ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
ΔΠΜΣ «Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών»

ΠΡΟΧΩΡΗΜΕΝΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΞΑΜΗΝΟΥ

«ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΕΠΕΜΒΑΣΕΩΝ ΣΕ ΔΙΩΡΟΦΟ ΚΤΙΡΙΟ – ΜΝΗΜΕΙΟ ΑΠΟ ΦΕΡΟΥΣΑ ΤΟΙΧΟΠΟΙΙΑ»

ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ & ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

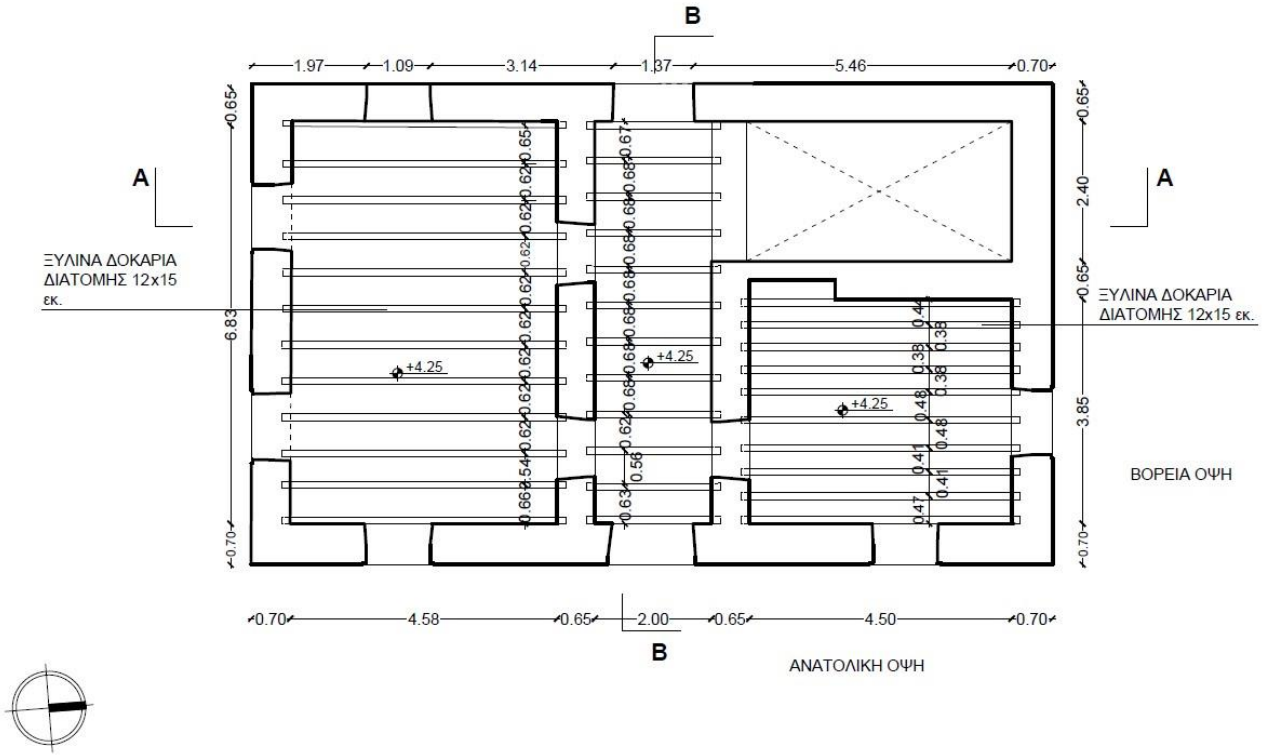
ΒΙΟΛΑΚΗΣ ΓΙΩΡΓΟΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

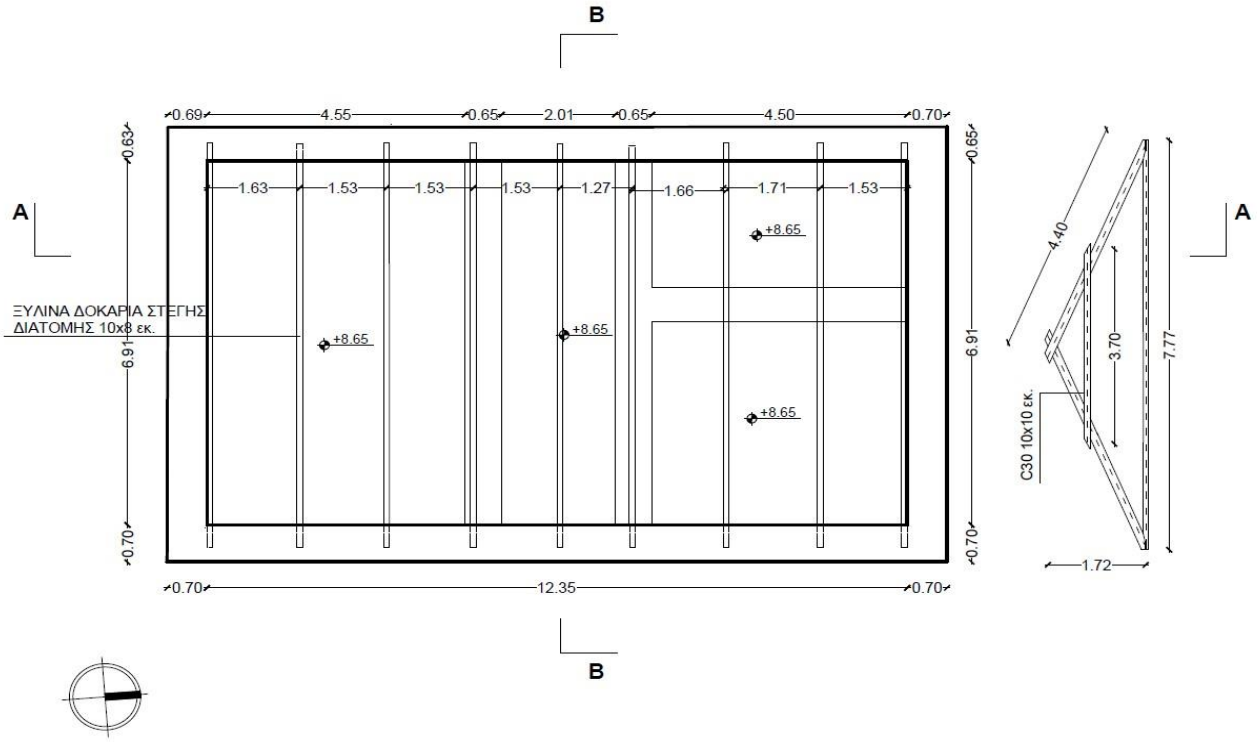
1. Γενικά....3
1.1 Αποτύπωση κτιρίου....3
1.2 Δεδομένα κτιρίου....7
2. ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ....7
2.1 Λογισμικό για την ανάλυση....7
2.2 Μέθοδος προσομοίωσης....7
2.3 Μέθοδος ανάλυσης....7
2.4 Ανάλυση κτιρίου....8
2.4.1 Δεδομένα εισαγωγής....8
2.4.2 Επιλογή κόμβου ελέγχου....9
2.4.3 Μοντέλο προσομοίωσης....10
2.4.4 Ιδιομορφική ανάλυση....12
2.4.5 Μη γραμμική στατική ανάλυση (Pushover)....12
2.4.6 Παρουσίαση και ερμηνεία αποτελεσμάτων....15
2.4.7 Σχολιασμός αποτελεσμάτων....28
2.4.8 Εκτός επιπέδου κάμψη....28
3. Επεμβάσεις ενίσχυσεις....30
3.1 Εισαγωγή....30
3.2 Προσομοίωση επεμβάσεων στο πρόγραμμα 3muri....32
3.3 Ιδιομορφική ανάλυση κτιρίου με επεμβάσεις....33
3.4 Μη γραμμική στατική ανάλυση....33
3.5 Συγκριτικά αποτελέσματα....42
3.6 Σχολιασμός αποτελεσμάτων....44

1. Γενικά

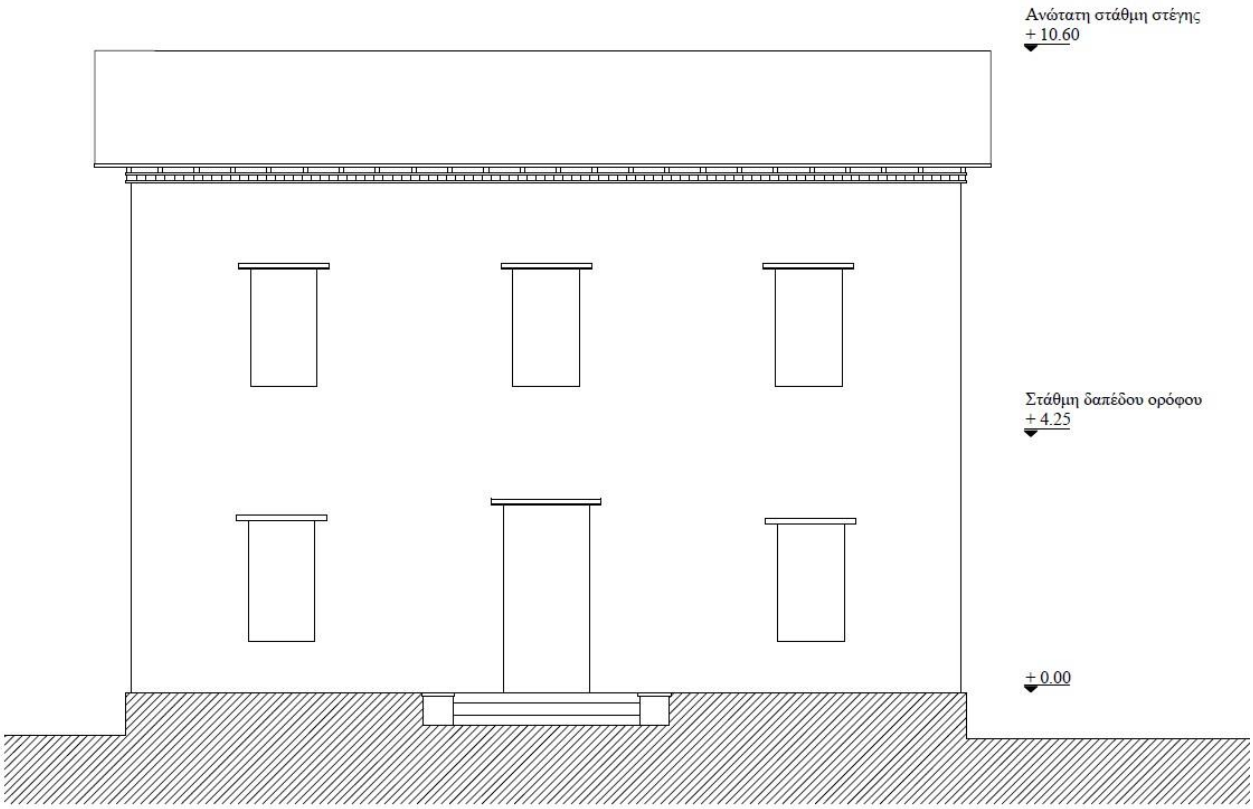
1.1 Αποτύπωση κτιρίου



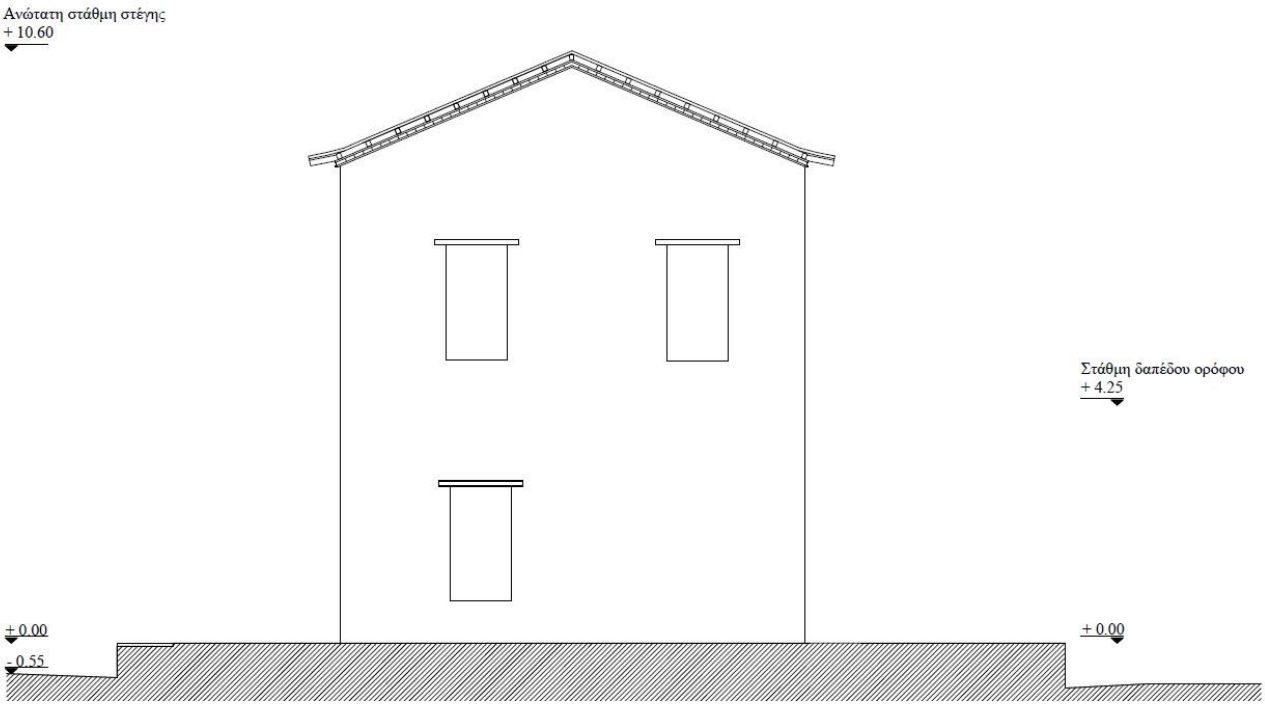
Εικόνα 1.1: Κάτοψη φέροντα οργανισμού δαπέδου ορόφου



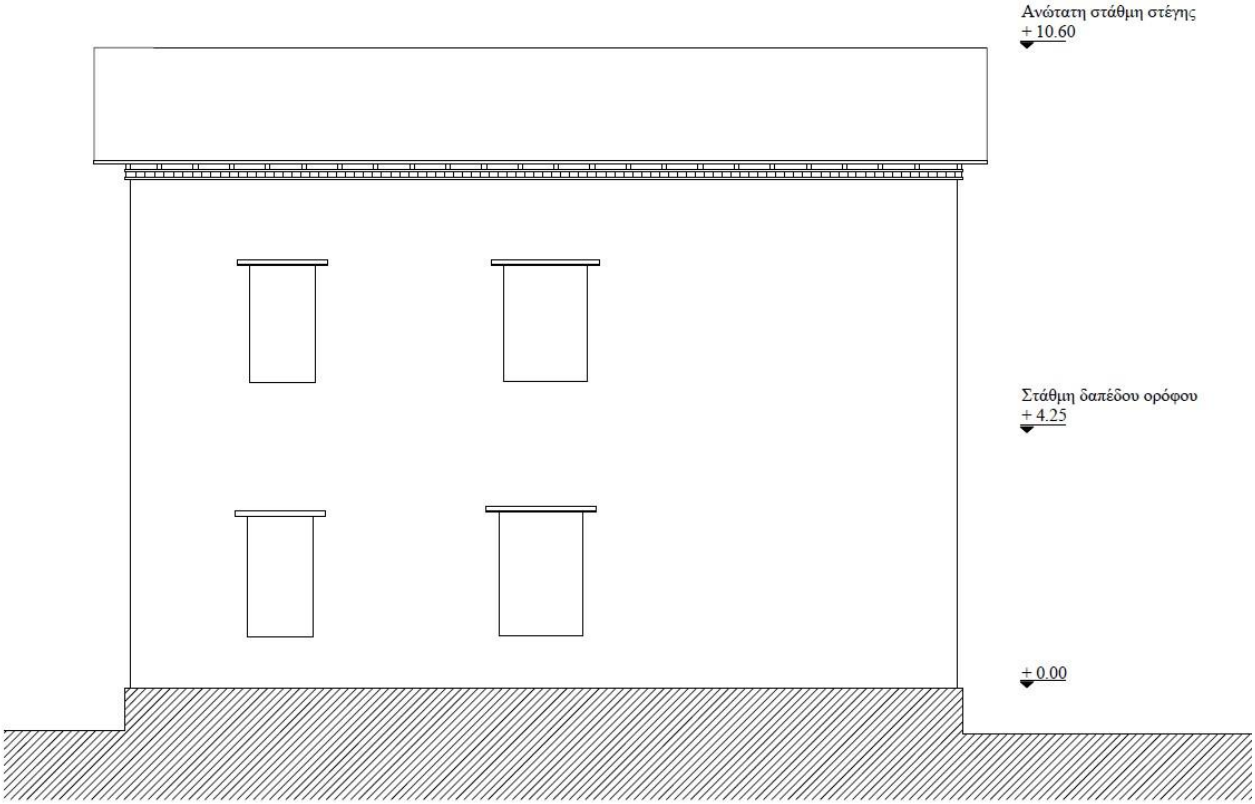
Εικόνα 1.2: Κάτοψη βασικών δοκών φέροντα οργανισμού στέγης



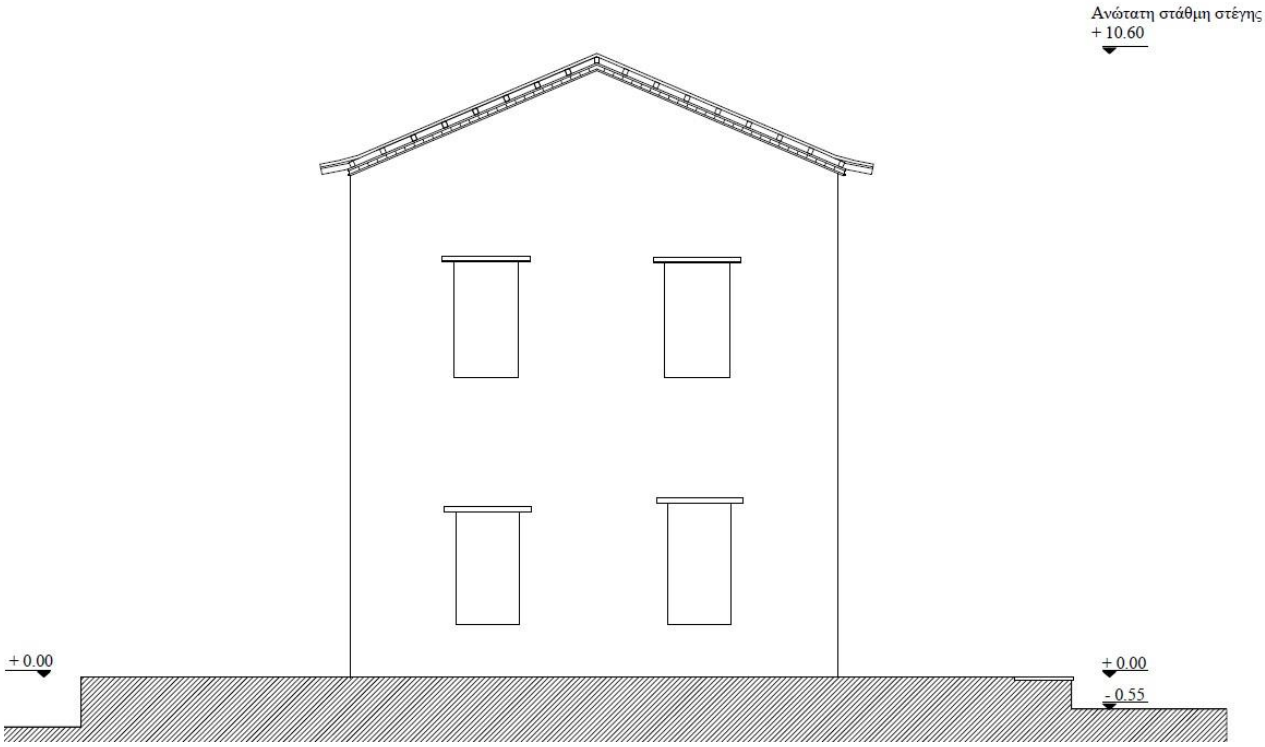
Εικόνα 1.3: Ανατολική όψη



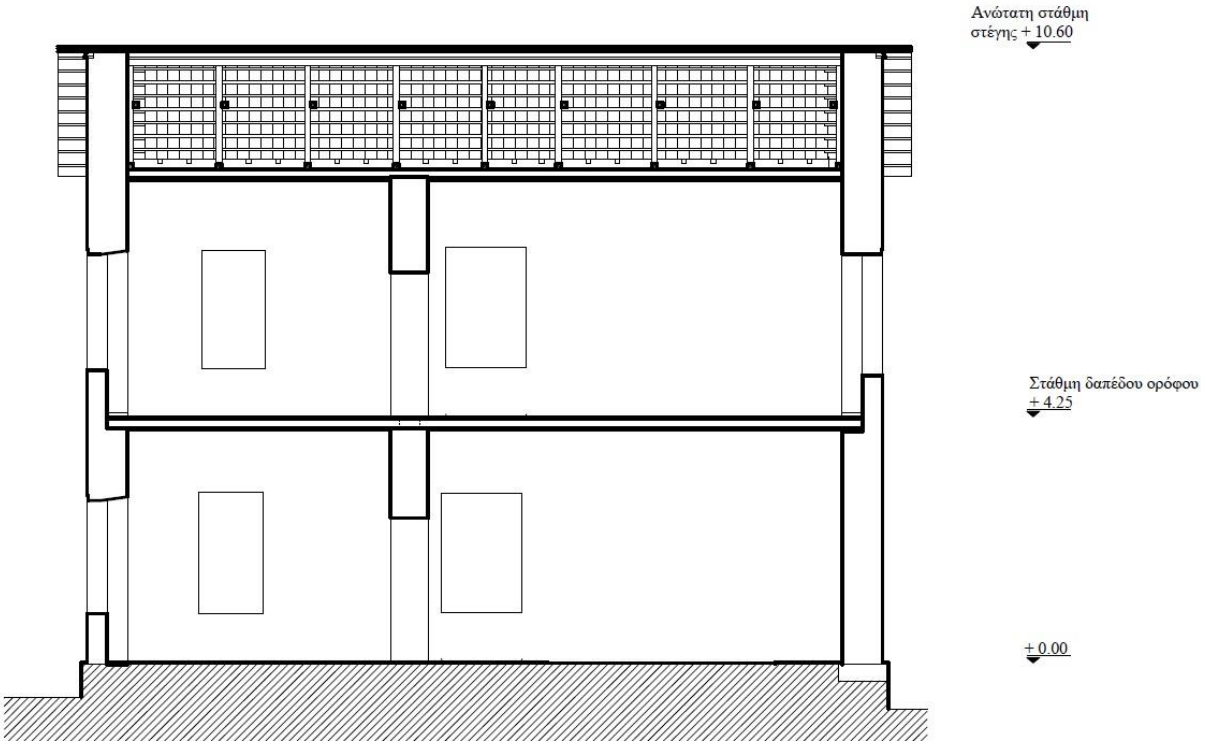
Εικόνα 1.4: Βόρεια όψη



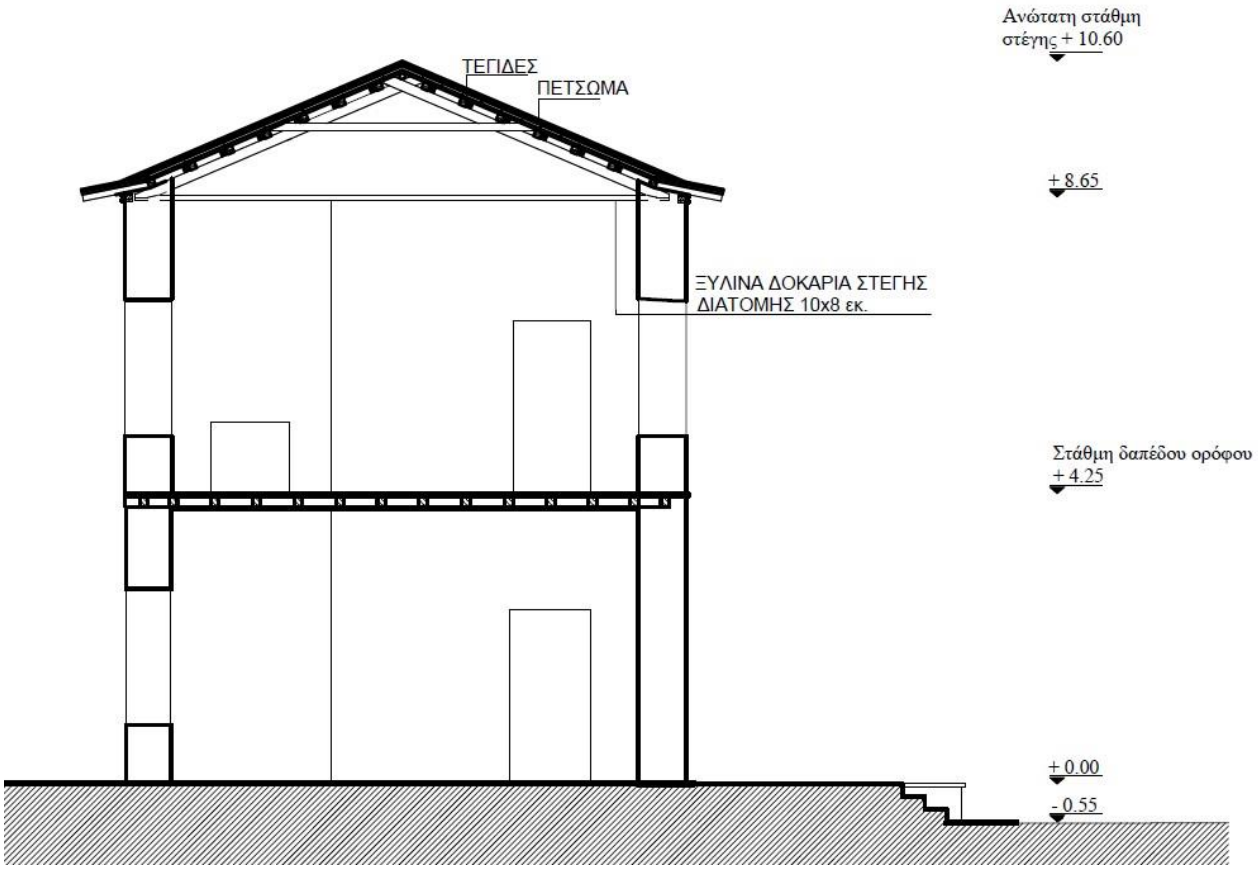
Εικόνα 1.5: Δυτική όψη



Εικόνα 1.6: Νότια όψη



Εικόνα 1.7: Τομή Α-Α



Εικόνα 1.8: Τομή Β-Β

1.2 Δεδομένα κτιρίου

Για την ανάλυση του κτιρίου λαμβάνονται υπόψη τα ακόλουθα δεδομένα:

Το κτίριο βρίσκεται σε ζώνη σεισμικότητας ΙΙ

Οι λίθοι από τους οποίους είναι κατασκευασμένο το κτίριο έχουν μέση θλιπτική αντοχή ίση με 60MPa, ενώ το κονίαμα δομήσεως έχει μέση θλιπτική αντοχή ίση με 1MPa.

Το μέσο πάχος των εξωτερικών παρειών της τοιχοποιίας είναι ίσο με 230mm και το μέσο πάχος του υλικού πληρώσεως είναι ίσο με 240mm (με ποσοστό κενών ίσο με 30%).

<u>Για τα φορτία:</u>

Ίδιο βάρος λιθοδομής: 22 kN/m^3

Βάρος επικάλυψης δαπέδων: 0.55 kN/m^2

Βάρος επικάλυψης στέγης: 1.20 kN/m^2

Ωφέλιμο φορτίο ορόφων: 2.00 kN/m^2

2. ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ

2.1 Λογισμικό για την ανάλυση

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την αποτίμηση αλλά και για την ενίσχυση του κτιρίου, είναι το 3Muri της εταιρείας S.T.A. Data Srl, το οποίο και χρησιμοποιήθηκε μετά από δωρεάν διάθεση της εταιρείας ERGOCAD, του επίσημου διανομέα σε Ελλάδα και Κύπρο.

2.2 Μέθοδος προσομοίωσης

Το λογισμικό 3muri χρησιμοποιεί, για την ανάλυση και τον έλεγχο κατασκευών από φέρουσα τοιχοποιία, τη μέθοδο FME (Frame by Macro Element – μέθοδος των μακρο-στοιχείων). Με τη μέθοδο αυτή, το μοντέλο προσομοίωσης της κατασκευής προσδιορίζεται με τη βοήθεια μακρο-στοιχείων, όπως είναι οι τοίχοι, οι δοκοί, τα υπέρθυρα, τα σενάζ, οι πλάκες, οι πεσσοί, οι κολώνες και οι ελκυστήρες. Συγκεκριμένα, η φέρουσα κατασκευή προσομοιώνεται ως ένα σύνολο από κατακόρυφους τοίχους και οριζόντια στοιχεία ικανά να παραμορφωθούν. Κάθε τοίχος αναπαρίσταται ως ένα πλαίσιο όπως προτείνεται από τους κανονισμούς, με διακριτό προσδιορισμό των κατακόρυφων πεσσών και των δοκών τοιχοποιίας (υπέρθυρα ή σεναζ) συνδεδεμένα μεταξύ τους άκαμπτα.

2.3 Μέθοδος ανάλυσης

Το λογισμικό 3muri χρησιμοποιεί ως μέθοδο ανάλυσης των κατασκευών από φέρουσα τοιχοποιία, τη μη γραμμική στατική ανάλυση Pushover. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος: "… ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα που περιλαμβάνει το πρόγραμμα είναι η εφαρμογή της Pushover ανάλυσης (στατική ανελαστική μέθοδος). Στο πρότυπο EN 1998.3, κεφάλαιο Γ.3.3 αναφέρεται ότι οι μη γραμμικές μέθοδοι επιβάλλεται να χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις όπου δεν μπορούν να εφαρμοστούν οι αντίστοιχες γραμμικές.

Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιούμε Pushover ανάλυση όταν δεν καλύπτονται οι προϋποθέσεις της παραγράφου 4.4.2(1)Α του προτύπου EN 1998.3 καθώς και οι παρακάτω προϋποθέσεις:

Οι τοίχοι που φέρουν οριζόντια φορτία είναι γενικά διατεταγμένοι και προς τις δύο οριζόντιες κατευθύνσεις.

- Οι τοίχοι είναι συνεχείς σε όλο το ύψος τους.
- Τα δάπεδα διαθέτουν αρκετή δυσκαμψία εντός του επιπέδου τους και είναι επαρκώς συνδεδεμένα με τους περιμετρικούς τοίχους έτσι ώστε να μπορεί να υποτεθεί ότι μπορούν να κατανείμουν τις δυνάμεις αδρανείας στα κατακόρυφα στοιχεία με διαφραγματική λειτουργία.
- Τα δάπεδα που βρίσκονται στις αντίθετες πλευρές ενός κοινού τοίχου βρίσκονται στο ίδιο ύψος.
- Σε κάθε όροφο, ο λόγος μεταξύ των, εντός του επιπέδου των, πλευρικών δυσκαμψιών του τοίχου με τη μεγαλύτερη δυσκαμψία και του πιο αδύναμου πρωτεύοντα σεισμικού τοίχου, λαμβάνοντας υπόψη την παρουσία των ανοιγμάτων, δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 2,5.
- Τα στοιχεία των υπερθύρων τα οποία συμπεριλαμβάνονται στο προσομοίωμα είναι είτε κατασκευασμένα από συμπαγή στοιχεία που εμπλέκονται ικανοποιητικά με εκείνα των προσκείμενων τοιχωμάτων είτε ενώνονται με συνδεσμους.

2.4 Ανάλυση κτιρίου

2.4.1 Δεδομένα εισαγωγής

Για την τοιχοποιία του κτιρίο, βάσει και των δεδομένων της εκφώνησης, ισχύει:

- Μέση θλιπτική αντοχή τοιχοποιίας

Υπολογίζεται βάσει της σχέσης (6.1) του ΚΑΔΕΤ:

$$f_{wc} = \frac{1}{\gamma_{Rd}}\left(2\lambda_e \delta f_{c,e} + \lambda_i f_{c,i}\right) : (1 + 2\delta)$$

όπου,
δ, ο λόγος του πάχους της εξωτερικής παρειάς προς το πάχος του υλικού πληρώσεως,
$f_{c,e}$ και $f_{c,i}$ η θλιπτική αντοχή των εξωτερικών παρειών και του υλικού πληρώσεως αντιστοίχως
γ_{Rd} δείκτης αβεβαιότητας, ο οποίος μπορεί να λαμβάνεται ίσος με 1,50.
Οι συντελεστές λ_e και λ_i ελλείψει ακριβέστερων στοιχείων, μπορούν να λαμβάνονται ίσοι με 0,80 και 1,20 αντιστοίχως.

Η θλιπτική αντοχή της εξωτερικής παρειάς της τοιχοποιίας, υπολογίζεται από τη σχέση (Σ6.3) του ΚΑΔΕΤ:

$$f_{wc} = \xi\left[\left\{\frac{2}{3}\sqrt{f_{bc}} - f_0\right\} + \lambda f_{mc}\right]$$

όπου,
f_{bc} η θλιπτική αντοχή του λιθοσώματος
λ συντελεστής συνάφειας λιθοσώματος-κονιάματος, ο οποίος λαμβάνεται ίσος με 0,50 για τραχείς λίθους και ίσος με 0,1 για πολύ λείους λίθους.
f_0 συντελεστής (σε MPa), ο οποίος λαμβάνει υπ΄ όψη τον βαθμό λάξευσης των λίθων και παίρνει τις ακόλοθες τιμές
0,00 για λαξευτή λιθοδομή
0,50-1,00 για λιθοδομή από ημικανονικούς λίθους

1,50-2,50 για αργολιθοδομή, ανάλογα με την ποιότητα δομήσεως
ξ, συντελεστής ο οποίος λαμβάνει υπ΄ όψη την δυσμενή επιρροή του πάχους των αρμών κονιάματος

Με εφαρμογή της σχέσης (Σ6.3) για ξ=1.00, $f_{bc} = 60$, $\lambda = 0.50$, $f_0 = 2$, προκύπτει ότι $f_{wc} = 3.66 = f_{c,e}$
Με εφαρμογή της σχέσης (6.1) για $f_{c,e} = 3.66$, $f_{c,i} = 0.15$, $\lambda_e = 0.80$, $\lambda_i = 1.20$, $\gamma_{Rd} = 1.50$ και $\delta = \frac{230}{240}$, προκύπτει $f_{wc} = 1.32$.

Το μέτρο ελαστικότητας της τοιχοποιίας υπολογίζεται από τη σχέση (Σ6.5) του ΚΑΔΕΤ:

$$E_{wc} = 1300\left(1 - \frac{f_{wc}}{5}\right) f_{wc} + 140 f_{wc}^2$$

Με εφαρμογή της σχέσης (Σ6.5) για $f_{wc} = 1.32MPa$, προκύπτει $E_{wc} = 1506.9MPa$.

2.4.2 Επιλογή κόμβου ελέγχου

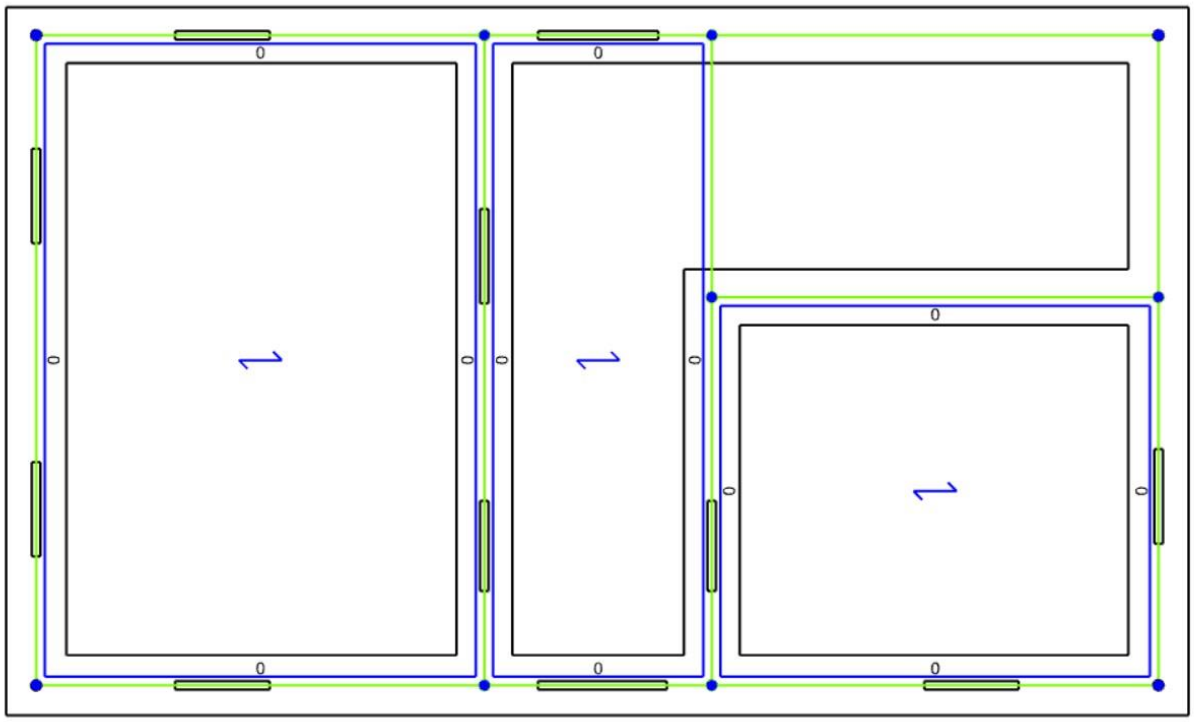
Για την εφαρμογή της μη γραμμικής στατικής ανάλυσης είναι απαραίτητος ο καθορισμός του κόμβου ελέγχου. Για τις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα, στις οποίες θεωρείται ότι υπάρχει διαφραγματική λειτουργία, ο κόμβος ελέγχου επιλέγεται κόντα στο κέντρο μάζας της τελευταίας στάθμης.

Στις κατασκευές με εύκαμπτα διαφράγματα στις οποίες η διαφραγματική λειτουργία δεν ισχύει, όπως είναι συνήθως οι κατασκευές από φέρουσα τοιχοποιία, η επιλογή του κόμβου ελέγχου δεν είναι μονοσήμαντη και μάλιστα ενδέχεται οι διαφορετικές επιλογές κόμβου ελέγχου να δώσουν αρκετά διαφορετικά, μεταξύ τους, αποτελέσματα. Σύμφωνα με τον Sergio Lagomarsino (2015), έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχει μεγαλύτερη σύγκλιση των αποτελεσμάτων αν επιλεγεί κόμβος που βρίσκεται σε στοιχείο τοιχοποιίας που έχει πρώιμη αστοχία. Επίσης, στο εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος αναφέρεται ότι όταν δεν υπάρχει δύσκαμπτο διάφραγμα στην τελευταία στάθμη του κτιρίου, τότε χρειάζεται να οριστεί ως κόμβος ελέγχου εκείνος ο οποίος παρουσιάζει τη μέγιστη μετακίνηση, η οποία μπορεί να βρέθει από την εκτέλεση δυναμικής ανάλυσης. Επίσης, αναφέρεται ότι ο κόμβος ελέγχου βρίσκεται συνήθως στην περίμετρο του κτιρίου, στην περίπτωση του εύκαμπτου διαφράγματος.

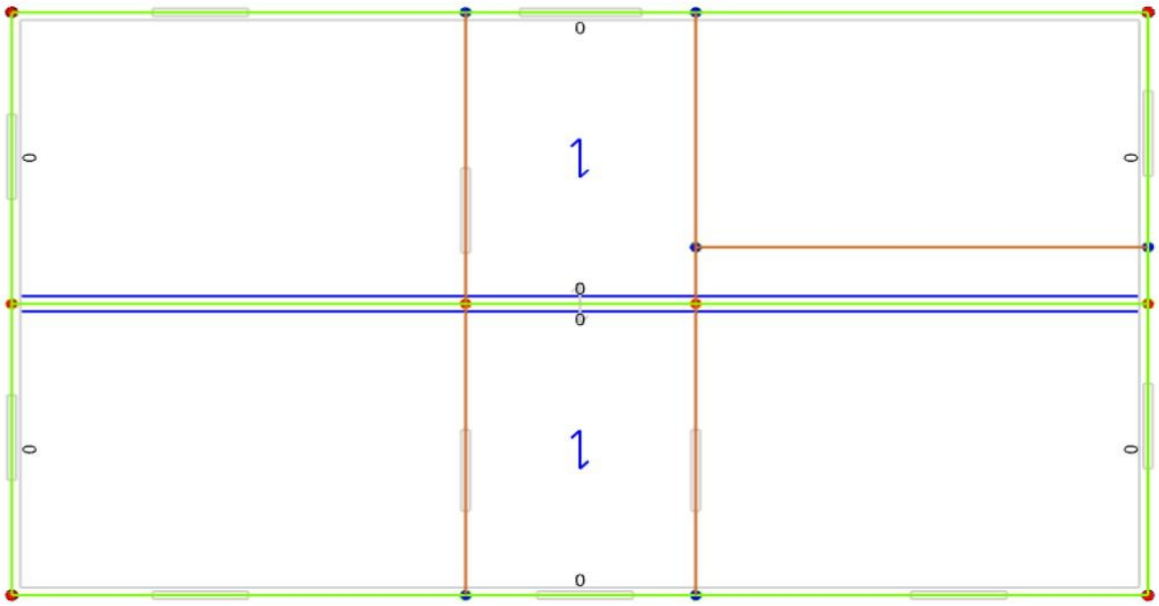
Για την πληρέστερη επίλυση του προβλήματος αλλά και για την σύγκριση των μεταξύ τους αποτελεσματών, στην συγκεκριμένη εργασία για την αποτίμηση θα επιλεγούν δύο διαφορετικοί κόμβοι ελέγχου. Ο ένας θα είναι αυτός που παρουσιάζει τη μέγιστη μετακίνηση βάσει δυναμικής ανάλυσης και ο άλλος θα βρίσκεται σε στοιχείο τοιχοποιίας που έχει πρώιμη αστοχία.

2.4.3 Μοντέλο προσομοίωσης

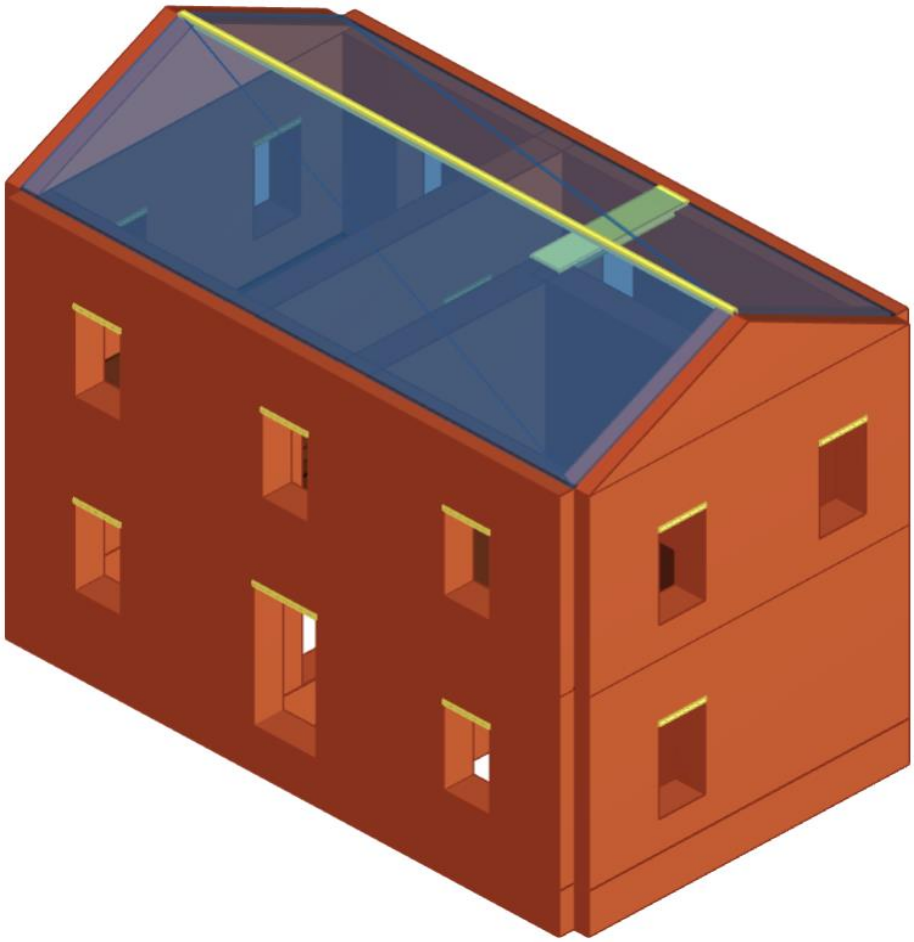
Παρουσιάζεται το μοντέλος προσομοίωσης του υπό μελέτη κτιρίο στο πρόγραμμα 3muri.



Εικόνα 2.1: Κάτοψη φέροντα οργανισμού δαπέδου στο πρόγραμμα



Εικόνα 2.2: Κάτοψη φέροντα οργανισμού στέγης στο πρόγραμμα.



Εικόνα 2.3: 3D προσομοίωμα

2.4.4 Ιδιομορφική ανάλυση

Παρατίθεται ο πίνακας με τις πρώτες ιδιομορφές του κτιρίου.

Ιδιομορφή	T [s]	mx [kg]	Mx [%]	my [kg]	My [%]	mz [kg]	Mz [%]
1	0,28217	1.785,918	0,31	163.316,044	28,22	52,372	0,01
2	0,18187	18,877	0,00	139.673,958	24,13	1,259	0,00
3	0,15802	36.580,582	6,32	7.163,238	1,24	32,618	0,01
4	0,14505	133.188,819	23,01	120.250,262	20,78	10,305	0,00
5	0,14352	273.508,406	47,26	84.945,385	14,68	349,158	0,06
6	0,12789	1.430,488	0,25	7,120	0,00	55,715	0,01
7	0,11635	53.934,849	9,32	15.462,724	2,67	44,552	0,01
8	0,10434	22.956,337	3,97	419,754	0,07	0,611	0,00
9	0,07251	37,324	0,01	11.381,679	1,97	76,212	0,01
10	0,05917	951,323	0,16	1.949,301	0,34	28,644	0,00
11	0,05800	4.538,215	0,78	30.066,476	5,19	849,364	0,15
12	0,05724	38.888,788	6,72	1.633,288	0,28	3.461,494	0,60
13	0,05262	107,064	0,02	363,407	0,06	1.843,783	0,32
14	0,05062	1.254,034	0,22	199,664	0,03	199,276	0,03

Εικόνα 2.4: Ιδιομορφές κτιρίου

Παρατηρείται ότι χρειάζεται μεγάλος αριθμός ιδιομορφών για να επιτευχθεί ποσοστό ανώτερο του 90%, όπως συμβαίνει συνήθως σε κτίρια από φέρουσα τοιχοποιία.

2.4.5 Μη γραμμική στατική ανάλυση (Pushover)

Κανονισμός αναφοράς

Για τους ελέγχους και τις αναλύσεις που εκτελέστηκαν στην παρούσα μελέτη, εφαρμόστηκαν οι διατάξεις και η νομοθεσία που περιλαμβάνεται στο παρακάτω κανονιστικό πρότυπο:

- Ευρωκώδικας 8 [EN 1998]: Αντισεισμικός σχεδιασμός των κατασκευών.

Στάθμη επιτελεστικότητας

Η στάθμη επιτελεστικότητας για την αποτίμηση και αφού πρόκειται για μνημείο επιλέγεται η SD (ή αλλιώς LS).

Γεωμετρία μοντέλου

Το μαθηματικό προσομοίωμα του κτιρίου αυτού έγινε με την εισαγωγή τοίχων, οι οποίοι διακριτοποιούνται με μακρο-στοιχεία, τα οποία αντιπροσωπεύουν τους αντίστοιχους πεσσούς και τις παραμορφώσιμες υπέρθυρες δοκούς. Οι άκαμπτοι κόμβοι παρουσιάζονται στα τμήματα τοιχοποιίας, τα οποία συνήθως είναι λιγότερο ευαίσθητα σε σεισμικές βλάβες. Οι πεσσοί και οι υπέρθυρες δοκοί είναι συνεχόμενοι με τα ανοίγματα και οι άκαμπτοι κόμβοι αναπαριστούν την σύνδεση μεταξύ των πεσσών και των υπέρθυρων δοκών. Ο μαθηματικός αλγόριθμος στον οποία στηρίζεται η χρήση αυτών των μακρο-στοιχείων, επιτρέπει την αναγνώριση του μηχανισμού αστοχίας από διάτμηση στο

κεντρικό τμήμα του στοιχείου αυτού ή του λυγισμού στις πλευρές του στοιχείου, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η δυναμική κατάσταση των βλαβών όπως ακριβώς εμφανίζονται στην πραγματικότητα.

Οι κόμβοι του μαθηματικού μοντέλου είναι 3-διαστάσεων με 5 βαθμούς ελευθερίας (3 μετακινησιακές συνιστώσες στο καθολικό σύστημα αναφοράς και 2 στροφές περί των άξονα X και Y) ή με 2-διαστάσεων κόμβους με 3 βαθμούς ελευθερίας (δύο μετακινήσεις και μία στροφή στο επίπεδο του τοίχου). Οι 3-διαστάσεων κόμβοι χρησιμοποιούνται για να γίνει η μεταφορά των δράσεων από τον έναν τοίχο στον άλλο ο οποίος είναι τοποθετημένος εγκάρσια στον πρώτο. Οι 2-διαστάσεων κόμβοι έχουν βαθμούς ελευθερίας μόνο στο επίπεδο του τοίχου επιτρέποντας να μεταφερθούν οι εντάσεις μεταξύ των διαφόρων σημείων του τοίχου.

Τα οριζόντια στοιχεία, προσομοιώνονται ως πλάκες τρικομβικών στοιχείων τα οποία συνδέονται με τους κόμβους 3-διαστάσεων, οι οποίες μπορούν να φέρουν μόνιμα και κινητά φορτία. Οι σεισμικές δράσεις δρουν στην πλάκα και την φορτίζουν κατά μήκος της μεσαίας στρώσης της πλάκας. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η πλάκα διαθέτει αξονική δυσκαμψία, χωρίς όμως να έχει καμπτική, αφού η κύρια μηχανική συμπεριφορά η οποία ελέγχεται είναι εκείνη που προκαλείται από το σεισμό και το αντίστοιχο οριζόντιο φορτίο.

<u>Φορτία</u>

Σεισμικά φορτία:

Ο έλεγχος θα πρέπει να εκτελείται με βάση τον συνδυασμό που περιλαμβάνει τις σεισμικές δράσεις και μη και ο οποίος καθορίζεται στην παράγραφο 6.5.3 του Ευρωκώδικα 0:

$$\gamma_I E + G_{k1} + G_{k2} + \sum_i \Psi_{2i} Q_{Ki}$$

Οι επιδράσεις από την σεισμική δράση ελέγχονται λαμβάνοντας υπόψη τις μάζες οι οποίες συνδέονται με τα κατακόρυφα φορτία:

$$G_{k1} + G_{k2} + \sum_i (\Psi_{Ei} Q_{Ki})$$

Στατικά φορτία:

Ο έλεγχος για τα στατικά φορτία στην οριακή κατάσταση διεξάγεται με βάση τις διατάξεις του ισχύοντος κανονισμού. Ο συνδυασμός φορτίων που λαμβάνεται υπόψη είναι:

$$\gamma_{G1} G_{k1} + \gamma_{G2} G_{k2} + \gamma_Q \Psi_0 Q_k$$

όπου:

g_I Συντελεστής σπουδαιότητα (παράγραφος 4.2.5 - Ευρωκώδικας 8)

E Σεισμικη δράση που εφαρμόζεται για την οριακή κατάσταση

G_{K1}, G_{K2} Χαρακτηριστικές τιμές μόνιμων φορτίων

Q_{Ki} Χαρακτηριστική τιμή για την μεταβλητή δράση Q_k.

Y_2 Συντελεστής συνδυασμού με οιονεί - μόνιμη τιμή μιας μεταβλητής δράσης

Y_0 Συντελεστής συνδυασμού για μεταβλητές δράσεις

Y_{Ei} Συντελεστής συνδυασμού της μεταβλητής δράσης Qi, στην οποία λαμβάνεται υπόψη η πιθανότητα ότι να δρουν όλα τα φορτία στην κατασκευή τη στιγμή εμφάνισης ενός σεισμικού γεγονότος και επιτυγχάνεται με τον πολλαπλασιασμό των συντελεστών Y_{2i} στο j.

g_{G1}; g_{G2}; g_Q: επιμέρους συντελεστές ασφαλείας

Οι τιμές των διαφόρων συντελεστών καθορίζονται με βάση την τύπο της χρήσης για τα διάφορα επίπεδα σχεδιασμού σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 0, πίνακας A1.1 και την παράγραφο 4.2.4 του Ευρωκώδικα.

Φάσμα σεναρίου-κανονισμού

Τα φάσματα απόκρισης, σύμφωνα με όσα αναφέρονται στα κανονιστικά πρότυπα, καθορίζονται από την μέγιστη επιτάχυνση και την κατηγορία εδάφους στην περιοχή που θα κατασκευαστεί το κτίριο.

agR (SD) [m/s2]	Τύπος εδάφους	S	TB [s]	TC [s]	TD [s]	I
2,35	B	1,20	0,15	0,50	2,00	1,00

Περιγραφή Pushover ανάλυσης

Για την πραγματοποίηση των απαραίτητων ελέγχων εκτελέστηκε μη-γραμμική στατική ανάλυση με βάση τις διατάξεις της παραγράφου 4.3.3.4.2 του Ευρωκώδικα 8. Οι απαιτούμενοι έλεγχοι περιλαμβάνουν σύγκριση μεταξύ των επιμέρους καμπυλών ικανότητας που δημιουργούνται κατά την διάρκεια των αναλύσεων με τις απαιτούμενες μετακινήσεις όπως ακριβώς περιγράφεται στον ισχύοντα κανονισμό. Η καμπύλη ικανότητας αναπαρίσταται από ένα διάγραμμα στον οποίο εμφανίζεται η μέγιστη μετακίνηση-τέμνουσα στη βάση. Σύμφωνα με τις διατάξεις της παραγράφου 4.3.3.4.2 του Ευρωκώδικα 8, υπάρχουν δύο τύποι κατανομών των δυνάμεων που πρέπει να ελεγχθούν:

- Κατανομή των δυνάμεων με βάση τις μάζες κάθε στάθμης:

  $F_i = \frac{m_i}{\sum_i m_i}$

- Κατανομή των δυνάμεων με βάση την παραγωγή των μαζών για την παραμόρφωση που προκύπτει από την πρώτη ιδιομορφή

Με τον τρόπο αυτό, η τιμή για την μέγιστη μετακίνηση στην βάση του κτιρίου, προκύπτει από τον υπολογισμό της κατανομής των δυνάμεων. Η τιμή αυτή της μετακίνησης αποτελεί την οριακή τιμή για το κτίριο.

Η μετακίνηση που ελέγχεται για τον καθορισμό της καμπύλης ικανότητας βρίσκεται στο σημείο του κτιρίου που ονομάζεται κόμβος ελέγχου. Ο κανονισμός απαιτεί να γίνεται δι-γραμμικοποίηση της καμπύλης ικανότητας σε ένα ισοδύναμο σύστημα (SDOF).

Ο προσδιορισμός της καμπύλης σε σχέση με το ισοδύναμο σύστημα επιτρέπει τον προσδιορισμό της περιόδου στην οποία προκύπτει λόγω σεισμικής δράσης η μέγιστη μετακίνηση, σύμφωνα με τα φάσματα που αναφέρονται στην παράγραφο 3.2.2.2 του Ευρωκώδικα 8. Αντίστοιχα, στην παράγραφο 4.3.2 του Ευρωκώδικα 8 καθορίζεται ότι η τυχηματική εκκεντρότητα για το κέντρο μάζας είναι ίση με το 5% της μέγιστης διάστασης του κτιρίου στην διεύθυνση που είναι κάθετη στην σεισμική δράση.

Με βάση την μορφή του κτιρίου, και τον κανονισμό, υπάρχουν οι παρακάτω επιλογές για την εκτέλεση των μη-γραμμικών αναλύσεων στο πρόγραμμα:

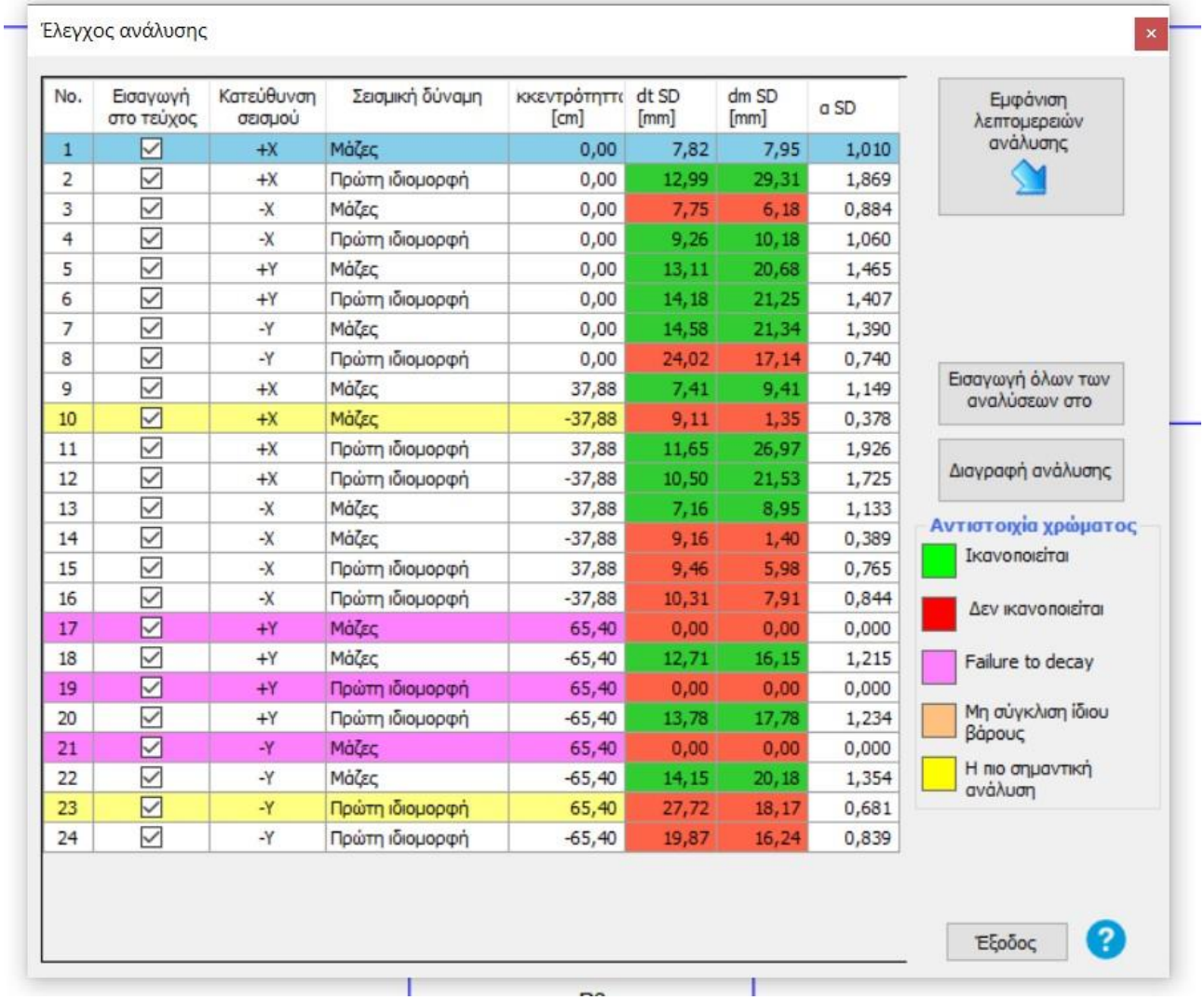
- Σεισμικό φορτίο: Αναγνωρίζει το πρόγραμμα ποια από τις 2 κατανομές φορτίων θα υπολογιστούν (με βάση τις μάζες ή την πρώτη ιδιομορφή)
- Διεύθυνση: Αναγνωρίζει το πρόγραμμα την διεύθυνση στην οποία η κατασκευή υπόκειται σε σεισμικά φορτία (X ή Y ή στο καθολικό σύστημα).

Προκειμένου να προσδιοριστεί η δυσμενέστερη κατάσταση από τις σεισμικές δυνάμεις, πραγματοποιούνται επιμέρους αναλύσεις για κάθε κατανομή, για κάθε σεισμική διεύθυνση και για κάθε πιθανή τυχηματική εκκεντρότητα.

2.4.6 Παρουσίαση και ερμηνεία αποτελεσμάτων

Κόμβος 30

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων Pushover για τον κόμβο με τη μέγιστη μετακίνηση βάσει δυναμικής ανάλυσης (κόμβος 30)



Έλεγχος ανάλυσης

No.	Εισαγωγή στο τεύχος	Κατεύθυνση σεισμού	Σεισμική δύναμη	κκεντρότητα [cm]	dt SD [mm]	dm SD [mm]	α SD
1	☑	+X	Μάζες	0,00	7,82	7,95	1,010
2	☑	+X	Πρώτη ιδιομορφή	0,00	12,99	29,31	1,869
3	☑	-X	Μάζες	0,00	7,75	6,18	0,884
4	☑	-X	Πρώτη ιδιομορφή	0,00	9,26	10,18	1,060
5	☑	+Y	Μάζες	0,00	13,11	20,68	1,465
6	☑	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	0,00	14,18	21,25	1,407
7	☑	-Y	Μάζες	0,00	14,58	21,34	1,390
8	☑	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	0,00	24,02	17,14	0,740
9	☑	+X	Μάζες	37,88	7,41	9,41	1,149
10	☑	+X	Μάζες	-37,88	9,11	1,35	0,378
11	☑	+X	Πρώτη ιδιομορφή	37,88	11,65	26,97	1,926
12	☑	+X	Πρώτη ιδιομορφή	-37,88	10,50	21,53	1,725
13	☑	-X	Μάζες	37,88	7,16	8,95	1,133
14	☑	-X	Μάζες	-37,88	9,16	1,40	0,389
15	☑	-X	Πρώτη ιδιομορφή	37,88	9,46	5,98	0,765
16	☑	-X	Πρώτη ιδιομορφή	-37,88	10,31	7,91	0,844
17	☑	+Y	Μάζες	65,40	0,00	0,00	0,000
18	☑	+Y	Μάζες	-65,40	12,71	16,15	1,215
19	☑	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	65,40	0,00	0,00	0,000
20	☑	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	-65,40	13,78	17,78	1,234
21	☑	-Y	Μάζες	65,40	0,00	0,00	0,000
22	☑	-Y	Μάζες	-65,40	14,15	20,18	1,354
23	☑	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	65,40	27,72	18,17	0,681
24	☑	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	-65,40	19,87	16,24	0,839

Εμφάνιση λεπτομερειών ανάλυσης

Εισαγωγή όλων των αναλύσεων στο

Διαγραφή ανάλυσης

Αντιστοιχία χρώματος

Ικανοποιείται

Δεν ικανοποιείται

Failure to decay

Μη σύγκλιση ίδιου βάρους

Η πιο σημαντική ανάλυση

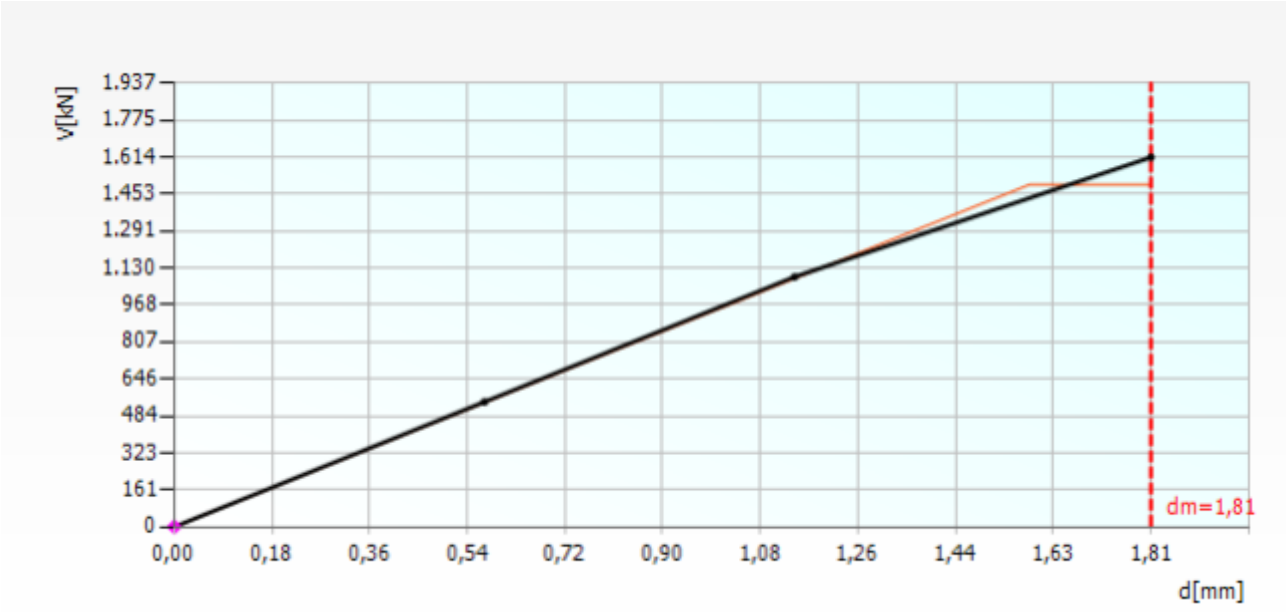
Έξοδος

Εικόνα 2.5: Αποτελέσματα αναλύσεων Pushover

<u>Επεξήγηση αποτελεσμάτων:</u>

Οι αναλύσεις που παρουσίαζονται με κόκκινο χρώμα δεν ικανοποιούνται, δηλαδή η στοχευόμενη μετακίνηση είναι μεγαλύτερη της προσφερόμενης μετακίνησης του κτιρίου. Από αυτές, εκείνες με το κίτρινο χρώμα είναι οι δυσμενέστερες για κάθε διεύθυνση σεισμικής φόρτισης. Επιπλέον, όσο μικρότερος (της μονάδας) είναι ο συντελεστής $\alpha\ SD$, τόσο μεγαλύτερη είναι η ανεπάρκεια κατά την εκάστοτε ανάλυση. Αντιθέτως, οι αναλύσεις που παρουσιάζονται με πράσινο ικανοποιούν αυτό το κριτήριο. Οι αναλύσεις που παρουσιάζονται με ματζέντα χρώμα αδυνατούν να συγκλίνουν.

Pushover ανάλυση No.10

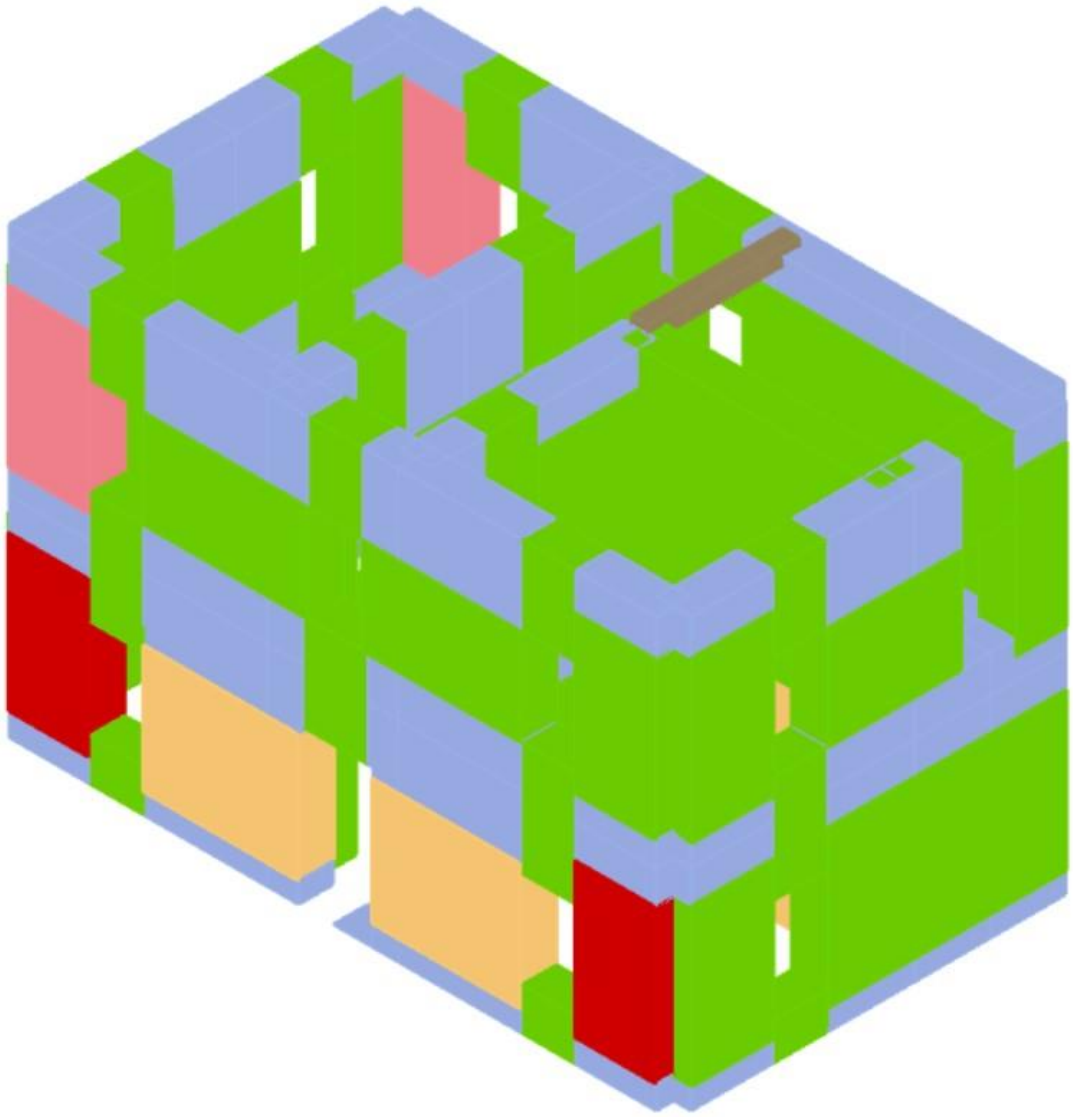


Εικόνα 2.6: Καμπύλη pushover για την ανάλυση No.10 (δυσμενέστερη κατά X).

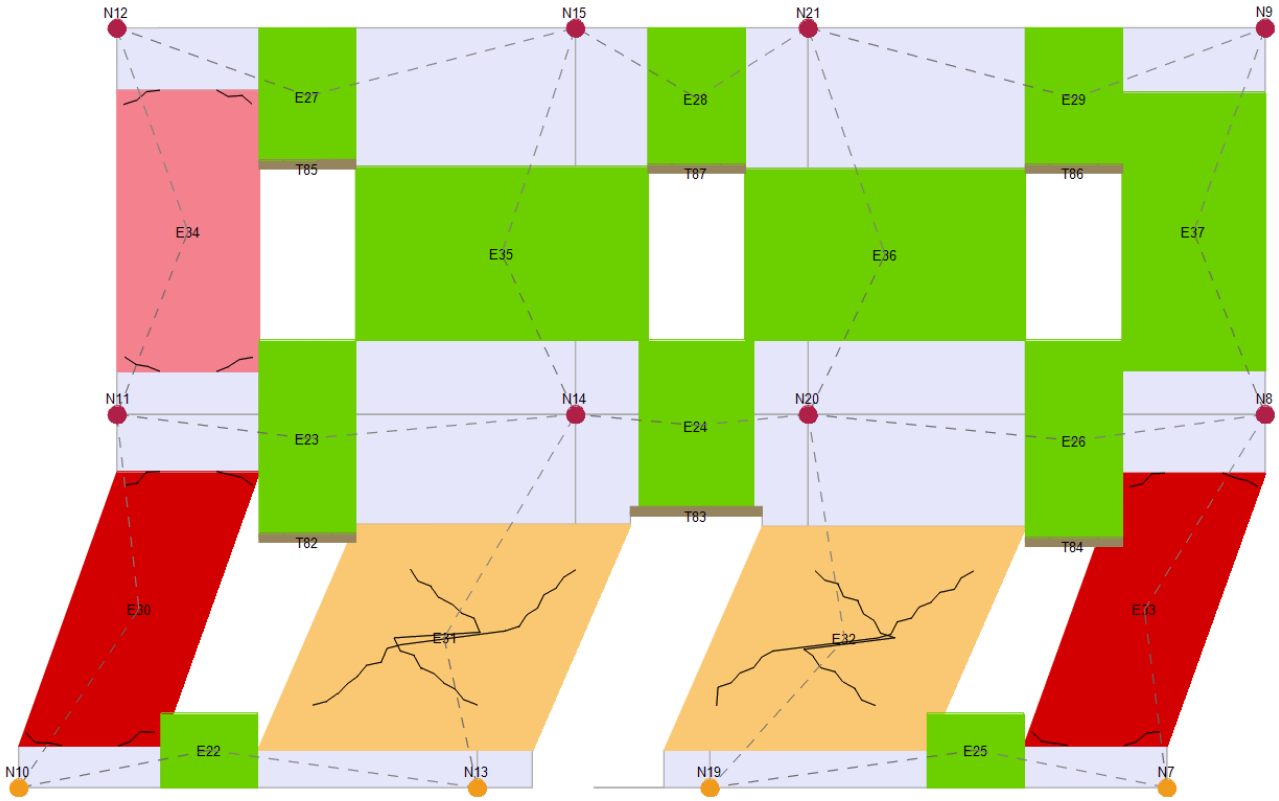
Μετα τις αναλύσεις Pushover παρουσιάζονται οι βλάβες και αστοχίες κάθε είδους στον φορέα. Για την πλήρη κατανόηση των αποτελεσμάτων, παρουσιάζεται ακολούθως το υπόμνημα των βλαβών και αστοχίων όπως χρησιμοποείται από το πρόγραμμα.

Ετικέτες αποτελεσμάτων

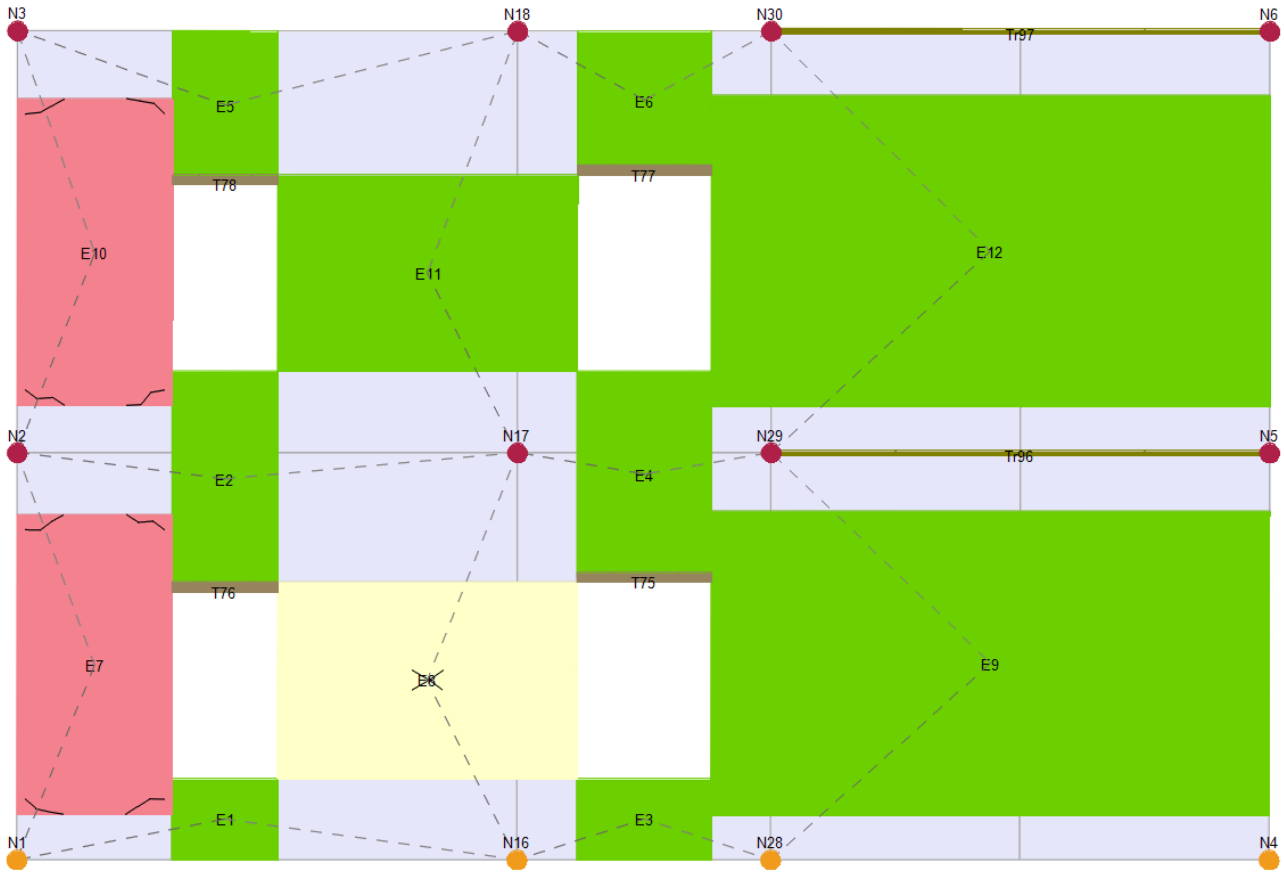
	Τοιχοποιία
	Χωρίς βλάβη
	Διατμητική βλάβη
	Καμπτική βλάβη
	Διατμητική αστοχία (όριο)
	Καμπτική αστοχία (όριο)
	Αστοχία λόγω θλίψης (όριο)
	Αστοχία λόγω εφελκυσμού (όριο)
	Αστοχία στην ελαστική φάση(όριο)



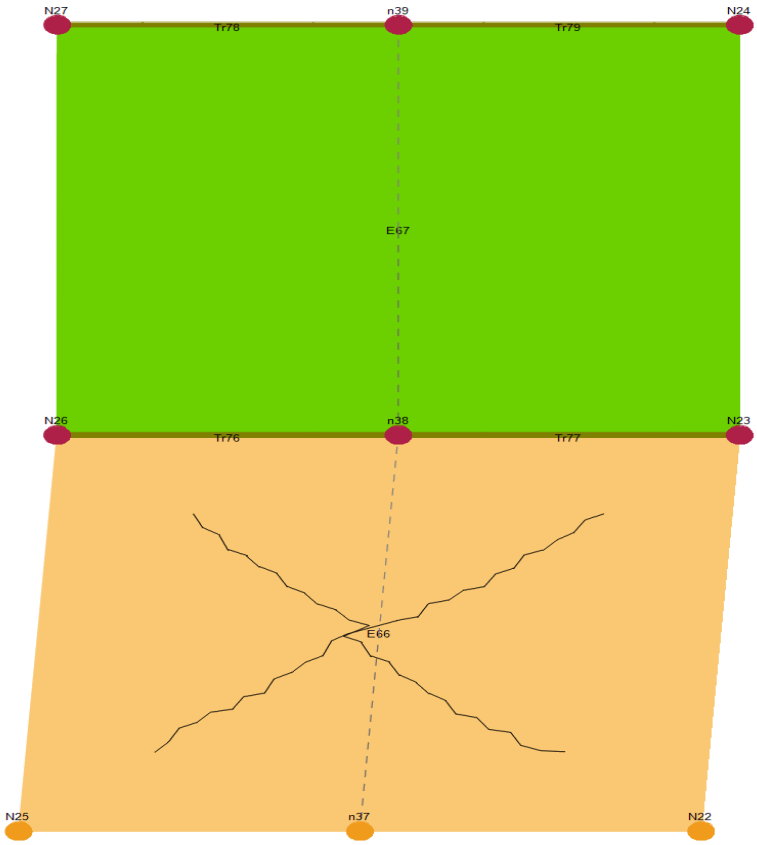
Εικόνα 2.7: Παρουσίαση φορέα μετά και το τελευταίο βήμα της pushover για την ανάλυση No.10.



Εικόνα 2.8: Ανατολική πλευρά κτιρίου μετά την ανάλυση Pushover No.10

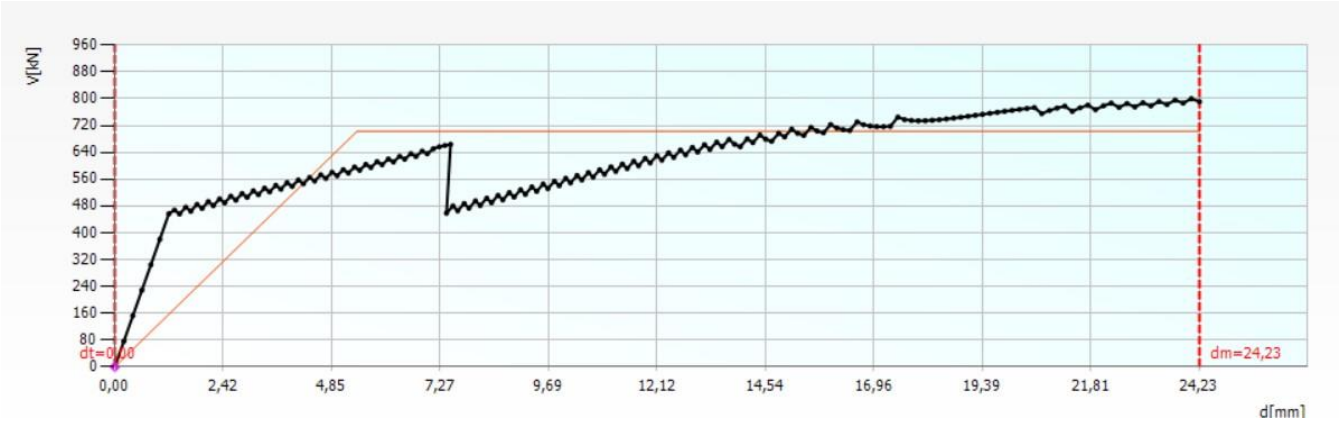


Εικόνα 2.9: Δυτική πλευρά κτιρίου μετά την ανάλυση Pushover No.10

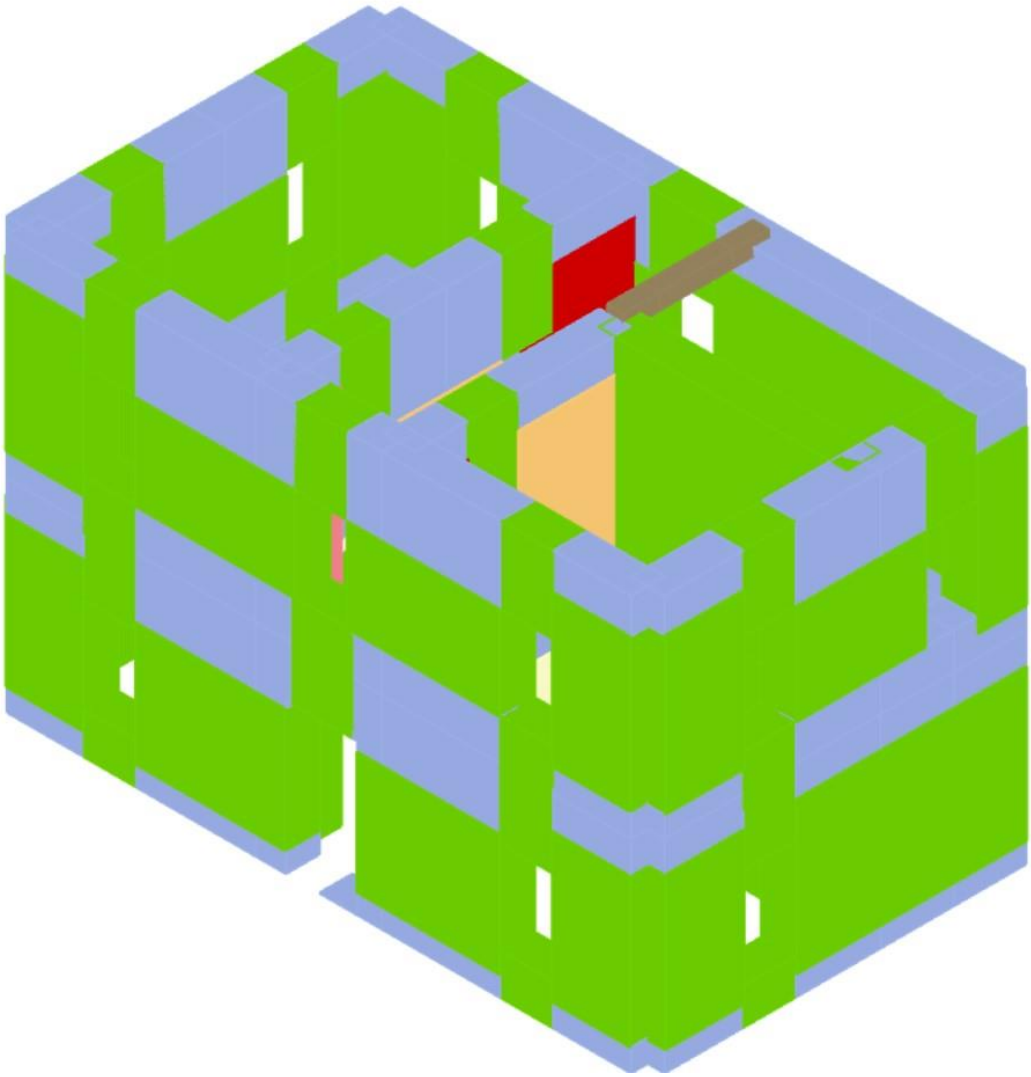


Εικόνα 2.10: Εσωτερική τοιχοποιία κτιρίου (κάθετα στην βορεινή πλευρά) μετά την ανάλυση Pushover No.10.

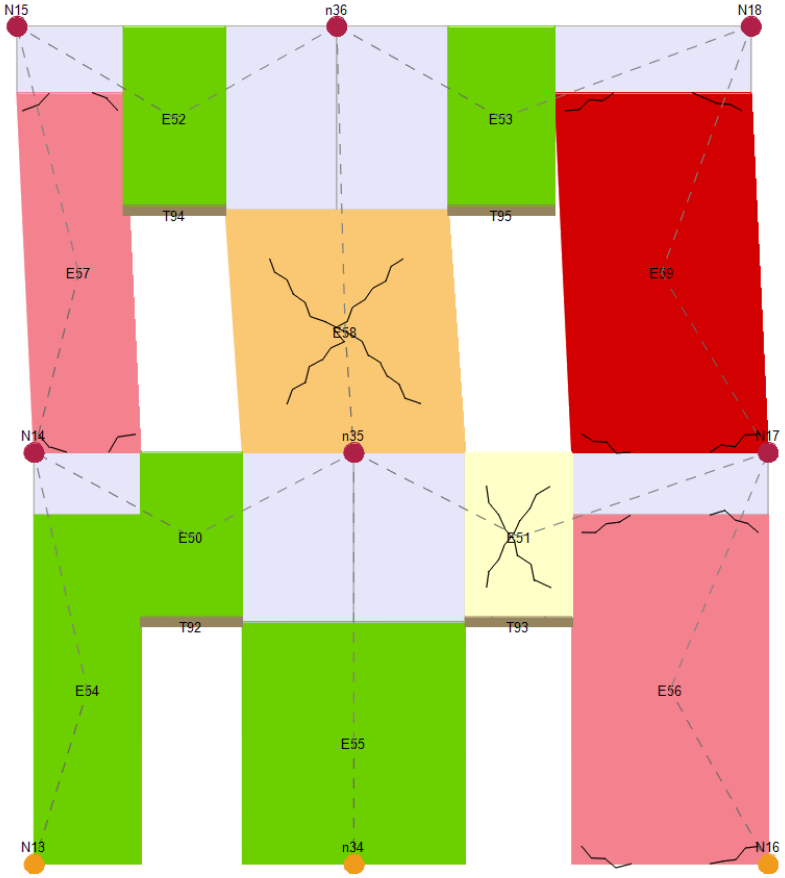
<u>Pushover ανάλυση No.23</u>



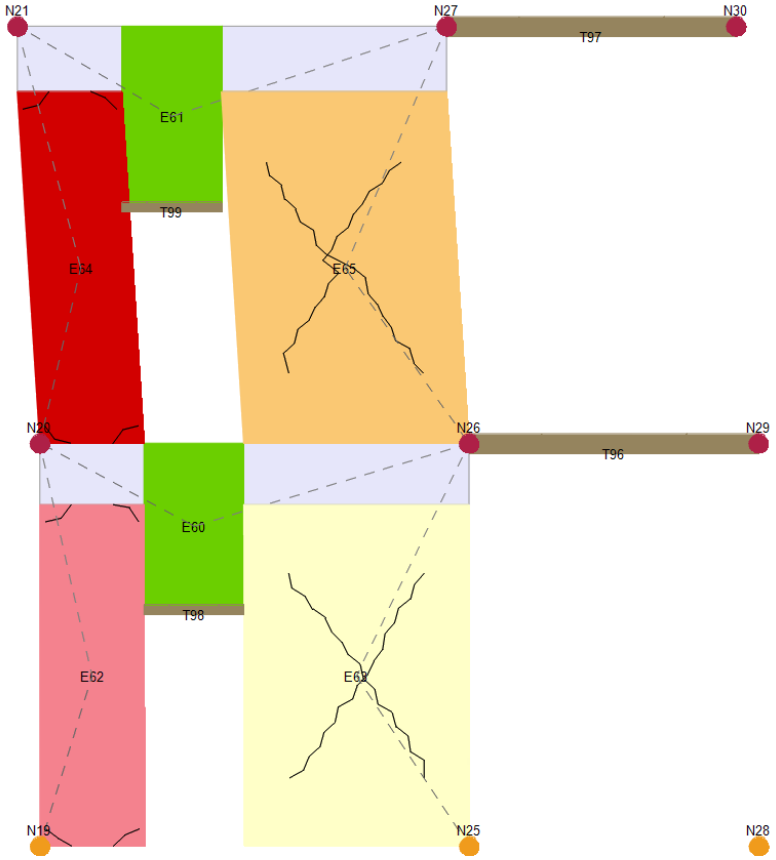
Εικόνα 2.11: Καμπύλη pushover για την ανάλυση No.23 (δυσμενέστερη κατά Y).



Εικόνα 2.12: Παρουσίαση φορέα μετά και το τελευταίο βήμα της pushover για την ανάλυση No.23.



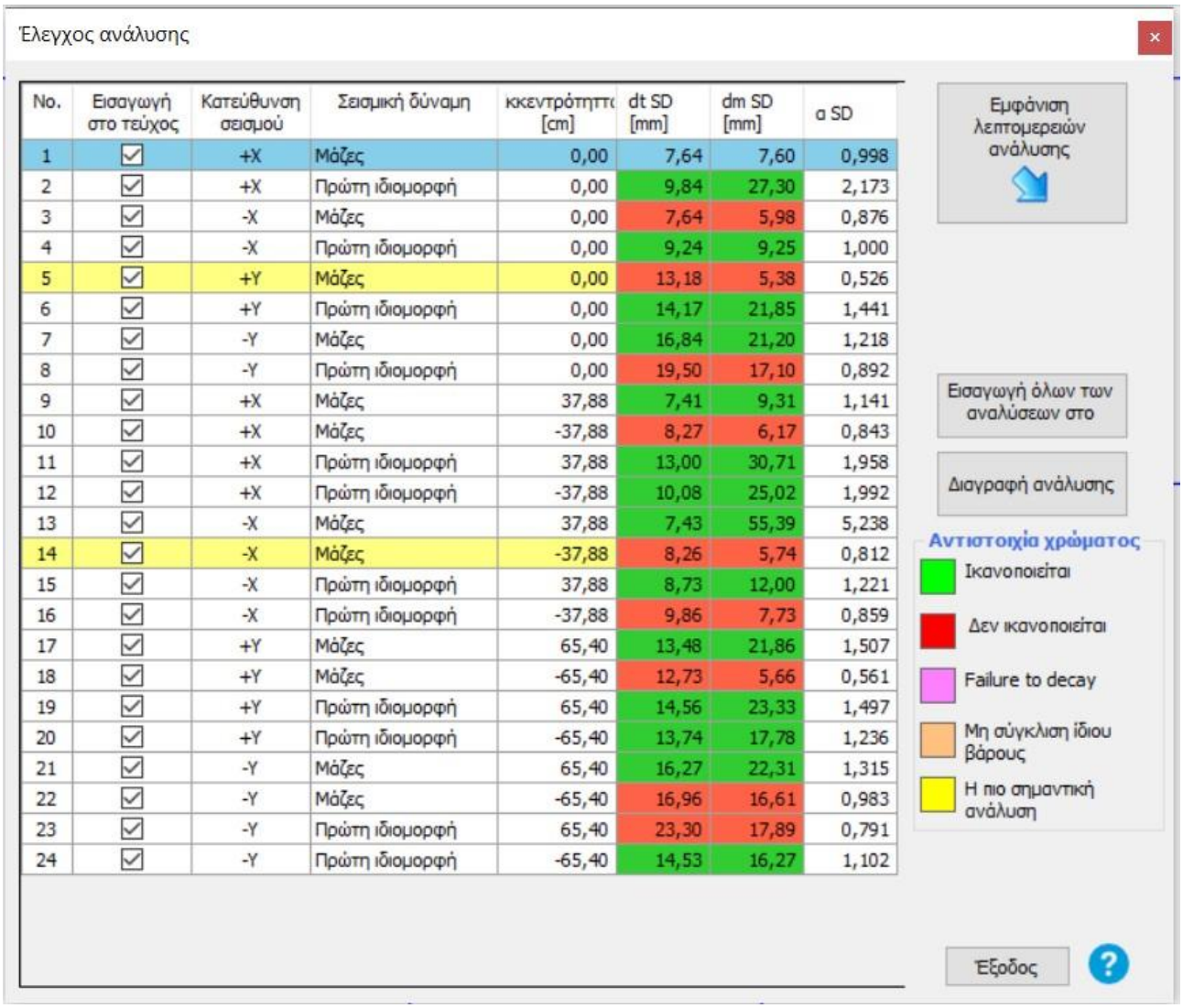
Εικόνα 2.13: Εσωτερική τοιχοποιία 1 κτιρίου μετά την ανάλυση Pushover No.23.



Εικόνα 2.14: Εσωτερική τοιχοποιία 2 κτιρίου μετά την ανάλυση Pushover No.23.

Κόμβος 15

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων Pushover για τον κόμβο που βρίσκεται σε τοίχο που παρουσιάζει πρώιμη αστοχία (κόμβος 15).



Έλεγχος ανάλυσης

No.	Εισαγωγή στο τεύχος	Κατεύθυνση σεισμού	Σεισμική δύναμη	κκεντρότητα [cm]	dt SD [mm]	dm SD [mm]	a SD
1	☑	+X	Μάζες	0,00	7,64	7,60	0,998
2	☑	+X	Πρώτη ιδιομορφή	0,00	9,84	27,30	2,173
3	☑	-X	Μάζες	0,00	7,64	5,98	0,876
4	☑	-X	Πρώτη ιδιομορφή	0,00	9,24	9,25	1,000
5	☑	+Y	Μάζες	0,00	13,18	5,38	0,526
6	☑	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	0,00	14,17	21,85	1,441
7	☑	-Y	Μάζες	0,00	16,84	21,20	1,218
8	☑	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	0,00	19,50	17,10	0,892
9	☑	+X	Μάζες	37,88	7,41	9,31	1,141
10	☑	+X	Μάζες	-37,88	8,27	6,17	0,843
11	☑	+X	Πρώτη ιδιομορφή	37,88	13,00	30,71	1,958
12	☑	+X	Πρώτη ιδιομορφή	-37,88	10,08	25,02	1,992
13	☑	-X	Μάζες	37,88	7,43	55,39	5,238
14	☑	-X	Μάζες	-37,88	8,26	5,74	0,812
15	☑	-X	Πρώτη ιδιομορφή	37,88	8,73	12,00	1,221
16	☑	-X	Πρώτη ιδιομορφή	-37,88	9,86	7,73	0,859
17	☑	+Y	Μάζες	65,40	13,48	21,86	1,507
18	☑	+Y	Μάζες	-65,40	12,73	5,66	0,561
19	☑	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	65,40	14,56	23,33	1,497
20	☑	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	-65,40	13,74	17,78	1,236
21	☑	-Y	Μάζες	65,40	16,27	22,31	1,315
22	☑	-Y	Μάζες	-65,40	16,96	16,61	0,983
23	☑	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	65,40	23,30	17,89	0,791
24	☑	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	-65,40	14,53	16,27	1,102

Εμφάνιση λεπτομερειών ανάλυσης

Εισαγωγή όλων των αναλύσεων στο

Διαγραφή ανάλυσης

Αντιστοιχία χρώματος

Ικανοποιείται

Δεν ικανοποιείται

Failure to decay

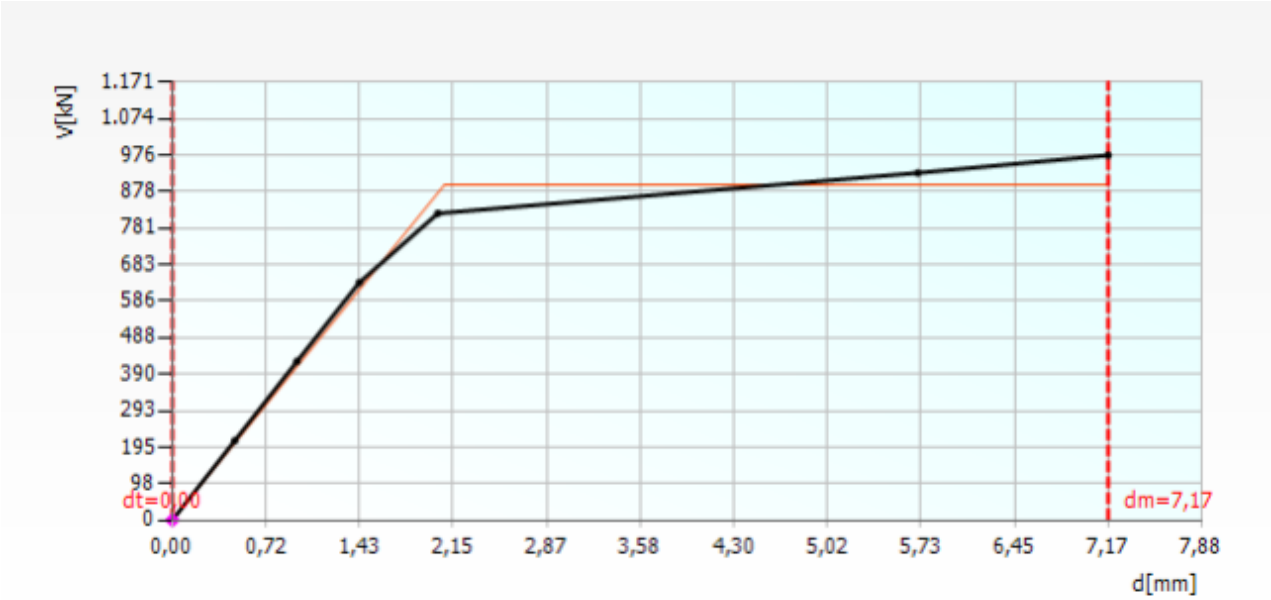
Μη σύγκλιση ίδιου βάρους

Η πιο σημαντική ανάλυση

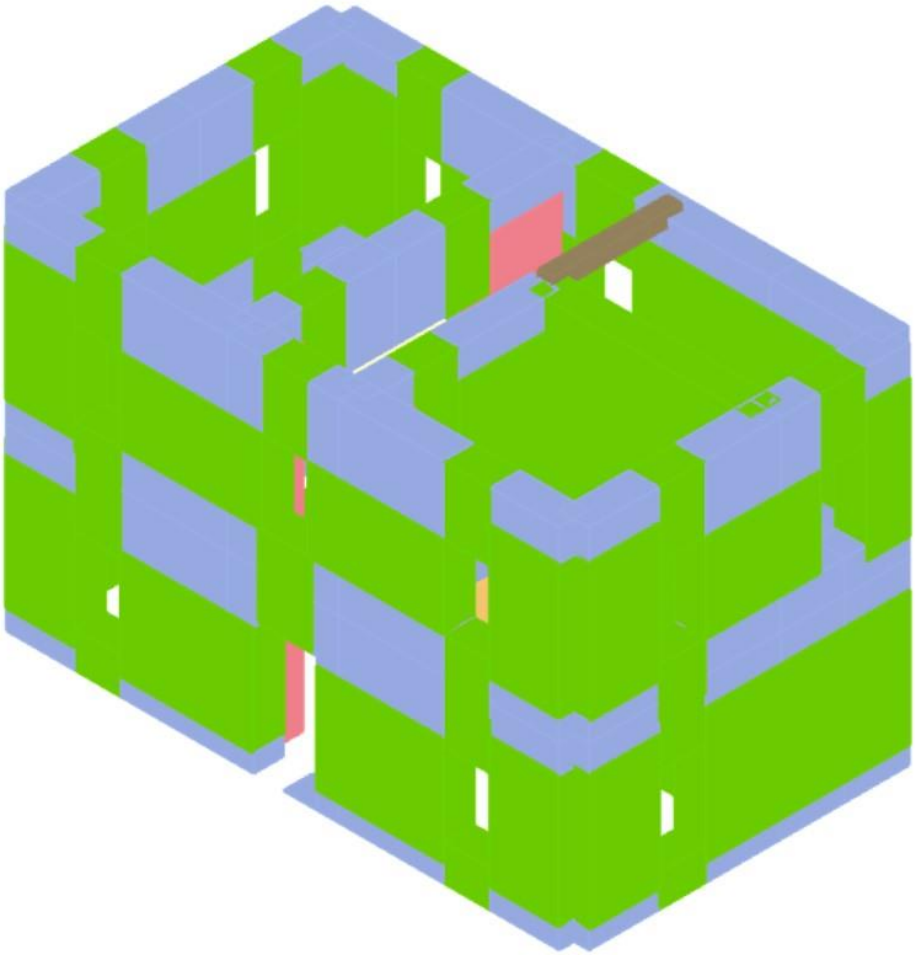
Έξοδος

Εικόνα 2.15: Αποτελέσματα αναλύσεων Pushover

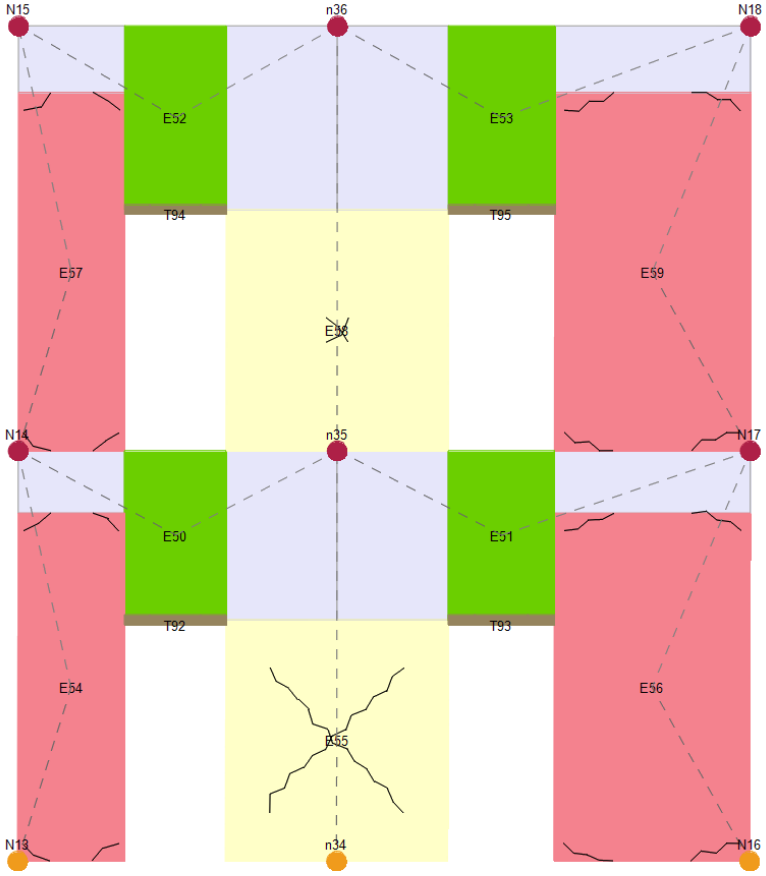
Pushover ανάλυση No.5



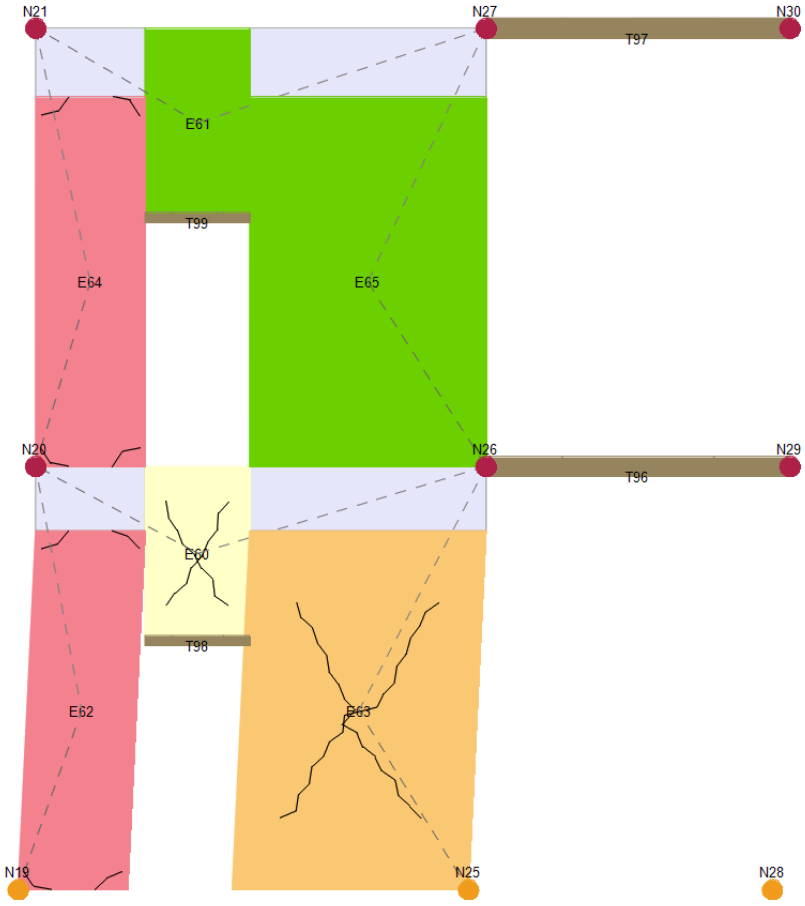
Εικόνα 2.16: Καμπύλη pushover για την ανάλυση No.5 (δυσμενέστερη κατά Y).



Εικόνα 2.17: Παρουσίαση φορέα μετά και το τελευταίο βήμα της pushover για την ανάλυση 5.

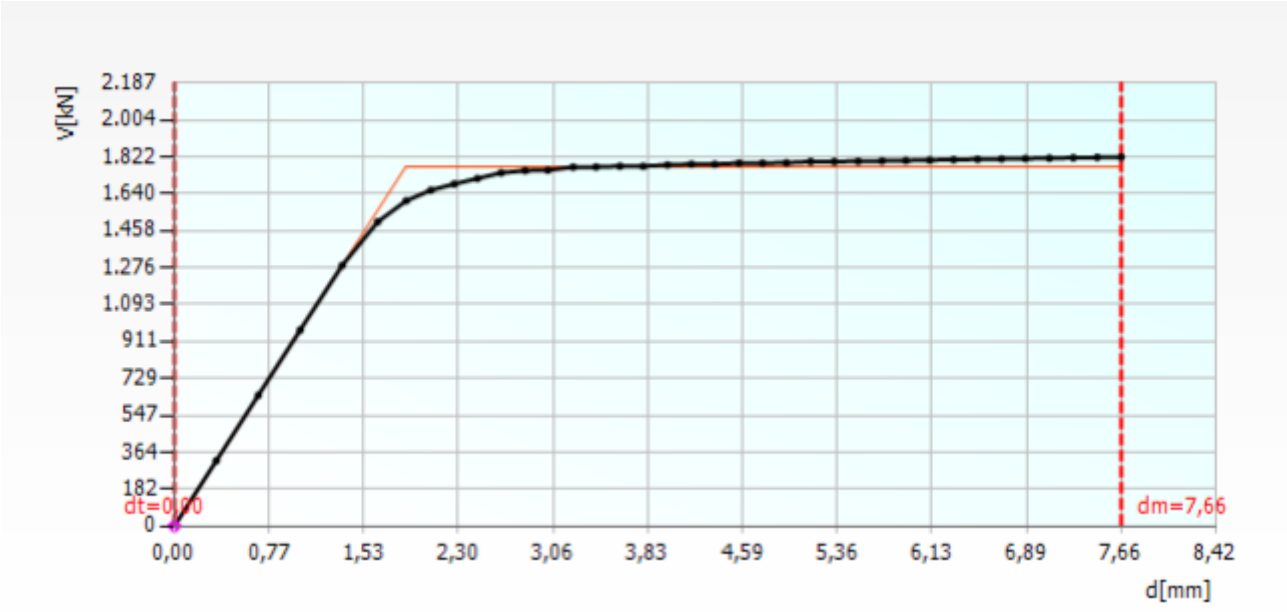


Εικόνα 2.18: Εσωτερική τοιχοποιία 1 κτιρίου μετά την ανάλυση Pushover No.5.

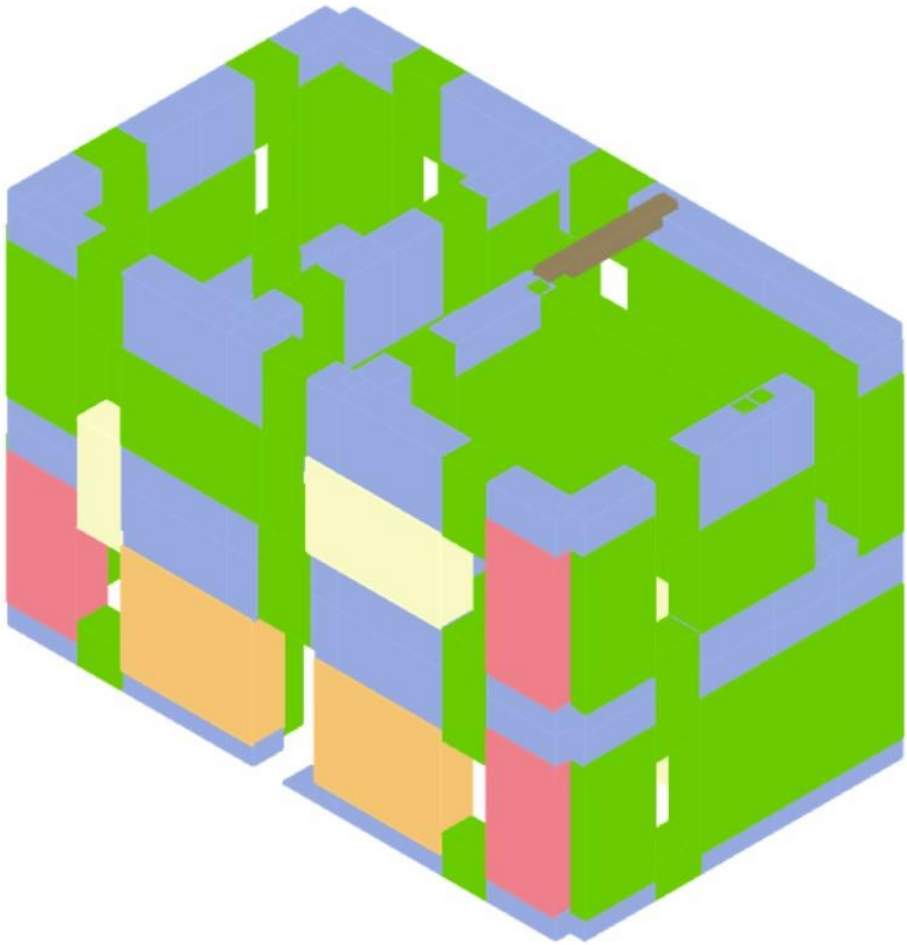


Εικόνα 2.19: Εσωτερική τοιχοποιία 2 κτιρίου μετά την ανάλυση Pushover No.5.

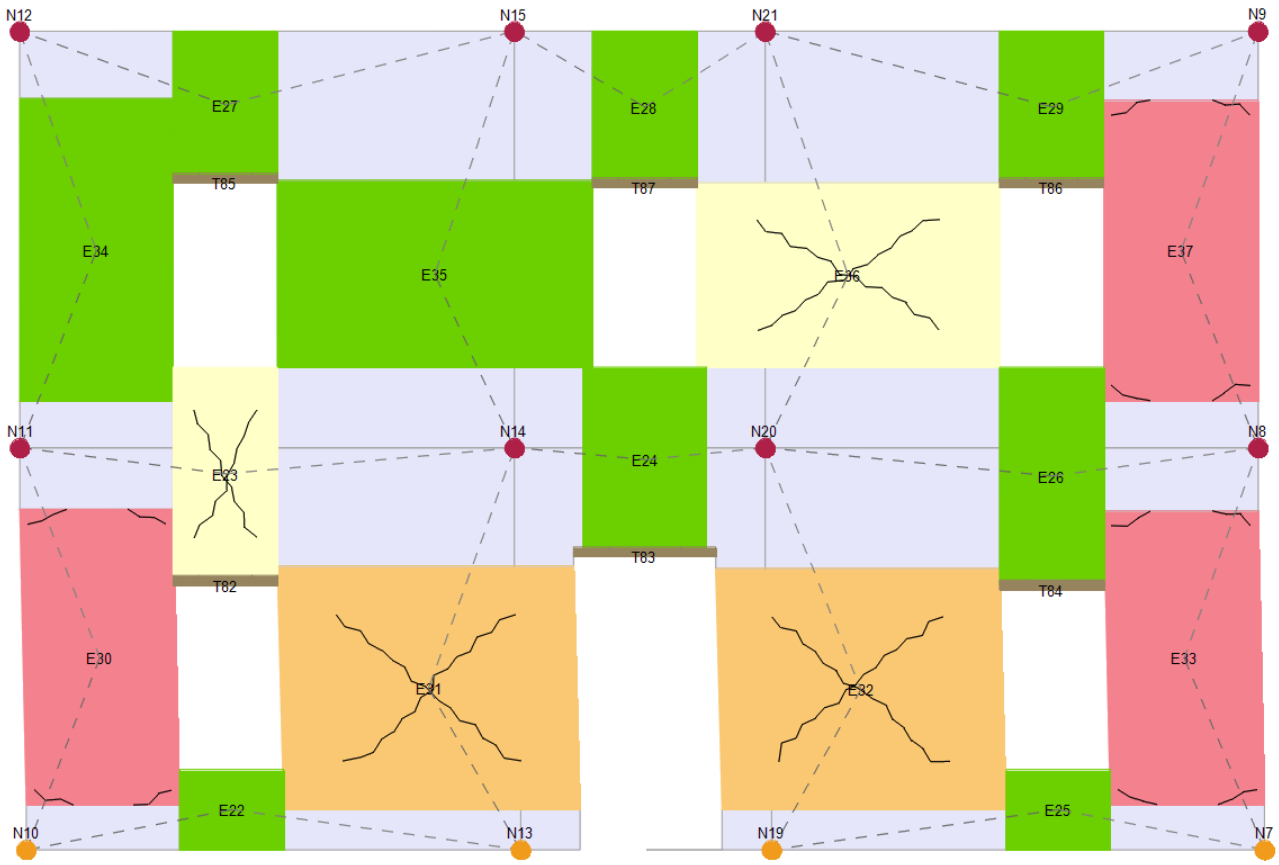
Pushover ανάλυση No.14



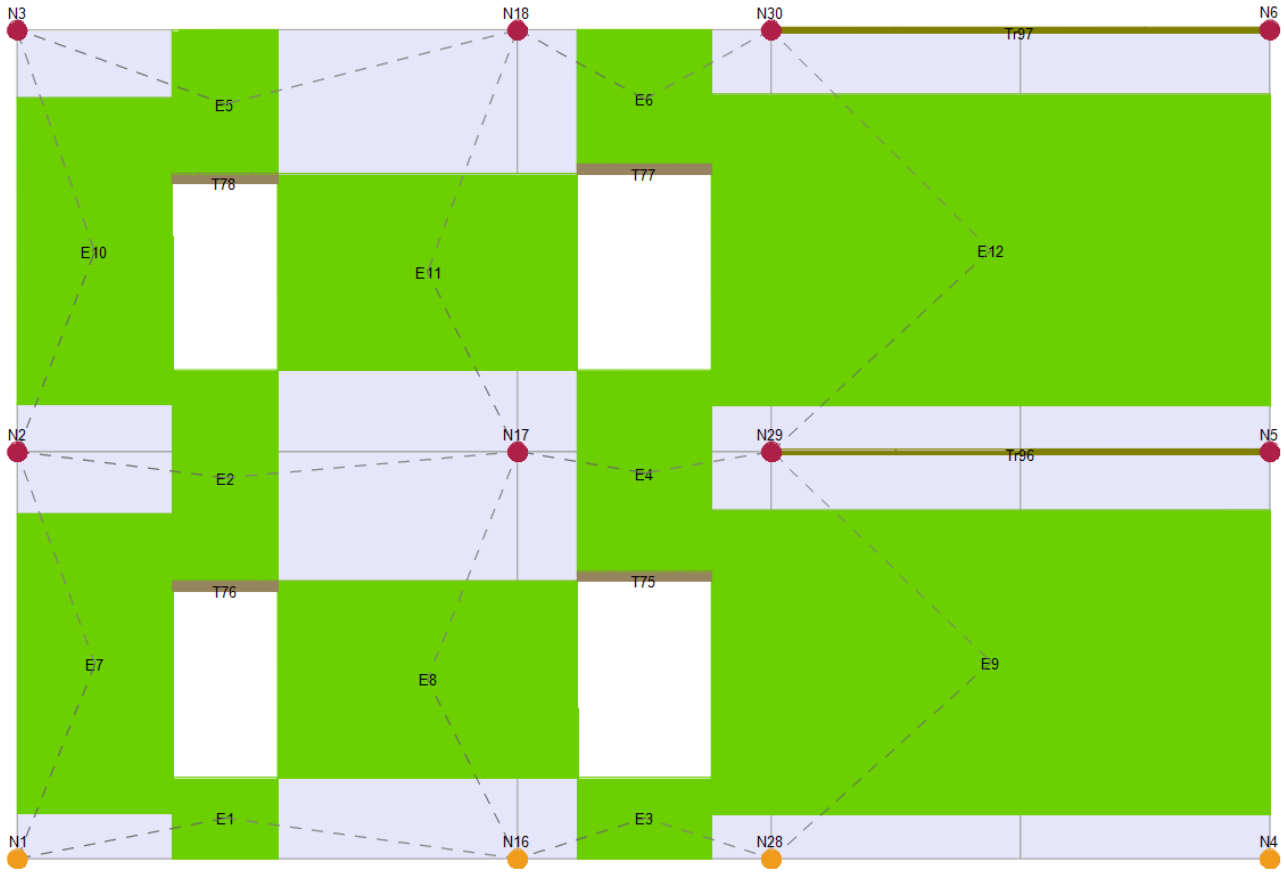
Εικόνα 2.20: Καμπύλη pushover για την ανάλυση No.14 (δυσμενέστερη κατά X).



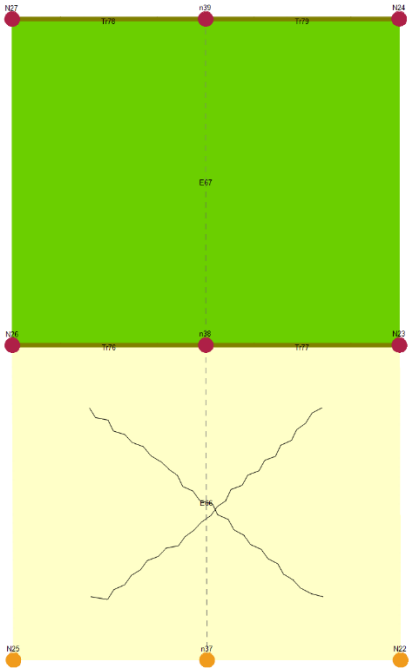
Εικόνα 2.21: Παρουσίαση φορέα μετά και το τελευταίο βήμα της pushover για την ανάλυση 14.



Εικόνα 2.22: Ανατολική πλευρά κτιρίου μετά την ανάλυση Pushover No.14.



Εικόνα 2.23: Δυτική πλευρά κτιρίου μετά την ανάλυση Pushover No.14.



Εικόνα 2.24: Εσωτερική τοιχοποιία κτιρίου (κάθετα στην βορεινή πλευρά) μετά την ανάλυση Pushover No.14.

2.4.7 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Παρατηρείται ότι εν γένει οι διαφορές στα αποτελέσματα των δύο κόμβων ελέγχου δεν είναι σημαντικές διαφορετικές αλλά ωστόσο, εντοπίζονται αποκλίσεις. Γενικά, το πρόβλημα εντοπίζεται στην ανατολική πλευρά του κτιρίου, όπου οι ακραίοι πεσσοί παρουσιάζουν βλάβες ή αστοχίες σε κάμψη εντός επιπέδου και οι μεσσαίοι πεσσοί σε διάτμηση. Επίσης, πρόβλημα παρουσιάζεται στον μεσαίο-διαχωριστικό τοίχο, όπου ο πεσσός του ισογείου παρουσιάζει πρόβλημα σε διάτμηση. Τοπικά παρουσιάζονται προβλήματα, αναλόγως και την ανάλυση και τον κόμβο ελέγχου, σε κάποια υπέρθυρα (διάτμηση) αλλά και σε πεσσούς του ορόφου (εντός επιπέδου κάμψη και διάτμηση).

2.4.8 Εκτός επιπέδου κάμψη

Στους παρόντες κανονισμούς, το κεφάλαιο που είναι αφιερωμένο στις διάφορες μεθόδους ανάλυσης περιγράφουν το πεδίο εφαρμοσιμότητας κάθε υπολογιστικής μεθόδου:

- Ελαστική στατική ανάλυση
- Δυναμική φασματική ανάλυση
- Μη γραμμική στατική ανάλυση
- Μη γραμμική δυναμική ανάλυση

Στην ειδική περίπτωση της μη γραμμικής στατικής ανάλυσης δεν υπάρχει κάποιο άρθρο το οποίο να περιγράφει την διαδικασία για τον εκτός επιπέδου έλεγχο των τοίχων, και για το λόγο αυτό χρειάζεται να αντλήσουμε πληροφορίες από τα αντίστοιχα κεφάλαια της ελαστικής στατικής ανάλυσης και της δυναμικής φασματικής, στα οποία προτείνεται η χρήση των μεθόδων υπολογισμού που χρησιμοποιούνται αντίστοιχα για μη στατικά στοιχεία.

Μέθοδος υπολογισμού

Επιδιωκόμενη ροπή

Ο έλεγχος για την εκτός επιπέδου αστοχία ενός πεσσού (κατακόρυφο τμήμα τοίχου) μπορεί να εκτελείται ξεχωριστά για κάθε πεσσό λαμβάνοντας q_a = #qa#. Πιο ειδικότερα, η σεισμική δράση με ορθογωνική κατανομή σε έναν τοίχο μπορεί να αναπαρασταθεί με μία οριζόντια δύναμη ίση με S_a/q_a φορές του κατακόρυφου φορτίου.
Η παρακάτω σχέση εκφράζει την αντίσταση των τοίχων έναντι σεισμού, θεωρώντας το S_a :

$$S_a = \alpha \cdot S \cdot [1.5 \cdot (1 - Z/H) - 0.5] \geq \alpha \cdot S$$

όπου:
a : ο λόγος της μέγιστης επιτάχυνσης του εδάφους ag, λαμβάνοντας τύπο εδάφους A για τον έλεγχο σε οριακή κατάσταση σχεδιασμού και επιτάχυνση της βαρύτητας g
S: συντελεστής ο οποίος λαμβάνει υπόψη της κατηγορία του εδάφους και τους συνθήκες τοπογραφίας
Z: σημείο του κέντρου βάρους του μη στατικού στοιχείου σε απόσταση από την στάθμη θεμελίωσης
H : Ύψος του κτιρίου σε απόσταση από την στάθμη θεμελίωσης

Θεωρείται μία οριζόντια δύναμη F_h η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$F_h = N \cdot S_a/q_a$$

Όπου N είναι το βάρος του πεσσού (κατακόρυφο τμήμα τοίχου).
Οπωσδήποτε, η δύναμη αυτή θα πρέπει να κατανέμεται καθ' ύψος της επιφάνειας του τοίχου, ενώ υπολογίζεται από τη σχέση $q_h = F_h/h_e$.

Θεωρώντας ότι η επιφάνεια του τοίχου συνδέεται αρθρωτά με τα δάπεδα, η μέγιστη επιδιωκόμενη ροπή θα βρίσκεται στο μέσο του ύψους του πεσσού, υπολογιζόμενη από τη σχέση από τον τύπο:

$$M_{ed} = q_h \cdot h_e^2/coef$$

όπου h_e είναι το ισοδύναμο ύψος του πεσσού το οποίο υπολογίζεται ως ίσο με το ύψος του ορόφου.

Ροπή αντίστασης

Για τον υπολογισμό της οριακής ροπής M_{Rd} , είναι απαραίτητο να επιτευχθεί η οριακή κεντρική θλίψη του πεσσού :

$$N \leq N_{Rd} = 0.85 \cdot f_d \cdot l \cdot t$$

όπου:
fd: αντίσταση σχεδιασμού τοιχοποιίας
l: μήκος της τοιχοποιίας
t: πάχος της τοιχοποιίας
Η οριακή ροπή μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση της σχέσης που ακολουθεί:

$$M_{Rd} = \left(t^2 \cdot l \cdot \frac{\sigma_0}{2}\right) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_0}{0.85 \cdot f_d}\right)$$

σ_0 καθορίζεται ως η μέση τιμή του εφελκυσμού στον πεσσό.

Έλεγχος

Ο έλεγχος πραγματοποιείται μέσω της ανισότητας $M_{ed} \leq M_{Rd}$, όπου συγκρίνονται οι δύο ροπές και προκύπτει ο συντελεστής ασφαλείας μέσω του λόγου M_{Rd}/M_{ed}. Αν ο συντελεστής αυτός είναι μεγαλύτερος από την μονάδα τότε ο έλεγχος ικανοποιείται.
Η PGAc αντιπροσωπεύει την ικανότητα επιτάχυνσης η οποία θα μπορούσε να οδηγήσει στην επίτευξη της οριακής συνθήκης για τον πεσσό.

Αποτελέσματα

Τοίχοι	MRd/Med Min
1	1,64
2	2,08
3	1,95
4	2,04
5	1,35
6	1,35
7	1,49

Εικόνα 2.25: Έλεγχοι σε εκτός επιπέδου κάμψη.

Προκύπτει ότι δεν υπάρχει ανεπάρκεια σε εκτός επιπέδου κάμψη σε κανέναν από τους τοίχους του κτιρίου.

3. Επεμβάσεις ενίσχυσεις

3.1 Εισαγωγή

Οι επεμβάσεις σε κτίρια που χαρακτηρίζονται ως μνημεία θα πρέπει να ικανοποιούν τις ακόλουθες αρχές (Σπυράκος Κ., 2019):

1. Σεβασμός στο πρωτότυπο, διατήρηση της αυθεντικότητας και διάκριση των νέων επεμβάσεων.
2. Διατήρηση της ιστορικής αλήθειας – Τεκμηρίωση (ιστορική, αρχαιολογική, αρχιτεκτονική, δομοστατική, παθολογία, υλικά δόμησης.)
3. Συμβατότητα μεταξύ των υφισταμένων και νέων υλικών, χρήσεων και δομικών στοιχείων.
4. Ανθεκτικότητα σε διάρκεια των νέων επεμβάσεων.
5. Αποτελεσματικότητα των επεμβάσεων.
6. Περιορισμός των επεμβάσεων στις απαραίτητες.
7. Αναστρεψιμότητα προτεινόμενων επεμβάσεων.

Σε πρώτη φάση θα επιλεχθούν επεμβάσεις οι οποίες βελτιώνουν τη συνολική συμπεριφορά του κτιρίου και κρίνονται ως ήπιες, σύμφωνα και με τα παραπάνω κριτήρια. Αυτές είναι:

1. Ενέματα (ομογενοποίηση μάζας)

Η τεχνική της ομογενοποίησης με ενέματα πραγματοποιείται με την εισπίεση ενεμάτων στο εσωτερικό των κενών της τοιχοποιίας με στόχο τη βελτίωση των μηχανικών της χαρακτηριστικών. Η τεχνική προτείνεται για τοιχοποιίες οι οποίες χαρακτηρίζονται είτε από μεγάλο ποσοστό κενών είτε από την παρουσία πολλών ρηγματώσεων στο εσωτερικό τους. Ο σκοπός της επέμβασης είναι να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο το ποσοστό των κενών και να ενισχυθεί η σύνδεση μεταξύ των λιθοσωμάτων. Η επέμβαση βελτιώνει τα μηχανικά χαρακτηριστικα της τοιχοποιίας όσον αφορά την αντοχή και τη δυσκαμψία. Οι καθοριστικές ιδιότητες για τη βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας είναι κυρίως: (i) η εφελκυστική αντοχή του ενέματος και (ii) η συνάφεια μεταξύ του ενέματος και των υφιστάμενων υλικών.

Η ομογενοποίηση δεν τροποποιεί τη μορφολογία και την αισθητική της κατασκευής, επιτρέποντας την εφαρμογή της σε μνημεία και διατηρητέα κτίρια, με την προϋπόθεση της χρήσης ενεμάτων κατάλληλης σύνθεσης τα οποία μέσω της φυσικοχημικής τους συμβατότητας με τα υφιστάμενα υλικά εξασφαλίζουν ικανοποιητική διαχρονική συμπεριφορά του κτιρίου. Δεδομένου ότι η επέμβαση δεν είναι αναστρέψιμη, τόσο το ένεμα όσο και ο τρόπος εφαρμογής του πρέπει να σχεδιαστούν κατάλληλα ώστε να ικανοποιούνται όλες οι απαιτήσεις αναστρεψιμότητας-συμβατότητας.

<u>Διαδικασία εφαρμογής:</u>

Η εφαρμογή της ομογενοποίησης αποτελείται από τις ακόλουθες φάσεις:

- Φάση Α΄: Καθαρισμός του τοίχου. Πραγματοποιείται μετά την καθαίρεση του επιχρίσματος. Ακολουθεί καθαρισμός της επιφάνειας με νερό με υψηλή ή χαμηλή πίεση. Η εφαρμογή υψηλής πίεσης απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή για να μην αποδιοργανωθεί η τοιχοποιία. Ο καθαρισμός δύναται να πραγματοποιθεί με: (i) κορεσμένο ατμό σε 150-200° C και πίεση 5-10 atm, με ιδιαίτερη προσοχή για να μην αποδιοργανωθεί περισσότερο η τοιχοποιία, (ii) πεπιεσμένο αέρα, (iii) αμμοβολή, (iv) βούρτσα, (v) ειδικά χημικά συστατικά.
- Φάση Β’: Αρμολόγημα και σφράγιση ρωγμών. Για να αποφεύγεται η απώλεια του ενέματος από ενδεχόμενες ρωγμές ή από αδύνατους αρμούς πρέπει πρώτα να πραγματοποιείται αρμολόγημα. Παρόλο που το αρμολόγημα είναι συχνά απαραίτητο και για τη στεγάνωση της τοιχοποιίας αλλά και για την αποκατάσταση του πάχους της τοιχοποιίας μετά την εφαρμογή της φάσης Α’, δεν είναι απαραίτητο να είναι βαθύ, δίοτι: (i) δεν αναμένεται να είναι αποτελεσματικό ως προς την αύξηση της αντοχής της τοιχοποιίας και (ii) επιβαρύνει δυσανάλογα το κόστος των επεμβάσεων. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να χρησιμοποιούνται κατάλληλα κονιάματα με χαρακτηριστικά συμβατά με αυτά του κονιάματος της υφιστάμενης τοιχοποιίας.
- Φάση Γ’: Καθορισμός βέλτιστης απόστασης οπών. Πριν διανοιχθούν οι οπές στο σύνολο του τοίχου και εισπιεστεί ακολούθως το ένεμα, πρέπει να καθοριστεί η βέλτιστη απόσταση για τη διάνοιξη των οπών. Για το σκοπό αυτό κατασκευάζεται μια οπή αναφοράς και μια σειρά οπών σε διάφορες αποστάσεις από την οπή αναφοράς. Το ένεμα εισάγεται από την οπή αναφοράς μέχρις ότου παρατηρηθεί η έξοδος του από την πιο κοντινή οπή. Σε αυτό το σημείο φράζεται η κοντινή οπή από την οποία εξέρχεται το ένεμα και συνεχίζεται η ενεμάτωση και το αντίστοιχο σφράγισμα των οπών μέχρι πλέον να μη μπορεί να εξέλθει το ένεμα από οπή.
- Φάση Δ’: Διάνοιξη των οπών. Έχοντας καθορίσει την βέλτιστη απόσταση d για την διάνοιξη των οπών, κατασκευάζονται οι υπόλοιπες οπές για την ενεμάτωση με διάταξη ισόπλευρου τριγώνου πλευράς d. Με αυτή την κατανομή των οπών επιτυγχάνεται να μειωθεί ο όγκος της

τοιχοποιίας στην οποία δε φτάνει το ένεμα. Γενικά οι οπές για την ενεμάτωση εφαρμόζονται στην ίδια πλευρά του τοίχου. Το βάθος της διάνοιξης των οπών πρέπει να είναι μεταξύ των 2/3 και των 3/4 του πάχους του τοίχου και πραγματοποιούνται με κλίση από πάνω προς τα κάτω για να διευκολύνεται η ενεμάτωση. Για την κατασκευή τους συνίσταται η χρήση περιστροφικών τρυπανιών, όχι κρουστικών τα οποία δύναται να προκαλέσουν βλάβες στην τοιχοποιία.

- Φάση Ε΄: Τοποθέτηση των σωλήνων πλήρωσης. Στις οπές εισάγονται σωλήνες πλήρωσης περιμετρικά των οποίων τοποθετείται κονίαμα ταχείας πήξης ώστε να αποφευχθεί η έξοδος του ενέματος, κατά τη διάρκεια της ενεμάτωσης.
- Φάση ΣΤ΄: Πλύσιμο και διαβροχή του τοίχου μέχρι κορεσμού. Πλένεται ο τοίχος ώστε να απομακρυνθούν τα τρίμματα που δημιουργήθηκαν κατά τη διάνοιξη των οπών. Ακολουθεί διαβροχή του τοίχου μέχρι κορεσμού ώστε να αποφευχθεί η απορρόφηση νερού από το ένεμα στην επόμενη φάση της ενεμάτωσης.
- Φάση Ζ΄: Ενεμάτωση. Σε αυτό το σημείο η τοιχοποιία είναι έτοιμη για ενεμάτωση. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του τοίχου και των ενεμάτων επιλέγεται μία από τις ακόλουθες μεθόδους: ομογενοποίηση με πίεση, ομογενοποίηση με βαρύτητα και ομογενοποίηση με υποπίεση. Οι δύο πρώτες είναι οι περισσότερο διαδεδομένες.

2. Πρόσθετη στρώση ξύλινου πατώματος

Κατά κανόνα είναι επιθυμητό τα πατώματα να έχουν αυξημένη εντός επιπέδου δυσκαμψία. Επίσης, σε κάθε περίπτωση, πρέπει να αποφεύγονται επεμβάσεις οι οποίες αλλάζουν σημαντικά το βάρος των πατωμάτων, ιδιαίτερα στους ανώτερους ορόφους. Η επικάλυψη του πατώματος με μία ή περισσότερες πρόσθετες στρώσεις σανίδων, οι οποίες συνδέονται με το αρχικό δάπεδο με καρφιά ή/και βίδες, είναι μία από τις ευκολότερες και πιο άμεσες επεμβάσεις ενίσχυσης. Επίσης, οι ξύλινες φέρουσες δοκοί του πατώματος οφείλουν να συνδέονται κατάλληλα μέσω μεταλλικών συνδέσμων με τους τοίχους στους οποίους εδράζονται.

3.2 Προσομοίωση επεμβάσεων στο πρόγραμμα 3muri

Για την προσομοίωση της εφαρμογής των ενεμάτων θα πρέπει να υπολογιστούν τα βελτιωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά της τοιχοποιίας, στη συγκεκριμένη περίπτωση τη θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται η σχέση (6.7) του ΚΑΔΕΤ για υδραυλικά ενέματα σε τρίστρωτες τοιχοποιίες:

$$f_{wcs} = f_{wc0}(1 + 1{,}25\frac{V_i}{V_w}\frac{\sqrt{f_{gr,c}}}{f_{wc0}})$$

όπου,
f_{wcs} η θλιπτική αντοχή της ενισχυμένης τοιχοποιίας
f_{wc0} η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας πριν την ενίσχυση
V_i ο όγκος του αρχικού υλικού πληρώσεως ο οποίος αντιστοιχεί σε
V_w όγκο τοιχοποιίας
$f_{gr,c}$ η θλιπτική αντοχή του ενέματος

Με εφαρμογή της σχέσης (6.7) για $f_{wc0} = 1.32MPa$, $\frac{V_i}{V_w} = 0.34$, $f_{gr,c} = 10MPa$ προκύπτει $f_{wcs} = 2.66MPa$.

3.3 Ιδιομορφική ανάλυση κτιρίου με επεμβάσεις

Ιδιομορφή	T [s]	mx [kg]	Mx [%]	my [kg]	My [%]	mz [kg]	Mz [%]
1	0,18962	468,376	0,08	479.668,211	82,88	0,192	0,00
2	0,14143	448.414,423	77,48	316,167	0,05	70,444	0,01
3	0,13214	64.005,058	11,06	2.583,937	0,45	4,147	0,00
4	0,11384	17,610	0,00	25.340,126	4,38	96,267	0,02
5	0,10432	8.421,999	1,46	14,074	0,00	142,175	0,02
6	0,09693	1.485,578	0,26	16.015,857	2,77	53,878	0,01
7	0,08678	879,146	0,15	18.626,886	3,22	158,028	0,03
8	0,06322	276,662	0,05	9.348,864	1,62	0,186	0,00
9	0,05650	12.818,974	2,21	7.321,449	1,27	135,482	0,02
10	0,05514	13.238,978	2,29	16.508,406	2,85	2.188,440	0,38
11	0,05480	24.001,849	4,15	1.806,163	0,31	825,476	0,14
12	0,04940	508,705	0,09	133,872	0,02	3.151,628	0,54
13	0,04387	170,363	0,03	149,343	0,03	118.129,241	20,41
14	0,04370	1.067,335	0,18	10,191	0,00	230.906,214	39,90

Εικόνα 3.1: Ιδιομορφική ανάλυση ενισχυμένου φορέα

Παρατηρείται σημαντική μείωση της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου του κτιρίου.

3.4 Μη γραμμική στατική ανάλυση

Η αποτίμηση του ενισχυμένου φορέα θα γίνει με χρήση της ανάλυσης Pushover. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο κόμβος ελέγχου θα επιλεγεί ως ο πλησιέστερος στο κέντρο μάζας, από τη στιγμή που υπάρχει ένα αρκετά πιο ισχυρό διάφραγμα στις στάθμες του κτιρίου σε σχέση με την αρχική του κατάσταση.

Κόμβος 27

Έλεγχος ανάλυσης

No.	Εισαγωγή στο τεύχος	Κατεύθυνση σεισμού	Σεισμική δύναμη	κκεντρότηττ [cm]	dt SD [mm]	dm SD [mm]	α SD
1	☑	+X	Μάζες	0,00	7,43	11,02	1,269
2	☑	+X	Πρώτη ιδιομορφή	0,00	8,94	13,74	1,320
3	☑	-X	Μάζες	0,00	7,12	12,06	1,367
4	☑	-X	Πρώτη ιδιομορφή	0,00	8,94	11,63	1,179
5	☑	+Y	Μάζες	0,00	13,49	9,30	0,773
6	☑	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	0,00	15,43	9,29	0,688
7	☑	-Y	Μάζες	0,00	13,54	10,14	0,816
8	☑	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	0,00	15,95	9,47	0,677
9	☑	+X	Μάζες	37,88	7,48	11,56	1,307
10	☑	+X	Μάζες	-37,88	7,49	10,49	1,222
11	☑	+X	Πρώτη ιδιομορφή	37,88	8,93	14,27	1,357
12	☑	+X	Πρώτη ιδιομορφή	-37,88	9,07	13,51	1,293
13	☑	-X	Μάζες	37,88	7,03	11,93	1,366
14	☑	-X	Μάζες	-37,88	7,38	11,02	1,266
15	☑	-X	Πρώτη ιδιομορφή	37,88	8,85	11,26	1,162
16	☑	-X	Πρώτη ιδιομορφή	-37,88	9,05	12,05	1,197
17	☑	+Y	Μάζες	65,40	13,50	10,70	0,848
18	☑	+Y	Μάζες	-65,40	13,54	8,21	0,710
19	☑	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	65,40	15,59	8,60	0,647
20	☑	+Y	Πρώτη ιδιομορφή	-65,40	15,30	9,68	0,713
21	☑	-Y	Μάζες	65,40	13,64	11,82	0,903
22	☑	-Y	Μάζες	-65,40	13,57	8,45	0,722
23	☑	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	65,40	16,08	8,77	0,638
24	☑	-Y	Πρώτη ιδιομορφή	-65,40	15,85	9,57	0,685

Εμφάνιση λεπτομερειών ανάλυσης

Εισαγωγή όλων των αναλύσεων στο

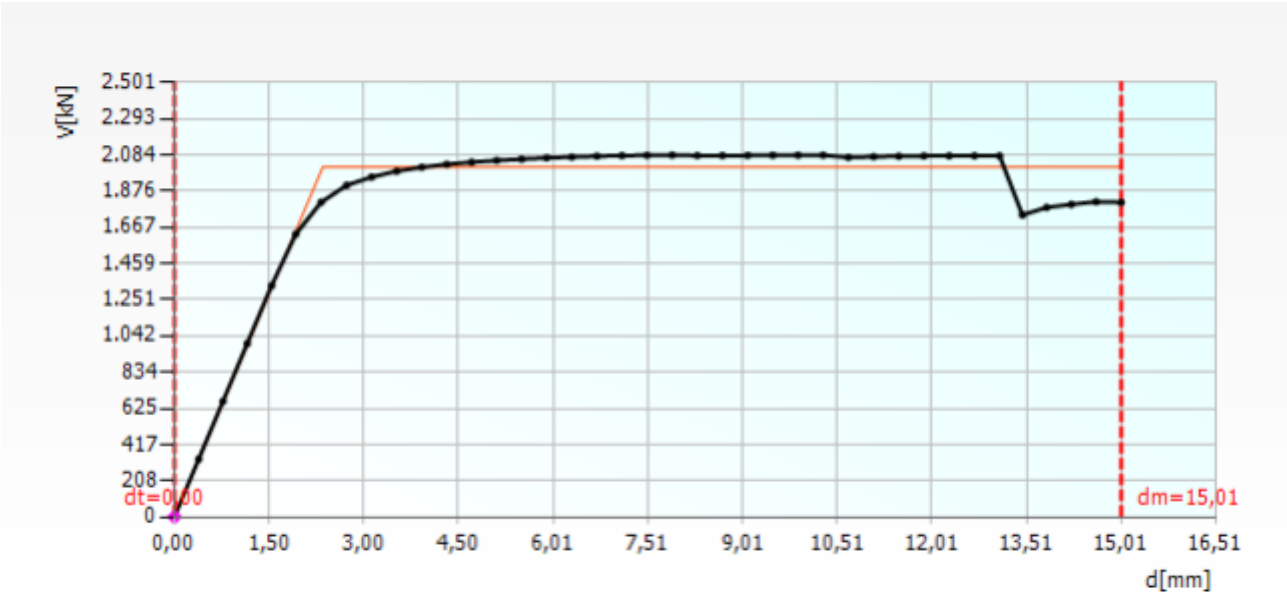
Διαγραφή ανάλυσης

Αντιστοιχία χρώματος

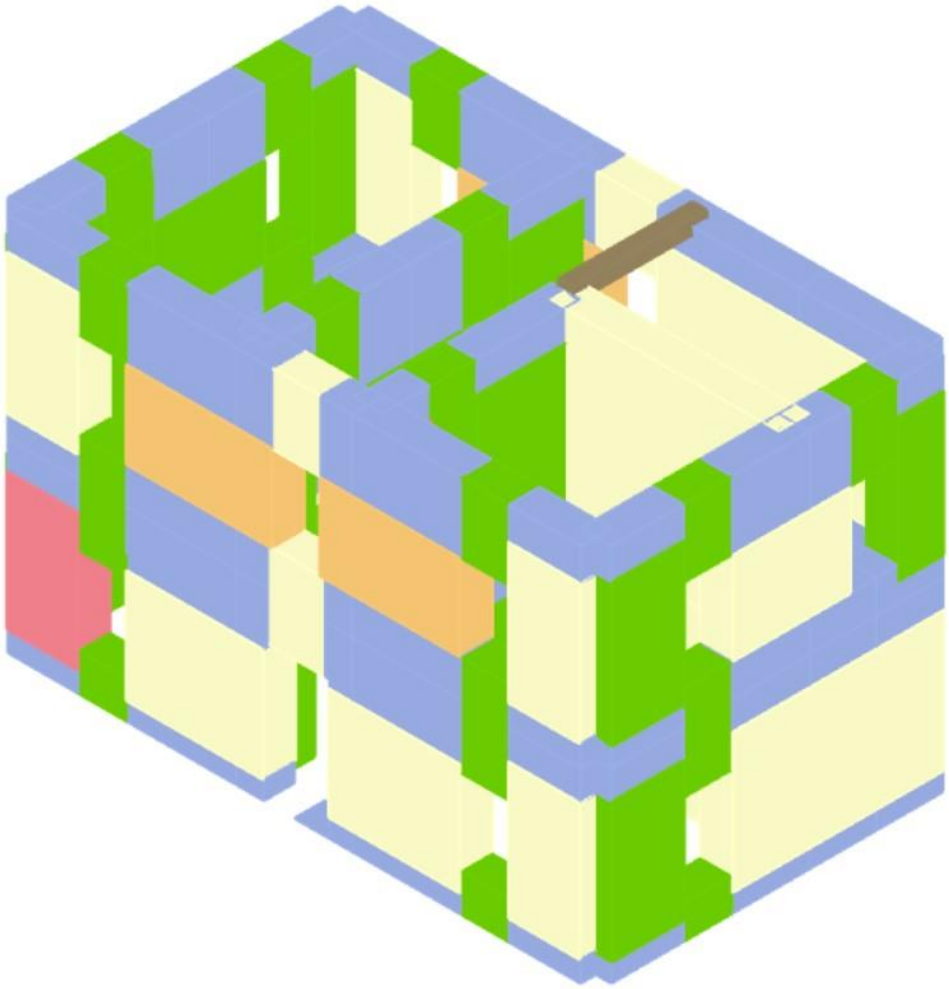
- Ικανοποιείται
- Δεν ικανοποιείται
- Failure to decay
- Μη σύγκλιση ίδιου βάρους
- Η πιο σημαντική ανάλυση

Έξοδος

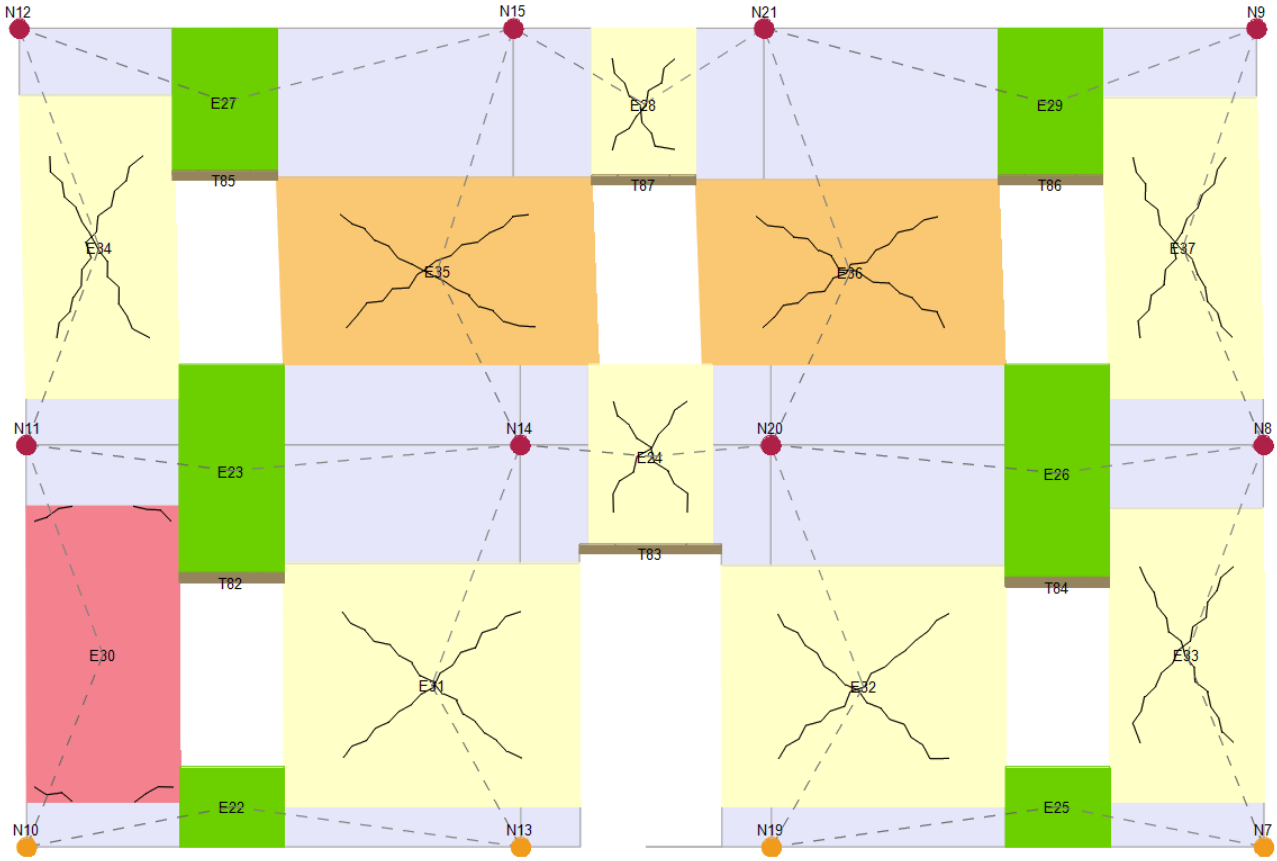
Εικόνα 3.2: Αποτελέσματα αναλύσεων Pushover



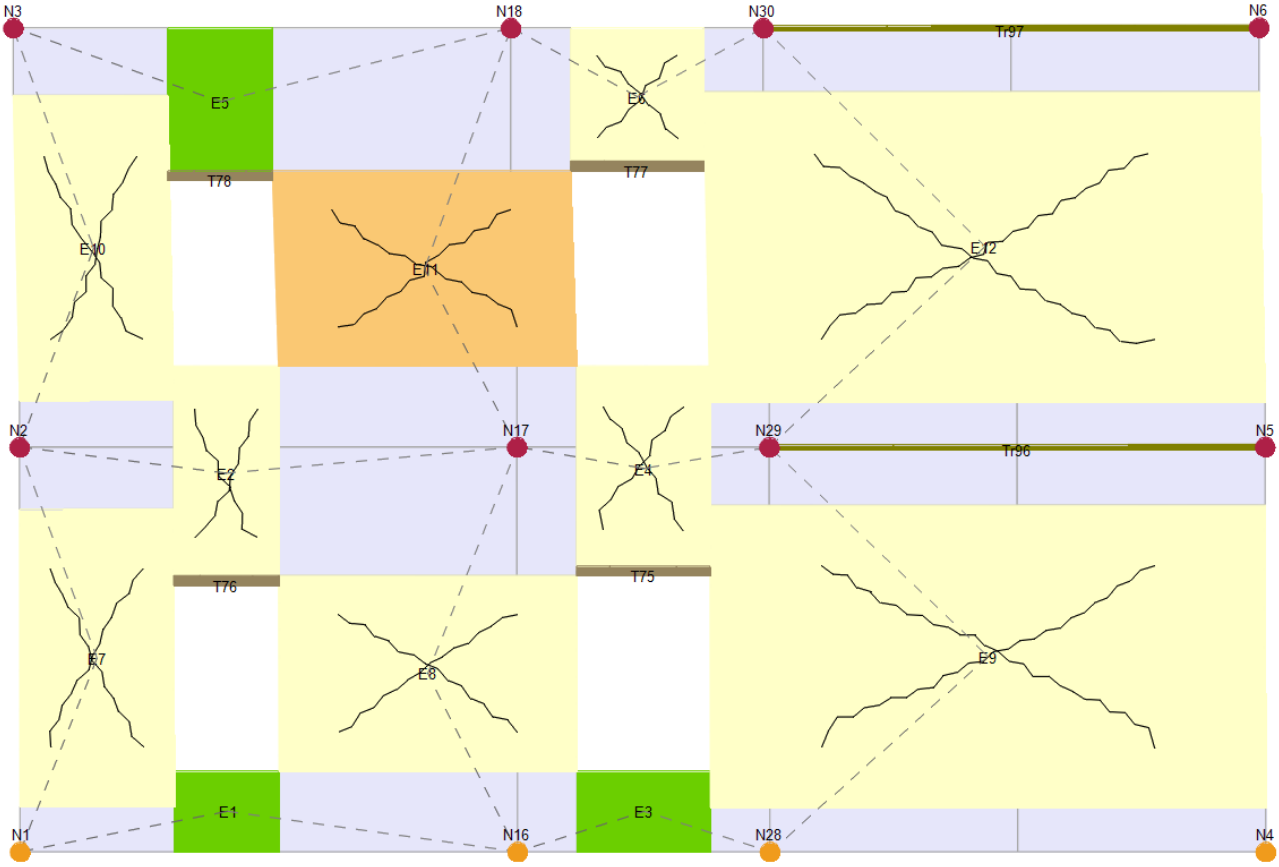
Εικόνα 3.3: Καμπύλη pushover για την ανάλυση No.15 (δυσμενέστερη κατά X).



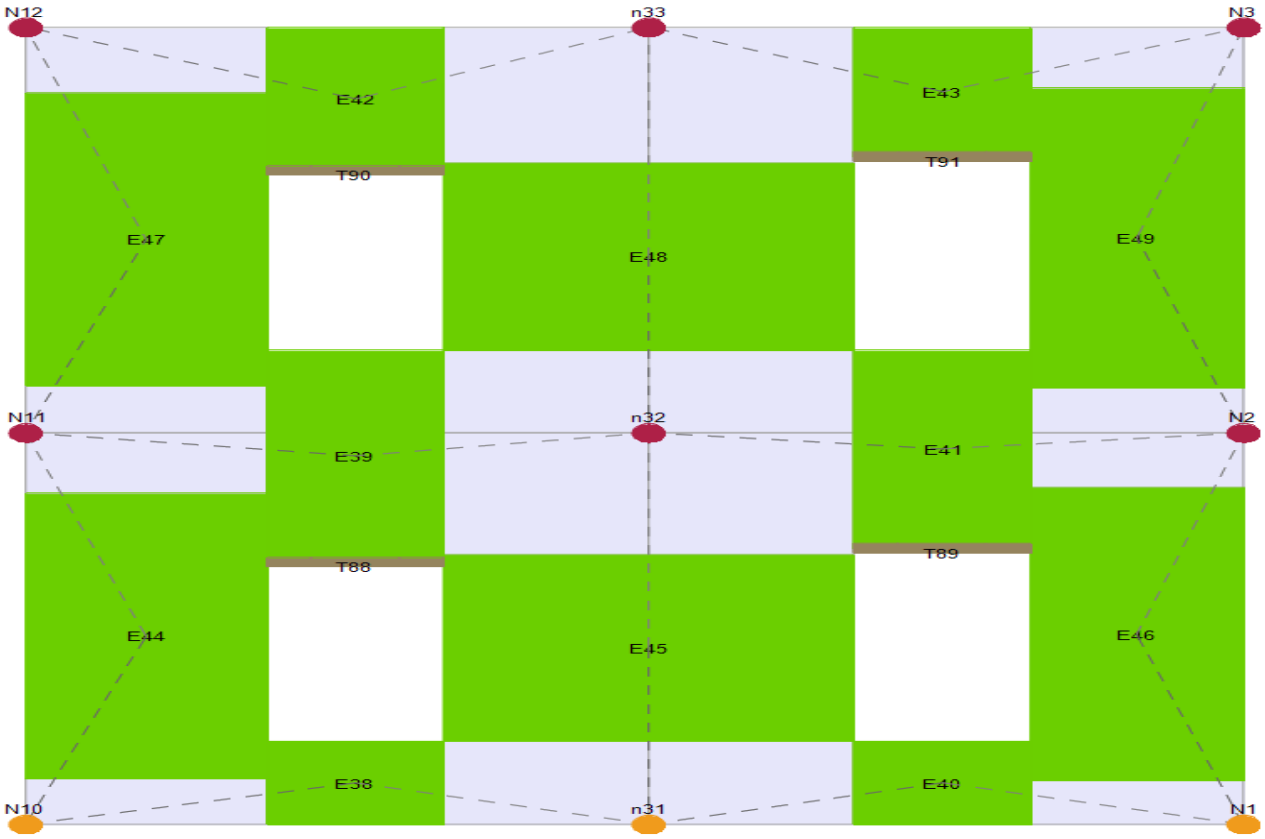
Εικόνα 3.4: Παρουσίαση ενισχυμένου φορέα μετά και το τελευταίο βήμα της pushover για την ανάλυση 15.



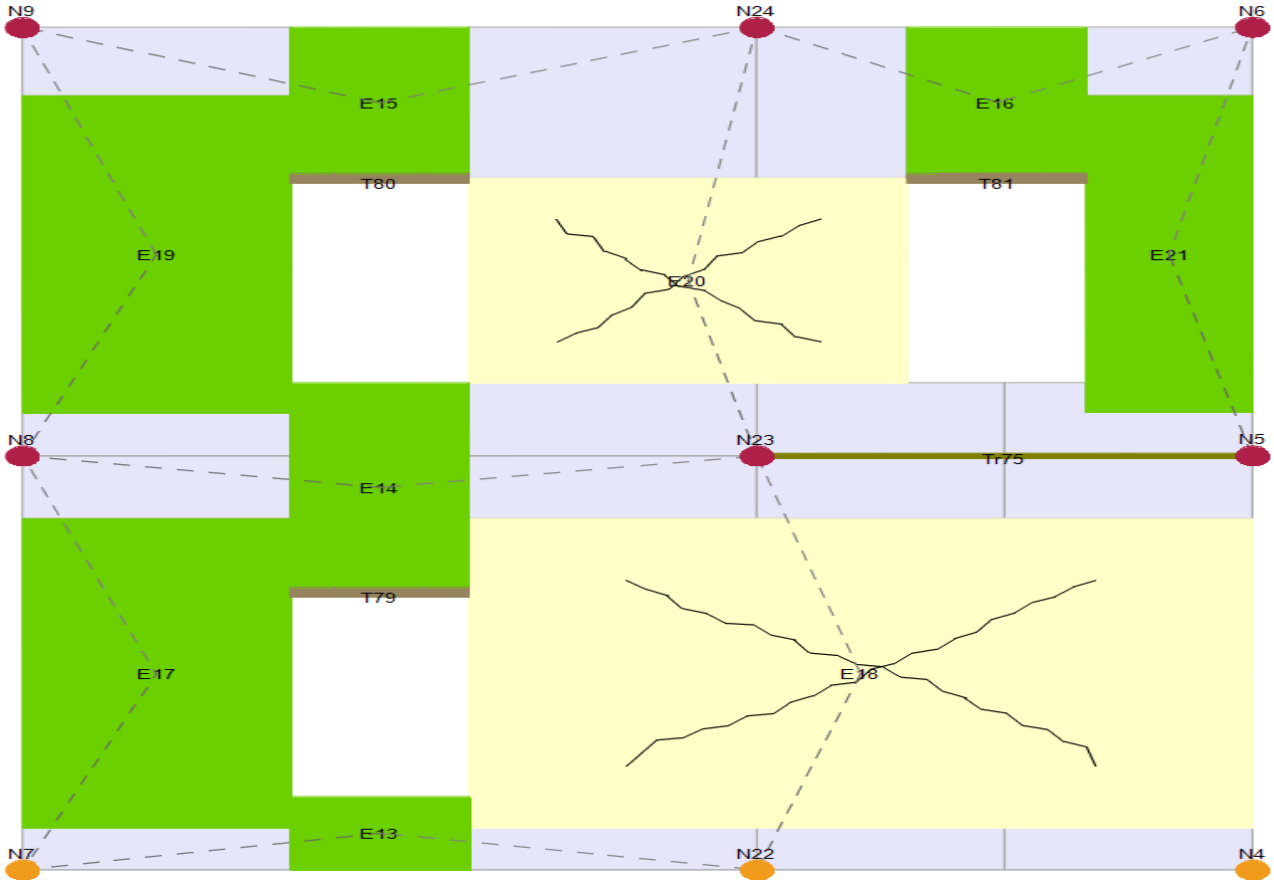
Εικόνα 3.5: Ανατολική πλευρά ενισχυμένου κτιρίου μετά την ανάλυση Pushover No.15.



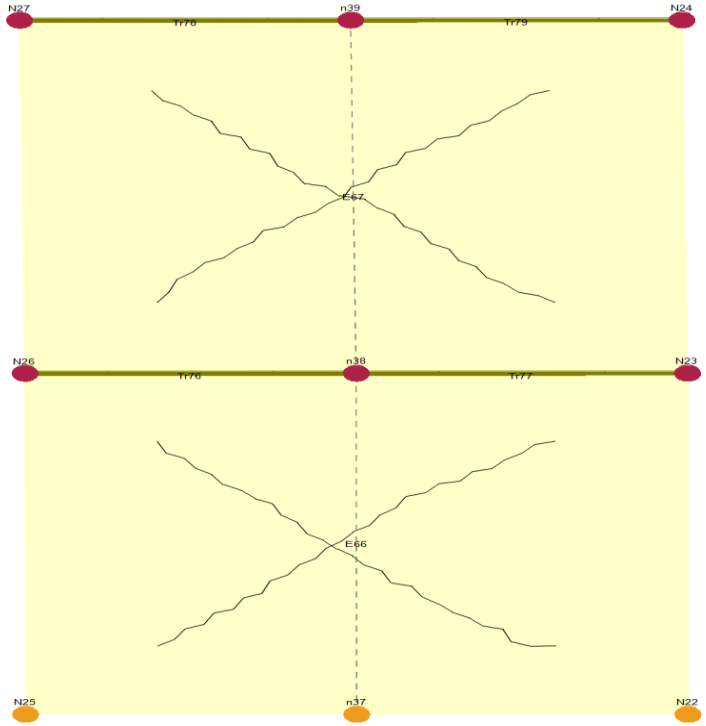
Εικόνα 3.6: Δυτική πλευρά ενισχυμένου κτιρίου μετά την ανάλυση Pushover No.15.



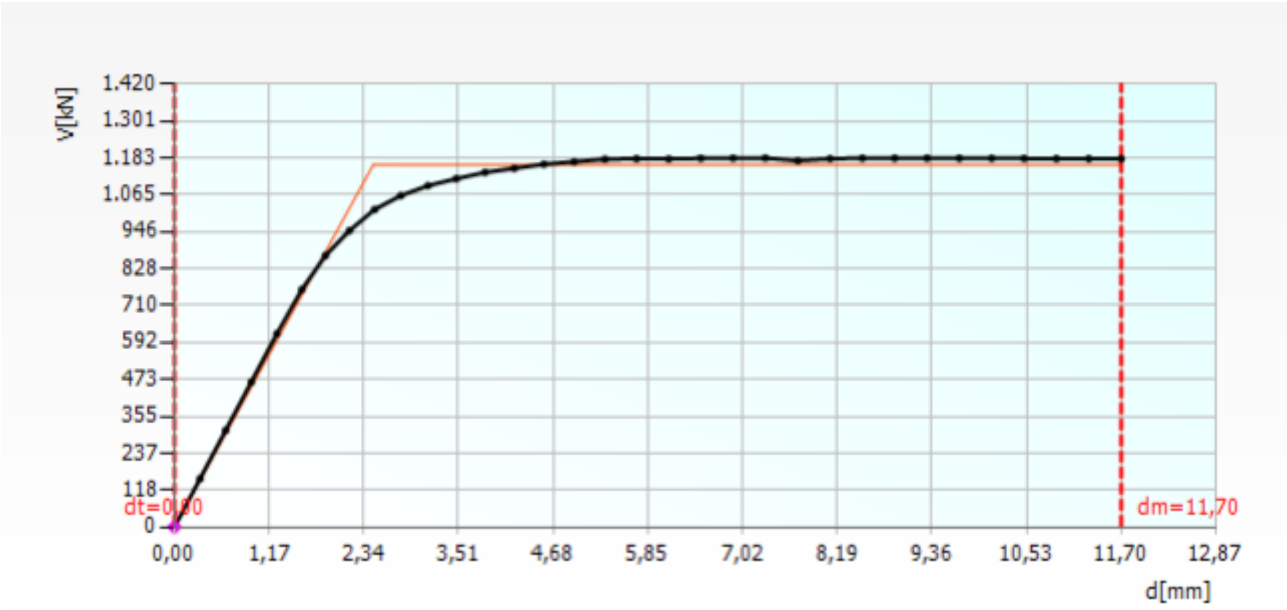
Εικόνα 3.7: Νότια πλευρά ενισχυμένου κτιρίου μετά την ανάλυση Pushover No.15.



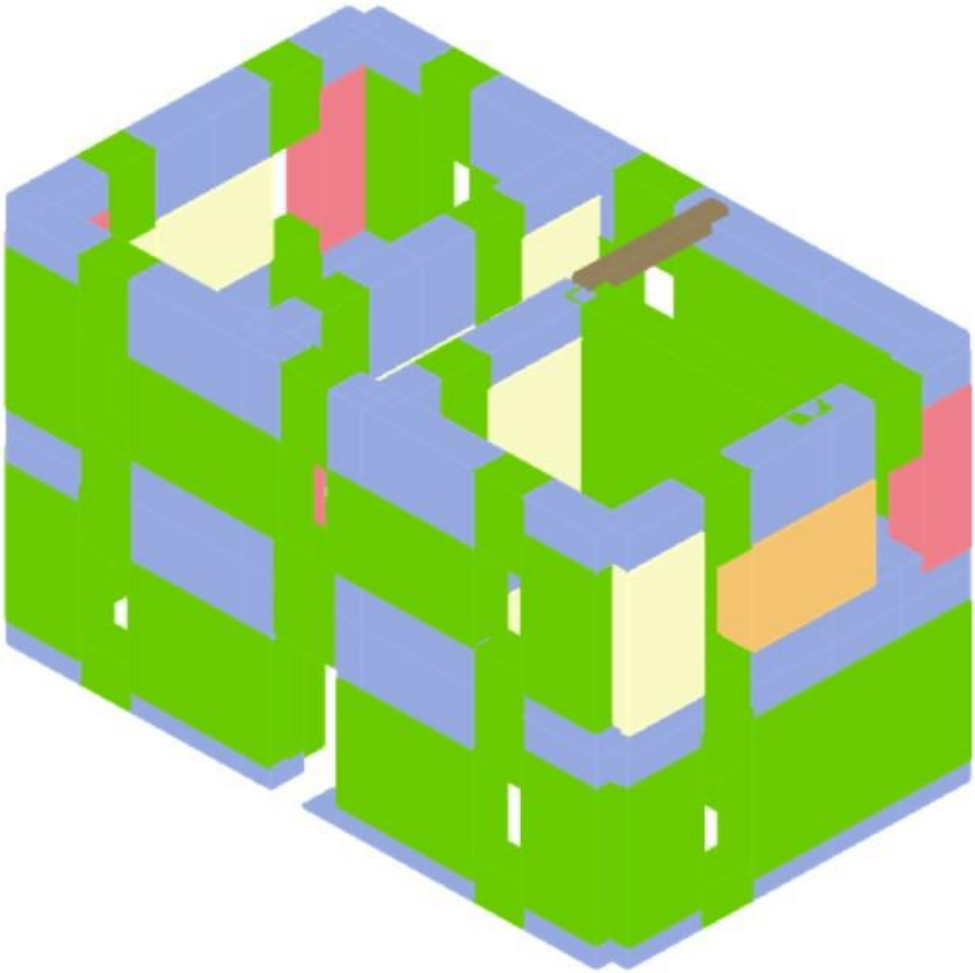
Εικόνα 3.8: Βόρεια πλευρά ενισχυμένου κτιρίου μετά την ανάλυση Pushover No.15.



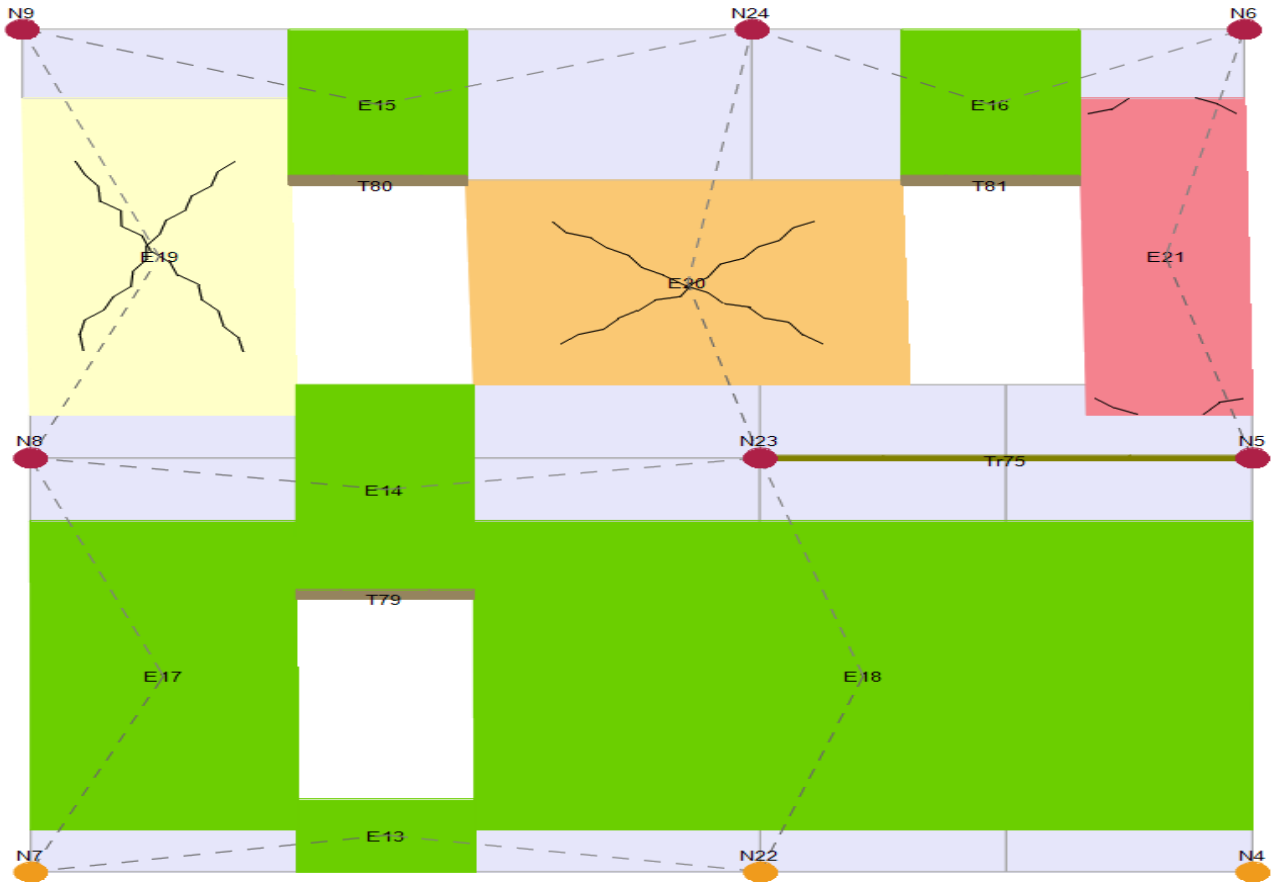
Εικόνα 3.9: Εσωτερική τοιχοποιία ενισχυμένου κτιρίου (κάθετα στην βορεινή πλευρά) μετά την ανάλυση Pushover No.15.



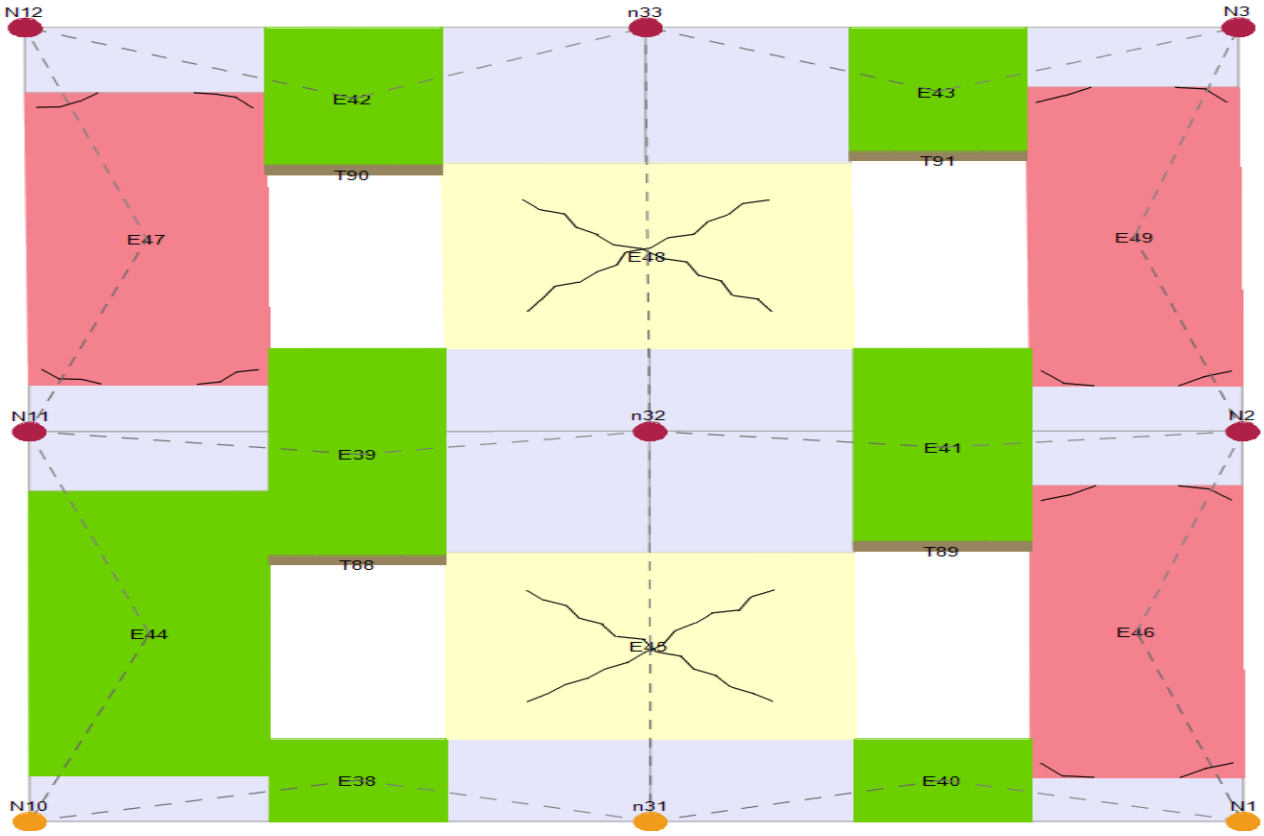
Εικόνα 3.10: Καμπύλη pushover για την ανάλυση No.23 (δυσμενέστερη κατά Y).



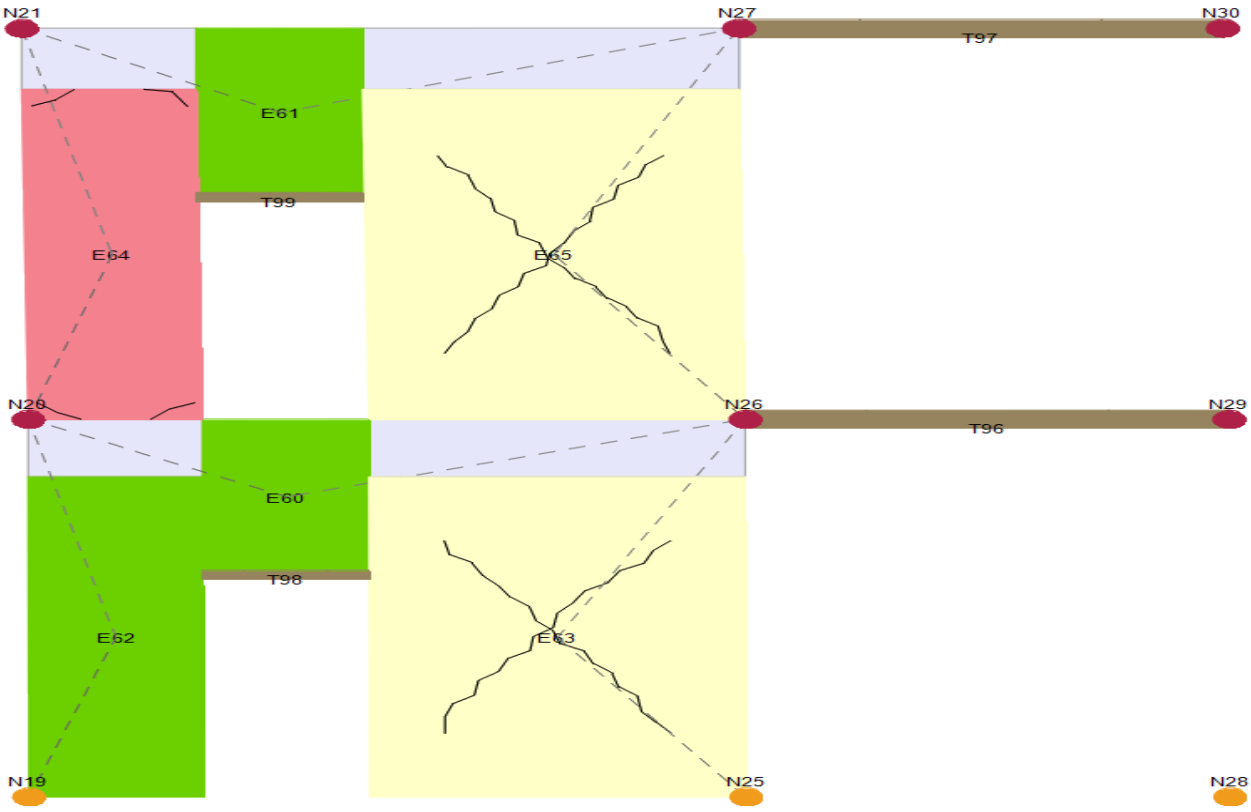
Εικόνα 3.11: Παρουσίαση ενισχυμένου φορέα μετά και το τελευταίο βήμα της pushover για την ανάλυση 23.



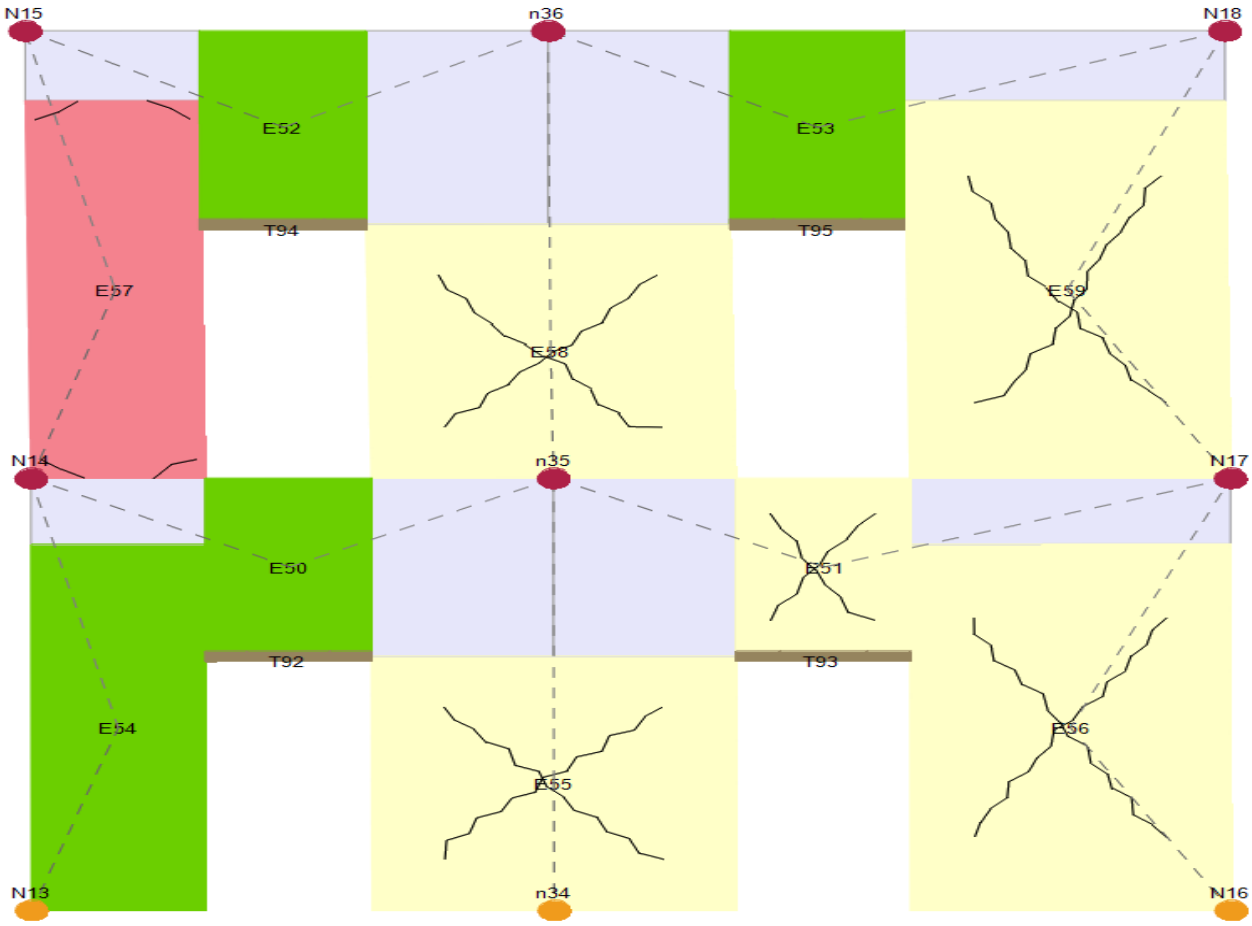
Εικόνα 3.12: Βόρεια πλευρά ενισχυμένου κτιρίου μετά την ανάλυση Pushover No.23.



Εικόνα 3.13: Νότια πλευρά ενισχυμένου κτιρίου μετά την ανάλυση Pushover No.23.



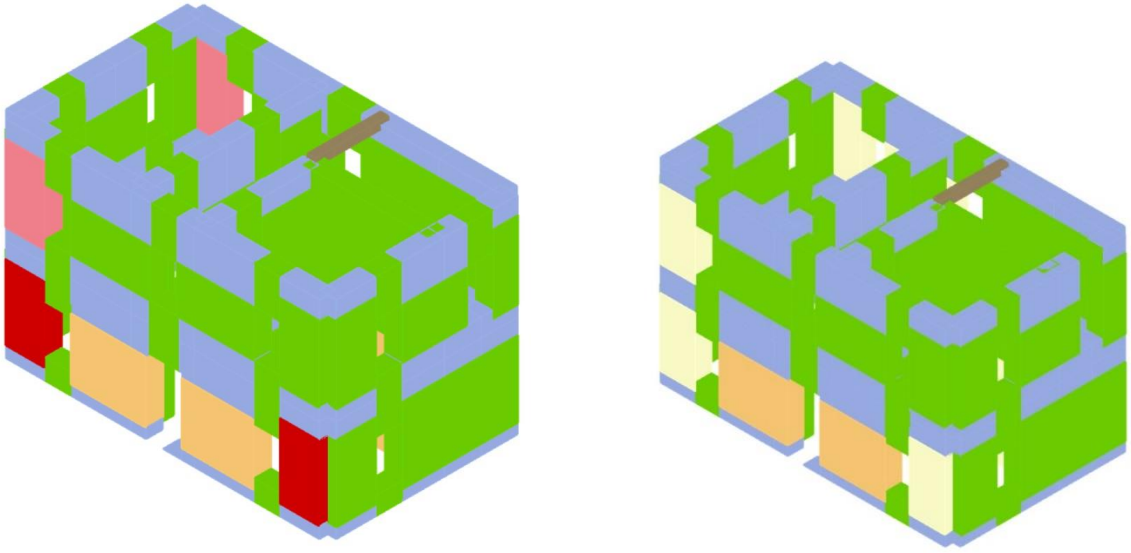
Εικόνα 3.14: Εσωτερική τοιχοποιία 1 ενισχυμένου κτιρίου μετά την ανάλυση Pushover No.23.



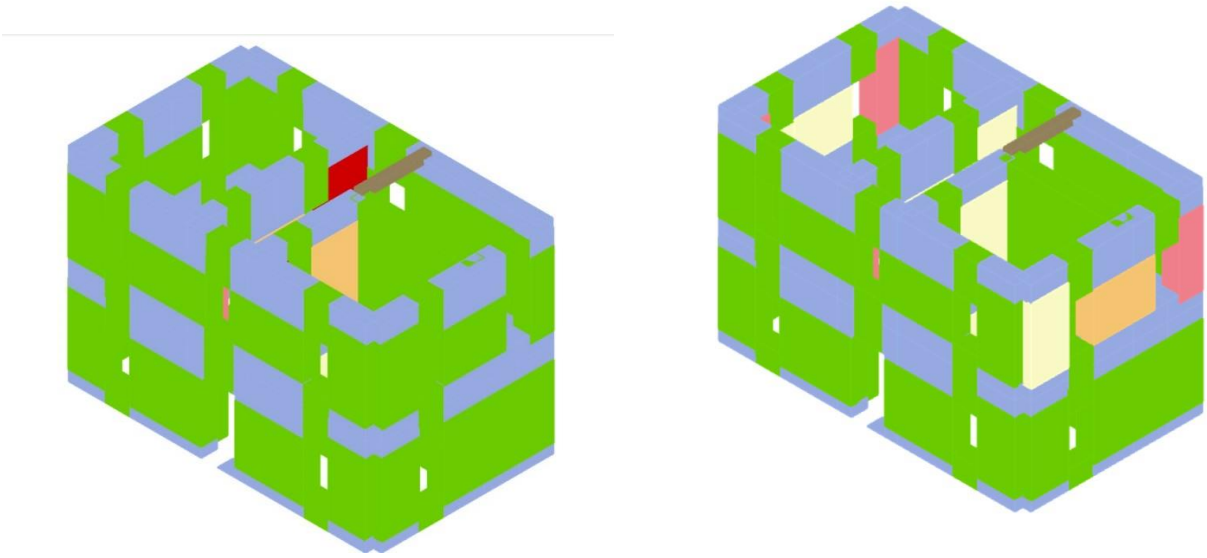
Εικόνα 3.15: Εσωτερική τοιχοποιία 2 ενισχυμένου κτιρίου μετά την ανάλυση Pushover No.23.

3.5 Συγκριτικά αποτελέσματα

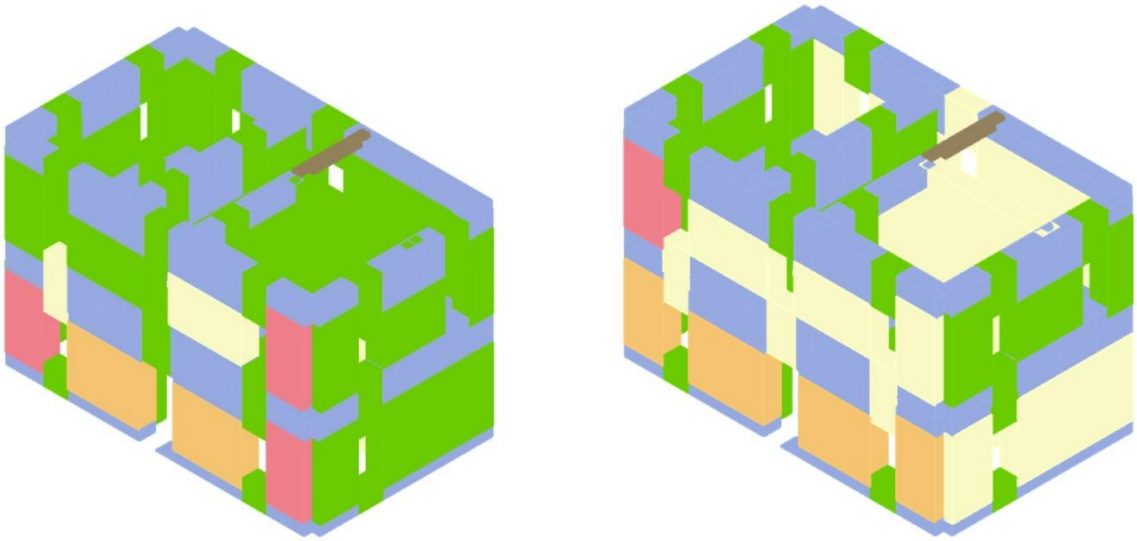
Παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα για τις καμπύλες pushover πριν και μετά τις ενισχύσεις. Για τις συγκρίσεις επιλέγονται οι δυσμενέστερες φορτίσεις για κάθε διεύθυνση και για τους δύο κόμβους ελέγχου του αρχικού φορέα. Στην συνέχεια, τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αντίστοιχες φορτίσεις για τον ενισχυμένο φορέα.



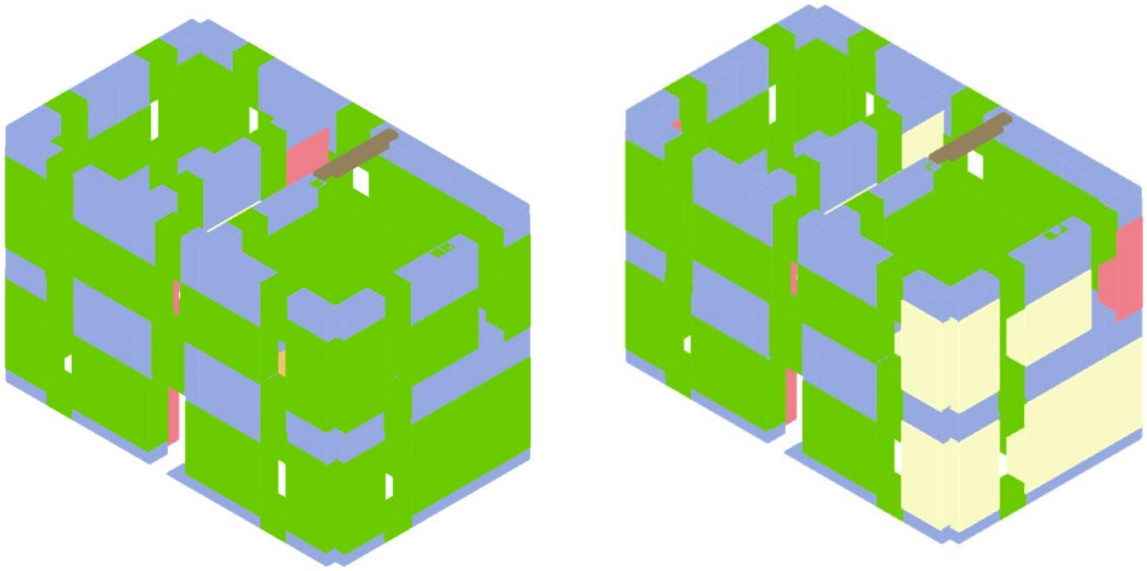
Εικόνα 3.16: Αρχικός φορέας (αριστερά) και ενισχυμένος φορέας (δεξιά) για φόρτιση No.10 (διεύθυνση X) και κόμβο ελέγχου 30 (για τον αρχικό φορέα).



Εικόνα 3.17: Αρχικός φορέας (αριστερά) και ενισχυμένος φορέας (δεξιά) για φόρτιση No.23 (διεύθυνση Y) και κόμβο ελέγχου 30 (για τον αρχικό φορέα).



Εικόνα 3.18: Αρχικός φορέας (αριστερά) και ενισχυμένος φορέας (δεξιά) για φόρτιση Νο.14 (διεύθυνση Χ) και κόμβο ελέγχου 15 (για τον αρχικό φορέα).



Εικόνα 3.19: Αρχικός φορέας (αριστερά) και ενισχυμένος φορέας (δεξιά) για φόρτιση Νο.5 (διεύθυνση Υ) και κόμβο ελέγχου 15 (για τον αρχικό φορέα).

Συμπεράσματα συγκρίσεων

Γενικά, παρατηρείται διαφοροποίηση στη συμπεριφορά του κτιρίου και επομένως και στα στοιχεία που παρουσιάζουν βλάβες ή αστοχίες. Επίσης, φαίνεται ότι για τις φορτίσεις στη διεύθυνση Χ, η συμπεριφορά του κτιρίου, συνολικά, βελτιώνεται σε μεγάλο βαθμό. Αντιθέτως, για τις φορτίσεις στη διεύθυνση Υ, η συμπεριφορά του κτιρίου παραμένει ουσιαστικά ίδια, με σχετικές διαφοροποιήσεις στα στοιχεία που παρουσιάζουν βλάβες ή/και αστοχίες.

3.6 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Συγκριτικά με τον αρχικό και τον ενισχυμένο φορέα παρατηρούμε ότι υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων. Πράγματι, η δυσκαμψία του κτιρίου αυξάνεται σημαντικά. Δεν παρατηρούνται οι αστοχίες του ισογείου της προ ενίσχυσης κατάστασης, αλλά αντιθέτως οι βλάβες-αστοχίες εντοπίζονται σε ένα πιο καθολικό χαρακτήρα στο σύνολο της κατασκευής. Ωστόσο, τα σενάρια (αναλύσεις) που δεν ικανοποιούνται στον ενισχυμένο φορέα είναι αρκετά και συγκρίσιμα με του αρχικού φορέα. Εδώ, αξίζει να αναφερθεί, ότι έγινε προσπάθεια περαιτέρω ενίσχυσης του φορέα με ελκυστήρες, όμως και πάλι η στοχεύομενη μετακίνηση ήταν μεγαλύτερη της προσφερόμενης (οι αναλύσεις pushover δεν ικανοποιούνταν). Η μόνη πρόταση επέμβασης που ικανοποιούσε όλα τα σενάρια ήταν η εφαρμογή οπλισμένου επιχρίσματος στο σύνολο των εσωτερικών τοιχοποιών του κτιρίου. Κάτι τέτοιο, όμως, δεν παρουσιάστηκε διότι υπερβαίνει τα κριτήρια των επεμβάσεων σε κτίρια που χαρακτηρίζονται ως μνημεία.

Στο σημείο αυτό, αξίζει να σχολιασθεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων του συνόλου των αναλύσεων για την προ και μετά ενίσχυσης κατάσταση. Το βασικό συμπέρασμα είναι ότι ενώ η συμπεριφορά του φορέα πράγματι διαφοροποιείται, δηλαδή παρουσιάζει την συμπεριφορά κιβωτίου λόγω του πιο δύσκαμπτου διαφράγματος, η τελική αποτίμηση της ενισχυμένης κατάστασης σε όρους μετακίνησης είναι περίπου ίδια με την αρχική. Δύο παράμετροι που χρειάζονται περαιτέρω διερεύνηση, αλλά δεν θα εξετασθούν στην παρούσα εργασία, είναι πρώτον κατά πόσον η μη γραμμική στατική ανάλυση προσομοιώνει ορθά τη συμπεριφορά του κτιρίου με εύκαμπτα διάφραγματα καθώς και η συνεπακόλουθη επιλογή κόμβου ελέγχου και δεύτερον, αν θα πρέπει το κτίριο να παραμείνει με τις επεμβάσεις που έχουν προταθεί ως τώρα και συνεπώς να μην επαρκεί για Στάθμη Επιτελεστικότητας (SD), αλλά να έχει ουσιαστική βελτίωση της συμπεριφοράς του ή να προταθούν επιπλεόν ενισχύσεις οι οποίες όμως θα αλλοιώνουν την αρχιτεκτονική του κτιρίου.