε ότι οι αρχικές αποκρίσεις της κατασκευής σε στατικά και δυναμικά φορτία μπορούν να υπολογιστούν με ακρίβεια, επιτρέποντας την αναγνώριση των περιοχών που παρουσιάζονται οι πρώτες αστοχίες. Οι διατμητικές δυνάμεις παρουσίασαν τις μέγιστες τιμές τους στα στηρίγματα των δοκών, υποδεικνύοντας την ανάγκη για ενίσχυση αυτών των περιοχών για την αποφυγή διατμητικών αστοχιών. Οι ροπές κάμψης εντοπίστηκαν κυρίως στα άκρα των δοκών, με ιδιαίτερη έμφαση στις περιοχές κοντά στα στηρίγματα, όπου απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή για την αποτροπή αστοχίας λόγω κάμψης. Στην συνέχεια η ανάλυση των πρώτων 10 ιδιομορφών αποκάλυψε τη δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής υπό σεισμική φόρτιση. Εντοπίστηκαν οι περιοχές που παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες παραμορφώσεις, υποδεικνύοντας την ανάγκη για τοπικές ενισχύσεις.

Η επόμενη ανάλυση που πραγματοποιήθηκε ήταν ανελαστική ανάλυση υπό την επιβολή οριζόντιου φορτίου, η οποία έδειξε την ανάπτυξη πλαστικών αρθρώσεων αρχικά σε όλα τα υποστυλώματα του ισογείου, αλλά να είναι εμφανές η γρηγορότερη εμφάνιση στους στύλους 9,10,11,12 με αποτέλεσμα να αστοχήσουν και να δημιουργήσουν μαλακό όροφο. Η ανάλυση αυτή υποδεικνύει την ανάγκη ενίσχυσης των περιοχών που παρουσιάζουν υψηλές παραμορφώσεις.

Η διαφοροποίηση στη διατομή των υποστυλωμάτων οδήγησε σε αύξηση των παραμορφώσεων και νωρίτερη εμφάνιση πλαστικών αρθρώσεων, γεγονός που υπογραμμίζει τη σημασία της σωστής διαστασιολόγησης και ενίσχυσης των δομικών στοιχείων

Επισημαίνεται ακόμα, όπως φαίνεται από το ιστορικό της δημιουργίας των πλαστικών αρθρώσεων, ότι τα δομικά στοιχεία του πρώτου ορόφου έχουν εμφανίσει σποραδικές πλαστικές αρθρώσεις.

Τέλος όσον αφορά την ανάλυση σεισμικών διεγέρσεων κατά τον σεισμό της Αχαΐας-Ηλείας οι καταγραφές έδειξαν σημαντικές μετατοπίσεις τόσο σε σημεία του ισογείου όσο και σε σημεία του Α' Ορόφου της κατασκευής, αλλά στα περισσότερα διαγράμματα παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες μετατοπίσεις σε σημεία του Α' Ορόφου. Οι διαφοροποιήσεις στις μετατοπίσεις υποδεικνύουν την ανάγκη για ενίσχυση των υποστυλωμάτων, ειδικά σε περιοχές όπου οι μετατοπίσεις ήταν μεγαλύτερες.

Συμπερασματικά η χρήση προχωρημένων λογισμικών, όπως το MASTAN2, επιτρέπει την ακριβέστερη προσομοίωση και αξιολόγηση της δομικής απόκρισης υφιστάμενων κατασκευών. Πιο συγκεκριμένα η ελαστοπλαστική ανάλυση διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στις σύγχρονες μηχανολογικές πρακτικές, προσφέροντας μια βαθύτερη εικόνα της συμπεριφοράς των υλικών, ενισχύοντας τη δομική αξιοπιστία και επιτρέποντας το σχεδιασμό στιβαρών κατασκευών. Τα πλεονεκτήματα και οι εφαρμογές της ελαστοπλαστικής ανάλυσης καταδεικνύουν τη σημασία της στη διασφάλιση της δομικής ασφάλειας και απόδοσης, αν και με ορισμένες προκλήσεις που απαιτούν περαιτέρω έρευνα και καινοτομία. Καθώς η τεχνολογία προχωρά, η αντιμετώπιση των περιορισμών της ελαστοπλαστικής ανάλυσης θα είναι κρίσιμη για την αξιοποίηση του πλήρους δυναμικού της για μελλοντικές μηχανικές προσπάθειες.

ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΤΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ



Εικόνα 147 Συνολική εικόνα κατάρρευσης(Φιτνέογλου, Χαραλαμπίδη, 2008).



Εικόνα 148 Άποψη της κατασκευής από της ανατολική όψη(Φιτνέογλου, Χαραλαμπίδη, 2008).



Εικόνα 149 Υποστύλωμα K12 πρώτου ορόφου. Το αντίστοιχο υποστύλωμα του ισογείου έχει καταστραφεί πλήρως



Εικόνα 150 Υποστύλωμα Κ9 πρώτου ορόφου. Το αντίστοιχο υποστύλωμα του ισογείου έχει καταστραφεί πλήρως(Φιτνέογλου, Χαραλαμπίδη, 2008).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Belinha, J.; Aires, M.; Rodrigues, Daniel.E.S. (2023). Elastoplastic Analysis of Frame Structures Using Radial Point Interpolation Meshless

<https://doi.org/10.3390/app132312591>.

Clough, R. W. & Penzien, J. (1993). Dynamics of Structures. McGraw-Hill Education.

Dolšek, M., & Fajfar, P. (2008). The effect of masonry infills on the seismic response of a four-storey reinforced concrete frame - a deterministic assessment. Engineering Structures, 1991–2001.

<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.01.001>.

European Committee for Standardization. (2004). Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. EN 1992-1-1.

Ferreira, T. M., Mendes, N., & Silva, R. (2019). Multiscale seismic vulnerability assessment and retrofit of existing masonry buildings. Buildings.

<https://doi.org/10.3390/buildings9040091>

Federal Emergency Management Agency (FEMA 356): “Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of buildings”

R. Raveendra Babu, Gurmail S. Benipal and Arbind K. Singh (2016). Constitutive modeling of concrete

Asian journal of civil engineering (Building and Housing) (2005) PAGES 211-246, Indian Institute of Technology, Delhi, India Indian Institute of Technology, Guwahati, India (Article in Asian Journal of Civil Engineering)

Karabinis, A. I., Professor, Ph.D. Civil Engineer, Democritus University of Thrace & Eleftheriadou, A. K. (Ph.D. Candidate, MSc Civil Engineer, Democritus University of Thrace). (2007) Vulnerability Assessment derived from earthquake damage data.

https://www.researchgate.net/publication/243464217_Vulnerability_Assessment_Derived_from_Earthquake_Damage_Data

Lee, H. K. & Foo, S. (2010). Seismic Performance of Reinforced Concrete Buildings. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 821-838.

Logismiki LH. (2013). Pushover Θεωρητικά στοιχεία. 1–67.

<https://www.scribd.com/document/429516223/Fespa-manual-pdf>

McGuire, William; Gallagher, Richard H. and Ziemian, Ronald D., "Matrix Structural Analysis, 2nd Edition" (2000). Faculty Books. 7.

<https://digitalcommons.bucknell.edu/books/7>

Park, R. & Paulay, T. (1975). Reinforced Concrete Structures.

Department of Civil Engineering, University of Canterbury, New Zealand

Smith, J., & Brown, A. (2008). The Plasticity of Reinforced Concrete. Journal of Structural Engineering, 123-135.

Wang, Z., & Xian, G. (2023). Impact performances of fiber reinforced polymer composites and cables: A review. Composite Structures.

<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117128>

Wen-Long Gao, Abdelrahman, Si-Wei Liu, Ronald D.Zieman

Second-order dynamic time-history analysis of beam-columns with nonsymmetrical thin-walled steel sections

<https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107367>

Δέσποινα Β. Συντζιρμά (2010).Διδακτορική Διατριβή. Αποτίμηση Της Σεισμικής Επάρκειας Υφιστάμενων Κατασκευών – Έμφαση Σε Στοιχεία Ο . Σ .

Ελένη Πυλαρινού Μαρκαντωνάτου(2023).Διπλωματική Εργασία.Αποτίμηση Σεισμικής Συμπεριφοράς Κτιρίου από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα.

Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος (ΕΚΩΣ 2003) ΟΑΣΠ, Αθήνα 2006

Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ 2000), Ο.Α.Σ.Π., Αθήνα 2006.

Ευρωκώδικας 2(2010): Σχεδιασμός Φορέων Από Σκυρόδεμα Μέρος 1-1: Γενικοί Κανόνες Και Κανόνες Για Κτίρια Κεφάλαια 1-5 Διάρθρωση Ευρωκωδίκων.

ΚΑΝ.ΕΠΕ. (2004) : “Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.) – Σχέδιο 1.”, Οργανισμός Αντισεισμικής Προστασίας. Αθήνα. (Αδημοσίευτο Κείμενο).

ΚΑΝ.ΕΠΕ. (2006) : “Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.) – Σχέδιο 2.”, Οργανισμός Αντισεισμικής Προστασίας. Αθήνα.

Μπουτσάκη, Σοφία (2014).Διπλωματική Εργασία Σεισμική συμπεριφορά ανεπαρκώς οπλισμένων τοιχωμάτων σκυροδέματος

<https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/39031>

Ολυμπία Τασκάρη (2014). Διδακτορική Διατριβή Σεισμική Τρωτότητα Γεφυρών Βελτιωμένης Αξιοπιστίας Συνεκτιμώντας Την Αλληλεπίδραση Εδάφους - Κατασκευής Και Υβριδικά Πειραματικά Δεδομένα.

Φέκας, Κωνσταντίνος (2015). Διπλωματική Εργασία «Αποτίμηση υφισταμένου κτιρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα με ελαστική και ανελαστική ανάλυση σύμφωνα με τις διατάξεις του ΚΑΝΕΠΕ».

Φιτνέογλου, Χαραλαμπίδη (2008).Διπλωματική Εργασία Αποτίμηση Σεισμικής Απόκρισης Υφιστάμενων Κατασκευών Από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα.

Σόκολη Αμαλία (2023).Διπλωματική Εργασία. Ποιοτικές μέθοδοι της σεισμικής τρωτότητας των κατασκευών. Μελέτη περίπτωσης για μια κρίσιμη υποδομή

Στάθης, Θεοφάνης (2005).Μεταπτυχιακή Διατριβή. Αποτίμηση Σεισμικής Τρωτότητας Υφισταμένου Τετραώροφου Κτιρίου. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Ξάνθη.